

rijkswaterstaat

deltadienst

rijkswaterstaat - deltdienst
milieu en inrichting
bibliotheek en documentatie
postbus 1039
4330 EA Middelburg

nota DDMI-81.03

titel :

auteur(s) : ir. J.A.C. Derks (T.H. Twente)

datum : maart 1981

bijlagen :

samenvatting : Het effect van stikstofbelasting en sediment op de eutrofiëring van het Grevelingenmeer, gesimuleerd in vier ondiepe reservoirs.

rijkswaterstaat - deltadienst
milieu en inrichting

bibliotheek en documentatie
postbus 439

4330 AK Middelburg

Inhoudsopgave

blz.

Overzicht figuren en tabellen

Inleiding

1

1. Beschrijving experiment

1.1. Inleiding

3

1.2. Plaats experiment

4

1.3. Beknopte technische beschrijving "enclosures"

4

1.4. Opzet experiment

5

2. Resultaten metingen

2.1. Het verloop van de diverse parameters in de tijd

6

2.2. Afsluitende experimenten

14

2.3. Algemene beschrijving

16

3. Massabalansen

3.1. Water- en chloridebalansen

17

3.2. Nutriëntbalansen

19

3.3. Foutenschatting in de massabalansen

20

3.4. Interpretatie resttermen massabalans

21

4. Nutriëntverhoudingen en primaire produktie

4.1. Nutriëntverhoudingen

26

4.2. Primaire produktie

29

5. Processnelheden

5.1. Inleiding

33

5.2. Turnover- en groeisnelheden

34

5.3. Mineralisatie en denitrificatie

36

5.4. De rol van Zoöplankton

40

5.5. Schatting invloed macrozoöbenthos op prim. prod.

42

Samenvatting

46

Lijst van gebruikte symbolen

Literatuurlijst

Overzicht bijlagen

Overzicht figuren en tabellen.

figuren:

1. Gemiddelde oppervlakteconcentraties Grevelingen
2. Netto belastingen Brouwerssluis
3. Schematisch overzicht enclosures
4. Schematisch overzicht experiment
5. Chloridegehalte Grevelingenmeer
6. Schematische opstelling gasafvang
7. Eenvoudig nutriëntenschema
8. Schema relatieve invloed macrozoöbenthos.

tabellen:

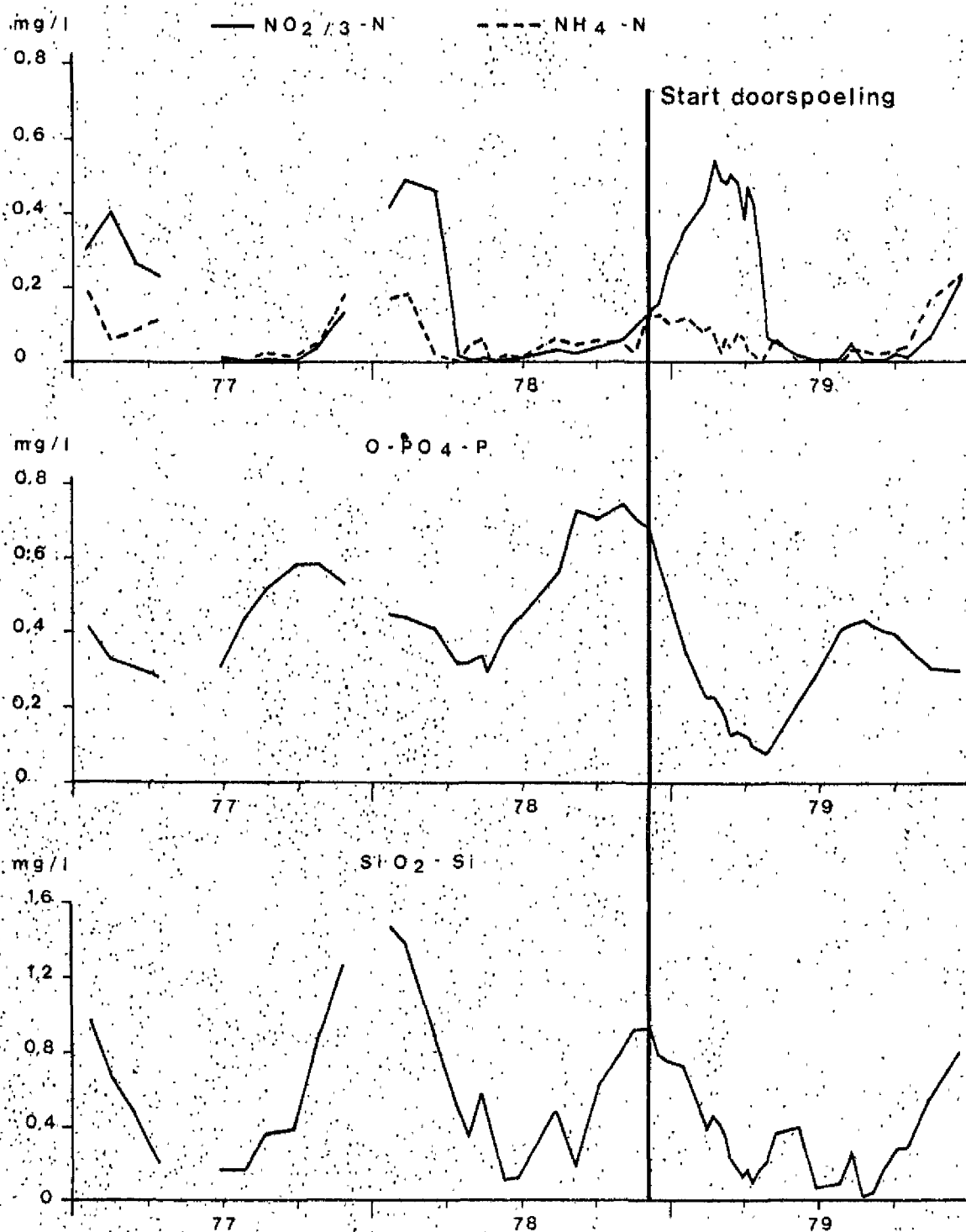
1. Gemiddelde chlorofylconcentraties
2. Resultaten gasanalyses
3. Beginvolumes reservoirs
4. Nutriëntgehalten in neerslag
5. (Bron/put) termen nutriëntbelansen
6. Fout in de gemiddelde neerslagconcentratie
7. Vergelijking B/p- met sedimentatieterm in ringen met dichte bodem
8. Gemiddelde gewichtsratio's van N_{part} , P_{part} , C_{part} en Chl-a in phyto-
plankton
9. N/P verhoudingen
10. Schatting zelfschaduwing fytoplankton
11. Significantiëgrenzen t.a.v. correlaties met de produktieparameters
12. Gemiddelde dagproduktie
13. Turnoversnelheden opgeloste nutriënten
14. Produktie en mineralisatie in de waterfase
15. Mineralisatie als percentage van de primaire produktie.

Inleiding.

Na afsluiting van het Grevelingenmeer d.m.v. de Brouwersdam bereikten jaarlijks zowel de opgeloste stikstof, silicium als fosfaatverbindingen omstreeks maart/april een minimum waarde. Deze minima zijn indicatief voor de voorjaarsbloei in het Grevelingenmeer (zie fig. 1).

Vanaf december 1978 wordt d.m.v. de Brouwerssluis het Grevelingenmeer doorgespoeld met zeewater.

Fig. 1. Gemiddelde oppervlakteconcentraties Grevelingen.



De voornaamste doelstellingen van deze verversingsoperatie zijn verhoging van het, sinds de afsluiting gedaalde, chloridegehalte tot boven de norm voor een optimaal semistagnant zout water ecosysteem ($[Cl^-] > 16 \text{ g } Cl^-/l$) en het inspoelen van nieuwe soorten organismen.

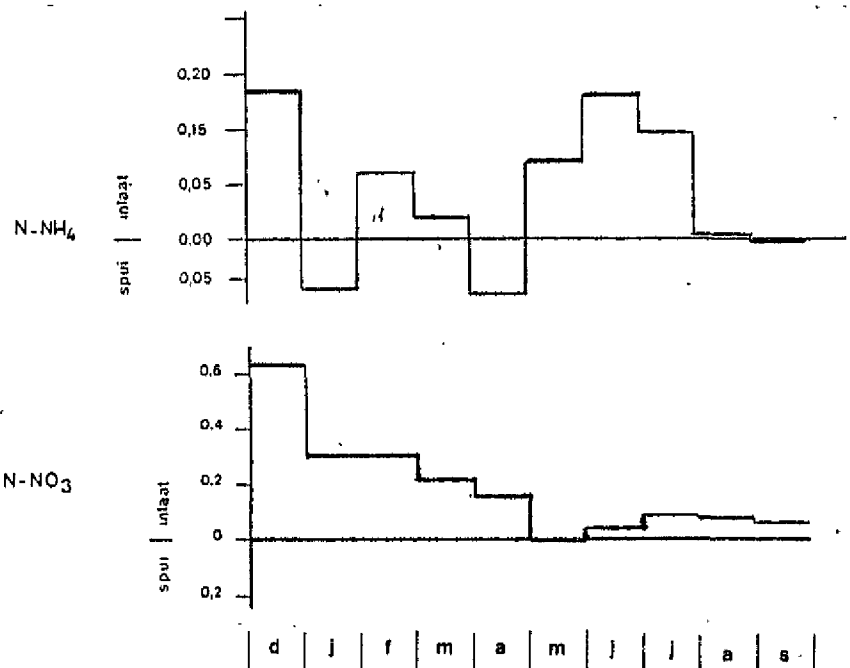
Door deze verversing met zeewater dalen vanaf 1978 de opgeloste silicium- en fosfaatconcentraties in het Grevelingenmeer, waardoor ook de minima tijdens de voorjaarsbloei lager worden. Een van de elementen waarmee het Grevelingenmeer extra belast wordt bij doorspoeling is stikstof. (zie fig. 2). De concentraties van de diverse stikstofverbindingen zijn in het kustwater meestal hoger dan in het Grevelingenmeer (lit. 16).

fig.2.

netto belastingen

Brouwersluis

(in $\text{g}/\text{m}^2/\text{maand}$)



Terwijl de primaire produktie in het Grevelingemeer relatief hoog is, zijn de fytoplanktonbiomassa's betrekkelijk laag. De indruk bestaat dat vooral stikstof en silicium (diatomeën) de groeisnelheid van fytoplankton limiteren (lit. 3). Verder lijkt een hoge mortaliteit en/of een sterke graas de biomassamaxima te beperken (lit. 11). Als stikstof de groeisnelheid van fytoplankton sterk limiteert, bestaat de mogelijkheid dat, bij inspoeling van stikstof door de Brouwersluis, deze groeisnelheid en mogelijk daardoor de fytoplanktonbiomassa zal stijgen.

De belangrijkste doelstellingen van dit experiment waren:

- het verkrijgen van een indruk van het effect van stikstofinspoeling

t.a.v. de biomassa en produktie van fytoplankton.

- het vinden van indicaties t.a.v. de oorzaak van de jaarlijkse fosfaatmobilisatie in het Grevelingenmeer.

Als deze mobilisatie in de enclosures niet optreedt is dit een aanwijzing voor fosfaatmobilisatie door zeegrasvelden en omgekeerd.

Dit onderzoek werd in opdracht van de Deltadienst Rijkswaterstaat uitgevoerd door de T.H. Twente.

1. Beschrijving experiment.

1.1. Inleiding.

Opsluiten van een waterkolom in een reservoir heeft voor de schatting van de invloed van processen die de fytoplanktongroei beïnvloeden een aantal belangrijke voordelen. Zo wordt het verschijnsel "patchiness": onregelmatige ruimtelijke verdeling van zowel fyto- als zoöplankton aanzienlijk gereduceerd en worden de afmetingen en complexiteit van het bestudeerde systeem verkleind. Bovendien kan in dergelijke "enclosures" op eenvoudige wijze met de omgeving gemanipuleerd worden (toevoeging nutriënten etc.).

Bij de constructie van deze "enclosures" werd zoveel mogelijk rekening gehouden met de nadelen van dergelijke enclosure-experimenten (lit.10):

- reductie van de mengkrachten: dit heeft invloed op de verticale en horizontale distributie van de ingesloten organismen, de bezinking van fytoplankton (detritus) en de snelheid waarmee nutriënten uit de bodem worden nageleverd.
- Beïnvloeding van de lichtsterkte binnen de reservoirs door reflectie en lichtabsorptie van de wand.

Om deze nadelen zoveel mogelijk te vermijden werd als voorwaarde aan de reservoirs gesteld, dat ze flexibel en lichtdoorlatend moesten zijn. Flexibel wil in dit geval zeggen dat van de aanwezige mengkrachten voldoende moet worden doorgegeven om een redelijke turbulentie binnen de enclosures te handhaven. Beïnvloeding van het lichtklimaat binnen de enclosures werd bovendien zoveel mogelijk voorkomen door de verhouding oppervlak/diepte relatief groot te kiezen, zodat het grootste gedeelte van het zonlicht direct (niet via de enclosurewand) in het ingesloten water doordringt.

- Slechte menging op macro-schaal: "patchiness" behoort ook tot het natuurlijke systeem.
- Moeilijkheden kunnen ontstaan bij extrapolatie van de resultaten naar het bekken zelf; dit wordt nog versterkt door de ondiepte van de gebruikte reservoirs.

1.2. Plaats experiment.

Omdat, voornamelijk vanwege de kosten en de eerder genoemde oppervlakte/diepte verhouding, de diepte van de enclosures gekozen is op slechts ca. 1 m moest voor de plaats een keuze gemaakt worden uit een van de ondiepe gebieden van het Grevelingenmeer. Deze ondiepe gebieden beslaan zo'n 25 à 30% van het totale Grevelingenoppervlak (zie bijlage 2).

Vanwege de beschutte ligging en de goede bereikbaarheid vanuit de werkhaven Bommenede werd gekozen voor plaatsing van de enclosures tussen twee zandplaten in het Grevelingenmeer:

De Grote en Kleine Stampersplaat (zie de bijlagen 1 en 3).

1.3. Beknopte technische beschrijving "enclosures" (Een uitgebreide technische beschrijving van de enclosures vindt u in lit. 13).

De enclosures bestaan uit reservoirs, gemaakt van een lichtdoorlatend plastic materiaal, met een diameter van 5.60 m. Deze reservoirs zijn een stuk boven het wateroppervlak via een flexibele ophanging bevestigd aan een drijfsysteem. Aan de bodem werd gezorgd voor een flinke overlap, zodat d.m.v. twee rijen zandzakken de enclosure kon worden gesloten. De flexibele ophanging en enige speling, die in het folie werd toegelaten, zorgden ervoor dat eventuele peilfluctuaties en windstoten konden worden opgevangen.

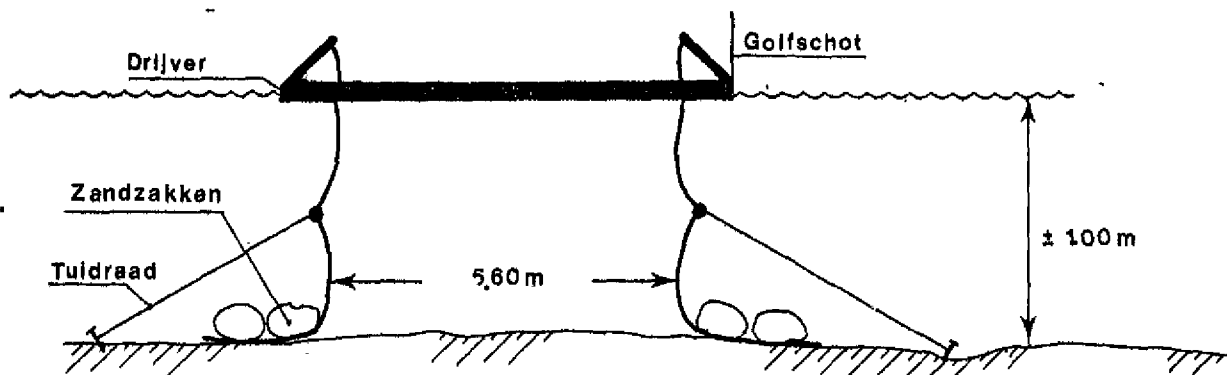


Fig. 3. Schematisch overzicht enclosure.

Na plaatsing van het eerste reservoir bleek dat extra bescherming nodig was, omdat het plasticfolie niet bestand was tegen de grote turbulentie die bij de toen heersende windsnelheid optrad. Dit gebeurde door het gebied te omringen met drijvende balken, die voor een belangrijke reductie van de golfbeweging aan het wateroppervlak zorgden. D.m.v. een verzwaringenkabel die in de reservoirs was aangebracht werden de reservoirs wat strakker opgetuid, zodat de kans op breuk (scheurtjes) door het voortdurend bewegen van de wanden kleiner werd.

Om extra bescherming tegen windinvloed en golfoverslag te krijgen werden in de loop van de tweede week van het experiment golfschotten op de drijfvingen geplaatst.

1.4. Opzet experiment.

Er werden vier enclosures geplaatst: twee met een natuurlijke bodem en twee met een bodem van plastic folie. Aan twee enclosures werd stikstof, in de vorm van NaNO_3 , toegevoegd, waarbij er naar werd gestreefd om de concentratie aan $\text{Nang} (= \text{N-NH}_3 + \text{N-NO}_3 / \text{NO}_2)$ op 0.5 p.p.m. te handhaven.

	Geen NO_3 additie	Wel NO_3 additie
Gesloten bodem	1	2
Open bodem	4	3

fig.4. Schematisch overzicht experiment.

Bemonstering van de reservoirs vond plaats op elke normale werkdag (+ 10u), daarbij werd ook het omringende Grevelingenmeer bemonsterd. Deze hoge meetfrequentie werd gekozen omdat een van de doelstellingen van het experiment was een schatting te maken van de optredende processnelheden.

De primaire produktie en lichtextinctie werden slechts éénmaal per week gemeten, (voor een beschrijving van het aantal bemonsterde parameters zie bijlage 4). Door het DIHO werden tijdens het experiment mineralisatiesnelheden gemeten (in principe 2 x per week, Goossens) en de wekelijkse zoöplanktonmonsters onderzocht. (Bakker-van Rijswijk)

2. Resultaten Metingen.

2.1. Het verloop van de diverse parameters in de tijd.

In de bijlagen 5 t/m 24 zijn de belangrijkste gemeten en afgeleide parameters als functie van de tijd uitgezet.

In deze paragraaf volgt hiervan een beknopte beschrijving.

- temperatuur (bijlage 5)

De temperatuur in de reservoirs en het omringende Grevelingenwater liep tijdens de meetperiode op van ca. 7°C tot ca. 16°C. De maximumwaarde in de ringen was ca. 19.5°C.

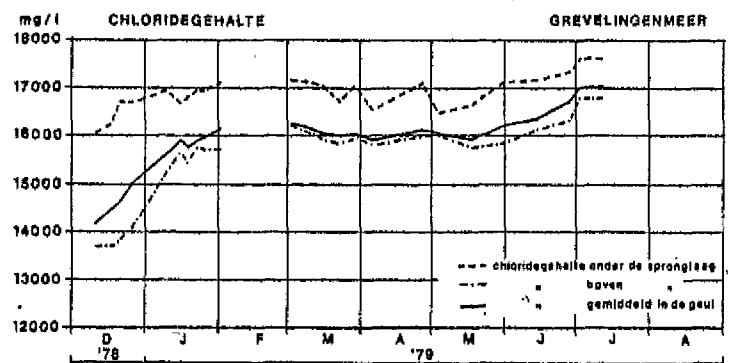
Tijdens een periode van snelle afkoeling (of opwarming) koelden de reservoirs wat sneller af (of warmden wat sneller op) dan het Grevelingenwater. De onderlinge verschillen waren echter zeer gering en het verschil met het Grevelingenwater werd niet groter dan 1 à 2°C.

- Chlorositeit (bijlage 6)

Door de geringe hoeveelheid neerslag steeg het chloridegehalte d.m.v. verdamping gedurende de eerste 10 weken van ca. 16500 p.p.m. tot ca. 18000 p.p.m., om door de overvloedige neerslag tijdens de laatste 5 weken weer snel te dalen tot ca. 16000 p.p.m..

Door de geringe diepte traden in de enclosures sterkere schommelingen in het chloridegehalte op dan in het Grevelingenmeer, maar de concentraties binnen de enclosures verschilden niet wezenlijk van concentraties die sinds de doorspoeling in het Grevelingenmeer worden gemeten. (zie fig.5). De verschillen tussen de reservoirs onderling worden voor een deel veroorzaakt door volumeverschil tussen de reservoirs (H3; tabel 3).

fig.5.
chloridegehalte
Grevelingenmeer.



- Chlorofyl-a (bijlage 7)

De chlorofylconcentratie wordt beschouwd als een maat voor de fytoplanktonbiomassa.

De chlorofylconcentraties in het bemonsterde Grevelingenwater zijn erg laag (maximum ca. 5.6 µg chl/l), hierin zijn ook geen duidelijke pieken te onderscheiden. In ring 1 en 4 (geen nutriëntadditie) zijn de chlorofylconcentraties hoger en zijn duidelijke pieken te onderscheiden. Maxima: ring 1 (dichte bodem) ca. 20 µg chl/l, ring 4 (open bodem) ca. 40 µg chl/l.

In ring 2 (stikstofadditie, dichte bodem) liep gedurende de eerste 6 weken de chlorofylcurve parallel aan ring 1 (geen stikstofadd, dichte bodem), vanaf week 7 werden veel hogere waarden gemeten, tot ca. 90 µg chl/l.

In ring 3 (stikstofadditie, open bodem) was gedurende de eerste 5 weken de ontwikkeling ook nagenoeg parallel aan de chlorofyl ontwikkeling in ring 4 (geen stikstofadditie, open bodem).

Vanaf week 6 werden echter weer veel hogere concentraties gemeten: tot hoger dan 150 µg/l. In tabel 1 wordt de respons van de gemiddelde chlorofylconcentratie tijdens het experiment op de gemanipuleerde omgevingsfactoren gegeven.

tabel 1. gemiddelde chlorofylconcentratie (µg/l).

geen stikstofadd. stikstofadd. respons op stikstof add.

Dichte bodem	5.3	20.6	15.3
Open bodem	15.7	49.4	33.7
Respons op bodem contact	10.4	28.8	

- Zuurgraad (bijlage 8)

Tengevolge van groei resp. afname van de fytoplankton biomassa en daarmee gepaard gaande stijging resp. daling van de primaire productie stijgt, resp. daalt de p.H. Het pH-verloop vertoont dan ook redelijke overeenkomst met het chlorofylverloop. De pH bereikt tijdens algenbloei waarden, die in het Grevelingenmeer niet gerealiseerd worden. Dit komt waarschijnlijk doordat de biomassa's beduidend hoger zijn, maar het is ook mogelijk dat, door verlaging van de turbulentie, de CO₂ uitwisseling met de lucht verminderd is. De hoge pH's in ring 2 en 3 kunnen ook door denitrificatie veroorzaakt zijn. Grootte orde fluctuaties:

ring 1	7.8 à 9.2
ring 2	8.2 à 9.7
ring 3	8.0 à 9.5
ring 4	7.5 à 8.8
Grevelingen	7.5 à 8.4

- Zuurstof (bijlage 9)

Tengevolge van primaire produktie stijgt het zuurstofgehalte tijdens groei van fytoplankton tot concentraties die veel hoger zijn dan de verzadigingsconcentratie, terwijl bij afname van de biomassa, tengevolge van mineralisatie, de zuurstofconcentratie aanzienlijk kan dalen. Daarom vertoont ook het zuurstofprofiel een goede overeenkomst met het verloop van de chlorofylconcentraties. Grootte orde fluctuaties:

ring 1	8 à 12 mg O ₂ /l
ring 2	9 à 16 mg O ₂ /l
ring 3	4 à 16 mg O ₂ /l
ring 4	6 à 13 mg O ₂ /l
Grevelingen	7 à 12 mg O ₂ /l

- Doorzicht

Vanwege de geringe diepte van de reservoirs is het niet mogelijk om elke meetdag m.b.v. een secchischijf het doorzicht te bepalen (secchiwaarde meestal groter dan 10 dm). Alleen tijdens extreem hoge fytoplanktonbloei in ring 2 en 3 was dit mogelijk, omdat toen door zelfschaduwning de lichtuitdoving enorm was toegenomen en de secchischijf op de bodem niet meer zichtbaar was.

Een nauwkeuriger maat voor het doorzicht zijn de wekelijkse extinctiemetingen.

- zwevend stof (bijlage 10)

Het zwevend stofgehalte vertoont zowel in als buiten de enclosures een nogal wisselend patroon. De hoogste concentratiepieken (ca. 50 p.p.m.) worden in de nitraatverrijkte reservoirs gevonden. Een significante correlatie met de windsnelheid (turbulentie) kon niet worden gevonden.

- Opgelost silicium (bijlage 11)

Terwijl in het Grevelingenmeer de concentratie aan opgelost silicium min of meer geleidelijk daalt van ca. 0.4 p.p.m. tot ca 0.1 p.p.m. komen in alle vier ringen (tijdens de ontwikkeling van een diatomeeënbloei) siliciumconcentraties voor die nagenoeg 0 zijn. Het is dan ook niet onwaarschijnlijk dat silicium tijdelijk een beperkende factor voor diatomeeënontwikkeling is geweest in de reservoirs. Opvallend is dat de start van de opgeloste silicium concentratie in ring 3 en 4 hoger is dan in ring 1 en 2, zelfs hoger dan in het Grevelingenmeer.

In ring 3 en 4 (natuurlijke bodem) treedt vanaf ca week 9 een forse stijging van het siliciumgehalte op (0-1 p.p.m.). De silicium concentraties in deze reservoirs worden dermate hoog t.o.v. de startwaarde in de reservoirs, dat waarschijnlijk alleen een nalevering vanuit de bodem

hiervoor verantwoordelijk kan zijn geweest.

- Ammonium N-NH₄ (bijlage 12)

In alle reservoirs daalt deze concentratie na de afsluiting van de enclosures tot niet detecteerbare concentraties. In ring 1 en 2 blijft deze concentratie nagenoeg 0. In ring 2 wordt het toegevoegde nitraat niet als NH₄ teruggevonden (evenals in ring 3) terwijl ook de afstervende biomassa's in ring 2 geen NH₄ verhoging geven.

In ring 3 en 4 worden hoge N-NH₄ concentratiepieken gemeten tengevolge van mineralisatie, dus meestal na afsterving van een hoge fytoplanktonbiomassa. Ook in het Grevelingenmeer wordt een significante N-NH₄ concentratie gemeten (0-0.15 p.p.m).

- NO₃/NO₂ (nitraat en nitriet) (bijlage 13)

In ring 1 en 4 dalen deze concentraties na de afsluiting van de enclosures tot nagenoeg 0 om niet meer significant te stijgen.

In het Grevelingenmeer daalt gedurende de eerst helft van de meetperiode de N-NO₃/NO₂ concentratie tot nagenoeg 0 om verder niet meer op te lopen.

In ring 2 en 3 is een sterk fluctuerende N-NO₃/NO₂ concentratie zichtbaar, dit komt door de nitraat-addities aan deze enclosures. Het streven bij deze nitraat-addities was om de Nangconcentratie (=N-NH₄+N-NO₃/NO₂) op 0.5 p.p.m te houden. Als een concentratie gemeten werd die kleiner was dan 0.5 p.p.m, dan werd de volgende dag nitraat toegevoegd. Deze toevoeging gebeurde echter na de monstername. Het vertoonde beeld is in feite dus nog veel grilliger omdat de onmiddellijke stijging van het nitraatgehalte na deze additie niet in de grafiek is opgenomen. Door de sterke dynamiek in de stikstofbehoefte was deze methode onvoldoende

om de gewenste concentratie aan Nang te handhaven.
Concentratiedalingen of -stijgingen van 0.5 p.p.m/dag
waren geen uitzondering.

- N totaal (bijlage 15)

In ring 1 en 4 daalt de totaal stikstofconcentratie in de eerste helft van het experiment (ring 1 van ca 0.75 p.p.m tot 0.5 p.p.m en ring 4 van ca. 0.9 p.p.m tot ca 0.7 p.p.m) om in de tweede helft van het experiment weer tot de oorspronkelijke waarde te stijgen.

In het Grevelingenmeer is gedurende het hele experiment een lichte daling in de totaalstikstofconcentratie waar te nemen.

In ring 2 en 3 komen sterke fluctuaties in het totaalstikstofgehalte voor, maar deze concentratie loopt gedurende het experiment op. Deze stijging lijkt slechts een klein gedeelte van de totale hoeveelheid toegevoegd stikstof te bevatten. Bovendien geldt ook voor de totaalstikstofconcentratie dat het beeld in feite veel grilliger is als men bedenkt dat pas na de dagelijkse monsternamen stikstofadditie plaatsvond.

- N organisch opgelost (bijlage 16)

Deze concentratie wordt bepaald als N tot F-Nang.

Voor ring 1, 4 en het Grevelingenmeer is deze concentratie tijdens het experiment nagenoeg constant (ca 0.4 p.p.m), terwijl in ring 2 en 3 (de stikstofgeëddeerde enclosures) een duidelijk stijgende tendens is waar te nemen. (0.4 tot ca 0.8 p.p.m). Van de stikstofverbindingen is de organische fractie meestal de grootste.

- Particulair stikstof Np (bijlage 17)

Deze fractie wordt bepaald als N tot -N tot F en is een maat voor de hoeveelheid organisch stikstof, die is

ingebouwd in zowel levend (fyto- en zoöplankton) als dood materiaal (detritus). Een goede correlatie bestaat tussen deze concentratie en de chlorofyl concentraties. De hoogste waarden (ca 1.6 p.p.m) worden dan ook in ring 2 en 3 gemeten.

- Orthofosfaat $O-PO_4$ (bijlage 18)

Na de afsluiting van de enclosures daalt in alle enclosures tijdens de 1e week deze concentratie tot nagenoeg 0.

In ring 1 wordt een, vrijwel constante, lage orthofosfaatconcentratie gemeten van ca. ≈ 0.03 p.p.m.

In ring 2 wordt tijdens het hele experiment geen significante fosfaatconcentratie meer gemeten.

In ring 4 loopt deze concentratie, na de aanvankelijke daling, weer op tot ca 0.1 p.p.m en blijft verder nagenoeg constant en tevens redelijk gelijk aan de concentratie in het Grevelingenmeer. In het Grevelingenmeer is tijdens het experiment een duidelijk stijgende tendens in de fosfaatconcentratie aanwezig (van ca 0.1 tot 0.25 p.p.m).

In ring 3 stijgt, na de aanvankelijke daling, de fosfaatconcentratie weer tot ca 0.1 p.p.m om daarna weer tot nagenoeg 0 te dalen.

Nadat dit gedurende week 6 t/m 8 zo blijft begint in week 9 een spectaculaire stijging van de orthofosfaatconcentratie, die doorgaat tot een waarde is bereikt van ca 0.7 p.p.m om vervolgens aan het eind van het experiment weer tot ca 0.2 p.p.m te dalen. Deze enorme concentratiestijging kan niet anders dan door een fosfaatnalevering uit de bodem verklaard worden.

- P tot:totaal fosfaat (bijlage 19)

Voor ring 1 en 2 vertoont dit concentratieprofiel veel overeenkomst met totaalstikstof. Tijdens de eerste helft van het experiment een lichte daling en tijdens de tweede helft een lichte stijging.

In ring 4 en in het Grevelingenmeer stijgt de totaalfosfaat concentratie voortdurend tijdens het experiment (van ca 0.1 tot 0.3 p.p.m).

In ring 3 is het spectaculaire $O-PO_4$ profiel in dit totaal-fosfaatprofiel terug te vinden.

- Organisch fosfaat Porg (bijlage 20)

Deze concentratie wordt weer bepaald als $p_{tot}^{F-O-PO_4}$ tot. Deze fractie is en blijft in de enclosures, evenals in het Grevelingenmeer op een, vrijwel constant, laag niveau. Alleen tijdens de orthofosfaatmobilisatie in ring 3 worden significante organisch fosfaatconcentraties berekend. (ca 0.1 p.p.m).

- Particulair fosfaat en koolstof p part en c part (bijlage 21 en 22)

Deze concentratieprofielen vertonen (evenals N part) een goede overeenkomst met de chlorofylprofielen in de reservoirs.

- Opgelost organisch koolstof D.O.C. (bijlage 23)

De D.O.C.profielen in de enclosures 1, 2 en 3 vertonen i.t.t. het Grevelingenmeer een stijgende tendens. Deze stijging is het grootst in de ring met de hoogste biomassa's (ring 3)

- Feofytine (bijlage 24)

Deze fractie is bepaald als totaal pigment-chlorofyl. Opvallend is dat de feofytine-profielen vooral de eerste weken sterk correleren met de chlorofylprofielen. Dit zou kunnen wijzen op een hoge sterftesnelheid van fytoplankton tijdens de eerste weken. Waarschijnlijk door ophoping van materiaal in de enclosures is deze correlatie op het eind van het experiment niet meer zichtbaar.

2.2 Afsluitende experimenten

Na afloop van het experiment werden nog een aantal afsluitende metingen verricht:

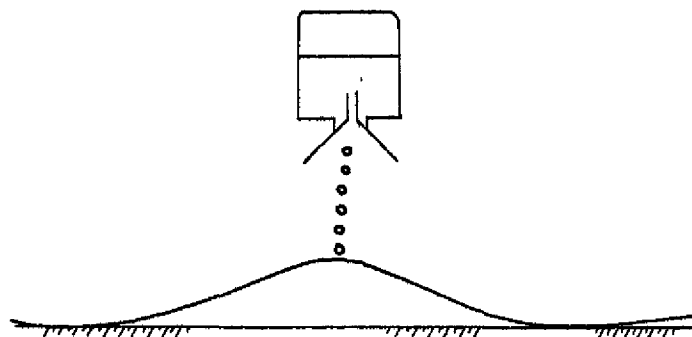
1. In ring 3, ring 4 en in het Grevelingenmeer werden een aantal sedimentmonsters genomen, waarin poriënwateranalyses werden uitgevoerd.
2. Geprobeerd werd om zowel kwalitatief als kwantitatief de hoeveelheid gesedimenteerd materiaal in de enclosures met een plastic bodem (ring 1 en 2) te bepalen.
3. Onder deze afgedekte bodem hadden zich gasbellen gevormd; de samenstelling van dit gas werd onderzocht.

- ad 1. De volgende sedimentmonsters werden in duplo genomen: ring 3; ring 4; Grevelingen vlak naast de enclosures en Grevelingen op 1 à 2 km afstand van de enclosures. Van deze sedimentmonsters werden poriënwateranalyses uitgevoerd. Bovendien werd het % koolstof van het sediment (uitgedrukt in nat en droog gewicht) gemeten door het DIHO. De resultaten zijn weergegeven in bijlage 25. Hierin zijn Grev. I en II vlak naast de enclosures en Grev. III en IV op enige afstand van de enclosures genomen. Grev. II wijkt af van de overige Grevelingenmonsters (zie redoxpotentiaal). Van de overige gegevens mag gezegd worden, dat de spreiding in de duplo's groter is dan de verschillen tussen de enclosures onderling. Deze grote spreiding in de poriënwatergehalten in de zandige Grevelingen bodem is reeds eerder aangetoond door Al en Holland (lit.1) en door Kelderman (lit.9). Alleen de verhoging van de pH in het poriënwater en de relatieve verhoging van de koolstofconcentratie van het sediment in ring 3 lijkt significant. Verder zijn t.a.v. de opgeloste nutriënten (SiO_2 ; O-PO_4 en

NO₃) de poriënwaterconcentraties, zeker plaatselijk, zo hoog t.o.v. de concentraties in de waterfase dat een positieve diffusie vanuit het sediment naar de waterfase tengevolge van een positieve concentratiegradiënt zeker niet denkbeeldig is. Dezelfde conclusie wordt voor het Brielse Meer en de Grote Rug door A.H.M. Hieltjes getrokken (lit. 7).

- ad 2. Vanwege het ontbreken van een pompsysteem, waarmee al het gesedimenteerde materiaal kwantitatief kon worden verzameld werd een andere methode van bemonstering gevolgd. Eerst werden de concentraties in de waterfase gemeten. Vervolgens werd voorzichtig een buis (diamater 24 cm) over het sediment geplaatst. Hierin werd door opwervelen van het bodemmateriaal getracht een homogene suspensie te verkrijgen. Door bemonstering van deze suspensie en de bepaling van de totaal stikstof en totaal fosfaatgehaltes hierin kon, door hier vervolgens het al in de waterfase aanwezige stikstof en fosfaat van af te trekken een schatting gemaakt worden van de hoeveelheid materiaal op de bodem van de reservoirs. Deze procedure werd in de ringen 1 en 2 enkele malen gevolgd. In een mengmonster werden vervolgens de concentraties gemeten. Ook is geprobeerd deze methode toe te passen door de hele ring op te wervelen. De resultaten van deze metingen staan vermeld in bijlage 26. In hoofdstuk 3, bij de bespreking van de massabalansen zal op de berekende hoeveelheden gesedimenteerde materiaal worden teruggekomen.
- ad 3. Onder het plastic folie vormden zich tijdens het experiment duidelijk zichtbare gasbellen, ten gevolge van anaerobe mineralisatieprocessen in het sediment. Om een indruk te krijgen van de optredende processen werd besloten van de gelegenheid gebruik te maken door een monster van het gas op zijn samenstelling te laten analyseren. De monstername vond plaats, door het verdringen door het gas van het water in een omgekeerde stopfles, voorzien van een trechter.

Figuur 6. Schematische opstelling gasafvang.



Twee duplo gasmonsters werden onderzocht door het D.I.H.O. en de T.H. Twente. Een probleem bij deze monsters was, dat nog wat water in de monsterflessen achterbleef, waarin H_2S , CO_2 en CH_4 oplosten. Terwijl tijdens de monsternamen H_2S duidelijk aanwezig was (reuk) werd dit zowel door het DIHO als de T.H. Twente niet meer in de gasfase aangetroffen.

Tabel 2. Resultaten gasanalyses.

	T.H. Twente	D.I.H.O.
CH_4	9 %	18%
CO_2	1,5%	-
N_2	88 %	-
waterdamp	1,5%	-

Het volledig verdwijnen van H_2S in de "kleine" waterfase zou echter toch kunnen betekenen, dat relatief weinig H_2S en CH_4 in het gasmonster aanwezig is t.o.v. N_2 , zodat denitrificatie een belangrijk proces lijkt t.o.v. b.v. anaerobe gisting.

2.3. Algemene beschrijving.

De fytoplanktonbiomassa's in alle reservoirs worden hoger dan de biomassa's in het Grevelingenmeer. De belangrijkste oorzaak hiervoor is de geringe diepte van de reservoirs: doordat het voor primaire produktie noodzakelijke licht exponentieel uitdooft in de diepte, zal de primaire produktie relatief groter zijn over de eerste meter water (reservoirs) dan over de gemiddelde Grevelingendiepte (+ 5.5 m). Ook het ontbreken van mosselen en andere macrozoöbenthossoorten binnen de enclosures zal een verschil veroorzaken. Het effect van de bodem blijkt uit de onderlinge verschillen tussen ring 1 en 4 en ring 2 en 3. De enclosures die in contact met de bodem zijn berei-

ken hogere fytoplanktonbiomassa's. Dit is te verklaren door aan te nemen dat mineralisatie door de bodemfauna een belangrijke rol speelt in de nalevering van, voor primaire produktie beschikbare, nutriënten. Bovendien bestaat de mogelijkheid van nalevering van nutriënten vanuit dieper gelegen sedimentlagen.

Een dergelijke nalevering blijkt ook daadwerkelijk, in de enclosures, op te treden, zoals blijkt uit de stijging van het opgelost silicium en totaal-fosfaat concentratie in de ringen 3 en 4.

Ook stikstofadditie blijkt verhoging van de fytoplanktonbiomassa ten gevolge te hebben (ring 2 t.o.v. ring 1 en ring 3 t.o.v. ring 4). Vooral de combinatie tussen bodemcontact en stikstofadditie leidt tot spectaculaire biomassa's (ring 3).

Afgezien van mogelijke silicium beperking voor de groei van diatomeën lijkt stikstof limiterend voor de omvang van de biomassa in het Grevelingenmeer. Pas na additie van stikstof wordt fosfaat limiterend voor de omvang van de biomassa (ring 2).

Ook bestaat de mogelijkheid van lichtlimitering door zelfschaduwing bij de ontwikkeling van hoge fytoplanktonbiomassa's in de stikstofgeëddeerde enclosures.

Opvallend is verder, dat van de toegevoegde hoeveelheden stikstof slechts een klein gedeelte in de totaal stikstof concentratie wordt teruggevonden.
(zie ook H3.)

3. Massabalansen.

3.1. Water en chloridebalansen.

Door o.a. het onregelmatige bodemprofiel is het moeilijk een redelijk nauwkeurige schatting van het in de enclosures ingesloten volume te maken.

Besloten werd om dit volume te berekenen op grond van de chlorideconcentratieveranderingen in de enclosures.

De waterbalans kent maar een invoer term: neerslag en een uitgaande term: verdamping. Omdat chloride zich gedraagt als een conservatieve stof (geen reacties) zal dit resulteren in resp. daling of stijging van het chloridegehalte.

Als neerslagcijfers werden de K.N.M.I. neerslagcijfers voor Brouwershaven gebruikt. Deze werden vermenigvuldigd met een door v.d. Meulen (lit.11)

geschatte correctiefactor van 1.15 om de onderschatting van, voor het Grevelingenmeer geldende, neerslagcijfers in rekening te brengen. Voor de berekening van de verdamping werd gebruik gemaakt van door het K.N.M.I. volgens de formule van Penman berekende verdampingscijfers voor Vlissingen. Het verdampingsproces in de enclosures wordt echter aanzienlijk beïnvloed door de constructie van de enclosures. Zo wordt door aftopping van de golven het fysische (verdampings)oppervlak verkleind en wordt, vooral door het plaatsen van de golfschotten op de drijfringen, de windsnelheid boven de enclosures aanzienlijk verlaagd. Een combinatie van deze factoren zal leiden tot een verdampingssnelheid die lager is dan voor het omringende Grevelingenwater. Bovendien blijkt voor grote en diepe meren, dat de berekening volgens Penman in het voorjaar te hoge waarden geeft en in het najaar te lage waarden; door onderschatting van de warmtecapaciteit van het meer (mondelinge mededeling ir. B. Brinkman, T.H. Twente).

Uit periodes waarvoor geldt, dat de chlorideconcentratie in de enclosures aan het begin gelijk is aan de chlorideconcentratie aan het eind van de beschouwde periode, kan deze factor worden afgeschat m.b.v. (De chlorideconcentratie in neerslag wordt verwaarloosd)

$$\text{neerslag} = fX (\text{verdamping}) \text{ Penman.}$$

Op deze manier wordt berekend $f = \frac{1}{2}$.

De berekende neerslag en verdampingswaarden worden gepresenteerd in bijlage 27. Vervolgens kunnen, per decade, de chloridebalansen worden doorgerekend.

Hiervoor is eerst een schatting nodig van het beginvolume van de enclosures.

Deze worden in bijlage 28 berekend m.b.v. de concentratie veranderingen aan chloride m.b.v. $V_1 = \frac{x \cdot O \cdot C_1}{C_2 - C_1}$ hierin is x = verd-neerslag

O = oppervlak ringen; C_1 = chlorideconc. op 11/4

C_2 = chloride concentraties op het beschouwde tijdstip.

Als startdatum wordt 11/4 gekozen, dit is de datum waarop de golfschotten geplaatst zijn, zodat vanaf deze datum de kans op fouten in de massabalansen door golfoverslag nihil is. De volgende beginvolumes worden berekend:

Tabel 3. Begin volumes reservoirs

ring 1	ring 2	ring 3	ring 4
29.0 m ³	30.4 m ³	26.8 m ³	36.2 m ³
+ 6.7	+ 4.8	+ 2.8	+ 6.1

Opvallend is hierbij vooral de hoge waarde van het ingesloten water-volume voor reservoir 4.

Deze closure is enkele dagen eerder, bij een hoger waterpeil, geplaatst, zodat relatief meer water is ingesloten.

Uitgaande van deze beginvolumina is het chlorideverloop in de enclosures berekend en vergeleken met de gemeten waarden (zie bijlage 29 t/m 32).

Hierbij is vooral opvallend, dat de gemeten chlorideconcentraties na hevige regenval veelal lager zijn dan de berekende chlorideconcentraties. Deze afwijkingen zijn significant t.o.v. de meetfout in de chlorideconcentratie.

3.2. Nutriëntbalansen.

De externe belansen voor de verschillende nutriënten zijn erg eenvoudig, omdat geen uitgaande termen in de massabalansen aanwezig zijn.

De ingaande termen zijn de nutriëntbelasting door neerslag en uiter-aard voor N-ang en N-totaal van ring 2 en 3 de stikstof addities.

Verder geldt:

$$\frac{dcv}{dt} = \frac{OxCN}{V} + \frac{M}{V} \pm (B/p)$$

Hierin is de (B/p) term een resultante van de interne processen zoals sedimentatie; mineralisatie en produktie (zie H 4).

Voor de nutriëntconcentraties van neerslag zijn de waarden, vermeld in het rapport van v.d. Meulen (lit. 11), gebruikt.

Tabel 4. Nutriëntgehalten in neerslag (v.d. Meulen, lit. 11).

N - NH ₄ ⁺	1,45 g N/m ³
N - NO ₃ ⁻	0,79 g N/m ³
N tot.	3,00 g N/m ³
P tot.	0,14 g P/m ³
P -PO ₄ ³⁻	0,06 g P/m ³
Si-SiO ₂	0,12 g Si/m ³

T.o.v. de accumulatietermen zijn de nutriënttoevoegingen door neerslag gering.

De resulterende Bron/put termen zijn grafisch weergegeven in de bijlagen 33 t/m 38.

In bijlage 39 zijn de toegevoegde hoeveelheden stikstof en de (Bron/put) term voor totaal stikstof tegen de tijd uitgezet. De onderlinge correlatie is erg duidelijk. Over de hele meetperiode is van de toegevoegde hoeveelheid stikstof ca. 87% verdwenen, de overige 13% is deels omgezet in particulier stikstof en wordt ook gedeeltelijk in de organische stikstof-fractie teruggevonden. In tabel 5 zijn de Bron/put/termen op de diverse balansen voor de reservoirs over het hele experiment (15 weken) samengevat. Tussen haakjes is de gemiddelde hoeveelheid materiaal van het reservoir ter vergelijking opgenomen.

Tabel 5. (Bron/put) termen (mg).

	ring 1	ring 2	ring 3	ring 4
B/p N ang	-9.993(1.701)	-325.626(13688)	-340.627(13.079)	-19.058(4.978)
B/p N tot.	794(17.014)	-298.820(45.528)	-295.595(45.775)	- 7.511(31.290)
B/p N part.	5.747(5.104)	18.343(16.961)	31.471(17.787)	13.341(11.734)
B/p N org.	7.465(10.776)	11.160(16.664)	15.970(17.002)	630(15.290)
B/p O-PO ₄	- 483(851)	- 799(595)	13.417(5.231)	5.220(2.845)
B/p P tot.	- 459(2552)	2887(3273)	20.892(9.286)	8.926(6.756)
B/p P part.	861(1134)	3943(2380)	3.198(3.662)	4.325(3.520)
B/p P org.	- 583(567)	- 51(595)	1.600(1.308)	- 366(1.067)

Een controle op deze massabalans is te verkrijgen door de (Bron/put) term voor de totale hoeveelheid nutriënt (N en P) gelijk te stellen aan de som van de (Bron/put) termen van de organische, anorganische en particuliere nutriëntconcentraties.

3.3. Foutenschatting in de massabalansen.

In bijlage 40 zijn voor de diverse nutriëntconcentraties de fouten in de verschillende balanstermen en in de resulterende (Bron/put) term geschat voor het totale experiment en per decade. Deze fouten zijn als volgt berekend:

- Foutenschatting in stofstromen t.g.v. neerslag.

Deze fouten zijn geschat m.b.v. lit. 11.

Tabel 6. Fout in de gemiddelde neerslagconcentratie (bij een 95% betrouwbaarheidsinterval).

Variabele	$2 \sigma_m$ g/m ³
P -PO ₄ ³⁻	0.02
P tot.	0.02
N mineraal	0.26
N tot.	0.26

Over de gehele meetperiode kan de fout in de stofstroom t.g.v. neerslag berekend worden met:

$\Delta N = 2 \sigma_m \cdot \Phi$. Hierin is Φ de hoeveelheid neerslag tijdens de hele meetperiode.

De fout per decade in deze stofstroom wordt dan

$$n = \frac{1}{\sqrt{10}} (2 \sigma_m \cdot \Phi) \quad (10 \text{ decades})$$

Foutenschatting in de accumulatieterm.

In bijlage 40 zijn de geschatte meetfouten (mF) in de diverse variabelen gegeven.

De fout in de schatting van de massa aan het begin of eind van een decade = $V \times m F$

De totale fout in de accumulatieterm ($V_2 C_2 - V_1 C_1$) wordt dan per decade $\approx \sqrt{2} \cdot \bar{V} \times m F$

De fout in de berekende accumulatie over het gehele experiment is ook $\sqrt{2} \cdot \bar{V} \cdot m F$ omdat deze uiteraard ook maar van 2 concentraties afhankelijk is. Om een 95% betrouwbaarheidsinterval te verkrijgen wordt weer 2x deze standaardafwijking gebruikt.

Foutenschatting in de stofstroom tengevolge van N-additie.

De fout in de totale hoeveelheid toegevoegd stikstof tengevolge van N-additie is geschat op ca. 1% van deze hoeveelheid. Deze fout werkt door zowel in de N totaal als in de N ang balans.

De fout per decade wordt weer als volgt berekend:

$$\frac{1}{\sqrt{10}} \times \Delta \text{ add.}$$

Foutenschatting in de (Bron/put)term.

Deze fout kan nu uit de afzonderlijke fouten berekend worden m.b.v.:

$$f \text{ (Bron/put)} = \Delta_{\text{acc.}}^2 + \Delta_{\text{add.}}^2 + \Delta_N^2$$

3.4. Interpretatie resttermen massabalans.

De enorme puttermen op de N ang. en N tot. belansen in ring 2 en 3 kunnen niet verklaard worden door sedimentatie alléén. Als b.v. in ring 2 de totale N totaal-put door sedimentatie zou zijn verdwenen, dan had de verhouding (N/p) in dit sediment vele malen groter moeten zijn dan de verhouding (5, 6:1) die aan het eind van het experiment bepaald is (zie bijlage 26). De enige aannemelijke verklaring is dat het over-

grote deel van deze stikstofput verdwijnt door denitrificatie, zowel in reservoir 3 als in reservoir 2.

Denitrificatie is echter een proces, dat slechts onder anaerobe omstandigheden optreedt: de rol van zuurstof als electronenacceptor wordt door nitraat overgenomen, daarbij ontwijkt stikstof in de vorm van N_2 . Omdat in de waterfase, zowel in ring 2 als 3 de zuurstofconcentratie erg hoog is, is denitrificatie in de waterfase niet aannemelijk. Ook het ontstaan van anaerobe micromilieu's in zwevende deeltjes lijkt bij deze hoge zuurstofconcentraties niet mogelijk. Heide en Krulze (lit. 6) hebben berekend dat in het centrum van actief slib deeltjes van 1 mm de zuurstofconcentratie pas 0 wordt als de zuurstofconcentratie in het water daalt tot ca. 0.5 p.p.m.

Daarom kan, in reservoir 3, alleen het anaerobe sediment voor deze denitrificatie verantwoordelijk zijn. Dit is in overeenstemming met het feit dat de sedimentmonsters van ring 3 geen geoxideerde laag bezitten. Voor de denitrificatie in reservoir 2 lijkt de enige aannemelijke verklaring, dat een anaeroob milieu is ontstaan, tijdens het experiment, in het op de plastic onderlaag bezonden sediment. Ook de stijging van de denitrificatiesnelheid met de tijd wijst in deze richting, maar dit zou ook een temperatuureffect kunnen zijn. Bovendien is het mogelijk dat 's nachts de zuurstofconcentratie door algenrespiratie erg laag is; maar dat de zuurstofconcentratie op het tijdstip van meten weer gestegen is dankzij de primaire produktie.

Onder de aanname dat de bepaling van de hoeveelheid gasedimenteerd materiaal in de reservoirs 1 en 2 kwantitatief gelukt is, zal deze hoeveelheid gelijk moeten zijn aan de (B/P) term voor totaal nutriënt.

Tabel 7. Vergelijking B/p- met sedimentatieterm in ringen met dichte bodem (afgezien van denitrificatie). mg

	N tot. ring 1	P tot. ring 1	N tot. ring 2	P tot. ring 2
-(B/p)	- 794	459	(+ 298.820)	- 2.887
sedimentatie	24.700	4.400	53.000	9.100

Deze termen stemmen echter niet met elkaar overeen. Een oorzaak zou kunnen zijn, dat de massabalans over de 1e week van het experiment (zonder golfschotten) de totale massabalans nog aanzienlijk beïnvloedt, immers vlak na de afsluiting van de enclosures dalen de concentraties aan N tot. en P tot. tengevolge van sedimentatie, omdat de mengkrachten aanzienlijk worden gereduceerd.

Deze dalingen zijn echter niet groot genoeg, om de grote hoeveelheid gesedimenteerd materiaal, die aan het eind van het experiment op de bodem wordt gevonden, geheel te verklaren.

Onder de aanname, dat de bepaling van de hoeveelheid gesedimenteerd materiaal aan het eind van het experiment kwantitatief goed is geweest en uiteraard, onder de aanname dat geen lek van de enclosures is opgetreden, is de enige aannemelijke verklaring dat tijdens de opbouw van het experiment een hoeveelheid sediment op de bodembedekking van ring 1 en 2 is terechtgekomen.

Als we aannemen dat voor ring 3 en 4 mineralisatie door de bodem-sedimentatie verwaarloosbaar is t.o.v. de fosfaatnalevering, dan kunnen we deze fosfaatnalevering berekenen uit de (B/p) term voor P tot. van deze ringen.

Dit geeft:

$$\begin{aligned} \text{Ring 3: Naleveringssnelheid} &= \frac{(B/p)}{O_{\text{bod.}} \times t} \\ &= \frac{20.892}{24.6 \times 10^5} = \frac{8.1 \text{ mg}^P/\text{m}^2 \text{ dag}}{\text{=====}} \approx 3.0 \text{ g P/m}^2 \text{ jaar} \end{aligned}$$

$$\text{Ring 4: Naleveringssnelheid} = \frac{8.926}{24.6 \times 10^5} = \frac{3.5 \text{ mg}^P/\text{m}^2 \text{ dag}}{\text{=====}} \approx 1.3 \text{ g P/m}^2 \text{ jaar}$$

Dit is de gemiddelde naleveringssnelheid voor fosfaat gedurende het gehele experiment.

Op dezelfde manier kan de maximale naleveringssnelheid voor fosfaat berekend worden uit de grootste stijging van de totaalfosfaatconcentratie: Dit geeft:

Voor ring 3 (periode (21/5 - 18/6):

Toename fosfaat = 0.82 - 0.13 = 0.69 p.p.m.

$$= 0.69 \text{ g}^P/\text{m}^2$$

$$\begin{aligned} \text{diepte } + 1 \text{ m} &=> 0.69 \text{ g P/m}^2 \\ 24.6 \text{ mg P/m}^2 \text{ dag} &\approx 9.0 \text{ g P/m}^2 \text{ jaar} \end{aligned}$$

Ring 4: (28/5 - 14/7)

toename fosfaat $0.16 - 0.36 = 0.20$ p.p.m.

maximale toename = $4.2 \text{ mg P/m}^2 \text{ dag} \approx 1.5 \text{ g P/m}^2 \text{ jaar}$.

Dat in ring 3 en 4 een duidelijke fosfaatmobilisatie is opgetreden, die voor ring 4 (zonder N-additie) vrijwel gelijk was aan de fosfaatmobilisatie in het Grevelingenmeer is een aanwijzing dat fosfaatmobilisatie anders dan door zeegrasvelden in principe mogelijk is. In de enclosures 3 en 4 zijn de omgevingsvariabelen echter duidelijk veranderd t.o.v. het Grevelingenmeer, zodat deze fosfaatmobilisatie ook door b.v. een extreem hoge pH kan zijn veroorzaakt. Bij een hoge pH wordt de binding Fe-PO_4 in het sediment zwakker, waardoor fosfaat aan het bovenliggende water wordt afgestaan; Bij verdere stijging van de pH (week 13) tot waarden > 9 kan precipitatie van CaCO_3 optreden waaraan fosfaat geadsorbeerd kan worden. Dit is een mogelijke verklaring voor het weer dalen van de fosfaatconcentratie in de waterfase in week 13 (zie lit. 7). Ook het ontstaan van een anaëroob milieu in het sediment zou een oorzaak van de fosfaatmobilisatie kunnen zijn, omdat onder anaërobe omstandigheden fosfaatmobilisatie veel sneller verloopt. Een aanwijzing hiervoor is het dalen van de zuurstofconcentratie in het bovenstaande water (van 16 naar $4 \text{ mg O}_2/\text{l}$), bovendien komt in deze periode veel organisch materiaal op het sediment terecht, dat voor zijn afbraak (mineralisatie) zuurstof behoeft. Een derde mogelijkheid is dat uiterst lage O-PO_4 concentraties in de waterfase (week 7 en 8) door een sterke concentratiegradiënt fosfaatanalevering mogelijk maakt. Deze nageleverde O-PO_4 wordt via primaire produktie omgezet in particulier fosfaat, zodat de concentratie van O-PO_4 in de waterfase weer daalt.

Hierdoor wordt de concentratiegradiënt weer groter.

De fosfaatanalevering zou op deze manier beschreven kunnen worden als een door reactie versneld diffusieproces. Door de onderlinge samenhang van veel parameters is het echter moeilijk om m.b.v. dit experiment het mechanisme van de fosfaatanalevering op te helderen. Hiertoe lijken meer doelgerichte experimenten noodzakelijk.

Als we weer aannemen dat op de totaalstikstofbalans voor ring 2 en 3 de resultaten van de overige processen verwaarloosbaar zijn t.o.v. de

denitrificatie dan kunnen we voor ring 2 en 3 een schatting maken van de optredende denitrificatiesnelheid:

$$V_{den} = \frac{(B/p) / N_{tot.}}{O \times tijd} = \frac{300.000}{24.6 \times 115} \approx 100 \text{ mg N/m}^2 \text{ dag.}$$

In lit. 8 vinden we denitrificatiesnelheden voor natuurlijke sedimenten: 3-130 mg N/m² dag.

Als we aannemen dat dit denitrificatieproces een 1e orde proces is voor de N ang concentratie, dan lijkt de bij deze hoge N ang concentraties gemeten denitrificatiesnelheid redelijk.

4. Nutriëntverhoudingen en primaire productie.

4.1. Nutriëntverhoudingen.

Chlorofyl -a wordt beschouwd als een maat voor de fytoplanktonconcentratie.

Een indruk van de concentraties aan stikstof, fosfor en koolstof in fytoplankton kan men verkrijgen door de particulaire concentraties van de nutriënten te correlleren met de chlorofylconcentraties. Dit is gebeurd in bijlage 41. In deze bijlage zijn tevens de onderlinge correlaties tussen de nutriënten N, P en C berekend voor de verschillende reservoirs.

Vooraf in de correlaties met chlorofyl worden significante asafsneden gevonden. Deze asafsnede is te verklaren door deze bijdrage aan particulier materiaal toe te schrijven aan zoöplankton en detritus.

$$(NU_p)_{tot} = (NU_p)_F + (NU_p)_Z + (NU_p)_D$$

Als we de gemeten feofytine concentraties beschouwen als een maat voor de hoeveelheid detritus, dan zou een multiple correlatie tussen particulier nutriënt en chlorofyl en feofytine betere correlaties moeten geven en kleinere asafsneden. De resultaten zijn vermeld in bijlage 42. Zowel de correlaties als de asafsneden werden niet significant verbeterd. Ook de grote standaardafwijkingen in de verhouding tussen particulier materiaal en feofytine wijzen hier op. Een verklaring hiervoor moet vooral worden gezocht in de sterke onderlinge correlatie tussen chlorofyl en feofytine, zodat een belangrijk deel van de feofytine (detritus)

bijdrage in de chlorofylbijdrage wordt meegerekend. De niet significantie van de berekende correlaties van de particulaire nutriënten met chlorofyl voor het Grevelingenmeer kan worden verklaard door de uiterst geringe biomassa's (chlorofylconcentraties) in Het Grevelingenmeer. De overige correlaties zijn voldoende om de nutriëntverhoudingen in algen af te schatten (overschrijdingskans $< 10^{-3}$)

Tabel 8. Gemiddelde gewichtsratio's van N part, P part, C part en chl-a.

ratio's	Strickland	ring 1	ring 2	ring 3	ring 4
N part/P part	7	3.8	7.0	5.3	2.7
N part/C part	0.12-0.25	0.14	0.19	0.14	0.11
P part/C part	0.018-0.040	0.026	0.023	0.023	0.036
N part/chl-a	3.7 - 7.5	10	14	7	9
P part/chl-a	0.5 - 1.2	1.9	1.5	1.0	2.7
C part/chl-a	30	70	57	31	33

Opvallend is, dat de onderlinge nutriëntverhoudingen goed met de literatuurwaarden (lit. 17) volgens Strickland overeenkomen, maar dat voor ring 1, 2 en 4 de verhoudingen tussen particulier nutriënt en chl-a be-
duidend hoger zijn. Dit is te verklaren door de geringe diepte van de
reservoirs, waardoor relatief veel licht voor fytoplankton beschikbaar is.
Het ontwikkelen van minder chlorofyl/alg is een adaptatie aan deze hoge
lichtintensiteiten. Dat dit in ring 3 niet wordt waargenomen is een gevolg
van de hoge extinctiewaarden die, door zelfschaduw, in dit reservoir
voorkwamen, waardoor relatief minder licht beschikbaar kwam.
Deze afhankelijkheid van de chlorofylinhoud van fytoplankton van de inge-
straalde hoeveelheid licht maakt chlorofyl tot een minder bruikbare
parameter ter beschrijving van het dynamisch gedrag van fytoplankton.
Deze afhankelijkheid werd eerder onder meer aangetoond in lit. 18.
Het al dan niet optreden van nutriëntlimitering wordt vooral weer-
spiegeld in de verhouding van de opgeloste nutriënten (zie tabel 9).

Tabel 9. N/p verhoudingen.

plaats	NP/pp particulair	N-N _{org} /P-O-PO ₄ opgelost	N-tot/P-tot totaal	limitering
ring 1	3.8	1.7	7.1	N
ring 2	7.0	31.8	18.8	P/licht
ring 3	5.3	5.7	6.5	licht
ring 4	2.7	2.0	5.2	N

In feite is de snelheid waarmee opgeloste nutriënten beschikbaar komen (mineralisatie of nalevering) van belang. Toch zien we dat het beeld dat we hadden op grond van de onderlinge verhouding tussen de particulaire nutriënten hierin wordt teruggevonden. De waarden van N tot/P tot worden beïnvloed door het aanwezig zijn van een aanzienlijke fractie organische stikstof.

In de bijlagen 43 t/m 48 is het verloop van de nutriëntverhoudingen met de tijd zichtbaar. Deze curven zijn vaak erg grillig. Dit komt omdat de fout in deze verhouding groot is: De meetfout in de particulaire concentraties is vrij groot, omdat het een verschil is van twee gemeten parameters, zodat bij deling van twee particulaire nutriëntconcentraties de fout erg groot wordt. Het is dan ook moeilijk om bepaalde tendensen in de ontwikkeling van deze verhouding op te sporen. Alleen de volgende tendensen lijken significant:

Voor ring 2 stijgen de N part/P part en N part/C part verhoudingen met de tijd; voor ring 4 is een in de tijd dalende N part/P part verhouding zichtbaar.

Een aanwijzing voor stikstoflimitering zijn de lage N part/P part verhoudingen voor ring 1, ring 4 en Het Grevelingenmeer en bovendien de lage N part/C part verhoudingen in ring 4 en in het Grevelingenmeer.

De hoge N part/P part verhouding in ring 2 is een aanwijzing voor adaptatie van het fytoplankton aan de uiterst lage O-PO₄ concentraties. Deze bewering wordt gesterkt door de stijgende tendens in deze verhouding. Deze

adaptatie samen met $O-PO_4$ toevoer d.m.v. neerslag is een mogelijke verklaring voor de hoge biomassa's die in ring 2 tijdens de laatste weken van het experiment gerealiseerd werden.

Ook de N part/chl-a verhouding in ring 2 is significant hoger dan in ring 1 en 4. Dat dit niet geldt voor ring 3 komt waarschijnlijk door de eerder beschreven relatief hoge chlorofylgehalten in dit reservoir. (zie tabel 8).

4.2. Primaire productie.

Gecombineerd met de C_{14} productiemetingen werden lichtextincties in de enclosures en in het omringende Grevelingenwater gemeten. De resultaten van deze metingen staan vermeld in bijlage 49.

Opvallend zijn de hoge extinctiewaarden, die in ring 2 en 3, door zelfschaduw, bereikt worden tijdens hoge biomassaniveaus.

In de literatuur wordt de extinctie vaak opgesplitst in een deel veroorzaakt door zelfschaduw en een achtergrondextinctie, veroorzaakt door het water zelf en de overige gesuspendeerde deeltjes.

$$k_e = k_o + \alpha \cdot A$$

met k_o = achtergrondextinctie

α = specifieke extinctie per biomassa-eenheid

A = biomassa-eenheid

Voor α wordt in de literatuur gevonden : $\alpha = 0.017 \text{ m}^{-1}/\mu\text{g Chl-a}$

Door correlatie van de gemeten extinctiewaarden met de gemeten chlorofyl-a waarden is deze zelfschaduwingsfactor te schatten. zie tabel 10.

Tabel 10.

Schatting zelfschaduw.

	r^2	n	P
$k_e = 0.92 + 0.038 \text{ Chl-a}$	0.575	34	0.001
$k_e = 0.39 + 0.535 \text{ C part}$	0.830	34	0.001
$k_e = 0.42 + 0.112 \text{ zw. stof}$	0.624	35	0.001
$k_e = 1.10 + 0.021 \text{ tot. pigm.}$	0.460	35	0.001

Opvallend is, dat, vooral de vorrelatie tussen C part en de extinctiecoëfficiënt, veel beter is dan de correlatie tussen chlorofyl en de extinctiecoëfficiënt. Bovendien is de asafsnede veel kleiner. Dit is te verklaren door ook de invloed van detritus en zoöplankton op deze lichtextinctie in beschouwing te nemen. De primaire produktie werd in het laboratorium gemeten m.b.v. de C_{14} -methode. Bij het uitzetten van de primaire produktie tegen de lichtintensiteit blijkt de vorm van de curve's nogal opvallend. Inhibitie van de produktieactiviteit bij hoge lichtintensiteiten komt niet of nauwelijks voor, terwijl dit bij het dieper routine meetpunt in het Grevelingenmeer G 11 wel regelmatig gemeten wordt. Dit is weer een aanwijzing voor adaptatie van het fytoplankton aan de hoge lichtintensiteiten in de reservoirs. Omdat het bij de gevonden primaire produktie curven (z.g. verzadigingscurven) vaak moeilijk is I opt te bepalen wordt de functie die de primaire produktie beschrijft als functie van de lichtintensiteit het best gekarakteriseerd door de initiële helling en P opt. Vandaar dat P opt beter correleert met de initiële helling dan met I opt (tabel 11). Een temperatuureffect voor P opt en I opt zoals dat b.v. gegeven wordt door Eppley (lit. 22)

$$P_{opt}(t) = \exp (0.0633T - 0.16)$$

blijkt slechts afwisselend voor P opt en I opt te bestaan.

Tabel 11. Significantiëgrenzen t.a.v. correlaties met de productieparameters.

Correlatie	ring 1	ring 2	ring 3	ring 4	Grev.
$P_{opt} // \text{init. helling}$	<0.001	<0.01	N.S.	<0.001	<0.001
$P_{opt} // I_{opt}$	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.
$P_{opt} // T(\ln)$	N.S.	<0.01	N.S.	<0.001	<0.02
$I_{opt} // T(\ln)$	<0.05	N.S.	<0.001	N.S.	<0.05

Bij de berekening van de dagtotalen van de primaire productie zoals uitgezet in bijlage 50 is van de beschikbare gegevens zoveel mogelijk gebruik gemaakt. Voor elke meetdag werd de primaire productie berekend m.b.v. de instralingsgegevens (Bommenede); de gemeten chlorofylgehalten en de geïnterpoleerde productieparameters. De extinctiecoëfficiënt k_e werd berekend m.b.v. de goede correlatie tussen C_{part} en k_e . De resultaten van deze berekening t.a.v. de gemiddelde dagproductie zijn vermeld in tabel 12.

Tabel 12. Gemiddelde dagproductie.

Productie (mg c/m ² dag)	ring 1	ring 2	ring 3	ring 4	Grevelingen
m.b.v. week gegevens	254	1162	1146	1037	109
m.b.v. dag- gegevens	246	1246	2032	1040	141
Verskil (%)	3	7	77	1	29

In deze tabel zijn ook de gemiddelde producties berekend op grond van de wekelijkse metingen vermeld.

Opvallend is vooral het grote verschil bij ring 3, waarschijnlijk omdat biomassa en productie in dit reservoir een erg dynamisch karakter hadden.

De verhouding tussen gemiddelde productie en gemiddeld chlorofylgehalte blijkt redelijk constant (52 ± 10.5) d.w.z. het verschil in productie tussen de reservoirs is hoofdzakelijk toe te schrijven aan het verschil in biomassa.

Nutriëntlimitering bleek niet aantoonbaar door correlatie van de productieparameters met de diverse nutriëntconcentraties. Een mogelijke oorzaak hiervoor is het vroege tijdstip waarop productiemonsters genomen werden (± 10 u 's morgens), terwijl het optreden van nutriëntlimitering vaak pas op het eind van de middag plaatsvindt (zie b.v. lit. 18). De 's morgens aanwezige hoeveelheid nutriënt wordt door de hoge productie rond het middaguur verbruikt, zodat deze nutriënt limiterend wordt. 's Nachts is er geen productie, maar blijft de nalevering van opgeloste nutriënten d.m.v. mineralisatieprocessen op gang, zodat 's morgens weer een geringe, maar voorproductie voldoende, hoeveelheid aanwezig is.

5. Processnelheden.

5.1. Inleiding.

In bijlage 51 is een schema voor de nutriëntenhuishouding van de enclosures opgenomen. Dit schema is een vereenvoudiging van het schema gebruikt door v.d. Meulen (lit. 12).

Dit schema is naast een aantal meer algemene aannamen gebaseerd op de volgende aannamen:

- De binnen de enclosures aanwezige mengkrachten zijn voldoende om een homogene menging van de waterfase te handhaven.
- Atmosferische stikstoffixatie komt in het zout Grevelingenwater (geen blauwalgen) niet voor en is dus niet in het schema opgenomen.
- Alleen detritus (dus geen levend fyto- of zoöplankton) sedimenteert.
- Resuspensie: het weer in de waterfase komen van eerder gesedimenteerd detritus is verwaarloosbaar binnen de enclosures. Uitgaande van dit eenvoudige nutriëntenschema kunnen de volgende interne massabalansen worden opgesteld (voor fosfaat en stikstof):

Voor totaal nutriënt:

$$(B/P)_T = - SED + MIB \pm (BO)_{3,4} - (DEN)_N$$

Voor opgelost nutriënt:

$$(B/P)_O = - PR + EXCR + MIW + MB \pm (BO)_{3,4} - (DEN)_N$$

Voor particulier nutriënt:

$$(B/P)_P = PR - SED - MIW - EXCR$$

Voor verklaring gebruikte symbolen zie blz. 48.

Hierbij is denitrificatie uiteraard beperkt tot de stikstofbalans en bodemuitwisseling slechts toegestaan voor ring 3 en 4. De van belang zijnde toestandsgrootheden kunnen, met uitzondering van de detritushoeveelheid op de bodem, eenvoudig worden gemeten. Moeilijker meetbaar zijn echter de optredende processnelheden ofwel nutriëntfluxen. Alleen primaire productie kan m.b.v. de C_{14} -methode gemeten worden. Met de nodige kant-

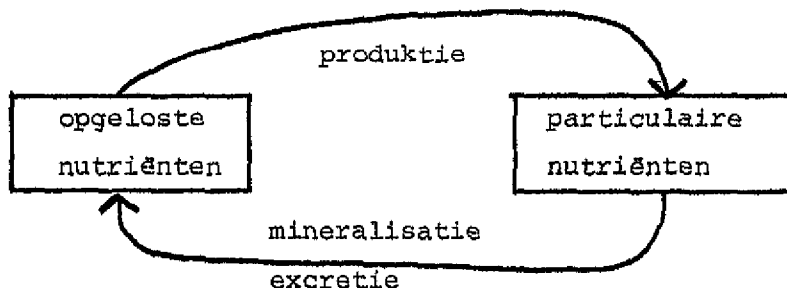
tekeningen kunnen verder uit de door het DIHO gemeten zuurstofverbruiken. in de waterfase de mineralisaties in de waterfase geschat worden.

Op grond van deze gegevens wordt in dit hoofdstuk getracht het nutriëntenschema van bijlage 51 zoveel mogelijk te kwantificeren.

5.2. Turnover- en groeisnelheden.

Het Grevelingenmeer wordt gekenmerkt door een hoge primaire produktie en een lage fytoplanktonbiomassa. Ook als in het vroege voorjaar de concentraties aan opgeloste nutriënten laag worden blijft de primaire produktie hoog. Dit kan alleen verklaard worden door een snelle turnover van nutriënten in het Grevelingenmeer, waarbij opgeloste nutriënten door mineralisatie van particulier materiaal of excretie door zoöplankton weer beschikbaar komen (zie fig. 7).

fig. 7. Eenvoudig nutriëntenschema.



Deze interne cyclus wordt beïnvloed door toe- en afvoer van nutriënten door b.v. de Brouwerssluis, neerslag en polderlozingen. Ook de interactie met het sediment, zoals bezinking en resuspensie van particulier materiaal en nalevering/binding van opgeloste nutriënten, alsmede de uitwisseling van nutriënten met de atmosfeer, kan een belangrijke rol spelen (denitrificatie). De turnoversnelheid is sterk afhankelijk van de keuze van het betreffende nutriëntencompartiment: Indien relatief veel particulier materiaal aanwezig is t.o.v. opgelost nutriënt zal de turnover van particulier materiaal relatief langzaam zijn.

Als we er van uitgaan dat geen accumulatie van nutriënt plaatsvindt in een van de compartimenten zijn alleen de stofstromen met elkaar in evenwicht. Een relatief korte turnovertijd voor een nutriënt is een aanwijzing voor mogelijke limitering van de betreffende nutriënt. Ten aanzien hiervan is tabel 13 in overeenstemming met de resultaten besproken in hoofdstuk 4.

Tabel 13. Turnoversnelheden opgeloste nutriënten (dagen).

ring 1		ring 2		ring 3		ring 4	
O-PO ₄	Nang	O-PO ₄	Nang	O-PO ₄	Nang	O-PO ₄	Nang
4.6	1.1	2.7	8.5	10.6	7.5	4.9	3.8

De snelheden in deze tabel zijn berekend door eerst m.b.v. de N/c resp. P/C verhouding in fytoplankton de primaire produktie in gram C/dag om te rekenen naar grammen N/dag resp. grammen P/dag. De turnoversnelheid kan nu worden berekend door de concentratie aan opgelost nutriënt door deze produktie te delen.

In lit. 25 wordt de snelheid waarmee de primaire produktie verloopt beschreven m.b.v. de relatieve groeisnelheid:

$K_2 = \text{prod}/C_{\text{part}}$. M.b.v. de chlorofylverandering wordt de actuele groeisnelheid k_a berekend: $(C_t = C_0 e^{k_a t})$. Het verschil tussen deze twee snelheden geeft dan de sterftesnelheid k_s :

$$K_s = \frac{k_2(t_2) + k_2(t_1)}{2} - K_a$$

Een conclusie van dit rapport is dat de actuele groeisnelheid verwaarloosbaar is t.a.v. de relatieve groeisnelheid; zodat de sterftesnelheid vrijwel gelijk is aan de primaire produktie: M.a.w. wat aan fytoplankton geproduceerd wordt sterft vrijwel tegelijkertijd. Dit is m.i. echter een gevolg van de onderschatting van het dynamische karakter van de fytoplanktonbiomassa, dus van K_a .

In lit. 25 wordt de actuele groeisnelheid berekend op grond van metingen om de 2 weken. Dit heeft een sterke uitmiddeling

van de werkelijke snelheden tot gevolg, zoals door dit experiment wordt aangetoond. Bij berekening van de actuele groeisnelheden op grond van dagelijkse bemonsteringen worden veel hogere Ka-waarden berekend (vooral voor ring 3): Verdubbeling of halvering van de fytoplanktonbiomassa in een dag is mogelijk.

Het effect hiervan is dat relatieve groei- en sterftesnelheid elkaar niet meer overlappen.

5.3. Mineralisatie en denitrificatie.

Door het DIHO is in alle ringen en omringend Grevelingenwater het zuurstofverbruik in de waterfase gemeten. Dit gebeurde bij een incubatietemperatuur van 10° C. M.b.v. de temperatuurafhankelijkheid volgens Thoman (lit. 23) voor BOD:

$$(K_2)_{T_1} = (K_2)_{T_2} (1.047)^{T_2-T_1}$$

zijn deze zuurstofverbruiken omgerekend naar de zuurstofverbruiken bij de werkelijke watertemperatuur (bijlage 52). Dit temperatuurgecorrigeerde zuurstofverbruik komt goed overeen met de C_{part} en Chl-a profielen. Interpretatie van dit zuurstofverbruik is echter niet eenvoudig. Voor het Grevelingenmeer, waarop niet wordt geloosd, lijkt het redelijk te veronderstellen dat dit zuurstofverbruik bestaat uit respiratie door fytoplankton en mineralisatie in de waterfase. De bijdrage aan het zuurstofverbruik door algenrespiratie is m.b.v. de gebruikelijke schatting $resp \approx 0.1 P_{opt}$ (10% van de produktie in het optimum) af te schatten. Op deze manier is MIW geschat (bijlage 52). MIW blijkt niet meer met C_{part} of Chl-a te correleren (i.t.t. het tot. zuurstofverbruik), maar lijkt (m.u.v. ring 4) ook nauwelijks per ring te verschillen. Het afwijkende gedrag van ring 4 zou verklaard kunnen worden door de hoge waarde voor P_{opt} in dit reservoir, waardoor de bijdrage door algenrespiratie aan het totale zuurstofverbruik mogelijk overschat is.

De resultaten zijn samengevat in tabel 14.

Tabel 14. Produktie en mineralisatie in de waterfase
(in mg C/m² dag)

Plaats	ring 1	ring 2	ring 3	ring 4	Grevelingen
Produktie	246	1246	2032	1040	141
O ₂ -verbr.	286	499	588	326	221
% resp.	15	54	53	54	14
MIW	242	230	274	149	190
MIW in % van prod.	98	18	13	14	135

Terwijl in het Grevelingenmeer (en ring 1) het zuurstofverbruik in de waterfase voor ca. 15% uit respiratie bestaat, bedraagt dit percentage voor ring 2, 3 en 4 ca. 54%.

Bij ring 1 (plastic bodem) lijkt vrijwel alles wat aan particulier materiaal geproduceerd wordt ook weer in de waterfase te mineraliseren, terwijl in ring 2, 3 en 4 slechts een klein deel van de totale produktie in de waterfase gemine-raliseerd wordt. Dit wijst erop dat naast ring 3 en 4 (natuur-lijke bodem), ook voor ring 2 de bodem een belangrijke rol speelt in de teruglevering van geproduceerd materiaal (minera-lisatie).

De materiaalbalansen behorende bij het nutriëntenschema van bijlage 51 kunnen als volgt worden uitgeschreven:

$$PR + (B/P)_O = MIW + MIB + EXCR + (BO)_{3,4} - (DEN)_N$$

$$PR - (B/P)_P = MIW + SED + EXCR$$

De bron/puttermen zijn relatief klein t.o.v. de produktie, daarom toont de combinatieterm (zowel voor P als N) veel overeenkomst met de produktie en dus ook met biomassa en temperatuur. Een eenduidige relatie tussen de afzonderlijke processen is echter op grond van deze gegevens niet te berekenen.

Een soortgelijk probleem doet zich voor bij het opstellen van

een zuurstofbalans voor de reservoirs:

$$\frac{dO_2}{dt} = \text{prod.} - (\text{resp.} + \text{MIW}) - \text{MIB} \pm \text{reaë(deaë)ratie}$$

ofwel

$$\text{MIB} = \frac{\Delta O_2}{\Delta t} - (\text{prod})_{O_2} + (\text{zuurstofverbr.}) \text{ water} \pm \text{reaëratie}$$

waarbij voor de reaëratie geldt: $\phi^{11} = KL (C_s - C)$

Bij berekening van de afzonderlijke termen van deze zuurstofbalans blijkt de produktie veruit de belangrijkste term.

Een probleem is, dat juist t.a.v. deze term grote onnauwkeurigheden ontstaan door omrekening van produktie in mg C naar mg O_2 .

De gemeten en berekende verhoudingen tussen koolstof en zuurstofmethode in de literatuur variëren van 2 à 10.

Getracht werd dit probleem te omzeilen door ervan uit te gaan dat voor ring 1 MIB verwaarloosbaar is:

$$\frac{\Delta O_2}{\Delta t} - x (\text{prod})_C + (\text{zuurstofverbr.}) \text{ water} \pm \text{reaëratie} = 0.$$

Uit deze gegevens is de omrekeningsfactor x geschat:

$$x \approx 5,2$$

De reaëratie constante KL werd bij deze berekening geschat m.b.v.:

$$KL = 0,03 W_{10}^2 \cdot 1,016^{(T-20)} \text{ m/dag} \quad (\text{lit. 24})$$

een formule die, voor de hoge windsnelheden tijdens het experiment, toepasbaar is. Bij lagere windsnelheden wordt de coëfficiënt die de afhankelijkheid van de windsnelheid beschrijft < 2 (lit. 28).

Aangezien het verdampingsproces door beïnvloeding van de windsnelheid boven het wateroppervlak sterk beïnvloed is door de reservoirs is aangenomen dat de reaëratie met eenzelfde factor verlaagd is (werkelijke reaëratie = $\frac{1}{2}$ x berekende reaëratie). Dit is in feite niet helemaal juist, omdat het reaëratieoppervlak weliswaar op dezelfde manier beïnvloed wordt als het verdampingsoppervlak; maar de invloed van de wind op het reaëratieproces is anders dan de invloed op het verdampingsproces omdat, bij het verdampingsproces, de weerstand tegen stoftransport aan de luchtzijde

zit en bij het reaëratieproces aan de waterzijde.

De op deze manier voor ring 2,3 en 4 berekende MIB correleert sterk met de primaire produktie (overschr. kans < 0.001). In tabel 15 zijn de aldus berekende MIB en nogmaals MIW als percentage van de primaire produktie weergegeven.

Tabel 15. Mineralisatie als perc. van de prim. produktie.

	ring 1	ring 2	ring 3	ring 4
MIW	98	18	13	14
MIB	-	55	76	76
restant	2	17	11	10

Een voorzichtige conclusie zou kunnen zijn dat, omdat in ring 2 de totale produktie niet in de waterfase gemineraliseerd kan worden een groot gedeelte van het geproduceerde materiaal op de bodem terecht komt. De efficiëntie van het mineralisatieproces is op deze plastic bodem echter beduidend lager dan in de ringen met een natuurlijk bodem. Het actief worden van het sedimentlaagje in ring 2 is ook de oorzaak van het optreden van denitrificatie in dit reservoir: Het zuurstof- en nitraatverbruik van het gesedimenteerde materiaal is afhankelijk van de hoeveelheid beschikbaar organisch materiaal (lit 19). Dit is een verklaring voor het zuurstofloos worden van het dunne laagje sediment in ring 2, terwijl anaërobie en daarmee denitrificatie in natuurlijk sediment, pas $\frac{1}{2}$ à 2 cm diep in het sediment plaatsvindt (lit.19).

Niet zo zeer de doordringdiepte in het sediment is van belang, maar de beschikbare hoeveelheid organisch materiaal en de temperatuur. Terwijl natuurlijk sediment slechts 0.1 à 4% organische stof bevat, bestaat het bezonken materiaal in ring 2 vrijwel geheel uit organisch materiaal in de vorm van detritus. Het zuurstofverbruik van dit sediment zal dus erg hoog zijn. Omdat door hoge produktie en snelle sedimentatie van detritus de con-

concentratie aan organisch materiaal in het sediment van ring 2 en 3 erg hoog was is deze concentratie t.a.v. het denitrificatieproces niet snelheidsbepalend, er is a.h.w. een overmaat van aanwezig. Omdat in ring 2 en 3 ook de watertemperatuur en de nitraatconcentratie nagenoeg gelijk waren is het niet verwonderlijk dat de gerealiseerde denitrificatiesnelheden in ring 2 en 3 gelijk waren.

5.4. De rol van zoöplankton.

Door Bakker en van Rijswijk (Delta Instituut) zijn uit vrijwel wekelijkse monsters uit alle reservoirs en het omringend Grevelingenwater de zoöplanktonconcentraties bepaald m.b.v. tellingen. In bijlage 53 worden deze concentraties gepresenteerd, uitgedrukt in mg C/m^3 .

Het verloop van deze concentraties geeft geen eenduidig verband met de fytoplanktonconcentraties.

Als reactie op de eerste fytoplanktonpiek, die direct na afsluiting van de enclosures ontstaat, ontstaat iets later in alle vier reservoirs ook een zoöplanktonpiek.

In ring 1 blijft na deze piek de zoöplanktonconcentratie verder laag. In ring 2 ontstaat nog een kleine en een grote zoöplanktonpiek, die vrijwel samenvallen met fytoplanktonpieken.

In ring 3 ontstaat pas in week 13 een hoge zoöplanktonconcentratiepiek, terwijl tegelijkertijd, voor het eerst sinds week 4, de fytoplanktonconcentratie kleiner is dan $10 \mu\text{g/l}$.

In ring 4 ontwikkelen zich, gelijktijdig met de relatief hoge fytoplanktonbiomassa's ook hoge zoöplanktonbiomassa's in de laatste maand van het experiment. In het Grevelingenmeer zijn geen duidelijke zoöplanktonpieken te onderscheiden. De zoöplanktonpieken ontstaan meestal als relatief weinig van het fytoplankton uit diatomeeën bestaat.

De bijdrage aan particulier materiaal door zoöplankton lijkt te verwaarlozen; gemiddeld is 1 à 2% van het particuliere koolstof zoöplankton gebonden, terwijl tijdens de hoogste zoöplanktonpiek in ring 3 zoöplankton slechts 8% aan het totaal aan particulier koolstof bijdraagt.

Alle zoöplanktonconcentratiepieken, m.u.v. de onscherpe piek kort na de afsluiting in ring 3, bestaan uit copépoden. De eerste piek in ring 3 bestaat uit raderdiertjes.

Volgens lit. 27 wordt een van de veelvuldig in de reservoirs

gesignaleerde algensoorten:

skeletonema gegraasd door copépoden, met een filtratiesnelheid van ca. 6.5 ml/dier/dag.

Als we ervan uitgaan dat 1 mg zoöplankton natgewicht overeenkomt met 25 organismen, dan kan het percentage van het fytoplankton dat per dag gegraasd wordt worden geschat.

Voor het Grevelingenmeer komen we dan gemiddeld op 4%/dag, voor ring 4 op 12%/dag; terwijl voor de grootste zoöplanktonpiek in ring 3 een verdwijnperscentage van 40%/dag tengevolge van zoöplanktongraas berekend wordt.

5.5. Schatting invloed macrozoöbenthos op primaire produktie.

Het blijkt niet mogelijk om het verschil in biomassa en produktie tussen ring 4 en het omringende Grevelingenwater toe te schrijven aan het verschil in diepte tussen ring 4 en de gemiddelde Grevelingendiepte. M.b.v. lit. 26 is het verschil in produktieefficiëncy tussen deze twee systemen te berekenen met:

$$E = \frac{1}{x_1+1} - \frac{1}{x_2+1}$$

$$1 \text{ m. diepte} : E = 1 - \frac{1}{2} = 0.50$$

$$5,5 \text{ m diepte} : E = 1 - \frac{1}{6.5} = 0.85$$

Eenzelfde volume water (5.5 m^3) in ring 4 haalt dus maximaal

$$\frac{5.5 \times 0.5}{0.85} = 3.2 \times \text{de produktie in het omringende water.}$$

Maximaal, omdat hierbij de uitwisseling van Grevelingenwater tussen diepe en ondiepe gebieden snel en volledig, veronderstelt wordt. Het werkelijke verschil in produktie $= 1040/141 \approx 7.4$, zodat waarschijnlijk een andere oorzaak (mede) verantwoordelijk is voor het verschillend gedrag van ring 4 en het omringende Grevelingenwater. Een belangrijk verschil is het ontbreken van macrozoöbenthos (mosselen) in ring 4, omdat hier bij de opbouw van het experiment op gelet is, terwijl in het omringende Grevelingenwater veel mosselen aanwezig zijn, die een gedeelte van de fytoplanktonbiomassa wegfiltreren, waardoor ook de primaire produktie daalt.

We kunnen de 3 systemen als volgt modelleren:

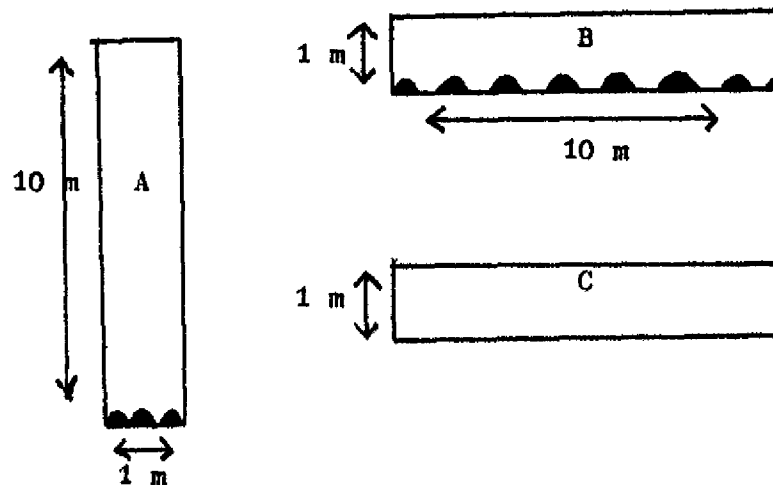
A: Diepe delen van het Grevelingenmeer (met mosselen)

B: Ondiepe delen van het Grevelingenmeer (het meetgebied, met mosselen)

C: ring 4, ondiep en mosselen ontbreken.

Uitgaande van 10 m^3 water ontstaat fig. 8:

Fig. 8. Schema relatieve invloed van macrozoöbenthos.



Terwijl op 1 meter diepte de helft van de, over de totale waterkolom mogelijke produktie bereikt is ($E \approx \frac{1}{2}$) is op 10 meter diepte 90% van de produktie bereikt. D.w.z. $(\text{prod})_B = 4.5 (\text{prod})_A$. De invloed van mosszelffiltratie zal in situatie B 10 x zo groot zijn, terwijl ook de overige verdwijntermen (sterfte, sedimentatie etc.) een bepaalde factor (f) zullen veranderen. Veronderstellen we dat "steady state" condities zijn bereikt dan gelden voor de 3 situaties de volgende vergelijkingen:

$$A \text{ (prod. - sterfte - filtratie) } = 0$$

$$B \text{ (4.5 prod. - } f \times \text{sterfte - 10 x filtratie) } = 0$$

$$C \text{ (2.5 prod. - } f \times \text{sterfte) } = 0$$

Hierbij zijn A, B en C de biomassaniveau's waarop de reacties zich afspelen. Het verschil in produktie tussen situatie B en C is berekend m.b.v. het zelfschaduwings-effect t.g.v. een verhoogd biomassaniveau. Aangenomen is dat alleen in situatie C zelfschaduwing een belangrijke reductie van de, onder gunstiger lichtomstandigheden, mogelijke produktie geeft:

$$\bar{k}_e = k_o + \alpha \times \bar{C}_{\text{part}}$$

$$\text{Geval B : } k_e = 0.4 + 0.54 \times 0.76 \approx 0.8$$

$$\text{Geval C : } k_e = 0.4 + 0.54 \times 1.94 \approx 1.45$$

Omdat de extinctiecoëfficiënt lineair doorwerkt in de berekening

van de primaire produktie geldt:

$$(\text{prod})_C = \frac{0.8}{1.45} \times (\text{prod})_B = 2.5 \text{ prod.}$$

Uitwerking van de vergelijking voor situatie C geeft:

$$\text{sterfte} = \frac{2.5}{f} \times \text{prod.}$$

combinatie van C) en B) geeft:

$$4.5 \text{ prod} - 2.5 \text{ prod} - 10 \text{ filtratie} = 0$$

$$10 \times \text{filtratie} = 2 \times \text{prod}$$

$$\underline{\text{filtratie} = 0.2 \times \text{prod}}$$

Invullen in de vergelijking voor situatie A geeft:

$$\text{prod} - \frac{2.5}{f} \times \text{prod} - 0.2 \times \text{prod} = 0$$

$$\frac{2.5}{f} = 0.8$$

$$f = 3.1$$

$$\underline{\text{sterfte} = 80\% \text{ produktie}}$$

D.w.z. voor de drie verschillende situaties:

situatie A : 20% van de primaire produktie verdwijnt door
filtratie door het macrozoöbenthos

80% van de prim. produktie verdwijnt door de
overige processen: sedimentatie, mortaliteit en
zoöplanktongraas

situatie B : 44% van de prim. produktie verdwijnt door fil-
tratie door het macrozoöbenthos

56% verdwijnt t.g.v. de overige processen

situatie C : 100% verdwijnt door de overige processen.

Een schatting van het gedrag van het Grevelingenmeer (gemid.
5.5 m diep) is te maken door aan te nemen dat het Grevelingen-
meer voor de helft bestaat uit water van 1 m diepte en voor
de andere helft uit water dat 10 meter diep is: A + B

$$5.5 \text{ prod} - 4.1 \text{ sterfte} - 11 \text{ filtratie} = 0$$

d.w.z. 40% van de prim. produktie wordt weggefiltreerd door
macrozoöbenthos

rijkswaterstaat

behoort bij: nota

nr. DDMI-81.03

bladnr: 44

60% van de prim. produktie verdwijnt t.g.v. de overige processen.

Samenvatting.

M.b.v. dit experiment werd het effect van het sediment en stikstofbelasting door de Brouwerssluis, in het groeiseizoen, op de eutrofiëring van het Grevelingenmeer gesimuleerd. Dit gebeurde in een ondiep gebied tussen twee zandplaten in 4 flexibele en lichtdoorlatende reservoirs van 1 meter diep. Door het opstellen van massabalansen voor water en chloride werden de ingesloten watervolumes geschat. M.b.v. de massabalansen voor de overige nutriënten worden denitrificatie en fosfaataflevering door het sediment als belangrijkste processen onderkend:

gemiddelde denitrificatiesnelheid $\pm 100 \text{ mg N/m}^3 \text{ dag}$ (in de stikstofgeëddeerde reservoirs) en maximale fosfaatafleverings-snelheid: $\pm 25 \text{ mg P/m}^2 \text{ dag}$.

Zowel stikstoftoevoeging als bodemcontact blijken stimulerend voor de ontwikkeling van fytoplankton.

Omdat stikstof, naast silicium voor diatomeeën, biomassa-limiterend is voor het fytoplankton in het Grevelingenmeer stijgt in de stikstofgeëddeerde reservoirs de biomassa en daarmee de produktie. Het limiterend worden van stikstof wordt onder natuurlijke omstandigheden bevorderd door het optreden van denitrificatie.

Fosfaat blijkt, ook zonder de pompwerking van zeegrasvelden in belangrijke mate te kunnen worden nageleverd. Deze nalevering wordt, direct of indirect versneld door het primaire produktieproces. Zonder bodemcontact wordt, bij toevoeging van stikstof, fosfaat limiterend terwijl bij bodemcontact voldoende fosfaat vanuit het sediment kan worden nageleverd. Dit proces gaat door totdat, door zelfschaduw, lichtlimitering optreedt. De dan ontstane situatie is in ieder geval ongewenst: fytoplanktonbiomassa's boven $200 \text{ } \mu\text{g/l}$, een doorzicht dat beperkt is tot enkele dm's en een sterk schommelende pH en zuurstofconcentratie.

Het belang van het sediment in de nutriëntenhuishouding wordt duidelijk als we bedenken, dat alleen het sediment voor de op-

getreden denitrificatie verantwoordelijk is. Bovendien speelt binnen de enclosures (m.u.v. ring 1) het sediment een overheersende rol in het mineralisatieproces. Het sediment kan ook in belangrijke mate orthofosfaat naleveren.

In het Grevelingenmeer zijn de fytoplanktonbiomassa's zo laag, dat door de relatief grote meetfouten het vrijwel onmogelijk is nutriëntverhoudingen in fytoplankton te berekenen. Binnen de reservoirs worden de biomassa's beduidend hoger en treedt bovendien geen "patchiness" op, zodat de nutriëntverhoudingen in fytoplankton significant berekend kunnen worden. Het is duidelijk dat het fytoplankton in staat is deze verhoudingen aan te passen aan de mate waarin opgeloste nutriënten beschikbaar zijn. De chlorofylgehalten van fytoplankton blijken sterk afhankelijk van de mate waarin het licht in het water doordringt. Het fytoplankton dat aanwezig is in relatief ondiepe gebieden, krijgt gemiddeld over de waterkolom meer licht en ontwikkelt dus minder chlorofyl. Dit stelt het fytoplankton in staat om hogere lichtintensiteiten te doorstaan, zonder dat de productiecurven foto-inhibitie vertonen. De invloed van zoöplankton op de fytoplanktonbiomassa lijkt niet gering. Omdat de productie ondanks lage nutriëntconcentraties hoog blijft moet de turnover van nutriënten erg snel zijn. Dit betekent een hoge mortaliteit van fytoplankton of hoge graas-snelheden en hoge mineralisatiesnelheden in het Grevelingenmeer. Dankzij de hoge bemonsteringsfrequentie is het dynamische karakter van de optredende processen sterk naar voren gekomen. Het lijkt niet onwaarschijnlijk dat ook variaties over de dag in b.v. de primaire produktie nog aanzienlijke invloed op de uiteindelijke toestandsgrootheden van het beschouwde systeem kunnen hebben. Hiervan dient men zich bij de beschrijving van dergelijke systemen m.b.v. statische modellen of dynamische modellen met een grote tijdstap terdege bewust te zijn.

Lijst van gebruikte symbolen.

CN	=	nutriëntconcentratie in neerslag
Δ_m	=	fout in de gemeten hoeveelheid neerslag
mF	=	meetfout in nutriëntconcentratie
Δ_{acc}	=	Fout in de accumulatieterm
Δ_{add}	=	fout in de additieterm
Δ_N	=	fout in de hoeveelheid neerslag
(NUP) _{tot}	=	Totaal particulier nutriënt
(NUP) _F	=	Fytoplankton gebonden particulier nutriënt
(NUP) _Z	=	Zoöplankton gebonden particulier nutriënt
(NU) _P _D	=	Detritus gebonden particulier nutriënt
I _{opt}	=	De lichtintensiteit waarbij de produktie maximaal is
P _{opt}	=	De produktie bij optimale lichtintensiteit
PR	=	Primaire produktie door fytoplankton
SED	=	Sedimentatie
MIB	=	Mineralisatie aan de bodem
MIW	=	Mineralisatie in de waterfase
BO	=	Uitwisseling met de bodem
DEN	=	Denitrificatie
EXCR	=	EXCRETIE door zoöplankton
K ₂	=	Reactieconstante voor BOD omzetting
W ₁₀	=	Windsnelheid op 10 m boven het aardoppervlak
MO	=	Mortaliteit fytoplankton
GRF	=	Graas van zoöplankton op fytoplankton
GRD	=	Graas van zoöplankton op detritus
DET _w	=	Hoeveelheid detritus in de waterfase
DET _b	=	Hoeveelheid detritus op de bodem

Literatuurlijst.

1. Al, J.P. & Holland, A.M.B. De kwaliteit van de onderwaterbodem in het Zuidelijk Deltagebied. Nota DDMI-80.01
2. Allen, H.E & Kramer, J.R. Nutrients in Natural waters. Env. Science and Techn.
3. Arkesteijn, L. De voorjaarsbloei in de Grevelingen. Laboratorium voor microbiologie. Landbouwhogeschool Wageningen.
4. Cochran, W.G. & Cox, G.M. Experimental designs. 2e editie
5. Golterman, H.L. Physiological Limnology Elsevier Scientific Publishing Company
6. Heide, B.A. & Kruise, R.R. Zuurstofoverdracht en denitrificatie in actief slib, H_2O 12 (1979), 337 - 340.
7. Hieltjes, A.H.M. Eigenschappen en gedrag van fosfaat in sedimenten. Proefschrift T.H. Twente (1980).
8. Kamp-Nielsen, L. & Andersen, J.M. A review of the literature on sediment water exchange of nitrogen components, Proj. Wat. Techn. 8: 393 - 418.
9. Kelderman, P. Bodem/water uitwisseling in de Grevelingen. 1e Interimrapport ZOWEC IV.
10. Mensel, D.W. Summary of experimental results: Controlled Ecosystem pollution experiment Bulletin of marine Science, 27 (1): 142 - 145. 1977
11. Meulen v.d., J.H.M. Waterkwaliteitskenmerken en stofbalansen van het Grevelingenmeer over de periode 1972 - 1977. Nota DDMI-80.16
12. Meulen v.d., J.H.M. Stofbalansen voor de Grote Rug en de drie butylreservoirs in 1978. Nota DDMI-80.14.
13. Mulder, C. Technische beschrijving "enclosure" systeem Notitie in voorbereiding.
14. Seghan, E. Fundamentals of hydrology Geogr. inst. R.U. Utrecht.

15. Sharp, J.H., Perry, M.J., Renga, E.H., Eppley, R.W.
Phytoplankton rate processes in the oligotrophic waters of the
central North Pacific Ocean,
Journal of Plankton Research. Vol 2, 1980.
16. Stokman, G.N.M. Gegevensinwinning in het Grevelingenmeer. Nota DDMI-80.23
17. Strickland, J.D.H. (1960) Measuring the production of marine
fytoplankton. Fish. Res. Bd. Canada Bull. 11 : 172.
18. Knies, J.C. Lichtklimaat en Primaire Produktie
Doctoraal verslag afdeling Chemische Technologie
T.H. Twente (aug. 1980).
19. Kessel, J.F. Influence of denitrification in aquatic sediments
on the nitrogen content of natural waters
Proefschrift Landbouwhogeschool Wageningen, 1976.
20. Sørensen, J. Denitrification rates in a Marine Sediment as
Measured by the acetylene inhibition Technique.
21. Smits, J.G.G. Microbial decomposition of organic matter and
nutrient regeneration in natural waters and sediments.
Waterloopkundig Laboratorium.
22. Eppley, R.W. Temperature and phytoplankton growth in the Sea.
Fisheries Bulletin Vol 70, 1972 p.p. 1063 - 1085.
23. Thoman, R.V. Systems Analysis & Water quality Management
24. Waterloopkundig Laboratorium. Zuurstofmodel Zoommeer tijdens
ontziltting
25. Stokman, G.N.M. Interimrapportage over de analyse van de gegevens
en de modelvorming. Interimrapport project ZOUVER DDMI
26. Kamer v.d. J.P.G. De gemiddelde efficiëncy. Notitie in voorbereiding.
27. Zoöplankton feeding, a literature review; sept. 1979
Waterloopkundig Laboratorium Delft.
28. Banks, R.B. Some features of wind action on shallow lakes. Journal of
the Environmental Engineering Division, ASCE 101 (1975): EE5, pp. 813-827.

Overzicht bijlagen.

1. Overzichtskaart van het Grevelingenmeer
2. Oppervlakte-diepte relatie Grevelingenmeer
3. Overzichtschets van het experiment
4. Beschrijving gemeten parameters
5. Verloop van de watertemperatuur als functie van de tijd
6. Verloop van de chlorideconcentratie als functie van de tijd
7. Verloop van de chlorofylconcentratie als functie van de tijd
8. Verloop van de pH als functie van de tijd
9. Verloop van de zuurstofconcentratie als functie van de tijd
10. Verloop van de zwev. stofconcentratie als functie van de tijd
11. Verloop van de opgelost SiO_2 concentratie als functie van de tijd
12. Verloop van de N-NH_4 concentratie als functie van de tijd
13. Verloop van de $\text{N-NO}_3/\text{NO}_2$ concentratie als functie van de tijd
14. Verloop van de N-ang concentratie als functie van de tijd
15. Verloop van de N totaal concentratie als functie van de tijd
16. Verloop van de N organisch concentratie als functie van de tijd
17. Verloop van de N particulier concentratie als functie van de tijd
18. Verloop van de P-PO_4 concentratie als functie van de tijd
19. Verloop van de P totaal concentratie als functie van de tijd
20. Verloop van de P organisch concentratie als functie van de tijd
21. Verloop van de P particulier concentratie als functie van de tijd
22. Verloop van de C particulier concentratie als functie van de tijd
23. Verloop van de DOC concentratie als functie van de tijd
24. Verloop van de feofytine concentratie als functie van de tijd
25. Resultaten interstitieel wateronderzoek
26. Berekening hoeveelheid bodemmateriaal
27. Neerslag en verdamping tijdens experiment
28. Berekening van de reservoir volumina
- 29 t/m 32. Berekende en gemeten chlorideverlopen
- 33 t/m 38. (Bron/put) resttermen massabalans
39. Vergelijking puttermen totaalstikstofbalans met de toegevoegde hoeveelheid stikstof
40. Berekening fouten in de massabalanstermen
41. Correlaties tussen particuliere nutriënten en chlorofyl

- 42. Correlaties tussen particulaire nutriënten, chlorofyl en feofytine
- 43 t/m 48. Nutriëntverhoudingen
- 49. Produktieparameters
- 50. Dagproduktie als functie van de tijd
- 51. Schema nutriëntenhuishouding
- 52. Zuurstofverbruik en mineralisatie in de waterfase
- 53. Zoöplanktonconcentratie.