Deltares

Fosfaat in het Markermeer-IJmeer

Een ruimtelijk gedifferentieerde balansstudie

Fosfaat in het Markermeer-IJmeer
Een ruimtelijk gedifferentieerde balansstudie

Auteur(s)
Ruurd Noordhuis
Menno Genseberger
Valesca Harezlak

Deltares

Fosfaat in het Markermeer-IJmeer
Een ruimtelijk gedifferentieerde balansstudie

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	De heer M. van den Berg
Referenties	
Trefwoorden	Fosfaat, Markermeer, Zandwinput, Vaargeul, Stroming, Verblijftijd, Accumulatie

Documentgegevens	
Versie	0.1
Datum	11-08-2022
Projectnummer	11206217-016
Document ID	11206217-016-ZWS-0001
Pagina's	79
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)		
	Ruurd Noordhuis	
	Menno Genseberger	
	Valesca Harezlak	

Onderstaande tabel is niet voor publicatie

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord
0.1	Ruurd Noordhuis	Pascal Boderie	Bianca Peters

Samenvatting

Enkele jaren geleden is door de UvA een fosfaatbalans van het Markermeer opgesteld. Hieruit blijkt dat er ongeveer drie keer zoveel fosfaat het Markermeer in komt dan er uit gaat. Toch worden in de waterkolom inmiddels nog maar zeer lage concentraties gemeten. Deze studie onderzoekt waarom dat zo is en waar het fosfaat terecht komt. Daarvoor worden de bronnen en routes van het aangevoerde water verkend met behulp van een stromingsmodel dat gevoed is door de balansgegevens van de UvA, waterkwaliteitsdata van Rijkswaterstaat en aangevuld met projectgegevens en weersgegevens van het KNMI. Bij de modellering is gebruik gemaakt van “tracers” om de verplaatsing van het water vanaf vier bronnen te bestuderen; de Eem, de Blocq van Kuffeler, de Houtribsluizenen en de Krabbersgatsluizen. Het resultaat is een meer ruimtelijk gedifferentieerd beeld van de water- en stoffenbalans.

Ruimtelijke differentiatie waterbalans
Uit de studie blijkt dat het water in het Markermeer-IJmeer weliswaar sterk gemengd is en door het hele systeem beweegt, maar dat de verschillende bronnen niettemin domineren in verschillende delen van het systeem. Ook varieert de duur van het transport waardoor verschillende processen (zoals opname van fosfaat in biota) meer of minder belangrijk zijn. De waterbalans heeft een sterk seizoenspatroon, met een groot verschil tussen zomer en winter.

In de winter vormen de Eem en Flevoland (via Blocq van Kuffeler) belangrijke aanvoerbronnen van water, terwijl de afvoer grotendeels via de Houtrib- en Krabbersgatsluizen naar het IJsselmeer plaatsvindt. Er is dan dus netto een noordelijke waterbeweging die volgens de modellen meestal gepaard gaat met een circulaire stroming met de klok mee. Daarbij voegt het water van de Blocq van Kuffeler zich vaak bij dat van de Eem, het stroomt vaak eerst naar het zuiden en dan langs de westkust mee richting noorden.

In de zomer is de aanvoer vanuit het zuiden veel geringer, terwijl er dan wel een relatief sterke afvoer is via de Oranjesluizen naar het IJ en Noordzeekanaal. Er is juist relatief sterke aanvoer vanuit het IJsselmeer, zodat er netto een meer zuidelijke waterbeweging is. Verdamping is echter ook belangrijk als verliespost en de wind heeft minder invloed, zodat het water uit het IJsselmeer de neiging heeft om in het Markermeer te stagneren.

Zuidelijke aanvoer en trapping/vastlegging van fosfaat
Water en fosfaat uit de Eem en de zuidelijke randmeren komt onderweg diepe putten, waterplanten en hoge dichtheden van filterende mosselen tegen. Omdat de aanvoer in de winter aanzienlijk groter is dan in de zomer is daarbij vooral de rol van de putten van belang. Berekeningen suggereren dat bij storm omvangrijke verplaatsingen van opgewerveld sediment plaatsvinden en vervolgens sedimentatie in de putten. Op basis van verschilkaarten in bodemhoogte en fosfaatconcentraties in sediment en zwevend stof blijft de helft of meer van de aanvoer van fosfaat naar het Markermeer in de putten achter. Voorbij de Hollandse Brug vindt door de verwijding van van de watergang ook verdunning plaats en de verblijftijd neemt toe. De windinvloed wordt groter, waardoor het resterende fosfaat in de waterkolom meer en meer wordt gebonden aan ijzer in het door de wind opgewervelde sediment (“interne oligotrofiering”). Daardoor wordt het fosfaat nog gevoeliger voor transport naar de putten. In de zomer komt het water uit het zuiden netto niet voorbij Marken.

Noordelijke aanvoer van fosfaat
In het noorden, via de Houtribdijk, wordt dus juist in de zomer veel water ingelaten, in de winter niet. Via de Houtribsluizen wordt wat meer ingelaten dan via de Krabbersgatsluizen. Dit water passeert nog na het meetpunt Houtribhoek in het IJsselmeer, over een traject van 5 km tot de Houtribsluizen eerst aaneengesloten mosselbanken met een grote filtratiecapaciteit. Zwevend stof met daaraan gebonden fosfaat wordt hier uit het water gefilterd. Dit zou ook kunnen betekenen dat de aanvoer van fosfaat via de Houtribsluizen iets is overschat.

Eenmaal in het Markermer treedt ook hier interne oligotrofiëring op, d.w.z. binding van opgelost fosfaat aan (ijzer in) zwevend stof, waardoor het binnengestroomde fosfaat gevoeliger wordt voor transport en sedimentatie, zeker aangezien in de zomer wind-gestuurde resuspensie minder sterk is. Sinds ongeveer 2004 verdwijnt de opgeloste fosfaatfractie geheel in aggregaten (vlokken) van algen en gesuspendeerde sedimentdeeltjes. Uit de verschilkaarten in bodemhoogte wordt duidelijk dat in het verleden grote hoeveelheden slib zijn geaccumuleerd in de oude geulen aan de binnenzijde van de Krabbersgatsluizen, en in de luwte van de bocht in de dijk bij de Houtribhoek, aan Markermeerzijde. Hier is aan de Markermeerzijde de verblijftijd zeer lang en de windinvloed groot, waardoor zwevend stof over grote afstanden naar deze sedimentatiegebieden kan worden getransporteerd.

Verliesposten fosfaat
Sedimentatie vindt elders in het Markermeer ook plaats, bijvoorbeeld in delen van de geulen, recent in de putten en geulen rond Marker Wadden en in het verleden in twee proefputten midden in het Markermeer. Deze zijn veel kleiner dan de putten in het IJmeer en het Gooimeer, maar de sedimentatie verliep er veel sneller. Berekeningen op basis van de verschilkaarten in bodemhoogte suggereren dat opslag in al deze sedimentatiegebieden (samen ongeveer 5% van het totale areaal) het verschil tussen aanvoer en afvoer (fosfaatbalans studie van de UvA) grotendeels tot geheel verklaart.

Andere mogelijke verliesposten die niet in de ruimtelijke balans zijn meegenomen zijn afvoer via vis door vissers en vogels, of toenemende opslag in biota zoals mosselen en planten. Voor vis en mosselen samen lijkt dat te gaan om orde grootte 2-3% van de totale aanvoer van fosfaat naar het Markermeer. Daar tegenover staat de afname van opname in fytoplankton. Ten opzichte van uitstroming en opslag in putten lijkt de rol van biota voor de balans verwaarloosbaar.

Vervolgstudie
Uit deze studie ontstaat het beeld dat de fosfaatbalans sterk ruimtelijk gedifferentieerd is en dat (bij het centrale meetpunt) in het midden van het Markermeer veel minder nutriënten aankomen dan dat berekend wordt op basis van totale menging. Veel fosfaat is waarschijnlijk opgesloten in diepe putten. Om te bevestigen of die opslag inderdaad voldoende groot is om het verschil in aan- en afvoer te verklaren, kan het best worden onderzocht door fosfaatmetingen te doen in het sediment in de putten. Dergelijke metingen zijn tot nu toe niet uitgevoerd, op een enkele uitzondering na. Ook is het raadzaam de voormalige metingen in sediment binnen MWTL te hervatten. Omdat recent de concentraties opgeloste nutriënten weer toenemen is ook aanvulling van de UvA water- en fosfaatbalans zinvol, om te onderzoeken of de gevoeligheid van het aangevoerde fosfaat voor sedimentatie in putten daarbij is afgenomen. Voor het bepalen van mitigatie mogelijkheden zijn modelstudies over de effecten van locatiekeuze en vormgeving van putten goed mogelijk. Metingen van het optreden van stratificatie onder verschillende omstandigheden zijn eveneens zinvol, enerzijds voor modelvalidatie, anderzijds voor combinatie met andere effecten van putten, zoals de opslag van organisch stof (zie bijlage) en de effecten op biota zoals macrofauna en vis.

Inhoud

	Samenvatting	**4**
1	**Inleiding**	**8**
2	**Opzet van de studie**	**9**
2.1	Vraag	9
2.2	Plan van aanpak	9
3	**Gebiedsbeschrijving en methoden**	**10**
3.1	Markermeer-IJmeer	10
3.1.1	MWTL data waterkwaliteit	10
3.2	Randmeren Zuid	11
3.2.1	MWTL data waterkwaliteit	12
3.3	Modellering	13
3.4	Data analyse	15
4	**Resultaten**	**17**
4.1	Ruimtelijke differentiatie waterbalans	17
4.1.1	UvA waterbalans	17
4.1.1.1	Waterbalans over het seizoen	18
4.1.1.2	Afvoer van de Eem	20
4.1.1.3	Spui door de Houtribdijk	20
4.1.2	Bewegingen; tracerstudie	22
4.1.2.1	Conservatieve tracers	22
4.1.2.2	Leeftijdstracers	22
4.1.3	Invloed van wind en inrichting op stroming	25
4.1.3.1	Water uit de Eem	27
4.1.3.2	Water uit de Houtribsluizen	27
4.1.3.3	Water uit de Blocq van Kuffeler	28
4.1.3.4	Water uit de Krabbersgatsluizen	28
4.1.4	Raaien	29
4.2	Fosfaatbelasting	30
4.2.1	Basisgegevens: trends en situatie peiljaren	30
4.2.2	Ruimtelijke differentiatie in data	31
4.2.2.1	Ruimtelijke verdeling aanvoer van fosfaat.	31
4.2.2.2	Seizoenspatronen	31
4.2.2.3	Fosfaat in de waterkolom	32
4.2.2.4	Fosfaat in de bodem	34
4.2.2.5	Nalevering	36
4.2.2.6	Nalevering en zuurstoftekort	37
4.2.2.7	Interne oligotrofiering	37
4.2.3	Zuidelijke route: beïnvloeding door overige factoren	41
4.2.3.1	Diepe putten	42
4.2.3.2	Schatting van sedimentatie in de putten	44
4.2.3.3	Fytoplankton	48

4.2.3.4 Filterende mosselen 48
4.2.3.5 Fosfaat opslag in mosselen 52
4.2.3.6 Waterplanten 52
4.2.4 Noordelijke route 53
4.2.4.1 Mosselen Zuidelijk IJsselmeer 53
4.2.5 In het Markermeer 57
4.2.5.1 Proefputten en andere sedimentatiegebieden Markermeer 57
4.2.5.2 Invloed van stormen 57
4.2.5.3 Benthos aan Markermeerzijde 58
4.2.5.4 Vis 59
4.2.6 Eindbalans 1990-2001 61
4.2.7 Recente ontwikkelingen 63
4.2.7.1 Verloop van retentie na 2000 63
4.2.7.2 Nieuwe putten en geulen Marker Wadden 64

5 Conclusies en discussie 67

6 Aanbevelingen 69

6.1 Heroverweging aanleg putten 69

6.2 Metingen in sedimentatiegebieden 69

6.3 Hervatten metingen in sediment 69

6.4 Metingen en modellering van stratificatie 69

6.5 Aanvulling van de UvA balans 69

7 Referenties 70

Bijlage A 72

A.1 Koolstof 72
A.1.1 Organisch koolstof in het Markermeer 72
A.1.2 Aanvoer vanuit de rivier 73
A.1.3 Veranderingen in het IJsselmeer 75
A.1.4 Blocq van Kuffeler 76
A.1.5 Koolstof vanuit het zuiden 77

1 Inleiding

Het Markermeer is een polder die nooit is drooggemalen. Om deze polder te transformeren in een goed en duurzaam functionerend meer is na bijna een halve eeuw nog steeds een uitdaging. Daarbij is de aard van die uitdaging veranderd als gevolg van veranderingen van buitenaf, zoals afname van de voedselrijkdom van het aangevoerde water, klimaatverandering en toegenomen druk door menselijk gebruik.

Een van de vragen die hierbij speelt komt voort uit de eerstgenoemde drukfactor, de afname van de voedselrijkdom.

Recent is een water en stoffenbalans voor het Markermeer opgesteld door de UvA in samenwerking met Maarten Ouboter (Waternet). Hierin zijn gegevens over de periode 1975-2015 gebruikt, waarbij ontbrekende data zijn ingevuld op basis van KNMI neerslag gegevens (Van der Geest et al. 2017).

Deze balans is echter niet ruimtelijk gedifferentieerd. Er lijkt een discrepantie te zijn tussen de balansgegevens en met name de extreem lage concentraties van de opgeloste fracties van N en P in de waterkolom van het Markermeer, met name in de periode 2004-2015. Ook lijkt de afname in concentraties in zowel water als bodem in strijd met de lange verblijftijd en de balansgegevens, die suggereren dat de aanvoer grotendeels achterblijft in het gebied. Soortgelijke vragen zijn er ook met betrekking tot koolstof. In dit document staan de ruimtelijke differentiatie van de fosfaatbalans en de zoektocht naar het “verdwenen” fosfaat centraal. In een bijlage wordt een eerste aanzet voor een analyse van koolstofstromen gegeven, bedoeld voor een vergelijkbare analyse.

2 Opzet van de studie

2.1 Vraag

In het kader van het project Levend Markermeer is gevraagd om een fosfaatbalans van het Markermeer met ruimtelijke differentiatie en de rol van factoren als vis en wind daarbij.

2.2 Plan van aanpak

Water en stoffenbalans
De basis van de uitvoering is een analyse van waterkwaliteitsdata en balansgegevens in combinatie met modelberekeningen van waterbewegingen. Voor de data analyse is gebruikt gemaakt van MWTL data en van de onderliggende databestanden van de balans van de UvA en Maarten Ouboter (Van der Geest et al. 2017).

Waterbewegingen
De modellering van waterbewegingen is uitgevoerd met behulp van D-Flow FM, met gebruikmaking van tracers voor de ruimtelijke differentiatie. Het beschouwde gebied bestaat uit Markermeer, IJmeer, Gouwzee, Gooimeer, Eemmeer en Eem. De berekeningen worden uitgevoerd voor de jaren 1981 (1979), 2006 en 2016.

Wind
De rol van wind wordt meegenomen in de modellering (KNMI gegevens genoemde peiljaren). De lange termijn effecten van wind (fluctuaties in stormfrequentie) op consolidatie en opwerveling van sediment worden onderzocht door middel van statistische bewerking van monitoringsgegevens van wind en zwevend stof.

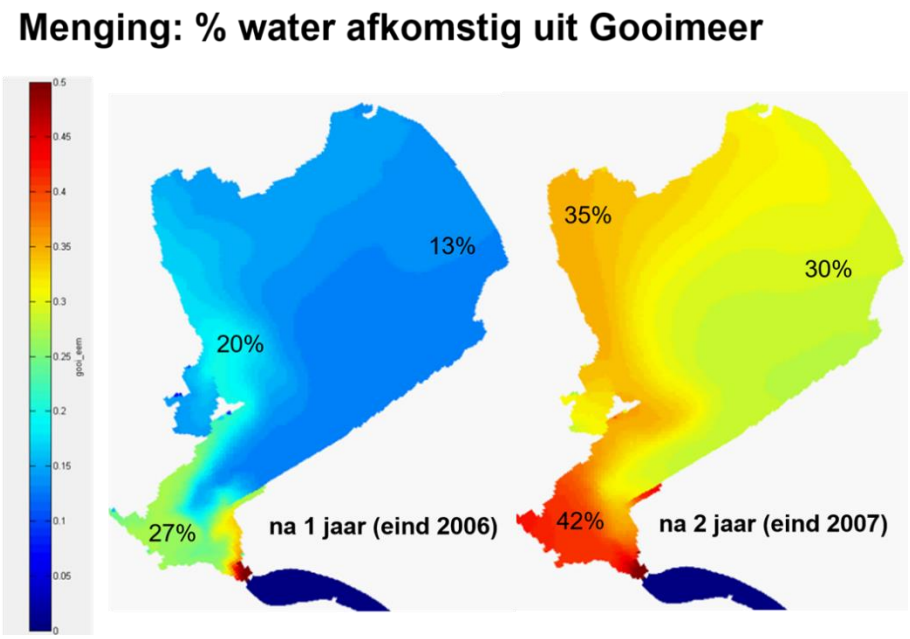
Zandwinputten
Een potentiële verliespost voor fosfaat is sedimentatie in zandwinputten en enkele andere sedimentatiegebieden. De betekenis van deze post is geschat op basis van eerdere studies met behulp van verschilkaarten in bodemhoogte voor de periode 1990-2001 en onderzoek aan proefputten in het Markermeer (Boderie et al. 2010) en MWTL en projectdata met betrekking tot fosfaatconcentraties in sediment en zwevend stof.

Biota
De rol van de onttrekking van vis als verliespost van fosfaat is uitgewerkt op basis van een tijdreeksanalyse van enerzijds de aanlanding van vis in combinatie met literatuurgegevens voer de hoeveelheid fosfaat in de weefsels van vis, anderzijds van de geschatte afvoer van vis naar aalscholverkolonies buiten het gebied. Minder intensief zijn ook de rollen van andere biota beschouwd, met name die van Driehoeks- en Quaggamosselen.

3 Gebiedsbeschrijving en methoden

3.1 Markermeer-IJmeer

Het Markermeer en het IJmeer staan in ruime open verbinding en vormen één waterlichaam in de zin van de KRW. Een eerdere modelstudie gaf aan dat het water binnen dit systeem volledig gemengd wordt (figuur 3.1; Noordhuis et al. 2018). Bij een verblijftijd van een jaar is de stroming voornamelijk door wind gedreven. De menging of vervangingstijd ligt daardoor in de orde van grootte van maanden of langer. Toch heeft ook stroming door met name de Eem en spui via de Oranjesluizen en door de Houtribdijk invloed op de waterbeweging. Daardoor is er een zekere ruimtelijke variatie in verblijftijd en belasting (deze studie).

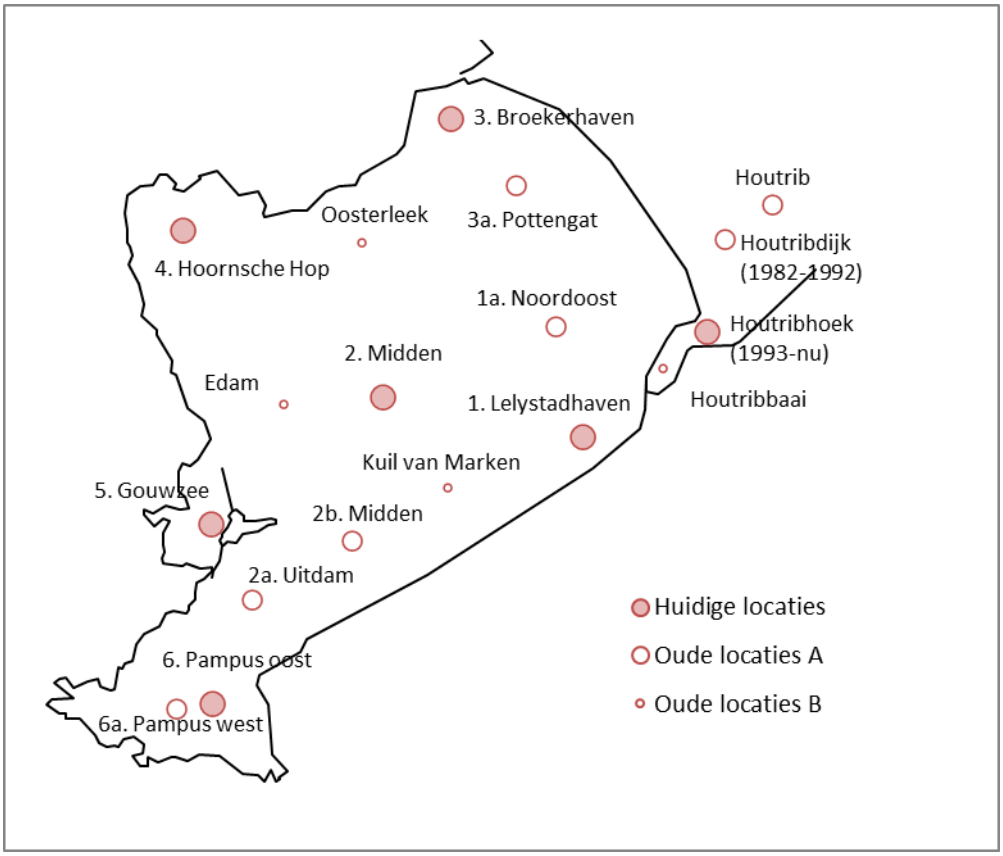


Figuur 3.1. Resultaten van een eerdere modelstudie, die suggereerden dat het water in het Markermeer-IJmeer volledig gemengd is, maar dat dit proces van menging lange tijd duurt.

3.1.1 MWTL data waterkwaliteit

Waterkwaliteit wordt gemonitord op zes locaties (figuur 3.1). Een zevende locatie bij Marker Wadden was nog niet in gebruik tijdens het laatste peiljaar 2016. Tijdens het eerste peiljaar 1981 (1979) waren de locaties Midden en Lelystadhaven nog niet in gebruik. Voor lange termijn studies worden respectievelijk de locaties Uitdam en Noordoost voorafgaand aan 1982 aan deze reeksen toegevoegd. De genoemde locaties worden eens per 4 weken bezocht.

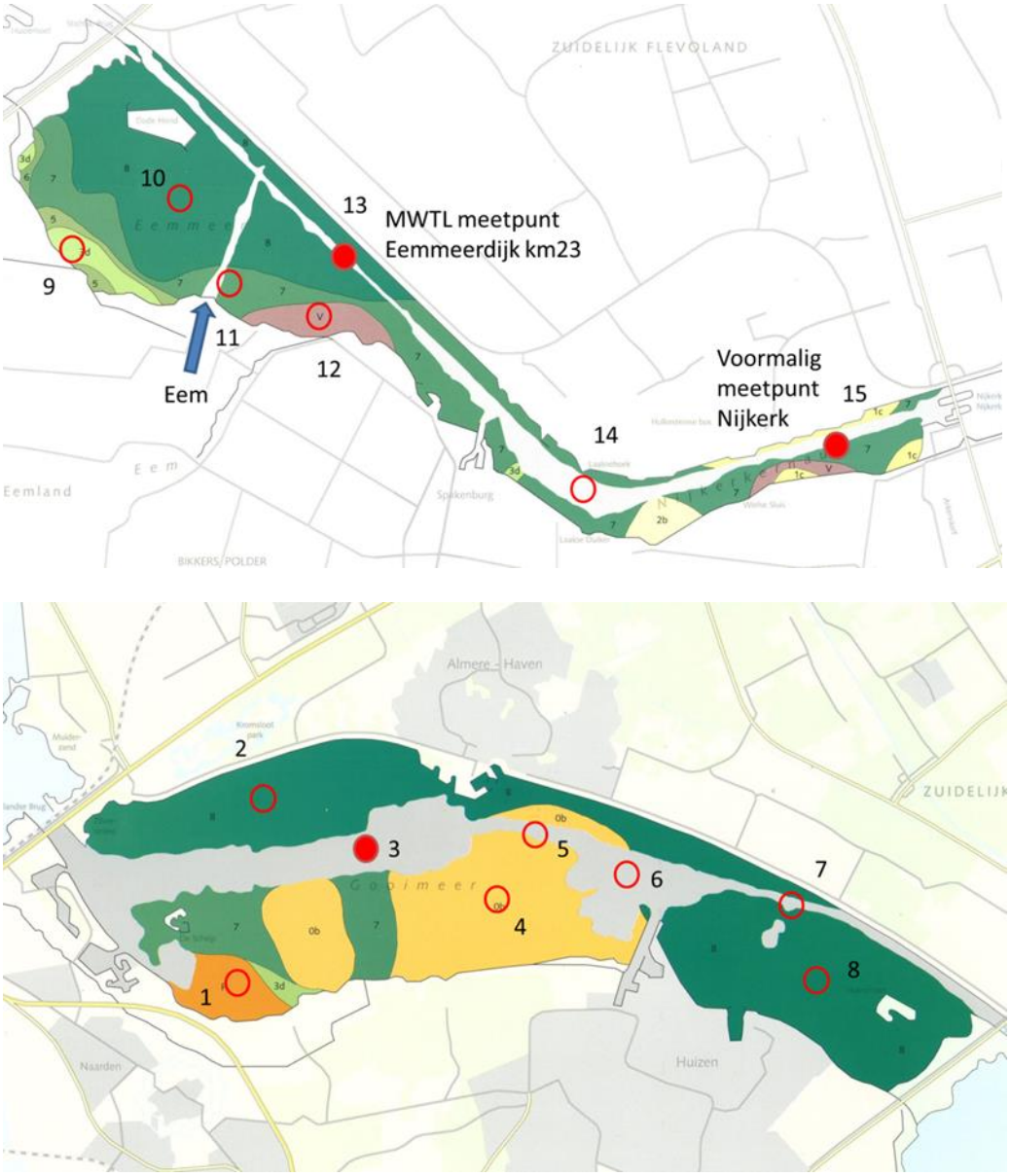
Een reeks chemische analyses in sediment is beschikbaar uit de jaren 1993-2010 van de locatie Lelystadhaven. Bemonstering vond eens per jaar plaats omstreeks oktober. Deze reeks is in 2018 (tijdelijk) in ere hersteld in het kader van KIMA, het onderzoek rond de aanleg van Marker Wadden.



Figuur 3.2. Ligging van oude en huidige meetlocaties van Rijkswaterstaat in het Markermeer-IJmeer en het zuidelijke IJsselmeer.

3.2 Randmeren Zuid

De Randmeren Zuid vormen een afzonderlijk KRW waterlichaam, maar staan niettemin in open verbinding met het IJmeer. Met name de rivier de Eem vormt via de Randmeren Zuid een belangrijke bron van water en stoffen naar het IJmeer. Vanuit de monding van de Eem volgen op de route naar het IJmeer echter twee komvormige verbredingen en twee versmallingen, waarvan met name de laatste relatief smal is.



Figuur 3.3. Ligging van oude (Gooimeer en Nijkerkernauw) en huidige (Eemmeer) meetlocaties van Rijkswaterstaat in de zuidelijke randmeren (gesloten rode stippen) en locaties en nummering van een meetcampagne in september 2017 (Noordhuis & Roskam 2017). Boven: Eemmeer en Nijkerkernauw. Onder: Gooimeer.

Daarnaast komt het water op deze route in het Gooimeer een complex van diepe putten tegen. Deze zijn verbonden naar de vaargeul, die een deel van het water na binnenkomst in het IJmeer naar een aldaar gelegen diepe put voert. Aansluitend heeft ook de evenwijdig aan de Oostvaardersdijk gelegen vaargeul Amsterdam – Lemmer invloed op het gedrag van het water (en sediment).

3.2.1 MWTL data waterkwaliteit

Sinds 2010 is er in de Randmeren Zuid nog maar één MWTL meetpunt voor waterkwaliteit; het punt Eemmeerdijk km23, in de vaargeul nabij de overgang van Nijkerkernauw naar Eemmeer, dus oostelijk van de monding van de Eem. Tot 2010 was er ook een meetpunt in het Gooimeer, genaamd Gooimeer Midden, dat eveneens in de vaargeul lag, direct na de diepste van de twee grote put . In een nog verder verleden was er ook een meetpunt in de vaargeul van het Nijkerkernauw, dichtbij de sluis.

Over de chemie van het sediment zijn alleen anekdotische gegevens beschikbaar. Wel is er een recente studie waarbinnen op een aantal locaties metingen zijn gedaan (Noordhuis & Roskam 2017).

3.3 Modellering

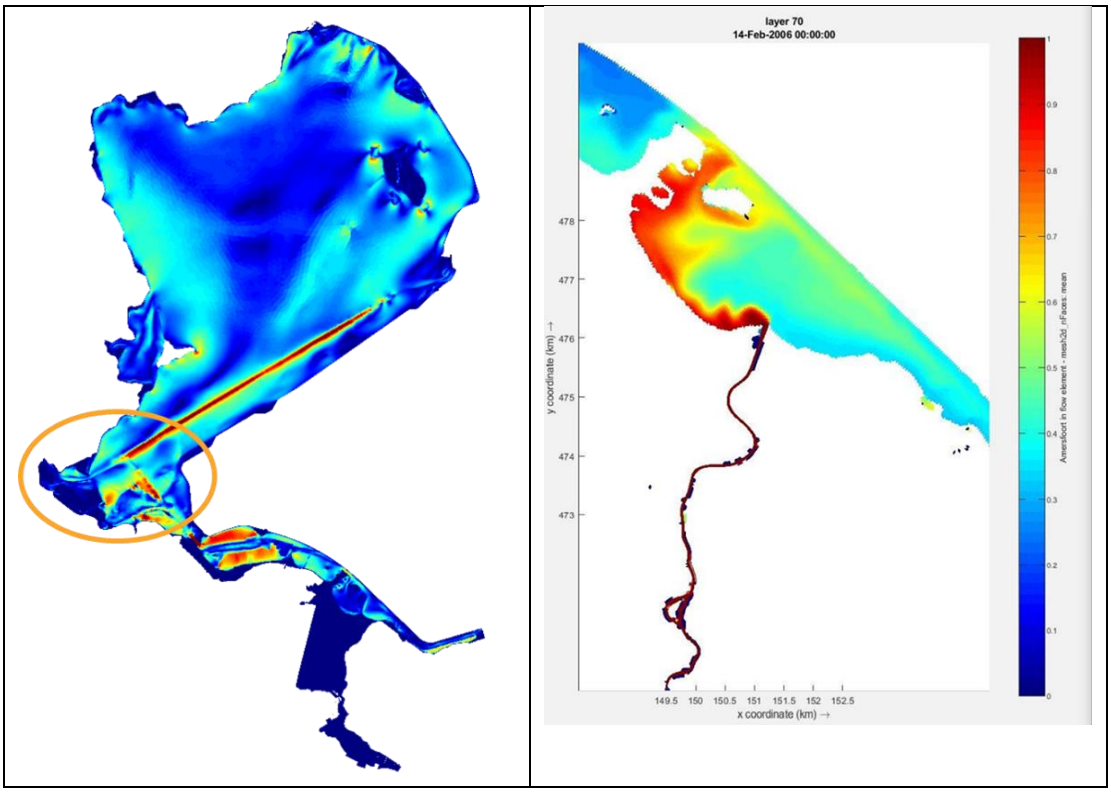
De basis van de uitvoering van de beantwoording van de vraag in deze opdracht is een modelbenadering op basis van balansgegevens, met gebruikmaking van de techniek van UvA en Maarten Ouboter (Van der Geest et al. 2017). De modellering wordt uitgevoerd met behulp van het nieuwe D-Flow FM model, met gebruikmaking van tracers voor de ruimtelijke differentiatie. Het beschouwde gebied bestaat uit Markermeer, IJmeer, Gouwzee, Gooimeer, Eemmeer en Eem. De berekeningen worden uitgevoerd voor drie jaren:

- 1979: Hoge fosfaatbelasting, relatief korte verblijftijd, nat jaarrond, uitstroom Oranjesluizen dominant
- 2006: Lage fosfaatbelasting, lange verblijftijd, droge zomer, uitstroom Houbribsluizen dominant, instroom kleine bijdrage van Zuiderzeeland (Blocq van Kuffeler)
- 2016: Zeer lage fosfaatbelasting, lange verblijftijd, zeer nat voorjaar, droog najaar, geen uitgewerkte balansgegevens

De tracers zijn losgelaten op vier plaatsen: 1) In de Eem bij Amersfoort, 2) bij de Blocq van Kuffeler, 3) bij de Houtribsluizen bij Lelystad en 4) bij de Krabbersgatsluizen bij Enkhuizen.

Met behulp van de tracers, de balansgegevens en de KNMI gegevens voor de desbetreffende jaren wordt het water gevolgd gedurende het jaar. Daarbij wordt enerzijds de verspreiding van dit water in de loop van een jaar in beeld gebracht (conservatieve tracers), in de vorm van de ruimtelijke verdeling van percentages water die na een jaar van de desbetreffende bron afkomstig zijn. Anderzijds worden ruimtelijke patronen van de gemiddelde leeftijd van het water gegeven (leeftijdstracers).

Figuur 3.4 geeft een voorbeeld van het detailniveau waarmee de verspreiding van water uit de Eem met behulp van het verbeterde model in beeld kan worden gebracht.



Figuur 3.4. Voorbeelden van het ruimtelijke detail van de output van het verbeterde model. Links: detaillering van de modelbasis met de positie van onder meer Marker Wadden, de putten in het Gooimeer en Eemmeer en de vaargeul Amsterdam-Lemmer langs de Oostvaardersdijk. Rechts: Verspreiding van Eemwater (fractie (0-1)"tracer") losgelaten in de Eem bij Amersfoort na anderhalve maand (14 februari 2006), met gebruikmaking van balansgegevens en KNMI weersgegevens.

Behalve de ruimtelijke verdeling van concentraties en leeftijden is berekend hoe snel het water uit elk van de vier bronnen over denkbeeldige raaien stroomt. Dit geeft samen met de leeftijdstracers een beeld van de reistijd van het water. De raaien zijn weergegeven in figuur 3.5.

Figuur 3.5. Raaien die gebruikt zijn voor berekening van de cumulatieve debieten over die lijn vanuit de verschillende tracerbronnen. De raaien zijn zo georiënteerd (deze wordt bepaald door eerste en tweede coördinaat) dat de positieve normaal (de denkbeeldige lijn loodrecht op de raai) naar het gebied in de naam van de raai wijst (in de meeste gevallen wijst deze weg vanaf het midden van het Markermeer).

3.4 Data analyse

Dataset UvA balans

De water- en stoffenbalans van de UvA (Van der Geest et al. 2017) is aan Rijkswaterstaat opgeleverd met de onderliggende dataset. Deze is op drie manieren gebruikt:

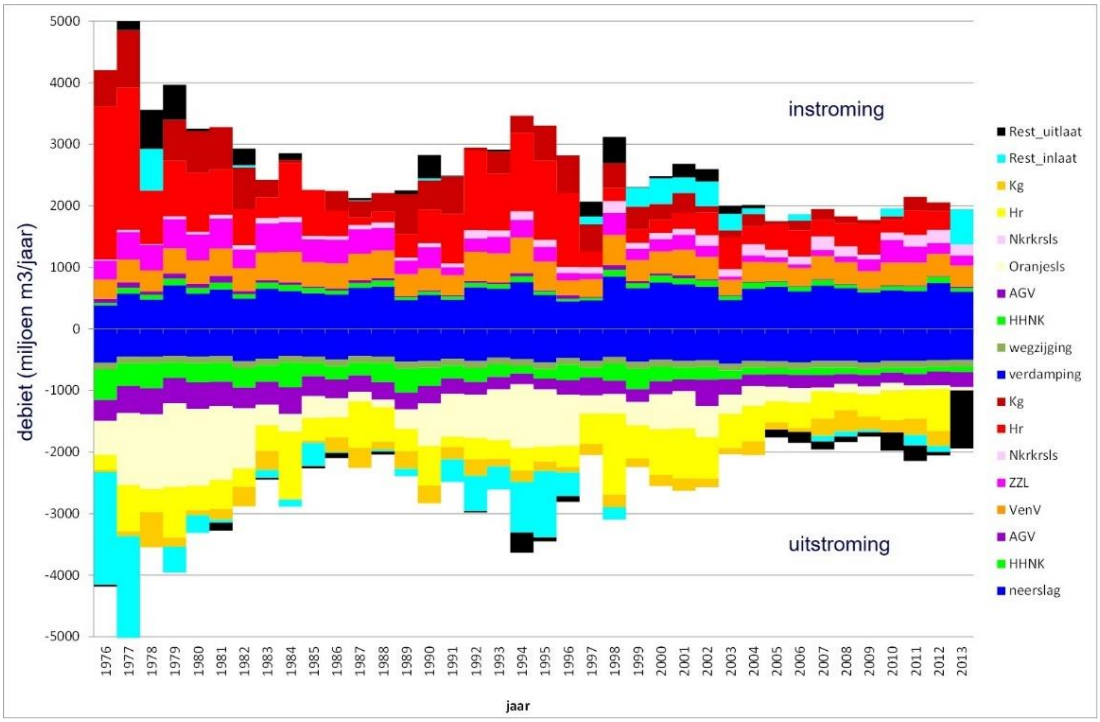
- Om een begin te maken met de ruimtelijke differentiatie.
- Om het seizoensverloop in de waterbalans aan te geven.
- Om de afvoer van fosfaat te bereken uit de waterbalans en MWTL data van fosfaatconcentratie, en deze te vergelijken met de in de UvA studie berekende externe aanvoer van fosfaat.

Verschilkaarten bodemhoogte
Deze zijn gebruikt voor een schatting van permanente sedimentatie van fosfaat in zandwinputten en andere sedimentatiegebieden. Hiervoor is een RWS verschilkaart over 1990-2001 gebruikt en een verschilkaart over ongeveer dezelfde periode van de zuidelijke randmeren (Van Leeuwen 2005). Berekeningen van sedimenttransport uit deze laatste studie zijn vergeleken met eenvoudig uit de verschilkaarten afgelezen ophoogsnelheden. De ophoogsnelheden zijn gecombineerd met fosfaatconcentraties in sediment en zwevend stof in dezelfde periode. Hiervoor zijn in de eerste plaats de schaarse MWTL metingen gebruikt van concentraties in de toplaag van het sediment, aangevuld met projectgegevens (Roskam 2016 en Noordhuis & Roskam 2017). In de tweede plaats zijn berekeningen van gebonden fosfaat in zwevend stof gebruikt in relatie met windsnelheid, om de sedimentmetingen aan te vullen (met name concentraties zwevend stof bij harde wind en storm). Uit ophoogsnelheden en P-gehalte in het sediment zijn de verliesposten voor fosfaat van water naar sediment berekend.

4 Resultaten

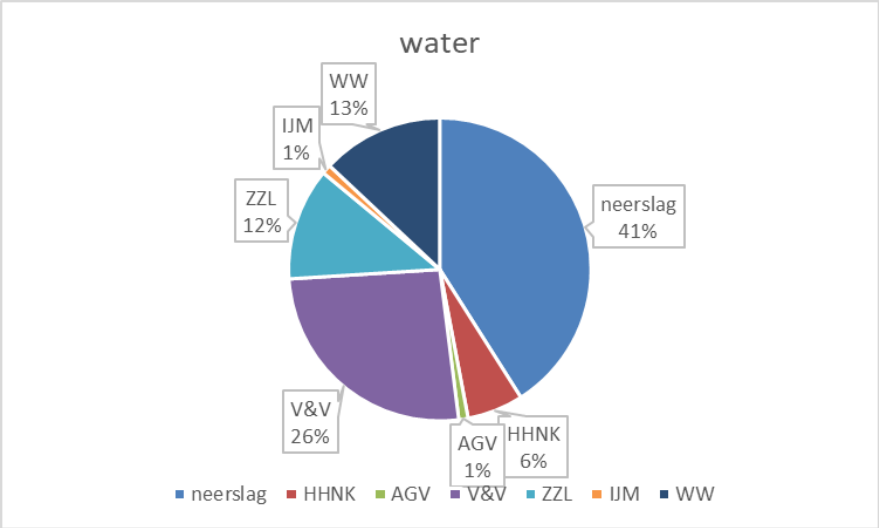
4.1 Ruimtelijke differentiatie waterbalans

4.1.1 UvA waterbalans



Figuur 4.1. De gereconstrueerde jaargemiddelde waterbalans van het Markermeer-IJmeer van 1976 t/m 2013 (Van der Geest et al. 2017).

In figuur 4.1 is de jaargemiddelde waterbalans weergegeven die is gemaakt door de UvA (Van der Geest et al. 2017). Figuur 4.2 geeft de verdeling van de aanvoer van water volgens deze studie over de periode 2003-2014. Gemiddeld is neerslag in die periode verantwoordelijk voor bijna de helft (41%) van de wateraanvoer naar het Markermeer-IJmeer, de tweede post is Vallei en Veluwe (m.n. de Eem) met ruim een kwart van het aangevoerde water, oftewel 44% van de rest.



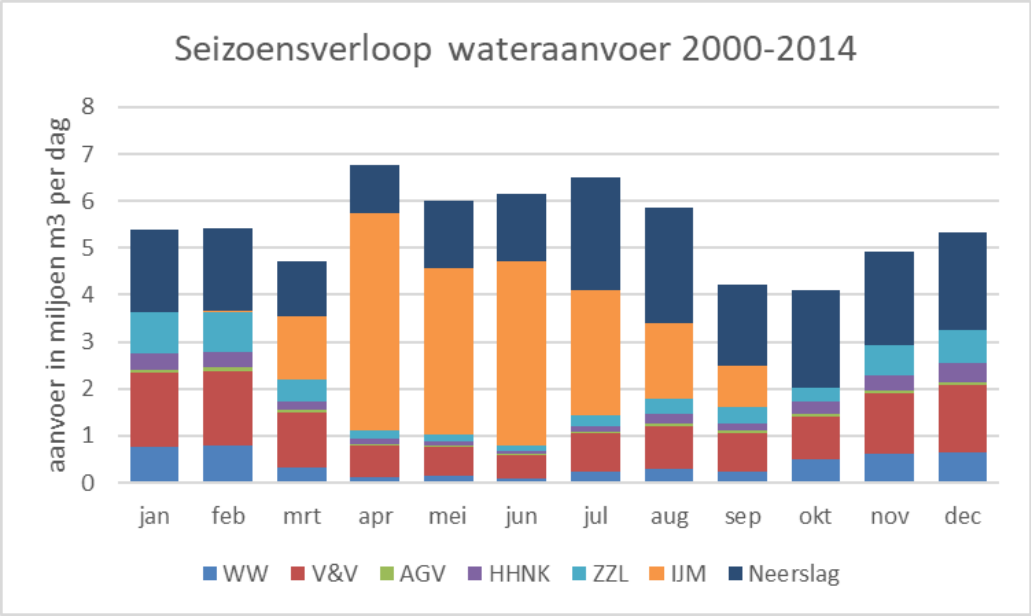
Figuur 4.2. Verdeling van inkomend water over de jaren 2003-2014 (Van der Geest et al. 2017). HHNK – Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier, AGV = Waterschap Amstel, Gooi en Vecht, V&V = Waterschap Vallei en Veluwe (inclusief Eemvallei), ZZL = Waterschap Zuiderzeeland, IJM = IJsselmeer, WW = Wolderwijd.

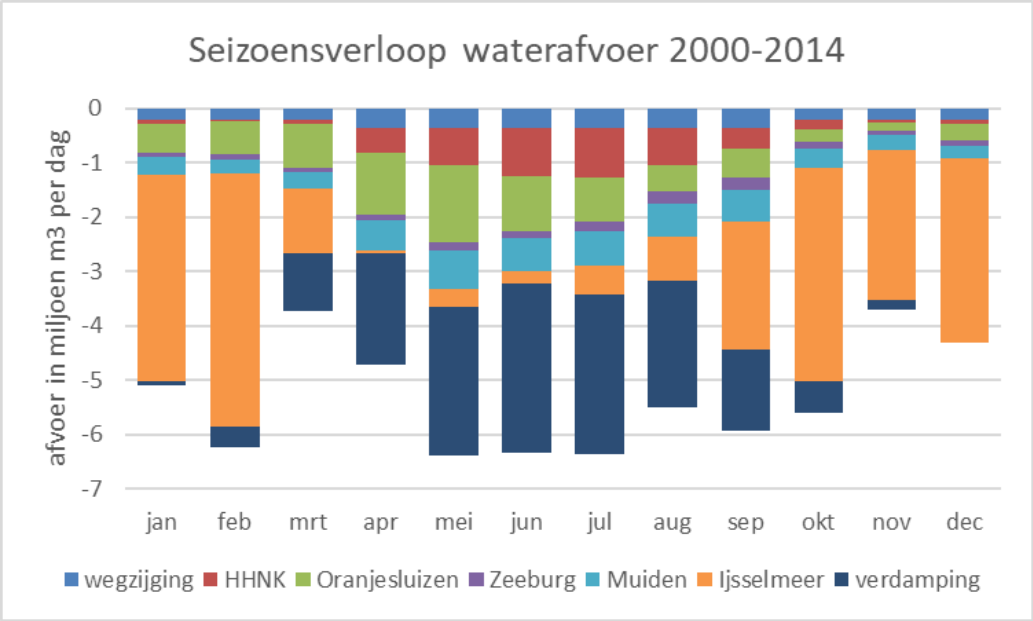
4.1.1.1 Waterbalans over het seizoen

Er is een groot verschil tussen zomer en winter in de ruimtelijke verdeling van water aan- en afvoer. Met behulp van de onderliggende balansgegevens is ook dit seizoensverloop van de aan- en afvoer weer te geven (figuur 4.3). In de winter komt 60% van het binnenstromende oppervlaktewater uit de zuidelijke randmeren, terwijl er dan nagenoeg geen aanvoer uit het IJsselmeer is. Tegelijkertijd stroomt 80% of meer van het uitstromende water naar het IJsselmeer. Er is dus in de winter (oktober - februari) een sterk noordelijk gerichte waterbeweging. In de winter stroomt drie kwart van het water dat de Houtribdijk passeert, via de Houtribsluizen naar het IJsselmeer (figuur 4.4).

In het voorjaar komt slechts een kwart van het instromende water uit de zuidelijke randmeren. Ongeveer 80% van het water komt dan uit het IJsselmeer. Water verdwijnt dan uit het systeem voor de helft door verdamping (en enige wegzijging), voor een kwart via de Oranjesluizen en de rest door inlaten bij Muiden, Zeeburg en door HHNK. In de zomer is er dus een min of meer zuidwaartse waterbeweging, maar die is veel minder krachtig dan de noordwaartse stroming in de winter, doordat de helft van het aangevoerde water verdwijnt door verdamping en doordat ook langs de westkust water wordt onttrokken. Ook stroomt er in de zomer minder water door de Houtribdijk naar het Markermeer dan in de wintermaanden naar het IJsselmeer. Ook in de zomer stroomt meer water door de Houtribsluizen dan door de Krabbersgatsluizen, maar het verschil is niet zo groot als in de winter.

Afhankelijk van wind en spui kan het water in het noordoosten van het Markermeer aansluitend op de Houtribdijk stagneren of deelnemen aan een deels wind-gestuurde stroming langs de kusten van het systeem. Voor spui naar het Markermeer is verval nodig en dat is er bijvoorbeeld door afwaaiïng bij wind vanuit het noorden of oosten. In een ten minste een deel van die omstandigheden ontstaat dan een circulatie tegen de klok in. Als dat niet het geval is kan het water van de Houtribsluizen zich bij dat van de Blocq van Kuffeler voegen en het stroomt dan via het IJmeer deels terug langs de westkust (zie modelstudie). Bij stroming tegen de klok in wordt het water uit de Houtribsluizen afgebogen naar het westen. Met name het water uit de Krabbersgatsluizen heeft dan de neiging zich naar het midden van het meer te bewegen en daar te stagneren.

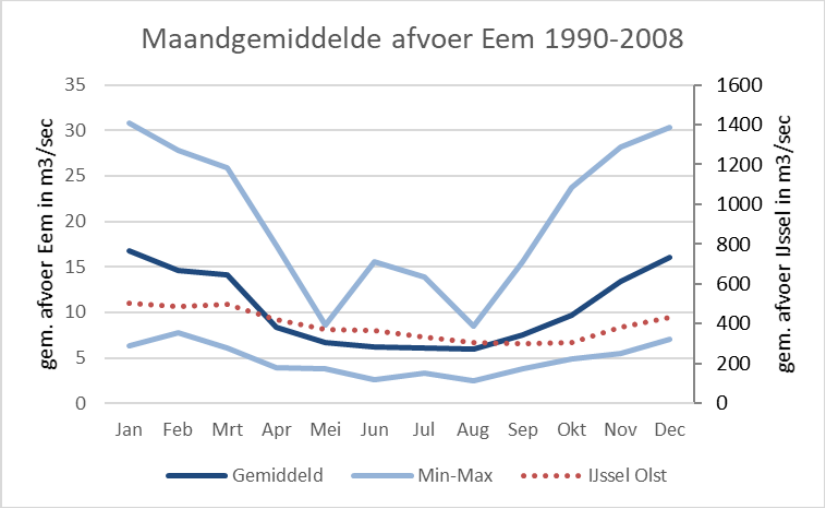




Figuur 4.3. Seizoensverloop van de gemiddelde verdeling van wateraanvoer (boven) en -afvoer (onder) naar en van het Markermeer-IJmeer (naar basisdata Van der Geest et al. 2017).

4.1.1.2 Afvoer van de Eem

De afvoer van de Eem heeft een relatief sterk seizoenspatroon; de verschillen tussen zomer en winter zijn bijvoorbeeld aanzienlijk groter dan in de IJssel. De afvoer in de winter is met een gemiddelde van ongeveer 15 m^3/sec twee tot drie keer zo groot als in de zomer (fig. 4.4).

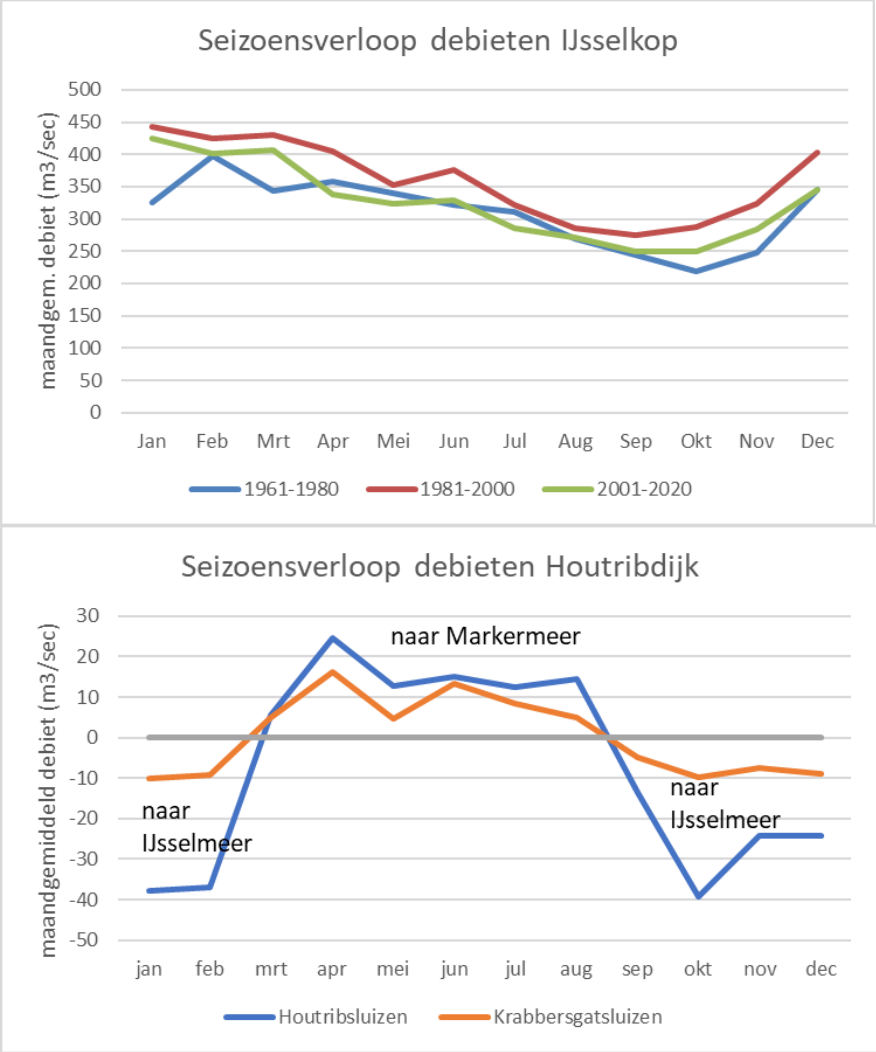


Figuur 4.4. Gemiddeld seizoensverloop van de Eem met de range in maandgemiddelden, en een vergelijking met het gemiddelde verloop in de IJssel (rechter ras).

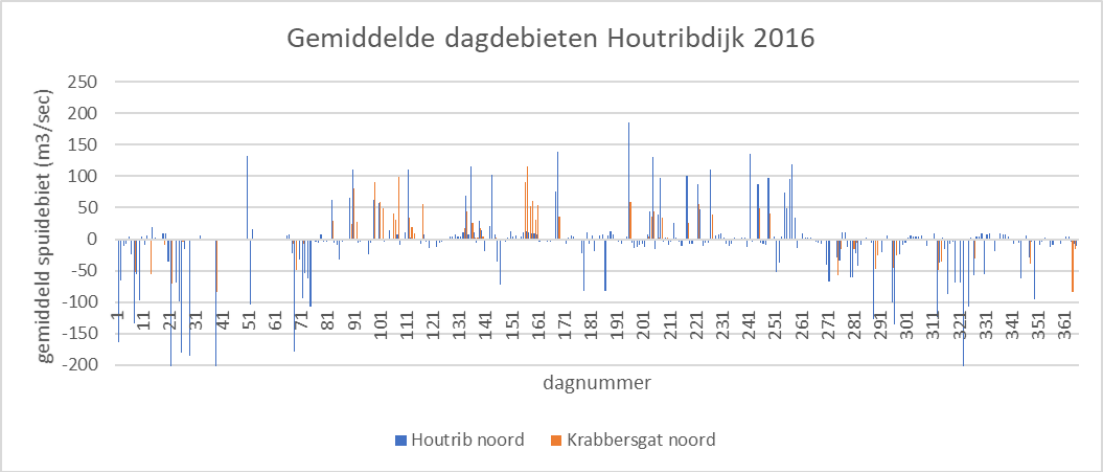
4.1.1.3 Spui door de Houtribdijk

Via de Houtribdijk wordt in de winter meestal van het Markermeer naar het IJsselmeer gespuid, in de zomer van het IJsselmeer naar het Markermeer. Dit gaat in tegen het natuurlijke afvoer verloop van de IJssel, waar de debieten het grootst zijn in de winter. In de periode waarin de invloed van de IJssel op het IJsselmeer het grootst is, wordt die naar het Markermeer afgesloten. Het meeste water dat de Houtribdijk passeert gaat via de Houtribsluizen. In de winter is dat drie keer zoveel als via de Krabbersgatsluizen bij Enkhuizen. In de zomer is het verschil kleiner (fig. 4.5).

De afvoer naar het IJsselmeer in de winter (en ook de aanvoer in de zomer) verloopt zeer discontinu en wijkt daarin dus af van de aanvoer vanuit de Eem. Vaak worden perioden van enkele dagen van afvoer naar het IJsselmeer afgewisseld met perioden zonder afvoer. Perioden van een tot twee weken zonder aanvoer komen vaak voor. Hoewel de maandgemiddelde debieten vergelijkbaar zijn met die van de Eem zijn de debieten als wel wordt gespuid eerder vergelijkbaar met de winterdebieten van de IJssel, met enkele honderden m^3 per sec en een maximum van meer dan 1000 m^3/s door de Houtribsluizen. Figuur 4.6 geeft daggemiddelde debieten, maar ook binnen een dag varieert het debiet vaak sterk en discontinu.



Figuur 4.5. Boven: Gemiddeld seizoensverloop van de debieten in de IJssel. Onder: Gemiddeld seizoensverloop van de spuidebieten door de Houtrib- en Krabbersgatsluizen in 2012-2017 (www.waterinfo.nl). Positief = Markermeer in, negatief = Markermeer uit.



Figuur 4.6. Weergave van de discontinue spui door de Houtrib- (blauw) en Krabbersgatsluizen (oranje) in de loop van 2016. Positief van IJsselmeer naar Markermeer, negatief andersom.

Ook gaan de Houtribsluis en de Krabbersgatsluis niet gelijk op. De aanvoer vanuit de zuidelijke randmeren (en de overige aanvoer) wordt dus in sommige perioden in de winter snel afgevoerd naar het IJsselmeer (debieten door de Houtribdijk zijn in die perioden enkele keren groter dan die door de Hollandse Brug; de spui via de Houtribsluis kan dan dus water uit het zuiden de vaargeul in trekken), maar stagneert tijdelijk in andere perioden. Het effect is goed terug te zien in de modelresultaten, waarin perioden van sterke NO waartse stroming via de vaargeul langs de Oostvaardersdijk worden afgewisseld met perioden met minder sterke beweging en meer spreiding.

4.1.2 Bewegingen; tracerstudie

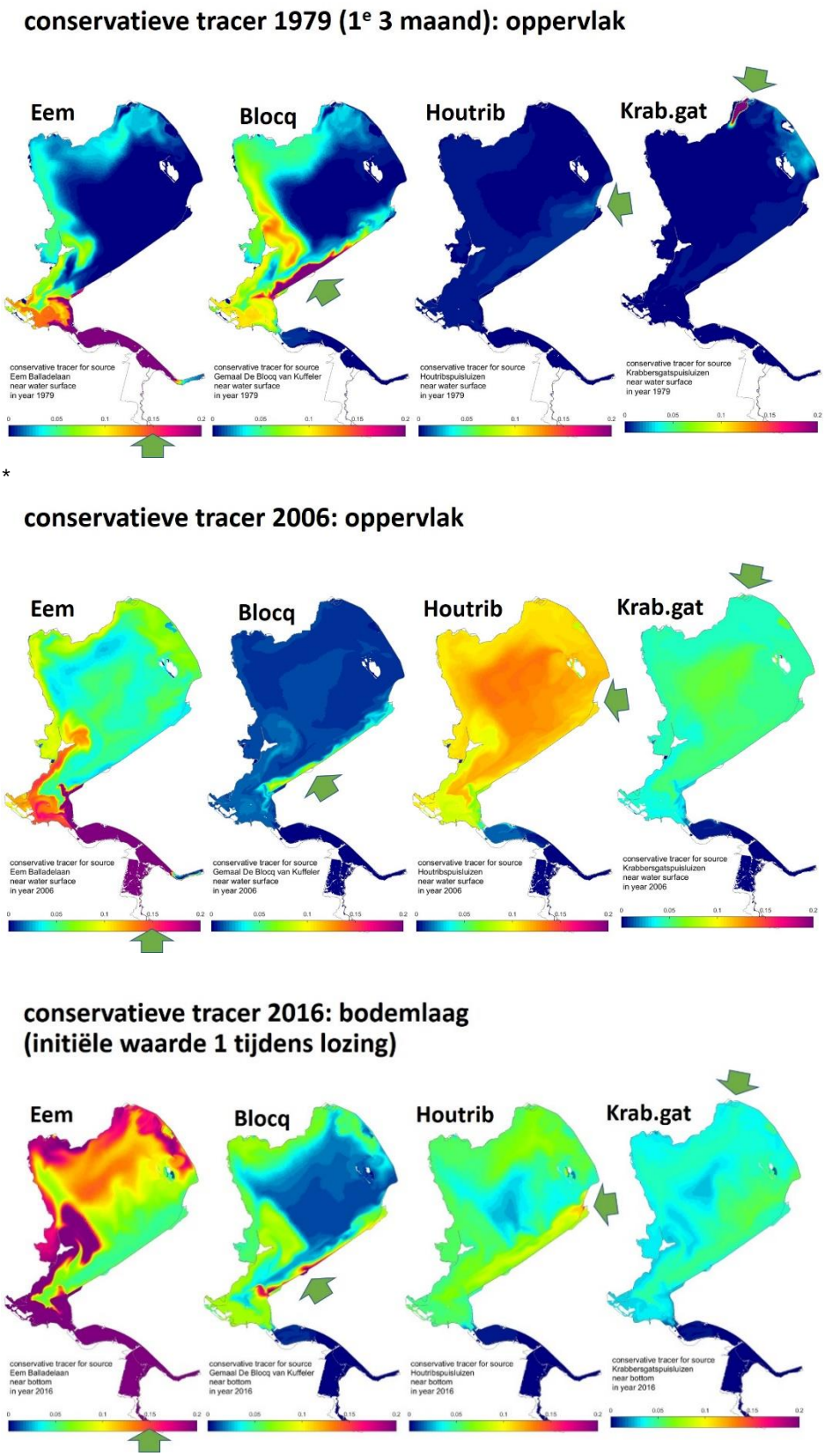
4.1.2.1 Conservatieve tracers

In alle drie de peiljaren laten de conservatieve tracers zien dat het water gemiddeld over het jaar met de klok mee door het systeem stroomt. Een relatief klein deel van het water uit de zuidelijke randmeren en de Blocq van Kuffeler stroomt tegen de klok in. Dit is niet gerelateerd aan spui via de Houtrib- of Krabbersgatsluizen maar aan veranderingen in windkracht en -richting. De windgestuurde circulatie van het water in het Markermeer is zodanig dat het water in de Oostvaardersgeul vaak tegen de wind in stroomt. Het water uit de Blocq stroomt met de afwisseling in stroomrichting eveneens heen en weer. Dit water heeft de neiging aan te sluiten bij het water uit de zuidelijke randmeren en steekt nauwelijks rechtstreeks over de vaargeul heen richting Marken. Het water uit het Gooimeer kan aanvankelijk zowel langs de zuidkust van het IJmeer als in het noorden langs de kust van Almere stromen, maar de laatste stroom zet zich uiteindelijk niet voort. Na de flessenhals van de Hollandse Brug vindt in het ruimere IJmeer een forse verdunning van het aangevoerde water plaats die door kustgebonden stroming in het midden van het IJmeer het sterkst is. In de figuren van de Blocq en Houtribsluizen is te zien dat een kleine hoeveelheid water via het IJmeer terugstroomt in de zuidelijke randmeren.

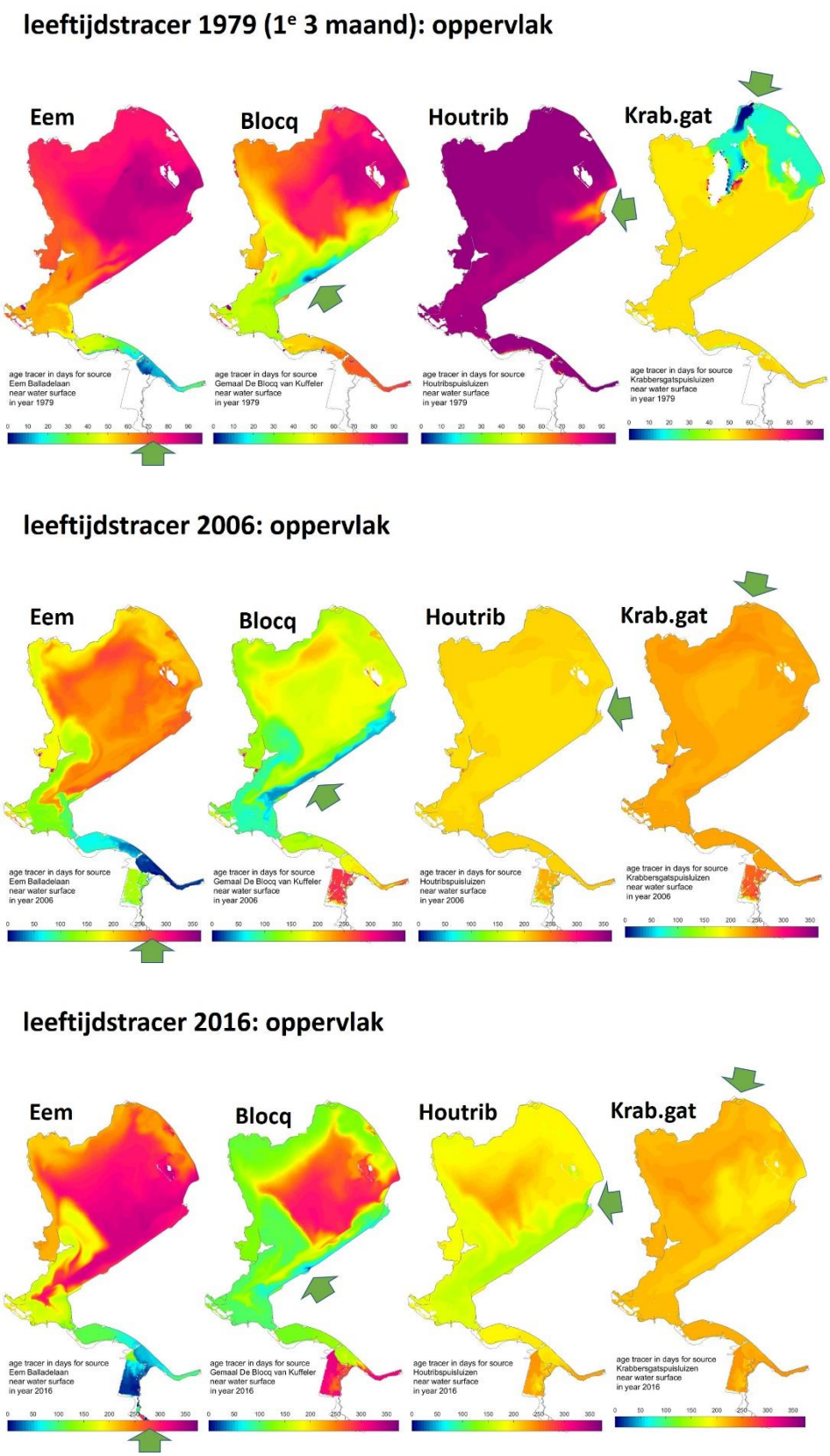
Het water in het midden van de kom van het Markermeer lijkt voor een relatief groot deel afkomstig van het IJsselmeer, via Houtrib- en Krabbersgatsluizen. Vooral het water uit de laatstgenoemde bron beweegt zich minder langs de randen van het systeem. De uitkomsten van het model suggereren een intensieve menging van de waterkolom; er is weinig tot geen verschil tussen de patronen van de verschillende lagen.

4.1.2.2 Leeftijdstracers

Ook de leeftijdstracers suggereren dat het water uit de zuidelijke randmeren en uit de Blocq van Kuffeler vooral langs de randen van het systeem loopt terwijl het water uit de het IJsselmeer zich meer over het gehele systeem verdeelt, waarbij het water uit de Krabbersgatsluizen relatief veel in het midden van het Markermeer blijft hangen. Omdat de ruimtelijke verschillen bij het water uit de zuidelijke randmeren en de Blocq het sterkst zijn, lijkt het water in het midden van de kom van het Markermeer gemiddeld relatief “oud” te zijn, d.w.z. een langer vervangingstijd / verblijftijd te hebben.



Figuur 4.7. Resultaten van conservatieve tracers vanuit de Eem, de Blocq van Kuffeler, de Houtribsluizen en de Krabbersgatsluizen (van links naar rechts) in de drie pijljaren (van boven naar beneden). Concentratie van water uit de vier bronnen na een jaar.

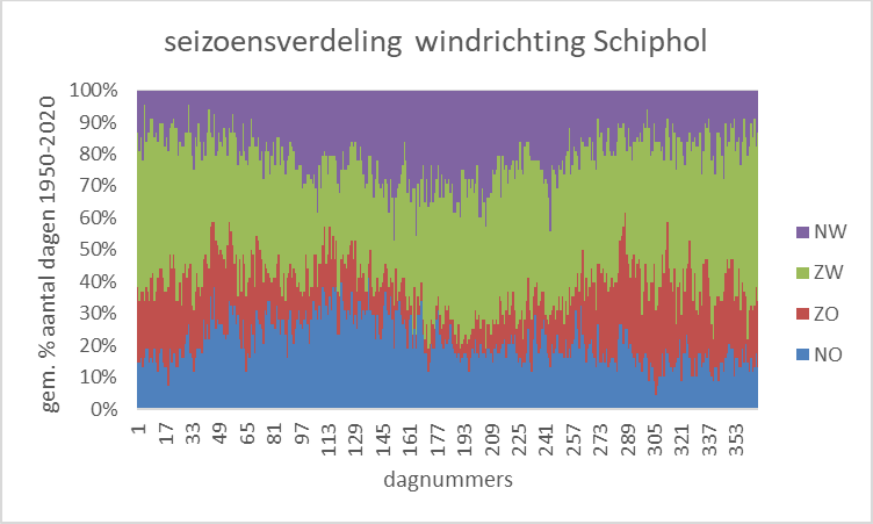


Figuur 4.8. Resultaten van leeftijdstracers vanuit de Eem, de Blocq van Kuffeler, de Houtribsluizen en de Krabbersgatsluizen (van links naar rechts) in de drie pijljaren (van boven naar beneden). Leeftijd van water uit de vier bronnen na een jaar.

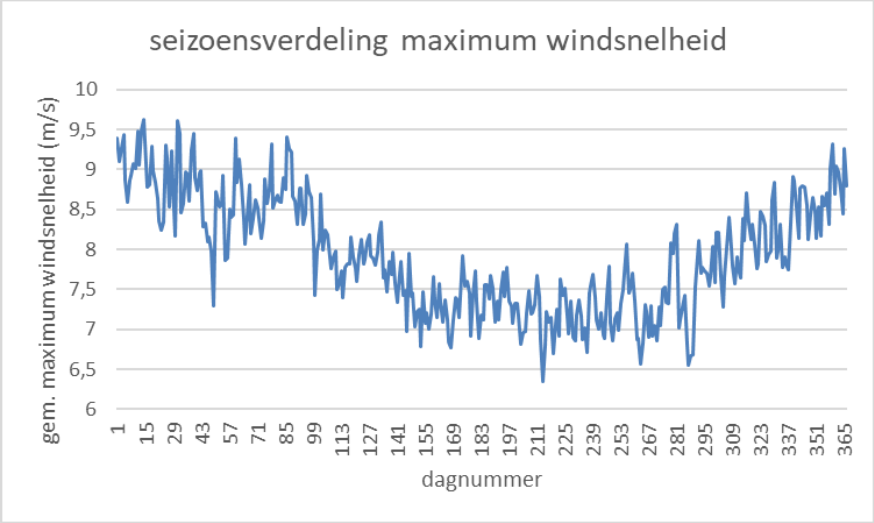
4.1.3 Invloed van wind en inrichting op stroming

Windrichting is van invloed op stromingsrichting. Dat betekent niet dat het water stroomt zoals de wind waait: ruwweg ontstaat in het Markermeer een circulaire stroming met de klok mee bij westenwind en tegen de klok in bij oostenwind. In grote delen van het meer is die stroming redelijk diffuus maar in het zuidoosten wordt hij sterk gekanaliseerd door de vaargeul die langs de Oostvaardersdijk loopt. Door het mechanisme met de circulaire stromingspatronen is de stromingsrichting in die vaargeul vaak tegengesteld aan de windrichting.

De invloed van de wind betekent ook dat er een seizoenspatroon is in de manier waarop stroming wordt aangestuurd. Enerzijds verschuift de verdeling over windrichtingen in de loop van het seizoen (figuur 4.9), anderzijds zijn de gemiddelde windsnelheden in de winter hoger dan in de zomer (figuur 4.10). Ook zijn de hogere windsnelheden niet evenredig verdeeld over de windrichtingen (figuur 4.11) Dit is van belang in combinatie met onder meer de seizoenspatronen in de afvoer van de Eem en de pui via de Houtribdijk.



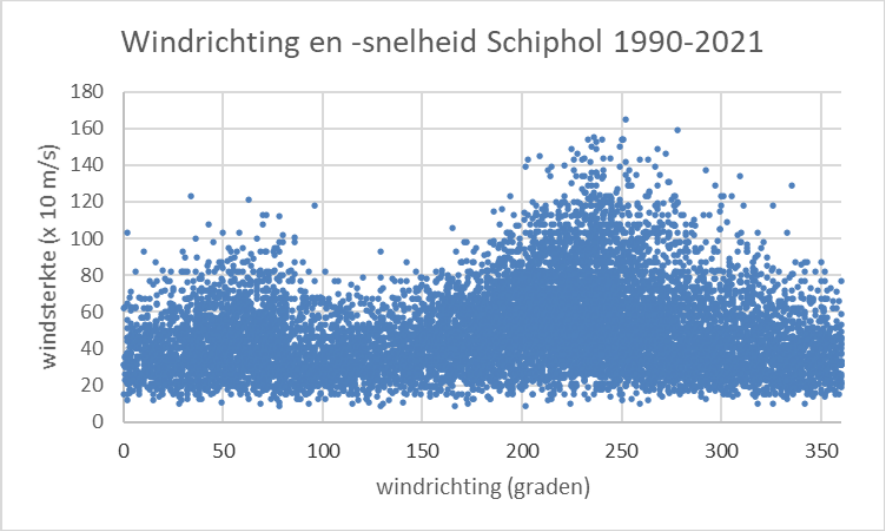
Figuur 4.9. Gemiddeld seizoensverloop van de verdeling van de vier windrichtingen NW, ZW, ZO en NO per dagnummer op meetstation Schiphol, 1950-2020.



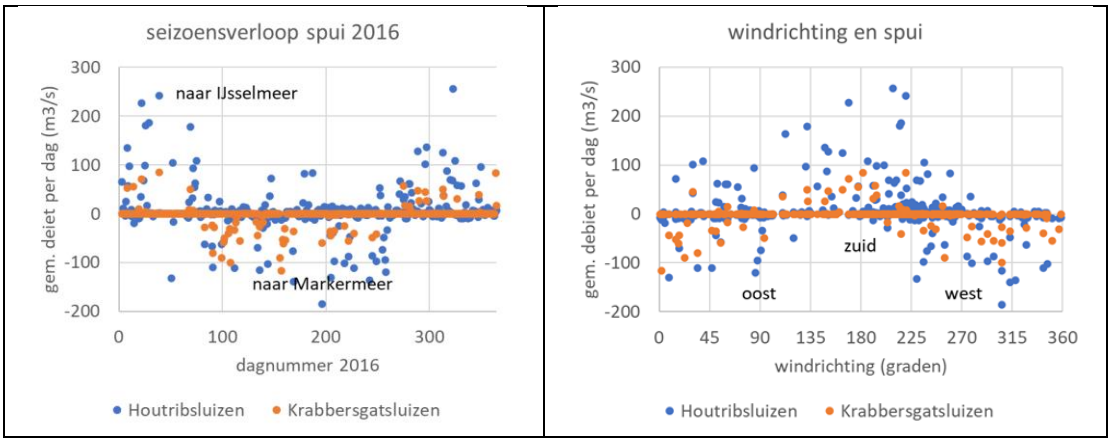
Figuur 4.10. Seizoensverdeling van de hoogste uurgemiddelde windsnelheid per dagnummer op meetstation Schiphol, 1950-2020.

De spui via de Houtribdijk is tevens gerelateerd aan wind via scheefstand en spuiverval. Er kan in de zomer naar het Markermeer worden gespuid als het water daar lager staat dan aan IJsselmeerzijde. Zo'n verschil ontstaat onder meer door windwerking en op- en afwaaiing. Spui van het Markermeer naar het IJsselmeer (winter) vindt vooral plaats bij wind uit het zuiden of zuidwesten, spui naar het Markermeer (zomer) bij wind uit het noordwesten of noorden (figuur 4.12). Dat betekent dat spui naar het IJsselmeer in de regel is gecombineerd met een circulatie van het water in het Markermeer met de klok mee. De spui wordt dan dus niet gevoed door stroming uit de vaargeul die langs de Oostvaardersdijk loopt, maar door water dat langs de Houtribdijk stroomt of uit het midden van het meer komt.

Bij spui naar het Markermeer kan waarschijnlijk zowel sprake zijn van stroming met de klok mee (NW en N wind) als tegen de klok in (NO wind). Hier bij is de stroming gemiddeld minder sterk door gemiddeld lagere windsnelheden. Binnenkomend water kan dus de vaargeul langs de Oostvaardersdijk in geleid worden of afbuigen naar het noordwesten.



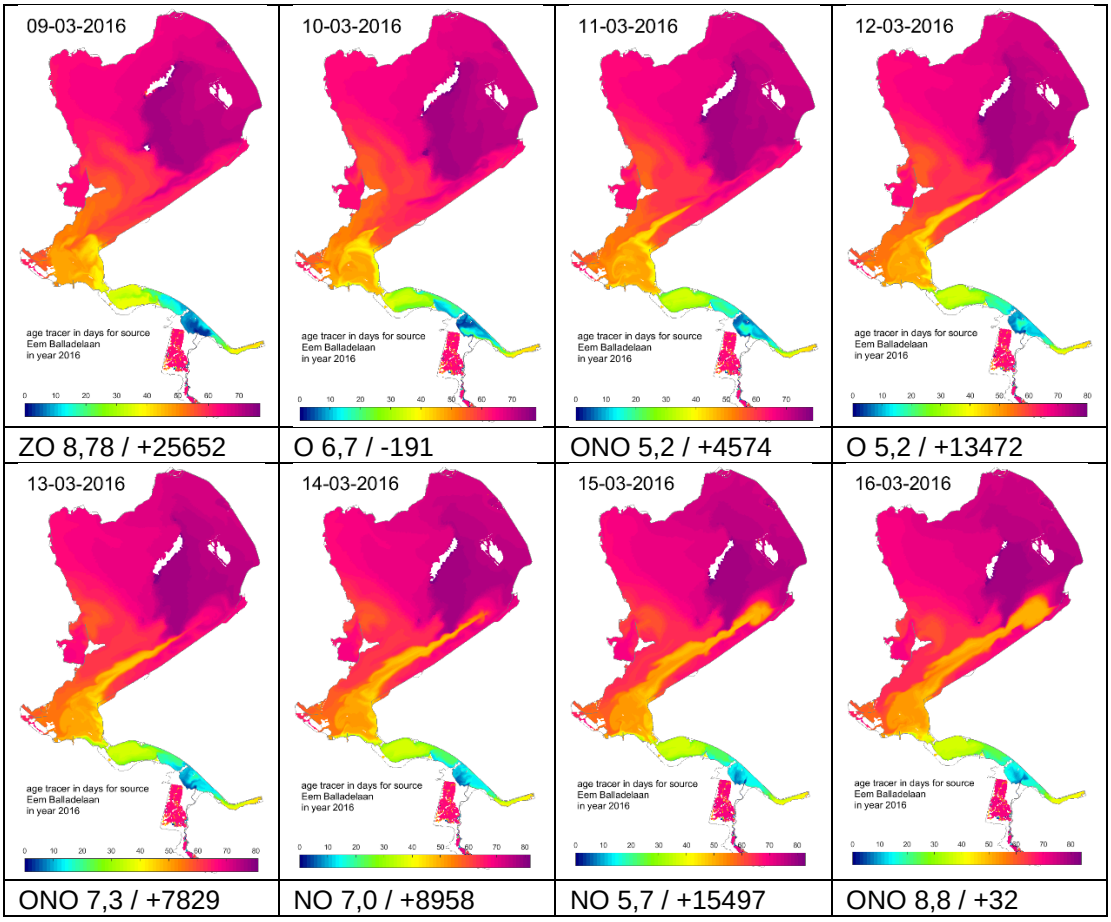
Figuur 4.11. Relatie tussen windsnelheid en windrichting. De grootste windsnelheden komen (op Schiphol) voor bij zuidwestenwind.



Figuur 4.12. Gemiddelde spuidebieten per dag door de Houtribdijk in 2016 (RWS, www.waterinfo.nl). Links seizoensverloop, rechts de relatie met de windrichting (KNMI gegevens windstation Houtribdijk).

4.1.3.1 Water uit de Eem

Dat is te zien in figuur 4.13, waarin het water dat afkomstig is uit de Eem door de vaargeul naar het noordoosten stroomt in een periode met matige (noord)oostenwind. Dit water legt dan een afstand van 30 km langs de Oostvaardersdijk af in 5 dagen, dus met een stroomsnelheid van ongeveer 6 km per dag ofwel 7 cm/s, tegen de wind in. Aan het eind komt dit water “uit de vaargeul” (zie figuur 3.4) voor de Houtribluizen en verspreidt zich ter plekke. Invloed van spui via de Houtribsluizen is nauwelijks zichtbaar.



Figuur 4.13. Voorbeeld van NO-waartse kanalisering van stroming in de vaargeul bij oostenwind 9 t/m 16 maart 2016. Leeftijdstracer vanuit de Eem. Windrichting en -snelheid op de aangegeven dag op KNMI windstation Houtribdijk / RWS spuigegevens Houtrib noord (in m3 per dag; + = noordwaarts, - = zuidwaarts).

4.1.3.2 Water uit de Houtribsluizen

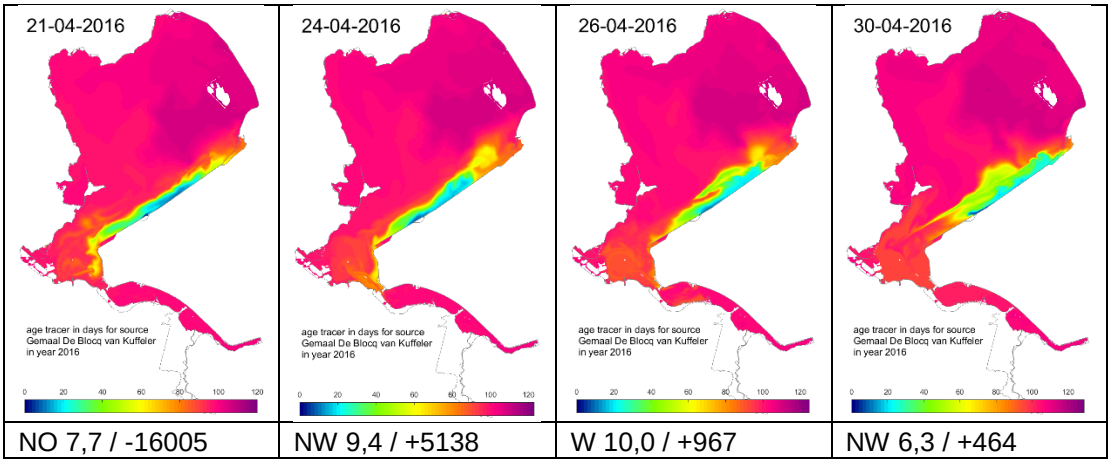
Het water dat in het zomerhalfjaar via de Houtribsluizen binnenkomt, voegt zich bij (zuid)westen wind bij het water dat met de klok mee circuleert en wordt dan via de Oostvaardersgeul naar het zuidwesten geleid. Aangezien de windsnelheid bij westen- en zuidwestenwind in de praktijk hoger oploopt dan bij oostenwind zijn de maximum stroomsnelheiden die daarbij in de geul worden bereikt wel twee of drie keer zo groot (orde grootte 15 cm/s) als de noordoostwaartse stroming bij oostenwind.

Bij oostenwind wordt het ingelaten water afgebogen door de circulatiestroom die dan tegen de klok in draait.

In de winter stroomt het water door de Houtribsluizen gemiddeld naar buiten.

4.1.3.3 Water uit de Blocq van Kuffeler

De stroming in de vaargeul kan werken als een watergordijn/barriere? voor water dat door FFL via de Blocq van Kuffeler wordt gespuid , zodat het relatief weinig rechtstreeks in het open water noordelijk vanr de vaargeul terecht komt . In figuur 4.14 is dat te zien voor de periode 21-30 april 2016. Aanvankelijk wordt het water uit de Blocq van Kuffeler opgesloten tussen de Oostvaardersdijk en de vaargeul, als de wind van NO naar W draait keert de stoomrichting in de vaargeul om naar het ZW en wordt het water van de Blocq meegenomen.



Figuur 4.14. Voorbeeld van gedrag van water uit de Blocq van Kuffeler t.o.v. de vaargeul, 21-30 april 2016. Leeftijdstracer vanuit de Blocq van Kuffeler. Windrichting en -snelheid op de aangegeven dag op KNMI windstation Houtribdijk / RWS spuigegevens Houtrib noord (+ = noordwaarts, - = zuidwaarts).

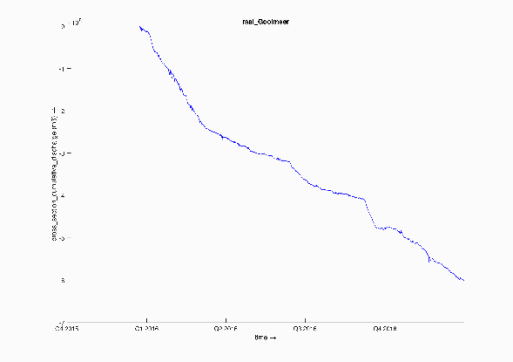
4.1.3.4 Water uit de Krabbersgatsluizen

Het water dat in de zomer via de Krabbersgatsluizen naar het Markermeer stroomt, wordt door de ligging veel minder gekanaliseerd. Het blijft vaak lange tijd in het noorden van het meer hangen, beweegt heen en weer met de wijzigingen in windrichting en stroomt relatief sterk naar het midden van het meer.

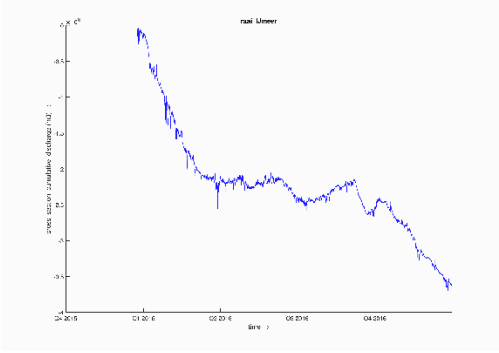
4.1.4 Raaien

Figuur 4.10 laat zien hoeveel water er in de loop van 2016 vanuit de zuidelijke randmeren de in figuur 3.5 weergeven raaien is gepasseerd

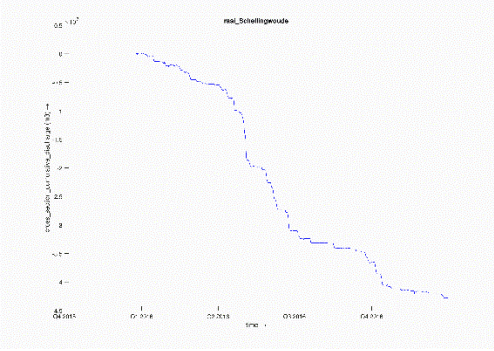
Raai Gooimeer (Hollandse Brug; negatief = van Gooimeer naar IJmeer)



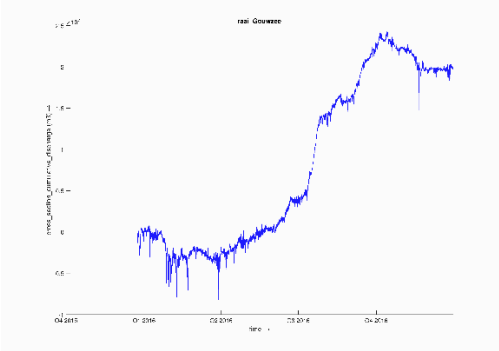
Raai IJmeer (negatief = van IJmeer naar Markermeer s.s.)



Raai Schellingwoude (Oranjesluizen; negatief = uit IJmeer)



Raai Gouwzee (positief = van Markermeer s.s. naar Gouwzee)



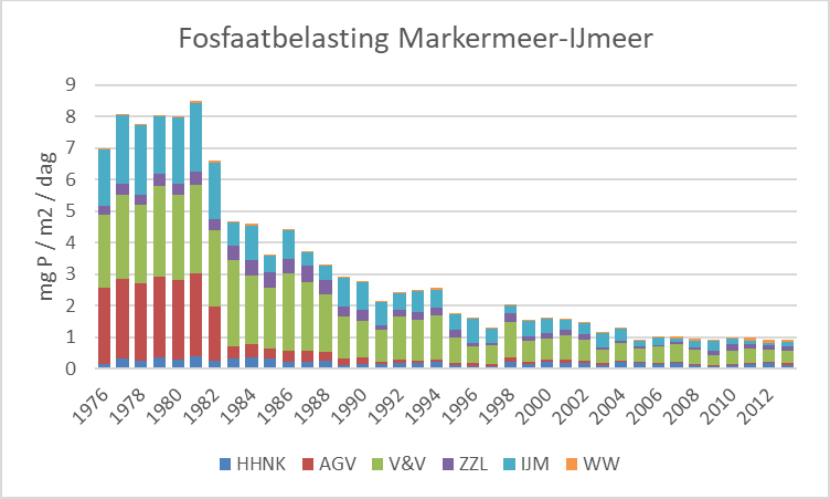
Figuur 4.15. Cumulatieve debieten van water afkomstig uit de Eem over de aangegeven lijn (figuur 3.5) over het jaar 2016. Negatieve en afnemende getallen vertegenwoordigen passage in de richting van het Markermeer, positieve (Gouwzee) van het Markermeer af (de Gouwzee in). Een horizontale lijn betekent geen aanvoer in die periode.

De cumulatieve debieten over de raai Gooimeer geeft aan dat water uit de Eem na korte tijd (twee weken?) bij de Hollandse Brug aankomt en het IJmeer instroomt. Vervolgens zijn de debieten in het voorjaar hoog (stijl verloop grafiek(, in de zomer iets lager (minder stijl) en in het najaar weer wat hoger, overeenkomstig de debieten van de Eem en de Nijkerkersluis. Dit patroon is veel sterker bij de IJmeer raai, waar de noordwaartse debieten relatief hoger zijn, terwijl de stroom vanuit het zuiden in de zomer min of meer stagneert (horizontaal deel van de grafiek). Bij Schellingwoude (Oranjesluizen) is het patroon omgekeerd, hier is in de winter weinig stroming richting IJ, terwijl die in de zomer juist sterk is. De lage debieten over de IJmeer raai in de zomer worden dus niet alleen veroorzaakt door de lagere debieten van de Eem en de Nijkersluis, maar ook door hogere afvoer via de Oranjesluizen. Het feit dat de cumulatieve lijn van de IJmeer raai in de zomer bijna horizontaal is, betekent dat (in 2016) nauwelijks water uit het zuiden in de kom van het Markermeer is aangekomen (althans cumulatief; onder invloed van m.n. wind kan wel sprake zijn geweest van uitwisseling in beide richtingen tegelijkertijd en tegengesteld in boven en onderlaag). Het water dat in het voorjaar de IJmeer raai is gepasseerd, begint in de zomer langzaam onder meer de Gouwzee in te stromen.

4.2 Fosfaatbelasting

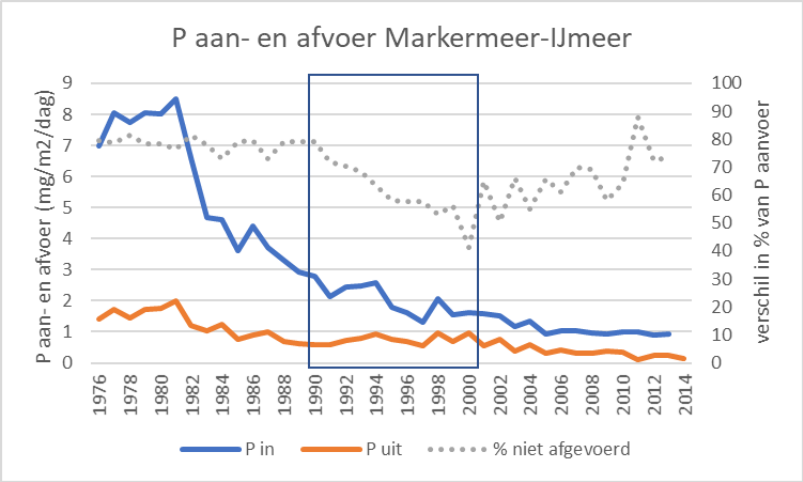
4.2.1 Basisgegevens: trends en situatie peiljaren

De totale fosfaatbelasting van het Markermeer-IJmeer met zuidelijke randmeren was hoog totdat in 1982 het afvalwater van Amsterdam werd afgeleid, en nam daarna sterk af. De belasting in de twee laatste peiljaren 2006 en 2016, onderling niet meer sterk verschillend, was bijna een factor 10 lager dan in het eerste peiljaar 1979.



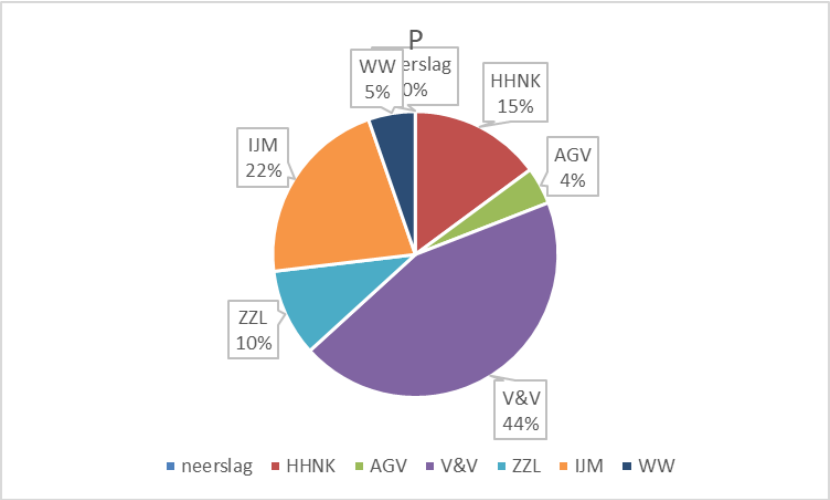
Figuur 4.16. Verloop van de totale externe fosfaatbelasting van het Markermeer-IJmeer (inclusief zuidelijke randmeren) op basis van de UvA balans (Van der Geest et al. 2017).

Met behulp van de data van de UvA waterbalans en de MWTL fosfaat gegevens is een schatting gemaakt van het verloop van de afvoer van fosfaat uit het Markermeer-IJmeer (figuur 4.16, “P uit”). Op basis van vergelijking met het verloop van de externe belasting (“P in”) zou tot 1990 bijna 80% van de externe belasting in het systeem achter blijven. Van 1990 tot 2000 nam dat af tot 50-60%, daarna nam het percentage weer toe.



Figuur 4.17. Verloop van de aan- en afvoer van fosfaat door de jaren, en het percentage van de aanvoer dat niet wordt afgevoerd per jaar. De box verwijst naar de periode waarover berekeningen werden uitgevoerd met betrekking tot sedimentatie in putten (paragraaf 4.2.3.1).

4.2.2 Ruimtelijke differentiatie in data



Figuur 4.18. Verdeling van inkomend fosfaat gemiddeld over de jaren 2003-2014 (Van der Geest et al. 2017). HHNK – Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier, AGV = Waterschap Amstel, Gooi en Vecht, V&V = Waterschap Vallei en Veluwe (inclusief Eemvallei), ZZL = Waterschap Zuiderzeeland, IJM = IJsselmeer, WW = Wolderwijd.

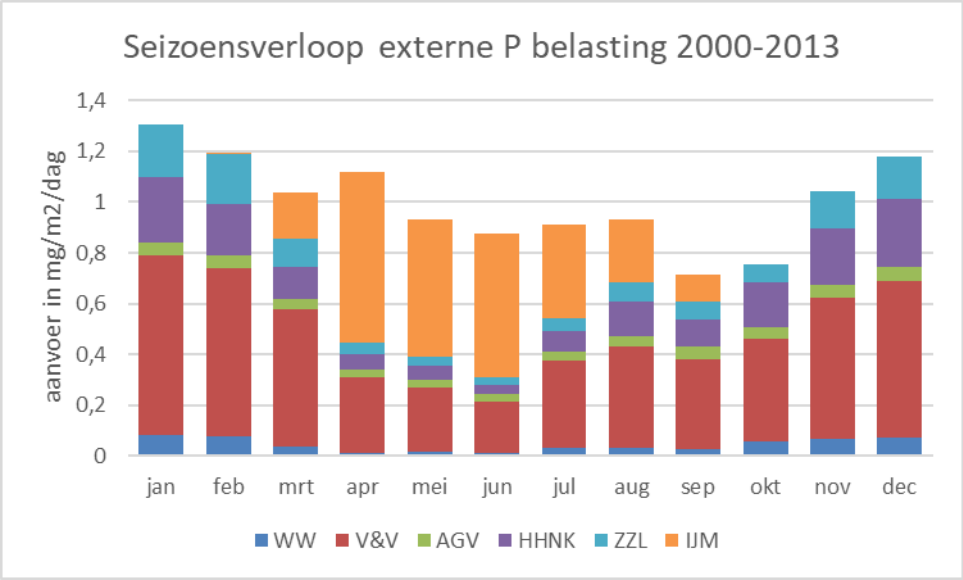
4.2.2.1 Ruimtelijke verdeling aanvoer van fosfaat.

Gemiddeld is neerslag in de periode 2003-2014 verantwoordelijk voor bijna de helft (41%) van de wateraanvoer naar het Markermeer-IJmeer (figuur 4.2), maar dan is de in- en uitstroom via de Houtribdijk wel verrekend . De tweede post is Vallei en Veluwe (m.n. de Eem) met ruim een kwart van het aangevoerde water, of 44% van de rest. In neerslag zit geen fosfaat, en in de fosfaatbalans is Vallei en Veluwe de grootste post, Deze bron is op jaarbasis ook voor 44% van de fosfaat aanvoer verantwoordelijk (figuur 4.18). Daarna volgen het IJsselmeer met 22%, Hollands Noorderkwartier met 15%, Zuiderzeeland met 10%, Wolderwijd met 5% en Amstel, Gooi en Vecht met 4%.

Sinds de afleiding van het afvalwater van Amsterdam in 1982 komt ongeveer de helft van de externe P aanvoer via de Hollandse Brug naar het Markermeer-IJmeer en iets minder dan een kwart uit het IJsselmeer.

4.2.2.2 Seizoenspatronen

Die seizoensverdeling over de verschillende P-bronnen in de balans (figuur 4.19) verschuift in navolging van de waterbalans (zie figuur 4.3 boven) behoorlijk in de loop van het seizoen De patronen wijken echter enigszins af van die van de waterbalans door verschillen in concentraties tussen de verschillende bronnen. Met name in het IJsselmeer zijn die lager dan bij de andere bronnen. In de winter komt 60% van het fosfaat uit de Zuidelijke Randmeren en vrijwel niets uit het IJsselmeer, in het voorjaar (april – juni) komt een kwart uit de randmeren en ongeveer 60% uit het IJsselmeer, waarbij de totale aanvoer in de zomer lager is dan in de winter (figuur 4.19).



Figuur 4.19. Gemiddeld seizoensverloop van de opbouw van de fosfaatbalans over de periode 2000-2013, naar de basisgegevens van de UvA fosfaatbalans (van der Geest et al. 2017).

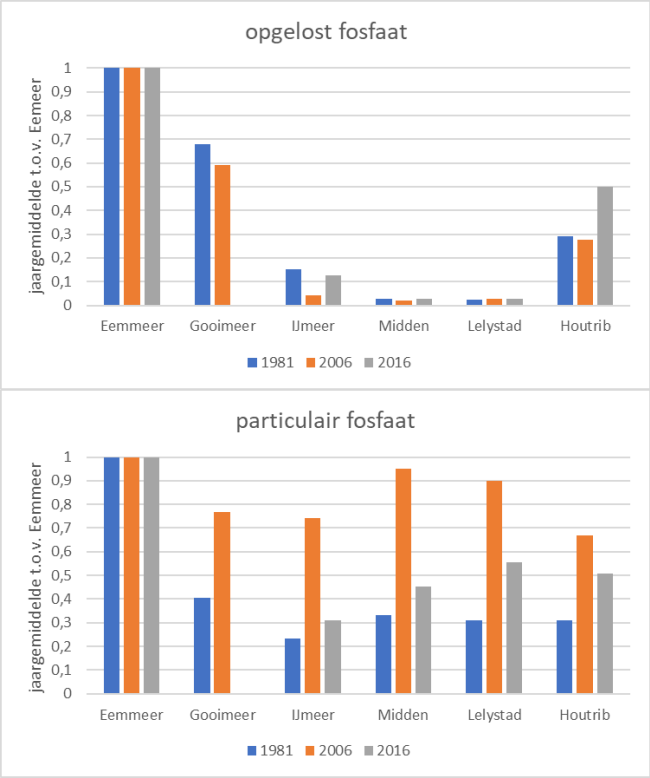
Dit is echter de situatie bij volledige menging van het water in het Markermeer-IJmeer. Uit tracerberekeningen blijkt dat in de zomer nauwelijks water de IJmeer raai passeert (2016) en dat betekent dan een waarschijnlijk forse overschatting van het aandeel van Vallei & Veluwe in de P-balans van de kom van het Markermeer in de zomer.

Omdat er weinig ruimtelijke variatie is in fosfaatconcentraties in het Markermeer-IJmeer is de verdeling van de afvoer in principe ongeveer gelijk aan de verdeling van het uitstromende water (figuur 4.3 onder). In de winter gaat het grootste deel van de afvoer van P naar het IJsselmeer (vooral via de Houtribsluizen), in de zomer meer verspreid over Oranjesluizen, Muiden, Zeeburg en HHNK.

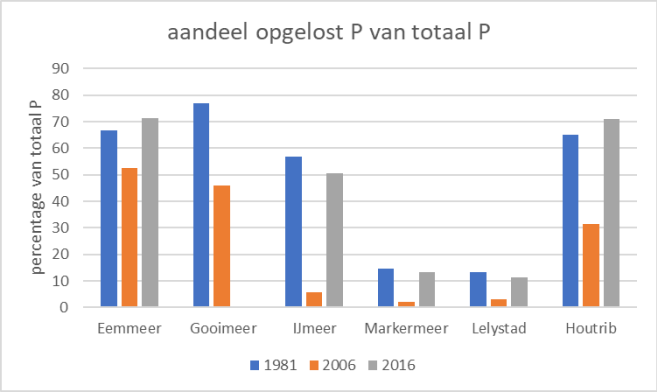
4.2.2.3 Fosfaat in de waterkolom

In alle betrokken meren is de fosfaatconcentratie in het water afgenomen, niet in de laatste plaats in het Eemmeer. Ondanks de sterke afname is de gemiddelde fosfaatconcentratie in het Eemmeer echter nog steeds de hoogste van het IJsselmeergebied. Ten opzichte van het Eemmeer neemt de concentratie op de route naar het Gooimeer, IJmeer en Markermeer steeds verder af. Dat komt vooral door sterke afname van opgelost fosfaat (figuur 4.20). Deze fractie neemt af met 40% tussen de meetpunten van Eemmeer en Gooimeer waarna op het meetpunt bij Pampus in het IJmeer nog orde grootte 10% over is.

Het verloop van de gebonden fractie is heel anders. Deze halveert tussen Eemmeer en Gooimeer, net als de opgeloste fractie. Maar daarna blijft de relatieve concentratie gebonden P ruwweg gelijk, of neemt zelfs weer toe van het IJmeer naar het Markermeer. Het aandeel van de opgeloste fractie op totaal fosfaat wordt dan zeer laag (figuur 4.21) Ongeveer het zelfde gebeurt van het zuidelijk IJsselmeer naar het Markermeer.



Figuur 4.20. Jaargemiddelde concentratie opgelost fosfaat (boven) en gebonden fosfaat (onder) in de waterkolom als percentage van de concentratie in het Eemmeer.

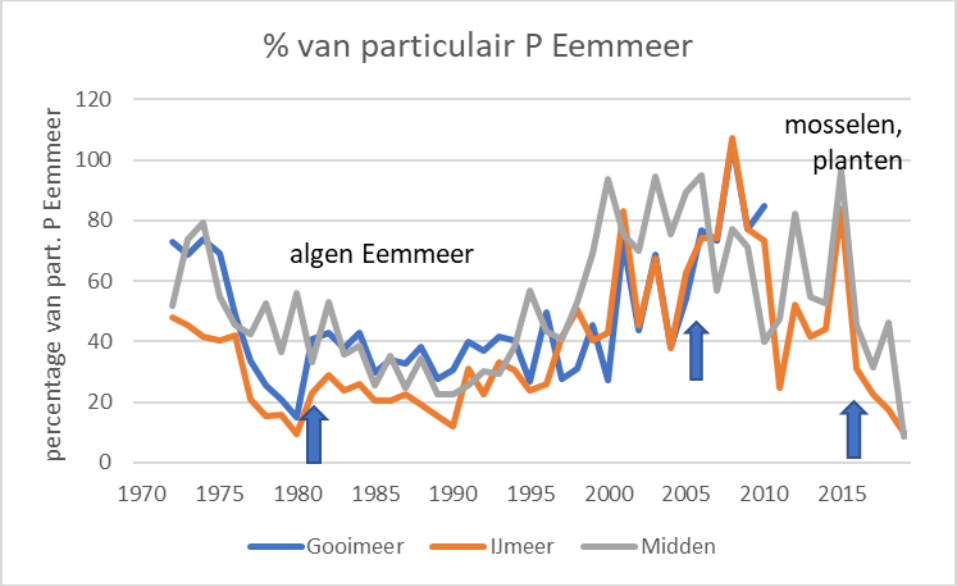


Figuur 4.21. Percentage opgelost fosfaat van totaal fosfaat, jaargemiddeld.

De mate van afname van meer tot meer is in de loop der jaren wel veranderd. Dat is te zien aan verschillen tussen de drie peiljaren in figuren 4.20 en 4.21. Peiljaar 2006 wijkt met name af van zowel 1981 als 2016 door een groter verlies van de opgeloste fractie van Eemmeer naar Markermeer en een kleiner verlies van de gebonden fractie . De gemiddelde zwevend stof concentraties in deze drie jaren was onderling nagenoeg gelijk en met ca. 40 mg/l relatief laag. Ook de jaargemiddelde windsnelheid is vergelijkbaar, al is het aantal dagen met harde wind in 2006 wat lager. Mogelijk heeft het verschil ook te maken met een beperkt rol van biota in 2006, na een forse afname van de algenconcentraties en voor de grootste toename van waterplanten en van filterende mosselen door opmars van de Quaggamossel. Figuur 4.22 laat de veranderingen van gebonden P van jaar op jaar zien ten opzichte van de concentraties in het Eemmeer. Daarin is het verschil tussen de drie peiljaren aangegeven in een completer tijdsbeeld. Tot kort voor de eeuwwisseling bleef twee derde van het particulair P achter in het Eemmeer (opgenomen in algen). Daarna werd met een sterk dalende

chlorofyl/zwevend stof ratio geleidelijk een aanzienlijk groter aandeel geëxporteerd naar het Gooimeer, totdat dat aandeel na 2010 weer terugloopt.

Ook in figuur 4.22 is vervolgens geen verschil meer te zien tussen Gooimeer en IJmeer. Van IJmeer naar Markermeer lijkt er sprake van een lichte toename. Onderweg is de opgeloste fractie echter fors afgenomen, met name in het IJmeer. Beide zijn wellicht het gevolg van toenemende windgevoeligheid en opwerveling van sediment, en binding van opgelost P aan het gesuspendeerde materiaal.

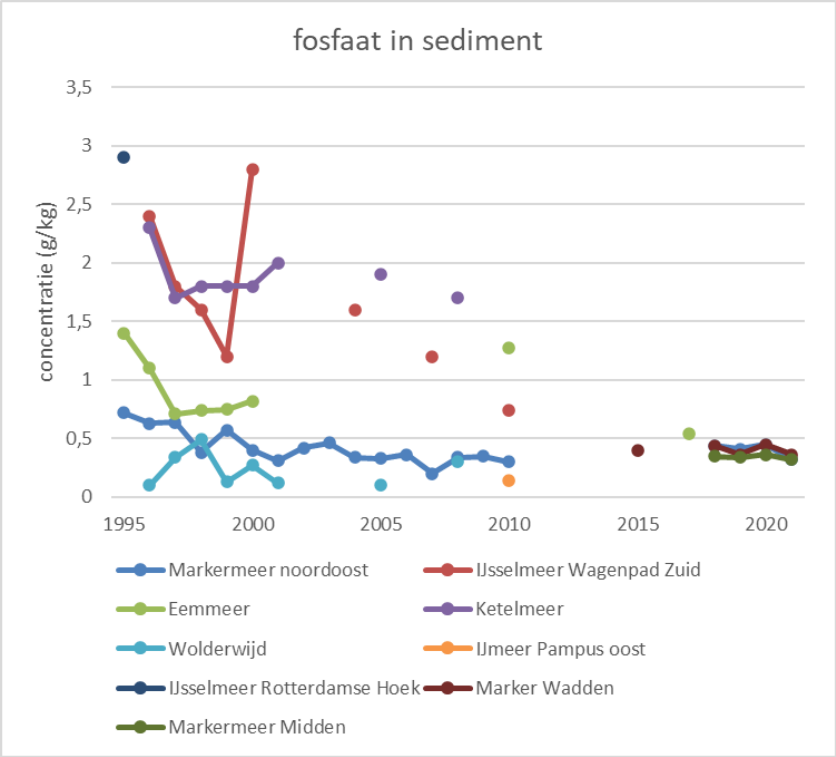


Figuur 4.22. Gemiddelde concentratie particulair fosfaat in het Gooimeer, IJmeer en Markermeer als percentage van de concentratie in het Eemmeer. De pijlen zijn de drie pijljaren.

4.2.2.4 Fosfaat in de bodem

MWTL metingen toplaag

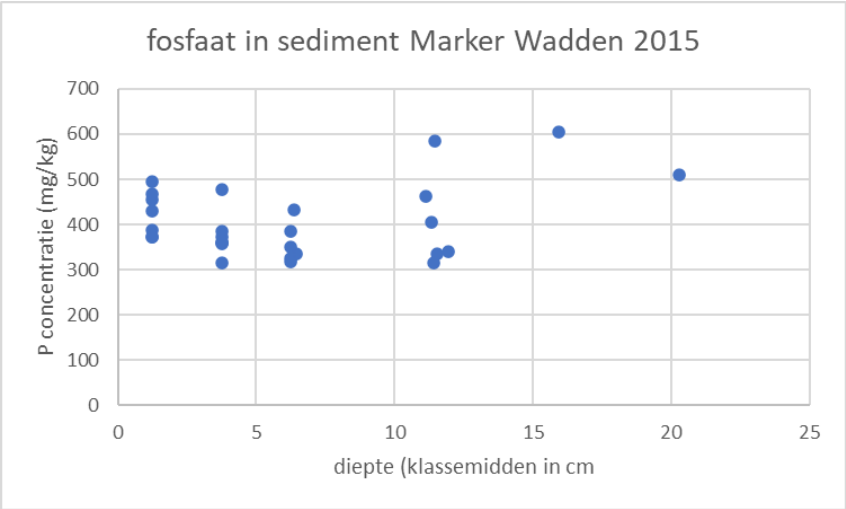
Verspreid over het IJsselmeergebied zijn, min of meer anekdotisch, gegevens beschikbaar over fosfaatconcentraties in de toplaag van de bodem. Er is slechts één locatie in het gebied waar zulke metingen zijn verricht over een reeks van jaren, nl. in het Markermeer bij Lelystad (Markermeer noordoost in figuur 4.23), en dan nog slechts eens per jaar, in het najaar. Deze reeks loopt van 1993 t/m 2010 en is in het kader van het onderzoek rond Marker Wadden (KIMA) hervat. Vergelijking van de verschillende locaties laat zien dat de waarden in het Markermeer-IJmeer tot de laagste in het IJsselmeergebied behoren. Alleen in het Wolderwijd zijn de waarden in het verleden nog lager geweest. De reeks laat verder een halvering van de fosfaatconcentraties zien tussen 1993 en 2000, hoewel de meest recente metingen weer iets hoger waarden laten zien dan in de periode 2005-2010. Ook op de andere locaties zijn forse afnames te zien, en lijken elkaar te naderen bij waarden net onder de 0,5 g/kg. Tegelijk met de recente metingen zijn ook monsters genomen op de locaties Markermeer Midden en Marker Wadden. Bij Marker Wadden zijn ook metingen uitgevoerd voorafgaand aan de start van de aanleg, eind 2015. Er is in deze periode nauwelijks verschil tussen de jaren of de locaties. Of dat in het verleden ook zo was is uit deze gegevens niet te achterhalen.



Figuur 4.23. Fosfaat concentraties in de toplaag (5 cm) van het sediment op een aantal locaties in het IJsselmeergebied, waaronder de reeks van Markermeer noordoost / Lelystad en enkele recente metingen. Data betreffen eenmalige metingen per jaar, in het najaar (meestal omstreeks oktober). Gegevens MWTL / MEP en Roskam 2016 (Marker Wadden 2015).

Metingen Marker Wadden: dieptegradiënt

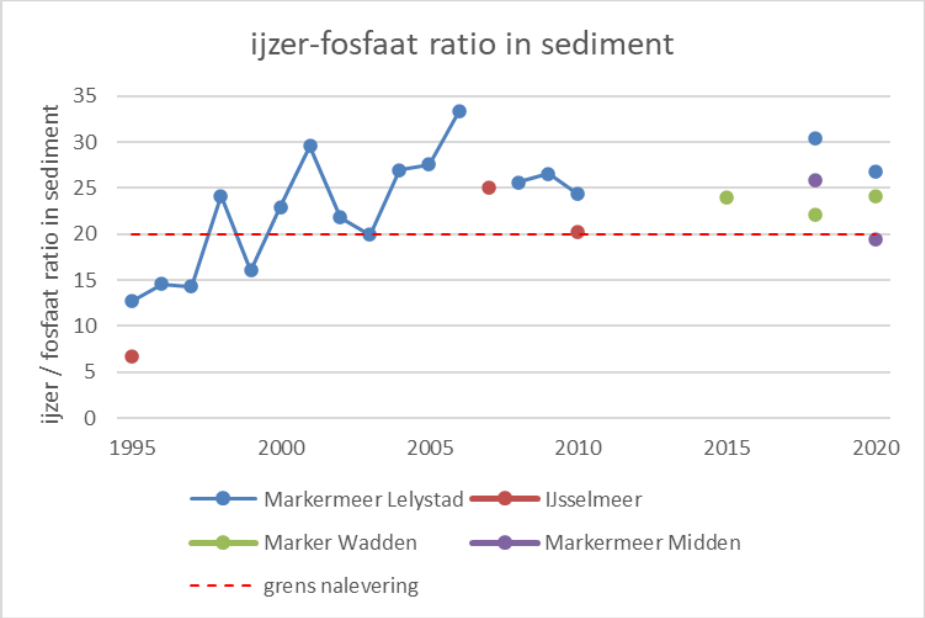
Terwijl de hierboven besproken monsters afkomstig zijn uit de toplaag (bovenste 5 cm) is bij de nulmeting op de locatie Marker Wadden in 2015 tot ongeveer 20 cm diepte gekeken. Er waren echter maar weinig monsters uit de onderkant van deze range, en er hoewel de diepste locaties relatief hoge concentraties lieten zien is er geen sprake van een heldere, significante relatie (figuur 4.24).



Figuur 4.24. Fosfaatconcentraties in het sediment op locatie Marker Wadden voor de aanleg in december 2015, in relatie tot de diepte in het sediment (uit Roskam 2016).

4.2.2.5 Nalevering

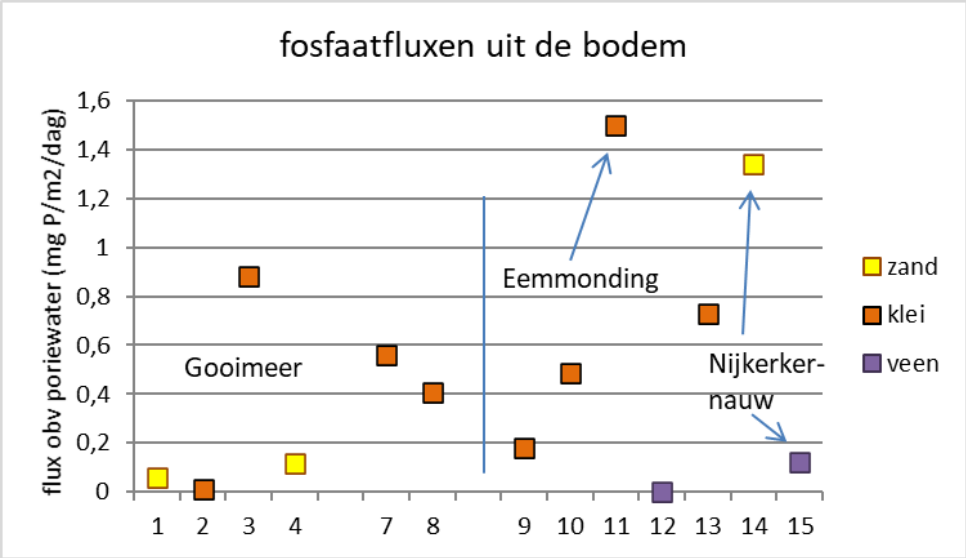
Fosfaat in de bodem is opgeslagen, kan worden nageleverd, waardoor bijv. een afname in de externe belasting (tijdelijk) kan worden gecompenseerd. De kans dat dat gebeurt is klein als er ten opzichte van fosfaat een overmaat aan ijzer in de bodem zit. Wel kan dat fosfaat van ijzer worden verdrongen door zwavel. De IJzer/zwavel ratio is in het IJsselmeergebied echter hoog (rond 3,5, vaak aanzienlijk hoger), waardoor zwavel in dit opzicht vaak niet de beperkende factor is foor fosfaatbinding (pas bij waarden <1; Handreiking Beoordeling Waterbodems, Hin et al. 2010). Dat betekent dat de kans op nalevering afhangt van de Fe/P ratio, waarbij de invloed van nalevering laag wordt geacht als die ratio hoger is dan 20 (Hin et al. 2010). In de MWTL bodemmonsters zijn ook zwavel en ijzer geanalyseerd, zodat de kans op nalevering van fosfaat kan worden geschat. Daarbij stijgt de Fe/P ratio na 2000 tot boven de 20, waaruit kan worden afgeleid dat de kans op nalevering ten tijde van de peiljaren 2006 en 2016 beperkt is geworden (figuur 4.25). De meer anekdotische gegevens uit de rest van het IJsselmeergebied, inclusief de zuidelijke randmeren, bevestigen dit beeld.



Figuur 4.25. IJzer-fosfaat ratio op basis van metingen in de toplaag van het sediment in het oosten van het Markermeer, bij Marker Wadden en in het IJsselmeer. De onderbroken rode lijn geeft de waarde waarboven de invloed van nalevering op de fosfaathuishouding laag wordt ingeschat (Handreiking Beoordeling Waterbodems; Hin et al. 2010). Zie verder vorige figuur.

Meetcampagne Eem- en Gooimeer

In het Eem- en Gooimeer is een dergelijke analyse, aan de hand van een meetcampagne in 2017, in meer detail uitgevoerd. De analyse is hier verfijnd door ijzer eerst te corrigeren voor het zwavel. Dit is gebeurd in een “Quickscan”, volgens een methode die is ontwikkeld in het kader van het IP-KRW project Baggernut, bedoeld om op basis van standaard gemeten parameters een inschatting te kunnen maken van de naleveringspotentie. Hiervoor zijn ook analyses van poriewater uitgevoerd (figuur 4.26; Noordhuis & Roskam 2017). Ook hieruit kwam naar voren dat de invloed van nalevering laag was, zowel op basis van de massamonsters als op basis van het poriewater. De afname van de fosfaatconcentraties in het Eemwater wordt onderweg naar het IJmeer dus niet (meer) gecompenseerd of afgezwakt door nalevering.



Figuur 4.26. Inschatting van het risico op nalevering op basis van de ratio (Fe - S)/P en de flux berekend door middel van de Quickscan op basis van de poriewateroncentraties (x-as). Een flux (y as) van minder dan 2 mg P/m2/dag wordt vertaald in een laag risico voor nalevering. Uit Noordhuis & Roskam 2017.

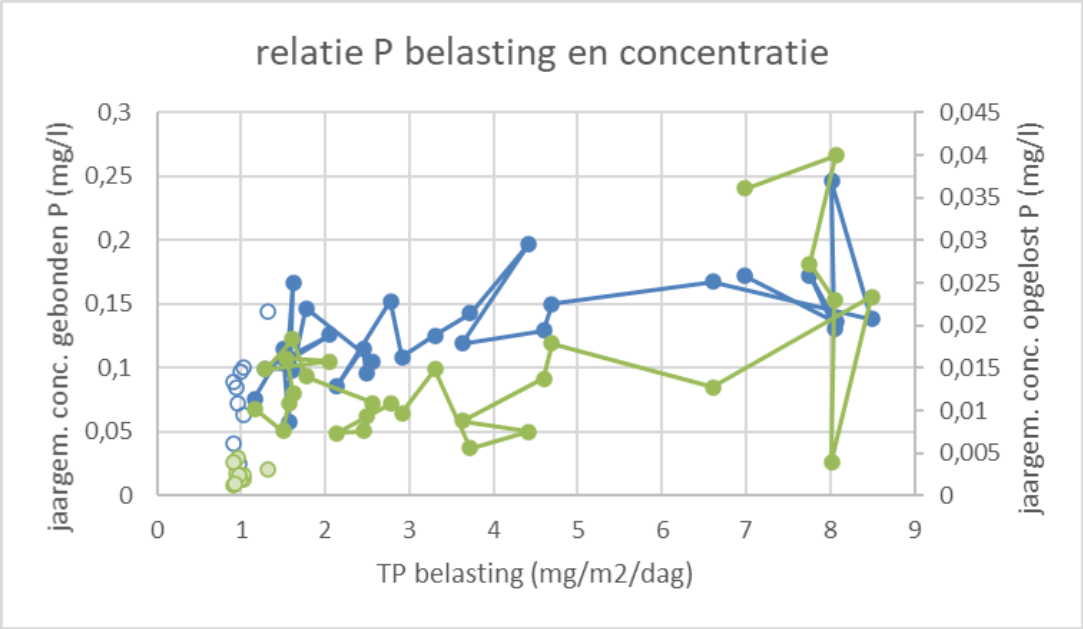
4.2.2.6 Nalevering en zuurstoftekort

In de diepe putten vindt vaak stratificatie plaats. In welke mate hangt af van de ligging en de dimensies van de put. In putten dicht bij de zuid- en westoevers van de meren vindt relatief veel en langdurig stratificatie plaats. Daarbij kan in het hypolimnion de zuurstofconcentratie sterk afnemen. Onder die omstandigheden neemt de fosfaatnalevering toe tot een nieuw evenwicht tussen water en bodem. Bij zuurstof verzadigingspercentages van minder dan 10% kunnen de concentraties opgelost fosfaat in het hypolimnion vertienvoudigen. Aan het eind van de stratificatieperiode komt deze voorraad vrij in het meer.

4.2.2.7 Interne oligotrofiering

Interne oligotrofiering is het verdwijnen van fosfaat uit de waterkolom door sedimentatie, na binding aan gesuspendeerd sediment. Ook dat wordt grotendeels gestuurd door de ijzerconcentratie. Daarbij lijkt het Markermeer binnen het IJsselmeergebied een hoge bindingscapaciteit te hebben.

Dit proces moet zich in het Markermeer altijd al hebben afgespeeld, maar het lijkt veel belangrijker te zijn geworden vanaf 2004. Tot die tijd is de concentratie van fosfaat in de waterkolom bij Markermeer Midden nauwelijks meegedaald met de belasting (figuur 4.27). Rond 2004 treedt echter een versterkte afname van de concentraties op van de opgeloste fractie.



*

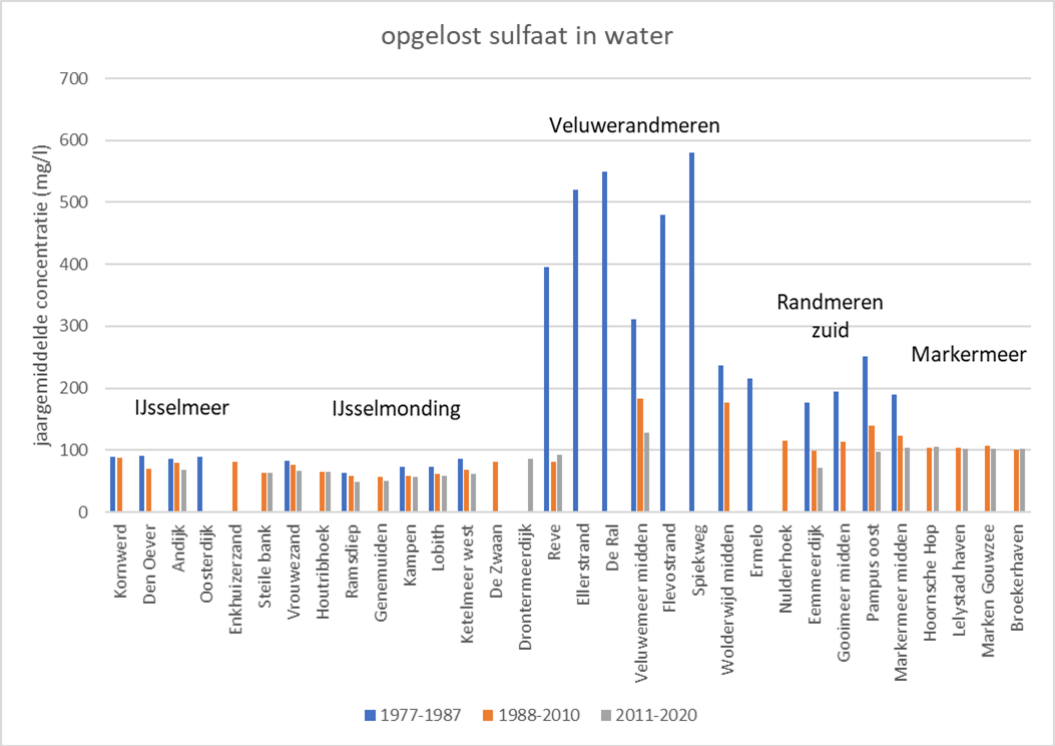
Figuur 4.27. Relatie tussen de belasting van totaal fosfaat op het Markermeer per jaar en de jaargemiddelde concentraties opgelost (groen) en gebonden fosfaat (blauw) in de waterkolom. De jaren zijn verbonden en de verandering lopen met afnemende belasting van rechts naar links. Open symbolen zijn de waarden vanaf 2004.

De verklaring begint bij een forse afname van de P vrachten door de Houtribdijk (en is weer een aanwijzing voor beperkte invloed van belasting vanuit het zuiden). Naar mate de aanvoer kleiner wordt, neemt de invloed van binding van opgelost P aan ijzer in gesuspendeerd sediment natuurlijk toe. Maar daarbij komt dat de Fe/P ratio in dat sediment ondertussen is toegenomen (figuur 4.20), terwijl de sulfaatconcentraties zijn afgenomen (figuur 4.28). De bindingscapaciteit van het (gesuspendeerde) sediment is dus belangrijk toegenomen.

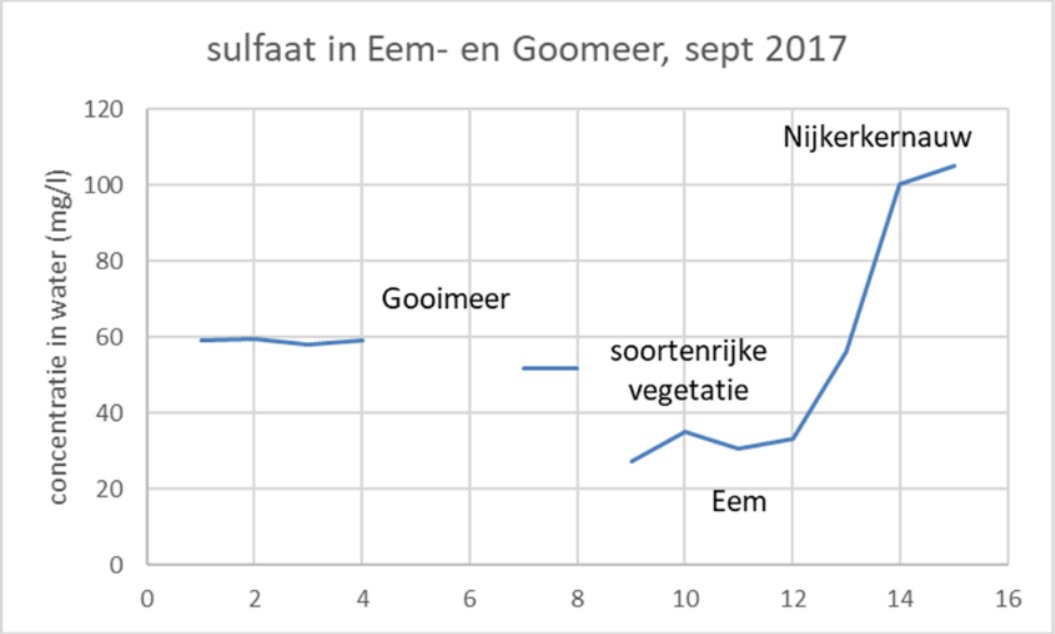
Sulfaat

Sulfaat komt vanuit het brakke verleden in relatief hoge concentraties voor in de meren en de polderbodems. Vooral in water dat uit de polders komt zit veel fosfaat. Omdat zwavel met fosfor concurreert om bindingsplaatsen aan ijzer is dat van belang voor de fosfaatbalans.

Na een sterke toename van sulfaat in de Veluwerandmeren door de start van doorspoeling met polderwater in 1979 is de concentratie daar weer gedaald, en na menging met het water uit de Eem (figuur 4.28) zijn de waarden van het water uit het zuiden nu lager dan in het Markermeer. Het effect van toevoer van sulfaatarm water uit de Eem is mooi te zien in de meetgegevens uit het Eem- en Gooimeer uit 2017 (figuur 4.29; Noordhuis & Roskam 2017). Bij het water uit het IJsselmeer was door de invloed van de IJssel altijd al sprake van verdunning. Sulfaat lijkt dus langzaam te worden uitgespoeld. De ijzerconcentraties zijn juist relatief hoog in de rivieren.

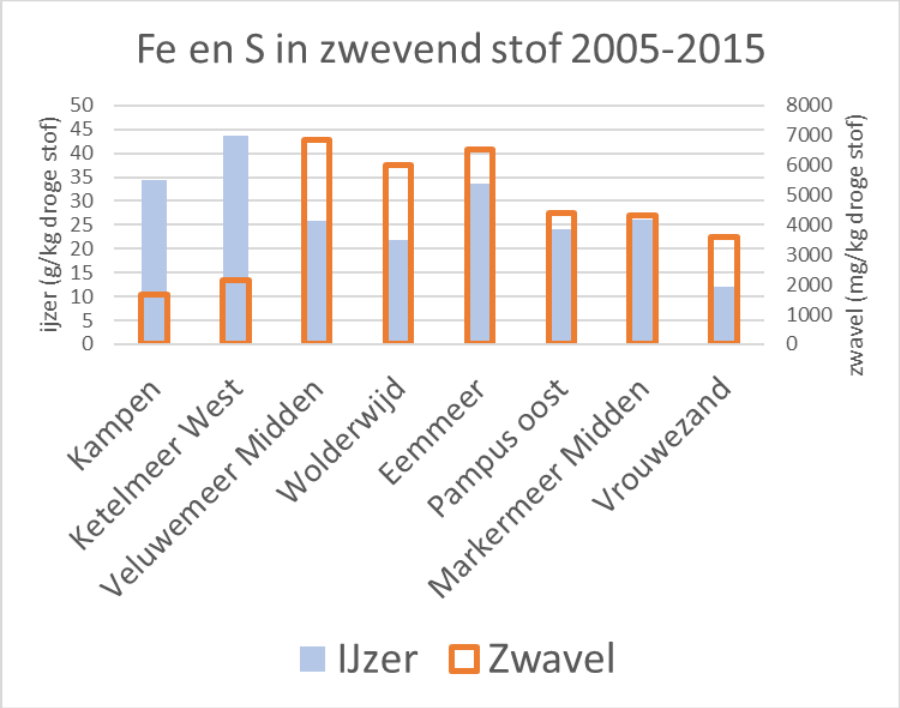


Figuur 4.28. Veranderingen in concentraties opgelost fosfaat in het IJsselmeergebied (rondje IJsselmeer – Randmeren – Markermeer). De hoge waarden in de Veluwerandmeren volgen op de start van doorspoeling met water uit de Flevopolders in 1979 en zakken dan geleidelijk uit. De waarden in het (zuidelijk) IJsselmeer zijn structureel lager dan die in met Markermeer, die in de zuidelijke randmeren inmiddels ook. Ontbrekende staven zijn het gevolg van het ontbreken van metingen, niet van nulwaarden.



Figuur 4.29. Sulfaatconcentraties in water op een reeks locaties in het Nijkerkernauw, Eemmeer en Gooimeer (van rechts naar links) in september 2015 (Noordhuis & Roskam 2016). Het water uit het Wolderwijd (Nijkerkernauw) heeft inmiddels beperkte, maar nog relatief hoge concentraties. De waarden in de buurt van de monding van de Eem zijn een factor drie lager, en het gemengde water in het Gooimeer ligt daar tussen in (en heeft inmiddels lagere concentraties dan het Markermeer).

Hoewel de Fe/S ratio in het sediment in het gehele IJsselmeergebied al veel hoger is dan de grenswaarde van 1 voor significante invloed op fosfaatbinding (Handreiking Beoordeling Waterbodems, Hin et al. 2010), lijkt die ratio in het Markermeer-IJmeer voor zwevend stof nog eens hoger te liggen dan in de rest van het IJsselmeergebied, afgezien van IJssel en Ketelmeer (figuur 4.30).Gecombineerd met de hoge concentraties anorganisch zwevend stof in het Markermeer geeft dat een hoge bindingscapaciteit voor opgelost fosfaat.



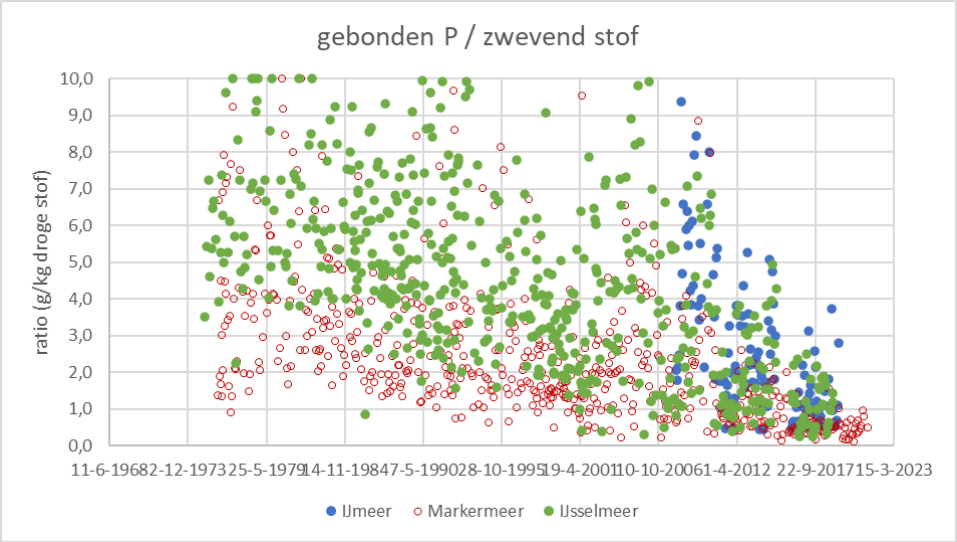
Figuur 4.30. Gemiddelde verhouding tussen ijzer en zwavel in zwevend stof in de periode 2005-2015 in een aantal wateren in het IJsselmeergebied.

Afname P in zwevend stof

Hoewel de gebonden fractie in absolute zin minder lijkt te reageren op veranderingen rond 2004, is er een sterke, doorgaande afname te zien bij de ratio gebonden P / zwevend stof (figuur 4.31). Die ratio is overal in het IJsselmeergebied inmiddels gedecimeerd, maar was daarbij in het Markermeer steeds aanzienlijk lager dan elders. De sterke afname past bij de toename van de Fe/P ratio in het sediment en vertegenwoordigt dus een toenemende overmaat aan bindingscapaciteit.

Deze afname van fosfaat in zwevend stof kan ook betekenen dat het zwevend stof (seston) als voedsel voor filteraars (mosselen, watervlooien) in kwaliteit achteruit is gegaan en dat kan weer een verklaring zijn voor de doorgaande afname van de gemiddelde grootte van de mosselen. Daarmee heeft het nog een ander (negatief) effect op de interne circulatie van fosfaat.

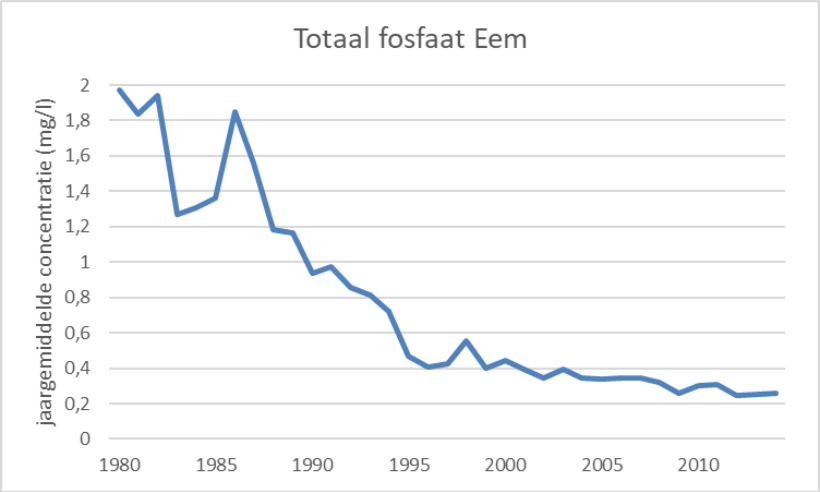
Opvallend is verder dat deze fractie, anders dan de fosfaat concentraties, in het IJmeer ruim twee keer zo hoog is als in het Markermeer (hoewel de afname even sterk is). Het verschil is gekoppeld aan een even groot, maar omgekeerd verschil in zwevend stof concentraties, en illustreert daarom de overmaat aan bindingscapaciteit van fosfaat aan het zwevend stof.



Figuur 4.31. Veranderingen in de ratio gebonden P / zwevend stof in het Markermeer, IJmeer en IJsselmeer (ratio's, oftewel kg/kg).

4.2.3 Zuidelijke route: beïnvloeding door overige factoren

De rivier de Eem is de belangrijkste bron van fosfaat voor het waterlichaam in de niet ruimtelijk gedifferentieerde balans. Sinds 1980 is de gemiddelde concentratie sterk afgenomen (figuur 4.32), maar nog steeds is deze relatief hoog, met een jaargemiddelde van bijna 0,3 mg/l drie keer zo hoog als in de Rijn, al is het debiet natuurlijk vele malen lager.



Figuur 4.32. Verloop van het jaargemiddelde totaal fosfaatgehalte in de Eem.

Voor interpretatie van de MWTL gegevens is het van belang de ligging van de betrokken meetpunten te beschouwen. Het eerste punt van aandacht daarbij is dat alle meetpunten in de randmeren in de vaargeulen liggen, en dus niet noodzakelijk de situatie op de ondiepten vertegenwoordigen. Verder is de exacte locatie van de meetpunten in het Eemmeer, Gooimeer en IJmeer van belang in relatie tot de ruimtelijke verdeling van factoren die de doorvoer van fosfaat kunnen belemmeren, zoals diepe putten, filterende mosselen en waterplanten. Het belang van deze factoren is in de loop van de beschouwde periode groter geworden. Deze toename is niet altijd goed in beeld. Ook over het totaal zijn de absolute verdwijnposten van fosfaat naar de putten afgenomen, maar waarschijnlijk relatief gezien toegenomen.

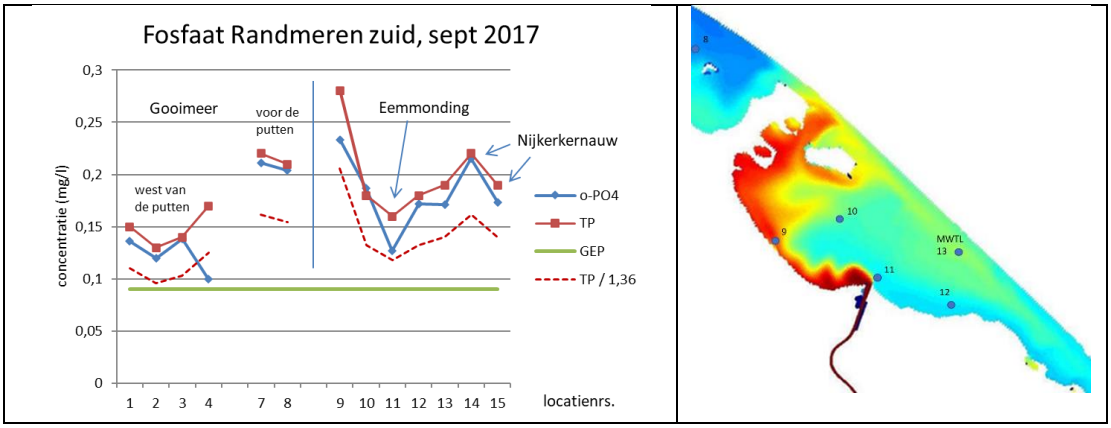
4.2.3.1 Diepe putten

Op route van Eem en Veluwerandmeren naar het Markermeer komt het water vanuit het zuiden enkele grote zandwinputten tegen. Bij het interpreteren van meetgegevens is het van belang de ligging van de meetpunten ten opzichte van deze putten in het oog te houden. Dit geldt meer in het algemeen ook voor de ligging van andere meetpunten in relatie tot diepteverdeling en stromingspatronen. In figuur 3.3 zijn voor het Eem- en Gooimeer de MWTL meetpunten en projectlocaties uit Noordhuis & Roskam 2017 in relatie tot geulen en putten weergegeven. Het huidige MWTL meetpunt in het IJmeer (Pampus Oost; zie figuur 3.2) ligt in de vaargeul net ten noorden van de IJmeerput (zi figuur 4.36).

Meetpunt Eemmeer

Dit meetpunt ligt in de hoofdvaargeul op enkele kilometers ten zuidoosten, oftewel “stroomopwaarts” van de locatie waar de dwarsgeul vanaf de Eemmonding (figuur 3.3). Het in figuur 4.29 getoonde voorbeeld van modelresultaten met betrekking tot het Eemmeer laat zien dat deze dwarsgeul mogelijk vooral een scheepvaartgeul is, en dat het water vanuit de Eem niet noodzakelijk ook die route volgt.

Tijdens de eerder genoemde meetcampagne in 2017 (Noordhuis & Roskam 2017) werd vlak voor de aantakt Eemmonding een relatief lage fosfaatconcentratie gemeten, terwijl de concentraties richting Stichtse Brug / Gooimeer juist hoger waren. Dat wordt begrijpelijk met het modelresultaat in figuur 4.33, waarin het water vanuit de Eemmonding direct afbuigt en langs de oevers naar de Stichtse Brug stroomt. In zulke situaties zou de concentratie op het MWTL meetpunt in de hoofdvaargeul dus ook een onderschatting zijn.

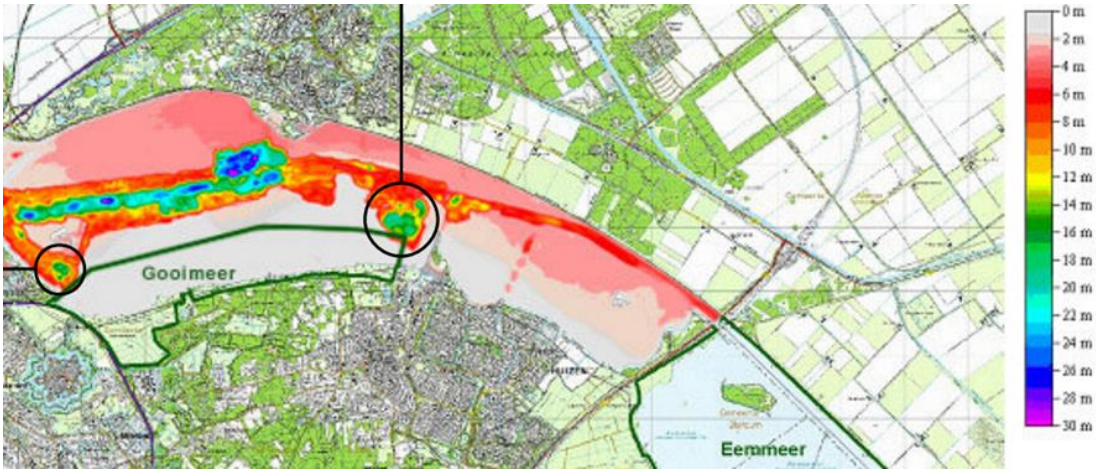


Figuur 4.33. Links: Resultaten van fosfaatmetingen in de waterkolom van een west-oost raai het Gooi- en Eemmeer in september 2017 (Noordhuis & Roskam 2017). De rode stippellijn geeft het geschatte zomerhalfjaargemiddelde. Rechts: ligging van de meetpunten (8-13) van de linker figuur in combinatie met modeluitkomst voor stroming (aandeel Eemwater). De volledige nummering van de meetpunten is te vinden in figuur 3.3.

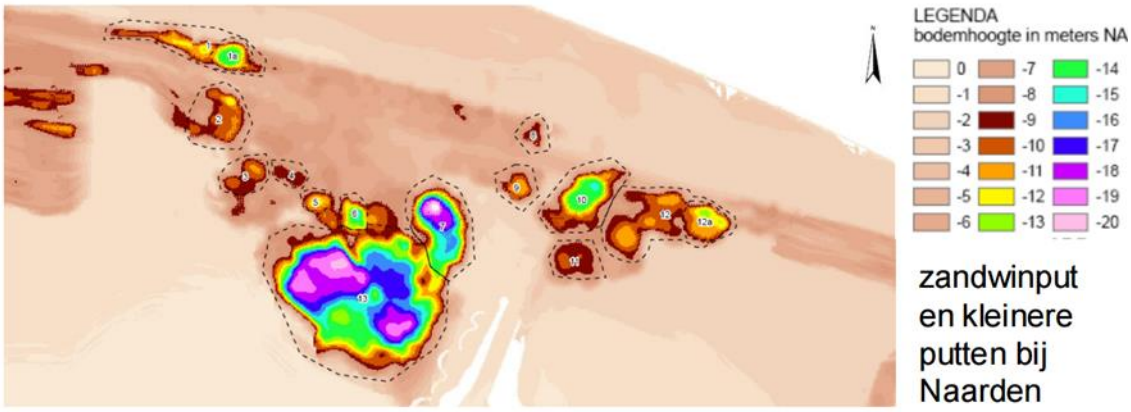
Meetpunt Gooimeer

Nadat het water vanuit het Eemmeer in het Gooimeer stroomt, krijgt het te maken met een complex van diepe putten. Dat begint met een complex van kleinere putten tegenover de pier van Huizen, die de breedte van het Gooimeer ter plaatse bijna halveert. De vaargeul loopt door de twee diepste daarvan, die een diepte van zo’n 15 meter hebben. De eerste grote put ligt aan de linkerkant van de geul achter de pier. De vaargeul ligt een kilometer lang op de noordhelling van deze grote put. Daarna zet alleen de vaargeul zich voort totdat die een kilometer verder bij de diepste put aankomt, in dit geval in het midden van de put. Deze put is 30 m diep en heeft een doorsnede van zo’n 500m. Het MWTL meetpunt ligt vanuit het Eemmeer bekeken aan de achterkant van deze tweede put. Het resterende deel van de vaargeul in het Gooimeer is verbreed en verdiept en vormt een derde grote diepe put.

In de resultaten van de meetcampagne in het Gooi- en Eemmeer uit 2017 is te zien dat de fosfaat concentratie naar het westen toe juist ter hoogte van de putten min of meer halveert (figuur 4.33). Ten westen van de pier van Huizen verwijdt het Gooimeer zich echter ook, waardoor ook in de breedte een zekere verdunning optreedt. De afname betreft ook de opgeloste fractie van fosfaat (die in september op z'n hoogst is).



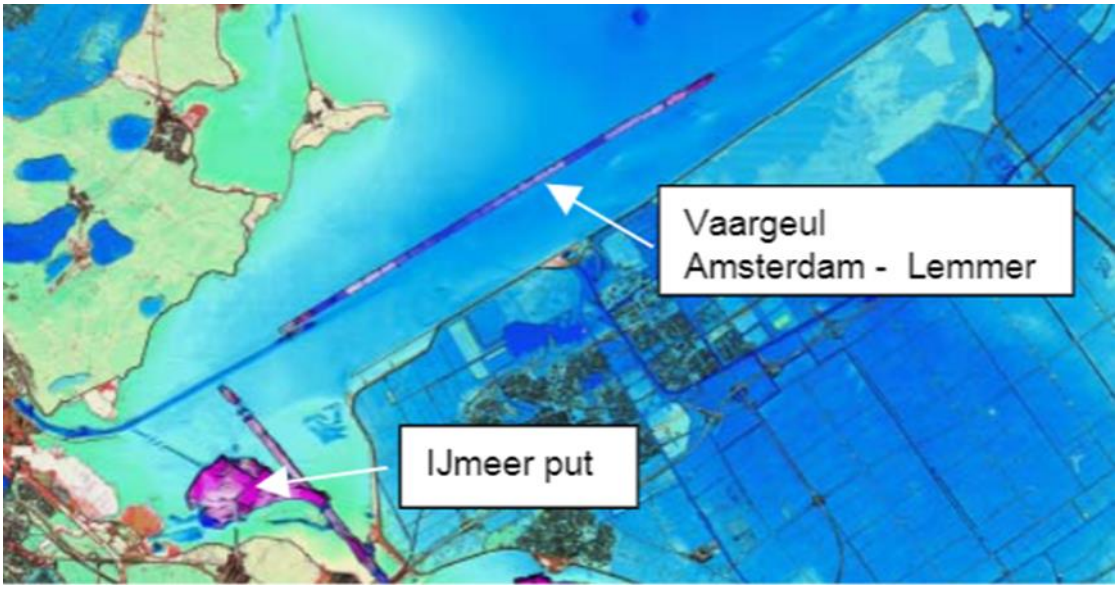
Figuur 4.34. Diepe putten in het Gooimeer.



Figuur 4.35. Details van het cluster kleine putten en de eerste grote put in het Gooimeer bij de pier van Huizen. Actueel Dieptebeastand IJsselmeergebied 2001, Rijkswaterstaat.

Meetpunt IJmeer

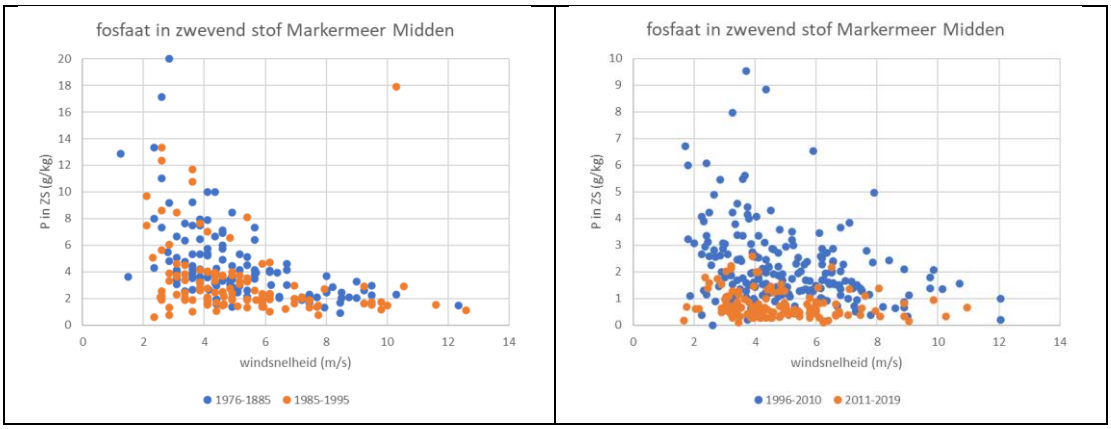
Niet ver van de Hollandse Brug, waar het water uit het Eemmeer het IJmeer in stroomt, ligt een vierde diepe put, die nog groter is dan de drie in het Gooimeer. Deze put heeft een oostwaartse uitloper die aantakt op de vaargeul. Een deel van het water uit het Eemmeer zal dus de put in stromen. De vaargeul loopt dan aan de noordkant door naar de vaargeul Amsterdam-Lemmer. Het meetpunt van het IJmeer ligt in die geul ten noorden van de put.



Figuur 4.36. Diepe put en vaargeulen IJmeer.

4.2.3.2 Schatting van sedimentatie in de putten

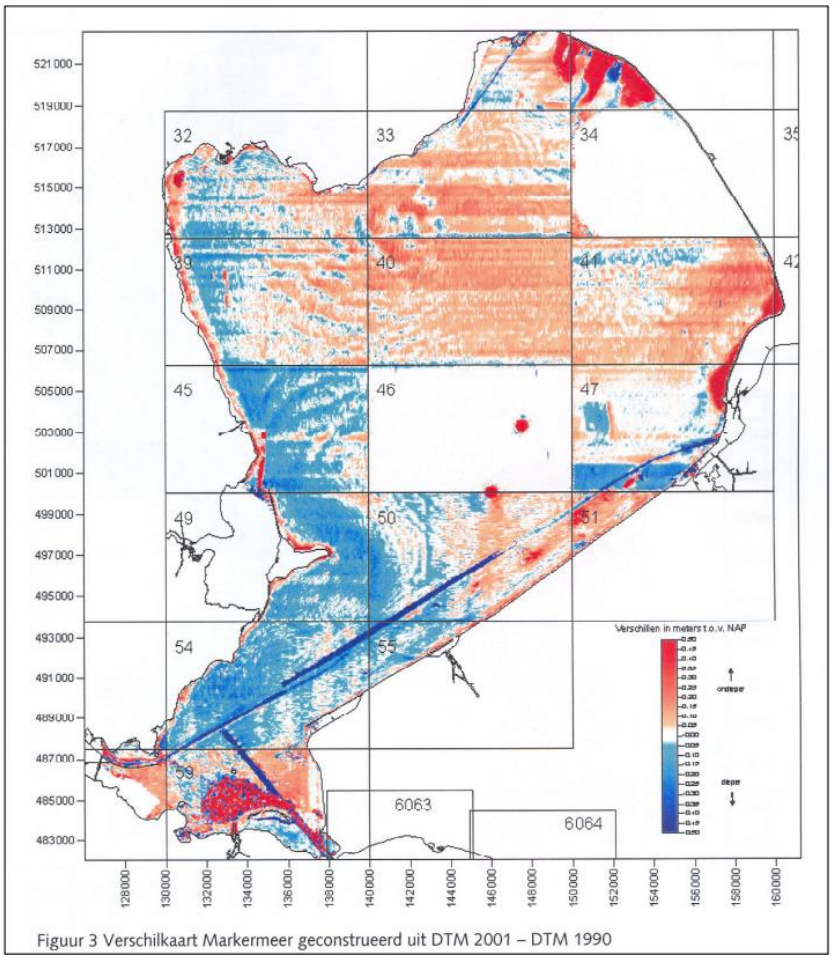
Met behulp van Van Leeuwen 2005 en Boderie et al. 2010 kan een indruk worden verkregen van de snelheid waarmee slib accumuleert in de putten in het Markermeer-IJmeer en het Gooimeer. De hoeveelheid fosfaat die daarmee in de putten wordt opgeslagen kan worden geschat door de gegevens over opvulling met slib uit verschilkaarten in bodemhoogte te verrekenen met metingen van fosfaatconcentraties in het omringende sediment en in het zwevend stof. In het algemeen zijn de P concentraties in het zwevend stof enkele malen hoger dan in het sediment, maar ze dalen en naderen de concentraties in het sediment als de wind toeneemt tot stormkracht (figuur 4.37). Onder die omstandigheden komen ook grovere sedimentfracties in suspensie, met een lager fosfaatgehalte.



Figuur 4.37. Relatie tussen windsnelheid (Schiphol, gemiddelde van meetdag en voorgaande dag) en de ratio totaal P / zwevend stof (in mg/kg) op locatie Markermeer Midden.

Volgens Van Leeuwen (2005) komen in het Gooimeer relatief hoge voor als gevolg van op- en afwaaiing in het IJmeer. Sediment dat bij storm wordt opgewerveld verplaatst zich over grote afstanden in zowel de zuidelijke randmeren als in het Markermeer, waardoor zich in de putten sediment kan afzetten vanuit een groot brongebied.

Volgens Boderie et al. 2010 is er een sterke relatie tussen de diepte van putten en het erosie-sedimentatie evenwicht. Bij diepere putten neemt de erosie af, en beneden een drempelwaarde speelt die nauwelijks een rol meer. Wat daar sedimenteert, komt er niet meer uit. Bij kleine putten is die diepte ongeveer 7 m -NAP, bij grote putten zoals de IJmeer- en Eemmeerputten 10 m -NAP.



Figuur 4.38. Verschilkaart tussen 2001 en 1990 van de bodemhoogtes in het Markermeer-IJmeer. Uit van Leeuwen 2005 (gemaakt door RWS).

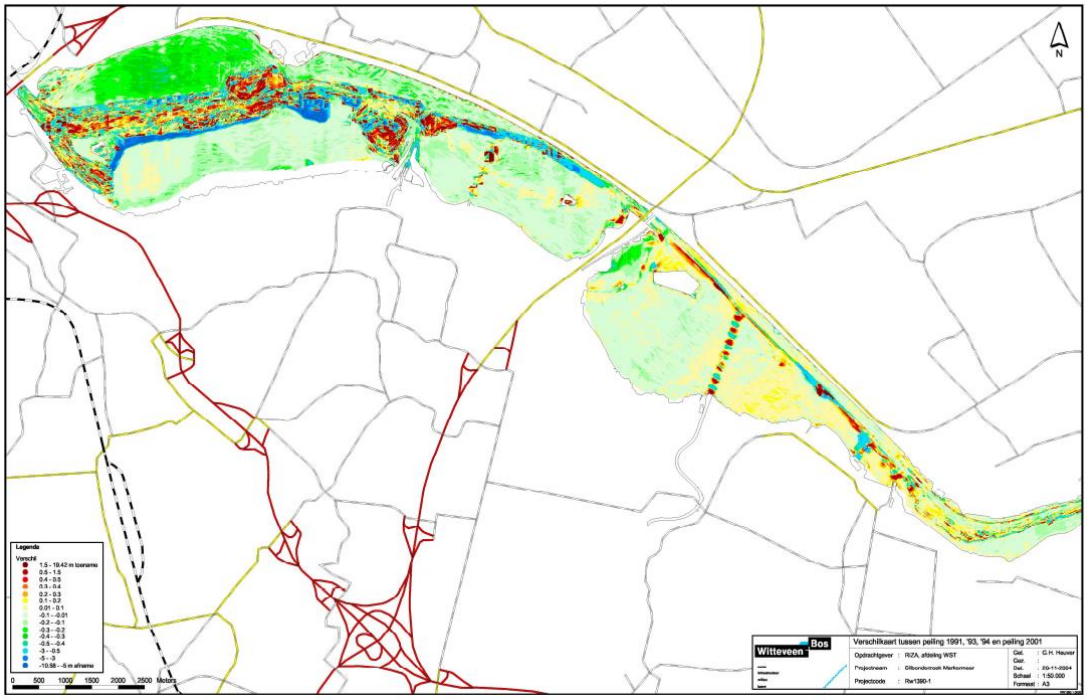
Met behulp van de genoemde bronnen zijn er twee opties om een schatting te maken van de hoeveelheid fosfaat die in de putten is gesedimenteerd in de periode 1990-2001:

1 Berekeningen in Van Leeuwen 2005 van de hoeveelheid verplaatst slib van Eemmeer naar Gooimeer en van Gooimeer naar IJmeer. Deze berekeningen concentreren zich op de Gooimeerputten en geven geen details voor de IJmeerput.

2 Schatting van de sedimentatiesnelheid op basis van de verschilkaarten. Dit komt voor het Gooimeer in dezelfde grootte uit als bij de voorgaande benadering. Voor het IJmeer is dit een minimum schatting omdat de schaalverdeling niet verder gaat dan 5 cm sedimentatie per jaar, terwijl uit Boderie et al 2010 blijkt dat de snelheden veel groter kunnen zijn.

De laatste berekening levert dus de hoogste waarden op; hierbij is gebruik gemaakt van gegevens over de diepteverdeling van de putten rond eind jaren 1980 (Beckers & Dirksen 1989) en de drempelwaarde van 10 meter diepte uit Boderie et al. 2010.

Methode 1 Gooimeerputten
In proefputten in het Markermeer sedimenteerde maximaal 2 m slib per jaar, met een dichtheid van ongeveer 240 kg/m3. Van Leeuwen (2006) stelt dat de IJmeerput (en de Gooimeerputten) veel langzamer dichtslibt door een lager aanbod aan slib. Een verschilkaart van bodemhoogte in het Gooimeer tussen 1990 en 2001 laat hooguit anderhalve meter verhoging in de putten zien. In die periode is volgens berekeningen van Van Leeuwen 0,46 miljoen ton slib in de Gooimeerputten gesedimenteerd, dus ongeveer 0,04 miljoen ton per jaar. Dat is iets minder dan de 0,6 miljoen ton slib of 0,055 per jaar die het Eemmeer volgens deze studie in dezelfde periode heeft geëxporteerd. Volgens die berekeningen exporteert het Gooimeer netto veel meer, bijna 7 miljoen ton, dat “voor een belangrijk deel” in de IJmeerput terecht komt.



Figuur 4.39. Verschilkaart tussen lodingen van 2001 en de periode 1991-1994 in het Eem- en Gooimeer. Uit Van Leeuwen 2005.

Aangezien de slibexport vanuit het Eemmeer in grote lijnen overeenkomt met de sedimentatie in de Gooimeerputten, kan worden aangenomen dat het materiaal dat in de putten sedimenteert grotendeels uit het Eemmeer komt. Daarom zou de hoeveelheid fosfaat die in dit materiaal zit kunnen worden berekend met fosfaat metingen in sediment en zwevend stof uit het Eemmeer (er zijn geen gegevens uit het Gooimeer). Dat is gemiddeld 0,92 g/kg (gegevens 1995-2000, zie figuur 4.39). Dat betekent sedimentatie van 38.473 kg P per jaar. De gemiddelde fosfaatbelasting vanuit Vallei en Veluwe op het Markermeer bedroeg 245.280 kg per jaar (Van de Geest et al. 2017). , waarvan de export van slib vanuit het Eemmeer dus ongeveer 20,5% zou bedragen zou verzorgen en waarvan 15,7% in de Gooimeerputten zou zijn gesedimenteerd.

Methode 2 Gooimeerputten
Op basis van de diepteverdeling van de Gooimeerputten eind jaren 1980 (Beckers & Dirksen 1989) was het gedeelte van de Gooimeerputten dat een diepte had van meer dan 10m ongeveer 420 ha. Op basis van de verschilkaart 1990-2001 is een sedimentatiesnelheid gebruikt van 5 cm per jaar, met een dichtheid van 240 kg/m3 (Van Leeuwen 2005)

Dat betekent een sedimentatie van 50,4 miljoen kg slib per jaar. Bij een concentratie van 0,92 g/kg P in de toplaag van het sediment betekent dat 46.368 kg P per jaar. Dat is ongeveer 9% van de totale gemiddelde fosfaatbelasting op het Markermeer in die periode, of 19% van belasting vanuit zuidelijke randmeren, vergelijkbaar met het resultaat van methode 1.

Methode 2 IJmeerput
Op basis van de diepteverdeling van de IJmeerput eind jaren 1980 (Beckers & Dirksen 1989) was het gedeelte van de Gooimeerputten dat een diepte had van meer dan 10m ongeveer 530 ha. Op basis van de verschilkaart 1990-2001 is een sedimentatiesnelheid gebruikt van 5 cm per jaar, met een dichtheid van 240 kg/m3 (Van Leeuwen 2005)

Dat betekent een sedimentatie van 63,6 miljoen kg slib per jaar. Bij een concentratie van 0,92 g/kg P in de toplaag van het sediment betekent dat 58.512 kg P per jaar. Dat is ongeveer 11,5% van de totale gemiddelde fosfaatbelasting op het Markermeer in die periode, of 24% van belasting vanuit zuidelijke randmeren.

Op basis van deze berekeningen zou dus bijna de helft van P aanvoer vanuit de zuidelijke randmeren sedimenteren in de putten. Dit is een voorzichtige benadering, met alleen delen van de putten dieper dan 10 meter, hoewel de vergelijkbare resultaten van de twee methoden voor het Gooimeer enig vertrouwen geven.

Wel is de vraag op de fosfaatconcentraties in het sediment voor Eem- Gooi- en IJmeer gelijk mogen worden verondersteld. Concentraties fosfaat in zwevend stof in het Eem- en Gooimeer zijn onderling vergelijkbaar, die in het IJmeer zijn echter belangrijk lager. Ook de enige meting in sediment in het IJmeer ligt veel lager dan de waarde uit het Eemmeer in dat jaar (figuur 4.23). Metingen in sediment uit het Gooimeer zijn niet beschikbaar. Concentraties in het water zijn ook in het Gooimeer altijd lager geweest dan in het IJmeer, en in de meetreeks van 2015 waren ze aan de westzijde van het Gooimeer nog eens lager dan aan de oostzijde (waar het reguliere meetpunt ligt; figuur 4.33, zie ook Noordhuis & Roskam 2017). Enerzijds gaat het echter om slib uit de randmeren dat in de IJmeerput sedimenteert. Anderzijds gaat de P concentratie in zwevend stof in het IJmeer zelf bij storm ook naar concentraties die vergelijkbaar zijn met (of zelfs iets hoger zijn dan) de gebruikte 0,92 g/kg.

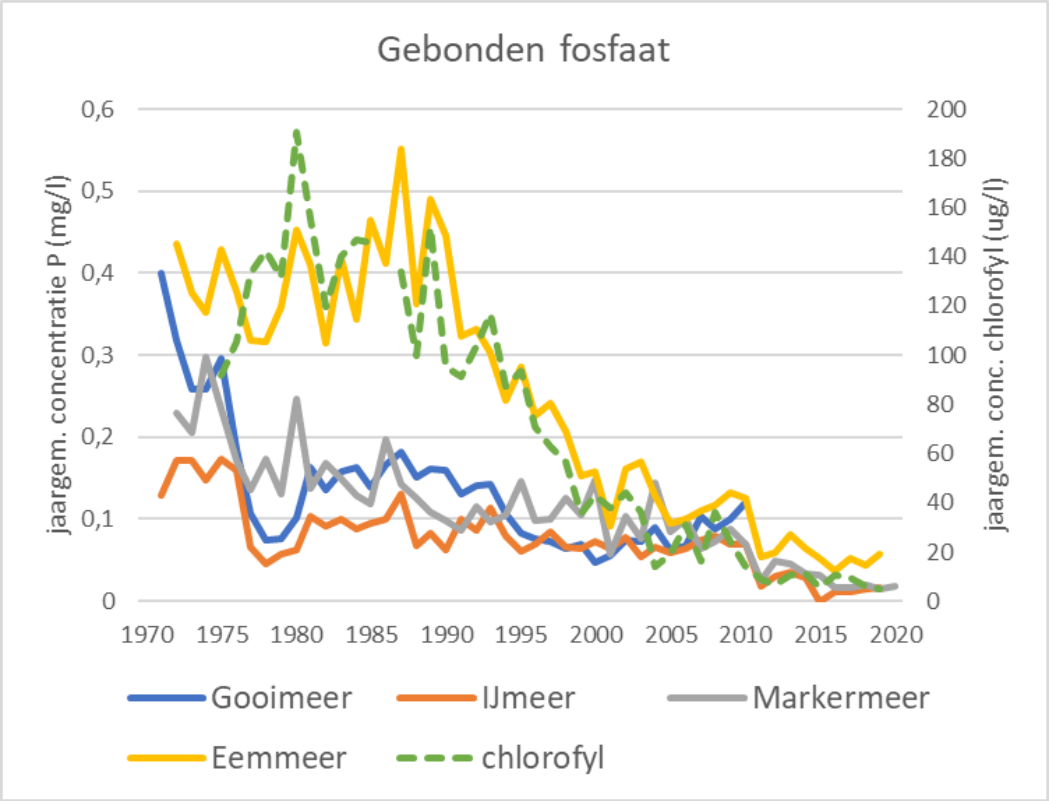
Opmerkingen bij de berekeningen
Omdat het bij storm opgewervelde slib een hoge bindingscapaciteit voor fosfaat heeft zorgt de interne oligotrofiering wellicht voor aanzienlijk hogere concentraties in het slib dat sedimenteert als de storm gaat liggen. Ook is de gebruikte sedimentatiewaarde van 5 cm per jaar voor de IJmeerput aan de voorzichtige kant (einde van de schaal op de verschilkaart), al is op de kaart ook zichtbaar dat de sedimentatie niet erg uniform is geweest en dat er ook gebiedjes dieper zijn geworden. Daar staat tegenover dat het oppervlak waar sedimentatie heeft plaatsgevonden volgens de verschilkaart ongeveer twee keer zo groot is als het gebruikte oppervlak van 530 ha dat dieper dan 10 m was volgens Beckers & Dirksen (1989).

Aan de verschilkaart van het Gooimeer is de zien dat het oppervlak van de westelijke Gooimeerput in de beschouwde periode fors is toegenomen ten opzichte van de gebruikte diepteverdeling in de jaren 1980. Deze verdiepingen hebben op basis van de dieptekaart (figuur 4.39) echter niet geleid tot dieptes van meer dan 10 meter.

In paragraaf 4.2.5.1 worden de berekeningen aan de Gooi- en IJmeerputten aangevuld met soortgelijke berekeningen aan sedimentatiegebieden in de kom van het Markermeer.

4.2.3.3 Fytoplankton

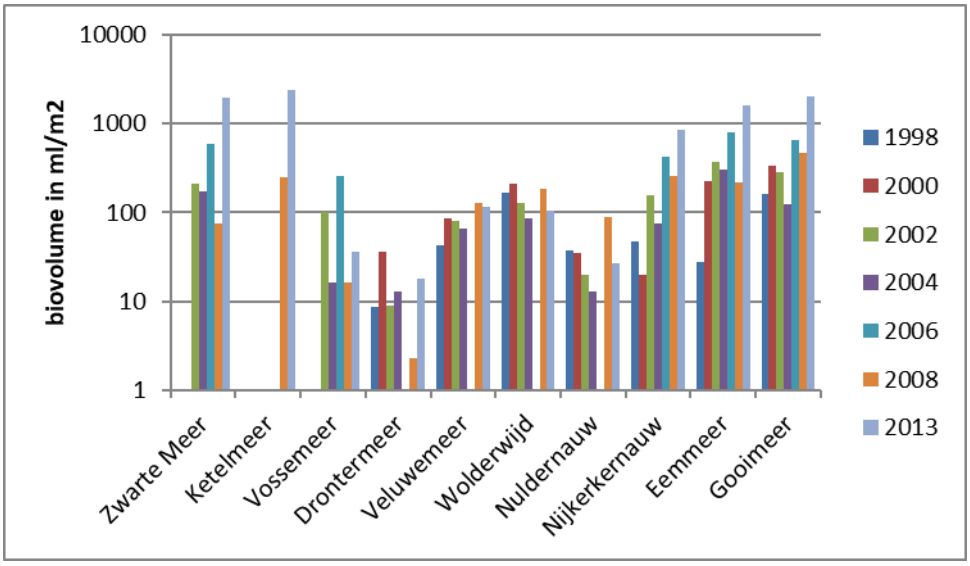
Het verloop van particulair fosfaat is in het Eemmeer in hoge mate gelijk opgegaan met dat van chlorofyl. Dat suggereert dat deze particulaire fosfaatfractie grotendeels in algen was opgenomen. Dat betekent dat die fractie ook het gedrag van fytoplankton vertoonde met betrekking tot stroming, resuspensie en sedimentatie, ook boven de diepe putten.



Figuur 4.40. Jaargemiddelde concentraties paritculair fosfaat (mgP/l, linkeras) in de zuidelijke randmeren, het IJmeer en het Markermeer, met aanvankelijk veel hogere waarden in het Eemmeer, waar het verloop is vergeleken met dat van chlorofyl (rechter as ug/l chlf-a).

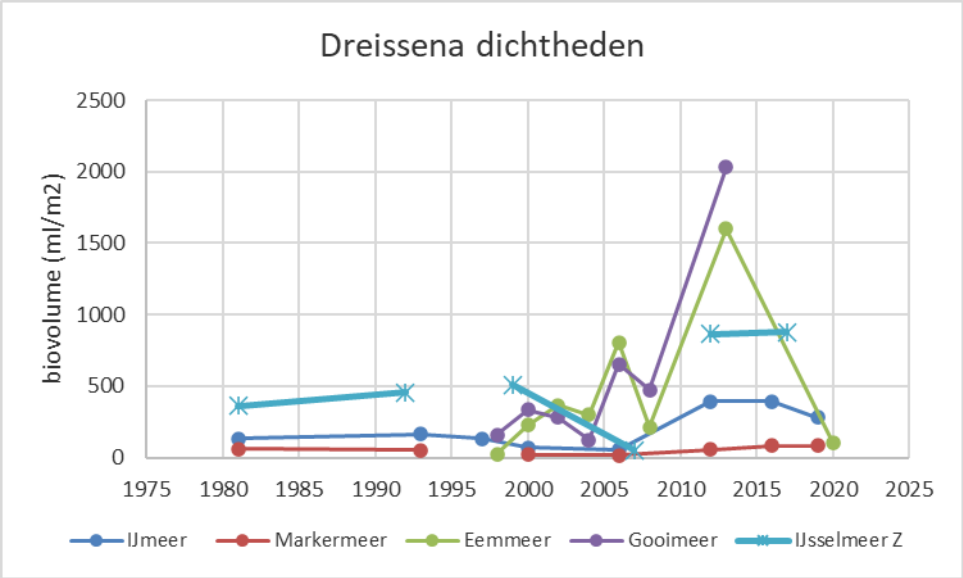
4.2.3.4 Filterende mosselen

Mosselen filteren zwevend materiaal uit het water, waarna een deel wordt geconsumeerd en de rest met mucus wordt verwerkt tot pseudofaeces, die na uitscheiding naar de bodem zakken. Het gefilterde zwevend stof wordt dus ten minste tijdelijk uit suspensie gehaald. Dit kan dus effect hebben op de hoeveelheid gebonden fosfaat in de waterkolom. De filtratie activiteit is temperatuur afhankelijk en valt in de wintermaanden bijna stil.



Figuur 4.41. Dichtheden van Driehoeks- en Quaggamosselen (vanaf 2008, dominant in 2013) in de randmeren in de periode 1998-2013.

Op de route van Eem naar IJmeer komt het water eerst de hoogste dichtheden van mosselen in het IJsselmeergebied tegen, vooral sinds de opkomst van de Quaggamossel. In het peiljaar 2006 was dat al het geval na een forse toename van de populatie Driehoeksmosselen in zowel het Eemmeer als het Gooimeer. De dichtheden in het IJmeer waren toen nog laag. Het jaar daarna begon de opmars van de Quaggamossel in het IJsselmeergebied en in 2013 waren ze in de zuidelijke randmeren dominant. De totale dichtheden waren daarbij verdubbeld tot verdrievoudigd ten opzichte van de voorgaande kartering in 2006 (figuur 4.42). In het IJmeer was de relatieve toename nog sterker, maar de absolute dichtheden werden niet zo hoog als in de zuidelijke randmeren. Metingen in 2012 en 2016 lieten ongeveer dezelfde dichtheden zien. In 2019 waren ze weer wat lager, en een kartering in het Eemmeer in 2020 (v.d. Kamp et al. 2020) suggereert een crash. Hoewel het waarschijnlijk lijkt dat de dichtheden in het peiljaar 2016 ook in de zuidelijke randmeren dus nog hoog waren, is dat dus niet zeker. Ook is de dichtheid rond 1980 (eerste peiljaar) in feite onbekend (al zal die gezien de hypertrofie en algenbloei destijds niet hoog zijn geweest).

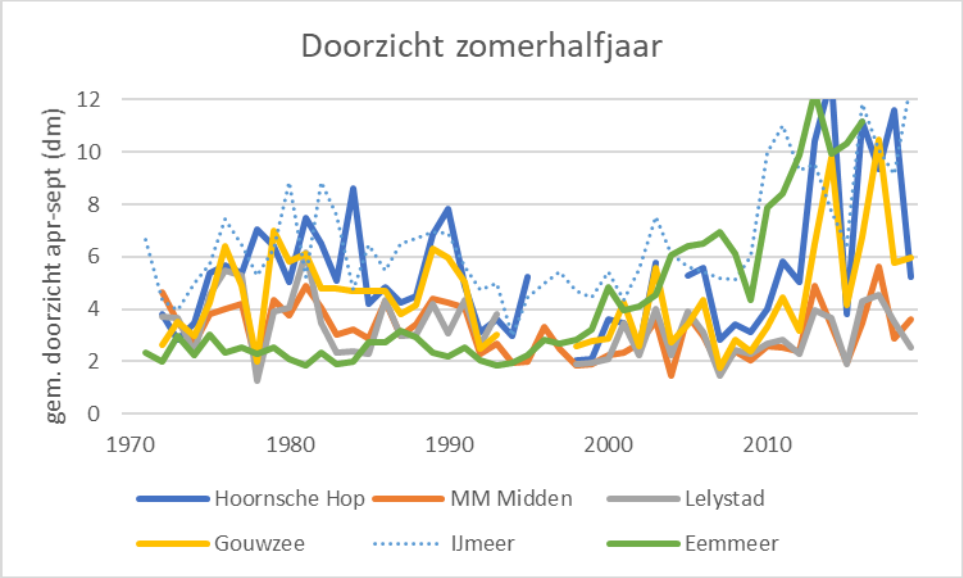


Figuur 4.42. Verloop van de dichtheid van Dreissena mosselen in het IJmeer, (overig) Markermeer en zuidelijk IJsselmeer.

De filtratiecapaciteit in 2016 was naar schatting 1525 liter per dag per m^2 in het IJmeer, put niet meegerekend, bij een gemiddelde diepte van 3,2 meter. Dit betekent ongeveer dat de bovenstaande waterkolom eens per 2 dagen zou kunnen worden gefilterd. De capaciteit in het Eemmeer (en Gooimeer) is nog veel hoger (hieronder zelfs nog zonder de Quagga's, en bij geringere diepte).

Hier met de kartering van 2013, na kolonisatie door de Quagga's, met 2000 ml mosselen per m^2, dus 4x zo veel als in het IJmeer, bij geringere diepte. De ondiepere delen van Eemmeer en Gooimeer worden dus dagelijks integraal gefilterd.

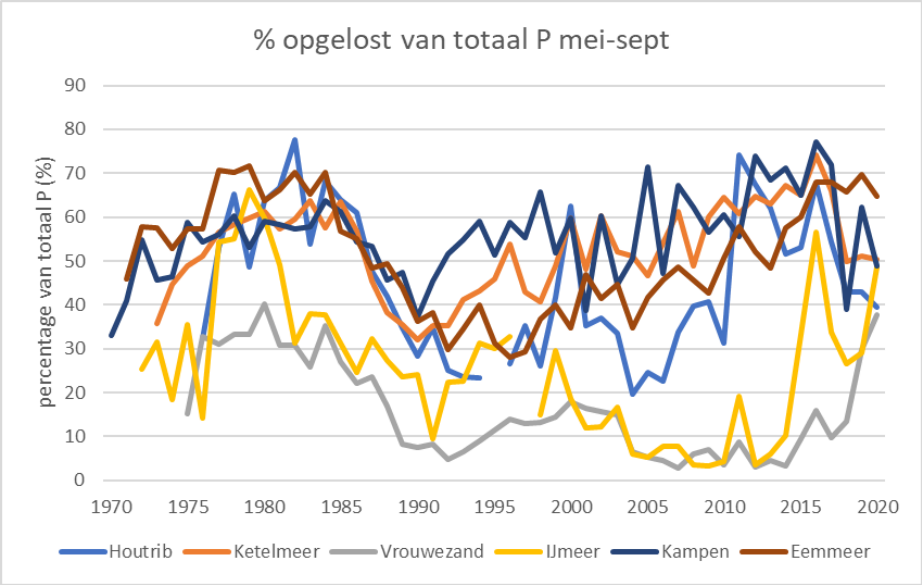
Het effect van filtratie komt ook terug in toename van het doorzicht in alle deelgebieden met veel mosselen, in het Eemmeer en IJmeer vooral vanaf 2010, in Hoornsche Hop en Gouwzee iets later. In het Midden en oosten van het Markermeer, waar weinig mosselen zitten, is nauwelijks toename van het zicht geweest. Natuurlijk hebben de planten ook iets bijgedragen (mogelijk na zelf te hebben geprofiteerd van de toename van mosselfiltratie).



Figuur 4.43. Verloop van het gemiddelde zomerdoorzicht in de zuidelijke randmeren en het Markermeer.

Het komt ook terug in een toename van het aandeel van de opgeloste fractie in totaal fosfaat in de mosselgebieden. Zowel door toename van planten als door filtratie van zwevend stof verdwijnt de gebonden fractie sterker uit de waterkolom dan opgelost fosfaat.

Dit gebeurt op twee van de belangrijkste aanvoerroutes naar het Markermeer; de route van de Eem naar het IJmeer en de route door de Houtribsluizen. In dit laatste geval heeft veel van de toegenomen filtratie echter al plaatsgevonden voor meetlocatie Houtrib, zodat het effect op de balans wellicht kleiner is.

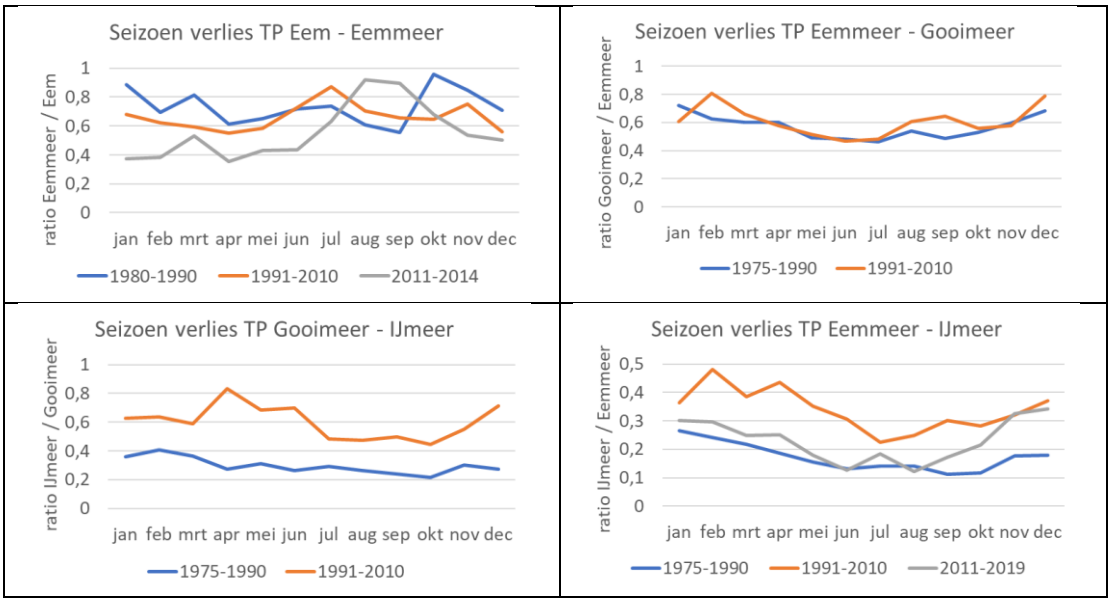


Figuur 4.44. Percentage opgelost fosfaat van totaal fosfaat in het Eemmeer en het IJmeer, vergeleken met andere wateren in het IJsselmeergebied.

Seizoenseffect van filtratie

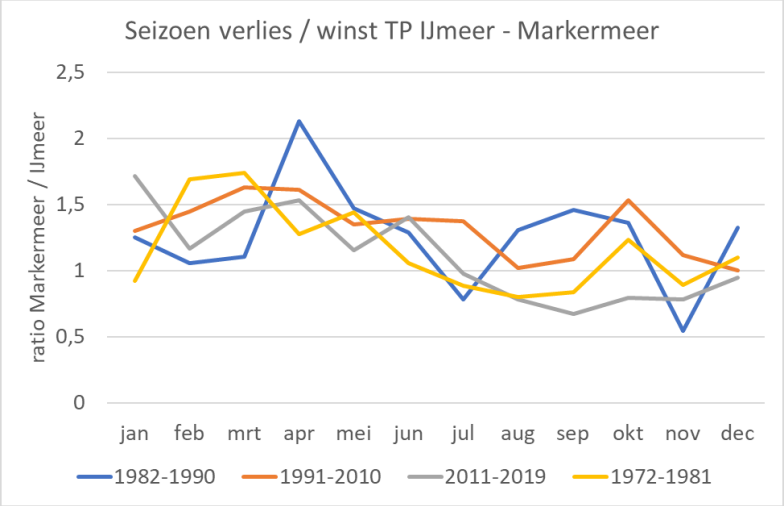
Omdat mosselen in de winter nauwelijks filteren, zou filtratie in de zwevend stof balans de grootste verliezen aan gebonden fosfaat moeten geven in het zomerhalfjaar. Dit geldt zeker voor de zuidelijke randmeren, waar in dat seizoen de verblijftijd aanzienlijk langer is.

Het verlies van TP tussen de Eem en het Eemmeer heeft geen duidelijk seizoensverloop (figuur 4.45). Het verlies tussen het Eemmeer en het Gooimeer en tussen Gooimeer en IJmeer is echter inderdaad het grootst in de nazomer, duidelijker over het hele traject. Het seizoensminimum is na 2010 versterkt en iets vervroegd (door opkomst van Quaggamossel?).



Figuur 4.45. Seizoenpatronen van het verlies van fosfaat op de route van Eem naar IJmeer. In het Gooimeer is na 2010 niet meer gemeten. Gemiddelden van de ratio's van de concentraties over de aangegeven twee meren per maand (bijv. rechtsboven: concentraties Gooimeer ongeveer 40-60% van die in het Eemmeer).

Tussen IJmeer Pampus en Markermeer Midden is gemiddeld sprake van toename. Die toename heeft vooral in het voorjaar plaatsgevonden (figuur 4.46). Mogelijk is dat een aanwijzing dat de aanvoer van fosfaat hier meer uit het noorden komt.



Figuur 4.46. Seizoenpatronen van het verlies of de winst van fosfaat tussen het IJmeer en het Markermeer.

4.2.3.5 Fosfaat opslag in mosselen

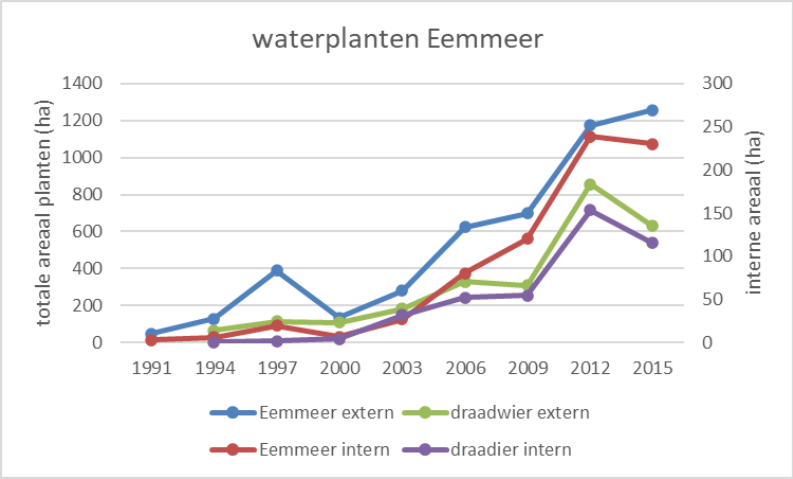
Omdat de mosselen vanaf 2000 een sterke, doorgaande toename hebben laten zien, is de toenemende opslag van fosfaat in de weefsels als een structurele verliespost te zien in de balans ten opzicht van de concentraties in de waterkolom. In 2013, het jaar met de hoogste dichtheden in de meetreeks, bedroeg het asvrij drooggewicht van de mosselen in het Eemmeer ongeveer 33 gram per m^2, in het Gooimeer 59 $g/^{m2}$ (Bouma et al. 2014). De hoeveelheid fosfaat in die mosselen bedroeg naar schatting enkele duizenden kilogrammen, ongeveer 9000 kg in Eem- en Gooimeer samen (6 g/kg P; Pennuto et al. 2012). Dat is ongeveer 7% van de belasting op het Markemeer vanuit de zuidelijke randmeren in de periode 2000-2013, dus ongeveer 0,5% verlies per jaar, beperkt tot die periode.

4.2.3.6 Waterplanten

Ook waterplanten nemen fosfaat op, in dit geval heeft dat effect op de opgeloste fractie. Daarnaast hebben waterplanten effect op de sedimentatiesnelheid van het zwevend stof, waardoor ook de gebonden fosfaatfractie in de waterkolom kan afnemen.
Waterplanten waren in het Eem- en Gooimeer aan het begin van de meetreeks (1987) beperkt tot een bescheiden bestand van Schedefonteinkruid. Juist rond het peiljaar 2006 was de vegetatie aan een sterke opmars bezig (figuur 4.47), met al een flinke presentie van met name Tenger Fonteinkruid en Zannichellia. Rond peiljaar 2016 (kartering 2015) was de hoeveelheid nog eens verveelvoudigd, en was ook kranswier present. Daarnaast was er een hoge abundantie van draadwier. Draadwier wortelt uiteindelijk niet meer in de bodem en neemt dan dus alleen uit het water voedingsstoffen op.

Ook in het IJmeer is sprake geweest van sterke toename van waterplanten, in dat geval met een veel groter aandeel van kranswieren.

De verspreiding van waterplanten over het Eem- en Gooimeer is nogal heterogeen, en verschillend per soort. Afhankelijk van de waterbewegingen in de meren wordt het Eemwater dus aan verschillende vegetatietypen blootgesteld. Met het stromingspatroon in figuur 4.33, als voorbeeld, zou het water een gemeenschap met veel Zannichellia tegenkomen. Dat zou betekenen dat de invloed van vegetatie een accent vroeg in het seizoen heeft; Zannichellia groeit vroeg en wordt in de loop van voorjaar en zomer door andere soorten vervangen.



Figuur 4.47. Verloop van het totale areaal en de dichtheid (interne areaal = totale areaal x bedekkingspercentage) van waterplanten in het Eemmeer, met het aandeel van draadwier.

4.2.4 Noordelijke route

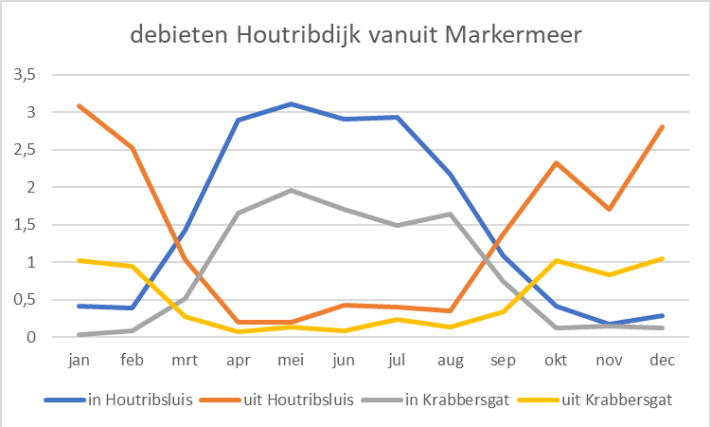
Via de Houtribdijk komt in de winter nauwelijks (water en dus) fosfaat naar het Markermeer, in de zomer is het echter de belangrijkste bron. Het meest water komt binnen in de maanden april t/m augustus, ongeveer twee derde via de Houtribsluizen en een derde via de Krabbersgatsluizen.

Het water dat via de Houtribsluizen binnenstroomt komt eerst door de zuidelijke kom en de ongeveer vijf kilometer lange Houtribbaai, die bij westenwind in de luwte van de bocht in de Houtribdijk voor Lelystad ligt. De waterkwaliteit wijkt hier af van die van Vrouwezand in het midden van het IJsselmeer en is in de loop der jaren sterker gaan afwijken. Op de Houtribhoek ligt een meetpunt waar sinds 1993 regulier waterkwaliteitsmetingen worden gedaan, in de jaren daarvoor hebben in de buurt andere meetpunten gelegen. Aan de IJsselmeerzijde bij de Krabbersgat sluizen ligt geen regulier meetpunt meer.

Het water dat dan wordt aangevoerd komt aan de Markermeerzijde geen belangrijke diepe putten of hoge dichtheden van mosselen of waterplanten meer tegen. Wel is hier mogelijk sprake van opname van fosfaat in bodemleven en vis. Verder is hier door de lange verblijftijd de interne oligotrofiëring relatief belangrijk.

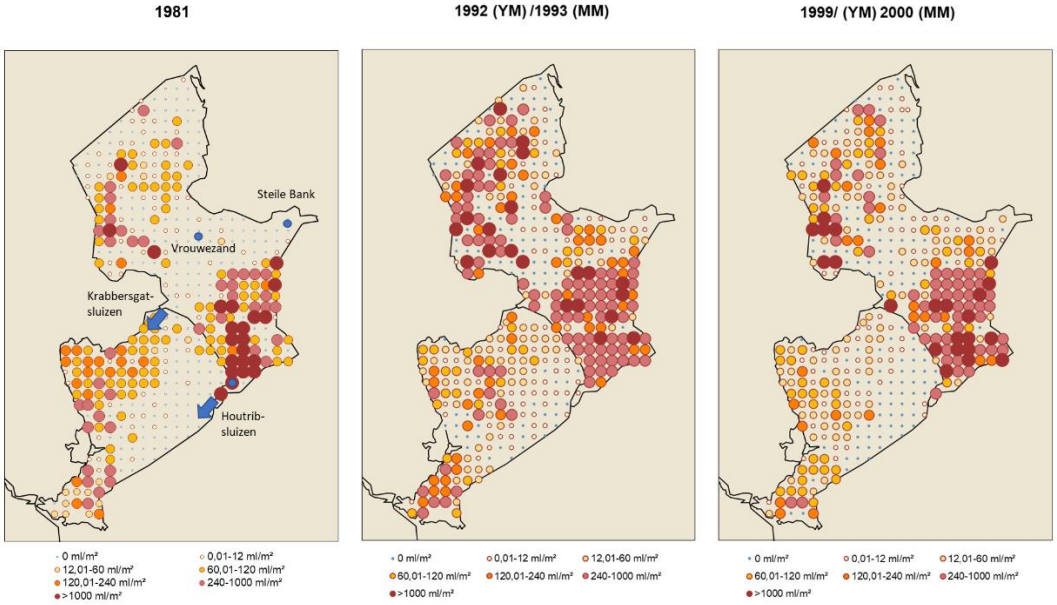
4.2.4.1 Mosselen Zuidelijk IJsselmeer

Ook onderweg van het IJsselmeer naar het Markermeer komt het water concentraties filterende mosselen tegen, met name in het zuidoosten, tussen de Houtribdijk en de dijk van Oostelijk Flevoland. Deze populatie filtert het meest actief in het zomerhalfjaar, wanneer het water (in tegenstelling tot ‘s winters) van IJsselmeer naar Markermeer stroomt door de Houtribsluizen (figuur 4.48).



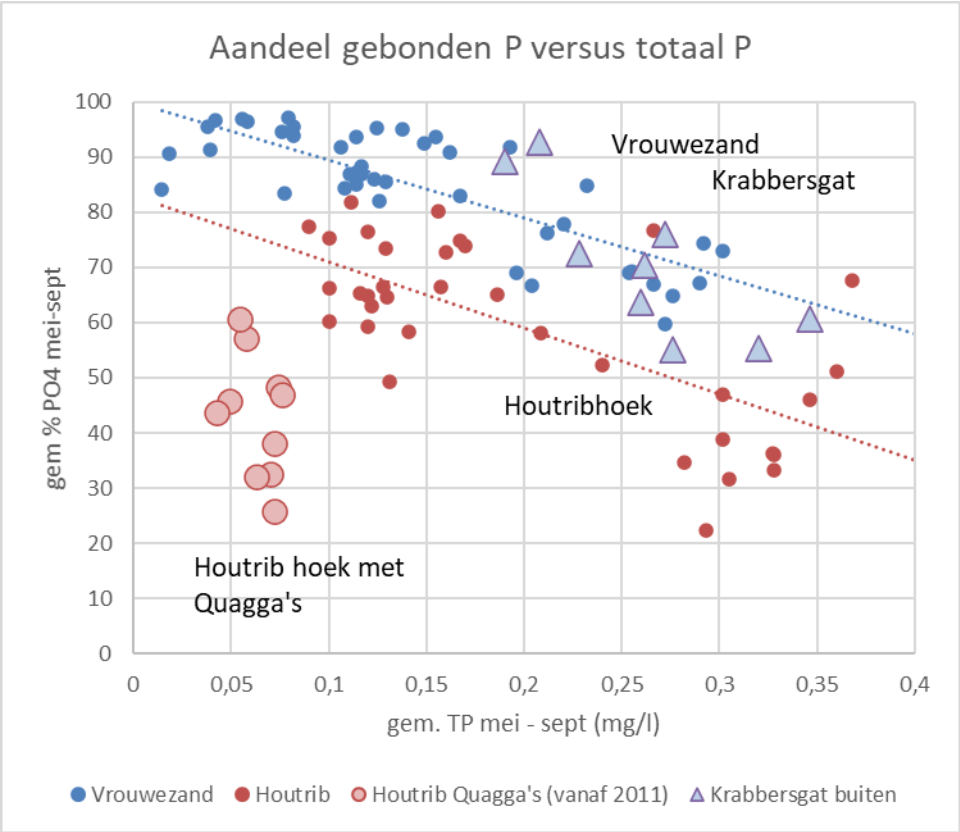
Figuur 4.48. Seizoensverloop van de spuidebieten in en uit het Markermeer via de Houtrib- en Krabbersgatsluizen.

In het zuidelijke deel van het IJsselmeer zijn de dichtheden van Driehoeksmosselen en Quaggamosselen altijd relatief hoog geweest. Ten opzichte van het hele meer herinnert deze concentratie aan de betekenis van het IJmeer voor het Markermeersysteem. De dichtheden in het zuidelijke IJsselmeer zijn echter twee keer zo hoog als die in het IJmeer, afgezien van een sterke tijdelijke afname vlak voor de opmars van de Quaggamossel (figuur 4.42), zij het bij grotere diepte. Op basis van oudere karteringen kan worden aangenomen dat dit naar het zuiden toe geldt tot en met de Houtribbaai. Door halvering van het meetgrid na de kartering van 1999 is het enige meetpunt dat hier lag echter vervallen, zodat de ontwikkelingen na de invasie door de Quaggamossel (vanaf 2007) hier strikt genomen onbekend zijn. In de rest van het zuidelijke IJsselmeer zijn de dichtheden van Dreissena mosselen na deze invasie sterk toegenomen. De zuidelijke deelpopulatie zet zich naar het westen toe voort tot vlak voor Enkhuizen, maar heeft hier waarschijnlijk minder invloed op het spuiwater. Aan de andere kant komen hier ook meer mosselen aan de Markermeerzijde voor.



Figuur 4.49. Verspreiding van Driehoeksmosselen op basis van de meer gedetailleerde, oudere karteringen.

Waarschijnlijk in interactie met filtratie bevat het water in het zuiden van het IJsselmeer minder zwevend stof, minder chlorofyl en minder gebonden fosfaat dan bij Vrouwezand, en is het doorzicht er gemiddeld hoger. Deze verschillen zijn rond 2010 versterkt, drie jaar na de eerste waarneming van de Quaggamossel in het IJsselmeer. Het doorzicht in het voorjaar nam toen (aanvankelijk) sterk toe en chlorofyl nam af, evenals de gebonden fractie van fosfaat. Sindsdien is zo'n 70% van het fosfaat hier opgelost.



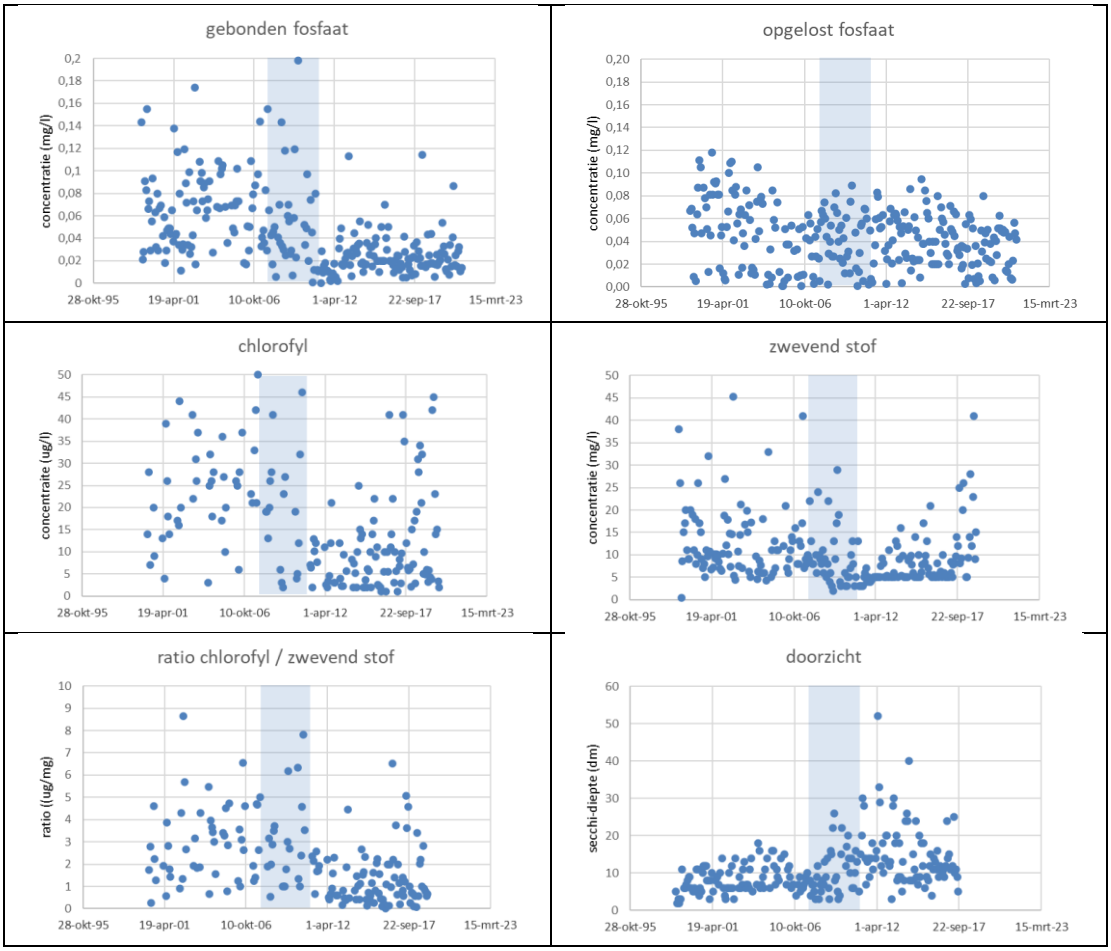
Figuur 4.50. Relatie tussen totaal fosfaat (x-as) en de grootte van de gebonden fractie (y-as). Deze fractie is (in de zomer) hoger geworden met de afname van totaal fosfaat, maar is in de het zuiden van het IJsselmeer bij de Houtribsluizen, waar veel mosselen voorkomen, toch weer lager. Na de mars van de Quaggamosselen is de fractie geabsorbeerd verder gedaald door filtratie van zwevend stof. Bij de Krabbersgatsluizen is de fractie vergelijkbaar met die van het midden van het meer, waar minder mosselen vooromen.

Met de afname van de concentraties totaal fosfaat in het IJsselmeer is de gebonden fractie toegenomen naar mate een toenemend aandeel van het opgeloste fosfaat door algen werd opgenomen. In de gebieden met veel mosselen wordt daarnaast een relatief groot deel van het zwevend stof, samen met de gebonden fosfaatfractie, weggefilterd. Daardoor is de gebonden fractie, los van de toename door de jaren heen, in het zuiden van het IJsselmeer kleiner dan in het midden van het meer bij Vrouwezand, waar veel minder mosselen voorkomen. Na de invasie van de Quaggamosselen werd die fractie in het zuiden nog aanzienlijk lager, in tegenstelling tot de fractie bij Vrouwezand.

Terwijl de gebonden fractie langs de zuidelijke route op deze manier in het IJmeer wordt weggefilterd, wordt die langs de noordelijke route al in het IJsselmeer weggefilterd, voordat het water met bijna alleen nog opgelost fosfaat het Markermeer in stroomt. Daar neemt de gebonden fractie snel weer toe door opname door lokale algen en binding van het opgeloste fosfaat aan opgewerveld, ijzerhoudend slib.

Hoewel bij de Krabbersgatsluizen aan de IJsselmeerzijde niet meer gemeten wordt, blijkt uit data uit de jaren 1970 dat de opgeloste fractie hier lager was dan bij de Houtribsluizen, vergelijkbaar met de fractie bij Vrouwezand. Dit lijkt in overeenstemming met de ligging van het voormalige meetpunt Krabbersgat buiten ten opzichte van de mosselconcentraties. Hier wordt de gebonden fractie dus niet verwijderd voordat het water het Markermeer in stroomt. In tegenstelling tot het oosten komen hier ook aan de Markermeerzijde beperkte dichtheden van mosselen voor.

Na de komst van de Quaggamossel neemt de concentratie van gebonden P in het zuidelijke IJsselmeer af, het opgeloste P niet. De afname is ook zichtbaar bij zwevend stof, maar is nog sterker bij chlorofyl, en de ratio chlorofyl / zwevend stof neemt daardoor ook af. Het doorzicht neemt toe. De totale hoeveelheid fosfaat die naar het Markermeer stroomt neemt af, en minder dan de helft is gebonden aan algen en ander zwevend materiaal. Het fosfaat daarentegen dat via de Krabbersgatsluizen naar het Markermeer stroomt, is waarschijnlijk voor 90% gebonden.



Figuur 4.51.Veranderingen in waterkwaliteitsparameters in het zuidelijke IJsselmeer (Houtribhoek) rond de invasie van de Quaggamossel . Deze is voor het eerst verschenen in 2007 en werd binnen drie jaar dominant (blauwe balk = periode van toename 2007-2011; zie figuur 4.42). Gegevens www.waterinfo.nl.

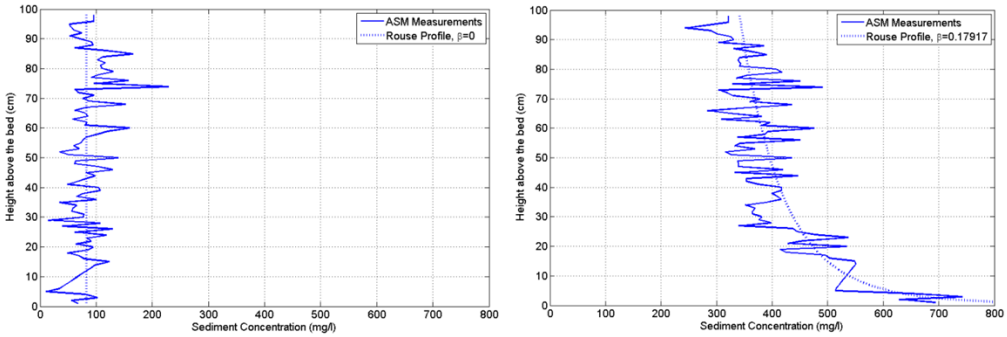
4.2.5 In het Markermeer

4.2.5.1 Proefputten en andere sedimentatiegebieden Markermeer

Midden in het Markermeer liggen twee proefputten uit 1984, aangelegd voor onderzoek naar de invloed van talud hellingen e.d. Deze putten zijn elk iets minder dan een km^2, veel kleiner dan de Gooi- en IJmeerputten, maar de sedimentatiesnelheid was vele malen hoger (tot 2 m per jaar). Ook deze putten hebben dus als verliespost van fosfaat bijgedragen over een aantal jaren. Het zelfde geldt voor de oude geulen bij de Krabbersgatsluizen, voor twee luwtegebieden achter de bocht in de dijk bij de Houtribsluizen en in mindere mate in enkele gebiedjes voor de Oostvaardersdijk (zie figuur 4.34). De sedimentatiegebieden bij de Houtribsluizen, en vooral die in de oude geulen bij de Krabbersgatsluizen zijn omvangrijk.

4.2.5.2 Invloed van stormen

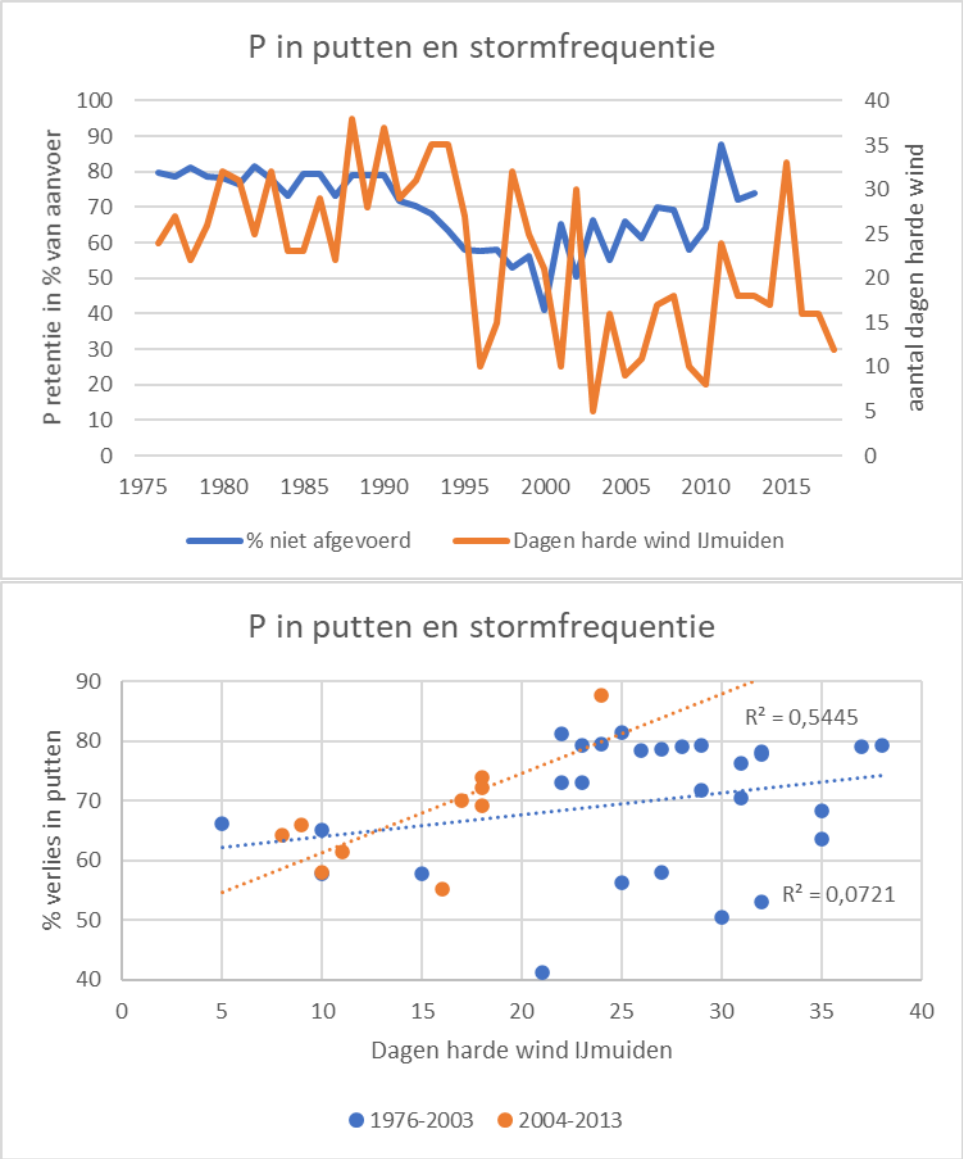
Sedimentatie in putten is het sterkst na storm. Daarbij wordt niet alleen de oxische toplaag van het Markermeer sediment opgewerveld, maar ook de anoxische laag daar onder (De Lucas Pardo 2014). Bij storm wordt daardoor de concentratie zwevend stof in de gehele waterkolom sterk verhoogd. Na transport kan dit materiaal na de storm in putten sedimenteren vanuit de waterkolom. Vlak boven de bodem zijn de concentraties tijdens de storm echter nog hoger (figuur 4.52). Dit dik-vloeibare materiaal kan dan ook via “dichtheidsstroming” over de bodem in putten terecht komen. Vijverberg (2008) berekent voor zo’n dichtheidsstroming met materiaal met een concentratie van een gram per liter een verplaatsingssnelheid van 2 cm per seconde, en schat dat tot 20% van de sedimentatie in putten via dit mechanisme kan verlopen.



Figuur 4.52. Verhoging zwevend stof bij storm. Slibconcentratie in de onderste meter van de waterkolom in het midden van het Markermeer (hoogte boven de bodem in cm op de y-as, concentratie zwevend stof op de x-as). Links tijdens rustig weer, rechts tijdens een storm. Uit Vijverberg 2008.

De frequentie waarmee storm of harde wind optreedt, heeft invloed op de consolidatie en de windgevoeligheid van het sediment. De resuspensie en sedimentatie kan daardoor sterker veranderen dan de stormfrequentie zelf.

Er is een zekere (positieve) correlatie tussen de stormfrequentie per winter en de gemiddelde hoeveelheid zwevend stof die bij een vaste windsnelheid in het water aanwezig is. Als het vaker stormt wervelt het sediment (daarna) dus makkelijker op. Het is daarom mogelijk dat de afname van de retentie in de jaren 1990 te maken heeft gehad met een afname van de stormfrequentie (figuur 4.53). Deze relatie is aanvankelijk niet heel sterk, maar sinds de veranderingen in waterkwaliteit rond 2004 lijkt de relatie sterker. Dit vraagt nog om nadere uitwerking.



Figuur 4.53. Het percentage fosfaat dat niet is afgevoerd per jaar (zie figuur 4.17) en het aantal dagen harde wind of storm, uitgezet als lijngrafiek (boven) en als scatterplot in twee perioden (onder).

4.2.5.3 Benthos aan Markermeerzijde

Er zijn geen metingen of schattingen van de productie van de benthische gemeenschappen in het Markermeer, wel van de biomassa. Vier categorieën van benthos zijn daarvoor relevant:

Driehoeks- en Quaggamosselen
Mosselen zijn vooral te vinden in het westen van het Markermeer (voor IJmeer zie zuidelijke route). Ook hier zijn de dichtheden toegenomen na de komst van de Quaggamossel, maar de absolute waarden zijn aanzienlijk lager dan in het IJmeer of de zuidelijke randmeren.

Overige bodemfauna
Naast mosselen komen nog allerlei andere ongewervelden in en op de bodem voor, zoals wormen en insectenlarven (vedermuggen). Gegevens zijn vooral beschikbaar van een integrale kartering in het najaar van 2016 (Van Riel et al. 2018). Er is nagenoeg niets bekend over de veranderingen in de loop der jaren.

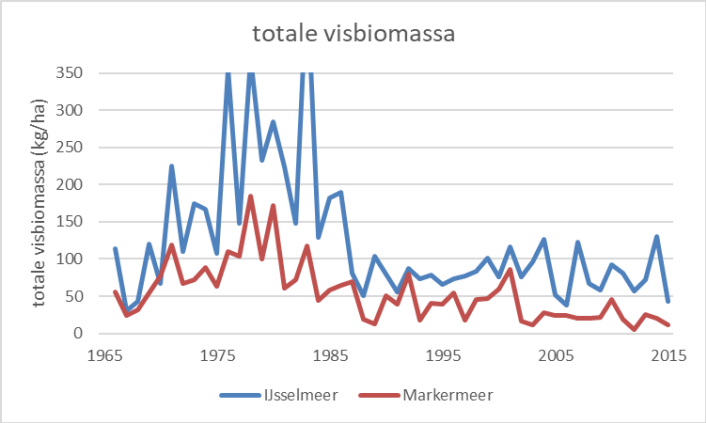
Bodemalgen
Naast fauna is ook benthische flora aanwezig, in de vorm van een groot aantal algensoorten en bacteriën. De algen hebben licht nodig en kunnen in een groot deel van het Markermeer dus niet permanent op de bodem leven. In feite is het fytoplankton in de waterkolom grotendeels te beschouwen als een benthische gemeenschap die afhankelijk is van continue resuspensie. Een groot deel van deze algen komt voor in aggregaten of vlokken (De Lucas Pardo 2014; Brinkmann et al. 2018; CIV bijdrage in De Rijk & Löffler in prep.). Ten tijde van het eerste peiljaar, rond 1980, was dit minder belangrijk, en kwamen veel vrije blauwalgen voor die bloeien vormden (*Aphanizomenon, Microcystis, Oscillatoria*). In de jaren 1990 is de soortsamenstelling veranderd en is vlokvorming belangrijker geworden (Noordhuis et al. 2014). Met verdere afname van de fosfaatconcentraties is het overgebleven fosfaat in de waterkolom grotendeels opgesloten in deze vlokken. Als de wind afneemt, verdwijnen het fosfaat dus met deze vlokken naar de bodem.

Bacteriën.
Bacteriën zijn ook primaire producenten, maar die leggen koolstof vast door middel van chemosynthese. Deze organismen kunnen dus zonder licht wel permanent op de bodem leven. Uit onderzoek door de UvA en onderzoek voor KIMA en Levend Markermeer blijkt dat op de bodem van het Markermeer hoge dichtheden voorkomen van draadvormige zwavelbacteriën (Noordhuis 2019, De Rijk & Löffler in prep.). Deze bacteriën vormen matten op de bodem. De bacteriedraden van de belangrijkste soort, *Thioploca*, zijn gevat in eiwitschedes. Daardoor kan de biomassa hoog oplopen en in delen van het Markermeer worden biomassa's van 200 gram versgewicht per m^2 bereikt. Dit is dezelfde orde van grootte als de schattingen voor mosselen en de overige bodemfauna (Verdonschot et al. 2021).

4.2.5.4 Vis

Vis heeft op meerdere manieren effect op de fosfaathuishouding. Een daarvan is opslag in biomassa, een andere effect via resuspensie van sediment door bodemwoeling, bijvoorbeeld door op benthos foeragerende Brasem.

De biomassa van vis in het Markermeer is in de loop der jaren afgenomen, hoewel niet zo sterk als in het IJsselmeer (figuur 4.54). De berekeningen van WMR geven voor het Markermeer na 2000 een biomassa van minder dan 25 kg/ha. Mogelijk is dat een (forse) onderschatting.

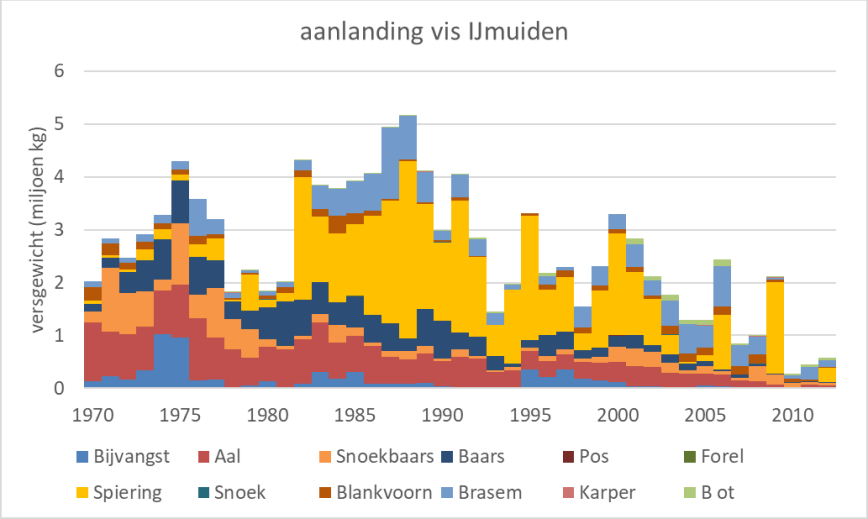


Figuur 4.54. Verloop van de totale biomassa van vis in het IJsselmeer en Markermeer volgens WMR (voor 1989 niet gestandaardiseerd en minder betrouwbaar). De gegevens van voor 1989 waren niet in dezelfde mate gestandaardiseerd als de latere gegevens.

Nog sterker dan de totale visbiomassa is de hoeveelheid Brasem in het Markermeer sterk afgenomen. De grote, bodemwoelende Brasem is sinds 2006 nagenoeg afwezig.

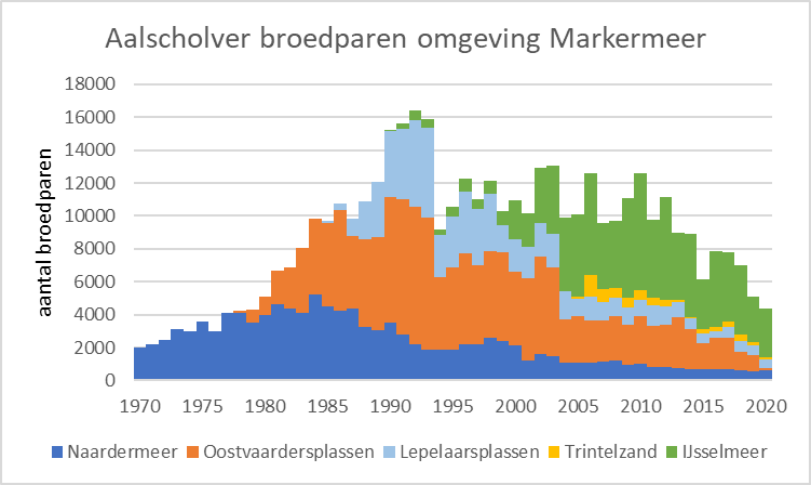
Onttrekking van fosfaat via visserij

Terwijl opslag van fosfaat in biota voor de balans in principe eenmalig van betekenis is, wordt via visserij structureel een percentage van die opslag weer afgevoerd. Gegevens van aanlanding in IJmuiden (figuur 4.55) laten zien dat vanuit het IJsselmeer en Markermeer in de toptijd 5 miljoen kg vis per jaar werd aangevoerd. Of de vis uit het IJsselmeer of het Markermeer afkomstig is, is niet onderscheiden. Net als de fosfaatbelasting is de hoeveelheid aangevoerde vis nogal afgenomen vanaf ongeveer 1990. Fosfaatafvoer via vis bedroeg in die periode op basis van een fosfaatconcentratie van 4g per kg vis (vers) en een verdeling over de meren op basis van oppervlak (Markermeer is ca 40%) ongeveer 5 miljoen kg vis per jaar, wat overeen komt met ongeveer 8 ton P/jaar, ongeveer 1% van de toenmalige totale fosfaataanvoer. (zie UvA balans figuur 4.16 en 4/17 met 2-3 mg/m2/d rond 1990). In de jaren daarna zijn zowel de aanlanding van vis als de fosfaataanvoer gedaald, en met ongeveer dezelfde factor, zodat het aandeel van 1% ongeveer gehandhaafd bleef (figuur 4.56).

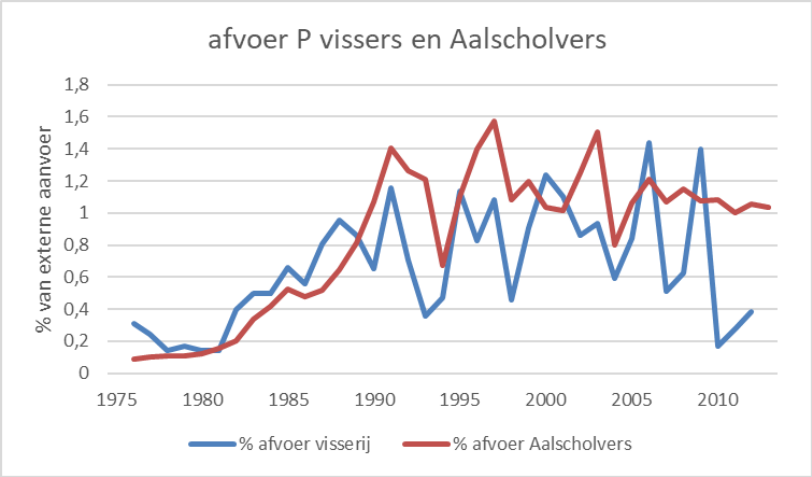


Figuur 4.55. Aanlanding van vis uit het IJsselmeer en Markermeer op de afslag van IJmuiden in kg per jaar. Gegevens WMR.

Een soortgelijke berekening kan worden gemaakt op basis van schattingen van onttrekking door visetende vogels. Daarbij gaat het om fosfaat dat uit het gebied verdwijnt, bijvoorbeeld naar kolonies buiten het Markermeer (Oostvaarders- en Lepelaarplassen, Naardermeer). Viseters scheiden veel meer fosfaat uit dan macrofauna- of planteneters. Een Aalscholverpaar voert per broedseizoen in potentie 300-500 gram fosfaat af (Hahn et al. 2007, 2008). In de toptijd, rond begin jaren 1990, met bijna 16000 paar Aalscholvers in de genoemde kolonies (figuur 4.56), was dat maximaal 8000 kg fosfaat per jaar als alle vogels in het Markermeer zouden foerageren. Dat is vergelijkbaar wat destijds door vissers per jaar in IJmuiden werd aangeland (figuur 4.57). Een deel van de vis die in deze kolonies werd aangevoerd kwam echter uit andere wateren. In recentere jaren zijn meer kolonies van viseters in het Markermeer zelf ontstaan, waardoor ook fosfaat door vogels wordt aangevoerd. Ook Smienten en ganzen die binnendijks foerageren en op buitendijks slapen voeren fosfaat aan, al is dat aanzienlijk minder per kg lichaamsgewicht dan bij viseters (Noordhuis et al 2021). Afvoer van vis door vogels, maar ook door vissers, is dus geen serieuze verliespost voor fosfaat. De rol van beide in de fosfaatbalans is na toename in de jaren 1980 min of meer constant sinds 1990, doordat niet alleen de fosfaatbelasting maar ook de aanlanding van vis en het aantal Aalscholvers is gedecimeerd.



Figuur 4.56. Verloop van de omvang van de aalscholverkolonies in en rond het Markermeer. De broedparen in het Markermeer (De Ven, De Kreupel) zijn niet meegenomen in de berekeningen van fosfaatavoer. Gegevens *www.sovon.nl*.



Figuur 4.57. Afvoer van fosfaat via aanlanding van vis door vissers en maximum afvoer via vis door Aalscholvers, als percentage van de totale externe aanvoer van fosfaat naar het Markermeer op basis van de UvA balans. De aanlanding is verrekend met het oppervlakte aandeel van het Markermeer op de combinatie Markermeer-IJsselmeer. De afvoer door Aalscholver is overschat doordat gerekend is met het maximum van de geschatte range voor uitscheiding van fosfaat per broedpaar, en met de aanname dat alle vogels in het Markermeer hadden gefoerageerd en alle vis hebben afgevoerd.

4.2.6 Eindbalans 1990-2001

In deze studie is de situatie over de jaren 1990-2001 geanalyseerd op basis van de bodemhoogte verschilkaarten. Dergelijke kaarten waren nog niet beschikbaar voor de periode daarna. De aangegeven periode is daarom gebruikt om te onderzoeken of opslag in putten een serieuze verliespost van fosfaat is. Enkele aanvullingen voor recentere jaren zijn te vinden in paragraaf 4.2.7.

In tabel 4.1 is een samenvatting gegeven waarin de belangrijkste opslagposten van fosfaat zijn weergegeven, inclusief een schatting ten opzichte van de totale aanvoer, voor de periode 1990-2001. Figuur 4.58 laat de betekenis van de sedimentatiegebieden onderling zien.

Voor de gebieden in de kom van het Markermeer zijn berekeningen uitgevoerd met de lagere gemiddelde fosfaatconcentraties ter plaatse (0,56 g/kg bij Lelystad over 1995-2000, zelfde periode als de waarde uit het Eemmeer). De gebruikte dichtheid van het sediment in de putten is ook iets lager, ontleend aan Boderie et al. 2010 (200 kg/m^3). De sedimentatie bij de Houtrib- en Krabbersgatsluizen is op basis van de verschilkaart (figuur 4.38) gesteld op 5 cm (grens van de schaalverdeling), op de helft daarvan bij Lelystad en op de veel hogere, maar binnen de in Boderie et al. 2010 aangegeven snelheid matige snelheden van 20 en 50 cm per jaar.

De som daarvan komt uit op 49,5 tot 60%, afhankelijk van de gekozen sedimentatiesnelheid in de proefputten. Dat komt opvallend dicht bij de berekende gemiddelde waarde van 61,9% van de externe belasting die jaarlijks in het systeem achterbleef. Bijna twee derde van de aanvoer zou dan dus zijn gesedimenteerd zijn in een klein aantal gebieden die samen ongeveer 5% van het oppervlak van het waterlichaam besloegen. Over deze periode is de balans van afvoerposten ten opzichte van de totale aanvoer van fosfaat per jaar zo vrijwel sluitend bij een sedimentatiesnelheid van 50 cm per jaar in de Markermeerputten.

Daarbij moet echter enkele belangrijke kanttekeningen worden gemaakt:

1 De sedimentatiegebieden bij de Houtribdijk zijn geen putten. De diepte van de toplaag is dus beperkt, waardoor gesedimenteerd materiaal bij storm of harde wind relatief gemakkelijk weer in suspensie komt. In de putten kan die situatie uiteindelijk ook weer ontstaan, naar mate deze zich vullen tot een diepte waarbij weer resusensie op kan treden.

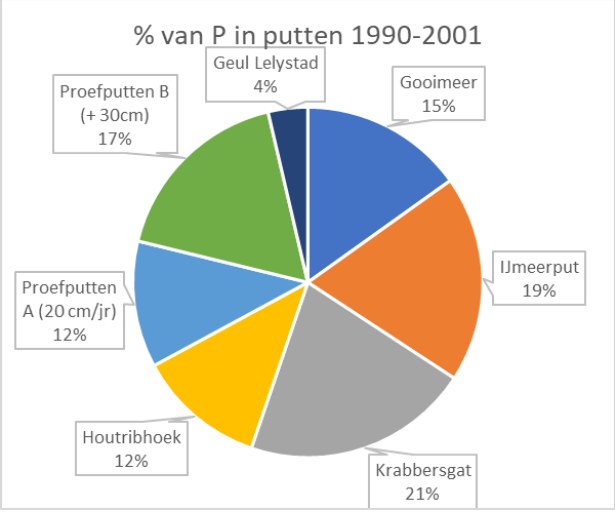
2 Als in de putten temparatuurstratifcatie optreedt die zuurstofloosheid tot gevolg heeft, kan de nalevering van fosfaat lokaal sterk toenemen. Binnen het hypolimion ontstaat dan een nieuw evenwicht tussen water en bodem. Aan het eind van de stratificatie periode wordt dit water met verhoogde concentraties opgelost fosfaat dan eenmalig vermengd met het overige meerwater. Vervolgens kan dit materiaal echter opnieuw mee sedimenteren, waardoor de netto sedimentatie weer toeneemt / minder afneemt.

3 De vergelijking met de totale aanvoer gaat uit van sedimentatie van materiaal dat eerder al veelvuldig in suspensie is geweest en via interne oligotrofiering fosfaat uit de waterkolom heeft opgepikt. In feite is een deel van dit fosfaat niet van externe aanvoer afkomstig, maar uit de Holocene ondergrond van het Markermeer, die van nature ook fosfaat bevat die via erosie in circulatie komt. Dit deel moet van het fosfaat in sedimentatie worden afgetrokken voordat een vergelijking met de externe belasting wordt gemaakt. Op dit moment is echter niet bekend wat de fosfaatconcentraties in de Holocene ondergrond zijn.

Wel is duidelijk dat de fosfaatconcentraties in zwevend stof hoger zijn dan in het sediment buiten de putten, ook al wordt deze vracht bij de hoogste windsnelheden verdund door toevoeging van geresuspendeerd sediment. Ook is gebleken dat de fosfaatconcentraties in sediment in de putten en geulen rond Marker Wadden beduidend hoger zijn dan in de directe omgeving buiten de putten. Een voorzichtige schatting van opslag in deze putten alleen, op basis van dit verschil in concentratie, komt uit op enkele tientallen procenten van de huidige externe fosfaatbelasting.

Tabel 4.1. Berekening van verliesposten van fosfaat via sedimentatie in putten en andere sedimentatie op basis van de verschilkaart bodemhoogtes over 1990-2001 (zie figuur 4.38).

	Gooimeer	IJmeerput	Krabbersgat	Houtribhoek	Proefputten**	Proefputten**	Geul Lelystad
ha	420*	530*	1150	650	160	160	400
Sedimentatie							
cm/jaar	5	5	5	5	20	50	2,5
m3/jaar	210000	265000	575000	325000	320000	800000	100000
kg/m3	240	240	200	200	200	200	200
kg/jaar	50400000	63600000	115000000	65000000	64000000	160000000	20000000
Fosfaatopslag							
P g/kg	0,92	0,92	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
kg P/jaar	46368	58512	64400	36400	35840	89600	11200
% belasting	9,1	11,5	12,6	7,1	7,0	17,5	2,2
Totaal % P belasting per jaar, periode 1990-2001							**49,5 - 60,0**
*alleen delen >10 meter							
**twee alternatieven							



Figuur 4.58. Verdeling van opslagposten van fosfaat in putten en andere sedimentatiegebieden in het Markermeer-IJmeer, gemiddeld over de periode 1990-2001.

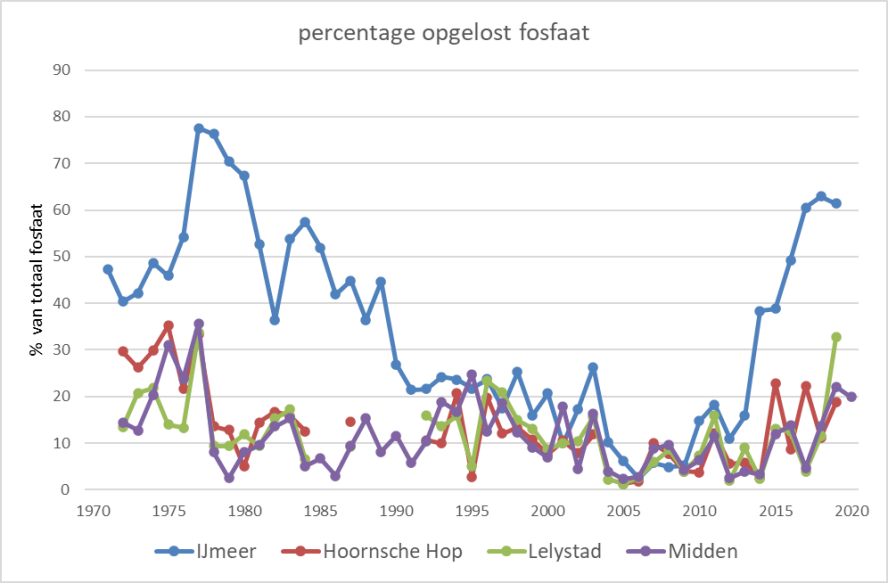
4.2.7 Recente ontwikkelingen

Na de periode van de verschilkaarten zijn nog eens twee decennia voorbij gegaan waarin verschillende veranderingen effecten op de fosfaatbalans hebben gehad. Zo is de externe belasting verder gedaald en zijn nieuwe putten gegraven. Enkele veranderingen worden hieronder besproken.

4.2.7.1 Verloop van retentie na 2000

Na 2000 is de externe fosfaatbelasting verder gedaald met ongeveer een derde, grotendeels binnen enkele jaren rond 2004 (figuur 4.16). Ongeveer 45% daarvan komt door afname van de aanvoer uit het IJsselmeer, 40% door die vanuit de Eem. Rond 2004 nam het aandeel van de opgeloste fractie van totaal fosfaat in de waterkolom sterk af (figuur 4.59). In figuur 4.17 is te zien dat het percentage fosfaat dat in het Markermeer achterblijft na 2000 weer toenam. Vanaf 2004 tot en met 2013, het einde van de UvA balansreeks, was bijna alle P in de waterkolom gebonden aan zwevend stof. Veel algen komen dan voor in aggregaten met anorganisch materiaal. Daardoor moet ook het fosfaat nog gevoeliger zijn geworden voor transport en sedimentatie.

Na 2013 nam het aandeel opgelost fosfaat weer toe, het meest in het IJmeer (figuur 4.59). Om te zien of dit een weerslag heeft gehad op de fosfaatbalans, moet de UvA balans met recente data worden aangevuld. Dat is in het kader van deze studie voor fosfaat nog niet gebeurd. Wel is in ander verband de waterbalans aangevuld t/m 2019 (van Duin ongepubliceerd). Daarin zijn na 2013 geen grote veranderingen te zien. Daarbij moet ook in aanmerking worden genomen dat weliswaar het aandeel opgelost fosfaat weer toeneemt, maar op een hoeveelheid totaal fosfaat die veel lager is dan in de jaren 1980. De huidige concentraties opgelost fosfaat zijn nog steeds veel lager dan omstreeks 1980, zeker in het IJmeer.



Figuur 4.59. Verloop van het jaargemiddelde percentage opgelost fosfaat van totaal fosfaat in het IJmeer en op drie locaties in het Markermeer.

4.2.7.2 Nieuwe putten en geulen Marker Wadden

Aan de andere kant zijn in combinatie met de aanleg van Marker Wadden vanaf mei 2016 een geul en enkele putten gegraven om slib te vangen, met als doel om dit met andere materialen te gebruiken om de eilanden aan te leggen. Hierin sedimenteert 40 cm (slibgeul) tot 80 cm (putten) slib per jaar. In totaal wordt d.d. 2021 ongeveer 200 kton slib per jaar gevangen (T. van Kessel, in De Rijk & Löffler in prep.). Dat is veel ten opzichte van het totaal van 378-474 kton die in deze studie is berekend voor de periode 1990-2001. Mogelijk komt dat door de voorzichtige schatting van ophogingssnelheden die in deze studie voor enkele sedimentatiegebieden in gebruikt. Bij een concentratie van 0,4 g/kg P (verschil tussen concentraties binnen en buiten de slibgeul) zou 80 ton P per jaar worden opgeslagen. Dat is een derde of meer van de huidige totale aanvoer naar het Markermeer. Waarschijnlijk gaat dit echter via terugkoppelingsmechanismen gepaard met een vermindering van vastleggen of zelfs het stimuleren van erosie elders in het Markermeer.

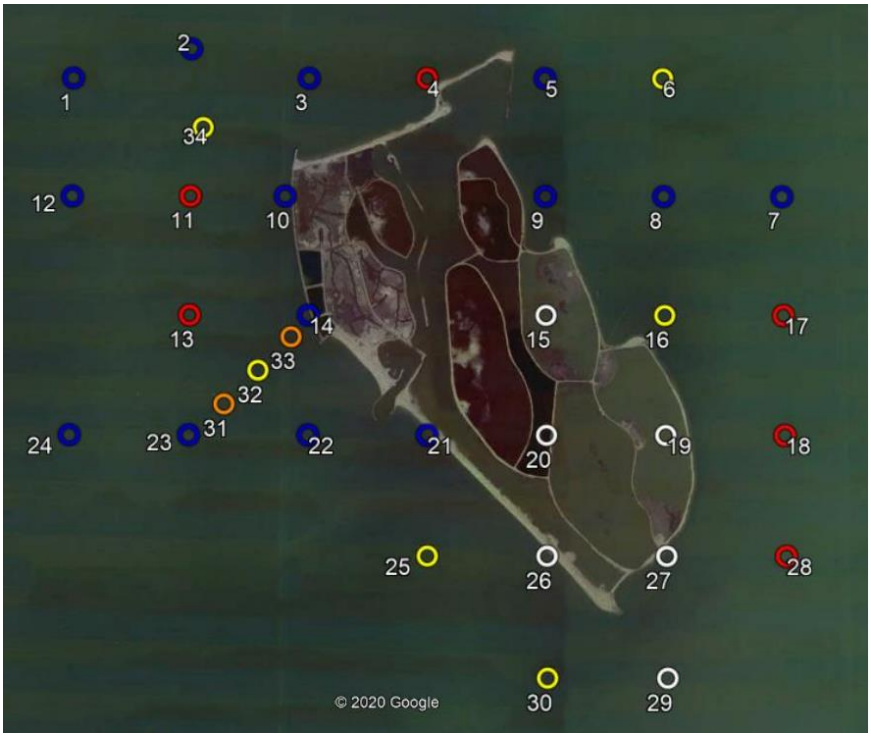
In het kader van KIMA zijn metingen uitgevoerd van fosfaatconcentraties in het sediment rond Marker Wadden. De concentraties van een nulmeting van voor de start van de aanleg (Roskam 2016; figuur 4.24) zijn vergelijkbaar met de concentraties op de MWTL locaties Lelystad, Markermeer Midden en Marker Wadden over de jaren 2018-2021. Deze metingen zijn weergegeven in figuur 4.23.

Metingen in 2019 en 2020 laten zien dat in nieuw sediment rond Marker Wadden, in het bijzonder in de speciaal aangelegde slibvanggeul, tot ongeveer twee keer zo hoge fosfaatconcentraties bevat. In 2015, voor de start van de aanleg van Marker Wadden, waren de waarden op alle locaties vergelijkbaar met de waarden buiten de geul in 2019 en 2020.

Tabel 4.2. Fosfaatconcentraties in sediment (% van droge stof) rond Marker Wadden in 2015, 2019 en 2020. De locatienummers zijn te vinden in figuur 4.60. De fosfaatbepalingen zijn uitgevoerd met X-ray fluorescentie (XRF); de uitkomsten zijn onderling vergelijkbaar maar niet met de getallen in figuur 4,23 en 4.24. Uit resp. Roskam 2016, 2019 en 2020.

**Op locatie 17 is het sediment fijner dan elders en vergelijkbaar met het sediment in de slibgeul (Roskam 2020).*

Locatie	2015	2019	2020
2	0,09		
4		0,08	0,11
8	0,09		
11		0,08	0,11
13	0,08		0,07
17*		0,16	0,15
18		0,09	0,10
19	0,10		
24	0,09		
26	0,11		
28		0,09	0,10
29	0,11	0,10	
Dun slib		0,17	
zandwinput		0,18	
Slibgeul (33)			0,19



Figuur 4.60. Locaties van sedimentbemonsteringen rond Marker Wadden. Uit Roskam 2020.

5 Conclusies en discussie

Op basis van de water- en fosfaatbalans van de UvA (Van der Geest et al. 2017) kan worden berekend dat tussen 1976 en 2013 ongeveer drie keer zoveel fosfaat naar het Markermeersysteem (inclusief IJmeer en zuidelijke Randmeren) werd aangevoerd dan dat er werd afgevoerd. Het “balanstekort” bedroeg aanvankelijk ca 75%, nam af tot ca 50% tussen 1990 en 2000 en nam daarna weer toe tot ca 75% in 2013.

Differentiatie balans in ruimte en tijd
Modelonderzoek met tracers geeft aan dat het water in het systeem volledig gemengd wordt, maar dat dit veel tijd vergt (maanden). Er is een groot verschil in ruimtelijk transport tussen zomer en winter. In de winter is het debiet van de Eem relatief groot en de afvoer via de Oranjesluizen klein. Door de Houtrib- en Krabbersgatsluizen wordt water afgevoerd naar het IJsselmeer, zodat er in dit seizoen een overwegend noordwaartse waterbeweging is. In de zomer wordt water binnengelaten uit het IJsselmeer, is het debiet van de Eem laag en de afvoer via de Oranjesluizen relatief groot. In dit seizoen is er dus een overwegend zuidwaartse waterbeweging en er komt netto niet of nauwelijks water uit het zuiden naar het Markermeer s.s.

Verlies van fosfaat onderweg
Door de trage menging is er veel tijd voor interne processen die invloed kunnen hebben op fosfaattransport. Onderweg wordt fosfaat opgenomen in o.a. mosselen en opgelost fosfaat verdwijnt na binnenkomst grotendeels uit de waterkolom, waarschijnlijk door binding aan ijzer in door de wind opgewerveld sediment (“interne oligotrofiering”). Op deze manier is het fosfaat gevoeliger voor transport en sedimentatie.

Vooral op de route vanuit het zuiden liggen enkele zeer grote en diepe zandwinputten. Voorzichtige berekeningen over de periode 1990-2001 suggereren dat hier met sedimenterend slib jaarlijks een hoeveelheid fosfaat werd opgeslagen die overeenkwam met 20% van de totale externe belasting. Een vergelijkbare of grotere hoeveelheid zou kunnen zijn opgeslagen in sedimentatiegebieden in de kom van het Markermeer.

Aanvullende afvoerposten
Een afvoerpost van fosfaat die niet in de balans is opgenomen is vis. Vis die door visserij aan het systeem wordt onttrokken en vis die door vogels naar binnendijkse kolonies wordt afgevoerd, bevat een hoeveelheid fosfaat die overeenkomt met ongeveer 2% van de totale externe belasting. Opslag in biota en lokale consumptie is eenmalig dan wel circulair, en heeft geen structureel effect op de balans.

De conclusie is dus dat alleen opslag in sedimentatiegebieden zoals diepe putten een plausibele verklaring is voor het grote balanstekort tussen aanvoer en afvoer van fosfaat in het Markermeersysteem.

Kanttekeningen bij de berekeningen
Een deel van het fosfaat dat in de putten en sedimentatiegebieden wordt opgeslagen is afkomstig van erosie van de Holocene ondergrond, die van nature ook fosfaat bevat. Erosie van deze kleilagen is de bron van het slib (en mogelijk ook van ijzer) dat bij wind in de waterkolom aanwezig is en dat vooral in het midden en het oosten van het Markermeer op de bodem ligt. Dit materiaal wordt geregeld gesuspendeerd en bindt daarbij extra fosfaat uit de waterkolom, dat wel een externe herkomst heeft. De fosfaatconcentratie in sediment die in de berekeningen is gebruikt, vertegenwoordigt dus een combinatie van extern intern fosfaat.

Voor het bepalen van het percentage van de externe belasting dat in sedimentatiegebieden wordt opgeslagen is de interne bron niet relevant. Het verschil in fosfaat concentratie tussen de Holocene klei en het gehersedimenteerde slib is op dit moment echter onbekend.

Wel is duidelijk geworden dat de concentratie fosfaat in zwevend stof hoger is dan die in het sediment, en pas bij de hoogste windsnelheden de concentraties in sediment nadert. Ook is gebleken dat de fosfaatconcentratie in vers sediment in de putten en geulen rond Marker Wadden tot twee keer zo hoog is als in het sediment daar buiten, of in het sediment ter plaatse voor de start van de aanleg. Verrekening van dit verschil met de sedimentatiesnelheid in deze putten en geulen suggereert eveneens een forse verliespost van fosfaat ten opzichte van de huidige externe belasting.

Voor toepassing van kennis op detailniveau is ook kennis over het gedrag van slib en sediment belangrijk. Metingen van accumulatie van sediment op de bodem van een put hebben niet alleen betrekking op sedimentatie vanuit de waterkolom en consolidatie. Ook dichtheidsstroming over de bodem van het meer speelt een rol (Vijverberg 2008; figuur 4.52), evenals afkalving van taluds en “zettingsvloeiing”, bewegingen van nog niet geconsolideerd sediment in de onderin de putten (Boderie et al. 2010).

6 Aanbevelingen

6.1 Heroverweging aanleg putten

In samenhang met bevestiging van de gepresenteerde berekeningen over sedimentatie van fosfaat in putten door middel van specifieke metingen wordt aanbevolen om dit aspect mee te wegen bij beslissingen over de aanleg van nieuwe putten en luwtegebieden. Dit is aan de orde bij natuurontwikkelingsprojecten, vooral als die gepaard gaan met de aanleg van putten en geulen, zoals bij Marker Wadden. Het is ook aan de orde bij beoordeling van ecologische effecten ten behoeve van het zandwinbeleid.

6.2 Metingen in sedimentatiegebieden

Gezien het grote belang van zandwinputten en enkele andere sedimentatiegebieden lijkt het van grote waarde om metingen van fosfaatconcentraties te gaan meten in dieptegradienten in het sediment op deze plaatsen. Voor vergelijking en berekeningen is het daarnaast van belang ook in niet verdiepte sedimentatiegebieden in open water en in de nog niet geërodeerde Holocene afzettingen te meten. Als deze metingen worden gecombineerd met dichtheidsmetingen kan een veel nauwkeuriger berekening worden gemaakt van de hoeveelheid fosfaat die hier inmiddels ligt opgeslagen. Ook metingen van andere stoffen zijn zinvol, met name organisch stof, dat mogelijk eveneens in grote hoeveelheden in putten wordt opgeslagen (ervaringen Marker Wadden).

6.3 Hervatten metingen in sediment

In combinatie met deze metingen is het zinvol de monitoring van fosfaat in sediment die in het verleden in het kader van MWTL plaatsvond (eens per jaar in het Markermeer bij Lelystad) te hervatten.

6.4 Metingen en modellering van stratificatie

In aanvulling op metingen in sediment is het aan te raden gegevens over stratificatie (temperatuur, zuurstof) uit te voeren in een aantal diepere delen van de meren met verschillen in ligging, expositie, diepte en grootte, en in verschillende meren. Recente gegevens van die aard zijn nauwelijks aanwezig. Na validatie met deze gegevens kunnen de huidige modellen worden gebruikt om scenario’s van vormgeving en ligging van putten worden doorgerekend om onder meer de relatie tussen stratificatie en opslag te onderzoeken, en om grip te krijgen op mitigatie mogelijkheden van ongewenste effecten.

6.5 Aanvulling van de UvA balans

Omdat de MWTL waterkwaliteitsgegevens suggereren dat de nutriëntbalans na 2013 weer veranderd is (toenemende concentraties van de opgeloste fracties) is het zinvol de UvA water- en fosfaatbalans aan te vullen voor recente jaren. Alleen op die manier kan worden bepaald of daarmee de gevoeligheid van het aangevoerde fosfaat voor sedimentatie in putten inderdaad weer wat kleiner is geworden.

7 Referenties

Beckers L. & F. Dirksen 1989. Achtergronddocument ten behoeve van milieu effect rapportage zandwinning IJsselmeergebied. RWS RIZA, rapport 89.103X, Lelystad.

Boderie P.M.A., M. van der Wal, T. van Kessel & M. Genseberger 2010. Aanslibgedrag vaargeul Amsterdam-Lelystad. Deltares rapport 1202714, Delft.

Bouma S., J.H. Bergsma, P.B. Broeckx & W. Lengkeek 2014. Tweekleppigen in de Randmeren. Bemonstering 2013. Bureau Waardenburg bv, rapport 13-236, Culemborg.

Brinkmann B.W., J.A. Vonk, S.A.M. van Beuskom, M. Ibanez, M.A. de Lucas Pardo, R. Noordhuis, E.M.M. Manders, J.M.H. Verspagen & H.G. van der Geest 2018. Benthic hotspots in the pelagic zone: Light and phosphate availability alter aggregates of microalgae and suspended particles in a shallow turbid lake. Limnology and Oceanography, https://doi.org/10.1002/lno.11062.

De Lucas Pardo M.A. 2014. Effect of biota on fine sediment transport processes. A study of Lake Markermeer. Proefschrift T.U. Delft.

De Rijk S. & M. Löffler (red.) in prep. (2022). Syntheserapport KIMA. De eerste vijf jaar onderzoek op Marker Wadden. Deltares, WMR, WEnR, Witteveen+Bos & Arcadis, Utrecht.

Hahn S., S. Bauer & M. Klaassen 2007. Estimating the contribution of carnivorous waterbirds to nutrient loading in freshwater habitats. Freshwater Biology 52: 2421-2433.

Hahn S., S. Bauer & M. Klaassen 2008. Quantification of allochthonous input into freshwater bodies by herbivorous waterbirds. Freshwater Biology 53: 181-193.

Hin J.A, L.A. Osté & C.A. Schmidt 2010. Handreiking Beoordelen Waterbodems. Methoden ter bepaling van de mate waarin het realiseren van kwaliteitsdoelen van een watersysteem wordt belemmerd door verontreinigde waterbodems. Min. I&M – DG Water, Den Haag.

Noordhuis R. 2019. Survey zwavel bacteriën Markermeer 2019. Deltares, notitie 11204657-002-ZWS-0001, Utrecht.

Noordhuis R., S. Groot, M. Dionisio Pires & M. Maarse 2014 Wetenschappelijk eindadvies ANT-IJsselmeergebied. Vijf jaar studie naar kansen voor het ecosysteem van het IJsselmeer, Markermeer en IJmeer met het oog op de Natura-2000 doelen. Deltares, rapport 1207767-000, Utrecht.

Noordhuis R. & G. Roskam 2017. De rol van nalevering bij overschrijdingen van de KRW normen in de Zuidelijke Randmeren. Deltares, rapport 11200041-000, Utrecht.

Noordhuis R., V. Harezlak, P. Boderie & M. Genseberber 2018. Waterbeheer en ecologische draagkracht in het Markermeer-IJmeer. Een eerste verkenning aan de hand van hydrologie en nutriënten. Presentatie in opdracht van RWS, met bijdragen van M. Ouboter (UvA/Waternet) en J. Veraart (WEnR).

Noordhuis R., M. van Roomen, E. van Winden & N. van Duijnhoven 2021. De rol van vogelmest in de nutriëntbalans van oppervlaktewateren. Deltares rapport 11205268-003, Utrecht.

Pennuto C.M., E.T. Howell, T.W. Lewis & J.C. Makarewicz 2012. Dreissena population status in nearshore Lake Ontario. Journal of Great Lakes Research 38: 161-170.

Roskam G. 2016. Resultaten 0-monitoring slibbodem Marker Wadden. Deltares, notitie 1230048-001-GEO-0001, Utrecht.

Van der Geest H.G., J.A. Vonk & M.R.L. Ouboter 2017. Reconstructie water- en stoffenbalans Markermeer 1976-2015. Eindrapportage. Universiteit van Amsterdam en Waternet.

Van der Kamp M., R.J. Brederveld, E.E. van Deelen & M. Verhofstad 2020. Waterplantenoverlast Gooi- en Eemmeer. Ecologische systeemanalyse en aanbevelingen voor optimalisatie van het waterplantenbeheer. Witteveen+Bos BV, rapport 117343/20-014.728, Deventer.

Van Leeuwen B. 2005. Quick scan slibproblematiek Markermeer en Eem- en Gooimeer. Witteveen + Bos Rw1390-1, Deventer.

Van Riel M.C., P.F.M. Verdonschot & D.D. 2018. Dekkers Markermeer bodemfaunakartering 2016 en MWTL-analyse MWTL data. Notitie Zoetwaterecosystemen, Wageningen Environmental Research, Wageningen UR, Wageningen.

Verdonschot P.F.M., M.C. van Riel & R.C.M. Verdonschot 2021. Gezond bodemleven als sleutel voor een robuust Markermeer. Landschap 2021/1: 15-23.

Vijverberg T. 2008. Mud dynamics in the Markermeer, silt traps as a mitigation measure for turbidity, Msc thesis, May 2008 TU Delft.

Bijlage A

A.1 Koolstof

Aan koolstof is in de studie van het IJsselmeergebied nog weinig aandacht besteed. Het organisch stof gehalte in het sediment en zwevend stof is relatief hoog, maar is in de periode 2000-2015 (in het zwevend stof) aanzienlijk lager geweest. Net als in de rivier is de fractie opgelost koolstof in de waterkolom zeer sterk afgenomen. Onderzoek van de UvA suggereert dat er slechts weinig koolstof uit de oeverzones in het voedselweb van het open water terecht komt.

De vraag rijst daarom, of terugkeer naar een natuurlijke aanvoer van fosfaat en stikstof bij gebrek aan (peil)dynamiek in land-water overgangen wel kan leiden tot de gewenste natuurwaarden en tot een productief, veerkrachtig en duurzaam ecologisch systeem.

Koolstof komt in de meren voor in de vorm van organisch en anorganische verbindingen, beide in de praktijk verdeeld in een opgeloste en een particulaire fractie, gescheiden door het vermogen of onvermogen om een filter te passeren.

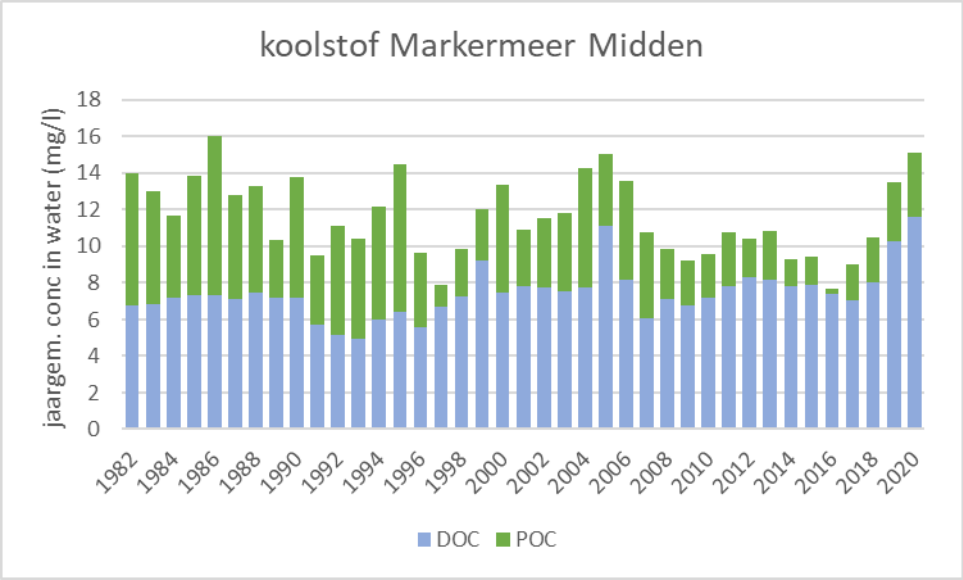
Paritculair anorganisch koolstof (PIC) bestaat vooral uit carbonaten, zoals kalkdeeltjes. Opgelost anorganisch koolstof (DIC) bestaat uit opgelost carbonaat, bicarbonaat en koolzuur.

Ook organisch koolstof kan worden aangevoerd in opgeloste vorm (DOC) of in particulaire vorm (POC), maar anders dan bij fosfaat kunnen organische koolstofverbindingen ook lokaal worden gevormd uit anorganisch koolstof, met name via opname van opgelost atmosferisch kooldioxide. Organisch stof in het Markermeer is dus deels “allochtoon” en deels “autochtoon”.

A.1.1 Organisch koolstof in het Markermeer

De gemiddelde concentratie organisch koolstof in het water van het Markermeer bedraagt sinds 1982 11,7 mg/l. Dat is een waarde die past bij een eutroof meer en is vergelijkbaar met de concentraties in Lake Peipsi. De waarden zijn wel aanzienlijk hoger dan in het IJsselmeer, waar ze variëren van 5,3 mg/l in het zuiden tot 7,4 mg/l in het midden van het meer (MWTL data 2010-2018). Recente gegevens in het Markermeer laten weinig ruimtelijke variatie zien, al is de concentratie van de gebonden fractie (POC) iets lager in de Hoornsche Hop en die van de opgeloste fractie (DOC) iets hoger aan de oostzijde van de Marker Wadden. De gemiddelde jaarconcentratie in het midden van het meer is sinds 1982 licht afgenomen. Dat geldt relatief sterk voor de gebonden fractie, waarvan het aandeel is gedaald van bijna 50 tot ongeveer 20%, mede door een licht stijgende tendens van de concentratie opgelost koolstof (figuur A1).

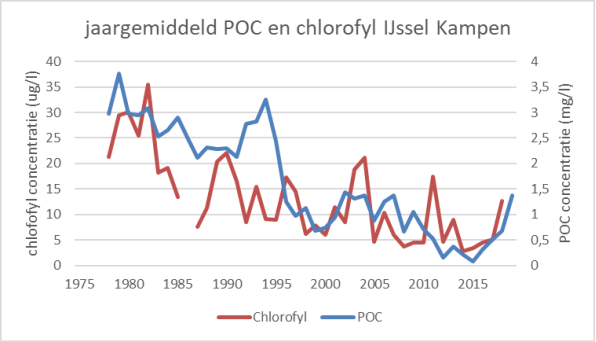
Op basis van de MWTL data lijkt er vanaf 2018 een toename te zijn van beide parameters, die ook op de meeste andere locaties zichtbaar is.

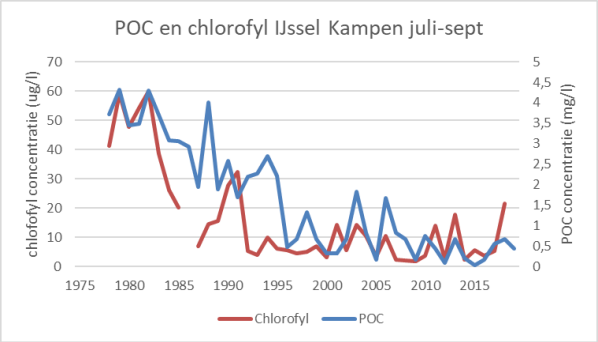


Figuur A1. Verloop van de jaargemiddelde concentraties opgelost koolstof (DOC) en gebonden koolstof (POC = totaal – opgelost koolstof) op locatie Markermeer Midden. Gegevens www.waterinfo.nl.

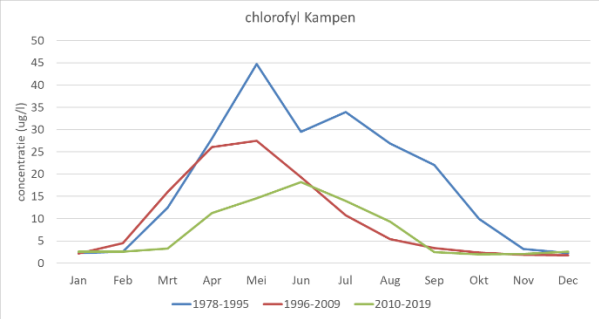
A.1.2 Aanvoer vanuit de rivier

De hoeveelheid koolstof in de rivier is in de loop der jaren sterk afgenomen (figuur A2). Dat komt net als in het Markermeer vooral door een afname van gebonden koolstof, die weer samenhangt met de afname van chlorofyl (algen). Door die afname is het aandeel gebonden koolstof in de IJssel bij Kampen gedaald van meer dan 40% in de jaren 1980 naar 12,5% in de laatste tien jaar Zowel bij chlorofyl als bij POC is de afname aanvankelijk het sterkst geweest in de tweede helft van de zomer, doordat het groeiseizoen van het fytoplankton in de jaren 1990 is verkort.



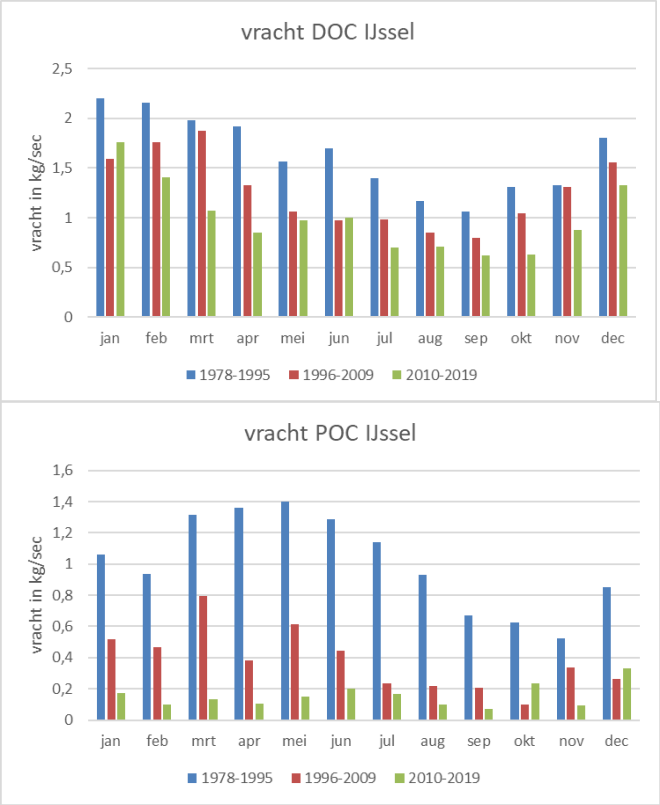


Figuur A2. Afname van gebonden koolstof en chlorofyl in de IJssel bij Kampen. Boven jaargemiddelden, onder in de tweede helft van het jaar.



Figuur A3. Veranderingen in het seizoenspatroon van chlorofyl in de IJssel bij Kampen. De afname was aanvankelijk het sterkst in de nazomer, later in het voorjaar.

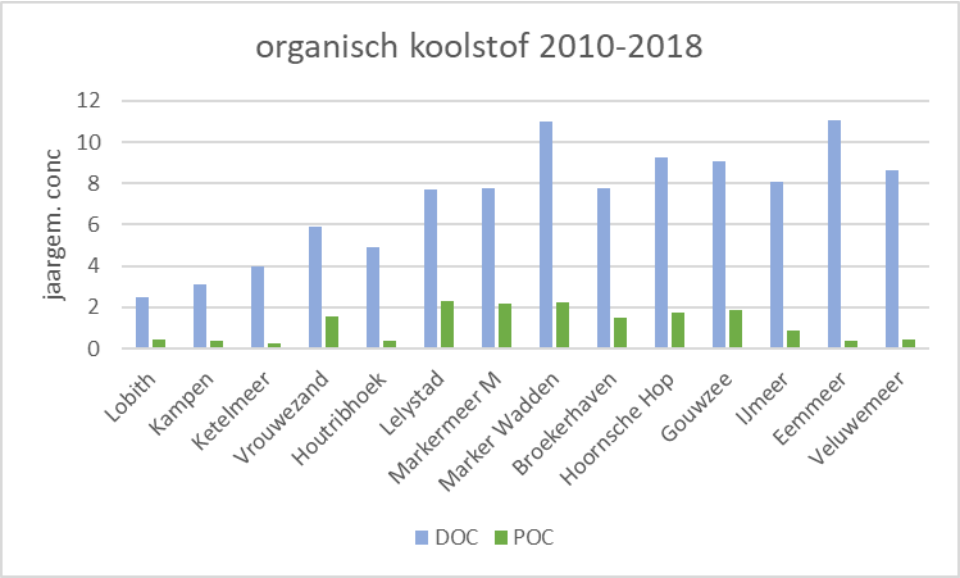
De relatie tussen chlorofyl en POC heeft een sterk seizoensverloop; in de winter is er in de rivieren nauwelijks levend fytoplankton, maar wel POC. De rol van afname van fytoplankton blijkt uit een minder sterke afname van POC in de winter, zodanig dat de concentraties tegenwoordig in de winter hoger zijn dan in de zomer. Dat geldt ook voor het DOC. In combinatie met de hogere afvoer in de wintermaanden wordt dus in toenemende mate een groot deel van het organisch koolstof in de winter naar de meren aangevoerd, vooral in opgeloste vorm. Er is dan echter weinig of geen spui van het IJsselmeer naar het Markermeer.



Figuur A4. Veranderingen in vrachten van organisch stof per maand in de IJssel (concentratie Kampen x debiet IJsselkop). Boven opgelost organisch koolstof, onder gebonden koolstof (totaal – opgelost). Gegevens www.waterinfo.nl.

A.1.3 Veranderingen in het IJsselmeer

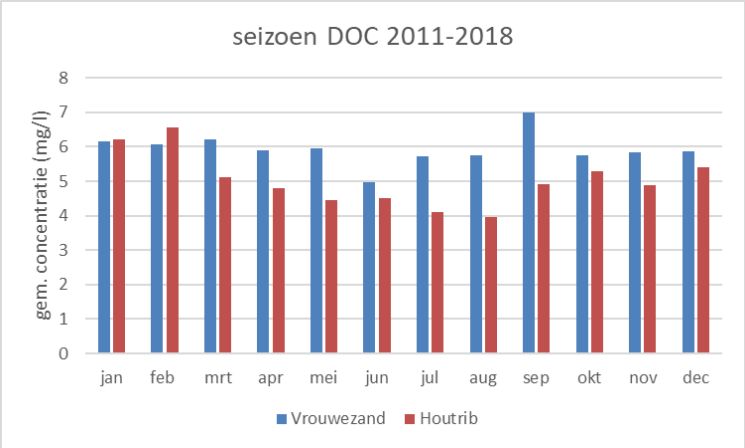
Op de route Rijn-IJssel-Ketelmeer-IJsselmeer is van het Ketelmeer naar het midden van het IJsselmeer een sterke toename van opgelost koolstof en van het Ketelmeer naar het IJsselmeer ook van gebonden koolstof zichtbaar (figuur A5). Dat geeft aan dat een groot deel daarvan lokaal is gevormd, zoals bij meren gebruikelijk is. Naar het zuiden toe, bij meetpunt Houtribhoek, neemt echter alleen de opgeloste fractie toe.



Figuur A5. Jaargemiddelde concentraties organisch koolstof op een reeks locaties van Rijn en IJssel naar het IJsselmeergebied.

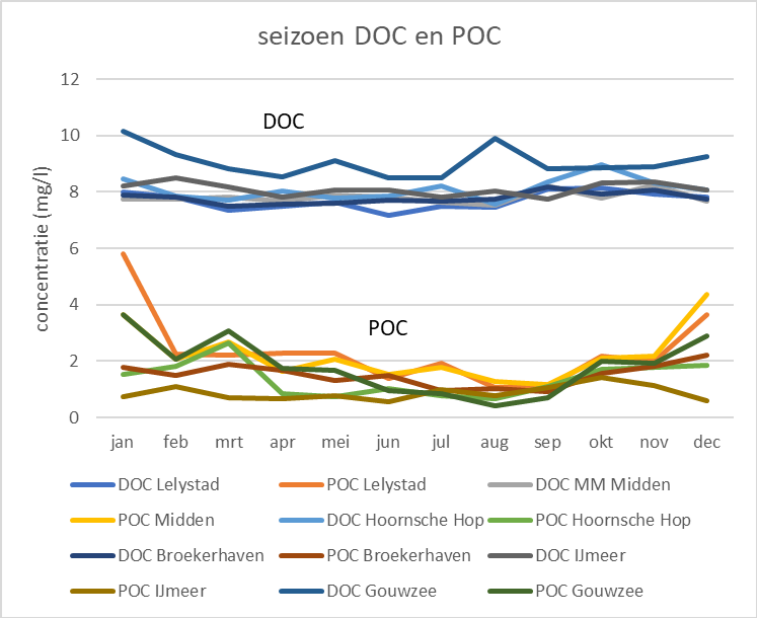
In het zuidelijke IJsselmeer komen, vooral sinds de invasie van de Quaggamossel, hoge mosseldichtheden voor, waardoor zwevend stof relatief sterk wordt weggefilterd (zie par. 4.2.4). Sinds de Quaggamosselen rond 2010 hoge dichtheden hebben, is zwevend stof, chlorofyl en gebonden fosfaat verder afgenomen. Omdat organisch koolstof hier pas vanaf 2010 is gemeten, is het effect op deze parameters niet goed in beeld te brengen, maar op basis van de overige parameters is het aannemelijk dat de gebonden fractie rond die tijd is gedaald.

Als via de Houtribsluizen water naar het Markermeer wordt gespuid, wordt dus maar weinig gebonden koolstof aangevoerd. De concentratie op alle punten in het Markermeer, ook die bij Lelystad in de buurt van de sluizen aan Markermeerzijde, is bij de opgeloste fractie hoger, bij de gebonden fractie veel hoger dan bij de Houtribhoek. De concentraties DOC zijn aan de IJsselmeerzijde nog eens relatief laag als in de zomer naar het Markermer wordt gespuid (figuur A6). Aan Markermeerzijde is dus waarschijnlijk het leeuwendeel van het koolstof lokaal vastgelegd (autochtoon). POC wordt via de Houtribsluizen nagenoeg niet aangevoerd. Waarschijnlijk wel (in beperkte hoeveelheid door lagere spuidebieten) via de Krabbersgatsluizen.



Figuur A6. Gemiddeld seizoensverloop van opgelost organisch koolstof in het IJsselmeer op locaties Vrouwezand en Houtribhoek.

In de mosselgebieden is geen sprake van een duidelijk seizoenspatroon in POC concentraties. In het Markermeer is dat er wel. Hier zijn de concentraties het hoogst in de winter. Dat patroon herinnert aan het “omgekeerde” seizoenspatroon van chlorofyl in het Markermeer, waarvan de concentraties in de winter ook hoger zijn dan in de zomer. Bij DOC is dat niet het geval, wel is hier vaak een lichte verhoging te zien in het najaar, net als in het IJsselmeer bij Vrouwezand. In de Hoornsche Hop is die verhoging relatief sterk. Ook bij POC is consequent een piekje in oktober te zien, dat wellicht afbraak van plantenmateriaal aan het eind van het groeiseizoen vertegenwoordigd (figuur A7).



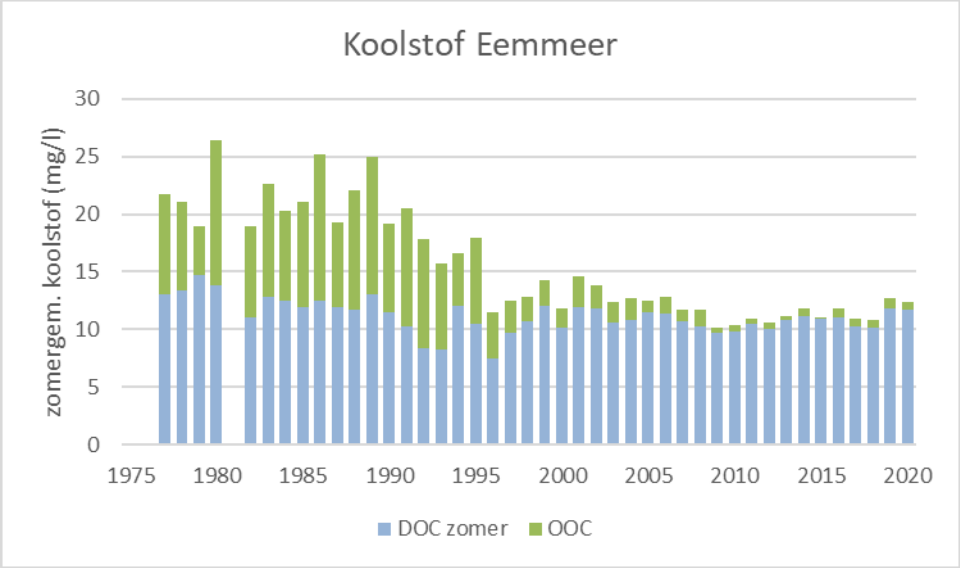
Figuur A7. Gemiddeld seizoensverloop van opgelost organisch koolstof (DOC) en gebonden organisch koolstof (POC = totaal – opgelost) over de periode 2010-2020 op de verschillende MWTL meetlocaties in het Markermeer-IJmeer. Gegevens www.waterinfo.nl.

A.1.4 Blocq van Kuffeler

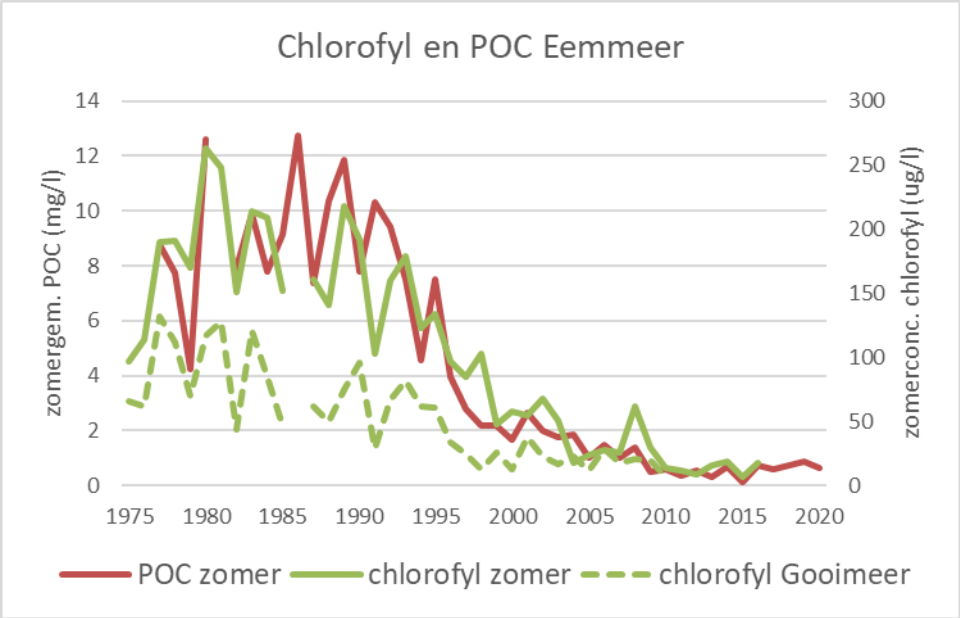
Water dat via de Blocq van Kuffeler wordt gespuid vanuit de Hoge en Lage Vaart heeft een koolstofgehalte van resp ca 10 en 15 mg/l, vergelijkbaar met de concentraties in het Markermeer, in de Lage Vaart iets hoger. In de winter is deze aanvoer relevant, in de zomer verwaarloosbaar (zie seizoenspatroon wateraanvoer, figuur 4.3). Uit de stromingsmodellering blijkt echter dat het meegevoerde materiaal zich vanuit deze locatie slecht verspreidt.

A.1.5 Koolstof vanuit het zuiden

In het Eemmeer is de concentratie gebonden organisch koolstof nog sterker gedaald dan in de IJssel of het Markermeer. In het zelfde patroon als chlorofyl is het sinds 1990 met een factor 10 gedaald, het aandeel op totaal organisch koolstof daalde van 40 naar ongeveer 5%.

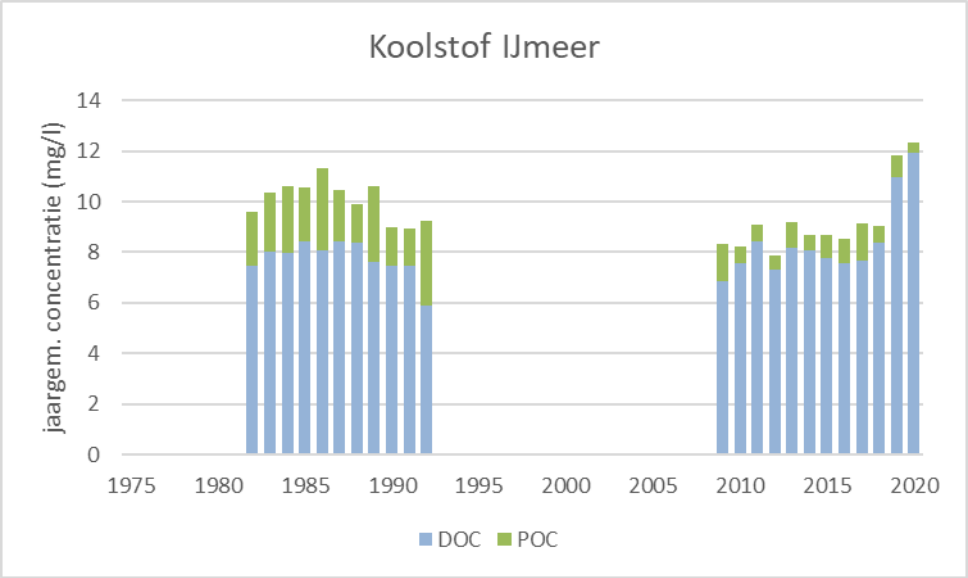


Figuur A8. Verloop van zomerhalfjaar gemiddelde concentraties opgelost en gebonden organisch koolstof in het Eemmeer.



Figuur A9. Vergelijking van het verloop van gebonden organisch koolstof met dat van chlorofyl in het Eemmeer en met het verloop van chlorofyl in het Gooimeer (gemeten t/m 2010).

In het Gooimeer was de chlorofylconcentratie (net als fosfaat) in de jaren 1980 de helft lager, in het IJmeer nog lager. In het IJmeer was de concentratie gebonden organisch koolstof in die periode een factor drie lager dan in het Eemmeer. Ook in het IJmeer is die concentratie sindsdien afgenomen (figuur A10), maar aanzienlijk minder sterk. Zo veel minder dat de concentratie nu bijna dubbel zo hoog is als die in het Eemmeer, wellicht door lokale productie.



Figuur A10. Verloop van zomerhalfjaar gemiddelde concentraties opgelost en gebonden organisch koolstof in het IJmeer (geen waarden tussen 1992 en 2009).

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl