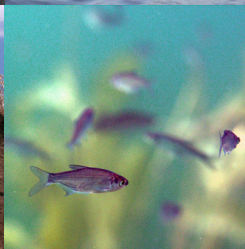


Watersysteemanalyse
Kardingerplas



**Watersysteemanalyse
Kardingerplas**

referentie	projectcode	status
STO170-1-15/strg/002	STO170-1-15	definitief
		datum
		19 april 2013

autorisatie	naam
goedgekeurd	

INHOUDSOPGAVE	blz.
1. INLEIDING	1
1.1. Aanleiding	1
1.2. Doel en resultaat	1
2. METHODE	3
2.1. Hydrologie	3
2.1.1. Waterbalans	3
2.1.2. Externe nutriëntenbelasting	4
2.2. Ecologische sleutelfactoren	5
2.3. Ecologie	8
2.4. PCLake	8
2.5. Uitgangspunten	10
2.5.1. Kenmerken watersysteem	10
2.5.2. Debieten	11
2.5.3. Stofconcentraties	11
3. SYSTEEMANALYSE	13
3.1. Systeembeschrijving	13
3.2. Hydrologie	14
3.2.1. Waterbalans	14
3.2.2. Externe nutriëntenbelasting	17
3.3. Ecologische sleutelfactoren	18
3.3.1. Stoplicht 1: productiviteit water	18
3.3.2. Stoplicht 2: lichtklimaat	28
3.3.3. Stoplicht 3: productiviteit waterbodem	31
3.4. Ecologie	32
3.4.1. Vegetatie	32
3.4.2. Vis	33
3.5. Samenvatting	33
4. PCLAKE	35
4.1. Methode	35
4.2. Resultaten	35
5. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	40
5.1. Ecologisch functioneren Kardingerplas	40
5.2. Beheermaatregelen	40
5.2.1. Verlaging van verblijftijd (niet wenselijk)	40
5.2.2. Beperking van de inlaat	40
5.2.3. Verbeteren kwaliteit inlaatwater	41
5.2.4. Aanbevelingen	42
6. LITERATUUR	44
laatste bladzijde	44
BIJLAGEN	aantal blz.
-	

1. INLEIDING

1.1. Aanleiding

In het project 'toetsing, verbetering en ontsluiting ecologische modellen PCLake en PC-Ditch aan de hand van praktijktoepassingen' werken Witteveen+Bos en NIOO, WUR en PBL samen om de geldigheid en de bruikbaarheid van de modellen te verbeteren. Daarnaast beoogt dit project het vertrouwen in de modellen te vergroten. Dit is als volgt vastgelegd in de projectdoelstelling:

- **vertrouwen in het model:** beoogd wordt het vertrouwen in de modellen te vergroten door 1) toepassing van het model in casestudies en 2) calibratie en validatie op basis van nieuwe datasets;
- **geldigheid:** beoogd wordt de geldigheid van de modellen te verbeteren aan de hand van een inventarisatie van knelpunten en wensen (o.a. nieuwe inzichten, wensen beheerders en wetenschappelijke kennis), een prioritering van knelpunten en wensen en casestudies. Dit vormt input voor wetenschappelijk onderzoek gericht op de belangrijkste knelpunten en wensen. Op basis hiervan worden de modellen aangepast;
- **bruikbaarheid:** beoogd wordt de bruikbaarheid van de modellen te verbeteren door het actualiseren en ontwikkelen van metamodellen en door het ontsluiten van de modellen in een toegankelijke modelomgeving.

Het waterschap Noorderzijlvest heeft aangegeven om met de Kardingerplas als case studie mee te willen doen in dit STOWA-project. Onderliggende rapportage beschrijft deze case studie

1.2. Doel en resultaat

Het doel van de casestudies is een verdere kennismaking met de modellen, een confrontatie van de modellen met specifieke systeemkenmerken en aansluiting van de modellen bij verschillende typen (KRW-)maatregelen en andere relevante kennisvragen vanuit het regionale waterbeheer. De resultaten van de casestudies vormen input voor 2 onderzoeken door promovendi later in het project.

Vanuit waterschap Noorderzijlvest spelen de volgende onderzoeksvragen:

- welke oorzaken liggen ten grondslag aan de blauwalgenproblematiek in de Kardingerplas?
- kan wateraanvoer vanuit een ander water dan het Boterdiep bijdragen aan de verbetering van de waterkwaliteit?
- hoe reageert de Kardingerplas op het beheer? Is er een effect van het maaibeheer op het gedrag van de plas?

Vanuit STOWA spelen de volgende onderzoeksvragen:

- hoe kunnen de modellen PCLake/PCDitch worden toegepast in meren met een beperkt oppervlak?
- is PCLake of PCDitch het meest geschikt voor watersysteemanalyse van kleine meren?
- Is het model PCLake goed toepasbaar voor het voorspellen van blauwalgenbloei?

Het hoofddoel van de studie is om vanuit begrip van het hydrologisch en ecologisch functioneren deze vragen te beantwoorden. PCLake, maar ook een water- en stoffenbalans en een systeemanalyse, zijn hiervoor een middel. Het doel van het onderzoeksproject is om door de case studies meer inzicht te krijgen in het functioneren van PCLake.

2. METHODE

Om een goed begrip te krijgen van het ecologisch en hydrologisch functioneren van de Kardingerplas worden een aantal werkstappen uitgevoerd:

1. analyse hydrologie;
2. analyse op basis van ecologische sleutelfactoren;
3. analyse van de ecologie;
4. toepassing van PCLake.

Elk van deze werkstappen is afhankelijk van, of levert, een essentiële bijdrage voor andere werkstappen. In dit hoofdstuk worden alle werkstappen apart besproken.

2.1. Hydrologie

De eerste stap in een systeemanalyse is het opstellen van een waterbalans. Deze waterbalans moet inzicht geven in de waterstromen van het systeem. Duidelijk moet worden welke waterstromen van belang zijn. Wanneer de debieten bekend zijn, kan daar een nutriëntenconcentratie aan gekoppeld worden waardoor ook de belasting op het watersysteem inzichtelijk wordt gemaakt.

2.1.1. Waterbalans

Waterstromen zijn erg belangrijk in aquatische systemen. In dit rapport worden de waterstromen inzichtelijk gemaakt door waterbalansen op te stellen in Excel. Het doel van deze benadering is om meer grip te krijgen op de water- en stofstromen in een watersysteem.

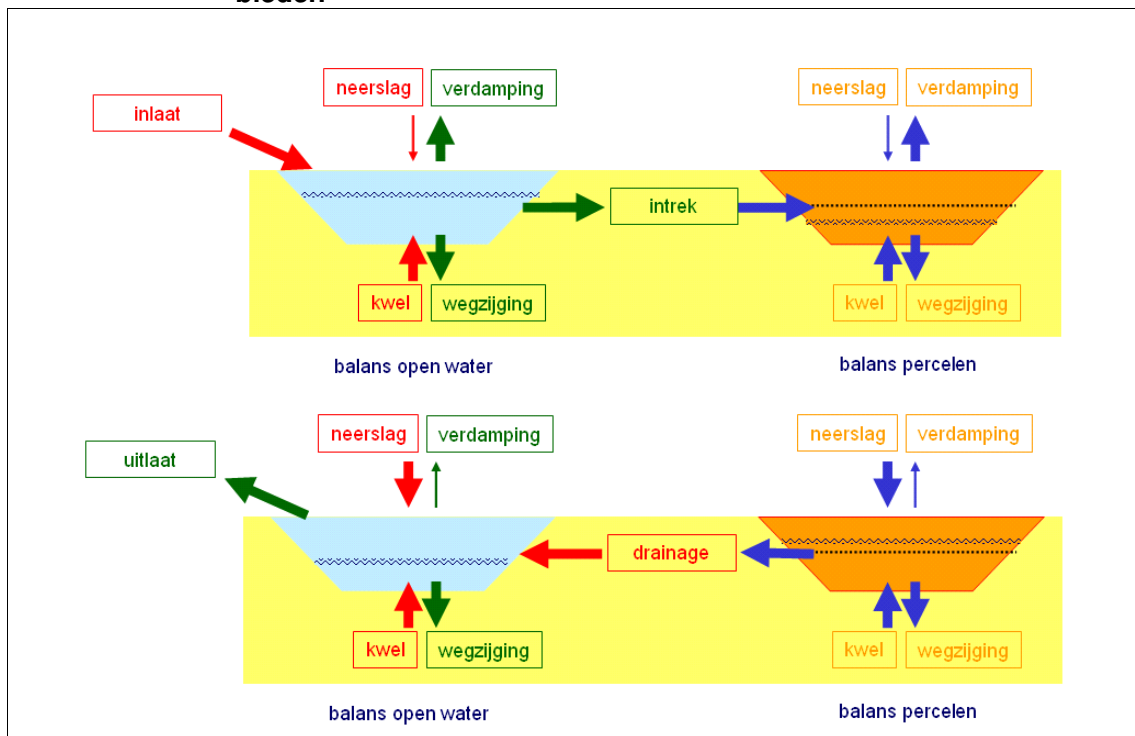
Werking

De waterbalans in Excel geeft met een relatief eenvoudige benadering van de hydrologie een goede indruk van de waterstromen. Elk balansgebied is onderverdeeld in 2 bakjes: 1) open water en 2) percelen. Het uitgangspunt is de balans voor het open water.

Het watertekort- en overschot in de percelen wordt bepaald in het bakje 'percelen' op basis van kwel en wegzijging enerzijds en neerslag en verdamping anderzijds. Als het peil in het bakje boven het evenwichtspeil (gelijk aan streefpeil) uitkomt gaat er water van de percelen naar het open water via drainage/uitspoeling. Andersom gaat er water van het open water naar de percelen door intrek als het peil in het bakje onder het evenwichtspeil uitkomt. Het peil in het bakje 'percelen' wordt dus berekend onafhankelijk van het peil in het open water. Het watertekort- en overschot in het watersysteem wordt bepaald in het bakje open water op basis van 1) kwel en wegzijging, 2) neerslag en verdamping en 3) drainage en intrek. Als het peil in het bakje open water boven het streefpeil + marge uitkomt wordt er water afgevoerd via het gemaal. Andersom wordt er water aangevoerd als het peil in het bakje onder het streefpeil + marge uitkomt.

In afbeelding 2.1 is dit geschematiseerd in een aanvoersituatie (droge zomer) en een afvoersituatie (natte winter). Het waterpeil in de zomer is in vrijwel alle balansgebieden hoger dan in de winter. In het rood is aangegeven welke onderdelen van de waterbalans bepalend zijn voor de chlorideconcentratie en de externe nutriëntenbelasting.

Afbeelding 2.1. Schematische aanvoer- (boven) en afvoersituatie (onder) balansgebieden



Controle waterbalansen

We controleren de waterbalans van een gebied op 3 onafhankelijke manieren:

- waterstand;
- maalstaat;
- chloride.

Of we de balans kunnen controleren hangt af van de beschikbaarheid van de gegevens. Wanneer de balans klopt kunnen afwijkingen tussen berekeningen en metingen ook wijzen op afwijkingen in beheer. Ook kloppen registraties van peilstanden en maalstaten niet altijd. Om de balans de controleren gebruiken we de waterstand, maalstaten en chlorideconcentraties:

- op basis van de waterstand kunnen we zien of de in de waterbalans berekende waterstanden overeenkomen met de daadwerkelijk gemeten waterstand. Deze methode is vooral zinnig als er (significante) peilfluctuaties (>5 cm) worden toegestaan in een watersysteem en de waterstand ook daadwerkelijk is gemeten;
- de maalstaat is een goede controle om te kijken of het gemodelleerde watersysteem vergelijkbaar functioneert als in de praktijk. Wanneer de berekende maalstaat overeenkomt met de geregistreeerde maalstaat, geeft dit vertrouwen in de opgestelde waterbalans;
- chloride is een 'inerte' stof in het watersysteem, dat wil zeggen dat het onder invloed van processen niet verdwijnt of geproduceerd wordt. Het is daarom een goede indicator om de herkomst van het water in een systeem te duiden. Chloride wordt om deze reden gebruikt om de waterbalansen te controleren.

2.1.2. Externe nutriëntenbelasting

Als vervolg op de waterbalans analyseren we de nutriëntenstromen en bepalen we de nutriëntenbelasting op Kardingerplas. Aan elke waterstroom in de waterbalans is hiervoor

een stofconcentratie gekoppeld. Er is onderscheid gemaakt in totaal P en totaal N. De vrachten van relevante stoffen worden bepaald door aan de debieten uit de waterbalans concentraties te koppelen van deze stoffen. De vrachten van alle waterstromen vormen samen de totale externe belasting op het watersysteem. Per waterstroom is aan de hand van meetgegevens, literatuur en expert kennis de concentratie bepaald. De bepaling van deze concentraties is beschreven in paragraaf 2.5.

2.2. Ecologische sleutelfactoren




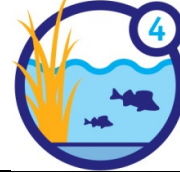
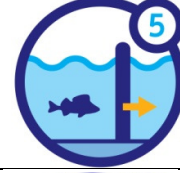




De tweede stap betreft een ecologische systeemanalyse. Hierbij wordt gebruik gemaakt van het concept volgens ecologische sleutelfactoren. De aanpak staat ook wel bekend als stoplichtenmethodiek [lit. 5]. Het is een conceptueel denkraam, waarbij de voorwaarden die bepalend zijn voor een goede ecologische kwaliteit in negen ecologische sleutelfactoren zijn gevat (tabel 2.1). Om tot deze sleutelfactoren te komen, is het ecologisch systeemfunctioneren ontrafeld. Dit heeft geleid tot een beter inzicht in de rol van de diverse ecologische processen op het systeemfunctioneren, waardoor het mogelijk wordt om gerichte maatregelen te treffen en een specifiek onderdeel van het systeemfunctioneren te adresseren. Het verbeterde inzicht in het ecologisch systeemfunctioneren heeft onder andere geleid tot de conclusie dat er sprake is van een volgordelijkheid in de voorwaarden die van belang zijn voor ecologische processen. Bij maatregelen ten behoeve van het ecologisch systeem functioneren kan daardoor pas een duidelijk effect verwacht worden, indien eerst de voorliggende sleutelfactoren op orde zijn.

Aan de hand van de ecologische sleutelfactoren kan worden bepaald wat realistische doelen zijn (welke voorwaarden voldoen, welke niet voldoen en in hoeverre kan een waterbeheerder ingrijpen op deze voorwaarden) en welke maatregelen effectief zijn (welke maatregelen grijpen in op de voorwaarden die meer dan andere voorwaarden ecologisch herstel in de weg staan).

Opgemerkt moet worden dat het conceptueel kader nog in ontwikkeling is. De huidige opzet is gebaseerd op het functioneren van zoete wateren in laag Nederland. In andere typen watersystemen kan een andere volgordelijkheid van toepassing zijn. Toepassing van het conceptueel kader kan tot aanpassingen leiden. Hier is natuurlijk alle ruimte voor.

Het belangrijkste uitgangspunt is dat het watersysteem als geheel wordt beschouwd: er zijn geen grenzen tussen geohydrologie, hydrologie, waterkwaliteit en ecologie. Een ander belangrijk uitgangspunt is dat het ecologisch functioneren zo veel als mogelijk wordt vereenvoudigd, terwijl toch recht wordt gedaan aan gebiedspecifieke verschillen. Ten slotte is een belangrijk uitgangspunt dat verschillende (KRW-)soortgroepen een plaats krijgen in het kader. De belangrijkste keuzes die hieruit voort zijn gekomen worden hieronder toegelicht.

Tabel 2.1. Ecologische sleutelfactoren (ESF's)

rang	ESF	bepalende factoren	symbool
Cluster I: voorwaarden voor ondergedoken waterplanten			
1	productiviteit water	verblijftijd externe nutriëntenbelasting kritische nutriëntenbelasting	
2	licht	onder andere humuszuren, kleideeltjes, verontreinigingen, aanwezigheid vis, scheepvaart	
3	productiviteit bodem	productiviteit, toxische condities in waterbodem (sulfide, ammoniak)	
Cluster II: voorwaarden voor specifieke gemeenschappen (planten, macrofauna, vis)			
4	habitatgeschiktheid	onder ander substraat, stromingscondities, waterkwaliteit (samenstelling macro-ionen)	
5	verspreiding	aanwezigheid restpopulaties, migratiemogelijkheden	
6	verwijdering	beheer en onderhoud, vraat	
Cluster III: organische belasting, toxiciteit en beleving			
7	organische belasting	organische belasting	
8	ecotoxiciteit	aanwezigheid milieuvreemde stoffen	
9	beleving		

Waterplanten centraal

Ondergedoken waterplanten staan centraal in de stoplichtenmethodiek, omdat ze een cruciale rol spelen in het ecologisch functioneren van watersystemen. Andere soorten (macrofauna, vis) zijn in belangrijke mate afhankelijk van waterplanten en ondergedoken waterplanten concurreren met algen en/of kroos om de beschikbare nutriënten. Net als ondergedoken waterplanten profiteren oeverplanten van een goede waterkwaliteit. De potenties voor oeverplanten, macrofauna en vis worden voor een belangrijk deel al indirect meegenomen. Potenties voor specifieke soorten (water- en oeverplanten, macrofauna en vis) spelen op standplaatsniveau.

Het uitgangspunt is dat de ecologische kwaliteit toeneemt in de volgorde: plantenarme wateren (algen, kroos), eenzijdige hoog productieve plantengemeenschap (Waterpest, Grof hoornblad), diverse of specifieke laag productieve plantengemeenschap (Kranswieren, Fonteinkruiden).

Hiërarchie in voorwaarden

Er is uitgegaan van een hiërarchie in de voorwaarden voor plantengroei. De belangrijkste en eerste voorwaarde voor plantengroei is voldoende licht op de bodem. Het belangrijkste potentiële knelpunt hiervoor is de aanwezigheid van algen of kroos veroorzaakt door een te hoge externe belasting met nutriënten. Als de belasting voldoet kunnen bijvoorbeeld zwevend stof en kleuring voor verstoring van het lichtklimaat zorgen. Pas als er voldoende licht op de bodem valt, kan de beschikbaarheid van nutriënten in de waterbodem een knelpunt vormen.

Schaalniveau: watersysteem centraal

In de stoplichtenmethodiek is het watersysteem het uitgangspunt, omdat wordt aangenomen dat gebieden op dit schaalniveau over het algemeen als een 'ecologische eenheid' functioneren. De hydrologische omstandigheden in watersystemen vormen een belangrijke randvoorwaarde voor standplaatscondities. Ze bepalen bijvoorbeeld wat de hydraulische belasting (=toestroom van water in mm/d) van een watersysteem is, welke stoffen worden aangevoerd en welke processen plaatsvinden op het raakvlak van water en bodem. Tegelijkertijd zijn deze omstandigheden afhankelijk van de plantengroei. In watergangen die vol staan met Waterpest en Grof Hoornblad, kan de af- en aanvoer van water problematisch worden door een hogere weerstand.

In deze studie worden alleen de eerste 3 stoplichten behandeld omdat deze stoplichten de voorwaarden zijn voor de aanwezigheid en samenstelling van ondergedoken waterplantgemeenschappen. Hieronder wordt de benadering van deze stoplichten toegelicht.

ESF 1: productiviteit water



De basis voor dit stoplicht is een vergelijking van de externe P-belasting met de kritische P-belasting. De externe P-belasting is per watersysteem bepaald aan de hand van een waterbalans en aan bronnen toegekende P-concentraties. De kritische P-belasting is per watersysteem bepaald op basis van (het metamodel) PCLake, waarbij uitgegaan is van de kenmerken diepte, debiet, bodemtype en strijklengte. Het debiet is bepaald op basis van de waterbalans. De diepte is bepaald op basis van ontvangen gegevens en de gemiddelde waterdiepte die in de waterbalans berekend wordt. Het bodemtype is zand, omdat de plas is afgedekt met 30 cm zand. De strijklengte is bepaald op basis van een kaart.

ESF 2: licht



Dit stoplicht richt zich op de lichtval op de bodem. Hierbij wordt de huidige lichtval op de bodem afgezet tegen de lichtval die minimaal nodig is voor de ontwikkeling van ondergedoken vegetatie. Om vast te stellen of de lichtval voldoende is, wordt uitgegaan van de vuistregel dat voor kieming en groei van ondergedoken waterplanten 4 % van het invallende licht moet doordringen tot op de bodem. Hiervan is sprake bij een doorzicht/diepte verhouding van 0,6 [onder andere [lit. 3]]. Deze vuistregel is afgeleid van de formule van Lambert-Beer: $I_z / I_0 = e^{-kz}$, waarbij het percentage licht op de bodem wordt bepaald op basis van de straling aan de oppervlakte (I_0) en de straling op diepte z (I_z).

ESF 3: productiviteit bodem



De basis voor dit stoplicht is de verhouding tussen fosfor, zwavel en ijzer in de bodem. In het onderzoeksproject BaggerNut [lit. 4] is een quickscan ontwikkeld die eenvoudig inzicht geeft in de potentie voor nalevering. Hierbij bepaald de hoeveelheid aanwezig ijzer de mogelijkheid van binding van nutriënten en de hoeveelheid zwavel de concurrentie van binding met de aanwezige fosfor. Daarnaast wordt met PCLake gekeken naar de ontwikkeling van de sliblaag als gevolg van externe belasting. Dit geeft in indruk van invloed van externe belasting op interne nalevering.

2.3. Ecologie

Na de analyse op basis van de ecologische sleutelfactoren, waarbij gekeken wordt naar de voorwaarden, wordt gekeken welke soorten of soortgroepen (planten, vissen) daadwerkelijk voorkomen. Door deze analyse kan het opgebouwde beeld van het watersysteem bevestigd of juist genuanceerd worden

2.4. PCLake

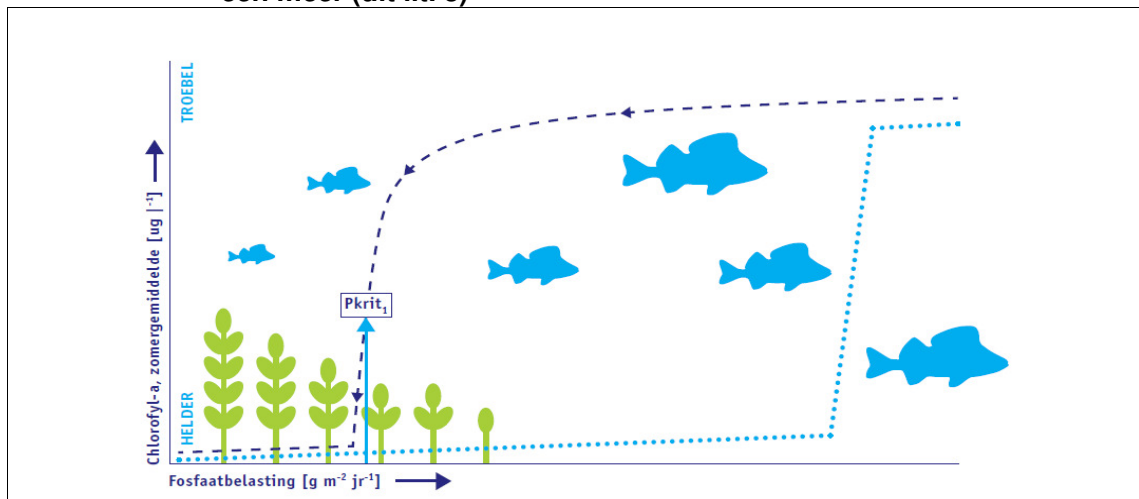
Als laatste stap van de analyse wordt een modellering met PCLake gedaan. Dit geeft een (modelmatig) beeld van het ecologisch functioneren van de plas. Meren, plassen, boezems en sloten kunnen verschillende verschijningsstoelstanden hebben. Voor meren is dat helder en plantenrijk aan de ene kant, en troebel en algenrijk aan de andere kant. De drijvende kracht achter de omslag van helder (oorspronkelijk waren de meeste wateren helder) naar troebel of kroosrijk is de toename van de nutriëntenbelasting, vooral fosfor.

De P-belasting waarbij het systeem omslaat noemen we de 'kritische P-belasting'. Voor de berekening van de kritische P-belasting is PCLake ingezet. In wateren bepaalt de inkomende nutriëntenbelasting en niet de concentratie dus voor een belangrijk deel het ecologisch functioneren van het watersysteem. Via de uitlaat van water verlaten nutriënten natuurlijk ook het watersysteem. Het verdwijnen van voedingsstoffen op deze wijze heeft echter geen invloed op het ecologisch functioneren van het systeem, maar is juist een resul-

tante van het functioneren van het systeem: de (voedselweb)processen in het systeem bepalen uiteindelijk de nutriëntenconcentraties in het uitlaatwater.

Bij meren werkt het zo dat er een interne weerstand bestaat tegen het omslaan van de heldere naar de troebele toestand. De omslag van helder naar troebel vindt plaats bij een veel hogere fosforbelasting dan de weg terug van troebel naar helder (afbeelding 2.2). Voedselwebrelaties tussen algen, waterplanten, watervlooien, vissen en de bodem spelen hierin een centrale rol. Als gevolg van dit zogenaamde hysterese-effect hebben meren 2 kritische grenzen [lit. 1].

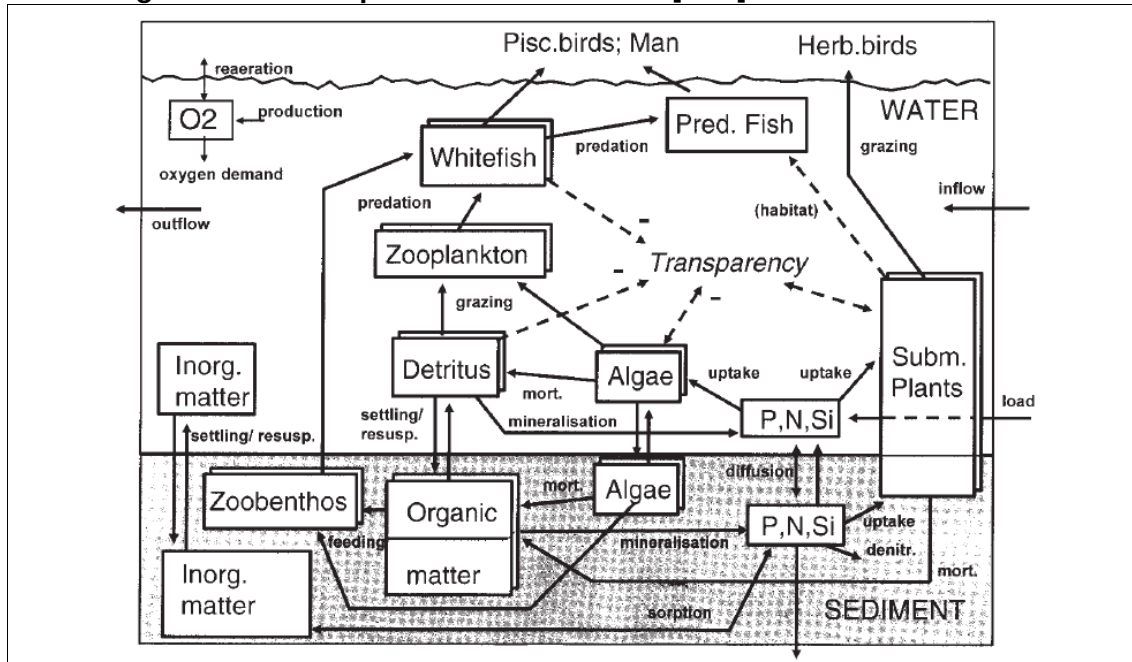
Afbeelding 2.2. Alternatieve stabiele toestanden in relatie tot de fosforbelasting van een meer (uit lit. 3)



De fosforbelasting wordt uitgedrukt in gram P per vierkante meter wateroppervlak per jaar ($\text{g}/\text{m}^2/\text{jaar}$). Naast fosforbelasting is ook de verblijftijd van belang voor de toestand waarin een watersysteem zich bevindt. Bij korte verblijftijden (minder dan 1-3 weken) gaat het principe van de alternatieve toestanden namelijk niet meer op. Bij korte verblijftijden stroomt het water zo snel door de sloten of meren dat processen nagenoeg geen invloed meer hebben op de waterkwaliteit. We spreken dan van 'verblijftijdgestuurde systemen'. Algen hebben in dergelijke systemen te weinig tijd om te groeien. Desondanks kan het water troebel zijn door bijvoorbeeld de opwerveling van slibdeeltjes of door algen die al in het aanvoerwater aanwezig zijn. Dus ook in een verblijftijd gestuurd systeem kan het water helder dan wel troebel zijn, maar het wordt daar niet gestuurd door de fosforbelasting. Bij verblijftijden groter dan 1-3 weken is dit wel het geval. We spreken dan van 'procesgestuurde systemen'.

Het ecologische model PCLake [lit. 2] simuleert de primaire productie (algen, waterplanten), het bijbehorende voedselweb en de uitwisseling van stoffen (C, N en P) tussen de abiotische en biotische compartimenten (afbeelding 2.3). De concrete invulling van het model is afgestemd op het type watersysteem waar het model voor ontwikkeld is. PCLake simuleert de belangrijkste ecologische processen in ondiepe meren (<4 m).

Afbeelding 2.3. Modelcomponenten voor PCLake [lit. 2]



2.5. Uitgangspunten

In deze paragraaf worden de uitgangspunten besproken die gebruikt zijn in de water- en stoffenbalans en de PCLake analyse (randvoorwaarden, configuratie, hydrologische relaties). Deze uitgangspunten zijn bepaald op basis van GIS gegevens, informatie vanuit het waterschap en eerder onderzoek in de Kardingerplas. Daarnaast worden meetgegevens en kentallen gebruikt om de modellen te voeden en wordt de invloed van de uitgevoerde maatregelen in de tijd opgenomen. Hieronder staat een overzicht van alle uitgangspunten.

2.5.1. Kenmerken watersysteem

In tabel 2.2 zijn de eigenschappen van het meer weergegeven zoals deze in de systeem-analyse gebruikt worden. Naast de Kardingerplas zelf wordt ook het helofytenfilter aan de noordkant van de plas meegenomen in deze studie. Dit helofytenfilter heeft als doel om het ingaande water nutriëntenarmer te maken. Het helofytenfilter is belangrijk in dit onderzoek, omdat het inzicht geeft in het debiet en de waterkwaliteit van het water dat de Kardingerplas instroomt.

Tabel 2.2. Gegevens systeem Kardingerplas

parameter	helofytenfilter	Kardingerplas	eenheid	bron
wateroppervlak	16.443	82.713	m ²	GIS
landoppervlak verhard	0	4.853	m ²	GIS
landoppervlak onverhard	5.481	32.102	m ²	GIS
aandeel water	75	0,51	%	GIS
gemiddelde diepte	0,30	1,30	m	bodemkaart+stuwpeil
strijklengte	n.v.t.	300	m	GIS
streefpeil	-1,24	-1,23	m NAP	waterschap
bovengrens (jaarrond)	-1,24	-1,23	m NAP	waterschap
ondergrens (jaarrond)	-1,28	n.v.t.	m NAP	
Sedimenttype	n.v.t.	Zand	-	waterschap
aandeel moeras	n.v.t.	0	%	

2.5.2. Debieten

Neerslag en verdamping

Het KNMI houdt al geruime tijd nauwkeurig bij hoeveel neerslag er is gevallen en wat de verdamping op een dag is geweest. Voor het gebruik van de waterbalans zijn de neerslag- en verdampingsreeksen gebruikt van station Eelde vanaf 1996 tot en met 2012 (tabel 2.3).

Kwel en wegzijging

De kwel en wegzijging zijn gebaseerd op de door het waterschap aangeleverde kwelkaart. Per waterbalansbakje (water, onverhard, en onder verhard) is het gemiddelde bepaald van de kwel.

In- en uitlaat

Volgens opgave van het waterschap staat in de zomer het gemaal dagelijks aan zodat er 350 m³/dag aan water het helofytenfilter ingepompt werd. In 2012 is geprobeerd de waterinlaat te beperken zodanig dat er geen water de plas in stroomde. De maximale inlaatcapaciteit van gemaal Potslikker is 4200 m³/dag. De aflaatcapaciteit is niet bekend. In de waterbalans is daarom aangenomen dat de capaciteit geen belemmering vormt voor de afvoer.

Tabel 2.3. Overzicht debieten van de waterstromen

Waterstroom	helofytenfilter	Kardingerplas	eenheid	bron
neerslag	tijdreeks	tijdreeks	mm/dag	KNMI
verdamping	tijdreeks	tijdreeks	mm/dag	KNMI
kwel - water	0,0	0,02	mm/dag	kwelkaart waterschap
kwel - onder verhard	0,0	-0,04	mm/dag	kwelkaart waterschap
kwel - onverhard	0,0	-0,01	mm/dag	kwelkaart waterschap
inlaat	350	350	m ³ /dag (zomer)	waterschap
maximale inlaatcapaciteit	4200	0	m ³ /dag	waterschap
maximale uitlaat capaciteit	n.v.t.	n.v.t.	m ³ /dag	waterschap

2.5.3. Stofconcentraties

Neerslag

De waterkwaliteit van neerslag in Nederland vertoont weinig ruimtelijke variatie. Daarom zijn in dit project standaard waarden gebruikt voor de concentraties. Regenwater is relatief schoon en bevat weinig chloride, stikstof en fosfor (tabel 2.4).

Inlaatwater

Vanuit het gemaal Potslikker wordt water ingelaten in het helofytenfilter nabij meetpunt 7112. De waterkwaliteit op het inlaatpunt is afgeleid aan de hand van het meetpunt 7112. De meetreeksen voor meetput 7112 (beschikbaar vanaf 2008 tot oktober 2012) zijn gebruikt als referentie voor de kwaliteit van het water dat wordt ingelaten in het helofytenfilter.

Vanuit het helofytenfilter stroomt het water naar de Kardingerplas. De waterkwaliteit van dit water is afgeleid aan de hand van het meetpunt 7113. De meetreeksen voor meetpunt 7113 (beschikbaar vanaf 2008 tot oktober 2012) zijn gebruikt als referentie voor de kwaliteit van het water dat wordt ingelaten in de Kardingerplas.

Uitspoeling en afstroming

Het onverharde oppervlak (grasveld, bermen en strand) is niet aangesloten op een waterafvoerend systeem (riolering). De geïnfiltreerde neerslag spoelt daarom uit richting het oppervlaktewater of stroomt, bij hevige buien, over het land het oppervlaktewater in. Hierbij neemt het nutriënten op die in het watersysteem beschikbaar komen.

Het bepalen van stofconcentraties van uitspoeling en afstroming is een van de moeilijkste opgaven in het opstellen van een water- en stoffenbalans. Dit komt vooral omdat weinig bekend is over de omvang van dit transport is en over de bijdrage aan de belasting van P en N op het watersysteem. Er is daarom een inschatting gemaakt op basis van expert judgement.

Kwel

De waterkwaliteit van kwel in de Kardingerplas is niet recent gemeten. Er is daarom een schatting gemaakt op basis van ervaringen met vergelijkbare systemen. Aangezien de debieten van kwel beperkt zijn, zal de onzekerheid in de concentraties niet van grote invloed zijn op de belasting.

Overige bronnen

Omdat de Kardingerplas in stedelijk gebied ligt en veel wordt gebruikt door recreanten (zwemmers, honden uitlaten et cetera) kunnen een aantal niet-waterbalans gerelateerde posten samen een relevante bijdrage leveren aan de belasting. In deze studie worden deze posten niet meegenomen omdat deze posten een grote marge van onzekerheid kennen. Vooruitlopend op de feiten mag worden aangenomen dat de bijdragen van deze posten in verhouding tot de belasting vanuit het helofytenfilter (en indirect gemaal Potslikker) beperkt is.

Tabel 2.4. Stofconcentraties (mg/l)

waterstroom	meetpunt	Cl	P	N	SO4
neerslag		2	0	0,06	3,62
kwel		13	0	0	0
uitspoeling		8	0,6	6,0	0,6
afstroming		8	0,7	7,0	0,6
inlaat helofytenfilter (gemaal Potslikker)	7112	82,7	0,25	1,40	56,39
inlaat Kardingerplas (uitlaat helofytenfilter)	7113	62,4	0,19	1,29	27,67

3. SYSTEEMANALYSE

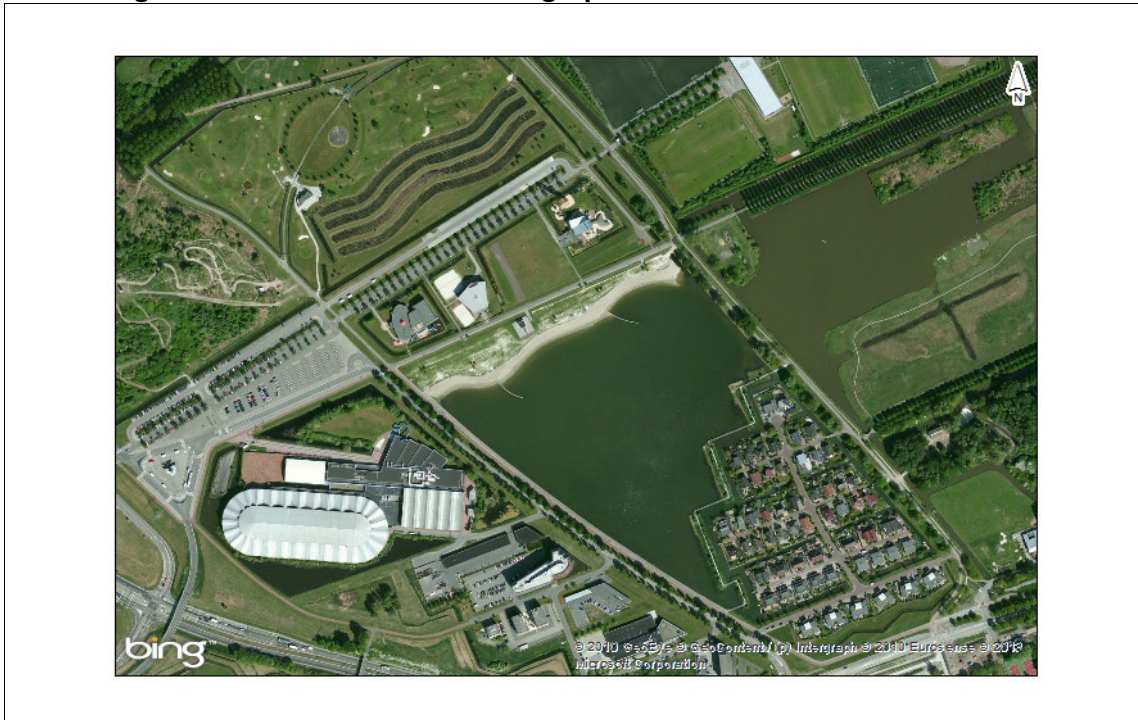
In dit hoofdstuk wordt het functioneren van de Kardingerplas geanalyseerd. Er wordt eerst een beschrijving gegeven van de Kardingerplas. Vervolgens wordt ingegaan op de hydrologie. Daarna komt de ecologische systeemanalyse aan bod.

3.1. Systeembeschrijving

Begrenzing

De Kardingerplas ligt in het noordoosten van de stad Groningen naast het hoofdkantoor van het Waterschap Noorderzijlvest. De Kardingerplas is tegelijk met de woningwijk Zilvermeer aangelegd in 1992. De bodem van de plas is afgedekt met 30 cm zand. De plas varieert in diepte van 50 cm tot meer dan 2 m. De Kardingerplas is ongeveer 7,6 ha groot.

Afbeelding 3.1. Luchtfoto van de Kardingerplas



Inlaat en uitlaat van water

De Kardingerplas wordt gevoed vanuit het helofytenfilter. Het helofytenfilter zelf wordt door gemaal Potslikker gevoed met water dat indirect uit het Boterdiep afkomstig is. Dit gemaal staat aan het begin van het helofytenfilter. Het helofytenfilter en de plas worden gescheiden door een overloop. Wanneer het water in het helofytenfilter hoger is dan de overloop, stroomt overtollig water (via een sloot) naar de plas. In het zuidoosten van de plas is een vaste overloop gesitueerd waardoor overtollig water wordt afgevoerd richting het Damsterdiep.

Maatregelen Kardingerplas

In de jaren tot 2012 werd in de zomermaanden (mei tot en met september) automatisch dagelijks 350 m³/dag water naar het helofytenfilter aangevoerd ongeacht de watervraag. Indien nodig werd extra water ingelaten om het peil in het helofytenfilter (en de plas) te handhaven. In 2012 is echter het peilbeheer gewijzigd zodat alleen nog water in het helofytenfilter werd ingelaten ter voorkoming van uitdroging van het helofytenfilter. Getracht is om het peil zo te handhaven, dat er geen water naar de Kardingerplas stroomt.

3.2. Hydrologie

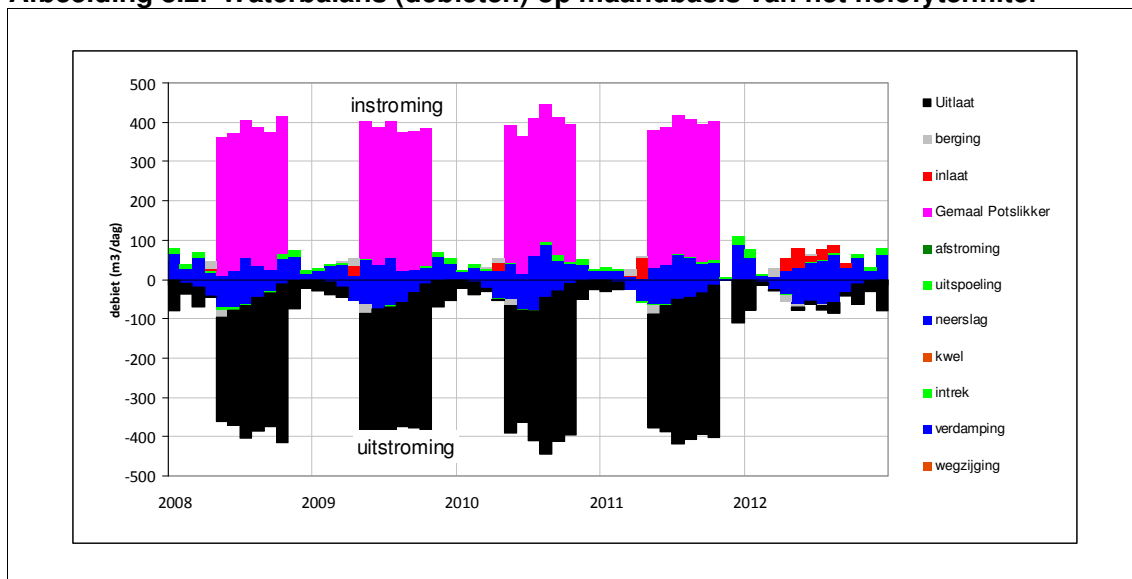
3.2.1. Waterbalans

Voor een goede inschatting van de waterbalans van de Kardingerplas is eerst begrip nodig van de waterbalans van het helofytenfilter. Hieronder beschrijven we daarom eerst de waterbalans van het helofytenfilter. De resultaten worden gebruikt voor de waterbalans van de Kardingerplas.

Helofytenfilter

Afbeelding 3.2 geeft een overzicht van de waterbalans van het helofytenfilter van 2008 tot en met 2012. De ingaande waterstromen in het helofytenfilter zijn neerslag, uitspoeling en inlaat van water uit het Boterdiep via gemaal Potslikker. De uitgaande waterstromen zijn voornamelijk verdamping en uitlaat naar de Kardingerplas. De inlaat vanuit het gemaal is veruit de grootste bron van water. In 2012 is het beheer gewijzigd. Tot die tijd werd automatisch dagelijks 350 m³/dag water aangevoerd. Nu wordt er alleen water ingelaten als dit nodig is om het waterpeil in het helofytenfilter te handhaven (rode balkjes).

Afbeelding 3.2. Waterbalans (debiëten) op maandbasis van het helofytenfilter

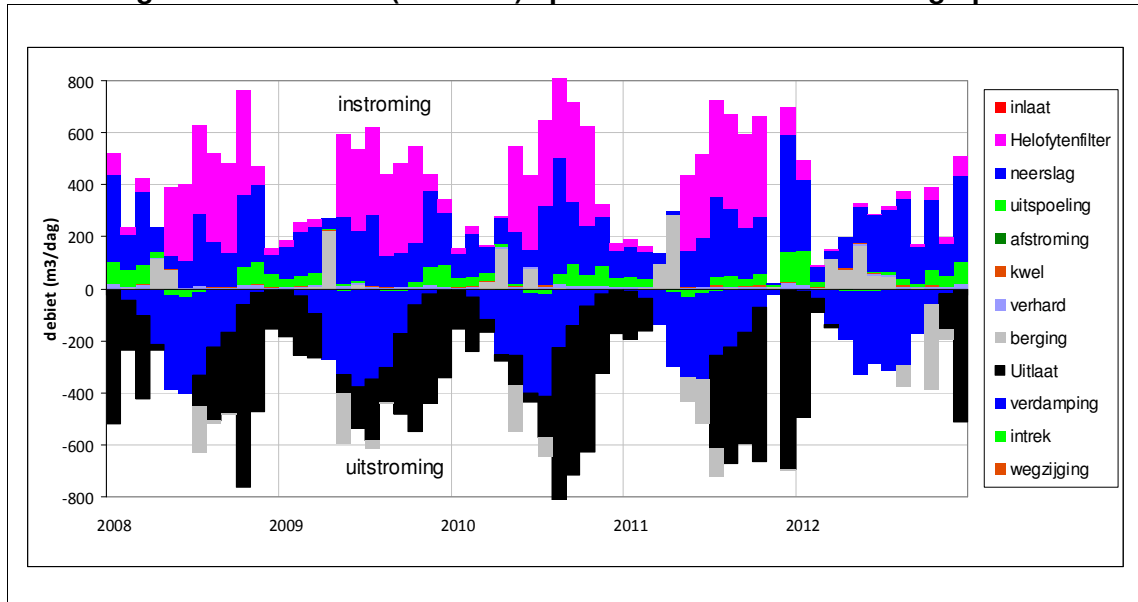


Kardingerplas

Afbeelding 3.3 geeft een overzicht van de waterbalans van de Kardingerplas van 2008 tot en met 2012. De ingaande waterstromen in de waterbalans van de Kardingerplas bestaan uit neerslag, kwel, inlaatwater vanuit het helofytenfilter, uit- en afstroming vanaf de percelen en afstroming vanuit verharde oppervlaktes.

Duidelijk is de invloed van het gemaal Potslikker te zien. Vanaf het moment van aanzetten is het debiet vanuit het helofytenfilter vele malen groter dan in de wintermaanden wanneer het gemaal niet aanstaat. Naast het water uit het helofytenfilter is neerslag ook een grote bron van water voor de plas.

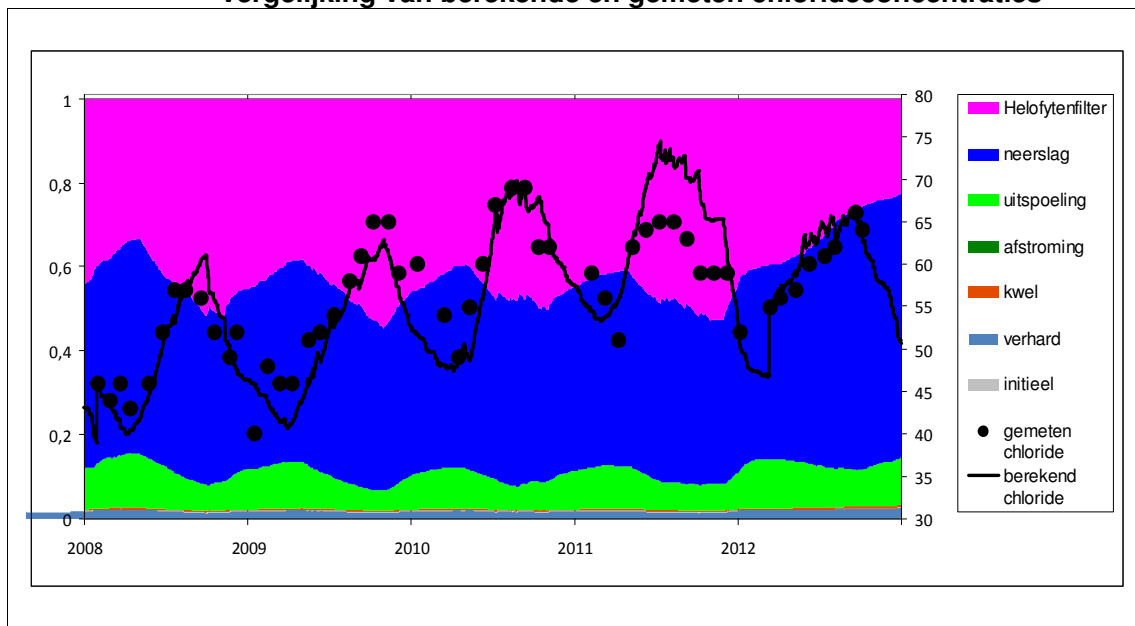
Afbeelding 3.3. Waterbalans (debieten) op maandbasis van de Kardingierplas



Afbeelding 3.4 toont de fractieverdeling in de Kardingierplas. De fractieverdeling laat de gemiddelde samenstelling van het oppervlaktewater op elk moment in de tijd zien. De fractieverdeling laat zien dat het water in de Kardingierplas voor het grootste deel (80-90 %) bestaat uit regenwater en water afkomstig vanuit het helofytenfilter. Het overige water komt van uitspoeling. Afstroming, kwel en verhard zijn minimaal aanwezig. In 2012 neemt het aandeel helofytenwater af als gevolg van het veranderde beheer.

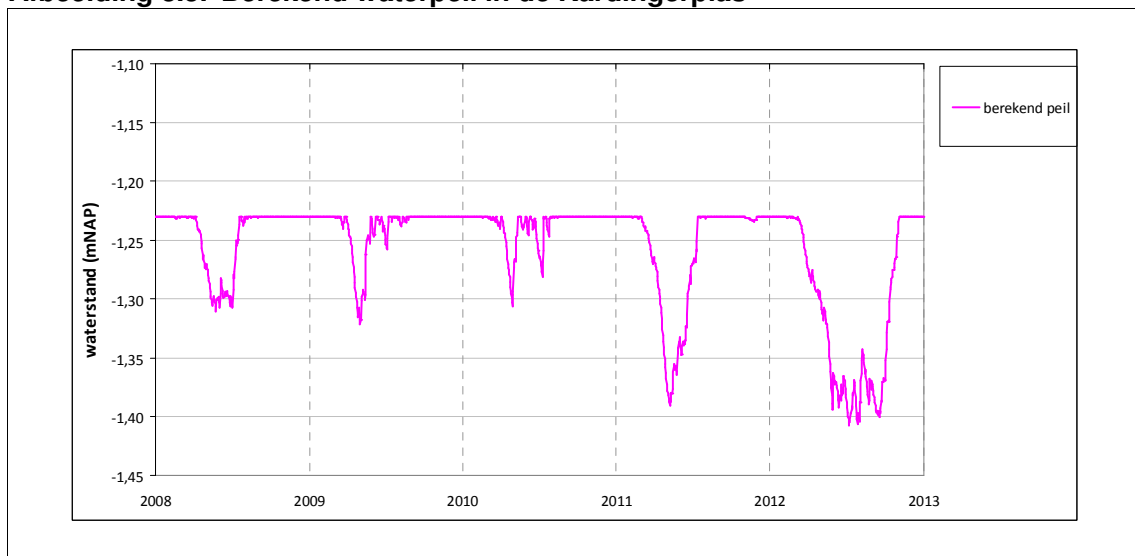
In afbeelding 3.4 zijn de gemeten en de door de waterbalans berekende chlorideconcentraties in de Kardingierplas weergegeven. De gemeten en berekende chloridewaarden in de Kardingierplas vertonen een overeenkomstig patroon. Sommige pieken en dalen, vooral in 2011 en 2012, worden echter niet goed berekend. Vooral in 2011 is de afwijking groot. Om te controleren of de chlorideconcentratie in 2012 wel goed berekend wordt is de chlorideconcentratie éénmalig gecorrigeerd in het voorjaar van 2012. Te zien is dat de concentratie in het vervolg weer goed berekend wordt.

Afbeelding 3.4. Fractieverdeling van het oppervlaktewater in de Kardingierplas met vergelijking van berekende en gemeten chlorideconcentraties



Afbeelding 3.5 laat tenslotte het berekende waterpeil in de Kardingierplas zien. Er zijn geen gemeten waterstanden bekend. Volgens de waterbalans kan het waterpeil in droge periodes maximaal zo'n 20 cm uitzakken.

Afbeelding 3.5. Berekend waterpeil in de Kardingierplas



3.2.2. Externe nutriëntenbelasting

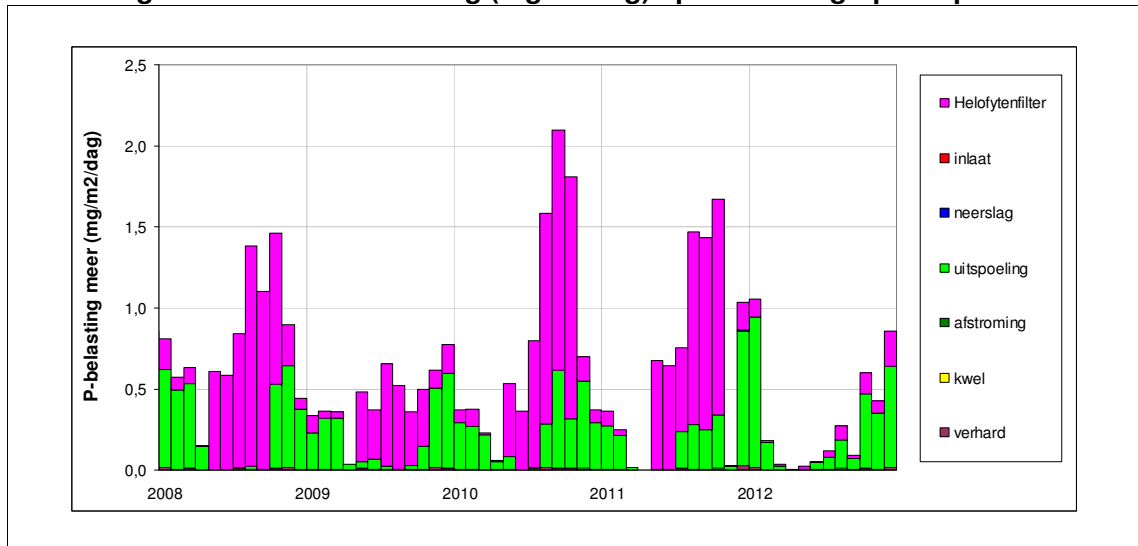
De tweede stap is het analyseren van de nutriëntenstromen en het bepalen van de nutriëntenbelasting op Kardingierplas. De belasting van een stof wordt berekend door de concentraties te vermenigvuldigen met de debieten.

P-belasting

In afbeelding 3.6 is de berekende externe P-belasting weergegeven. De externe belasting in de zomer is relatief groot als gevolg van de aanvoer van water uit het helofytenfilter. De belasting is in de zomermaanden voor meer dan 75 % afkomstig uit het helofytenfilter.

In de wintermaanden neemt de belasting uit het helofytenfilter af, omdat er geen water wordt aangevoerd. De belasting bestaat in de wintermaanden vooral uit uitspoeling. Ondanks dat neerslag een van de belangrijkste bronnen van water is, draagt deze bron nauwelijks bij aan de belasting doordat er vrijwel geen P in neerslag zit.

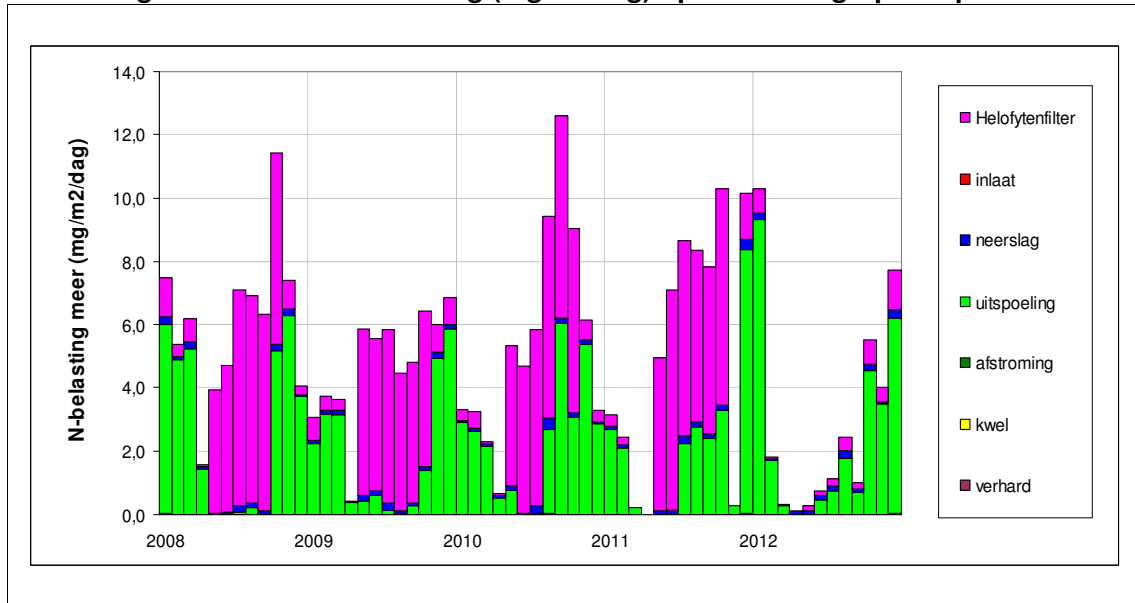
Afbeelding 3.6. Externe P-belasting (mg/m²/dag) op de Kardingierplas op maandbasis



N-belasting

In afbeelding 3.7 is de N-belasting op de Kardingierplas weergegeven. In de zomer bestaat de belasting voornamelijk uit water afkomstig van het helofytenfilter.

Afbeelding 3.7. Externe N-belasting (mg/m²/dag) op de Kardingerplas op maandbasis



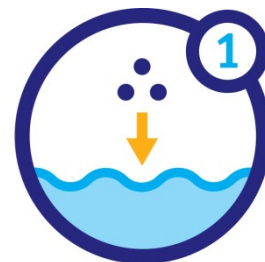
3.3. Ecologische sleutelfactoren

Voor de analyse wordt gebruik gemaakt van het concept volgens ecologische sleutelfactoren (voorheen bekend als stoplichtenmethodiek [lit. 5]). We concentreren ons op de eerste 3 ecologische sleutelfactoren (ESF's). De voorwaarden voor ondergedoken waterplanten staan centraal. De eerste 3 ESF's zijn 'productiviteit water', 'licht' en 'productiviteit bodem'. Deze ESF's worden geanalyseerd aan de hand van fysisch-chemische data, berekeningen met de water- en stoffenbalans en (het metamodel) PCLake. Biologische data worden vervolgens gebruikt om te verifiëren of het beeld op basis van de fysisch-chemische data overeenkomt met de werkelijkheid.

3.3.1. Stoplicht 1: productiviteit water

Verblijftijd en stroomsnelheid

Ondanks de regelmatige wateraanvoer vanuit het helofytenfilter is de verblijftijd in de Kardingerplas lang, gemiddeld meer dan 100 dagen. Daardoor is de Kardingerplas procesgestuurd. Dit betekent dat de externe belasting in relatie tot de kritische belasting bepalend is voor de primaire productie in het systeem. In de vervolgstappen bekijken we daarom welk nutriënten (N of P) bepalend is voor de primaire productie en of de externe belasting voldoet ten opzichte van de kritische belasting.



Nutriëntenlimitatie

De verhouding tussen stikstof en fosfor laat zien of stikstof of fosfor limiterend is voor de primaire productie. We kijken naar de verhouding in de belasting en de verhouding in de concentratie. De verhouding in de belasting is een betere maat. Vaak wordt uitgegaan van de Redfield-ratio. Redfield (1934) ontdekte een opmerkelijke overeenstemming in de samenstelling van fytoplankton in oceanen. De verhouding tussen N en P is opvallend vaak 16 (mol/mol). Dit komt overeen met een verhouding van 7,2 (g/g). Algemeen wordt aangenomen dat bij een N/P-ratio (g/g) hoger dan 10 fosfor bepalend is voor de primaire productie. Bij een lagere ratio dan 3,5 (g/g) is stikstof bepalend voor de primaire productie (Janse

2005). Tussen een ratio van 3,5 (g/g) en 10 (g/g) zijn beide nutriënten van belang. Er is dan sprake van co-limitatie.

Achtergrond bij de N/P-ratio

Vaak is stikstof of fosfor limiterend voor de primaire productie in een watersysteem (groei van algen, kroos of ondergedoken waterplanten). De verhouding tussen de beschikbaarheid van stikstof en fosfor (N/P-ratio) laat zien welke van de 2 nutriënten in potentie limiterend is. De N/P-ratio geeft daarnaast informatie over de concurrentie tussen algen en planten. Blauwalgen zijn stikstoffixeerders, wat betekent dat ze in een stikstof gelimiteerd systeem concurrentie voordeel hebben ten opzichte van planten. Tussen plantensoorten bestaan verschillen in de mate, waarin ze in staat zijn om met nutriëntenlimitatie om te gaan, waardoor de N/P-ratio van invloed is op de samenstelling van de aanwezige plantengemeenschap.

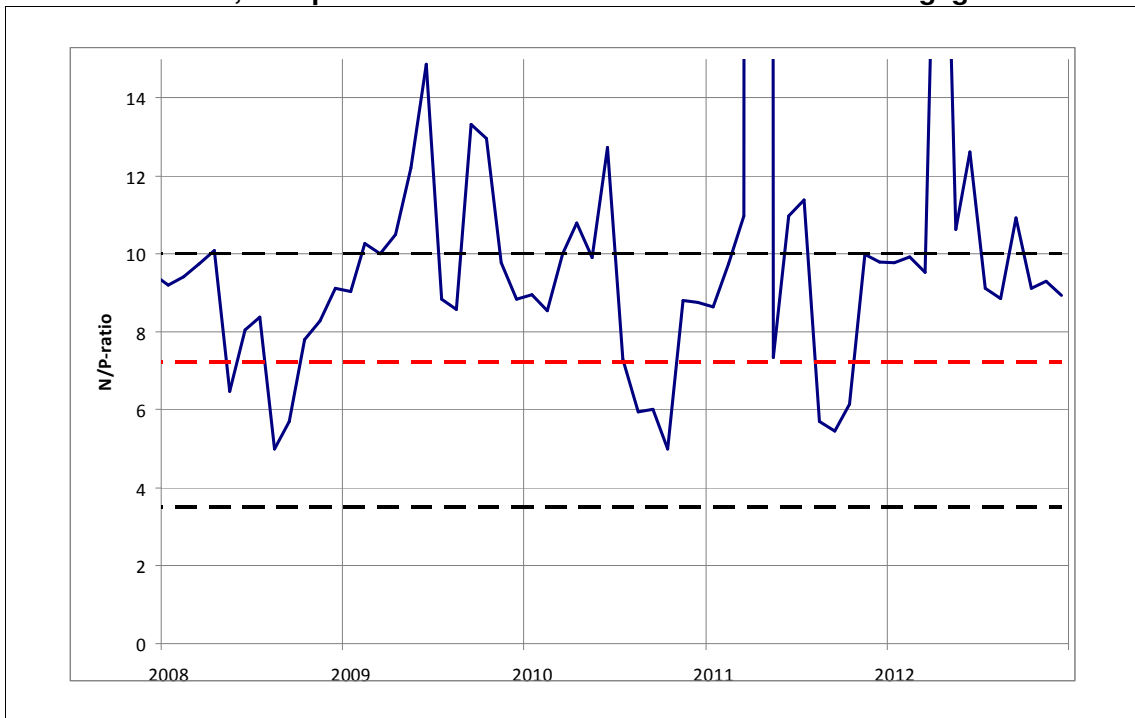
Algemeen wordt aangenomen dat bij een N/P-ratio (concentratie totaal N (mg/l)/concentratie totaal P (mg/l)) hoger dan 10 fosfor bepalend is voor de primaire productie. Bij een lagere ratio dan 3,5 is stikstof bepalend voor de primaire productie. In werkelijkheid zijn deze grenzen veel minder hard. Wij kijken vooral naar de N/P-ratio van de nutriëntenbelasting (totale N-vracht/totale P-vracht), omdat deze ratio bepalend is voor wat er in het voedselweb gebeurt. De N/P-ratio, waarbij N of P limiterend is, hangt bovendien af van andere factoren, zoals de specifieke soorten die in het watersysteem aanwezig zijn. Als zowel N als P in overvloed aanwezig zijn, wordt de primaire productie overigens geremd door lichtbeschikbaarheid. Ook andere factoren kunnen limiterend zijn, waaronder de verblijftijd.

Wanneer maatregelen ter verbetering van de ecologische waterkwaliteit worden getroffen, wordt vaak de voorkeur gegeven aan de sturing op P-limitatie, ook als er sprake is van N-limitatie. De reden hiervoor is dat N-limitatie een concurrentievoordeel oplevert voor blauwalgen en omdat N moeilijker te beïnvloeden is (er vindt ook uitwisseling plaats met de atmosfeer).

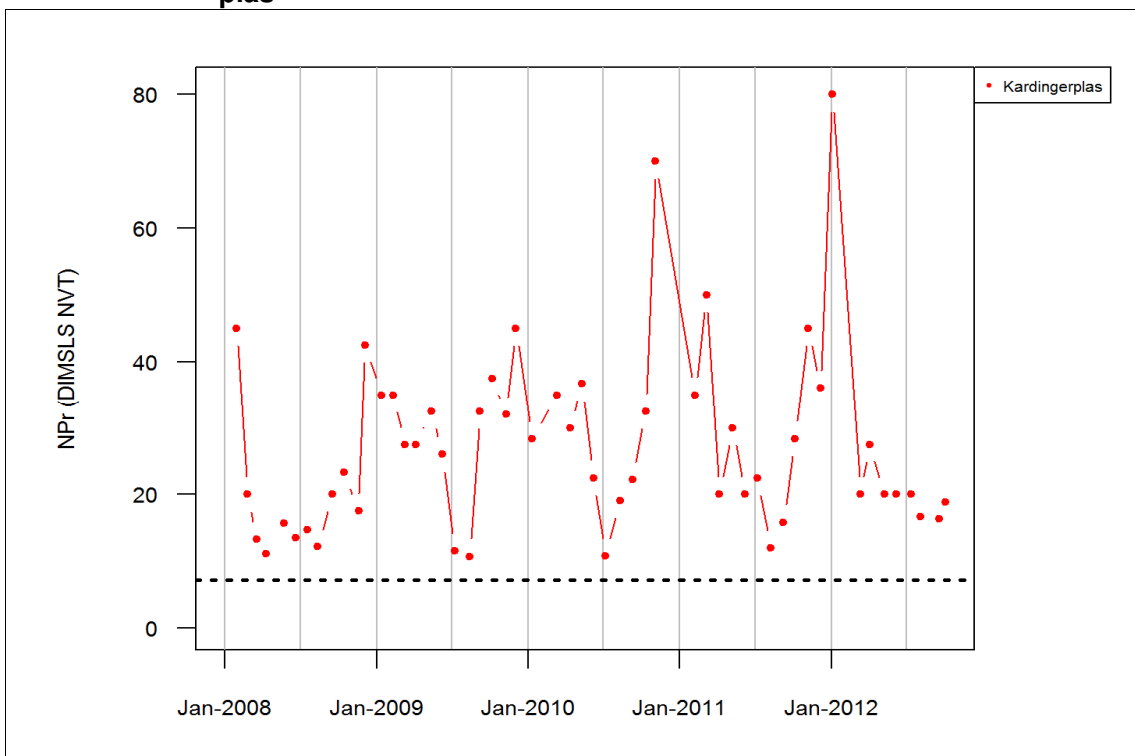
In afbeelding 3.8 is te zien dat de stikstofbelasting ongeveer acht tot tien maal hoger is dan de fosforbelasting in de Kardingerplas. In de jaren 2008, 2010 en 2011 zakt de verhouding in de zomer naar 5. Dit laat zien dat de stikstofbelasting mede bepalend is voor de primaire productie. Als we kijken naar de verhouding tussen stikstof en fosfor in de concentratie zien we dat de N-concentratie ongeveer 10 tot 40 maal hoger is dan de P-concentratie (afbeelding 3.9). In het voorjaar neemt de N/P-ratio flink af. Vanaf juli/augustus neemt de N/P-ratio juist weer toe.

Bekend is dat in de Kardingerplas in de maanden juli t/m september blauwalgenbloei voorkomt. Sommige blauwalgen zijn in staat om (lucht)stikstof te fixeren. Deze blauwalgen hebben hiermee een competitief voordeel ten opzichte van andere algen.

Afbeelding 3.8. N/P-ratio van de belasting op de Kardingerplas. Bij een N/P-ratio van boven de 10 is sprake van P-limitatie. Bij een N/P-ratio van onder de 3,5 is sprake van N-limitatie. De redfield-ratio is weergegeven in rood



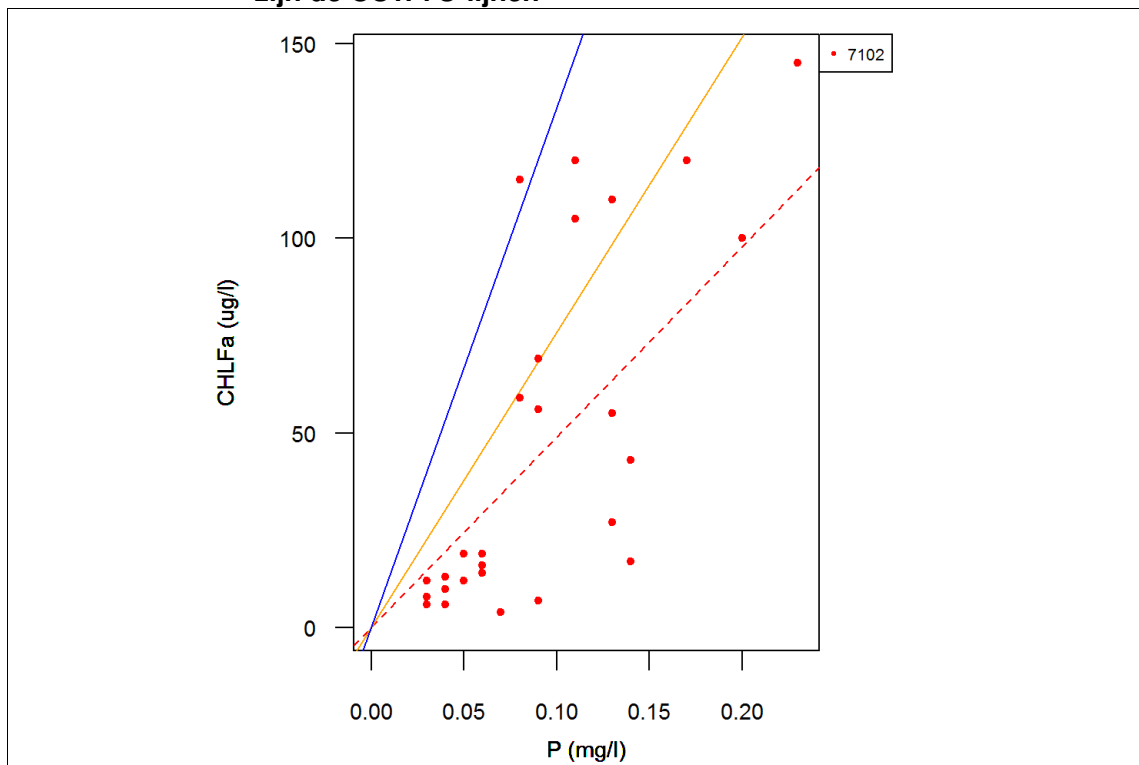
Afbeelding 3.9. N/P-ratio van de concentraties totaal-P en totaal-N in de Kardingerplas



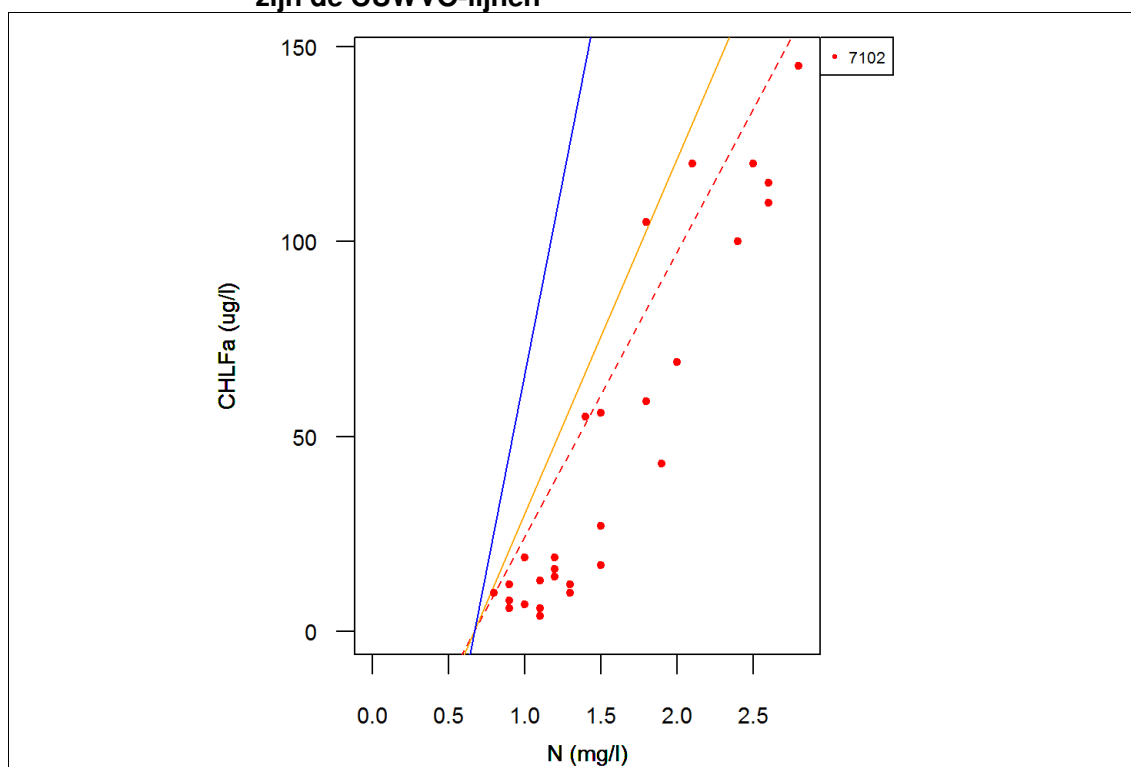
CUWVO-lijnen

In afbeelding 3.10 en afbeelding 3.11 is het chlorofyl-a gehalte uitgezet tegen de P-concentratie en de N-concentratie. Hoe duidelijker een verband tussen chlorofyl-a en een nutriënt, hoe groter de kans dat het betreffende nutriënt bepalend is voor de primaire productie (algengroei). Daarnaast zijn CUWVO-lijnen geplot. Deze CUWVO-lijnen zijn afkomstig uit de vierde eutrofiëringenquête en geven de relatie weer tussen het zomergemiddelde totaal-P en totaal-N gehalte en de bijbehorende chlorofyl-a gehalten afhankelijk van welke algengroep dominant is. Er is een vergelijking gemaakt met de CUWVO-lijnen voor wateren met 'meer dan 30 % Microcystis in 3^e kwartaal' (rood gestippelde lijn), 'afwezigheid dominantie van draadvormige blauwalgen' (oranje lijn) en 'meer dan 30 % draadvormige blauwalgen in de zomer' (blauwe lijn). Te zien is dat veel punten rond de lijnen liggen. Voor P (afbeelding 3.10) geldt dat er meer punten tussen de lijnen liggen. Voor N (afbeelding 3.11) geldt dat het verband tussen N en chlorofyl-a sterker lijkt te zijn. Het bevestigt dat beide nutriënten van belang zijn, maar dat er in veel gevallen sprake is van N-limitatie.

Afbeelding 3.10. Relatie tussen P-concentratie en Chlorofyl-a (punten). De lijnen zijn de CUWVO-lijnen



Afbeelding 3.11. Relatie tussen N-concentratie en Chlorofyl-a (punten). De lijnen zijn de CUWVO-lijnen



Belasting versus kritische belasting

De belasting met nutriënten is de belangrijkste voorwaarde voor herstel van helder water met ondergedoken waterplanten. Of de belasting van een systeem de groei van ondergedoken waterplanten toelaat hangt af van de kritische belasting.

De kritische belasting van de Kardingierplas is bepaald met behulp van het metamodel van PCLake. Dit metamodel is een versimpelde versie van het model waarmee de kritische grens van een systeem kan worden bepaald aan de hand van een klein aantal parameters. Verderop in deze studie wordt de werking van PCLake voor de Kardingierplas nader onderzocht en wordt het volledige model gespecificeerd naar de eigenschappen van de Kardingierplas waardoor ook dynamische runs uitgevoerd kunnen worden. Hiermee worden processen door de tijd inzichtelijk.

Voor het metamodel zijn de basale eigenschappen van de Kardingierplas ingevoerd zoals strijklengte, diepte, debiet en bodemtype. Deze eigenschappen geven genoeg informatie om de kritische grenzen te bepalen.

Tabel 3.1. Kritische belasting (mg/m²/dag) Kardingierplas op basis van het metamodel

plas	zomerdebiet (mm/dag)	kritische belasting troebel - helder	kritische belasting helder - troebel	actuele belasting jaargemiddeld	actuele belasting zomergemiddeld
voor 2012	6	0,9	2,6	0,7	0,8
2012	4*	0,7	2,4	0,3	0,1

* Het gemiddeld zomerdebiet in 2012 was minder dan 4 mm/dag, maar het minimum voor het metamodel van PCLake is 4 mm/dag. De kritische belasting neemt af met een afname van het debiet (toename verblijftijd).

Tabel 3.1 laat zien dat de belasting op de Kardingerplas in alle gevallen lager ligt dan de kritische belasting. Dit betekent dat PCLake een helder systeem met ondergedoken waterplanten voorspelt.

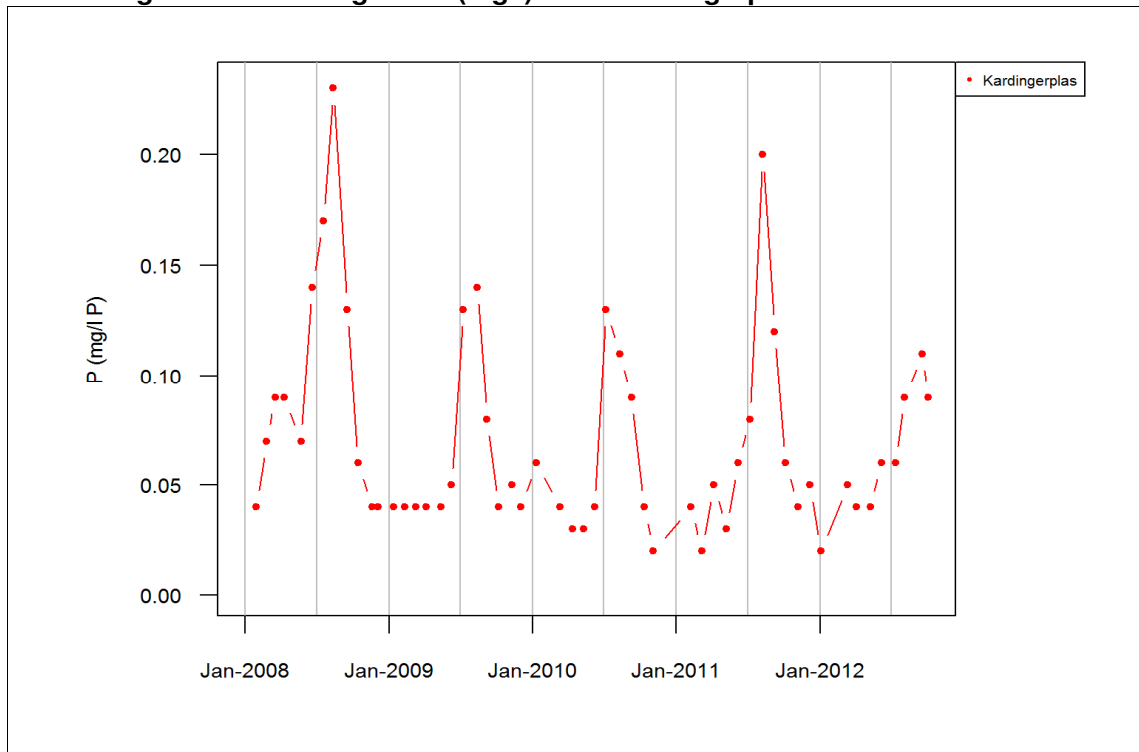
Een kanttekening bij deze berekening is dat de waterbalans het systeem als een dimensieloos bakje beschouwt, waardoor geen onderscheid wordt gemaakt in ruimtelijke variatie. De toepassing van het metamodel betreft daardoor een vrij grove benadering. Dit komt onder meer tot uitdrukking in de benadering van de strijklengte. De strijklengte van de Kardingerplas is maximaal 350 m. Deze maximale strijklengte wordt echter maar in een zeer klein deel van de plas behaald. In het metamodel is daarom uitgegaan van een strijklengte van 300 m. Dit is ook de ondergrens die in het metamodel kan worden gevoerd. In veel delen van de plas zal de strijklengte nog kleiner zijn, waardoor de kritische belasting hoger zal liggen.

Een andere kanttekening is dat we nu kijken naar de kritische P-belasting, terwijl de kritische N-belasting wel eens bepalend kan zijn. Voordat we de kritische N-belasting bepalen willen we eerst meer inzicht in de rol van nutriënten door een uitgebreide modeltoepassing.

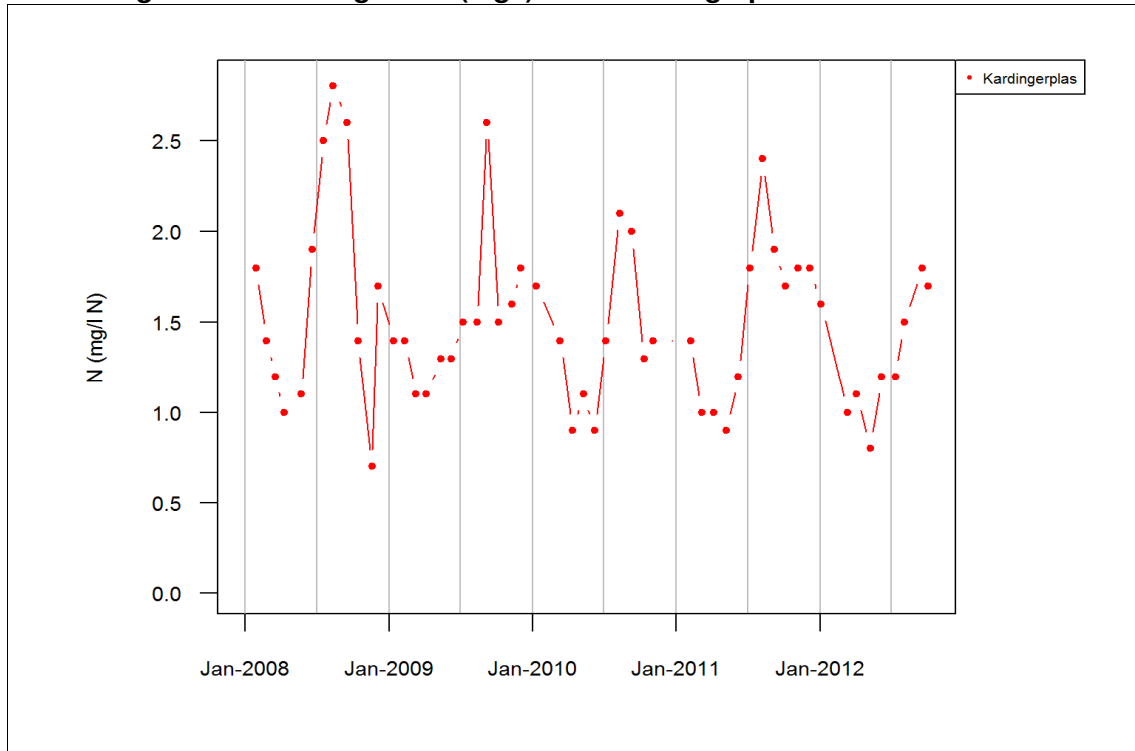
Gemeten concentraties

In afbeelding 3.12 is het verloop van de totaal P-concentratie in de Kardingerplas weergegeven. In de afbeelding is zichtbaar dat de P-concentratie in de zomer hoog is. De toename in P-concentratie komt jaarlijks in de vroege zomer (vanaf juni) op gang. Na augustus neemt de P-concentratie weer af. Mogelijk is de toename van P een gevolg van nalevering van P vanuit de waterbodem. Eenzelfde beeld is te zien in afbeelding 3.13 waar de gemeten totaal N-concentratie is weergegeven. De stijging in de N-concentratie is opvallend. In veel watersystemen is de N-concentratie in de zomer laag als gevolg van denitrificatie. Mogelijk zorgt de fixatie van luchtstikstof door blauwalgen voor deze stijging.

Afbeelding 3.12. Totaal-P gehalte (mg/l) in de Kardingerplas

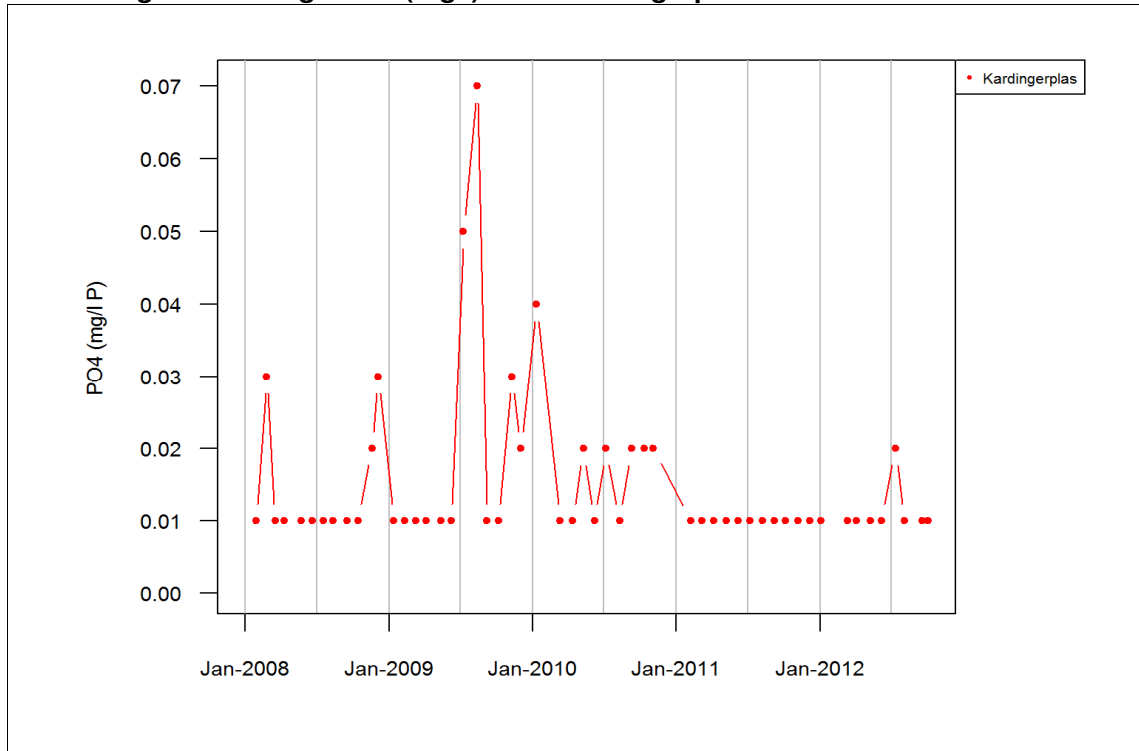


Afbeelding 3.13. Totaal-N gehalte (mg/l) in de Kardingierplas

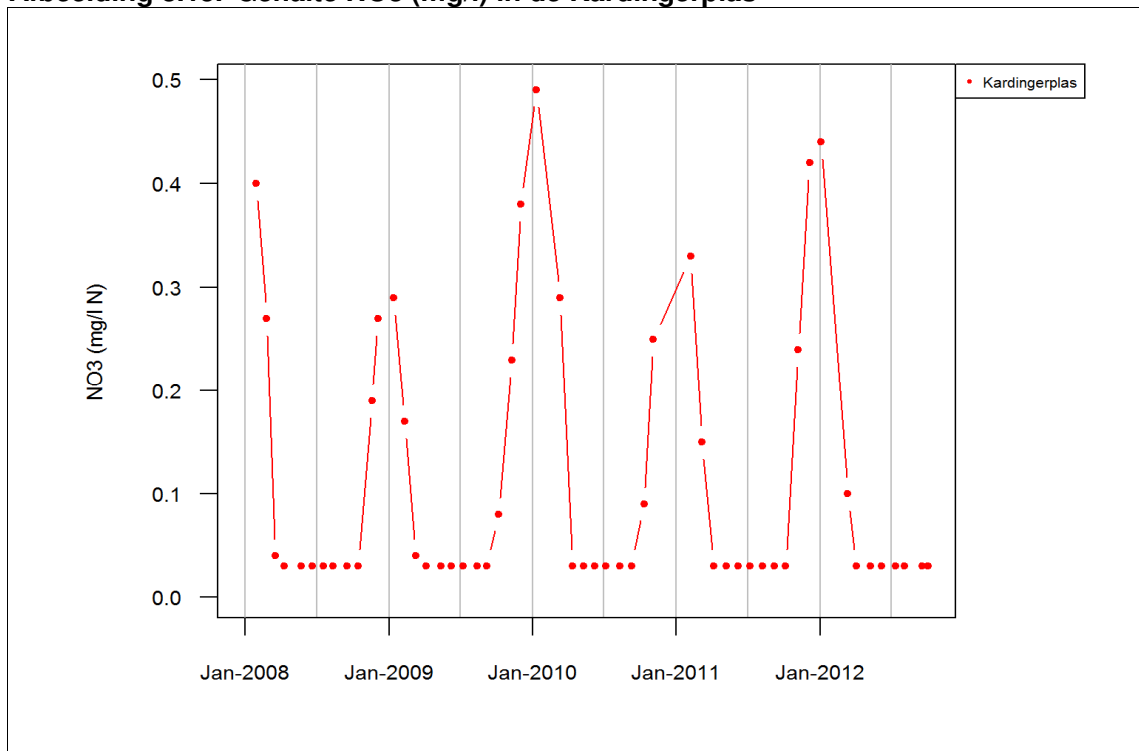


In de afbeeldingen 3.13, 3.14 en 3.15 zijn de concentraties van de vrij beschikbare nutriënten PO₄, NO₃ en NH₄ weergegeven. In de zomer bereiken deze concentraties zeer lage waarden, soms liggen de concentraties zelfs op of onder de detectielimiet. In de zomer van met name 2009 en in mindere mate 2010 liggen de gemeten concentraties van PO₄ veelal (net) boven de detectiegrens. In die periodes lijkt dus sprake van N-limitatie.

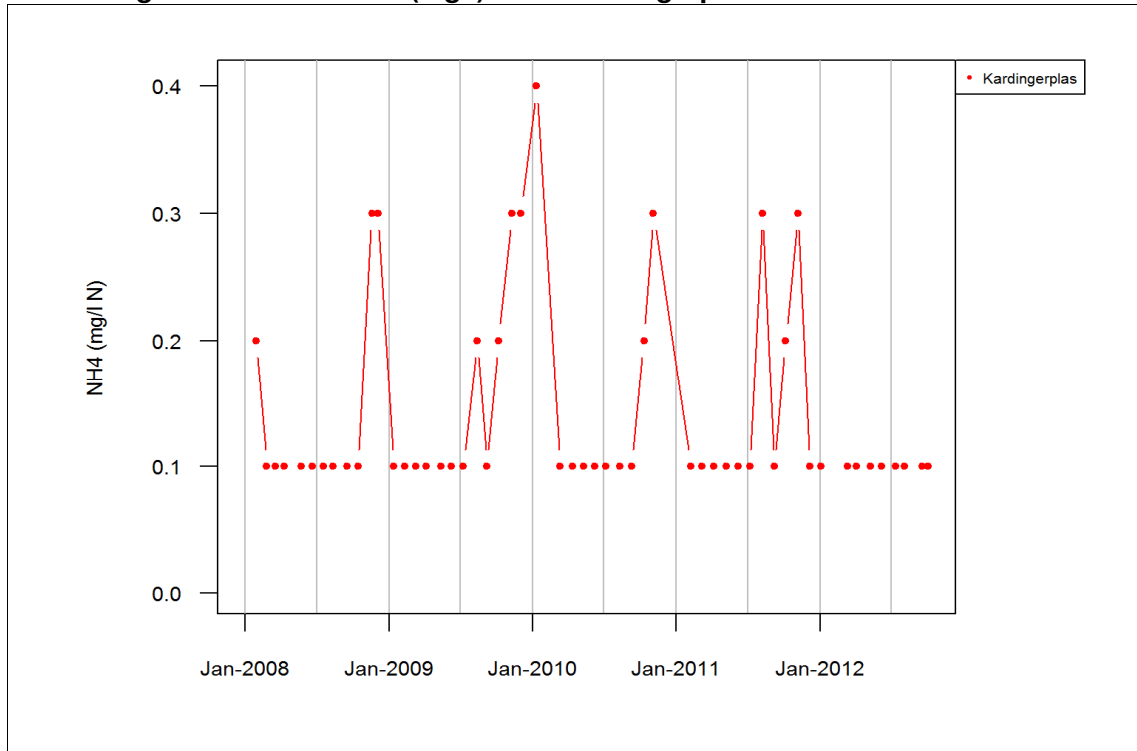
Afbeelding 3.14. PO₄-gehalte (mg/l) in de Kardingierplas



Afbeelding 3.15. Gehalte NO₃ (mg/l) in de Kardingierplas



Afbeelding 3.16. Gehalte NH4 (mg/l) in de Kardingierplas



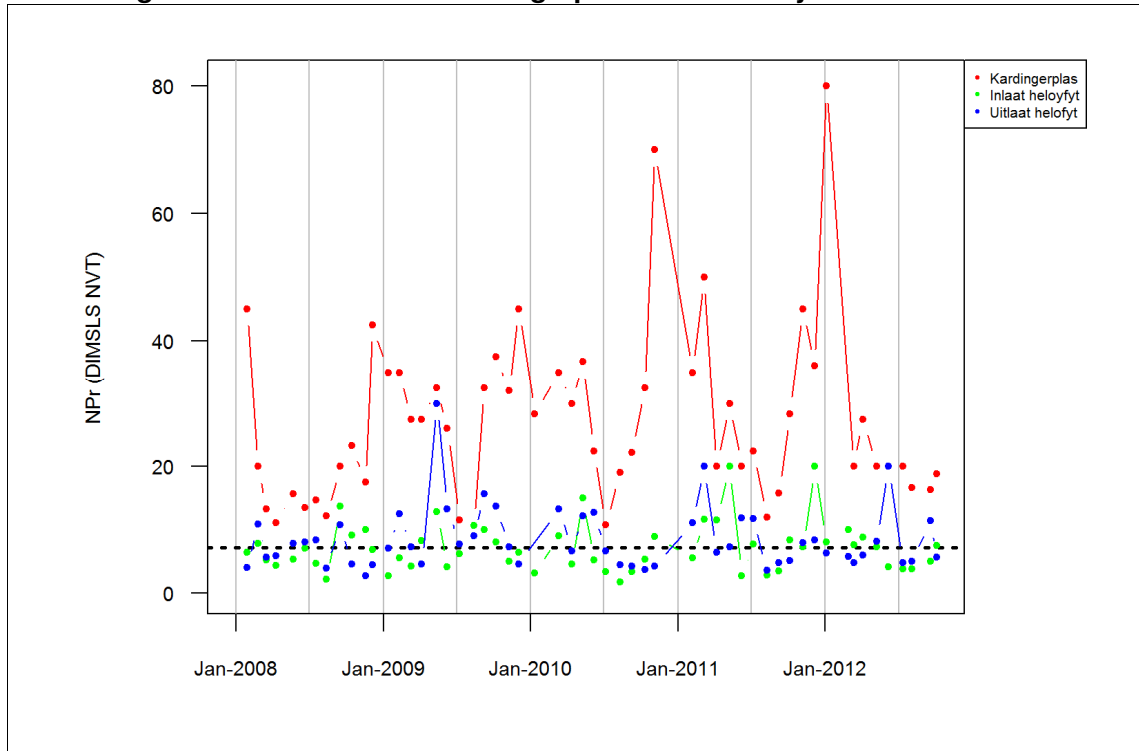
Helofytenfilter

De waterkwaliteit in het helofytenfilter is van belang voor de waterkwaliteit in de Kardingierplas. Daarom gaan we hieronder uitgebreider in op de waterkwaliteit in het helofytenfilter.

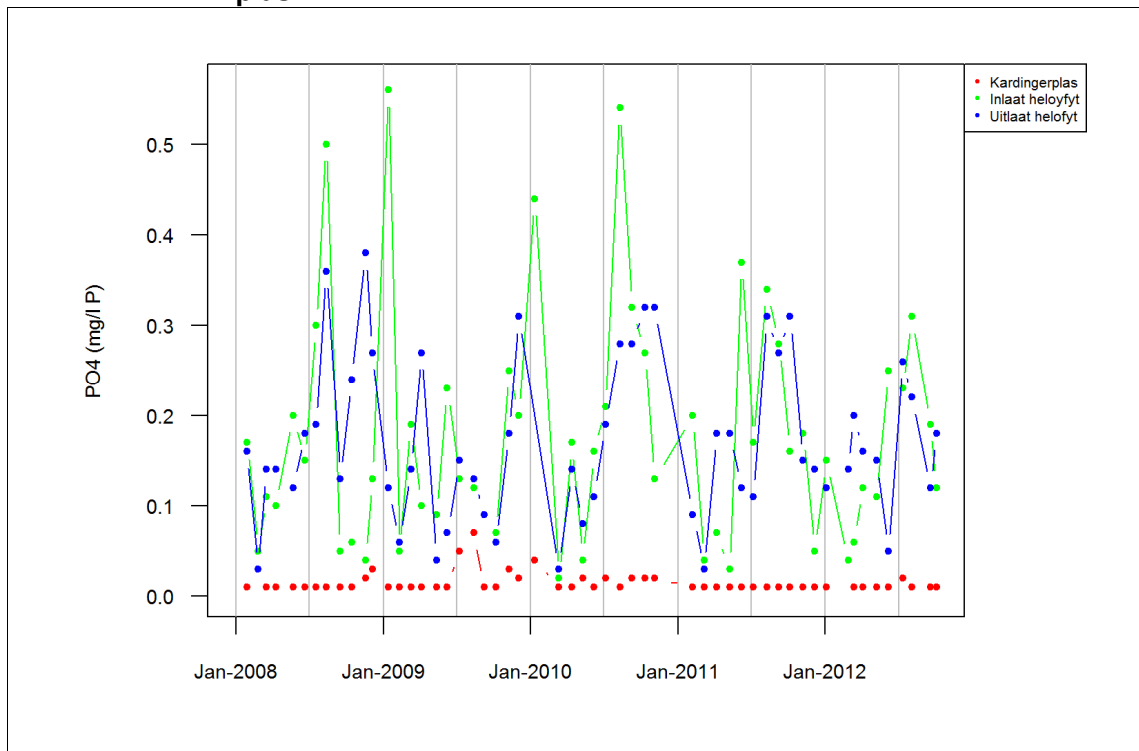
In afbeelding 3.17 is de N/P-ratio weergegeven van de Kardingierplas in vergelijking met de N/P-ratio in het helofytenfilter. De N/P-ratio in de inlaat en uitlaat van het helofytenfilter is vergelijkbaar, maar duidelijk lager dan in de plas. Gemiddeld ligt de N/P-ratio tussen de 5 en 9. Soms komt de N/P-ratio in de buurt van de 3,5.

In afbeelding 3.18 is de PO₄-concentratie weergegeven. Te zien dat er soms periodes zijn waarin de concentratie PO₄ uit het helofytenfilter hoger is dan van het inlaatwater. Dit gebeurt dan vooral in het voorjaar. Op deze momenten is het helofytenfilter een leverancier van PO₄. Dit is niet het geval voor NO₃. NO₃ uit het inlaatwater wordt volledig gedenitrificeerd. De NO₃-concentratie daalt tot onder de detectiegrens. Ook de NH₄-concentraties dalen tot onder de detectiegrens (niet afgebeeld). Het totaal N-concentratie en de concentratie particulier gebonden N zijn voor en na het helofytenfilter ongeveer gelijk.

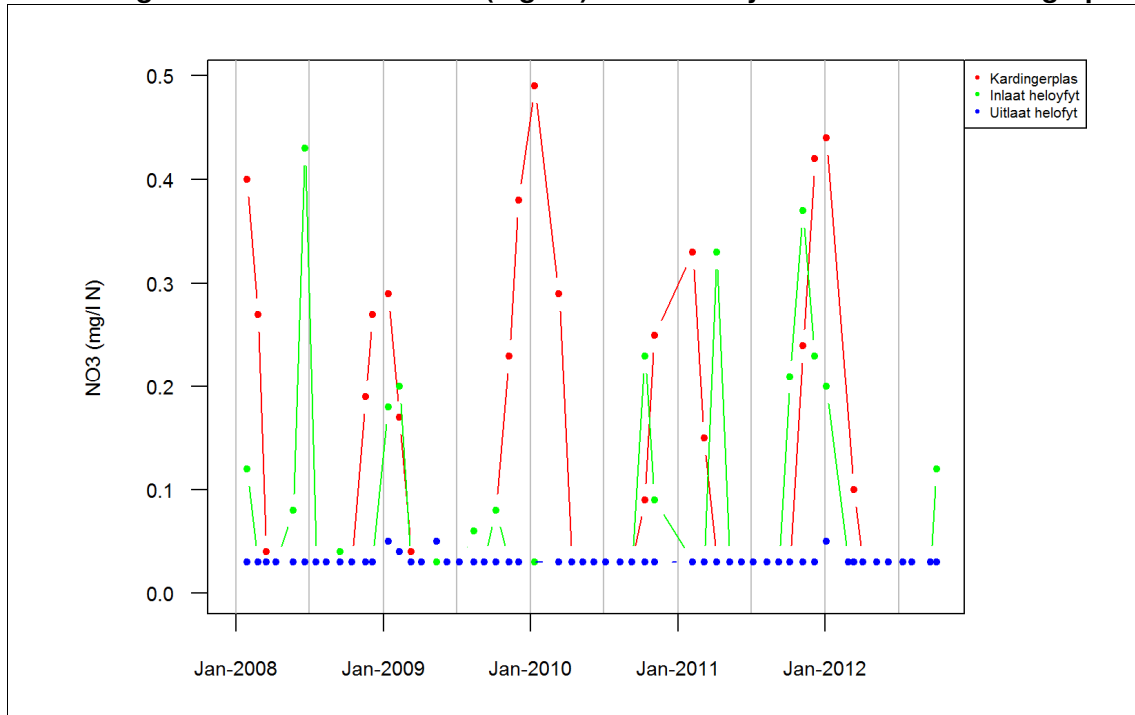
Afbeelding 3.17. N/P-ratio in de Kardingerplas en het helofytenfilter



Afbeelding 3.18. PO4-concentraties (mg P/l) in het helofytenfilter en de Kardingerplas



Afbeelding 3.19. NO₃-concentratie (mg N/l) in het helofytenfilter en de Kardingerplas



Conclusie

De externe P-belasting op de Kardingerplas is lager dan de kritische belasting. De N/P-ratio van de belasting is dermate laag dat regelmatig sprake zal zijn van N-gelimeerde omstandigheden voor primaire productie. Het helofytenfilter is de belangrijkste bron van N en P. De N/P-ratio in het water dat uit de helofytenfilter komt is laag. De N/P-ratio is echter ook al laag voordat het water in het helofytenfilter terecht komt. Belangrijk is dat in het helofytenfilter alle beschikbare stikstof (NO₃ en NH₄) wordt verwijderd. Het gevolg is dat er voor de groei van algen in de Kardingerplas weinig stikstof direct beschikbaar is. Voor PO₄ geldt dit niet.

Al met al betekent dit dat de beschikbaarheid van stikstof tot 2011 beperkend moet zijn geweest voor algengroei. Vanaf 2012 wordt er minder water ingelaten. Dit zal invloed hebben op de beschikbaarheid van zowel N als P. We verwachten dat de N/P-ratio toe zal nemen. In het vervolg van het project (uitgebreide modellering met PCLake) zullen we hier op terugkomen.

3.3.2. Stoplicht 2: lichtklimaat

Stoplicht 2 betreft het lichtklimaat. Wanneer de externe belasting niet beperkend is, dan kan het lichtklimaat in bredere zin beperkend zijn voor de groei en ontwikkeling van ondergedoken waterplanten. Voor het lichtklimaat is van belang dat voldoende licht de waterbodem bereikt zodat kieming van ondergedoken waterplanten mogelijk is.



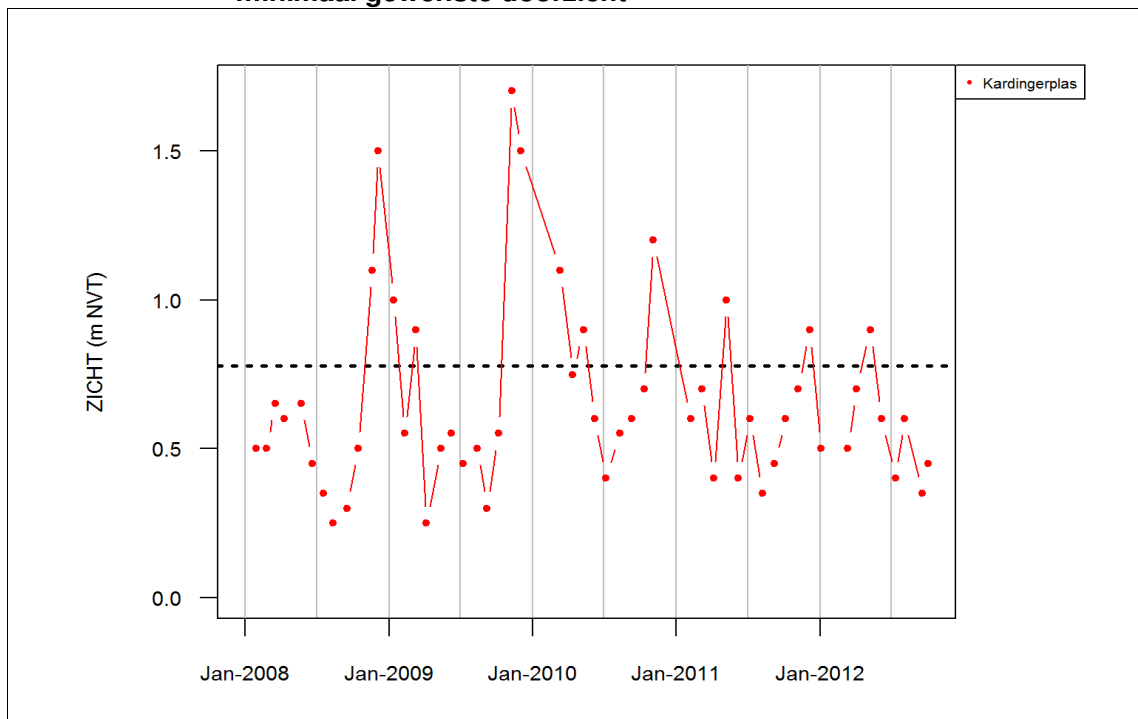
Doorzicht

De gemiddelde waterdiepte in de Kardingerplas is ongeveer 1,30 m. Voor de plas gaan we er van uit dat voor kieming en groei van ondergedoken waterplanten een doorzicht nodig is

van tenminste 0,78 m. De hierbij gehanteerde vuistregel is dat voor kieming en groei van ondergedoken waterplanten 4 % van het licht tot op de bodem moet doordringen. Er is sprake van 4 % licht op de bodem bij een doorzicht/diepte verhouding van 0,6 [lit. 3]. Voor kieming is het lichtklimaat vooral in het voorjaar en de zomerperiode belangrijk. Voor de verdere groei van ondergedoken waterplanten kan het lichtklimaat jaarrond een limiterende invloed hebben.

Afbeelding 3.20 laat zien dat het doorzicht in de Kardingierplas vanaf 2002 sterk fluctueert tussen de 25 en 150 cm. In de zomer is het doorzicht gelijk of lager dan de grens van 78 cm. De doorzichtpiek in de winter van 2010 is beduidend kleiner dan de voorgaande piek in de winter. Er komen in de Kardingierplas dus frequent perioden voor waarin de lichtval op de bodem voldoende is, maar dit is niet jaar rond het geval. Gedurende het jaar neemt het doorzicht af. De planten hebben zich al kunnen ontwikkelen waardoor een verminderd doorzicht van minder belang is.

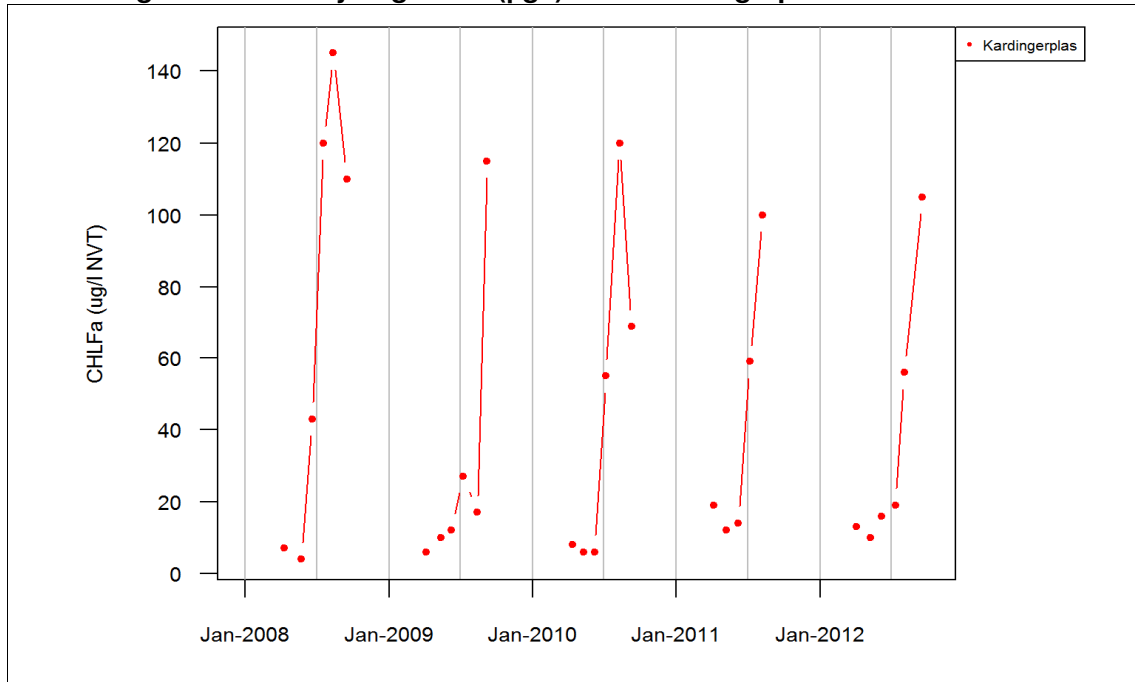
Afbeelding 3.20. Doorzicht (m) in de Kardingierplas. De zwarte onderbroken lijn is het minimaal gewenste doorzicht



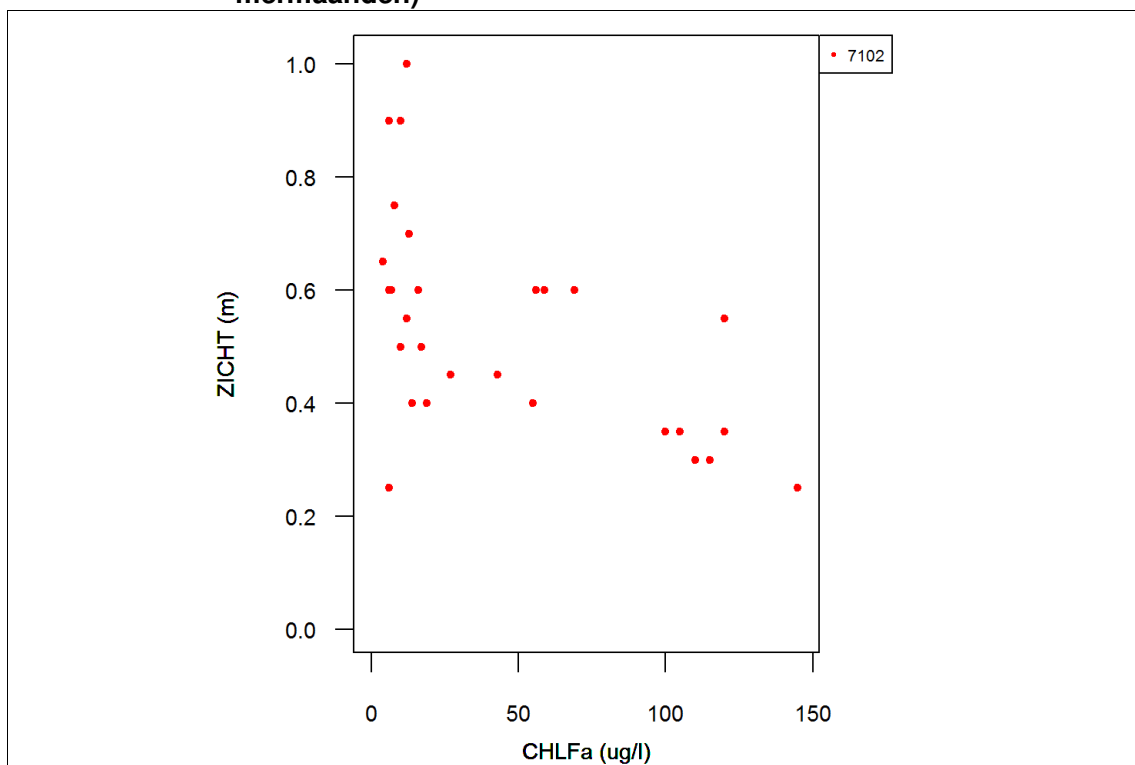
Algen

Het doorzicht wordt beïnvloed door natuurlijke uitdoving en het aantal deeltjes in het water. Deze deeltjes kunnen bestaan uit zwevend stof of algen. Helaas zijn er geen metingen beschikbaar van het gehalte aan zwevend stof in de Kardingierplas. De hoeveelheid algen in het water is wel bekend. In afbeelding 3.21 is het verloop in de chlorofylconcentratie, een maat voor de algenconcentratie, in de Kardingierplas weergegeven. De algenconcentratie laat een duidelijke toename zien in de zomer, gelijk met de P- en N-concentraties en de afname in doorzicht. In afbeelding 3.22 is het chlorofyl-a gehalte uitgezet tegen het doorzicht. Daaruit blijkt dat bij een hogere algenconcentratie het doorzicht laag is.

Afbeelding 3.21. Chlorofyl-a gehalte ($\mu\text{g/l}$) in de Kardingierplas



Afbeelding 3.22. Verhouding chlorofyl-a/doorzicht in de Kardingierplas (alleen zomermaanden)



Conclusie

Er is in het begin van het jaar voldoende doorzicht, dus zal het lichtklimaat naar verwachting geen beperking opleveren voor de ontkieming en groei van waterplanten. Later in het jaar verslechteren de condities als gevolg van algengroei. Mogelijk zorgt ook de visstand voor een verslechtering van het lichtklimaat.

3.3.3. Stoplicht 3: productiviteit waterbodem

Het derde stoplicht betreft de productiviteit van de waterbodem. Waterbodems zijn in staat om nutriënten te binden ('sink'), maar kunnen ook een bron zijn van nutriënten door interne nalevering ('source'). De verhouding tussen de aanwezige voorraad P en bindende stoffen (met name Fe) bepaalt of de waterbodem een sink of een source is. Omdat S een belangrijke concurrent is van P in de binding met Fe en omdat SO₄ kan zorgen voor afbraak van organisch materiaal, speelt ook de aanwezigheid van S een belangrijke rol in de functie van de waterbodem.



Om inzicht te krijgen in de interne nalevering van de waterbodem zijn in november 2010 slib- en bodemvochtmonsters genomen door Arcadis [lit. 5]. In dit onderzoek zijn onder andere Fe, S, Al en P uitgebreid gemeten. Deze gegevens zijn in het huidige onderzoek gebruikt om inzicht te krijgen in de mogelijke nalevering van nutriënten. Om potentiële nalevering te bepalen hebben we een quickscan uitgevoerd die op basis van de verhouding tussen Fe-S/P ratio de nalevering bepaald. Deze quickscan is ontwikkeld in het kader van het BaggerNut onderzoek [lit. 4].

In tabel 3.2 en tabel 3.3 zijn de door Arcadis gemeten waarden en de potentiële nalevering zoals berekend in de quickscan, weergegeven. De potentiële P-nalevering vanuit de bodem is laag (< 1 mg/m²/dag). Slechts op één locatie (punt 4) is de potentiële nalevering vanuit de bodem meer dan 1 mg/m²/dag. Zelfs in gesimuleerde zuurstofloze omstandigheden komt er nauwelijks P vrij vanuit de bodem.

Tabel 3.2. Slibmonsters

	P mg/kg (DW)	Fe mg/kg (DW)	S mg/kg (DW)	P-nalevering (mg/m ² /d)
1	0,11	4,6	0,73	< 1
2	0,11	3,8	0,62	< 1
3	0,07	2,9	0,39	< 1
4	0,24	13,0	2,3	< 1
5	0,06	2,6	0,23	< 1

Tabel 3.3. Bodemvochtmonsters

	P mg/l (FW)	Fe mg/l (FW)	S mg/l (FW)	P-nalevering (mg/m ² /d)
1	0,42	0,98	12,0	< 1
2	1,2	1,9	8,5	< 1
3	1,0	1,7	9,7	< 1
4	2,1	1,7	12,0	1,4
5	1,3	2,3	7,9	< 1

Conclusie

De nalevering vanuit de bodem is laag en is geen bron van nutriënten. Dit is opvallend, omdat er wel sprake is van een toename van de P-concentratie in de zomerperiode. Mogelijk komt dit P ergens anders vandaan.

3.4. Ecologie

3.4.1. Vegetatie

Samenstelling en bedekking

Vegetatie heeft in de concurrentie met algen vaak het voordeel dat een deel van de biomassa de winter overleeft (voornamelijk wortelstokken) waardoor de vegetatie bij de ontkieming in het voorjaar een voorsprong heeft op de algengroei.

De vegetatie is in de Kardingerplas niet bemonsterd. Er zijn daarom geen geschikte gegevens beschikbaar die mee kunnen worden genomen in de analyse. Wel is aangegeven dat de plas jaarlijks sterk vol groeit met ondergedoken planten, voornamelijk Schedefonteinkruid, Haarfonteinkruid en in mindere mate kranswieren (Verbeek, mon. med.).

Maaibeheer

In de Kardingerplas wordt het zwemgedeelte eenmaal in het zwemseizoen gemaaid. Dit om overlast voor zwemmers te verminderen. Daarnaast wordt de gehele plas in het najaar gemaaid. Voorheen werd de gehele plas in het zwemseizoen gemaaid. De bedoeling is dat de planten tot 50 cm onder het wateroppervlak worden afgemaaid. De afgemaaide delen worden verwijderd. De precieze timing van het maaien en de afgemaaide hoeveelheden zijn niet bekend.

Achtergrond bij maaibeheer

Er kunnen verschillende aanleidingen zijn om ondergedoken vegetatie te maaien. Veelal wordt gemaaid om overlast voor recreanten (zwemmers, plezierjacht) te verminderen of vermijden. Planten kunnen ook de doorstroming in een watergang verminderen. Daarnaast worden bij het maaien ook nutriënten uit het watersysteem verwijderd wat een verbetering van de waterkwaliteit op kan leveren. Maaien kan ook nadelige effecten hebben. Tijdens het maaien kan de bodem verstoord raken. De opwerveling van bodemdeeltjes als gevolg van de verstoring kan een verminderd doorzicht tot gevolg hebben. Er komt dan minder licht op de bodem, waardoor planten minder mogelijkheden hebben om te groeien. Deze opwerveling wordt niet alleen veroorzaakt door het uit de grond trekken van de planten maar ook door waterstromen veroorzaakt door (de motor van) de boot. Het maaien kan ook tot gevolg hebben dat er nutriënten vrijkomen. Wanneer niet alle afgemaaide vegetatie wordt verwijderd, leidt dat tot versnelde afbraak van de plantendelen. Ook worden planten gekneusd, waardoor extra nutriënten beschikbaar komen.

Aangezien het maaien in het najaar plaats vindt en algenbloei in de zomer lijkt er geen directe relatie tussen het maaibeheer en de algenbloei te zijn. Er zijn weinig concrete getallen bekend over de hoeveelheid nutriënten die vrijkomen na het maaien, maar wanneer het maaisel direct wordt afgevoerd zullen er weinig voedingsstoffen vrijkomen. Desondanks lijkt het verstandig om niet voor juli te gaan maaien. De planten ondervinden dan minder nadeel van het maaien en kunnen nog weer herstellen, terwijl overlast in het zwemseizoen beperkt blijft.

Een belangrijk gegeven is dat de P-concentratie toeneemt in de zomerperiode. Twee mogelijke bronnen zijn de uitlaat van het helofytenfilter en de waterbodem. In het voorgaande hebben we gezien dat beide niet kunnen zorgen voor de volledige toename in de concentratie. Een mogelijke derde bron zijn de waterplanten in de Kardingerplas. We hebben gezien dat de (licht)condities vanaf ongeveer juli ongunstiger worden. De waterplanten in het zwemgedeelte worden bovendien gemaaid. Mogelijk is hier sprake van een causaal verband en zorgen de waterplanten voor nalevering van P naar het oppervlaktewater (waardoor de algenconcentratie toeneemt, de lichtcondities verder verslechteren en plantenmateriaal afsterft). Dit zullen we in het vervolg verder onderzoeken.

3.4.2. Vis

De visstand is in de Kardingerplas niet bemonsterd. Er zijn daarom geen geschikte gegevens beschikbaar die mee kunnen worden genomen in de analyse.

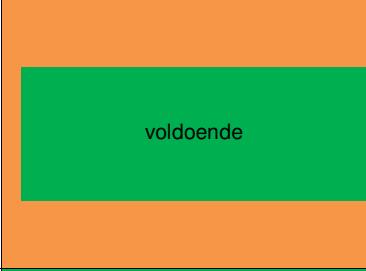

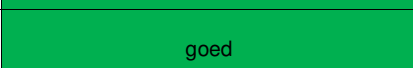
Mondeling is aangegeven dat er forse karpers en brasems in de plas aanwezig zijn, maar hierover zijn geen kwantitatieve gegevens bekend.

3.5. Samenvatting

De Kardingerplas is een kleine ondiepe plas met een aanzienlijke bedekking aan ondergedoken waterplanten. De aanwezigheid van waterplanten suggereert een helder systeem zonder overmatige groei van (blauw)algen. De opname van de beschikbare nutriënten door waterplanten zorgt ervoor dat deze nutriënten niet beschikbaar komen voor algen. Toch is er af en toe sprake van ongewenste (blauw)algenbloei. Deze blauwalgengroei kan mogelijk verklaard worden door de lage N/P-ratio in de belasting (N-limitatie).

In voorgaande paragrafen hebben we de eerste 3 ecologische sleutelfactoren (stoplichten) bekeken. De resultaten zijn tabel 3.4 weergegeven.

Tabel 3.4. Diagnosetabel

stoplicht	status	diagnose
productiviteit water	 voldoende	<ul style="list-style-type: none">- externe P-belasting (0,8 mg/m²/dag) lager dan kritische belasting (1,2 mg/m²/dag)- hoge bedekking met waterplanten- N-limitatie leidt tot blauwalgenbloei (vandaar het rode randje)- verwijdering opgelost N in helofytenfilter versterkt N-gelimiteerde condities
lichtklimaat	 voldoende	<ul style="list-style-type: none">- in voorjaar genoeg licht op bodem voor plantengroei- doorzicht neemt in zomer af door algenbloei- veel waterplanten aanwezig
productiviteit bodem	 goed	<ul style="list-style-type: none">- nalevering is laag- ook zonder ijzer nauwelijks nalevering

Uit de analyse blijkt dat geen van de factoren die door de stoplichten beschreven worden een beperking vormt voor de ontwikkeling van ondergedoken waterplanten. Dit is in tabel 3.4 grafisch weergegeven door de stoplichten op groen te zetten. Met de 3 groene stoplichten wordt aangegeven dat er goede kansen zijn voor de ontwikkeling van waterplanten. De plas staat in de praktijk ook vol met waterplanten. Het voorkomen van algenbloei laat zien dat er ondanks de gunstige situatie voor plantengroei nog wel aandachtspunten zijn met betrekking tot het ecologisch systeemfunctioneren. Uit de systeemanalyse komt naar voren dat dit waarschijnlijk samenhangt met verwijdering van beschikbaar N in het helofytenfilter (stoplicht 1). Daarom heeft stoplicht 1 in tabel 3.4 een oranje rand gekregen.

In het navolgende hoofdstuk wordt de toepassing van PCLake verfijnd om meer inzicht in het systeemfactoren te krijgen. Daarnaast wordt gekeken of PCLake de Kardingerplas goed kan modelleren.

4. PCLAKE

In de vorige hoofdstukken is de huidige toestand van de Kardingerplas geanalyseerd aan de hand van de stoplichten methodiek. In dit hoofdstuk wordt uitgebreider naar de Kardingerplas gekeken met behulp van het model PCLake. In plaats van alleen een aantal kentallen worden nu ook (onder andere) berekende tijdreeksen van N en P-belastingen aan het model meegegeven.

4.1. Methode

Er zijn een aantal instellingen aangepast ten opzichte van de standaard instellingen. Het in- en uitgaande debiet, verdamping en de P- en N-belasting staan standaard op een vaste waarde. In dit onderzoek zijn deze vervangen door de tijdreeksen afkomstig uit de waterbalans. Daarnaast zijn diepte (1,17 m), striklengte (300 m) en bodemtype (zand) opgegeven. Uitgegaan is van een heldere begintoestand. Het model is doorgerekend voor de periode 1 januari 1996 tot 31 december 2012, gelijk aan de periode van de waterbalans.

4.2. Resultaten

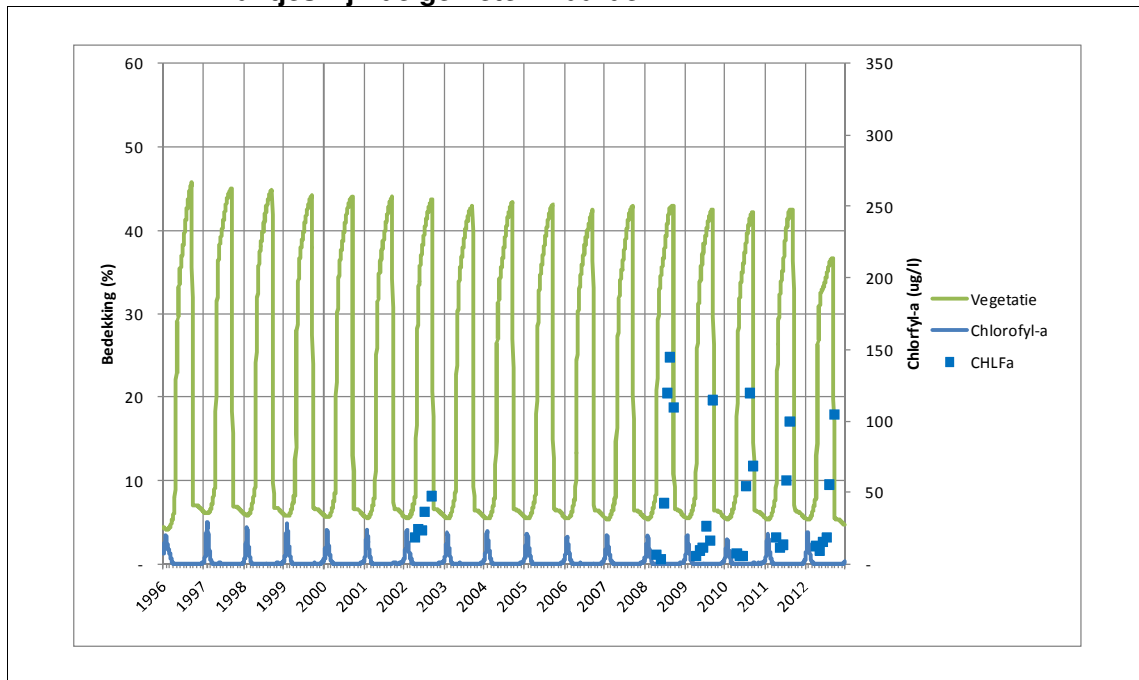
In

afbeelding 4.1 is de voorspelde vegetatiebedekking weergegeven. Het model voorspelt met de huidige belastingen een heldere plantenrijke plas. De planten bedekken in de zomer tot 45 % van het wateroppervlak. In de winter sterven de planten af. Op dat moment neemt de P(O₄)-concentratie toe (afbeelding 4.2), waardoor algen kunnen profiteren van het vrijgekomen fosfor/fosfaat. De voorspelde vegetatiebedekking komt overeen met de plantenrijke situatie in de Kardingerplas.

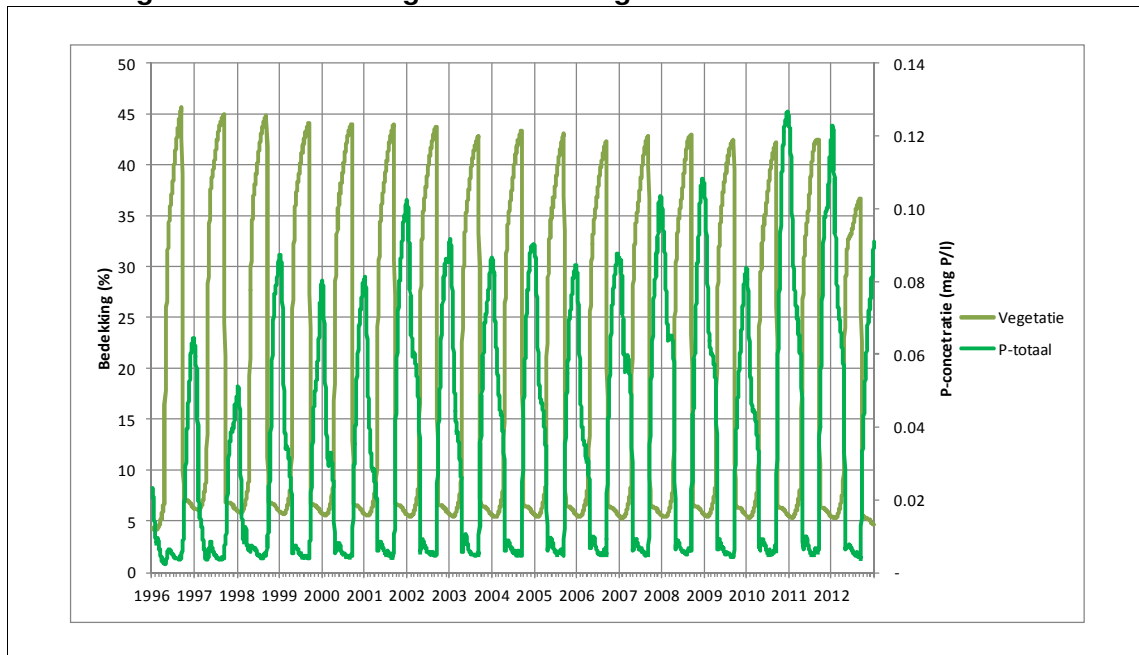
In de modelresultaten (afbeelding 4.3) valt verder op dat de fosfor- en algenpieken in het model een half jaar later dan de gemeten pieken plaatsvinden. Het complete patroon is een halfjaar opgeschoven. De orde grootte van de P-totaal en PO₄-concentraties zijn wel in overeenstemming. Waarom de voorspelde en gemeten P- en algenconcentraties uit de pas lopen is vooralsnog onduidelijk.

Hoe dit precies zit, is voor ons nog onduidelijk. Een mogelijke theorie is dat het afsterven van planten geleidelijker gebeurt, waardoor P al eerder beschikbaar komt. Algen kunnen dan ook al eerder tot ontwikkeling komen. In PCLake sterven planten nu in één keer massaal af, wat in de praktijk weinig voorkomt. In het vervoltraject zal in meer detail worden gekeken naar de wijze waarop PCLake het systeemfunctioneren van de Kardingerplas modelleert.

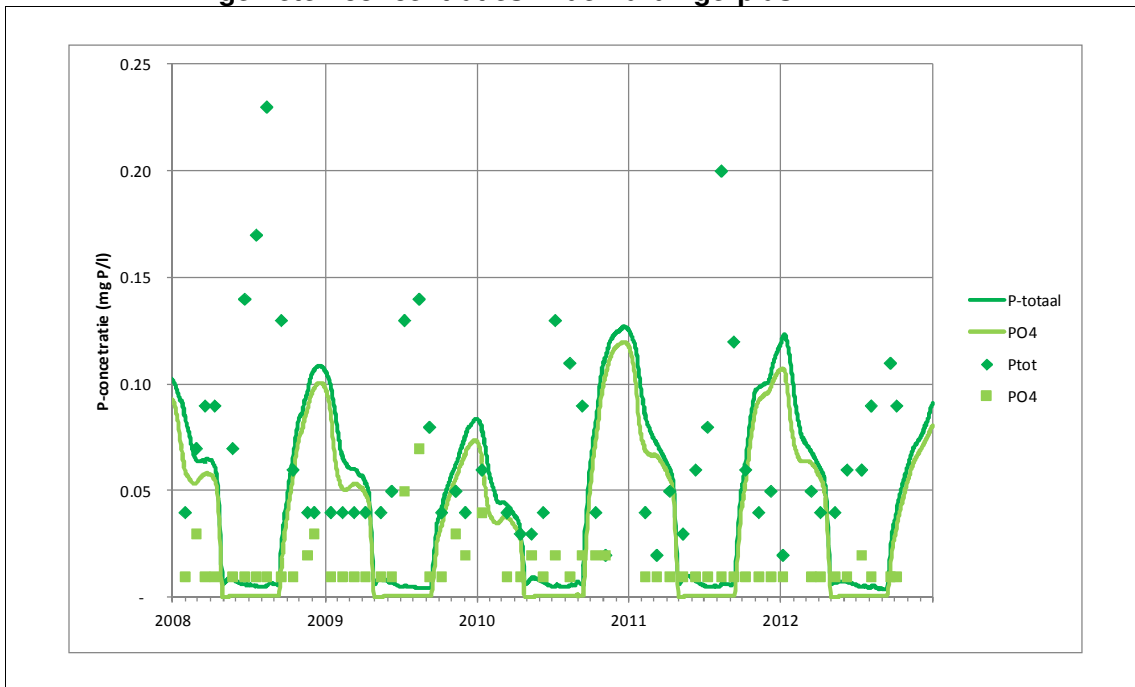
Afbeelding 4.1. Berekende vegetatiebedekking en Chlorofyl-a-concentratie. De vierkantjes zijn de gemeten waarden



Afbeelding 4.2. Berekende vegetatiebedekking en P-concentratie



Afbeelding 4.3. Berekende en gemeten P- en PO4 concentratie. De stippen zijn de gemeten concentraties in de Kardingerplas



5. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

5.1. Ecologisch functioneren Kardingerplas

In de systeemanalyse is gekeken naar het ecologisch functioneren van de Kardingerplas, waarbij het begripen van het systeem centraal staat. De Kardingerplas is een goed functionerend systeem met helder water en een aanzienlijke bedekking aan ondergedoken waterplanten. De eerste 3 stoplichten lijken daarmee op groen te staan. Het functioneren van de Kardingerplas is ook in lijn met de voorspelling op basis van PCLake. Ondanks de gunstige condities in de plas treedt er jaarlijks blauwalgenbloei op. Deze bloei vindt meestal in de nazomer plaats. Op basis van de systeemanalyse lijkt de blauwalgenbloei het gevolg te zijn van PO₄-nalevering uit het helofytenfilter in combinatie met een ongunstige N/P-ratio in de Kardingerplas. De nalevering uit het helofytenfilter wordt veroorzaakt door een te hoge nutriëntenbelasting op het filter vanuit het Boterdiep en treedt ieder najaar op. Om een verbetering van de waterkwaliteit te bewerkstelligen is het wenselijk om de belasting op het helofytenfilter te verlagen.

5.2. Beheermaatregelen

De nutriënten die vanuit het helofytenfilter naar de plas worden aangevoerd, kunnen bij de lange verblijftijd worden opgenomen in de ecologische processen in de plas. Het aangevoerde PO₄ komt in de algenbloei tot expressie. Om het optreden van algenbloei te voorkomen kan ervoor gekozen worden om:

- de verblijftijd te verlagen;
- minder water in te laten;
- de kwaliteit van het inlaatwater te verbeteren.

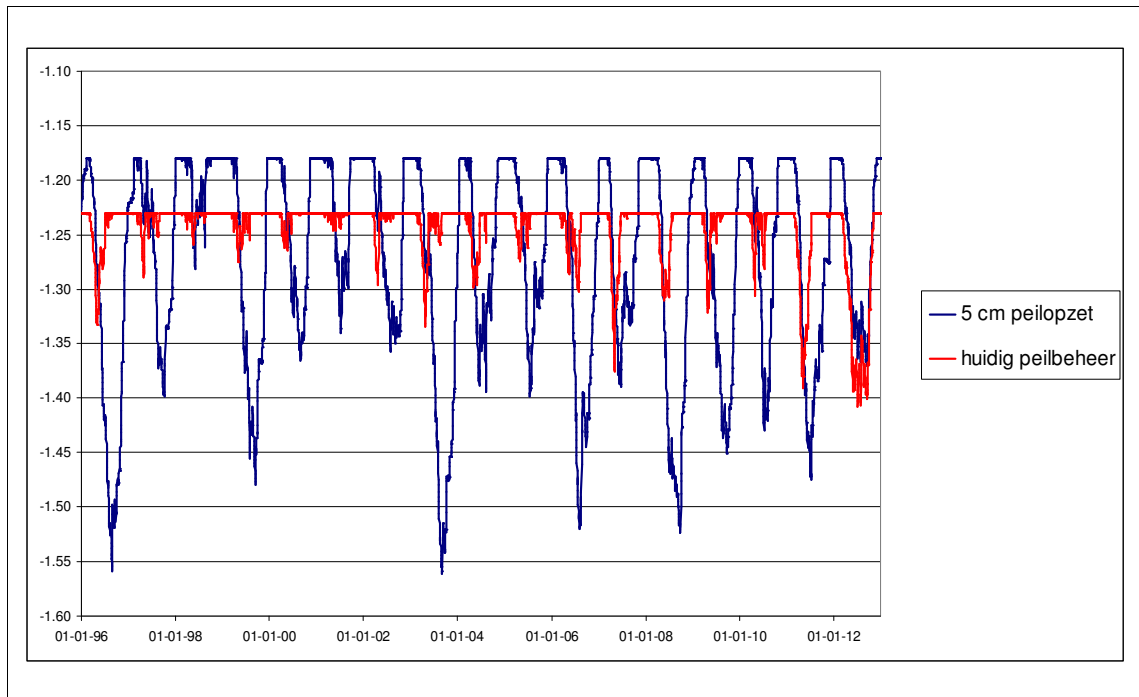
5.2.1. Verlaging van verblijftijd (niet wenselijk)

Om het systeem verblijftijdgestuurd te maken (verblijftijd korter dan 21 dagen), moet het ingaande debiet sterk verhoogd worden. Door verlaging van de verblijftijd worden de mogelijkheden voor het tot expressie komen van nutriënten beperkt. Er worden dan echter wel veel nutriënten aangevoerd, die tot expressie zullen komen als de verblijftijd in (een gedeelte) van de plas (periodiek) oploopt. Als gevolg van de verhoogde aanvoer kunnen extreme reacties van het watersysteem verwacht worden. Het doorspoelen van de Kardingerplas is daarom geen wenselijke oplossing. De capaciteit van het bestaande gemaal en de aan- en afvoerende watergangen is onvoldoende.

5.2.2. Beperking van de inlaat

De belasting op de Kardingerplas kan ook worden teruggebracht door de wateraanvoer te verminderen. In 2012 is hier al een proef mee uitgevoerd. Het inlaatbeheer bij de helofytenfilter is toen gewijzigd, waarbij de inlaat naar het helofytenfilter dusdanig werd beperkt dat er nauwelijks nog wateraanvoer naar de plas plaatsvond. Daarmee is de belasting op de plas sterk verminderd. Het is wenselijk om deze aangepaste vorm van beheer voort te zetten en eventueel nog verder door te voeren door helemaal geen water in te laten. De kans op het optreden van ongewenste peiluitzakking gedurende het zomerhalfjaar kan beperkt worden door het maximumpeil te verhogen en in de winter een buffer op te bouwen. Het berekende peilverloop zonder waterinlaat en met een verhoging van 5 cm van het maximumpeil is te zien in afbeelding 5.1. Het huidige peilbeheer is ter referentie erbij gezet.

Afbeelding 5.1. Berekend waterpeil in de Kardingerplas met een maximumpeil van -1,18 mNAP en geen minimum peil over de periode 01-01-2006 tot en met 31-12-2012



5.2.3. Verbeteren kwaliteit inlaatwater

De nalevering van nutriënten op de plas is het gevolg van de aanvoer van voedselrijk water naar het helofytenfilter. Het filter is onvoldoende in staat om de voedingsstoffen uit het inlaatwater te binden, waardoor de nalevering aan de plas optreedt.

De zuiveringscapaciteit van het helofytenfilter is beperkt. Nalevering treedt op doordat de bindingscapaciteit van het helofytenfilter verzadigd is. Er worden dan meer nutriënten aangevoerd, dan dat in het filter gebonden kunnen worden. Om bindingsplaatsen vrij te maken zou het helofytenfilter periodiek kunnen worden droog gezet. Door de oxidatieprocessen die bij droogval plaatsvinden, komt een deel van de bindingsplaatsen weer vrij. Het fosfaat dat al gebonden is, wordt bij droogval echter niet afgevoerd. Droogval heeft daardoor maar een tijdelijk effect. Om het fosfaat, dat zich sinds de aanleg van het helofytenfilter heeft opgehoopt, af te voeren, is het wenselijk om het helofytenfilter te schonen (baggeren).

Voordat wordt besloten om te gaan baggeren moet er wel eerst onderzoek worden gedaan naar de opbouw van de bodem van en onder het helofytenfilter. Als er bij het baggeren juist een nutriëntenrijke bodem wordt blootgelegd kunnen er juist meer voedingsstoffen vrijkomen, waardoor het baggeren een negatieve uitwerking op de nutriëntenhuishouding heeft. Het schonen moet wel periodiek gebeuren. Daarnaast zal het resultaat van het baggeren niet afdoende zijn om de belasting op de Kardingerplas voldoende te laten verminderen. Daarom is het wenselijk om het baggeren niet als zelfstandige maatregel, maar alleen in combinatie met andere maatregelen in te zetten.

De belangrijkste maatregel om de kwaliteit van het water dat op de plas wordt ingelaten te verbeteren betreft de verbetering het water dat wordt ingelaten op het helofytenfilter. Voorsnog wordt water ingelaten vanaf het Boterdiep.

De wateraanvoer vanuit het Boterdiep zou onder meer beperkt kunnen worden door regenwater dat op het dak van Sportcentrum Kardingge valt aan te voeren. Om ongewenste stoffen (zware metalen en bacteriën) uit het regenwater te verwijderen, zou dit water via het helofytenfilter geleid kunnen worden voordat het wordt ingelaten op de plas.

5.2.4. Aanbevelingen

Samenvattend bevelen we op basis van de uitgevoerde analyses de volgende maatregelen aan:

- vermindering van de inlaat van water vanuit het helofytenfilter op de Kardingplas door:
 - het inlaten van water op de Kardingplas tot een minimum te beperken;
 - peilmarges vergroten;
- verbetering van de kwaliteit inlaatwater door:
 - vermindering van de inlaat op het helofytenfilter;
 - verbetering werking helofytenfilter. Periodieke droogval en het baggeren van de waterbodem kunnen hiervoor geschikte maatregelen vormen. Om een definitief advies te kunnen geven is onderzoek naar de opbouw van de waterbodem in het helofytenfilter nodig;
 - gebruik te maken van alternatieve waterbronnen, zoals regenwater van Sportcentrum Kardingge.

6. LITERATUUR

1. Nico Jaarsma, Marcel Klinge en Leon Lamers (in opdracht van STOWA), 2008, *Van helder naar troebel... en weer terug, een ecologische systeemanalyse en diagnose van ondiepe meren en plassen voor de Kaderrichtlijn Water*. Rapportnummer 2008-04, ISBN 978.90.5773.386.4.
2. Jan H. Janse , 2005, *Model studies on the eutrophication of shallow lakes and ditches*. ISBN 90-8504-214-3.
3. Witteveen+Bos, 2006, *Interacties tussen stuurvariabelen voor ecologische doelen in meren, fase 2: analyse van simulaties*. Referentie BHV-4-1/schj16/001.
4. M.D.M. Poelen, L.J.L. van den Berg, G.N.J. ter Heerdt, R. Bakkum, A.J.P. Smolders, N.G. Jaarsma, R.J. Brederveld en L. P.M. Lamers, 2012, *WaterBODEMbeheer in Nederland: Maatregelen Baggeren en Nutriënten (BaggerNUT) - metingen interne nutriëntenmobilisatie en decompositie (MIND-BAGGERNUT, Tussenrapportage 2012*. Rapportnummer 2012.11.
5. Redfield A.C., On the proportions of organic derivations in sea water and their relation to the composition of plankton. In *James Johnstone Memorial Volume*. (ed. R.J. Daniel). University Press of Liverpool, pp. 177–192, 1934.
6. Schep, S., Moria, L., Geest van G. en Ouboter, M. (in opdracht van Waternet), 2011, *De stoplichtenmethodiek: toepassing in stilstaande wateren*.