Witteveen + Bos

water
infrastructuur
milieu
bouw

Waterschap Veluwe

Katholieke Universiteit Nijmegen

RIZA deskundig in water

AquaTerra Water en Bodem B.V.

Onderzoek naar maatregelen voor herstel van de waterkwaliteit van het Uddelermeer

Witteveen + Bos

water
infrastructuur
milieu
bouw

Waterschap Veluwe

Onderzoek naar maatregelen voor herstel van de waterkwaliteit van het Uddelermeer

onze referentie	projectcode	status
UDL3-2/krub/008	UDL3-2	definitief
projectleider	**projectdirecteur**	**datum**
drs. M. Klinge	drs. M.P. Grimm	7 augustus 2003

autorisatie	naam	paraaf
goedgekeurd	drs. M. Klinge	

Witteveen+Bos
van Twickelostraat 2
postbus 233
7400 AE Deventer
telefoon 0570 69 79 11
telefax 0570 69 73 44

Het kwaliteit management systeem van Witteveen+Bos is gecertificeerd volgens NEN-EN-ISO 9001 : 1994

© Witteveen+Bos
Niets uit dit bestek/drukwerk mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande toestemming van Witteveen+Bos Raadgevende ingenieurs b.v., noch mag het zonder een dergelijke toestemming worden gebruikt voor enig ander werk dan waarvoor het is vervaardigd.

1946914

INHOUDSOPGAVE blz.

1. INLEIDING **1**
1.1. Aanleiding 1
1.2. Doel 1
1.3. Projectteam 1
1.4. Leeswijzer 1

2. IJZERADDITIE-EXPERIMENT **2**
2.1. Achtergrond 2
2.2. Proefopzet 2
2.3. Resultaten 4
2.3.1. Beschikbaarheid van fosfaat in de bodem 4
2.3.2. Fixatie van fosfaat en helderheid 4
2.3.3. Neveneffecten 9
1.1.4. Labexperiment: ijzer(II)chloride versus ijzer(III)chloride 10
1.4. Conclusies 11

3. PROEFBEVISSING **14**
3.1. Achtergrond 14
3.2. Werkwijze 14
3.3. Resultaten 14
3.3.1. Algemene waarnemingen 14
3.3.2. Zegenvisserij 14
3.4. Conclusies 17

4. ZAADBANKONDERZOEK **18**
4.1. Achtergrond 18
4.2. Proefopzet 18
4.3. Verwerking resultaten 18
4.4. Resultaten 19
4.5. Conclusies 20

5. DISCUSSIE, CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN **21**
5.1. Benodigde maatregelen op grond van het onderzoek 21
5.2. Aandachtspunten bij uitvoering van de maatregelen 21
5.3. Duurzaamheid van de combinatie van maatregelen 22
5.4. Gevolgen van maatregelen voor historische sliblaag 22
5.5. Slotconclusie en aanbevelingen 23

6. REFERENTIES **24**

laatste bladzijde **24**

bijlage aantal bladzijden
I Fysisch-chemische gegevens ijzeradditie-experiment 8

SAMENVATTING

In opdracht van Waterschap Veluwe heeft Witteveen+Bos een onderzoek uitgevoerd naar maatregelen die moeten leiden tot herstel van een duurzaam helder Uddelermeer. Hiervoor is Witteveen+Bos een samenwerking aangegaan met de Katholieke Universiteit Nijmegen (KUN), het Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA) en adviesbureau AquaTerra Water en Bodem B.V.

Het Uddelermeer kent een slechte waterkwaliteit, met name veroorzaakt door een hoge trofiegraad. In het Restauratieplan Uddelermeer (Grontmij, 1996) is, naast een aantal andere maatregelen, het verwijderen van een groot deel van de sliblaag als de belangrijkste maatregel voor het verbeteren van de waterkwaliteit in het Uddelermeer beoordeeld. Met deze maatregel kon de nalevering van fosfaat uit de bodem worden verminderd. Het verwijderen van de sliblaag werd echter niet wenselijk bevonden vanwege de historische waarde van het slib.

Een alternatief voor verwijdering van de sliblaag is fixatie van fosfaat in het sediment door toedienen van ijzerzouten. In enclosures in het Uddelermeer is de werkzaamheid van additie van ijzerchloride aan het sediment en de waterlaag onderzocht. Daarnaast is de bevisbaarheid van het Uddelermeer in het licht van een gewenste uitdunningsvisserij onderzocht. Ook is een onderzoek opgestart teneinde de omvang en kwaliteit van de zaadbank in de bodem van het Uddelermeer te bepalen.

ijzeradditie-experiment
Additie van 100 gram ijzer per m^2 (356 gram ijzer(II)chloride) in de bodem zorgt voor de beste fosfaatbinding en de meest langdurige helderheid. Alleen bij deze ijzerdosis blijft de Fe/PO_4-ratio boven de 1:1 in de waterlaag en (ver) boven de 10:1 in het bodemvocht. Gezien de geïsoleerde ligging van het Uddelermeer en de lage gemeten sulfaatreductie kan met redelijk grote zekerheid gesteld worden dat de voorgestelde beijzering van de bodem een aantal jaren het gewenste effect zal hebben. Dit hangt vooral samen met het feit dat er nauwelijks externe aanvoer van fosfaat of sulfaat te verwachten is, iets wat bij veel andere beijzeringsprojecten wel het geval was.

Er zijn echter ook een paar aandachtspunten en onzekerheden gesignaleerd:
- de pH in de waterlaag daalt bij de hoogste dosering sterk. Dit heeft ongunstige gevolgen voor bijvoorbeeld vissen en zoöplankton. Doordat de bodem blijft bufferen, is het vrijwel zeker dat deze pH-daling maar tijdelijk is. Ook in andere zwakgebufferde wateren komt een dergelijke, tijdelijke verzuring voor, bijvoorbeeld na het droogvallen in de zomer. Bovendien kan deze verzuring deels worden voorkomen, door verhoging van de pH van de ijzerchloride-oplossing met natriumhydroxide tot pH 5;
- het chlorofyl-a gehalte en totaal-P gehalte in algen blijft bij alle behandelingen vrij hoog. Voor het krijgen van helder water heeft het voedselweb (met name grazen van zoöplankton op algen) daarom een essentiële rol. In dat licht is herstel van de pH naar waarden die bij een zwakgebufferd water horen (licht zuur) belangrijk;
- In de enclosures (behalve bij de hoogste dosering ijzerchloride) is, in vergelijking met metingen buiten de enclosures, een verhoging van de orthofosfaatconcentratie waargenomen, waarschijnlijk als gevolg van zuurstofdepletie. Ondanks de sterkere fosfaatmobilisatie binnen de cilinders was additie van ijzer nog steeds effectief in het binden van fosfaat in de bodem. Het waargenomen 'enclosure-effect' (bekend van veel andere experimenten) treedt bij een behandeling van het gehele Uddelermeer niet op door de grotere waterbeweging en menging, en door geringere opwarming. Dit betekent dat de ratio tussen beschikbaar ijzer en gemobiliseerd fosfaat nog veel hoger zal liggen, waardoor de behandeling nog gunstiger zal uitvallen;
- ijzeradditie leidt tot extra mobilisatie van ammonium in de bodem. Hoge ammoniumconcentraties in water en bodem kunnen een belangrijke belemmering vormen voor de terugkeer van vegetaties van zwakgebufferde wateren. Deels is de verhoging van de ammoniumconcentratie een cilindereffect.

proefbevissing
De omvang en samenstelling van de huidige visstand is dusdanig dat deze een herstel van het Uddelermeer naar een helder systeem effectief in de weg staat. In het Uddelermeer is een dikke en zeer slappe sliblaag aanwezig die een uitdunningsvisserij kan bemoeilijken doordat de netten kunnen vastlopen in de sliblaag en/of doordat vissen door het slib onder het net door kunnen zwemmen. Het realiseren van een vergaande uitdunning van de visstand moet daarom plaatsvinden met een combinatie van vangtuigen. Naast zegen en elektrovisapparaat zal er ook met staand want en langdurig met fuiken gevist moeten worden. Tevens zullen controlemomenten moeten worden ingebouwd waarmee kan worden vastgesteld of het gewenste uitdunningsniveau bereikt is. Met deze combinatie van middelen is een uitdunningsvisserij voor het Uddelermeer tot het gewenste niveau zeker mogelijk.

zaadbankonderzoek
Onzeker was of, als het water weer helder wordt, waterplanten vanzelf weer terug kunnen keren. Om deze vraag te beantwoorden is in het voorjaar het sediment van het Uddelermeer bemonsterd om te onderzoek of onder gunstige omstandigheden waterplanten kunnen kiemen.

Het lichtklimaat van het Uddelermeer is onvoldoende voor de ontwikkeling van ondergedoken waterplanten. Bovendien is de biomassa van zaden in de toplaag van de waterbodem zeer laag. Door de lage zaadbank biomassa leidt een verbetering van alleen het lichtklimaat niet tot een snelle ontwikkeling van waterplanten op korte termijn (1 jaar).

Omdat waterplanten nodig zijn om de waterhelderheid te stabiliseren en te houden, kan worden overwogen worden om diasporen (zaden, sporen, tubers, etc.) van waterplanten te introduceren in combinatie met maatregelen die het lichtklimaat verbeteren. Daarbij kan worden gedacht aan soorten die in het verleden zijn aangetroffen in het Uddelermeer, namelijk soorten karakteristiek voor (zwak tot) matig gebufferd water.

droogzetten
Een in potentie zeer goede oplossing om de praktische uitvoerbaarheid sterk te verbeteren is het uitvoeren van de maatregelen in combinatie met het geheel of gedeeltelijk droogzetten van het Uddelermeer. Deze maatregel is naar voren gekomen naar aanleiding van recente positieve resultaten van deze techniek in een meer in Finland, en lijkt ook voor het Uddelermeer een kansrijke maatregel te zijn.

conclusie
Een combinatie van vergaande uitdunning van de visstand, beijzering van de bodem en enten van waterplanten wordt als een kansrijk pakket van maatregelen gezien voor herstel van een duurzaam helder Uddelermeer. De praktische uitvoerbaarheid, resultaten en duurzaamheid van deze maatregelen zullen zeker verbeteren indien daarnaast ook voor het tijdelijk geheel of gedeeltelijk droogleggen van het Uddelermeer wordt gekozen. Ook zou dit het enten van waterplanten eventueel overbodig kunnen maken. Wel vraagt het droogzetten om nader onderzoek, in de vorm van een geohydrologisch onderzoek naar de mogelijkheden en effecten en een laboratorium proef naar de eigenschappen van het sediment tijdens en na droogvallen plus beijzeren.

1. INLEIDING

1.1. Aanleiding

Het Uddelermeer kent al lange tijd een slechte waterkwaliteit. De problemen zijn gelegen in te hoge gehaltes aan voedingsstoffen (N- en P-verbindingen) in het water. Door deze hoge trofiegraad wordt het water gekenmerkt door troebel water veroorzaakt door hoge dichtheden aan zwevende algen, afwezigheid van ondergedoken waterplanten en een hoge visbiomassa gedomineerd door brasem.

In 2000 is in opdracht van Waterschap Veluwe door Witteveen+Bos een verkenning uitgevoerd naar de mogelijkheden van toepassing van actief biologisch beheer in het Uddelermeer (Witteveen+Bos, 2000). Tot deze verkenning werd besloten nadat duidelijk was geworden dat het verwijderen van een groot deel van de sliblaag, hetgeen als de belangrijkste maatregel voor het verbeteren van de waterkwaliteit in het Uddelermeer was beoordeeld (Grontmij, 1996), niet wenselijk werd bevonden vanwege de historische waarde van het slib.

Uit de verkenning is destijds naar voren gekomen dat er in het Uddelermeer in principe goede mogelijkheden zijn om met behulp van actief biologisch beheer een duurzame verbetering van de waterkwaliteit te realiseren. Echter, in de verkenning zijn ook enkele belangrijke onzekerheden gesignaleerd, welke eerst onderzocht zouden moeten worden. Dit rapport behandelt het onderzoek naar deze onzekerheden. Het gaat hierbij om de volgende onderzoeken:

- enclosure-onderzoek naar de mogelijkheden van fosfaatfixatie door additie van ijzerchloride;
- onderzoek naar de bevisbaarheid van het Uddelermeer in het licht van de gewenste uitdunningsvisserij;
- onderzoek naar de omvang en kwaliteit van de zaadbank in de bodem van het Uddelermeer.

1.2. Doel

Het doel van de onderzoeken is het gewenste maatregelenpakket voor een duurzaam helder Uddelermeer en de verwachte werkzaamheid in het Uddelermeer nader te bepalen. Dit levert belangrijke informatie ten behoeve van de besluitvorming over daadwerkelijke uitvoering van de maatregelen in het gehele Uddelermeer.

1.3. Projectteam

Het onderzoek is uitgevoerd door adviesbureau Witteveen+Bos, dat voor dit project een samenwerking is aangegaan met de Katholieke Universiteit Nijmegen (KUN), het Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA) en adviesbureau AquaTerra Water en Bodem B.V. In onderstaande tabel is het projectteam weergegeven.

Tabel 1.1. Projectteam

Naam	Instituut	Rol in project
Namens de opdrachtgever/begeleiding		
De heer H.J. Rem	Waterschap Veluwe	Projectleiding en begeleiding
De heer drs. P.W.M. van Beers	Waterschap Veluwe	Begeleiding
Namens de opdrachtnemer/uitvoering		
De heer drs. M. Klinge	Witteveen+Bos	Projectleiding en rapportage
De heer drs. L.G. Turlings	Witteveen+Bos	Rapportage
De heer dr. L.P.M. Lamers	KUN	Uitvoering en rapportage experiment ijzeradditie
De heer drs. J.J.M. Geurts	KUN	Uitvoering en rapportage experiment ijzeradditie
De heer dr. M.S. van den Berg	RIZA	Uitvoering en rapportage experiment zaadbank
De heer ing. J. Kampen	AquaTerra	Uitvoering en rapportage proefbevissing

1.4. Leeswijzer

De achtergronden, resultaten en conclusies van het ijzeradditie-experiment, de proefbevissing en het onderzoek naar de zaadbank zijn weergegeven in respectievelijk hoofdstuk 2, 3 en 4. In hoofdstuk 5 worden aan de hand van de resultaten van de verschillende deelonderzoeken maatregelen voorgesteld die moeten leiden tot een verbetering van de waterkwaliteit van het Uddelermeer. Ook worden hier aanbevelingen voor vervolgonderzoek gedaan.

2. IJZERADDITIE-EXPERIMENT

2.1. Achtergrond

In vrijwel alle Nederlandse oppervlaktewateren wordt de primaire productie ge(co-)limiteerd door fosfaat. Verhoging van de fosfaatconcentratie leidt onherroepelijk tot een sterke toename van de algenconcentratie. Wanneer de productie te hoog wordt door continue hoge aanvoer van fosfaat uit de bodem of uit externe bronnen, schiet het systeem door naar hypertroof, troebel water.

De nalevering van fosfaat uit venige bodems is, met name in eutrofe systemen, hoog. Meestal wordt bij herstelmaatregelen om deze reden overgegaan tot het baggeren (opschonen) van waterbodems. Wanneer dit niet mogelijk of wenselijk is, zoals in het geval van het Uddelermeer, is de enige mogelijkheid het immobiliseren van het fosfaat dat vrijkomt door mineralisatie in de bodem.

De kringlopen van ijzer en fosfaat zijn in natte systemen zeer nauw gekoppeld. In plassen en andere wateren wordt het vastleggen en vrijkomen van fosfaat voor het grootste deel gestuurd door de binding van dit nutriënt in de vorm van allerlei ijzerfosfaatcomplexen, zoals ijzer(hydr)oxide-fosfaat. Van nature worden veel natte systemen beschermd tegen fosfaateutrofiëring door voldoende aanvoer van ijzer via anaëroob grondwater. Door verdroging op landschapsschaal is deze ijzerrijke kwel echter op veel plaatsen weggevallen. Gebufferd oppervlaktewater bevat nauwelijks ijzer, doordat ijzer in contact met zuurstof in het water neerslaat.

Omdat een belangrijk deel van het in de bodem aanwezige fosfaat van nature al gebonden is aan ijzer, is ijzeradditie een heel natuurlijke manier om de bindingscapaciteit voor fosfaat in de bodem te verhogen. In het verleden is verschillende malen experimenteel aangetoond dat het toedienen van ijzerzouten leidt tot een spectaculaire verbetering van de waterkwaliteit (Boers, 1991; Smolders *et al.*, 1995). Na ijzeradditie bleven fosfaatconcentraties laag, bleef algenbloei achterwege en werd het water helder. In de niet-beijzerde controles werd het water groen en troebel doordat de mobilisatie van fosfaat uit de bodem hoog bleef. Een probleem bij deze experimenten was echter dat de dosis niet voldoende hoog was en de consumptie van ijzer door fosfaat en sulfide erg hoog was, waardoor het effect slechts enkele maanden standhield. Ook lagen deze systemen hydrologisch gezien niet geïsoleerd, met als gevolg dat er sneller verversing optrad met (fosfaat- of sulfaatrijk) water.

Het Uddelermeer ligt hydrologisch gezien wel geïsoleerd. Het meer maakt deel uit van het stroomgebied van de Hierdensche beek en ligt in het bovenstroomse gedeelte van dit stroomgebied. Het intrekgebied voor oppervlakkige afstroming beslaat circa 14 hectare, waarvan 10,5 hectare bestaat uit onbemeste percelen (Grontmij, 1996). De verblijftijd is lang en bedraagt naar schatting circa 1,1 jaar (Grontmij, 1996). Al deze aspecten scheppen gunstige condities voor het succesvol reduceren van de nalevering van fosfaat door middel van additie van ijzerzouten.

Om na te gaan welke methode van ijzeradditie geschikt is en welke dosis ijzer nodig is om in het Uddelermeer met behoud van de sliblaag te komen tot helder water, is een uitgebreid experiment opgezet. In de volgende paragraaf wordt de opzet van dit experiment besproken.

2.2. Proefopzet

Voor het experiment zijn cilinders van polycarbonaat gebruikt met een diameter van 1 meter en een hoogte van 1,5 meter (Smolders *et al.*, 1995; Lamers, 2002). De cilinders zijn enkele decimeters in het sediment gedrukt, waardoor het oppervlaktewater geïsoleerd wordt van het buitenwater. Door het gebruik van cilinders is daarnaast voorkomen dat omwoeling door vissen kan plaatsvinden binnen de cilinders en ook de windwerking neemt af. Het hele experiment is niet-destructief en heeft dan ook geen negatieve gevolgen voor het systeem inclusief de waterbodem.

Uit de cilinders zijn eenmaal per maand oppervlaktewater- en bodemvochtmonsters genomen (van maart 2002 t/m februari 2003).

Het bemonsteren van het bodemvocht geschiedt (noodzakelijkerwijs) anaëroob, met behulp van keramische vacuümcups. Aan de monsters zijn alle belangrijke procesvariabelen bepaald, waaronder fosfaat-, ijzer-, sulfide- en chlorofylconcentraties, pH, alkaliniteit en turbiditeit. Bovendien is eenmalig een sequentiële fosfaatextractie (Psenner et al. 1988) uitgevoerd aan (anaërobe) waterbodemmonsters op zes locaties, om de binding van fosfaat aan verschillende fracties te bepalen.

De beste methode voor het toedienen van ijzer is het toedienen aan het sediment. In het experiment is ook ijzeradditie aan het oppervlaktewater getest, aangezien dit op praktijkschaal een aanzienlijk eenvoudigere methode is.

Vanaf mei 2002 zijn de volgende behandelingen toegepast binnen de cilinders, gebaseerd op de resultaten van Boers (1991) en Smolders *et al.* (1995):

- anaërobe injectie van 100 g m^{-2} ijzer(II)chloride in de bovenste 10 cm van het sediment;
- anaërobe injectie van 50 g m^{-2} ijzer(II)chloride in de bovenste 10 cm van het sediment;
- toediening van 10 g m^{-2} ijzer(III)chloride aan het oppervlaktewater;
- toediening van 5 g m^{-2} ijzer(III)chloride aan het oppervlaktewater;
- geen ijzeradditie (controle binnen cilinders).

Alle behandelingen zijn in drievoud uitgevoerd (in totaal 15 cilinders + 3 locaties buiten de cilinders) en eenmaal per maand bemonsterd.

Tweewaardig ijzer en driewaardig ijzer zijn de meest natuurlijke ijzervorm in respectievelijk bodem en water. De doseringen zijn zo gekozen dat ze verzuring van bodem en waterlaag zoveel mogelijk tegengaan. Echter, op de vraag welke vorm van ijzerchloride die wordt toegediend aan de bodem de minste verzuring veroorzaakt in de waterlaag, wordt in de literatuur verdeeld gereageerd (tabel 2.1.). Om dit te onderzoeken is een kleinschalig labexperiment opgezet, waarbij met bodemmateriaal en water uit het Uddelermeer de veldsituatie nagebootst is. Negen glazen potten met een inhoud van 900 ml zijn voor 60% gevuld met bodem en voor 40% met water. Vervolgens zijn de bodems geïnjecteerd met natriumchloride (blanco), ijzer(II)chloride en ijzer(III)chloride (in drievoud). De toegevoegde hoeveelheid ijzer komt overeen met de hoogste dosis van het veldexperiment (100 g per m^2). De potten zijn in het donker bewaard bij 19 °C. Op deze manier kon vrij snel gemeten worden of de waterlaag al dan niet verzuurde na de verschillende behandelingen.

Tabel 2.1. Vergelijking tussen de voordelen van $FeCl_2$- en $FeCl_3$-injectie in de bodem (o.a. Smolders *et al.*, 2001)

Voordelen	$FeCl_2$ in de bodem	$FeCl_3$ in de bodem
Minder verzuring (minder zuurverdringing)	X	
Minder verzuring (geen oxidatie)		X
Minder vrijkomen van aluminium en ammonium	X	
Minder ijzerchloride nodig	X	
Natuurlijker in anaërobe bodems	X	
Geringere uitwisseling naar de waterlaag		X
Hogere redoxpotentiaal in de bodem		X
Efficiëntere binding van fosfaat		X (?)
Reductie levert buffercapaciteit op		X

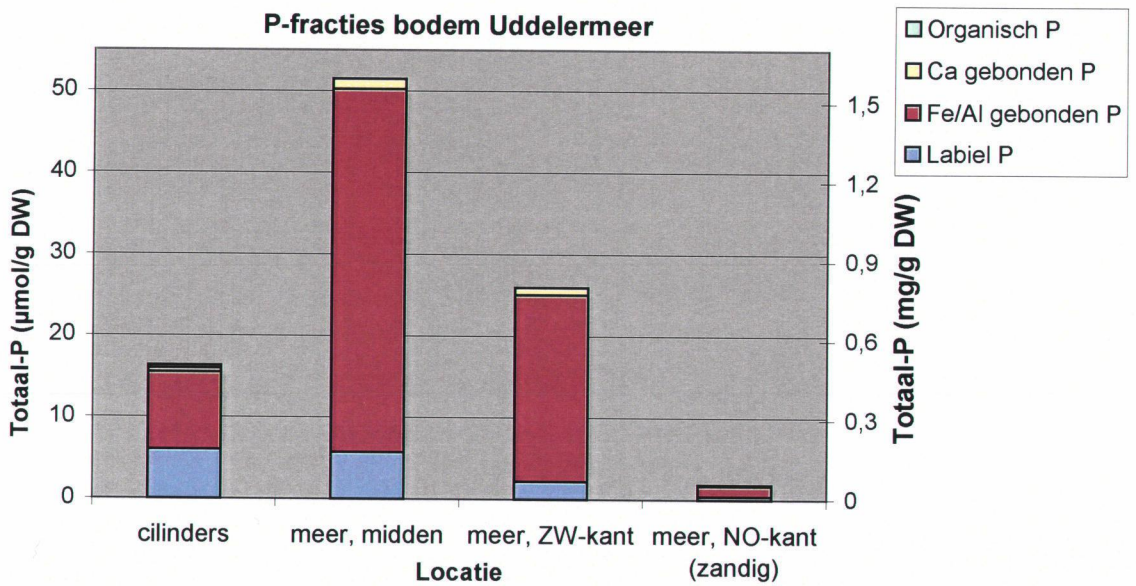
2.3. Resultaten

2.3.1. Beschikbaarheid van fosfaat in de bodem

Om te testen of de bodem inderdaad als fosfaatbron voor het meer kan werken, is de beschikbaarheid van fosfaat in de bodem bepaald. Hiervoor is zowel bodemmateriaal van binnen als van buiten de cilinders gebruikt.

Totaal-P na destructie van de bodem is vrij hoog, met uitzondering van het zandige stuk aan de noordoostkant van het meer. In het midden van het meer, waar de sliblaag het dikst is, loopt het totaal-P gehalte op tot 50 µmol/g dw (1,6 mg/g dw), wat ook gemeten wordt in landbouwgronden die onder water zijn gezet (pers. comm. A.J.P. Smolders). Bijna alle waterplanten en helofyten komen voor bij totaal-P gehaltes lager dan 40 µmol/g dw (1,3 mg/g dw; De Lyon & Roelofs, 1986). Belangrijker nog is het feit dat bijna al het P makkelijk uitwisselbaar is, omdat het direct beschikbaar is (labiele fractie, d.w.z. in het bodemvocht opgelost of zeer licht gebonden fosfaat) of aan ijzer (en aluminium) gebonden is (afbeelding 2.1.). De bodem kan daarom gemakkelijk als een fosfaatbron werken. De calcium-gebonden fractie (gebonden aan carbonaat en/of als apatiet) in het Uddelermeersediment bleek relatief laag te zijn.

Afbeelding 2.1. Verschillende P-fracties na extractie van bodemmateriaal



2.3.2. Fixatie van fosfaat en helderheid

In deze paragraaf is beschreven in welke mate bij de verschillende behandelingen sprake is van fixatie van fosfaat, en wat het effect hiervan is op de helderheid van het water in de cilinders.

fosfaatconcentratie in bodemvocht en waterlaag

De concentratie van orthofosfaat in het bodemvocht blijkt na ijzeradditie in de bodem significant te dalen. Bij injectie van 100 gram ijzer per m^2 (356 gram ijzer(II)chloride per m^2) in de bodem is dit effect het grootst (afbeelding 2.2.). Bovendien houdt alleen bij deze dosis het effect langer dan vier maanden aan (vergeleken met de controlecilinders), waardoor de nalevering van fosfaat naar de waterlaag ook daadwerkelijk wordt verminderd, zoals blijkt uit afbeelding 2.3.

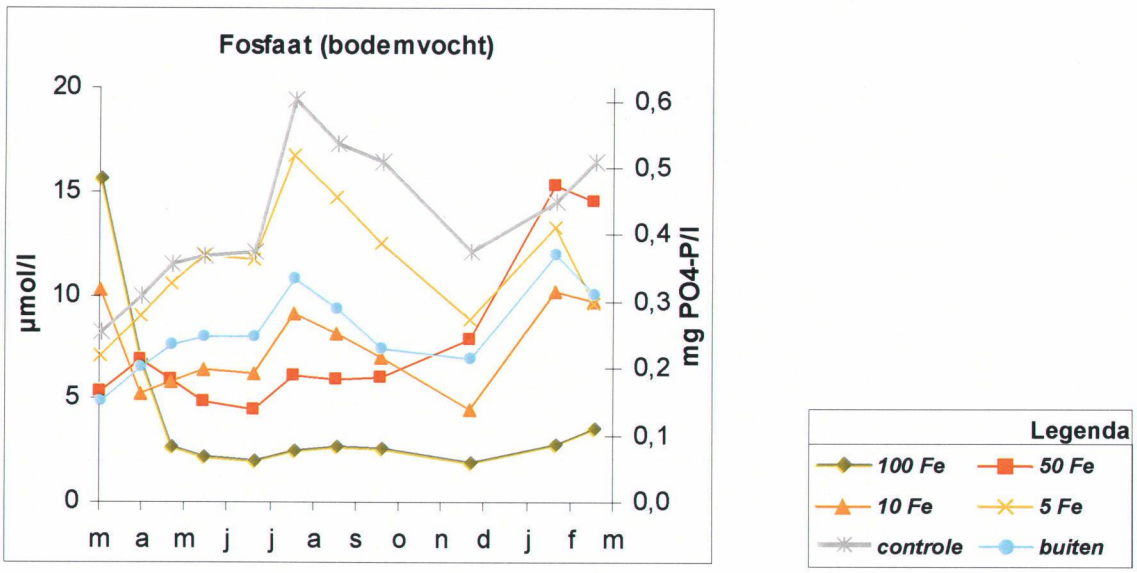
Uit afbeelding 2.3. blijkt verder dat fosfaatconcentraties in de waterlaag buiten de cilinders laag zijn. Dit wijst op een hoge turnover door algen: fosfaat dat beschikbaar komt wordt direct opgenomen, zodat weinig beschikbaar fosfaat gemeten wordt.

Ook blijkt dat het fosfaatgehalte van zowel bodemvocht als waterlaag in de controlecilinders hoger is dan het fosfaatgehalte buiten de cilinders. Er is dus sprake van een cilindereffect.

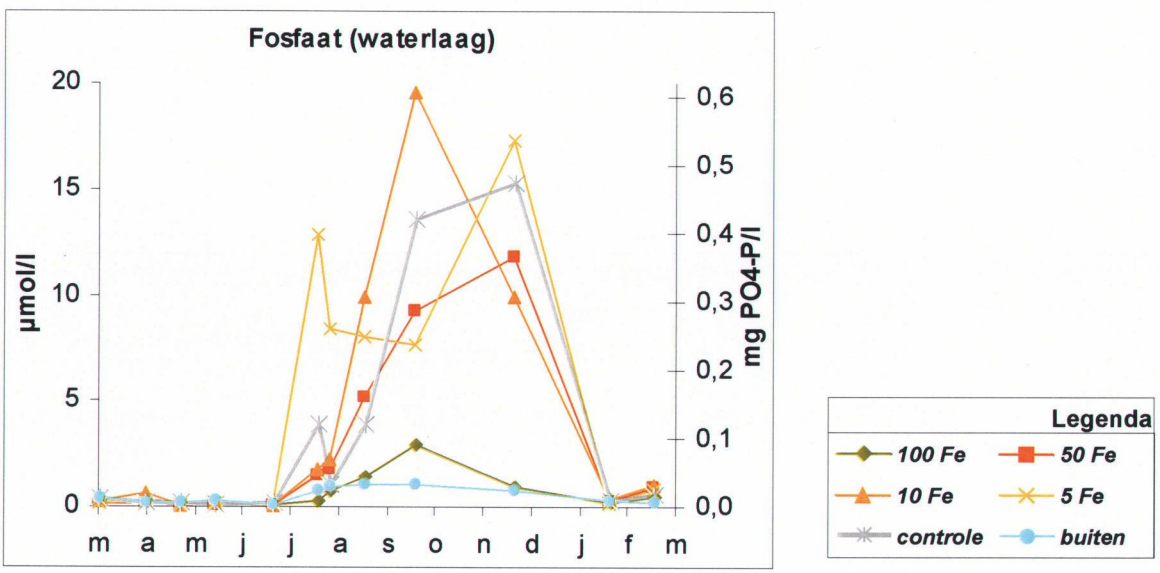
De resultaten van de verschillende behandelingen kunnen daardoor beter worden vergeleken met de controlecilinders dan met de metingen buiten de cilinders.

Waarschijnlijk wordt de stijging van het (ortho)fosfaatgehalte in de cilinders veroorzaakt doordat in de cilinders door afbraak van organisch materiaal het zuurstofgehalte in de waterlaag daalt, waarbij binnen de cilinders minder verversing en menging optreedt dan buiten de cilinders. Onder de sterker gereduceerde omstandigheden die hierdoor ontstaan zijn de aanwezige ijzerfosfaatverbindingen minder stabiel en komen zowel ijzer als fosfaat gemakkelijker in oplossing. Ondanks dit enclosure-effect is het toegevoegde ijzer nog steeds in staat om fosfaat sterk te binden. Buiten de cilinders zal de binding van fosfaat aan ijzer, door minder gereduceerde omstandigheden, nog veel gunstiger verlopen.

Afbeelding 2.2. Fosfaatconcentraties in het bodemvocht (in µmol/l en mg PO_4/l). Behandelingen vonden plaats in april, na het tweede meetpunt



Afbeelding 2.3. Fosfaatconcentraties in de waterlaag (in µmol/l en mg PO_4/l). Behandelingen vonden plaats in april, na het tweede meetpunt

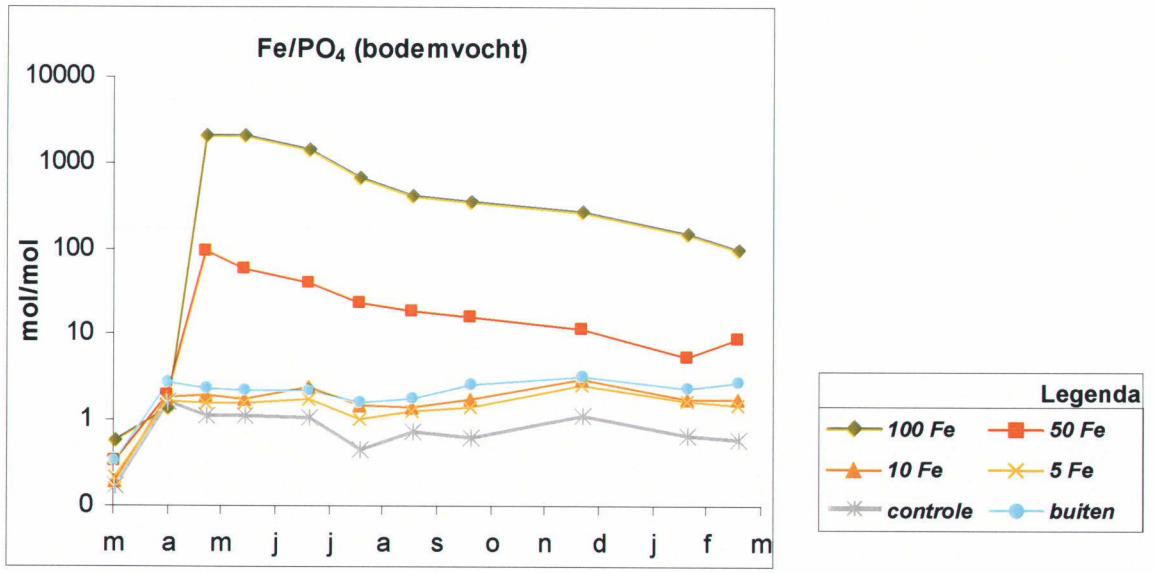


Additie van ijzerchloride aan de bodem (behandelingen 100 en 50) blijkt effectiever dan aan de waterlaag (behandeling 10 en 5). Dit wordt onder andere veroorzaakt doordat bij additie van ijzer in de waterlaag colloïdvorming optreedt door contact met zuurstof. Gedurende het hele groeiseizoen, waarin meer fosfaat gemobiliseerd wordt door hogere temperaturen,zijn de verschillen in de ijzerconcentratie tussen de bodemaddities enerzijds en de andere behandelingen en controles anderzijds aanwezig.

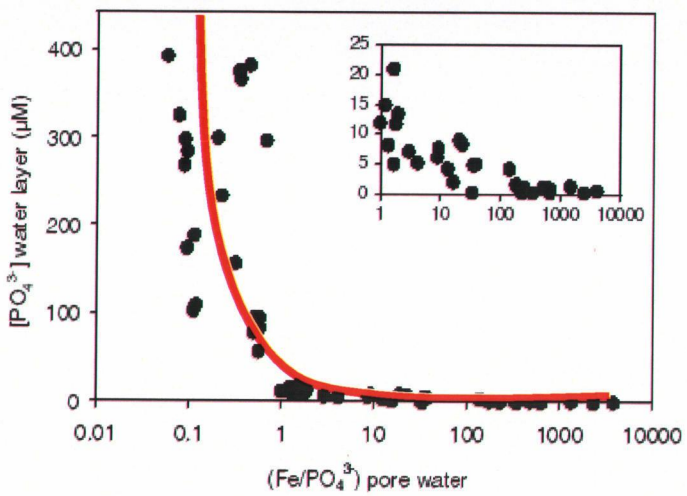
Fe/PO_4-ratio

In afbeelding 2.4. is de Fe/PO_4-ratio in het bodemvocht weergegeven. Om een gunstige beschikbaarheid van fosfaat in de waterlaag te realiseren, is een Fe/PO_4-ratio (mol/mol) van minimaal 1:1 in de waterlaag en van 10:1 in het bodemvocht noodzakelijk (zie ook afbeelding 2.5.: boven een ratio van 10:1 in het bodemvocht wordt fosfaat vrijwel niet meer gemobiliseerd). De Fe/PO_4-ratio blijft alleen bij de hoogste ijzerdosis continu boven de noodzakelijke 1:1 (waterlaag) en 10:1 in het bodemvocht. De daling van de Fe/PO_4-ratio bij de behandelingen 100 en 50 wordt voornamelijk veroorzaakt door een daling van de ijzerconcentratie in het bodemvocht. IJzer wordt naar het bodemoppervlak getransporteerd door diffusie of grondwaterbeweging en slaat daar neer als (hydr)oxide. Het hierdoor ontstane laagje geoxideerd ijzer is nog steeds werkzaam voor wat betreft fosfaatfixatie, maar het ijzer wordt niet meer gemeten in het bodemvocht met een daling van de Fe/PO_4-ratio als gevolg. Bovendien bindt een deel van het ijzer aan fosfaat en aan het bodemadsorptiecomplex. De verwachting is dat de dalende Fe/PO_4-ratio steeds verder zal afvlakken, waarbij deze in ieder geval voor de hoogste ijzerdosering voldoende hoog zal blijven.

Afbeelding 2.4. Fe/PO_4-ratio in het bodemvocht. Behandelingen vonden plaats in april, na het tweede meetpunt



Afbeelding 2.5. Verband tussen de Fe/PO_4-ratio in het bodemvocht en de fosfaatconcentratie in de waterlaag (Smolders *et al.*, 2001)



helderheid

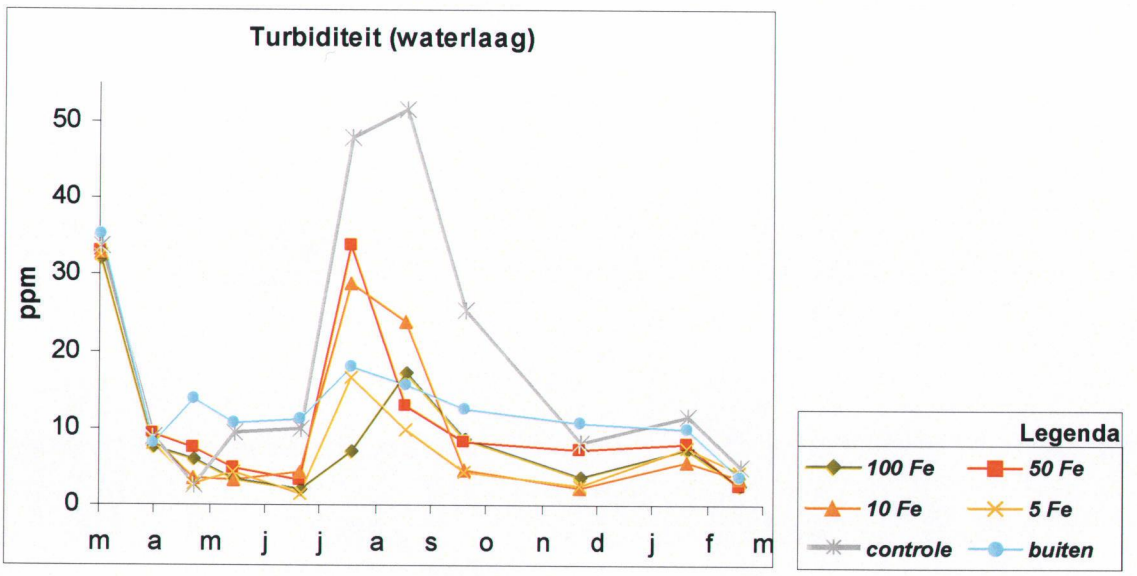
De ijzerdoseringen hebben in een aantal gevallen tot zichtbaar heldere kolommen geleid (afbeelding 2.6.). Bij injectie van 100 gram ijzer per m^2 in de bodem blijft het water in de cilinders na behandeling het langst helder. Pas na drie maanden komen er algen in twee van de drie cilinders. Uiteindelijk waren er in augustus en september nog drie kolommen vrij helder (behandelingen met 100, 50 en 5 g ijzer per m^2), terwijl in alle andere cilinders algen en/of kroos domineerden. Hierbij kan een gesloten kroosdek ook bijdragen aan de eerder geconstateerde zuurstofdepletie. De turbiditeit (afbeelding 2.7.) was in augustus en september resp. 8 en 5 ppm voor de heldere cilinders, tegenover gemiddeld 28 en 23 ppm voor de rest van de meetpunten. Vooral de controlecilinders hadden in de zomermaanden een duidelijk hogere turbiditeit (50 ppm). Het verloop van de chlorofylconcentraties laat ongeveer hetzelfde beeld zien: de heldere cilinders blijven beneden de 50 µg/l, terwijl in de controlecilinders piekconcentraties van 250 µg/l werden gemeten. In de heldere kolommen zijn echter geen waterplanten opgekomen, ondanks de verbeterde helderheid en het relatief grote oppervlak van de cilinders (redelijk grote trefkans). Dit lijkt te duiden op een slechte diasporenbank (zie ook hoofdstuk 4).

Afbeelding 2.6. Helderheidssituatie van een aantal behandelingen drie maanden na beijzeren

controle | 10 g ijzer per m^2 | controle

100 g ijzer per m^2 | 5 g ijzer per m^2 | 100 g ijzer per m^2

Afbeelding 2.7. Turbiditeit in de waterlaag. Behandelingen vonden plaats in april, na het tweede meetpunt



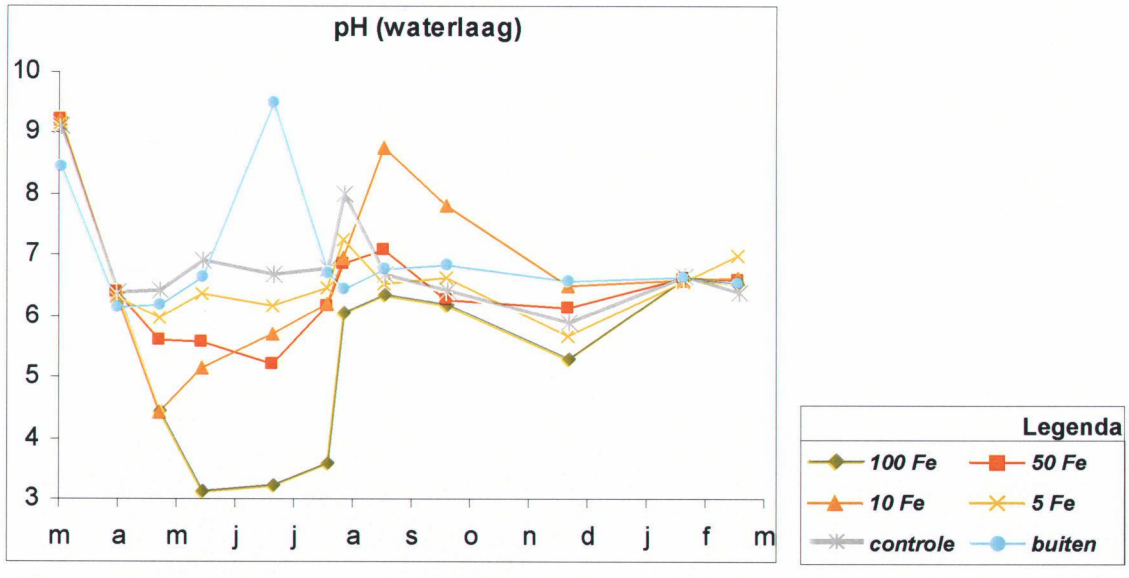
2.3.3. Neveneffecten

pH en buffercapaciteit

Bij de hoogste dosering (100 g ijzer/m^2) treedt verzuring van het water op (afbeelding 2.8.), de pH daalt tijdelijk naar 3 en de buffercapaciteit van het water verdwijnt door oxidatie van het tweewaardig ijzer. Bij lagere dosering en toediening aan de waterlaag is de pH-daling aanmerkelijk minder, maar is ook de daling van de fosfaatconcentratie in de bodem aanzienlijk kleiner. De pH van het bodemvocht verandert nauwelijks bij de hoogste dosering (slechts een halve eenheid), terwijl de buffercapaciteit licht daalt, maar zich weer herstelt. De lage pH in de waterlaag kan vissterfte veroorzaken. Voor plantensoorten van zwakgebufferde wateren is kieming en groei bij deze pH echter normaal gesproken geen probleem. In de conclusie (zie §2.4) wordt voor het tijdelijke verzuringsprobleem een oplossing aangedragen. Dankzij de buffercapaciteit van de bodem zal de buffercapaciteit van de waterlaag, en daarmee ook de pH, weer stijgen.

Niet geheel uit te sluiten valt dat de afwezigheid van algen en kroos in de kolommen met de hoogste dosering mede wordt veroorzaakt door de sterke daling van de pH in deze kolommen. Echter, ook bij een dergelijk lage pH kunnen sommige soorten algen massaal groeien mits voldoende fosfaat aanwezig is (mondel. mededeling J.G.M. Roelofs).

Afbeelding 2.8. pH in de waterlaag. Behandelingen vonden plaats in april, na het tweede meetpunt



sulfide

De sulfideconcentratie wordt, onverwacht, na ijzeradditie slechts weinig naar beneden gebracht ten opzichte van de controlecilinders (resp. 1,0 en 1,7 mg/l, bijlage I). Er is verder geen verband tussen de hoeveelheid toegevoegd ijzer en de sulfideconcentratie in het bodemvocht. De gemeten concentraties zijn voor helofyten geen probleem, maar voor meer gevoelige (ondergedoken) waterplanten zijn dergelijke waarden licht toxisch. De meeste soorten van zwakgebufferde milieus kunnen echter alleen maar kiemen en groeien op meer zandige oevers, en zullen op het (gereduceerde, anaerobe) veen veel slechter groeien. Hiervoor zullen delen van de oevers opgeschoond moeten worden (verwijdering sliblaag met riet). De sulfaatreductie-snelheid is waarschijnlijk laag, gezien de lage concentraties totaal-S in bodemvocht en waterlaag (maximaal 120 µmol/l; 4 mg/l).

ammonium en nitraat
De ammoniumconcentraties in zowel bodemvocht als waterlaag laten een lichte stijging zien bij de hoogste ijzerdosering veroorzaakt door de daling van de pH, waarbij vooral de concentraties in de waterlaag (tot 250 µmol/l; 3,5 mg NH4-N/l, bijlage I) erg hoog zijn. IJzeradditie leidt tot extra mobilisatie van ammonium in de bodem. Hoge ammoniumconcentraties in water en bodem kunnen een belangrijke belemmering vormen voor de terugkeer van vegetaties van zwakgebufferde wateren. De hoge concentraties zijn alleen in de cilinders te zien. In de controlesituatie buiten de cilinders zijn de ammoniumconcentraties in de waterlaag tijdens het groeiseizoen beduidend lager, binnen de concentratiereeks gemeten in zwakgebufferde wateren met de doelvegetaties. Bij een tijdelijke daling van het waterpeil zal een deel van het ammonium in de bodem omgezet worden in nitraat. De nitraatconcentraties gemeten in de waterlaag zijn relatief laag en vormen geen belemmering voor de doelvegetaties. Er is geen aanwijzing voor nitraatuitspoeling.

aluminium
De aluminiumconcentratie in het bodemvocht is overal laag en stijgt slechts tot 8 µmol/l (0,22 mg/l, bijlage I), wat verwaarloosbaar klein is.

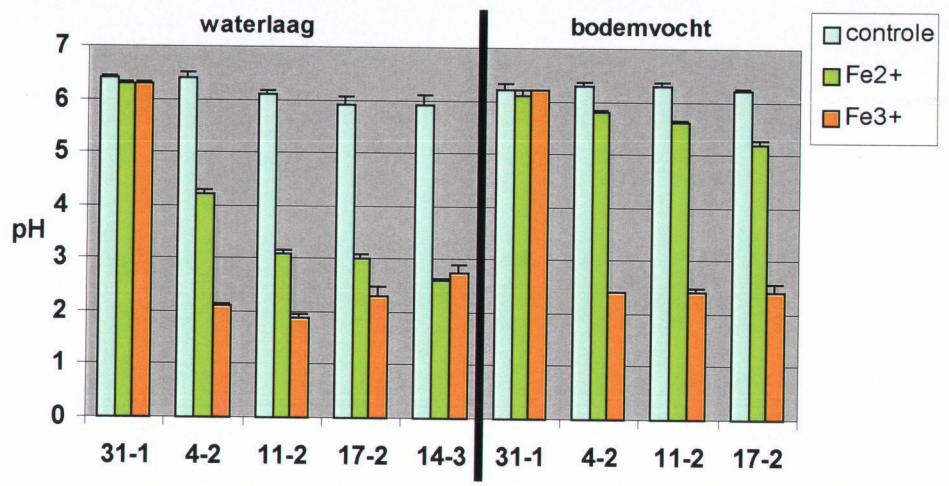
chloride
De chlorideconcentraties lopen bij de hoogste ijzerbehandeling flink omhoog, in vergelijking met de controlesituaties tot 30 keer zo hoog in het bodemvocht (maximaal 16 mmol/l of 600 mg/l in de bovenste 10 cm van de bodem, bijlage I) en tot 5 keer zo hoog in de waterlaag (maximaal 1,9 mmol/l; 67 mg/l, bijlage I). De bovenste bodemlaag wordt hierdoor zeer licht brak (range voor licht brak: 300-3000 mg Cl/l). Omdat de waterlaag zoet blijft en de chlorideconcentratie in het bodemvocht aan het eind van de winter weer tot circa 50 mg/l (zoet) gedaald is, worden geen problemen voor de groei van planten verwacht.

andere bepalingen
De dichtheid van de bodem is laag (bulk density is 0,3 g dw per cm^3) en laat geen verschillen zien tussen de behandelingen en de controles. De totaal-P concentraties in de algenbiomassa van de waterlaag in de cilinders zijn niet significant verschillend van elkaar. Alleen buiten de cilinders wordt er minder totaal-P gemeten, omdat er daar minder fosfaat gemobiliseerd wordt uit de bodem en er meer verdunning plaatsvindt door het veel grotere volume en de grotere toestroom van water .

De chlorofyl-a gehaltes van de waterlaag verschillen niet significant van elkaar, mede door de grote spreiding binnen de behandelingen. Ook bij de hoogste dosering bereikt de concentratie chlorofyl-a een maximale waarde van 75 µg/l (bijlage I), hetgeen relatief hoog is voor een zwakgebufferd water. De sterke stijging van de chlorofylconcentraties in een groot deel van de cilinders in de zomer valt samen met de al eerder geconstateerde stijging van de orthofosfaatbeschikbaarheid in de cilinders (hetgeen als cilindereffect was beoordeeld). Daarnaast zijn de chlorofyl-a concentraties in de winter opvallend hoog.

2.3.4. Labexperiment: ijzer(II)chloride versus ijzer(III)chloride
Zowel ijzer(II)chloride als ijzer(III)chloride veroorzaken een sterke pH-daling in de waterlaag tot een pH van 2 (afbeelding 2.9.), waarbij de buffercapaciteit vrijwel uit het water verdwijnt. De behandeling met ijzer(III)chloride leidt zelfs in het bodemvocht tot een pH van 2,5 door sterkere proton-(zuur)verdringing door het driewaardige ijzer in de bodem. Wel moet worden opgemerkt dat er in dit labexperiment geen aanvoer van bufferstoffen plaatsvindt uit diepere bodemlagen, waardoor de pH wat lager uitvalt dan in de natuurlijke situatie. Het water is zo zuur geworden, dat er geen of minder fosfaat gebonden kan worden (zie ook Stumm & Morgan, 1996). Er lijkt zelfs fosfaat vrijgekomen te zijn in de ijzerchloridebehandelingen. Verder blijkt ijzer(II)chloride wel fosfaat te binden in de bodem, mede doordat de pH daar maar weinig daalt. Ook komen er bij de behandeling met ijzer(II)chloride minder toxische stoffen, zoals ammonium en aluminium, vrij door verdringing in bodem en waterlaag (zie ook Smolders *et al.*, 2001). Op basis hiervan lijkt ijzer(II)chloride dan ook de meest geschikte vorm van ijzerchloride om toe te passen op grote schaal in het Uddelermeer.

Afbeelding 2.9. Labexperiment: pH in waterlaag en bodemvocht na injectie van ijzerchloride of natriumchloride (controle) in de bodem op 3 februari



2.4. Conclusies

Additie van 100 gram ijzer per m^2 (356 gram ijzer(II)chloride) in de bodem zorgt duidelijk voor de beste fosfaatbinding en de meest langdurige helderheid. Alleen bij deze ijzerdosis blijft de Fe/PO_4-ratio boven de 1:1 in de waterlaag en boven de 10:1 in het bodemvocht. Als deze dosis wordt aangehouden, betekent dit dat er voor het hele Uddelermeer ruim 6000 kg ijzer nodig is, wat neerkomt op ruim 21000 kg ijzer(II)chloride (ter vergelijking: 29000 kg ijzer(III)chloride). In de cilinders werd, ondanks de hogere fosfaatconcentraties, fosfaat nog steeds effectief gebonden. De verwachting is dat dit proces bij behandeling van het gehele meer gunstiger zal uitvallen, door de lagere fosfaatmobilisatiesnelheid.

Uit de experimenten van Boers (1991) en Smolders *et al.* (1995) bleek dat het effect van ijzeradditie aan de bodem slechts kortdurend was (één seizoen). De door hen onderzochte (harde) wateren waren echter hydrologisch gezien niet geïsoleerd van de omgeving, waardoor er nog steeds fosfaat- en sulfaatrijk water aangevoerd werd met een hoge ijzerconsumptiesnelheid tot gevolg. Daarentegen is in het Beuven-Zuid, een ander zwakgebufferd water met minder organische stof in de bodem, een meer succesvolle beijzering toegepast (25 gram ijzer per m^2), waarbij het water 10 jaar lang helder bleef (pers. comm. J.G.M. Roelofs).

Gezien de geïsoleerde ligging van het Uddelermeer en de lage gemeten sulfaatreductie wordt verwacht dat de voorgestelde beijzering van de bodem hier wel een aantal jaren het gewenste effect zal hebben. Dit hangt vooral samen met het feit dat er nauwelijks externe aanvoer van fosfaat of sulfaat te verwachten is. Het grondwater bevat weliswaar redelijk veel P (0,03 mg/l op 5m diepte en 0,13 mg/l op 12 m diepte), maar volgens Grontmij (1996) speelt voeding van het Uddelermeer met (dieper) grondwater niet of nauwelijks een rol.

Er zijn in het voorgaande echter ook een paar belangrijke aandachtspunten en onzekerheden gesignaleerd:

- de pH in de waterlaag daalt bij de hoogste dosering tijdelijk. Dit heeft ongunstige gevolgen voor bijvoorbeeld vissen en zoöplankton. Doordat de buffering van de bodem intact blijft, zal de pH van de waterlaag na de tijdelijke daling weer stijgen. Wellicht kan deze verzuring deels worden voorkomen, hierop wordt verderop ingegaan;
- het chlorofyl-a gehalte en totaal-P gehalte in algen blijft bij alle behandelingen vrij hoog. Voor het krijgen van helder water heeft het voedselweb (met name grazen van zoöplankton op algen) daarom een essentiële rol. Om deze reden is het belangrijk dat de pH-daling slechts tijdelijk optreedt.

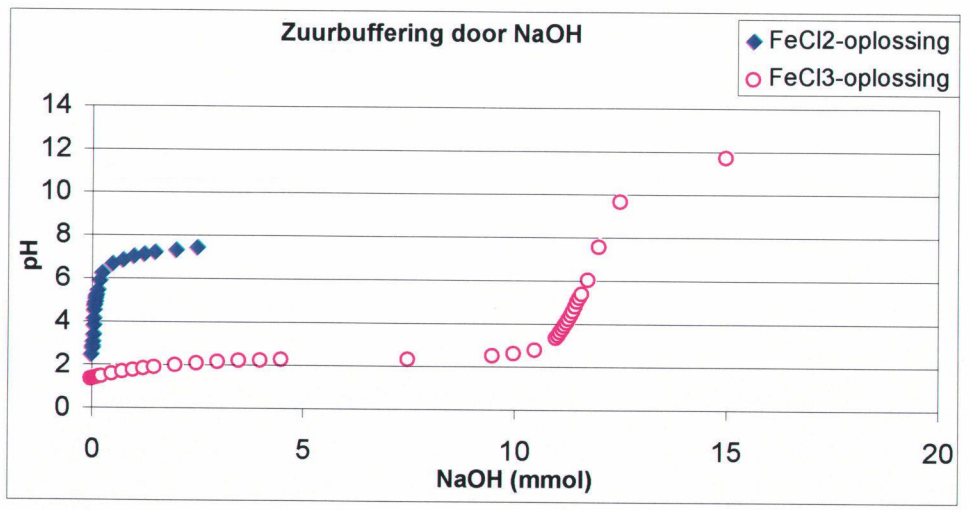
De verhoging van de orthofosfaatconcentratie als gevolg van afbraakprocessen en zuurstofdepletie, zoals die in de cilinders (behalve bij de hoogste dosering) geconstateerd is, treedt bij een behandeling van het gehele Uddelermeer waarschijnlijk niet op.

In die zin valt te verwachten dat een behandeling met 100 gram ijzer per vierkante meter fosfaat in voldoende mate zal fixeren. Immers, dat is zelfs in de kolommen met de geconstateerde stijging van fosfaat al het geval. Of een behandeling met 50 gram ijzer zonder kolomeffect fosfaat in voldoende mate zal fixeren is moeilijk te zeggen. Deze optie levert daarmee een groot risico op.

terugdringen verzuring waterlaag

Een tijdelijlke verzuring van de waterlaag tot een pH van 3 kan ongewenste gevolgen hebben voor sommige flora en fauna, maar dit geldt niet voor soorten die karakteristiek zijn voor zachte wateren. Uit het labexperiment blijkt dat ijzer bij een te lage pH niet of nauwelijks in staat is om fosfaat te binden. Om de tijdelijke pH-daling terug te dringen kan vlak voor het injecteren de pH van de ijzer(II)chlorideoplossing 'opgekrikt' worden tot 4 met behulp van natriumhydroxide (NaOH). Er zijn dan geen blijvende verzuringsproblemen meer te verwachten, terwijl ijzerchloride wel in oplossing blijft. Boven een pH van 5 begint het ijzer uit te vlokken, waardoor het zijn werkzaamheid verliest. Uit afbeelding 2.10. blijkt nog eens dat een ijzer(III)chloride-oplossing veel moeilijker gebufferd kan worden dan een ijzer(II)chloride-oplossing. Om de juiste pH te bereiken moet voor elke kilo ijzer(II)chloride die opgelost wordt, voorzichtig ongeveer 28 gram natriumhydroxide worden toegevoegd. Het is echter sterk aan te raden om dit van tevoren in grote vaten uit te testen in verband met andere kwaliteiten ijzerchloride en/of natriumhydroxide.

Afbeelding 2.10. Buffering van ijzerchlorideoplossingen door natriumhydroxide



praktische problemen

Begin augustus zijn na een hevige bui de cilinders tijdelijk overgelopen. Deze overstroming kan teruggevonden worden in de metingen, bijvoorbeeld in het chloridegehalte in de waterlaag (bijlage I). De verschillen tussen de behandelingen in de waterlaag nemen duidelijk af door de verdunning met meer- en regenwater. Het experiment wordt hierdoor echter niet wezenlijk beïnvloedt, omdat de meeste processen zich in de bodem afspelen en bovendien de verschillen tussen de behandelingen in de meeste gevallen na verloop van tijd weer terugkwamen. De stijging van de pH van de waterlaag van de beijzerde cilinders trad al (in mindere mate) op vóór deze overstroming, zoals verwacht door de bufferwerking vanuit de bodem.

Uit de verschillen tussen de controlecilinders en de controlepunten buiten de cilinders blijkt dat sommige effecten puur te wijten zijn aan de cilinders zelf. Naast de uitsluiting van vissen en de verminderde windwerking, vindt er ook minder verversing plaats in de cilinders.

Verder kunnen algen zich aan de wanden gaan hechten om zich van daaruit over de hele cilinder te gaan verspreiden. Wel is het materiaal van de cilinders zo gekozen, dat er maar weinig fosfaat hecht aan de wanden. De twee andere opties waren echter een behandeling van het gehele meer met slechts een type beijzering (met alle risico's van dien) of een laboratoriumexperiment dat veel verder van de veldsituatie af staat.

Om de verschillende processen die een rol spelen in beeld te brengen, kunnen de behandelde cilinders echter beter vergeleken worden met de controlecilinders dan met de meetpunten buiten de cilinders. Echter, zoals uitgelegd, zal de effectiviteit van de fosfaatbinding bij behandeling van het gehele meer alleen maar gunstiger verlopen.

3. PROEFBEVISSING

3.1. Achtergrond

De omvang en samenstelling van de huidige visstand is dusdanig dat deze een herstel van het Uddelermeer naar een helder systeem effectief in de weg staat. De belemmeringen betreffen zowel zogenaamde top-down (consumptiegestuurde) invloeden als bottom-up (productiegestuurde invloeden) (zie ook Witteveen+Bos (2000)). Voorbeelden van belangrijke top-down invloeden zijn bodemwoeling (bij het zoeken naar voedsel in de bodem) waarmee de kieming en ontwikkeling van waterplanten wordt voorkomen en predatie van grote watervlooien waardoor algen en andere zwevende deeltjes niet effectief uit het water gefilterd worden. De bottom-up invloed van de huidige visstand betreft het in stand houden van een omvangrijke interne nutriëntencyclus, waarbij nutriënten uit de bodem zowel direct (via bodemwoeling en geassocieerde nalevering) als indirect (via het eten van bodemvoedsel en de uitwerpselen) in de waterfase gebracht worden en de algen voeden, waarna de dode algen weer voedsel zijn voor de bodemdieren (muggenlarven, wormen etc.) die de vissen weer eten. Het hoogproductieve karakter van het Uddelermeer wordt geheel door deze interne cyclus in stand gehouden, immers de externe nutriëntenbelasting is erg klein.

Vanwege de grote invloed van de huidige visstand op de waterkwaliteit is het uitdunnen van deze visstand een belangrijke maatregel voor het bereiken van een helder Uddelermeer. In het Uddelermeer is echter een dikke en zeer slappe sliblaag aanwezig die een uitdunningsvisserij kan bemoeilijken doordat de netten kunnen vastlopen in de sliblaag en/of doordat vissen door het slib onder het net door kunnen zwemmen. Om deze reden is middels een proefbevissing onderzocht of een uitdunningsvisserij in het Uddelermeer succesvol kan zijn.

3.2. Werkwijze

Op het Uddelermeer zijn in maart 2 zegentrekken uitgevoerd met een zegen van 175 meter lang en vissend maximaal 3 meter hoog. De maaswijdte is 40 mm hele maas in de vleugels afnemend tot 12 mm in de zak. Per zegentrek is ongeveer ¼ deel van het meer (= 1 hectare) bevist. De zegen is handmatig binnengehaald.

Daarnaast is met een normaal elektrovisapparaat een deel van de oever bevist (ongeveer 150 meter oever en de sloot naar het botenhuis). De vangsten zijn niet verwerkt met uitzondering van een deel van de vangst in de tweede zegentrek.

Verder zijn wat waarnemingen verricht die van belang kunnen zijn bij het opstellen van een afvisplan.

3.3. Resultaten

3.3.1. Algemene waarnemingen

Het water was donkergroen met waarschijnlijk hoge dichtheden aan alg, zeker voor de tijd van het jaar. De zichtdiepte was slechts 30 cm.

Zoals al wel bekend was, en nu weer bevestigd is, ligt er een uitzonderlijk slappe sliblaag op de bodem van het Uddelermeer. Het is op het "open water" onmogelijk met een stok de grens van bodem en water te bepalen. Een stok van 4 meter kan zonder enige weerstand te ondervinden weggeduwd worden. Pas bij 20 meter uit de oever wordt de bodem stevig (N en W oever) of hard (Z en O oever, zandplaat).

De diepte loopt van 1 meter nabij de W en N oever af naar ruim 2 meter bij de Z en O oever. In het midden is de diepte gemiddeld 1,25 meter. Deze diepte is vastgesteld met een schepnet waarbij het criterium was of er bodemmateriaal zichtbaar was op het netwerk.

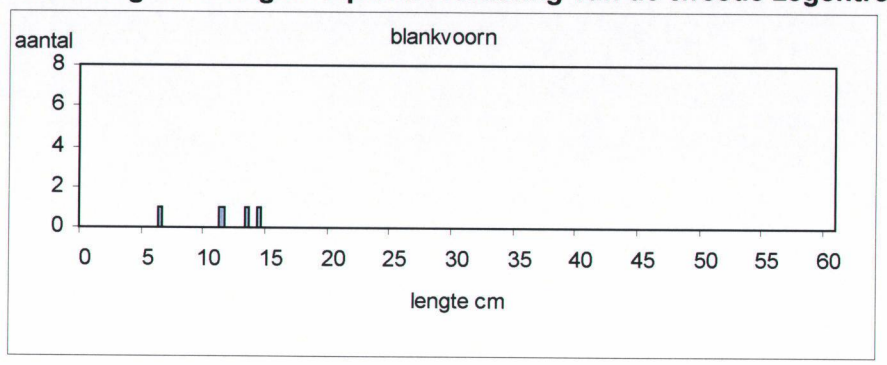
3.3.2. Zegenvisserij

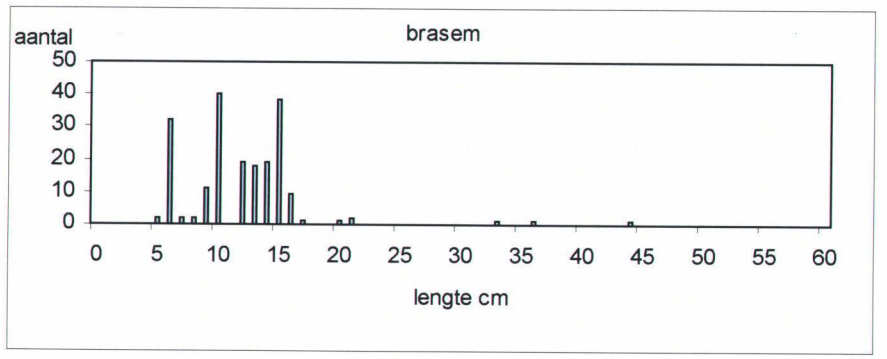
De eerste zegentrek is binnengehaald op het strandje aan de Z oever. De trek ging vrij zwaar waarbij al snel bodemslib in de zegenzak kwam. Desondanks kon de trek tot een goed einde worden gebracht. Omdat het water voor de kant ondiep is, kon het slib niet uitgespoeld worden.

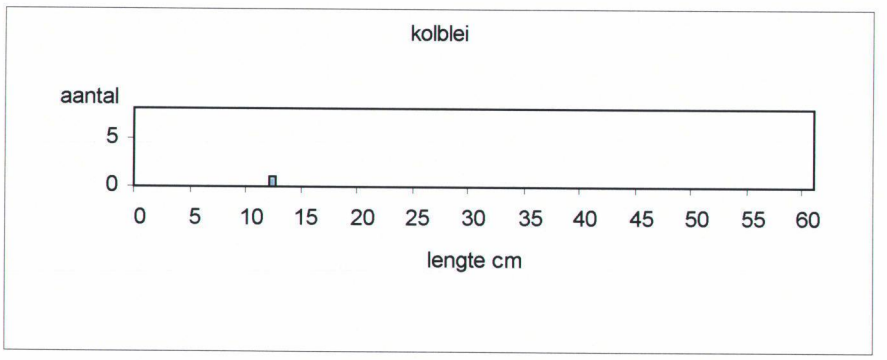
De zak is toen aan de achterzijde opengemaakt en zo geleegd. Naar schatting zat er 100 kilogram vis in het net voornamelijk bestaande uit brasem van 5 tot 15 cm. Verder werden enkele grote snoekbaarzen gezien (50-75 cm).

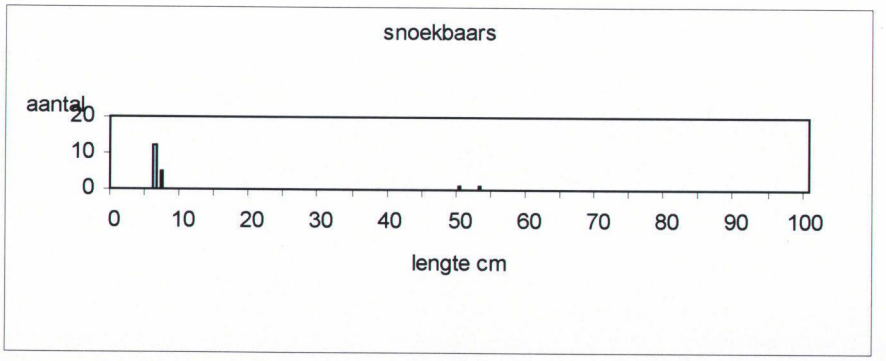
Voor de tweede zegentrek is van het middendeel van de zegen (75 meter) de helft van de verzwaring verwijderd. De tweede trek is binnengehaald aan de NO oever (ongeveer bij het restaurant). De trek verliep grotendeels gelijk. Weer werd behoorlijk veel bodemmateriaal in de zegenzak verzameld, al was het mogelijk iets minder. Doordat het water bij de oever dieper was, kon de zak gespoeld worden en de vangst verzameld. Ongeveer de helft van de vangst is gemeten. In afbeelding 3.1. zijn de lengtefrequentieverdelingen van deze vissen gegeven.

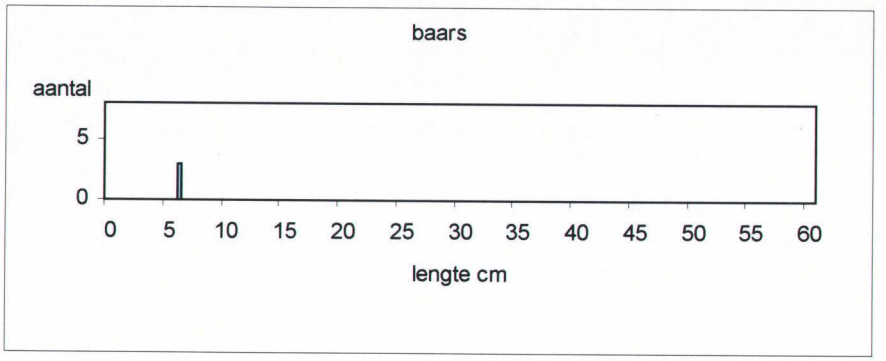
Afbeelding 3.1. Lengtefrequentieverdeling van de tweede zegentrek











3.3.3. Elektrovisserij

Het is mogelijk gebleken elektrisch te vissen, de geleidbaarheid van het water is echter uiterst laag. Bij een spanning van ruim 400 volt liep er 1 a 2 ampère stroom. Normaal is (op de hoogste stand) een voltage van 250 volt met een stroomsterkte van 15 a 20 ampère. Er moest met 2 schepnetten gevist worden om de noodzakelijke 1 ampère op te wekken. Om schade aan het apparaat te vermijden (door veelvuldig aan-uitschakelen) is slechts kort gevist. De vis was nog wel goed vangbaar. Met enige aanpassingen (vergroten oppervlak van de elektrodes) kan de stroomsterkte verhoogd worden en de bevissing succesvoller.

In de oevervegetatie was redelijk veel vis aanwezig. De vangst bestond uit blankvoorn, kolblei en brasem van 5 tot 15 cm. Verder werden 2 alen, 2 snoekbaarzen en 1 snoek gevangen. Er was niet veel snoek aanwezig gezien de uitgebreide oevervegetatie. In het slootje naar het botenhuis was geen visconcentratie aanwezig.

3.4. Conclusies

Hoewel de visstand niet op representatieve wijze is bemonsterd, is toch een schatting van de aanwezige visstand gemaakt. Deze bedraagt naar verwachting tussen de 200 en 400 kg/ha.

Het Uddelermeer is een uitzonderlijk water. Met de gebruikte zegen is op andere plaatsen zelfs onder de meest extreme omstandigheden nog nooit slib meegevangen. De enige uitzonderingen hierop zijn twee plaatsen geweest waar veel organisch slib uit een RWZI aanwezig was. Organisch slib is in tegenstelling tot normaal slib vlokkerig en vormt niet een vettige contactlaag tussen water en bodem. Het slib in het Uddelermeer bestaat uit een laag afgestorven algen en is in feite dus ook sterk organisch slib. Het is op zich mogelijk met een zegen te vissen al zal de efficiëntie lager liggen dan normaal. Een gedeeltelijke oplossing kan zijn het toepassen van een grotere maaswijdte, al kan dat slechts beperkt door de aanwezigheid van veel klein brasembroed. Deze verhoging van de maaswijdte samen met toepassing van dunner netwerk en aanpassing aan de onderpees kan naar verwachting een beter resultaat opleveren al zal er altijd wel slib meegevangen worden. Ook zal door de slappe bodem altijd vis onder het net doorgaan.

Het realiseren van een vergaande uitdunning van de visstand moet daarom plaatsvinden met een combinatie van vangtuigen. Naast zegen en elektrovisapparaat zal er ook met staand want (rechtop in het water staande kieuwnetten) en langdurig met fuiken gevist moeten worden. Tevens zullen controlemomenten moeten worden ingebouwd waarmee kan worden vastgesteld of het gewenste uitdunningsniveau bereikt is. Met deze combinatie van middelen is een uitdunningsvisserij voor het Uddelermeer tot het gewenste niveau zeker mogelijk.

4. ZAADBANKONDERZOEK

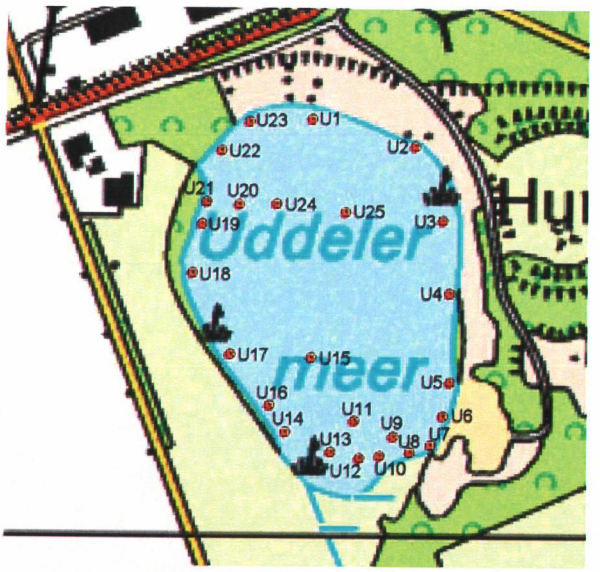
4.1. Achtergrond

In de voorgaande hoofdstukken zijn maatregelen besproken die noodzakelijk zijn om het water in het Uddelermeer weer helder te krijgen. De vraag die hierop volgt is of, als het water weer helder wordt, waterplanten vanzelf weer terug kunnen keren. Om deze vraag te beantwoorden is in het voorjaar het sediment van het Uddelermeer bemonsterd om te onderzoek of onder gunstige omstandigheden waterplanten kunnen kiemen.

4.2. Proefopzet

In maart 2002 zijn 25 plekken sediment monsters genomen in het Uddelermeer (zie afbeelding 4.1.). De locaties zijn vooral gekozen op de zandbodem, omdat hier de kans dat waterplanten terugkeren het grootst wordt geacht vanwege de waterdiepte en de bodemstructuur. Van de plekken werd de waterdiepte bepaald. Op elke plek werden binnen enkele vierkante meters vijf monsters genomen met een steekbuis (doorsnede 5,7 cm). De bovenste ca. 10 cm van de toplaag werd meegenomen. Op twee van de 25 plekken werd een monster genomen van de 60 cm toplaag die in drie lagen van 20 cm werd gesplitst. De vijfmonsters van elke plek werden bij elkaar gevoegd en als één monster beschouwd. Het sediment werd in bakken overgebracht en geïncubeerd (T ca. 23°C, 14 uur ca. 30 µmol m^{-2} s^{-1} op het sediment oppervlak) met daarboven op een laag van ca. 10 cm gebiedseigen water. Verdamping werd tegengegaan door doorzichtig plastic folie. Het aantal en de soort kiemplanten van waterplanten uit het sediment werd 10 weken bij gehouden. Na deze periode werd de proef gestopt.

Afbeelding 4.1. Bemonsterde locaties van sediment toplaag in het Uddelermeer 2002



4.3. Verwerking resultaten

Voor de verwerking van de resultaten werd gebruik gemaakt van waterkwaliteitsgegevens van het WS Veluwe van het jaar 2001. Op basis van de gekiemde soorten waterplanten en de dichtheid van zaden werd een biomassa van de zaadbank voor verschillende locaties berekend. Daarnaast werd op basis van zomergemiddelde van doorzicht en chlorofyl-a gehaltes een schatting gemaakt van de lichtuitdoving (k). Aangenomen is dat 2001 geen significante afwijking vertoont van de lichtuitdoving de jaren ervoor. Met een doorzicht van 0,3 m en een chlorofyl-a gehalte van 81 µg l^{-1} wordt met

(1) $k = 0{,}016 * chf\text{-}a + 1{,}3/Secchi\ diepte^{0,5}$ (Scheffer, 1998)

een lichtuitdoving (k) van 3,8 berekend. Voor het Uddelermeer is de uitdoving echter mogelijk groter, omdat bovenstaande formule is gekalibreerd op meren met een relatief laag gehalte aan humuszuren.

Voor elke plek in het meer kan nu met de lichtuitdoving (k) en de waterdiepte (z) het percentage licht dat op waterbodem valt (%SL) worden berekend met:

(2) % SL = e^{-kz} * 100 (zie b.v. Middelboe & Markager, 1997)

Met een logistisch model dat ontwikkeld is op basis van een vergelijkbare studie van 5 Nederlandse meren kan met de gegevens over het percentage licht dat op de bodem valt en de biomassa van de zaadbank (ZB in g m^{-2}, waarbij de zaadbank staat voor alle voortplantingsorganen) de kans worden berekend dat in een volgend jaar waterplanten komen. De formule hiervoor is :

(3) Kans waterplanten = exp(0,116*ZB*%SL)/(1+exp(0,116*ZB*%SL))

(zie van den Berg & Delaunay, submitted)

Het model is gebaseerd op 143 plekken in een vijftal meren en het gekalibreerde model geeft een juiste voorspelling in 79 % van de gevallen. Met deze formule kan worden geschat wat de limiterende factor is voor rekolonisatie van waterplanten. Uit de formule blijkt dat de interactie term tussen zaadbank en %SL de verklarende factor is. Hieruit kan worden afgeleid dat zowel voldoende licht als voldoende zaadbank nodig zijn voor een hoge kans op (kieming van) waterplanten. In afbeelding 4.2. is de formule grafisch weergegeven en gebruikt om de resultaten uit het Uddelermeer te vergelijken en te interpreteren.

4.4. Resultaten

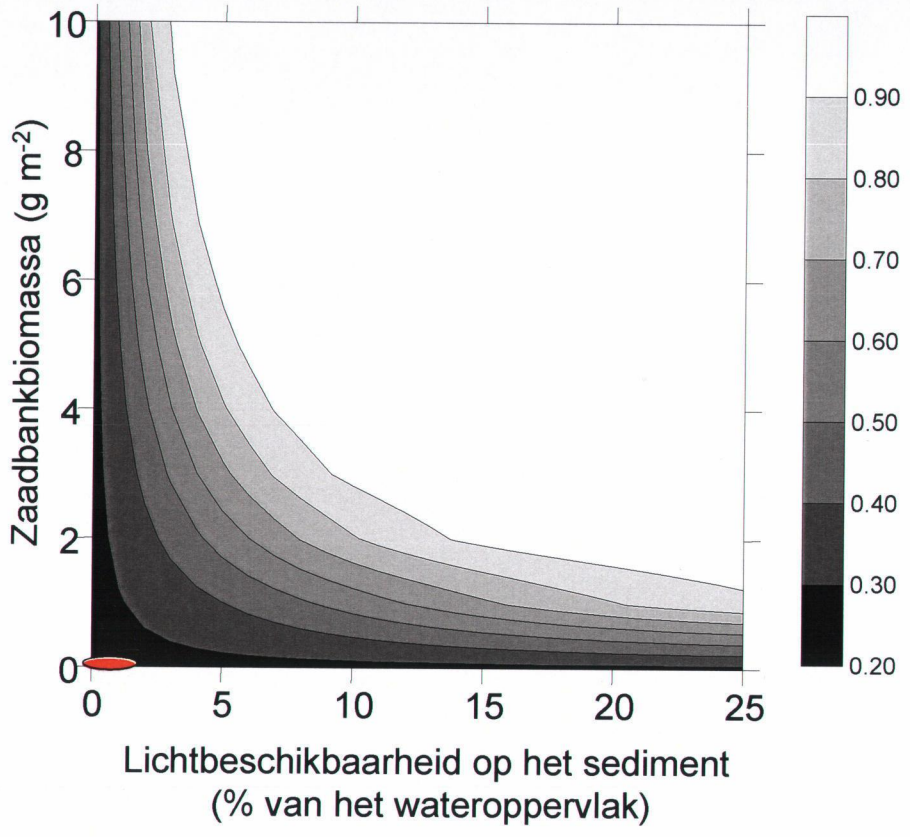
In het Uddelermeer is in één monster kieming opgetreden van een ondergedoken waterplant. Het betrof kieming van een kranswier (*Nitella flexilis*). Verder is kieming aangetroffen van een aantal Waterweegbree planten (*Alisma* sp.), planten die zich soms ook goed onder water kunnen handhaven. Uit de diepere lagen van het sediment zijn geen zaden gekiemd.

Van drie monsters werd het sediment na de kiemproef gecontroleerd op aanwezigheid van niet gekiemde zaden. In deze drie monsters werden geen zaden aangetroffen van ondergedoken waterplanten. In alle monsters zijn wel in totaal enkele tientallen restanten aangetroffen van oösporen en resten van fonteinkruidzaden (U4, U8 en U14). Dit duidt op aanwezigheid van kranswieren en fonteinkruiden in het verleden van het Uddelermeer.

De totale zaadbank biomassa van ondergedoken waterplanten in het Uddelermeer is geschat tussen de 0 en 0,015 g m^{-2} . Op de locatie waar het kranswier werd aangetroffen was die 0,0016 g m^{-2}. Op de plekken waar ook *Alisma* zaden werden aangetroffen was de biomassa maximaal 0,015 g m^{-2}.

Het lichtklimaat op de waterbodem van het Uddelermeer is slecht. Bij de lichtuitdoving van 2001 bedroeg het percentage licht op de bodem tussen de 0,05 en de 1 %. Deze gegevens lezend in afbeelding 4.2. blijkt dat alle punten van het Uddelermeer heel dicht in de buurt liggen van de oorsprong. De verwachte kans op waterplanten is daarmee voor alle punten minder dan 30 %, waarbij opgemerkt moet worden dat het model nooit lager voorspelt dan een kans van 20 %. Uit afbeelding 4.2. blijkt ook dat alleen een verbetering van het lichtklimaat of alleen een verbetering van de zaadbank biomassa niet leidt tot een hogere kans op waterplanten. Deze uitspraak is geldig voor de toestand van de zomer volgend op de bemonstering in de winter daarvoor. Als het lichtklimaat een aantal jaren achtereen goed is, zal de kans op kolonisatie toenemen door de kans dat zaden worden aangevoerd van buitenaf.

Afbeelding 4.2. Een logistisch model voor de voorspelling van de kans op ondergedoken vegetatie (Naar Van den Berg & Delaunay, submitted). Met de rode ovaal is aangegeven waar de bemonsterde locaties van het Uddelermeer zich bevinden



4.5. Conclusies

Het lichtklimaat van het Uddelermeer is onvoldoende voor de ontwikkeling van ondergedoken waterplanten. Bovendien is de biomassa van zaden in de toplaag van de waterbodem zeer laag. Door de lage zaadbank biomassa leidt een verbetering van alleen het lichtklimaat niet tot een snelle ontwikkeling van waterplanten op korte termijn (1 jaar).

Omdat waterplanten nodig zijn om de waterhelderheid te stabiliseren en te houden, kan worden overwogen worden om voortplantingsorganen van waterplanten te introduceren in combinatie met maatregelen die het lichtklimaat verbeteren. Daarbij kan worden gedacht aan soorten die in het verleden zijn aangetroffen in het Uddelermeer, namelijk soorten karakteristiek voor (zwak tot) matig gebufferd water.

Een punt van zorg is dat de kansen voor waterplanten na introductie van zaden bedreigd worden door de slechte toestand van de bodem. De bodem bestaat grotendeels uit een zeer dikke laag waterig slib. Uit onderzoek in Engeland blijkt dat een dergelijke waterbodem de rekolonisatie van waterplanten kan belemmeren door zowel de slechte chemische toestand als door de grote kans dat wortelende waterplanten losraken (Schutten et al.,1997). Het sterk reduceren van de brasemstand zal echter ook een positief effect hebben op de structuur van de waterbodem. Dit laatste kan tot gevolg hebben dat de waterbodem geschikt wordt voor goede ontwikkeling van watervegetatie.

5. DISCUSSIE, CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

5.1. Benodigde maatregelen op grond van het onderzoek

Op grond van de resultaten en conclusies uit de verschillende deelonderzoeken worden de volgende maatregelen ter verkrijging van een duurzaam helder Uddelermeer nodig geacht:

1. Vergaand uitdunnen van de visstand. De omvang en samenstelling van de huidige visstand is dusdanig dat deze een herstel van het Uddelermeer naar een helder systeem effectief in de weg staat. Uitdunnen van deze visstand is daarmee een belangrijke maatregel. Op grond van de tijdens de proefbevissing opgedane ervaring kan een op het Uddelermeer toegespitst afvisplan worden opgesteld. Dit afvisplan moet bestaan uit visserij met zegen en elektroapparaat, alsmede met staand want en fuiken. Tevens zullen controlemomenten moeten worden ingebouwd waarmee kan worden vastgesteld of het gewenste uitdunningsniveau bereikt is. Op deze wijze is het zeker mogelijk de visstand in het Uddelermeer tot het gewenste niveau uit te dunnen.

2. Additie van 100 gram ijzer per m^2 in de vorm van ijzer(II)chloride aan de bodem. Na de uitdunningsvisserij kan additie van ijzer aan het sediment plaatsvinden. Dit dient te gebeuren vóór het begin van het groeiseizoen. Uit de uitgevoerde experimenten is gebleken dat alleen bij een dosis van 100 gram ijzer per vierkante meter het water in de cilinders langdurig helder werd. Indien een behandeling met een lagere dosis ijzer zou worden toegepast, wordt op grond van de resultaten in de cilinders betwijfeld of voldoende effect van de maatregel zal worden verkregen. Met betrekking tot de effecten en neveneffecten van de dosering van 100 gram ijzer per m^2 bestaat wel een aantal onzekerheden:
   - in het experiment treedt een tijdelijke verzuring van de waterlaag op. De waterlaag wordt vrijwel zeker opnieuw gebufferd vanuit de bodem en de tijdelijke verzuring kan worden teruggebracht door buffering van de toe te dienen oplossing met natriumhydroxide. Het verdient aanbeveling dit eerst in de praktijk te testen;
   - het chlorofyl-a gehalte en totaal-P gehalte in algen blijft ook bij de behandeling met 100 gram ijzer vrij hoog. Voor het krijgen van helder water heeft het voedselweb (met name grazen van zoöplankton op algen) daarom een essentiële rol. In dat licht zal de pH-daling inderdaad van tijdelijke aard moeten zijn. Tijdelijke verzuring van de waterlaag is erg gebruikelijk voor zwakgebufferde wateren, bijvoorbeeld na peildaling in de zomer;
   - ijzeradditie leidt tot extra mobilisatie van ammonium in de bodem. Hoge ammoniumconcentraties in water en bodem kunnen een belemmering vormen voor de terugkeer van vegetaties van zwakgebufferde wateren. Deels is de verhoging van de ammoniumconcentratie een cilindereffect.

3. Enten van waterplanten. Uit het onderzoek naar de kwaliteit van de zaadbank is gebleken dat naast het lichtklimaat ook de kiemkracht van de zaadbank in het Uddelermeer sterk te wensen overlaat. Naar verwachting zal hierdoor na het ontstaan van helder water door afvissing en additie van ijzer kolonisatie door waterplanten niet of nauwelijks optreden. De snelle ontwikkeling van ondergedoken waterplanten is noodzakelijk om de effecten van de maatregelen langdurig in stand te houden. Het enten van zaden of sporen van soorten die karakteristiek zijn voor zwakgebufferde wateren wordt dan ook sterk aanbevolen. Eventueel kunnen bij wijze van proef waterplanten geënt worden in de thans nog in het meer staande cilinders, en dan met name in de heldere cilinders. Voor soorten uit zwakgebufferde wateren is een zandige oever (littoraal) echter een belangrijke voorwaarde voor kieming en vestiging. Gedeeltelijk opschonen van de oevers kan in dit verband overwogen worden.

5.2. Aandachtspunten bij uitvoering van de maatregelen

Een goede praktische uitvoering van de maatregelen is cruciaal voor een succesvol herstel:

- Wat het visstandbeheer betreft is het bereiken van een vérgaande uitdunning heel belangrijk. Mislukte projecten in het verleden kunnen vrijwel steeds in verband gebracht worden met een onvoldoende uitdunning van de visstand (zie o.a. de landelijke evaluatie van actief biologisch beheer, uitgevoerd door RIZA). De slappe bodem vormt hierbij een zeer belangrijk aandachtspunt bij de praktische uitvoering van de uitdunning.

- Wat het beijzeren betreft is het van belang dat vergaande en langdurige verzuring wordt voorkomen (zie de vorige paragraaf) en dat de toplaag van het bodemslib goed dekkend wordt behandeld en dat deze bij het beijzeren niet sterk wordt opgewoeld. In overleg met Ballast Ham Nederland B.V., een bedrijf dat ervaring heeft met het grootschalig beijzeren van waterbodems (zij hebben in het verleden een beijzeringsapparaat gebouwd waarmee een experiment in Groot Vogelenzang is gedaan), is gebleken dat hiervoor een nieuwe wijze van dosering zal moeten worden bedacht.
- Wat het enten van waterplanten betreft is het van belang voldoende materiaal te verzamelen om op enkele plaatsen in het Uddelermeer de zaadbankdichtheid voldoende te kunnen verhogen. Dit is niet zo eenvoudig, omdat het gaat om soorten van zwakgebufferde wateren die zeker niet algemeen zijn.

droogzetten

Een in potentie zeer goede oplossing om de praktische uitvoerbaarheid sterk te verbeteren is het uitvoeren van de maatregelen in combinatie met het geheel of gedeeltelijk droogzetten van het Uddelermeer. Deze maatregel is naar voren gekomen naar aanleiding van recente positieve resultaten van deze techniek in een meer in Finland, en lijkt ook voor het Uddelermeer een kansrijke maatregel te zijn. Droogzetten biedt namelijk zeer belangrijke praktische voordelen:

- Het maakt het vérgaand uitdunnen van de visstand eenvoudiger (en dus goedkoper), omdat de vissen niet kunnen schuilen in de omvangrijke rietkragen die het Uddelermeer omgeven. Bij de uitdunning worden de vissen weggevangen uit het diepste deel, voordat dit eventueel geheel drooggezet wordt. Hiermee is het ook eenvoudiger vast te stellen dat de visstand inderdaad vergaand uitgedund wordt.
- Het beijzeren van de bodem wordt wellicht eenvoudiger, omdat dit geheel of gedeeltelijk in het droge kan worden gerealiseerd. Dit is echter wel afhankelijk van het gedrag van de bodem na het droogzetten (mate van inklinking en daarmee gepaard gaande stevigheid van de bodem).

Behalve praktische voordelen heeft het geheel of gedeeltelijk droogzetten ook een aantal effecten die heel gunstig zijn voor de kansen op herstel:

- Droogleggen heeft gunstige effecten op de bodem, te weten consolidatie, oxidatie en structuurverandering (de slappe bodem krijgt een korstje), hetgeen bijdraagt aan het krijgen van helder water met een goed milieu voor ondergedoken waterplanten.
- Het droogleggen leidt tot ammoniumverwijdering via nitrificatie. Dit is gunstig, aangezien ammonium de ontwikkeling van soorten van zwakgebufferd water sterk kan belemmeren.
- Het droogleggen stimuleert de kieming van resterende zaden en sporen in de bodem. Dit vergroot de kansen op spontaan herstel, ondanks de geringe zaadbank. In die situatie zou overwogen kunnen worden het spontane herstel af te wachten alvorens te besluiten om planten te enten.

Technisch is het geheel of gedeeltelijk droogzetten waarschijnlijk eenvoudig te realiseren. Wel dienen de (geo)hydrologische en eventuele andere consequenties hiervan onderzocht te worden. Daarnaast wordt aanbevolen in het laboratorium een droogval- en beijzeringsproef uit te voeren. Hierbij wordt de potentiële capaciteit voor fosfaatbinding en optredende verzuring bij droogval en hervernatting bepaald.

5.3. Duurzaamheid van de combinatie van maatregelen

De duurzaamheid van de maatregelen zal afhangen van de zorgvuldigheid waarmee ze worden uitgevoerd en de reacties van het Uddelermeer hierop. Wanneer de maatregelen kunnen worden uitgevoerd in combinatie met het geheel of gedeeltelijk droogzetten wordt een duurzaamheid van tenminste 5 à 10 jaar verwacht. Op langere termijn zal veel afhangen van hoe de bodem zich gaat gedragen, en daarmee samenhangend de ontwikkeling van de waterplanten- en visgemeenschap. In het gunstigste geval ontstaat een langdurig helder systeem met een stabiele bodem die qua productiviteit in evenwicht is met het laagproductieve water dat het Uddelermeer voedt. Het is echter ook mogelijk dat de bodem uiteindelijk weer een interne eutrofiëring zal veroorzaken, waarna de maatregelen zullen moeten worden herhaald.

5.4. Gevolgen van maatregelen voor historische sliblaag

De voorgestelde maatregelen hebben geen gevolgen voor de historische waarde van de aanwezige sliblaag. De gelaagdheid van de sliblaag blijft intact. Effecten van de additie van ijzer op in de sliblaag aanwezige bronzen of ijzeren relicten zullen niet optreden, aangezien de invloed van de ijzerbehandeling zich beperkt tot de bovenste 10 cm van de sliblaag.

5.5. Slotconclusie en aanbevelingen

Alles in beschouwing nemend wordt een combinatie van vergaande uitdunning van de visstand, beijzering van de bodem en enten van waterplanten, als een kansrijk pakket van maatregelen gezien voor herstel van een duurzaam helder Uddelermeer. De praktische uitvoerbaarheid, resultaten en duurzaamheid van deze maatregelen zullen zeker verbeteren indien daarnaast ook voor het tijdelijk geheel of gedeeltelijk droogleggen van het Uddelermeer wordt gekozen. Ook zou dit het enten van waterplanten eventueel overbodig kunnen maken. Wel vraagt het droogzetten om nader onderzoek, in de vorm van een geohydrologisch onderzoek naar de mogelijkheden en effecten en een laboratorium proef naar de eigenschappen van het sediment tijdens en na droogvallen plus beijzeren.

6. REFERENTIES

Berg, M.S. van den & G. Delaunay. The relationship between light, submerged macrophytes and propagule bank in shallow lakes. Aq. Bot, submitted.

Boers, P.C.M. (1991). The release of dissolved phosphorus from lake sediments. Thesis LUW (NI-OO/CL & RIZA); Universiteitsbibliotheek: Diss. WA 1991: 7

De Lyon, M.J.H. & Roelofs, J.G.M. (1986). Waterplanten in relatie tot waterkwaliteit en bodemgesteldheid (Deel 2: Tabellen). Laboratorium voor Aquatische Oecologie, Katholieke Universiteit Nijmegen.

Grontmij (1996). Restauratieplan Uddelermeer. Grontmij Gelderland / Grontmij Milieu, Arnhem / De Bilt.

Lamers, L.P.M. (2002). Factors controlling the extent of eutrophication and toxicity in sulfate-polluted freshwater wetlands. Limnol.Oceanogr. 47: 585-593.

Middelboe, A.L. & Markager, S., 1997. Depth limits and minimum light requirements of freshwater macrophytes. Freshwat. Biol. 37: 553-68.

Psenner, R. , Boström, B., Dinka, M., Petterson, K., Pucsko, R. and Sager, M., 1988. Fractionation of phosphorus in suspended matter and sediment. Archiv für Hydrobiologie, Beihefte Ergebnisse der Limnologie 30: 98-110.

Scheffer, M., 1998. Ecology of Shallow Lakes. Chapman and Hall, New York, 357 pp.

Schutten, J., Davy, A.J., Madgick, F.J., Coops, H., Admiraal, W., Lammens, E.H.R.R. and Phillips, G.L., 1997. Factors affecting water plant recovery -overview and sediment influences. In: Madgwick, F.J. and Phillips, G.L. (eds), Restoration of the Notfolk Broads. Final report (BARS 14c), Broads Authority and (P-89) Environment Agency, Norwich.

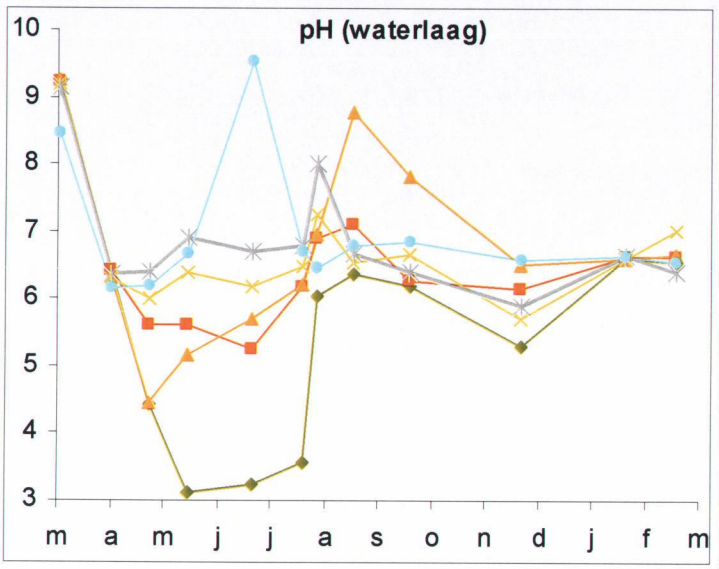
Smolders, A.J.P., Lamers, L.P.M., Moonen, M., Zwaga, K. & Roelofs, J.G.M. (2001). Controlling phosphate release from phosphate-enriched sediments by adding various iron compounds. Biogeochemistry 54: 219-228.

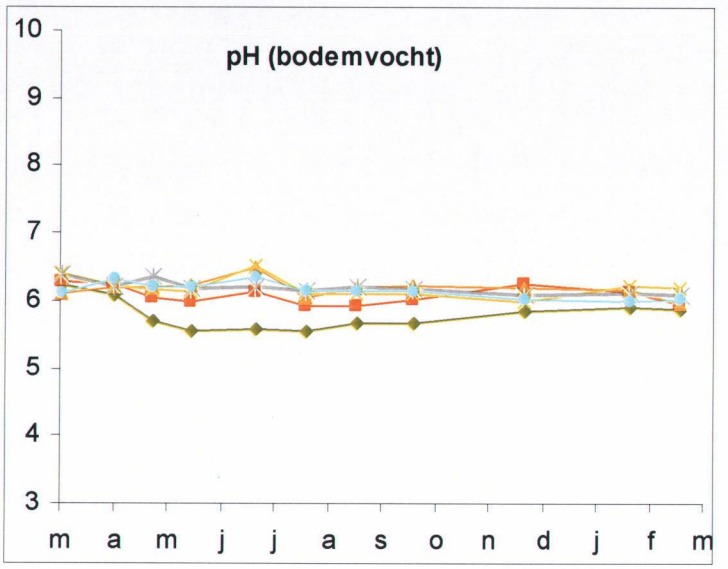
Smolders, A.J.P., Nijboer, R.C. & Roelofs, J.G.M. (1995). Prevention of sulphide accumulation and phosphate mobilization by the addition of iron(II) chloride to a reduced sediment: An enclosure experiment. Freshwater Biology 34: 559-568.

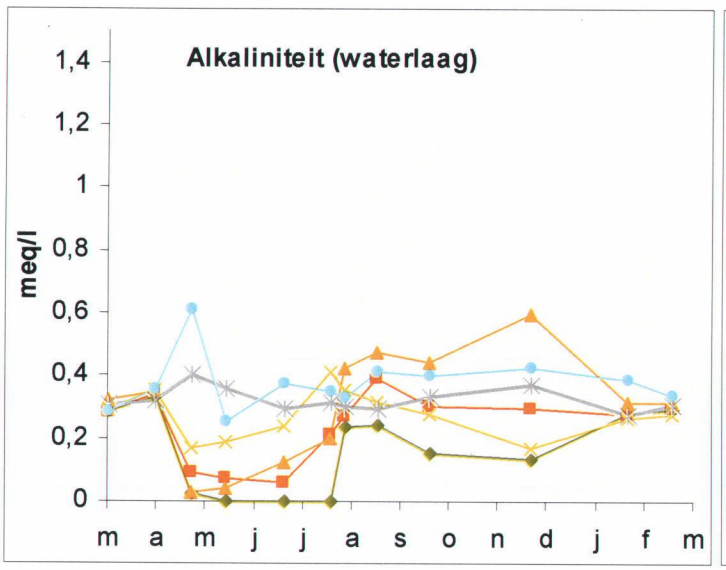
Stumm, W. & Morgan, J.J. (1996). Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters. 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc., New York.

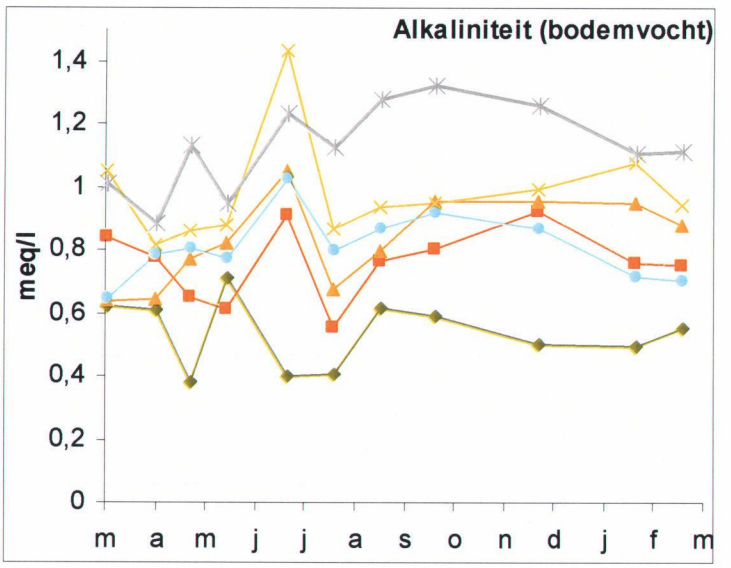
Witteveen+Bos, 2000. Verkenning van de mogelijkheden voor toepassing van actief biologisch beheer in het Uddelermeer.

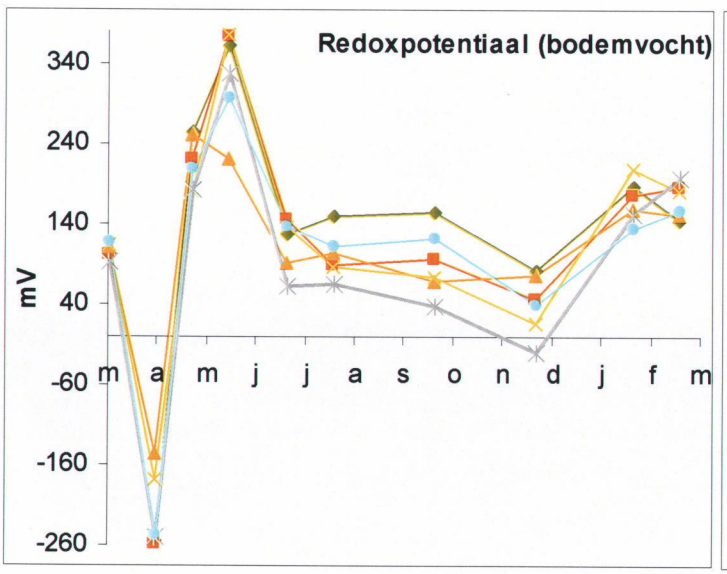
BIJLAGE I Fysisch-chemische gegevens ijzeradditie-experiment

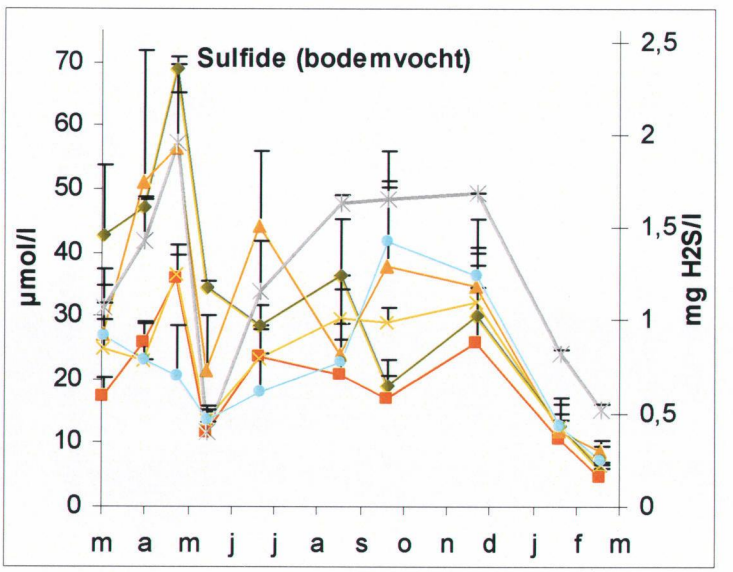

pH (waterlaag)
10
9
8
7
6
5
4
3
m a m j j a s o n d j f m

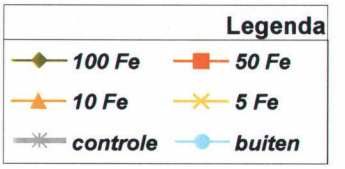

pH (bodemvocht)
10
9
8
7
6
5
4
3
m a m j j a s o n d j f m

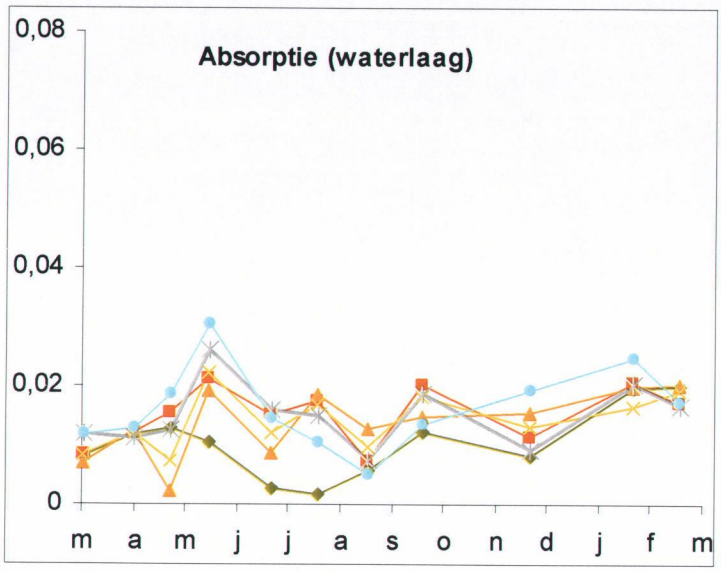

Alkaliniteit (waterlaag)
meq/l
1,4
1,2
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
m a m j j a s o n d j f m

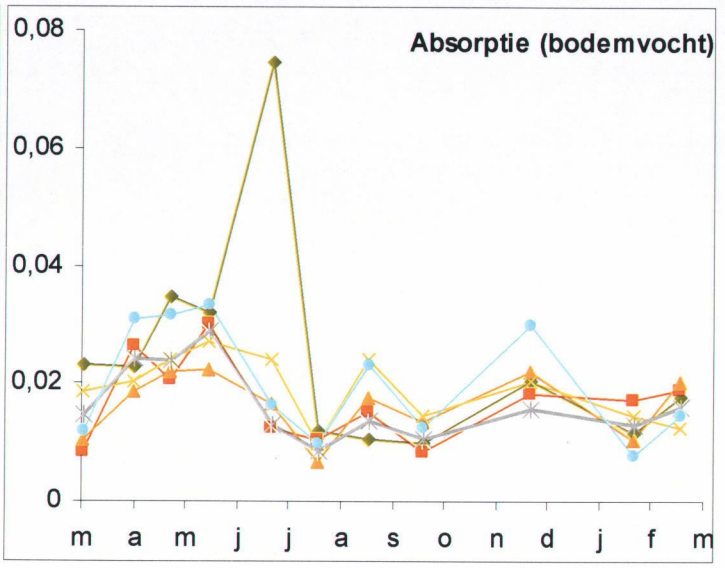

Alkaliniteit (bodemvocht)
meq/l
1,4
1,2
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
m a m j j a s o n d j f m

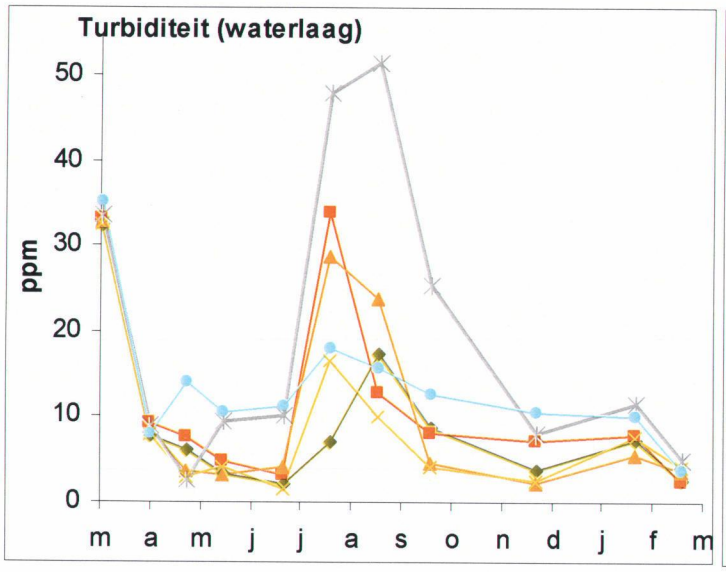

Redoxpotentiaal (bodemvocht)
mV
340
240
140
40
-60
-160
-260
m a m j j a s o n d j f m

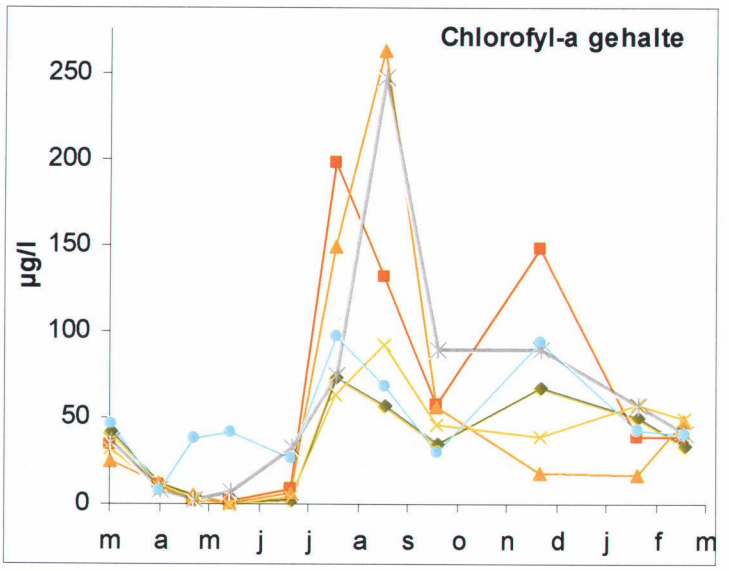

Sulfide (bodemvocht)
µmol/l
mg H2S/l
70
60
50
40
30
20
10
0
2,5
2
1,5
1
0,5
0
m a m j j a s o n d j f m

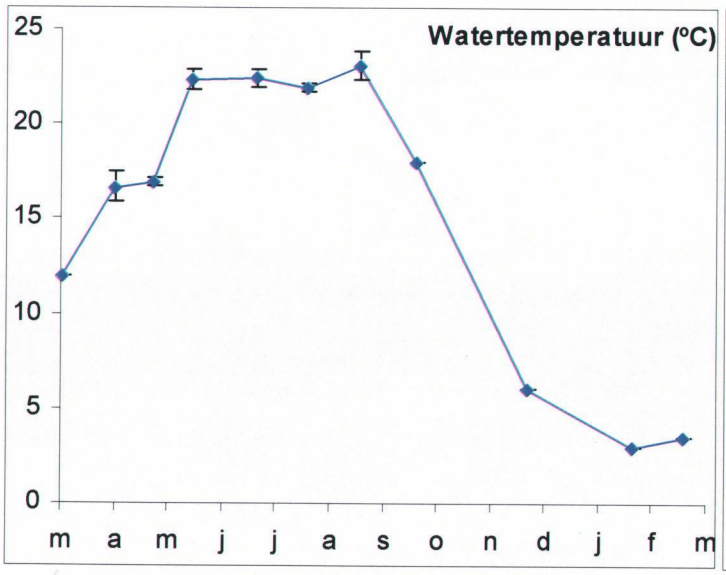

Legenda
100 Fe
50 Fe
10 Fe
5 Fe
controle
buiten

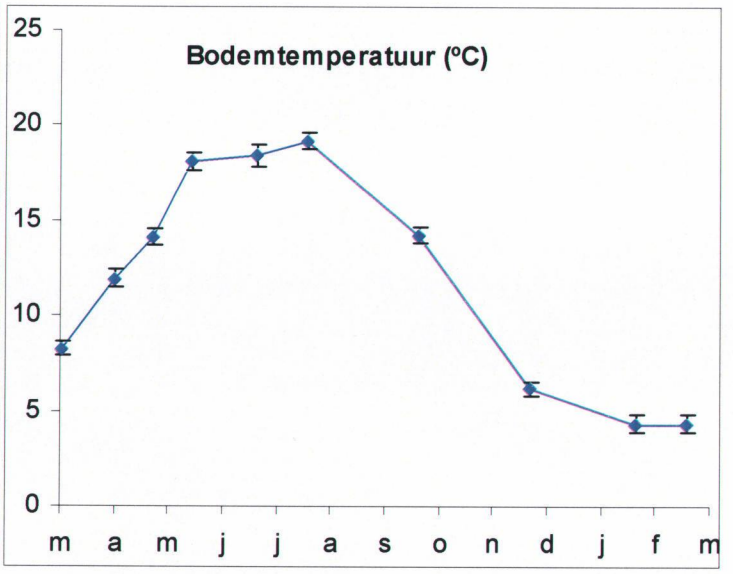

Absorptie (waterlaag)
0,08
0,06
0,04
0,02
0
m a m j j a s o n d j f m

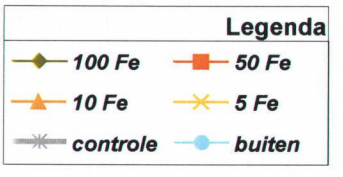

Absorptie (bodemvocht)
0,08
0,06
0,04
0,02
0
m a m j j a s o n d j f m

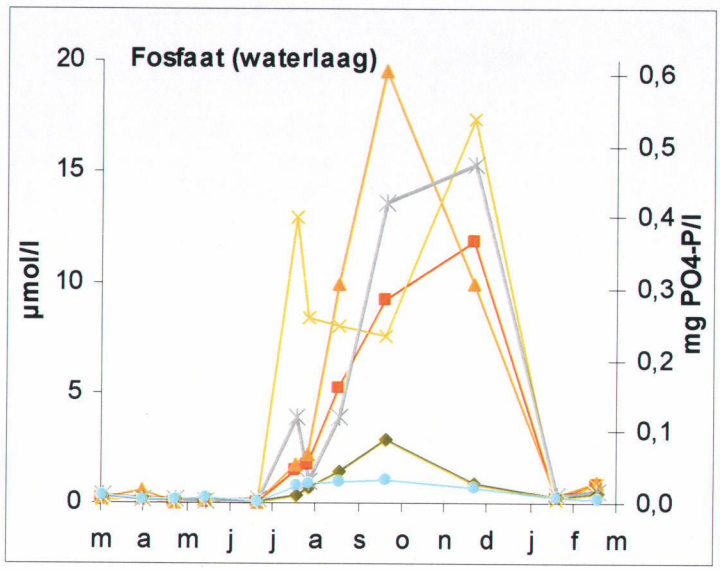

Turbiditeit (waterlaag)
ppm
50
40
30
20
10
0
m a m j j a s o n d j f m

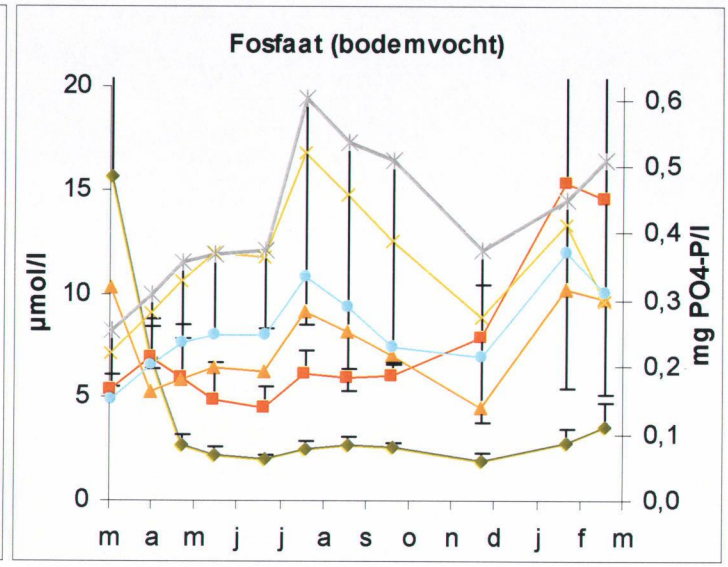

Chlorofyl-a gehalte
µg/l
250
200
150
100
50
0
m a m j j a s o n d j f m

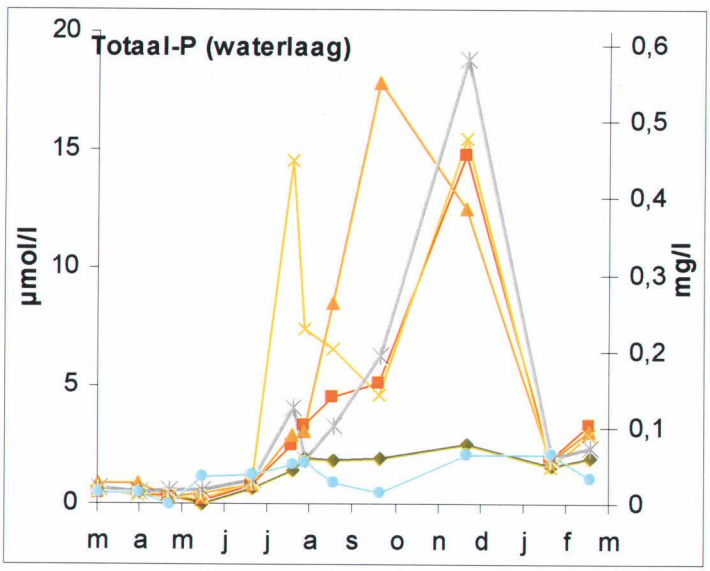

Watertemperatuur (ºC)
25
20
15
10
5
0
m a m j j a s o n d j f m

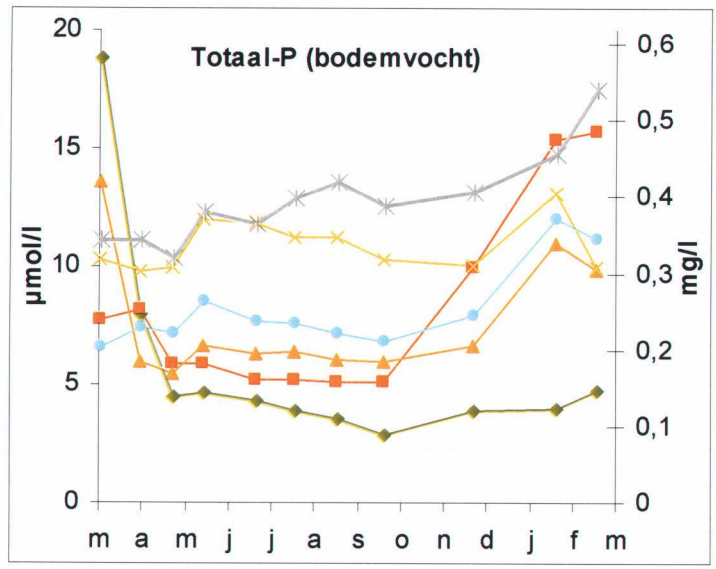

Bodemtemperatuur (ºC)
25
20
15
10
5
0
m a m j j a s o n d j f m

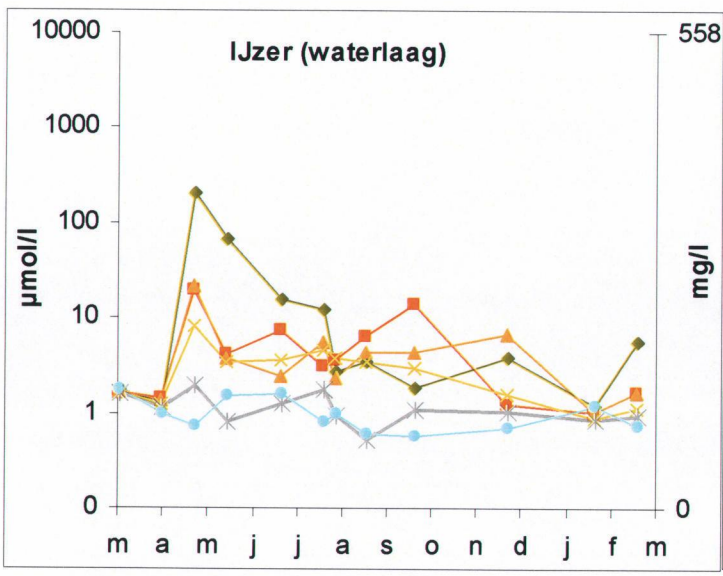

Legenda
100 Fe
50 Fe
10 Fe
5 Fe
controle
buiten

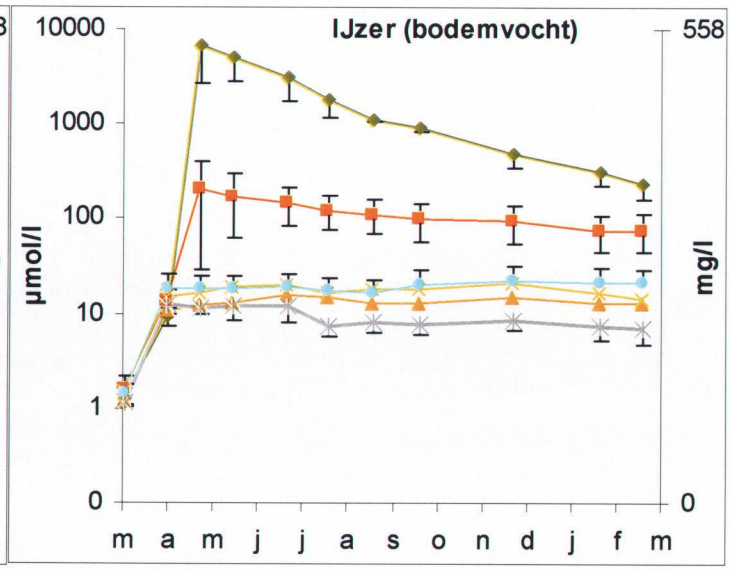

Fosfaat (waterlaag)
µmol/l
mg PO4-P/l
20
15
10
5
0
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0,0
m a m j j a s o n d j f m

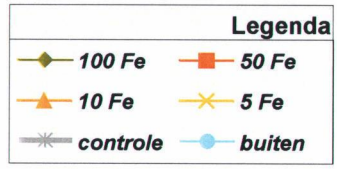

Fosfaat (bodemvocht)
µmol/l
mg PO4-P/l
20
15
10
5
0
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0,0
m a m j j a s o n d j f m

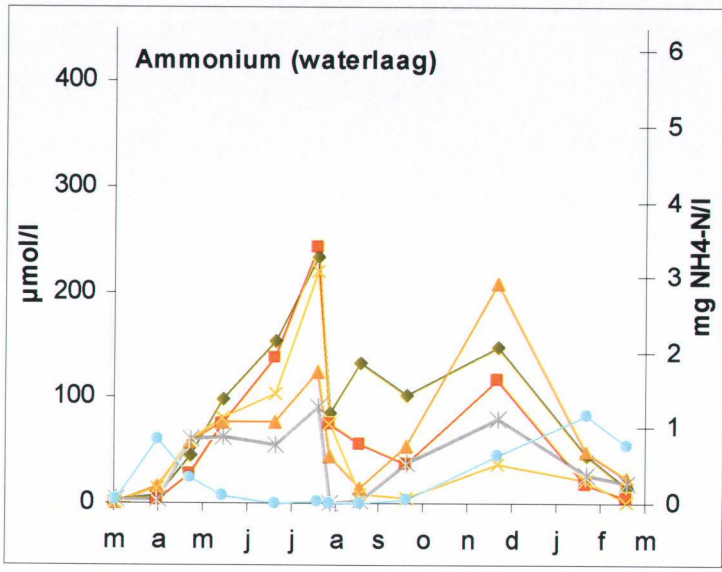

Totaal-P (waterlaag)
µmol/l
mg/l
20
15
10
5
0
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
m a m j j a s o n d j f m

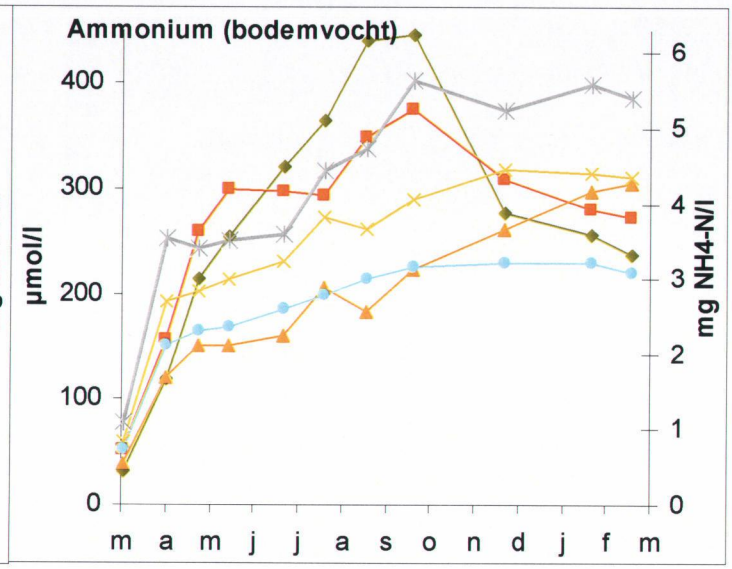

Totaal-P (bodemvocht)
µmol/l
mg/l
20
15
10
5
0
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
m a m j j a s o n d j f m

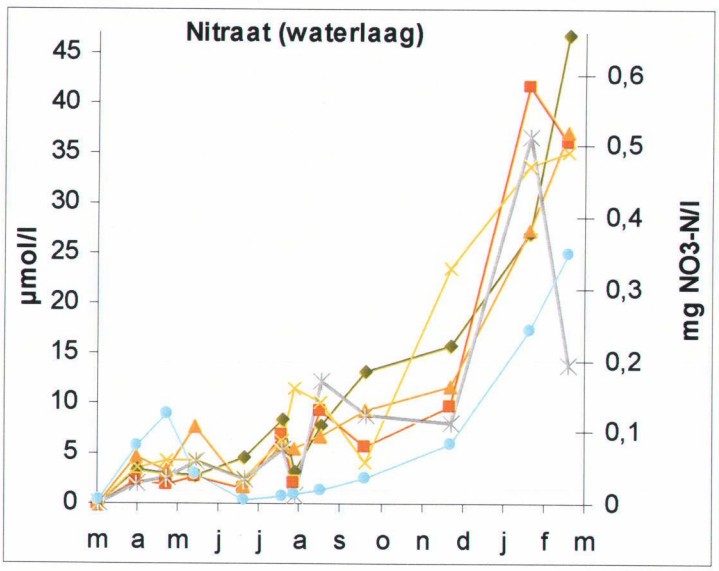

IJzer (waterlaag)
µmol/l
mg/l
10000
1000
100
10
1
0
558
0
m a m j j a s o n d j f m

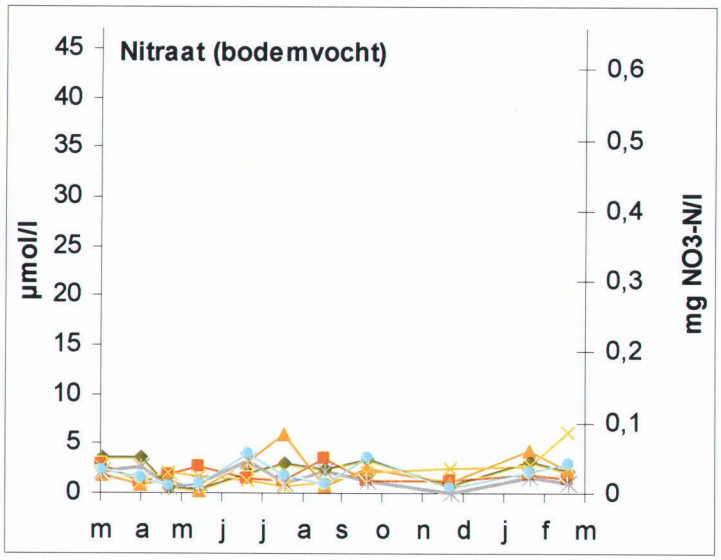

IJzer (bodemvocht)
µmol/l
mg/l
10000
1000
100
10
1
0
558
0
m a m j j a s o n d j f m

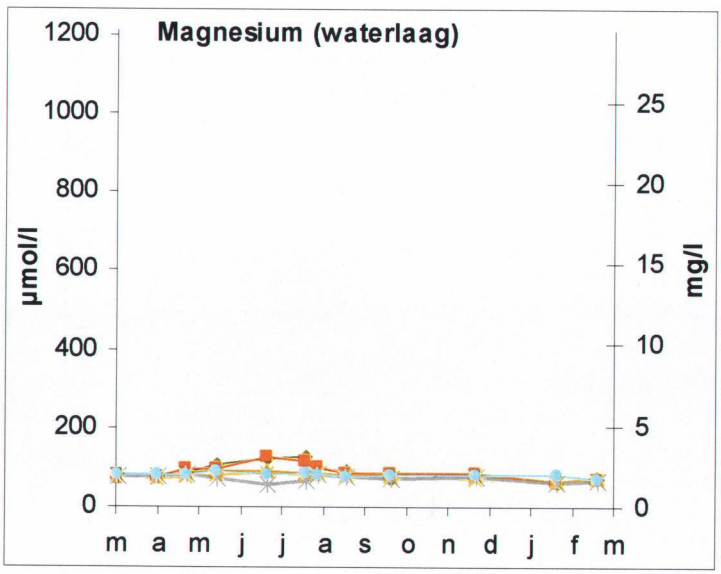

Legenda
100 Fe
50 Fe
10 Fe
5 Fe
controle
buiten

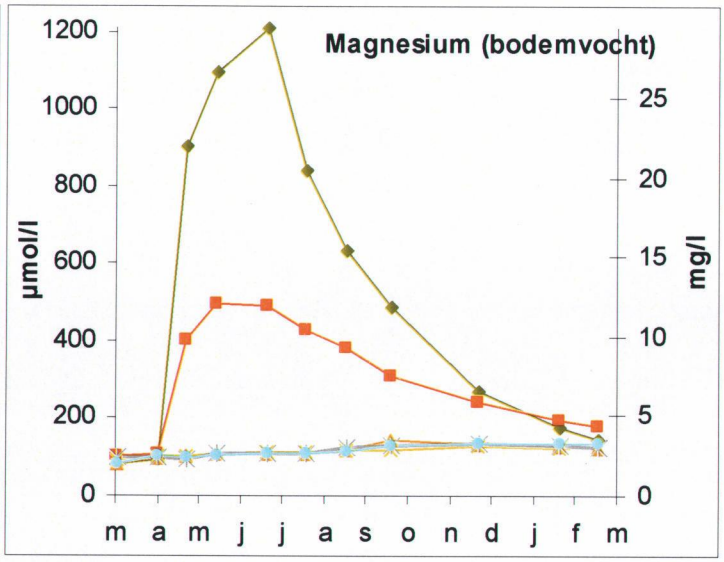

Ammonium (waterlaag)
µmol/l
mg NH4-N/l
0
100
200
300
400
0
1
2
3
4
5
6
m a m j j a s o n d j f m

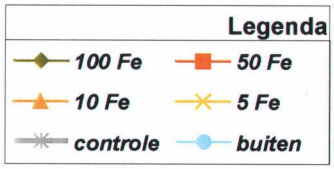

Ammonium (bodemvocht)
µmol/l
mg NH4-N/l
0
100
200
300
400
0
1
2
3
4
5
6
m a m j j a s o n d j f m

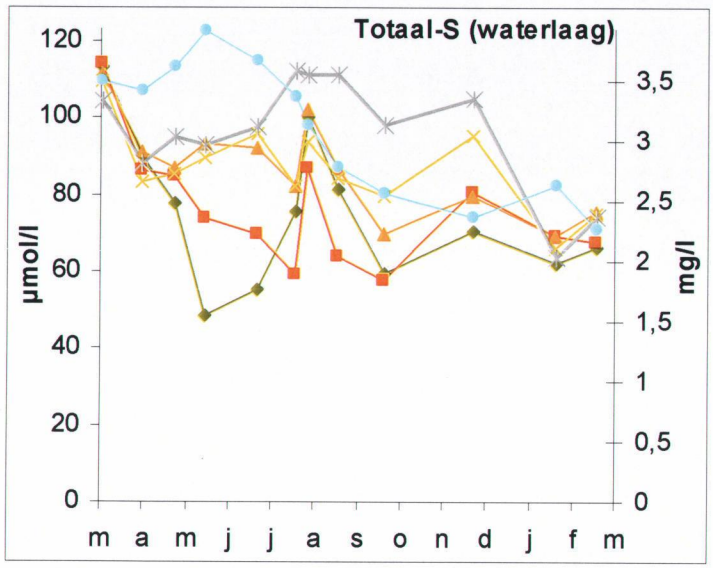

Nitraat (waterlaag)
µmol/l
mg NO3-N/l
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
m a m j j a s o n d j f m

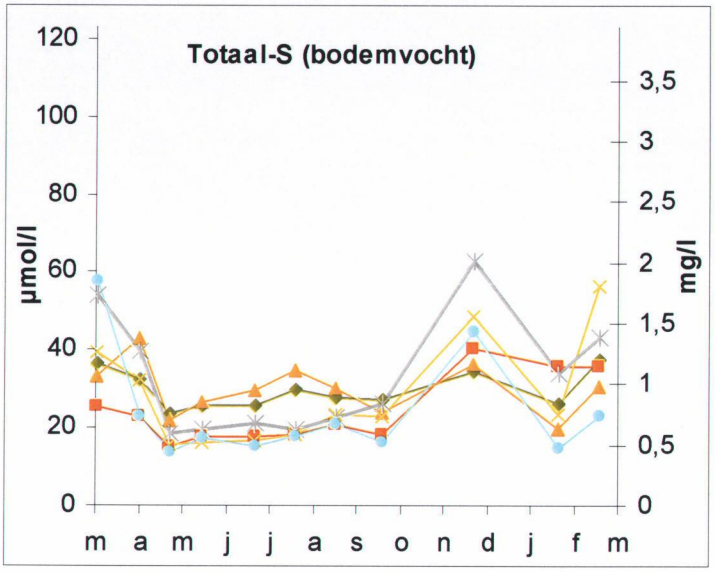

Nitraat (bodemvocht)
µmol/l
mg NO3-N/l
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
m a m j j a s o n d j f m

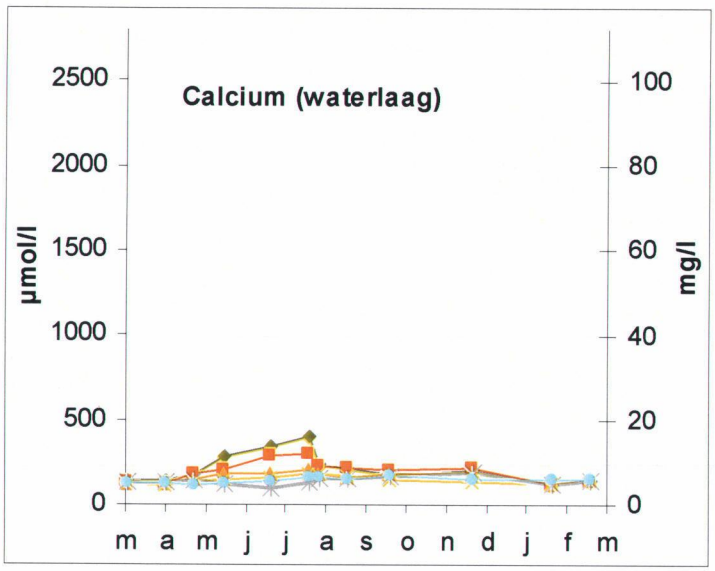

Magnesium (waterlaag)
µmol/l
mg/l
0
200
400
600
800
1000
1200
0
5
10
15
20
25
m a m j j a s o n d j f m

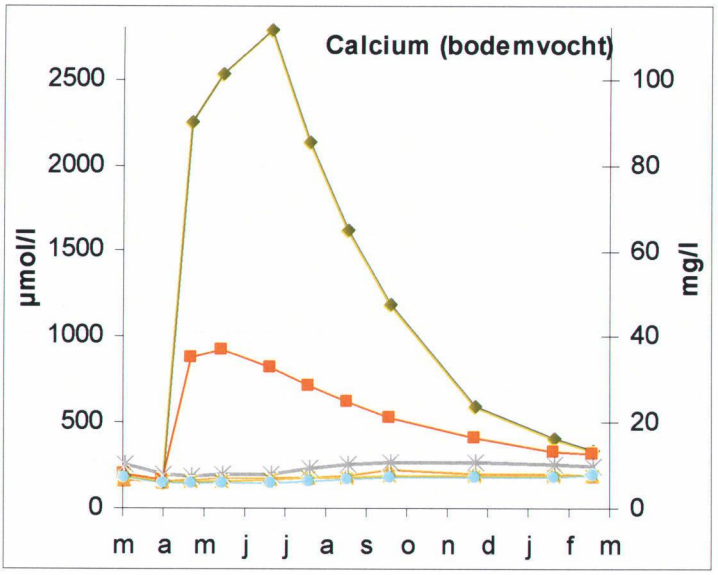

Magnesium (bodemvocht)
µmol/l
mg/l
0
200
400
600
800
1000
1200
0
5
10
15
20
25
m a m j j a s o n d j f m

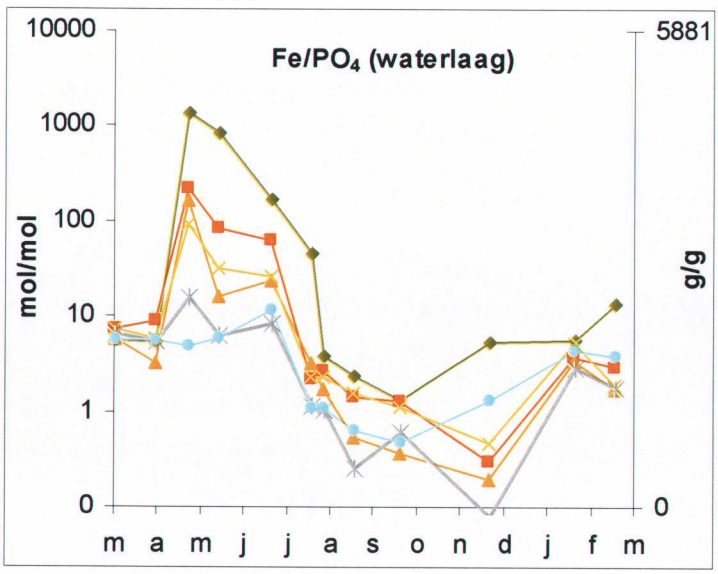

Legenda
100 Fe
50 Fe
10 Fe
5 Fe
controle
buiten

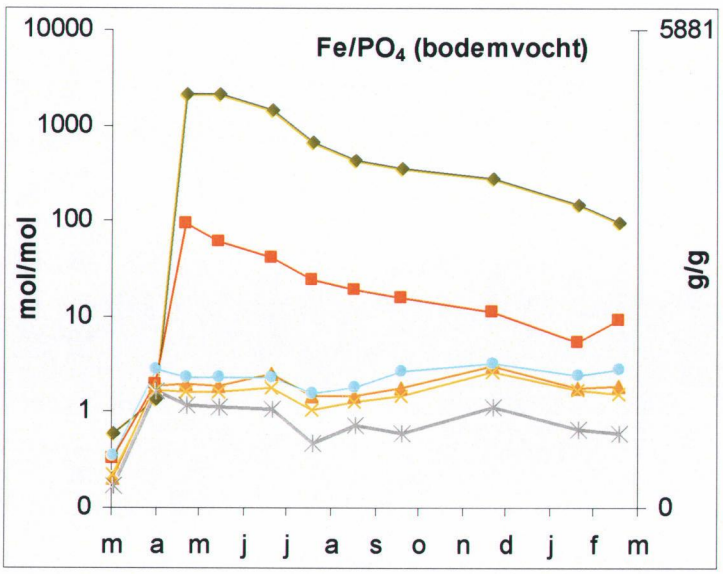

Totaal-S (waterlaag)
µmol/l
mg/l
120
100
80
60
40
20
0
3,5
3
2,5
2
1,5
1
0,5
0
m a m j j a s o n d j f m

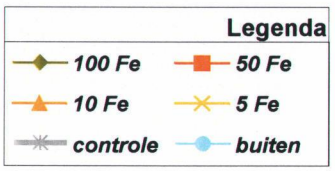

Totaal-S (bodemvocht)
µmol/l
mg/l
120
100
80
60
40
20
0
3,5
3
2,5
2
1,5
1
0,5
0
m a m j j a s o n d j f m

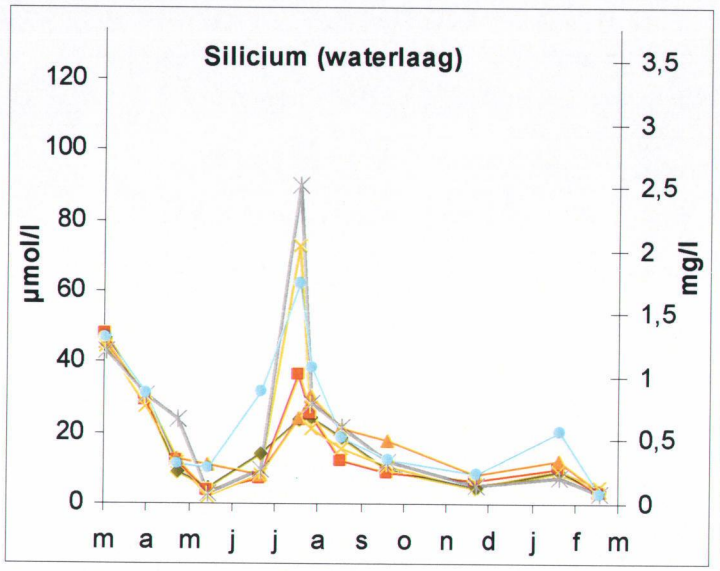

Calcium (waterlaag)
µmol/l
mg/l
2500
2000
1500
1000
500
0
100
80
60
40
20
0
m a m j j a s o n d j f m

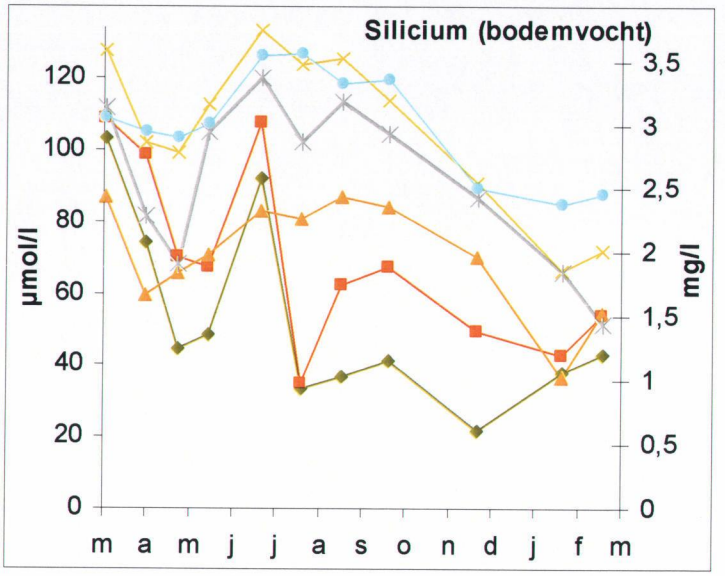

Calcium (bodemvocht)
µmol/l
mg/l
2500
2000
1500
1000
500
0
100
80
60
40
20
0
m a m j j a s o n d j f m

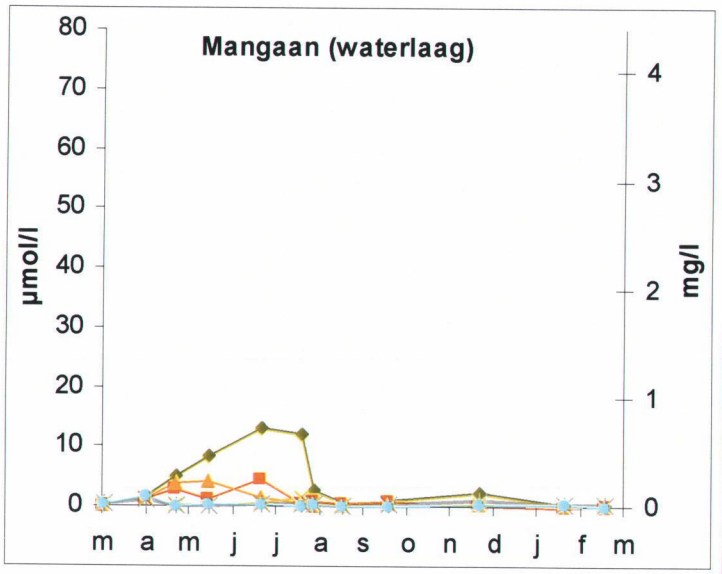

Fe/PO4 (waterlaag)
mol/mol
g/g
10000
1000
100
10
1
0
5881
0
m a m j j a s o n d j f m

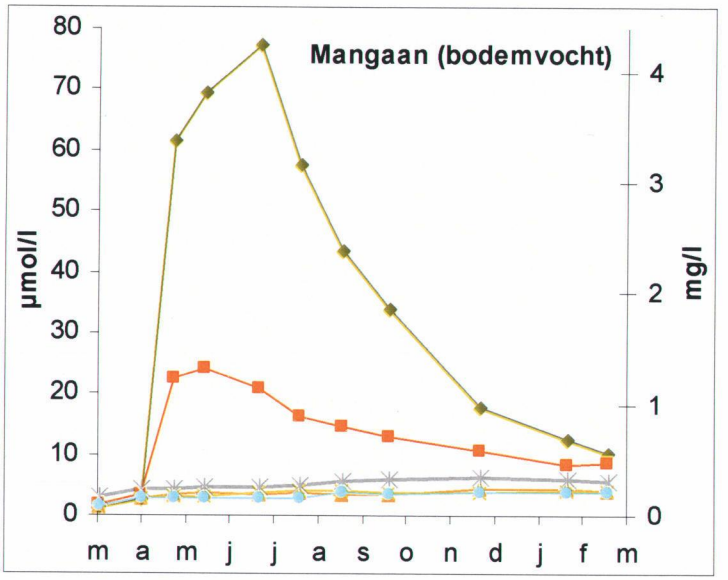

Fe/PO4 (bodemvocht)
mol/mol
g/g
10000
1000
100
10
1
0
5881
0
m a m j j a s o n d j f m

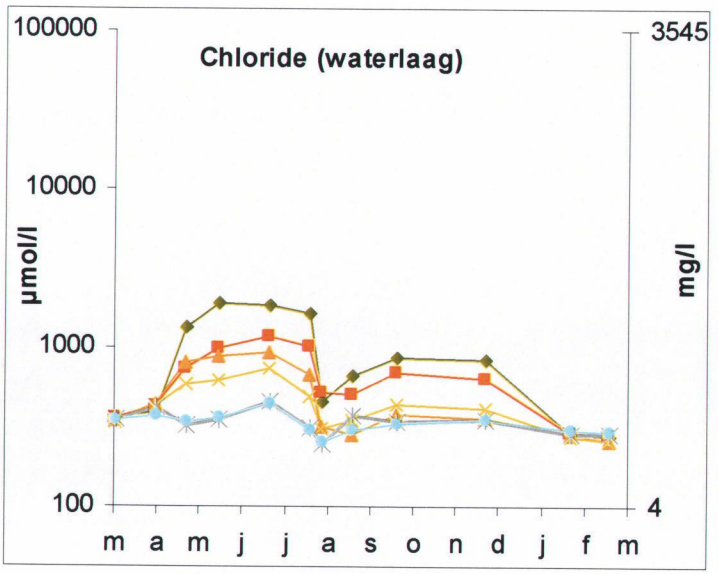

Legenda
100 Fe
50 Fe
10 Fe
5 Fe
controle
buiten

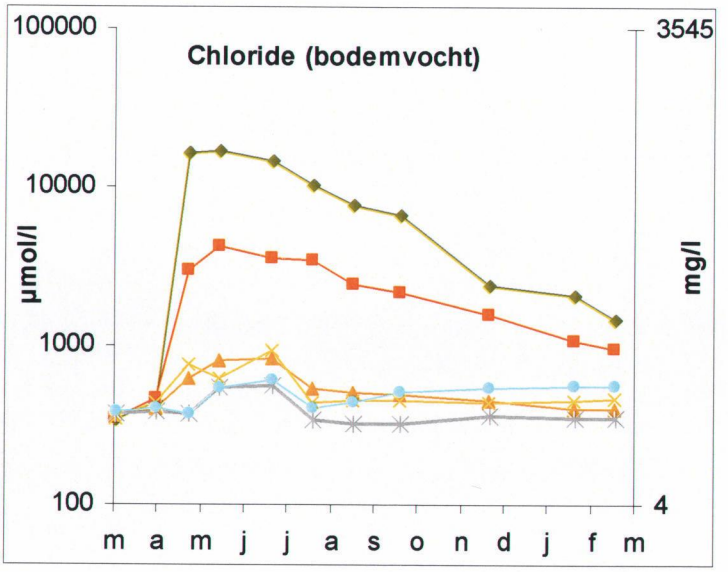

Silicium (waterlaag)
µmol/l
mg/l
0
20
40
60
80
100
120
0
0,5
1
1,5
2
2,5
3
3,5
m a m j j a s o n d j f m

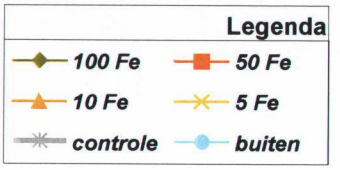

Silicium (bodemvocht)
µmol/l
mg/l
0
20
40
60
80
100
120
0
0,5
1
1,5
2
2,5
3
3,5
m a m j j a s o n d j f m

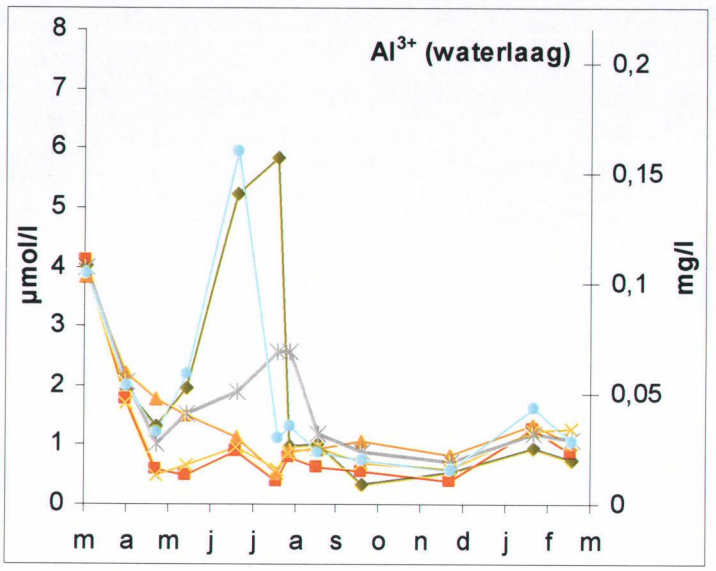

Mangaan (waterlaag)
µmol/l
mg/l
0
10
20
30
40
50
60
70
80
0
1
2
3
4
m a m j j a s o n d j f m

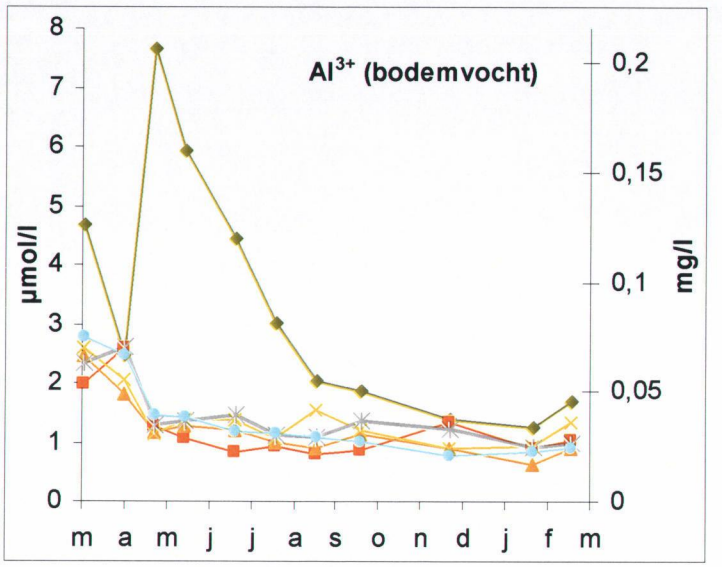

Mangaan (bodemvocht)
µmol/l
mg/l
0
10
20
30
40
50
60
70
80
0
1
2
3
4
m a m j j a s o n d j f m

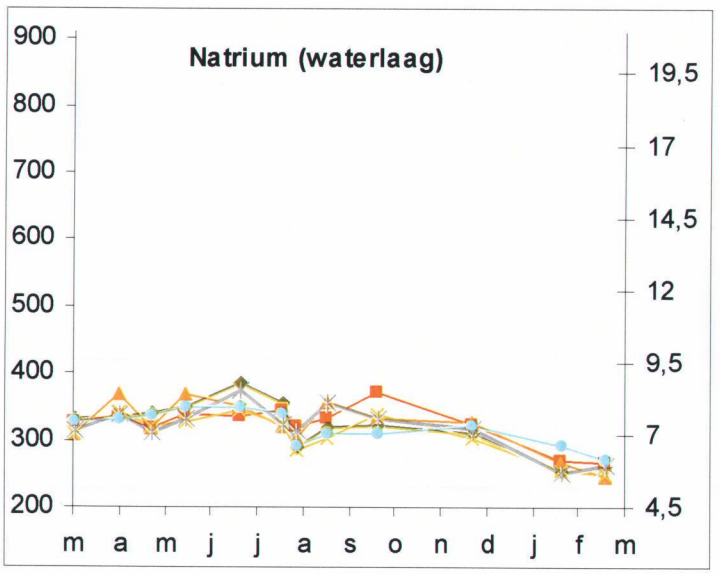

Chloride (waterlaag)
µmol/l
mg/l
100
1000
10000
100000
4
3545
m a m j j a s o n d j f m

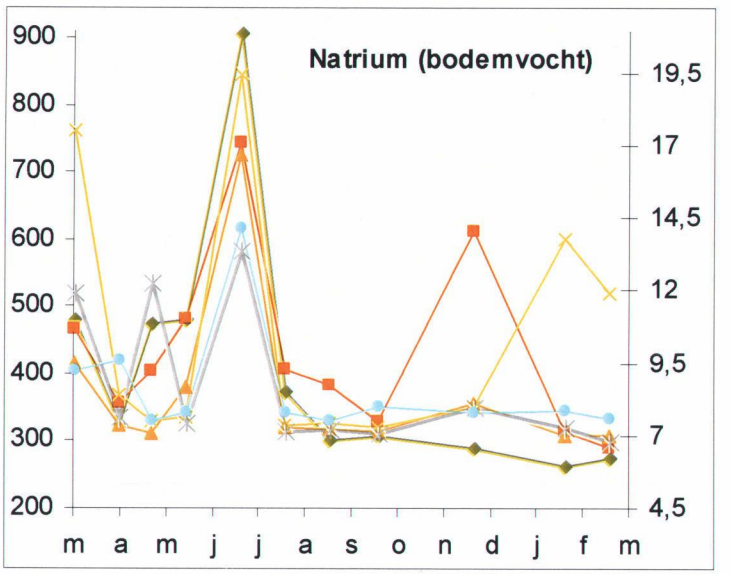

Chloride (bodemvocht)
µmol/l
mg/l
100
1000
10000
100000
4
3545
m a m j j a s o n d j f m

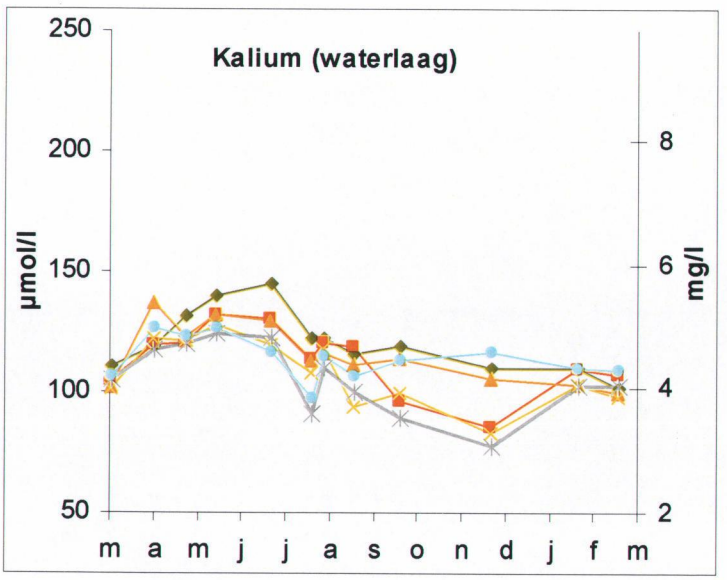

Legenda
100 Fe
50 Fe
10 Fe
5 Fe
controle
buiten

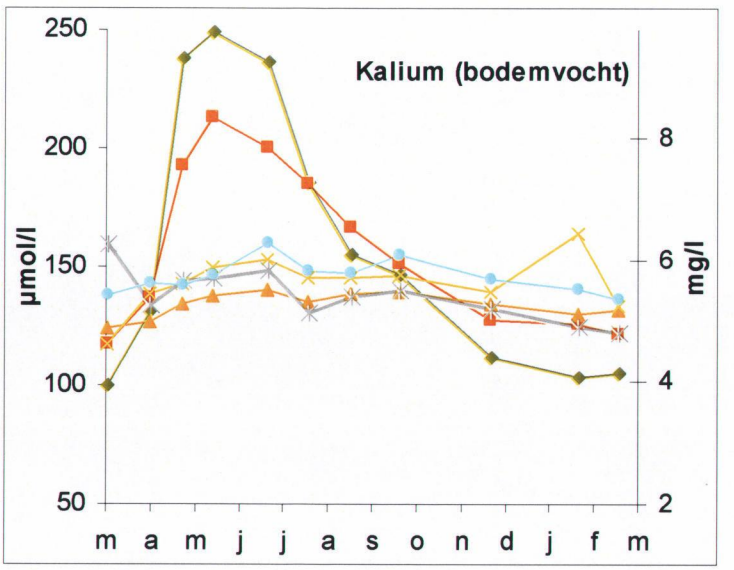

Al3+ (waterlaag)
µmol/l
mg/l
0
1
2
3
4
5
6
7
8
0
0,05
0,1
0,15
0,2
m a m j j a s o n d j f m

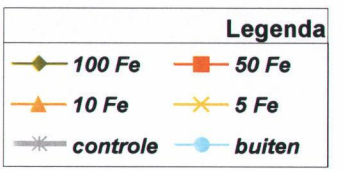

Al3+ (bodemvocht)
µmol/l
mg/l
0
1
2
3
4
5
6
7
8
0
0,05
0,1
0,15
0,2
m a m j j a s o n d j f m

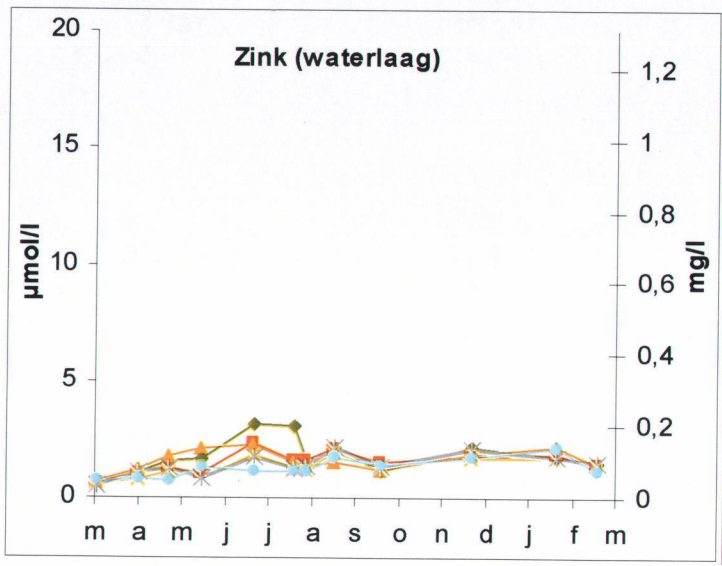

Natrium (waterlaag)
200
300
400
500
600
700
800
900
4,5
7
9,5
12
14,5
17
19,5
m a m j j a s o n d j f m

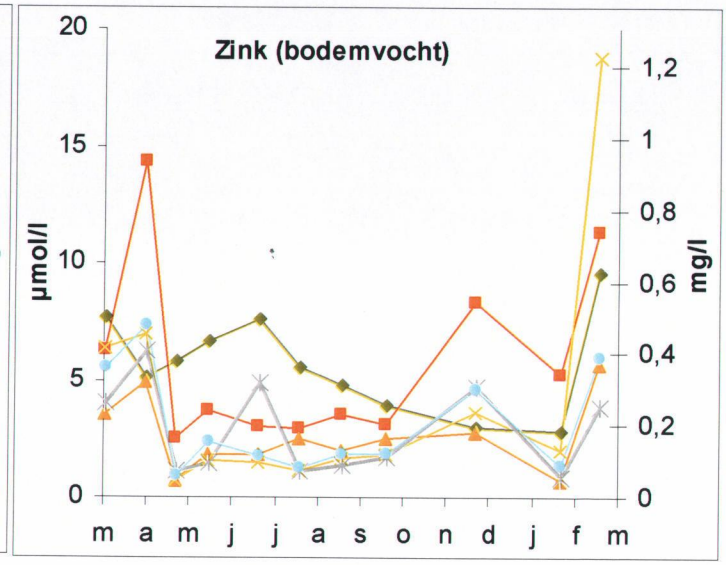

Natrium (bodemvocht)
200
300
400
500
600
700
800
900
4,5
7
9,5
12
14,5
17
19,5
m a m j j a s o n d j f m

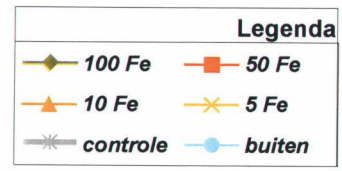

Kalium (waterlaag)
µmol/l
mg/l
50
100
150
200
250
2
4
6
8
m a m j j a s o n d j f m


Kalium (bodemvocht)
µmol/l
mg/l
50
100
150
200
250
2
4
6
8
m a m j j a s o n d j f m


Legenda
100 Fe
50 Fe
10 Fe
5 Fe
controle
buiten


Zink (waterlaag)
µmol/l
mg/l
20
15
10
5
0
1,2
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
m a m j j a s o n d j f m


Zink (bodemvocht)
µmol/l
mg/l
20
15
10
5
0
1,2
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
m a m j j a s o n d j f m


Legenda
100 Fe
50 Fe
10 Fe
5 Fe
controle
buiten