

waterloopkundig laboratorium
delft hydraulics laboratory

berekeningen toekomstige waterkwaliteit van het
zoete Grevelingenmeer, het Volkerak en het
Zoommeer

verslag onderzoek

R1644 - R1645

december 1982

berekeningen toekomstige waterkwaliteit van het
zoete Grevelingenmeer, het Volkerak en het
Zoommeer

verslag onderzoek

R1644 – R1645

december 1982

INHOUD

1. Inleiding	1
1.1 Waterkwaliteits model zoete Grevelingen, Volkerak en Zoommeer.	1
1.2 Doelstelling en vraagstelling	1
1.3 Opbouw van het rapport.	2
2. Samenvatting en konklusies.	3
2.1 Samenvatting	3
2.1.1 De modellen	4
2.1.2 Gegevens verwerking	5
2.1.3 Systeem definitie	6
2.1.4 Simulaties	6
2.1.5 Diskussie	7
2.2 Konklusies	8
2.3 Aanbevelingen	9
3. Algemene werkwijze	10
3.1 Modelmatige aanpak	10
3.2 Gegevensverwerking en aanvullende data acquisitie	11
3.2.1 Gegevens Deltadienst	13
3.2.2 Gegevens Waterloopkundig laboratorium.	14
3.2.3 Achtergrond extinktie en bodem nalevering	16
3.3 Het fytoplankton model BLOOM II	17
3.3.1 Algemeen	17
3.3.2 Relatie tussen nutriënten en fytoplankton biomassa	19
3.3.3 Relatie tussen licht en fytoplankton biomassa	20
3.3.4 Vereiste invoer en uitvoer van BLOOM II	27
3.4 Het chemische model CHARON	28
3.4.1 Algemeen	28
3.4.2 Moduul voor de evenwichtsreacties	30
3.4.3 Moduul voor de langzame processen	33
3.4.4 Het fytoplankton moduul	35
3.4.5 De modeluitvoer	42
3.5 Verschillen tussen BLOOM II en het gekoppeld model	43
3.6 Het chloride model CHSIMP	43
4. Systeem-definitie	45
4.1 Definiering van het systeem voor BLOOM II	45
4.2 Definiering van het systeem voor CHARON	46
4.2.1 Definitie van de samenstelling van het oppervlaktewater.	46
4.2.2 Definitie van de processen in het systeem	50
4.2.3 Invoerbestand en belastingen	52
5. Resultaten Grevelingen	54
5.1 De hydrologische scenario's	56
5.2 De varianten op de hydrologische scenario's	61
5.3 Gevoeligheids onderzoek scenario's Grevelingen.	66
6. Resultaten Volkerak en Zoommeer	72
7. Diskussie resultaten	77
7.1 Relatie tussen fosfor belasting en concentratie	77
7.2 Relatie fosfor concentratie chlorofyl concentratie	79
7.3 Relatie licht niveau chlorofyl concentratie	82
7.4 De nutriënten flux vanuit de bodem.	82
Referenties	84

TABELLEN

Tabel 3.1	Overzicht hydrologische scenario's	13
Tabel 3.2	Overzicht geometrische gegevens	14
Tabel 3.3	Schatting ontbrekende Ca^{++} gehalten	15
Tabel 3.4	Schatting ontbrekende HCO_3^- gehalten	15
Tabel 3.5	Verhouding respiratie netto produktie	22
Tabel 3.6	Voorbeeld systeemdefinite CHARON	30
Tabel 3.7	Vergelijking BLOOM II - BLOOMII/CHARON	43
Tabel 4.1	Stoichiometrische konstanten BLOOMII	46
Tabel 4.2	Chemische samenstelling oppervlakte water	48
Tabel 4.3	Proces konstanten	52
Tabel 5.1	Overzicht berekeningen Grevelingen	54
Tabel 5.2	Samenvatting resultaten hydrologische scenario's	56
Tabel 5.3	Samenvatting resultaten hydrologische scenario's	57
Tabel 5.4	Samenvatting resultaten hydrologische scenario's	58
Tabel 5.5	Samenvatting resultaten varianten	62
Tabel 5.6	Samenvatting resultaten varianten	63
Tabel 5.7	Samenvatting resultaten varianten	64
Tabel 5.8	Samenvatting resultaten gevoeligheids onderzoek	67
Tabel 5.9	Samenvatting resultaten gevoeligheids onderzoek	68
Tabel 5.10	Samenvatting resultaten gevoeligheids onderzoek	69
Tabel 6.1	Samenvatting resultaten Volkerak Zoommeer	73
Tabel 6.2	Samenvatting resultaten Volkerak Zoommeer	74
Tabel 6.3	Samenvatting resultaten Volkerak Zoommeer	75
Tabel 7.1	Fosfor fluxen in verschillende berekeningen	78
Tabel 7.2	Relatie fosfor belasting fosfor concentratie	79
Tabel 7.3	Relatie fosfor concentratie chlorofyl concentratie	81

FIGUREN

- 2.1 Schematisch overzicht van de onderlinge relaties in het projekt.
- 3.1 Overzicht van de gebruikte gegevens bij de modellering.
- 3.2 Schematisering C modellering, de dubbele pijlen in het middelste vierkant stellen evenwichts reacties voor, de andere pijlen zijn niet evenwichts reacties.
- 3.3 Fytoplankton modellering in CHARON.
- 3.4 Afhankelijkheid van P_g (bruto groei) van fosfor concentratie

In de volgende figuren staat op de x-as de tijd in dekaden vanaf 1 januari 1974. Voor de scenario aanduidingen wordt verwezen naar Tabel 5.1 op pagina 54 en Tabel 6.1 op pagina 73

- 5.1 Chloride concentratie (g/m^3), Grevelingen scen. 1, 6, 10.
- 5.2 Fytoplankton concentratie ($g C/m^3$), Grevelingen scen. 1, 6, 10.
- 5.3 pH, Grevelingen scen. 1, 6, 10.
- 5.4 Zuurstof concentratie (g/m^3), Grevelingen scen. 1, 6, 10.
- 5.5 Nitraat concentratie ($g N/m^3$), Grevelingen scen. 1, 6, 10.
- 5.6 Ortho fosfaat concentratie ($g P/m^3$), Grevelingen scen. 1, 6, 10.
- 5.7 Totaal fosfaat concentratie ($g P/m^3$), Grevelingen scen. 1, 6, 10.
- 5.8 Opgelost silicium concentratie ($g Si/m^3$), Grevelingen scen. 1, 6, 10.
- 5.9 Chloride concentratie (g/m^3), Grevelingen scen. 6, 6C, 6L.
- 5.10 Fytoplankton concentratie ($g C/m^3$), Grevelingen scen. 6, 6C, 6L.
- 5.11 Nitraat concentratie ($g N/m^3$), Grevelingen scen. 6, 6C, 6L.
- 5.12 Ortho fosfaat concentratie ($g P/m^3$), Grevelingen scen. 6, 6C, 6L.
- 5.13 Totaal fosfaat concentratie ($g P/m^3$), Grevelingen scen. 6, 6C, 6L.
- 5.14 Opgelost silicium concentratie ($g Si/m^3$), Grevelingen scen. 6, 6C, 6L.
- 5.15 Fytoplankton concentratie ($g C/m^3$), Grevelingen scen. BB, CO, CB.
- 5.16 Nitraat concentratie ($g N/m^3$), Grevelingen scen. BB, CO, CB.
- 5.17 Ortho fosfaat concentratie ($g P/m^3$), Grevelingen scen. BB, CO, CB.
- 5.18 Totaal fosfaat concentratie ($g P/m^3$), Grevelingen scen. BB, CO, CB.
- 5.19 Opgelost silicium concentratie ($g Si/m^3$), Grevelingen scen. BB, CO, CB.

- 6.1 Chloride concentratie (g/m^3), Volkerak en Zoommeer scen. v2, v13, z2, z13.
- 6.2 Fytoplankton concentratie (g C/m^3), Volkerak en Zoommeer scen. v2, v13, z2, z13.
- 6.3 pH, Volkerak en Zoommeer scen. v2, v13, z2, z13.
- 6.4 Zuurstof concentratie (g/m^3), Volkerak en Zoommeer scen. v2, v13, z2, z13.
- 6.5 Nitraat concentratie (g N/m^3), Volkerak en Zoommeer scen. v2, v13, z2, z13.
- 6.6 Ortho fosfaat concentratie (g P/m^3), Volkerak en Zoommeer scen. v2, v13, z2, z13.
- 6.7 Totaal fosfaat concentratie (g P/m^3), Volkerak en Zoommeer scen. v2, v13, z2, z13.
- 6.8 Opgelost silicium concentratie (g Si/m^3), Volkerak en Zoommeer scen. v2, v13, z2, z13.

1. INLEIDING

1.1 WATERKWALITEITS MODEL ZOETE GREVELINGEN, VOLKERAK EN ZOOMMEER.

Ten behoeve van de voorspelling van de waterkwaliteit in de zoete Grevelingen, het Volkerak en het Zoommeer, zijn met behulp van de gekoppelde modellen BLOOM II en CHARON berekeningen gemaakt voor de hydrologische jaren 1974 t/m 1976.

Deze modellen zijn ontwikkeld in het kader van het WABASIM project, een samenwerkingsproject van Rijkswaterstaat Deltadienst en Waterloopkundig Laboratorium.

Het voorspellen van de waterkwaliteit van nog niet bestaande meren vereist de toepassing van een model dat zoveel mogelijk in proces beschrijving overeenkomt met deze toekomstige meren. De in dit project gebruikte modellen zijn ontwikkeld met behulp van de data bestanden van het spaarbekken de Grote Rug, terwijl de uiteindelijke procesbeschrijving en systeemdefinitie die voor dit project is gebruikt, ontleend is aan de modelstudie naar de eutrofiering van het IJsselmeer (de Rooij e.a. 1982). De diverse kompartimenten zoals in de IJsselmeer studie onderscheiden, vertonen in verschillende opzichten grote overeenkomsten met de hier bestudeerde meren, behalve voor de scenario's van het Grevelingen meer met grote verblijftijden.

1.2 DOELSTELLING EN VRAAGSTELLING

Algemene doelstelling van het project:

- De kwantificering c.q. voorspelling van de resultaten van verschillende beheers scenario's op de kwaliteit van de betreffende meren voor wat betreft chloride, de fosfaat- en stikstofhuishouding, de fytoplankton biomassa (drooggewicht en chlorofyl), de soorten samenstelling en de beperkende factoren.

Uit de algemene doelstelling kunnen de volgende konkrete vragen worden afgeleid:

- Wat zijn de chloride concentraties bij de verschillende beheers scenario's, en wat is het verloop in de tijd, mede afhankelijk van de hydrologische omstandigheden.
- Wat is de maximaal mogelijke fytoplankton concentratie en de daarbij behorende soortensamenstelling van de fytoplankton biomassa bij de verschillende beheers scenario's.
Welke zijn de beperkende factoren voor de maximale fytoplankton biomassa en in welke periode van het jaar zijn deze van belang?
- Wat is de invloed van de verschillende beheers scenario's op de nutriënten niveaus, de pH en de zuurstof concentratie.
- Welke rol speelt de bodem bij de relatie belasting-koncentratie?

- Welke rol speelt het lichtklimaat ten aanzien van de fytoplankton biomassa's.

1.3 OPBOUW VAN HET RAPPORT.

Onderhavig rapport behandelt de werkzaamheden, die in het kader van het modelmatig onderzoek naar de eutrofieringstoestand van het Grevelingen meer, het Volkerak en het Zoommeer hebben plaatsgevonden, alsmede de resultaten daarvan.

In hoofdstuk 3 wordt de algemene aanpak van het onderzoek behandeld, de gebruikte en geschatte gegevens worden vermeld, tevens wordt ingegaan op de toegepaste modellen BLOOM II en CHARON.

Hoofdstuk 4 behandelt de systeem definitie voor de verschillende modellen.

In hoofdstuk 5 worden de resultaten van de modellen beschreven voor het Grevelingen meer.

In hoofdstuk 6 worden de resultaten van de modellen beschreven voor het Volkerak en Zoommeer.

In hoofdstuk 7 volgt een diskussie van de resultaten, met name wat betreft de vergelijking van de model resultaten met andere andere voorspellings methoden.

In hoofdstuk 2 staat een samenvatting van het onderzoek.

Het onderzoek werd uitgevoerd en gerapporteerd door drs. N.M. de Rooij, drs. M.F.X. Veul, en ing. B. de Groot.

2. SAMENVATTING EN KONKLUSIES.

In dit hoofdstuk worden de resultaten van het onderzoek samengevat en worden de voornaamste konklusies weergegeven.

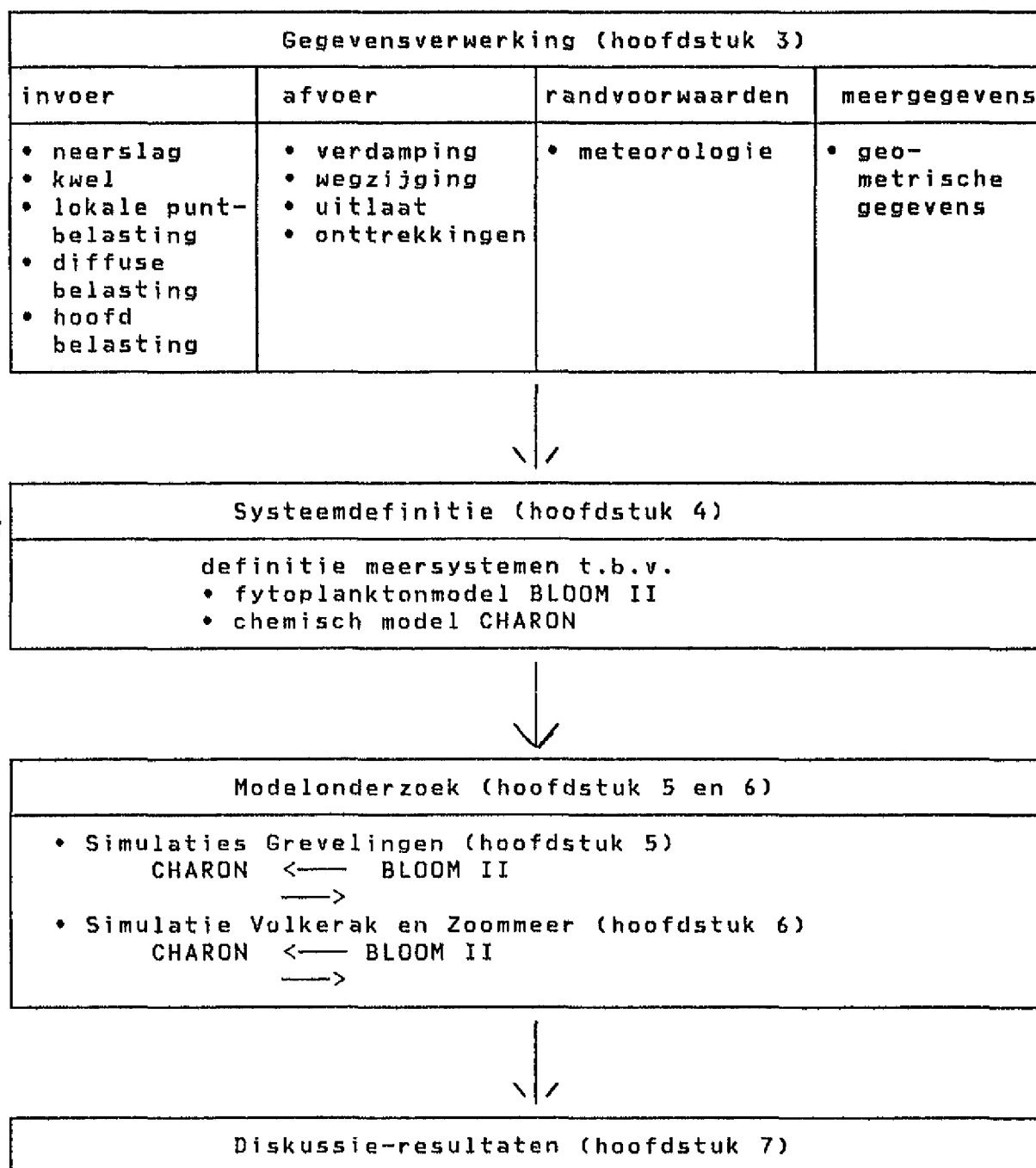
2.1 SAMENVATTING

Medio 1981 werd door de Delta dienst Rijkswaterstaat aan het Waterloopkundig Laboratorium opgedragen een modelmatig onderzoek uit te voeren naar de toekomstige waterkwaliteit van de zoete Grevelingen, Volkerak en Zoommeer. Centraal hierbij staat de keuze tussen de verschillende mogelijkheden van water kwantiteits beheer.

Voor de behandeling van de onderzoeks resultaten zal een overzicht worden gegeven van de werkzaamheden en gebruikte methoden (Fig. 2.1.).

Figuur 2.1

Chronologisch overzicht van de verrichte werkzaamheden ten behoeve van de waterkwaliteitsmodellering Grevelingen, Volkerak en Zoommeer.



2.1.1 De modellen

Centraal in de gevolgde modelmatige aanpak van de waterkwaliteit voor het Volkerak, de Grevelingen en het Zoommeer staan de wiskundige modellen BLOOM II en CHARON.

Het fytoplankton model BLOOM II is in het kader van het WABASIM (Water BASIn Model) projekt, door het WL in samenwerking met de

Deltadienst ontwikkeld. Het model maakt gebruik van een optimalisatie techniek om het potentiële fytoplankton maximum te berekenen in overeenstemming met de heersende abiotische omstandigheden.

De fytoplanktonbloei kan worden beperkt door drie voedingsstoffen: stikstof, fosfor en silicium en/of door de groeisnelheid en de beschikbare hoeveelheid energie. In deze laatste 2 factoren spelen, behalve de hoeveelheid zonlicht, ook andere grootheden zoals de watertemperatuur en mengdiepte een belangrijke rol. Afhankelijk van de omstandigheden kiest het model uit tien potentiële fytoplankton soorten, die combinatie, die het meest efficiënt van de beschikbare hoeveelheden gebruik maakt. Voorts kunnen in het model zooplankton biomassa's worden ingevoerd om de fytoplankton verliezen door graas uit te rekenen.

BLOOM II levert uitvoer in de vorm van de concentratie van elke fytoplankton soort en de totale concentratie van alle soorten in mg drooggewicht per m^3 (de totale chlorofyl concentratie), de verdeling van beschikbare hoeveelheden nutrient over detritus en levend fytoplankton enerzijds en alle overige frakties anderzijds en de totale extinktie van het water per m diepte.

Het chemisch model CHARON is evenals BLOOM II in het kader van het WABASIM projekt ontwikkeld. Het model maakt gebruik van twee basis wetten, te weten de wet van behoud van massa en de massa-actie wet. Het model berekent de chemische samenstelling van oppervlaktewater als resultante van de belasting, de uitwisseling met de lucht en de bodem, interne processen en de afvoer. Onder chemische samenstelling vallen in dit verband niet alleen de chemische verbindingen, maar ook het fytoplankton.

Het model is voorzien van een drietal modules voor (1) evenwichtsreacties, (2) langzame processen en (3) fytoplankton.

Het moduul voor evenwichtsreacties berekent de verdeling van de componenten voor die verbindingen, die onderling zeer snel reageren en daarom met elkaar in evenwicht zijn.

Het moduul voor langzame processen berekent de concentratie verandering van de langzame reaktanten en de invloed hiervan op de massabalans van de evenwichtsreaktanten. Voor elke komponent wordt de hoeveelheid uitgerekend, die aan het evenwichtssysteem wordt afgestaan of onttrokken. De kinetische formuleringen hebben de vorm van eerste-orde differentiaal vergelijkingen.

Het fytoplankton moduul is vooral ontworpen voor de gekoppelde versie van BLOOM II en CHARON. Bij toepassing van CHARON alleen berekent het moduul de netto uitwisseling van de nutrienten tussen anorganische en organische kompartimenten.

CHARON levert uitvoer in de vorm van de concentratie van alle gemodelleerde variabelen in mol/m^3 en, voor wat betreft de langzame reakties, de fluxen in $mol/m^2.tijdseenheid$.

2.1.2 Gegevens verwerking

De eerste fase van de werkzaamheden omvatte de gegevens inventarisatie, verwerking en opslag. Deze gegevens betreffen de

waterkwaliteit, emissies, waterbalans, meteorologie, en geometrie van de verschillende meren.

Na inventarisatie van deze gegevens vindt opslag in een komputerbestand plaats. Vervolgens worden de gegevens geanalyseerd ondermeer om de schematisatie van het te modelleren systeem en de representativiteit van en de leemten in de gegevens vast te stellen.

Na aanvullende data-acquisitie worden de gekorrigeerde en gekompleteerde bestanden verwerkt tot de uiteindelijke invoerbestanden voor de modellen BLOOM II, en CHARON.

2.1.3 Systeem definitie

De algemene structuren van de modellen BLOOM II, en CHARON zullen voor de daadwerkelijke modellering van waterkwaliteits variabelen moeten worden aangevuld met meer/rivier specifieke informatie ten aanzien van parameters en processen. De keuze van parameters en processen wordt vooral bepaald door het belang ervan op het te modelleren verschijnsel te weten eutrofiering; het moge duidelijk zijn dat het belang per meer of per rivier verschilt. Bijgevolg moet de definiering van het systeem mede afgestemd worden op de specifieke eigenschappen van het te modelleren oppervlaktewater.

In deze studie is gebruikt gemaakt van de systeem definitie zoals die voor de IJsselmeer studie was vastgesteld, omdat geen gegevens van de Zoete Grevelingen, Volkerak of Zoommeer aanwezig zijn om de modellen op te kalibreren en valideren.

Op een beperkt aantal punten is wijziging aangebracht in de systeem definitie, indien hier duidelijke argumenten voor aanwezig waren:

- Het produktie voordeel van Blauwwieren in verband met hun opdrijvend vermogen wat in de IJsselmeer studie op 20% was gesteld, is hier op 10% gesteld. Het voordeel van Blauwwieren ten opzichte van Diatomeeen bleek dusdanig groot dat deze laatste soort in deze iets diepere meren dan het IJsselmeer, nauwelijks tot produktie kon komen. Op de totale biomassa bleek het effect van deze wijziging marginaal.
- De fosfor nalevering vanuit de bodem werd op 40 % van de gekalibreerde IJsselmeer waarde gesteld. Vooral bij langere verblijftijden is de belasting veel geringer dan die op het IJsselmeer, zodat een dergelijke ingreep verantwoordt leek.
- Om dezelfde rede als hiervoor, is de denitrifikatie snelheid gehalveerd. Deze snelheid is afhankelijk van de oxidator vraag van de bodem.

2.1.4 Simulaties

Met de vastgestelde systeemdefinities zijn berekeningen uitgevoerd voor de verschillende hydrologische scenario's.

Hierbij zijn allereerst enkele scenario's doorgerekend, die onderling het meest verschilden. Aan de hand van de resultaten

hiervan is besloten welke overige scenario's en varianten moesten worden berekend, almede welk gevoeligheids onderzoek moest worden uitgevoerd.

De resultaten staan kort vermeld bij de konklusies in 2.2.

2.1.5 Diskussie

Aan het einde van de studie zijn de modelresultaten aan een nadere beschouwing onderworpen. Daarbij stonden 3 vragen centraal:

- Hoe betrouwbaar zijn de voorspellingen?
- Hoe gevoelig zijn bepaalde kritische aannamen?
- Hoe verhouden zich de modelresultaten tot empirische gegevens en voorspellingen gebaseerd op empirische verbanden?

2.1.5.1 Resultaten

Mede vanwege onzekerheden in de basisgegevens en de beperkingen in de kennis van de processen ligt het voor de hand de resultaten van de simulaties te vergelijken met gegevens van andere meren en empirische verbanden tussen fosfor belasting en fytoplankton biomassa. Dit verband kan in tweeën worden opgesplitst te weten (1) de relatie tussen fosfor belasting en fosfor concentratie en (2) tussen de fosfor concentratie en fytoplankton biomassa.

Eerstgenoemde relatie wordt in internationaal verband veelal beschreven door middel van het zgn. Vollenweider model. Dit model legt een empirisch verband tussen fosfor belasting en verblijftijd enerzijds en fosfor concentratie anderzijds.

Wordt ervan uitgegaan dat fytoplankton alleen verantwoordelijk is voor de sedimentatie van fosfor, dan neemt bij een fosfor limitatie de sedimentatie proportioneel af met de concentratie van het instromende water. In een dergelijke situatie kunnen simpele modellen toegepast worden.

Is het systeem evenwel niet fosfor gelimiteerd dan zal de sedimentatie bij een verlaging van de fosfor belasting, absoluut gezien gelijk blijven, maar procentueel toenemen. In dit geval kan het Vollenweider model in principe niet toegepast worden. (zie tabel 7.1 Grevelingen scenario 13 en scenario 2)

Voor de relatie fosfor concentratie chlorofyl concentratie zijn er een tweetal verbanden die gebruikt kunnen worden. Naast de Vollenweider relaties die dit verband beschrijft is er ook de CUWVO relatie die dit verband uit empirische gegevens van een groot aantal Nederlandse meren beschrijft.

Bij een vergelijking van de uitkomsten van het eutrofierings model met de Vollenweider relatie blijkt het eutrofieringsmodel hogere waarden te geven dan de gebruikte Vollenweider relaties. De Vollenweider relaties blijken echter voor de huidige situatie in een groot aantal Nederlandse meren niet te voldoen.

Het feit dat de Vollenweider relaties duidelijk verschillende uitkomsten geven voor de verschillende beheers scenario's, terwijl het eutrofierings model dit veel minder doet, wordt veroorzaakt door het feit dat de Vollenweider relatie er van uitgaat dat fosfor altijd limiterend is. Het eutrofierings model berekend met name voor de scenario's met kortere verblijftijd alleen lichtlimitaties, zodat deze scenario's ook slechts geringe verschillen in biomassa laten zien.

De CUWVO relaties geven een bovengrens aan zomer gemiddeld chlorofyl bij gegeven nutriënten concentraties en licht huishouding. Voor de vaststelling van de nutriënten concentraties voor een niet bestaand meer zal dan van een ander model gebruik moeten worden gemaakt.

De resultaten van de CUWVO relaties met de door het eutrofierings model berekende nutriënten gehalten geven in bijna alle scenario's een gemiddeld chlorofyl gehalte van 70 a 80 mg/m³ te zien bij een lichtlimitatie, alleen bij totaal P gehalten kleiner dan 0.12 g P/m³ treedt een fosfor limitatie op.

Gekonkludeerd wordt dan ook dat de Vollenweider relaties die impliciet uitgaan van fosfor limitatie, niet geschikt zijn voor deze meren als voorspellend middel. De impliciete aanname van de Vollenweider relatie is ook in strijd met de uitkomsten van zowel de CUWVO relaties als de resultaten van het eutrofierings model: in de meeste scenario's overheerst licht limitatie. Op grond van bovenstaande en een aantal aanvullende overwegingen, die in deze samenvatting niet aan de orde zullen komen, maar besproken worden in hoofdstuk 7 van onderhavig rapport, wordt gemeend dat het eutrofieringsmodel voldoende geloofwaardigheid bezit om als beleidsonderbouwend instrument dienst te doen.

2.2 KONKLUSIES

De konklusies zullen hier puntsgewijs kort worden weergegeven:

- Zonder extra doorspoeling worden de chloride gehalten in alle meren hoog. Voor de Grevelingen wordt 1800 g/m³ berekend, voor het Volkerak 337 g/m³ en voor het Zoommeer 1100 g/m³. Een extra doorspoel debiet van 50 m³/sec. is nodig om de chloride gehalten onder de 500 g/m³ gemiddeld te houden. Het weglaten van polder en sluis belasting geeft ook bij een doorspoel debiet van 25 m³/sec een lager chloride gehalte, namelijk 376 g/m³ gemiddeld.
- Het niveau van de gemiddelde fytoplankton biomassa is vrij ongevoelig voor de verblijftijd. De verschillende scenario's voor de Grevelingen geven gehalten van 2.5 a 3.0 g C/m³, wat bij een gemiddelde C/chl verhouding van 35, 70 a 85 mg chlorofyl/m³ geeft. De gehalten voor het Volkerak en Zoommeer liggen in dezelfde orde grootte.
- Nutriënten limitatie is alleen essentieel in de scenario's met lange verblijftijd in de Grevelingen. De chloride gehalten worden dan echter zeer hoog, ca. 1800 g/m³.
- Licht is praktisch de enige bepalende faktor voor de fytoplankton biomassa in het Volkerak en het Zoommeer en de voornaamste faktor in de Grevelingen.

- De bodemproblematiek speelt geen enkele rol in het Volkerak en het Zoommeer. In de Grevelingen zijn de scenario's met lange verblijftijd gevoelig voor de aanname omtrent de bodemnalevering, zij het in beperkte mate. De scenario's met kortere verblijftijd, dat wil zeggen met extra doorspoeling, zijn niet gevoelig voor de aannamen omtrent de bodemnalevering.
- Alle berekeningen zijn gevoelig voor de aanname omtrent het lichtklimaat: de achtergrond extinktie.

2.3 AANBEVELINGEN

Gezien de grote afhankelijkheid van de berekenings resultaten voor de aanname van de waarde voor de achtergrond extinktie lijkt het zinvol om meer onderzoek uit te voeren naar de factoren die deze waarde bepalen. De waarden die in Nederlandse meren worden gevonden variëren van ca. 1/m tot 5/m. Hogere achtergrond extinktiefactoren dan de nu aangenomen extinktie van 1.1/m zullen aanleiding geven tot lagere biomassa's. Met name voor ondiepere meren worden over het algemeen hogere waarden gevonden. Dit betekent dat met name voor de voorspellingen van het Zoommeer, met een diepte van 3.5 meter en praktisch in alle scenario's gedomineerd door licht limitaties, de berekenings resultaten waarden geven die wel eens lager zouden kunnen uitkomen.

3. ALGEMENE WERKWIJZE

Dit hoofdstuk begint met een algemene inleiding, waarin de gevolgde werkwijze wordt beschreven (zie 3.1). Vervolgens wordt beschreven, op welke wijze de gegevens voor de diverse modellen zijn verwerkt en opgeslagen (zie 3.2). Hierop volgt een algemene beschrijving van de gebruikte modellen, te weten BLOOM II (zie 3.3), CHARON (zie 3.4) en een overzicht van enkele belangrijke verschillen tussen het zelfstandige BLOOM II model en de gekoppelde versie CHARON/BLOOM II (zie 3.5).

3.1 MODELMATIGE AANPAK

Voor de beantwoording van de vraag 'Hoe zal de eutrofieringstoestand van het Grevelingen meer, het Volkerak en het Zoommeer zijn bij verschillende beheers strategieën?' is een modelmatige aanpak gekozen.

Centraal in deze benadering staan dus analyse en kwantificering van het te onderzoeken verschijnsel. In vergelijking tot meer beschrijvende, traditionele methodes heeft een dergelijke aanpak een aantal belangrijke voordelen:

- Er komt meer kwantitatieve informatie ter beschikking voor het beleid en beheer, zowel m.b.t. de invloed van de belasting en de processen als de gevolgen van voorgenomen maatregelen.
- Er zijn betere mogelijkheden om alternatieve c.q. additoele beleidsmaatregelen te definiëren en te evalueren.
- Er worden betere communicatie mogelijkheden geschapen tussen beleidsvoorbereiders, beheerders en onderzoekers.
- Dominante factoren en processen kunnen worden aangegeven zodat de resultaten beter begrijpelijk kunnen worden gemaakt.
- Aannamen en veronderstellingen kunnen meer expliciet gemaakt worden waardoor gevolgen beter zichtbaar kunnen worden gemaakt (vgl. 'expert opinion').
- Hypothesen en de gevoeligheid voor de diverse gegevens kunnen beter worden getoetst, waardoor de invloed van onzekerheden kan worden geschat.

De mate waarin deze voordelen kunnen worden benut, is afhankelijk van de beschikbare gegevens en de kennis betreffende het functioneren van het te modelleren systeem.

De activiteiten, die nodig zijn voor het realiseren van de doelstelling kunnen als volgt worden ingedeeld:

Selektie beleidsscenario's

Door medewerkers van de Deltadienst is een aantal scenario's geselecteerd voor de drie meren. Deze scenario's verschillen in de mate van doorspoelen van deze meren en de wijze van water aanvoer naar het meer. Dit laatste geldt alleen voor de Grevelingen, waar een keus is tussen Volkerak water, Hollands Diep water (Leidam variant) en Haringvliet water (Halskanaal variant).

Vaststellen van de kwaliteit van het aanvoerende water

De waterkwaliteits gegevens zijn voor het grootste gedeelte verzameld door de Delta dienst, en als zodanig aangeleverd.

Aanvullende data-acquisitie

Naast de gegevens, die door de Delta Dienst zijn aangeleverd zijn voor de voorspelling van de waterkwaliteit van het Hollands Diep voor 1985 berekeningen uitgevoerd op het Waterloopkundig Laboratorium (Stans 1982). Voor een aantal variabelen zijn schattingen gemaakt.

Kalibratie en Validatie

Model voorspellingen dienen te worden voorafgegaan door model kalibratie en validatie. Omdat de betreffende meren nog niet (in hun zoet water versie) bestaan, kon deze stap niet worden uitgevoerd. Daarom is uitgegaan van de modelversie zoals die na Kalibratie en Validatie van het IJsselmeer is vastgesteld. (de Rooij e.a. 1982) De drie gemodelleerde meren vertonen grote overeenkomsten met het IJsselmeer, voor wat betreft diepte, kwaliteit van het aanvoerende water en verblijftijd.

Simulaties

Aan de hand van de geselecteerde scenario's zijn de in hydrologie meest verschillende scenario's doorgerekend en is op grond van deze resultaten vastgesteld welke overige scenario's en eventuele varianten berekend moeten worden.

Gevoeligheids onderzoek

Op grond van de resultaten van de verschillende scenario's wordt vastgesteld welk gevoeligheids onderzoek zal plaats vinden, om de onzekerheid in de resultaten voor verschillende aannamen zo goed mogelijk te kwantificeren.

3.2 GEGEVENSVERWERKING EN AANVULLENDE DATA ACQUISITIE

De voor de modellering benodigde gegevens vallen uiteen in de volgende vier categorieën:

- Kwaliteit van het instromende water.
- Gegevens met betrekking tot de waterbalans (debieten).
- Meteorologische gegevens (windsnelheid, temperatuur en globale instraling)
- Geometrische gegevens (diepte en oppervlak).

Voor een volledig overzicht van alle verzamelde gegevens voor de Grevelingen, Volkerak en Zoommeer wordt verwezen naar figuur 3.1 Alle daarin genoemde gegevens zijn in komputer-databestanden opgenomen.

De databestanden zijn vastgelegd op schijf(disk) en zijn via een aanroep vanaf een beeldscherm (terminal) direkt toegankelijk. Tevens zijn zij door de waterkwaliteitsmodellen direkt in te lezen. De gegevens die benodigd zijn voor het waterkwaliteitsmodel zijn toegeleverd door:

- Deltadienst
- Waterloopkundig Laboratorium

Fig 3.1

Benodigde gegevens van 1974 t/m 1976
t.b.v. Waterkwaliteitsmodel CHARON en BLOOM II

Gemeten grootheid	Lokatie
Meteorologische gegevens (gemiddeld per dekade)	
Temperatuur (graden Celcius) Globale instraling (Joule/cm ²) Windsnelheid (0.5 m/sec)	K.N.M.I. meetstations ' '
Waterkwaliteitsgegevens (in g/m ³)	
Zuurstof Biochemisch Zuurstofverbruik Ammonium-stikstof (Nitraat+Nitriet)-stikstof Totaal stikstof Ortho-fosfaat Totaal-fosfaat Chloride Opgelost Calcium *) Silikaat Totaal IJzer Bicarbonaat *) Zwevend stof	Polderuitslag Grevelingen Polderuitslag Volkerak Polderuitslag Zoommeer Sluis Krammer en Grevelingen Sluis Bergsche Diep Sluis Kreekrak Brouwersluis (kwel Grevel.) H9 Volkeraksluis ***) H12 Variant Halskanaal neerslag
Waterbalansgegevens **) per dekade in m ³ /sec)	
Extra doorstroomdebiet Peil t.o.v. N.A.P. in m Inlaatdebiet Uitlaatdebiet Polderuitslag of opname Kwel Zijging Neerslag Verdamping Watergebruik sluizen Uitwisseling via sluizen	Grevelingen Grevelingen/Zoommeer/Volkerak ' ' ' ' ' ' ' ' '
*) geheel of gedeeltelijk geschat volgens berekening die in tekst is toegelicht **) Gegevens variabel per hydrologisch scenario ***) Voor de scenario's 1985 is voor punt H9 gebruik gemaakt van de model resultaten van de Hollands Diep/Haringvliet studie voor wat betreft O2, BOD, Stikstof en fosfor (Stans 1981).	

3.2.1 Gegevens Deltadienst

De Deltadienst heeft de gegevens op magneetband toegeleverd, ze zijn te onderscheiden in:

- Meteorologische gegevens (vnl. KNMI-data) van de Grevelingen, het Volkerak en het Zoommeer (GVZ)
- Waterbalansgegevens van het GVZ
- Waterkwaliteitsgegevens van de belastende wateren (met uitzondering van BOD, Ca++ en HCO₃-)

Het betreffen de gegevens voor de te modelleren hydrologische en meteorologische jaren 1974, 1975 en 1976. De gegevens zijn opgegeven in tijdsperioden van dekaden.

De meteorologische gegevens zijn voornamelijk afkomstig van het K.N.M.I.

De waterbalansgegevens zijn voor de Grevelingen, het Volkerak en het Zoommeer opgegeven voor ieder scenario dat door de Deltadienst is vastgesteld. Deze scenario's zijn vermeld in Tabel 3.1 Tevens heeft de Deltadienst de geometrische gegevens verstrekt van de betreffende meren, die in Tabel 3.2 vermeld staan.

Tabel 3.1
Overzicht hydrologische scenario's.

scenario nummer	extra debiet Volkerak (m ³ /sec)	extra debiet Grevelingen (m ³ /sec)	extra debiet Zoommeer (m ³ /sec)	peil Grevelingen
1	0	0	0	vast
2	0	0	0	variabel
3	25	0	25	variabel
4	50	0	50	variabel
5	100	0	100	variabel
6	0	50	0	variabel
7	75	50	25	variabel
8	100	50	50	variabel
9	150	50	100	variabel
10	100	100	0	variabel
11	125	100	25	variabel
12	150	100	50	variabel
13	200	100	100	variabel

Het extra doorspoeldebiet wordt alleen toegepast indien voldoende water beschikbaar is, zodat de uiteindelijke debieten lager worden.

Tabel 3.2
Overzicht geometrische gegevens.

Meer	gemiddelde diepte (m)	oppervlak (milj m ²)	volume (milj m ³)
Grevelingen	5.4	106.7	579.0
Volkerak	5.2	45.7	238.0
Zoommeer	3.5	15.8	55.0

De in Tabel 3.1 gegeven nummering voor de scenario's zal in het hierna volgende worden gehanteerd, ook al zijn niet alle scenario's uiteindelijk doorerekend.

Varianten en gevoeligheids onderzoek zullen met letters worden aangeduid.

Voor de waterkwantiteits gegevens bestaat er per scenario een bestand waarin alle debieten per inlaatpunt en uitlaatpunt voor de jaren 1974/1976 zijn opgenomen. De inlaatpunten en uitlaatpunten worden onderscheiden in:

- Hoofdinlaat.
Voor het Volkerak is dit het Hollands Diep.
Voor de Grevelingen is dit het Volkerak, het Hollands Diep via de Leidam, of het Haringvliet via het Halskanaal.
Voor het Zoommeer is dit het Volkerak via de Eendracht.
- Polderinlaten.
- Neerslag.
- Uitwisseling sluizen (inlaat en uitlaat).
Voor het Volkerak is dit de Krammer sluis.
Voor de Grevelingen is dit de Grevelingen sluis.
Voor het Zoommeer is dit de Bergsche Diep sluis en de Kreekkraak sluis.
- Hoofduitlaat.
Voor het Volkerak is dit de Flakkeese spuisluis en de Eendracht.
Voor de Grevelingen is dit de Brouwer spuisluis.
Voor het Zoommeer is dit de Bathse spuisluis.
- Landbouw onttrekkingen.
- Verdamping.

Voor de waterkwaliteitsgegevens bestaat er per gemeten grootheid (10 stoffen), per te modelleren jaar (1974, 1975 of 1976) een bestand, waarin de gegevens per inlaatpunt van de betreffende meren, behalve het Volkerak als inlaatpunt voor Grevelingen en Zoommeer, per dekade zijn opgenomen. In totaal betreft het 9 inlaatpunten.

3.2.2 Gegevens Waterloopkundig laboratorium.

Voor modellering ontbreken de waterkwaliteitsgegevens van BOD, Ca++ en HCO₃⁻.

Ca2+ en HCO3-

Om Ca2+ en HCO3- gegevens alsnog in de databestanden op te nemen zijn schattingen gedaan gebaseerd op relaties tussen chloride, calcium en bicarbonaat op het punt H9 - Haringvlietbrug (G.Th. v.Eck persoonlijke meded.) en aan de hand van ervaringen voor zout water. Voor de modellering zijn de relaties gebruikt van Tabel 3.3

Tabel 3.3
schatting ontbrekende Ca++ gehalten

inlaat punt	relatie
polderuitslag Grevelingen	$[Ca^{2+}] = 0.021 * [Cl^-]$
polderuitslag Zoommeer	$[Ca^{2+}] = 0.021 * [Cl^-]$
polderuitslag Volkerak	$[Ca^{2+}] = 0.1 * [Cl^-] + 60$
H9 Volkeraksluis	$[Ca^{2+}] = 0.1 * [Cl^-] + 60$
H12 variant Halskanaal	$[Ca^{2+}] = 0.1 * [Cl^-] + 60$
sluis Bergsche Diep	$[Ca^{2+}] = 353.$
sluis Krammer en Grevelingen	$[Ca^{2+}] = 145.$
sluis Kreekrak	$[Ca^{2+}] = 350.$
neerslag	$[Ca^{2+}] = 0.0$
Brouwersluis (kwel Grevelingen)	$[Ca^{2+}] = 357.$

Tussen bicarbonaat en chloride is vrijwel geen relatie. Voor meetpunt H9 blijkt wel een relatie te bestaan tussen HCO3- en Ca2+ :

$$[HCO_3^-] = 0.8 * [Ca^{2+}] + 87.5$$

Voor het Hollands Diep/Haringvliet gebied heeft het gehalte van HCO3- een vrijwel konstante waarde, zodat een indeling in klassen een verantwoorde schatting is van de HCO3- concentratie zoals in Tabel 3.4 is weergegeven

Tabel 3.4
schatting ontbrekende HCO3- gehalten

Voorwaarde:	relatie:
$[Ca^{2+}] \leq 60 \text{ mg/l}$	$[HCO_3^-] = 135 \text{ mg/l}$
$[Ca^{2+}] > 60 \text{ mg/l}$	$[HCO_3^-] = 145 \text{ mg/l}$
$[Ca^{2+}] > 70 \text{ mg/l}$	$[HCO_3^-] = 150 \text{ mg/l}$
$[Ca^{2+}] > 80 \text{ mg/l}$	$[HCO_3^-] = 160 \text{ mg/l}$
$[Ca^{2+}] > 90 \text{ mg/l}$	$[HCO_3^-] = 170 \text{ mg/l}$
$[Ca^{2+}] > 100 \text{ mg/l}$	$[HCO_3^-] = 180 \text{ mg/l}$
$[Ca^{2+}] > 150 \text{ mg/l}$	$[HCO_3^-] = 190 \text{ mg/l}$
$[Ca^{2+}] > 200 \text{ mg/l}$	$[HCO_3^-] = 200 \text{ mg/l}$

BOD5

Voor de ontbrekende gehalten aan BOD5 is een globale schatting

gedaan aan de hand van BOD-metingen bij de monsterpunten Roosendaal/Steenbergse Vliet, Mark en Dintel, Gemaal Eendracht, gemaal Dreischer en gemaal Den Osse :

- voor de polderlozingen een gehalte van 9.0 mg/l
- doorlaat van de sluizen een gehalte van 4.0 mg/l
- gehalte van BOD5 in neerslag 0.0 mg/l

Voor de BOD5 gehalten van de RIZA meetpunten H9 en H12 zijn de waarden uit de kwartaal verslagen aan het bestand toegevoegd. Zonodig is lineaire interpolatie toegepast om per dekade een meetwaarde te verkrijgen.

Waterkwaliteit Hollands Diep: 1985, sanerings scenario.

Voor de simulaties van de situatie in 1985, na sanering van de Rijn en onder de aanname van 50 % polyfosfaat vervanging in wasmiddelen, zijn waterkwaliteits gegevens berekend voor het punt H9 in het Hollands Diep. De volgende overige aannamen zijn gemaakt:

- Voor het inlaatpunt van het Volkerak wordt de concentratie van de gemodelleerde variabelen voor meetpunt H9 als representatief beschouwd. Deze kwaliteit is het resultaat van de Hollands-Diep/Haringvliet studie uitgevoerd door het Waterloopkundig Laboratorium (Stans 1982). De resultaten van deze studie voor wat betreft het effect van 50% polyfosfaat vervanging zijn gebruikt voor aanvullende scenario berekeningen.
- Voor de polderlozingen wordt een zelfde kwaliteit van het water verondersteld en worden de waarden van 1974, 1975 en 1976 gebruikt.
- De waterkwaliteit van de inlaatpunten vanuit het Volkerak op de Grevelingen en het Zoommeer zijn afhankelijk van de modelresultaten van het Volkerak.
- De hydrologie en meteorologie van de jaren 1974/1976 zijn gebruikt voor de 1985 simulatie.

Verwerking

De Waterkwaliteits bestanden worden met de debieten en meteorologische gegevens geaggregeerd tot het invoerbestand voor de gekoppelde versie van CHARON en BLOOM II. Naast dit invoerbestand zijn nog een tweetal bestanden nodig om met dit model te kunnen rekenen. Het ene bestand bevat voor CHARON benodigde gegevens met betrekking tot de geometrie van het systeem, de beschrijving van de chemische samenstelling van het water en de kinetiek van de processen, die zich daarin afspelen. Het andere bestand is het reeds genoemde bestand van de voor BLOOM II benodigde biologische konstanten met betrekking tot chemische samenstelling (C, N, P, Si), specifieke lichtextinctie, primaire produktie, sterfte en respiratie van de diverse fytoplanktonsoorten. Deze twee bestanden worden bij de systeemdefinitie behandeld.

3.2.3 Achtergrond extinktie en bodem nalevering

Voor reeds bestaande meren wordt normaal de achtergrond extinktie bepaald door een analyse van extinktie gegevens. Omdat deze

gegevens voor nog niet bestaande meren ontbreken moet een schatting gemaakt worden van de achtergrond extinktie. Deze schatting is uitgevoerd door de Delta dienst (van Eck, 1981), waarbij een waarde van 1.1/m voor alle meren werd gevonden.

De bodemnalevering wordt bepaald door analyse van waterkwaliteits gegevens van het interstitiele water en eventueel bijgesteld door kalibratie. Omdat deze exercitie ook niet mogelijk is, is een waarde vastgesteld die gelijk is aan de waarde gevonden voor het IJsselmeer, behalve voor fosfor en ijzer, waarvoor een waarde gebruikt is die 40 % van de IJsselmeer waarde bedraagt. Deze verlaging is aangebracht, omdat het IJsselmeer hoge waarden oplevert, vooral veroorzaakt door een langdurige hoge belasting met deze stoffen. Omdat met name voor de Grevelingen een aantal scenario's langere verblijftijden kent, met lagere externe belastingen, is een verlaging van de bodemnalevering te verdedigen. Voor systemen met korte verblijftijd, zoals het Volkerak en het Zoommeer, is de grootte van de bodemnalevering relatief onbelangrijk ten opzichte van de grote externe belasting.

Op beide onzekerheden, achtergrondextinktie en bodemnalevering, zal in het gevoeligheids onderzoek nader worden ingegaan.

3.3 HET FYTOPLANKTON MODEL BLOOM II

3.3.1 Algemeen

BLOOM II is in het kader van het WABASIM project in samenwerking met de Deltadienst door het WL ontwikkeld (Los, 1982). Dit model is de sterk gewijzigde zoetwater versie van het 'Algae Bloom Model'. Deze oorspronkelijke versie werd door de RAND Corp. uit de Verenigde Staten ontwikkeld in het kader van de beleids analyse omtrent de afsluiting van de Oosterschelde (POLANO) in opdracht van Rijkswaterstaat (Bigelow et al., 1977). Behalve in het kader van WABASIM is BLOOM II op uitgebreide schaal toegepast tijdens de beleidsanalyse van de Nederlandse waterhuishouding, de zogenaamde PAWN studie (Los et al., 1982). Verder is het model gebruikt bij de IJsselmeer studie en wordt het gebruikt bij het waterkwaliteits onderzoek van verschillende meren in het Hoogheemraadschap Rijnland.

Het model maakt gebruik van een optimalisatie techniek, lineaire programmering, om het potentiele fytoplankton maximum te berekenen in overeenstemming met de heersende abiotische omstandigheden. De bloei kan worden beperkt door de drie voedingstoffen stikstof, fosfor, en silicium, en/of door de groeisnelheid en de beschikbare hoeveelheid energie. In deze laatste twee factoren spelen behalve de hoeveelheid zonlicht ook andere grootheden zoals de temperatuur en de diepte een belangrijke rol. Afhankelijk van de omstandigheden kiest het model uit de (momenteel) tien aanwezige soorten die combinatie, die het meest efficiënt van de beschikbare hoeveelheden gebruik maakt.

Fytoplankton soorten kunnen vaak hoge groeisnelheden bereiken, waardoor zij zich enkele malen per week, soms zelfs enkele malen per dag kunnen vermenigvuldigen. Daarom wordt in het model

gewoonlijk een evenwicht voor fytoplankton verondersteld met een tijdstap van een week. Bovendien wordt aangenomen dat de nutriënten cyclus (Fig. 3.3) in evenwicht is. Er kunnen zich omstandigheden voordoen waaronder met name deze laatste aanname tot significante afwijkingen kan leiden (Los, 1982). Overigens speelt dit probleem niet in de gekoppelde versie van BLOOM II en CHARON (zie 3.4.4.1). Omdat de externe milieu kondities meestal geleidelijk veranderen, vertonen de resultaten van het model gewoonlijk geen grote sprongen, hoewel die theoretisch mogelijk zijn.

Oorspronkelijk kon het model uitsluitend voor evenwichts situaties worden gebruikt. Momenteel zijn hiernaast verschillende opties ingebouwd om de toepasbaarheid te vergroten in situaties, waarin (mogelijk) geen evenwicht is bereikt binnen een berekenings tijdstap, te weten:

1. De nominale tijdstap (een week) kan gedurende een deel of het gehele jaar worden vergroot.
2. Er kunnen beperkingen worden toegevoegd voor de maximale groei van elke soort in een tijdstap, gelet op de energie kondities (gemiddeld licht niveau, temperatuur).
3. De vergelijkingen voor de regeneratie van nutriënten kunnen dynamisch worden opgelost met behoud van de steady state aanname voor fytoplankton.
4. De extinktie, die wordt veroorzaakt door bestaand levend en dood fytoplankton, kan als beperking worden opgelegd aan alle overige soorten, wanneer die bij een volgende tijdstap in de bloei trachten te komen. Hierbij wordt rekening gehouden met de verdwijnsnelheid van de bestaande soorten.

In onderhavig onderzoek met de gekoppelde versie van BLOOM II en CHARON zijn de tweede en vierde optie altijd gebruikt.

Verder kunnen zooplankton biomassa's worden ingevoerd om de verliezen tengevolge van graas uit te rekenen. Dit is voor dit projekt niet gedaan, omdat uiteraard geen zooplankton gegevens beschikbaar waren. In de IJsselmeer studie is wel het potentiële effect van zooplankton onderzocht, waaruit gekonkludeerd kan worden dat een mogelijke verlaging van 10 a 20 % in het biomassa niveau direkt na de voorjaarsbloei mogelijk is.

Bij het WABASIM projekt (Los, 1982) werd overigens gekonkludeerd, dat graas door zooplankton tijdens grote bloeien in de Grote Rug onbelangrijk was. Op grond van een geheel verschillende benadering komen Bannink en anderen (1978) tot een vergelijkbare konklusie. Graas bleek geen belangrijke vorm van sterfte in twee van de drie door hen bekeken ringen in de Grote Rug in 1977: ring 1 en ring 2; in laatstgenoemde ring werd een zeer grote blauwwieren bloei waargenomen. Alleen in ring 3 was graas mogelijk belangrijk, afhankelijk van de aannamen, maar hierin kwam geen grote bloei voor. Hoe dan ook, het ontbreken van graas kan bij de toepassing van het model als een mogelijke foutenbron worden gezien. Hierop zal bij de bespreking van de resultaten nog worden terug gekomen.

Doordat het model de biomassa maximaliseert heeft het de neiging het voorkomen van grote bloeien enigszins te overschatten. Er kunnen beperkingen optreden, die niet in het model zijn opgenomen, de sterfte kan hoger zijn dan de (lage) schatting, die in het model wordt gebruikt, of de voorgeschiedenis van de bloei kan er de

oorzaak van zijn, dat een andere (=minder efficiënte) combinatie van soorten uiteindelijk domineert dan in de strikte evenwichts versie van BLOOM II.

Er kunnen zich ook omstandigheden voordoen, waaronder het model juist een ondervoorspelling geeft, bijvoorbeeld doordat het fytoplankton zich aanpast aan (ongunstige) omstandigheden op een wijze die niet in het model is geïntroduceerd. Een andere mogelijke oorzaak is dominantie van soorten, die niet in het model zijn opgenomen, en die kennelijk onder de gegeven condities een hoger biomassa niveau kunnen bereiken. Uit de resultaten van de IJsselmeer studie blijkt dat de berekende fytoplankton niveaus in het herhaaldelijk te hoog zijn na de voorjaarsbloei, maar juist te laag tijdens de herfst.

3.3.2 Relatie tussen nutriënten en fytoplankton biomassa

Om de fytoplankton biomassa te berekenen die kan voorkomen, moeten (1) de totale hoeveelheid van elk nutriënt in het water en (2) de beschikbare en niet-beschikbare frakties worden geschat. De totale hoeveelheid nutriënt in het water wordt beïnvloed door twee belangrijke processen: water transport (belasting en onttrekking) en uitwisseling met de bodem. Beide processen worden in CHARON, niet in BLOOM II gemodelleerd.

Beschouw de volgende variabelen:

- x_j = de hoeveelheid van fytoplankton soort j ,
- $a_{i,j}$ = de hoeveelheid van nutriënt i per biomassa eenheid van j : de (minimum) stochiometrische konstante,
- y_i = de hoeveelheid van nutriënt i , die (tijdelijk) niet beschikbaar is voor fytoplankton,
- z = de totale hoeveelheid zooplankton,
- c_i = de hoeveelheid van nutriënt i per biomassa eenheid van zooplankton,
- e_i = het surplus van nutriënt i , dat direct voor fytoplankton beschikbaar is,
- b_i = de totale hoeveelheid van nutriënt i , die potentieel beschikbaar is gedurende een tijdstap,
- q_i = de fraktie van dood fytoplankton, die gemineraliseerd moet worden en niet direct beschikbaar komt, als een cel sterft (de fraktie, die niet autolyseert),
- D_i = de specifieke mineralisatie snelheid van dood fytoplankton per dag,
- S = de specifieke sedimentatie snelheid van dood fytoplankton per dag.

Voor de totale hoeveelheid van nutriënt i in het water moet de volgende massa-balans vergelijking gelden:

$$b_i = \sum_j a_{i,j} \cdot x_j + y_i + c_i \cdot z + e_i \quad (3.1)$$

Vaak is een aanzienlijk deel van een nutriënt vastgelegd in dood fytoplankton (detritus) en daardoor tijdelijk niet beschikbaar voor levende cellen. Het modelleren van detritus is echter om twee

redenen moeilijk: (1) er is geen methode om detritus in een monster te onderscheiden van andere organische frakties, zodat de berekende hoeveelheid niet rechtstreeks met een waarneming kan worden vergeleken en (2) er bestaat nogal wat onzekerheid over de snelheid, waarmee detritus wordt geproduceerd en verwijderd.

Een bepaalde hoeveelheid ($M_j \cdot x_j$) met nutriënten inhoud ($M_j \cdot a_{i,j} \cdot x_j$) van elke fytoplankton soort sterft, maar slechts een deel hiervan ($q_i \cdot M_j \cdot a_{i,j} \cdot x_j$) wordt detritus, wanneer de cel desintegreert (een proces genaamd autolyse). Voor elk nutriënt i is een q_i waarde van 0.5 aangenomen: 50 procent van elk nutriënt wordt detritus. De overige 50 procent komt (vrijwel) direkt beschikbaar voor de groei van nieuwe individuen. Detritus kan worden verwijderd naar de bodem ($S \cdot y_i$) of - door bacteriele afbraak - naar het opgeloste nutriënten kompartiment ($D_i \cdot y_i$) in evenredigheid met zijn concentratie. Daardoor kan de verandering van de hoeveelheid van nutriënt i in detritus worden geschreven als:

$$\frac{d y_i}{dt} = \sum_j (q_i \cdot M_j \cdot a_{i,j} \cdot x_j) - D_i \cdot y_i - S \cdot y_i \quad (3.2)$$

Aangezien y_i afhangt van de hoeveelheid fytoplankton x_j , is er geen eenvoudige analytische oplossing voor (3.2), tenzij extra aannamen worden gedaan. Een mogelijkheid is de veronderstelling, dat het detritus kompartiment binnen een tijdstap een evenwicht bereikt. Deze aanname is in BLOOM II gedaan. In het hier alleen toegepaste gekoppelde model wordt detritus echter dynamisch gemodelleerd, zodat een eventuele afwijking van het evenwichts niveau geen probleem oplevert.

Tevens is in BLOOM II aangenomen, dat er geen sedimentatie van detritus plaatsvindt. Deze laatste aanname is gedaan, om te voorkomen dat in de berekeningen wel nutriënten naar de bodem verdwijnen, zonder dat er nutriënten uit de bodem terugkomen. In het gekoppeld model spelen deze problemen geen rol, aangezien de uitwisseling met de bodem hierin expliciet is opgenomen.

3.3.3 Relatie tussen licht en fytoplankton biomassa

Zoals vrijwel alle andere planten, maakt het fytoplankton voor zijn energie voorziening rechtstreeks gebruik van het zonlicht. Bij de bepaling van de de energiebalans, kunnen de volgende termen worden onderscheiden:

- Pg = de over diepte en tijd gemiddelde specifieke bruto produktie snelheid per dag,
- R = de specifieke respiratie snelheid per dag,
- M = de natuurlijke specifieke sterfte snelheid per dag, dat wil zeggen alle vormen van sterfte, behalve graas,
- G = de specifieke sterfte snelheid per dag ten gevolge van graas door zooplankton.

Het netto effect van deze processen kan worden samengevat in de bekende eerste orde differentiaal vergelijking:

$$\frac{dx}{dt} = (P_g - M - R - G) \times \quad (3.3)$$

Vergelijking (3.3) geldt voor elke fytoplankton soort in het model, maar voor de duidelijkheid zijn de indices en funktionele relaties vooralsnog weggelaten. De drie genoemde verliestermen worden onderscheiden, omdat ze allen een duidelijke fysiologische basis hebben. Dat wil overigens niet zeggen, dat hun waarden onder alle kondities bekend zijn.

Het lijkt voor de hand liggend, eerst de primaire produktie en vervolgens de verschillende verliestermen te bespreken, maar omdat produktie het ingewikkeldste proces is, is de omgekeerde volgorde aangehouden.

3.3.3.1 Respiratie

In de fysiologische literatuur onderscheidt men twee afzonderlijke vormen van respiratie: foto- en donker respiratie. Harris (1978) zegt echter, dat foto-respiratie tijdens een bloei onbelangrijk is. Bij de zogenaamde donker respiratie gebruikt het fytoplankton substraten uit de voorafgaande licht periode om bouwstoffen voor de cel en de benodigde energie te leveren. De synthese van allerlei andere verbindingen zoals eiwitten zal nu niet worden beschouwd. Overigens is de naam wat misleidend, want de chemische reacties, die gezamenlijk als donker respiratie bekend staan, vinden ook gedurende het licht plaats.

Goede gegevens over respiratie snelheden zijn schaars, doordat:

- De meest gebruikte veld methode om produktie te meten -met radioactief koolstof C^{14} - geen meting van de respiratie toelaat.
- Het belang van respiratie lang is onderschat.

Meestal wordt $R(T)$ geschreven als een exponentiele funktie van de temperatuur:

$$R(T) = \text{EXP}(A.T - B) \quad (3.4)$$

die bij 20°C varieert van 0.05 tot 0.20 maal de maximale netto produktie snelheid $P_{\text{max}}(T)$: de produktie snelheid bij het licht optimum en een overmaat aan nutrienten. Volgens de meeste onderzoeken ligt de Q_{10}^1 voor respiratie bij de meeste soorten in de orde van 2.3 tot 2.9. Aangezien de produktie meestal een minder sterke temperatuurs funktie is, wordt respiratie bij een afnemende temperatuur een minder belangrijke verliesterm. In BLOOM II wordt de respiratie uit de maximum produktie bij 20° berekend zie: Tabel 3.5

¹ De Q_{10} is de toename van een snelheids konstante per 10° Celcius. Een Q_{10} waarde van 2 betekent, dat een proces bij 20° tweemaal zo snel verloopt als bij 10° .

Tabel 3.5

Verhouding tussen $R(T)$ en $P_{nmax}(T)$ bij 20°C en de waarde van de Q_{10} bij verschillende fytoplankton soorten.

Groep van Soorten	$R(20) / P_{nmax}(20)$	Q_{10}
Blauw wieren	0.05	1.9
Diatomeeen	0.125	2.9
Flagellaten	0.125	2.9
Groen wieren	0.125	2.9
Dinoflagellaten	0.20	1.9

3.3.3.2 Natuurlijke sterfte

Natuurlijke sterfte is net als respiratie een verlies term, maar er is een duidelijk fysiologisch onderscheid tussen beide processen. Respiratie betekent voornamelijk, hoewel niet uitsluitend, een verlies aan koolstof verbindingen (energie). Maar een gezonde cel zal bijvoorbeeld geen eiwitten voor zijn energie voorziening gebruiken, tenzij de uitwendige kondities bijzonder ongunstig worden. Respiratie heeft dan ook geen effect op de de nutriënten cyclus. In de gekoppelde versie van BLOOM II en CHARON speelt respiratie dan ook geen rol bij de modellering van de chemische processen, maar beïnvloed alleen de door BLOOM II berekende netto primaire produktie.

Na een aantal celdelingen, met name onder ongunstige milieu kondities, zal elke fytoplankton cel ophouden zich te delen en uiteindelijk sterven. Vervolgens valt de cel uiteen en komt de cel inhoud vrij in het omringende water. Een bepaalde fraktie komt vrij in een vorm, die direkt kan worden opgenomen door levende cellen², maar de rest wordt detritus en gaat daarmee tijdelijk verloren, totdat bacteriele afbraak heeft plaats gevonden.

Mortaliteit heeft dan ook twee effecten op een fytoplankton populatie: een energieverlies net als respiratie, maar bovendien een verlies aan cel materialen (beschikbare nutriënten), omdat de cel uiteenvalt in (gedeeltelijk) langzaam afbrekende delen.

Jammer genoeg zijn er geen direkte methodes om de mortaliteit te schatten, aangezien het niet mogelijk is, dood cel materiaal te onderscheiden van andere organische verbindingen. De enige praktische methode is het aftrekken van de waargenomen netto biomassa veranderingen van de gemeten produktie snelheden op achtereenvolgende tijdstippen. De mortaliteit wordt dan feitelijk geschat als de sluitpost van de biomassa balans.

² In het model wordt op grond van experimentele onderzoeken een waarde gebruikt van 50 procent.

Toepassing van deze indirecte methode op gegevens uit de Grote Rug in het kader van WABASIM, heeft geleid tot de volgende konklusies: (1) zowel de mortaliteit als de produktie snelheid zijn groot (maximaal ongeveer 1.0 per dag) in vergelijking tot de waargenomen netto verandering in fytoplankton populaties (meestal minder dan 0.1 per dag), (2) $M(T)$ is exponentieel gekorreleerd met de water temperatuur maar (3) exceptioneel lage waarden kunnen bij elke temperatuur voorkomen.

Jaarreeksen van M konden echter niet aan enige variabele worden gerelateerd op een wijze, die het mogelijk maakt de mortaliteits snelheid te berekenen in overeenstemming met de waarnemingen. Bijvoorbeeld de vaak veronderstelde negative terugkoppeling tussen de sterfte snelheid M en de biomassa concentratie x (geleidelijk toenemende mortaliteit bij een toename van de bloei) bleek onjuist in de gegevens van de Grote Rug. Gewoonlijk was de sterfte laag tijdens een bloei, maar hoog in periodes met weinig fytoplankton.

Gezien de doelstelling van BLOOM II: maximalisatie van de fytoplankton biomassa, is een alternatieve aanpak voor dit model gevolgd, waarbij de mortaliteit gelijk wordt gesteld aan de minimum waarde, die redelijkerwijs verondersteld mag worden. Een vergelijking om $M_{min}(T)$ te berekenen werd afgeleid uit Grote Rug gegevens. Hierbij is een curve getrokken door de laagste punten in een grafiek van de mortaliteits snelheid tegen de temperatuur:

$$M_{min}(T) = \text{EXP}(0.0742 \cdot T - 2.9678) \quad (3.5)$$

Gezien het huidige kennisniveau en de overeenkomst in geschatte waarden van $M_{min}(T)$ tijdens de bloeien van verschillende soorten, wordt dezelfde waarde gebruikt voor elke soort. Dit betekent niet, dat alle soorten dezelfde aktuele sterfte snelheid hebben, maar veeleer dat onder gunstige kondities alle soorten dezelfde, lage sterfte snelheid kunnen bereiken.

3.3.3.3 Primaire produktie

De primaire produktie snelheid wordt door diverse omgevingsfactoren beïnvloed op een wijze, die verschilt van soort tot soort. Een mathematische beschrijving van dit proces zal dan ook altijd een vrij sterke simplifikatie van de werkelijkheid inhouden. In het volgende zal de bruto produktie snelheid P_g (zie 3.3.3) worden geschreven als het produkt van diverse termen, die volgens de aannamen van het model onderling onafhankelijk zijn.

Als er voldoende nutriënten zijn kan P_g worden geschreven als een funktie van temperatuur en licht, die voor elke temperatuur T een maximum bereikt, genaamd $P_{gmax}(T)$ bij een bepaalde licht intensiteit: I_{opt} . Door $R(T)$ van $P_{gmax}(T)$ af te trekken kan de maximum netto specifieke produktie snelheid $P_{nmax}(T)$ worden berekend. Als nog slechts een klein deel (e_i) van nutriënt i beschikbaar is, kan P_g afnemen, wat zal worden aangeduid met een funktie $g(e_i)$. Na introductie van een licht afhankelijkheids funktie $E(I, T)$, waarbij

I = de totale instraling in Joules per m² per uur van het fotosynthetisch actief deel van het licht spektrum,

kan P_g worden berekend als:

$$P_g(I, T, e_1) = E(I, T) * P_{gmax}(T) * g(e_1) \quad (3.6)$$

Er worden diverse funkties voor g(e₁) gebruikt, bijvoorbeeld de Monod en de stap-funktie. Deze laatste wordt in BLOOM II gebruikt: zolang een nutrient in oplossing is wordt de groeisnelheid alleen beïnvloed door licht en temperatuur, maar bij een nutrient uitputting wordt de netto groeisnelheid gelijk aan nul (Los, 1982). Door het grote aantal soorten in het model zou het trouwens bijzonder moeilijk zijn gebruik te maken van de Monod funktie, omdat hierbij een half-waarde konstante moet worden gebruikt, maar:

- Kleine onderlinge verschillen hebben een zeer groot effect op de soorten samenstelling.
- Gemeten waarden voor een soort vertonen grote onderlinge verschillen.
- Gemeten waarden hebben de neiging steeds kleiner te worden naarmate de experimentele technieken beter worden.

3.3.3.4 Primaire produktie en temperatuur

Volgens de meeste gepubliceerde gegevens kan P_{gmax} worden beschreven als een exponentiele funktie van de temperatuur, althans over de gehele temperatuur reeks zoals die wordt waargenomen in meren in de gematigde klimaatszones.

In een klassieke publikatie over de relatie tussen temperatuur en groei van fytoplankton soorten in de zee, heeft Eppley (1972) meer dan honderd waarnemingen uitgezet van het maximum aantal verdubbelingen per dag (U_{max}) in kontinu kulturen tegen de temperatuur en volgens een curve getrokken door de hoogste punten bij elke temperatuur. Deze curve kan worden beschreven met de volgende vergelijking:

$$U_{max}(T) = \text{EXP}(0.0639 * T - 0.16) \quad (3.7)$$

en aangezien P_{nmax}(T) gelijk is aan U_{max}(T) maal log₂, geldt

$$P_{nmax}(T) = \log_2 * \text{EXP}(0.0639 * T - 0.16) \quad (3.8)$$

Er zijn aanwijzingen dat (3.8) tamelijk universeel geldig is voor zowel zout- als zoetwater soorten. Echter grote soorten zoals bouwvier kolonies kunnen deze hoge groeisnelheden niet bereiken blijkens produktie metingen ondermeer in de Grote Rug. Gemiddeld bedroeg hun maximale produktie snelheid ongeveer 70 procent van die der kleine soorten. Dit getal wordt daarom in BLOOM II gebruikt om

de $P_{nmax}(T)$ waarde van blauwwieren te verminderen ten opzichte van (3.8).

3.3.3.5 De produktie efficiëntie en het licht

In het voorgaande is produktie gebruikt als synoniem voor groei, dat wil zeggen: vermeerdering van biomassa, die uiteindelijk tot een celdeling leidt. Een noodzakelijke, maar onvoldoende voorwaarde voor groei is primaire produktie (fotosynthese): grofweg de omzetting van zonlicht in zetmeel. In veld situaties is men meestal geïnteresseerd in groei, maar beschikbare gegevens, zo die er zijn, hebben meestal betrekking op de produktie gemeten met bijvoorbeeld C^{14} of zuurstof.

Om de zo belangrijke relatie tussen de licht intensiteit en de groei vast te leggen is het meestal noodzakelijk, bepaalde aannamen te doen. Het meest voor de hand ligt uiteraard de veronderstelling, dat groei dezelfde functie van het lichtniveau is als fotosynthese. Immers fotosynthese kan als de motor achter de groei worden beschouwd. Deze opvatting wordt bijvoorbeeld verdedigd door Harris (1978) en in BLOOM is deze praktijk gevolgd. Het is echter goed te bedenken, dat niet iedereen er gelijk over denkt. Medewerkers van de afdeling Microbiologie van de Universiteit van Amsterdam komen bijvoorbeeld in een door WABASIM gesponserd onderzoek voorlopig tot de konklusie, dat groei bij een lagere licht intensiteit maximaal is dan die waarbij de fotosynthese maximaal is.

3.3.3.6 Middeling van de produktie

Omdat de licht intensiteit varieert over de diepte en de tijd wordt in het model een middelings procedure uitgevoerd, waarbij de gemiddelde efficiëntie E_a voor een tijdstap wordt verkregen. Hierbij doen zich verschillende biologische en numerieke komplikaties voor, die elders worden besproken (Los, 1982). Na introductie van een functie F en definitie van de volgende symbolen:

DL = de dag gemiddelde licht periode in uren (de daglengte),
 I_s = de licht intensiteit juist onder het water oppervlak,
 H = de beschouwde diepte,
 K = de totale extinktie van het water per meter,
 K_l = de extinktie bijdrage van levend fytoplankton per meter,
 K_d = de extinktie bijdrage van dood fytoplankton per meter,
 K_b = de extinktie bijdrage van al het overig materiaal per meter.

kan E_a uiteindelijk worden berekend als:

$$E_a = \frac{DL}{16} \frac{F(K,H,I_s)}{K.H} \quad (3.9)$$

In deze vergelijking is:

$$K = K_l + K_d + k_b \quad (3.10)$$

Volgens verg. (3.9) is E_a evenredig met de daglengte. Men kan bewijzen, dat E_a afneemt als het produkt van de diepte en de totale extinktie toeneemt. Als een bloei omhoog gaat, zal K toenemen, zodat E_a alsmear kleiner wordt (self-shading). In verg. (3.9) is een konstante van 16 opgenomen, aangezien de groei van de meeste fytoplankton soorten verzadigd raakt bij een daglengte van 16 uur.

Vergelijkingen (3.9) en (3.6) kunnen in de fytoplankton vergelijking (3.3) worden ingevuld voor elke soort j :

$$\frac{dx}{dt} = (P_{gmax}(T) * E_a - M_{min}(T) - R(T) - G) x \quad (3.11)$$

Met behulp van de gevonden uitdrukkingen voor $P_{gmax}(T)$, E_a , $M_{min}(T)$ en $R(T)$, ($G = 0$ moest worden verondersteld) is het nu mogelijk verg. (3.11) op te lossen.

Zonder in details te treden, zullen nog enkele komplikaties kort worden vermeld. De relatie tussen de gemiddelde efficiëntie en de tijd is minder eenvoudig dan vaak wordt aangenomen aangezien veel fytoplankton soorten gevoelig schijnen voor het ritme, waarin het licht varieert. Dit uit zich ondermeer is een hoge initiele groeisnelheid gedurende het eerste half uur licht na een donker periode. Modellerings hiervan vereist feitelijk kennis van cirkulatie patronen door het water, omdat cirkulatie een belangrijke oorzaak is van optredende verschillen in licht sterkte.

Bij de beschrijving van de relatie tussen de produktie efficiëntie en de diepte doen zich komplikaties voor, wanneer de licht intensiteit anders dan exponentieel met de diepte afneemt. Dit laatste kan voorkomen tijdens een bloei van sommige blauwwieren met actief drijfvermogen.

3.3.3.7 Energie en groei beperking

Wanneer de uitwendige omstandigheden lang genoeg gelijk blijven, zal het fytoplankton een evenwicht kunnen bereiken. Gesteld dat er voldoende nutriënten zijn, dan betekent dit voor de energie balans dat verg. (3.11) gelijk is aan nul: de verliezen compenseren de totale produktie. Dit evenwicht wordt bereikt bij een bepaald extinktie niveau: de totale uitdoving van licht, inclusief die veroorzaakt door het fytoplankton, levert een gemiddelde waarde voor de produktie efficiëntie E_a die, vermenigvuldigd met $P_{gmax}(T)$, juist gelijk is aan de som der verliestermen. Op grond hiervan kan het energie beperkte biomassa maximum van elke soort door het model worden berekend. In de pure evenwichts versie van BLOOM II wordt uit deze bovengrens, en uit de nutriënten

beperkingen, het fytoplankton maximum berekend, dat energie en/of nutrient beperkt kan zijn.

Bij een lage gemiddelde licht intensiteit is het echter niet altijd mogelijk het energie beperkte maximum in een tijdstap van een week te bereiken. De gemiddelde efficiëntie wordt dan zo laag, dat de biomassa in een week tijd relatief slechts weinig kan toenemen (enkele malen per week). Een soort, die aan het begin van de tijdstap een zeer lage biomassa had, kan hierdoor onmogelijk in een week op zijn energie beperkte maximum komen. Dergelijke energie-arme kondities komen in veel meren voor in de winter, wanneer de instraling gering is. In andere meren heersen echter min of meer permanent energie-arme kondities, doordat de aanwezige biomassa in combinatie met het achtergrond materiaal en de diepte altijd voor een gemiddeld laag lichtniveau zorgen. De Grevelingen, het Volkerak en het Zoommeer behoren tot de meren waarin dit het geval is.

Om het model in dergelijke gevallen toch zinvol te kunnen toepassen, kunnen groeibeperkingen aan het normale stelsel van vergelijkingen worden toegevoegd. De soortspecifieke bovengrenzen worden als volgt berekend. Aan het begin van een tijdstap zijn de waarden bekend van de totale extinktie (namelijk de extinktie van de voorgaande periode), de diepte en het opvallend lichtniveau I_s . Met behulp van verg. (3.9) kan nu de initiële efficiëntie $E_a(0)$ op dat moment voor elke soort worden berekend. Door de differentiaal vergelijking (3.11) op te lossen en deze waarde van $E_a(0)$ voor E_a in te vullen, kan de groei beperkte biomassa bovengrens $x_{lim,j}$ op tijdstip t eenvoudig worden berekend:

$$x_{lim,j} = x_j(0) \text{ EXP}[t \cdot (P_{gmax,j}(T) \cdot E_a(0)_j - M_{min}(T) - R(T) - G_j)] \quad (3.12)$$

Had een soort j gedurende de vorige tijdstap al een positieve biomassa, dan wordt dit niveau voor $x_j(0)$ ingevuld. Voor soorten, die tot nu toe niet in de bloei vertegenwoordigd waren, wordt een basis niveau voor $x_j(0)$ genomen. Meestal wordt hiervoor 100 mg drooggewicht per m^3 gekozen, wat ongeveer overeenkomt met 1 μg chlorofyl per l.

Bij de berekeningen voor het IJsselmeer is aanvankelijk de pure evenwichts versie van het model gebruikt, zonder groei beperkingen, maar aangezien energie beperking vrijwel voortdurend bleek voor te komen, zijn alle resultaten in dit rapport berekend met groeibeperkingen. Verder is het goed erop te wijzen, dat groeibeperkingen in de gekoppelde versie van BLOOM II en CHARON altijd worden beschouwd. Dit hangt samen met de sterkere tijdsafhankelijkheid van het gekoppeld model.

3.3.4 Vereiste invoer en uitvoer van BLOOM II

Voor de toepassing van het model moeten enkele algemene model parameters worden ingevoerd:

- De sterfte snelheid (als functie van de temperatuur).

- De mineralisatie snelheden van de nutriënten.
- De fraktie van elk nutriënt die bij het afsterven van een fytoplankton cel naar detritus gaat, en gemineraliseerd moet worden.
- De snelheid, waarmee het effect van dood fytoplankton op de extinktie verdwijnt.
- De gemiddelde daglengte.

Omdat in BLOOM II tien verschillende soorten worden beschreven, moeten voor elk van deze soorten een aantal specifieke coëfficiënten worden ingevoerd:

- De minimale nutriënt concentratie per eenheid van biomassa (droog gewicht) voor elk nutriënt.
- De koolstof (of drooggewicht) chlorofyl verhouding. Deze ratio wordt soms meer-specifiek aangepast.
- De specifieke extinktie coëfficiënt.
- Het gemiddeld cel volume (als correctie op de maximale produktie snelheid).
- De respiratie snelheid (als functie van de temperatuur).
- De produktie - licht respons kurve (efficiëntie kurve).

Naast deze model parameters, moeten voor elke toepassing de volgende meer-specifieke grootheden worden ingevoerd:

- De gemiddelde watertemperatuur per tijdstap.
- De gemiddelde concentratie van totaal beschikbaar stikstof, fosfor en silicium per tijdstap.
- De achtergrond extinktie.
- De meng diepte.
- De verblijftijd (alleen van belang als uitspoeling snel is in verhouding tot de karakteristieke processen van het fytoplankton: orde 10 dagen in de zomer, orde 30 dagen in de winter).
- De gemiddelde globale instraling van zonlicht per tijdstap.

BLOOM II levert de volgende uitvoer:

- De concentratie van elke fytoplankton soort in mg drooggewicht per m^3 .
- De totale concentratie van alle soorten in mg drooggewicht per m^3 .
- De totale concentratie van alle soorten in mg chlorofyl per m^3 .
- De verdeling van de beschikbare hoeveelheden nutriënt over detritus en levend fytoplankton aan de ene kant en alle overige frakties aan de andere kant.
- De totale extinktie per m.

3.4 HET CHEMISCHE MODEL CHARON

3.4.1 Algemeen

CHARON is ontwikkeld in het kader van het samenwerkingsproject WABASIM van Deltadienst en Waterloopkundig Laboratorium (de Rooij,

1982). Het model is geënt op een door de Rand Corporation ontwikkeld chemisch model (Clasen, 1965). Met behulp van massabalans, massaactiewet en proceskinetiek berekent het model de chemische samenstelling van een aquatisch systeem. In de berekening wordt gebruik gemaakt van een lineaire programmeringstechniek.

Het model is ontwikkeld, gekalibreerd en geverifieerd op het gegevensbestand van de modelreservoirs in het spaarbekken 'de Grote Rug', gelegen nabij Dordrecht. Daarnaast is het model gebruikt bij de beleidsanalyse van de Nederlandse waterhuishouding PAWN-I en bij de bestudering van de gevolgen van dumping van baggerspecie in het Oostvoornse Meer. In de vorm van de aan BLOOM II gekoppelde versie is het toegepast op het IJsselmeer, en verschillende meren in het Hoogheemraadschap Rijnland.

In de modelmatige bestudering van het verschijnsel eutrofiering vormt een chemisch model zoals CHARON een onmisbare schakel. Met name moet worden gewezen op de berekening van de pH, die bekend moet zijn om de voor fytoplankton beschikbare hoeveelheid fosfaat te bepalen. Bovendien biedt CHARON de mogelijkheid dat een groot aantal waterkwaliteitsparameters in de berekening kan worden meegenomen. Niet alleen parameters als zuurstof en BOD, maar bijvoorbeeld ook zware metalen kunnen met het model worden gesimuleerd. Zo kan CHARON als een in principe allesomvattend waterkwaliteitsmodel worden gezien. De beperkingen van het huidige model zijn vooral gelegen in de wijze, waarop de stofuitwisseling tussen bodem en water wordt gesimuleerd.

Het model CHARON berekent de chemische samenstelling van een aquatisch systeem als resultante van de belastingen, de uitwisseling met lucht en bodem, interne processen en afvoer. Onder chemische samenstelling vallen hier niet alleen de chemische verbindingen, maar ook het fytoplankton. De chemische verbindingen worden verdeeld in evenwichtsverbindingen en langzame reaktanten. Het model is voorzien van een drietal modules (de Rooij, 1980). Deze zijn respectievelijk:

- Een moduul voor de evenwichtsreacties, waarin op basis van evenwichtsformuleringen de verdeling van componenten over de verbindingen in het evenwichtssysteem wordt berekend.
- Een moduul voor de langzame processen, waarin op basis van kinetische formuleringen de verandering van de hoeveelheid componenten in de langzame reaktanten wordt berekend. De verandering leidt tot een even grote onttrekking of toelevering van componenten aan het evenwichtssysteem.
- Een moduul voor fytoplankton, waarin de hoeveelheden levend fytoplankton, gesuspendeerd detritus, bezonken detritus en hieruit geproduceerde inerte organische stof wordt berekend. Dit alles leidt eveneens tot verandering van de hoeveelheid componenten in het evenwichtssysteem.

Het model wordt toegepast op het systeem van een waterkolom van 1 m² met een hoogte, die gelijk is aan de diepte van het te modelleren aquatische systeem, en een zich daar boven bevindende luchtkolom van zeer grote hoogte. Een voorbeeld van zo'n systeem is te vinden in Fig. 3.2, waarin de koolstof cyclus van het oppervlaktewater wordt weergegeven. De evenwichtsprocessen bevinden zich in het centrale blok, terwijl de langzame processen worden

gerepresenteerd door de pijlen, die uit het centrale blok komen of er naar toe gaan.

De modules en de door het model geleverde uitvoer worden hieronder successievelijk behandeld. De modules voor evenwichtsreacties en langzame processen zijn kenmerkend voor het afzonderlijke model CHARON. Het moduul voor fytoplankton daarentegen kan zijn rol op twee manieren vervullen. Het kan de fytoplankton kompartimenten berekenen op basis van gemeten biomassa's (chlorofyl) of op basis van door BLOOM II berekende produkties. In het eerste geval is het fytoplankton moduul een onderdeel van het afzonderlijke model CHARON. In het tweede geval vormt het moduul de schakel tussen de specifieke CHARON routines en BLOOM II in de gekoppelde versie van CHARON. Het fytoplankton moduul zal in 3.4.4 worden besproken vanuit het perspectief van de gekoppelde versie.

3.4.2 Moduul voor de evenwichtsreacties

De evenwichtsmodule berekent de verdeling van componenten over die verbindingen, die onderling zeer snel reageren en daarom met elkaar in evenwicht zijn. Een voorbeeld hiervan is de dissociatie van water.



Dit systeem kan worden opgevat als bestaande uit de componenten H^+ en OH^- en tegelijkertijd uit de verbindingen H_2O , H^+ en OH^- . Iedere verbinding kan nu worden gevormd uit een lineaire combinatie van de componenten. Het spreekt vanzelf dat voor een meer gekompliceerd systeem met een groot aantal verbindingen het aantal componenten dient te worden uitgebreid. De componenten moeten echter wel zo worden gekozen dat een component nooit een lineaire combinatie van de overige componenten kan zijn. Het stelsel lineaire combinaties kan worden weergegeven in een matrix:

Tabel 3.6

Verbinding	Komponent	
	H^+	OH^-
H^+	1	0
OH^-	0	1
H_2O	1	1

Binnen een chemisch systeem geldt de wet van behoud van massa. Dit betekent in feite dat de hoeveelheid van de componenten konstant is. Aangezien alle componenten over verbindingen worden verdeeld geldt daarom

$$\sum_j a_{ij} \cdot x_j = b_i \quad (3.14)$$

Hierin is a_{ij} de matrixkoefficient van verbinding j voor component i , x_j de hoeveelheid van verbinding j in molen¹ en b_i de hoeveelheid van component i eveneens in molen. Voor het voorbeeld van zuiver water is vergelijking 3.14 te schrijven als

$$\begin{matrix} x & + & x & = & b \\ \text{H}^+ & & \text{H}_2\text{O} & & \text{H}^+ \end{matrix} \quad (3.15)$$

en

$$\begin{matrix} x & + & x & = & b \\ \text{OH}^- & & \text{H}_2\text{O} & & \text{OH}^- \end{matrix} \quad (3.16)$$

Dit systeem heeft twee vergelijkingen en drie onbekenden en is dus onoplosbaar. Er is een extra vergelijking nodig, die kan worden ontleend aan de thermodynamica. Volgens de wetten der thermodynamica geldt voor een systeem in evenwicht dat de Gibbsenergie van dat systeem minimaal is. De Gibbsenergie is een toestandsgrrootheid, die kan worden afgeleid uit andere toestandsgrrootheden volgens

$$G = U + P.V - T.S \quad (3.17)$$

Hierin is U de inwendige energie, P de druk, V het volume, T de temperatuur en S de entropie, een maat voor de wanorde in het systeem. De bijdrage, die elke verbinding aan deze energie levert wordt gegeven door

$$G_j = G_j^0 + x_j.R.T.\ln x f_j \quad (3.18)$$

waarin G_j^0 de Gibbsenergie van de zuivere verbinding j bij standaardomstandigheden (298.15 °K, 1 atmosfeer, ionsterkte 0) in kJ is. R is de gaskonstante in kJ/(mol.°K), T de absolute temperatuur in °K, en $x f_j$ de molfraktie² van verbinding j . Dit kan worden herschreven tot:

$$G_j = R.T.x_j(c_j + \ln x f_j) \quad (3.19)$$

Hierin is c_j de dimensieloze relatieve Gibbsenergie parameter van de verbinding j . In feite zegt vergelijking 3.19 dus dat de bijdrage van een verbinding aan de Gibbsenergie van het systeem is samengesteld uit een stof-afhankelijk deel en een concentratie-afhankelijk deel. In het model wordt om redenen van vereenvoudiging niet de parameter G gehanteerd, maar de parameter F , die als volgt is gedefinieerd

¹ Met een mol wordt hier grammolekuul bedoeld. Het gewicht van een grammolekuul in grammen is gelijk aan het molekuulgewicht van de betreffende stof.

² De molfraktie van een stof is het de hoeveelheid molen van die stof, gedeeld door de totale hoeveelheid in een fase aanwezige molen.

$$F_j = G_j / (R.T) \quad (3.20)$$

De Gibbsenergiefunctie F van het systeem is nu de som van de bijdragen van de afzonderlijke verbindingen

$$F = \sum_j F_j \quad (3.21)$$

waarbij deze functie minimaal is in de evenwichtssituatie. Er kan worden bewezen dat vergelijkingen 3.14 en 3.21 samen het systeem volledig vastleggen en een eenduidige oplossing hebben in het geval van chemisch evenwicht (Clasen, 1965; Shapley et al., 1969).

De relatieve Gibbsenergie parameters c_j zijn afhankelijk van temperatuur en ionsterkte. Het model corrigeert de bij standaard temperatuur en ionsterkte opgegeven c_j -waarden voor de werkelijk aanwezige waarden van deze grootheden. De c_j -waarden kunnen op diverse wijzen worden bepaald:

- Uit in de literatuur gegeven waarden van de relatieve Gibbsenergieën, waarbij

$$\Delta c_j = \Delta G_j / (R.T) \quad (3.22)$$

ΔG_j is het verschil in Gibbsenergie per mol tussen produkt j en de samenstellende reaktanten, waarvan de Gibbsenergie gelijk kan zijn gesteld aan nul. Dit is mogelijk daar G een konservatieve grootheid is, zodat alleen het verschil telt. Voor Δc_j geldt uiteraard hetzelfde.

- Uit in de literatuur gegeven waarden van de evenwichtskonstanten K . Het verband tussen K en c_j is

$$\Delta c_j = -\log(K) \quad (3.23)$$

Voor de dissociatie van water (verg. 3.1) geldt

$$K = (H^+).(OH^-)/(H_2O) = 3.24 \times 10^{-18} \quad (3.24)$$

Als deze waarde (op basis van molfrakties³) wordt ingevuld in 3.23 resulteert dat in een waarde van -40.27 voor de Δc van reactie 3.13, hetgeen betekent

$$c_{H_2O} - c_{H^+} - c_{OH^-} = -40.27 \quad (3.25)$$

Als nog geen referentie is gekozen, is het logisch en voldoende om c_{H^+} en c_{OH^-} op nul te stellen en c_{H_2O} op -40.27.

- Uit metingen.
Als in bovenstaand voorbeeld de H^+ concentratie is gemeten, kan het model een inverse berekening uitvoeren.

³ De molfractie in water is de concentratie in water, uitgedrukt in molen per kg, gedeeld door het aantal molen water per kg (=55.51).

De normale uitvoer, de hoeveelheid van de verbindingen, wordt invoer en de normale invoer, de c_j parameter, wordt uitvoer.

De waarde van de relatieve Gibbsenergie van een verbinding is afhankelijk van de temperatuur. Uitgaande van een bij standaardomstandigheden (zie boven) gegeven waarde kan c_j worden berekend langs de volgende weg:

$$\frac{dG_j/T}{dt} = \frac{-H_j}{T^2} \quad (3.26)$$

Hierin is H_j de enthalpie van een verbinding j , een thermodynamische toestandsgrrootheid. Integratie van vergelijking 3.26 levert:

$$\frac{G_j(T_0)}{T} - \frac{G_j(T)}{T} = H_j \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (3.27)$$

T_0 is de standaardtemperatuur 298,15 °K. Substitutie van vergelijking 3.22 in vergelijking 3.27 levert:

$$c_j(T) = c_j(T_0) + H_j \cdot (T_0 - T) / (R \cdot T \cdot T_0) \quad (3.28)$$

In bovenstaande afleiding is aangenomen dat de enthalpie onafhankelijk van de temperatuur is. Over het algemeen is dit niet zo. Binnen het beschouwde temperatuursgebied (0-25 °C) zijn de optredende afwijkingen echter verwaarloosbaar klein.

3.4.3 Moduul voor de langzame processen

Het moduul voor de langzame processen berekent de verandering van de hoeveelheid langzame reaktanten en van de hoeveelheid componenten, die beschikbaar zijn voor de evenwichtsverbindingen (de Rooij, 1982). De kinetische formuleringen hebben de vorm van eerste-orde differentiaalvergelijkingen. Deze zijn van tweerlei soort.

Het eerste type beschrijft een proces, waarvan de snelheid wordt bepaald door het verschil tussen een actuele concentratie en een evenwichtskoncentratie. De vergelijking ziet er als volgt uit

$$\frac{dSR_l}{dt} = k_l \cdot (C_j - Ce_j) \quad (3.29)$$

Hierin is SR_l de hoeveelheid langzame reaktant l in mol/m² en k_l de snelheidskonstante in m/d. C_j en Ce_j zijn respectievelijk de

aktuele en evenwichtskoncentratie van de verbinding in mol/m³. Deze vergelijking wordt gebruikt voor de beschrijving van de uitwisseling van zuurstof en kooldioxyde tussen water en lucht. Voor het voorbeeld van de uitwisseling van zuurstof wordt vergelijking 3.29 geschreven als

$$\frac{dO_{2l}}{dt} = k_1 (O_{2w} - O_{2v}) \quad (3.30)$$

Hierin is de langzame reaktant dus de hoeveelheid zuurstof in de lucht (O_{2l}), die verandert onder invloed van het verschil tussen aktuele en verzadigingskoncentratie in het water. Bij onderverzadiging gaat er zuurstof het water in, bij oververzadiging gaat er zuurstof uit. Hetzelfde kan worden gezegd van de componenten, waaruit zuurstof is opgebouwd (2OH-, -2H+ en -4EL-, waarbij EL- staat voor elektron). De snelheidskonstante is hier een transportkonstante, die kan worden geschreven als

$$k_1 = c_1 \cdot H \cdot W \cdot k_t \quad (3.31)$$

c₁ is de transportkoefficient, die voor onder- en oververzadiging verschillende waarden kan hebben (bv. voor kooldioxyde). H is waterdiepte, W is de windsnelheid en k_t een temperatuurskoefficient.

Het tweede type gaat uit van een proces, waarbij de verbinding deelneemt aan een eerste-orde reaktie. De algemene vergelijking is

$$\frac{dSR_l}{dt} = k_1 \cdot SR_l + k_2 \quad (3.32)$$

Met deze vergelijking kan een aantal processen of combinaties daarvan worden weergegeven. Indien k₁ gelijk is aan nul, geeft de vergelijking een nulde-orde proces, bijvoorbeeld de belasting op het systeem of de teruglevering van de bodem. Als daarentegen k₂ gelijk is aan nul is er sprake van eerste-orde afbraak of produktie van de verbinding SR_l al naar gelang k₁ negatief of positief is.

Voorbeelden van afbraakprocessen zijn de afbraak van organische stof onder verbruik van zuurstof, denitrifikatie van nitraat, doch ook de afvoer van verbindingen door middel van uitspoeling en sedimentatie.

In het algemeen zijn de verbindingen in het aquatische systeem onderhevig aan belasting, afbraak en uitspoeling. In dat geval is k₁ de som van afbraakkonstante en verdunningssnelheid. Wanneer het vaste stoffen betreft, zal er ook sedimentatie plaats vinden en moet eveneens de sedimentatiekonstante in k₁ worden opgenomen. De componenten in de evenwichtsverbindingen zijn alleen onderhevig aan belasting en uitspoeling. Het zal duidelijk zijn dat het netto

resultaat van deze processen leidt tot het afstaan of onttrekken van componenten aan het evenwichtssysteem.

De konstanten k_1 en k_2 zijn over het algemeen afhankelijk van de temperatuur. In het model wordt deze afhankelijkheid weergegeven door

$$k = k_{20} \cdot \frac{(T-20)}{10} \quad (3.33)$$

waarin k_{20} gelijk is aan de snelheidskonstante bij 20 °C. k_1 is niet afhankelijk van de temperatuur, als het proces sedimentatie of uitspoeling betreft. k_2 is niet afhankelijk van de temperatuur als het om belasting gaat.

3.4.4 Het fytoplankton moduul

Het fytoplankton moduul is in eerste instantie ontworpen voor de gekoppelde versie van BLOOM II en CHARON. Het wordt ook gebruikt voor de berekeningen die CHARON alleen maakt, waarbij gemeten biomassa concentratie's als invoer worden gebruikt. In beide gevallen berekent het moduul de netto uitwisseling van nutriënten tussen anorganische en organische kompartimenten.

Het fytoplankton moduul heeft een drietal functies:

1. Het verzorgen van de communicatie tussen BLOOM II en CHARON. De informatie, die CHARON aan BLOOM II doorgeeft, bestaat uit tijdsafhankelijke gegevens zoals:
 - concentraties van nutriënten, die beschikbaar zijn om in biomassa te worden omgezet.
 - extinktie op $t=\Delta t$, als gedurende deze tijdstap geen omzetting van nutriënten in biomassa plaats zou vinden (pseudo achtergrond extinktie).
 - lichtintensiteit, temperatuur, diepte en daglengte. In de oorspronkelijke BLOOM versie worden deze door BLOOM zelf ingelezen., BLOOM II leest nu alleen de universele biologische informatie.

Door BLOOM II wordt aan CHARON doorgegeven:

- De hoeveelheden van iedere fytoplanktonsoort, die in BLOOM II op tijdstip $t=\Delta t$ worden berekend.
 - De sterfte snelheid van fytoplankton gedurende de integratiestap.
2. Het berekenen van de grootte van de diverse biomassa kompartimenten.
 3. Het berekenen van de uitwisseling van componenten tussen chemische en biologische kompartimenten.

De hoofdinformatie stroom tussen de twee modellen bestaat dus uit enerzijds de nutriënten informatie van CHARON naar BLOOM II, anderzijds de biomassa informatie van BLOOM II naar CHARON.

Als het model CHARON alleen wordt gebruikt, zijn de biomassa niveaus invoer voor het model. In de hierna volgende vergelijkingen wordt de informatie van BLOOM II omgerekend tot een biomassa niveau. Met behulp van deze vergelijkingen kan ook de omgekeerde weg worden behandeld, waarbij een gegeven biomassa niveau wordt omgerekend tot de informatie die BLOOM II zou leveren om dit niveau te bereiken. De gebruikte formuleringen voor CHARON gekoppeld aan BLOOM II zijn dan ook identiek aan die voor het afzonderlijke model CHARON. Daar de verwerking en tot stand koming van deze informatie in het fytoplankton moduul op een andere manier verloopt dan in de modellen afzonderlijk, zal hier eerst worden ingegaan op de wijze waarop de biomassa kompartimenten in het fytoplankton moduul worden beschreven.

3.4.4.1 Fytoplankton cyclus in het gekoppelde model

In Fig. 3.3 is schematisch aangegeven welke vier fytoplankton kompartimenten er in het gekoppelde model worden onderscheiden, alsmede de relaties, die er tussen deze kompartimenten bestaan. Het verschil met de BLOOM II formulering is dat er twee extra kompartimenten zijn opgenomen. Deze twee kompartimenten bevinden zich niet in de waterkolom maar op de bodem. De direkte relatie tussen het gebeuren in de waterkolom en in het sediment wordt hiermee beschreven. Het min of meer onafhankelijke gebeuren in de bodem wordt in CHARON met een aparte verbinding gemodelleerd (zie 4.2).

Voor verschillende processen, die in Fig. 3.3 staan aangegeven, kunnen eenvoudige differentiaal-vergelijkingen worden opgesteld en opgelost. Geen eenvoudig op te lossen vergelijking is er voor de produktie van fytoplankton. Het gekoppelde model is ook niet in staat om de produktie te berekenen. BLOOM II kan alleen niveaus van biomassa berekenen bij gegeven nutriënten concentraties en aanvoer van energie. In het gekoppelde model berekent BLOOM II niet het absolute biomassa niveau op een bepaald tijdstip maar de bruto toename in biomassa (het inkrement) ten opzichte van een zogenaamd nulniveau.

Het nulniveau is het niveau, dat zou ontstaan op $t = \Delta t$ als alleen de op $t = 0$ bestaande biomassa beschouwd zou worden, die gedurende Δt niet produceert en daardoor afneemt ten gevolge van sterfte en uitspoeling. Dit is dus het niveau, dat ontstaat als in de tijdstap geen produktie plaatsvindt.

De door BLOOM II berekende bruto toename of inkrement is dus gelijk aan de bruto produktie gedurende de tijdstap. Als deze tijdstap naar oneindig gaat nadert het inkrement tot de totaal op Δt aanwezige biomassa. Als de tijdstap naar nul gaat nadert het inkrement tot de netto produktie gedurende de tijdstap. De bruto produktie is altijd groter dan de netto produktie, het verschil is gelijk aan de vermindering in biomassa ten gevolge van sterfte, uitspoeling en mineralisatie.

Het uiteindelijke biomassa niveau op tijdstip Δt wordt gevormd door de som van het nul niveau en het inkrement. Met biomassa niveau wordt hier de som van de biomassa's van de vier fytoplankton kompartimenten bedoeld.

Het inkrement wordt door BLOOM II berekend bij gegeven constraints⁴ van nutriënten, energie en groeisnelheid (de groei-limitatie optie is altijd in het gekoppelde model in werking). BLOOM II onderscheidt normaal twee biomassa kompartimenten, levend fytoplankton en detritus, die beiden in steady state zijn. In het gekoppelde model kent BLOOM II slechts een biomassa kompartiment, namelijk levend fytoplankton. Door de mineralisatiesnelheid van detritus op oneindig te stellen in de BLOOM II berekening wordt geen detritus kompartiment berekend. Het door BLOOM II berekende inkrement wordt door CHARON over vier biomassa kompartimenten verdeeld. Het model maakt dus voor elk kompartiment onderscheid tussen biomassa, die reeds bestond aan het begin van de tijdstap en biomassa, die afkomstig is van het inkrement.

Het bestaande levende fytoplankton zal onafhankelijk van het inkrement gedurende de tijdstap onderhevig zijn aan sterfte en uitspoeling. Dit fytoplankton kompartiment kan worden beschreven na definitie van de volgende grootheden:

$x_{lb,j}$ = de hoeveelheid fytoplankton van soort j , die ontstaat uit de hoeveelheid, die reeds vanaf het begin ($t=0$) van de tijdstap aanwezig is,
 M = de sterfte snelheid per dag,
 U = de uitspoel snelheid per dag,
 I_j = de hoeveelheid fytoplankton van soort j , die per dag het systeem instroomt.

Met deze grootheden kan voor elke fytoplankton soort de volgende vergelijking worden opgeschreven:

$$\frac{dx_{lb,j}}{dt} = - (M + U) \cdot x_{lb,j} + I_j \quad (3.34)$$

De vergelijkingen voor de overige fytoplankton kompartimenten kunnen nu op soortgelijke wijze worden opgesteld. Na definitie van een aantal grootheden kan voor het detritus kompartiment worden geschreven:

x_{db} = de hoeveelheid detritus, die ontstaat uit de hoeveelheid fytoplankton, die reeds vanaf het begin ($t=0$) van de tijdstap aanwezig is,
 D = de mineralisatiesnelheid van detritus per dag,
 S = de sedimentatiesnelheid detritus per dag,
 q = de fraktie van het afgestorven fytoplankton, die wordt omgezet in detritus⁵.

⁴ Een constraint is in deze kontekst de onder de gegeven kondities maximaal beschikbare hoeveelheid van een grootheid, die voor de groei van het fytoplankton onmisbaar is.

⁵ De produktie van detritus uit levend fytoplankton is niet gelijk aan de mortaliteit M , maar aan $q.M$. De reden hiervan is dat een gedeelte $1-q$ van het afgestorven fytoplankton door middel van autolyse instantaan in nutriënten wordt omgezet.

$$\frac{dx_{db}}{dt} = q.M.\sum_j x_{lb,j} - (D + S + U).x_{db} \quad (3.35)$$

Uit deze vergelijking valt af te leiden dat voor het detritus kompartiment geen onderscheid wordt gemaakt tussen de diverse fytoplankton soorten, zodat in de vergelijking de som van de $x_{lb,j}$'s verschijnt. Een soortgelijke benadering wordt voor de overige op $t=0$ bestaande fytoplankton kompartimenten aangehouden.

Het door BLOOM II berekende inkrement moet vervolgens over levend fytoplankton en de overige fytoplankton kompartimenten verdeeld worden. De verdeling van dit inkrement over de verschillende biomassa kompartimenten geschiedt niet met dezelfde vergelijkingen als gebruikt voor de bestaande biomassa, hoewel ze er sterk op lijken. Een essentieel verschil is dat de term uitspoeling niet in deze vergelijkingen voorkomt. De reden hiervoor is dat het inkrement de totale vermeerdering van biomassa op $t = \Delta t$ geeft, uitgaande van de randvoorwaarden op $t=0$. Een van de randvoorwaarden is de hoeveelheid beschikbaar nutriënt. Bij de berekening hiervan is met de term uitspoeling wel rekening gehouden.

In eerste instantie wordt voor het gehele inkrement aangenomen, dat dit het levend fytoplankton kompartiment binnenkomt. Door middel van sterfte zal een gedeelte vanuit dit kompartiment naar het detritus kompartiment gaan. De vergelijking voor de hoeveelheid levend fytoplankton $x_{lp,j}$ van soort j , die ten gevolge van door BLOOM II tussen $t=0$ en $t=\Delta t$ geproduceerde inkrement Δx_j , aanwezig is, ziet er als volgt uit:

$$\frac{dx_{lp,j}}{dt} = - q.M.x_{lp,j} + \Delta x_j / \Delta t \quad (3.36)$$

Hierin sterft het fytoplankton niet af met de snelheid M , maar met $q.M$. De reden hiervan is dat moet worden voorkomen, dat een gedeelte van de in het inkrement opgenomen nutriënten weer vrijkomt via autolyse. Dit zou immers impliceren, dat het inkrement bij een nutriënt beperking niet maximaal is, omdat dan niet alle beschikbare nutriënten door het fytoplankton benut zijn. BLOOM II hanteert wel de volledige sterfte.

De totale levende fytoplanktonbiomassa op $t = \Delta t$ kan nu worden gevonden door vergelijkingen 3.34 en 3.36 op te lossen en het resultaat op te tellen. De grootte van het levende fytoplankton kompartiment op Δt wordt dus berekend uit de som van twee bijdragen. Deze zijn:

1. dat deel van het $t=0$ aanwezige fytoplankton, dat op $t=\Delta t$ nog over is.
2. dat deel van het gedurende Δt geproduceerde fytoplankton, dat op $t=\Delta t$ nog over is.

Vergelijking 3.36 geeft het gedeelte van het inkrement, dat in het levend fytoplankton kompartiment achterblijft, en het gedeelte dat in detritus wordt omgezet. Vanuit dit kompartiment vindt verdeling

plaats over de laatste twee kompartimenten, hetgeen met soortgelijke vergelijkingen berekend kan worden.

De vergelijkingen voor levend fytoplankton worden soortspecifiek opgelost. De vergelijkingen voor de overige kompartimenten worden nutriënt specifiek opgelost. De hoeveelheid van ieder der nutriënten in levend fytoplankton is bekend met behulp van de stochiometrische coëfficiënten. Het verschillende nutriënten gedrag van de overige biomassa kompartimenten wordt veroorzaakt door verschillende mineralisatie snelheden ($P > N > C \gg Si$).

3.4.4.2 Bepaling invoer voor BLOOM II in gekoppeld model

In dit hoofdstuk zal worden ingegaan op de wijze, waarop in het gekoppelde model verschillende constraints in BLOOM II worden gehanteerd. Er worden drie constraints besproken, nutriënten, licht en groei. Verder zal aandacht worden besteed aan de term uitspoeling, omdat deze soms wel en soms niet in de vergelijkingen voorkomt.

Nutriënten.

Voor de berekening van het inkrement op $t = \Delta t$, krijgt BLOOM II als input de ter beschikking staande nutriënten op $t = \Delta t$. Deze worden door CHARON op de volgende wijze vastgesteld:

1. De vergelijkingen voor de fytoplankton kompartimenten worden opgelost met een inkrement gelijk aan nul. Dit geeft de totale hoeveelheid nutriënt, die door recycling weer ter beschikking komt tussen $t=0$ en $t=\Delta t$.
2. De externe en interne belasting wordt aan het systeem toegevoerd, en de uitstroming wordt hiervan afgetrokken.
3. De op $t=0$ reeds (of nog) aanwezige anorganische nutriënten hoeveelheden worden na correctie voor sedimentatie (P), afbraak (denitrifikatie N) en uitstroming bij de in de vorige twee punten genoemde hoeveelheden opgeteld.
4. Van de totale hoeveelheid nu berekend nutriënt wordt afgetrokken wat op $t=\Delta t$ als niet beschikbaar wordt beschouwd.

Dit laatste wordt alleen voor fosfor uitgevoerd, en heeft betrekking op de hoeveelheid geadsorbeerd fosfaat, die als niet beschikbaar wordt beschouwd. De hoeveelheid geadsorbeerd fosfaat op $t = \Delta t$ wordt in mindering gebracht op de totale hoeveelheid fosfaat zoals hierboven is berekend. Bovendien moet nog een geringe hoeveelheid opgelost fosfaat als niet beschikbaar worden beschouwd.

Aangezien het model een evenwicht aanneemt tussen vrij en geadsorbeerd fosfor, zou in een fosfaat gelimiteerd systeem, waar alle vrij fosfaat wordt opgenomen door biomassa, er continue desorptie optreden tot geen geadsorbeerd fosfaat over is. Het is aantoonbaar, en zal hierna ook aangetoond worden, dat het fytoplankton hier niet toe in staat is, zodat een aangepaste berekeningsmethodiek noodzakelijk is. Figuur 3.4 geeft een illustratie van het adsorptie/desorptie verschijnsel. De vergelijking voor de groei uit deze figuur is:

P_g = de bruto primaire produktie snelheid per dag,
 C_p = de konzentratie van opgelost fosfaat,
 k = een konstante, die gelijk is aan twee maal de halfwaarde konstante uit de Monod vergelijkingen,
 P_{gmax} = de maximale primaire produktie bij het ontbreken van een nutrient limitatie.

$$P_g = \text{minimum}\left(\frac{C_p}{k}, 1\right) \cdot P_{gmax} \quad (3.37)$$

De steady state formulering voor de groei bruto produktie is:

$$P_g = R + M \quad (3.38)$$

Hiermee kan de konzentratie van opgelost fosfaat, die in steady state bij een fosfaat limitatie niet beschikbaar is voor het fytoplankton, worden berekend. De vergelijking voor de konzentratie opgelost fosfaat luidt:

$$C_p = k \cdot \frac{R + M}{P_{gmax}} \quad (3.39)$$

De konzentratie opgelost fosfaat is groter dan C_p , indien er geen sprake is van fosfaat limitatie, hetgeen het geval is wanneer C_p groter is dan k . Dit doet zich in eutrofe meren het grootste gedeelte van de tijd voor. De hoeveelheid voor het fytoplankton beschikbaar fosfaat is nu gelijk aan de totaal aanwezige hoeveelheid fosfaat, verminderd met datgene dat reeds in het fytoplankton zit, de konzentratie opgelost fosfaat (C_p in geval van fosfaat limitatie, anders $> C_p$) en de daarbij berekende hoeveelheid geadsorbeerd fosfaat.

In principe geldt bovenstaande redenering omtrent de hoeveelheid 'vrij' nutrient die het fytoplankton niet kan opnemen voor alle nutrienten. Aangezien de hoeveelheden echter meestal erg gering zijn, hebben ze geen praktisch effect. Dit praktisch effect is er wel voor fosfaat, omdat een relatief grote hoeveelheid geadsorbeerd fosfaat met een kleine hoeveelheid vrij fosfaat in chemisch evenwicht kan zijn. Het onttrekken van deze kleine konzentraties zou desorptie veroorzaken, en daarmee niet beschikbaar fosfaat in beschikbaar fosfaat omzetten, hetgeen onjuist is.

Licht (energie).

In het gekoppelde model wordt de totale extinktie op $t=\Delta t$ opgebouwd uit vier termen. Deze zijn:

1. De achtergrondextinktie van het water met daarin opgeloste stoffen en gesuspendeerd sediment.

2. De extinktie van fytoplankton dat aanwezig is op $t=0$ en na sterfte gedurende $t=\Delta t$ nog over is.
3. De extinktie van detritus dat aanwezig is op $t=0$ en na afbraak gedurende $t=\Delta t$ nog over is.
4. De extinktie van het op $t=\Delta t$ berekend fytoplankton inkrement.

De verschillende bijdragen aan de extinktie worden op de volgende wijze in rekening gebracht. Per integratiestap wordt een berekening gemaakt van de veranderingen van de fytoplankton kompartimenten onder de konditie dat het inkrement gelijk is aan nul. Hiermee kunnen de extinktie bijdragen 2 en 3 van de bovengegeven opsomming berekend worden. Deze worden opgeteld bij de werkelijke achtergrondextinktie en in BLOOM II als achtergrondextinktie ingevoerd. BLOOM II telt zelf de extinktie van het inkrement hierbij op om de totale extinktie te bepalen, die de licht-constraint voor het fytoplankton vormt.

Groeilimitatie.

De vergelijking voor de maximale biomassa onder groeilimitatie is in het gekoppelde model niet zonder meer te gebruiken. Uit deze vergelijking moet een constraint voor het inkrement geformuleerd worden. Het maximale inkrement is gelijk aan:

$$\Delta x_{lim,j}(\Delta t) = r \cdot x_{lb,j}(0) - x_{lb,j}(\Delta t) \quad (3.40)$$

Hierin is r de verhouding van $x_{lim,j}$ en $x_j(0)$ uit vergelijking 3.12, waarbij deze vergelijking nu ook de termen uitspoeling en instroming bevat en in de differentiaalvorm is herschreven tot:

$$\frac{dx_j}{dt} = (Pg - R - M - U) \cdot x_j + I_j \quad (3.41)$$

Dit betekent dat het maximale inkrement bij een groeibeperking bestaat uit een tweetal bijdragen. Deze zijn:

1. een hoeveelheid nodig om de biomassa te vermeerderen en gelijk aan $r \cdot x_{lb}(0) - x_{lb}(0)$.
2. een hoeveelheid nodig om de verliezen van de bestaande biomassa te compenseren en gelijk aan $x_{lb}(0) - x_{lb}(\Delta t)$.

In het geval de verhouding r gelijk zou zijn aan 1 is de maximaal toegelaten produktie gelijk aan het verlies in bestaande biomassa, dat wil zeggen dat de biomassa juist op peil blijft. De sterfte van de bestaande biomassa wordt juist gekompenseerd.

Uitspoeling.

Het gebruik van de term uitspoeling in de verschillende vergelijkingen in het fytoplankton moduul, en in de verschillende vergelijkingen in BLOOM II verdient enige toelichting.

De produktie van fytoplankton in een systeem is onafhankelijk van de termen inspoeling en uitspoeling. Het fytoplankton 'weet' immers niet of het ingespoeld of uitgespoeld wordt. Daarom worden

in de produktie vergelijking van BLOOM II alleen de termen Gp, R en M meegenomen. De produktie is afhankelijk van de op dat moment aanwezige fytoplankton konzentratie. Deze is op zijn beurt echter wel van in- en uitspoeling afhankelijk.

De vergelijking voor de groei-constraint is een vergelijking, die een niveau (maximum niveau bij maximale energie opname) beschrijft. Aangezien het uiteindelijke niveau wel beïnvloed wordt door de termen inspoeling en uitspoeling, moeten deze in de vergelijking worden meegenomen. De vergelijkingen in het fytoplankton moduul van CHARON, waarmee de beschikbare nutriënten niveau's worden berekend, houden wel rekening met in- en uitspoeling.

Een komplicerende faktor is het feit dat een gedeelte van de bruto primaire produktie tussen $t = 0$ en $t = \Delta t$ zal uitspoelen. Dit vinden we niet in het inkrement terug. Voor CHARON betekent dit in feite dat er een hoeveelheid CO₂ niet als CO₂ uitspoelt maar als CH₂O. De konsekwenties voor de uitwisseling van de nutriënten met het inkrement worden als volgt berekend. De vergelijkingen voor de fytoplankton kompartimenten worden opgelost zoals hiervoor beschreven. De sommatie van deze inkrement kompartimenten geeft de netto opname van nutriënt op $t = \Delta t$. Echter tussen $t = 0$ en $t = \Delta t$ is een gedeelte van de produktie uitgespoeld, dat niet terug te vinden is in de vergelijkingen voor de inkrement kompartimenten. Deze uitspoeling van tijdens Δt geproduceerde biomassa wordt gegeven door:

$$\sum_j x_{uit,j} = U \cdot \Delta t \cdot \sum_j \Delta x_j / 2 \quad (3.42)$$

De uitwisseling tussen anorganische en organische verbindingen, ofwel de bruto opname van nutriënt, is nu gelijk aan de som van $\sum_j x_{uit,j}$ en $\sum_j \Delta x_j$.

3.4.5 De modeluitvoer

De uitvoer bestaat in principe uit de waarden van alle gemodelleerde variabelen in molen/m². Het moduul voor de langzame reakties levert alle fluxen in molen/m²/tijdstep.

De uitvoer is niet een in het model vastgelegd gegeven. De gebruiker kan via de invoer specificeren, welke variabelen of fluxen in de uitvoer dienen te verschijnen. Hij kan bovendien konversiefaktoren opgeven, waarmee de eenheden, waarin de uitvoer wordt gepresenteerd, worden omgerekend naar meer bekende eenheden (bijvoorbeeld mg/l). Via een daarvoor speciaal toegevoegde routine kan vervolgens per variabele een gedetailleerde balans worden opgemaakt. Uit deze balans kan een compleet beeld worden verkregen van herkomst en bestemming van een variabele. In deze balans worden dus alle processen gekwantificeerd, die in het model voor de betreffende variabele zijn gedefinieerd. Dit betekent onder andere voor bijvoorbeeld fosfaat dat onderscheid wordt gemaakt tussen de diverse sedimentatie processen van anorganische of organische aard.

3.5 VERSCHILLEN TUSSEN BLOOM II EN HET GEKOPPELD MODEL

In het voorgaande zijn het fytoplankton model BLOOM II behandeld (zie 3.3) en het chemisch model CHARON (zie 3.4). Tevens is hierbij beschreven, hoe de gekoppelde versie van BLOOM II en CHARON gebruik maakt van de afzonderlijke modellen. Ter illustratie van dat laatste is hierbij een tabel opgenomen.

Tabel 3.7

Vergelijking van BLOOM II als zelfstandig model met de gekoppelde versie van BLOOM II en CHARON.

Eigenschap	BLOOM II	BLOOM II/CHARON
Nutrienten cyclus	evenwicht	langzaam proces
Aantal nutrienten frakties	drie	variabel; voor P veel
Doelstelling	maximalisatie biomassa	maximalisatie groei
Groeilimitatie	optie; gebruikt in IJsselmeer studie	altijd gebruikt
Mogelijkheid snelle verandering van fytoplankton soorten samenstelling	groot (bij evenwicht versie) tot matig (bij gebruik groei limitatie)	gering

3.6 HET CHLORIDE MODEL CHSIMP

Voor het Volkerak en het Zoommeer is chloride met behulp van het chemisch model CHARON gemodelleerd. Voor de chloride modellering van de Grevelingen is een apart chloride model opgesteld. De reden hiervoor was dat bij lange verblijftijden (> 1jaar), de invloed van de gekozen startwaarde voor chloride zich over de hele berekeningsperiode uitstrekt. In dergelijke gevallen moet een soort iteratieve procedure plaatsvinden als blijkt dat de gekozen startwaarde buiten het gebied ligt waarin de gemodelleerde waarden uitkomen. Een nieuwe startwaarde wordt gekozen en de berekening wordt herhaald.

Deze iteratieve procedure is alleen nodig voor variabelen met konservatief gedrag in een systeem met lange verblijftijd. Om onnodige rekenkosten te vermijden is daarom voor de Grevelingen, waar een aantal scenario's een lange verblijftijd heeft, een apart chloride model gebruikt.

De chloride vergelijking kan worden opgesteld na definitie van de volgende grootheden:

Cl^- = de hoeveelheid Chloride per tijdstap aanwezig (grammen)
 U = de uitspoel snelheid per dag,
 I = de hoeveelheid chloride die het systeem binnenkomt (grammen/dag)

De vergelijking heeft de volgende vorm:

$$\frac{dCl^-}{dt} = -U \cdot Cl^- + I \quad (3.43)$$

Oplossing van vergelijking 3.43 en deling door de hoeveelheid water, waarvoor een identieke vergelijking wordt gehanteerd, levert de concentratie van chloride per tijdsstap.

Met dit chloride model zijn de berekeningen van chloride voor de Grevelingen uitgevoerd. In de iteratieve procedure wordt nu telkens een nieuwe berekening, met een nieuwe startwaarde gemaakt als de vorige startwaarde buiten het gebied van de gemodelleerde waarden ligt. De procedure wordt herhaald zolang aan deze voorwaarde wordt voldaan.

4. SYSTEEM-DEFINITIE

In hoofdstuk 3 zijn de algemene structuren van de afzonderlijke modellen BLOOM II, CHARON en de gekoppelde versie toegelicht. Deze algemene structuren dienen voor de daadwerkelijke modellering van waterkwaliteitsparameters te worden aangekleed met deze parameters en de processen, die ze ondergaan. De keuze van de parameters en processen wordt bepaald door het belang voor de te onderzoeken verschijnselen. Het belang van parameters en processen verschilt per meer of per rivier. Dit betekent in het algemeen dat de systeem-definitie dient te worden afgestemd op het te modelleren oppervlaktewater.

De systeem definitie zoals voor de IJsselmeer studie bepaald, is overgenomen voor onderhavige studie.

In het nu volgende hoofdstuk worden de systeem-definities gegeven van de meren ten behoeve van BLOOM II en CHARON. Voor de gekoppelde versie van BLOOM II en CHARON is de systeem-definitie gelijk aan de som van de definities voor de afzonderlijke modellen.

4.1 DEFINIERING VAN HET SYSTEEM VOOR BLOOM II

Door zijn algemene opzet is het bij de meeste toepassingen niet nodig (ingrijpende) wijzigingen aan te brengen in de model parameters van BLOOM II of de model formulering. Om het model aan te passen aan de specifieke kondities in het IJsselmeer zijn kleine veranderingen aangebracht in de stochiometrie van enkele soorten (met name de verhouding van koolstof en chlorofyl). Tevens is een belangrijke, veel in het IJsselmeer voorkomende soort toegevoegd, het kiezelwier Melosira. De coëfficiënten zoals in deze studie gebruikt zijn weergegeven in de volgende tabel. Omdat geen oplossing was gevonden voor het probleem van het drijfvermogen van blauwalgen is aan deze soorten een produktie voordeel toegekend van 10%.

Tabel 4.1

Stoichiometrische konstanten van de soorten in BLOOM II, soorten specifieke coëfficiënten voor de extinktie, en droog gewicht naar chlorofyl konversie

Soort	N	P	Si	K _j	C/CHL	DRG/C
Asterionella	0.024	0.0032	0.22	7.00E-05	30	3.0
Melosira	0.040	0.0026	0.15	5.20E-05	30	3.0
Cryptomonas	0.072	0.0046	0.0007	5.21E-05	36	2.3
Volvox	0.076	0.0070	0.0007	5.21E-05	36	2.3
Scenedesmus	0.058	0.0052	0.0007	5.21E-05	36	2.3
Ceratium	0.064	0.0046	0.0007	6.00E-05	36	2.3
Anabaena	0.070	0.0057	0.0007	2.66E-04	36	2.5
Aphanizomenon	0.068	0.0043	0.0007	2.35E-04	36	2.5
Microcystis	0.053	0.0057	0.0007	1.20E-04	40	2.5
Oscillatoria	0.063	0.0046	0.0007	1.75E-04	40	2.5

4.2 DEFINIERING VAN HET SYSTEEM VOOR CHARON

Voor de beschrijving van de (bio-)chemie van het oppervlaktewater van de meren is uitgegaan van de beschrijving, zoals die tot stand gekomen was na kalibratie van het gekoppelde model CHARON-BLOOM II op het IJsselmeer. Deze beschrijving van samenstelling en processen wordt hieronder besproken. Vervolgens wordt ingegaan op het benodigde invoerbestand.

4.2.1 Definitie van de samenstelling van het oppervlaktewater.

De voor het water van de meren gedefinieerde samenstelling wordt gegeven in Tabel 4.2 Hierin zijn de verbindingen, de fase waarin ze voorkomen en de wijze, waarop ze zijn opgebouwd uit de componenten, en hun c-waarden aangegeven. De verbindingen zijn gekozen op grond van hun belang voor de fytoplanktongroei, de zuurstofhuishouding en de chemie(pH). Als een fase dus onvolledig gedefinieerd is, komt dat omdat de niet opgenomen verbindingen geen rol van betekenis spelen met betrekking tot deze drie aspecten. De gekozen fasen zijn:

- WATER en LUCHT
- De vaste fasen voor fytoplankton (ALGEN), biologisch zuurstof verbruikend koolstof (BODC) en stikstof (BODN), calciëet (CALCIT), en anorganische (ADPSL1) partikulaire fosfaatfrakties. Deze fasen zijn alle gesuspenderd in de fase WATER.
- De vaste fasen voor anorganisch sediment (ANOSSED) en organisch sediment (ORGSED). Deze fasen bevinden zich in de bodem van het meer.

Alle verbindingen in de fase WATER zijn evenwichtsverbindingen. De aanwezigheid van de meeste ligt voor de hand. Enige toelichting verdienen echter ADSOH en ADSP. De komponent ADS vertegenwoordigt het in het water aanwezige fosfaatadsorberende materiaal. In werkelijkheid is dit materiaal niet opgelost, zoals wordt gesuggereerd, maar een vaste stof. Daar van deze stof echter wordt verondersteld dat hij in evenwicht is met opgelost fosfaat, kan hij toch als opgelost worden beschouwd. Tijdens de kalibratie op het IJsselmeer bleek ADS goed te worden gerepresenteerd door het totaal-ijzer gehalte van het water. ADSOH en ADSP zijn nu dus respectievelijk te beschouwen als ijzer(III)hydroxyde en ijzer(III)fosfaat. Deze verbindingen komen in de werkelijkheid als een vaste fase voor, te omschrijven als ijzer(III)hydroxifosfaat-komplex.

Tabel 4.2

De chemische samenstelling van het oppervlaktewater

fase	species	c-waarde	komponenten en stochiometrische konstanten					
WATER	H+	0.0	1.0	H+				
	OH-	0.0	1.0	OH-				
	H2O	-40.27	1.0	H+	1.0	OH-		
	O2	17.6	2.0	OH-	-2.0	H+	-4.0	EL-
	CO2	-6.26	1.0	H2CO3	-1.0	H+	-1.0	OH-
	CO3--	0.0	1.0	H2CO3	-2.0	H+		
	HCO3-	-27.78	1.0	H2CO3	-1.0	H+		
	NO3-	0.0	1.0	NO3-				
	PO4---	0.0	1.0	PO4---				
	HPO4--	-32.3383	1.0	PO4---	1.0	H+		
	H2PO4-	-52.9335	1.0	PO4---	2.0	H+		
	H4SiO4	0.0	1.0	H4SiO4				
	CA++	0.0	1.0	CA++				
	CACO3	-11.38	1.0	CA++	1.0	H2CO3	-2.0	H+
	CAHCO3	-34.72	1.0	CA++	1.0	H2CO3	-1.0	H+
	ADSOH	1.0	1.0	ADS	3.0	OH-		
	ADSP	0.0	1.0	ADS	1.0	PO4---	1.5	OH-
	CAP-	-18.89	1.0	CA++	1.0	PO4---		
	Cl-	0.0	1.0	Cl-				
CALCIT ANOSED	CACO3S	-25.00	1.0	CA++	1.0	H2CO3	-2.0	H+
	DENIT	-	1.0	NO3-	1.0	H+	1.0	FDEN
	ADSOHS	-	1.0	ADS	3.0	OH-	1.0	FADS
	ADSPS	-	1.0	ADS	1.0	PO4---	1.0	FADSP
	CACPS	-	1.0	CA++	1.0	PO4---	1.0	H+
			1.0	FKALP				
LUCHT			1.0	CA++	1.0	H2CO3	-2.0	H+
			1.0	FKAL				
ALGEN	O2A	5.365	2.0	OH-	-2.0	H+	-4.0	EL-
	CO2A	-13.57	1.0	H2CO3	-1.0	OH-	-1.0	H+
ORGSED	ALGAE	-	1.0	H2CO3	-2.75	OH-	2.75	H+
			5.5	EL-	1.0	FALGC		
	NITR	-	1.0	NO3-	1.0	H+	1.0	FALGN
	FOSF	-	1.0	PO4---	3.0	H+	1.0	FALGP
	SILI	-	1.0	H4SiO4	1.0	FALGS		
BODC	OM	-	1.0	H2CO3	0.16	NO3-	-2.75	OH-
			2.75	H+	5.31	EL-	.008	PO4--
			0.02	H4SiO4	0.01	ADS	1.0	FBOTT
BODN	BODC	-	1.0	H2CO3	-2.0	OH-	2.0	H+
			4.0	EL-	32.0	FBODC		
ADPSL1	BODN	-	1.0	NO3-	-3.0	OH-	6.0	H+
			8.0	EL-	64.0	FBODN		
	ADPSL1	-	1.0	PO4---	1.0	ADS	1.0	FADPS1

De fase LUCHT bestaat slechts uit twee gasvormige verbindingen, te weten zuurstof (O2A) en kooldioxyde (CO2A). Ten gevolge hiervan heeft zuurstof een ongeveer vijf maal te hoge dampspanning. Om te voorkomen dat de oplosbaarheid in de fase WATER niet navenant te hoog wordt, is de relatieve Gibbsenergie parameter c_j van zuurstof in de lucht hiervoor gecorrigeerd.

De vaste fase ALGEN bestaat uit vier verbindingen, voor koolstof en nutriënten N, P en Si elk een. Deze verbindingen bevatten elk de som van hun aandelen in de levende alg, het gesuspenderde detritus, het detritus op de bodem en het inerte overblijfsel van detritus, dat in het bodemsediment wordt opgeslagen.

De vier fytoplanktonkompartimenten worden door CHARDN, als afzonderlijk model, berekend uit de door BLOOM II berekende netto primaire produktie.

De fasen BODC en BODN zijn het biologisch zuurstofverbruik, nodig voor de afbraak van respektievelijk organisch koolstof en stikstof, afkomstig van externe belastingen. De fase CALCIT ontstaat door precipitatie van calciumcarbonaat.

De fase en tevens verbinding ADPSL1 vertegenwoordigt een anorganische fosfaatfractie. ADPSL1 komt overeen met zeer vast aan anorganisch partikulair materiaal gebonden fosfaat, dat hieruit slechts langzaam vrijkomt als de concentratie van opgelost fosfaat sterk is gereduceerd.

In de vaste fase anorganisch sediment (ANOSD) bevinden zich een vijftal verbindingen. ADSOHS, ADSP en CALCIS komen daarin terecht ten gevolge van sedimentatie van de in het water aanwezige overeenkomstige verbindingen.

De calciumcarbonaatfosfaat verbinding CACPS komt in het sediment door middel van directe toepassing van een sedimentatie snelheidskonstante op het opgeloste complex CAP-. Er is geen gesuspenderd calciumcarbonaatfosfaat gedefinieerd, omdat met betrekking tot de thermodynamische stabiliteit van deze verbinding geen gegevens beschikbaar zijn. De gekozen oplossing voor dit probleem impliceert de aanname van een lineair verband tussen de concentraties van CAP- en gesuspenderd calciumcarbonaatfosfaat.

De resterende verbinding DENIT representeert de via denitrifikatie uit het systeem verwijderde komponent nitraat. Deze verbinding vormt dus een putterm voor nitraat.

De vaste fase organisch sediment ORGSED bevat alleen de verbinding OM, die de pool van mineralisatie produkten (o.a. nutriënten) en oplossings produkten (ijzer) in de bodem representeert. Vanuit deze pool worden in het interstitiele water opgeloste verbindingen teruggeleverd aan het bovenstaande water.

De verbinding OM wordt niet aangevuld met het bezonken detritus, zodat hiermee in feite de afbraak van organisch materiaal in de bodem gedeeltelijk is losgekoppeld van de teruglevering. De koppeling bestaat nog wel voor de afbraak van op de bodem bezonken detritus. De afbraakprodukten daarvan worden direkt teruggeleverd aan het bovenstaande water. Op zich is de deze ontkoppeling onjuist. Onder de gegeven omstandigheden vormt het echter de enig haalbare wijze, waarop de teruglevering van in het interstitieel water opgeloste verbindingen in het model kan worden opgenomen.

Tenslotte moet nog enige toelichting gegeven worden op de komponenten, waarvan de beginletter een F is. Om de tijdsafhankelijke berekeningen te kunnen starten, moet aan het model een begintoestand worden gegeven. De begintoestand wordt opgegeven in de vorm van de hoeveelheden komponenten, die zich in het systeem bevinden op $t=0$. Vervolgens wordt het evenwicht

berekend. Hierbij blijkt zich met betrekking tot de langzame reaktanten het probleem voor te doen, dat ze niet in evenwicht zijn. De concentraties van de langzame reaktanten moeten dus op een andere wijze worden vastgelegd. Dit kan geschieden met behulp van fiktieve componenten, een voor elke langzame reaktant en aangegeven met de beginletter F. Door een fiktieve component slechts in een verbinding te laten voorkomen is met de hoeveelheid fiktieve component ook de hoeveelheid van die verbinding vastgelegd.

4.2.2 Definitie van de processen in het systeem

De processen, die zich in het aquatische systeem afspelen zijn, zoals reeds in hoofdstuk 3 is gesteld, te verdelen in evenwichtsreacties en langzame processen. De processen, die in de systeembeschrijving zijn opgenomen, worden hieronder verdeeld over deze twee categorieën. Daarnaast wordt vermeld welke verbindingen aan welke processen onderhevig zijn. Voor de mathematische beschrijving van de processen wordt verwezen naar hoofdstuk 3.

Evenwichtsreacties:

- Zuur-base reacties.
Hieronder vallen de dissociatie van water, de carbonaat evenwichten en de fosfaatevenwichten. H_3PO_4 is niet opgenomen, omdat deze verbinding kwantitatief altijd verwaarloosbaar is.
- Zoutvorming (precipitatie-dissolutie).
Hiertoe behoren de vormingen van de calciumcarbonaten en -fosfaten.
- Ad- en desorptie.
Het enige ad- en desorptie evenwicht is dat van fosfaat aan ijzer(III)hydroxyde.

Langzame processen:

- In- en uitstroming.
Vier langzame reaktanten, te weten BOD_C , BOD_N , $ADPSL_1$ en $ADPSL_2$, en alle componenten zijn onderhevig aan in- en uitstroming. De overige in het water voorkomende verbindingen zijn alleen aan uitstroming onderhevig.
- Uitwisseling met de lucht.
Zuurstof en kooldioxyde wisselen uit met de lucht.
- Nalevering uit de bodem.
Vanuit de verbinding OM wordt een aantal componenten teruggeleverd aan het bovenstaande water. OM wordt hierbij afgebroken met een snelheid, die alleen afhankelijk is van de temperatuur.
- Afbraak.
Hieronder valt een aantal uiteenlopende processen; De afbraak van BOD_C en BOD_N onder verbruik van zuurstof en produktie van kooldioxyde en nitraat, denitrifikatie van nitraat aan de bodem, en de afbraak van de fosfaatfrakties $ADPSL_1$ en $ADPSL_2$ onder de vorming van ortho-fosfaat. Alle vijf stoffen worden afgebroken volgens een eerste orde proces, dat afhankelijk is van de temperatuur.
- Sedimentatie.

Hieraan zijn alle vaste stoffen, die zich in het water bevinden onderhevig; AD5OH, AD5P, CAP-, CAC03s (uit de sedimentatie van deze stoffen worden de overeenkomstige verbindingen in het anorganische sediment ANOSED aangevuld), BODC, BODN, ADPSL1 en ADPSL2. Alleen de eerste drie zijn evenwichtsverbindingen.

- Processen met betrekking tot fytoplankton en detritus. Groei, respiratie, sterfte van levend fytoplankton; mineralisatie, autolyse en bezinking van gesuspendeerd detritus; mineralisatie van en vorming van inert organisch materiaal uit bezonken detritus.

De afbraakprocessen, nalevering en instroming leveren vanuit verbindingen componenten aan de water fase. Groei van fytoplankton, sedimentatie en uitstroming onttrekken componenten hieraan. Het proces van reaeratie, uitwisseling met de lucht, levert of onttrekt componenten afhankelijk van onder- of oververzadiging. De waarden van de bij al deze processen horende konstanten zijn verzameld in Tabel 4.3

De wijze, waarop de nalevering van de bodem door het model wordt gesimuleerd, is een sterke vereenvoudiging van de werkelijkheid. Het is desalniettemin de meest haalbare wijze bij de gegeven beperkingen met betrekking tot proceskennis en beschikbare meetgegevens. De waarde van de snelheid, waarmee de bodem nalevert en waarmee dus OM wordt afgebroken, is via kalibratie in het IJsselmeer onderzoek vastgesteld. Tevens zijn de gevonden waarden onderbouwd met meetgegevens van interstitiele water concentraties en sediment samenstelling.

Voor het onderzoek ten behoeve van Grevelingen Volkerak en Zoommeer is echter de gebruikte coëfficiënt voor fosfor verlaagd tot 0.008 (deze was in het IJsselmeer 0.02), en die voor ADS is verlaagd tot 0.010 (deze was in het IJsselmeer 0.018). Het argument voor deze verlaging is dat met name in de scenario's met langere verblijftijd, de externe belasting geringer zal zijn dan op het IJsselmeer, zodat ook de concentratie in de bodem geringer zal zijn. Voor de scenario's met korte verblijftijd is de nalevering vanuit de bodem minder relevant, tenzij nutriënt limitatie zal optreden. In verband met de geschatte vermindering in intensiteit van bodem water uitwisseling is tevens de denitrifikatie snelheid gehalveerd.

Tabel 4.3

De waarden van de proceskonstanten na kalibratie.

proces	k (20 °C)	k (20 °C)	k t
	1 1/d	2 mol/m ² .d	
afbraak gesusp. detr. ALGAE ³	0.09	-	1.047
afbraak gesusp. detr. NITR ³	0.09	-	1.047
afbraak gesusp. detr. FOSF ³	0.09	-	1.047
afbraak gesusp. detr. SILI ³	0.01	-	1.047
afbraak bezonken detr. ALGAE ³	0.04	-	1.047
afbraak bezonken detr. NITR ³	0.04	-	1.047
afbraak bezonken detr. FOSF ³	0.04	-	1.047
afbraak bezonken detr. SILI ³	0.005	-	1.047
afbraak BODC ³	0.20	-	1.047
afbraak BODN ³	0.05	-	1.08
afbraak ADPSL1	0.04	-	1.08
bioturb. bezonken detr. ALGAE	0.04	-	1.047
bioturb. bezonken detr. NITR	0.04	-	1.047
bioturb. bezonken detr. FOSF	0.04	-	1.047
bioturb. bezonken detr. SILI	0.04	-	1.047
aeratie O ₂ ingaand ⁴	0.06 ¹	-	1.00
aeratie O ₂ uitgaand ⁴	0.06 ¹	-	1.00
aeratie CO ₂ ingaand ⁴	0.070 ¹	-	1.016
aeratie CO ₂ uitgaand ⁴	0.045 ¹	-	1.00
denitrifikatie NO ₃ - ³	0.054 ²	-	1.12
nalevering bodem OM	-	0.025	1.06
sedimentatie BODC	0.001	-	1.00
sedimentatie BODN	0.001	-	1.00
sedimentatie ADPSL1	0.7 ²	-	1.00
sedimentatie ADSPS	0.636 ²	-	1.00
sedimentatie ADSOHS	0.636 ²	-	1.00
sedimentatie CALCIS	0.636 ²	-	1.00
sedimentatie CACPS	0.0636 ²	-	1.00
sedimentatie detritus ALGAE	0.15	-	-
sedimentatie detritus NITR	0.15	-	-
sedimentatie detritus FOSF	0.15	-	-
sedimentatie detritus SILI	0.15	-	-

¹ In het geval van reaeratie wordt de transportcoëfficiënt c₁ uit verg 3.31 bedoeld met de dimensie d/m⁴.

² Deze snelheden zijn gegeven in m/d en moeten dus door de diepte van het meer gedeeld worden.

³ (Smits, 1980).

⁴ (van Pagee, 1978).

4.2.3 Invoerbestand en belastingen

Het invoerbestand voor CHARON, voor elk kompartiment aangemaakt op de in sectie 3.2 beschreven wijze, bevat in de gegeven volgorde:

- De instromende fytoplankton biomassa uitgesplitst over 10 soorten.

- De belastingen van de niet-evenwichts verbindingen BODC, BODN en ADPSL1.
- De belastingen van de evenwichtsverbindingen (ook te zien als belastingen van de componenten) zuurstof, nitraat, fosfaat, opgelost calcium, opgelost silikaat, totaal-ijzer (ADSOH), bicarbonaat en kooldioxyde. Hiernaast bevinden zich eveneens de som van de ingaande en de som van de uitgaande debieten.
- De windsnelheid, watertemperatuur en instraling.
- De gemiddelde waterkwaliteitsgegevens, waaronder de pH, zuurstof, nitraat, orthosfosfaat, totaal-fosfaat, opgelost silicium, chlorofyl, opgelost calcium, totaal-ijzer en bicarbonaat.

Het bestand bevat de gegevens per decade voor een periode van drie aaneensluitende jaren. Het model in zijn huidige vorm veronderstelt dat er per parameter slechts een belasting op het systeem plaatsvindt. Dat betekent dat de verschillende belastingen tot een belasting moeten worden samengesteld. Hiertoe worden alle belastingen in vrachten bij elkaar opgeteld.

De belasting van ADPSL1 is als volgt afgeleid uit de parameters ortho-fosfaat, totaal-fosfaat en chlorofyl:

$$\text{ADPSL1 (mg P/l)} = f \cdot (\text{tot-P} - \text{ortho-P}) \quad (4.1)$$

De fraktie f geeft aan dat een gedeelte van het partikulaire fosfaat als niet-evenwichts fosfaat wordt beschouwd. De waarde van f is onbekend en is bepaald aan de hand van de kalibratie voor het IJsselmeer. Gevonden werd $f=0.75$.

De belasting van totaal-ijzer (ADSOH) is niet direct af te leiden uit de gemeten ijzergehalten. Niet al het in het water aanwezige ijzer is reaktief ten opzichte van fosfaat. In overeenstemming met de fraktie niet-evenwichts fosfaat werd middels kalibratie bij de IJsselmeer studie gevonden, dat 75 procent van het totaal-ijzer niet-reaktief is. De belasting van ADSOH bevat dus de overige 25 procent.

5. RESULTATEN GREVELINGEN

Met het eutrofieringsmodel zijn verschillende berekeningen uitgevoerd voor de jaren 1974/1975/1976. Het merendeel van de uitgevoerde berekeningen heeft betrekking op de verschillende hydrologische regimes in de Grevelingen (zie 3.2.1). Daarnaast zijn een aantal berekeningen uitgevoerd met andere aannamen voor achtergrond extinktie en bodemflux. Tevens is een aantal berekeningen uitgevoerd met varianten op scenario 6, zoals de Halskanaal- en Leidam variant, een hydrologische variant met een extra doorspoeling van 25 m³/sec i.p.v. 50 m³/sec, alsmede een berekening zonder polder en sluis belastingen in deze laatste variant. Deze drie soorten berekeningen:

- De hoofd hydrologische scenario's.
- De varianten op deze scenario's.
- Het gevoeligheids onderzoek.

zullen in deze volgorde worden gepresenteerd. Het gevoeligheids onderzoek en de varianten beperken zich tot de hydrologische scenario's 1 en 6 (resp 0 m³/sec en 50 m³/sec doorspoeling, omdat alleen bij deze hydrologische scenario's van nutriënten limitatie sprake is.

In Tabel 5.1 staat een overzicht van alle gepresenteerde berekeningen.

Tabel 5.1

Overzicht gemaakte berekeningen.
Debiten in m³/sec., achtergrond extinktie in /m,
bodemflux in percentages van nominale waarde.

Berekening (aanduiding)	doorspoel debiet	achtergr. extinktie	bodemflux	opmerkingen
1	0	1.1	100	
2	0	1.1	100	
5	0	1.1	100	
6	50	1.1	100	
9	50	1.1	100	
10	100	1.1	100	
13	100	1.1	100	
1A	0	1.1	100	1985 50% polyf. 1985 50% polyf. zonder polder/sluis Leidam variant Halskanaal variant
6A	50	1.1	100	
6B	25	1.1	100	
6C	25	1.1	100	
6L	50	1.1	100	
6H	50	1.1	100	
BB	25	1.6	100	variant 6B
AB	0	0.7	40	variant 1A
CB	25	0.7	40	variant 6C
CD	25	1.1	40	variant 6C

Per soort berekening zijn overzichts tabellen gemaakt met de voornaamste resultaten en zijn grafieken gemaakt, waarin variabelen tegen de tijd zijn uitgezet. Als toelichting op de tabellen en grafieken volgt een bespreking.

In de tabellen staat per scenario de volgende informatie opgenomen:

- Extra doorspoel debieten, aangeduid met dsp debiet, voor Grevelingen (Gr), Volkerak (Vo), en Zoommeer (Zo) (m^3/sec).
- Verblijftijd (dagen).
- Gemiddeld debiet over de gehele berekenings periode (m^3/sec).
- Gemiddelde, minimum en maximum van een aantal kwaliteits variabelen:
 - Fytoplankton ($\text{g C}/\text{m}^3$).
 - Chloride ($\text{g Cl}/\text{m}^3$).
 - pH (pH eenheden).
 - Zuurstof ($\text{g O}_2/\text{m}^3$).
 - Nitraat ($\text{g N}/\text{m}^3$).
 - ortho fosfaat ($\text{g P}/\text{m}^3$).
 - totaal fosfaat ($\text{g P}/\text{m}^3$).
 - opgelost silicium ($\text{g Si}/\text{m}^3$).

In een tweede tabel worden per scenario limitaties, norm overschrijding en fluxen gegeven:

- Stikstof, fosfor en silicium limitaties in percentages van de tijd.
- Overschrijding van de chlorofyl norm van $100 \text{ mg}/\text{m}^3$ in percentages van de tijd. De IMP norm van $100 \text{ mg chlorofyl}/\text{m}^3$ geldt voor de zomer periode, de hier opgegeven percentatges zijn berekend ten opzichte van het gehele jaar.
- Externe en interne (bodem) fosfor belasting ($\text{g P}/\text{m}^2/\text{jaar}$).
- Totale fosfor retentie in percentages, alsook de bijdrage hieraan door algen sedimentatie en anorganische sedimentatie.
- Externe en interne (bodem) stikstof belasting ($\text{g N}/\text{m}^2/\text{jaar}$).
- Totale stikstof retentie in percentages, alsook de bijdrage hieraan door algen sedimentatie en denitrifikatie.
- Externe en interne (bodem) silicium belasting ($\text{g Si}/\text{m}^2/\text{jaar}$).
- Totale silicium retentie in percentages.
- Totale bruto primaire produktie ($\text{g C}/\text{m}^2/\text{jaar}$).

In een derde tabel tenslotte staat de soorten samenstelling in gemiddelde percentages over alle jaren, zowel voor het gehele jaar, alsook voor het winter en zomer halfjaar.

5.1 DE HYDROLOGISCHE SCENARIO'S

De resultaten van de beschouwde hydrologische scenario's staan vermeld in: Tabel 5.2, Tabel 5.3 en Tabel 5.4. In Fig 5.1 t/m 5.8 staan de resultaten voor Cl⁻, fytoplankton, pH, O₂, NO₃⁻, ortho fosfaat, totaal fosfaat en opgelost silicium voor de scenario's 1, 6, en 10 tegen de tijd, in dekaden vanaf 1 januari 1974, uitgezet. Van de oorspronkelijke opgegeven scenario's zijn niet alle varianten doorgerekend, indien uit de reeds doorgerekende variant kon worden gekonkludeerd dat geen essentiële verschillen zouden optreden.

Tabel 5.2

Samenvatting resultaten, hydrologische scenario's Grevelingen.
Debeten in m³/sec., verblijftijd in dagen,
koncentraties in g/m³, fytoplankton in g C.

Omschrijving	sc. 1	sc. 2	sc. 5	sc. 6	sc. 9	sc. 10	sc. 13
Gr dsp debiet	0	0	0	50	50	100	100
Vo dsp debiet	0	0	100	50	150	100	200
verblijftijd	1085	1086	1086	125	128	67.4	69.6
gem. debiet	6.15	6.14	6.14	53.3	52.1	98.9	95.8
fytopl gem	2.66	2.66	2.71	2.77	2.76	2.55	2.55
fytopl max	4.66	4.65	4.67	5.29	5.07	4.54	4.65
fytopl min	0.17	0.17	0.17	0.19	0.19	0.19	0.19
Cl ⁻ gem	-	1827	1812	461	442	367	-
Cl ⁻ max	-	1989	1966	624	616	551	-
Cl ⁻ min	-	1706	1706	357	354	268	-
pH gem	8.60	8.60	8.61	8.50	8.51	8.41	8.44
pH max	9.12	9.12	9.09	8.86	8.86	8.84	8.84
pH min	8.00	8.01	8.02	8.04	8.06	8.04	8.09
O ₂ gem	11.16	11.16	11.18	10.93	10.94	10.68	10.84
O ₂ max	14.45	14.47	14.60	13.68	13.69	13.68	13.84
O ₂ min	8.41	8.46	8.47	8.43	8.64	8.00	8.58
NO ₃ ⁻ gem	0.49	0.48	0.52	2.29	2.46	2.97	2.92
NO ₃ ⁻ max	1.18	1.17	1.23	3.19	3.19	3.74	3.64
NO ₃ ⁻ min	0.00	0.00	0.00	1.39	1.52	1.91	1.82
ortho P gem	.022	.022	.023	.065	.079	.112	.094
ortho P max	.057	.056	.058	.156	.206	.217	.214
ortho P min	.003	.003	.003	.028	.031	.054	.044
Totaal P gem	.078	.078	.083	.167	.194	.237	.211
Totaal P max	.116	.116	.116	.248	.394	.400	.396
Totaal P min	.065	.065	.067	.128	.136	.173	.147
opgel. Si gem	.262	.264	.235	.633	.649	.918	.907
opgel. Si max	2.65	2.65	2.65	2.68	2.68	3.37	3.38
opgel. Si min	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000

Tabel 5.3

Limitaties en fluxen, hydrologische scenario's Grevelingen.
 Limitaties en chlorofyl norm overschrijding in % van de tijd,
 externe belasting, bodem belasting en prim. prod. in g/m²/jaar,
 retentie in procenten.

Omschrijving	sc. 1	sc. 2	sc. 5	sc. 6	sc. 9	sc. 10	sc. 13
N limitaties	8	8	7	-	-	-	-
P limitaties	21	21	19	-	-	-	-
Si limitaties	31	31	31	31	31	26	25
Chlorof norm	43	44	48	32	32	26	27
P extern	.73	.72	.84	5.40	5.81	10.92	9.52
P bodem	1.37	1.37	1.37	1.37	1.37	1.37	1.37
Retent. P tot	80	80	82	52	48	36	36
' alg sed.	44	44	44	16	13	7	7
' anorg sed.	36	36	38	36	35	29	29
N extern	11.1	10.9	11.8	89.2	90.7	171.4	156.5
N bodem	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4
Retent. N tot	81	81	82	40	38	24	25
' alg sed.	57	57	58	14	12	6	7
' denitrif.	23	23	24	26	26	18	18
Si extern	5.68	5.70	4.85	37.5	36.9	69.0	67.0
Si bodem	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11
Si retentie	93	93	93	73	73	60	60
Prim prod.	1091	1090	1115	1149	1139	1071	1068

Zoals uit bovenstaande tabel blijkt, verschillen de resultaten van scenario 1, 2 en 5 nauwelijks, terwijl 6 en 9, en 10 en 13 ook vrijwel identiek zijn. In tabel Tabel 5.4 die de soorten samenstelling weergeeft zijn daarom alleen van de scenario's 1, 6 en 10 de resultaten opgenomen.

Tabel 5.4

Soorten samenstelling hydrologische scenario's Grevelingen.
 Soorten samenstelling in procenten gemiddelde concentratie
 over alle jaren, totale biomassa in g C/m³.

Omschrijving	diato	flag /groen	afani /anab	micro	oscil	totaal
sc. 1 jaar	14	45	2	18	21	2.66
sc. 1 winter	25	43	0	27	6	2.22
sc. 1 zomer	5	47	2	12	33	3.10
sc. 6 jaar	30	23	2	38	8	2.77
sc. 6 winter	52	16	0	31	1	2.17
sc. 6 zomer	14	28	3	43	12	3.38
sc.10 jaar	38	17	2	31	11	2.55
sc.10 winter	56	13	0	29	1	2.24
sc.10 zomer	23	19	4	34	19	2.87

De overeenkomst tussen scenario's met praktisch gelijke verblijftijd toont aan dat vooral het gemiddelde debiet bepalend is in deze situatie voor de uiteindelijke water kwaliteit.

Achtereenvolgens zullen nu de verschillende waterkwaliteits variabelen worden besproken.

Chloride

Het chloride gehalte in de scenario's 2 en 5 is hoog (ruim 1800 g/m³), met slechts geringe variaties in de tijd, de maxima zijn ruim 8 % hoger, de minima ruim 5 % lager dan het gemiddelde. Dit min of meer konstante hoge gehalte wordt veroorzaakt door de konstante hoge belasting via sluizen, kwel en polders. De variërende chloride gehalten in de hoofdinvoer vanuit het Volkerak zijn veel lager maar beïnvloeden het gehalte in de Grevelingen nauwelijks. De gehalten in het Volkerak zijn bij de scenario's 2 en 5 resp: 337 en 267 hetgeen in de Grevelingen slechts een verschil geeft van 1827 en 1812 respectievelijk tussen scenario 2 en 5.

Bij scenario 6 en 9 is duidelijk het doorspoel effect met chloride armer Volkerak water te zien, de gehalten zijn dan 461 en 442. De variatie in gehalte in de tijd is nu echter veel hoger dan bij scenario 2 en 5, zowel absoluut als relatief. De maxima zijn ca 35 % hoger en de minima zijn ca. 22 % lager dan het gemiddelde. Deze variaties worden vooral door de variatie in het chloride gehalte van het Volkerak bepaald.

In scenario 10 is het gehalte aan chloride in de Grevelingen, danzij het verdunnende effect van de doorspoeling gezakt tot 367 g Cl/m³, waarbij de maxima en minima nu met 50 % en resp. 27 % om het gemiddelde liggen.

Konkluderend kan worden gesteld dat de chloride gehalten hoog zijn bij afwezigheid van extra doorspoeling en vrij konstant in de tijd.

Bij toenemende doorspoeling worden de gemiddelde gehalten lager, maar de variatie in de tijd wordt hoger.

Eutrofiering

Biomassa

De invloed van de verschillende hydrologische scenario's op het eutrofierings gebeuren is niet zo eenduidig als bij chloride. De verschillende biomassa gehalten variëren slechts zeer gering, terwijl een maximum wordt gevonden bij een doorspoeling van 50 m³/sec.

Dit wordt veroorzaakt door het feit dat verhoging van het debiet op twee manieren in de biomassa resultaten tot uitdrukking kan komen:.

- Een groot debiet levert een hoge nutriënten belasting, zodat minder nutriënten limitaties voorkomen.
- Een groot debiet levert een grotere bijdrage aan uitspoeling van fytoplankton, zodat meer groei en/of licht limitaties voorkomen

In de scenario's 1,2 en 5 is de nutriënten belasting dermate laag dat de biomassa mede door nutriënten gelimiteerd wordt. Er treedt hier zowel fosfor als stikstof limitatie op. De nutriënt limitaties treden vooral op in de periodes met hoge biomassa niveaus, het grootste gedeelte van het jaar is de biomassa licht gelimiteerd.

In de scenario's 9, 10 en 13 treedt, afgezien van de bijna altijd wel optredende Si limitaties, geen nutriënten limitatie op. Het systeem wordt in deze scenario's geheel door licht gelimiteerd. Dat onder deze omstandigheden toch een (weinig) lagere biomassa ontstaat dan in de nutriënten gelimiteerde situatie, is te danken aan het effect van uitspoeling van biomassa en een, mede daardoor, veranderde soorten samenstelling.

De vergelijking van de scenario's 1,2 en 5 enerzijds, en 9, 10 en 13 anderzijds toont tevens aan dat de nutriënten limitaties in scenario 1,2 en 5 geen grote invloed op het biomassa niveau uitoefenen en dat deze niveaus niet zover van de licht limitatie afliggen.

De scenario's 6 en 9 zijn de optimale scenario's voor een maximale biomassa:

- De belasting is juist hoog genoeg om geen nutriënten limitatie te bewerkstelligen.
- De uitspoeling is nog dermate laag (< 1%/dag) dat de uitspoeling van fytoplankton de biomassa niveaus niet wezenlijk beïnvloedt.

Uit de resultaten blijkt dan ook, dat de biomassa het hoogst is in scenario 6 en 9.

De hierboven geschetste relatie met het doorspoel debiet (en dus met de verblijftijd), is een geheel andere dan die welke door de Vollenweider relatie wordt gegeven. In de Vollenweider relatie wordt echter met energie limitatie geen rekening gehouden. In de discussie zal hier nog nader op worden ingegaan.

De chlorofyl norm van 100 mg/m^3 wordt in alle scenario's overschreden, variërend van 26 % tot 48 % van de tijd.

Soorten samenstelling

De soorten samenstelling in de verschillende hydrologische scenario's wordt gekenmerkt door een dominantie van diatomeeen, flagellaten en groenwieren in het voorjaar, terwijl in de zomerperiode meer Microcystis en Oscillatoria voorkomen.

Het aandeel van diatomeeen stijgt bij toenemende doorspoeling, ten gevolge van een vergroting van de silicium belasting. Deze stijging gaat vooral ten koste van flagellaten en groenwieren. In scenario 1 zijn in de zomer periode vooral Oscillatoria dominant, terwijl voor de overige scenario's in de zomer een dominantie van vooral Microcystis geldt.

Nutrienten

Het nutriënten gedrag is een directe weerspiegeling van het biomassa gedrag en de mate van doorspoeling. In de scenario's 1,2 en 5 bereiken nitraat en ortho fosfaat dermate lage waarden dat nutriënten limitaties optreden, vanaf scenario 6 is hiervan geen sprake meer. Vanaf scenario 10 wordt de verblijftijd dermate klein dat de gehalten van de nutriënten niet zo heel veel verschil meer vertonen met die van het instromende Volkerak water.

In scenario 6 is de externe fosfor belasting $5.4 \text{ g/m}^2/\text{jaar}$. Dit is in dezelfde orde grootte als de huidige fosfor belasting op het IJsselmeer, welk meer eveneens door licht limitatie gekenmerkt wordt.

In de scenario's zonder extra doorspoeling is de nutriënten belasting vooral door de extern gespecificeerde bodem belasting bepaald. In scenario 1 vormt de interne fosfor belasting 65 % van de totale fosfor belasting. Omdat bij dit scenario ook fosfor limitaties optreden is de gevoeligheid van de berekenings resultaten voor deze bodem flux aanname erg hoog. Bij het gevoeligheids onderzoek zal hier nader op worden ingegaan. In scenario 6 echter is de interne fosfor belasting slechts 20 % van de totale belasting. Omdat in dit scenario fosfor limitaties bijna niet meer optreden is de gevoeligheid van de berekenings resultaten voor deze aanname erg gering. Overigens zal ook voor dit scenario hierop in het gevoeligheids onderzoek worden terug gekomen.

De berekende pH's en zuurstof gehalten vertonen weinig verschillen in de verschillende berekeningen. Voor beide geldt dat het maximum bereikt wordt in het voorjaar als de maximale biomassa bereikt wordt, terwijl het minimum bereikt wordt na de voorjaarsbloei, vlak voor het midden van de zomer. De pH vertoont nog een tweede maximum en minimum per jaar. Het tweede maximum valt omstreeks augustus, maar is lager dan het eerste, terwijl het tweede minimum omstreeks oktober valt, en ongeveer gelijke waarden als het eerste minimum bereikt. Deze maxima en minima komen overeen met de toename respectievelijk afname in biomassa. Dat de berekende waarden weinig verschillen voor de verschillende scenario's wordt veroorzaakt doordat zowel de CO₂ dynamiek (welk gehalte de pH bepaalt), als de O₂ dynamiek bijna geheel door de biomassa dynamiek worden bepaald, die ook weinig verschilt in de verschillende scenario's. Dat zuurstof slechts een maximum en minimum per jaar vertoont, terwijl de pH er twee vertoont, wordt veroorzaakt door

het feit dat de zuurstof uitwisseling met de atmosfeer sneller verloopt dan de CO₂ uitwisseling, dit is het gevolg van de hogere verzadigings concentratie van zuurstof. De zuurstof verzadigings percentages variëren slechts een 30 tal procenten ten opzichte van 100, terwijl de CO₂ verzadiging percentages factoren verschillen, van 10 % tot 300 %.

Bovendien wordt de zuurstof concentratie veel meer door de temperatuur bepaald dan de CO₂ concentratie.

5.2 DE VARIANTEN OP DE HYDROLOGISCHE SCENARIO'S

De beschouwde varianten staan vermeld in Tabel 5.5 , Tabel 5.6 en in Tabel 5.7 . In Fig 5.9 t/m 5.14 staan de resultaten voor chloride, fytoplankton, NO₃⁻, ortho fosfaat, totaal fosfaat en opgelost silicium voor een aantal scenario's tegen de tijd uitgezet.

De volgende varianten zijn berekend:

- De 1985 randvoorwaarden zijn gebruikt voor het bepalen van de nutriënten belasting op Volkerak en Grevelingen. Deze berekeningen zijn uitgevoerd voor de hydrologische scenario's 1 en 6. De berekeningen zijn aangeduid met respectievelijk 1A en 6A.
- Een extra doorspoeldebiet voor de Grevelingen van 25 m³/sec is toegepast. Bij deze berekening is uitgegaan van de Volkerak randvoorwaarde van scenario 6 (50 m³/sec) en is aangeduid met 6B.
- Een berekening met gelijke hydrologische randvoorwaarden als 6B, waarbij de belastingen door polder en sluizen zijn weggelaten. De uitwisseling via de sluizen is op 0 gesteld, terwijl het door de polders uitgeslagen debiet nu aan het Volkerak wordt onttrokken, om de waterbalans te laten kloppen. Deze berekening heeft vooral effect op de Chloride gehalten. Deze berekening is aangeduid met 6C.
- Een berekening waarbij het aanvoer water via een leidam in het Volkerak wordt geleverd, met een extra doorspoeldebiet van 50 m³/sec. Deze berekening is aangeduid met 6L. Deze berekening heeft gevolgen voor:
 - Chloride, omdat de extra chloride belasting op het Volkerak wordt vermeden.
 - Eutrofiering, omdat nu rechtstreeks water uit het Hollands Diep wordt aangeleverd, met een hoger nutriënten gehalte dan het water dat na een zekere verblijftijd in het Volkerak wordt aangeleverd.
- Een berekening waarbij het aanvoer water via het Halskanaal uit het Haringvliet wordt aangeleverd, met een extra doorspoeldebiet van 50 m³/sec. Deze berekening is aangeduid met 6H. Deze berekening heeft gevolgen voor:
 - Chloride, omdat de chloride gehalten in het Haringvliet lager zullen zijn dan in het Volkerak.
 - Nutriënten, omdat de nutriënten gehalten in het Haringvliet mogelijk anders kunnen zijn dan in het Volkerak. Uit de berekende waarden voor het Volkerak blijkt echter dat de gemiddelde niveaus van het

Volkerak ongeveer gelijk zijn aan die van het Haringvliet.

Ter vergelijking zijn in de tabel ook de resultaten van scenario 6 opgenomen.

Tabel 5.5

Samenvatting resultaten, varianten hydrologische scenario's Grevelingen.

Debiten in m³/sec., verblijftijd in dagen, concentraties in g/m³, fytoplankton in g C.

Omschrijving	sc.1A	sc.6A	sc.6B	sc.6C	sc.6L	sc.6H	sc.S6
Gr dsp debiet	0	50	25	25	50	50	50
Vo dsp debiet	0	50	50	50	—	—	50
verblijftijd	1085	125	233	235	125	125	125
gem debiet	6.15	53.3	28.6	28.4	53.3	53.3	53.3
fytopl gem	2.63	2.77	3.09	3.10	2.75	2.91	2.77
fytopl max	4.66	5.29	7.01	6.68	5.09	6.68	5.29
fytopl min	0.17	0.19	0.17	0.17	0.19	0.19	0.19
Cl- gem	—	—	620	376	419	428	461
Cl- max	—	—	812	495	570	613	624
Cl- min	—	—	552	318	347	353	357
pH gem	8.59	8.51	8.56	8.57	8.60	8.62	8.50
pH max	9.11	8.86	9.10	9.11	8.91	9.05	8.86
pH min	8.01	8.04	7.97	7.96	8.12	8.16	8.04
O2 gem	11.16	10.98	11.13	11.13	11.14	11.23	10.93
O2 max	14.45	13.72	15.56	15.42	13.76	14.32	13.68
O2 min	8.44	8.50	7.89	7.89	8.78	8.26	8.43
NO3- gem	.47	2.18	1.61	1.61	2.44	2.28	2.28
NO3- max	1.13	3.06	2.50	2.50	3.02	2.86	3.19
NO3- min	.00	1.40	.94	.94	1.39	1.38	1.39
ortho P gem	.021	.056	.044	.043	.074	.060	.066
ortho P max	.055	.140	.118	.112	.151	.144	.156
ortho P min	.003	.022	.004	.003	.036	.010	.028
Totaal P gem	.077	.150	.131	.128	.194	.168	.167
Totaal P max	.116	.225	.184	.176	.244	.230	.248
Totaal P min	.065	.115	.100	.097	.152	.121	.128
opgel. Si gem	.257	.633	.422	.371	.682	.460	.633
opgel. Si max	2.65	2.68	2.66	2.64	2.70	2.58	2.68
opgel. Si min	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000

Tabel 5.6

Limitaties en fluxen, varianten hydrologische scenario's
Grevelingen.

Limitaties en chlorofyl norm overschrijding in % van de tijd,
externe belasting, bodem belasting en prim. prod. in g/m²/jaar,
retentie in procenten.

Omschrijving	sc.1A	sc.6A	sc.6B	sc.6C	sc.6L	sc.6H	sc.S6
N limitaties	8	-	-	-	-	-	-
P limitaties	22	-	2	4	-	-	-
Si limitaties	31	31	35	34	31	32	31
Chlorof norm	44	32	42	41	31	40	32
P extern	.68	4.84	3.01	2.88	6.98	5.64	5.40
P bodem	1.37	1.37	1.37	1.37	1.37	1.37	1.37
Retent. P tot	80	51	63	63	56	53	52
' alg sed.	44	16	27	28	13	16	16
' anorg. sed	36	35	36	35	43	37	36
N extern	10.5	83.6	49.2	49.0	95.4	90.8	89.2
N bodem	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4
Retent. N tot	81	40	55	55	41	41	40
' alg sed.	59	14	25	25	13	14	14
' denitrif.	22	26	30	30	28	27	26
Si extern	5.68	37.5	21.2	18.9	37.1	30.7	37.5
Si bodem	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11
Si retentie	93	73	83	83	71	76	73
Prim prod.	1079	1149	1336	1336	1133	1255	1149

Tabel 5.7

Soorten samenstelling varianten hydrologische scenario's
Grevelingen.

Soorten samenstelling in procenten gemiddelde concentratie
over alle jaren, totale biomassa in g C/m³.

Omschrijving	diato	flag /groen	afani /anab	micro	oscil	totaal
sc. 6 jaar	30	23	2	38	8	2.77
sc. 6 winter	52	16	0	31	1	2.17
sc. 6 zomer	14	28	3	43	12	3.38
sc.6B jaar	20	41	0	33	5	3.09
sc.6B winter	41	27	0	30	1	2.26
sc.6B zomer	9	51	1	34	7	3.93
sc.6C jaar	19	44	1	29	6	3.10
sc.6C winter	37	31	0	29	2	2.32
sc.6C zomer	8	53	2	29	9	3.89
sc.6L jaar	29	23	2	37	9	2.75
sc.6L winter	51	15	0	31	1	2.17
sc.6L zomer	13	29	3	41	14	3.34
sc.6H jaar	24	35	2	32	7	2.91
sc.6H winter	46	21	0	31	2	2.22
sc.6H zomer	12	42	2	33	10	3.34

Zoals uit bovenstaande tabellen blijkt, hebben sommige varianten wel degelijk effect op de verschillende waterkwaliteitsvariabelen, hoewel de verschillen niet erg groot zijn.

Achtereenvolgens zullen nu de verschillende waterkwaliteitsvariabelen worden besproken.

Chloride

De gehalten aan chloride bij scenario 6B zijn ten gevolge van de lagere doorspoeling duidelijk hoger dan bij scenario 6. Het gemiddelde gehalte stijgt van 461 tot 620 g/m³.

Het Leidam scenario 6L geeft duidelijk lagere Cl gehalten, namelijk 419 g/m³, terwijl de Halskanaal variant 6H hier slechts licht boven blijft met een gehalte van 428 g/m³.

De meeste verbetering is echter te bereiken door het afleiden van polder en sluis belastingen op de Grevelingen. Scenario 6C geeft een gehalte van 376 g/m³ t.o.v. 620 g/m³ in scenario 6B.

Het oplopen van het chloride gehalte in 1976 wordt veroorzaakt door enerzijds een tekort aan water, zodat minder kan worden doorgespoeld, anderzijds door een hogere concentratie in het aanvoerende water, voor zover beschikbaar.

Eutrofiering

Biomassa

Het gemiddelde biomassa niveau vertoont een maximum in de scenario's 6B en 6C. De gemiddelde niveaus zijn ca. 10 % hoger dan in scenario 6 en de hoogste die in enig scenario of variant berekend worden. De nutriënten limitaties zijn dan nog minimaal, resp 2 en 4% fosfor limitatie, terwijl de verblijftijd toch vrij hoog is, nl ca 235 dagen. Deze 25 m³/sec doorspoel varianten waren juist bedacht om de nutriënten belasting te verlagen, en daardoor een verlaging van de biomassa te bewerkstelligen. De fosfor belasting ligt echter nog steeds rond de 3.0 g P/m²/jaar, hetgeen nog steeds een vrij hoge waarde is.

Scenario 1A en 6A (de 1985 varianten) vertonen nauwelijks verschillen ten opzichte van scenario 1 en scenario 6. Hoewel de oorspronkelijke fosfor belasting ca. 7 % terug loopt, neemt de mate van fosfor limitatie nauwelijks toe.

Scenario 6L en 6H geven kleine verschillen ten opzichte van scenario 6. De verhoging van biomassa bij 6H wordt veroorzaakt door een verandering in soortensamenstelling, n.l. meer soorten met een lagere specifieke extinctie.

Soorten samenstelling

De soorten samenstelling varieert slecht in geringe mate tussen de verschillende varianten. Opvallend is dat Microcystis in alle varianten een vrij konstant aandeel van ca. 30 % in de soorten samenstelling inneemt, zowel in zomer halfjaar als winter halfjaar. Oscillatoria heeft in de zomer een aandeel van ca 10 %, terwijl verder vooral groenwieren en flagellaten voorkomen in de zomer. In de winter periode is er een dominantie van diatomeeen, met een aandeel van ca. 50 %.

De lagere silicium belasting in 6H zorgt ervoor dat na de voorjaarsbloei van diatomeeen, groenwieren en flagellaten eerder in de tijd de dominantie van diatomeeen overnemen. Hierdoor wordt het voor Microcystis moeilijker gemaakt de dominantie van groenwieren en flagellaten over te nemen, omdat deze dan al in hogere concentraties voorkomen. Omdat deze laatste soorten een lagere specifieke extinctie hebben dan Microcystis kunnen onder lichtlimitaties hogere biomassa's bereikt worden.

Nutriënten

Het nutriënten gedrag verschilt nauwelijks van de oorspronkelijke scenario's.

De 1985 varianten, scenario 1A en 6A geven iets lagere fosfor belastingen dan scenario 1 en 6. De verschillen zijn echter niet dermate groot dat daardoor duidelijk verschillende nutriënten niveaus en biomassa niveaus mee worden bereikt.

De 25 m³/sec varianten, de scenario's 6B en 6C geven duidelijk lagere nutriënten niveaus, maar nauwelijks meer nutriënten limitaties.

De scenario's 6L, Hollands Diep water via de Leidam, en 6H, Haringvliet water via het Halskanaal, geven in beperkte mate verandering van nutriënten niveaus. Het Haringvliet water blijkt van ongeveer gelijke kwaliteit te zijn als het Volkerak water, met

uitzondering van opgelost silicium, hetgeen in het Volkerak in hogere concentratie aanwezig is dan in het Haringvliet. Daardoor ontstaat een iets andere soorten samenstelling in scenario 6H met minder diatomeeen, en meer groenwieren, met een iets hogere biomassa. Het Hollands diep bevat hogere gehalten aan nutriënten en geeft hogere belastingen op de Grevelingen. De gehalten aan nutriënten zijn ook enigszins hoger.

5.3 GEVOELIGHEIDS ONDERZOEK SCENARIO'S GREVELINGEN.

De resultaten van het gevoeligheids onderzoek staan in Tabel 5.8 , Tabel 5.9 en in Tabel 5.10 . In Fig 5.15 t/m 5.19 staan de resultaten voor fytoplankton, NO_3^- , ortho fosfaat, totaal fosfaat en opgelost silicium voor een aantal berekeningen tegen de tijd uitgezet.

De volgende punten zijn onderzocht:

- Variatie in de achtergrond extinktie. Bij de nominale berekeningen is een achtergrond extinktie toegepast van 1.1/m (Van Eck 1981) Daar de meeste berekeningen licht limitaties te zien geven, heeft de achtergrond extinktie grote invloed op de bereikte biomassa niveau's. De volgende variaties in achtergrond extinktie zijn toegepast:
 - Een achtergrond extinktie van 1.6/m op scenario variant 6B ($25 \text{ m}^3/\text{sec}$ doorspoeling), aangeduid met BB.
 - Een achtergrond extinktie van 0.7/m op scenario variant 1A ($0 \text{ m}^3/\text{sec}$ doorspoeling, 1985 variant), en op scenario variant 6C ($25 \text{ m}^3/\text{sec}$ doorspoeling met afleiding van polder en sluis belasting). In deze twee berekeningen is tegelijkertijd de via de model invoer gespecificeerde bodem nutriënten belasting tot 40 % van de nominale waarde gereduceerd. Deze twee berekeningen zijn aangeduid met AB en CB.
- Met name bij de zeer lage externe nutriënten belasting kan de invloed van de interne bodem belasting erg hoog zijn. In een drietal berekeningen is onderzocht wat het effect is t.o.v. de nominale berekening van een verlaging van de nutriënten belasting uit de bodem tot 40 %. deze berekeningen zijn:
 - berekening AB, scenario variant 1A, waarbij tegelijkertijd de achtergrond extinktie tot 0.7/m is gereduceerd.
 - berekening CB, scenario variant 6C, waarbij tegelijkertijd de achtergrond extinktie tot 0.7/m is gereduceerd.
 - berekening CO, scenario variant 6C.

Tabel 5.8

Samenvatting resultaten gevoeligheids onderzoek Grevelingen.
 Debieten in m³/sec., verblijftijd in dagen, achtergrond-
 extinktie in /m, bodemflux in procenten van de nominale waarde,
 concentraties in g/m³, fytoplankton in g C.

Omschrijving	sc.BB	sc.6B	sc.AB	sc.1A	sc.CB	sc.6C	sc.CO
Gr dsp debiet	25	25	0	0	25	25	25
Vo dsp debiet	50	50	0	0	50	50	50
verblijftijd	233	233	1085	1085	235	235	235
gem debiet	28.6	28.6	6.15	6.15	28.4	28.4	28.4
achtg ext	1.6	1.1	.7	1.1	.7	1.1	1.1
bodem	100	100	40	100	40	100	40
fytopl gem	1.24	3.09	2.59	2.63	4.20	3.10	3.01
fytopl max	4.05	7.07	5.22	4.66	7.50	6.68	6.15
fytopl min	.00	.17	1.31	.17	1.18	.17	.17
pH gem	8.34	8.56	8.69	8.59	8.88	8.57	8.67
pH max	8.78	9.10	8.94	9.11	9.46	9.11	9.13
pH min	7.89	7.97	8.24	8.01	8.20	7.96	8.02
O2 gem	10.54	11.13	11.32	11.16	11.54	11.13	11.33
O2 max	13.12	15.56	13.84	14.45	15.11	15.42	15.70
O2 min	7.18	7.89	9.27	8.44	8.90	7.89	8.85
NO3- gem	2.67	1.61	.61	.47	.96	1.61	1.34
NO3- max	3.45	2.50	.56	1.13	1.87	2.50	2.20
NO3- min	1.53	.94	.0	.0	.37	.94	.62
ortho P gem	.097	.044	.005	.021	.019	.043	.032
ortho P max	.156	.118	.027	.055	.093	.112	.100
ortho P min	.032	.004	.002	.003	.002	.003	.003
Totaal P gem	.181	.131	.047	.077	.103	.128	.108
Totaal P max	.256	.184	.114	.116	.167	.176	.167
Totaal P min	.131	.100	.038	.065	.065	.097	.064
opgel. Si gem	1.56	.422	.141	.257	.236	.371	.319
opgel. Si max	3.21	2.66	2.56	2.65	2.56	2.64	2.64
opgel. Si min	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000

Tabel 5.9

Limitaties en fluxen, gevoeligheids onderzoek Grevelingen.
 Limitaties en chlorofyl norm overschrijding in % van de tijd,
 externe belasting, bodem belasting en prim. prod. in g/m²/jaar,
 retentie in procenten.

Omschrijving	sc.BB	sc.6B	sc.AB	sc.1A	sc.CB	sc.6C	sc.CO
N limitaties	-	-	45	8	-	-	-
P limitaties	-	2	73	22	26	4	17
Si limitaties	4	35	9	31	50	34	33
Chlorof norm	3	42	55	44	49	41	44
P extern	3.01	3.01	.68	.68	2.88	2.88	2.88
P bodem	1.37	1.37	.55	1.37	.55	1.37	.55
Retent. P tot	48	63	87	80	70	63	68
' alg sed.	7	27	55	44	45	28	35
' anorg sed.	41	36	32	36	25	35	33
N extern	49.2	49.2	10.5	10.5	49.0	49.0	49.0
N bodem	12.4	12.4	4.9	12.4	4.9	12.4	4.9
Retent. N tot	38	55	88	81	63	55	60
' alg sed.	6	25	59	59	42	25	30
' denitrif.	32	30	29	22	21	30	30
Si extern	21.2	21.2	5.68	5.68	18.9	18.9	18.9
Si bodem	3.11	3.11	1.22	3.11	1.22	3.11	1.22
Si retentie	35	83	96	93	98	83	85
Prim prod.	585	1336	928	1079	1753	1336	1289

Tabel 5.10

**Soorten samenstelling gevoeligheids onderzoek
Grevelingen.**

Soorten samenstelling in procenten gemiddelde concentratie
over alle jaren, totale biomassa in g C/m³.

Omschrijving	diato	flag /groen	afani /anab	micro	oscil	totaal
sc.BB jaar	26	42	2	26	5	1.24
sc.BB winter	24	40	0	33	2	.62
sc.BB zomer	26	41	2	23	6	3.38
sc.6B jaar	20	41	0	33	5	3.09
sc.6B winter	41	27	0	30	1	2.26
sc.6B zomer	9	51	1	34	7	3.93
sc.AB jaar	13	22	10	13	41	2.59
sc.AB winter	20	31	1	22	26	2.64
sc.AB zomer	5	14	19	4	57	2.55
sc.1A jaar	14	45	2	16	23	2.63
sc.1A winter	25	42	0	26	6	2.21
sc.1A zomer	5	47	2	9	36	3.06
sc.CB jaar	14	53	3	20	10	4.20
sc.CB winter	22	45	0	27	5	3.93
sc.CB zomer	7	60	4	14	15	4.47
sc.6C jaar	19	44	1	29	6	3.10
sc.6C winter	37	31	0	29	2	2.32
sc.6C zomer	8	53	2	29	9	3.89
sc.CO jaar	18	45	2	28	7	3.01
sc.CO winter	36	34	0	27	2	2.31
sc.CO zomer	8	52	2	28	10	3.71

Achtereenvolgens zullen nu de verschillende waterkwaliteits variabelen worden besproken.

Chloride

De variatie in parameters heeft geen gevolgen voor het chloride gedrag, zodat deze variabele hier verder onbesproken blijft.

Eutrofiering

Biomassa

De achtergrond extinktie blijkt duidelijk een bepalende grootte te zijn voor de uiteindelijke biomassa. Scenario BB, met een achtergrond extinktie van 1.6/m in plaats van 1.1/m zoals in scenario 6B, geeft een verlaging van 60 % in de gemiddelde biomassa. Dit gedrag is begrijpelijk, omdat deze systemen door licht limitaties gekenmerkt worden.

Bij verlaging van de achtergrond extinktie treedt, afhankelijk van de mate van nutrient limitatie, een verhoging van de biomassa op. Scenario CB, met een achtergrond extinktie van 0.7/m, geeft een 40 % hogere gemiddelde biomassa dan scenario CO, met een achtergrond extinktie van 1.1/m. Verlaging van de achtergrond extinktie beïnvloedt vooral de winter niveaus, omdat die praktisch altijd licht gelimiteerd zijn. De minimale fytoplankton niveaus komen bij verlaging van de achtergrond extinktie boven de 1.0 g C/m³.

Verlaging van de bodemflux heeft maar een beperkte invloed op de gemiddelde biomassa niveaus. Scenario CO met een bodemflux die 40 % bedraagt van de nominale flux, geeft een slechts 3 % lagere gemiddelde biomassa in vergelijking met scenario 6C. In scenario CO vormt de interne fosfor belasting 19 % van de externe fosfor belasting, terwijl in de nominale berekening 6C, dit percentage 48 % bedraagt.

Bij gelijktijdige verlaging van de achtergrond extinktie en de bodem flux, is het afhankelijk van de mate van nutrient en licht limitatie, welke verschuivingen optreden:

- Scenario AB in vergelijking met scenario 1A geeft een geringe verlaging van het gemiddelde fytoplankton niveau en een verhoging van maximum en vooral minimum. Fosfor limitaties zijn de belangrijkste limitaties (73 % van de tijd).
- Scenario CB in vergelijking met scenario 6C geeft zowel een verhoging van gemiddelde als minimaal en maximaal niveau. Hieruit blijkt duidelijk dat de licht limitaties belangrijker zijn in deze berekening dan de nutrient limitaties.

Soorten samenstelling

De soorten samenstelling in de gevoeligheids berekeningen vertonen enige verschillen ten opzichte van de nominale berekeningen.

Bij verhoging van de achtergrond extinktie treedt een verschuiving op naar soorten met een lagere specifieke extinktie. In de zomer periode betekent dit een relatieve en absolute toename van diatomeeen. Dit wordt het duidelijkst geïllustreerd bij vergelijking van scenario BB met 6B.

Verlaging van de achtergrond extinktie geeft een groter aandeel aan flagellaten en groenwieren ten koste van diatomeeen en Microcystis. Vergelijk scenario CB met scenario 6C.

Verlaging van de bodemflux geeft nauwelijks veranderingen, vergelijk scenario CO met 6C.

Verlaging van bodemflux en achtergrond extinktie, zodat nutrienten limitaties gaan overheersen, geeft een verschuiving ten gunste van Aphanizomenon en Oscillatoria, ten koste van alle andere soorten. Vergelijk scenario AB met 1A.

Nutrienten

Het nutrienten gedrag in de verschillende gevoeligheids berekeningen staat in directe relatie met het fytoplankton gebeuren: hogere concentraties bij lagere biomassa's en omgekeerd.

Opvallend is dat bij toenemende fosfor limitaties het totaal fosfaat gehalte in de tijd konstanter wordt. (zie Fig. 5.18)

Hoewel de verandering van bodemflux aanleiding geeft tot enigszins andere resultaten, zijn deze veranderingen niet van dien aard dat de berekende gehalten daardoor volledig zouden veranderen. Mede door de interne bufferings processen wordt het resultaat voor wat betreft biomassa maar in beperkte mate door de grootte van de bodemflux beïnvloed. Deze interne buffering is af te lezen aan de retentie cijfers:

- Bij verlaging van de bodemflux: neemt de totale retentie toe, in 6C 63 % voor fosfor en in CD 68 %. Dit betekent dat minder fosfor het systeem uitstroomt.
- Tevens neemt het aandeel van de algen sedimentatie in de retentie meer toe dan de totale retentie, ten koste van de anorganische sedimentatie. Algen sedimentatie neemt toe van 28 naar 35 %, terwijl anorganische sedimentatie van 35 naar 33 % afneemt.

Deze bufferings processen zorgen ervoor dat de beschikbaarheid van fosfor voor fytoplankton opname slechts in beperkte mate afhankelijk is van de grootte van de bodemflux.

6. RESULTATEN VOLKERAK EN ZOOMMEER

De resultaten van de berekeningen voor het Volkerak en het Zoommeer staan samengevat in Tabel 6.1, Tabel 6.2 en in Tabel 6.3. In Fig. 6.1 t/m 6.8 staan de resultaten voor chloride, fytoplankton, pH, zuurstof, NO_3^- , ortho fosfaat, totaal fosfaat en opgelost silicium tegen de tijd uitgezet. Voor beide meren zijn de hydrologische scenario's 2, 5 en 13 uitgekozen ter presentatie. De andere hydrologische scenario's verschillen slechts marginaal van scenario 5 en 13, die onderling ook erg weinig verschillen.

Behalve voor scenario 2, waarbij geen extra doorspoeling wordt toegepast, zijn de verblijftijden erg gering. Deze geringe verblijftijd heeft een aantal belangrijke konsekwenties voor de waterkwaliteits processen:

- De waterkwaliteit neigt er toe erg veel te gaan lijken op die van het instromende water. Een duidelijke uitzondering hierop vormt chloride in scenario 2 voor beide meren, waar ten gevolge van de hoge lokale belasting door sluis uitwisseling toch nog zeer hoge concentraties ontstaan.
- Ten gevolge van de hoge uitspoeling moet meer primaire produktie plaats vinden om een bepaald biomassa niveau te bereiken en te handhaven. Dit heeft tot konsekwentie dat deze systemen zich veelal kenmerken door groeilimitaties.
- Ten gevolge van de hoge uitspoeling bereikt het biomassa niveau niet de waarde die het zonder uitspoeling onder licht limitatie zou bereiken. De gemiddelde licht intensiteit is daardoor hoger dan in een overigens vergelijkbaar systeem zonder hoge uitspoeling. Ten gevolge van de hogere licht intensiteit kan een hogere primaire produktie per m^2 worden bereikt. Een groot gedeelte van deze geproduceerde fytoplankton verlaat het systeem via uitspoeling.
- De soorten samenstelling kan eveneens beïnvloed worden door de hoge uitspoeling, doordat de 'snelle groeiers' relatief in het voordeel zijn.
- Ten gevolge van de relatief hoge primaire produktie ontstaan hoge zuurstof gehalten, en een hoge pH.
- Ten gevolge van de hoge externe belasting speelt de interne belasting vanuit de bodem in deze systemen een ondergeschikte rol. Zelfs in scenario 2 in het Volkerak is de interne belasting minder dan 10 % van de externe belasting.
- Ten gevolge van de hoge externe belasting komen nutriënten limitaties erg weinig voor. Alleen in scenario 2 in het Zoommeer komen nutriënt limitaties voor. Dat ondanks een belasting van totaal $13.4 \text{ g P/m}^2/\text{jaar}$ toch fosfor limitatie voorkomt, wordt veroorzaakt door het feit dat in deze situatie een groot deel van de nutriënten in fytoplankton het systeem via uitspoeling verlaat. In een systeem met grotere verblijftijd, kunnen deze nutriënten na recycling weer opnieuw, zelfs meerdere malen, voor fytoplankton produktie gebruikt worden.
- Bij de zeer korte verblijftijden in het Zoommeer in scenario 5 en scenario 13 zijn de biomassa niveaus die bereikt kunnen worden mede afhankelijk van de ingespoelde hoeveelheden biomassa. Daarom zijn bij deze berekeningen

de concentraties uit het Volkerak als invoer concentraties in het Zoommeer in de berekening meegenomen.

Een belangrijk verschil tussen het Zoommeer, en het Volkerak en de Grevelingen, is de geringere diepte van het Zoommeer, 3.5 m. In licht beperkte situaties is de biomassa concentratie beperkt in termen van concentratie per m^2 . Dit betekent dat bij geringere diepte hogere concentraties per m^3 kunnen optreden.

Tabel 6.1

Samenvatting resultaten, hydrologische scenario's
Volkerak en Zoommeer.

Debiten in $m^3/sec.$, verblijftijd in dagen,
concentraties in g/m^3 , fytoplankton in $g C$.

Omschrijving	sc. 2 volk	sc. 5 volk	sc.13 volk	sc. 2 zoom	sc. 5 zoom	sc. 13 zoom
Vo dsp debiet	0	100	200	0	100	200
extra zoom.	0	100	100	0	100	100
verblijftijd	62	20	12	26	5.5	5.6
gem debiet	44.7	137.5	224.2	24.5	117.4	114.3
fytopl gem	2.83	2.61	2.11	4.83	2.98	3.34
fytopl max	6.54	7.50	4.22	10.39	7.97	6.40
fytopl min	0.35	0.34	0.31	1.20	0.53	1.09
Cl- gem	337	267	253	1111	445	439
Cl- max	500	494	491	1345	931	926
Cl- min	232	129	107	570	289	267
pH gem	8.60	8.57	8.52	8.72	8.59	8.62
pH max	8.96	9.11	8.91	9.34	9.14	9.00
pH min	8.20	8.14	8.06	8.20	8.13	8.20
O2 gem	11.57	12.03	11.92	12.45	13.49	13.97
O2 max	16.25	19.43	16.59	17.91	22.56	20.36
O2 min	8.36	8.21	8.00	8.51	8.48	8.51
NO3- gem	2.40	2.87	3.05	1.33	2.31	2.42
NO3- max	4.25	3.89	3.75	3.13	3.62	3.38
NO3- min	1.25	2.11	2.24	0.00	1.14	1.35
ortho P gem	.091	.115	.126	.047	.091	.087
ortho P max	.291	.289	.286	.170	.240	.198
ortho P min	.007	.042	.047	.003	.023	.028
Totaal P gem	.239	.305	.328	.183	.266	.280
Totaal P max	.525	.545	.624	.384	.468	.503
Totaal P min	.088	.188	.216	.096	.158	.177
opgel. Si gem	.958	1.35	1.80	.752	1.18	1.34
opgel. Si max	3.74	4.21	4.27	3.65	4.15	3.96
opgel. Si min	.000	.000	.010	.000	.000	.000

Tabel 6.2

Limitaties en fluxen, hydrologische scenario's
Volkerak en Zoommeer.

Limitaties en chlorofyl norm overschrijding in % van de tijd,
externe belasting, bodem belasting en prim. prod. in g/m²/jaar,
retentie in procenten.

Omschrijving	sc. 2 volk	sc. 5 volk	sc.13 volk	sc. 2 zoom	sc. 5 zoom	sc. 13 zoom
N limitaties	-	-	-	7	-	-
P limitaties	-	-	-	11	-	-
Si limitaties	27	20	6	34	27	15
Chlorof norm	32	27	18	49	36	42
P extern	14.4	42.1	67.9	11.9	71.5	74.9
P bodem	1.37	1.37	1.37	1.37	1.37	1.37
Retent. P tot	49	31	25	26	13	14
' alg sed.	7	2	1	7	1	1
' anorg sed.	42	29	24	19	12	12
N extern	132	392	632	131	718	735
N bodem	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4
Retent. N tot	25	10	6	9	4	4
' alg sed.	8	3	1	4	1	1
' denitrif.	17	7	5	5	3	3
Si extern	75	223	367	64	342	438
Si bodem	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11
Si retentie	66	43	23	39	15	27
Prim prod.	1091	1211	1127	1305	1201	1457

Tabel 6.3

Soorten samenstelling Volkerak en Zoommeer
 Soorten samenstelling in procenten gemiddelde concentratie
 over alle jaren, totale biomassa in g C/m³.

Omschrijving	diato	flag /groen	afani /anab	micro	oscil	totaal
sc.v2 jaar	28	24	3	32	12	2.83
sc.v2 winter	51	16	2	29	2	2.49
sc.v2 zomer	11	30	3	25	20	3.18
sc.v5 jaar	37	32	2	21	9	2.61
sc.v5 winter	50	25	0	21	4	2.61
sc.v5 zomer	24	39	4	21	13	2.60
sc.v13 jaar	27	39	2	25	6	2.11
sc.v13 winter	35	36	2	23	4	2.05
sc.v13 zomer	21	42	4	26	7	2.16
sc.z2 jaar	10	47	13	20	9	4.83
sc.z2 winter	19	49	3	20	9	4.94
sc.z2 zomer	1	44	25	20	10	4.72
sc.z5 jaar	12	66	19	1	1	2.98
sc.z5 winter	23	61	14	1	1	2.66
sc.z5 zomer	4	71	23	1	1	3.40
sc.z13 jaar	22	62	12	2	2	3.34
sc.z13 winter	36	50	9	2	2	3.03
sc.z13 zomer	12	71	14	2	2	3.65

De resultaten zullen nu achtereenvolgens voor de verschillende water kwaliteits processen besproken worden.

Chloride

De gemiddelde chloride niveaus zijn afhankelijk van het extra doorspoel debiet dat wordt toegepast. De hoogste niveaus worden gevonden bij afwezigheid van doorspoeling, 337 g Cl/m³ in het Volkerak, en 1111 g Cl/m³ in het Zoommeer. De scenario's 5 en 13 geven ongeveer gelijke resultaten, ca 260 g Cl/m³ voor het Volkerak, en 440 g Cl/m³ voor het Zoommeer. De hoge maxima worden bereikt in de zomer van 1976 als te weinig water voor doorspoeling aanwezig is. Deze maxima variëren ook maar weinig in de verschillende scenario's. Het maximum in het Volkerak ligt in de buurt van 500 g Cl/m³ in alle Volkerak scenario's. Het maximum is 1345 g Cl/m³ voor scenario 2 in het Zoommeer en ca. 930 g Cl/m³ in de andere twee scenario's in het Zoommeer.

Eutrofiering

Biomassa en soorten samenstelling

De biomassa moet hier samen met de soorten samenstelling behandeld

worden, omdat er een nauwe relatie tussen deze grootheden bestaat in de onderhavige berekeningen.

De gemiddelde biomassa niveaus in de berekeningen voor het Volkerak variëren maar weinig. In geen enkel scenario treedt nutriënten limitatie op, afgezien van silicium limitatie.

De iets lagere niveaus in de simulaties met hogere doorspoeling worden veroorzaakt door een toenemende uitspoeling van fytoplankton en een daardoor toenemende groei beperking. De primaire produktie in scenario 5 is ook hoger dan in scenario 2. In scenario 13 is de primaire produktie lager dan in scenario 5, hetgeen veroorzaakt wordt door een toenemende extinktie als gevolg van een andere soorten samenstelling.

De hoogste gemiddelde biomassa in het Zoommeer wordt in scenario 2 gevonden, 4.83 g C/m^3 . In scenario 5 daalt dit gehalte tot 2.98 g C/m^3 , ten gevolge van de toenemende doorspoeling. De verschuiving in de soorten samenstelling naar de soort Aphanizomenon zorgt tevens voor een toename van extinktie en dus een afname van gemiddeld licht niveau. Deze verschuiving is mede verantwoordelijk voor de lagere biomassa in scenario 5. In scenario 13, neemt het relatieve aandeel van Aphanizomenon weer iets af, zodat ook het gemiddelde niveau weer stijgt. De relatieve afname van Aphanizomenon wordt veroorzaakt door de competitie met diatomeeën, die in scenario 13 in het Zoommeer meer kansen hebben door de toegenomen silicium belasting.

Opvallend is de vrijwel volledige afwezigheid van Microcystis in de scenario's 5 en 13 in het Zoommeer. Dit ondanks het feit dat de aanvoer concentratie van Microcystis uit het Volkerak bepaald niet verwaarloosbaar is.

Het zal duidelijk zijn dat de waarde van de berekende verschillen in soorten samenstelling niet erg hard is, het illustreert wel dat in een dergelijk complex systeem een groot aantal factoren aan de uiteindelijke waterkwaliteit bijdraagt.

Nutriënten

Het nutriënten gedrag wordt voornamelijk door het toegepaste doorspoel debiet bepaald en is nauwelijks afhankelijk van de biomassa ontwikkeling. De retentie van fosfor en stikstof neemt duidelijk af met toenemende doorspoeling, vooral de retentie als gevolg van sedimentatie van algen materiaal. De anorganische afvoer processen overheersen in alle gevallen de organische sedimentatie. Dit is een normaal verschijnsel voor een meer met een dergelijke hoge belasting en korte verblijftijd, en kan bijvoorbeeld ook in het Ketelmeer worden gekonstateerd.

Opvallend is vooral in de gemodelleerde grootheden de extreem hoge waarden van zuurstof en pH. Vooral de scenario's voor het Zoommeer geven hoge gemiddelde zuurstof concentraties, tot 13.97 wat op een gemiddelde verzadiging van 126% uitkomt, en maxima tot 22.56 g/m^3 .

7. DISKUSSIE RESULTATEN

In deze sectie zullen de uitkomsten van de model berekeningen kritisch worden beschouwd en vergeleken met de resultaten van andere benaderingen om inzicht te verkrijgen in de resultaten zoals met dit model berekend.

Hierbij zal de discussie zich toespitsen op de relatie nutriënten belasting versus fytoplankton concentratie, omdat dit:

- de meest voor de hand liggende aanpak bij het beheer van de eutrofiering is,
- eveneens de relatie is die in andere benaderingen, weliswaar op een andere manier, wordt gebruikt om de fytoplankton concentratie te voorspellen.

Het effect van nutriënten belasting op de eutrofiering wordt door twee relaties bepaald:

- De relatie tussen nutriënt belasting en nutriënt concentratie.
- De relatie tussen nutriënt concentratie en fytoplankton biomassa.

Omdat over het algemeen meer van fosfor limitatie dan van stikstof limitatie sprake is, zal de discussie zich voor wat betreft de nutriënten op fosfor toespitsen. Dit temeer daar in Nederland en ook internationaal fosfor beschouwd wordt als de sleutel faktor in de aanpak van de eutrofiering.

Tevens zal aandacht worden besteed aan de relatie gemiddeld lichtniveau - biomassa en de relatie bodemflux - biomassa.

7.1 Relatie tussen fosfor belasting en concentratie

Naast de complexe relatie, zoals die gehanteerd is in het onderhavige deterministische model, zijn ook via empirische weg relaties tussen de fosfor belasting en fosfor concentratie gevonden. De bekendste hiervan is wel de Vollenweider relatie. (Vollenweider en Kerekes, 1980).

Daarnaast kan tevens gekeken worden naar de resultaten van berekeningen die kunnen worden uitgevoerd met behulp van de CUWVO relaties (RIZA, 1980).

Resultaten eutrofieringsmodel

De wijze waarop het eutrofieringsmodel de fosfor concentratie in het meer berekent, kan het best worden toegelicht aan de hand van de berekende fluxen. Deze fluxen staan in Tabel 7.1 voor een aantal berekeningen samengevat.

Tabel 7.1

Fosfor fluxen, in een aantal berekeningen met verschillende verblijftijden volgens modelberekeningen.

Fluxen in g P/m²/jaar.

	Volk sc.2		Grev sc.2		Grev sc.13		Zoom sc.13	
verblijftijd	62		1085		69.6		5.6	
Flux								
Fytopl. sed.	1.38	9%	1.18	56%	1.09	10%	.86	1%
Ca-P sed.	1.88	12%	.33	16%	1.63	15%	2.06	3%
Fe-P sed.	3.59	23%	.47	22%	1.43	13%	4.82	6%
Part-P. sed	1.96	12%	.16	8%	1.14	10%	6.77	8%
Uitstroming	7.34	47%	.14	7%	6.05	55%	64.2	84%
Instroming	14.4	91%	.72	35%	9.52	87%	75.0	88%
Bodem flux	1.4	9%	1.37	65%	1.37	13%	1.4	2%

Bij bestudering van Tabel 7.1 valt op dat er grote verschillen zijn in sedimentatie patroon afhankelijk van de verblijftijd en soort belasting. Hoewel de absolute bijdrage van het fytoplankton niet zo verschillend is, is de relatieve bijdrage dit wel. Dit betekent dat de processen die de fosfor concentratie bepalen in het eutrofierings model niet alleen van de verblijftijd of de fytoplankton concentratie afhankelijk zijn, maar van een groot aantal andere factoren.

Er blijkt bovendien een compensatie in fosfor sedimentatie op te treden naarmate de fytoplankton bijdrage relatief groter wordt.

Dit compensatie mechanisme van de sedimentatie processen kan worden gekarakteriseerd met de term: dynamische buffering. Dit betekent dat door een verandering in de intensiteit van een bepaald proces, een ander proces zodanig wordt beïnvloed, dat er geen effect is op een specifieke variabele. In de onderhavige situatie geeft een vermindering in fosfor belasting aanleiding tot een vermindering in anorganische sedimentatie, zodat de hoeveelheid fosfor in fytoplankton konstant blijft.

Vollenweider model

De Vollenweider relatie die het verband beschrijft tussen fosfor belasting en fosfor concentratie luidt:

$$C = \left[\frac{C_q}{1 + \text{SQRT}(t)} \right]$$

De Vollenweider berekeningen zijn gemaakt voor Volkerak en Grevelingen beiden scenario 2 en 13, alsmede voor het IJsselmeer en de Westeinder plassen. Voor deze situaties zijn tevens berekeningen gemaakt met het eutrofieringsmodel, terwijl voor de

laatste twee situaties ook meetgegevens voorhanden zijn om de berekeningen mee te vergelijken.

- In de Vollenweider relatie is de fosfor concentratie enkel afhankelijk van de verblijftijd, er wordt geen onderscheid gemaakt naar de diverse processen die de fosfor concentratie bepalen.
- In het eutrofieringsmodel is de retentie van fosfor afhankelijk van zowel fytoplankton sedimentatie als ook van anorganische sedimentatie.

Hiermee is verklaard dat de modellen geen gelijk lopende respons berekenen bij verschillende verblijftijden en verschillende belasting.

Tabel 7.2

Relatie fosfor belasting, fosfor concentratie.
Eutrofieringsmodel, Vollenweider.

Volkerak, Grevelingen, IJsselmeer(77/78), Westeinder.(77/78)
Totaal fosfaat concentraties (g P/m³).

Omschrijving	Vo sc2	Vo sc13	Gr sc2	Gr sc13	IJsselm	Westeind
Metingen					.272	.285
Eutrof model	.239	.328	.078	.211	.255	.264
Vollenweider	.329	.391	.121	.272	.390	.394

Uit de vergelijking van de verschillende modellen blijkt dat de Vollenweider relatie veel hogere concentraties voorspelt. Voor de twee gevallen dat vergelijking met meetgegevens mogelijk is, blijkt het resultaat van het eutrofierings model het dichtst bij de meetgegevens te liggen.

7.2 Relatie fosfor concentratie chlorofyl concentratie

Alvorens tot een beschouwing van de relatie fosfor concentratie chlorofyl concentratie over te gaan, is het wellicht zinvol nogmaals op te merken dat het eutrofieringsmodel geen chlorofyl modelleert. De berekende fytoplankton biomassa is in eenheden droog gewicht, en wordt gepresenteerd in de vorm van droog gewicht of organisch koolstof.

Voor de vergelijking met meetgegevens bij de kalibratie en de verifikatie, worden wel chlorofyl meetgegevens gebruikt, die daartoe worden omgerekend tot koolstof of droog gewicht. De bij deze omrekening gebruikte konversie faktor wordt afgeleid uit een regressie analyse op meetgevens. Hier zal de bij de IJsselmeer studie gevonden konversie worden toegepast. (C/Chl = 35) Deze konversie faktor is een gemiddelde over het jaar, hetgeen betekent dat afhankelijk van het seizoen nog wel variaties kunnen optreden.

In de Westeinder plassen is een afwijkende C/Chl verhouding gevonden, van ca. 85. Dit betekent dat per eenheid van biomassa relatief weinig chlorofyl aanwezig is. Dit betekent echter ook dat chlorofyl een slechte maat is voor algenbiomassa:

- De lichtuitdoving is niet evenredig met de hoeveelheid chlorofyl, maar vooral afhankelijk van de hoeveelheid biomassa.
- De primaire productie wordt niet bepaald door de hoeveelheid chlorofyl, maar door de hoeveelheid biomassa.
- De effecten van primaire produktie op zuurstof, pH en nutriënten opname worden bepaald door de omzettingen in termen van koolstof in plaats van chlorofyl.

Bovenstaande betekent dat berekeningen in termen van koolstof meer zin hebben dan berekeningen in termen van chlorofyl. De P/Chl relaties zijn, behalve van de C/Chl verhouding, natuurlijk ook afhankelijk van de C/P verhouding. De door het eutrofieringsmodel gebruikte verhoudingen zijn in de systeem definitie van BLOOM II vermeld (Tabel 4.2).

De Vollenweider relatie die het verband tussen gemiddeld fosfor en gemiddeld chlorofyl niveau aangeeft luidt:

$$\text{Chl(av)} = 0.28 * \text{P(av)}^{0.96}$$

In de Vollenweider relatie hebben we enkel te maken met de P/Chl verhouding. Deze verhouding wordt impliciet als konstant aangemerkt.

Voor het berekenen van het maximale zomer chlorofyl met behulp van de CUWVO relaties is het nodig te beschikken over de nutriënten concentraties. De door het eutrofierings model berekende concentraties zijn hiervoor gebruikt. Overigens blijkt uit de gekozen voorbeelden alleen scenario 2 voor de Grevelingen op een fosfor limitatie uit te komen, alle andere voorbeelden uit Tabel 7.3 geven een lichtlimitatie. Wellicht ten overvloede kan nog vermeld worden dat de cijfers van de CUWVO relatie betrekking hebben op zomer gemiddelde waarden, terwijl de andere cijfers op jaargemiddelde waarden betrekking hebben.

Tabel 7.3

Resultaten berekeningen van relatie fosfor concentratie chlorofyl concentratie.

De eutrofieringsmodel resultaten zijn omgerekend met een C/Chl van 35 voor Volkerak, Grevelingen, Zoommeer en IJsselmeer, en met een C/Chl van 85 voor de Westeinder plassen.

Omschrijving	Vo sc2	Vo sc13	Gr sc2	Gr sc13	IJsselm	Westeind
Metingen					91	40
Eutrof model	81	60	76	73	86	49
Vollenweider	73	86	28	61	86	87
CUWVO	78	78	45	75	101	143

Uit Tabel 7.3 blijkt dat de Vollenweider benadering voor het IJsselmeer een goed resultaat geeft, terwijl dit voor de Westeinder te hoog uitkomt. Deze resultaten zijn echter bereikt met fosfor gehalten die te hoog berekend waren.

Wanneer in aanmerking genomen wordt dat:

- het Vollenweider model ervan uitgaat dat de biomassa alleen door fosfor bepaald wordt;
- er in het IJsselmeer van fosfor limitatie geen sprake is, Het gemiddelde ortho fosfaat gehalte is 0.137 g P/m^3 ten opzichte van een totaal fosfaat gehalte van $.272 \text{ g P/m}^3$;
- dat de Vollenweider benadering bij een fout gemiddeld P gehalte een goed chlorofyl gehalte berekend;

Dan moet gekonkludeerd worden dat voor het IJsselmeer en de Westeinder Plassen, de Vollenweider relatie geen betrouwbare resultaten oplevert. Er is dan ook geen enkele reden om te veronderstellen dat voor vergelijkbare meren deze relatie wel betrouwbare resultaten zou geven.

De relatief grote verschillen die in de Vollenweider benadering gevonden worden tussen de hydrologische scenario's, worden veroorzaakt doordat het fosfor gehalte alleen van de verblijftijd afhankelijk is, en het chlorofyl gehalte alleen van het fosfor gehalte.

De grootste afwijkingen tussen het eutrofierings model en het Vollenweider model worden gevonden voor Grevelingen scenario 2. De grote verblijftijd in dit scenario speelt hier vooral een rol in het resultaat van het Vollenweider model.

De CUWVO relaties geven voor de twee Volkerak scenario's gelijke resultaten, omdat alleen het lichtklimaat hier beperkend is. Het eutrofieringsmodel geeft voor deze twee scenario's verschillende resultaten, omdat ook het effect van de korte verblijftijd op de groei van biomassa wordt verdisconteerd, zodat scenario 13 van het Volkerak lager uitkomt. Voor scenario 2 van de Grevelingen geeft het CUWVO model veel lagere gehalten dan het eutrofierings model. De invloed van lage fosfor concentraties in het CUWVO model is veel sterker dan in het eutrofierings model. Een uitgebreide discussie over de betrouwbaarheid van het CUWVO model bij lage fosfor

koncentraties is opgenomen in het rapport over het IJsselmeer onderzoek (de Rooij e.a. 1982). Nu zal worden volstaan met een tweetal opmerkingen:

- Zowel de gegevens van de OECD enquête als die van de CUWVO enquête tonen aan dat met name in het gebied met lage fosfor concentraties de relatie fosfor chlorofyl niet lineair is.
- De CUWVO gegevens in het gebied met lage fosfor concentraties hebben vooral betrekking op diepe meren, zodat de vraag gewettigd lijkt in hoeverre deze gegevens representatief zijn.

Het eutrofierings model hanteert aanmerkelijk meer relaties en is daardoor veel complexer. In dit model is er geen a priori vastgelegd verband tussen de fosfor concentratie en de biomassa concentratie. Integendeel, in de meeste gevallen overheerst licht limitatie, zodat slechts kleine verschillen in biomassa berekend worden, ook al verschillen de fosfor concentraties aanmerkelijk.

7.3 Relatie licht niveau chlorofyl concentratie

Afgezien van de silicium limitaties, is er in de verschillende berekeningen vooral sprake van licht limitatie. Alleen in de scenario's met lange verblijftijd in de Grevelingen is van nutriënten limitatie sprake.

Dit betekent dat alle grootheden die met licht te maken hebben een essentiële rol spelen in de berekening. De grootheden die het lichtklimaat bepalen zijn:

- De achtergrond extinktie. De invloed van deze grootheid blijkt duidelijk uit de verschillen die gevonden worden indien bij het gevoeligheids onderzoek de achtergrond extinktie wordt veranderd.
- De gemiddelde diepte. (in feite is het produkt van achtergrond extinktie en diepte bepalend.) De gevolgen van verschillen in diepte blijken duidelijk uit de verschillen tussen de berekeningen van het Volkerak en Grevelingen aan de ene kant, met een diepte van resp. 5.2 en 5.4 meter, en het Zoommeer aan de andere kant, met een diepte van 3.5 meter. Ondanks de handicap van de korte verblijftijd, worden in het Zoommeer de hoogste biomassa concentraties gevonden.

Het drastische effect van verandering van de achtergrond extinktie wordt het duidelijkst geïllustreerd bij vergelijking van de Grevelingen scenario's BB en 6B, met achtergrond extinkties van 1.6 en 1.1 /m respectievelijk, en biomassa's van 1.24 en 3.09 g C/m³.

7.4 De nutriënten flux vanuit de bodem.

De nutriënten flux vanuit de bodem wordt niet door het model zelf berekend, maar in de model invoer opgelgd. Deze flux is voor fosfor

vastgesteld op 40 % van de in de IJsselmeer studie gevonden flux, die met behulp van porien water gegevens, sediment samenstelling en kalibratie is bepaald. De 40 % is gekozen omdat de externe belasting veelal geringer is dan die van het IJsselmeer. In de gevallen dat de externe belasting gelijk of hoger is dan die van het IJsselmeer, betekent dit dat de bodem belasting mogelijkerwijs te laag is gespecificeerd. Op de biomassa niveau's heeft dit echter nauwelijks effect, omdat in die scenario's alleen licht limitaties voorkomen. Onderzocht is wat het effect is van een verlaging van de fosfor bodemflux van $1.37 \text{ g/m}^2/\text{jaar}$ tot $.55 \text{ g/m}^2/\text{jaar}$. Hierbij dient te worden bedacht dat de huidige fosfor flux in de zoute Grevelingen aanmerkelijk hoger is (Kelderman 1982). De effecten van deze verlaging zijn zelfs in de scenario's met langere verblijftijd niet opmerkelijk.

REFERENTIES

Bannink, B.A., J.H.M. van der Meulen, J.C.H. Peeters, and J.C. van der Vlugt, Hydrobiological consequences of the addition of phosphate precipitants to the inlet water of lakes, Hydrobiological Bullitin, Vol. 14, No. 1/2, 1980, pp. 73-89.

Bigelow, J.H., J.G. Bolten, and J.C. De Haven; Protecting an Estuary from Floods--A Policy Analysis of the Oosterschelde: Vol. IV, Assessment of Algae Blooms, A potential Ecological Disturbance, The Rand Corporation, R-2121/4-NETH, April 1977.

Clasen, R.J.; The numerical solution to the chemical equilibrium problem, Rand Corporation RM-4345, 1965.

Eck, G.Th.M. van.; Enige opmerkingen aangaande de achtergrondextinctie op het toekomstige Volkerakmeer, Zoommeer en (mogelijk) Zoet Grevelingenmeer. RWS, Deltadienst, Hoofdafdeling Milieu en Inrichting, Middelburg, notitie DDMI-81.231, 1981.

Eppley, R.W.; Temperature and Phytoplankton Growth in the Sea, Fisheries Bulletin, Vol. 70, 1972, pp. 1063-1085.

Harris, G.P.; Photosynthesis, Productivity and Growth: The Physiological Ecology of Phytoplankton, Arch. Hydrobiol. Ergebn. Limnol., Vol. 10, No. I-IV, 1978, pp. 1-171.

Kelderman, P.; Bodem - water uitwisseling in de Grevelingen, tweede interimrapport ZOWEC IV, Delta Instituut voor Hydrobiologisch onderzoek, Ierseke, 1982.

Los, F.J.; Mathematical Simulation of Algae Blooms by the Model BLOOM II, Delft Hydraulics Laboratory, R1310-7, 1982 (in press).

Los, F.J., N.M. de Rooij, J.G.C. Smits, and J.H. Bigelow; Policy Analysis of Water Management for the Netherlands: VOL. VI, Design of Eutrophication Control Strategies, Rand Corp. and Delft Hydraulics Laboratory, N-1500/6-NETH, February 1982.

Meulen, J.H.M. van der; Verwachtingswaarden voor chlorofyl en doorzicht in een zoet Grevelingenmeer bij verschillende beheers- en inrichtingsvarianten RWS, Deltadienst, Hoofdafdeling Milieu en inrichting, Middelburg, notitie DDMI-81.314, 1981.

Megard, R.O., J.C. Settles, H.A. Boyer, and W.S. Combs, Jr.; Light, Secchi disks, and trophic states, Limnol. Oceanogr., Vol. 25, No. 2, 1980, pp. 373-377.

Pagee, J.A. van; Natuurlijke beluchting van open water ten gevolge van wind, Waterloopkundig Laboratorium Delft R1318-II, 1978.

RIZA; Ontwikkeling van grenswaarden voor doorzicht, chlorofyl, fosfaat en stikstof. Resultaten van de eutrofieringsenquête, coördinatiecommissie uitvoering wet verontreiniging oppervlaktewateren (CUWVO), werkgroep VI, 1980.

Rooij, N.M. de; A chemical model to describe nutrient dynamics in lakes, In: J. Barrica and L.R. Mur (eds.), Hypertrophic Ecosystems, Junk Publishers, 1980.

Rooij, N.M. de, Smits, J.G.C., Los, F.J., Stans, J.C., Groot, B. de, Klomp, R.; Waterkwaliteitsmodel IJsselmeer, onderzoek naar de invloed van een aantal mogelijke beheersmaatregelen op de eutrofiering van het IJsselmeer, Waterloopkundig Laboratorium, Verslag onderzoek R1552, juni 1982.

Rooij, N.M. de; Mathematical Simulation of bio-chemical processes in natural waters by the model CHARON, Delft Hydraulics Laboratory, R1310-10, 1982 (in voorbereiding).

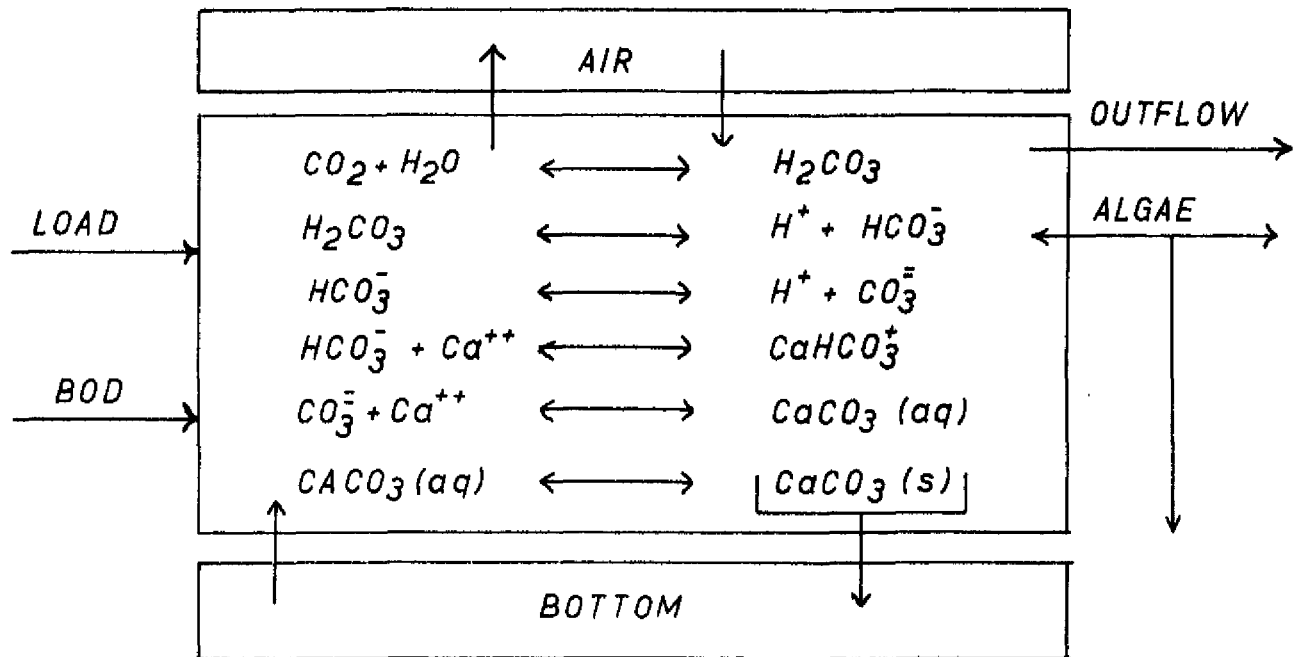
Shapley, M., Cutler, L., De Haven, J.C., Shapiro, N.; Specifications for a new jacobian package for the Rand chemical equilibrium problems, Rand Corporation RM-5426-PR, 1969.

Smits, J.G.C.; Microbial decomposition of organic matter and nutrient regeneration in natural waters and sediments, Report on literature study, Delft Hydraulics Laboratory R1310-5, 1980.

Stans, J.C.; Waterkwaliteitsmodel Hollands Diep/Haringvliet, Voorspelling toekomstige waterkwaliteit bij het meetpunt H9. Waterloopkundig Laboratorium, Verslag onderzoek R1656, september 1981.

Vollenweider, R.A. and J.J. Kerekes; Synthesis report. Cooperative programme on monitoring of inland waters (Eutrophication Control). Report prepared on behalf of technical bureau, water management sector group, Organization of Economic Cooperation and Development (OECD), Paris, 1980.

CARBON MODELLING

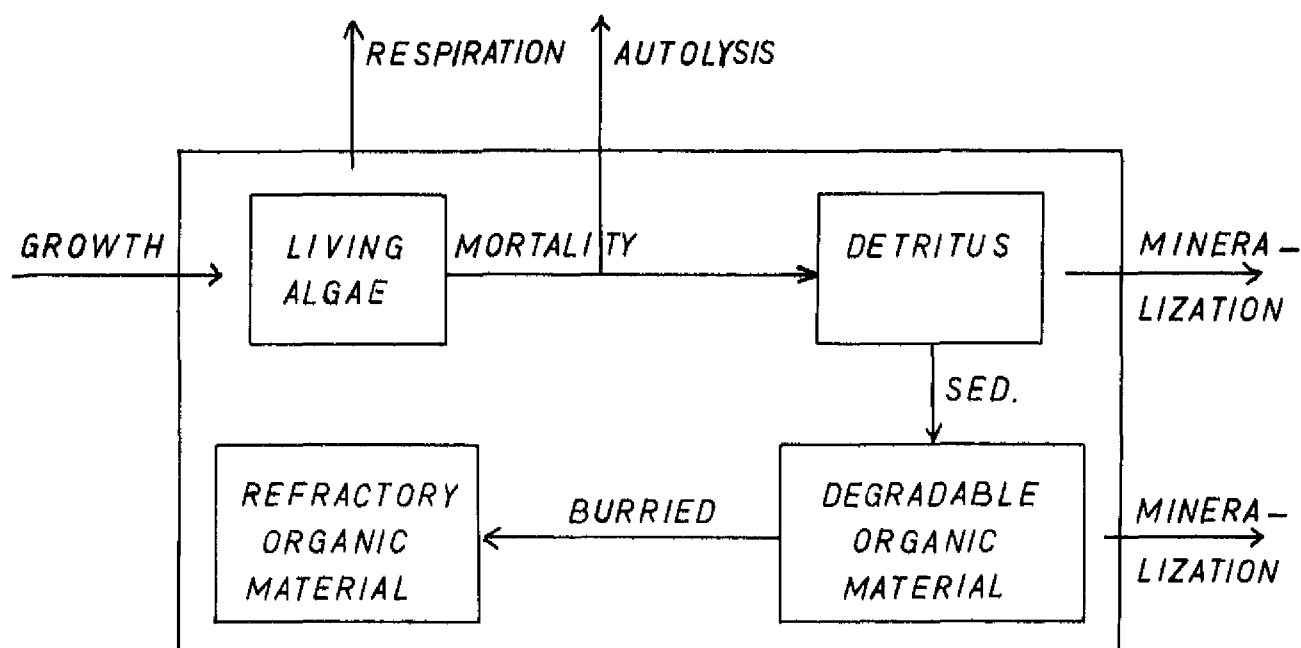


Schematisering C modellering. De dubbele pijlen in het middelste vierkant stellen evenwichtsreacties voor, de pijlen die het middelste vierkant in- of uitgaan, zijn niet evenwichtsprocessen

Fig. 3.2

A4

ALGAE COMPARTMENTS

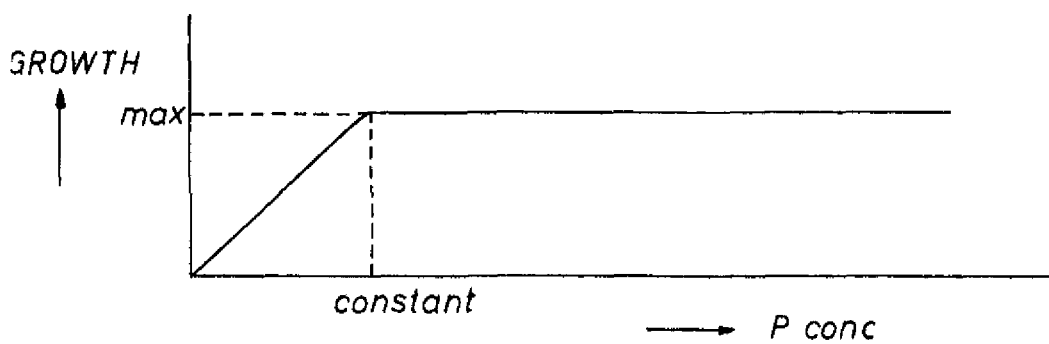
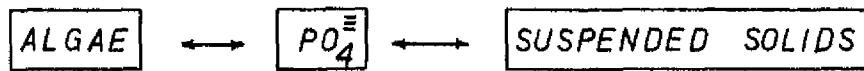


Fytoplankton modellering
De grootte van P_g-R (groei-respiratie) wordt door BLOOM II geleverd, de overige processen worden door het fytoplankton moduul berekend.

Fig. 3.3

A4

'FIGHT' FOR PHOSPHORUS

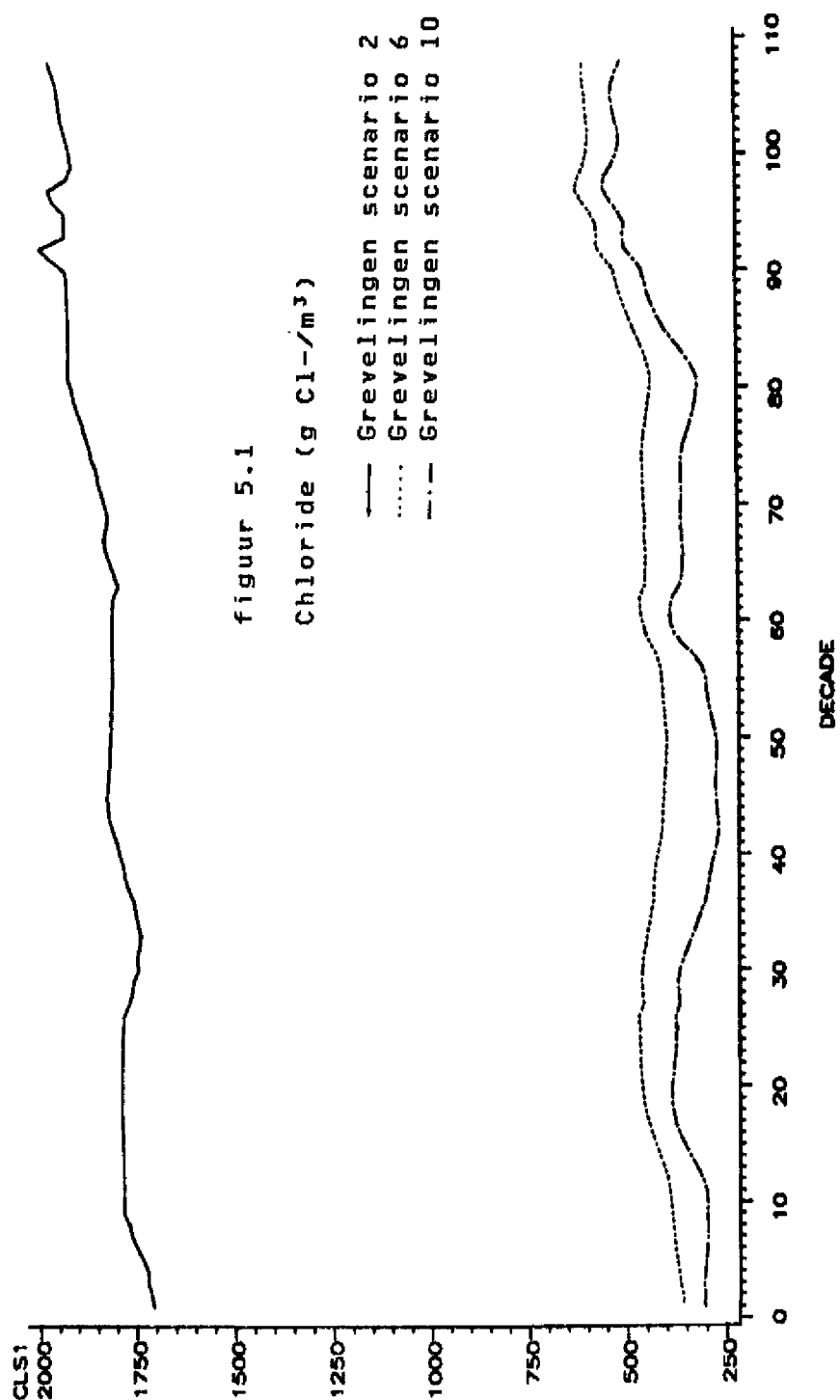


$$GROWTH = \text{MINIMUM} \left(\frac{P \text{ conc.}}{\text{constant}}, 1 \right) \times \text{MAXIMUM GROWTH}$$

Afhankelijkheid van P_g (bruto groei) van fosfor
 concentratie

Fig. 3.4

A4

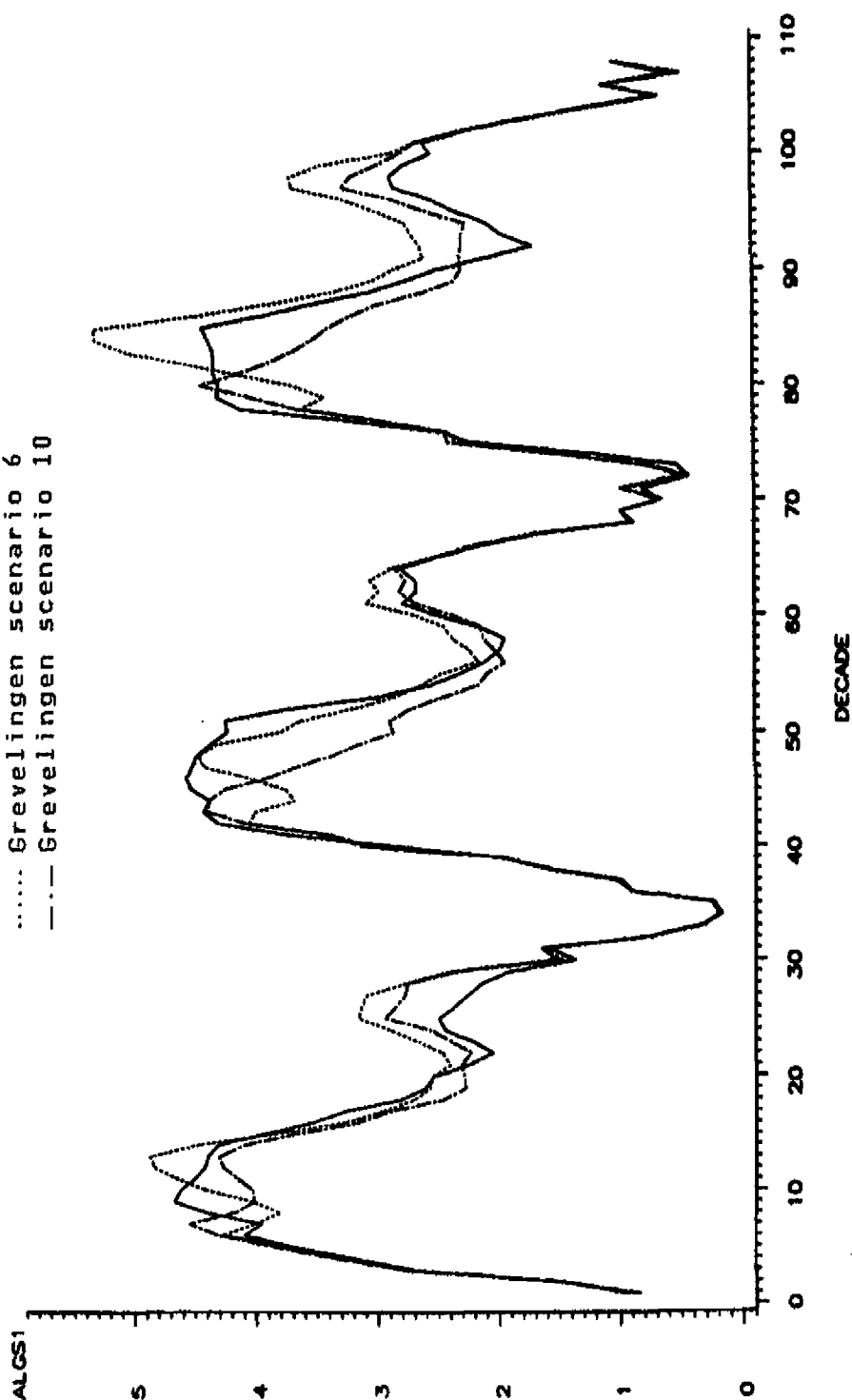


figuur 5.1

figuur 5.2

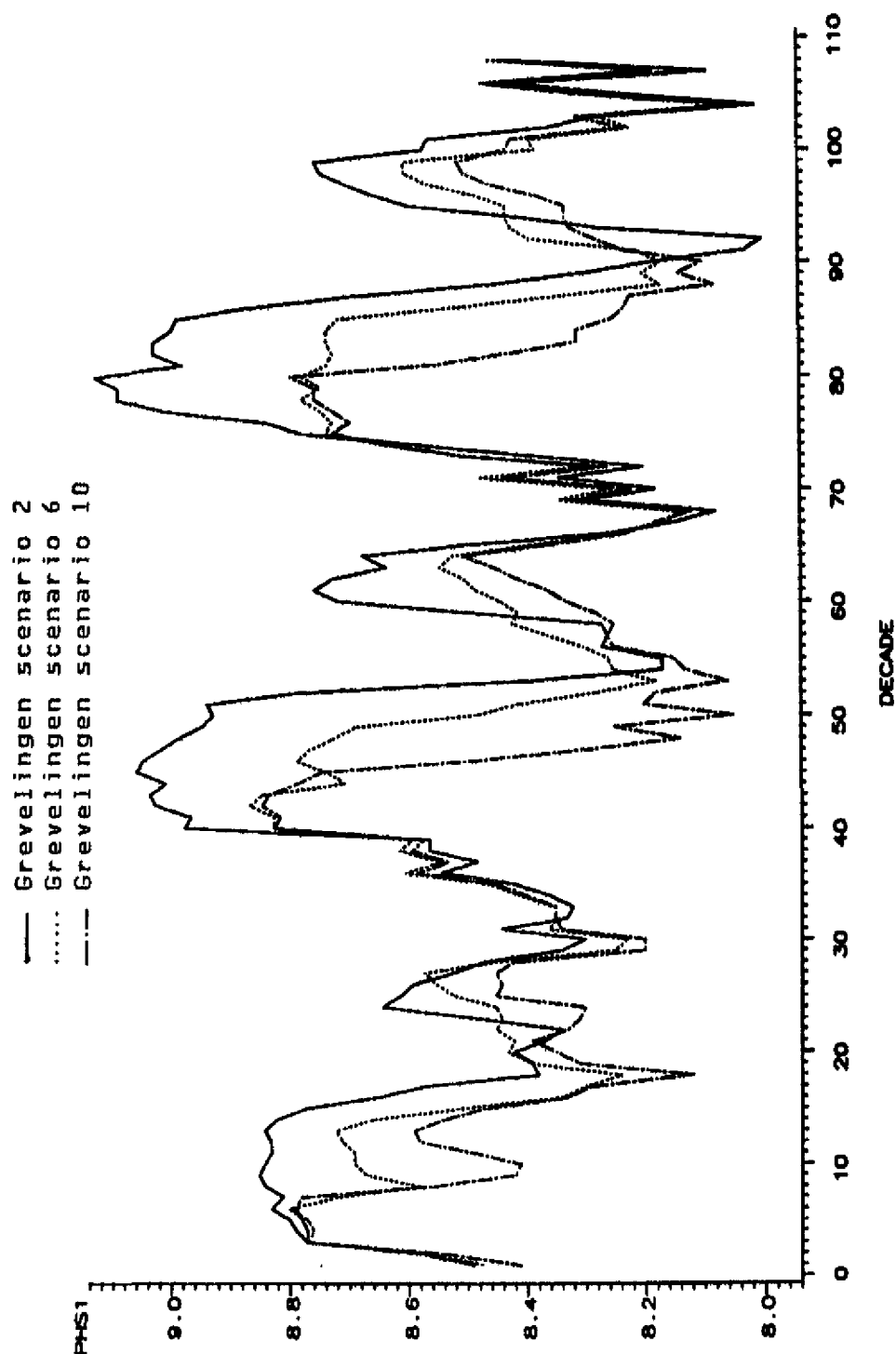
Fytoplankton (g C/m³)

- Gravelingen scenario 2
- Gravelingen scenario 6
- Gravelingen scenario 10



figuur 5.3

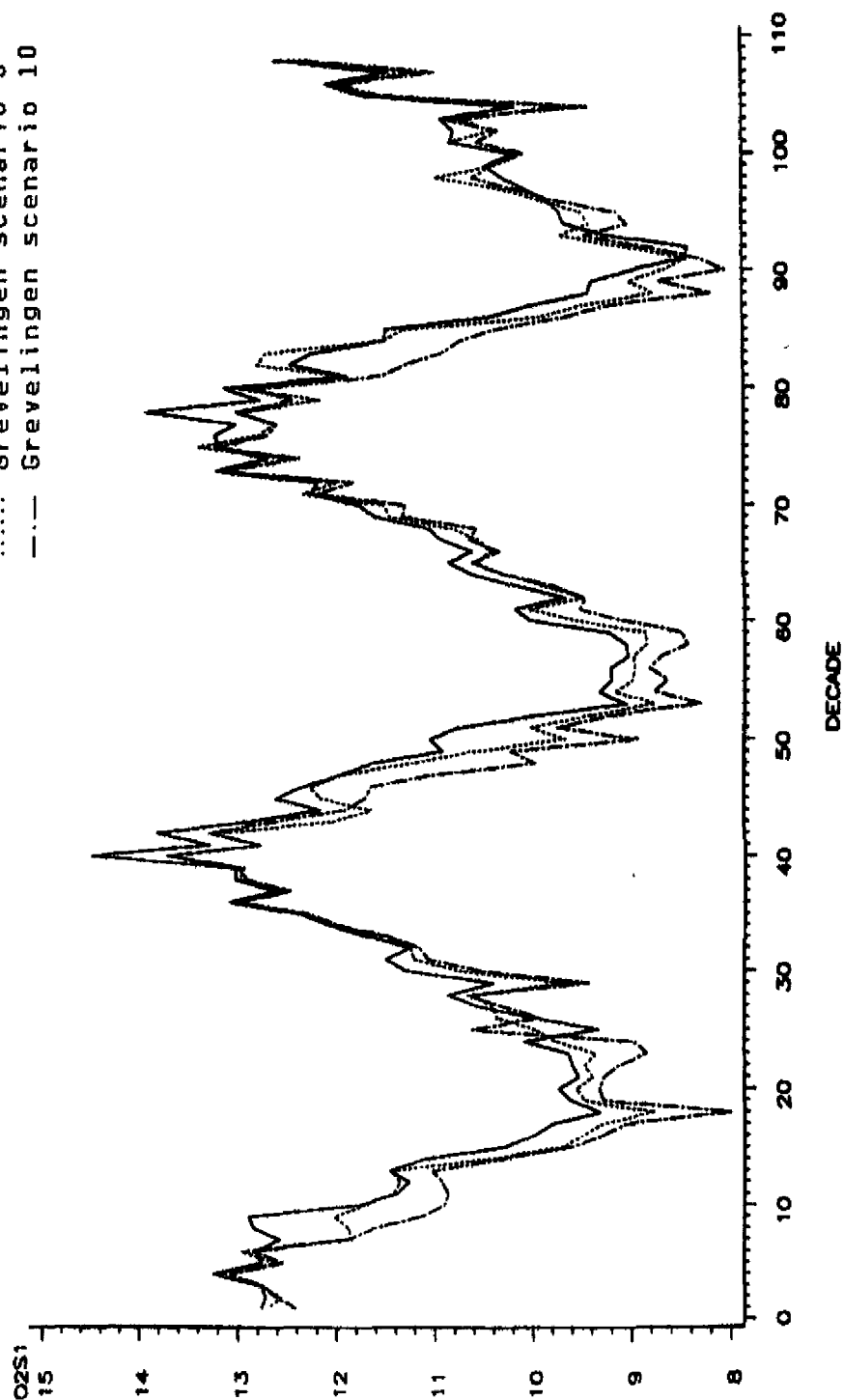
pH



figuur 5.4

Zuurstof ($\text{g O}_2/\text{m}^3$)

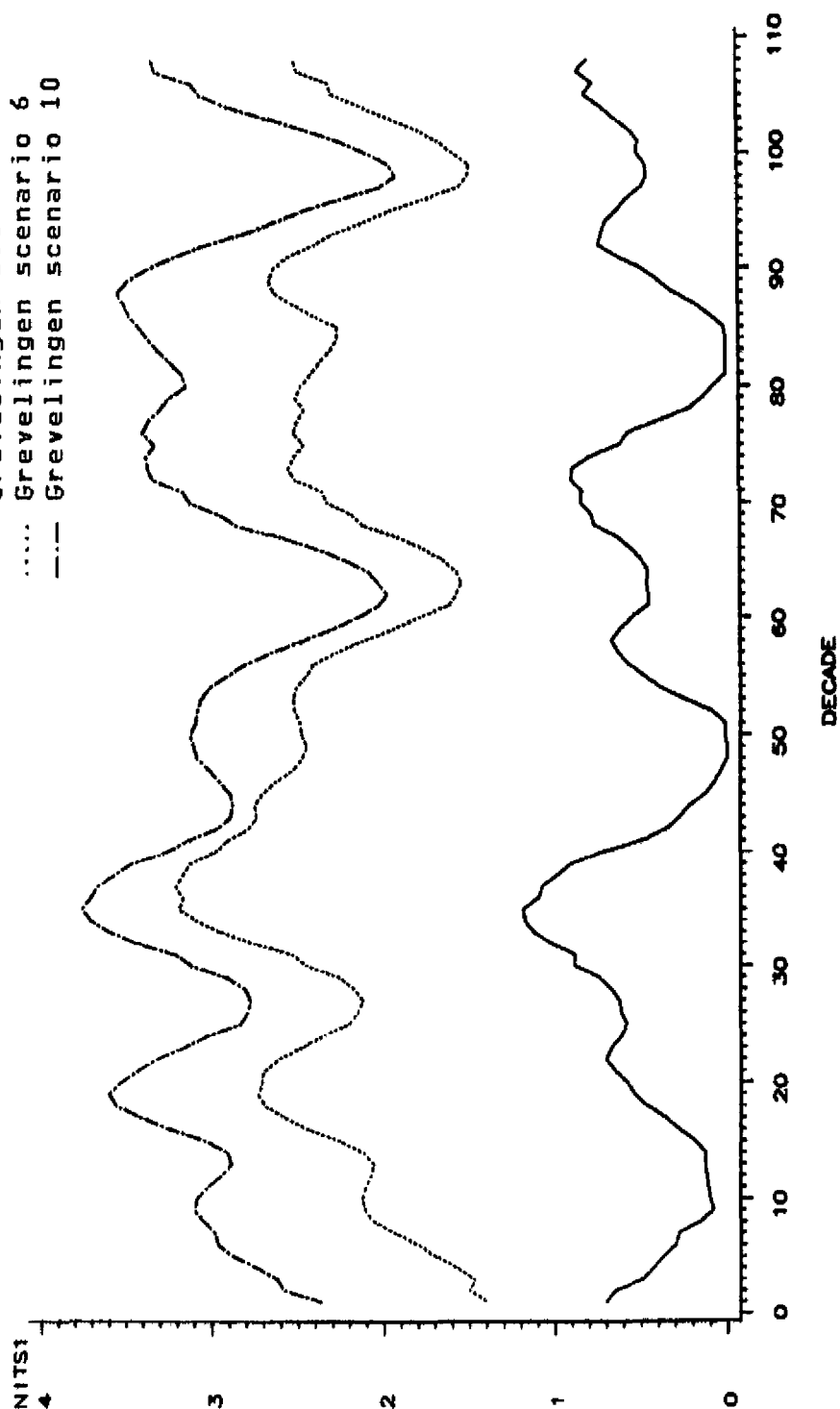
- Grevelingen scenario 2
- Grevelingen scenario 6
- Grevelingen scenario 10



figuur 5.5

Nitraat (g N/m³)

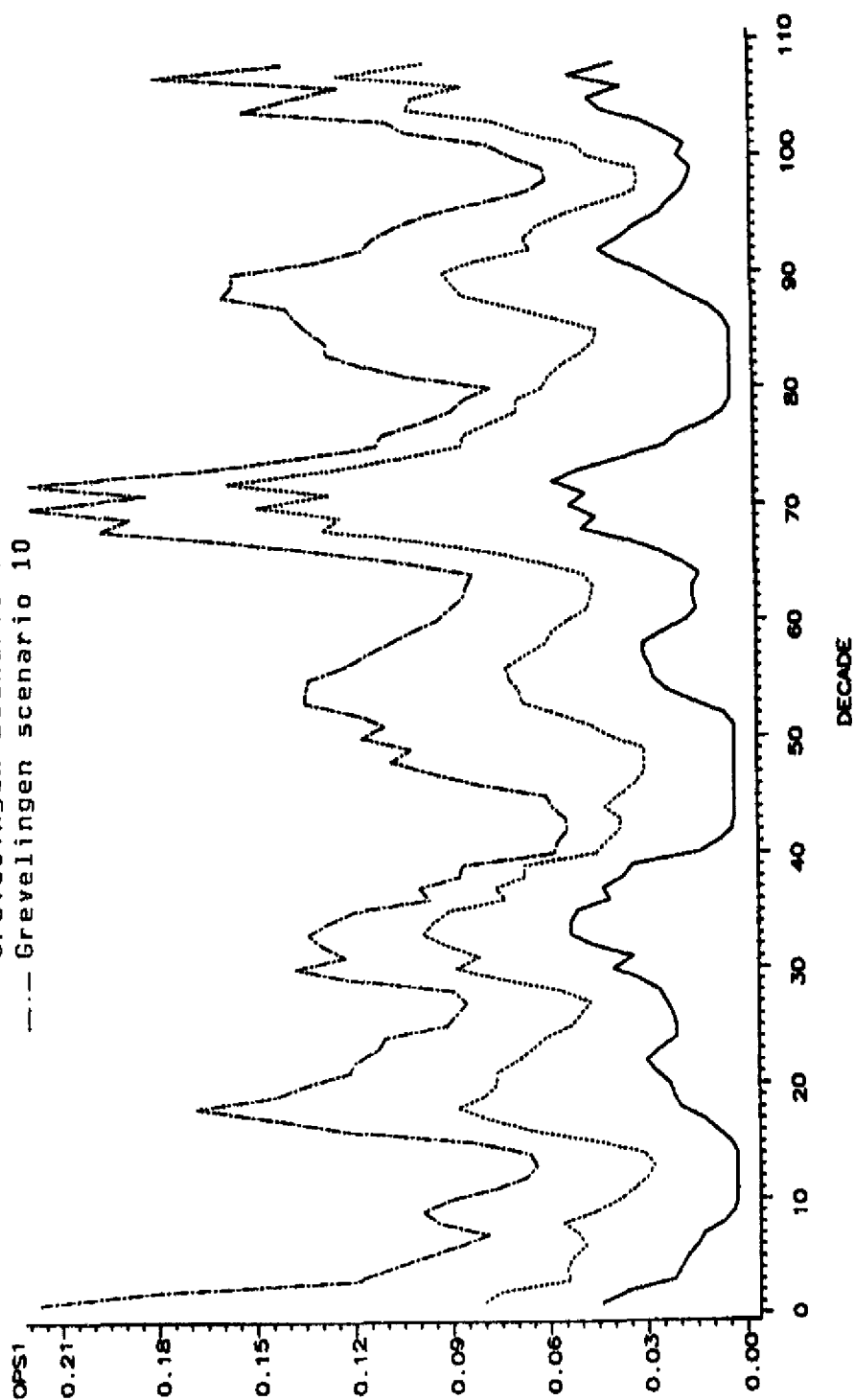
- Grevelingen scenario 2
- Grevelingen scenario 6
- Grevelingen scenario 10



figuur 5.6

Ortho fosfaat (g P/m³)

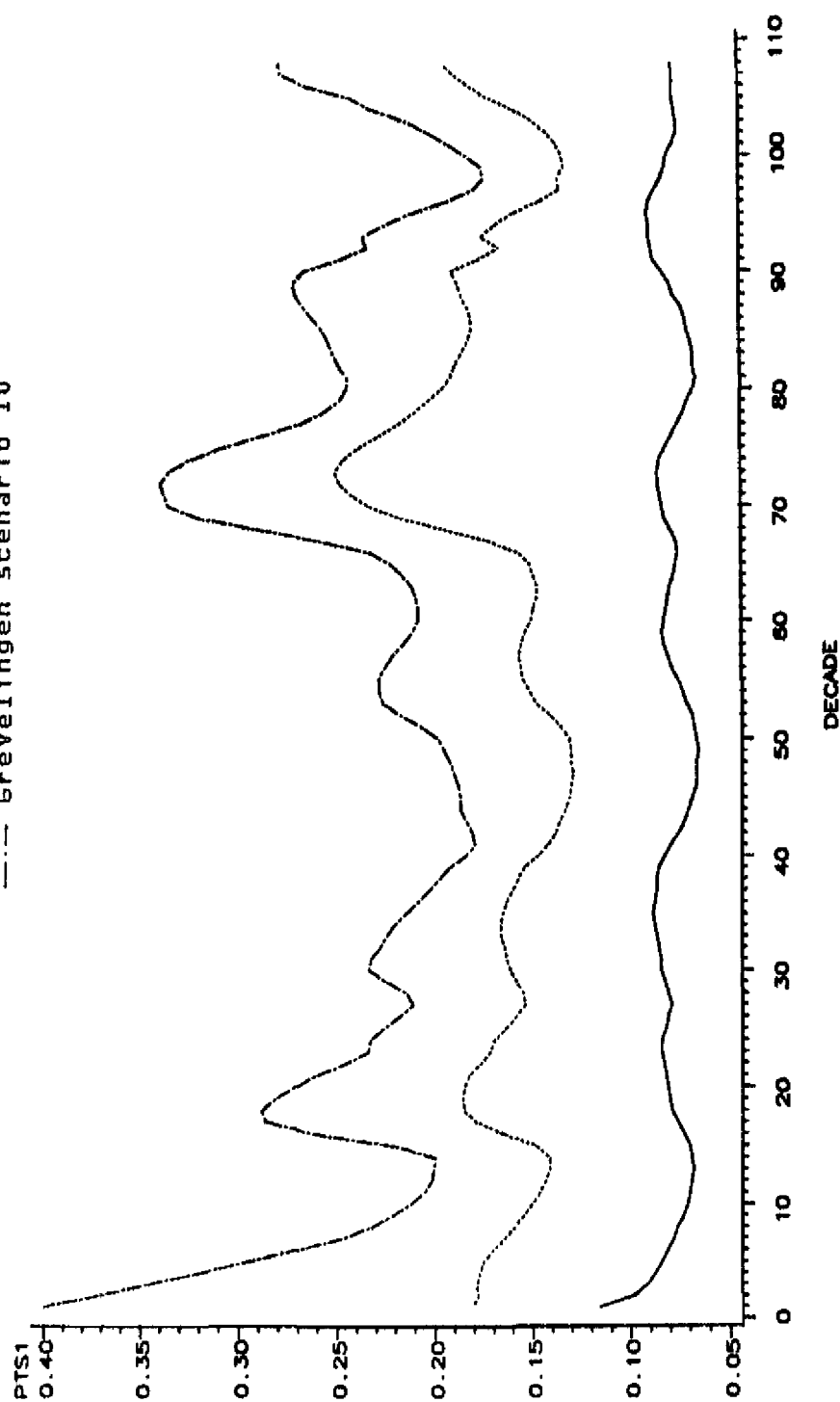
- Grevelingen scenario 2
- Grevelingen scenario 6
- Grevelingen scenario 10



figuur 5.7

Totaal fosfaat (g P/m³)

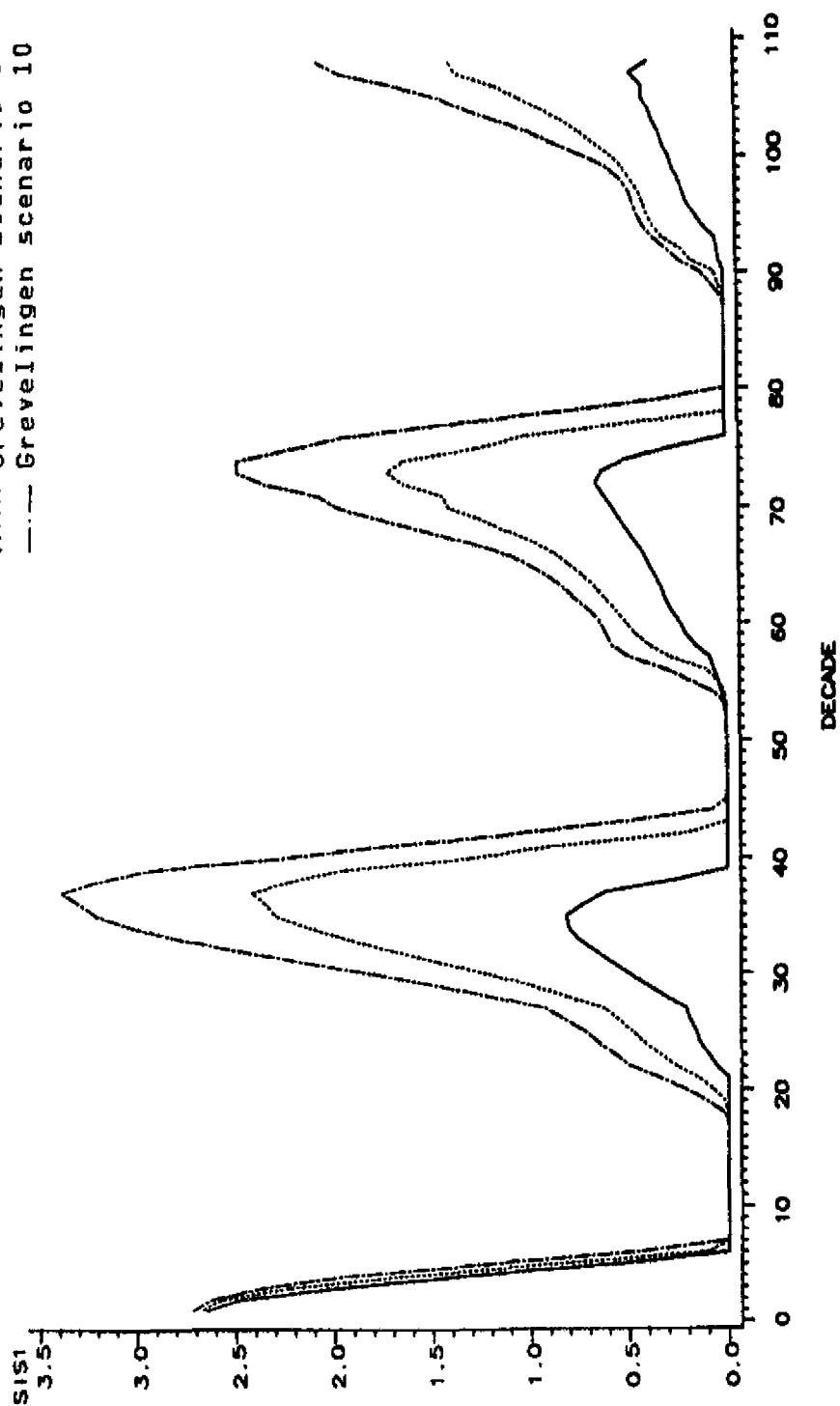
- Grevelingen scenario 2
- Grevelingen scenario 6
- Grevelingen scenario 10



figuur 5.8

Opgelost Silicium (g Si/m³)

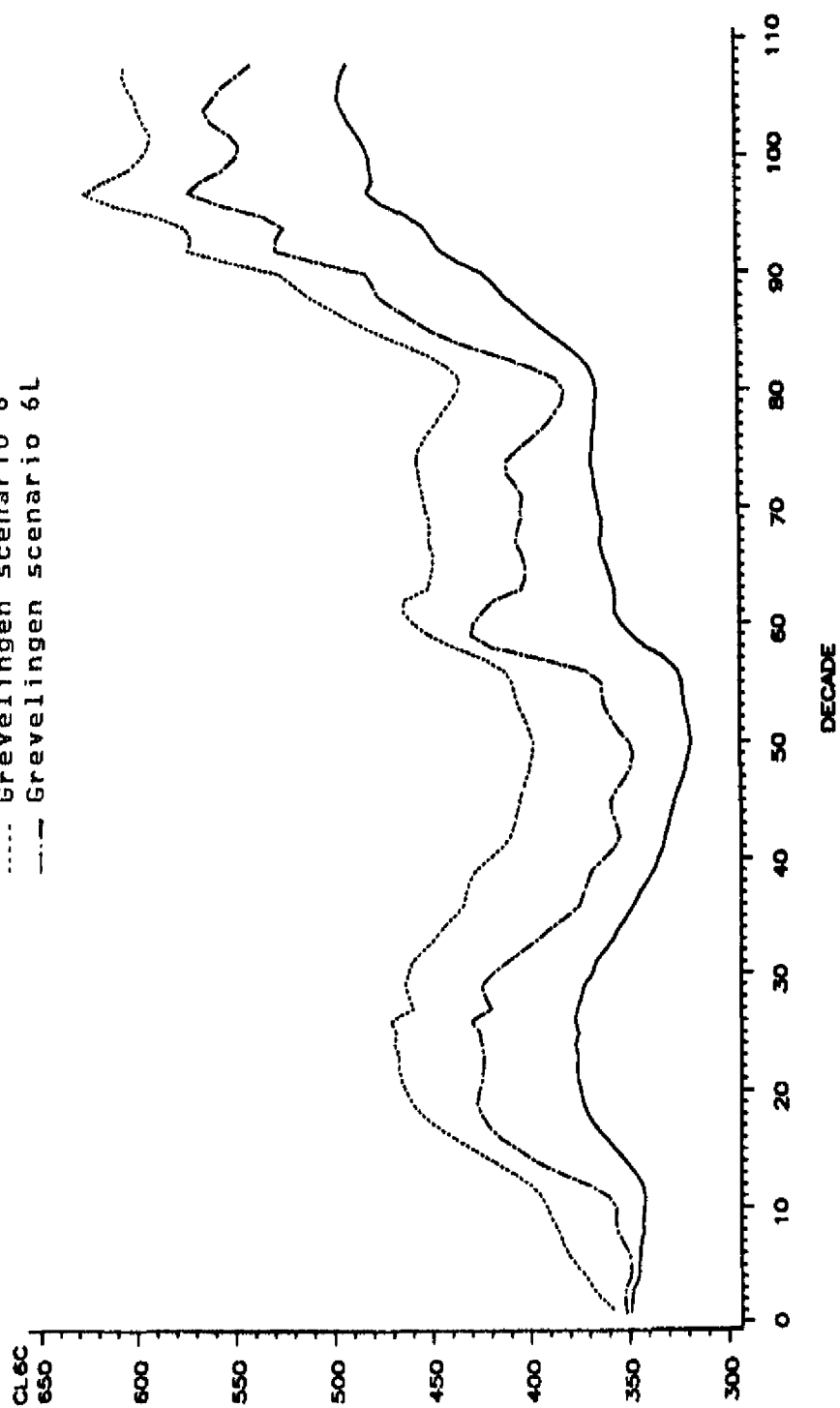
- Grevelingen scenario 2
- Grevelingen scenario 6
- Grevelingen scenario 10



figuur 5.9

Chloride (g Cl-/m³)

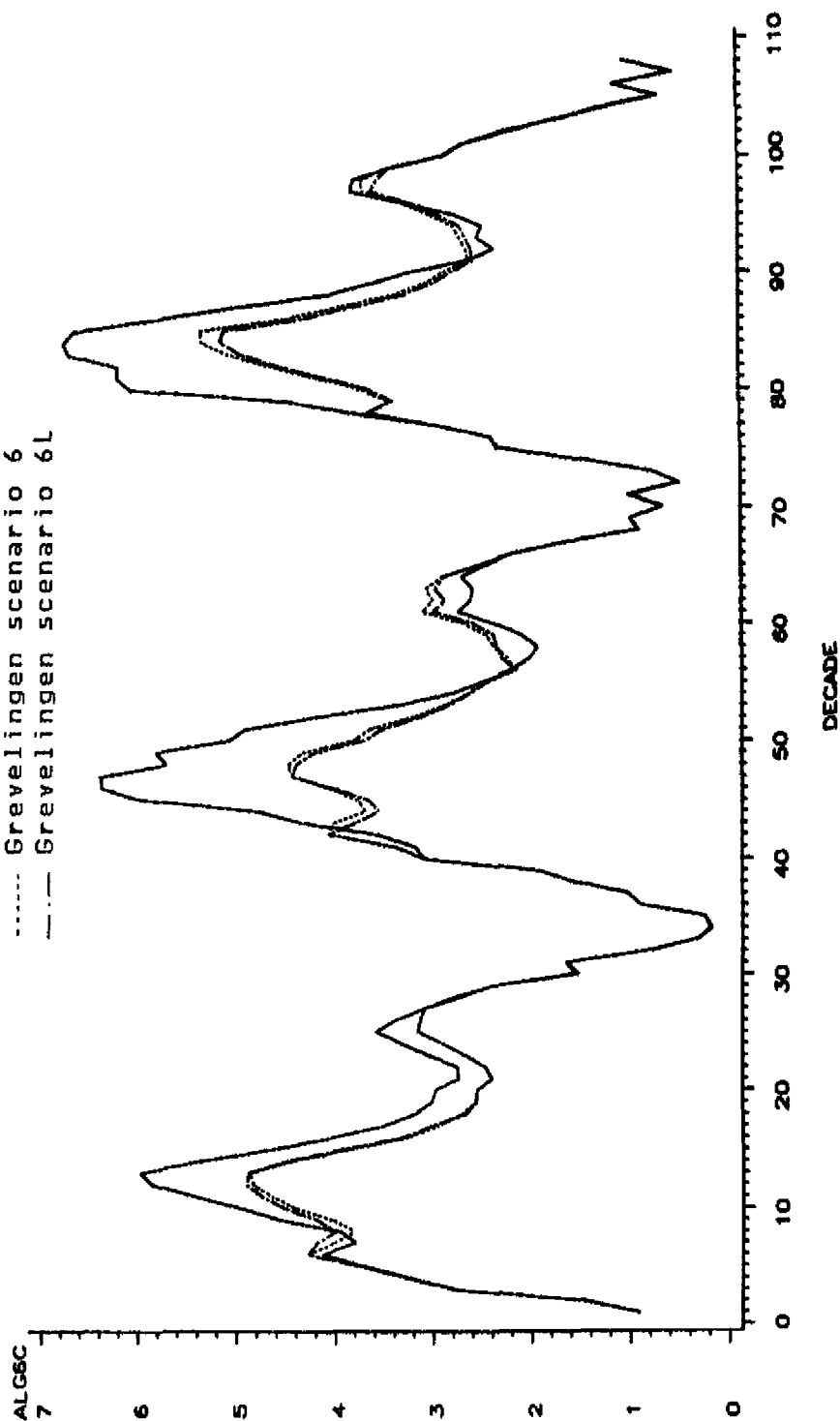
- Grevelingen scenario 6C
- Grevelingen scenario 6
- - - Grevelingen scenario 6L



figuur 5.10

Fytoplankton (g C/m³)

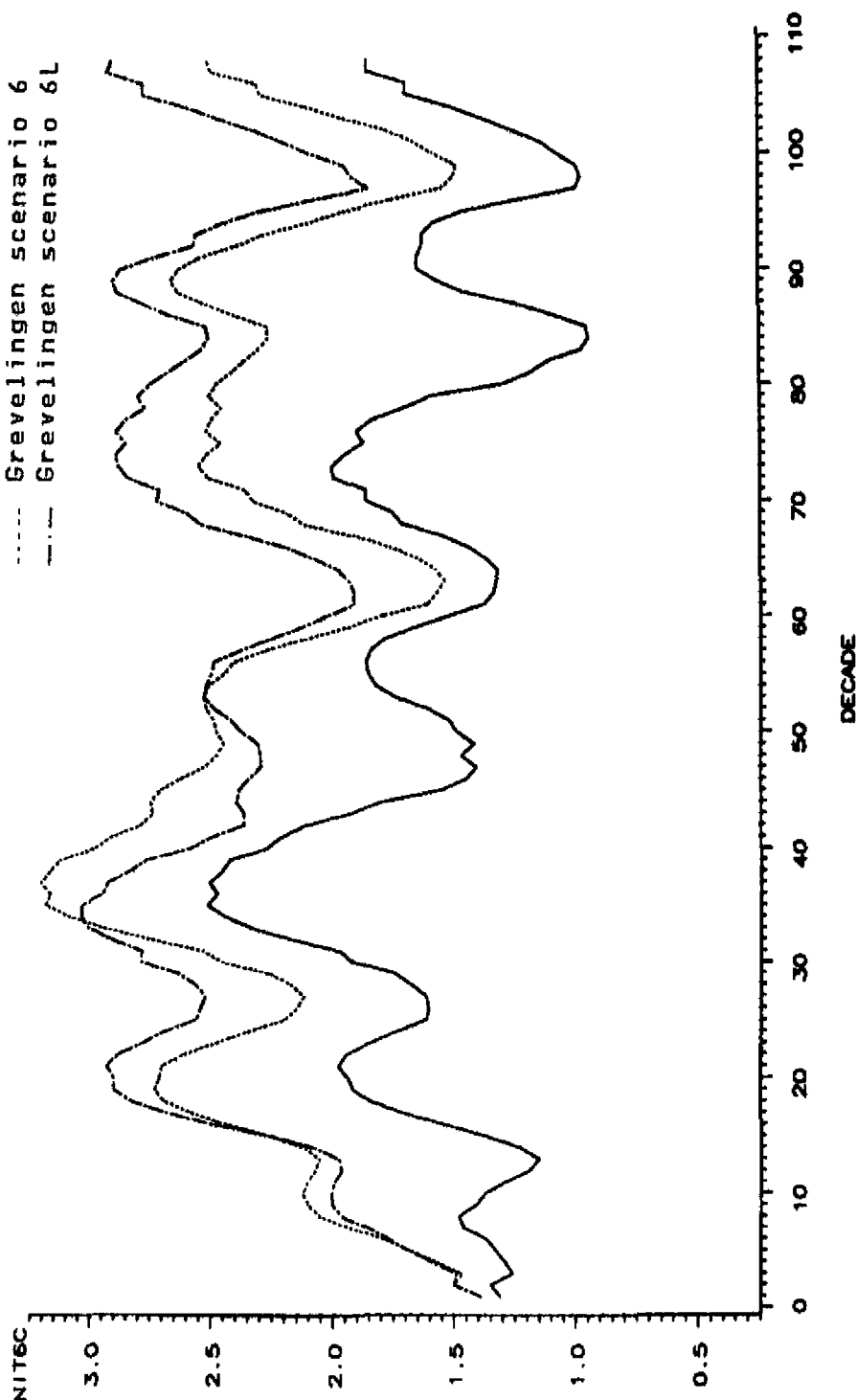
- Grevelingen scenario 6C
- Grevelingen scenario 6
- Grevelingen scenario 6L



figuur 5.11

Nitraat (g N/m³)

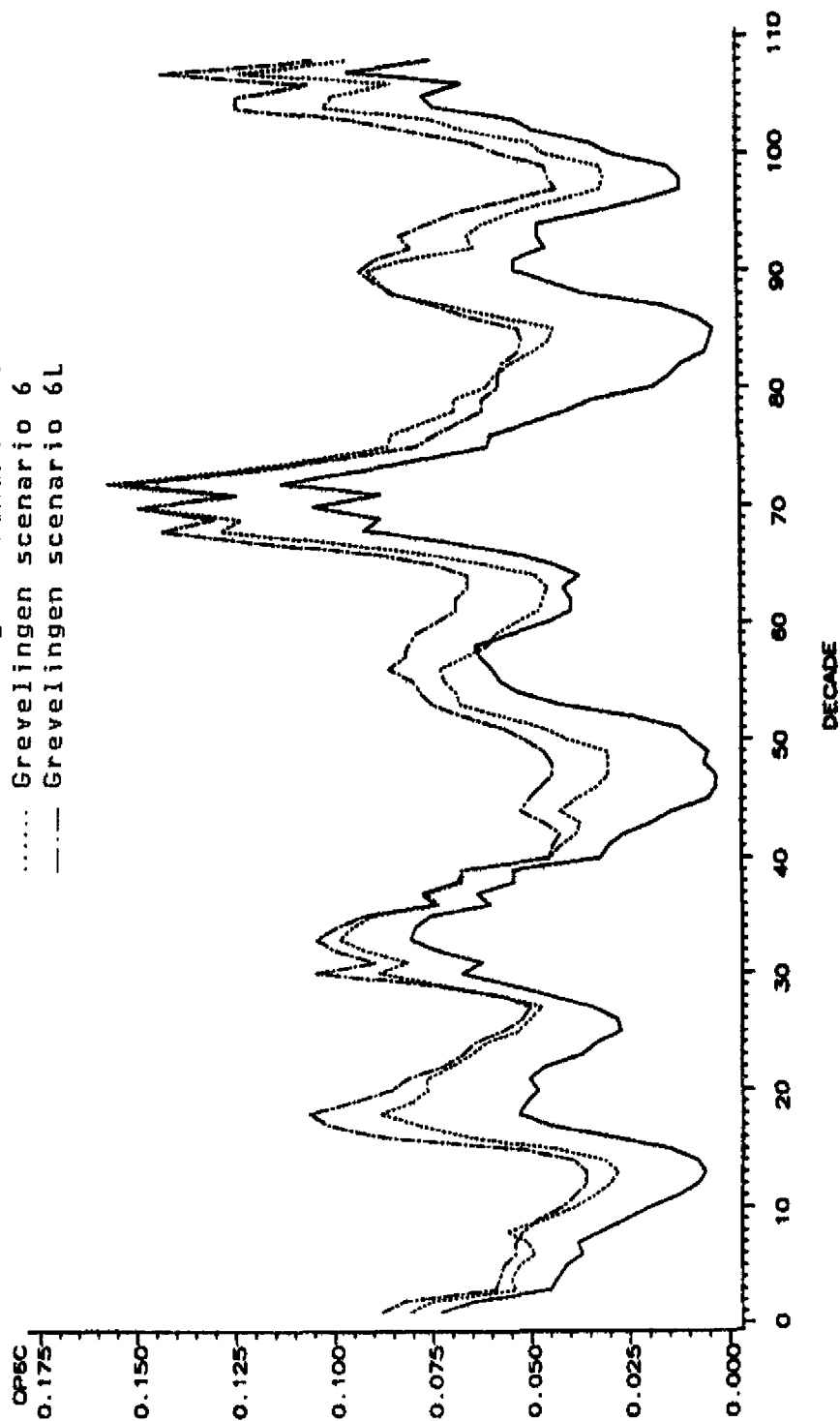
- Grevelingen scenario 6C
- Grevelingen scenario 6
- - - Grevelingen scenario 6L



figuur 5.12

Ortho fosfaat (g P/m³)

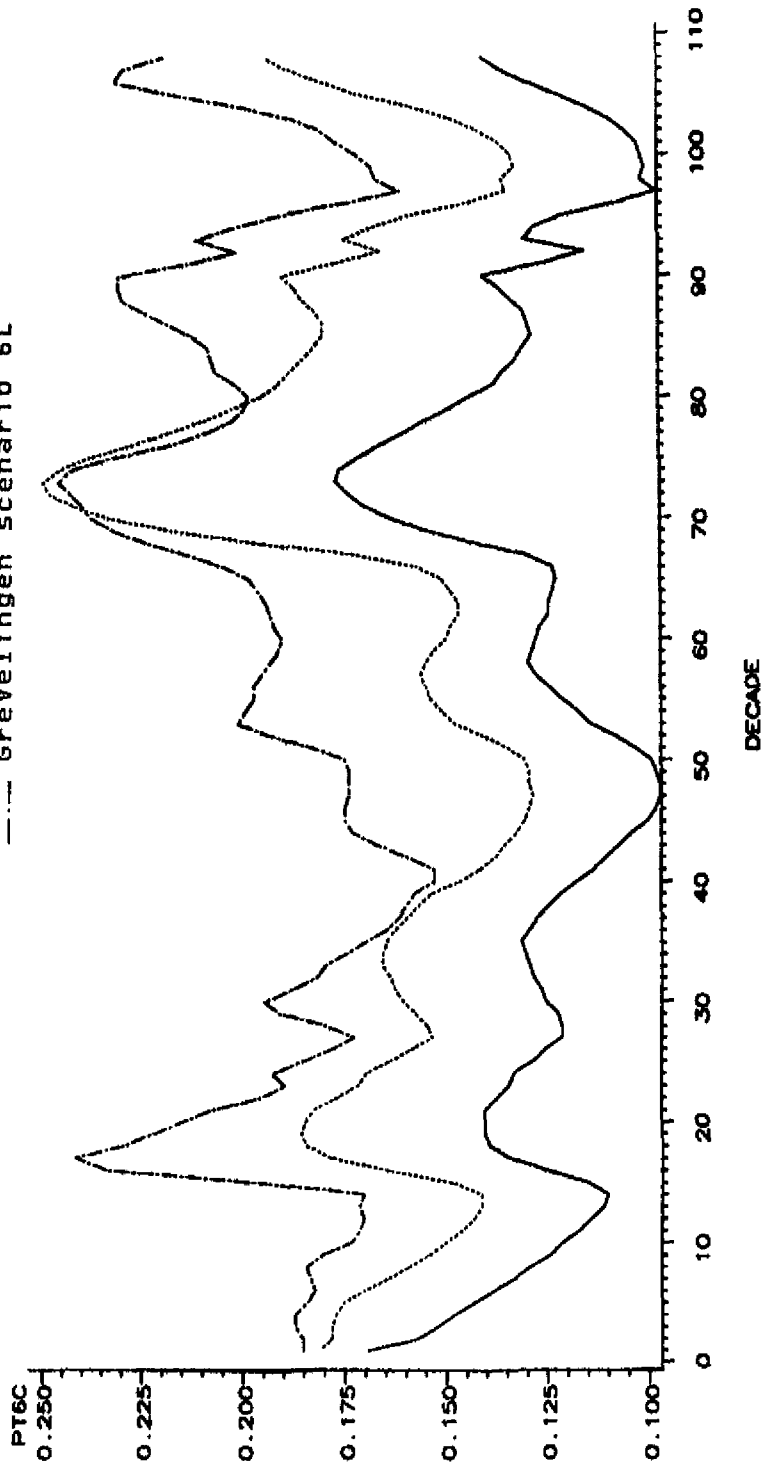
- Grevelingen scenario 6C
- Grevelingen scenario 6
- Grevelingen scenario 6L



figuur 5.13

Totaal fosfaat (g P/m³)

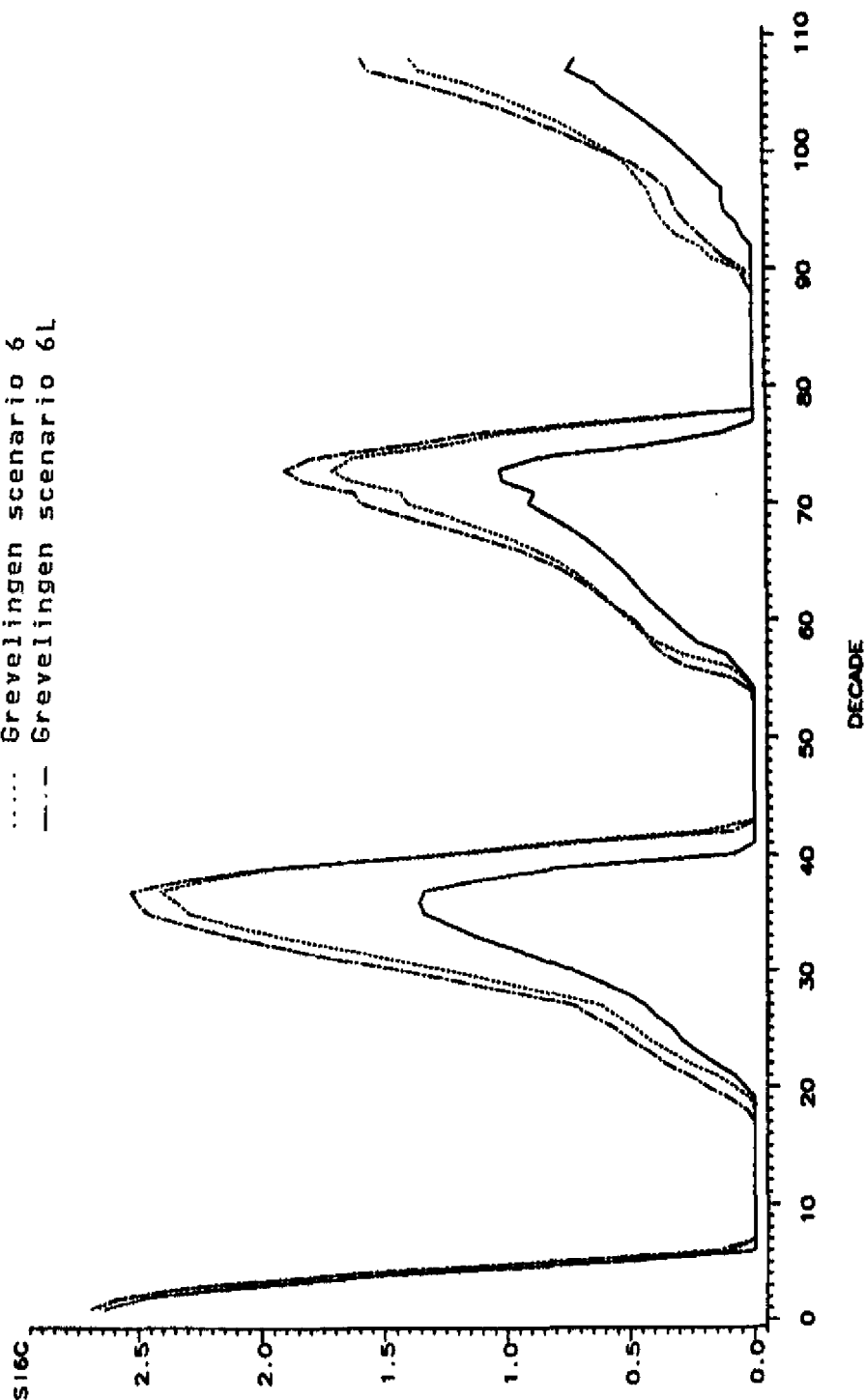
- Grevelingen scenario 6C
- Grevelingen scenario 6
- Grevelingen scenario 6L



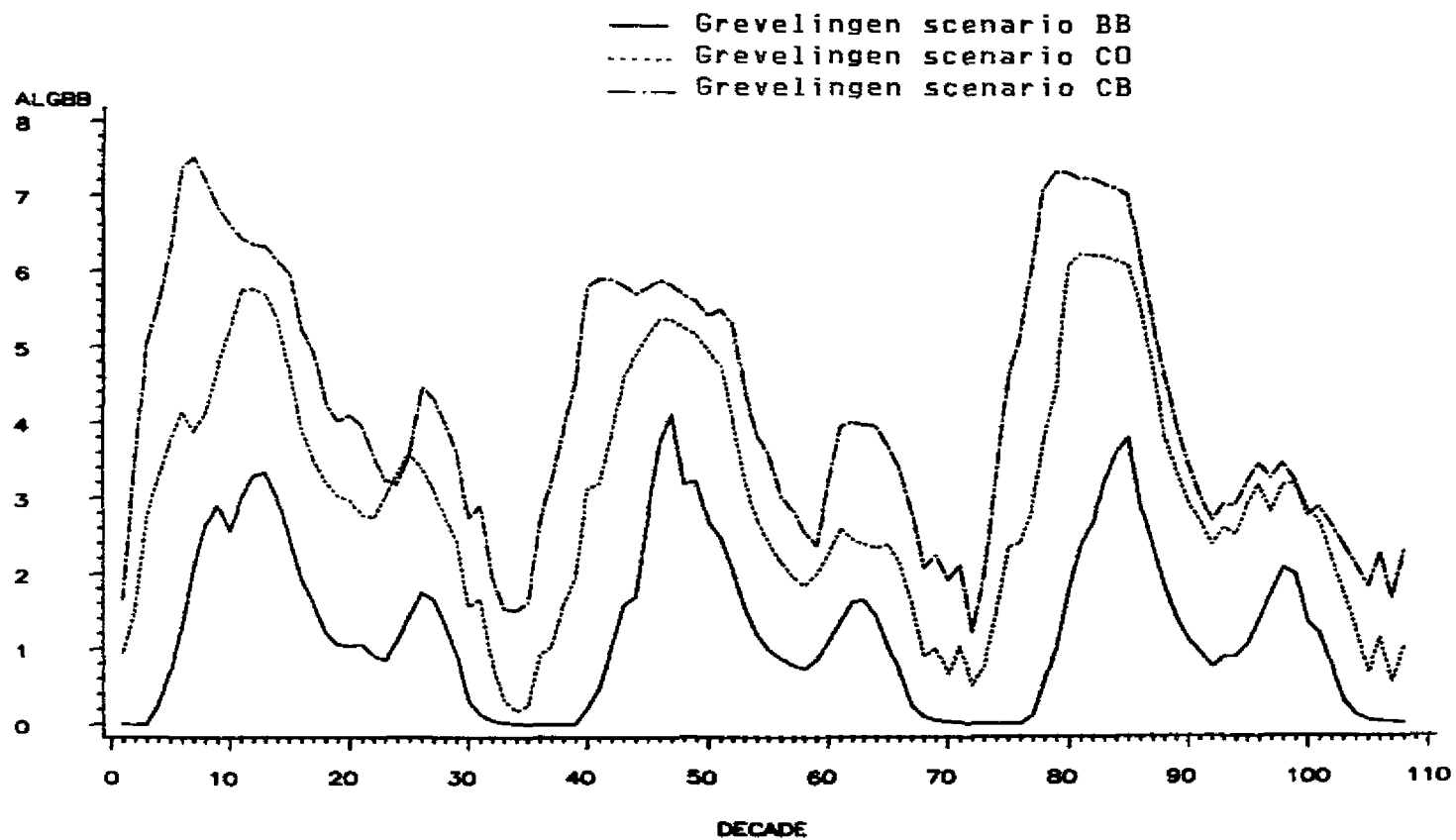
figuur 5.14

Opgelost Silicium (g Si/m^3)

- Grevelingen scenario 6C
- Grevelingen scenario 6
- Grevelingen scenario 6L



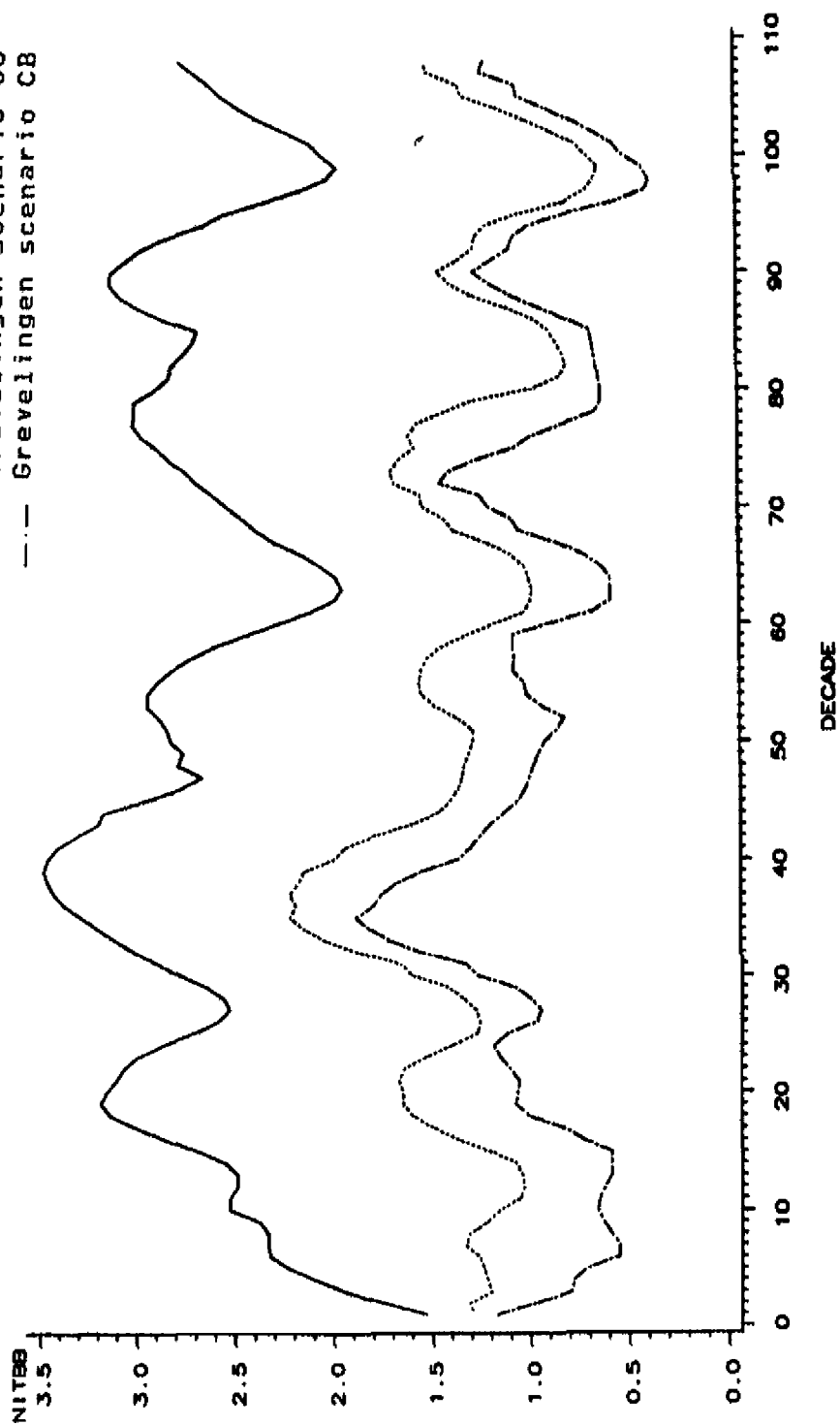
figuur 5.15

Fytoplankton (g C/m^3)

figuur 5.16

Nitraat (g N/m³)

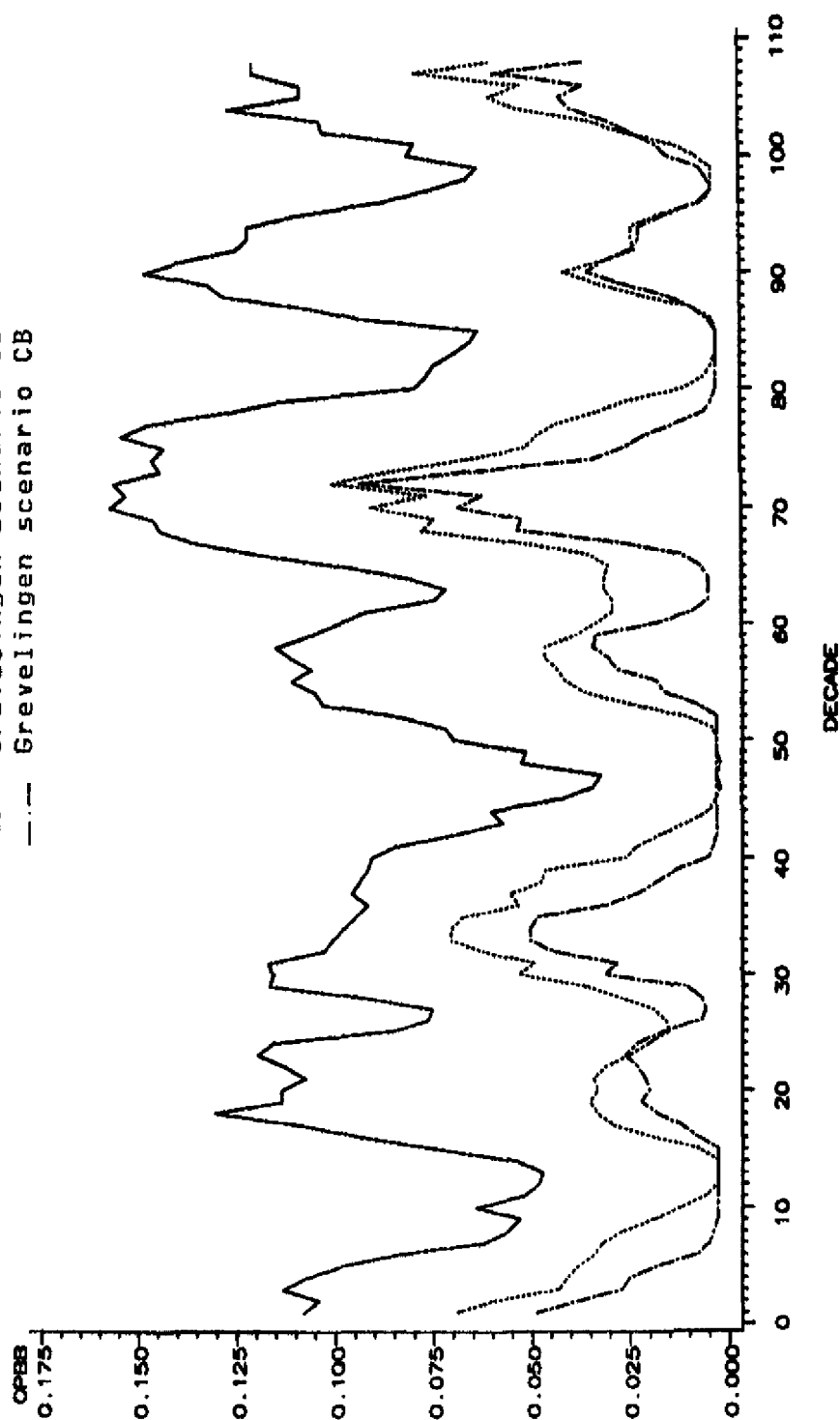
- Grevelingen scenario BB
- Grevelingen scenario CO
- - - Grevelingen scenario CB



figuur 5.17

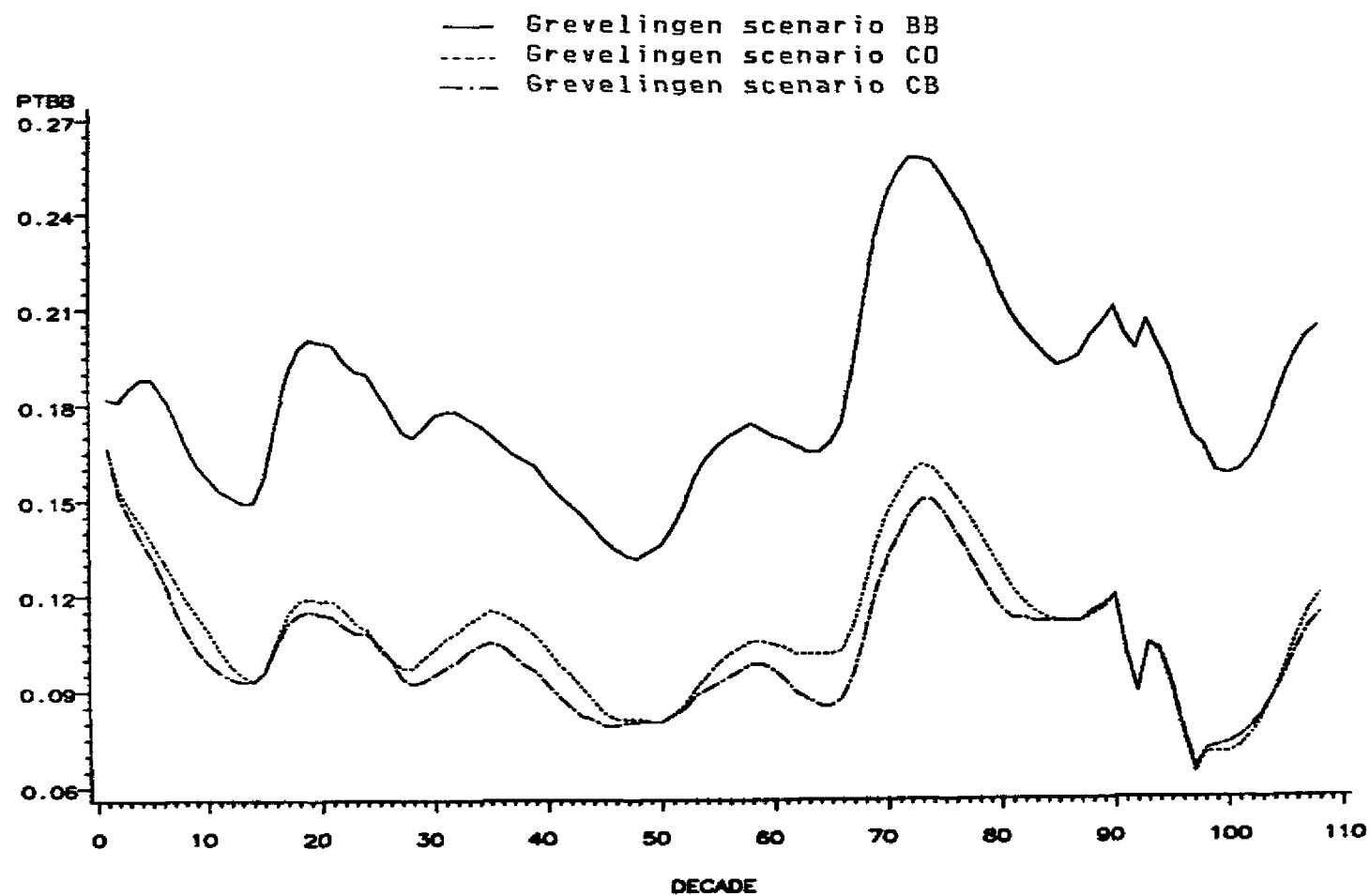
Ortho fosfaat (g P/m³)

- Grevelingen scenario BB
- - - Grevelingen scenario CO
- . - Grevelingen scenario CB



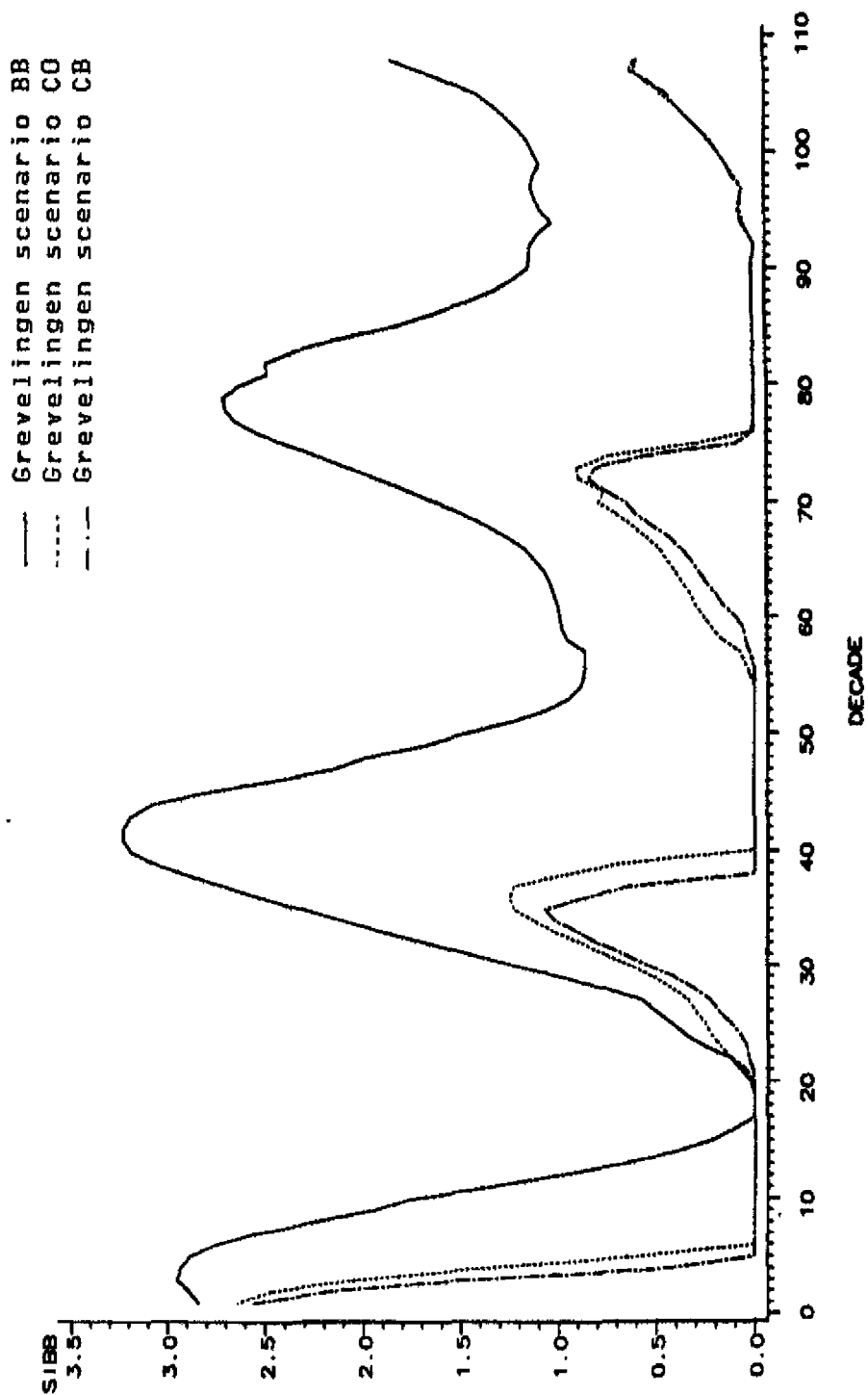
figuur 5.18

Totaal fosfaat (g P/m³)

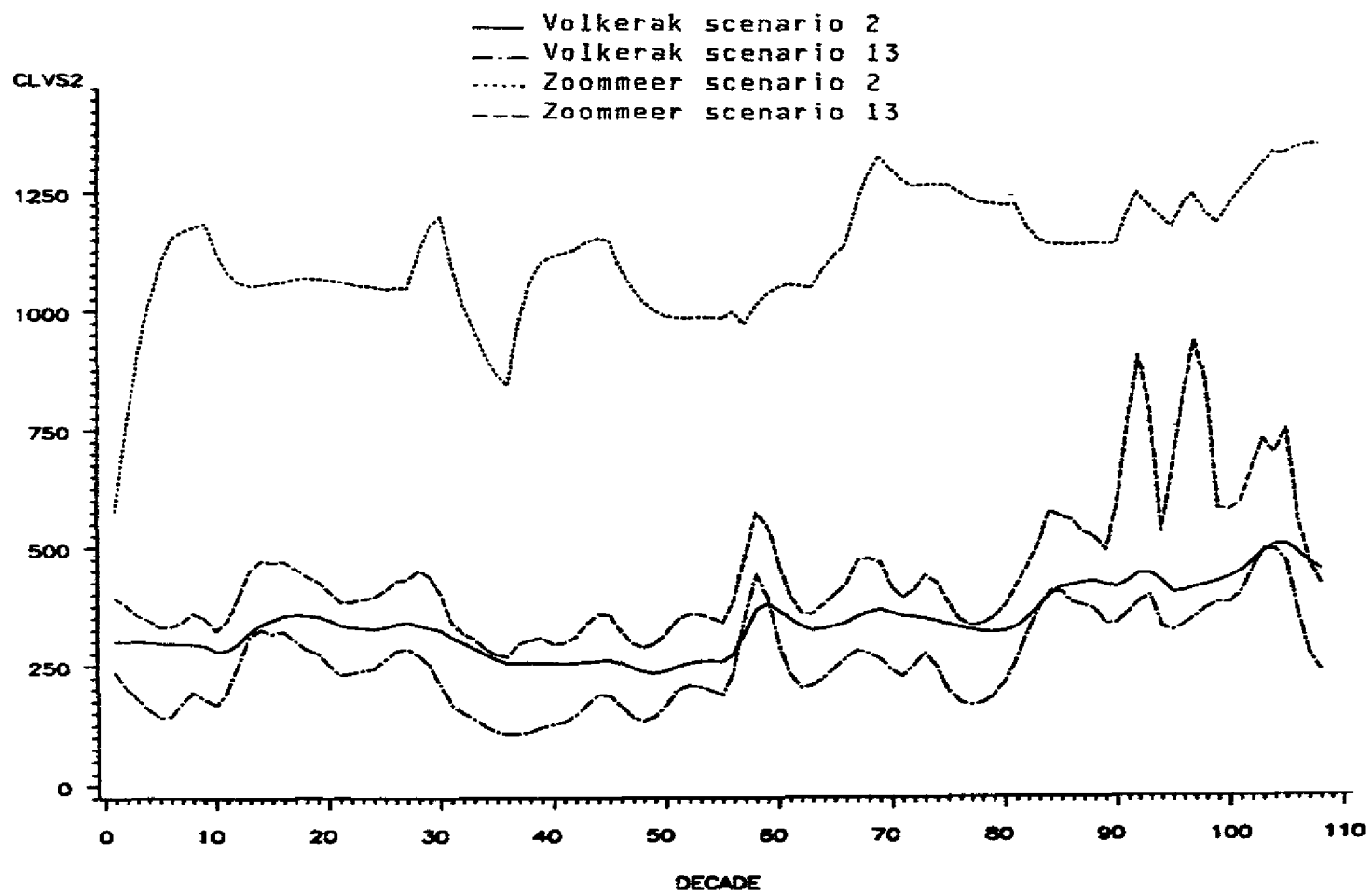


figuur 5.19

Opgelost Silicium (g Si/m³)



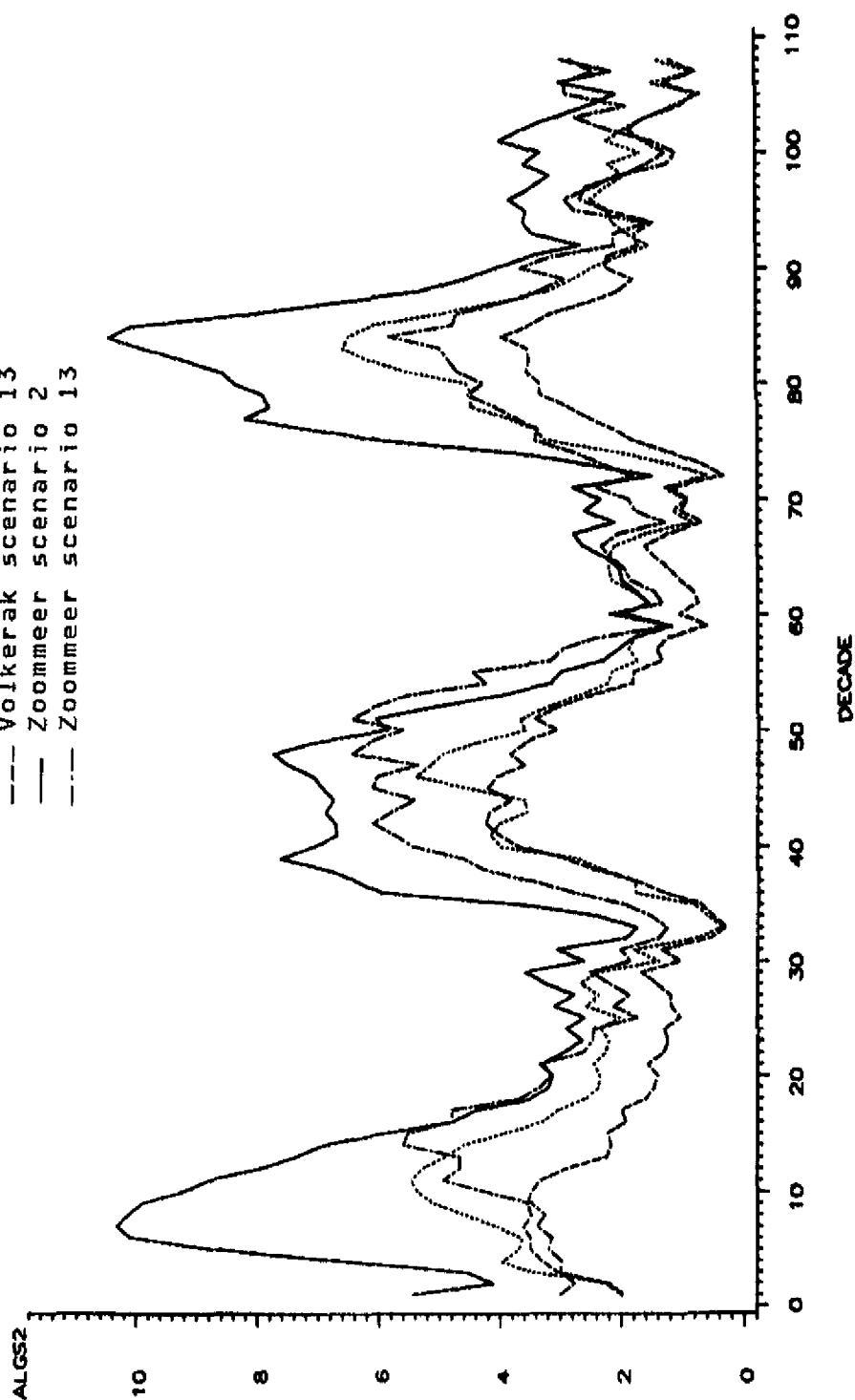
figuur 6.1

Chloride ($\text{g Cl}^-/\text{m}^3$)

figuur 6.2

Fytoplankton (g C/m^3)

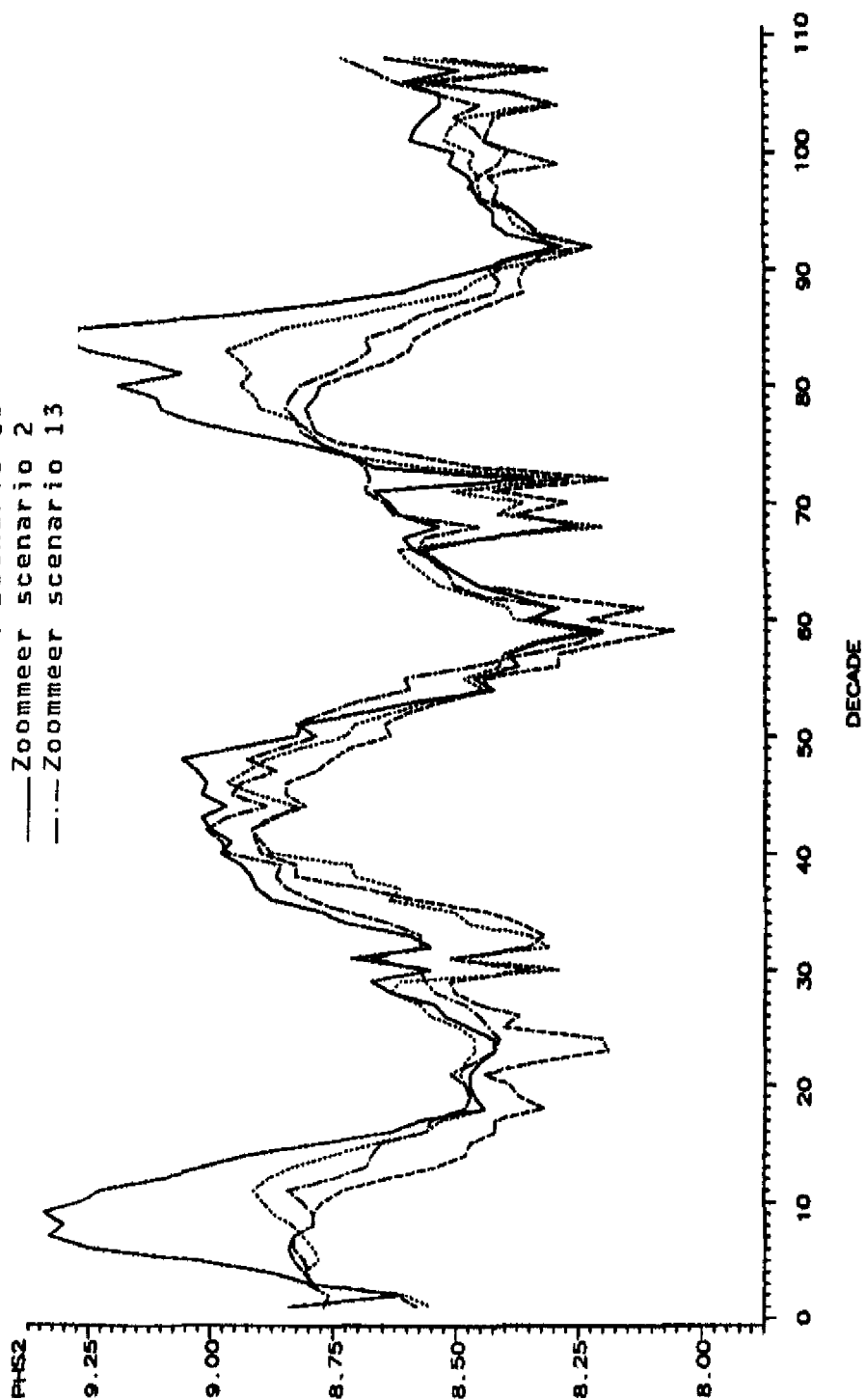
..... Volkerak scenario 2
 ---- Volkerak scenario 13
 — Zoommeer scenario 2
 --- Zoommeer scenario 13



figuur 6.3

pH

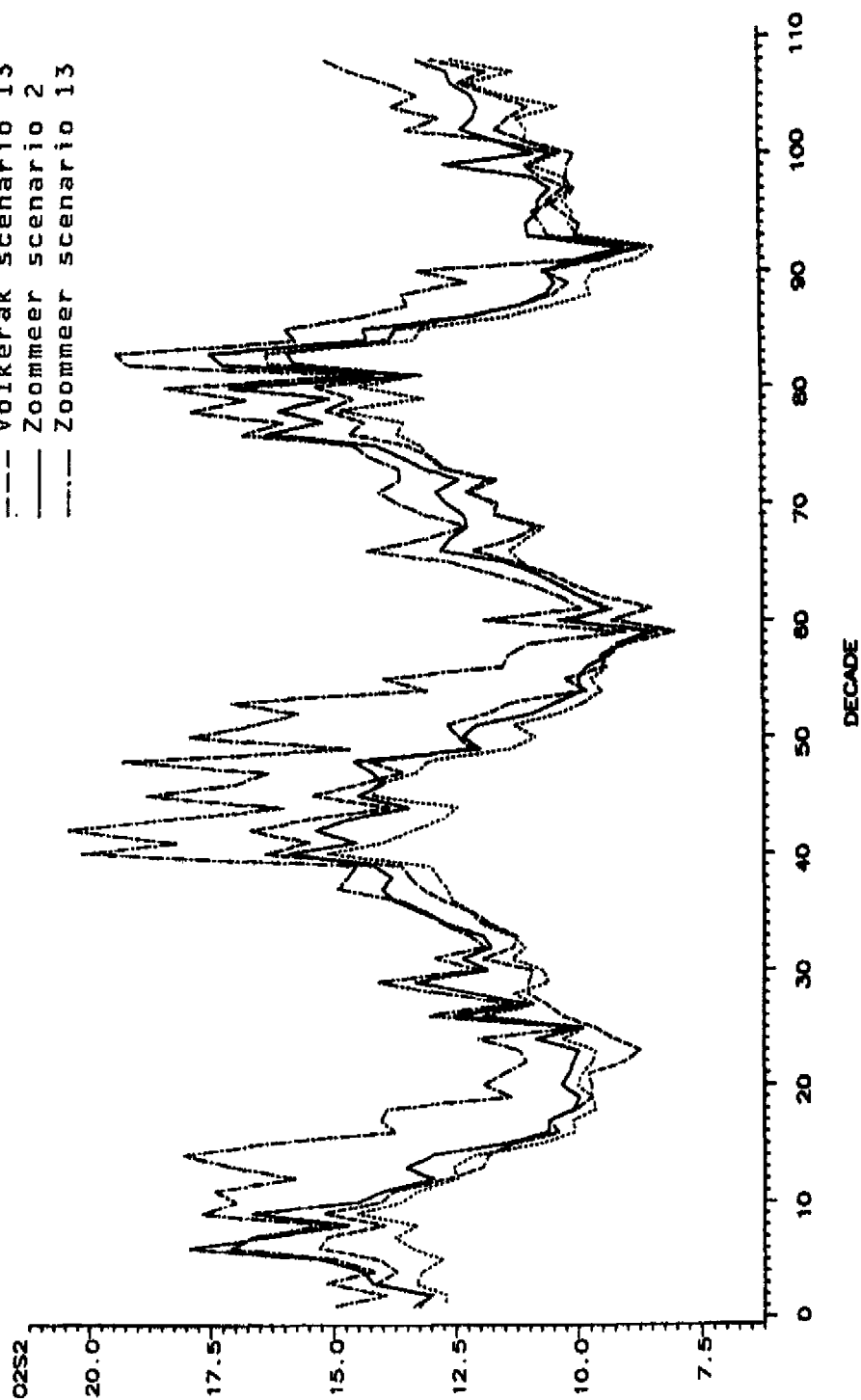
- Volkerak scenario 2
- Volkerak scenario 13
- Zoommeer scenario 2
- Zoommeer scenario 13



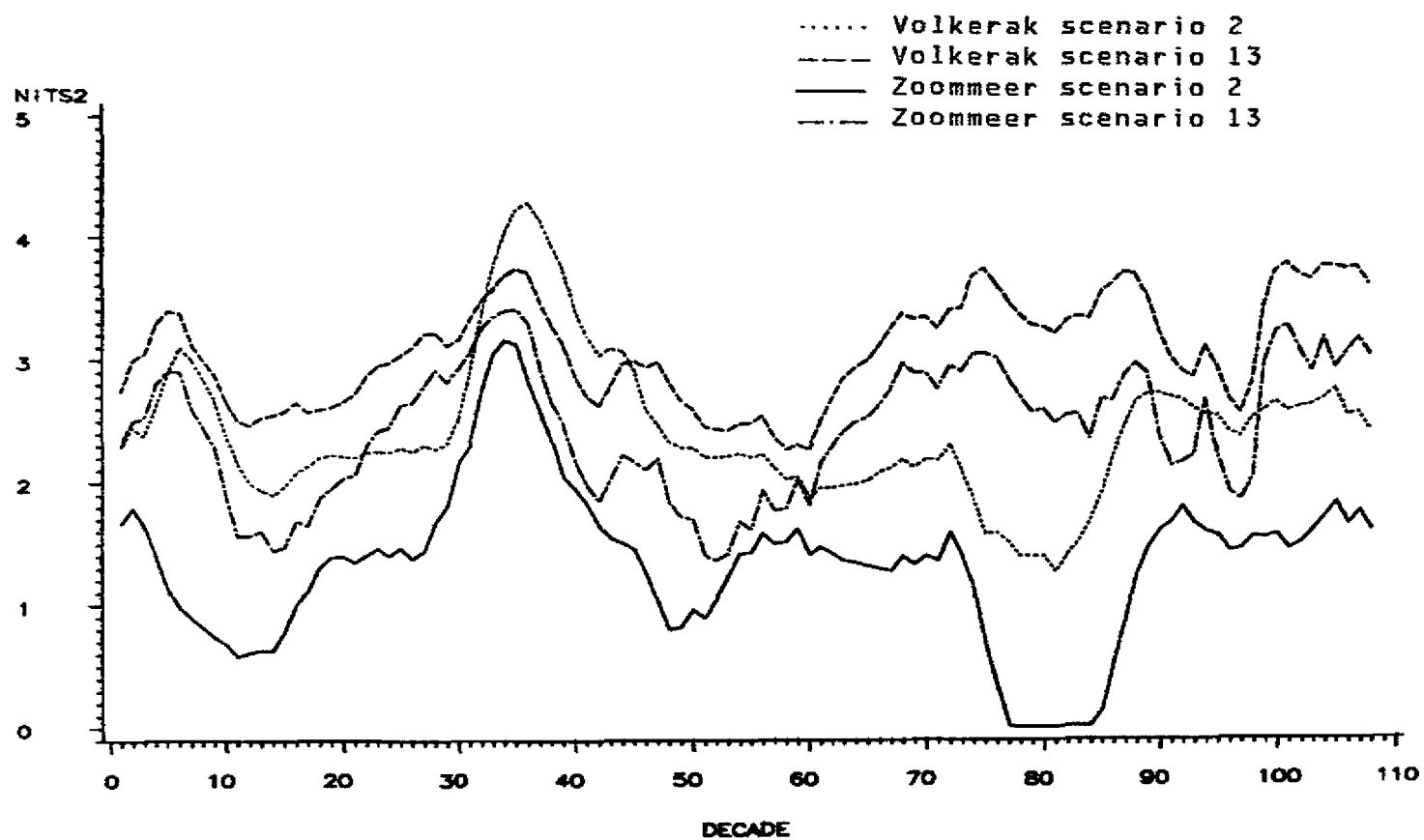
figuur 6.4

Zuurstof ($\text{g O}_2/\text{m}^3$)

..... Volkerak scenario 2
 --- Volkerak scenario 13
 — Zoommeer scenario 2
 --- Zoommeer scenario 13



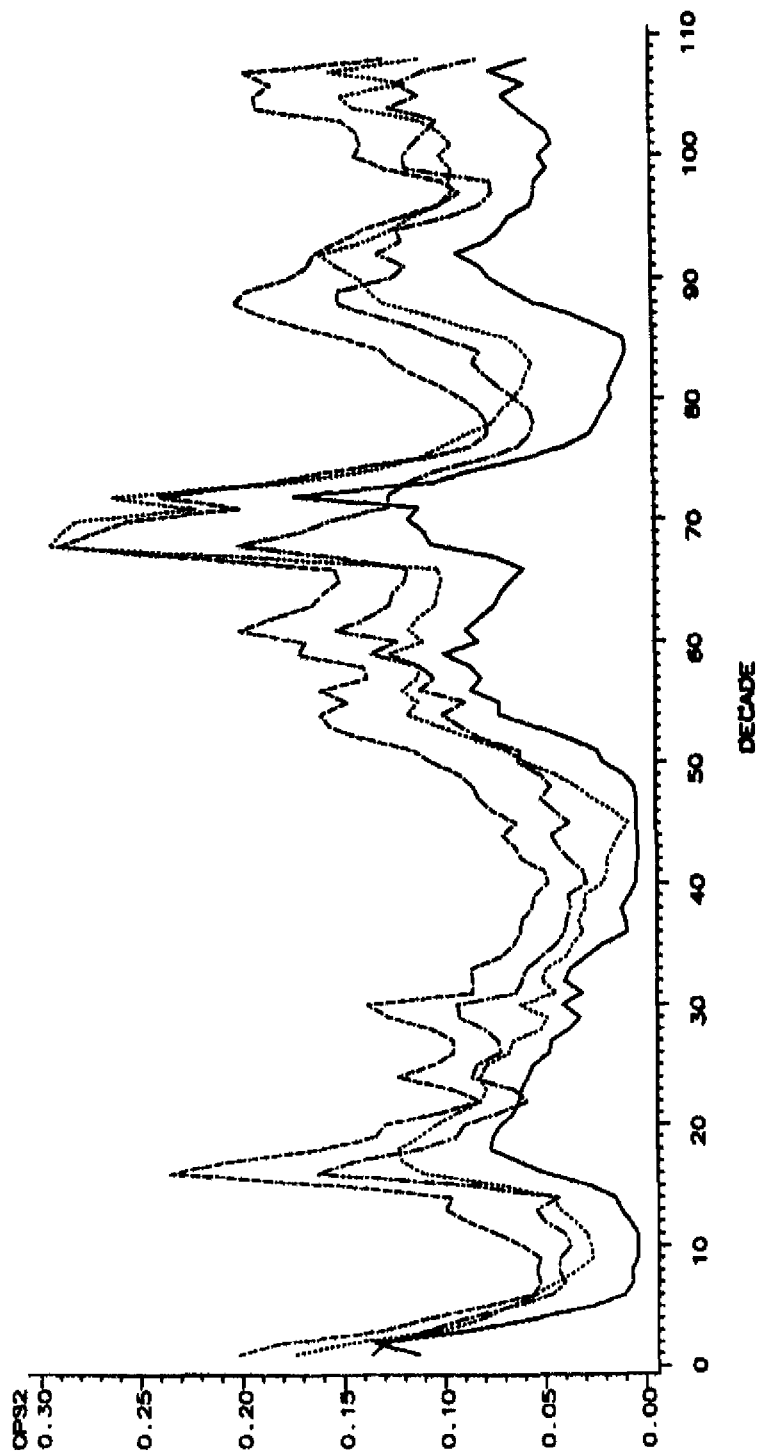
figuur 6.5

Nitrat (g N/m³)

figuur 6.6

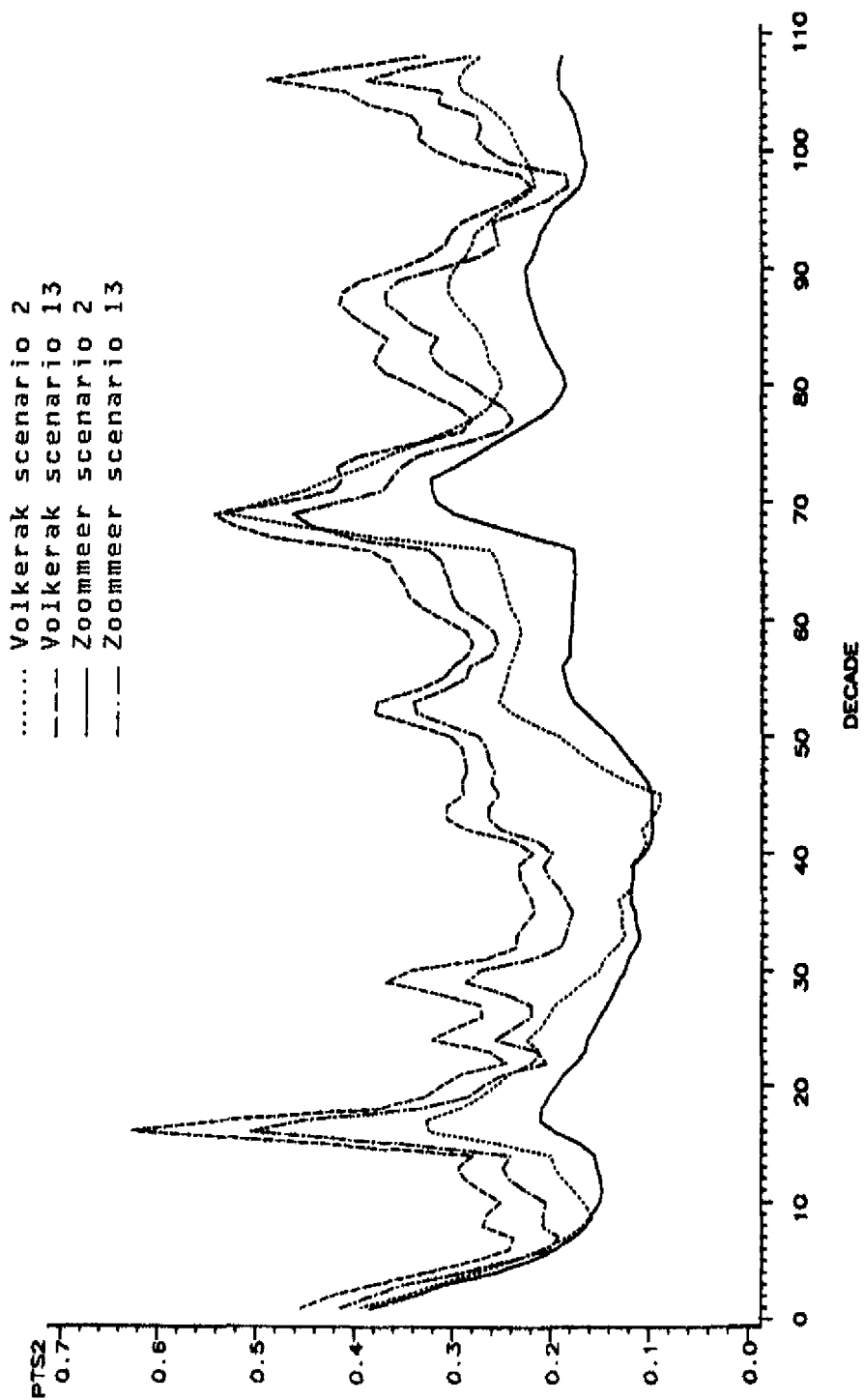
Ortho fosfaat (g P/m³)

- Volkerak scenario 2
- Volkerak scenario 13
- Zoommeer scenario 2
- Zoommeer scenario 13



figuur 6.7

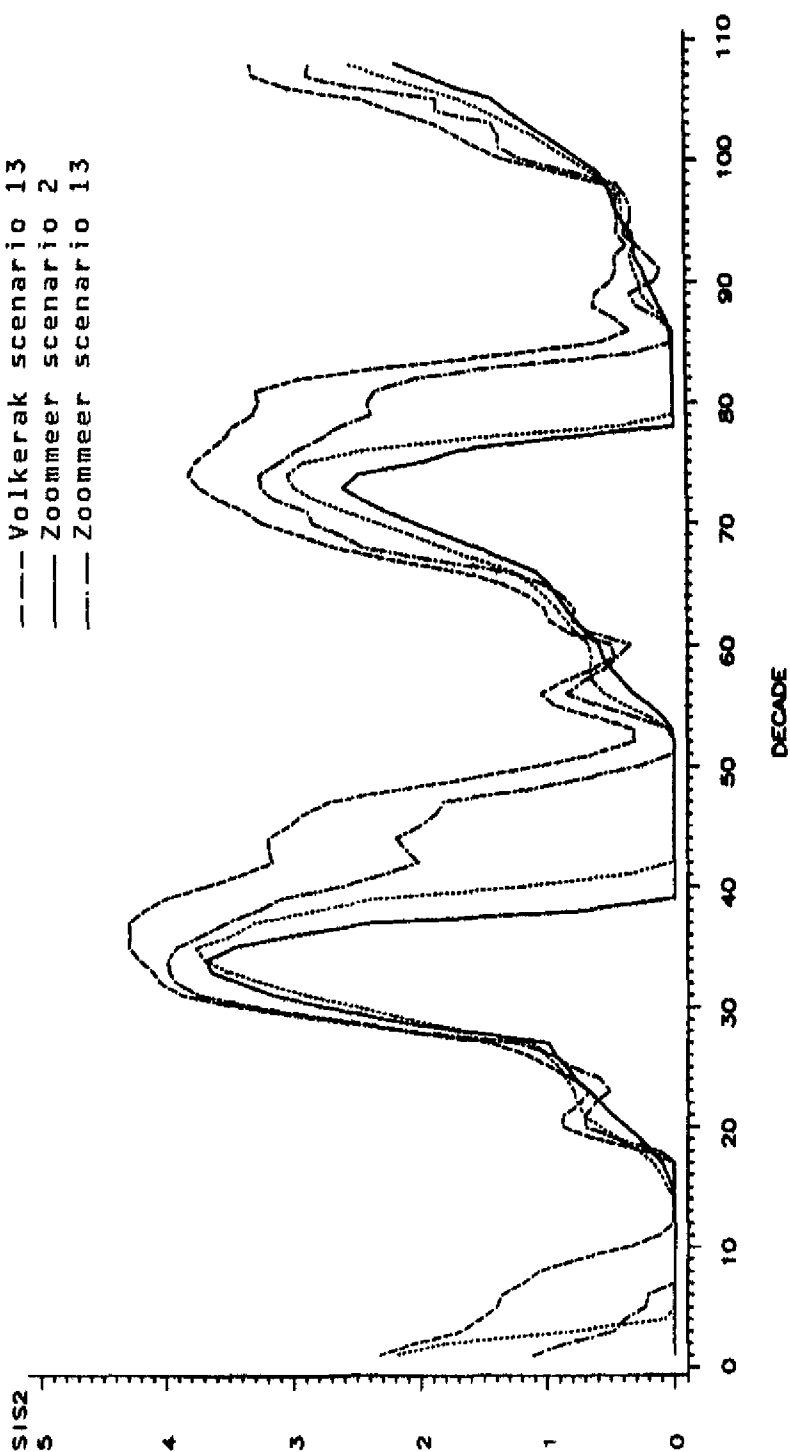
Totaal fosfaat (g P/m³)



figuur 6.8

Opgelost Silicium (g Si/m³)

- Volkerak scenario 2
- Volkerak scenario 13
- Zoommeer scenario 2
- Zoommeer scenario 13



p.o. box 177

2600 mh delft

the netherlands