

Dienst Binnenwateren/RIZA

empirische lichtmodellering
voor een aantal Nederlandse meren

T 387

augustus 1988

eindverslag

A.H. Bakema

SAMENVATTING

Alhoewel de zichtdiepte een veel gebuikte maat is voor de beoordeling van de waterkwaliteit, is het niet goed mogelijk deze te relateren aan modelberekeningen. Hierbij wordt het lichtklimaat onder water namelijk vrijwel altijd gekarakteriseerd door de extinctiecoëfficiënt, aangezien deze rechtstreeks samenhangt met de mate van lichtdoordringing in het water. Extinctiemetingen zijn tot nu toe op veel beperktere schaal uitgevoerd dan zichtdieptemetingen.

De relaties tussen de zichtdiepte en de extinctie onderling en tussen de zichtdiepte en de extinctie en de in het water aanwezige frakties opgelost en gesuspendeerd materiaal zijn echter onvoldoende bekend.

De relatie tussen zichtdiepte en extinctie is veel minder rechtstreeks zijn dan doorgaans verondersteld wordt, en gebruik van een eenvoudige conversieformule (de bekende Poole-Atkins vergelijking) is daarom in de meeste gevallen af te raden. Uitbreiding van de theorie rond het onderwater-lichtklimaat heeft geleid tot de ontwikkeling van uitgebreidere modellen, die een beter licht werpen op de samenhang tussen extinctie en zichtdiepte, en de relatie met de in het water aanwezige opgeloste en gesuspendeerde stoffen. Voor het gebruik van deze uitgebreidere lichtmodellen ontbreken vooralsnog echter de benodigde meetgegevens.

Rechtstreekse regressie van zowel de extinctie als de reciproke zichtdiepte op de concentraties opgelost en gesuspendeerd materiaal, zonder gebruik te maken van het verband tussen de twee, lijkt daarom vooralsnog de beste mogelijkheden te bieden.

Deze methode is toegepast op een aantal Nederlandse meren, en leidt over het algemeen tot goede resultaten wanneer voldoende metingen beschikbaar zijn.

De afgeleide relaties zijn afhankelijk van de samenstelling van de frakties opgelost en gesuspendeerd materiaal, en daardoor meer-specifiek. Vanwege de grote hoeveelheid benodigde metingen is het aantal meren waarvoor betrouwbare relaties afgeleid konden worden, vooral voor wat betreft de extinctie, beperkt.

INHOUD

SAMENVATTING	i
INHOUD	1
1.0 ALGEMENE INLEIDING	2
2.0 DOORZICHT EN EXTINCTIE	3
2.1 Inleiding	3
2.2 Doorzicht	3
2.3 Extinctie	4
2.4 Relatie doorzicht en extinctie	5
2.4.1 Poole-Atkins vergelijking	5
2.4.2 Duntley-Preisendorfer vergelijking	6
3.0 BEPALING VAN ZICHTDIEPTE EN EXTINCTIE	9
3.1 Meting	9
3.1.1 Extinctie	9
3.1.2 Zichtdiepte	9
3.2 Berekening via rechtstreekse regressie	11
3.2.1 Extinctie	11
3.2.2 Zichtdiepte	12
3.3 Berekening via de relatie zichtdiepte en extinctie	12
3.4 Berekening op grond van absorptie en verstrooiing	13
3.4.1 Methode Di Toro	16
3.4.2 Methode Kirk	17
3.4.3 Berekening van a, b, c, K en zichtdiepte	19
3.5 Konklusie	22
4.0 TOEPASSING IN DE PRAKTIJK	23
4.1 Inleiding	23
4.2 Gegevensverzameling	23
5.0 GEGEVENS ANALYSE	26
5.1 Inleiding	26
5.2 Verkennende data-analyse	27
5.3 Regressie analyse	28
5.4 Reciproke zichtdiepte	29
5.4.1 Verband met gloeirest, chlorofyl en detritus	29
5.4.2 Verband met drooggewicht alleen	32
5.4.3 De invloed van DOC	32
5.4.4 Bruikbaarheid van de gevonden relaties	33
5.4.5 Mogelijke verbeteringen	34
5.5 Extinctie	35
5.5.1 Verband met gloeirest, chlorofyl en detritus	36
5.5.2 Verband met drooggewicht alleen	37
5.5.3 Bruikbaarheid van de gevonden relaties	37
5.6 Relatie zichtdiepte en extinctie	38
5.7 Konklusie	40
6.0 GERAADPLEEGDE LITERATUUR	65
7.0 Tabellen en figuren	69

1.0 ALGEMENE INLEIDING

De zichtdiepte vormt een veel gebruikte maat voor de beoordeling van de waterkwaliteit. Reeds gedurende vele jaren worden in vrijwel alle Nederlandse oppervlaktewateren regelmatig zichtdieptemetingen uitgevoerd. Tot dusver is het niet goed mogelijk deze te relateren aan modelberekeningen van de waterkwaliteit.

De groei van algen (en ondergedoken waterplanten) wordt in belangrijke mate bepaald door de lichtdoordringing in het water. Bij modelberekeningen terzake wordt het lichtklimaat onder water vrijwel altijd gekarakteriseerd door de extinctiecoëfficiënt.

Tot de invoer van dergelijke modellen behoort dan meestal de achtergrondextinctie, die gedefinieerd wordt als dat gedeelte van de extinctie dat niet veroorzaakt wordt door de aanwezige algen en (soms) detritus. Ook de invloed op het lichtklimaat wordt meestal weergegeven als de resulterende totale extinctie, berekend als de achtergrondextinctie plus de door algen en detritus veroorzaakte extinctie.

Extinctiemetingen komen echter pas relatief kort, en dan nog op veel beperktere schaal dan zichtdieptemetingen, beschikbaar.

Gelet op het bovenstaande bestaat de behoefte om op grond van de modelberekeningen niet alleen de extinctiecoëfficiënt, maar ook de zichtdiepte te kunnen voorspellen. Daarnaast is het gebruik van een konstante achtergrondextinctie in de modelberekeningen soms weinig realistisch, en ontleemt het de mogelijkheid om de invloed van maatregelen die de achtergrondextinctie zouden kunnen veranderen te voorspellen.

Om deze redenen is door DBW/RIZA in het kader van activiteiten ten behoeve van de Derde Nota Waterhuishouding aan WL opdracht verleend om een onderzoek uit te voeren naar de relaties tussen de zichtdiepte en de extinctie enerzijds en de in het water aanwezige frakties opgelost en gesuspendeerd materiaal anderzijds, en naar de relatie tussen zichtdiepte en extinctie onderling, voor een aantal Nederlandse meren.

Het onderzoek is in 1987 gestart en in 1988 afgerond. De werkzaamheden zijn uitgevoerd en gerapporteerd door Drs. A.H. Bakema. De constructieve en stimulerende tussentijdse besprekingen met Ir. E.J.B. Uunk, Ir. H. Buiteveld (beiden DBW/RIZA) en Drs. F.J. Los (WL) hebben een belangrijke inhoudelijke bijdrage geleverd bij de uitvoering van het onderzoek.

In dit rapport worden de resultaten besproken. De hoofdstukken 2 en 3 bevatten de resultaten van een literatuurstudie naar de mogelijkheden om bovengenoemde relaties te ontwikkelen, terwijl in de hoofdstukken 4 en 5 de toepassing voor de onderzochte meren wordt besproken.

2.0 DOORZICHT EN EXTINCTIE

2.1 INLEIDING

Om te komen tot een verantwoorde beschrijving van de relaties tussen zichtdiepte, extinctie en de concentraties opgelost en gesuspendeerd materiaal in de Nederlandse meren, is allereerst een literatuurstudie uitgevoerd naar de verschillende mogelijkheden om hiervoor een eenvoudig model te ontwikkelen.

Hier wordt een samenvatting van de resultaten van deze studie gegeven, terwijl waar nodig de achterliggende theorie kort wordt weergegeven. Hierbij is zoveel mogelijk gebruik gemaakt van algemeen gebruikte benamingen voor de verschillende optische eigenschappen zonder overal strikt bij de in de optica gebruikte definities aan te sluiten.

In de tekst zijn slechts verwijzingen naar enkele artikelen opgenomen. Een volledige literatuurlijst is echter toegevoegd.

2.2 DOORZICHT

Een belangrijke optische eigenschap van water is het doorzicht. Het doorzicht geeft aan hoe diep men het water in kan kijken, en vormt een intuïtieve maat voor de 'schoonheid' van het water. Aangezien het doorzicht ook nog makkelijk te meten is, ligt het voor de hand dat deze maat al vroeg gebruikt is om iets over de waterkwaliteit te kunnen zeggen. De Italiaanse onderzoeker Angelo Secchi heeft aan het eind van de vorige eeuw doorzichtmetingen op zee uitgevoerd en hiervoor een methode beschreven. Deze methode wordt nog steeds in vrijwel ongewijzigde vorm toegepast. De meting wordt uitgevoerd met behulp van een witte (soms ook zwart/wit geblokte) ronde schijf (Secchi-disk), die zo ver in het water wordt neergelaten dat hij nog net met het blote oog waarneembaar is. De diepte waarop de schijf zich dan bevindt (de Secchi-diepte of zichtdiepte, SD) wordt gebruikt als maat voor het doorzicht van het water. Voordelen van het gebruik van de Secchi-disk voor doorzichtmetingen zijn vooral de eenvoud van de metingen en de robuustheid van 'het meetapparaat'. Nadelen zijn de afhankelijkheid van de meetresultaten van de manier waarop en de omstandigheden waaronder de meting wordt uitgevoerd (schaduw of zonkant van de boot, aanwezigheid van golven, stand van de zon, etc.). Ook is de nauwkeurigheid van de meting in troebel water beperkt. Bovendien is het doorzicht niet de meest geschikte maat om iets over het lichtklimaat onder water te weten te komen.

2.3 EXTINCTIE

Een andere optische eigenschap van het water is de extinctie, waarmee hier bedoeld wordt de uitdoving van de naar beneden gerichte natuurlijke instraling. Dit verslag beperkt zich tot de fotosynthetisch actieve straling (PAR = photosynthetically active radiation) en waar verder over licht of straling wordt gesproken wordt hiermee PAR bedoeld. Deze straling komt vrijwel overeen met het zichtbaar licht en heeft een golflengte tussen 400 en 700 nm.

De extinctie wordt uitgedrukt d.m.v. de extinctiecoëfficiënt (K), de lichtuitdoving per diepte-eenheid. De lichtintensiteit onder water als functie van de diepte wordt dan gegeven door :

$$I(z) = I(0) * \text{EXP} -(K * z) \quad (1)$$

waarbij

I(z) lichtintensiteit (PAR) op diepte z
I(0) lichtintensiteit (PAR) net onder het wateroppervlak
K extinctiecoëfficiënt (m^{-1})
z diepte (m)

De extinctiecoëfficiënt is dus tevens een maat voor de fraktie overblijvend licht als functie van de diepte, en wordt ook op die manier bepaald. Hiervoor wordt in het water op een aantal diepten de lichtintensiteit gemeten, waarna m.b.v. vergelijking (1) de waarde van K eenvoudig bepaald kan worden (middels log-lineaire regressie).

Op theoretische gronden valt te verwachten dat de waarde van de extinctiecoëfficiënt afhankelijk is van de diepte (e.g. Atlas en Bannister, 1980). Hiervoor zijn twee redenen aan te wijzen. Ten eerste treedt er een verschuiving op in de spectrale samenstelling van het licht, doordat bij verschillende golflengten een verschillende extinctiewaarde hoort, en licht van verschillende golflengten dus niet even snel uitdooft. De golflengten met de hoogste extinctie verdwijnen daardoor het snelst, en de extinctie voor totaal PAR zou dus met toenemende diepte af moeten nemen. Ten tweede treedt er een verandering in de door het licht afgelegde weg per meter diepte op als gevolg van verstrooiing. Aan de ene kant wordt een bundel vertikaal invallend licht diffuser door verstrooiing (een steeds grotere fraktie van de straling is van richting veranderd). Aan de andere kant is de afgelegde weg per meter diepte groter voor lichtstralen met een grotere hoek met de vertikaal en daardoor worden deze ook eerder geabsorbeerd. Door deze tegengestelde effecten verandert de richtingsverdeling van het licht met toenemende diepte tot zij uiteindelijk een evenwicht bereikt; de asymptotische verdeling.

Dit diepte-afhankelijke effect van de verstrooiing op de extinctie is op onze breedtegraad echter te verwaarlozen

(Klepper et al., 1984) en alhoewel zij wel een geringe afname van de extinctie op grote diepte vinden, is dit effect in de meeste meetreeksen niet terug te vinden. Met de complicaties van een diepte-afhankelijke extinctiewaarde wordt hier dan verder ook geen rekening gehouden.

2.4 RELATIE DOORZICHT EN EXTINCTIE

De meting van de extinctiecoëfficiënt was, toen eenvoudige en betrouwbare stralingsmeters nog niet beschikbaar waren, lastig uit te voeren. De meting van het doorzicht met behulp van de Secchi-disk is daarentegen zo eenvoudig dat men al heel vroeg geprobeerd heeft de waarde van de extinctiecoëfficiënt aan de zichtdiepte te correleren, om zodoende de (vooral vroeger) gecompliceerdere extinctiemetingen overbodig te maken. Intuïtief is ook onmiddellijk duidelijk dat het doorzicht en de extinctie van het water 'iets' met elkaar te maken moeten hebben.

2.4.1 Poole-Atkins vergelijking

Poole en Atkins vonden in 1929 een verband tussen deze twee grootheden, en wel:

$$K = \frac{\text{con}}{\text{SD}} \quad \text{of} \quad K * \text{SD} = \text{con} \quad (2)$$

waarbij

K extinctiecoëfficiënt (m^{-1})
SD zichtdiepte (m)
con een constante die sindsdien de Poole-Atkins coëfficiënt wordt genoemd (-)

Veel onderzoekers hebben nadien een dergelijk verband tussen extinctie en zichtdiepte in hun gegevens gevonden, waarbij de gevonden waarde voor de constante varieert van 1.2 tot 3.0. De diepte waarop men de schijf nog kan waarnemen wordt bepaald door het contrast van de schijf met zijn omgeving. Een 'verklaring' voor het verband tussen de twee grootheden kan gegeven worden als we veronderstellen dat de waargenomen lichtintensiteit van de Secchi-disk gegeven wordt door de lichtintensiteit op twee maal de zichtdiepte (tweemaal, omdat het licht van de Secchi-disk ook weer terug moet naar de oppervlakte). Het waargenomen contrast van de Secchi-disk wordt dan bepaald door deze lichtintensiteit gedeeld door de lichtintensiteit van de omge-

ving (reflektie vanuit het omringende water). De lichtintensiteit op twee maal de zichtdiepte volgt uit vergelijking (1) wanneer voor z twee maal de zichtdiepte wordt ingevuld. Het ligt verder voor de hand dat de lichtintensiteit van de omgeving van de schijf evenredig is met I_0 , en dat de waarnemingsgrens van de Secchi-disk dus samenhangt met een vaste waarde $I(2*SD)/I_0$, en dat dus ook $EXP-(K*2*SD)$ een vaste waarde heeft. Dat betekent dat ook het produkt $K*SD$ een vaste waarde heeft, wat vergelijking (2) oplevert.

Deze redenering, alhoewel zelden expliciet vermeld, vormt de theorie achter vergelijking (2) In veel gevallen wordt zo'n relatie ook gevonden, en op grond van de hierboven summier weergegeven redenering ligt het voor de hand te veronderstellen dat de daarbij gevonden waarde van de constante ook in andere dan de onderzochte wateren op zal gaan. Er zijn in deze redenering immers geen andere variabelen dan de grenswaarde van het door het menselijk oog waar te nemen contrast van belang. De waarde van de lichtintensiteit op zichtdiepte gedeeld door de instraling wordt vaak vermeld en blijkt te variëren van 5% tot 25%. Uit de gevonden spreiding in deze waarde en de daarmee samenhangende spreiding in de Poole-Atkins coefficient blijkt echter al dat deze aanpak toch minder universele resultaten oplevert dan op het eerste gezicht verwacht zou mogen worden. Dat maakt deze aanpak gelijk een stuk minder interessant, want men is er nooit zeker van dat de waarde van de Poole Atkins coefficient niet is veranderd als men niet beschikt over hernieuwde metingen van zowel het doorzicht als de extinctie. In dat geval is de extinctie echter al bekend en hoeft zij niet meer geschat te worden.

In de afgelopen decennia is de theorie rond de Secchi-disk meting echter aanzienlijk verbeterd en uitgebreid en is duidelijk geworden waarom bovenstaande methode om de extinctie af te leiden uit de zichtdiepte vaak tekort schiet.

2.4.2 Duntley-Preisendorfer vergelijking

De simpele theorie die ten grondslag ligt aan het gebruik van de Poole-Atkins coefficient is de laatste jaren uitgebreid en verbeterd, en Preisendorfer (1986) geeft hiervan een goed overzicht. Dit heeft geleid tot een nieuw begrip van de Secchi-disk meting en tot een nieuwe vergelijking die het verband tussen de extinctie en de zichtdiepte beschrijft. Zonder al te diep in te gaan op de achterliggende (complexe) theorie zullen enkele van de resultaten hieronder worden besproken. De voor een beter begrip van de Secchi-diepte meting meest belangrijke uitbreiding is het gebruik van een verschillende extinctiecoefficient voor het licht dat van het wateroppervlak de Secchi-disk bereikt en voor het licht dat van de Secchi-disk terugkeert naar het wateroppervlak en bijdraagt tot de waarneming van de Secchi-disk. Dat voor de uitdoving van licht in hetzelfde water twee verschillende extinctiecoefficienten van belang zijn kan eenvoudig

worden begrepen als men bedenkt dat het licht dat bijdraagt aan de beeldvorming van de Secchi-disk, rechtstreeks van de Secchi-disk naar het oog van de waarnemer moet gaan, zonder daarbij verstrooid te worden. Immers, licht vanaf de Secchi-disk dat na verstrooid te zijn het oog bereikt wordt waargenomen onder een andere hoek dan waar de Secchi-disk zich bevindt en draagt dus niet bij tot de waarneming van de schijf. Hoe het licht vanaf de oppervlakte de Secchi-disk bereikt doet echter niet ter zake, aangezien ook verstrooide straling bijdraagt tot de verlichting van de schijf. In de door Duntley en Preisendorfer afgeleide vergelijking komen dan ook twee verschillende extinctiecoëfficiënten voor; een voor totaal licht en een voor 'beeldvormend' of 'gericht' licht:

$$(c + K) = \frac{\text{gamma}}{SD} \quad (3)$$

waarbij

- c extinctiecoëfficiënt voor gericht licht (beam attenuation coefficient) (m^{-1})
 K extinctiecoëfficiënt voor naar beneden gericht totaal licht (m^{-1})
 gamma een constante met een op grond van de theorie redelijk nauwkeurig te voorspellen waarde (-)
 SD zichtdiepte gemeten met de Secchi-disk (m)

De waarde van K geeft aan hoe snel de natuurlijke instraling in het water uitdooft en bepaalt dus de lichtintensiteit in de waterkolom. Vanuit ekologisch oogpunt is dit dus veruit de belangrijkste variabele. Het zicht onder water, dat voor predatoren van belang kan zijn, wordt overigens, net als de zichtdiepte, bepaald door zowel K als c.

Uit vergelijking (3) wordt duidelijk dat het gebruik van de Poole-Atkins coëfficiënt om de extinctie uit de zichtdiepte te berekenen slechts dan verantwoord is wanneer de verhouding tussen c en K constant is. Immers, als de verhouding tussen c en K constant is en we schrijven vergelijking (3) als

$$K * (c/K + 1) = \frac{\text{gamma}}{SD} \quad (4)$$

dan volgt onmiddellijk

$$K = \frac{\text{con}}{SD} \quad \text{met} \quad \text{con} = \frac{\text{gamma}}{(c/K + 1)} \quad (5)$$

Als de verhouding tussen c en K niet konstant of bekend is, kan deze relatie dus niet gebruikt worden. Slechts de som van c en K kan dan nog op grond van de zichtdiepte worden geschat. Omgekeerd kan een schatting van de zichtdiepte alleen worden gemaakt als naast K ook c bekend is.

3.0 BEPALING VAN ZICHTDIEPTE EN EXTINCTIE

3.1 METING

3.1.1 Extinctie

De meting van de extinctiecoëfficiënt (voor PAR) met behulp van kwantum-fotometers levert nauwkeurige resultaten en is, gezien de beschikbaarheid van goede meetinstrumenten, relatief eenvoudig uit te voeren. Mede gezien het belang van de extinctiecoëfficiënt, vooral bij gebruik van modellen waarbij het lichtklimaat onder water een grote rol speelt, is het uitvoeren van deze metingen zeer gewenst. Met een geringe extra inspanning (omdraaien van de fotometer op een aantal meetdiepten) kan tevens de interne reflectie in het water bepaald worden. Op het nut van deze meting wordt straks teruggekomen.

3.1.2 Zichtdiepte

Een nadeel van de Secchi-disk meting is dat de resultaten mede worden beïnvloed door de omstandigheden waaronder en de manier waarop de meting wordt uitgevoerd. In de literatuur zijn dan ook verschillende adviezen te vinden over hoe de meting uit te voeren om de invloed van deze factoren zo klein mogelijk te houden. Met name over de vraag of de meting aan de zonzijde dan wel aan de schaduwzijde van de boot dient te worden uitgevoerd bestaat onduidelijkheid. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat hier verschillende processen een rol spelen (zie punt 2 en 7 hieronder).

Preisendorfer (1986) geeft een theoretisch goed onderbouwde analyse van de gevoeligheid van de zichtdieptemeting met behulp van de Secchi-disk voor factoren als toestand van het wateroppervlak, eigenschappen van de Secchi-disk en de wijze waarop de meting wordt uitgevoerd. De resultaten van zijn analyse die van belang zijn voor een goede uitvoering van de meting worden hier kort samengevat. Hierbij wordt steeds verondersteld dat alle andere factoren gelijk blijven.

Het verband waaraan de Secchi-disk meting zijn nut ontleent is:

$$1. \Delta SD/SD = - \Delta(c+K)/(c+K)$$

Aangezien zowel c als K rechtstreeks variëren met de concentraties van het in het water opgelost en gesuspenseerd materiaal, geldt dit dus ook voor de reciproke zichtdiepte. De zichtdiepte is daarmee dus een maat voor de concentraties van deze stoffen. Dit betekent dat de reciproke zichtdiepte in principe op de-

zelfde manier als c of K (b.v. middels meervoudige regressie) aan deze concentraties gerelateerd kan worden. Hierop wordt later teruggekomen.

$$2. \Delta SD/SD = 1/\gamma * \Delta T/T$$

waarbij T de 'contrast transmittance factor' van het wateroppervlak is

De contrast transmittance factor wordt zowel bepaald door de golfvorming aan het wateroppervlak als door de reflectie van opvallend licht. Een voorbeeld berekening van Preisendorfer toont dat T bij geringe windsnelheden afneemt tot ongeveer 40% van zijn waarde bij windstil weer ten gevolge van golfvorming. Met een waarde van gamma tussen de 8 en 10 levert dat een reductie van 3 tot 4 % van de Secchi-disk diepte op. Dit effect kan uitgeschakeld worden door bij de meting gebruik te maken van een kijkdoos met glazen bodem. Ook het effect van reflecties wordt hierdoor al voor een deel opgeheven. Andere oplossingen om het effect van reflecties te verkleinen zijn het gebruik van een paraplu om het water te beschaduwten (gevaar voor schuin invallend licht) of een overdekte boot met glazen bodem (zoals voorgesteld door Preisendorfer). De laatste methode is ongetwijfeld de beste, maar doet de grote verdienste van de Secchi-disk meting (namelijk zijn eenvoudige uitvoerbaarheid) voor een groot deel teniet.

$$3. \Delta SD/SD = 1/\gamma * \Delta R_{disk}/R_{disk}$$

waarbij R_{disk} de reflectie (in water !) van de Secchi-disk is

De reflectie van de schijf heeft dus, zoals verwacht, een aanzienlijke invloed op de uitkomst van de meting. Het is daarom vreemd dat hiervoor nooit een algemene standaard ontwikkeld is, behalve dan dat de schijf 'wit' moet zijn.

4. De Secchi-diepte wordt groter bij grotere diameter van de schijf

Dit effect speelt alleen een rol als de schijf onder zeer kleine hoek wordt waargenomen (dit volgt uit Blackwell (1946)) en is voor het Nederlands binnenwater te verwaarlozen bij gebruik van een schijf van enkele tientallen centimeters doorsnee.

5. De Secchi-diepte wordt groter bij grotere zonnehoogte

Dit effect kan verkleind worden door de waarnemingen niet bij extreme zonnehoogten (begin en eind van de dag) uit te voeren.

6. De Secchi-diepte wordt kleiner bij grotere hoogte van de waarnemer boven het water

Dit effect wordt kleiner als de contrast transmittance factor (zie 2) tot 1 nadert. Door gebruik van een kijkglas wordt ook dit effect dus minder belangrijk.

7. De Secchi-diepte is groter als de waterkolom tussen schijf en waarnemer meer beschaduwd is

Dit effect kan opgeheven worden door de meting altijd aan de zonkant van de boot uit te voeren. Uitvoeren van de meting aan de schaduwkant heeft het nadeel dat de schijf onder de schaduw van de boot uit kan komen, waardoor er een plotselinge verandering in waarneembaarheid met de diepte op kan treden. Wanneer geen kijkglas of paraplu gebruikt wordt heeft meting aan de schaduwzijde wel het voordeel dat de reflectie aan het wateroppervlak verminderd wordt.

Tot slot dient nog vermeld dat de nauwkeurigheid van de zichtdiepte-meting met behulp van de Secchi-disk, bij zorgvuldige uitvoering hoogstens 2 centimeter, en meestal slechts 5 centimeter bedraagt. Bij zeer troebele wateren met zichtdiepten van b.v. 20 cm., betekent dit nog altijd een relatieve fout van 10 tot 25 %.

3.2 BEREKENING VIA RECHTSTREEKSE REGRESSIE

3.2.1 Extinctie

Wanneer geen extinctiemetingen voorhanden zijn, kan de extinctiecoëfficiënt bepaald worden door gebruik te maken van eerder of elders ontwikkelde verbanden tussen de extinctiecoëfficiënt en de concentraties opgelost en gesuspendeerd materiaal (e.g. Verduin, 1982):

$$K = k_1 * C + k_2 * D + k_3 * S + k_4 \quad (6)$$

C concentratie chlorofyl
D concentratie detritus
S concentratie zwevend slib
k₁,k₂,k₃ specifieke extinctiecoëfficiënten voor de verschillende frakties
k₄ restterm (extinctie veroorzaakt door DOC en water)

In deze vergelijking wordt een lineair verband verondersteld tussen extinctie en deze concentraties. Aangezien de waarde van de extinctiecoëfficiënt ook afhankelijk is van de samenstelling van het invallend licht, is deze aanname in feite niet juist.

Doordat de verschillende stoffen de absorptie en scattering op verschillende wijze beïnvloeden, verandert met een verschuiving in de concentraties ook de samenstelling van het licht (zowel qua richting als qua spectrale verdeling). Daardoor veranderen ook de specifieke extinctiecoëfficiënten voor de verschillende frakties. Dit effect is echter in de bestudeerde literatuur nergens terug te vinden en wordt daarom, net als de diepteafhankelijkheid van de extinctiecoëfficiënt in het vorige hoofdstuk, verwaarloosd (beide effecten worden veroorzaakt door de invloed van een veranderende samenstelling van het licht op de extinctiecoëfficiënt, die blijkbaar in de meeste situaties erg klein is).

3.2.2 Zichtdiepte

Uitgaande van een lineair verband tussen K (zie boven) en c (zie verder) met de bepalende factoren, is ook het verband tussen reciproke zichtdiepte met de bepalende factoren lineair:

$$1/SD = s_1 * C + s_2 * D + s_3 * S + s_4 \quad (7)$$

Met dezelfde kanttekeningen als voor de extinctie gemaakt werden, kan dus ook voor de reciproke zichtdiepte een dergelijk verband middels regressie worden verkregen.

3.3 BEREKENING VIA DE RELATIE ZICHTDIEPTE EN EXTINCTIE

Zichtdieptemetingen kunnen behulpzaam zijn bij het verantwoord interpoleren (in ruimte of in tijd) van extinctiemetingen, wanneer enkele gecombineerde zichtdiepte- en extinctie-metingen beschikbaar zijn (met behulp van een plaats- en tijds-specifieke Poole-Atkins-coëfficiënt).

Berekening van de extinctie op grond van de zichtdiepte met behulp van een eerder of elders bepaalde Poole-Atkins coëfficiënt is vanwege de variabiliteit in de Poole-Atkins coëfficiënt af te raden, zoals in het vorige hoofdstuk werd besproken.

Berekening van zichtdiepte op grond van gemeten extinctiewaarden met behulp van een Poole-Atkins-coëfficiënt is zelden interessant, aangezien zichtdiepte gemakkelijker is te meten dan extinctie. Overigens geldt ook hier dat een dergelijke methode slechts als interpolatie tussen gecombineerde metingen enigszins betrouwbaar kan worden gebruikt.

3.4 BEREKENING OP GROND VAN ABSORPTIE EN VERSTROOIING

Zoals eerder uiteengezet heeft de relatie van (reciproke) zichtdiepte met de extinctiecoëfficiënt slechts een zeer beperkte geldigheid. Slechts als ook de waarde van de 'beam attenuation coefficient' (c) bepaald kan worden kan een meer algemeen geldend verband afgeleid worden. Om deze reden is uitgebreid onderzocht hoe bepaling van c plaats zou kunnen vinden en of deze benadering een bruikbare methode oplevert om de zichtdiepte en de extinctiecoëfficiënt te berekenen.

Absorptie en verstrooiing zijn de processen waar zowel de beam attenuation coefficient als de extinctiecoëfficiënt (en dus ook de zichtdiepte) door bepaald worden. Zichtdiepte en extinctie zijn dus gekoppeld via de absorptie- en scatteringscoëfficiënt van het water. De waarde van c en K hangen als volgt met de absorptie- en scatteringscoëfficiënt samen:

$$c = a + b \quad (8)$$

en

$$K = F(a, b) \quad (9)$$

waarbij

a absorptie coëfficiënt (m^{-1})
b scattering coëfficiënt (m^{-1})
F een functie die afhangt van de 'volume scattering function' (zie verder)

Kirk (1981a) vond voor K de volgende functie (behorend bij de 'volume scattering function' uit figuur 3.2):

$$K = \sqrt{a^2 + 0.256 ab} \quad (10)$$

wat, zolang de verhouding b/a niet al te sterk varieert, een vrijwel lineair verband oplevert van de vorm:

$$K = a + x * b \quad (11)$$

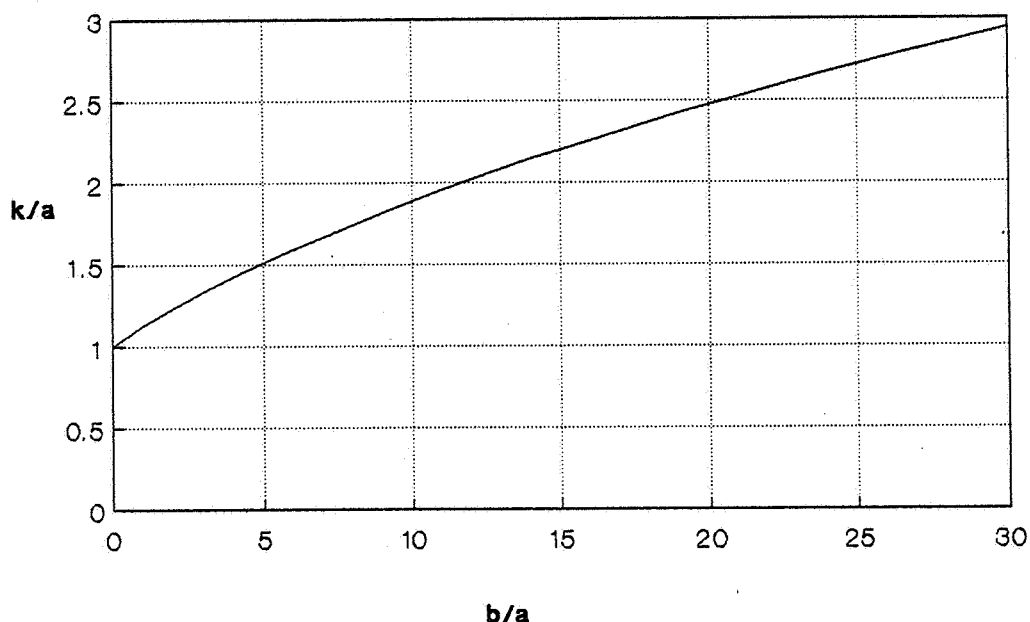
Dit is gemakkelijk in te zien door k/a uit te zetten tegen b/a. Uit vergelijking (10) volgt:

$$k/a = \sqrt{1.0 + 0.256 b/a}. \quad (12)$$

Uit figuur 3.1 blijkt duidelijk dat k/a , zolang b/a niet al te sterk varieert, ook goed beschreven kan worden volgens:

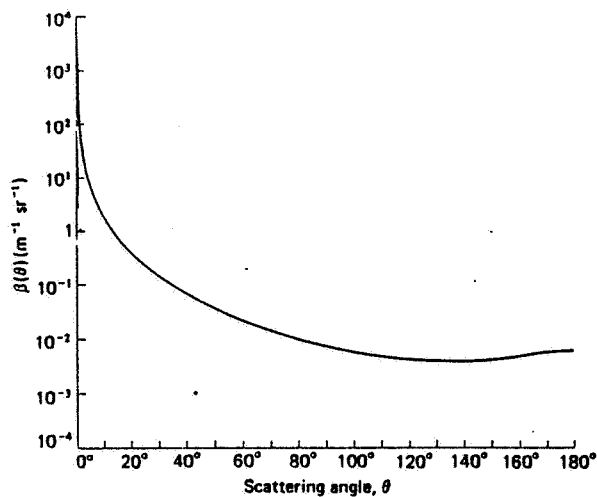
$$k/a = 1.0 + x * b/a \quad (13)$$

wat identiek is aan vergelijking (11)



Figuur 3.1.
Relatie tussen k/a en b/a volgens vergelijking (10)

De processen absorptie en verstrooiing bepalen volledig het gedrag van de fotonen, en de absorptie- en scatteringscoëfficiënt (die overigens wel golflengte-afhankelijk zijn) vormen daarmee de meest basale optische eigenschappen van het water. Naast de waarde van deze twee coëfficiënten, bepaalt ook de richting waarin de scattering plaatsvindt de mate van lichtdoordringing. De functie die de (relatieve) hoeveelheid verstrooiing van een lichtbundel onder verschillende hoeken ten opzichte van deze bundel weergeeft heet de '(normalized) volume scattering function' (VSF) (figuur 3.2), en werd hierboven al even genoemd.



Figuur 3.2.

De Volume Scattering Function voor het water in de haven van San Diego (uit Kirk, 1984). Duidelijk is de sterke nadruk op voorwaartse verstrooiing te zien.

Bepalen van a en b heeft het voordeel dat een (vrijwel) volledige beschrijving van het lichtklimaat onder water wordt verkregen. Samen met de VSF leggen zij niet alleen c, maar ook K eenduidig vast. Aangezien de VSF voor troebel water weinig variabel is, is een schatting van a en b voldoende om zowel K als c, en dus ook de zichtdiepte te bepalen.

Aangezien extinctiemetingen op veel plaatsen uitgevoerd worden, is gezocht naar methoden om de waarden van a en b hieruit af te leiden. Hiermee zou het mogelijk worden a en b middels regressie te relateren aan de bepalende factoren. In dat geval liggen ook K en c en de zichtdiepte vast en ontstaat een veel fundamentele beschrijving van het lichtklimaat dan door middel van rechtstreekse regressie van zichtdiepte en extinctie op de bepalende factoren wordt verkregen.

De mogelijkheden van deze aanpak zijn daarom uitvoerig onderzocht.

Uit vergelijkingen (10) en (11) is al duidelijk dat extinctiemetingen alleen niet voldoende zijn om a en b te bepalen, ook niet wanneer de VSF bekend is. Hiervoor is meting van minstens nog een variabele nodig en deze moet liefst eenvoudig uitvoerbaar zijn. Zo'n variabele is de interne reflectie (R) in het water, de verhouding tussen naar boven en naar beneden gericht licht. Deze is relatief eenvoudig te bepalen wanneer toch extinctiemetingen worden uitgevoerd, door op een of meer meetdiepten de kwantumfotometer omgekeerd te gebruiken.

Om deze reden zijn door verscheidene auteurs (Di Toro, 1978, Kirk, 1981a en 1981b) methoden bedacht om op grond van extinctie- en reflektiemetingen, met behulp van enkele aannamen

en vereenvoudigingen, de waarden van de absorptie- en scatteringscoëfficiënt te bepalen.

Zij maken daarvoor gebruik van de theorie van de optica om naast een relatie tussen a en b met K, ook een relatie tussen a en b met R te ontwikkelen. Hiervoor kwam al aan de orde dat a en b, gecombineerd met de VSF het gedrag van het licht onder water volledig bepalen. De vergelijking die de voortplanting van het licht (inclusief de verdeling over de verschillende richtingen) beschrijft, heet de 'radiative transfer equation'. Door voor een gegeven VSF de 'radiative transfer equation' op te lossen, kan in principe de relatie van a en b met K en R worden vastgesteld. De oplossing van de 'radiative transfer equation' is echter met analytische methoden niet mogelijk voor een willekeurige VSF.

Om verbanden tussen a en b met K en R af te leiden zijn daarom twee stappen nodig, namelijk het definieren van een realistische VSF en vervolgens het oplossen van de 'radiative transfer equation' voor die VSF.

Kirk en Di Toro hebben hiervoor verschillende oplossingen bedacht, die hieronder kort worden besproken. Op grond van de extinctie- en reflektiemetingen kunnen daarmee de waarden van a, b en c bepaald worden.

Tot nu toe is, voorzover bekend, in Nederland slechts in een meetreeks de reflectie naast de extinctie bepaald, namelijk gedurende 4 jaar voor de Reeuwijkse plassen. Deze gegevens zijn voorlopig overigens slechts in ruwe vorm beschikbaar. Toepassing van de methoden van Kirk of Di Toro heeft voor de Nederlandse situatie daarom nog niet plaatsgevonden.

3.4.1 Methode Di Toro

Di Toro's methode berust op een vereenvoudigde wiskundige formulering voor de vorm van de VSF. Hierdoor wordt de radiative transfer equation aanzienlijk vereenvoudigd.

In troebel water vindt een groot gedeelte van de verstrooiing plaats in (bijna) voorwaartse richting. De VSF kan daarom worden vereenvoudigd door deze opgebouwd te denken uit een isotrope fractie (evenveel verstrooiing naar alle richtingen) en een voorwaarts gerichte fractie.

Door deze vorm vast te leggen wordt de VSF aanzienlijk vereenvoudigd en ligt verder geheel vast door de fractie voorwaarts gerichte verstrooiing te specificeren.

Bij de oplossing van de 'radiative transfer equation' worden vervolgens twee benaderingen gevolgd. De eerste is gebaseerd op de aanname dat de uitdoving van het licht in alle richtingen en op alle diepten gelijk verloopt (de extinctiecoëfficiënt is dan dus onafhankelijk van de richting en van de diepte). Met behulp van deze aanname wordt de 'radiative transfer equation' aanzienlijk vereenvoudigd.

Uit vergelijking met de resultaten van Monte Carlo simulaties blijkt dat de aanname van diepte- en richting-onafhankelijke

uitdoving het gedrag van het licht goed weergeeft wanneer de zon recht boven het wateroppervlak staat.

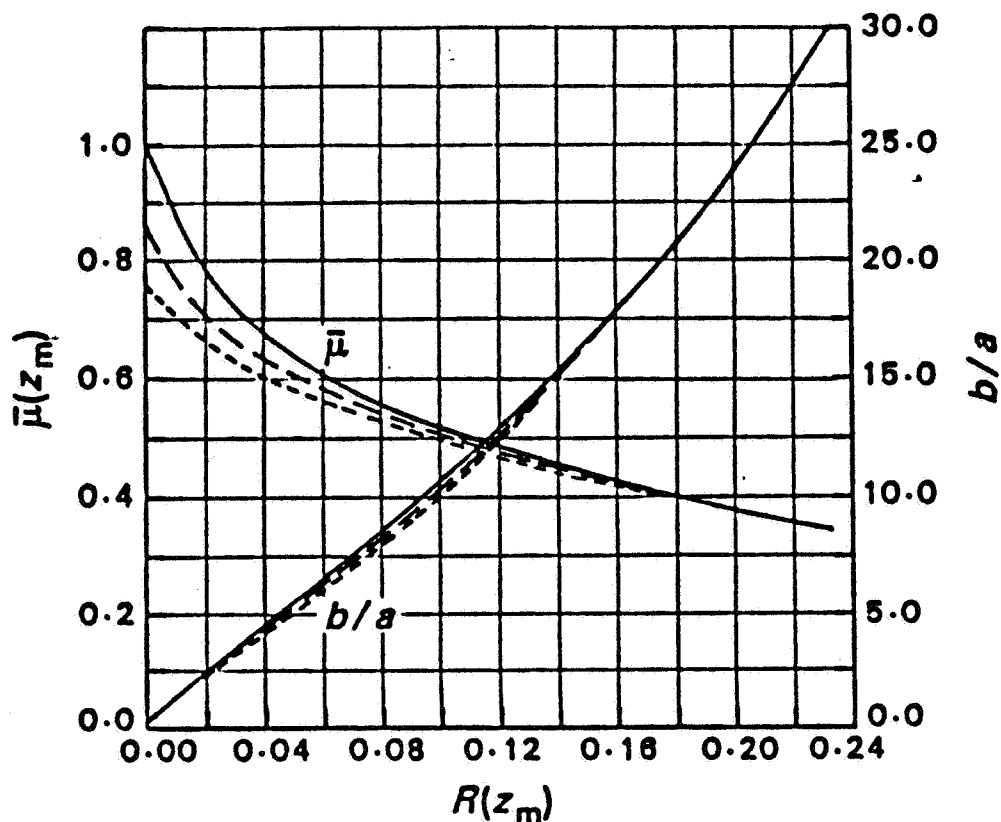
De tweede benadering is gebaseerd op de aanname van 'quasi-single-scattering'. Deze benadering is ook gebaseerd op de grote fraktie verstrooiing in voorwaartse richting. Er wordt aangenomen dat alle verstrooiing die niet richting oppervlak plaatsvindt, in voorwaartse richting plaatsvindt. De quasi-single-scattering benadering blijkt de invloed van de zonnehoogte goed weer te geven, terwijl deze bij de aanname van richting- en diepte-onafhankelijke exponentieel uitdoving geen effect heeft.

Door beide methoden te combineren vindt Di Toro een verband tussen a en b met K en R dat geldig is voor verschillende zonnehoogte en voor de situatie dat $R < 10\%$. De waarde van de absorptie-coëfficiënt kan uit K en R bepaald worden, zelfs zonder dat de fraktie voorwaarts gerichte verstrooiing bekend is. Bepaling van de scatteringscoëfficiënt vereist ook nog een schatting van de fraktie voorwaarts gerichte verstrooiing of van c . Door de eerste te schatten (en dus de VSF geheel vast te leggen) is het verband tussen a en b met K en R af te leiden. Met behulp van dit verband leidt Di Toro relaties af tussen a en b met de concentraties zwevend slib, detritus en chlorofyl.

3.4.2 Methode Kirk

De door Kirk (1981b) gevolgde methode gaat er van uit dat de VSF voor troebel water er altijd vrijwel hetzelfde uitziet. Voor de haven van San Diego is de VSF bepaald (figuur 3.2) en in een eerdere publicatie maakt Kirk (1981a) aannemelijk dat deze een goede algemene benadering is voor troebel water. Daarmee is het eerste probleem, het definiëren van de VSF, opgelost.

Voor het oplossen van de 'radiative transfer equation' maakt hij gebruik van Monte Carlo simulatie van het gedrag van individuele fotonen. De in dit verband belangrijkste resultaten van deze simulaties zijn de gevonden verbanden tussen reflectie, de 'average cosine' (μ) en de verhouding tussen scattering en absorptie, zoals die voor de gebruikte VSF gelden (figuur 3.3).



Figuur 3.3.
Relatie tussen μ , R en b/a in het midden van de eufotische zone (Z_m).

————— Vertikaal invallend licht
 Licht onder hoek van 45 graden met de vertikaal
 ----- Licht onder hoek van 60 graden met de vertikaal

Verder maakt hij gebruik van de relatie:

$$a = \mu * K_e \quad (14)$$

waarbij

a de absorptiecoëfficiënt (m^{-1})
 μ de gemiddelde cosinus van de hoek van de fotonen met de vertikaal (deze is gelijk aan de netto neerwaartse straling gedeeld door de straling gemeten met een bolvormige meter (= scalaire irradiantie))
 K_e de extinctiecoëfficiënt van de netto neerwaartse straling (straling neerwaarts min straling opwaarts) (m^{-1})

Op grond van vergelijking (14) en de in de figuur 3.3 weergegeven verbanden zijn de absorptie- en scatteringscoëfficiënt nu eenvoudig uit de extinctiecoëfficiënt en de reflectie te bepalen.

Bij de door Kirk gevolgde methode ligt de VSF dus volledig vast (en dit is ook nodig om de 'radiative transfer equation' met behulp van Monte Carlo simulatie te kunnen oplossen, terwijl Di Toro de verbanden afleidt voor een VSF waarvan wel de vorm vastligt maar niet de verhouding tussen isotrope en voorwaartse verstrooiing. Deze verhouding moet overigens wel bekend zijn om de scatteringscoëfficiënt met behulp van de gevonden verbanden te berekenen.

Overzicht van de twee besproken methoden		
	Methode Kirk	Methode Di Toro
Volume Scattering Function	Ligt geheel vast Gemeten (San Diego Harbour)	Vorm ligt vast Geïdealiseerd
Oplossing Radiative Transfer Equation	Monte Carlo simulatie	Analytisch, aannamen: Exponentieel uitdoving Quasi-single-scattering

3.4.3 Berekening van a, b, c, K en zichtdiepte

Met behulp van een van de twee hierboven geschetste methoden kunnen de absorptie- en scatteringcoëfficiënt uit extinctie- en reflectiemetingen afgeleid worden. Hierdoor kan, zonder de absorptie en verstrooiing in het veld te hoeven meten, een verband worden ontwikkeld voor de relatie van absorptie- en scatteringcoëfficiënt (en dus ook c), met de bepalende factoren:

$$a = a_1 * C + a_2 * D + a_3 * S + a_4 \quad (15)$$

$$b = b_1 * C + b_2 * D + b_3 * S + b_4 \quad (16)$$

$$c = (a_1 + b_1) * C + (a_2 + b_2) * D + (a_3 + b_3) * S + (a_4 + b_4) \quad (17)$$

Toro of Kirk. Wanneer K gemeten is levert deze benadering in principe een betere schatting van de zichtdiepte op dan gebruikmaking van vergelijking (19) of (7) omdat slechts de fraktie van de reciproke zichtdiepte die samenhangt met c via regressie bepaalt hoeft te worden in plaats van beide frakties.

Er zijn echter twee redenen waarom rechtstreekse regressie van de reciproke zichtdiepte op de bepalende factoren (vergelijking (7)) toch voordelen biedt.

Ten eerste is slechts een gegevensset beschikbaar voor de regressie van c op de bepalende factoren. Dit kan immers alleen gebeuren wanneer naast de extinctie ook de reflectie gemeten is, en vooralsnog is dat alleen gebeurd in de Reeuwijkse plassen. De nauwkeurigheid en geldigheid van deze regressievergelijking zal daarom kleiner zijn dan van vergelijking (7)

Ten tweede is bepalen van de zichtdiepte als extinctiemetingen beschikbaar zijn zelden interessant. Zichtdieptemetingen zijn dan vrijwel altijd ook beschikbaar. Wel is het zo dat bij lage zichtdiepten berekening van de zichtdiepte betrouwbaarder kan worden dan rechtstreekse meting ervan, vanwege de onnauwkeurigheid die inherent is aan de zichtdieptemetingen.

3.5 KONKLUSIE

De relatie tussen zichtdiepte en extinctie is veel minder rechtstreeks dan doorgaans verondersteld wordt. Om de mogelijkheden van het gebruik van een dergelijke relatie te onderzoeken is gezocht naar nieuwe wegen om deze relatie op grond van de huidige theorie over het gedrag van licht in water te kunnen bepalen.

Om te komen tot een integraal lichtmodel, waarmee naast de relatie tussen extinctie en zichtdiepte, ook de absorptie-, scattering- en beam attenuation-coëfficiënt kunnen worden bepaald, zijn metingen van de interne reflectie in het water, naast extinctiemetingen, essentieel.

Wanneer we alleen kijken naar de nauwkeurigheid van de extinctieschattingen biedt berekening op grond van de zichtdiepte met behulp van dit model echter geen voordelen boven een rechtstreekse regressie van de extinctie op bepalende factoren (concentraties gesuspendeerd en opgelost materiaal).

Voor wateren waarvoor extinctiemetingen beschikbaar zijn, levert gebruik van een dergelijk lichtmodel een nauwkeuriger schatting van de zichtdiepte op dan door middel van een rechtstreekse regressie van de zichtdiepte op de bepalende factoren verkregen wordt. Voor lage zichtdiepten is deze schatting waarschijnlijk nauwkeuriger dan rechtstreekse meting van de zichtdiepte. Bovendien biedt het model een meer volledige beschrijving van de relaties tussen de verschillende variabelen.

Gezien de beperkte beschikbaarheid van reflectiemetingen is toepassing van een lichtmodel vooralsnog niet goed uitvoerbaar. Wanneer een dergelijk model alleen gebruikt zou worden om de zichtdiepte te berekenen wanneer de extinctie al bekend is (en men niet geïnteresseerd is in de onderlinge relaties en de waarden van de absorptie- scattering- of beam attenuation-coëfficiënt) is deze aanpak vergelijkbaar met het schieten met een geweer op een mug.

Rechtstreekse regressie van zowel de extinctie als de reciproke zichtdiepte op de concentraties opgelost en gesuspendeerd materiaal, zonder gebruik te maken van het verband tussen de twee, lijkt daarom voorlopig het meest aan te bevelen. Het verband van de Poole-Atkins coëfficiënt met de bepalende factoren ligt daarmee ook vast.

Wanneer naast een reeks zichtdieptemetingen ook enkele gecombineerde zichtdiepte- en extinctie-metingen beschikbaar zijn, kunnen de zichtdieptemetingen wel gebruikt worden om een betrouwbaarder interpolatie tussen de extinctiemetingen uit te voeren (met behulp van een plaats- en tijdsspecifieke Poole-Atkins coëfficiënt).

4.0 TOEPASSING IN DE PRAKTIJK

4.1 INLEIDING

Op grond van de in de voorgaande hoofdstukken weergegeven argumenten, is besloten dat, om te komen tot betrouwbare voorspellingen van zichtdiepte en extinctie, het afleiden van verbanden met de concentraties in het water opgelost en gesuspendeerd materiaal de beste mogelijkheden biedt.

In hoeverre dergelijke verbanden algemene geldigheid bezitten of in hoeverre zij meer-specifiek zullen zijn, is echter op grond van de theorie niet op voorhand te voorspellen. De voor de verschillende frakties gevonden coëfficiënten kunnen immers variëren met de samenstelling van deze frakties. Hierom worden eerst voor een aantal verschillende meren dergelijke verbanden opgesteld. Daarna zullen de resultaten voor de verschillende meren worden vergeleken, en kan besloten worden of de coëfficiënten voor de verschillende meren al dan niet significant van elkaar verschillen.

In dit en het volgende hoofdstuk worden achtereenvolgens het verzamelen en het analyseren van de daartoe benodigde gegevens besproken.

4.2 GEGEVENSVERZAMELING

Het afleiden van verbanden tussen zichtdiepte en extinctie met de concentraties van in het water opgelost en gesuspendeerd materiaal, is, op verzoek van DBW/RIZA, gericht geweest op de volgende meren:

Rijkswateren:

- IJsselmeer
- Markermeer
- IJmeer
- Veluwemeer
- Wolderwijd
- Eemmeer
- Gooimeer
- Zwartemeer
- Haringvliet
- Volkerakmeer
- Zoommeer

REGIONALE WATEREN

- Slotermeer
- Tjeukemeer

- Sneekermeer
- Fluessen
- Westeinder
- Braassemermeer
- Brielse meer

Voor deze meren is gezocht naar metingen van zichtdiepte en extinctie, gecombineerd met metingen van de concentraties van zwevend en opgelost materiaal. Op grond van hun verwachte invloed op de zichtdiepte en extinctie, zou het wenselijk zijn, gecombineerd met de zichtdiepte en extinctie, de waarde te weten van de concentratie gesuspendeerd anorganisch materiaal, algenbiomassa, detritusconcentratie (hier: gesuspendeerd dood organisch materiaal) en 'humuszuren' (opgelost organisch materiaal).

Er is daarom gezocht naar gecombineerde metingen van gloei- of as-rest (als maat voor de anorganische zwevende fractie), chlorofylconcentratie (als maat voor de concentratie levende algen), totaal drooggewicht (om asvrij drooggewicht te bepalen) en DOC. De detritusconcentratie kan dan geschat worden als asvrij drooggewicht minus algenbiomassa, waarbij algenbiomassa berekend wordt middels een conversie van chlorofyl naar algendrooggewicht. Voor deze conversie is uitgegaan van een drooggewicht / chlorofyl verhouding van 70, als een redelijk gemiddelde. Overigens is de gevoeligheid van de onderzochte relaties voor een afwijkende waarde van deze verhouding zeer gering, en heeft alleen betrekking op de detritus fractie.

Bij het zoeken naar zichtdiepte- en extinctiemetingen, is de voorwaarde gesteld dat gloeirest, chlorofyl en asvrij drooggewicht ook gemeten moesten zijn. De meting van DOC bleek in veel gevallen niet uitgevoerd, en beperking tot alleen die gegevens waar ook DOC gemeten is, leek dan ook niet verstandig. Extinctiemetingen zijn zo schaars, dat in eerste instantie ook naar gegevens gezocht is waar niet alle bovengenoemde fracties gemeten waren. Deze werden gevonden voor Westeinder, Braassemermeer en Sneekermeer. Gezien de onvolledigheid en de relatief geringe omvang van deze meetreeksen zijn deze echter buiten deze studie gebleven.

Een aantal gegevens was daarnaast niet op tijd aanwezig om nog in deze analyse meegenomen te worden.

In tabel 4.1 is weergegeven voor welke meren bruikbare gegevenssets zijn gevonden, en wordt de bron van deze gegevens vermeld.

Voor alle WAKWAL-gegevens is het jaar 1986 buiten beschouwing gelaten, aangezien de chlorofylbepalingen voor dat jaar onbetrouwbaar zijn. Gezien de beperkte beschikbaarheid van extinctiemetingen voor de onderzochte meren, is verder een uitgebreide gegevensset van de Reeuwijkse plassen toegevoegd voor de jaren '83 tot en met '86, afkomstig van het Waterkwaliteitsonderzoek Reeuwijkse plassen, uitgevoerd door Hoogheemraadschap van Rijnland / RIVM (van der Vlugt, Klapwijk en van Dijk, 1986).

Tabel 4.1	Overzicht van de gebruikte gegevens			
Locatie	extinctie		zichtdiepte	
	bron	periode	bron	periode
IJsselmeer	-	-	W	80-87
Markermeer	R	82-85	W R	80-87 82-85
IJmeer	-	-	W	80-87
Veluwemeer	R	78-84	W R	80-87 78-84
Wolderwijd	R	78-84	W R	80-87 78-84
Eemmeer	R	77-78	W R	80-87 73-78
Gooimeer	-	-	W	80-87
Zwartemeer	-	-	W	80-87
Haringvliet	E	87	W	80-87
Volkerakmeer	-	-	W	80-87
Zoommeer	-	-	W	80-87
Westeinder	-	-	h	86-87
Braassemermeer	-	-	h	86-87
Reeuwijkse plassen	H	83-86	H	83-86

W = Dienst Binnenwateren / RIZA (WAKWAL-gegevens)
 R = Rijksdienst IJsselmeer polders
 E = Dienst Binnenwateren / RIZA
 h = Hoogheemraadschap van Rijnland
 H = Hoogheemraadschap van Rijnland / RIVM

5.0 GEGEVENS ANALYSE

5.1 INLEIDING

Bij het zoeken naar verbanden tussen extinctie (k) of reciproke zichtdiepte (rsd) met in het water opgelost en gesuspendeerd materiaal, is het allereerst noodzakelijk te bepalen welke frakties onderscheiden zullen worden.

Hiervoor zijn in ieder geval drie belangrijke criteria aanwezig, te weten:

1. De beschikbaarheid van meetgegevens voor de desbetreffende frakties
2. De fysische interpreteerbaarheid van de voor de frakties afgeleide coëfficiënten
3. De mate waarin de fraktie bijdraagt tot het verklaren van de variantie van k of rsd

Punt 1 is hiervoor al even ter sprake gekomen. Op grond van de beschikbare meetgegevens en het verwachte belang voor k en rsd is besloten de analyse in ieder geval te beperken tot de volgende frakties:

- droogrest
- gloeirest
- chlorofyl
- eventueel hiervan af te leiden frakties (asvrij drooggewicht of detritus)

Op grond van de te verwachten invloed op k en rsd zou verder het opgelost organisch koolstof (DOC) opgenomen kunnen worden. Hiervan zijn echter helaas veel minder gegevens beschikbaar dan voor de andere frakties. Om deze reden wordt DOC niet als aparte fraktie opgenomen. Wel worden bij alle regressies ook resttermen bepaald, waarin vooral de invloed van DOC tot uiting komt (plus de invloed van water met de daarin opgeloste anorganische bestanddelen, maar deze is erg klein).

Daarnaast kan in de resttermen ook (een gedeelte van) de invloed van de droogrest, gloeirest of chlorofyl tot uiting komen. Dit is gemakkelijk als volgt in te zien. Wanneer bijvoorbeeld de gloeirest een konstante waarde heeft, wordt er geen verband gevonden tussen de gloeirest en de zichtdiepte of de extinctie. De (konstante) invloed van de gloeirest komt dan geheel tot uiting in de (konstante) restterm. Hetzelfde treedt op als de zichtdiepte of extinctie zelf weinig variatie vertoont.

Met punt 2 wordt bedoeld, dat een meervoudige regressie van k of rsd met de droogrest, gloeirest en chlorofyl, leidt tot coëfficiënten die niet corresponderen met de specifieke extinctiecoëfficiënten van deze frakties, omdat de frakties elkaar overlappen (gloeirest en chlorofyl maken immers beide deel uit van het drooggewicht). Om dit te voorkomen dienen de te

onderscheiden frakties elkaar dus niet te overlappen, en is een combinatie van gloeirest en asvrij drooggewicht dus bijvoorbeeld te verkiezen boven een combinatie van gloeirest en totaal drooggewicht (Beide relaties verklaren overigens precies hetzelfde gedeelte van de variantie in k of rsd. Dit volgt uit het feit dat asvrij drooggewicht wordt berekend als totaal drooggewicht minus de gloeirest. De informatie-inhoud van beide combinaties van variabelen is dus gelijk).

Op grond van deze criteria zijn de volgende combinaties van frakties denkbaar:

- chlorofyl + restterm
- detritus + restterm
- asvrij drooggewicht + restterm
- gloeirest + restterm
- totaal drooggewicht + restterm
- gloeirest + chlorofyl + restterm
- gloeirest + asvrij drooggewicht + restterm
- gloeirest + detritus + restterm
- chlorofyl + detritus + restterm
- gloeirest + chlorofyl + detritus + restterm

5.2 VERKENNENDE DATA-ANALYSE

De combinaties die op grond van criteria 1 en 2 zijn vastgesteld zijn vervolgens getoetst aan de hand van criterium 3 : de mate waarin zij de waargenomen variantie in k of rsd kunnen verklaren.

De verwachting hierbij was dat het opnemen van meer frakties het verband zal verbeteren, aangezien hierdoor de variatie in samenstelling van de onderscheiden frakties kleiner wordt. Verder valt te verwachten dat bij de enkelvoudige verbanden het totaal drooggewicht als beste uit de bus zal komen, aangezien hierin het effect van alle andere frakties is samengevat.

In tabel 5.1 en 5.2 zijn de resultaten van deze analyse weergegeven. Voor iedere beschikbare gegevensset is een correlatie-analyse uitgevoerd voor alle mogelijke combinaties van de te onderscheiden frakties, en voor ieder van deze is de fraktie verklaarde variantie van k en sd weergegeven.

Er valt op dat het totaal drooggewicht inderdaad in bijna alle gevallen de beste resultaten geeft van de enkelvoudige verbanden, terwijl de combinatie gloeirest, chlorofyl en detritus de beste resultaten geeft van alle combinaties. In enkele gevallen is de verklaarde variantie ten gevolge van een andere combinatie echter groter dan die van deze drie frakties, wat op het eerste gezicht uiterst merkwaardig lijkt. Immers, iedere andere combinatie is, bij de gevolgde berekeningsmethode impliciet ook in de combinatie van deze drie variabelen aanwezig. Een andere combinatie zou dus wel minder maar nooit meer van de waargenomen variantie verklaren. Deze schijnbare tegenstrijdigheid wordt veroorzaakt door het feit dat in een aanzienlijk deel van de

metingen de waarnemingen voor chlorofyl ontbreken. De verbanden waar chlorofyl en detritus ontbreken zijn dus op andere (meer) gegevens gebaseerd dan het verband met deze drie frakties. In de meeste gevallen blijkt echter dit laatste verband het grootste gedeelte van de variantie te verklaren, zoals verwacht. Bovendien zijn de verschillen voor de gevallen waarin drooggewicht alleen het beter doet klein.

Het meervoudige verband is verder zowel vanuit theoretisch oogpunt als vanuit beheers oogpunt het meest interessant, omdat het de invloeden van de verschillende frakties kan onderscheiden. Uit deze verkennende analyse blijkt dat het ook vanuit statistisch oogpunt het meest veelbelovend is. Daarnaast is het verband met drooggewicht alleen, vanwege de grote eenvoud gepaard aan redelijk tot goede resultaten, een goede tweede. De andere verbanden zullen hier daarom verder buiten beschouwing worden gelaten.

Uit deze analyse blijkt verder dat een aanzienlijk deel van de waargenomen variantie met modellen als deze verklaard kan worden, maar dat toch ook een aanzienlijk deel onverklaard blijft. Alhoewel de ontwikkelde verbanden een zinvolle methode lijken om k en rsd op grond van het opgelost en gesuspenseerd materiaal te schatten, kunnen hiervan dus (helaas) geen wonderen worden verwacht.

5.3 REGRESSIE ANALYSE

Voor zowel de reciproke zichtdiepte als voor de extinctie, zijn voor alle beschikbare datasets de specifieke extinctie-coëfficiënten en 'reciproke-zichtdiepte-coëfficiënten' bepaald voor de frakties gloeirest, chlorofyl, detritus en drooggewicht, samen met de achtergrond extinctie en 'achtergrond reciproke zichtdiepte'.

Zowel de verklaarde als de verklarende variabelen, zijn in dit geval gemeten grootheden, en dus aan onzekerheid onderhevig. Bij het uitvoeren van de regressie analyse wordt geen rekening gehouden met de onzekerheid in de verklarende variabelen, en deze blijft hier dus buiten beschouwing.

Dat steeds met reciproke zichtdiepte gewerkt wordt in plaats van met de reële zichtdiepte, zou op het eerste gezicht bezwaarlijk kunnen lijken. Een dergelijke transformatie beïnvloedt immers de uitkomsten van een regressie analyse, en de best passende vergelijking voor de reciproke zichtdiepte zal daardoor afwijken van de best passende vergelijking voor de reële zichtdiepte. Zoals in deel 1 van dit verslag aan de orde is gekomen, is de reciproke zichtdiepte echter een veelzeggender maat voor het lichtklimaat onder water, en de transformatie werkt daardoor als een voordeel in plaats van een nadeel. Overigens betekent dit dat een verschil in voorspelde en waargenomen zichtdiepte tussen 20 en 25 cm. even 'ernstig' beschouwd wordt als een verschil tussen 50 en 100 cm. (!), terwijl zonder transformatie een verschil tussen 20 en 25 cm. even ernstig is als een verschil tus-

sen 95 en 100 cm. Op de konsekwenties die dit heeft voor het gebruik van de gevonden verbanden voor het voorspellen van hoge zichtdieptes wordt later nog teruggekomen.

5.4 RECIPROKE ZICHTDIEPTE

De door middel van regressie gevonden verbanden van rsd met totaal drooggewicht en met gloeirest, chlorofyl en detritus, zijn weergegeven in tabellen 5.3 en 5.4. Achter ieder gevonden verband wordt nogmaals de fraktie van de door dit verband verklaarde variantie vermeld samen met het aantal waarnemingen waarop het verband is gebaseerd. Voor het IJmeer zijn de RIJP-gegevens en de WAKWAL-gegevens gecombineerd, omdat beide gegevenssets erg klein waren. Voor het Veluwemeer, Markermeer, Wolderwijd en Eemmeer zijn de RIJP-gegevens en de WAKWAL-gegevens apart geanalyseerd.

Wat hierbij als eerste opvalt is dat de coëfficiënten voor de verschillende meren aanzienlijke verschillen kunnen vertonen. Deze verschillen kunnen veroorzaakt worden door verschil in samenstelling van de verschillende meren, maar zouden ook een artefact van de gevolgde methode kunnen zijn, veroorzaakt door de onzekerheid in de gevonden verbanden. Om hier meer inzicht in te krijgen zijn de gevonden coëfficiënten weergegeven met hun 95 % betrouwbaarheidsintervallen, in figuur 5.1 tot en met 5.4 voor het verband gloeirest, chlorofyl en detritus. De resultaten worden hieronder kort besproken.

5.4.1 Verband met gloeirest, chlorofyl en detritus

Het Haringvliet, de Westeinder en het Braassemermeer nemen een wat bijzondere plaats in bij de gehele analyse; de betrouwbaarheidsintervallen voor de coëfficiënten zijn steeds erg groot, en de waarden van de coëfficiënten vormen dan ook regelmatig de uitschieters. Voor het Braassemermeer is voor een aantal coëfficiënten geen betrouwbaarheidsinterval weergegeven. In deze gevallen was het betrouwbaarheidsinterval zo groot dat het niet binnen de gebruikte schaal kon worden afgebeeld. Dat deze meren een zo afwijkend beeld vertonen wordt waarschijnlijk veroorzaakt door het zeer geringe aantal beschikbare metingen waar alle drie de frakties in voorkomen (voor Westeinder en Braassemermeer respectievelijk 10 en 9, en voor het Haringvliet 29). Deze gegevenssets vormen daarmee de kleinste die gebruikt zijn. Aan de resultaten voor deze meren dient daarom niet al te veel waarde worden toegekend.

De coëfficiënten voor de gloeirest variëren over een groot traject. De betrouwbaarheidsintervallen vertonen enige overlap.

maar er lijkt tussen de verschillende meren toch een aanmerkelijke variatie te bestaan.

De spreiding in de coëfficiënten voor chlorofyl is veel kleiner dan die voor de gloeirest, maar ook de betrouwbaarheidsintervallen zijn hier veel kleiner, waardoor toch een geringe overlap optreedt. De verschillen tussen de meren zouden samen kunnen hangen met verschillen in algensoortensamenstelling en/of chlorofyl-drooggewicht verhoudingen van de algen ten gevolge van verschillen in groei beperking. Het is echter vooralsnog niet duidelijk of de verschillen tussen de meren wat betreft soortensamenstelling en/of groei beperking inderdaad overeenkomen met het verschil in gevonden coëfficiënten.

Opvallend is verder het verschil tussen de coëfficiënten gebaseerd op de WAKWAL-gegevens ten opzichte van die gebaseerd op de RIJP-gegevens. Voor zowel Markermeer, Veluwemeer, Wolderwijd als Eemmeer is de coëfficiënt voor de WAKWAL-gegevens in alle gevallen anderhalf tot twee maal zo groot als voor de RIJP-gegevens. Dit verschil wordt waarschijnlijk veroorzaakt door verschil in de gebruikte meetmethoden.

Voor de detrituscoëfficiënten ligt de situatie heel anders. Hier is de spreiding van de coëfficiënten groot (vergelijkbaar met die voor de gloeirest), maar de betrouwbaarheidsintervallen zijn ook erg groot (veel groter dan die voor de gloeirest coëfficiënten).

De grote betrouwbaarheidsintervallen worden waarschijnlijk veroorzaakt door de indirecte methode waarmee de detritusfractie is berekend, namelijk als het verschil tussen het asvrij drooggewicht en een naar drooggewicht omgerekende chlorofyl concentratie. De waarden voor de detritus fractie worden daardoor beïnvloed door de meetfouten in zowel het totaal drooggewicht, de gloeirest (die beide gebruikt worden om het asvrij drooggewicht te berekenen) en het chlorofyl gehalte, en bovendien komt daar de onzekerheid ten gevolge van de omrekening van chlorofyl naar algen biomassa nog bij.

De spreiding in de resttermen of de reciproke 'achtergrondzichtdiepten', dienen anders geïnterpreteerd te worden dan de coëfficiënten voor de verschillende frakties. De spreiding van de andere coëfficiënten wordt (behalve door onzekerheden ten gevolge van meetfouten) immers veroorzaakt door verschillen in de samenstelling van de frakties en hun daardoor verschillende invloed op r_{sd} . Voor de resttermen speelt echter waarschijnlijk de absolute hoeveelheid van het aanwezig opgelost organisch materiaal een veel grotere rol dan verschillen in de samenstelling daarvan (zie verder).

De resttermen vertonen een in verhouding tot de andere coëfficiënten geringe spreiding, op de 'beruchte drie' (Haringvliet, Westeinder, Braassemmeer) en het Eemmeer na. Toch lijkt ook hier, gezien de relatief kleine betrouwbaarheidsintervallen, er verschil tussen de meren te bestaan. De hoge waarde voor het Eemmeer zou kunnen duiden op een grotere hoeveelheid opgelost organisch materiaal, en die voor het Haringvliet op een lagere hoeveelheid.

5.4.1.1 Vergelijking van de gevonden verbanden

De voorgaande beschrijving van de relaties voor de verschillende meren geeft een overzicht van de factoren die de meeste variatie tussen de meren veroorzaken, maar is tegelijkertijd enigszins 'uit de losse hand'.

Er is daarom ook nog statistisch getoetst of de gevonden verbanden een significant beter resultaat opleveren dan het gebruik van een algemeen verband voor alle data tesamen. Voor een dergelijke vergelijking is de meest voor de hand liggende maat de afwijking tussen waarnemingen en voorspellingen. Daarom is eerst voor alle gegevens samen eenzelfde regressie uitgevoerd tussen reciproke zichtdiepte en de gloeirest-, chlorofyl- en detritus-fraktie. Dit levert het volgende verband:

$$1/SD = .034*glrest + .0096*chl + .039*detrit + 1.169 \quad (21)$$

$$R^2 = .51, \quad N = 1878$$

Daarna is onderzocht of de afwijking van dit verband met de waarnemingen significant groter is dan de afwijkingen voor de voor ieder meer afzonderlijk afgeleide verbanden. De toetsingsgrootte hiervoor is de residuele variantie van het algemene verband gedeeld door de residuele variantie van de afzonderlijke verbanden. Voor alle meren samen is deze significant ($p < 0.025$). Door voor ieder meer een aparte regressievergelijking te gebruiken wordt dus een significant beter resultaat bereikt dan wanneer een algemeen verband gebruikt zou worden. Daarnaast is voor ieder meer afzonderlijk nagegaan of het voor dat meer gevonden verband significant betere resultaten oplevert dan het algemene verband toegepast op dat meer. De resultaten van deze vergelijking worden weergegeven in tabel 5.5.

5.4.1.2 Bijdragen aan reciproke zichtdiepten

Verschillen in het lichtklimaat tussen de meren kunnen zowel veroorzaakt worden door variatie in de samenstelling van de onderscheiden frakties (leidend tot verschillende regressie-coëfficiënten), als door variatie in de concentratie van de frakties. De reciproke zichtdiepte wordt immers bepaald door het produkt van deze twee. Om een beeld te geven van de bijdragen aan de reciproke zichtdiepte door de verschillende frakties, zijn deze produkten voor alle meren berekend, gebruikmakend van de gemiddelde concentratie voor de frakties, en met behulp van de uit de regressie-analyse gevonden coëfficiënten.

De resultaten zijn samengevat in figuur 5.5. Duidelijk blijkt hieruit de grote invloed van de restterm, die bijna de helft van de reciproke zichtdiepte uitmaakt. Ook blijkt dat de relatieve

bijdrage van de frakties voor de onderzochte meren enorme variatie vertoont. Zo wordt in Veluwemeer en Wolderwijd rsd voor een groot deel door de chlorofyl-fractie bepaald, terwijl in het IJmeer vooral de invloed van de gloeirest van belang is.

5.4.2 Verband met drooggewicht alleen

De coëfficiënten voor de drooggewicht fractie vertonen een relatief geringe spreiding (al vormt het Zwartemeer een uitschieter), maar ook de betrouwbaarheidsintervallen zijn klein (figuur 5.6). Ook hier komen de verschillen tussen de meren dus tot uiting in de coëfficiënten.

De resttermen vertonen een beeld dat geheel vergelijkbaar is met de resttermen uit het verband met gloeirest, chlorofyl en detritus (figuur 5.7). Bij een nadere vergelijking blijkt dat alleen bij het Veluwemeer de twee betrouwbaarheidsintervallen elkaar niet overlappen, terwijl bij alle andere meren de overlap vrijwel compleet is.

De overeenstemming in de waarden van de resttermen, vormt een aanwijzing dat deze resttermen inderdaad een werkelijke achtergrond-invloed weergeven.

5.4.3 De invloed van DOC

Eerder is al ter sprake gekomen dat verwacht mag worden dat in de resttermen zoals die in de regressievergelijkingen gevonden worden, vooral de invloed van opgelost organisch koolstof (DOC) tot uiting komt. Om deze verwachting te toetsen zijn voor de WAKWAL-gegevens de gemiddelde DOC-waarden per meer berekend met hun standaardfout, en zijn deze vergeleken met de gevonden resttermen (con).

Locatie	con	DOC	st.fout	N
Haringvliet	.667	4.076	.09	88
IJsselmeer	.944	6.529	.09	174
Markermeer	1.736	7.274	.14	72
Veluwemeer	1.058	7.434	.07	344
Wolderwijd	1.593	7.739	.14	173
IJmeer	1.254	7.902	.12	63
Gooimeer	1.732	11.111	.18	84
Zwartemeer	2.207	11.637	.33	86
Eemmeer	2.936	12.444	.24	84

Deze gegevens leiden tot het volgende verband:

$$\text{con} = 0.229 * \text{DOC} - 0.366, \quad R^2 = 0.77, N = 9. \quad (22)$$

Het verband tussen DOC en de gevonden resttermen lijkt dus inderdaad duidelijk aanwezig. Zoals al eerder opgemerkt, hangt de restterm ook af van de variatie in chlorofyl-gehalte, gloeirest en detritus. Wanneer deze variatie kleiner is komt een groter gedeelte van de invloed van deze factoren in de restterm tot uiting. Het gevonden verband tussen DOC en resttermen betekent dan ook niet dat de restterm geheel door DOC bepaald wordt. Wel is het een aanwijzing dat DOC inderdaad een belangrijke invloed op de resttermen heeft.

Overigens zij hier opgemerkt dat opnemen van DOC in de regressievergelijkingen voor de verschillende meren, waarschijnlijk slechts een geringe verbetering van de gevonden verbanden per meer zou betekenen. De variatie in DOC is namelijk vooral hoog tussen de verschillende meren. Binnen de bovengenoemde meren zelf varieert DOC veel minder.

5.4.4 Bruikbaarheid van de gevonden relaties

De afgeleide relaties hebben tot doel om de zichtdiepte zo nauwkeurig mogelijk te voorspellen.

De gevonden relaties zijn afgeleid aan de hand van de beschikbare meetgegevens voor de verschillende meren. Dit betekent dat voorzichtigheid geboden is bij extrapolatie van deze verbanden buiten het door de meetgegevens omvatte bereik. Met name lijkt dit het geval te zijn voor het voorspellen van de zichtdiepte bij lage concentraties van de gloeirest, chlorofyl en detritus.

Bovendien zijn de verbanden afgeleid voor de reciproke zichtdiepte. Bij grote zichtdieptes treedt daardoor een probleem op. Uit de resttermen in de vergelijkingen volgt immers al een maximale zichtdiepte (= minimale reciproke zichtdiepte) die door het gevonden verband in de meest 'gunstige' positie (gloeirest = 0, chlorofyl = 0, detritus = 0) voorspeld wordt. Dit betekent dus dat volgens de gevonden verbanden nooit een hogere zichtdiepte op zal treden dan de reciproke waarde van de resttermen.

De vraag is dan natuurlijk of deze achtergrond-zichtdiepte inderdaad een reële eigenschap van de onderzochte meren is, of een artefact van de gebruikte methode om de relaties te ontwikkelen. Waarschijnlijk spelen beide zaken een rol.

Aan de ene kant is het een gevolg van het feit dat de verbanden worden afgeleid voor de reciproke zichtdiepte. Hierdoor spelen bij het bepalen van de best passende vergelijking, de afwijkingen bij hoge zichtdiepten een veel kleinere rol dan de afwijkingen bij lage zichtdiepten. Met andere woorden; welk verband het best de meetgegevens reproduceert wordt in veel sterkere mate bepaald door de lage dan door de hoge zichtdieptemetingen. Daar komt nog bij dat in de meeste meren slechts bij weinig metingen een hoge zichtdiepte gevonden is. Op grond

hiervan valt dus al te verwachten dat de voorspellingen steeds onnauwkeuriger worden bij hogere zichtdiepten.

Aan de andere kant lijkt het verband met DOC erop te wijzen dat de gevonden resttermen voor de huidige situatie wel degelijk een reële eigenschap van de meren te zijn. In ieder geval lijkt het zo te zijn dat de afgeleide verbanden slechts geldig zijn zolang de DOC-gehalten niet te veel zullen veranderen.

De relatie tussen de gemeten zichtdiepte en de door de regressievergelijking voorspelde zichtdiepte is voor het Veluwemeer (weinig metingen van hoge zichtdiepte) en voor de Reeuwijkse plassen (veel metingen), weergegeven in figuur 5.8 en 5.9. Uit deze figuren blijkt duidelijk dat bij gemeten zichtdiepten boven ongeveer 50 centimeter, de voorspellingen achter gaan blijven bij de metingen. Bij de Reeuwijkse plassen gebeurt dit iets later dan bij het Veluwemeer. Hiervoor zijn echter ook veel meer metingen van grotere zichtdiepten gedaan.

Een uitweg uit het probleem zou in principe kunnen zijn om voor ieder meer twee verschillende verbanden af te leiden, voor lage zichtdiepten en voor hoge zichtdiepten. (Deze aanpak wordt gevolgd in de volgende paragraaf, met het Veluwemeer als voorbeeld.) Het grote probleem hierbij is echter dat voor de meeste meren slechts zeer weinig metingen van hoge zichtdiepten beschikbaar zijn. Het op deze manier afgeleide verband voor de hoge zichtdiepten zal daardoor ook niet erg betrouwbaar zijn, al zal het wel beter de metingen reproduceren.

Voorlopig lijkt het gebruik van de hier afgeleide verbanden daarom toch het best haalbare, waarbij helaas de betrouwbaarheid bij grotere zichtdiepten snel afneemt. Zijn er aanwijzingen dat in een meer naast de concentraties van de gloeirest, chlorofyl en detritus ook het DOC-gehalte zal veranderen, dan lijkt aanpassing van de restterm op grond van het hiervoor afgeleide verband nog een verantwoorde mogelijkheid te bieden om het geldigheidsgebied van de afgeleide verbanden enigszins te vergroten.

5.4.5 Mogelijke verbeteringen

Hierboven werd opgemerkt dat het ontwikkelen van meerdere regressievergelijkingen voor een meer, voor hoge en lage zichtdiepten afzonderlijk, mogelijk tot verbeteringen zou kunnen leiden. Deze methode is als voorbeeld op de RIJP-gegevens van het Veluwemeer toegepast. De 'knik' in de punten van figuur 5.8 lijkt bij zichtdiepten van ongeveer 40 cm. te liggen. Voor dezelfde data zijn daarom regressievergelijkingen afgeleid voor zichtdiepten kleiner dan 40 cm. en voor zichtdiepten groter dan 40 cm. Voor alle metingen samen was het verband:

$$\begin{aligned} 1/SD &= .023*glrest + .008*chl + .080*detrit + 1.206 \quad (23) \\ R^2 &= .67, \quad N = 87 \end{aligned}$$

Voor zichtdiepten kleiner dan 40 cm. wordt dit:

$$\begin{aligned} 1/SD &= .010*glrest + .005*chl + .042*detrit + 2.654 \quad (24) \\ R^2 &= .35, \quad N = 58 \end{aligned}$$

en voor zichtdiepten groter of gelijk aan 40 cm. :

$$\begin{aligned} 1/SD &= .021*glrest + .009*chl + .049*detrit + .886 \quad (25) \\ R^2 &= .55, \quad N = 29 \end{aligned}$$

We zien dat het percentage verklaarde variantie (R^2) voor beide vergelijkingen lager is dan voor het gezamenlijke verband. Dit is geheel volgens de verwachting, en wordt veroorzaakt doordat de totale variantie in de gesplitste gegevenssets veel kleiner is geworden.

In figuur 5.10 en 5.11 is voor deze twee verbanden opnieuw de waargenomen zichtdiepte tegen de voorspelde zichtdiepte uitgezet. De waarnemingen volgen de voorspellingen nu natuurlijk beter. Wanneer we de residuele variantie van het totale verband vergelijken met de residuele variantie voor deze twee verbanden, blijkt dat de opsplitsing significant betere resultaten oplevert ($p < .05$). Deze methode biedt dus nog mogelijkheden om het verband tussen zichtdiepte en gloeirest, chlorofyl en detritus verder te verbeteren.

Voor de meren waarvoor voldoende DOC-gegevens beschikbaar zijn, leidt het opnemen van DOC in de regressievergelijking mogelijk ook nog tot een verbetering van het afgeleide verband, al is de variatie in DOC binnen de onderzochte meren kleiner dan de variatie in DOC tussen de verschillende meren. Deze aanpak wordt hier niet verder uitgewerkt, maar lijkt nog wel enige mogelijkheden te bieden.

5.5 EXTINCTIE

De door middel van regressie gevonden verbanden van de extinctie met totaal drooggewicht en met gloeirest, chlorofyl en detritus zijn weergegeven in tabel 5.6 en 5.7, met de fraktie van de door dat verband verklaarde variantie in k en het aantal waarnemingen.

Het aantal beschikbare gegevenssets is klein, maar de gevonden verbanden zijn goed te noemen, behalve voor het Eemmeer en (alweer) het Haringvliet. De extinctiegegevens voor het Haringvliet zijn afkomstig van het Eutrofieringsonderzoek Haringvliet. De gebruikte metingen zijn op slechts drie verschillende dagen uitgevoerd.

Ook hier bestaan weer aanzienlijke verschillen tussen de voor de verschillende meren gevonden coëfficiënten. De

extinctiecoëfficiënten voor de verschillende frakties zijn in figuur 5.12 tot en met 5.15 weergegeven met hun betrouwbaarheidsintervallen. Voor het Haringvliet is bij de extinctiecoëfficiënt van de chlorofylfractie, en voor het Eemmeer is bij de restterm geen betrouwbaarheidsinterval weergegeven. In deze gevallen was het betrouwbaarheidsinterval zo groot dat het bij de gebruikte schaal buiten de figuur zou vallen.

5.5.1 Verband met gloeirest, chlorofyl en detritus

Aangezien voor slechts zes meren voldoende gegevens waren om een relatie tussen de extinctie en de concentraties van de gloeirest, chlorofyl en detritus af te leiden, is het lastig algemene conclusies over de gevonden verbanden te trekken. Bovendien zijn slechts voor de Reeuwijkse plassen en het Markermeer, en in mindere mate ook voor het Veluwemeer, de betrouwbaarheidsintervallen klein genoeg om iets over de eventuele verschillen tussen de meren aan het licht te brengen. De bespreking kan daarom kort blijven.

Voor de extinctiecoëfficiënten van de gloeirest bestaat een aanmerkelijke spreiding, al overlappen de meeste betrouwbaarheidsintervallen elkaar geheel of gedeeltelijk. De Reeuwijkse plassen lijken een bijzondere positie in te nemen, met een in verhouding hoge waarde voor de extinctiecoëfficiënt van de gloeirest. Slechts het Wolderwijd komt hier enigszins bij in de buurt.

De extinctiecoëfficiënten voor de chlorofylfractie vertonen een vergelijkbaar beeld. Alhoewel de betrouwbaarheidsintervallen hier relatief kleiner zijn, bestaat weer een aanzienlijke overlap. Opnieuw nemen de Reeuwijkse plassen een bijzondere plaats in, met in dit geval een lagere waarde, en opnieuw komt alleen het Wolderwijd daar nog bij in de buurt.

Voor de detritusfractie is de overlap nog completer. Alleen een verschil tussen Reeuwijkse plassen en het Markermeer en Veluwemeer is hier nog aantoonbaar.

De resttermen tenslotte overlappen elkaar volledig. Slechts voor de Reeuwijkse plassen, Markermeer en Veluwemeer is nog met enige nauwkeurigheid een schatting van deze rest-extinctie te geven.

5.5.1.1 Bijdragen aan de extinctie

In figuur 5.16 is weergegeven wat de gevonden verbanden betekenen voor de bijdrage van de verschillende frakties aan de totale extinctie. Gezien de grote betrouwbaarheidsintervallen voor een groot gedeelte van de gevonden coëfficiënten, moet dit overzicht echter voorzichtig geïnterpreteerd worden.

Voor de Reeuwijkse plassen zijn de schattingen het betrouwbaarst. We zien een vrijwel gelijke bijdrage van de verschillende frakties en de restterm aan de totale extinctie. Ook voor het Markermeer is de schatting van de verschillende bijdragen, behalve voor detritus, redelijk betrouwbaar. Het chlorofylgehalte draagt hier in verhouding sterker bij aan de totale extinctie, wat niet veroorzaakt wordt door hogere chlorofylgehalten maar door een hogere specifieke extinctiecoëfficiënt voor de chlorofylfractie. Voor de overige meren is eigenlijk alleen de bijdrage van de chlorofylfractie aan de extinctie in het Veluwemeer nog betrouwbaar. We zien een ten opzichte van het Markermeer nog grotere bijdrage aan de totale extinctie, geheel veroorzaakt door de hogere gemiddelde chlorofyl-concentratie.

5.5.2 Verband met drooggewicht alleen

De relaties van de extinctie met de droogrest zijn weergegeven in tabel 5.6. De specifieke extinctiecoëfficiënten voor de droogrest zijn in het Veluwemeer, Wolderwijd en de Reeuwijkse plassen vrijwel gelijk, die voor het Markermeer veel lager. De relaties voor Eemmeer en Haringvliet zijn opnieuw weinig betrouwbaar.

De resttermen vallen, behalve voor het Haringvliet, steeds hoger uit dan voor de relaties met gloeirest, chlorofyl en detritus. Het percentage verklaarde variantie ten opzichte van deze relaties is, behalve voor het Haringvliet, lager of gelijk (Wolderwijd).

5.5.3 Bruikbaarheid van de gevonden relaties

Zoals vermeld in de inleiding, zijn de verbanden met de extinctie met name nodig om aan modellen die de algengroei berekenen, een achtergrondextinctie aan te kunnen bieden die afhankelijk is van de gloeirest. Dit in tegenstelling tot de nu meestal gebruikte konstante waarde voor de achtergrondextinctie. De relatie van de extinctie met de verschillende frakties, zou dus een betrouwbare schatting op moeten leveren van de achtergrondextinctie, afhankelijk van gemeten of berekende gloeirest. Op grond hiervan zou de beschikbare hoeveelheid licht voor algengroei berekend kunnen worden.

Gezien het geringe aantal gegevenssets waar extinctiemetingen in voorkomen, en gezien de grote betrouwbaarheidsintervallen voor de specifieke extinctiecoëfficiënt van de gloeirest en de restterm in het Wolderwijd, Haringvliet en Eemmeer, lijkt dit slechts goed mogelijk voor de Reeuwijkse plassen, het Markermeer en het Veluwemeer.

Een mogelijkheid zou nog kunnen zijn de gevonden verbanden voor deze meren ook toe te passen op andere, vergelijkbare meren. Vergelijkbaar betekent hier dan vergelijkbaar wat betreft de optische eigenschappen van de verschillende frakties, met name wat betreft de coëfficiënten voor de gloeirest en de restterm. Deze zijn echter voor de extinctie onbekend voor de andere meren. Een vergelijking kan wel gemaakt worden voor de coëfficiënten uit de vergelijkingen voor de reciproke zichtdiepte. Alhoewel gelijke coëfficiënten voor de reciproke zichtdiepte nog niet betekent dat ook de extinctiecoëfficiënten aan elkaar gelijk zullen zijn, vormt het wel de beste indicatie waarover we beschikken. Op grond van dit criterium zouden de extinctiecoëfficiënten voor de gloeirest en de restterm voor de Reeuwijkse plassen, ook eventueel toegepast kunnen worden op het IJsselmeer en het IJmeer.

5.5.3.1 Voorbeeldtoepassing op het Veluwemeer

Eerder werd opgemerkt dat de afgeleide verbanden voor de extinctie met name van belang kunnen zijn om bij modelberekeningen een variabele achtergrondextinctie te kunnen gebruiken, afhankelijk van de restterm en de gloeirest. In figuur 5.17 wordt voor vier jaren de aldus berekende achtergrondextinctie afgebeeld. De hier gebruikte restterm en de specifieke extinctie voor de gloeirest zijn de uit het verband met chlorofyl, gloeirest en detritus verkregen waarden. De aldus berekende achtergrondextinctie is de extinctie die over zou blijven als alle algen en detritus uit het water zouden worden verwijderd. Het blijkt dat volgens het afgeleide verband tussen gloeirest en extinctie, er aanzienlijke variatie in de waarde van de achtergrondextinctie gedurende het jaar optreedt. Het gebruik van een variabele achtergrondextinctie in bijvoorbeeld modellen die de algengroei berekenen, zal dus waarschijnlijk de resultaten van de modelberekeningen wel degelijk beïnvloeden. De door de gloeirest (en de restterm) veroorzaakte variabele achtergrondextinctie kan dan als invoer in het model worden opgenomen, terwijl de invloed van levende algen en detritus in het model wordt berekend.

5.6 RELATIE ZICHTDIEPTE EN EXTINCTIE

In tabel 5.8 is de relatie tussen zichtdiepte en extinctie weergegeven voor de meren waar zij beide gemeten zijn. In tabel 5.9 is de omgekeerde relatie weergegeven (Dat de coëfficiënten van beide vergelijkingen niet uit elkaar af te leiden zijn wordt veroorzaakt doordat bij een regressieanalyse de kwadratensom van de afhankelijke variabele wordt geminimaliseerd. Wanneer afhan-

kelijke en onafhankelijke variabele worden omgedraaid, kan het best passende verband daardoor verschillen.)

In de hoofdstukken 2 en 3 is beargumenteerd dat voor het afleiden van de zichtdiepte en extinctie, een rechtstreeks verband met de bepalende factoren de meeste perspectieven biedt. Als voorbehoud werd daarbij opgemerkt dat wanneer gecombineerde metingen van zowel zichtdiepte als extinctie beschikbaar zijn, het afleiden van de zichtdiepte uit de extinctie tot betere resultaten zou kunnen leiden. Hierbij zou immers gebruik gemaakt kunnen worden van een specifiek voor die gegevensset bepaald verband tussen extinctie en zichtdiepte.

Interessant is nu om het percentage verklaarde variantie door deze verbanden, te vergelijken met het percentage dat door de eerder afgeleide verbanden werd verklaard voor dezelfde gegevensset. Voor de zichtdiepte geldt dat de verbanden met gloei-rest, chlorofyl en detritus steeds een groter of gelijk (Markermeer) gedeelte van de variantie verklaren, behalve voor het Haringvliet, dat zich over de hele linie afwijkend gedraagt en waar het percentage in beide gevallen erg laag is.

Dit duidt er op dat zelfs wanneer we de beschikking hebben over gecombineerde zichtdiepte/extinctie- metingen, de zichtdiepte beter geschat kan worden met behulp van het verband met gloei-rest, chlorofyl en detritus, dan op grond van de extinctiemetingen.

Ook voor de extinctie geldt dat het percentage verklaarde variantie volgens de in tabel 5.9 weergegeven verbanden, in alle gevallen kleiner is dan voor de eerder afgeleide regressievergelijkingen. Ook hier lijkt dus te gelden dat zelfs wanneer gecombineerde zichtdiepte/extinctie- metingen beschikbaar zijn, de extinctie beter met behulp van de eerder afgeleide verbanden dan op grond van de zichtdiepte- metingen bepaald kan worden.

Dit resultaat lijkt de in hoofdstuk 2 en 3 weergegeven theorie geheel te bevestigen.

Overigens zij hier opgemerkt dat het toetsen van de bruikbaarheid van een gevonden verband op grond van het percentage verklaarde variantie in de oorspronkelijke dataset, niet alles zegt over de bruikbaarheid van het verband voor gegevens buiten de dataset. Welk verband zich beter gedraagt bij toepassing buiten de dataset waarop zij gebaseerd zijn, is daarom nog een open vraag. De hier gemaakte vergelijking geeft daarvoor slechts een voorlopige indicatie.

Tot slot een opmerking over de manier waarop het verband tussen zichtdiepte en extinctie wordt afgeleid. In veel gevallen gebeurt dit met behulp van de Poole-Atkins coefficient, oftewel volgens de vergelijking:

$$k = a * 1/SD \quad \text{of} \quad SD = a * 1/k \quad (26)$$

Deze vergelijking leidt vaak tot hoge correlaties, en dus ook tot een hoog percentage verklaarde variantie, en doet dat ook in de bovengenoemde datasets (voor de Reeuwijkse plassen bijvoor-

beeld 95 in plaats van 51 %). Op het eerste gezicht zou het verwondering kunnen wekken dat het verband:

$$k = a * 1/SD + b \quad \text{of} \quad 1/SD = c * k + d \quad (27)$$

tot lagere percentages verklaarde variantie leidt. Aangezien hier ook nog een constante vrij gekozen mag worden, zou deze relatie immers een beter passend verband op moeten leveren. Deze schijnbare tegenstrijdigheid wordt veroorzaakt door een eigenaardigheid van regressievergelijkingen waar geen constante in voorkomt. De variantie van de metingen wordt hier namelijk uitgedrukt als variantie rond de nul-waarde, terwijl in regressievergelijkingen waar wel een constante term in voorkomt, de variantie ten opzichte van het gemiddelde van de waarnemingen wordt berekend. Het percentage verklaarde variantie valt daardoor voor vergelijkingen zonder restterm steeds hoger uit. Bij gebruik van een Poole-Atkins coefficient zullen daardoor ook altijd relatief hoge correlaties tussen k en $1/SD$ worden gevonden. Vergelijking van het percentage verklaarde variantie tussen deze verschillende typen regressievergelijkingen is daardoor niet zinnig. In deze analyse is daarom alleen gewerkt met regressievergelijkingen waar wel een constante term in is opgenomen. Vergelijking van de percentages verklaarde variantie vormen dan een bruikbare maat om de verschillende verbanden met elkaar te vergelijken.

5.7 KONKLUSIE

De gebruikte methode om verbanden te ontwikkelen tussen de (reciproke) zichtdiepte en de extinctie met de frakties opgelost en gesuspenderd materiaal, leidt over het algemeen tot goede resultaten wanneer voldoende gecombineerde metingen beschikbaar zijn.

Dergelijke relaties lijken een betrouwbaarder basis te vormen voor een schatting van de zichtdiepte en extinctie dan de relatie tussen zichtdiepte en extinctie onderling. Toch is het aantal meren waarvoor bruikbare relaties konden worden afgeleid helaas klein. Bovendien lijkt het voorspellen van hoge zichtdiepten met deze methode niet goed mogelijk.

Voor de zichtdiepte zijn voor een twaalftal meren de gegevens geanalyseerd. Voor zes van deze meren werd een relatie gevonden die een aanzienlijk deel (meer dan de helft) van de variantie verklaart, en waarvan de betrouwbaarheidsintervallen van de verschillende coefficienten relatief klein zijn, namelijk voor het IJsselmeer, Markermeer, Veluwemeer, Wolderwijd, IJmeer en voor de Reeuwijkse plassen.

Voor de extinctie zijn voor slechts zes meren gecombineerde meetreeksen gevonden. Slechts voor drie van deze meren waren voldoende gegevens beschikbaar om een relatie af te leiden die

6.0 GERAADPLEEGDE LITERATUUR

Atlas, D. & T.T. Bannister, 1980.
Dependence of mean spectral extinction coefficient of
phytoplankton on depth, water colour, and species.
Limnol. Oceanogr. 25(1): 157-159.

Beeton, A.M., 1957.
Relationship between Secchi disc readings and light penetration
in lake Huron.
Trans. Amer. Fish. Soc. 87 : 73-79.

Blackwell, H.R., 1946.
Contrast thresholds of the human eye.
J. Opt. Soc. Am. 36 : 624-642.

Brezonik, P.L., 1978.
Effect of organic colour and turbidity on Secchi disk
transparency.
Journal of fisheries research board of Canada 35(11) :
1410-1416.

Canfield, D.E. & L.M. Hodgson, 1983.
Prediction of Secchi-disc depths in Florida lakes : impact of
algal biomass and organic colour.
Hydrobiologia 99(1) : 51-60.

Carlson, R.E., 1977.
A trophic state index for lakes.
Limnol. Oceanogr. 22: 361-369

Carlson, R.E., 1980.
More complications in the chlorophyll- Secchi disk relationship.
Limnol. Oceanogr. 25: 379-382.

Colijn, F., 1982.
Light absorption in the waters of the Ems-Dollard estuary and
its consequences for the growth of phytoplankton and
microphytobenthos.
Netherlands Journal of Sea research 15(2): 196-216.

Di Toro, M., 1978.
Optics of turbid estuarine waters: approximations and
applications.
Water res. 12:1059-1068

Edmondson, W.T., 1980.
Secchi disk and chlorophyll.
Limnol. Oceanogr. 25(2): 378-379.

- Effler, S.W., 1985.
Attenuation versus transparency.
J. of environmental engineering 111(4) : 448-459.
- French, R.H. & J.J. Cooper, 1982.
Secchi-disk relationships.
Water resources bulletin 18(1) : 121-123.
- Gordon, H.R. & A.W. Wouters, 1978.
Some relations between Secchi depth and inherent optical properties of natural waters.
Appl. opt. 17(21) : 3341-3343.
- Jerlov, N.G., 1976.
Marine optics.
Elsevier Oceanography series 14, Elsevier Amsterdam.
- Jewson, D.H., 1977.
Light penetration in relation to phytoplankton content of the euphotic zone of Lough Neagh, N. Ireland.
Oikos 28(1):74-83.
- Kirk, J.T.O., 1975.
A theoretical analysis of the contribution of algal cells to the attenuation of light within natural waters (I).
New phytologist 75(1): 11-20.
- Kirk, J.T.O., 1975.
A theoretical analysis of the contribution of algal cells to the attenuation of light within natural waters (II).
New phytologist 75(1): 21-36.
- Kirk, J.T.O., 1976.
A theoretical analysis of the contribution of algal cells to the attenuation of light within natural waters (III).
New phytologist 77(2): 341-358.
- Kirk, J.T.O., 1981a.
Monte carlo study of the nature of the underwater light field in, and the relationship between optical properties of, turbid yellow waters.
Aust. J. Mar. Freshwater Res. 32: 517-532.
- Kirk, J.T.O., 1981b.
Estimation of the scattering coefficient of natural waters using underwater irradiance measurements.
Australian Journal of Marine and Freshwater research 32: 533-539.
- Lind, O.T., 1986.
The effect of non-algal turbidity on the relationship of Secchi depth to chlorophyll-a.
Hydrobiologia 140(1) : 27-35.

- Lorenzen, M.W., 1980.
Use of chlorophyll-Secchi disk relationships.
Limnol. Oceanogr. 25: 371-372.
- Mankovskiy, V.I., 1979.
Empirical formula for estimating the light attenuation coefficient in sea water from Secchi disk readings.
Okeanologiya 18(4) : 493-494.
- Megard, R.O., J.C. Settles, H.A. Boyer & W.S. Combs Jr., 1980.
Light, Secchi disks, and trophic states.
Limnol. Oceanogr. 25: 373-377.
- Nyquist, G., 1979.
Relationships between Secchi disk transparency, irradiance attenuation and beam transmittance in a Fjord system.
Mar. Sci. Commun. 5(6) : 333-359.
- Otto, L., 1966.
Light attenuation in the North sea and the Dutch Wadden sea in relation to Secchi disk visibility and suspended matter.
Neth. Jnl. Sea Res. 3 : 28-51.
- Postma, H., 1961.
Suspended matter and Secchi disk visibility in coastal waters.
Netherl. Jnl. Sea Res. 1 : 359-390.
- Preisendorfer, R.W. & C.D. Mobley, 1984.
Direct and inverse irradiance models in hydrologic optics.
Limnol. Oceanogr. 29: 903-929.
- Preisendorfer, R.W., 1986.
Secchi-disk science : visual optics of natural water.
Limnology and oceanography 31(5) : 909-926.
- Sheldon, J.W., 1978.
In situ measurement of water transparency.
Photogramm. Eng. & Remote sensing (USA) 44(6) : 717-720.
- Stefan, H.G., J.J. Cardoni, F.R. Schiebe & C.M. Cooper, 1983.
Model of light penetration in a turbid lake.
Water resources research 19:109-120.
- Tyler, J.E., 1968.
The Secchi disc
Limnology and oceanography 13(1) : 1-6.
- Verduin, J., 1982.
Components contributing to light extinction in natural waters: method of isolation.
Arch. Hydrobiol. 93(3): 303-312.

Vlugt, J.C. van der, S.P. Klapwijk & J.A.A.M. van Dijk, 1986.
Waterkwaliteitsonderzoek Reeuwijkse plassen WOR 1983-1985;
verslag van drie jaar veldonderzoek.
Rapportnr. 840156001 Rijksinstituut voor Volksgezondheid &
Milieuhygiene.

Walker, T.A., 1980.
Correction to the Poole and Atkins Secchi disc /
light-attenuation formula.
J. Marine Biol. Assoc. 60(3) : 769-771.

Walker, T.A., 1982.
Use of a Secchi disc to measure attenuation of underwater light
for photosynthesis.
Journal of applied ecology 19(2) : 539-543.

Weidemann, A.D., T.T. Bannister, S.W. Effler & D.J. Johnson,
1985.
Particulate and optical properties during CaCO₃ precipitation in
Otisco lake.
Limnology and Oceanography 30(5) : 1078-1083.

Williams, J., 1968.
The meaningful use of the Secchi disc.
John Hopkins university. Chesapeake bay institute reference no
68-15 Technical report no 45, 14 pp.

Williams, J., 1968.
A mathematical model for the description of the optical
properties of turbid water in terms of suspended particle size
and concentration.
John Hopkins university. Chesapeake bay institute reference no
68-17 Technical report no 47.

Williams, J., 1968.
Determination of particle size and concentration from photometer
and Secchi disc measurements.
John Hopkins university. Chesapeake bay institute reference no
68-18 Technical report no 48, 13 pp.

Williams, D.T, G.R. Drummond, D.E. Ford & D.L. Robey, 1981.
Determination of light extinction coefficients in lakes and
reservoirs.
Proc. ASCE symposium on surface water impoundments.
Minneapolis, Minnesota, vol 2: 1329-1335.

7.0 TABELLEN EN FIGUREN

Tabel 5.1		Verklaarde variantie (R^2) van de reciproke zichtdiepte in % door verband :									
Locatie		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IJsselmeer	W	32	19	37	55	59	60	59	55	37	61
Markermeer	W	11	29	33	41	45	39	41	36	34	39
Markermeer	R	39	56	62	65	68	69	68	66	62	69
IJmeer	R/W	15	5	19	72	67	75	72	74	13	75
Veluwemeer	W	52	23	41	2	32	52	41	24	52	58
Veluwemeer	R	42	40	60	8	47	51	65	43	62	67
Wolderwijd	W	67	14	12	0	4	64	12	13	67	66
Wolderwijd	R	39	41	56	6	46	40	56	40	55	55
Eemmeer	W	19	1	23	14	21	29	25	10	21	28
Eemmeer	R	14	33	43	17	39	23	44	39	43	45
Gooimeer	W	24	2	22	24	38	42	34	29	21	42
Zwartemeer	W	0	0	8	13	0	16	15	16	4	15
Haringvliet	W	0	0	0	32	38	13	36	12	0	12
Reeuwijk	H	29	36	50	12	56	34	56	45	53	58
Westeinder	h	32	9	16	0	48	7	32	29	15	21
Braassem	h	95	0	88	18	72	97	89	23	97	97

W = DBW/RIZA (WAKWAL-gegevens)
 R = Rijksdienst IJsselmeerpolders
 H = Hoogheemraadschap van Rijnland / RIVM
 h = Hoogheemraadschap van Rijnland

De verschillende verbanden staan vermeld bij tabel 5.2

Tabel 5.2		Verklaarde variantie (R ²) van de extinctie in % door verband :									
Locatie		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Markermeer	R	59	43	59	51	57	72	60	52	68	72
Veluwemeer	R	88	29	68	2	47	89	67	27	89	90
Wolderwijd	R	65	47	64	32	70	70	70	59	67	72
Eemmeer	R	63	0	24	0	6	58	15	0	58	52
Haringvliet	E	24	0	0	31	42	30	40	41	29	40
Reeuwijk	H	43	32	54	26	71	56	73	57	62	77

R = Rijkdienst IJsselmeer polders
E = DBW/RIZA eutrofieringsonderzoek Haringvliet
H = Hoogheemraadschap van Rijnland / RIVM

De verschillende verbanden zijn:

1. chlorofyl + restterm
2. detritus + restterm
3. asvrij drooggewicht + restterm
4. gloeirest + restterm
5. totaal drooggewicht + restterm
6. gloeirest + chlorofyl + restterm
7. gloeirest + asvrij drooggewicht + restterm
8. gloeirest + detritus + restterm
9. chlorofyl + detritus + restterm
10. gloeirest + chlorofyl + detritus + restterm

Tabel 5.3		Coefficiënten van de vergelijking : 1/SD = a * glrest + b * chl + c * detrit + d					
Locatie		a	b	c	d	R ²	N
IJsselmeer	W	.050	.005	.021	.944	.61	269
Markermeer	W	.034	.016	.009	1.736	.39	180
Markermeer	R	.033	.011	.044	1.213	.69	259
IJmeer	R/W	.053	.005	-.002	1.100	.75	38
Veluwemeer	W	.022	.015	.041	1.058	.58	282
Veluwemeer	R	.023	.008	.080	1.206	.67	87
Wolderwijd	W	.000	.012	.029	1.593	.66	126
Wolderwijd	R	-.007	.008	.075	1.525	.55	62
Eemmeer	W	.017	.005	.000	2.936	.28	89
Eemmeer	R	.016	.003	.082	1.792	.45	39
Gooimeer	W	.053	.007	.122	1.732	.42	141
Zwartemeer	W	.031	.000	-.002	2.207	.15	71
Haringvliet	W	.065	-.008	.025	.667	.12	29
Reeuwijk	H	.050	.006	.051	.902	.58	357
Westeinder	h	.013	.007	.071	.521	.21	10
Braassem	h	-.007	.032	-.037	.381	.97	9
W = DBW/RIZA (WAKWAL-gegevens) R = Rijksdienst IJsselmeerpolders H = Hoogheemraadschap van Rijnland / RIVM h = Hoogheemraadschap van Rijnland							
SD: meters, gloeirest en detritus: mg l ⁻¹ , chlorofyl: ug l ⁻¹							

Tabel 5.4		Coefficiënten voor : $1/SD = a * dwt + b$			
Locatie		a	b	R ²	N
IJsselmeer	W	.045	.932	.64	491
Markermeer	W	.035	1.841	.45	295
Markermeer	R	.040	1.542	.68	259
IJmeer	R/W	.035	1.193	.67	75
Veluwemeer	W	.048	1.793	.32	411
Veluwemeer	R	.050	1.737	.47	103
Wolderwijd	W	.028	2.584	.04	176
Wolderwijd	R	.059	1.810	.46	66
Eemmeer	W	.020	3.328	.21	112
Eemmeer	R	.037	1.731	.39	39
Gooimeer	W	.053	1.819	.38	206
Zwartemeer	W	-.008	3.252	.00	112
Haringvliet	W	.048	.641	.38	131
Reeuwijk	H	.058	.971	.56	362
Westeinder	h	.035	1.040	.48	32
Braassem	h	.283	-1.514	.72	31
W = DBW/RIZA (WAKWAL-gegevens) R = Rijksdienst IJsselmeerpolders H = Hoogheemraadschap van Rijnland / RIVM h = Hoogheemraadschap van Rijnland					
SD: meters, droogrest: mg l ⁻¹					

Tabel 5.5		Significantie verschil tussen algemeen en meer-specifiek verband	
Locatie		P	N
IJsselmeer	W	<.001	269
Markermeer	W	n.s.	180
Markermeer	R	n.s.	259
IJmeer	R/W	n.s.	38
Veluwemeer	W	<.05	282
Veluwemeer	R	n.s.	87
Wolderwijd	W	<.005	126
Wolderwijd	R	n.s.	62
Eemmeer	W	<.05	89
Eemmeer	R	<.05	39
Gooimeer	W	n.s.	141
Zwartemeer	W	<.001	71
Haringvliet	W	<.05	29
Reeuwijk	H	<.001	357
Westeinder	h	<.001	10
Braassem	h	<.001	9

W = DBW/RIZA (WAKWAL-gegevens)
R = Rijksdienst IJsselmeerpolders
H = Hoogheemraadschap van Rijnland / RIVM
h = Hoogheemraadschap van Rijnland

SD: meters, gloeirest en detritus: mg l⁻¹, chlorofyl: ug l⁻¹

Tabel 5.6		Coefficients van de vergelijking : $k = a * \text{glrest} + b * \text{chl} + c * \text{detrit} + d$					
Locatie		a	b	c	d	R ²	N
Markermeer	R	.025	.022	.008	.877	.72	158
Veluwemeer	R	.044	.023	.027	.513	.90	54
Wolderwijd	R	.076	.017	.058	1.020	.70	38
Eemmeer	R	.010	.035	.008	-.259	.52	11
Haringvliet	E	.050	-.027	.083	1.666	.40	27
Reeuwijk	H	.137	.012	.075	.865	.77	357
R = Rijksdienst IJsselmeerploders E = DBW/RIZA eutrofieringsonderzoek Haringvliet H = Hoogheemraadschap van Rijnland / RIVM							
K: m ⁻¹ , gloeirest en detritus: mg l ⁻¹ , chlorofyl: ug l ⁻¹							

Tabel 5.7		Coefficients voor : $k = a * \text{dwt} + b$			
Locatie		a	b	R ²	N
Markermeer	R	.040	1.542	.68	259
Veluwemeer	R	.119	.693	.56	64
Wolderwijd	R	.109	1.440	.70	42
Eemmeer	R	.069	3.623	.06	11
Haringvliet	E	.066	1.152	.42	27
Reeuwijk	H	.104	1.124	.71	331
R = Rijksdienst IJsselmeerpolders E = DBW/RIZA eutrofieringsonderzoek Haringvliet H = Hoogheemraadschap van Rijnland / RIVM					
k: m ⁻¹ , droogrest: mg l ⁻¹					

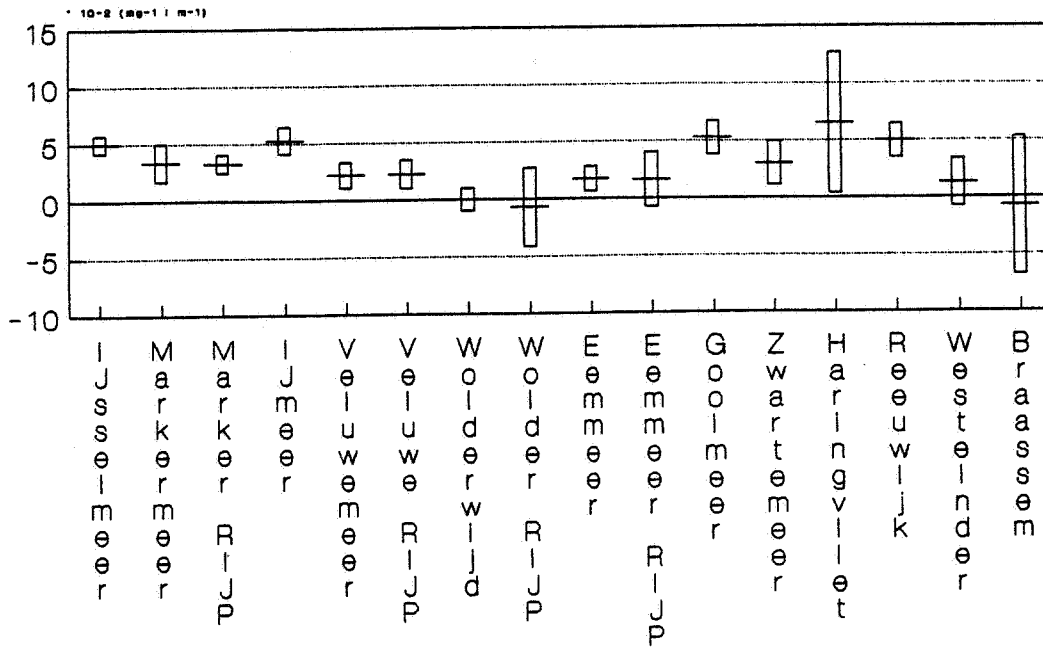
Tabel 5.8		Coefficients voor : $1/SD = a * k + b$			
Locatie		a	b	R ²	N
Markermeer	R	.958	.408	.69	157
Veluwemeer	R	.443	1.413	.54	64
Wolderwijd	R	.422	1.655	.47	45
Eemmeer	R	.274	1.707	.28	11
Haringvliet	E	.331	.692	.22	27
Reeuwijk	H	.450	.726	.51	325

R = Rijksdienst IJsselmeerpolders
E = DBW/RIZA eutrofieringsonderzoek Haringvliet
H = Hoogheemraadschap van Rijnland / RIVM

Tabel 5.9		Coefficients voor : $k = a/SD + b$			
Locatie		a	b	R ²	N
Markermeer	R	.739	.603	.69	157
Veluwemeer	R	1.242	.250	.54	64
Wolderwijd	R	1.145	.867	.47	45
Eemmeer	R	1.300	1.866	.28	11
Haringvliet	E	.748	1.391	.22	27
Reeuwijk	H	1.137	.892	.51	325

R = Rijksdienst IJsselmeerpolders
E = DBW/RIZA eutrofieringsonderzoek Haringvliet
H = Hoogheemraadschap van Rijnland / RIVM

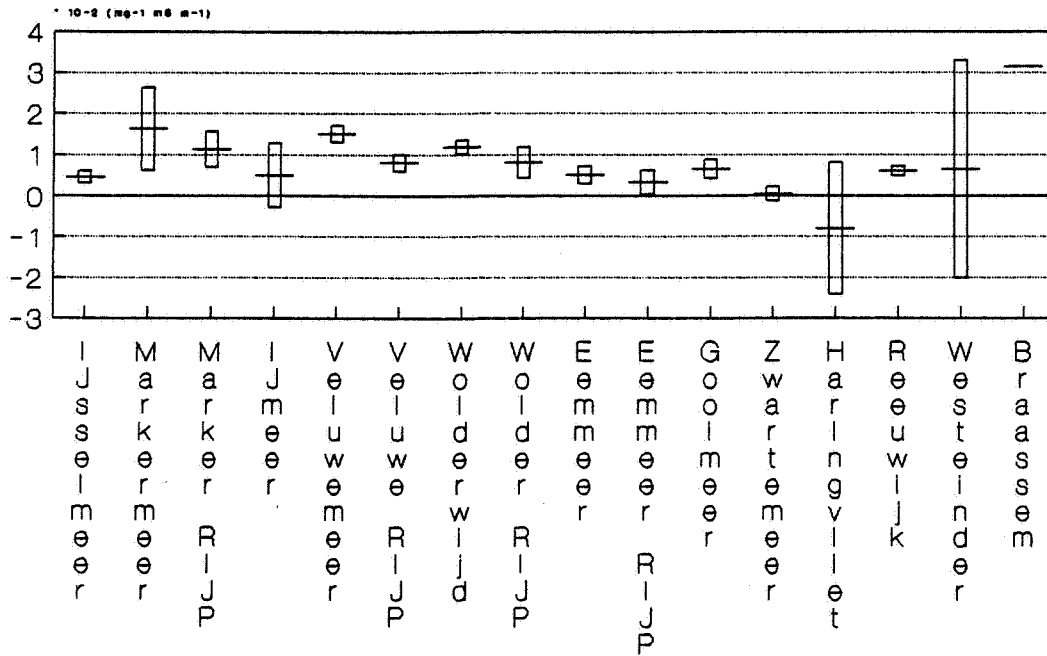
Gloeirest-coëfficiënten 1/zichtdiepte



Figuur 5.1.

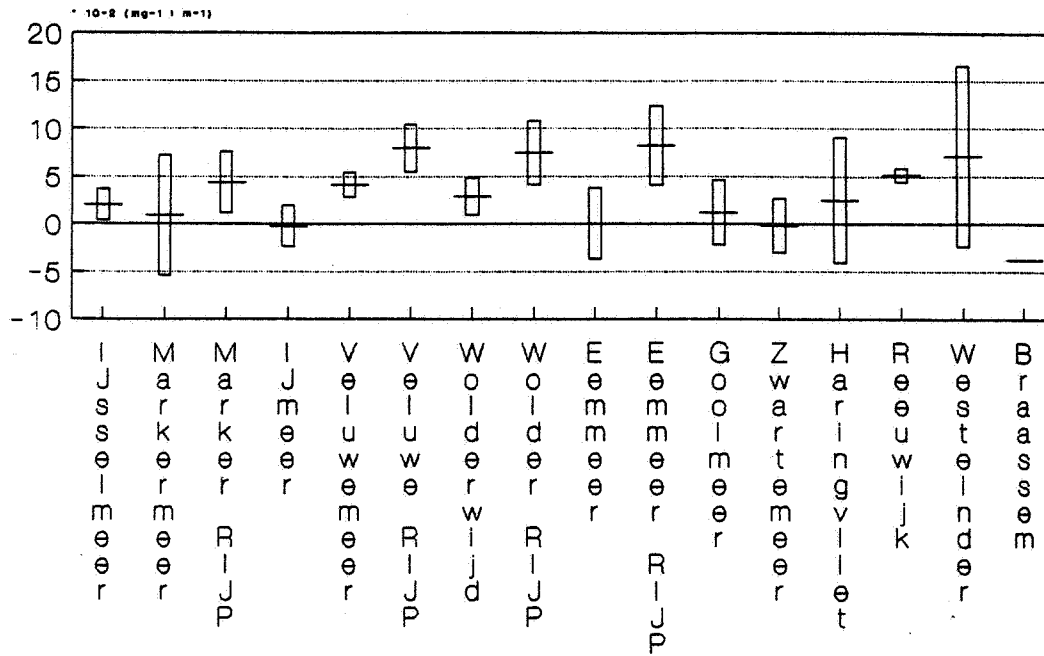
Specifieke reciproke-zichtdiepte-coëfficiënten voor de gloeirest fractie, met 95 % betrouwbaarheidsintervallen, voor het verband tussen reciproke zichtdiepte met gloeirest, chlorofyl en detritus ($10^{-2} \text{ mg}^{-1} \text{ l m}^{-1}$).

Chlorofyl-coëfficiënten 1/zichtdiepte



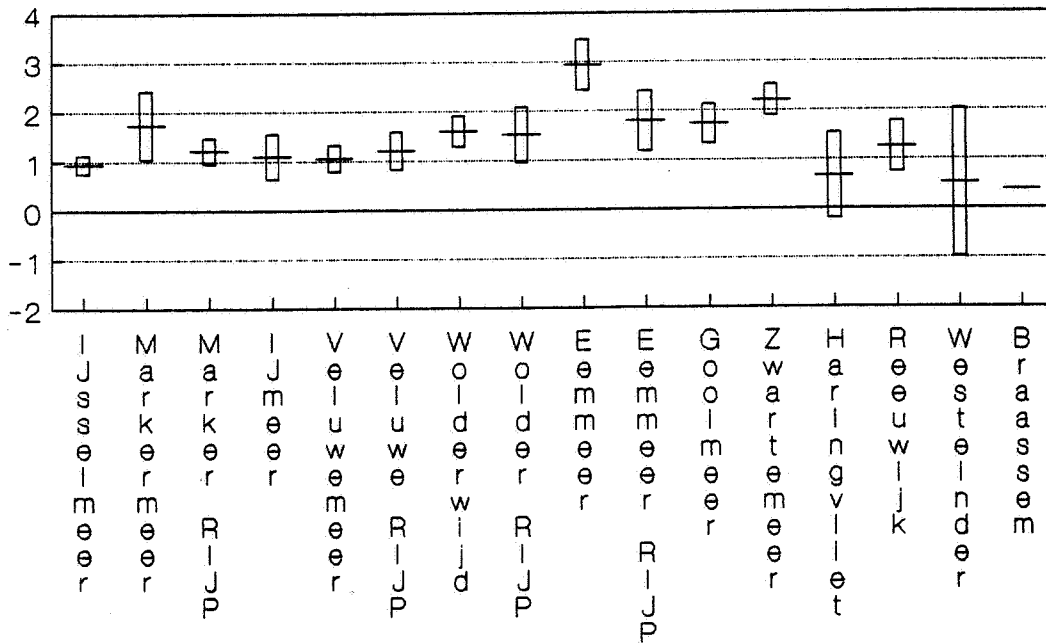
Figuur 5.2.
 Specifieke reciproke-zichtdiepte-coëfficiënten voor de chlorofyl
 fraktie, met 95 % betrouwbaarheidsintervallen, voor het verband
 tussen reciproke zichtdiepte met gloeirest, chlorofyl en
 detritus ($10^{-2} \text{ mg}^{-1} \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$).

Detritus-coëfficiënten 1/zichtdiepte



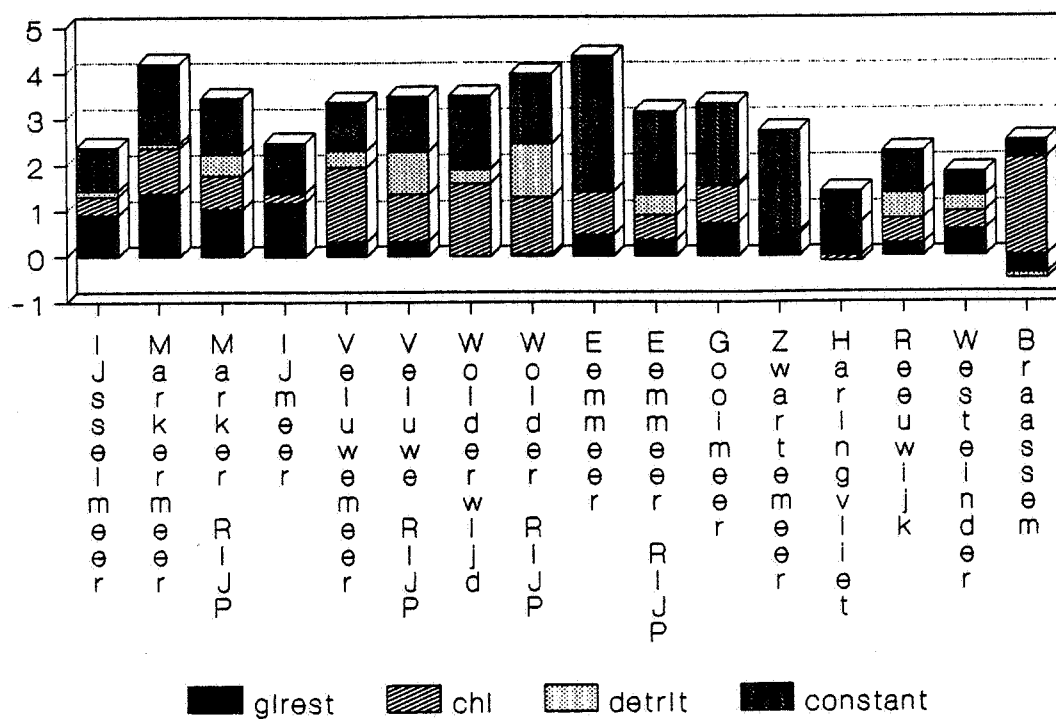
Figuur 5.3. Specifieke reciproke-zichtdiepte-coëfficiënten voor de detritus fractie, met 95 % betrouwbaarheidsintervallen, voor het verband tussen reciproke zichtdiepte met gloeirest, chlorofyl en detritus ($10^{-2} \text{ mg}^{-1} \text{ l m}^{-1}$).

Resttermen reciproke Secchdiepte



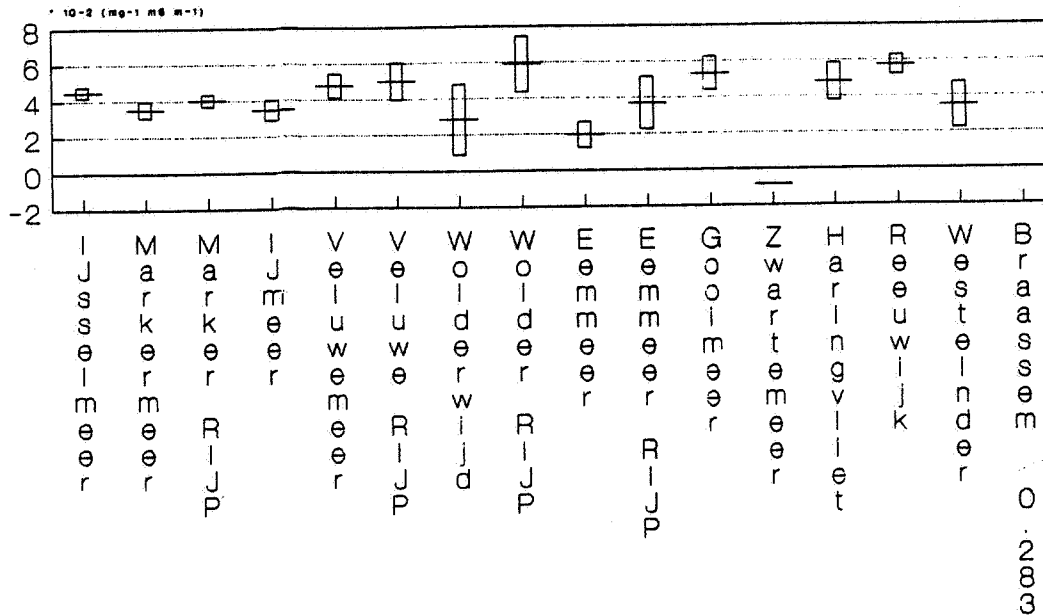
Figuur 5.4.
 Reciproke achtergrond-zichtdiepten, met 95 % betrouwbaarheidsintervallen, voor het verband tussen reciproke zichtdiepte met gloeirest, chlorofyl en detritus (m^{-1}).

Bijdragen aan reciproke Secchidiepte



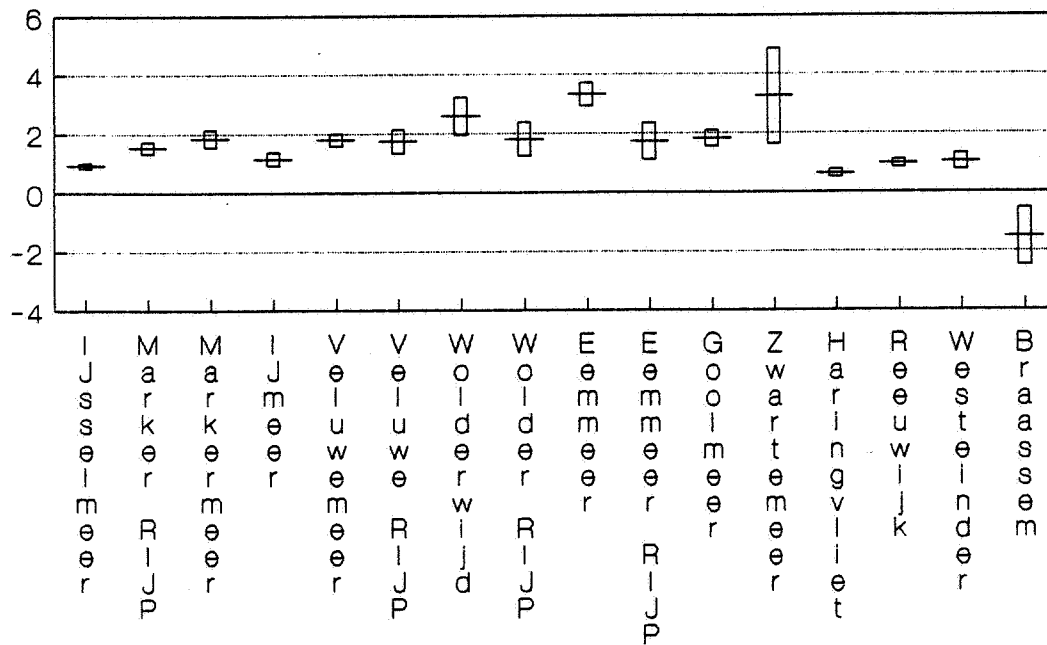
Figuur 5.5.
Opbouw van de reciproke zichtdiepte door de verschillende frakties, voor elk van de onderzochte meren (m^{-1}).

Drooggewicht-coëfficiënten 1/zichtdiepte

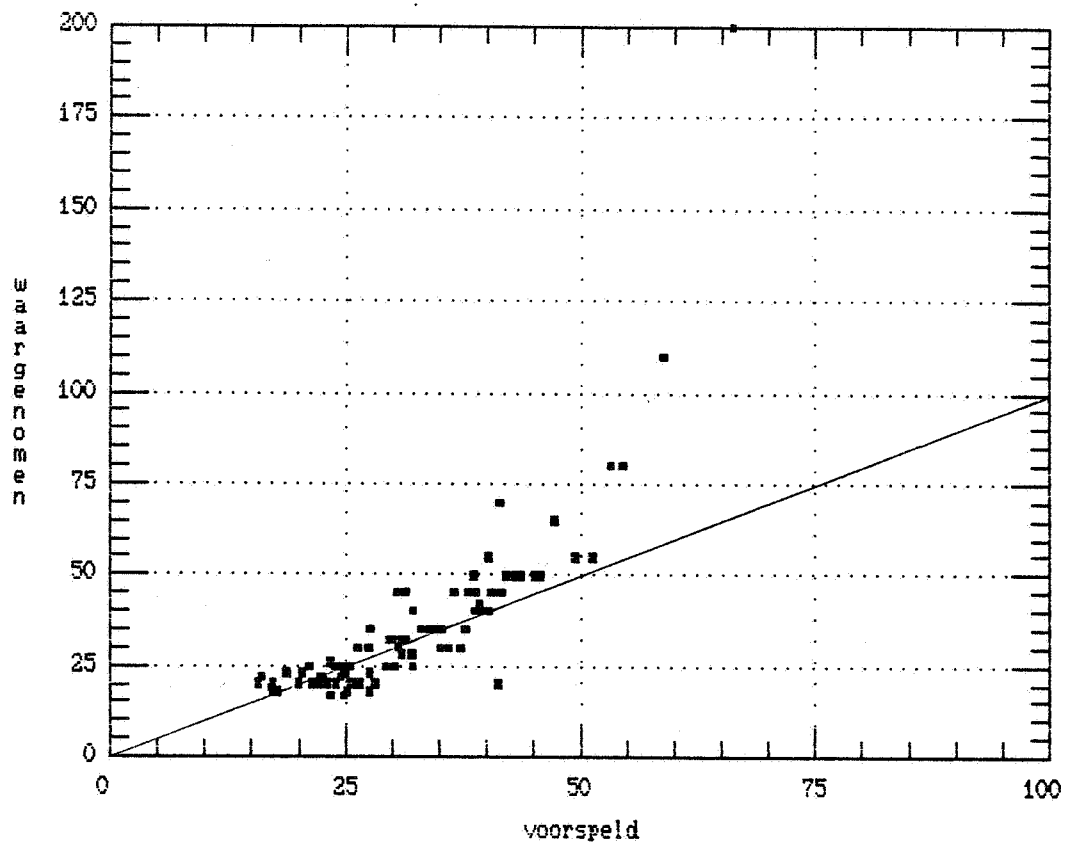


Figuur 5.6.
 Specifieke reciproke-zichtdiepte-coëfficiënten voor totaal drooggewicht, met 95 % betrouwbaarheidsintervallen, voor het verband tussen reciproke zichtdiepte met totaal drooggewicht alleen. ($10^{-2} \text{ mg}^{-1} \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$).

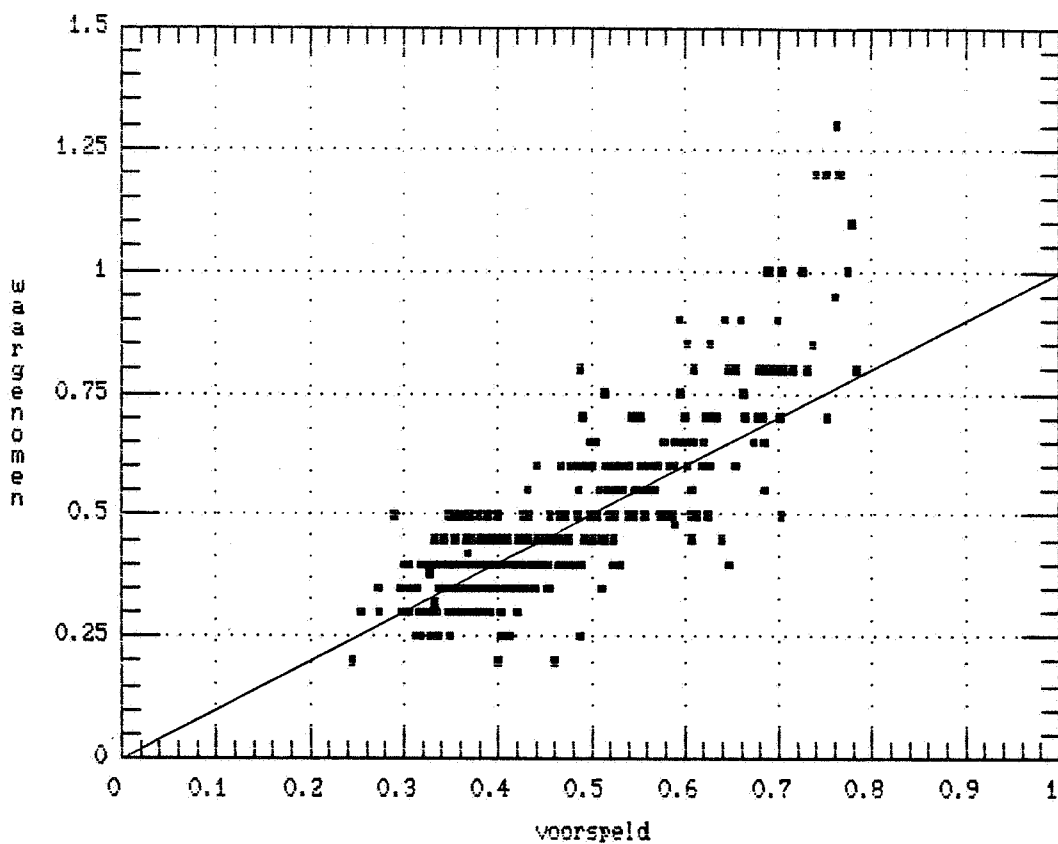
Resttermen reciproke Secchidiepte (dwt)



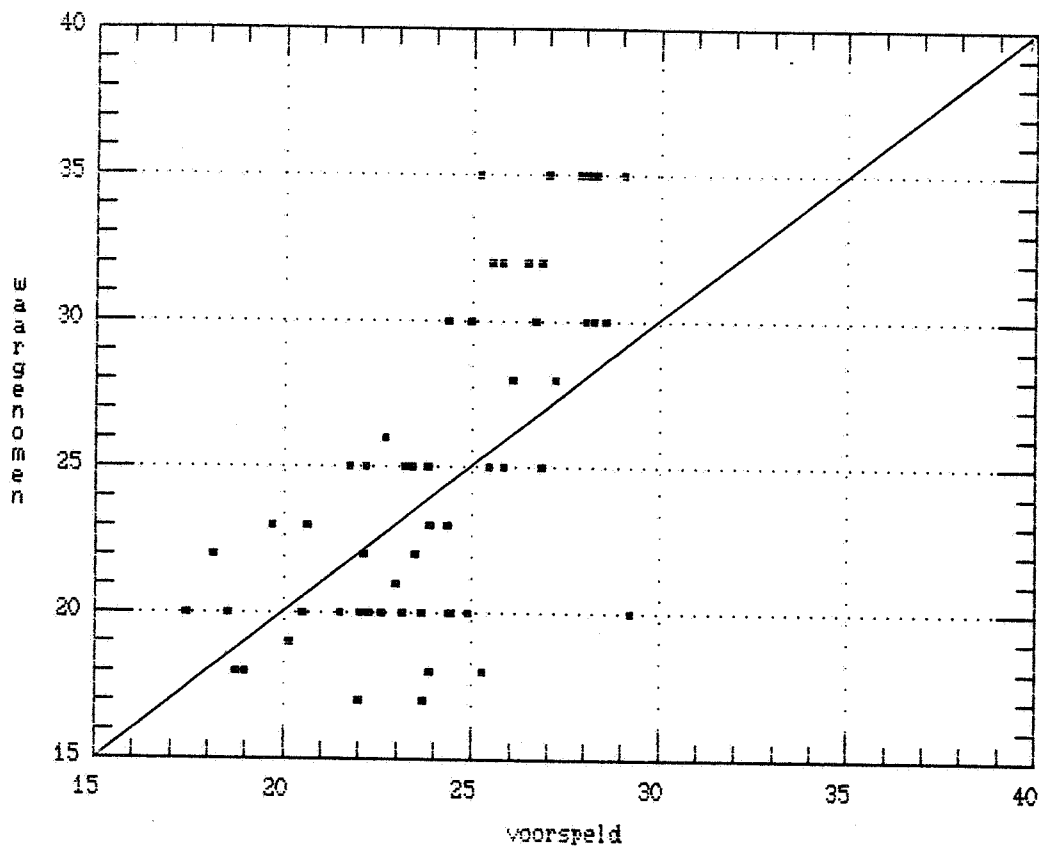
Figuur 5.7.
 Reciproke achtergrond-zichtdiepten, met 95 % betrouwbaarheidsintervallen, voor het verband tussen reciproke zichtdiepte met totaal drooggewicht alleen (m^{-1}).



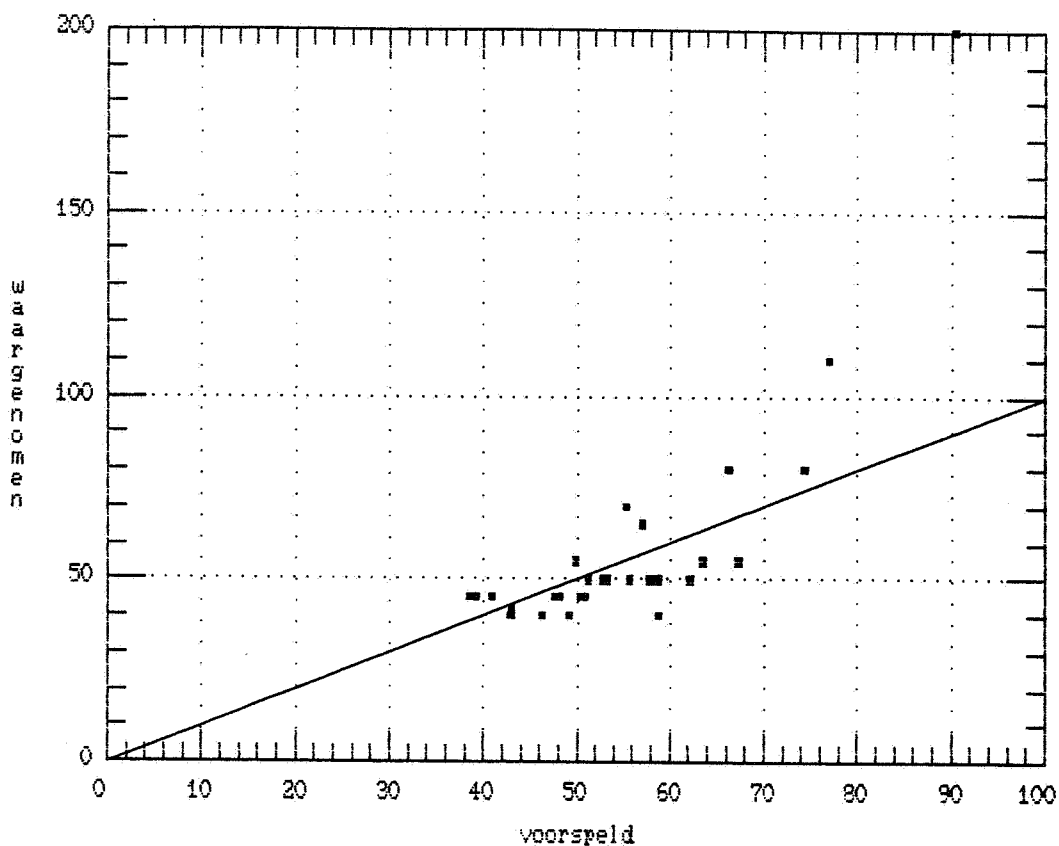
Figuur 5.8.
 Waargenomen tegen voorspelde zichtdiepte voor het Veluwemeer
 (gegevens: Rijksdienst IJsselmeerpolders).



Figuur 5.9.
 Waargenomen tegen voorspelde zichtdiepte voor de Reeuwijkse
 plassen (gegevens: Hoogheemraadschap van Rijnland / RIVM).

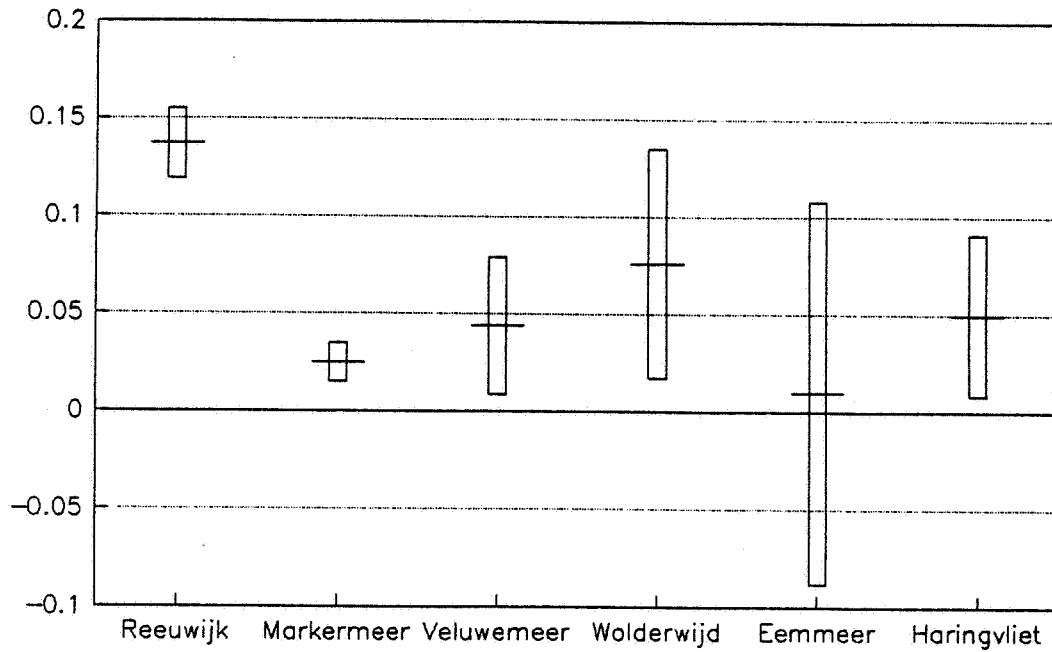


Figuur 5.10.
 Waargenomen tegen voorspelde zichtdiepte voor het Veluwemeer,
 voor waargenomen zichtdiepten kleiner dan 40 cm. (gegevens:
 Rijksdienst IJsselmeerpolders).



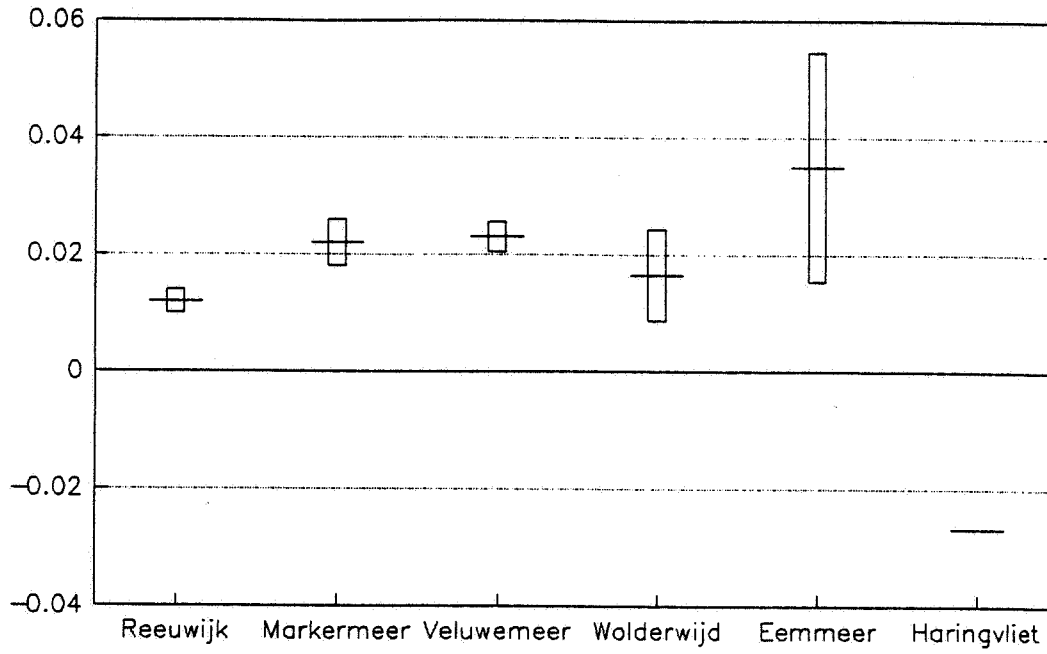
Figuur 5.11.
 Waargenomen tegen voorspelde zichtdiepte voor het Veluwemeer,
 voor waargenomen zichtdiepten groter of gelijk aan 40 cm. (ge-
 gevens: Rijksdienst IJsselmeerpolders).

Extinctiecoëfficiënten gloeirest



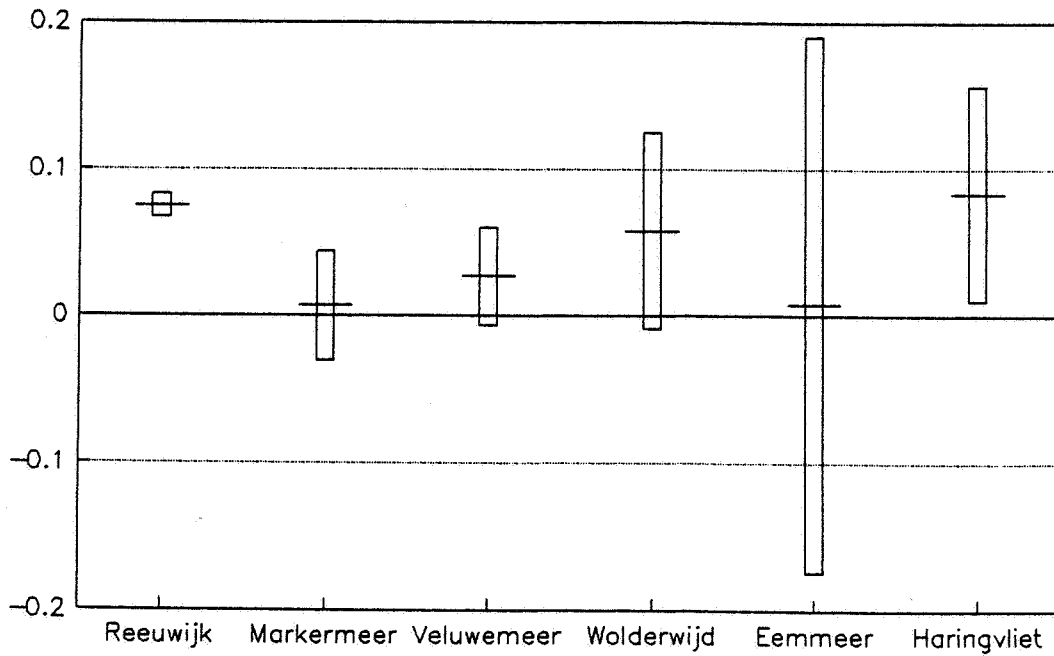
Figuur 5.12.
Specifieke extinctie-coëfficiënten voor de gloeirest fractie, met 95 % betrouwbaarheidsintervallen, voor het verband tussen extinctie met gloeirest, chlorofyl en detritus ($m^{-1} mg^{-1} l$).

Extinctie coëfficiënten chlorofyl



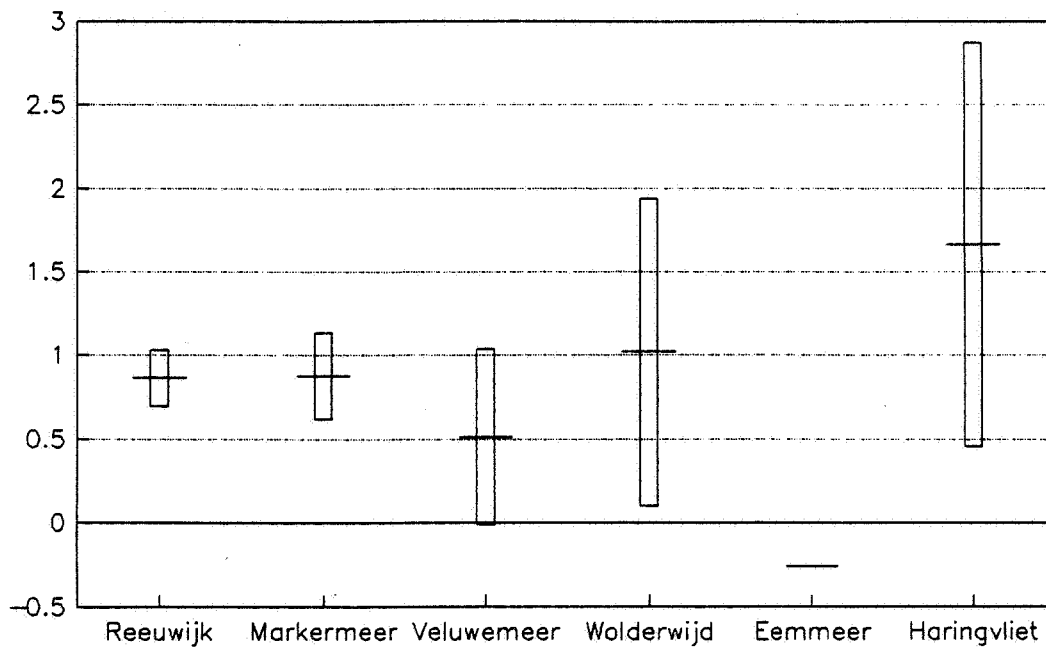
Figuur 5.13.
Specifieke extinctie-coëfficiënten voor de chlorofyl fractie, met 95 % betrouwbaarheidsintervallen, voor het verband tussen extinctie met gloeirest, chlorofyl en detritus ($m^{-1} mg^{-1} m^3$).

Extinctie coëfficiënten detritus



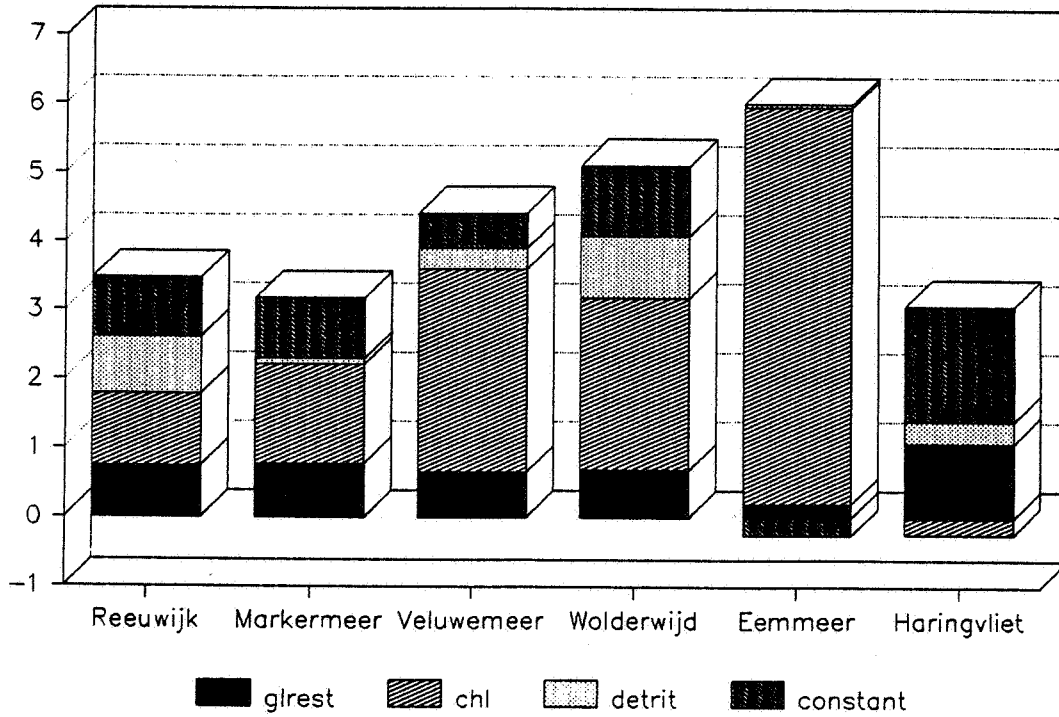
Figuur 5.14.
Specifieke extinctie-coëfficiënten voor de detritus fractie, met 95 % betrouwbaarheidsintervallen, voor het verband tussen extinctie met gloeirest, chlorofyl en detritus ($m^{-1} mg^{-1} l$).

Resttermen extincctie

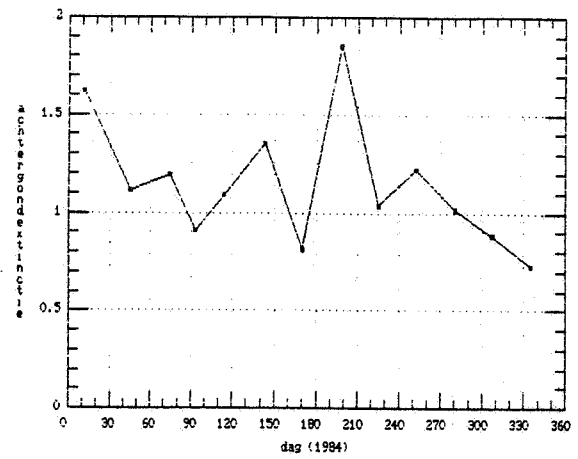
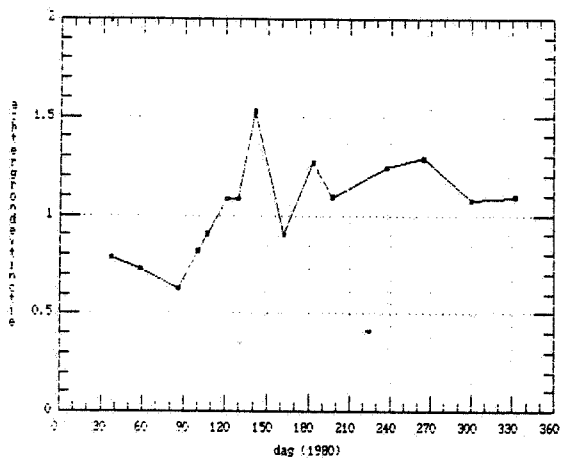
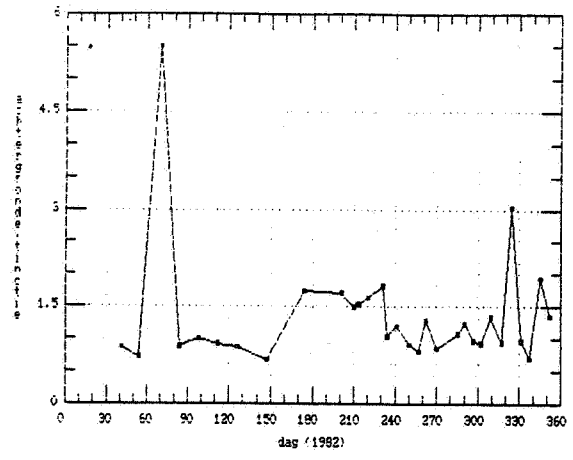
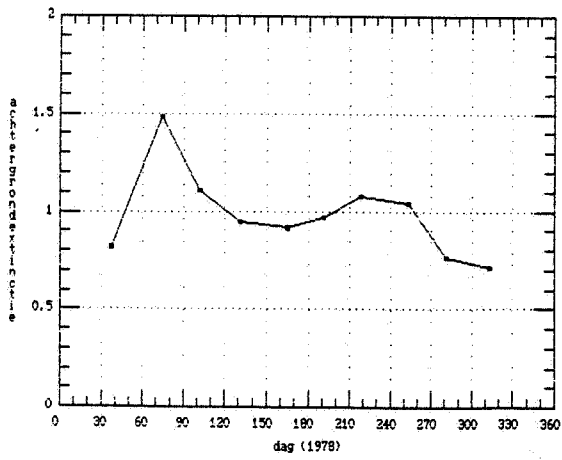


Figuur 5.15.
Achtergrond-extincties, met 95 % betrouwbaarheidsintervallen,
voor het verband tussen extincctie met gloeirest, chlorofyl en
detritus. (m⁻¹).

Bijdragen aan extinctie



Figuur 5.16.
Opbouw van de extinctie door de verschillende frakties, voor elk van de onderzochte meren (m^{-1}).



Figuur 5.17. Achtergrondextinctie voor het veluwemeer, gedurende het jaar (gegevens: Rijksdienst IJsselmeerpolders).