

## Memo

**Aan**

mevrouw F. van Luijn / de heer A. Remmelzwaal

**Datum**

20 november 2020

**Ons kenmerk**

11203697-033-BGS-0001

**Aantal pagina's**

1 van 18

**Contactpersoon**

Tineke Troost

**Doorkiesnummer**

+31(0)88 335 8281

**E-mail**

Tineke.Troost@deltares.nl

**Onderwerp**

Primaire productie berekeningen Markermeer

## 1 Inleiding

Dit document is gemaakt in opdracht van WVL (Albert Remmelzwaal en Francien van Luijn) voor de Werkgemeenschap Levend Markermeer. Het doel is om te verkennen hoe de primaire productie in het watersysteem van het Markermeer door de tijd is veranderd onder de invloed van een veranderende nutriënten-toevoer. De resultaten kunnen dienen als input voor het voedselwebmodel van het Markermeer (De Haan et al., 2019). Onderliggende verkenning is uitgevoerd d.m.v. modellering.

In het kader van het ANT-IJsselmeer project in 2013 is er een Delft3D-waterkwaliteitsmodel opgezet voor zowel het IJsselmeer als het Markermeer. Waar het IJsselmeer model tot goede en gevalideerde resultaten leidde (Harezlak, 2013), bleek het Markermeemodel niet in staat om de waargenomen seizoenale dynamiek in het Markermeer te simuleren. Zo laten waarnemingen zien dat er in de winter hoge chlorofyl gehalten aanwezig zijn; iets wat in het model niet optreedt. Overigens zien we een dergelijke dynamiek ook niet in vergelijkbare watersystemen in Nederland; het Markermeer is hierin dus tamelijk uniek. Ook zijn er omissies bekend in de opzet van het model (bv flocculatie en zwavelbacteriën), waarvan nog onbekend is hoe groot hun invloed op de primaire productie is.

Het doel van deze verkenning is *niet* om het bestaande model te verbeteren of aan te passen. De berekeningen zullen dan ook niet leiden tot een accurate inschatting van de primaire productie. Desondanks kunnen we het model wel inzetten om inzicht te verkrijgen in de rol van nutriënten in de primaire productie. Uit een voorafgaande inventarisatie van hypothesen in de Werkgemeenschap Levend Markermeer (Troost et al., 2020) kwam namelijk het gezamenlijk gedragen beeld naar voren dat nutriënten mogelijk een belangrijke limiterende rol spelen in het huidige Markermeer. Hoewel andere factoren (slib, flocculatie, zwavelbacteriën) mogelijk ook een rol spelen, is het aannemelijk te veronderstellen dat de nutriënten een *bovengrens* stellen aan de primaire productie in het systeem. Overigens beperkt onze modelopzet zich tot primaire productie door *algen*, en wordt primaire productie door waterplanten in deze studie niet meegenomen.

### 1.1 Doelstelling

Het doel van deze verkenning is om deze bovengrens aan de primaire productie, oftewel de *potentiële* primaire productie, te berekenen. Deze bovengrens wordt bepaald door de nutriënten-aanvoer. Door de berekende potentiële productie te vergelijken met gemeten waarden (beschikbaar dankzij een meetcampagne van de CIV) en met de gemodelleerde waarden in het IJsselmeer, kan verder inzicht verkregen worden in hoe groot de invloed is van andere factoren, die momenteel nog niet in het model zijn meegenomen, en die uniek lijken voor het Markermeer.

## 2 Modelopzet

### 2.1 Aanpak

Voor het berekenen van de potentiële primaire productie gaan we zoveel mogelijk uit van bestaande data en modellen. Voor zowel het Markermeer als het IJsselmeer wordt uitgegaan van modellen die zijn opgezet in het kader van het project ANT-IJsselmeer. Voor het IJsselmeer heeft dat project geleid tot een gevalideerd model waarmee productiviteitsberekeningen gedaan zijn voor een drietal jaren (1981, 1992, 2006) met daarin afnemende nutriëntconcentraties. Voor deze sommen is steeds hetzelfde model (grid, hydrodynamica, en slib) gebruikt, enkel de meteorologische data (wind, temperatuur, instraling) en nutriëntenaanvoer zijn aangepast per jaar. De resultaten zijn gerapporteerd in een ANT-deelrapport (Harezlak, 2013).

In het huidige project zijn deze IJsselmeer berekeningen als volgt aangepast:

- (1) geactualiseerd naar de nieuwste executable en processenbibliotheek
- (2) geüniformiseerd, door telkens dezelfde meteorologie en slibforcering (van het jaar 2006) te gebruiken. Het is immers niet het doel van dit project om accurate producties te berekenen die matchen met een specifiek jaar, maar om inzicht te krijgen in de invloed van de nutriënten op de productie. Om het effect van deze uniformering te onderzoeken wordt wel nog een modeltest uitgevoerd waarin het slib van 2006 wordt vervangen door dat uit 1981.
- (3) uitgebreid naar het jaar 2016, door (enkel) de nutriëntenaanvoer te vervangen door die van het jaar 2016.

Voor het Markermeer heeft het ANT-IJsselmeer project niet geleid tot een gevalideerde en gerapporteerde versie. De bestaande versie bleek qua opzet echter niet veel af te wijken van het IJsselmeer model. In het huidige project maken we gebruik van het grid, de hydrodynamica, en de data m.b.t. de nutriëntenvrachten zoals die in het ANT-IJsselmeer project zijn opgezet voor het jaar 2006. De slibdynamiek is gebaseerd op een gemodelleerd slibveld voor het jaar 2006 (zie sectie 2.5).

In het huidige project zijn de Markermeer-berekeningen als volgt:

- (1) geactualiseerd door de instellingen van het waterkwaliteitsmodel over te nemen van het (geactualiseerde) IJsselmeer model
- (2) uitgebreid naar de jaren 1981 en 2016, door (enkel) de nutriëntenaanvoer te vervangen door data uit die jaren.
- (3) in twee extra simulaties gecombineerd met een nieuw slibveld voor 2016. De waterbeweging is hierbij wel gelijk gehouden, om niet te veel verschillen tegelijkertijd te introduceren.

NB: het slibveld in deze modelruns heeft enkel invloed op de extinctie van licht. Andere zaken zoals vlokvorming met algen, of adsorptie of nalevering van fosfaat, worden dus niet beïnvloed.

Tabel 1 Overzicht simulaties IJsselmeer. Het jaartal verwijst naar het jaar van de nutriëntenaanvoeren. Een 'u' achter het jaartal betekent dat het om een geüniformeerde som gaat waarin meteorologie en het slibveld zijn gebaseerd op het jaar 2006.

Jaartal	Grid, meteo en waterbeweging	Slib	Nutriënten aanvoer	Opmerkingen
1981	2006 (meteo 1981)	1981	1981	Testrun ivm validatie (zie sectie 4.1)
1981u	2006	2006	1981	
2006u	2006	2006	2006	
2016u	2006	2006	2016	

Tabel 2 Overzicht simulaties Markermeer. Het jaartal verwijst naar het jaar van de nutriëntenaanvoeren. Een 'u' achter het jaartal betekent dat het om een geüniformeerde som gaat waarin meteorologie en slibveld zijn gebaseerd op het jaar 2006.

Jaartal	Grid, meteo en waterbeweging	Slib	Nutriënten aanvoer	Opmerkingen
1981	2006	2016	1981	Testrun om het effect van slib te onderzoeken (zie sectie 4.3)
1981u	2006	2006	1981	
2006u	2006	2006	2006	
2016u	2006	2006	2016	
2016	2006	2016	2016	Testrun om het effect van slib te onderzoeken (zie sectie 4.3)

## 2.2 Opzet waterkwaliteitsmodel

In het WAQ model worden oa de volgende onderdelen meegenomen:

### Waterbeweging

De waterbeweging in de sommen voor zowel Markermeer als IJsselmeer is oorspronkelijk met een 3D model uitgerekend. Daarna is deze geaggregeerd naar 2D. NB: Voor beide watersystemen wordt de waterbeweging voor het jaar 2006 ook gebruikt voor de andere jaren.

### Randcondities/forceringen:

- bathymetrie en temperatuur
- invallend licht
- wind (in waterkwaliteitsmodel enkel van belang voor reaeratie)
- nutriëntenaanvoer op verschillende locaties (zie sectie 2.4)
- slibconcentratie (zie sectie 2.5)

### Processen, o.a.:

- algenprocessen (groei en sterfte, respiratie, competitie, etc)
- remineralisatie (in waterkolom en bodem)
- (de)nitrificatie (in waterkolom en bodem)
- licht uitdoving (door slib, en door ander levend&dood materiaal)
- sedimentatie (van algen en detritus)

### Berekende grootheden:

- anorganische nutriënten in de waterkolom (NO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>, PO<sub>4</sub>, Si),
- dood organische materiaal (C,N,P,Si) in zowel het water als in de bodem,
- algen in de waterkolom (verschillende soorten)
- zuurstof

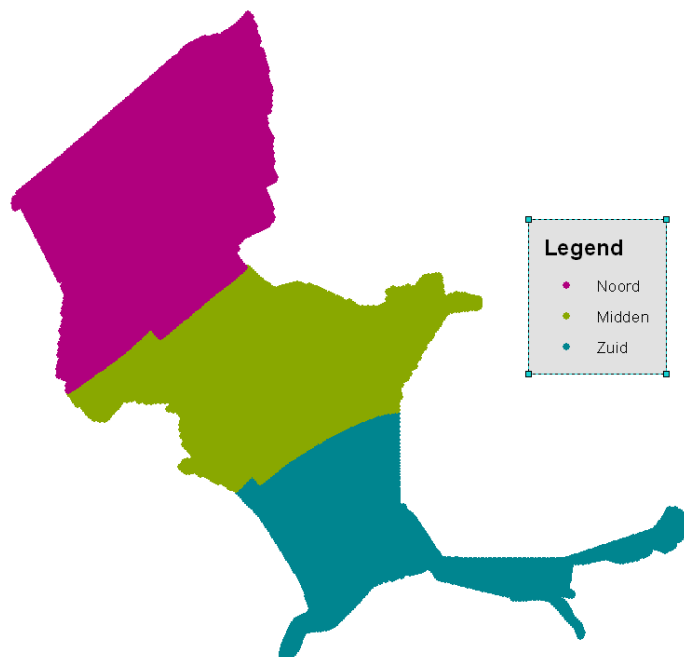
Niet expliciet meegenomen, o.a.: vlokvorming, zwavelbacteriën, waterplanten, schelpdieren, zoöplankton (graas van algen door zoöplankton is overigens wel impliciet verdisconteerd in de parametersetting van de algensterfte).

## 2.3 Ruimtelijke en tijdschalen van de resultaten

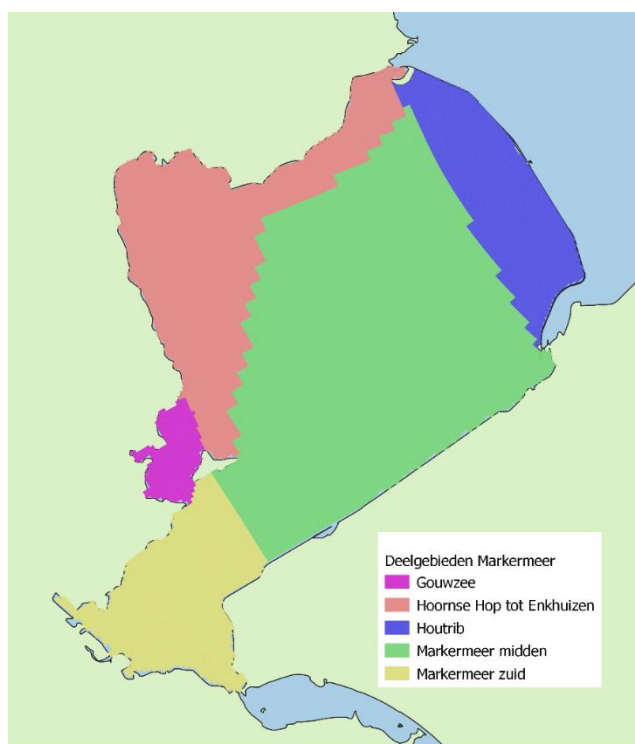
Het model geeft in principe dagelijkse uitvoer, maar aangezien de seizoenspatronen van de Markermeerberekeningen niet overeenkomen met de gemeten patronen (zie sectie 1), is het zinvoller om naar jaarlijkse gemiddeldes van potentiële primaire productie te kijken. Daarnaast zijn de resultaten uit het model ruimtelijk expliciet. Omdat de ruimtelijke verschillen grotendeels door bathymetrie, slib, en nutriëntenaanvoer en-transport worden ingegeven (welke factoren allen redelijk tot goed vertegenwoordigd zijn in het model), lijkt een benadering per deelgebied nuttig.

Voor het IJsselmeer worden drie deelgebieden toegepast, zoals ook in de ANT-IJsselmeer studie het geval was (zie Figuur 1). Feitelijk gaat het om een noordelijk en een zuidelijk gebied, maar de grens tussen het noordelijke en zuidelijke gebied ligt niet vast. Data uit Vrouwezand laten zien dat deze locatie zich in sommige jaren 'noordelijk' gedraagt en in sommige jaren juist 'zuidelijk'. Dit lossen we op door een derde gebied, het middengebied, te definiëren.

Voor het Markermeer worden vijf deelgebieden toegepast (zie Figuur 2). Deze zijn grofweg gebaseerd op de habitats-geschiktheids analyse van het Markermeer (van Zuidam et al., 2014, Maarse 2014).



*Figuur 1 Indeling van het IJsselmeer in een zuidelijk (groen/blauw), midden (groen) en noordelijk (roze) deel.*



Figuur 2 Indeling van het Markermeer in vijf deelgebieden.

## 2.4 Nutriënten vrachten

Voor zowel het IJsselmeer als het Markermeer was er vanuit het ANT-IJsselmeer project reeds beschikking over de nutriëntenaanvoeren voor de jaren 1981 en 2006. Voor het Markermeer hebben we deels ook gebruik gemaakt van de nutriëntenaanvoeren uit het jaar 1980; in dit rapport refereren we voor het gemak echter enkel naar het jaar 1981. De data voor het Markermeer dienden nog opgeschoond en aan het model gekoppeld te worden. Voor 1980/81 waren enkel gegevens voor de belangrijkste inlaten naar het Markermeer beschikbaar. Voor de ontbrekende gegevens zijn de gegevens van 2006 gebruikt. Voor 2016 zijn nieuwe data gezocht, opgeschoond, en aan het model gekoppeld. Dit is zoveel mogelijk op dezelfde manier gedaan als voor de bestaande reeksen.

In de invoerbestanden voor de modelruns voor 2016 zijn FLOW (inkomende debieten) en Si (silicaat) overgenomen van de dataset van de 2006 berekeningen. De overige data zijn aangevuld vanuit meetdata van RWS en waterschappen (volgens onderstaande tabel). Voor CHLFA is de eenheid  $\mu\text{g/l}$ . Voor alle andere stoffen is de eenheid  $\text{mg/l}$ . Ontbrekende data zijn in principe opgevuld met “-999.0”, wat DWAQ in staat stelt daar zelf een waarde bij te berekenen op basis van lineaire interpolatie. Wanneer voor bepaalde meetpunten gehele jaren ontbraken zijn de data overgenomen van het meest nabije jaar waar wel data voor beschikbaar zijn, maar dit bleek enkel het geval voor de kleinere instroomlocaties.

Table 3 Herkomst data nutriëntenconcentraties

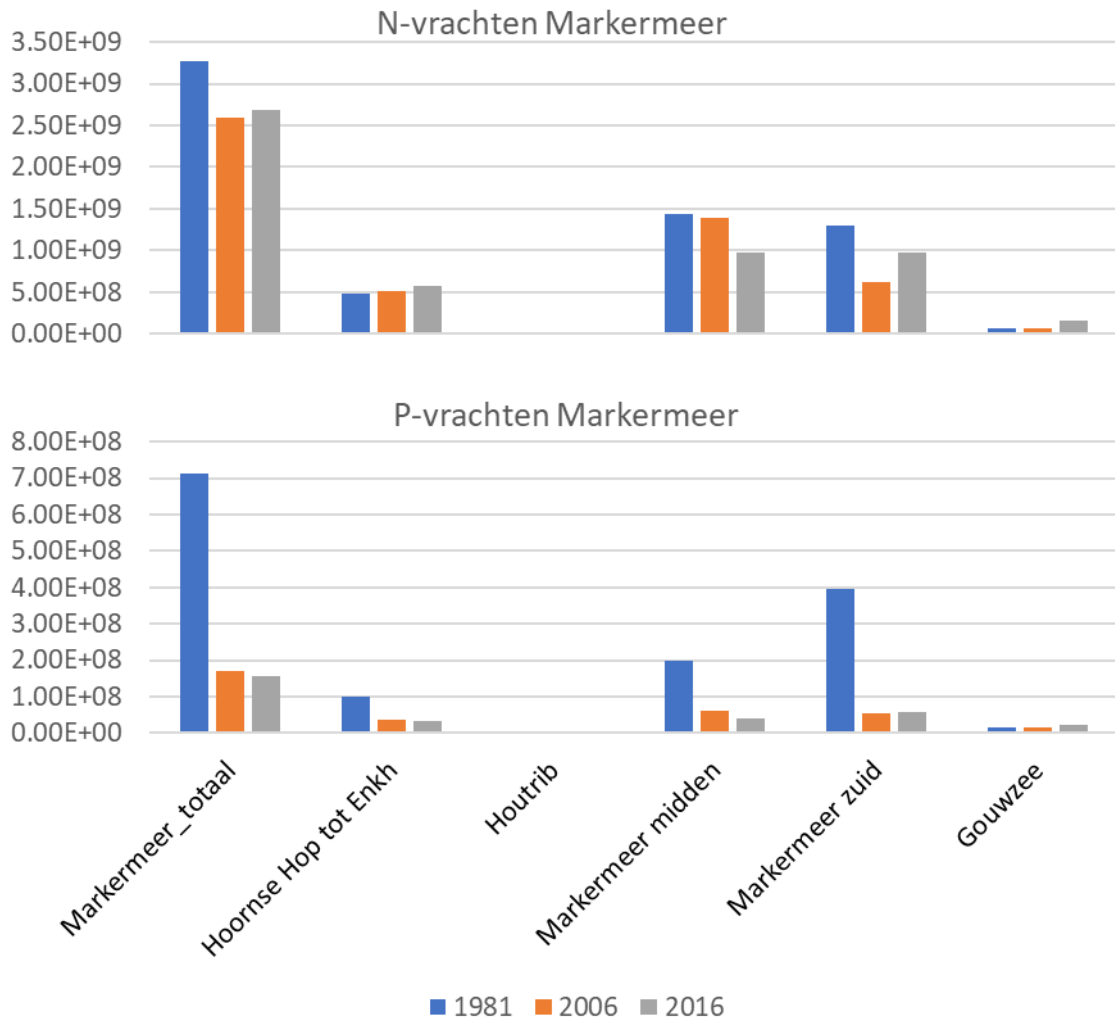
waterlichaam	load locatie	Meetpunt
Markermeer	Gem Zeeburg Oranjesluis	Amsterdam (kilometer 25, IJtunnel)
Markermeer	Gemaal Drieban	12_GBM045
Markermeer	Gemaal Wortman	37_26BN-008-01
Markermeer	Eem	Eemmeerdijk. kilometer 23
Markermeer	Houtribsluis	Houtribhoek
Markermeer	Gooische zomerkade	Eemmeerdijk. kilometer 23
Markermeer	Krabgatsluis	Vrouwezand
Markermeer	RWZI Huizen	Eemmeerdijk. kilometer 23

Markermeer	Gemaal Wiel	Eemmeerdijk. kilometer 23
Markermeer	Gemaal Veendijk	Eemmeerdijk. kilometer 23
Markermeer	Nijkerkersluis	Eemmeerdijk. kilometer 23
Markermeer	Gemaal de Poel	12_517017
Markermeer	Grafelijkheidsluis	12_146301
Markermeer	Groote zeesluis	11_NTV001
Markermeer	Gemaal Katwoude	12_535002
Markermeer	Gemaal Warder	12_570107
Markermeer	Zeesluis	12_006002
Markermeer	Lutje Schardam	12_002002
Markermeer	Schardam_Westerkrogge	12_613005 en 12_613015
Markermeer	Gemaal de Block hoog	37_26AZ-052-01
Markermeer	Gemaal de Block laag	37_26AZ-053-01
Markermeer	Gemaal Oosterpolder	12_611006
Markermeer	Schellinkhout	12_610003
Ijsselmeer	Colijn	37_20HN-044-01
Ijsselmeer	Colijn	37_21CN-015-01
Ijsselmeer	Houtribsluis	Lelystad haven
Ijsselmeer	IJssel	Kampen
Ijsselmeer	Lemmer	02_0121
Ijsselmeer	Stavoren	02_0117
Ijsselmeer	Vissering	37_20FN-186-01
Ijsselmeer	Zwarte Water	Genemuiden
Ijsselmeer	Krabbegat (bound)	Markermeer midden (zwaartepunt Markermeer)
Ijsselmeer	Roggebotsluis (bound)	Drontermeerdijk, kilometer 0.4

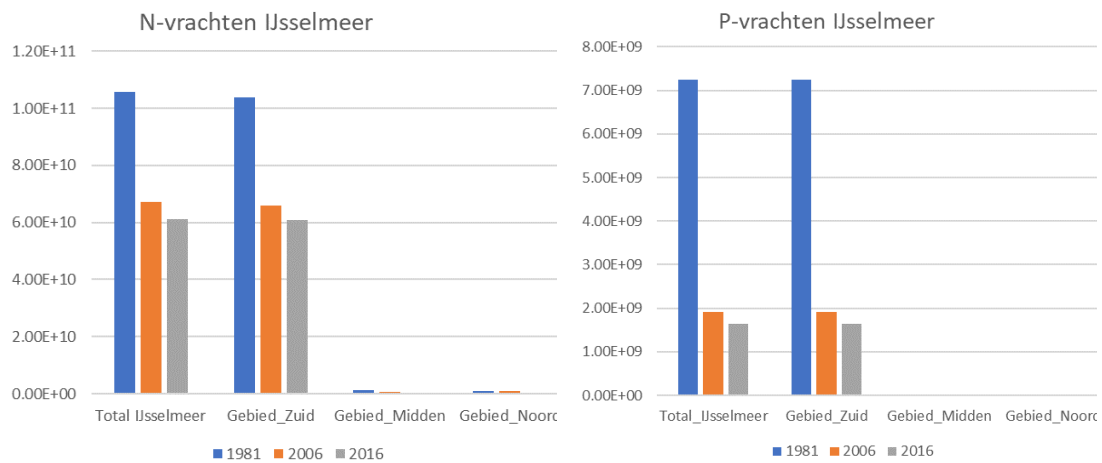
In alle nieuwe bestanden wordt gebruik gemaakt van onderstaande conversies (zgn USEFOR statements), met uitzondering van de locaties Zwarte Water en IJssel, de belangrijkste nutriëntenbronnen voor het IJsselmeer, waar een correctiefactor van 1.3 voor FLOW wordt gebruikt omdat de afvoergegevens van een bovenstrooms punt (Pannerden) afkomstig zijn:

```
USEFOR 'FLOW' 'FLOW'  
USEFOR 'Continuity' 'Continuity'  
USEFOR 'NH4' 'NH4'  
USEFOR 'NO3' 'NO3'  
USEFOR 'Si' 'Si'  
USEFOR 'POP1' 'CHLfa' * 0.00114  
USEFOR 'POP2' 'CHLfa' * 0.000171  
USEFOR 'AAP' 0.230769 * 'Ptot' - 'POP1' - 'POP1' - 'POP2' MIN 0.  
USEFOR 'PO4' 'PO4' + 'AAP'  
USEFOR 'PON1' 'CHLfa' * 0.0136  
USEFOR 'PON2' 'NKj' - 'NH4' - 'PON1' - 'PON1'
```

Voor het Markermeer zijn de belangrijkste nutriëntenbronnen de Houtribsluis en Krabbegat, gevolgd door Eem, Nijkerkersluis en Gemaal de Block. In Figuur 3 en Figuur 4 zijn de ingaande vrachten per deelgebied weergegeven. NB: de Houtribsluis loost in het deelgebied Markermeer Midden, vandaar dat daar de grootste vrachten in terecht komen (zie ook Figuur 2). In het deelgebied Houtrib vindt geen enkele lozing of andere nutriëntenaanvoer plaats.



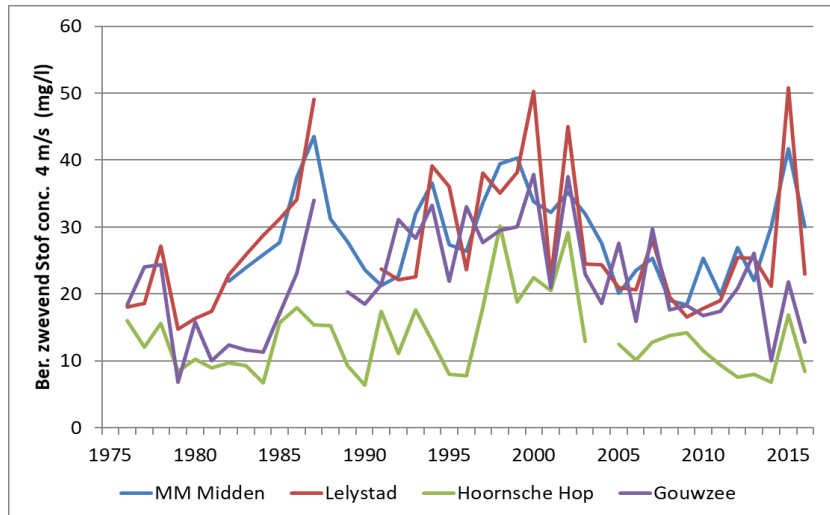
Figuur 3 Ingaande nutriëntenvrachten in het Markermeer voor de jaren 1981, 2006, en 2016. Boven: totaal stikstof (gN/jaar). Onder: totaal fosfor (gP/jaar)



Figuur 4 Ingaande nutriëntenvrachten in het IJsselmeer voor de jaren 1981, 2006, en 2016. Links: totaal stikstof (gN/jaar). Rechts: totaal fosfor (gP/jaar)

## 2.5 Slib

Slib speelt een belangrijke rol in het Markermeer. Na het ontstaan van het Markermeer namen de slibconcentraties toe. In de periode 2005-2014 leken deze weer af te nemen, maar in recente jaren worden er opnieuw hogere waarden gemeten (Figuur 5).

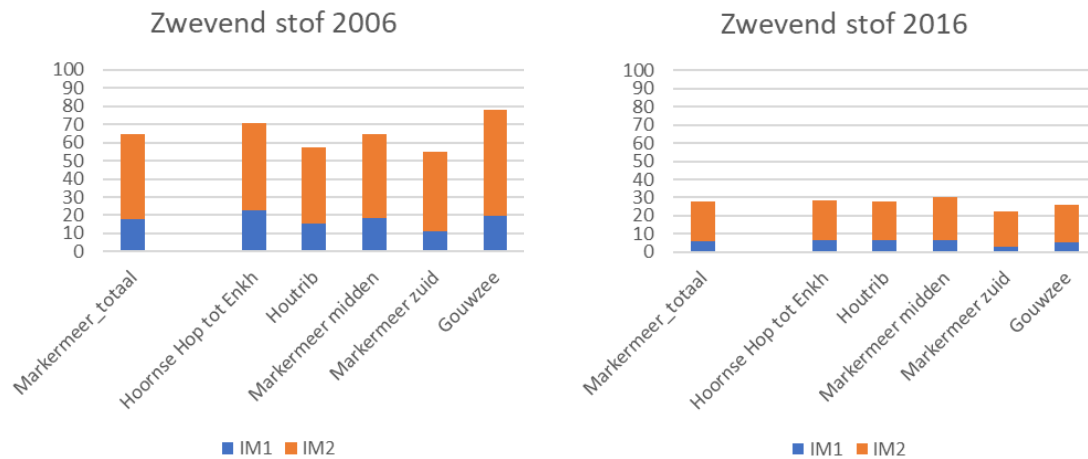


Figuur 5 Gemeten concentraties zwevend stof (mg/l) op verschillende locaties in het Markermeer

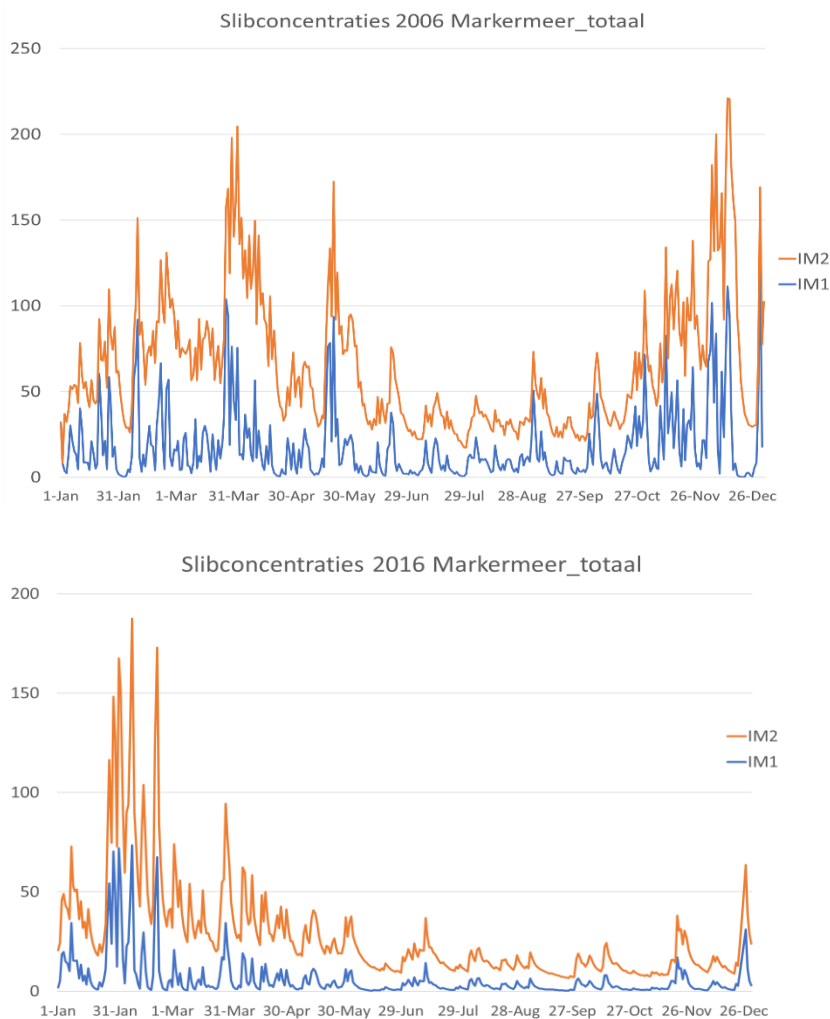
De slibconcentraties die in de sommen voor het Markermeer worden gebruikt, zijn oorspronkelijk met een 3D model uitgerekend. Daarna zijn deze geaggregeerd naar 2D. Er zijn twee slibvelden beschikbaar: één voor 2006 en één voor 2016, beide afkomstig uit het KIMA project (2018). De slibdynamiek in 2006 is gekalibreerd en gevalideerd met satellietdata van het Freshmon project (2008) en de slibresultaten van 2016 zijn gevalideerd met satelliet data uit het EU INFORM project (Harezlak & de Kok, 2017). Ook zijn beide jaren gevalideerd met in-situ gemeten jaren. In beide jaren komen de gemodelleerde waarden redelijk overeen met de remote sensing-gemeten waarden, terwijl de in-situ gemeten waarden structureel lager liggen. Dit heeft o.a. te maken met de zeer grote variatie in slibwaarden in combinatie met de lagere meetfrequentie van de in-situ metingen en de wellicht selectievere meetmomenten (alleen bij niet al te veel wind). Figuur 6 en Figuur 7 geven een indruk van beide slibconcentraties in tijd en ruimte. Het berekende slibveld voor 2006 laat hogere gemiddelde waarden zien dan dat voor 2016.

Omdat slib geen dominante rol speelt voor de primaire productie in het IJsselmeer, worden voor het IJsselmeer geen ruimtelijke verschillen voor slib meegenomen. De gebruikte tijdseries (1981 en 2006) zijn gebaseerd op metingen bij Vrouwezand (zie Figuur 8).

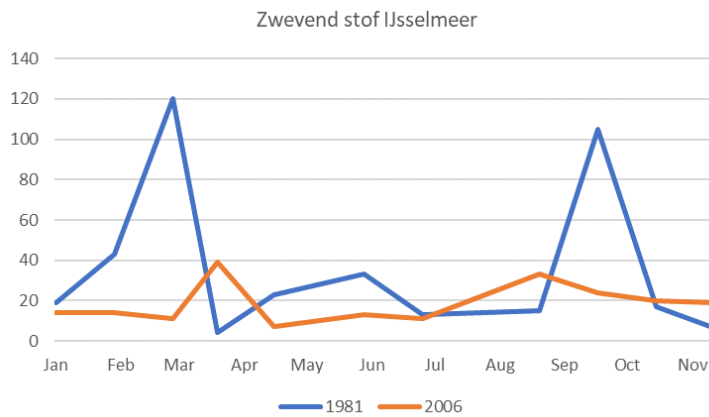




Figuur 6 Berekende jaargemiddelde concentraties zwevend stof (mg/l), per deelgebied van het Markermeer voor het jaar 2006 (links) en 2016 (rechts). IM1 en IM2 staan voor verschillende grootte-fracties van het zwevend stof.



Figuur 7 Berekende concentraties zwevend stof (mg/l), gemiddeld voor het hele Markermeer voor het jaar 2006 (boven) en 2016 (onder). IM1 en IM2 zijn twee verschillende slibfracties, die hier cumulatief zijn weergegeven.



Figuur 8 Gemeten concentraties zwevend stof in Vrouwezand (mg/l), in 1981 en in 2006

### 3 Resultaten

#### 3.1 Nutriënten

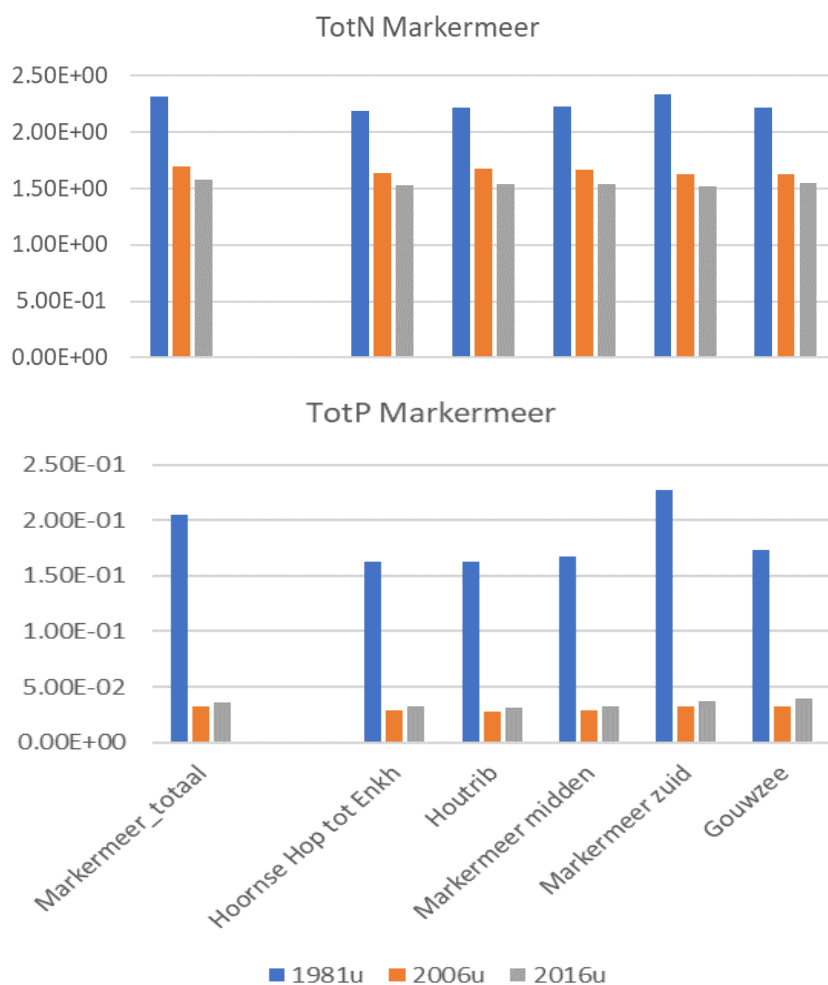
In zowel het Markermeer als het IJsselmeer zijn de ingaande nutriëntenvrachten het hoogst in het jaar 1981, en lager (maar onderling min of meer gelijk) in 2006 en 2016. De afname t.o.v 1981 is groter voor P dan voor N (Figuur 3 en Figuur 4).

De afname in nutriëntenvrachten vertaalt zich door in de gemodelleerde concentraties TotN en TotP die aanwezig zijn in het water (Figuur 9 en Figuur 12 Figuur 10). In het Markermeer lijken de totale nutriëntenconcentraties min of meer proportioneel te reageren op de afname in vrachten, terwijl in het IJsselmeer de relatieve afname van de totale nutriënten concentraties duidelijk kleiner is dan de afname in de vrachten.

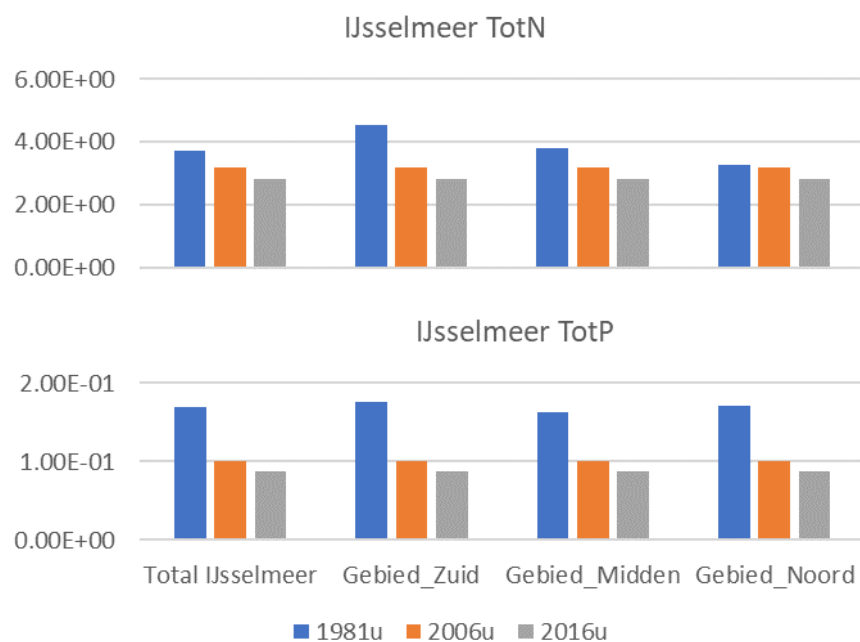
Door de gemodelleerde uitstroom van nutriënten te vergelijken met de instroom, kan de relatieve retentie worden berekend:

$$\text{Relatieve retentie} = 1 - ( \text{flux}_{\text{uit}} / \text{flux}_{\text{in}} )$$

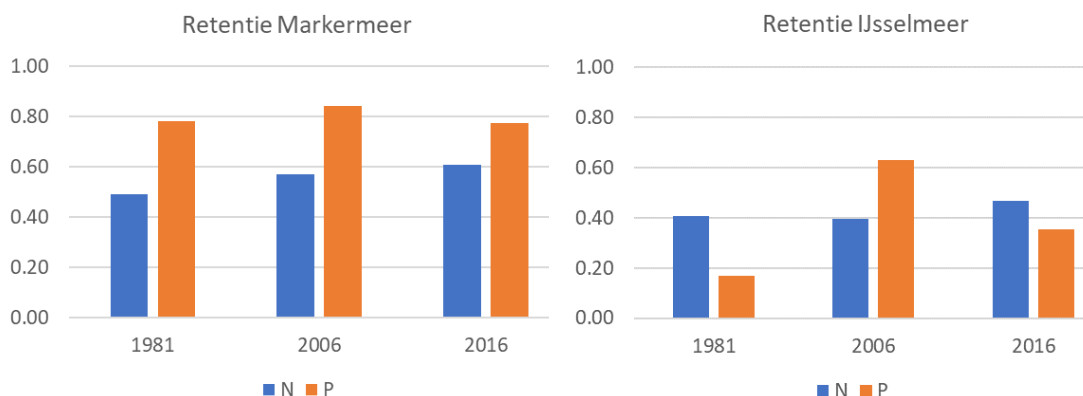
De resultaten laten zien dat in het IJsselmeer van 1981 slechts ~20% van de hoeveelheid aangevoerde P wordt vastgehouden, het overgrote deel stroomt weer weg uit het systeem (Figuur 11). In de recentere jaren (waarin de aanvoer afneemt) neemt de P-retentie toe tot ~40% in 2016. In het Markermeer wordt echter al in 1981 80% van de hoeveelheid P-aanvoer vastgehouden, en dit percentage blijft gelijk in 2016 hoewel ook daar de absolute P-aanvoer flink afneemt. Ook de retentie van N ligt hoger in het Markermeer dan in het IJsselmeer.



Figuur 9 Berekende jaargemiddelde concentratie (mg/l) totaalN (boven) en totaalP (onder) per deelgebied van het Markermeer



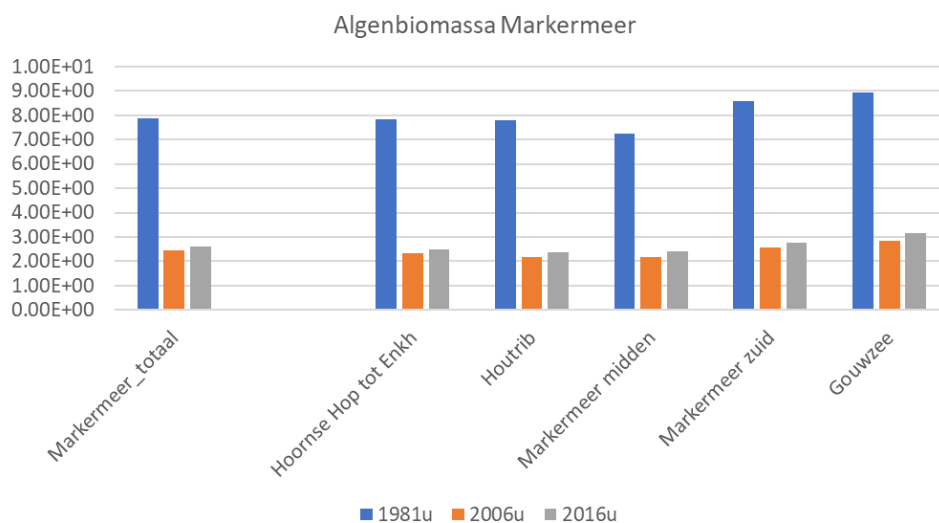
Figuur 10 Berekende jaargemiddelde concentratie (mg/l) totaalN (boven) en totaalP (onder) per deelgebied van het IJsselmeer



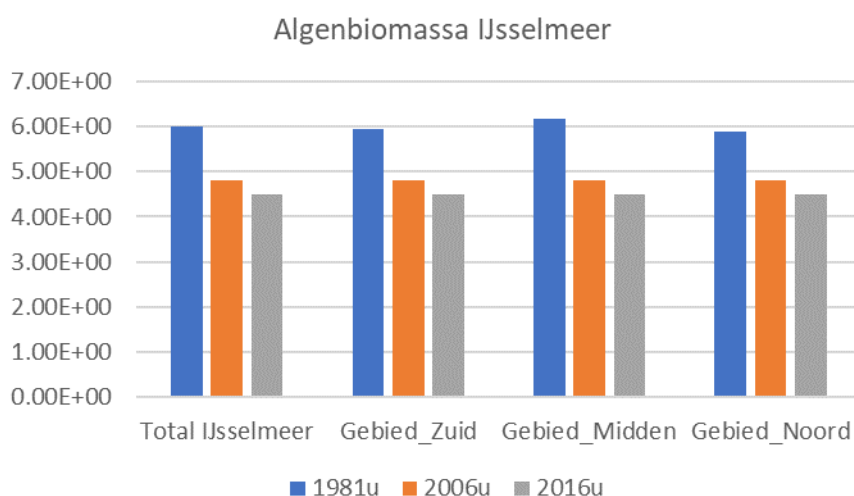
Figuur 11 Berekende relatieve retentie [-] berekend op basis van nutriënten in- en uitstroom.

### 3.2 Algen

De berekende algenbiomassa's volgen min of meer de patronen van de totale nutriëntenconcentraties, met hoge biomassa's in 1981 en lagere in de jaren 2006 en 2016 (Figuur 12 en Figuur 13). De berekende N:P ratio's van de algen in het IJsselmeer blijven in de verschillende jaren echter op een ongeveer constante waarde van 11:1, terwijl deze in het Markermeer verschuiven van 10:1 (in 1981) naar 14:1 (in 2016).



Figuur 12 Berekende jaargemiddelde algenbiomassa (mgDM/l) per deelgebied van het Markermeer

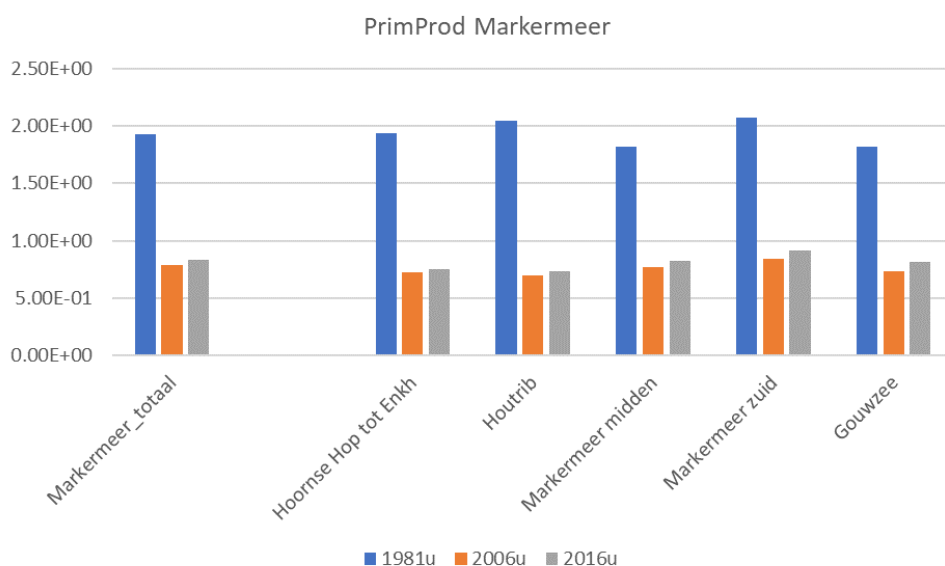


Figuur 13 Berekende jaargemiddelde algenbiomassa (mgDM/l) per deelgebied van het IJsselmeer

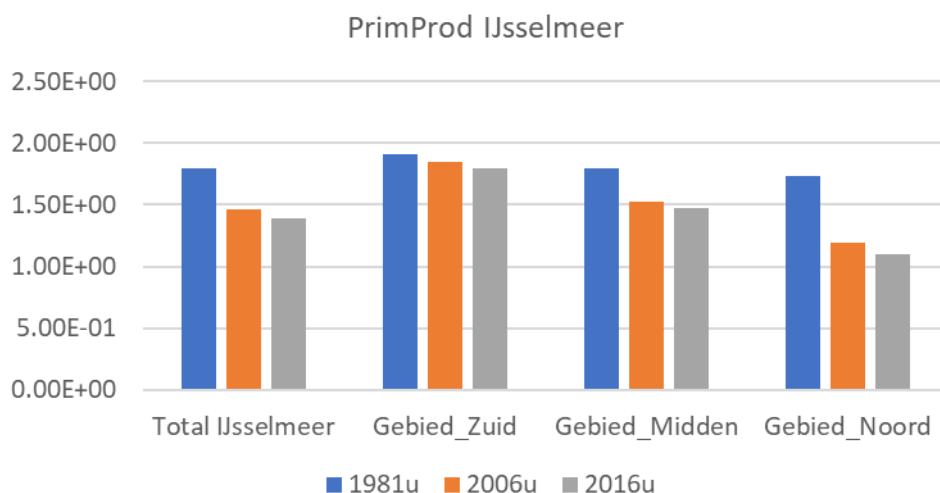
### 3.3 Primaire productie

Figuur 14 en Figuur 15 tonen de berekende jaargemiddelde primaire producties. Voor het Markermeer gaat het hierbij om de *potentiële* primaire productie, zoals uitgelegd in de inleiding.

De berekende (potentiële) primaire productie in 1981 is in IJsselmeer en Markermeer ongeveer even groot (~1.8gC/m<sup>2</sup>/d). In beide systemen is deze lager in de jaren 2006 en 2016, maar voor het Markermeer is de afname t.o.v. 1981 veel groter dan voor het IJsselmeer. Hierdoor laat het Markermeer in zowel 2006 als 2016 een duidelijk lagere berekende productie zien (0.75gC/m<sup>2</sup>/d) dan het IJsselmeer (1.4gC/m<sup>2</sup>/d).



Figuur 14 Berekende jaargemiddelde potentiële primaire productie (gC/m<sup>2</sup>/dag) per deelgebied van het Markermeer



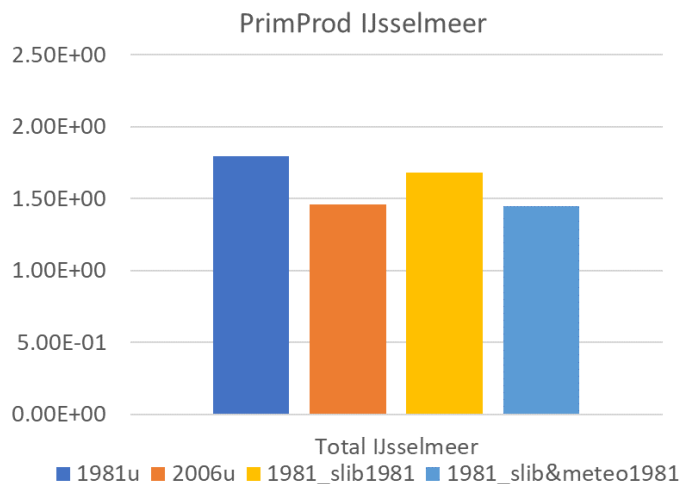
Figuur 15 Berekende jaargemiddelde primaire productie ( $gC/m^2/dag$ ) per deelgebied van het IJsselmeer

## 4 Discussie

### 4.1 Validatie

Het is lastig om de modelresultaten m.b.t. primaire productie te valideren, met name door een tekort aan meetgegevens van primaire productie. Om dit gat op te vullen is er in de afgelopen periode een gerichte CIV-meetcampagne opgestart in het Markermeer. Hoewel er inmiddels ruwe data over primaire productie voorhanden zijn, zijn deze op het moment van schrijven nog niet opgewerkt naar grootheden die kunnen worden vergeleken met de modelresultaten. Zodra de data beschikbaar zijn, zal deze vergelijking alsnog uitgevoerd worden.

Wel kan een vergelijking worden gemaakt tussen de IJsselmeerberekeningen in deze studie en die in het ANT-IJsselmeer project. Die laatste zijn uitgebreid gevalideerd voor een reeks van grootheden (niet voor primaire productie zelf). In de ANT-IJsselmeerstudie ligt de berekende primaire productie voor het jaar 1981 iets lager dan die in de huidige studie ( $1.4gC/m^2/d$  i.p.v.  $1.8gC/m^2/d$ ), en is deze gelijk aan de berekende productie in het jaar 2006. Nader onderzoek laat echter zien dat het verschil met de huidige studie toe te schrijven is aan de uniformering van de sommen, waarbij voor alle sommen de meteorologische en slibdata voor 2006 zijn gebruikt. Een testrun wijst namelijk uit dat de berekende primaire productie op basis van meteorologie en slibmetingen uit 1981 inderdaad vrijwel identiek is aan die van 2006, mits de oorspronkelijke slibconcentraties en meteorologie worden gebruikt (zie **Figuur 16**). Hierin spelen zowel de meteorologie als het slib een rol: als enkel slib wordt aangepast blijft een deel van het verschil bestaan. Naast de absolute (jaargemiddelde) productie vallen ook de temporele patronen in de testrun samen met de oorspronkelijke run in het ANT-IJsselmeer project (niet getoond). Deze vergelijking laat zien dat de huidige modelresultaten zich begrijpelijk gedragen ten opzichte van de eerder gevalideerde resultaten, maar ook dat interjaarlijkse verschillen in meteorologie en slib kunnen leiden tot interjaarlijkse verschillen in primaire productie. Deze verschillen zijn voor het IJsselmeer van dezelfde grootte-orde als de verschillen veroorzaakt door de afname in de nutriëntenaanvoer.



Figuur 16 Berekende jaargemiddelde primaire productie ( $\text{gC}/\text{m}^2/\text{dag}$ ) voor het hele IJsselmeer voor de jaren 1981 en 2006. De meteorologie en slib zijn afkomstig uit het jaar 2006 tenzij anders vermeld in de legenda.

Ook kan een vergelijking worden gemaakt met gemeten waarden uit de literatuur. Zo wordt in het eerdergenoemde Ecopath rapport gebruik gemaakt van de metingen door Mur et al. (1990). In dat rapport wordt voor de jaren '87 en '88 gemeten *relatieve groeisnelheden* van fytoplankton gemeld in de range van  $-0.08 - 0.05$  [ $\text{gAFDW}/\text{gAFDW}$ ] /uur. Deze metingen zijn uitgevoerd in het meetpunt Y112 (gelegen in het Markermeer Midden, ten westen van het midden, dus richting de Hoornse Hop), en betreffen de zomerperiode van april tot en met september. In het Ecopath-rapport worden deze relatieve groeisnelheden gemiddeld over alle meetmomenten en omgerekend naar een *jaarlijkse relatieve groeisnelheid* van  $108.33$   $\text{gDW}/\text{gDW}/\text{jaar}$  (gerealiseerde biomassa per jaar in gram drooggewicht per eenheid aanwezige biomassa). De modelberekening daarentegen resulteren in een *absolute groeisnelheid* voor het totale Markermeer en het jaar 1981 van  $1.93$   $\text{gC}/\text{m}^2/\text{dag}$  (jaargemiddeld) of  $3.85$   $\text{gC}/\text{m}^2/\text{dag}$  (zomergemiddeld). Deze kunnen op basis van de (jaargemiddelde of zomergemiddelde) algenbiomassa worden omgerekend naar een jaarlijkse relatieve groeisnelheid van  $66$   $\text{gC}/\text{gC}/\text{jaar}$  (jaargemiddeld) of  $84$   $\text{gC}/\text{gC}/\text{jaar}$  (zomergemiddeld). De ruimtelijke variatie in de gemodelleerde zomergemiddelde relatieve groeisnelheid is als volgt:  $70$  (Mkm zuid);  $93$  (houtrib);  $86$  (Mkm midden);  $142$  (Gouwzee)  $\text{gC}/\text{gC}/\text{jaar}$  (allen zomergemiddeld). De interjaarlijkse variatie in de gemodelleerde zomergemiddelde relatieve groeisnelheid neemt toe over de jaren:  $84$  (1981);  $101$  (2006);  $101$  (2016)  $\text{gC}/\text{gC}/\text{jaar}$  (allen zomergemiddeld); dit terwijl de absolute primaire productie juist afneemt over deze jaren. Kortom, de gemodelleerde waarden liggen netjes rondom de (omgerekende) meetwaarden. Een aandachtspunt is dus wel dat absolute en relatieve productie twee erg verschillende dingen zijn, en dat deze ook tegenovergestelde patronen kunnen laten zien.

Ten slotte kan een validatie worden uitgevoerd op basis van een vergelijking tussen gemeten en gemodelleerde chlorofyl concentraties (niet getoond). Hieruit blijkt dat de voor het Markermeer gemodelleerde waarden voor de jaren 2006 en 2016 prima overeenkomen met de gemeten range van  $10-40$   $\text{mg}/\text{l}$ . Voor het jaar 1981 ligt de gemodelleerde waarde echter een factor 2 boven de gemeten range van  $20-40$   $\text{mg}/\text{l}$ . Het zou dus kunnen zijn dat er in dat jaar een limiterende factor ontbreekt in het model waarmee de chlorofylconcentratie lager zou komen te liggen. Een mogelijke kandidaat is bijvoorbeeld de schelpdierenpopulatie die niet in deze modelstudie is meegenomen, terwijl deze weldegelijk aanwezig was in de beginjaren van het Markermeer. Graas kan leiden tot een afname van chlorofyl, maar hoeft overigens niet per sé tot een lagere primaire productie te leiden.

## 4.2 Invloed van nutriënten

In 1981 is de berekende (potentiële) primaire productie in Markermeer en IJsselmeer ongeveer even groot. In de recentere jaren neemt de primaire productie in beide systemen af, als reactie op de afname in nutriëntenaanvoer. Dit suggereert dat voor beide modelsystemen de nutriënten een limiterende factor zijn voor de (potentiële) primaire productie, in ieder geval in de recentere jaren.

De afname in de berekende primaire productie is echter veel groter in het Markermeer dan in het IJsselmeer. Een verklaring hiervoor is te vinden in de retentie van beide watersystemen. De modelresultaten laten een lagere retentie van nutriënten zien in het IJsselmeer dan in het Markermeer, met name in 1981 (zie sectie 3.1). De retentie in het IJsselmeer neemt toe in de recente jaren, terwijl die van het Markermeer min of meer gelijk blijft.

De verschillen in retentie kunnen deels te maken hebben met verblijftijden en andere systeemeigenschappen. Echter, een lage retentie in combinatie met een *toename* in de recente jaren (zoals in het IJsselmeer te zien zijn), duidt op een relatieve *overmaat* aan nutriënten(aanvoer). Onderliggende verklaring is dat bij een overmaat aan nutriënten deze grotendeels weer uitstromen uit het systeem. Bij een afname in nutriënten aanvoer hoeft het biogeochemische systeem zich dan namelijk niet of nauwelijks aan te passen, want er blijven nog genoeg nutriënten over. Wel zullen er iets minder nutriënten het systeem uitstromen (want er komen ook minder binnen), en een relatief groter deel wordt vastgelegd door het systeem, wat leidt tot een toename van de retentie. Dit is wat we zien gebeuren in de modelresultaten van het IJsselmeer: bij een afname van de nutriënten blijft de algen N:P ratio vrijwel gelijk, neemt de productie iets af, en neemt de retentie toe.

De hoge retentie in het Markermeer, die gelijk blijft bij een afnemende nutriëntenaanvoer, duidt juist op het tegenovergestelde: een *nutriëntenlimitatie*. Bij een tekort aan nutriënten zal het biogeochemische systeem namelijk een relatief grotere claim leggen op de wel aanwezige nutriënten en er ook efficiënter mee omgaan. Een afname in nutriënten dwingt het systeem tot het (nog) efficiënter gebruik maken van de nutriënten. Maar omdat de rek daarin beperkt is, zal dit desondanks gepaard gaan met een afname van de productie. Omdat de nutriënten-uitstroom hierbij min of meer gelijk blijft (relatief ten opzichte van de instroom), zal de retentie ook min of meer gelijk blijven. Dit lijkt het geval te zijn in het Markermeer waar de algenbiomassa en productie meer dan halveren in de recente jaren. De toename van efficiëntie is terug te zien in de veranderende N:P ratio van de algenbiomassa in het Markermeer, terwijl de retentie dus onveranderd hoog blijft.

Kortom, het Markermeer lijkt sterker nutriënten-gelimiteerd dan het IJsselmeer. Dit maakt het Markermeer gevoeliger voor een afname van de nutriëntenaanvoer, en verklaart de lagere potentiële primaire productie in recentere jaren ten opzichte van het IJsselmeer, alsmede de verschuiving in de berekende N:P ratio's van de algen. Deze verschuiving leidt er toe dat de algen een lagere voedselkwaliteit hebben voor de hogere trofische niveaus.

De modelresultaten suggereren dus dat nutriënten een grote invloed hebben op het Markermeer. De verschillen in nutriëntenaanvoer, in combinatie met verschillen in bathymetrie, watertransport en slibconcentraties zijn voldoende om tot een veel lagere primaire productie te komen in het Markermeer dan in het IJsselmeer. Hierbij lijkt slib van ondergeschikt belang (zie volgende sectie). De modelopzet m.b.t. de biogeochemische processen is vooralsnog identiek in beide modelsystemen. Echter, zoals al besproken in de inleiding, kunnen er ook nog andere biogeochemische factoren een rol spelen in de primaire productie die nu niet in de modellen zijn meegenomen, zoals flocculatie en zwavelbacteriën.

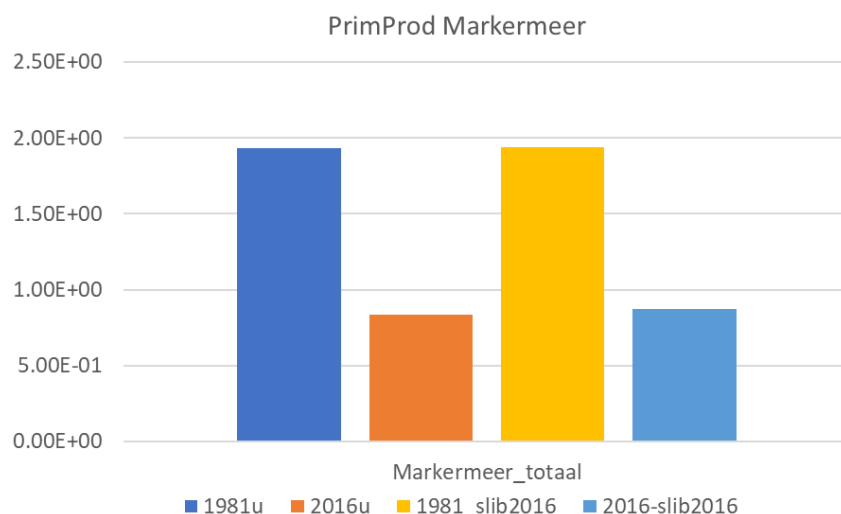


Deze factoren zouden de verschillen in primaire productie nog verder kunnen vergroten. Het kan echter ook zijn, dat deze factoren slechts (of deels) het gevolg zijn van de verschillen in primaire productie, zonder dat ze er veel invloed op hebben. Een vergelijking van de gemodelleerde met de gemeten primaire productie kan hier inzicht in geven, maar deze data waren op het moment van schrijven nog niet beschikbaar.

### 4.3 Invloed van slib

Hoewel slib over het algemeen een zeer kleine rol wordt toebedacht in de primaire productie van het IJsselmeer, laat Figuur 16 zien dat de interjaarlijkse verschillen in slib toch enig effect hebben op de berekende primaire productie. Voor het Markermeer wordt er over het algemeen juist een grote rol aan slib toegekend. Daarom is het wellicht verrassend dat het effect van een ander slibveld in het Markermeer (nog) kleiner is dan in het IJsselmeer (zie Figuur 17).

Deze resultaten duiden er op dat in beide modelsystemen lichtlimitatie slechts een kleine rol speelt in de berekende primaire productie. Overigens bestaat het gebruikte slibveld voor het Markermeer voor 2016 uit relatief lage waarden. Figuur 5 suggereert dat er andere jaren zijn waarin hogere concentraties optreden. Wellicht is er wel een (groter) effect te zien zijn als er een ander slibveld zou worden gebruikt met hogere waarden. Ook kan het zijn dat slib een andere rol heeft op de primaire productie dan via lichtextinctie, bijvoorbeeld via flocculatie.



Figuur 17 Berekende jaargemiddelde potentiële primaire productie (gC/m²/dag) voor het hele Markermeer voor de jaren 1981 en 2016. Het gebruikte slibveld is afkomstig uit het jaar 2006 tenzij anders vermeld in de legenda.

## 5 Conclusies

In deze verkenning is bekeken hoe de primaire productie in het watersysteem van het Markermeer door de tijd is veranderd onder de invloed van een veranderende nutriënten-toevoer. De modelresultaten suggereren dat in 1981 de (potentiële) primaire productie in het Markermeer vergelijkbaar was met die van het IJsselmeer. In de recentere jaren is de gemodelleerde primaire productie in beide systemen afgenomen, als een rechtstreeks gevolg van de afname in de nutriënten-aanvoer. Echter, in het Markermeer is de afname in primaire productie veel groter dan in het IJsselmeer. Dit komt omdat het Markermeer veel sterker nutriënten-gelimiteerd is dan het IJsselmeer.

De modelresultaten laten dus zien dat nutriënten een grote invloed hebben op het Markermeer. De verschillen in nutriëntenaanvoer, in combinatie met verschillen in bathymetrie en watertransport zijn voldoende om tot een veel lagere primaire productie te komen in het

Markermeer dan in het IJsselmeer. Lichtlimitatie door slib lijkt hierbij van ondergeschikt belang. Andere factoren (bv zwavelbacteriën en flocculatie) zijn in deze studie niet meegenomen. Het is nog niet onderzocht onbekend in hoeverre deze factoren de primaire productie nog verder beïnvloeden. Een vergelijking van de gemodelleerde met de gemeten primaire productie kan hier inzicht in geven, maar deze data waren op het moment van schrijven nog niet beschikbaar.

## 6 Referenties

- De Haan, M., Schoffelen, N., Teurlinckx, S., & De Senerpont Domis, L. N. (2019). Voedselweb en productiviteit van het Markermeer. *Rijkswaterstaat WVL BG2580WATRP1903071409*.
- Harezlak & de Kok (2017). Demonstration and testing report of water quality forecasting. *INFORM\_D7.3\_v1.0*
- Harezlak, V. (2013). *Nutriëntbalansen en waterkwaliteit van het IJsselmeer*
- Maarse, M. (2014). HABITAT gebiedsmodel IJsselmeer en Markermeer. Deltares report.
- Mur, L. R., M. J. van Hezewijk, and P. M. Visser. 1990. Fytoplankton Markermeer.
- Troost, T.A., Noordhuis, R., Van der Geest, H., Genseberger, M., 2020. Hypothese document Markermeer-v20200611 labiotiek en primaire productie. Memo tbv Werkgemeenschap Levend Markermeer.
- van Zuidam, B., van Geest, G., Harezlak, V. Noordhuis, R. 2014. Update kennisregels voor lichtklimaat, waterplanten en mosselen. Digitaal document ANT-IJsselmeer.