



waterloopkundig laboratorium  
delft hydraulics laboratory

zuurstofmodel zoommeer tijdens ontzilting

verslag onderzoek

---

R1318

april 1978

---

zuurstofmodel zoommeer tijdens ontzilting

verslag onderzoek

---

R1318

april 1978



## INHOUD

Symbolenlijst

Lijst met figuren

	blz.
<u>1</u> <u>Algemene beschouwingen</u> .....	1
1.1    inleiding en probleemstelling.....	1
1.2    studie opzet.....	3
1.3    systeemschematisatie.....	4
<u>2</u> <u>Nadere beschouwing van de verschillende processen</u> .....	7
2.1    reaeratie-proces.....	7
2.2    afstervingsproces.....	10
2.3    afbraakproces.....	12
2.4    bodemrespiratie.....	15
2.5    achtergrond zuurstofverbruik.....	16
2.6    ontziltingsproces en modelschematisaties m.b.t. het mengsysteem... 22	
<u>3</u> <u>Mathematische formulering van de modelschematisaties</u> .....	25
3.1    ideaal gemengd model.....	25
3.2    propstroommodel.....	28
3.3    gelaagd model.....	29
<u>4</u> <u>Gegevens en uitgangspunten</u> .....	35
4.1    geometrische gegevens.....	35
4.2    maximale zuurstofbehoefte voor afbraak van de totale bodembiomassa 36	
4.3    gegevens doorspoelwater (Hollands Diep).....	39
4.4    lozingen op het Volkerakmeer.....	39
4.5    windgegevens.....	40
4.6    overige gegevens.....	41
4.7    uitgangspunten.....	42
<u>5</u> <u>Oriënterende berekeningen</u> .....	44
5.1    model ideaal gemengd-propstroom-ideaal gemengd.....	45
5.1.1  Volkerakmeer (ideaal gemengd).....	45
5.1.2  Eendracht (propstroom).....	50

## INHOUD (vervolg)

	blz.
5.1.3 Kommeer (ideaal gemengd).....	52
5.2 model met propstroom in het Volkerakmeer.....	54
5.3 model met gelaagdheid in het Volkerakmeer.....	59
5.4 model ideaal gemengd voor het Markiezaat.....	61
5.5 discussie met betrekking tot de resultaten.....	63
<u>6 Berekeningen met de computermodellen IGPRIG en GEPRIG.....</u>	<u>65</u>
6.1 modelstructuur.....	65
6.2 nadere beschouwing submodellen.....	66
6.3 gevoeligheidsanalyse.....	67
6.4 berekeningsresultaten.....	72
<u>7 Diskussie en konklusies.....</u>	<u>84</u>

## Literatuur

## Appendix

### I Gelaagdheid in het Volkerakmeer tijdens ontziling

## SYMBOLLEN

		eenheid
$a_1$	dikte van de bovenlaag	m
A	oppervlakte van het meer	$m^2$
$A_{bio}$	oppervlakte van de bodem waarin de biomassa zich voornamelijk bevindt	$m^2$
$A_h$	oppervlakte van het meer op diepte h	$m^2$
$A_{12}$	uitwisselingsoppervlak tussen onder- en bovenlaag	$m^2$
$A_o$	constante in vgl. 5.1.19	-
AZV	achtergrond zuurstofverbruik	$grO_2/m^3$
B	hoeveelheid afbreekbaar organisch materiaal in de waterfase in zuurstof-equivalenten	$grO_2/m^3$
$B^{max}$	maximale waarde voor het B-gehalte	$grO_2/m^3$
$BOD_5^{20}$	zuurstofbehoefte van het water (Biochemical Oxygen Demand)	$grO_2/m^3$
C	zuurstofgehalte	$gr/m^3$
$C_o$	zuurstofgehalte instromend water	$gr/m^3$
$C^{min}$	minimale zuurstofgehalte	$gr/m^3$
$C^*$	zuurstofgehalte vóór en na het afbraakproces	$gr/m^3$
$C_+$	zuurstofgehalte buiten de 'prop'	$gr/m^3$
$C_z$	zuurstofgehalte vóór ontziltling	$gr/m^3$
$C_s$	zuurstof-verzadigingswaarde	$gr/m^3$
$Cl^-$	chloride-gehalte	$gr/m^3$
$D_1$	longitudinale dispersiecoëfficiënt	$m^2/s$
$D_z$	verticale diffusiecoëfficiënt	$m^2/s$
g	gravitatieconstante	$m/s^2$
h	diepte onder het wateroppervlak	m
H	gemiddelde diepte van het meer	m
$K_1$	afbraakconstante	$dag^{-1}$
$K_1(20)$	afbraakconstante bij $20^\circ C$	$dag^{-1}$

SYMBOLEN (vervolg)

		eenheid
$K_2$	reaeratieconstante	$\text{dag}^{-1}$
$K_L$	zuurstofoverdrachtscoëfficiënt	$\text{m/dag}$
$L$	afbreekbaar organisch materiaal	$\text{grO}_2/\text{m}^3$
$L_x$	oorspronkelijke hoeveelheid afbreekbaar organisch materiaal	$\text{grO}_2/\text{m}^3$
$L_a$	B-belasting t.g.v. afbraak	$\text{grO}_2/\text{m}^3 \cdot \text{dag}$
$L_o$	B-belasting t.g.v. lozingen	$\text{grO}_2/\text{m}^3 \cdot \text{dag}$
$n$	chloriniteit	$\text{grCl}/\text{m}^3$
$p$	luchtdruk	$\text{mmHg}$
$p_w$	dampspanning van water	$\text{mmHg}$
$p_{...}$	parameter voor gevoeligheidsanalyse	-
$Q$	doorspoeldebiet	$\text{m}^3/\text{s}$
$Q_e$	entrainmentdebiet	$\text{m}^3/\text{s}$
$Q_1$	uitstroomdebiet bovenlaag	$\text{m}^3/\text{s}$
$Q_2$	uitstroomdebiet onderlaag	$\text{m}^3/\text{s}$
$r_{bl}$	bodemrespiratie door levende organismen	$\text{grO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{dag}$
$r_{bo}$	bodemrespiratie voor bodem zonder biomassa	$\text{grO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{dag}$
$R$	zuurstofverbruik t.g.v. respiratie	$\text{grO}_2/\text{m}^3 \cdot \text{dag}$
$R^{(20)}$	zuurstofverbruik t.g.v. respiratie bij 20°C	$\text{grO}_2/\text{m}^3 \cdot \text{dag}$
$R_b$	zuurstofverbruik t.g.v. bodemrespiratie	$\text{grO}_2/\text{m}^3 \cdot \text{dag}$
$R_w$	achtergrond zuurstofverbruik	$\text{grO}_2/\text{m}^3 \cdot \text{dag}$
$S$	saliniteit	$\text{‰}$
$t$	tijd na ontziltling	$\text{dag}$
$t_a$	tijdstip waarop het afstervingsproces begint	$\text{dag}$
$t_b$	tijdstip waarop het afstervingsproces is voltooid	$\text{dag}$
$T$	temperatuur	$^{\circ}\text{C}$
$U$	stroomsnelheid in de bovenlaag	$\text{m/s}$

SYMBOLLEN (vervolg)

		eenheid
UOD	potentiële hoeveelheid afbreekbaar organisch materiaal (Ultimated Oxygen Demand)	$\text{grO}_2/\text{m}^3$
v	stroomsnelheid	m/s
V	volume van het meer	$\text{m}^3$
$V_{\text{gemengd}}$	volume onder het wateroppervlak dat volledig is gemengd	$\text{m}^3$
$V_h$	volume beneden de diepte h	$\text{m}^3$
$W_{10}$	windsnelheid op 10 m boven het wateroppervlak	m/s
x	afstand tot het instroompunt	m
$x_1$	afstand tot het front	m
X	lengte van het meer	m
$X_p$	lengte van de 'prop'	m
$\Phi$	zuurstoftoevoer t.g.v. reaeratie	$\text{grO}_2/\text{m}^3 \cdot \text{dag}$
$\Phi''$	zuurstoftoevoer per oppervlakte eenheid t.g.v. reaeratie	$\text{grO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{dag}$
$\Phi_a$	zuurstofverbruik door het afbraakproces	$\text{grO}_2/\text{m}^3 \cdot \text{dag}$
$\Phi_{\text{BOD}}^{(T)}$	zuurstofverbruik door afbraak van BOD	$\text{grO}_2/\text{m}^3 \cdot \text{dag}$
$\rho$	dichtheid van het water	$\text{kg}/\text{m}^3$
$\rho_a$	dichtheid waarbij het afstervingsproces begint	$\text{kg}/\text{m}^3$
$\rho_b$	dichtheid waarbij het afstervingsproces is voltooid	$\text{kg}/\text{m}^3$
$\rho_o$	dichtheid instromende water	$\text{kg}/\text{m}^3$
$\rho_z$	dichtheid vóór ontziltling	$\text{kg}/\text{m}^3$
$\rho_{1s}$	dichtheid bovenlaag tijdens de beschouwde beginsituatie	$\text{kg}/\text{m}^3$
$\theta$	temperatuurcorrectie-factor (vgl. 2.3.2)	-

SYMBOLEN (vervolg)

tenzij anders is vermeld zijn de volgende indices gebruikt.

e	Eendracht
k	Konmeer
m	Markiezaat
v	Volkerakmeer
1	bovenlaag
2	onderlaag



## Lijst met figuren

	blz.	
1.1	Situering van het Zoommeer	2
1.2	Vereenvoudigde systeemschematisatie m.b.t. de zuurstofhuishouding tijdens ontziltling	4
2.1	Zuurstofoverdrachtscoëfficiënt als functie van de windsnelheid	8
2.2	Afbraakconstante als functie van de temperatuur	15
2.3	Verloop van het zuurstofverbruik tijdens de BOD <sub>5</sub> - proef	
2.4.a	Maandgemiddelde AZV- waarde bepaald uit het BOD <sub>5</sub> - gehalte (A) en een eenvoudige zuurstofbalans (B)	
2.4.b	Verschil tussen de AZV - waarden via de methoden (A) en (B)	21
2.5	Geometrische schematisatie Zoommeer	24
4.1	Oppervlakte - diepte relatie Volkerakmeer	35
4.2	Volume - diepte relatie Volkerakmeer	35
4.3	Biomassa verdeling in het intergetijde gebied	36
4.4	Maximale zuurstofbehoefte (UOD) voor afbraak van de bodembiomassa van het Volkerakmeer, Eendracht, Kommeer en Markiezaat	38
5.1	Verloop van de dichtheid tijdens ontziltling	46
5.2	Verloop van het B-gehalte tijdens ontziltling	48
5.3	Verloop van het zuurstofgehalte tijdens ontziltling	49
5.4	Verloop van de dichtheid in het Volkerakmeer (1), de Eendracht (2) en het Kommeer (3)	53
5.5	Ontwikkeling van het zout/zoetfront volgens vergelijking (5.2.3) (a) en geschematiseerd (b)	55
5.6	Berekende minimale zuurstofgehalten van het Markiezaat onder maandgemiddelde omstandigheden ( $Q = 5 \text{ m}^3/\text{s}$ )	62
6.1	Verloop van het zuurstofgehalte, zuurstofbehoefte en dichtheid berekend met het model IGPRIG (jaargemiddelde en juni)	77
6.2	Verloop van het zuurstofgehalte, zuurstofbehoefte, dichtheid en dikte bovenlaag berekend met het model GEPRIG (jaargemiddelde en juni)	78

Lijst met figuren (vervolg)

	blz.
6.3 Minimale zuurstofgehalten, $Q = 150 \text{ m}^3/\text{s}$ , voor maandgemiddelden	80
6.4 Minimale zuurstofgehalten, $Q = 150 \text{ m}^3/\text{s}$ , $W_{10}=4 \text{ m/s}$ voor maandgemiddelden	81
6.5 Verloop van de concentraties e.d. voor de maand juni met $Q = 150 \text{ m}^3/\text{s}$ en een waterverlies via de Philipssluzen van $25 \text{ m}^3/\text{s}$ (GEPRIG en IGPRIG)	82
6.6 Verloop van de concentraties e.d. voor de maand juni met $Q = 50 \text{ m}^3/\text{s}$ en een waterverlies via de Philipssluzen van $25 \text{ m}^3/\text{s}$ (GEPRIG en IGPRIG)	83

## ZUURSTOFMODEL ZOOMMEER TIJDENS ONTZILTING

### 1 Algemene beschouwingen

#### 1.1 Inleiding en probleemstelling

Door de aanleg van kompartimenteringsdammen (Philipsdam en Oesterdam) zal rond 1985 het Zoommeer ontstaan, dat wordt gevormd door het huidige Volkerak en Krammer, de Eendracht en het oostelijk deel van de Oosterschelde nabij Bergen op Zoom. ( zie figuur 1.1 )

Doordat dit gedeelte van het Deltagebied aan het getij wordt onttrokken ontstaat de mogelijkheid voor een getijloze Schelde-Rijnverbinding, alsmede de mogelijkheid voor de vorming van een zoetwaterbekken.

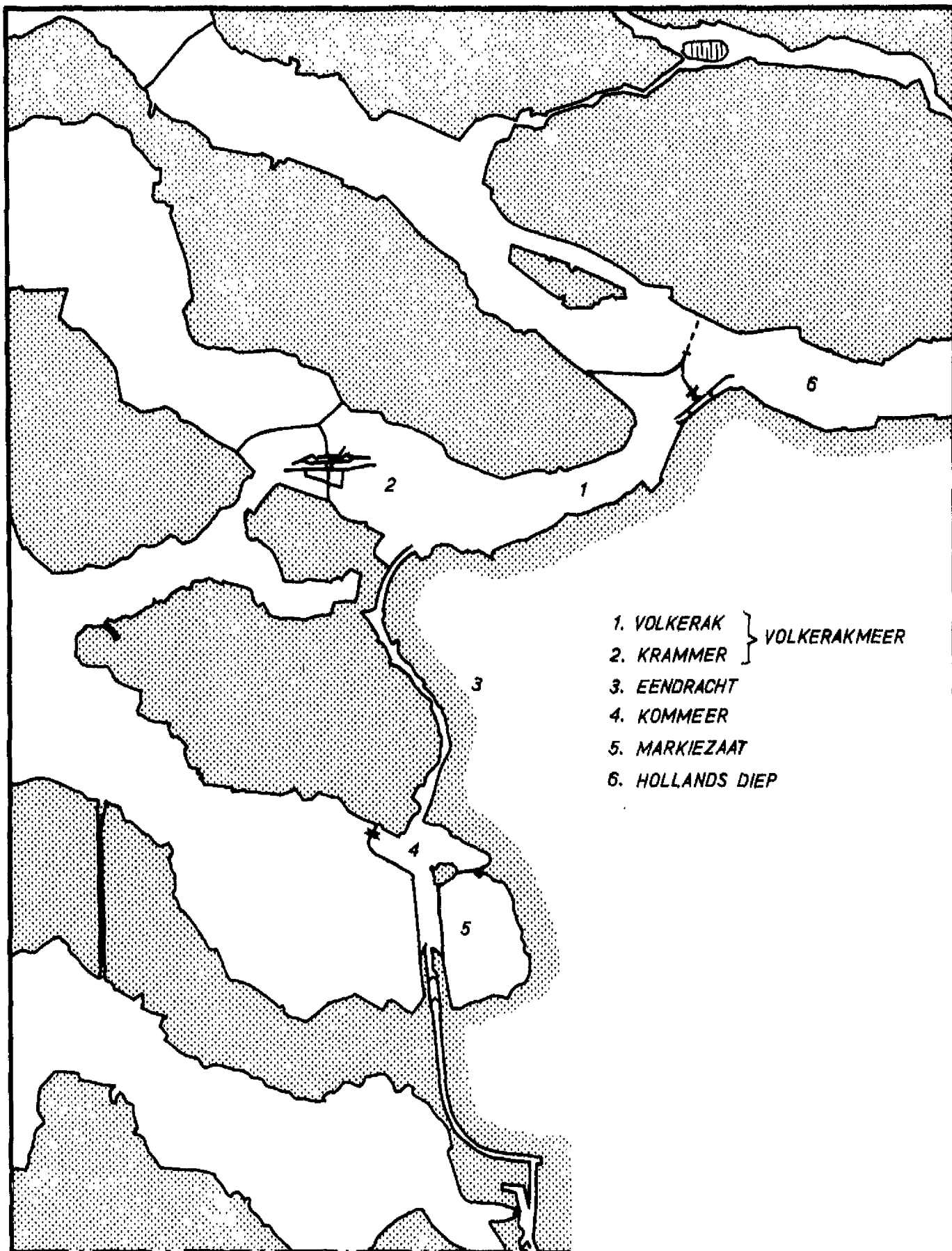
Tengevolge van de verzoeting (ontziltling) van het Zoommeer zal de oorspronkelijke specifieke zoutwater flora en fauna afsterven, hetgeen zal leiden tot een tijdelijke verslechtering van de waterkwaliteit.

Met name het zuurstofgehalte zal door de bacteriologische afbraak van de dode organismen sterk kunnen dalen, waardoor mogelijk zuurstofloosheid (anaërobie) kan ontstaan.

Onder dergelijke zuurstofloze danwel zuurstofarme omstandigheden kunnen anaërobe processen leiden tot stankoverlast, terwijl tevens het ontstaan van een nieuwe flora en fauna wordt verhinderd.

Deze studie is erop gericht om na te gaan in hoeverre de kans op anaërobie tengevolge van de ontziltling reëel is en zo ja, hoe lang dit zal kunnen duren. Tevens dient te worden nagegaan in welke periode en op welke wijze ( snel-langzaam ) het ontziltlingsproces zich het best kan voltrekken teneinde de kans op zuurstofloze omstandigheden te minimaliseren.

Deze studie is verricht door ir. J.A. van Pagee in opdracht van de afdeling Milieu Onderzoek van de Deltadienst van Rijkswaterstaat.



SITUERING VAN HET ZOOMMEER

JB

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1318 - 1005

FIG. 1.1

## 1.2 Studie opzet

Teneinde de mogelijkheid van het ontstaan van zuurstofloosheid in het Zoommeer tijdens de ontziltingsfase nader te kunnen bestuderen is het noodzakelijk inzicht te verkrijgen in de processen die zowel direct als indirect het zuurstofgehalte beïnvloeden.

Vervolgens kan worden getracht deze processen zodanig te formuleren dat deze kunnen worden ingebouwd in een mathematisch model, waarmee voor bepaalde omstandigheden het zuurstofgehalte kan worden berekend.

In eerste instantie zal daarom via een systeemschematisatie worden nagegaan welke processen het zuurstofgehalte beïnvloeden en hoe de samenhang is tussen deze processen ( par. 1.3 ).

Een nadere beschouwing van de processen is noodzakelijk teneinde de invloed van deze processen op het zuurstofgehalte te kunnen kwantificeren ( hoofdstuk 2 )

Aangezien een exacte beschrijving van de diverse processen niet mogelijk zal blijken te zijn, is het noodzakelijk diverse simplificaties in te voeren, waarbij zoveel mogelijk zal worden getracht te voorkomen dat dit het te berekenen minimale zuurstofgehalte in gunstige zin beïnvloed.

Bij sommige simplificaties zal echter niet zonder meer kunnen worden voorspeld of dit een gunstige dan wel ongunstige invloed heeft op het zuurstofgehalte. Met name de invloed van de wijze van menging is onzeker. Dit zal worden onderzocht door berekeningen te doen met een aantal geïdealiseerde mengsystemen ( hoofdstuk 3 ).

Met behulp van de aldus geformuleerde mathematische beschrijvingen van het gehele systeem dat bepalend is voor het zuurstofgehalte zullen eerst enkele oriënterende berekeningen worden gedaan teneinde inzicht te verkrijgen in de importantie van de verschillende processen ( hoofdstuk 5 ).

Voor het bepalen van het verloop van het zuurstofgehalte tijdens het ontziltingsproces zullen met behulp van enkele computermodellen meer gedetailleerde berekeningen worden gedaan ( hoofdstuk 6 ).

Uit de berekeningsresultaten kunnen vervolgens tendensen worden afgeleid, waarmee bij het ontwikkelen van de ontziltingsstrategie rekening kan worden gehouden ( hoofdstuk 7 ).

Aangezien de mogelijkheid van het ontstaan van gelaagdheid in het Volkerak vrij reëel lijkt, is aan dit aspect speciale aandacht besteed, mede omdat de ontwikkeling van de gelaagdheid de hydrodynamische basis vormt voor een zuurstofmodel onder dergelijke condities (Appendix I).

### 1.3 Systeemschematisatie

Het zuurstofgehalte in een meer wordt beïnvloed door verschillende biologische en fysische processen. Tot de belangrijkste biologische processen behoren respiratie, fotosynthese, nitrificatie, alsmede bacteriologische afbraak van dood organisch materiaal. Het belangrijkste fysische proces dat het zuurstofgehalte beïnvloedt is het reaeratieproces.

Bij de ontziltiging van een zout meer zal een groot deel van de organismen in het meer afsterven als gevolg van een verandering van het zoutgehalte. Dit heeft tot gevolg dat de hoeveelheid dood organisch materiaal sterk zal toenemen. Voor de afbraak van dit materiaal door bacteriën is zuurstof nodig, zodat dit leidt tot een verhoogd zuurstofgebruik.

Teneinde te kunnen bestuderen in hoeverre dit een sterke daling van het zuurstofgehalte tot gevolg heeft, of zelfs anaërobie kan veroorzaken, is het noodzakelijk na te gaan door welke processen het zuurstofgehalte zowel direct als indirect wordt beïnvloed en hoe de samenhang is tussen deze processen.

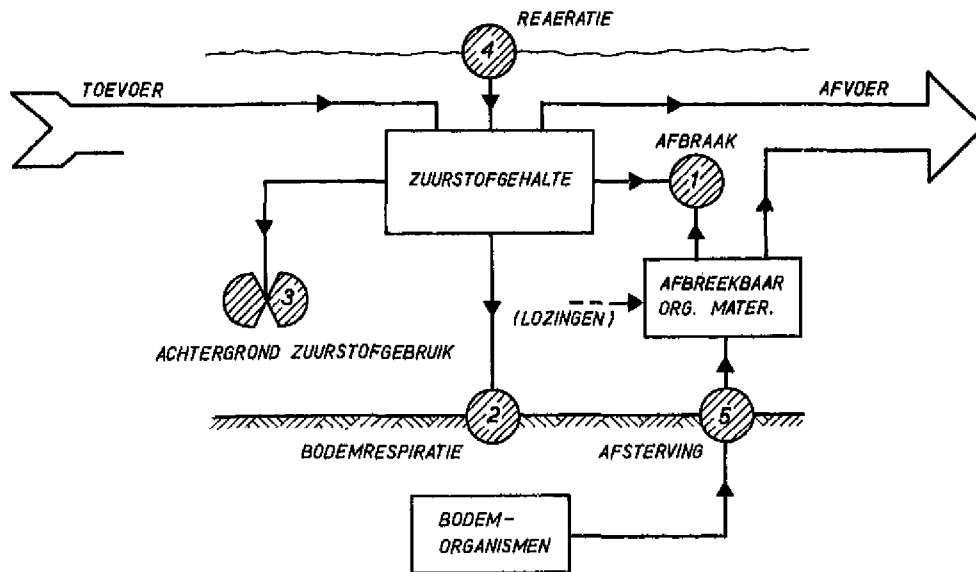


FIG. 1.2 VEREENVOUDIGDE SYSTEEMSCHEMATISATIE m.b.t. DE ZUURSTOFHUISHOUDING TJDENS ONTZILTING



In figuur 1.2 is in een vereenvoudigde systeemschematisatie weergegeven welke de belangrijkste processen zijn die tijdens de ontziltingsfase het zuurstofgehalte beïnvloeden.

Onderscheid kan worden gemaakt in processen die direct en indirect van invloed zijn op het zuurstofgehalte.

A. Processen die direct het zuurstofgehalte bepalen zijn :

1. bacteriologische afbraak van afgestorven organismen
2. bodemrespiratie
3. (netto) achtergrondzuurstofverbruik
4. reaeratie

ad 1. Dit proces betreft het zuurstofverbruik ten behoeve van de afbraak van afgestorven bodemorganismen, waarvoor is verondersteld dat deze na afsterving suspenderen en vervolgens in de waterfase worden afgebroken.

ad 2. Met dit proces wordt bedoeld het zuurstofverbruik tengevolge van respiratie van (nog) levende bodemorganismen alsmede het zuurstofverbruik t.g.v. chemische reacties in of aan de bodem.

ad 3. Onder het achtergrondzuurstofverbruik (AZV) wordt verstaan het oorspronkelijke "netto" zuurstofverbruik in de waterfase en is dus niet specifiek een gevolg van het ontziltingsproces. Dit zuurstofverbruik is de hoeveelheid zuurstof die, per tijdseenheid nodig is voor onder ander de respiratie van levende organismen (plankton, vissen en dergelijke), het nitrificatie-proces en de afbraak van op natuurlijke wijze afgestorven organismen en ander organisch materiaal (lozingen en dergelijke). Tevens is in het AZV het zuurstofproducerende fotosynthese-proces ondergebracht.

ad 4. Dit proces betreft de zuurstoftoevoer via het lucht-watergrensvlak, indien er sprake is van een zuurstofdeficiet ten opzichte van de zuurstofverzadigingswaarde.

B. Processen die indirect het zuurstofgehalte beïnvloeden zijn :

5. afstervingsproces

6. ontziltingsproces

ad 5. Het afstervingsproces betreft de afsterving van bodemorganismen tengevolge van de verandering van het zoutgehalte.

Ter vereenvoudiging van het systeem is aangenomen dat gelijktijdig met de afsterving de dode bodemorganismen worden toegevoegd aan de waterfase, alwaar door het afbraakproces het gesuspendeerde organisch materiaal wordt gemineraliseerd.

ad 6. Onder dit proces wordt benevens de verandering van het zoutgehalte tevens het mengsysteem verstaan.

Mede vanwege de complexiteit van het mengsysteem zal de invloed hiervan nader worden beschouwd door toepassing van een aantal geïdealiseerde modellen, te weten ideaal gemengd, propstroom en gelaagd model.

Alvorens nader in te gaan op de verschillende processen dient te worden opgemerkt dat de afsterving en afbraak van de organismen die zich in de waterfase bevinden niet afzonderlijk zal worden beschouwd. Deze vereenvoudiging lijkt gezien de geringe concentraties van de biomassa in de waterfase gerechtvaardigd, terwijl het effect hiervan mogelijk valt binnen de normen van het achtergrondzuurstofverbruik ( par. 2.5 ).

## 2 Nadere beschouwing van de verschillende processen

### 2.1 Reaeratie-proces

In een meer wordt het reaeratie-proces beheerst door de invloed van wind en de grootte van het zuurstofdeficiet in het water ten opzichte van de verzadigingsconcentratie. De zuurstoftoevoer via het water-oppervlak wordt gegeven door de zuurstofflux die gelijk is aan,

$$\phi'' = K_L (C_s - C) \text{ gr } O_2/m^2 \text{ dag} \quad (2.1.1)$$

$K_L$  is de zuurstofoverdrachtcoëfficiënt (m/dag),  $C_s$  de zuurstofverzadigingsconcentratie (gr/m<sup>3</sup>),  $C$  de zuurstofconcentratie (gr/m<sup>3</sup>).

Voor de zuurstoftoevoer per volume eenheid is eenvoudig af te leiden dat deze gelijk is aan,

$$\phi = K_2 (C_s - C) \text{ gr } O_2/m^3 \text{ dag} \quad (2.1.2)$$

waarbij,

$$K_2 = \frac{K_L \cdot A}{V_{\text{gemengd}}} \text{ dag}^{-1} \quad (2.1.3)$$

$K_2$  is dan de zogenaamde reaeratieconstante (dag<sup>-1</sup>),  $A$  is de grootte van de oppervlakte van het meer (m<sup>2</sup>),  $V_{\text{gemengd}}$  is het volume onder het oppervlak dat als homogeen gemengd kan worden beschouwd (m<sup>3</sup>).

In een meer, waar het stromingsbeeld voornamelijk wordt bepaald door de wind, is de zuurstofoverdrachtcoëfficiënt afhankelijk van de windsnelheid en temperatuur.

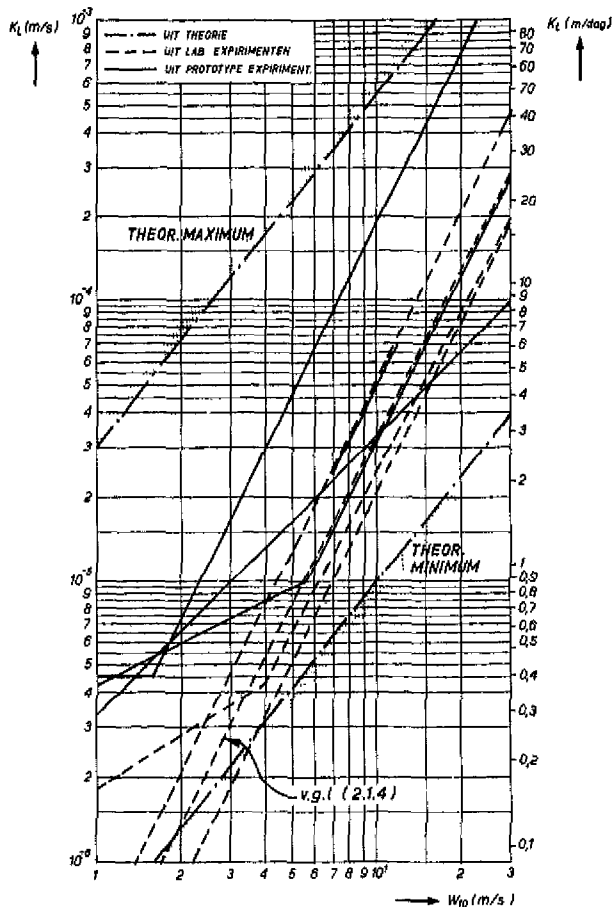
In het kader van dit project is een literatuurstudie verricht naar de grootte van natuurlijke beluchting van open water tengevolge van wind, rapport WL - R 1318 - II (1). Uit deze studie blijkt onder andere dat voor de zuurstofoverdrachtcoëfficiënt (c.q. reaeratieconstante) geen eenduidige relatie kan worden afgeleid uit bestaande theoriën en gedane experimenten.

Wel kan uit een vergelijking van theoretische beschouwingen en experimentele resultaten, zowel op laboratorium als prototype schaal, enig inzicht worden verkregen met betrekking tot de orde van grootte van de zuurstofoverdracht-coëfficiënt als functie van de windsnelheid.

In figuur 2.1 zijn enkele relaties uitgezet die empirisch zijn afgeleid uit een interpretatie van de resultaten van laboratorium en prototype experimenten. Tevens zijn in de figuur de relaties uitgezet waarmee een maximale en minimale waarde voor  $K_L$  is afgeleid op basis van een theoretische uitwerking van respectievelijk het turbulent diffusie model en stagnant filmlaag model. In het rapport wordt voor de berekening van de mate van reaeratie de volgende relatie voorgesteld,

$$K_L = 0,03 W_{10}^2 \cdot 1,016^{(T-20)} \text{ m/dag} \quad (2.1.4)$$

T is de temperatuur in °C en  $W_{10}$  is de windsnelheid op 10 meter boven het wateroppervlak in m/s.



figuur 2.1

Zuurstofoverdrachtscoëfficiënt als functie van de windsnelheid (1).

De zuurstofverzadigingsconcentratie is afhankelijk van de temperatuur, het zoutgehalte en de samenstelling van de lucht boven het wateroppervlak. In de literatuur worden verschillende relaties gegeven voor  $C_s$  ( zie o.a. Truesdale et. al (2), Fair, Okun en Geyer (3), Horne (4)).

Aangezien de door Fair et al (3) voorgestelde relatie het best overeenkomt met de waarden die zijn gebruikt bij het berekenen van de zuurstofpercentages in de waterkwaliteitsoverzichten van R.W.S. (tabel Whipple & Whipple), is in verband met het gebruik van deze gegevens hieraan de voorkeur gegeven.

De relatie luidt,

$$C_s = (0,680 - 6.10^{-4} \cdot T) (p - p_w) (1 - 9.10^{-6} \cdot n)/(T + 35) \quad (2.1.5)$$

$p$  = luchtdruk in mmHg

$p_w$  = dampspanning van water mmHg

$n$  = chloridegehalte in  $gr/m^3$

Bij benadering gelden de volgende relaties,

$$p = 760$$

$$p_w = 4,6 + 0,032 T^2$$

$$n = \frac{\rho - 1000}{1,45 \cdot 10^{-3}} \quad (\rho = \text{dichtheid van water in } kg/m^3)$$

zodat,

$$C_s = (0,680 - 6.10^{-4} T) (755,4 - 0,032 T^2) (1 - 9.10^{-6} \cdot \frac{\rho - 1000}{1,45}) \cdot \frac{1}{T + 35} \quad (2.1.6)$$

Opmerking :

De invloed van het zoutgehalte op  $K_L$  is buiten beschouwing gelaten aangezien hiervoor geen duidelijke relatie kan worden afgeleid.

Wel is de zoutinvloed gemeten in een systeem dat werd gemengd met behulp van roerders ( zie rapport Thames (5)), waarbij bleek dat bij toenemend zoutgehalte de reaeratie vermindert met een factor  $1 - 0,06 \sqrt{S}$ , waarbij  $S$  de saliniteit van het water is in gr zout/1000 gr water.

De invloed van zout blijkt overigens sterk af te hangen van het stromingsbeeld zodat deze relatie voor windstroming niet zonder meer kan worden gebruikt. Mede in verband met de onzekerheid in de voorgestelde relatie van  $K_L$  zal daarom de invloed van het zoutgehalte op  $K_L$  worden verwaarloosd.

## 2.2 Afstervingsproces

De afsterving van de oorspronkelijke zoutwater flora en fauna op de bodem van het Zoommeer kan tengevolge van de volgende factoren worden geïnitieerd,

1. stilzetten van het getij
2. verandering van het zoutgehalte
3. zuurstofarmoede

ad 1. Het stilzetten van het getij heeft tot gevolg dat de organismen afsterven, die zich in dat bodemgedeelte bevinden dat niet meer wordt overspoeld. Het afbraakproces van deze dode organismen zal echter geen nadelige invloed hebben op het zuurstofgehalte van het water, tenzij via de afvoer van regenwater een deel van het organische materiaal het Zoommeer inspoelt. Het oxidatieproces van de dode organismen op de drooggevallen gebieden kan weliswaar leiden tot enige stankoverlast, doch bij de afsluiting van het Veerse Meer en Grevelingenmeer is gebleken dat dit van beperkte omvang is.

Van de organismen die overspoeld blijven zal mogelijk een gedeelte afsterven, tengevolge van het wegvallen van het getij. De verwachting is echter dat dit een gering percentage van de totale hoeveelheid organismen zal betreffen.

ad 2. De verandering van het zoutgehalte zal leiden tot het afsterven van de specifieke zoutwater flora en fauna. Bij welk zoutgehalte dit op zal treden is onbekend, maar te verwachten is dat niet alle organismen bij eenzelfde zoutconcentratie af zullen sterven. Dit vanwege de grote diversiteit aan organismen en het onderling verschil in resistentie met betrekking tot veranderingen van het milieu ( zie o.a. Ringelberg (6) ).



Derhalve is te veronderstellen dat de afsterving aanvangt bij een bepaalde waarde voor het zoutgehalte en nagenoeg volledig is als het zoutgehalte voor het merendeel van de organismen een kritische waarde heeft bereikt.

In navolging van Vegter (7) is aangenomen dat over een dergelijk zouttraject de afsterving nagenoeg evenredig is met de verandering van het zoutgehalte. Een mogelijke orde van grootte met betrekking tot het zouttraject waarin het afstervingsproces plaatsvindt, is geschat op ca.  $\frac{1}{3}$  van het totale zouttraject dat ten behoeve van de ontzilting wordt doorlopen. Uitgaande van bijvoorbeeld een oorspronkelijk chloridegehalte van ca. 12.000 gr/m<sup>3</sup> voor het Volkerak wordt dan aangenomen dat de afsterving plaatsvindt over het zouttraject van 8.000 - 4.000 gr/m<sup>3</sup>.

ad 3. Een andere oorzaak met betrekking tot het afsterven van de bodemorganismen is een zuurstofarme omgeving. Een dergelijke situatie zou bijvoorbeeld kunnen ontstaan indien reeds een gedeelte van de organismen is afgestorven en het betreffende organische materiaal via biologische oxidatieprocessen wordt gemineraliseerd.

Beukema (8) merkt op dat een massale afsterving van de bodemorganismen optreedt, indien het zuurstofgehalte geringer is dan 1 à 2 gr/m<sup>3</sup>.

Zoals reeds in paragraaf 1.2 is opgemerkt zal worden aangenomen dat de afbraak van het organisch materiaal afkomstig van de afgestorven bodemorganismen, plaatsvindt in de waterfase. Dit impliceert dat wordt aangenomen dat het afbraakproces pas zal aanvangen nadat het organisch materiaal is gesuspendeerd.

De turbulentiegraad zal hierbij een belangrijke rol spelen, terwijl tevens van belang is hoe het zoö-benthos zich zal gedragen bij afsterving. Bij afsterving tengevolge van zuurstofarmoede is waargenomen dat kort voor de afsterving het zoö-benthos massaal naar het bodemoppervlak komt. Indien echter het zoö-benthos als het ware vlucht voor het veranderde zoutgehalte, zal het dieper de bodem ingaan en zal daardoor het suspenderen van het organisch materiaal beduidend moeizamer verlopen.

Aangezien zowel met betrekking tot het afsterven van de organismen, als met betrekking tot het suspenderen van het afgestorven organisch materiaal diverse onzekerheden bestaan, zal voor de eenvoud worden aangenomen dat onder het afstervingsproces tevens het in suspensie komen van het af te breken organisch materiaal wordt verstaan.

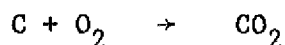
Verder zal bij de berekeningen alleen afsterving tengevolge van het zoutgehalte worden verondersteld, waarbij over het afstervingstraject wordt aangenomen dat het vrijkomen van het afbreekbare organisch materiaal evenredig is met de verandering van het zoutgehalte (c.q. dichtheid).

### 2.3 Afbraakproces

Voor het afbreken van het afgestorven organisch materiaal door bacteriën is zuurstof nodig. De potentiële hoeveelheid zuurstof die nodig is voor volledige mineralisatie kan worden uitgedrukt in de UOD-waarde (Ultimate Oxygen Demand).

De grootte van deze UOD-waarde kan worden bepaald door te veronderstellen dat alle organisch gebonden koolstof en stikstof moet worden geoxideerd (zie o.a. literatuur (5) ). Aangezien het stikstofpercentage over het algemeen vrij gering is zal alleen de oxidatie van organische koolstof nader worden beschouwd.

De eenvoudigste reactie-vergelijking van de oxidatie van koolstof is,



De hoeveelheid zuurstof, die in dit geval per gram koolstof nodig is voor oxidatie, is gelijk aan,

$$\frac{2 \times 16}{12} = 2,67 \text{ gr } O_2 / \text{ gr } C$$

Aangezien de afbraak van organisch materiaal plaatsvindt via veel meer complexe reacties zal de zuurstofbehoefte voor de oxidatie van 1 gram organische koolstof enigszins kunnen afwijken van bovengenoemde waarde, terwijl in deze ook het soort organische materiaal van belang is.

Uit een beschouwing van de chemische samenstelling van het organisch materiaal blijkt dat dit o.a. 50 - 60 gewichtsprocent organisch gebonden koolstof bevat (5).

Een redelijke schatting lijkt derhalve dat voor het afbreken van organisch materiaal ca. 1,3 - 1,6 gram  $O_2$  per gram organische stof nodig is.

Deze schatting komt min of meer overeen met Vegter (7), die stelt dat 1,42 gram  $O_2$  per gram organische stof nodig is.

Indien de totale hoeveelheid organisch materiaal per  $m^2$  van het bodemoppervlak bekend is, kan hieruit de maximale zuurstofbehoefte op eenvoudige wijze worden afgeleid. (zie paragraaf 4.2)

Voor het bepalen van de hoeveelheid zuurstof die per tijdseenheid nodig is ten behoeve van het afbraakproces, wordt over het algemeen aangenomen dat deze evenredig is met de zuurstofbehoefte ( $1^e$  orde afbraak). De grootte van de evenredigheidsconstante (afbraakconstante) is daarbij bepalend voor de snelheid waarmee het oxidatieproces zich voltrekt.

De hoeveelheid zuurstof die per tijdseenheid door het afbraakproces wordt verbruikt is gelijk aan,

$$\phi_a = K_1 \cdot B \quad \text{gr}O_2/m^3 \cdot \text{dag} \quad (2.3.1)$$

B is hierbij de concentratie van het organisch materiaal afkomstig van de afgestorven bodem-organismen, uitgedrukt in zuurstofequivalenten volgens de UOD-bepaling.

$K_1$  is de afbraakconstante ( $\text{dag}^{-1}$ ).

De grootte van de afbraakconstante zal afhangen van de soort bacteriën die in het meer aanwezig zijn, het soort organisch materiaal dat wordt gemineraliseerd, temperatuur en zoutgehalte.

Gotaas (9) heeft metingen gedaan teneinde  $K_1$  te bepalen voor verschillende temperatuur en zoutgehalte. Uit de resultaten blijkt dat bij een chloriniteit van 2 - 4 ‰ de afbraakconstante het grootst is, hetgeen in overeenstemming is met de bevindingen van Martin et al (10).

Qua orde grootte vond Gotaas bij 20 °C ,  $K_1$  - waarden van 0,1 - 0,3 dag<sup>-1</sup> en bij 10 °C van 0,07 - 0,15 dag<sup>-1</sup>.

In het kader van de Thames Studie (5) zijn verschillende metingen gedaan naar de grootte van de afbraakconstante betrokken op UOD. Hieruit kan worden geconcludeerd dat de afbraakconstante niet constant is maar geleidelijk afneemt met de duur van het afbraakproces.

De resultaten van de metingen lopen ver uiteen, maar qua orde grootte kan worden aangegeven dat over 5 dagen bezien de afbraakconstante gelijk is aan 0,04 - 0,2 dag<sup>-1</sup> bij 20 °C.

Voor rivieren worden veelal waarden gehanteerd van 0,1 - 0,4 dag<sup>-1</sup> (20 °C) (zie o.a. rapport WL-R 1056-II (Rijnstudie) (11) ), ook hierbij wordt vaak opgemerkt dat de afbraakconstante afneemt naar gelang de duur van het proces (zie o.a. Wolf (12) ).

Voor de beschrijving van de temperatuurafhankelijkheid van de afbraakconstante wordt voor temperatuursvariaties van 15 - 30°C veelal de onderstaande relatie gebruikt,

$$K_1(T) = K_1(20) \cdot \theta^{T-20} \quad (2.3.2)$$

De parameter  $\theta$  varieert hierbij in de waarde van 1,03 - 1,05.

Een in de literatuur veel voorkomende waarde is  $\theta = 1,047$ .

Wolf (12) heeft empirisch de volgende relaties afgeleid (zie figuur 2.2)

$$K_1(T) = K_1(20) \cdot 0,75 \cdot 1,108^{(T-15)} \quad 0 < T < 15^\circ\text{C} \quad (2.3.3.a)$$

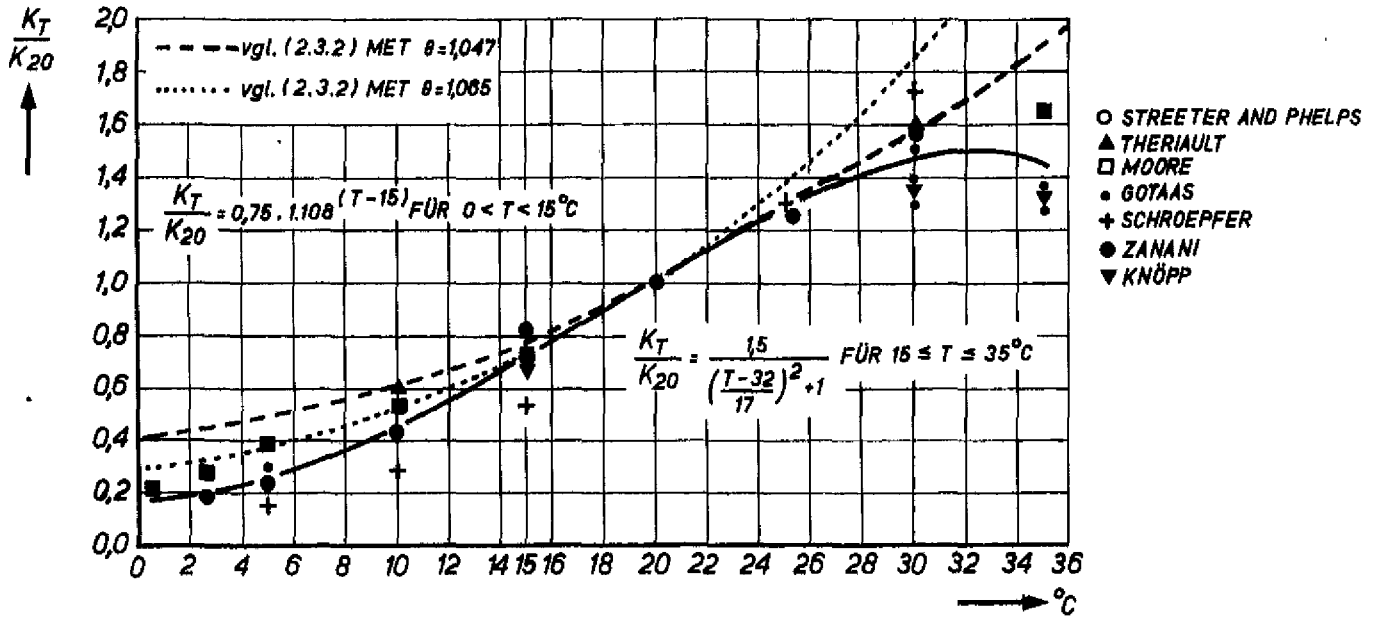
$$K_1(T) = K_1(20) \cdot \frac{1,5}{\left(\frac{T-32}{17}\right)^2 + 1} \quad 15 < T < 35^\circ\text{C} \quad (2.3.3.b)$$

Mede vanwege het grotere temperatuurstraject dat door deze relaties wordt beschreven is hieraan de voorkeur gegeven.

Voor de berekeningen is met betrekking tot de grootte van de afbraakconstante uitgegaan van

$$K_1(20) = 0,3 \text{ dag}^{-1} \quad (2.3.4)$$

waarbij de invloed van het zoutgehalte en dergelijke buiten beschouwing is gelaten.



figuur 2.2 Afbraakconstante als functie van de temperatuur.

#### 2.4 Bodemrespiratie

Metingen van de bodemrespiratie zijn o.a. gedaan bij de Thames studie (5). Hierbij werd een orde-grootte van de respiratie gevonden van ca.  $0,96 \text{ grO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{dag}$  ( $20^\circ\text{C}$ ). Indien zich in de bodem tubifex-wormen bevinden blijkt het zuurstofverbruik per oppervlakte-eenheid een factor 10 groter te zijn.

Thomann (13) geeft voor een estuarium een waarde voor de bodemrespiratie van ca.  $1-2 \text{ grO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{dag}$  bij  $20^\circ\text{C}$ , hetgeen dus vrij goed in overeenstemming is met de Thames studie.

Ook Brewer et al (14) vindt voor de bodemrespiratie een orde-grootte van ca.  $1 \text{ grO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{dag}$ .

Zowel Thomann (13) als lit. (5) geven aan dat bij een temperatuur van  $10^\circ\text{C}$  de grootte van de bodemrespiratie circa de helft bedraagt van de respiratie bij  $20^\circ\text{C}$ .

Thomann stelt op basis hiervan voor, de temperatuursinvloed volgens een zelfde relatie als (2.3.2) te beschrijven, waarbij  $\theta \approx 1,065$ . Voor temperatuursvariaties van  $10-30^\circ\text{C}$  geeft dit redelijke resultaten, voor temperaturen beneden de  $10^\circ\text{C}$  worden echter lagere waarden gevonden dan die welke met deze relatie worden berekend. Mede omdat volgens Brewer et al (14) het zuurstofverbruik aan de bodem voornamelijk is toe te schrijven aan biologische processen die vergelijkbaar zijn met het afbraakproces zal voor de temperatuursafhankelijkheid van de bodemrespiratie gebruik worden gemaakt van dezelfde relaties (2.3.3.a,b) als voor de beschrijving van de temperatuursafhankelijkheid van de afbraakconstante.

(In figuur 2,2 is het verloop van deze relaties uitgezet, terwijl hierin tevens het verloop van de door Thomann voorgestelde relatie is opgenomen.)

De grootte van de bodemrespiratie bij 20°C is voor de berekeningen gesteld op 1 grO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>.dag. Voor die gedeelten waarin de biomassa zich voornamelijk bevindt, is voor de grootte van de bodemrespiratie 2 grO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>.dag verondersteld. Ten gevolge van de afsterving van de bodemorganismen is aangenomen dat deze waarde evenredig met de afsterving afneemt tot eveneens 1 grO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>.dag.

### 2.5 Achtergrond-zuurstofverbruik

Het begrip achtergrond-zuurstofgebruik (AZV) is ingevoerd ten einde op eenvoudige wijze de invloed van die processen in rekening te kunnen brengen, die samen met het zuurstofverbruik ten behoeve van het afbraakproces (zie paragraaf 2.3) het totale zuurstofverbruik in de waterfase bepalen.

De processen die direct onder het begrip 'AZV' vallen zijn:

- a. zuurstofverbruik ten behoeve van bacteriologische afbraak van organisch materiaal afkomstig van lozingen en afgestorven organismen uit de waterfase (n.b. hieronder valt niet de afbraak van afgestorven bodemorganismen, zie hiervoor paragraaf 2.3)
- b. zuurstofverbruik ten gevolge van respiratie van organismen (vissen, plankton e.d.) in de waterfase.  
(n.b. hieronder valt niet de respiratie van de bodemorganismen, zie hiervoor paragraaf 2.4)
- c. het zuurstofverbruik ten behoeve van de oxidatie van ammonia tot nitraat onder invloed van nitrificerende bacteriën (nitrificatie)
- d. zuurstofproductie ten gevolge van fotosynthese.

Een gedetailleerde beschrijving van bovengenoemde processen is een ingewikkelde zaak die slechts nader kan worden beschouwd indien er voldoende waterkwaliteitsgegevens beschikbaar zijn. Mede door het ontbreken hiervan en het feit dat de invloed van de verandering van het zoutgehalte op die processen slechts kwalitief zal kunnen worden aangegeven, zal daarom worden volstaan met een schatting ten aanzien van de orde van grootte van het netto zuurstofverbruik door bovengenoemde processen.



Op twee verschillende wijzen is getracht een afchatting te maken voor het achtergrond-zuurstofverbruik.

A. Afchatting AZV uit BOD<sub>5</sub>-gehalte

Een schatting van het zuurstofverbruik ten behoeve van afbraak van organisch materiaal (a) en de respiratie van organismen (b) is mogelijk door gebruik te maken van de beschikbare gegevens met betrekking tot het BOD<sub>5</sub>-gehalte.

Het BOD<sub>5</sub>-gehalte is de hoeveelheid zuurstof die bij 20°C door een volume-eenheid water wordt verbruikt gedurende de eerste 5 dagen na incubatie.

Bij de bepaling van het BOD<sub>5</sub>-gehalte wordt zowel de invloed van het nitrificatieproces als van het fotosyntheseprocess onderdrukt zodat het aldus gemeten zuurstofverbruik bepaald wordt door afbraak en respiratie. Indien 1e orde afbraak wordt verondersteld dan is voor het zuurstofverbruik over 5 dagen af te leiden

$$BOD_5^{20} = \int_0^5 K_1(20) \cdot L \, dt + \int_0^5 R(20) \, dt \quad (2.5.1)$$

L is de potentiële zuurstofbehoefte voor de afbraak van het organisch materiaal, uitgedrukt in zuurstofequivalenten. K<sub>1</sub>(20) is de afbraakconstante bij 20°C.

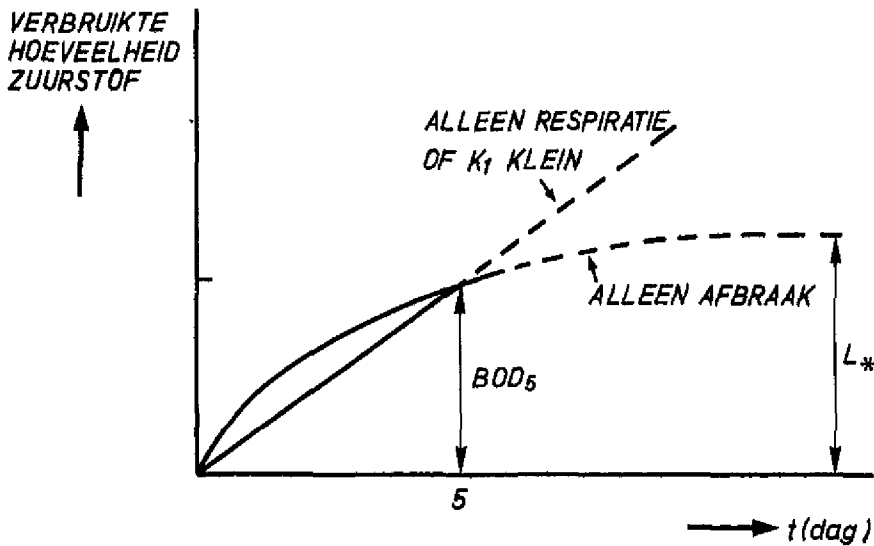
R(20) is het zuurstofverbruik ten gevolge van respiratie bij 20°C.

Indien L<sub>\*<sub>z</sub></sub> de zuurstofbehoefte is op t = 0, dan is na uitwerking van de 1e orde afbraakvergelijking  $\frac{dL}{dt} = -K_1 L$ , eenvoudig af te leiden dat

$$BOD_5^{20} = L_{*z} (1 - e^{-K_1(20) \cdot 5}) + R(20) \cdot 5 \quad (2.5.2)$$

Hierbij is tevens aangenomen dat R(20) konstant is.

De grootte van zowel L<sub>\*<sub>z</sub></sub>, K<sub>1</sub>(20) en R(20) zijn onbekend, zodat ook het verloop van de verbruikte hoeveelheid zuurstof onbekend is. Enkele mogelijkheden zijn opgenomen in figuur 2.3.



figuur 2.3 Verloop van het zuurstofverbruik tijdens de BOD<sub>5</sub>-proef

Uit de figuur blijkt dat tijdens de BOD<sub>5</sub>-bepaling het zuurstofverbruik over het algemeen geleidelijk afneemt. Aangezien het zuurstofverbruik ten tijde van de monsternamen vergelijkbaar is met het zuurstofverbruik aan het begin van de proef dient voor de afschatting van het AZV het aanvankelijke zuurstofverbruik te worden bepaald.

Hiervoor geldt:

$$\phi_{\text{BOD}} = K_1 L_* + R \quad (2.5.3)$$

Mede omdat de grootte van de respiratieterm onbekend is, is ten behoeve van een eerste afschatting van het AZV aangenomen dat het zuurstofverbruik bij benadering gelijk is aan het over de BOD<sub>5</sub>-proef gemiddelde zuurstofverbruik, zodat

$$\phi_{\text{BOD}} \approx \frac{\text{BOD}_5}{5} \quad (2.5.4)$$

Voor de invloed van de temperatuur op dit zuurstofverbruik blijkt uit vergelijking (2.5.3) dat

$$\phi_{\text{BOD}}(T) = \frac{K_1(T) L_* + R(T)}{K_1(20) L_* + R(20)} \cdot \phi_{\text{BOD}}(20) \quad (2.5.5)$$

Aangezien de temperatuursinvloed op de respiratie vergelijkbaar is met de temperatuursinvloed op de afbraakconstante lijkt het aannemelijk te veronderstellen dat de temperatuursafhankelijkheid van het aldus bepaalde AZV eveneens zal kunnen worden benaderd door de relaties (2.3.a, b).

Door Van Stralen e.a. (15) is direct de temperatuursafhankelijkheid bepaald van het  $BOD_5$ -gehalte waarvoor een afhankelijkheid is gevonden die eveneens redelijk kan worden beschreven met bovengenoemde relaties.

Een globale methode voor de afschatting van het AZV is derhalve mogelijk met behulp van vergelijking (2.5.4) en toepassing van de temperatuurscorrecties overeenkomstig vergelijking (2.3.3a, b).

#### B. Afschatting van het AZV uit de gegevens voor het Hollands Diep

Aangezien voor de doorspoeling van het Zoommeer het water uit het Hollands Diep wordt gebruikt, lijkt het zinvol na te gaan of voor dit water direct het achtergrond-zuurstofverbruik kan worden afgeleid uit een eenvoudige zuurstofbalans. Mede omdat onder het begrip AZV alle zuurstofverbruikende en eventuele zuurstofproducerende processen zijn ondergebracht, behalve het zuurstofverbruik aan de bodem (bodemrespiratie, paragraaf 2.5) en de zuurstoftoevoer door het lucht-watergrensvlak (reaeratie, paragraaf 2.1), bevat de zuurstofbalans de volgende termen

$$\text{zuurstoftoename} = \text{reaeratie} - \text{bodemrespiratie} - \text{AZV}$$

zodat,

$$\text{AZV} = \text{reaeratie} - \text{bodemrespiratie} - \text{zuurstoftoename}$$

De grootte van de reaeratieterm kan worden bepaald met behulp van de vergelijkingen (2.1.2), (2.1.3), (2.1.4) en (2.1.6), aangezien de gegevens als zuurstofgehalte, temperatuur en windsnelheid bekend kunnen worden verondersteld.

De grootte van de bodemrespiratie is voor de gehele bodem gesteld op ca.  $1 \text{ grO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{dag}$  bij  $20^\circ\text{C}$ . Met toepassing van de temperatuurcorrectie is hiermee de bodemrespiratieterm te berekenen.

Indien het Hollands Diep wordt beschouwd als een langzaam stromende rivier, dan blijkt uit een vergelijking van het zuurstofgehalte aan het begin (nabij

Moerdijk) en aan het eind van dit traject (Haringvlietsluizen), dat het zuurstofgehalte over het algemeen toeneemt. De grootte van de zuurstoftoename-term is afgeschat uit de globale toename (ca. 2 à 3 gr/m<sup>3</sup>) en de gemiddelde stroomtijd (ca. 20 à 30 dagen) zodat qua orde-grootte deze term kan worden afgeschat op 0,1 gr/m<sup>3</sup> dag.

Op basis van maandgemiddelde gegevens zijn de waarden berekend van het AZV, waarbij de berekening is geschied zowel uit het BOD<sub>5</sub>-gehalte (methode A) als via de vereenvoudigde zuurstofbalans (methode B).

De benodigde gegevens zijn betrokken uit het waterkwaliteitsonderzoek van Rijkswaterstaat (16) en door het KNMI verstrekte windgegevens over de periode 1972-1974 (zie resp. paragraaf 4.3 en 4.5).

De resultaten zijn grafisch uitgezet in figuur 2.4.a.

Opmerkelijk hierbij is dat hoewel over het jaargemiddelde de beide methoden qua orde-grootte dezelfde AZV-waarde geven, de seizoeninvloeden duidelijke tendensverschillen vertonen. Met name in de zomerperiode is het AZV, berekend uit de zuurstofbalans, beduidend kleiner dan op basis van het BOD<sub>5</sub>-gehalte is afgeleid.

De verschillen tussen beide methoden zijn toe te schrijven aan diverse oorzaken, waarvan mogelijk de belangrijkste is het onderdrukken van de invloed van fotosynthese bij de bepaling van het BOD<sub>5</sub>-gehalte.

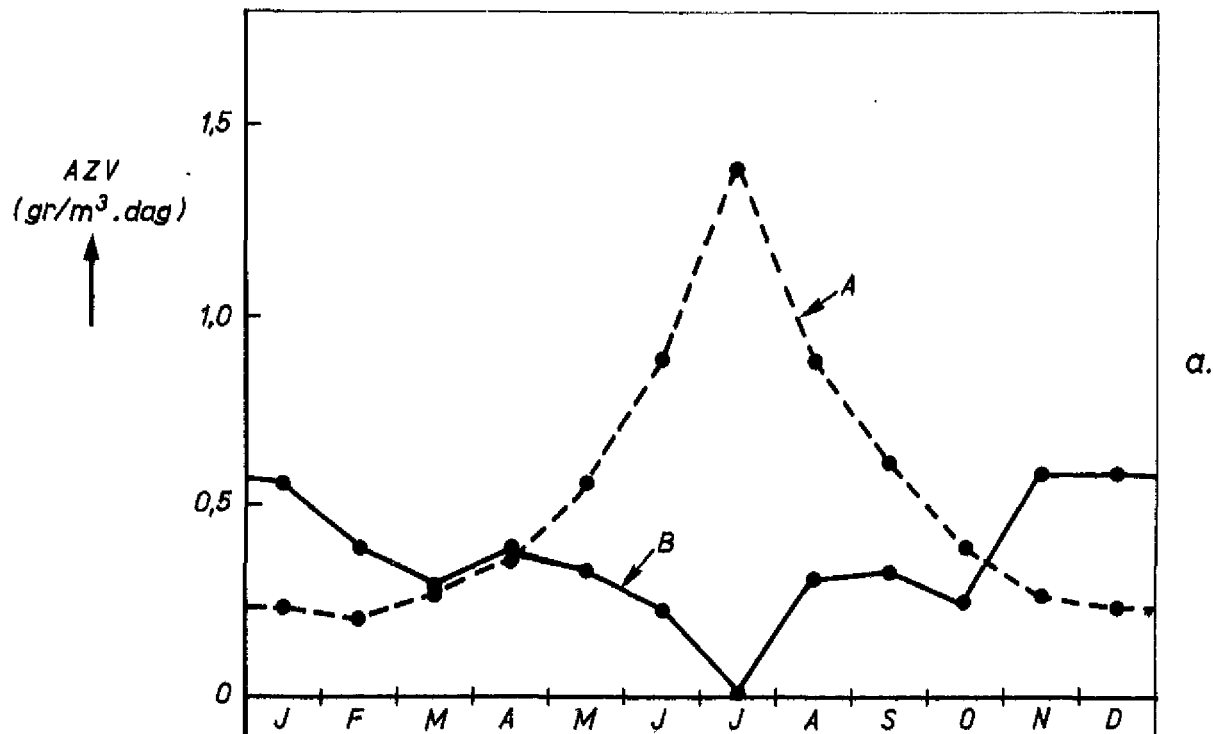
Tevens worden afwijkingen veroorzaakt door de vereenvoudigingen die bij beide methoden zijn toegepast.

In figuur 2.4.b is het verschil tussen het via beide methoden bepaalde AZV uitgezet. Zowel qua tendens als orde-grootte lijkt het aannemelijk dat een belangrijk deel van de verschillen is toe te schrijven aan de invloed van fotosynthese. In hoeverre echter met dit proces tijdens de ontziltingsfase van het Zoommeer rekening mag worden gehouden is onzeker.

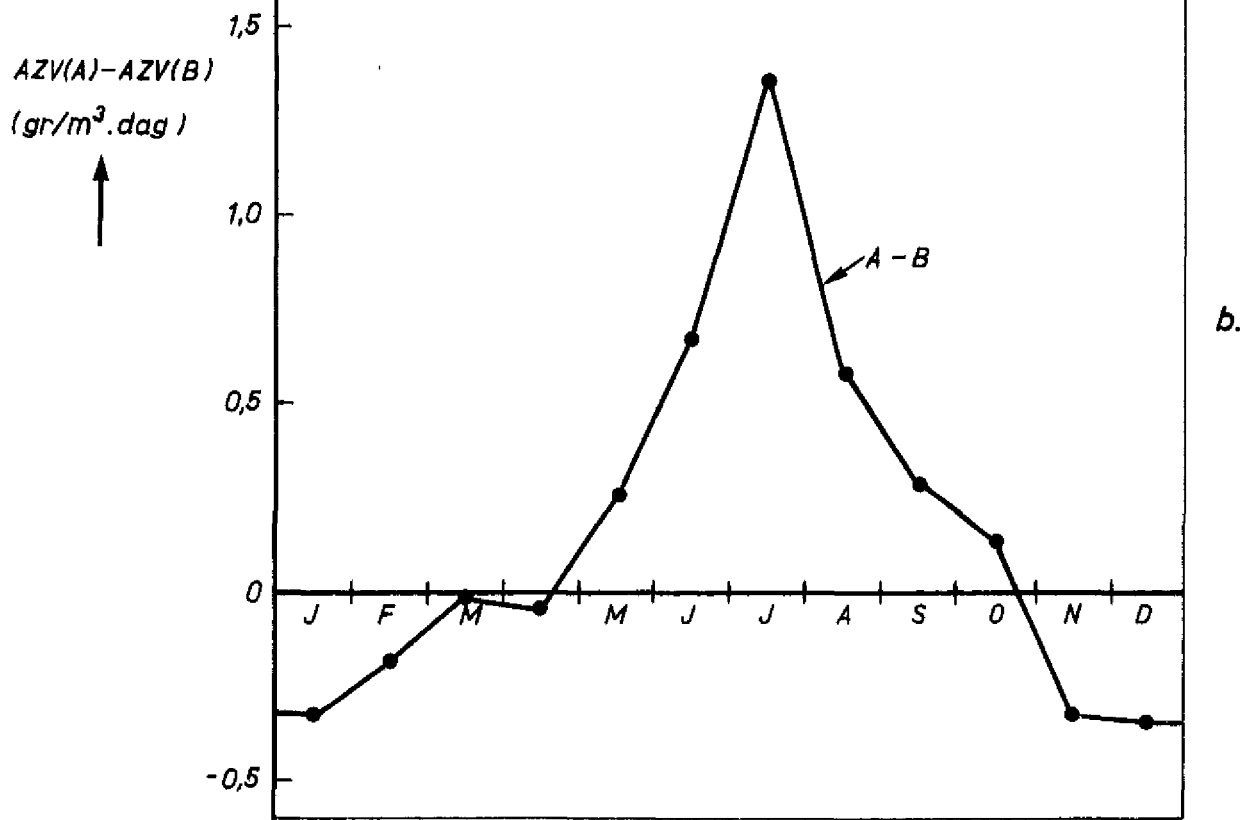
Teneinde te voorkomen dat door het verloop van het AZV bepaalde seizoensinvloeden met betrekking tot de te berekenen kans op het ontstaan van anaërobie worden ingevoerd die onjuist zijn, is de voorkeur gegeven aan een constante waarde voor het AZV.

De invloed van de grootte van het AZV kan vervolgens in de zuurstofmodellen via gevoeligheidsanalyses nader worden bestudeerd.

Uit oogpunt van een beschouwing van een ongunstige situatie lijkt een AZV-waarde van 0,5 grO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>.dag acceptabel, mede omdat te verwachten is dat door afbraak het AZV in het Zoommeer over het algemeen geringer zal zijn dan in het Hollands Diep.



a.



b.

a. MAANDGEMIDDELDE AZV-WAARDEN BEPAALD UIT HET  $BOD_5$ -GEHALTE (A) EN EEN EENVOUDIGE ZUURSTOFBALANS (B)  
 b. VERSCHIL TUSSEN DE AZV-WAARDEN VIA METHODE (A) & (B)

JB

A4

## 2.6 Ontziltingsproces en modelschematisaties met betrekking tot het meng-systeem

Uit een beschouwing van de verschillende processen, die bij ontziltiging zowel direct als indirect het zuurstofgehalte beïnvloeden, blijkt dat deze processen veelal afhankelijk zijn van de verschillende concentraties in het meer.

Het zal daarom niet zonder meer toegestaan zijn de zoutconcentratie, zuurstofconcentratie en concentratie aan dood-organisch materiaal gelijk te stellen aan de over het gehele meer gemiddelde waarden.

Weliswaar zullen door menging (o.a. door stroming tengevolge van doorspoelen, wind en scheepvaart) de concentratieverschillen enigszins worden genivelleerd, maar het is de vraag of deze menging groot genoeg zal zijn om het gehele meer als homogeen gemengd te beschouwen.

Concentratieverschillen kunnen zowel in het horizontale vlak optreden als over de diepte.

De horizontale verschillen zullen voor een belangrijk deel ontstaan als gevolg van een verschil in samenstelling van het doorspoelwater ten opzichte van het meer.

Verticale concentratieverschillen zullen voornamelijk worden veroorzaakt door het ontstaan van een eventuele gelaagdheid, waardoor de verticale menging sterk wordt gereduceerd. Een dergelijke gelaagdheid ontstaat als gevolg van dichtheidsverschillen, hetgeen enerzijds kan worden veroorzaakt door een verschil in zoutconcentratie, anderzijds als gevolg van temperatuurverschillen. Aangezien over het algemeen het dichtheidsverschil tengevolge van temperatuurverschillen een orde kleiner is dan tengevolge van verschillen in zoutconcentratie, zal dit aspect worden verwaarloosd (opm.: bij een sterke warmte-instraling in het voorjaar is het echter goed mogelijk dat dit aspect enige invloed heeft op een gelaagdheid in het meer).

Bij gelaagdheid kan als gevolg van de slechte uitwisseling tussen de zoete (eventueel brakke) bovenlaag en de zoute onderlaag de samenstelling van beide lagen sterk van elkaar verschillen. Zo zal de indringing van zuurstof in de onderlaag sterk worden bemoeilijkt, waardoor de kans groot is dat deze laag na verloop van tijd anaëroob wordt.

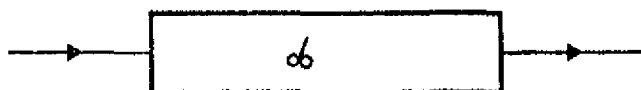
Gezien de complexiteit van het mengsysteem is het noodzakelijk een aantal verstrekkende aannamen te doen, waarvan niet van te voren kan worden voorspeld



of dit een positieve dan wel negatieve invloed zal hebben op het te berekenen zuurstofgehalte. Vandaar dat de voorkeur is gegeven aan het beschouwen van enkele geïdealiseerde modellen.

De belangrijkste modellen die voor de beschrijving van het mengsysteem kunnen worden gebruikt zijn:

1. ideaal (homogeen) gemengd model



De samenstelling van het water in het meer is overal gelijk (homogeen) en zal geleidelijk door het invoerwater worden beïnvloed. De samenstelling van het afvoerwater is gelijk aan de samenstelling van het water in het meer.

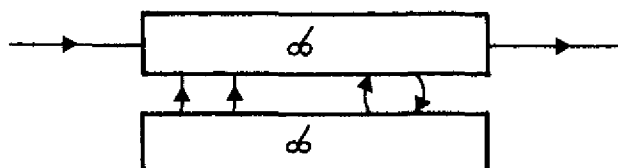
2. propstroommodel



Over de vertikaal gezien is de samenstelling homogeen. Horizontale verschillen in de samenstelling treden op als gevolg van de verschillende samenstelling van het invoerwater.

Bij een zuivere propstroom is er geen horizontale uitwisseling maar zal het invoerwater het oorspronkelijke water in het meer geleidelijk aan verdringen.

3. gelaagd model (ideaal gemengd)

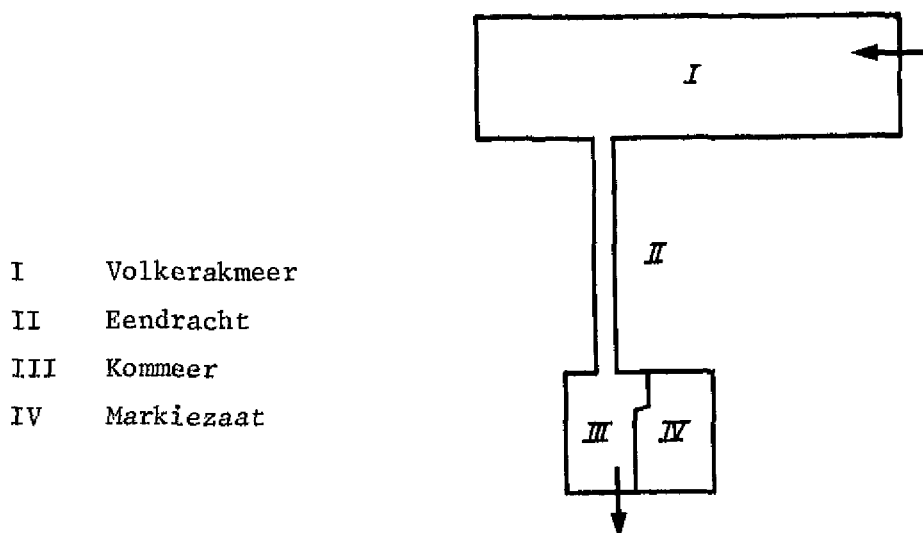


Onder- en bovenlaag worden beschouwd als zijnde ideaal gemengd.

De begrenzing tussen de beide lagen zakt doordat als gevolg van een grotere turbulentie in de bovenlaag (ten gevolge van doorspoeling en windstroming) zout water uit de onderlaag wordt opgenomen in de bovenlaag (entrainment). Ten gevolge van diffusie is het mogelijk dat er een geringe uitwisseling is tussen onder- en bovenlaag.

Koppeling verschillende modellen

Gezien de geometrie van het Zoommeer en de wijze van doorspoeling lijkt het onjuist het gehele meer als één systeem te beschouwen. Voor de hand ligt de onderverdeling in drie subsystemen volgens de geometrische schematisatie in figuur 2.5. (Door de afscheiding van het Markiezaat van het overige deel van het Zoommeer zal dit gedeelte afzonderlijk worden beschouwd.)



- I Volkerakmeer
- II Eendracht
- III Kommeer
- IV Markiezaat

Figuur 2.5. Geometrische schematisatie Zoommeer

De volgende combinaties van submodellen zijn nader beschouwd.

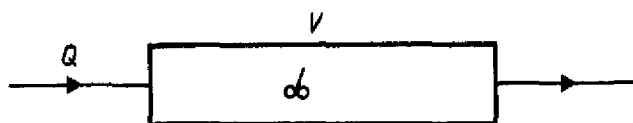
Volkerakmeer	Eendracht	Kommeer	modelnaam
ideaal gemengd	propstroom	ideaal gemengd	IGPRIG
gelaagd	propstroom	ideaal gemengd	GEPRIIG
propstroom*	-	-	-

\* alleen oriënterende berekeningen

Het Markiezaat zal als ideaal gemengd worden beschouwd.

### 3 Mathematische formulering van de geïdealiseerde submodellen

#### 3.1 Ideaal gemengd model



In verband met het gebruik van de dichtheid voor diverse andere relaties zal in plaats van verandering van het zoutgehalte de dichtheidsverandering worden beschouwd.

Indien wordt verondersteld dat het volume van het meer niet verandert dan is het toevoerdebiet gelijk aan het afvoerdebiet. Verder zijn voor dit geval de verschillende balansen als volgt te schrijven:

$$\text{Massabalans} \quad : \quad \frac{d\rho}{dt} = \frac{Q}{V} (\rho_o - \rho) \quad (3.1.1)$$

$$\text{B-balans} \quad : \quad \frac{dB}{dt} = \frac{Q}{V} (B_o - B) - K_1 B + L_a + L_o \quad (3.1.2)$$

$$\text{Zuurstofbalans:} \quad \frac{dC}{dt} = \frac{Q}{V} (C_o - C) + K_2 (C_s - C) - K_1 B - R_w - R_b \quad (3.1.3)$$

Verklaring van de symbolen:

t tijd (dag)

$\rho$  dichtheid ( $\text{kg/m}^3$ )

Q debiet ( $\text{m}^3/\text{dag}$ )

V volume ( $\text{m}^3$ )

B B-gehalte, concentratie afbreekbaar organisch materiaal ( $\text{gr/m}^3$ )

$K_1$  afbraakconstante ( $\text{dag}^{-1}$ )

$L_o$  B-belasting door eventuele afzonderlijk te beschouwen lozingen ( $\text{gr/m}^3 \cdot \text{dag}$ )

$L_a$  B-belasting door afsterving en suspensie bodemorganismen ( $\text{gr/m}^3 \cdot \text{dag}$ )

C zuurstofconcentratie ( $\text{gr/m}^3$ )

$K_2$  reaeratieconstante ( $\text{dag}^{-1}$ )

$C_s$  zuurstofverzadigingsconcentratie ( $\text{gr/m}^3$ )

$R_w$  achtergrond-zuurstofverbruik AZV ( $\text{grO}_2/\text{m}^3 \cdot \text{dag}$ )

$R_b$  bodemrespiratie ( $\text{grO}_2/\text{m}^3 \cdot \text{dag}$ )

o - index heeft betrekking op de concentratie van het toevoerwater.

Toelichting met betrekking tot de balansen

Massabalans: De verandering van de dichtheid (c.q. zoutgehalte) wordt slechts beïnvloed door de doorspoelterm.

Voor het Volkerak zal  $\rho_0$  gelijk zijn aan de dichtheid van het zoete water terwijl voor het Kommeer de dichtheid aan de uitmonding van de Eendracht dient te worden genomen.

B-balans: De verandering van het concentratie afbreekbaar organisch materiaal wordt beïnvloed door respectievelijk doorspoeling, afbraak, afsterving bodemorganismen en eventuele afzonderlijk te beschouwen lozingen.

Voor het Volkerak is  $B_0 = 0$  aangezien zich in het water van het Hollands Diep geen afgestorven bodemorganismen bevinden. Voor het Kommeer zal  $B_0$  worden bepaald door het B-gehalte aan het einde van de Eendracht.

De afbraakconstante  $K_1$  is in paragraaf 2.3 nader beschouwd. Voor een temperatuur van  $20^\circ \text{C}$  is verondersteld dat,

$$K_1(20) = 0,3 \text{ dag}^{-1}$$

Met de vergelijkingen (2.3.3.a, b) kan de  $K_1$ -waarde worden berekend voor een bepaalde temperatuur.

De belasting aan organisch materiaal ten gevolge van afsterving is in paragraaf 2.2 nader beschouwd, waarbij is aangenomen dat deze over een bepaald zouttraject evenredig is met de verandering van het zoutgehalte, hetgeen impliceert.

$$L_a = 0 \qquad \rho < \rho_a \qquad (3.1.4a)$$

$$L_a = \frac{1}{\rho_a - \rho_b} \left(-\frac{d\rho}{dt}\right) \cdot UOD \qquad \rho_b < \rho < \rho_a \qquad (3.1.4b)$$

$$L_a = 0 \qquad \rho < \rho_b \qquad (3.1.4c)$$

Voor de dichtheid waarbij het afstervingsproces aanvangt ( $\rho_a$ ) en als voltooid kan worden beschouwd ( $\rho_b$ ), zal aanvankelijk worden aangenomen,  $\rho_a = 1010 \text{ kg/m}^3$

en  $\rho_b = 1005 \text{ kg/m}^3$ , hetgeen overeenkomt met zoutconcentraties van respectievelijk ca.  $7500 \text{ gr/m}^3$  en  $3750 \text{ gr/m}^3$ .

De waarden voor de maximale zuurstofbehoefte voor de afbraak van de totale biomassa (UOD) zullen in paragraaf 4.2 nader worden beschouwd.

De eventueel afzonderlijk te beschouwen lozingen  $L_o$  zullen in paragraaf 4.4 nader worden beschouwd.

Zuurstofbalans: De verandering van het zuurstofgehalte is afhankelijk van respectievelijk doorspoeling, reaeratie, afbraak, bodemrespiratie en achtergrond-zuurstofverbruik.

De reaeratie is nader beschouwd in paragraaf 2.1. Met de vergelijkingen (2.1.3), (2.1.4) en (2.1.6) kunnen de waarden voor  $K_2$  en  $C_s$  worden bepaald.

De bodemrespiratie is in paragraaf 2.4 nader beschouwd. Hieruit zijn de volgende relaties af te leiden.

$$R_b = r_{bo} \frac{A}{V} + r_{bl} \frac{A_{bio}}{V} \quad \text{grO}_2/\text{m}^3 \cdot \text{dag} \quad (3.1.5)$$

$r_{bo}$  is de bodemrespiratie voor die delen waarin zich geen biomassa bevindt.  $r_{bl}$  is de verhoging van de bodemrespiratie die specifiek toe te schrijven is aan de respiratie van levende bodemorganismen.  $A_{bio}$  is het oppervlak waarin deze bodemorganismen zich bevinden.

Aangenomen zijn de volgende waarden.

$$r_{bo} = 1,0 \cdot f(T) \quad (3.1.6)$$

$$r_{bl} = 1,0 \cdot f(T) \quad \rho > \rho_a \quad (3.1.7a)$$

$$r_{bl} = 1,0 \cdot \frac{\rho - \rho_b}{\rho_a - \rho_b} \cdot f(T) \quad \rho_b < \rho < \rho_a \quad (3.1.7b)$$

$$r_{bl} = 0 \quad \rho < \rho_b \quad (3.1.7c)$$

Voor de temperatuursfunctie,  $f(T)$ , zijn dezelfde relaties verondersteld als voor de afbraakconstante (zie paragraaf 2.3), d.w.z.

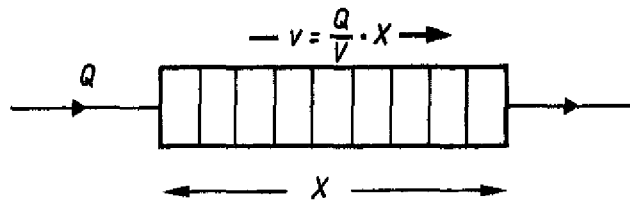
$$f(T) = 0,75 \cdot 1,108^{(T-15)} \quad 0 < T < 15^{\circ}\text{C} \quad (3.1.8a)$$

$$f(T) = \frac{1,5}{\left(\frac{T-32}{17}\right) + 1} \quad 15 < T < 35^{\circ}\text{C} \quad (3.1.8b)$$

In paragraaf 2.5 is het achtergrond-zuurstofverbruik geschat op

$$R_w = 0,5 \text{ grO}_2/\text{m}^3 \cdot \text{dag} \quad (3.1.9)$$

### 3.2 Propstroommodel



Voor de verandering van de concentraties kunnen voor een propstroming de volgende relaties worden afgeleid

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -v \frac{\partial \rho}{\partial x} + D_1 \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} \quad (3.2.1)$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} = -v \frac{\partial B}{\partial x} + D_1 \frac{\partial^2 B}{\partial x^2} - K_1 B + L_a + L_o \quad (3.2.2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -v \frac{\partial C}{\partial x} + D_1 \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + K_2 (C_s - C) - K_1 B - R_w - R_b \quad (3.2.3)$$

$v$  is de gemiddelde stroomsnelheid ten gevolge van doorspoeling en is gelijk aan

$$v = \frac{Q}{V} \cdot X \quad (3.2.4)$$

$X$  is de lengte van het traject waarover de doorspoeling plaatsvindt.  
 $x$  is de afstand tot het instroompunt en  $D_1$  is een dispersiecoëfficiënt voor de longitudinale richting.

Naar aanleiding van een vergelijking van bovenstaande relaties met die voor het ideaal gemengd model kan o.a. het volgende worden opgemerkt met betrekking tot het propstroommodel:

- de concentraties variëren zowel in tijd als plaats
- de verandering van de concentraties wordt beïnvloed door convectie en dispersie.

De relaties voor de niet-konservatieve termen uit de vergelijkingen (3.2.2) en (3.2.3) zijn over het algemeen gelijk aan die voor het ideaal gemengd model. Aangezien de afsterving op een bepaalde plaats evenredig wordt gesteld met de verandering van het zoutgehalte geldt voor  $L_a$

$$L_a = \frac{1}{\rho_a - \rho_b} \left( - \frac{\partial \rho}{\partial t} \right) \cdot UOD \quad \rho_b < \rho < \rho_a \quad (3.2.5)$$

Een vereenvoudiging van de vergelijkingen is mogelijk indien de dispersie wordt verwaarloosd en de verandering van de concentraties wordt beschouwd vanuit een meebewegend systeem. De relaties gaan met  $t_1 = \frac{v}{x}$  over in,

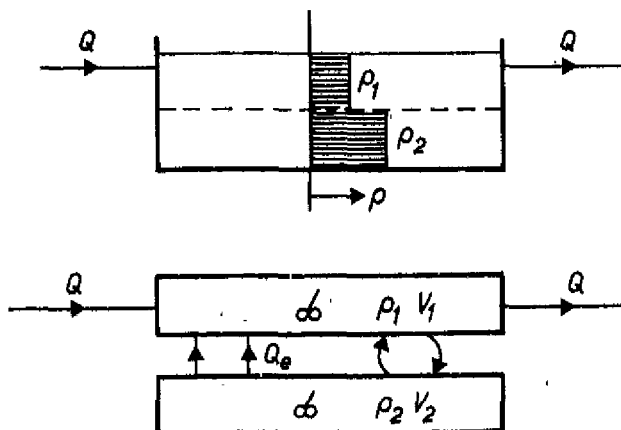
$$\frac{d\rho}{dt_1} = 0 \quad (3.2.6)$$

$$\frac{dB}{dt_1} = -K_1 B + L_a + L_o \quad (3.2.7)$$

$$\frac{dC}{dt_1} = K_2(C_s - C) - K_1 B - R_w - R_b \quad (3.2.8)$$

Met deze relaties kan het propstroommodel op eenvoudige wijze worden doorgerkend indien de concentraties aan het begin van het traject bekend zijn.

### 3.3 Gelaagd model (ideaal gemengd)



Voor het gelaagde model kunnen bij een constant volume van het meer de volgende balansen worden afgeleidt:

$$\text{volumebalans} : \frac{dV_1}{dt} = Q_e \quad (3.3.1)$$

$$V_2 = V - V_1 \quad (3.3.2)$$

$$\text{massabalans} : \frac{d\rho_1}{dt} = \frac{Q}{V_1} (\rho_o - \rho_1) + \frac{Q_e}{V_1} (\rho_2 - \rho_1) + \frac{\rho_2 - \rho_1}{H} D_z \frac{A_{12}}{V_1} \quad (3.3.3)$$

$$\frac{d\rho_2}{dt} = \frac{\rho_1 - \rho_2}{H} D_z \frac{A_{12}}{V_2} \quad (3.3.4)$$

$$\text{B-balans} : \frac{dB_1}{dt} = \frac{Q}{V_1} (B_o - B_1) - \frac{Q_e}{V_1} B_1 - K_1 B_1 + L_{a1} + L_{o1} \quad (3.3.5)$$

$$\begin{aligned} \text{zuurstofbalans} : \frac{dC_1}{dt} = \frac{Q}{V_1} (C_o - C_1) + \frac{Q_e}{V_1} (C_2 - C_1) + \frac{C_2 - C_1}{H} D_z \frac{A_{12}}{V_1} + \\ K_2 (C_s - C_1) - K_1 B_1 - R_w - R_{b1} \end{aligned} \quad (3.3.6)$$

$$\frac{dC_2}{dt} = \frac{C_1 - C_2}{H} D_z \frac{A_{12}}{V_2} - R_w - R_{b2} \quad (3.3.7)$$

In de bovenstaande relaties hebben de indices 1 en 2 respectievelijk betrekking op de onder- en bovenlaag.

$Q_e$  is het entrainmentdebiet waarmee het water vanuit de onderlaag wordt opgenomen in de bovenlaag ( $m^3/\text{dag}$ ).

$D_z$  is een 'overall' verticale diffusiecoëfficiënt ( $m^2/\text{dag}$ ).

$A_{12}$  is de grootte van het uitwisselingsoppervlak tussen onder- en bovenlaag ( $m^2$ ).

$H$  is de gemiddelde diepte van het meer (m).

#### Toelichting met betrekking tot de balansen:

Volumebalans: Het volume van de bovenlaag zal geleidelijk aan toenemen ten gevolge van entrainment uit de onderlaag. De begrenzing tussen de zoete (brakke) bovenlaag en de zoute onderlaag zal als gevolg hiervan zakken.



De entrainment wordt veroorzaakt door de grotere turbulentie in de bovenlaag, die voornamelijk wordt veroorzaakt door de stromingen in deze laag ten gevolge van wind en doorspoeling. Uit de literatuur zijn voor het entrainmentdebiet de volgende relaties afgeleid (zie Appendix I),

entrainmentdebiet ten gevolge van wind:

$$Q_e = 6,9 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{W_{10}^{3,75}}{g \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1} a_1} \cdot A_{12} \quad \text{m}^3/\text{s} \quad (3.3.8a)$$

entrainmentdebiet ten gevolge van doorspoeling:

$$Q_e = 2 \cdot 10^3 \cdot \frac{u^3}{g \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1} a_1} \cdot A_{12} \quad \text{m}^3/\text{s} \quad (3.3.8b)$$

$g$  is de gravitatieconstante ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ )

$a_1$  is de dikte van de bovenlaag (m)

$W_{10}$  is de windsnelheid op 10 m boven het wateroppervlak (m/s)

$u$  is de snelheid in de bovenlaag ten gevolge van doorspoeling (m/s).

Indien de doorsnede van het meer over het doorspoeltraject constant is dan is voor deze snelheid eenvoudig af te leiden

$$u = \frac{Q}{V_1} \cdot X \quad (3.3.9)$$

Massabalans: De dichtheid van de bovenlaag verandert ten gevolge van respectievelijk doorspoeling, entrainment en diffusie.

De dichtheid van de onderlaag zal slechts veranderen ten gevolge van diffusie. Zoals uit de vergelijkingen (3.3.8a, b) blijkt is de grootte van het entrainmentdebiet afhankelijk van de dichtheid van de onder- en bovenlaag. Tevens is het entrainmentdebiet via de dikte van de bovenlaag gekoppeld aan het volume van deze laag zodat voor het doorrekenen van de ontwikkeling van de gelaagdheid de oplossing is vereist van de gekoppelde vergelijkingen (3.3.1), (3.3.2), (3.3.3), (3.3.4), (3.3.8) en (3.3.9).

Aangezien deze vergelijkingen het hydrodynamische systeem bepalen en daarmee de basis vormen voor het zuurstofmodel is een nader uitwerking van deze relaties noodzakelijk ten einde hiermee  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ ,  $V_1$ ,  $V_2$ , en  $Q_e$  te kunnen bepalen.

In Appendix I wordt hier nader op ingegaan.

B-balans: Het B-gehalte in de bovenlaag wordt bepaald door respectievelijk doorspoeling, entrainment, afbraak, belasting ten gevolge van afsterving en lozingen.

Aangezien de biomassa zich voornamelijk in het intergetijde gebied bevindt en de verandering van het zoutgehalte in de onderlaag vrij gering zal zijn, is aangenomen dat de afsterving in de onderlaag nagenoeg verwaarloosbaar is. In verband met de geringe invloed van de diffusie tussen de beide lagen kan daardoor het B-gehalte in de onderlaag buiten beschouwing worden gelaten, zodat het afbraakproces alleen plaatsvindt in de bovenlaag.

De invloed van de entrainment op het B-gehalte komt door deze verwaarlozing neer op verdunning met meegesleurde water uit de onderlaag.

Voor de belastingsterm ten gevolge van afsterving kunnen de volgende relaties worden afgeleid.

$$L_{a_1} = 0 \quad \rho_1 > \rho_a \quad (3.3.10a)$$

$$L_{a_1} = \frac{1}{\rho_a - \rho_b} \left(-\frac{d\rho_1}{dt}\right) \cdot UOD \cdot \frac{V}{V_1} \quad \rho_b < \rho_1 < \rho_a \quad (3.3.10b)$$

$$L_{a_1} = 0 \quad \rho_1 < \rho_b \quad (3.3.10c)$$

Bij deze relaties is verondersteld dat alle biomassa zich tijdens de afsterfingsperiode in dat deel van de bodem bevindt, dat in direct contact staat met de bovenlaag. Indien dit niet het geval is moet tevens rekening worden gehouden met het effect dat door het zakken van de grenslaag de organismen in contact komen met de bovenlaag. In dit geval dienen deze termen aan de relatie (3.3.10b) en (3.3.10c) te worden toegevoegd, d.w.z. als  $A_{bio} > A - A_{12}$ ,

$$L_{a_1} = \frac{1}{\rho_a - \rho_b} \left(-\frac{d\rho_1}{dt}\right) \frac{V}{V_1} UOD \frac{A - A_{12}}{A_{bio}} + \frac{\rho_a - \rho_1}{\rho_a - \rho_b} \frac{1}{A_{bio}} \left(-\frac{dA_{12}}{dt}\right) \frac{V}{V_1} UOD \quad \rho_b < \rho_1 < \rho_a \quad (3.3.10d)$$

$$L_{a_1} = \frac{1}{A_{bio}} \left(-\frac{dA_{12}}{dt}\right) \frac{V}{V_1} UOD \quad \rho_1 < \rho_b \quad (3.3.10e)$$

De invloed van eventuele lozingen wordt verondersteld alleen plaats te vinden in de bovenlaag. De relatie tussen de belasting ten gevolge van lozing in alleen de bovenlaag en het gehele meer luidt,

$$L_{O1} = L_o \frac{V}{V_1} \quad (3.3.11)$$

Zuurstofbalans: Het zuurstofgehalte in de bovenlaag wordt bepaald door respectievelijk doorspoeling, entrainment van water uit de onderlaag, diffusie, reaeratie, afbraak, achtergrond-zuurstofverbruik en bodemrespiratie.

Het zuurstofgehalte in de onderlaag wordt beïnvloed door zuurstoftoevoer vanuit de bovenlaag ten gevolge van diffusie, achtergrond-zuurstofverbruik en bodemrespiratie. Aangezien in de onderlaag de enige zuurstoftoevoer plaatsvindt via diffusie is deze voor het zuurstofgehalte wel in beschouwing genomen.

De reaeratie heeft in het gelaagde model alleen betrekking op de bovenlaag zodat uit vergelijking (2.1.3) volgt,

$$K_2 = \frac{K_L \cdot A}{V_1} \quad (3.3.12)$$

Voor het achtergrond-zuurstofverbruik is voor de boven- en onderlaag dezelfde waarde aangenomen, waarbij dient te worden opgemerkt dat dit voor de onderlaag een ongunstige benadering is aangezien het AZV van het oorspronkelijke water in het Zoommeer geringer zal zijn dan dat van het ingelaten water uit het Hollands Diep.

Voor de bodemrespiratie dient onderscheid te worden gemaakt met betrekking tot het feit of alle bodemorganismen zich in de bovenlaag bevinden, dan wel gedeeltelijk in de onderlaag.

Uit paragraaf 2.4 is hiervoor af te leiden,

$$A_{bio} \leq A - A_{12}: \quad R_{b1} = r_{bo} \frac{A - A_{12}}{V_1} + r_{b1} \frac{A_{bio}}{V_1} \quad (3.3.13a)$$

$$R_{b2} = r_{bo} \frac{A_{12}}{V_2} \quad (3.3.13b)$$

$$A_{bio} \geq A - A_{12}: \quad R_{b1} = r_{b0} \frac{A - A_{12}}{V_1} + r_{b1} \frac{A - A_{12}}{V_1} \quad (3.3.13c)$$

$$R_{b2} = r_{b0} \frac{A_{12}}{V_2} + r_{b1} \frac{A_{bio} - A + A_{12}}{V_2} \quad (3.3.13d)$$

$r_{b0}$  en  $r_{b1}$  zijn te bepalen met behulp van de vergelijkingen (3.1.6) en (3.1.7a, b, c).

Opmerking: In het hierboven beschreven model vormen de concentraties uit de bovenlaag de beginconcentraties voor de Eendracht.

Het is echter denkbaar dat bij geringe dikten van de bovenlaag directe uitstroming uit de onderlaag plaatsvindt in de Eendracht. Indien de directe uitstroming uit de onderlaag gelijk is aan  $Q_2$  dan is bij een constant volume de uitstroming uit de bovenlaag gelijk aan  $Q_1 = Q - Q_2$ .

In de balansvergelijkingen (3.3.1) t/m (3.3.7) zal alleen de vergelijking (3.3.1) dienen te worden aangepast. Voor de verandering van het volume van de bovenlaag is namelijk af te leiden

$$\frac{dV_1}{dt} = Q_e + Q - Q_1 \quad (3.3.14)$$

De grootte van  $Q_1$  en  $Q_2$  is in Appendix I afgeschat door te veronderstellen dat de uitstroomsnelheid uniform is over de diepte,  $H_e$ , van de monding in de Eendracht, zodat

$$\text{als } a_1 < H_e \quad Q_1 = \frac{a_1}{H_e} \cdot Q \quad (3.3.15a)$$

$$Q_2 = \left(1 - \frac{a_1}{H_e}\right) \cdot Q \quad (3.3.15b)$$

$$\text{als } a_1 \geq H_e \quad Q_1 = Q \quad (3.3.15c)$$

$$Q_2 = 0 \quad (3.3.15d)$$

4 Gegevens en Uitgangspunten

4.1 Geometrie

Zoals reeds eerder is opgemerkt is het Zoommeer te onderscheiden in 3 gedeelten t.w. het Volkerakmeer, de Eendracht en Kommeer. Door omkading van het Markiezaat nabij Bergen op Zoom ontstaat tevens een 4<sup>e</sup> gedeelte, dat echter niet in open verbinding staat met het overige deel van het Zoommeer. In onderstaande tabel zijn voor de verschillende delen de waarden vermeld voor het volume, oppervlak en gemiddelde diepte bij NAP.

	volume (Mm <sup>3</sup> )	oppervlakte (ha)	diepte (m)
Volkerakmeer	249,9	4451	5,6
Eendracht	13,2	400	3,3
Kommeer	27,0	1026	2,6
Markiezaat	12,2	870	1,4

In verband met de beschouwing van een gelaagd model voor het Volkerakmeer zijn benaderingsrelaties opgesteld voor het bepalen van het volume en het oppervlak behorende bij een niveau NAP-h.

$$V_h = 5,18 \cdot 10^3 (20 - h)^{3,6} \quad \text{m}^3 \quad (4.1.1)$$

$$A_h = 18,6 \cdot 10^3 (20 - h)^{2,6} \quad \text{m}^2 \quad (4.1.2)$$

Ter vergelijking van deze relaties met de uit dieptekaarten afgeleide waarden voor het volume en oppervlak behorende bij een bepaald waterniveau zijn deze uitgezet in de figuren 4.1 en 4.2.

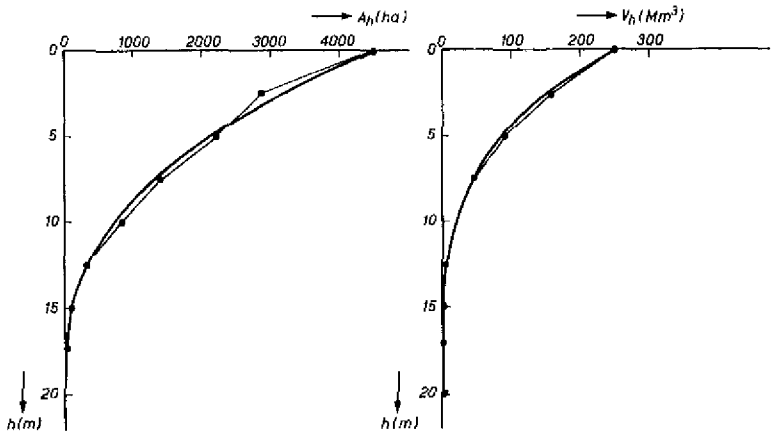


FIG 4.1 OPPERVLAKTE-DIEPTE RELATIE VOLKERAKMEER

FIG 4.2 VOLUME-DIEPTE RELATIE VOLKERAKMEER

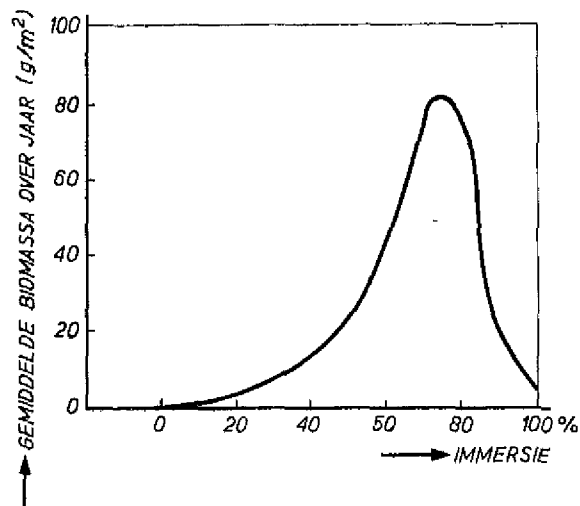
#### 4.2 Maximale zuurstofbehoefte voor de afbraak van de totale bodembiomassa

Op basis van de aanname dat volledige afbraak van 1 gram asdroge biomassa 1,42 grO<sub>2</sub> behoeft, heeft Vegter (7) de volgende gegevens afgeleid voor de maximale zuurstofbehoefte bij afbraak van de biomassa uit de bodem (zie ook par. 2.3). Deze zuurstofbehoeften (uitgedrukt in gr O<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>) zijn voor de verschillende maanden opgenomen in onderstaande tabel.

	jan.	febr.	mrt.	apr.	mei	juni	juli	aug.	sept.	okt.	nov.	dec.	jaargem.
macrozoo- benthos	47,8	45,9	44,6	46,5	56,2	71,7	82,7	83,4	78,8	69,8	60,1	51,7	61,6
microfyto- benthos	51,1	42,6	36,1	51,1	72,6	72,6	51,6	36,6	58,6	70,3	53,9	49,7	53,9
	98,9	88,5	80,7	97,6	128,8	144,3	134,3	120,0	137,4	140,1	114,0	101,4	115,5
macrofyto- benthos	3,4	2,7	3,4	5,4	8,0	10,7	12,5	13,2	12,5	10,7	8,0	5,4	8,0

De gegevens hebben betrekking op de biomassa in de bovenste 5 cm van de bodem. Vegter (7) geeft aan dat de biomassa zich voornamelijk in het intergetijdengebied bevindt zodat alleen de biomassa wordt beschouwd tussen GLW en NAP (zie ook figuur 4.3).

Dit geldt niet voor het macrofytobenthos dat over de gehele bodem voorkomt. In het Volkerakmeer is de bijdrage van het macrofytobenthos echter verwaarloosbaar.



figuur 4.3 Biomassa verdeling in het intergetijdengebied (16)

Voor de verschillende delen van het Zoommeer zijn voor de grootte van het gebied tussen GLW en NAP de volgende waarden afgeleid

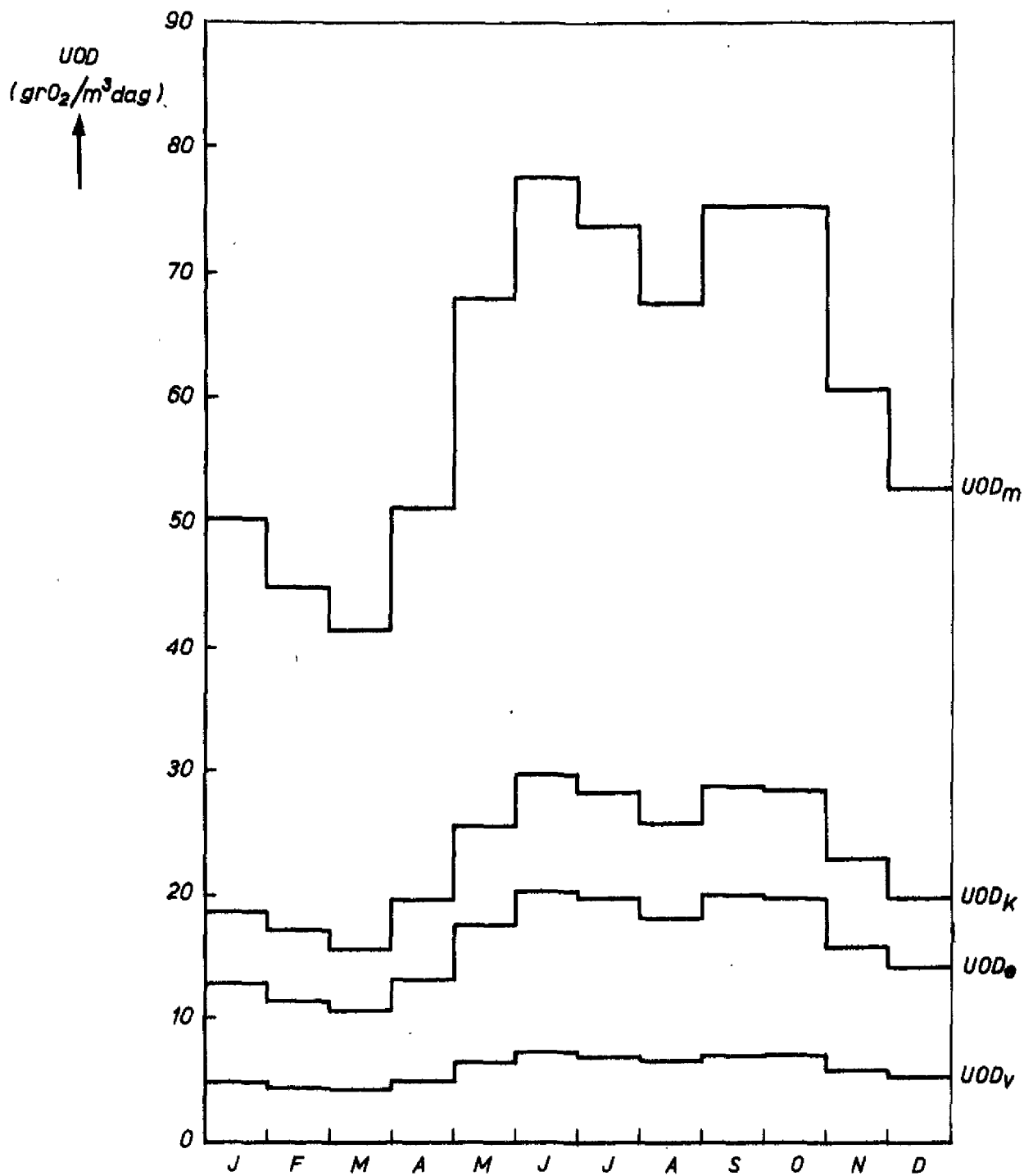
	oppervlakte tussen GLW en NAP (ha)
Volkerakmeer	1250
Eendracht	155
Kommeer	470
Markiezaat	590

Met behulp van het bovenstaande en de geometrische gegevens (par. 4.1) is voor verschillende delen de totale zuurstofbehoefte per volume eenheid te berekenen, die nodig is voor volledige afbraak van de beschouwde biomassa. De resultaten van deze berekeningen zijn opgenomen in onderstaande tabel.

maximale zuurstofbehoefte bij afbraak van bodem-biomassa (gr  $O_2/m^3$ )

	Volkerakmeer	Eendracht	Kommeer	Markiezaat
januari	5,0	12,6	18,5	50,3
februari	4,4	11,2	16,9	44,7
maart	4,0	10,5	15,4	41,5
april	4,9	13,1	19,1	51,1
mei	6,4	17,5	25,5	68,0
juni	7,2	20,2	29,2	77,4
juli	6,7	19,6	28,2	73,9
augustus	6,0	18,1	26,0	67,4
september	6,9	20,0	28,7	75,4
oktober	7,0	19,7	28,5	75,4
november	5,7	15,8	23,0	60,8
december	5,1	13,6	19,7	52,9
jaargemiddelde	5,8	16,0	23,2	61,6

De in de tabel vermelde waarden voor de maximale zuurstofbehoefte (UOD-waarden) zijn tevens grafisch uitgezet in figuur 4.4.



MAXIMALE ZUURSTOFBEHOEFTE (UOD) VOOR AF-  
BRAAK VAN DE BODEMBIOMASSA VAN HET VOLKERAK-  
MEER, EENDRACHT, KOMMEER EN MARKIEZAAT

JB

A4



#### 4.3 Gegevens doorspoelwater (Hollands Diep)

Uit de kwartaaloverzichten van het "kwaliteitsonderzoek in de Rijkswateren" voor de periode 1972 t/m 1976 zijn de volgende gegevens afgeleid (17).

	temperatuur (°C)	zuurstofgehalte (%)	zuurstofgehalte (gr/m <sup>3</sup> )	BOD <sub>5</sub> <sup>20</sup> (gr O <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )
januari	5,6	70	8,8	4,0
februari	5,5	71	8,9	3,6
maart	7,8	70	8,3	3,8
april	10,5	70	7,8	3,8
mei	14,6	61	6,8	3,9
juni	18,7	62	5,9	4,8
juli	20,6	77	6,1	6,5
augustus	20,0	56	5,0	4,4
september	17,6	58	5,5	3,5
oktober	12,0	69	7,4	3,5
november	8,0	71	8,4	3,5
december	5,9	76	9,4	3,9
jaargem.	12,1	67	7,3	4,1

#### 4.4 Lozingen

De belangrijkste lozingen die op het Zoommeer uitkomen zijn de afwateringen van de West-Brabantse rivieren Mark en Dintel alsmede de Steenbergsche- en Roosendaalse Vliet.

Aangezien deze rivieren vrij sterk zijn vervuild, kan hierdoor het zuurstofgehalte mogelijk nadelig worden beïnvloed.

Uit metingen over de periode 1973/74 zijn de volgende jaargemiddelde waarden afgeleid.

Mark en Dintel :  $BOD_5^{20} = 11 \text{ gr/m}^3$  afvoerdebiet =  $9,8 \text{ m}^3/\text{s}$   
 Roosendaalse- en  
 Steenbergsche Vliet :  $BOD_5^{20} = 9 \text{ gr/m}^3$  afvoerdebiet =  $2,9 \text{ m}^3/\text{s}$

Hoewel dit niet duidelijk uit de metingen blijkt, is te verwachten dat vooral in het najaar de kwaliteit van het rivierwater een dieptepunt bereikt als gevolg van de verwerking van de suikerbieten-oogst.

#### 4.5 Windgegevens

Voor de afschatting van de windsnelheid is gebruik gemaakt van de windsnelheidsgegevens van het meetstation Vlissingen. In hoeverre dit station echter representatief is voor de windsnelheid in de omgeving van het Zoommeer is onbekend, hoewel het aannemelijk lijkt dat de windsnelheid in deze regio over het algemeen geringer zal zijn.

In onderstaande tabel zijn de maandgemiddelde windsnelheidsgegevens opgenomen over de periode 1961 t/m 1977 zoals die zijn verstrekt door het KNMI. In de tabel zijn tevens opgenomen de hieruit af te leiden gemiddelden voor de gehele periode alsmede de minimale waarden, die zijn onderstreept.

Windsnelheidsgegevens van het station Vlissingen (maandgemiddelden)

jaar <sup>1)</sup>	jan.	febr.	mrt.	apr.	mei	juni	juli	aug.	sept.	okt.	nov.	dec.
1961	6,9	6,1	5,4	4,2	5,9	4,6	5,3	6,6	4,9	6,8	6,5	6,5
1962	7,4	7,7	4,8	<u>6,5</u>	5,9	4,7	4,3	6,4	5,4	<u>4,1</u>	<u>4,8</u>	6,0
1963	5,2	<u>3,9</u>	5,7	4,7	5,3	5,8	4,4	6,3	5,4	<u>5,4</u>	<u>7,3</u>	<u>4,8</u>
1964	<u>4,5</u>	<u>5,1</u>	5,1	5,9	5,0	4,9	4,9	4,7	5,6	4,8	5,5	<u>6,6</u>
1965	<u>6,6</u>	4,8	5,1	5,1	<u>5,7</u>	5,4	6,5	5,4	5,7	5,0	7,2	7,5
1966	6,1	6,6	6,4	4,8	6,0	5,3	5,3	5,9	5,2	5,1	6,2	7,6
1967	5,7	7,7	8,1	5,6	5,7	4,8	4,4	5,2	5,6	8,6	6,0	6,5
1968	6,9	5,5	7,2	4,9	5,2	5,6	5,6	5,0	6,0	6,0	5,1	5,4
1969	6,2	5,7	6,0	6,4	5,2	5,5	4,3	5,2	4,9	4,5	8,3	5,6
1970	4,9	6,9	6,3	6,4	4,4	4,7	6,2	4,8	5,8	7,1	8,1	5,6
1971	6,0	5,5	6,0	5,5	4,0	6,0	<u>4,0</u>	6,0	4,5	6,0	6,0	5,5
1972	5,0	5,5	6,0	8,0	<u>6,5</u>	5,5	<u>5,0</u>	5,5	4,5	5,5	8,0	7,0
1973	5,0	6,5	4,5	6,0	5,5	<u>4,0</u>	5,0	4,5	<u>5,5</u>	5,0	7,0	7,0
1974	8,0	7,5	<u>5,5</u>	5,5	5,0	<u>5,5</u>	7,0	5,0	7,0	5,0	8,5	10,5
1975	9,5	5,5	6,0	6,0	6,0	5,5	6,0	5,0	6,5	5,5	6,0	6,0
1976	9,5	5,5	6,5	5,5	5,5	5,0	5,0	5,0	5,0	7,0	6,5	7,0
1977	6,0	6,5	6,5	7,0	6,0	5,0	6,0	<u>4,0</u>	5,5	6,0		
gemid.	6,4	6,0	6,0	5,7	5,4	5,1	5,2	5,3	5,4	5,7	6,7	6,6

1) periode 1961 t/m 1970 berekend tot in 0,1 m/s  
 periode 1971 t/m 1977 berekend tot in 0,5 m/s

#### 4.6 Overige gegevens

##### Zoutgehalte vóór ontziltting:

Uit de kwartaaloverzichten van het "Kwaliteitsonderzoek der Rijkswateren" zijn voor de periode 1972 t/m 1976 de gemiddelde chloride-gehalten bepaald voor het Volkerak en de Oosterschelde nabij Bergen op Zoom.

Met behulp van de relatie,

$$S = 1,806 \text{ Cl}^- + 0,030 \quad (4.6.1)$$

Kan de saliniteit (S) worden bepaald, waarmee bij gegeven temperatuur (T) de dichtheid van het water kan worden berekend met de vergelijking

$$\rho = 1000,0 + 0,80 S - 0,0061 (T - 4 + 0,2 S)^2 \quad (4.6.2)$$

In onderstaande tabel zijn de betreffende gegevens opgenomen waarbij voor het Volkerak het gemiddelde is genomen van 3 meetpunten (Hellegat, Volkerak (midden), Volkerak (west)).

	Volkerak	Oosterschelde (Bergen op Zoom)
Cl <sup>-</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	10,98	16,43
S (‰)	19,9	29,7
ρ (kg/m <sup>3</sup> )	1015,0	1022,5

##### Doorspoeling zoetwater

Behalve de doorspoeling met zoet water ten behoeve van de ontziltting is er tevens een continue zoet water toevoer door de West Brabantse rivieren (ca. 11,4 m<sup>3</sup>/s) en direkte polderafvoer (ca. 1,6 m<sup>3</sup>/s) (zie lit. (18)).

Daarnaast is er een zoetwaterverlies door de schutsluizen van ca. 47 m<sup>3</sup>/s, (18), zodat nog ca. 34 m<sup>3</sup>/s extra zoet water nodig is om dit verlies te compenseren.

Dit zoete water wordt evenals het water t.b.v. doorspoeling onttrokken aan het Hollands Diep.

Ten behoeve van de ontziltling van het Zoommeer is het mogelijk om uit het Hollands Diep een extra hoeveelheid zoet water in te laten.

De totale hoeveelheid zoet water die tijdens het ontziltlingsproces het Zoommeer binnenstroomt bedraagt dan ca.  $47 + Q_d$  m<sup>3</sup>/s, waarvan 13 m<sup>3</sup>/s afkomstig is van de Brabantse rivieren.  $Q_d$  is het extra doorspoeldebiet dat ten behoeve van de ontziltling wordt ingelaten. De grootte van dit extra doorspoeldebiet zal maximaal ca. 100 m<sup>3</sup>/s bedragen.

### Zoutlast

De zoutlast op het Zoommeer via schutsluizen en polderafvoer bedraagt ca. 18,4 kg Cl/s (18).

Deze zoutlast heeft een vertraging van het ontziltlingsproces tot gevolg doch deze vertraging is voor de beginfase van de ontziltling verwaarloosbaar. Wel heeft de zoutlast invloed op het uiteindelijk te bereiken zoutgehalte doch dit is vanwege de keuze van het afstervingstraject van geen belang.

### 4.7 Uitgangspunten

#### Wijze van doorspoeling:

Met betrekking tot de wijze van doorspoelen zal er vanuit worden gegaan dat het zoete water afkomstig is uit het Hollands Diep en wordt ingelaten via de Volkeraksluizen op het Volkerakmeer.

De uitstroming wordt verondersteld voornamelijk plaats te vinden via, of nabij, de Kreekraksluizen uit het Kommeer. In de omgeving van de Kreekraksluizen is namelijk een lozingsmiddel gepland opdat het zoete (brakke) water kan worden geloosd op de Westerschelde (19).

Zoals reeds in de vorige paragraaf is opgemerkt zal ten gevolge van het waterverlies via de schutsluizen tevens een beperkt gedeelte via deze weg worden geloosd.

Bij de berekeningen zal er in eerste instantie vanuit worden gegaan dat het zoetwaterverlies via de Philipsdamsluizen te verwaarlozen is zodat het doorspoeldebiet voor alle delen van het Zoommeer gelijk is.

Voor de grootte van het doorspoeldebiet is een maximale waarde van 150 m<sup>3</sup>/s en een minimale waarde van 50 m<sup>3</sup>/s verondersteld.

Vervolgens zullen tevens enkele berekeningen worden gedaan waarbij het zoetwaterverlies door de Philipsdamsluizen ca. 25 m<sup>3</sup>/s bedraagt. Als gevolg hiervan zal een doorspoeldebiet van respectievelijk 150 en 50 m<sup>3</sup>/s voor het Volkerak-

meer een doorspoeldebiet van 125 en 25 m<sup>3</sup>/s voor de Eendracht en het Kommeer betekenen.

Parameters en grootheden:

Aangenomen zal worden dat grootheden als temperatuur en windsnelheid voor alle delen van het Zoommeer gelijk zijn en gedurende het ontziltingsproces niet veranderen (maandgemiddelden).

Ook zullen de parameters zoals o.a. de afbraakconstante en het achtergrondzuurstofverbruik voor alle delen gelijk worden verondersteld.

## 5 Oriënterende berekeningen

Uit hoofdstuk 3 zal duidelijk zijn geworden dat slechts een beperkt aantal vergelijkingen analytisch oplosbaar is, zodat voor het bepalen van het verloop van het zuurstofgehalte gebruik dient te worden gemaakt van numerieke rekenmethoden.

Alvorens hiertoe wordt overgegaan, zal eerst worden getracht eenvoudige relaties af te leiden voor het minimaal te verwachten zuurstofgehalte. Hiertoe is het noodzakelijk een aantal verstrekkende vereenvoudigingen en aannamen te doen, zodat deze berekeningen slechts kunnen resulteren in een indicatie ten aanzien van de orde van grootte van de minimale zuurstofgehalten. Met deze berekeningen wordt daarom voornamelijk beoogd meer inzicht te verkrijgen omtrent de samenhang en importantie van de verschillende processen.

Bij de berekeningen zal eerst het model worden beschouwd, waarbij het Volkerakmeer, Eendracht en Kommeer worden benaderd door respectievelijk een ideaal gemengd-, propstroom-, en ideaal gemengd model (paragraaf 5.1). Vervolgens zal op het Volkerakmeer het gelaagd model worden toegepast (paragraaf 5.2), alsmede het propstroommodel (paragraaf 5.3).

Tevens is de doorspoeling van het Markiezaat nader beschouwd (paragraaf 5.4).

Mede vanwege het oriënterende karakter van deze berekeningen, zal worden volstaan met berekeningen gebaseerd op jaargemiddelde gegevens.

Voor het Markiezaat zullen tevens berekeningen worden gedaan op basis van maandgemiddelde gegevens.

Met betrekking tot de oriënterende berekeningen zal gebruik worden gemaakt van de onderstaande gegevens:

Algemene gegevens:  $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $T = 12,2^\circ\text{C}$ ,  $W_{10} = 5,9 \text{ m/s}$

Met behulp van hoofdstuk 2 zijn hieruit de volgende procesparameters af te leiden,

reaeratie	: $K_L = 0,90 \text{ m/dag}$ , $C_s = 10,2 \text{ gr/m}^3$
afsterving	: $\rho_a = 1010 \text{ kg/m}^3$ , $\rho_b = 1005 \text{ kg/m}^3$
afbraak	: $K_1 = 0,18 \text{ dag}^{-1}$
achtergrond-zuurstofverbruik:	$R_w = 0,5 \text{ grO}_2/\text{m}^3.\text{dag}$
bodemrespiratie	: $r_b = 0,6 \text{ grO}_2/\text{m}^2.\text{dag}$

gegevens Volkerak:  $V_v = 250 \text{ Mm}^3$ ,  $H_v = 5,6 \text{ m}$ ,  $\text{UOD}_v = 5,8 \text{ gr/m}^3$

gegevens Eendracht:  $V_e = 13,2 \text{ Mm}^3$ ,  $H_e = 3,3 \text{ m}$ ,  $\text{UOD}_e = 16,0 \text{ gr/m}^3$

gegevens Kommeer:  $V_k = 27,0 \text{ Mm}^3$ ,  $H_k = 2,6 \text{ m}$ ,  $\text{UOD}_k = 23,2 \text{ gr/m}^3$

gegevens Markiezaat:  $V_m = 12,2 \text{ Mm}^3$ ,  $H_m = 1,4 \text{ m}$ ,  $\text{UOD}_m = 61,6 \text{ gr/m}^3$ .

De indices v, e, k en m hebben respectievelijk betrekking op het Volkerakmeer, de Eendracht, het Kommeer en het Markiezaat.

N.B.: Voor het Markiezaat is het doorspoeldebiet gesteld op  $5 \text{ m}^3/\text{s}$ .

## 5.1 Model ideaal gemengd - propstroom - ideaal gemengd

### 5.1.1 Volkerakmeer (ideaal gemengd)

Bij deze beschouwing wordt uitgegaan van de relaties voor het ideaal gemengd model (paragraaf 3.1), waarbij de concentraties van het ingelaten doorspoelwater betrekking hebben op de concentraties in het Hollands Diep.

Aangezien de afsterving van de bodemorganismen afhankelijk is van de verandering van het zoutgehalte (c.q. dichtheid) zal dit eerst nader worden beschouwd.

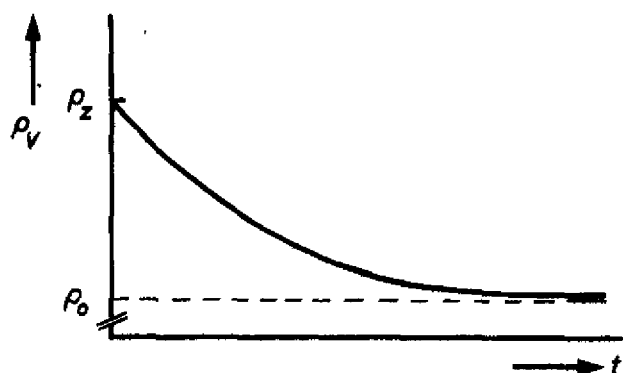
#### i. dichtheid

Uit vergelijking (3.1.1) is bij constant doorspoeldebiet en volume af te leiden dat het verloop van de dichtheid wordt beschreven door de relatie

$$\rho_v = \rho_o + (\rho_z - \rho_o) e^{-\frac{Q}{V} \cdot t} \quad (5.1.1)$$

$\rho_z$  is de oorspronkelijke dichtheid van het zoute water in het Volkerak.

In figuur 5.1 is kwalitatief het verloop van  $\rho_v$  uitgezet. Uit de figuur blijkt dat de dichtheid (c.q. zoutgehalte) geleidelijk afneemt tot de waarde voor zoet water ( $\rho_o$ ). Dit proces verloopt sneller naarmate het doorspoeldebiet groter is.



Figuur 5.1 Verloop van de dichtheid tijdens ontziltling

ii. B-gehalte

Indien vooralsnog wordt aangenomen dat de lozingen op het Volkerakmeer ver-  
 waarloosbaar zijn, dan is vóór de aanvang van het afstervingsproces de concen-  
 tratie organisch materiaal gelijk aan nul. Dit zal veranderen op het moment  
 dat het zoutgehalte onder de kritische waarde komt met betrekking tot de af-  
 sterving van de organismen.

Indien voor de eenvoud wordt aangenomen dan gedurende de afsterving, de belas-  
 ting  $L_a$  constant is, dan is uit vergelijking (3.1.3) het volgende verloop af  
 te leiden (opm.:  $B_o = 0$ ),

$$B_v = \frac{L_a}{\frac{Q}{V_v} + K_1} \left\{ 1 - e^{-\left(\frac{Q}{V_v} + K_1\right)(t-t_a)} \right\} \quad t_a < t < t_b \quad (5.1.2)$$

$t_a$  is het tijdstip waarop het afstervingsproces begint.

$t_b$  is het tijdstip waarop alle bodemorganismen zijn afgestorven.

Uit vergelijking (5.1.1) zijn de volgende relaties af te leiden voor  $t_a$  en  $t_b$   
 met betrekking tot de afstervingscriteria

$$\rho_a = \rho_o + (\rho_z - \rho_o) e^{-\frac{Q}{V_v} \cdot t_a} \quad (5.1.3)$$

$$\rho_b = \rho_o + (\rho_z - \rho_o) e^{-\frac{Q}{V_v} \cdot t_b} \quad (5.1.4)$$

Na enige bewerkingen is hieruit af te leiden,



$$t_b - t_a = \frac{V_v}{Q} \ln \frac{\rho_a - \rho_o}{\rho_b - \rho_o} \quad (5.1.5)$$

Uitgaande van  $\rho_a = 1010$ ,  $\rho_b = 1005$ ,  $\rho_o = 1000 \text{ kg/m}^3$ ,  $V_v = 250 \text{ Mm}^3$  en  $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$  volgt hieruit voor de tijdsduur van de afsterving

$$t_b - t_a \approx 20 \text{ dagen.}$$

Gezien de duur van het afstervingsproces blijkt dat nagenoeg de limietwaarde voor het B-gehalte wordt bereikt aangezien de e-macht in vergelijking (5.1.2), met een  $K_1$ -waarde van ca.  $0,2 \text{ dag}^{-1}$ , qua orde-grootte gelijk is aan 0,01.

Op  $t = t_b$  wordt dus bij benadering de maximale waarde van B bereikt, die gelijk is aan

$$B_v^{\max} = \frac{L_a}{\frac{Q}{V_v} + K_1} \quad (5.1.6)$$

Voor  $L_a$  is via substitutie van vergelijking (3.1.1) in (3.1.4b) af te leiden

$$L_a = \frac{\rho_v - \rho_o}{\rho_a - \rho_b} \frac{Q}{V_v} \text{ UOD}_v \quad \rho_b < \rho_v < \rho_a \quad (5.1.7)$$

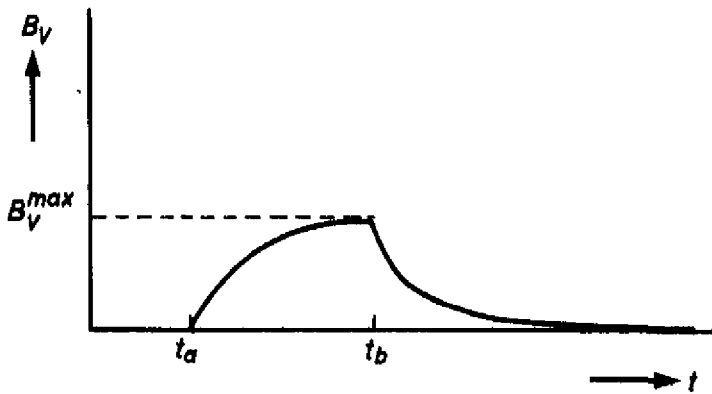
Hieruit blijkt dat  $L_a$  niet constant is maar geleidelijk afneemt gedurende het afstervings proces. Een orde van grootte voor  $L_a$  kan worden berekend door de dichtheid  $\rho_v$  in de vergelijking gelijk te stellen aan  $\rho_v = \frac{\rho_a - \rho_b}{2}$ .

Op het tijdstip  $t_b$  zijn de bodemorganismen volledig afgestorven en daarmee  $L_a = 0$ . Na dit tijdstip zal het B-gehalte afnemen ten gevolge van doorspoeling en afbraak.

Uit vergelijking (3.1.1) is hiervoor af te leiden,

$$B_v = B_v^{\max} \cdot e^{-\left(\frac{Q}{V_v} + K_1\right)(t-t_b)} \quad t > t_b \quad (5.1.8)$$

Het globale verloop van het B-gehalte is weergegeven in figuur 5.2.



Figuur 5.2 Verloop van het B-gehalte tijdens ontziltling

Met de jaargemiddelde gegevens is uit vergelijking (5.1.6) en (5.1.7) af te leiden,

$$B_v^{\max} = \frac{0,30}{0,035 + 0,18} = 1,4 \text{ gr/m}^3$$

### iii. zuurstofgehalte

Voor een nadere uitwerking van de zuurstofbalans zullen in verband met het verloop van het B-gehalte 3 fasen worden onderscheiden te weten de periode vóór afsterving, het afstervingstraject en de periode na afsterving.

Voor alle perioden zal worden verondersteld dat de zuurstofverzadigingswaarde en de bodemrespiratie als constante grootheden kunnen worden beschouwd.

- Vóór de afstervingsperiode is  $B = 0$ , zodat uitwerking van de vergelijking (3.1.3) de volgende relatie geeft met betrekking tot het verloop van het zuurstofgehalte

$$C_v = C_v^* + (C_z - C_v^*) e^{-\left(\frac{Q}{V_v} + K_2\right)t} \quad t < t_a \quad (5.1.9)$$

$C_z$  is de zuurstofconcentratie vóór ontziltling.

$C_v^*$  is de zuurstofconcentratie die zich instelt indien de periode vóór de afsterving voldoende lang duurt, hiervoor geldt

$$C_v^* = \frac{\frac{Q}{V_v} C_o + K_2 C_s - R_w - R_b}{\frac{Q}{V_v} + K_2} \quad (5.1.10)$$

Uit vergelijking (5.1.3) is met de eerder aangenomen waarden voor  $\rho_o$ ,  $\rho_z$ ,  $\rho_a$ ,  $\rho_b$ ,  $Q$  en  $V_v$  deze tijdsduur bepaald op ca. 12 dagen.

Uitgaande van de gemiddelde windsnelheid (5,9 m/s) en temperatuur (12,2°C) alsmede de grootte van het oppervlak van het meer is uit paragraaf 2.1 af te leiden dat  $K_2 \approx 0,16 \text{ dag}^{-1}$ .

Dit impliceert dat de waarde van de e-macht in de vergelijking (5.1.9) kleiner is dan 0,1, zodat op het tijdstip  $t = t_a$  het zuurstofgehalte nage-noe-g gelijk zal zijn aan  $C_v^*$ .

- Tijdens de afsterving verandert het B-gehalte. Mede omdat het verloop van het B-gehalte slechts bij benadering zal voldoen aan vergelijking (5.1.2), zal voor het afschatten van het minimale zuurstofgehalte worden verondersteld dat het B-gehalte over het gehele traject gelijk is aan de maximale waarde volgens vergelijking (5.1.6).

Eenvoudig is dan op analoge wijze uit vergelijking (3.1.3) af te leiden

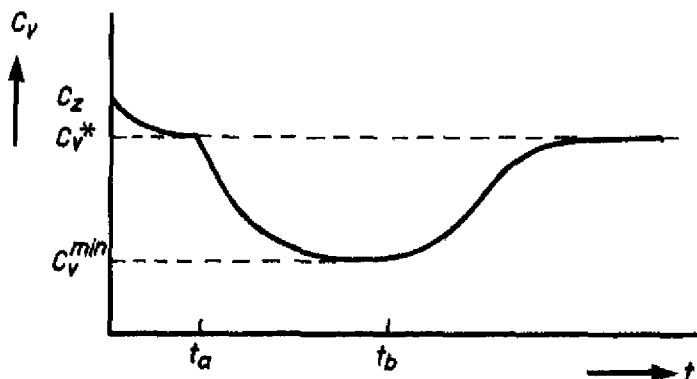
$$C_v = C_v^{\min} + (C_v^* - C_v^{\min}) e^{-\left(\frac{Q}{V_v} + K_2\right)(t - t_a)} \quad t_a < t < t_b \quad (5.1.11)$$

$C_v^{\min}$  is de minimale waarde die kan worden bereikt, hiervoor geldt

$$C_v^{\min} = \frac{\frac{Q}{V_v} C_o + K_2 C_s - K_1 B_v^{\max} - R_w - R_b}{\frac{Q}{V_v} + K_2} \quad (5.1.12)$$

- Na de afstervingsperiode neemt het B-gehalte geleidelijk af volgens vergelijking (5.1.8) totdat uiteindelijk  $B_v = 0$ . Dit heeft tot gevolg dat het zuurstofgehalte weer toe zal nemen met als limietwaarde  $C = C_v^*$

Het verloop van het zuurstofgehalte is globaal weergegeven in figuur 5.3.



Figuur 5.3 Verloop van het zuurstofgehalte tijdens ontzilting

De relatie (5.1.12) met betrekking tot het minimale zuurstofgehalte is om te werken tot

$$C_v^{\min} = C_s - \frac{1}{\frac{Q}{V} + K_2} \left\{ \frac{Q}{V} (C_s - C_o) + K_1 B_v^{\max} + R_w + R_b \right\} \quad (5.1.13)$$

I                    II                    III    IV

Uit deze relatie blijkt duidelijk hoe het zuurstoftekort is opgebouwd.

- I    niet verzadigd zijn van het inlaatwater
- II   afbraak afgestorven organismen
- III achtergrond-zuurstofverbruik
- IV   bodemrespiratie.

De grootte van het zuurstofdeficiet wordt middels  $K_2$  beïnvloed door de mate van reaeratie.

Uit de jaargemiddelde gegevens kunnen de volgende waarden worden berekend

$$C_v^{\min} = 10,2 - \frac{1}{0,035 + 0,16} \{0,10 + 0,25 + 0,50 + 0,11\} = 5,3 \text{ gr/m}^3.$$

### 5.1.2 Eendracht (propstroom)

Bij deze beschouwing wordt uitgegaan van de relaties voor het propstroommodel (paragraaf 3.2), waarbij de concentratieveranderingen worden beschouwd vanuit een meebewegend systeem. De longitudinale dispersie wordt hierbij verwaarloosd. Aan het begin van de Eendracht (tijdstip  $t_1 = 0$ ) zijn de concentraties gelijk aan die van het Volkerakmeer. Getracht zal worden een schatting te maken voor de concentraties aan het eind van de Eendracht bij uitmonding in het Kommeer.

#### i. dichtheid

Aangezien het verloop van de dichtheid in het Volkerakmeer bekend is (verg. (5.1.1)) en de dispersie is verwaarloosd zal de dichtheid tijdens doorstroming niet veranderen. Indien wordt verondersteld dat de dichtheid vóór ontzilting gelijk is aan  $\rho_z$  dan is voor het dichtheidsverloop aan het eind van de Eendracht eenvoudig af te leiden

$$\rho_e = \rho_z \quad t < t_e \quad (5.1.14a)$$

$$\rho_e = \rho_o + (\rho_z - \rho_o) e^{-\frac{Q}{V_v}(t-t_e)} \quad t > t_e \quad (5.1.14b)$$

$t_e$  is de verblijftijd in de Eendracht, hiervoor geldt

$$t_e = \frac{V_e}{Q} \quad (5.1.15)$$

Voor  $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$  en  $V_e = 13,2 \text{ Mm}^3$  is hieruit af te leiden dat de verblijftijd ca. 1,5 dag bedraagt.

Dit impliceert dat de veranderingen in de concentraties vrij beperkt zullen zijn. Voor de verandering van het B-gehalte en het zuurstofgehalte zal daarom via linearisatie van de vergelijkingen (3.2.7) en (3.2.8) de grootte hiervan worden afgeschat.

### ii. B-gehalte

Met behulp van vergelijking (3.2.7) is af te leiden

$$\Delta B \approx (-K_1 B_v^{\max} + L_a) \cdot t_e \quad (5.1.16)$$

Waarbij  $L_a$  kan worden bepaald uit het verloop van de dichtheid, welke op een tijdsverschuiving na gelijk is aan het dichtheidsverloop in het Volkerakmeer, zodat

$$L_a = \frac{\rho_e - \rho_o}{\rho_a - \rho_b} \frac{Q}{V_v} \text{ UOD}_e \quad (5.1.17)$$

Met de jaargemiddelde gegevens is af te leiden dat,

$$\Delta B \approx (-0,25 + 0,83) \cdot 1,5 = 0,9 \text{ gr/m}^3$$

Aan het eind van de Eendracht is het B-gehalte dus maximaal gelijk aan

$$B_e^{\max} = B_v^{\max} + \Delta B = 1,4 + 0,9 = 2,3 \text{ gr/m}^3$$

iii. zuurstofgehalte

Uit vergelijking (3.2.8) is af te leiden

$$\Delta C = \{K_2 \cdot (C_s - C_v^{\min}) - K_1 \cdot B_e^{\max} - R_w - R_b\} \cdot t_e \quad (5.1.18)$$

Gebruik makend van de jaargemiddelde gegevens is te berekenen dat,

$$\Delta C = \{1,36 - 0,41 - 0,50 - 0,18\} \cdot 1,5 = 0,4 \text{ gr/m}^3$$

Zodat het minimale zuurstofgehalte aan het eind van de Eendracht gelijk is aan

$$C_e^{\min} = C_v^{\min} + \Delta C = 5,3 + 0,4 = 5,7 \text{ gr/m}^3$$

5.1.3 Kommeer (ideaal gemengd)

Voor een nadere beschouwing van het minimale zuurstofgehalte in het Kommeer is evenals voor het Volkerakmeer gebruik gemaakt van de balansvergelijkingen in paragraaf 3.1, waarbij voor de concentraties van het ingelaten water die voor het eind van de Eendracht worden gebruikt.

i. dichtheid

Met behulp van de relatie (5.1.14b) voor het verloop van de dichtheid aan het eind van de Eendracht is met de aannamen  $\rho = \rho_z$  voor  $t < t_e$  uit vergelijking (3.1.1) af te leiden, dat voor  $t \geq t_e$ ,

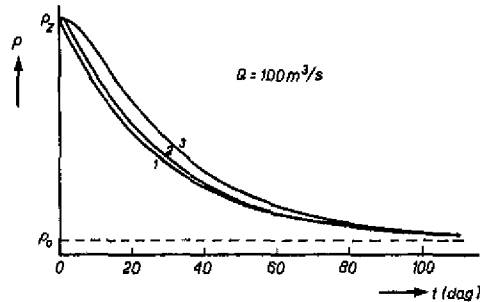
$$\rho = \rho_o + (\rho_z - \rho_o) \cdot \left\{ A_o e^{-\frac{Q}{V_v}(t-t_e)} - (A_o - 1) e^{-\frac{Q}{V_k}(t-t_e)} \right\} \quad (5.1.19)$$

waarbij de constante  $A_o$  gelijk is aan

$$A_o = \frac{V_v}{V_v - V_k}$$

In figuur 5.4 is het verloop van de dichtheid in de verschillende meren uitgezet. Uit deze figuur blijkt dat, behalve het begin van de ontzilting, het verloop van de dichtheid slechts in tijd wordt verschoven.

Dit wordt veroorzaakt door het feit dat het volume van het Kommeer (27 Mm<sup>3</sup>) aanzienlijk kleiner is dan van het Volkerakmeer (250 Mm<sup>3</sup>).



Figuur 5.4 Verloop van de dichtheid in het Volkerakmeer (1), de Eendracht (2) en het Kommeer (3)

ii. B-gehalte

Voor het bepalen van het minimale B-gehalte wordt verondersteld dat het B-gehalte van de Eendracht gedurende een langere periode nagenoeg gelijk is aan de met vergelijking (5.1.16) te berekenen maximale waarde.

Uit vergelijking (3.1.2) is dan met  $\frac{dB}{dt} \approx 0$  af te leiden

$$B_k^{max} = \frac{1}{\frac{Q}{V_k} + K_1} \left\{ \frac{Q}{V_k} B_e^{max} + L_a \right\} \tag{5.1.20}$$

Voor  $L_a$  geldt een zelfde relatie als voor het Volkerakmeer, dit omdat over het afstervingstraject de verandering van de dichtheid in het Kommeer nagenoeg analoog is aan de dichtheidsverandering in het Volkerakmeer (zie figuur 5.4).

Voor jaargemiddelde omstandigheden is te berekenen

$$B_k^{max} = \frac{1}{0,32 + 0,18} (0,74 + 1,21) = 3,9 \text{ gr/m}^3$$

iii. zuurstofgehalte

Indien wordt aangenomen dat het zuurstofgehalte aan het eind van de Eendracht gedurende een langere periode nagenoeg gelijk is aan het minimale zuurstofgehalte en het B-gehalte maximaal is (paragraaf 5.1.2), dan is op analoge wijze als voor het Volkerakmeer af te leiden dat,

$$C_k^{\min} = C_s - \frac{1}{\frac{Q}{V_k} + K_2} \left\{ \frac{Q}{V_k} (C_s - C_e^{\min}) + K_1 B_k^{\max} + R_w + R_b \right\} \quad (5.1.21)$$

Voor jaargemiddelde omstandigheden levert dit,

$$C_k^{\min} = 10,2 - \frac{1}{0,32 + 0,35} (1,47 + 0,75 + 0,50 + 0,23) = 5,8 \text{ gr/m}^3$$

## 5.2 Model met propstroom in het Volkerakmeer

Indien in het propstroommodel de longitudinale dispersie wordt verwaarloosd, zou dit in het Volkerak leiden tot een discrete overgang van zout naar zoet. Hierdoor kan met de aanname dat de belasting aan afbreekbaar organisch materiaal ten gevolge van afsterving van de bodemorganismen evenredig is met de verandering van de dichtheid geen zinvol model worden opgesteld.

Voor de toepassing van een propstroommodel voor het Volkerak is daarom een andere aanpak noodzakelijk, bijvoorbeeld:

1. meenemen van de invloed van dispersie
2. afsterving niet evenredig met dichtheidsverloop, maar bijvoorbeeld tijds-traject
3. geen afbraak in de waterfase na suspensie, maar afbraak in (aan) de bodem.

### ad 1

Globale berekeningen zijn gedaan met een model waarin de invloed van de dispersie is meegenomen.

Ten gevolge van dispersie ontstaat er een gebied waarin de dichtheid verloopt van zout naar zoet. De grootte van dit gebied hangt af van de duur van het ontziltingsproces en de grootte van de dispersiecoëfficiënt.

Voor een konstante stroomsnelheid kan de verandering van het zoutgehalte in een meebewegend systeem worden beschreven door, (zie paragraaf 3.2)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t_1} = D_1 \frac{\partial^2 \rho}{\partial x_1^2} \quad (5.2.1)$$

$t_1$  is de tijd na het begin van de ontziltiging

$x_1$  is de afstand tot het front, waarvoor geldt,

$$x_1 = x - v t_1 \quad (5.2.2)$$



De beginvoorwaarden zijn  $t_1 = 0$ , voor  $x_1 > 0$   $\rho = \rho_z$   
 voor  $x_1 < 0$   $\rho = \rho_o$ .

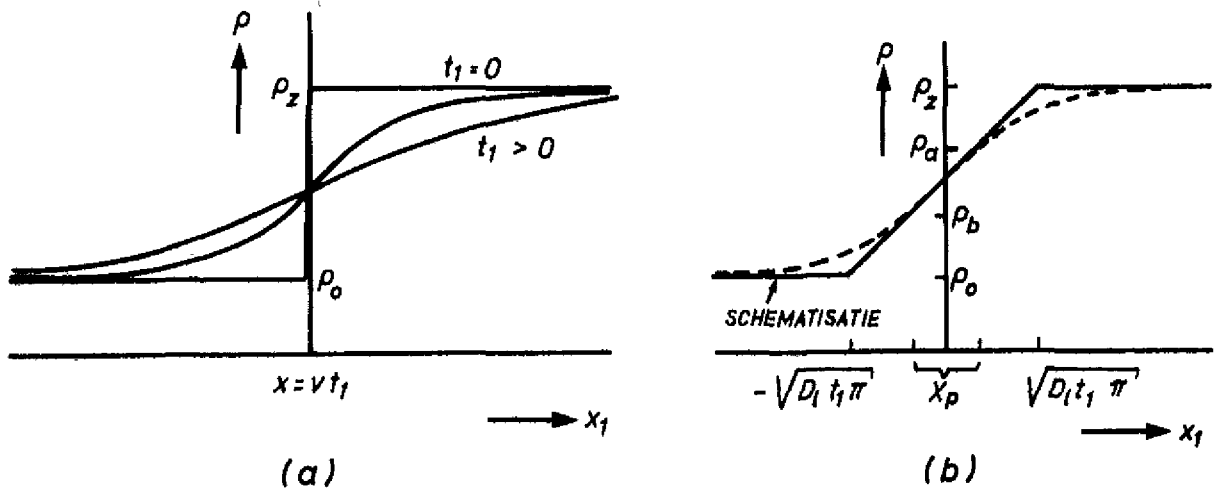
De oplossing van de vergelijking (5.2.1) luidt,

$$\rho = \frac{\rho_z - \rho_o}{2} + \frac{\rho_z - \rho_o}{2} \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{x_1}{2\sqrt{D_1 t_1}}\right) \quad (5.2.3)$$

waarbij,

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-q^2) dq.$$

In figuur 5.5 is het verloop van de dichtheid weergegeven.



Figuur 5.5 Ontwikkeling van het zout/zoetfront volgens vergelijking (5.2.3) (a) en geschematiseerd (b)

Uitgaande van de aannamen dat de afsterving plaatsvindt over een bepaald (zout-)dichtheidstraject ( $\rho_a$ ,  $\rho_b$ ), zal er een zich uitbreidende prop ontstaan, waarin zich het afbraakproces voltrekt.

Een simplificatie van deze prop is mogelijk door het verloop van de dichtheid te schematiseren door het in figuur 5.5.b aangegeven verloop. De lengte waarover de afsterving plaatsvindt is daarom te benaderen door,

$$X_p = \frac{\rho_a - \rho_b}{\rho_z - \rho_o} \cdot 2\sqrt{D_1 t_1} \pi \quad (5.2.4)$$

Voor de afschatting van de grootte van het B-gehalte en het zuurstofgehalte binnen de prop, zal worden aangenomen dat er geen concentratieverschillen in de prop zijn, zodat hiervoor de volgende balansen kunnen worden afgeleid

$$\frac{1}{V_p} \frac{d(B V_p)}{dt_1} = -K_1 B + L_a \quad (5.2.5)$$

$$\frac{1}{V_p} \frac{d(C V_p)}{dt_1} = \frac{C_+}{V_p} \frac{dV_p}{dt_1} + K_2 (C_s - C) - K_1 B - R_w - R_b \quad (5.2.6)$$

$V_p$  is volume van de prop en  $C_+$  het zuurstofgehalte buiten de prop.

De eerste term van het rechterlid van vgl. (5.2.6) is hierbij de toevoer van zuurstof in de prop tengevolge van het vergroten van het volume van de prop, waardoor water aan de prop wordt toegevoegd met een zuurstofgehalte  $C_+$ .

Uit vergelijking (3.2.8) is met  $B = 0$  en  $\frac{dC}{dt} = 0$  de waarde voor het zuurstofgehalte buiten de prop ( $= C_+$ ) te bepalen.

Aangezien het volume van de prop evenredig is met  $X_p$  is met behulp van vergelijking (5.2.4) af te leiden

$$\frac{dB}{dt} = -\frac{B}{2t} - K_1 B + L_a \quad (5.2.7)$$

$$\frac{dC}{dt} = \frac{C_+ - C}{2t} + K_2 (C_s - C) - K_1 B - R_w - R_b \quad (5.2.8)$$

De eerste termen in het rechterlid zijn toe te schrijven aan het uitbreiden van de prop.

Voor de B-belasting ten gevolge van afsterving ( $L_a$ ) is, met de aanname dat de afsterving evenredig is met de verandering van de dichtheid, af te leiden

$$L_a = \frac{l}{\rho_a - \rho_b} v \frac{d\rho}{dx_1} \text{ UOD}$$

daar,  $v = \frac{Q}{V} \cdot X$  ( $X$  is de lengte van het meer)

en  $\frac{d\rho}{dx_1} \approx \frac{\rho_a - \rho_b}{X_p}$  voor  $-\frac{X_p}{2} < x_1 < \frac{X_p}{2}$

volgt hieruit,

$$L_a = \frac{Q}{V} \cdot \frac{X}{X_p} \cdot \text{UOD} \tag{5.2.9}$$

De belasting is dus afhankelijk van de grootte van  $X_p$ , waardoor het B-gehalte mede zal worden beïnvloed door de grootte van de dispersiecoëfficiënt.

Op basis van literatuurgegevens is de grootte van de dispersiecoëfficiënt geschat op ca.  $1 \text{ m}^2/\text{s}$ , waarbij dient te worden opgemerkt dat mede vanwege het optreden van dichtheidsverschillen de waarde hiervan mogelijk een factor 10 kan verschillen.

In verband hiermee is voor een 2-tal waarden van  $D_1$  het B-gehalte bepaald waarbij gebruik is gemaakt van jaargemiddelde gegevens (zie onderstaande tabel).

$t_1$ (dag)	$D_1$ ( $1 \text{ m}^2/\text{s}$ )		$D_1$ ( $10 \text{ m}^2/\text{s}$ )	
	B ( $\text{gr}/\text{m}^3$ )	$X_p$ (m)	B ( $\text{gr}/\text{m}^3$ )	$X_p$ (m)
1	9,8	350	3,1	1100
2	12,6	490	4,0	1550
4	15,0	700	4,8	2200
6	15,8	850	5,0	2690
10	15,3	1100	4,8	3470
20	12,7	1550	3,9	4900

Een eenvoudige schatting voor het minimale zuurstofgehalte is mogelijk door in (5.2.8)  $\frac{dC}{dt} = 0$  te veronderstellen. Hieruit is af te leiden

$$C = C_s - \frac{1}{K_2 + \frac{1}{2t_1}} \left[ \frac{C_s - C^*}{2t_1} + K_1 B + R_w + R_b \right] \tag{5.2.10}$$

Voor  $t_1 = 10$  dagen:

$$D_1 = 1 \text{ m}^2/\text{s} : C = 10,2 - \frac{1}{0,16 + 0,05} (0,19 + 2,75 + 0,50 + 0,10) = < 0 \text{ gr/m}^3$$

$$D_1 = 10 \text{ m}^2/\text{s} : C = 10,2 - \frac{1}{0,16 + 0,05} (0,19 + 0,86 + 0,50 + 0,10) = 2,3 \text{ gr/m}^3$$

voor  $t_1 = 20$  dagen:

$$D_1 = 1 \text{ m}^2/\text{s} : C = 10,2 - \frac{1}{0,16 + 0,02} (0,09 + 2,29 + 0,50 + 0,10) = < 0 \text{ gr/m}^3$$

$$D_1 = 10 \text{ m}^2/\text{s} : C = 10,2 - \frac{1}{0,16 + 0,02} (0,09 + 0,70 + 0,50 + 0,10) = 2,7 \text{ gr/m}^3$$

Hoewel de grootte van de dispersiecoëfficiënt een grote invloed heeft op het zuurstofgehalte in de prop, blijkt uit deze beschouwing dat het propstroommodel met beide waarden voor  $D_1$  een beduidend ongunstiger beeld geeft dan het ideaal gemengd model.

#### ad 2

Indien wordt verondersteld dat de afsterving van de bodemorganismen niet evenredig is met het verloop van de dichtheid, maar plaatsvindt gedurende een bepaalde periode na het passeren van het front, dan geldt hiervoor de volgende relatie ten aanzien van de belasting  $L_a$ .

$$L_a = \frac{1}{t_s} \text{ UOD} \quad (5.2.11)$$

$t_s$  is de duur van het afstervingstraject.

Aangezien  $L_a$  constant is kunnen uit vergelijking (3.2.7) en (3.2.8) de volgende relaties worden afgeleid met betrekking tot de maximale waarde voor het B-gehalte en de minimale waarde voor het zuurstofgehalte.

$$B^{\max} = \frac{L_a}{K_1} \quad (5.2.12)$$

$$C^{\min} = C_s - \frac{1}{K_2} (K_1 B^{\max} + R_w + R_b) \quad (5.2.13)$$

Indien de afstervingsduur qua orde-grootte gelijk wordt gekozen aan die welke volgt uit de beschouwing van het ideaal gemengd model (paragraaf 5.1) dan is  $t_s \approx 20$  dagen, zodat,

$$B^{\max} = \frac{0,29}{0,18} = 1,6 \text{ gr/m}^3$$

$$C^{\min} = 10,2 - \frac{1}{0,16} (0,29 + 0,50 + 0,10) = 4,6 \text{ gr/m}^3$$

ad 3

Een andere aanname is dat de afsterving vrij plotseling plaatsvindt waarbij het organisch materiaal niet in suspensie komt maar wordt afgebroken aan of in de bodem. Vanwege de grote concentratie aan organisch materiaal is de grootste invloed van het afbraakproces dicht achter het zout/zoetfront te verwachten.

Hiervoor geldt,

$$B^{\max} = UOD$$

$$C^{\min} = C_s - \frac{1}{K_2} (K_1 B^{\max} + R_w + R_b)$$

De grootte van de afbraakconstante zal in dit geval kleiner zijn vanwege de geringe menging, waardoor de toevoer van zuurstof kan worden beperkt. Stel  $K_1(20) = 0,1 \text{ dag}^{-1}$ , dan is af te leiden.

$$B^{\max} = 5,8 \text{ gr/m}^3$$

$$C^{\min} = 10,2 - \frac{1}{0,16} (0,35 + 0,5 + 0,1) = 4,2 \text{ gr/m}^3$$

Zoals uit bovenstaande blijkt zijn de onzekerheden in de modellering van het Volkerakmeer door middel van een propstroommodel vrij groot, hetgeen voornamelijk wordt veroorzaakt doordat in een dergelijk model het ontziltingsproces zich minder geleidelijk voltrekt. Mede vanwege het optreden van dichtheidsverschillen is het bovendien twijfelachtig of het ontziltingsproces in het Volkerakmeer kan worden benaderd door propstroming.

### 5.3 Model met gelaagdheid in het Volkerakmeer

In Appendix I is de ontwikkeling van gelaagdheid in het Volkerakmeer bestudeerd. Uit deze beschouwing blijkt ondermeer dat tijdens de ontziltingsperiode het optreden van gelaagdheid in dit deel van het Zoommeer vrij reëel is. De begrenzing tussen de zoete bovenlaag en de zoute onderlaag zakt weliswaar in het begin van de ontzilting vrij snel tot zo'n 5 m onder het wateropperv-

vlak, maar vervolgens gaat het zakken van de laag door de geringere invloed van de mengmechanismen op deze diepte beduidend langzamer.

Uit de bijlage is verder af te leiden dat indien wordt aangenomen dat de afsterfing geschiedt over het dichtheidstraject van 1010-1005 kg/m<sup>3</sup> het afsterfingsproces ca. 15 dagen zal duren.

De dikte van de bovenlaag is dan ca. 5 m hetgeen impliceert dat het volume van de bovenlaag ongeveer 60% is van het totale volume van het Volkerakmeer, terwijl het uitwisselingsoppervlak tussen de onder- en bovenlaag gelijk is aan ca. 50% van het totale oppervlak (zie vgl. (4.1.1), (4.1.2)).

Voor het entrainmentdebit is uit de Appendix een grootte orde af te leiden van  $Q_e = 30 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Op analoge wijze als in paragraaf 5.1.1 zijn voor het maximale B-gehalte en het minimale zuurstofgehalte in de bovenlaag uit de vergelijkingen (3.3.5) en (3.3.6) de volgende relaties af te leiden

$$B_1^{\max} = \frac{L_a}{\frac{Q + Q_e}{V_1} + K_1} \quad (5.3.1)$$

$$C_1^{\min} = C_s - \frac{1}{\frac{Q + Q_e}{V_1} + K_2} \left\{ \frac{Q}{V_1} (C_s - C_o) + \frac{Q_e}{V_1} (C_s - C_2) + K_1 B_{\max} + R_w + R_{b_1} \right\} \quad (5.3.2)$$

Voor de zuurstofbalans van de onderlaag kan worden afgeleid dat de zuurstoftoevoer via het grensvlak met de bovenlaag ten gevolge van diffusie verwaarloosbaar is, zodat uit vergelijking (3.3.7) volgt,

$$\frac{dC_2}{dt} = - R_w - R_{b_2} \quad (5.3.2)$$

Dit impliceert dat zuurstofgehalte in de onderlaag afneemt tot anaërobie wordt bereikt. Met vergelijking (3.3.13b) en hetgeen in paragraaf 2.4 is opgemerkt kan van de vergelijking (5.3.3) worden afgeleid

$$\frac{dC_2}{dt} = -0,50 - 0,13 = -0,63 \text{ grO}_2/\text{m}^3 \cdot \text{dag}$$

zodat na ca. 10-15 dagen de onderlaag anaëroob is.

Uitgaand van een anaërobe onderlaag is voor de vergelijkingen (5.3.1) en (5.3.2) af te leiden.

$$B_1^{\max} = \frac{0,64}{0,08 + 0,18} \approx 2,5 \text{ mg/l}$$

$$C_1^{\max} = 10,2 - \frac{1}{0,08 + 0,27} \{0,17 + 0,18 + 0,45 + 0,50 + 0,12\} = 6,1 \text{ mg/l}$$

Uit een vergelijking met het ideaal gemengde model blijkt dat de maximale zuurstofbehoefte ten gevolge van afbraak van afgestorven bodemorganismen groter is, hetgeen wordt veroorzaakt doordat de afsterving en afbraak alleen plaatsvindt in de bovenlaag. Het minimale zuurstofgehalte, voor de bovenlaag althans, is gunstiger dan in de ideaal gemengde situatie. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door de grotere reaeratie in deze laag.

#### 5.4 Model ideaal gemengd voor het Markiezaat

De ontzilting van het Markiezaat zal plaatsvinden nadat het Zoommeer is ontzilt. Gezien de geometrie van het Markiezaat en de grootte van het doorspoeldebiet (maximaal =  $5 \text{ m}^3/\text{s}$ ) ligt het voor de hand dit meer als ideaal gemengd te beschouwen.

Aangezien de tijdsduur die nodig is voor ontzilting, bij een dergelijk doorspoeldebiet voldoende lang is ( $\frac{V_k}{Q} \approx 28$  dagen), kunnen voor het maximale B-gehalte en het minimale zuurstofgehalte dezelfde relaties worden afgeleid als voor het Volkerakmeer, d.w.z.

$$B_m^{\max} = \frac{L_a}{\frac{Q}{V_m} + K_1} \quad (5.4.1)$$

waarbij,

$$L_a = \frac{\rho_m - \rho_o}{\rho_a - \rho_b} \frac{Q}{V_m} \text{ UOD}_m \quad \rho_b < \rho_m < \rho_a \quad (5.4.2)$$

$$C_m^{\min} = C_s - \frac{1}{\frac{Q}{V_m} + K_2} \left\{ \frac{Q}{V_m} (C_s - C_{ok}) + K_1 B_m^{\max} + R_w + R_b \right\} \quad (5.4.3)$$

Uit deze relaties is voor jaargemiddelde gegevens met  $Q = 5 \text{ m}^3/\text{s}$  af te leiden

$$B_m^{\max} = \frac{2,9}{0,04 + 0,18} = 13,3 \text{ gr/m}^3$$

$$C_m^{\min} = 10,2 - \frac{1}{0,04 + 0,64} (0,12 + 2,39 + 0,50 + 0,68) = 4,8 \text{ gr/m}^3$$

Dezelfde berekeningen als op basis van het jaargemiddelde zijn tevens gedaan met maandgemiddelde gegevens.

Voor de maand juni is het volgende getallenvoorbeeld van toepassing met betrekking tot de vergelijkingen (5.4.1) en (5.4.3).

$$B_m^{\max} = \frac{3,4}{0,04 + 0,28} = 10,9 \text{ gr/m}^3$$

$$C_m^{\min} = 8,9 - \frac{1}{0,04 + 0,55} (0,12 + 3,05 + 0,50 + 1,12) = 0,7 \text{ gr/m}^3$$

Uit een vergelijking met het getallenvoorbeeld voor het jaargemiddelde, blijkt dat het geringe zuurstofgehalte voor de maand juni voornamelijk wordt veroorzaakt door:

- geringere zuurstofverzadigingswaarde ( $C_s$ )
- geringere reaeratie ( $K_2$ )
- grotere afbraak ( $K_1 \cdot B_m^{\max}$ )
- grotere bodemrespiratie ( $R_b$ ).

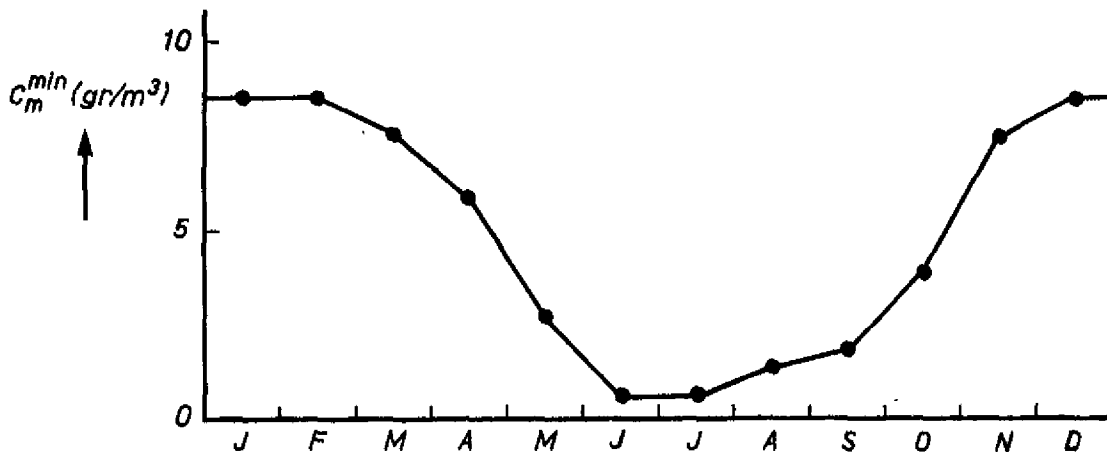


Fig. 5.6 Berekende minimale zuurstofgehalten van het Markiezzaat onder maandgemiddelde omstandigheden. ( $Q = 5 \text{ m}^3/\text{s}$ )



In figuur 5.6 zijn de overige resultaten uitgezet met betrekking tot het aldus berekende minimale zuurstofgehalte indien de ontziltling zou plaatsvinden onder de omstandigheden behorende bij de betreffende maand.

### 5.5 Discussie met betrekking tot de resultaten

Mede vanwege het oriënterende karakter met betrekking tot de berekening in dit hoofdstuk dient de interpretatie van de resultaten met de nodige voorzichtigheid te geschieden. Aangezien bij het afleiden van de relaties met betrekking tot het minimale zuurstofgehalte een aantal grootheden en parameters ten onrechte constant zijn verondersteld kunnen de verkregen resultaten slechts een indicatie geven omtrent de grootte en het verloop van het te verwachten zuurstofgehalte onder de beschouwde omstandigheden.

Opmerkelijk is evenwel dat de aldus berekende minimale zuurstofgehalten onder jaargemiddelde omstandigheden geen verontrustende lage waarden opleveren. Dit geldt echter niet voor de beschouwing met propstroom in het Volkerakmeer, hetgeen wordt veroorzaakt door de plaatselijke snelle afsterving en het beperkte watervolume waarin de afsterving plaatsvindt. Aangezien door het optreden van dichtheidsverschillen het twijfelachtig is of het ontzilttingsproces in het Volkerakmeer kan worden benaderd door propstroming zal dit model niet nader worden beschouwd. Het optreden van gelaagdheid in het Volkerakmeer heeft weliswaar tot gevolg dat de onderlaag mogelijk anaëroob zal worden, voor de bovenlaag wordt door de grotere invloed van de reaeratie een hogere waarde voor het minimale zuurstofgehalte berekend als bij de beschouwing van een volledig gemengd Volkerakmeer.

Uit de voorgaande getallenvoorbeelden met betrekking tot het minimale zuurstofgehalte is getracht af te leiden in welke mate de verschillende processen het zuurstofgehalte beïnvloeden. Hiertoe is het percentage bepaald van de mate waarin de processen bijdragen tot het berekende zuurstofdeficiet ten opzichte van de verzadigingswaarde.

Deze percentages zijn berekend voor de in paragraaf 5.1 en paragraaf 5.3 beschouwde modellen.

Zuurstofdeficiet t.g.v.:	model volgens par. 5.1			par. 5.3
	Volkerakmeer	Eendracht	Kommeer	Volkerakmeer
niet verzadigd inlaatwater*	10%	75%	50%	12%
niet verzadigd entrainment water	-	-	-	13%
afbraak afgestorven organismen	27%	10%	25%	32%
achtergrond-zuurstofverbruik	52%	11%	17%	35%
bodemrespiratie	11%	4%	8%	8%

\* voor de Eendracht en het Kommeer is het inlaatwater afkomstig uit respectievelijk het Volkerakmeer en de Eendracht

Uit de bovenstaande verhoudingen waarin de processen bijdragen in het zuurstofdeficiet blijkt dat het afbraakproces slechts voor een beperkt deel direct bijdraagt tot het zuurstofdeficiet. Vooral in het Volkerakmeer heeft het achtergrond-zuurstofverbruik een belangrijk aandeel in het zuurstofdeficiet. Het zuurstofdeficiet wordt in de Eendracht en het Kommeer voor een belangrijk deel veroorzaakt door het niet verzadigd zijn van het instromende water. De bodemrespiratie speelt onder de beschouwde jaargemiddelde omstandigheden een beperkte rol.

Een soortgelijke beschouwing is gedaan voor het zuurstofdeficiet dat ontstaat bij de ontzilting van het Markiezaat, hiervoor is uit paragraaf 5.4 afgeleid

Zuurstofdeficiet t.g.v.	jaargemiddelde	juni
niet verzadigd inlaatwater	6%	3%
afbraak afgestorven organismen	61%	64%
achtergrond-zuurstofverbruik	19%	10%
bodemrespiratie	14%	23%

Opmerkelijk hierbij is de grote bijdrage van het afbraakproces, hetgeen is toe te schrijven aan de grote biomassaconcentraties in dit gebied.

De seizoensinvloed op de percentages is voor een belangrijk deel terug te vinden in de grotere bodemrespiratiebijdrage in de zomermaanden.

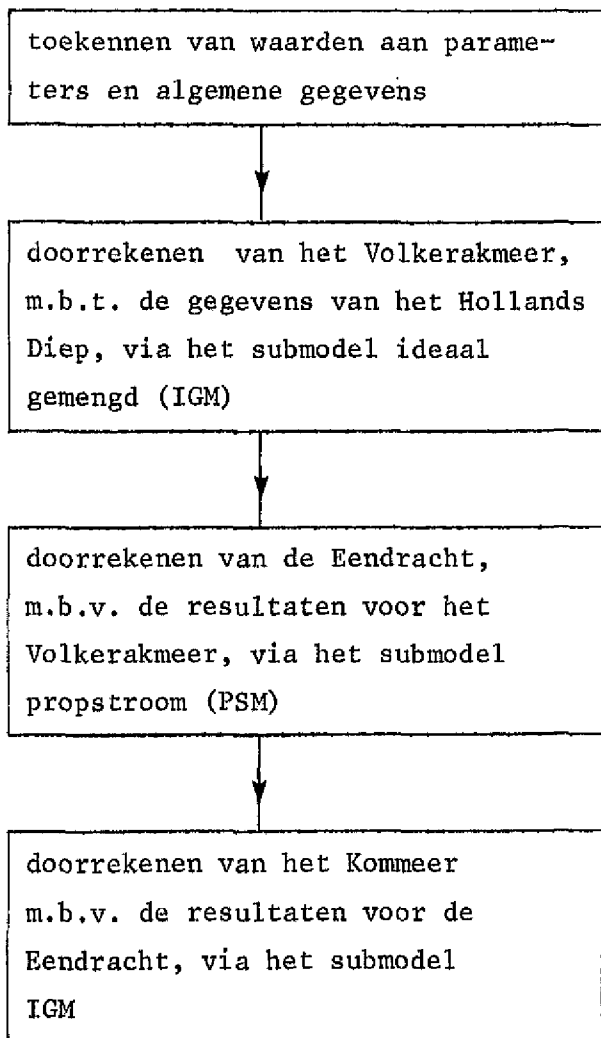
In de zomermaanden is het zuurstofdeficiet beduidend groter (zie figuur 5.6) hetgeen wordt veroorzaakt door de grotere afbraak en bodemrespiratie terwijl de reaeratie ( $K_2$ ) en de zuurstofverzadigingswaarde geringer is.

## 6 Berekeningen met de computermodellen IGPRIG en GEPRIG

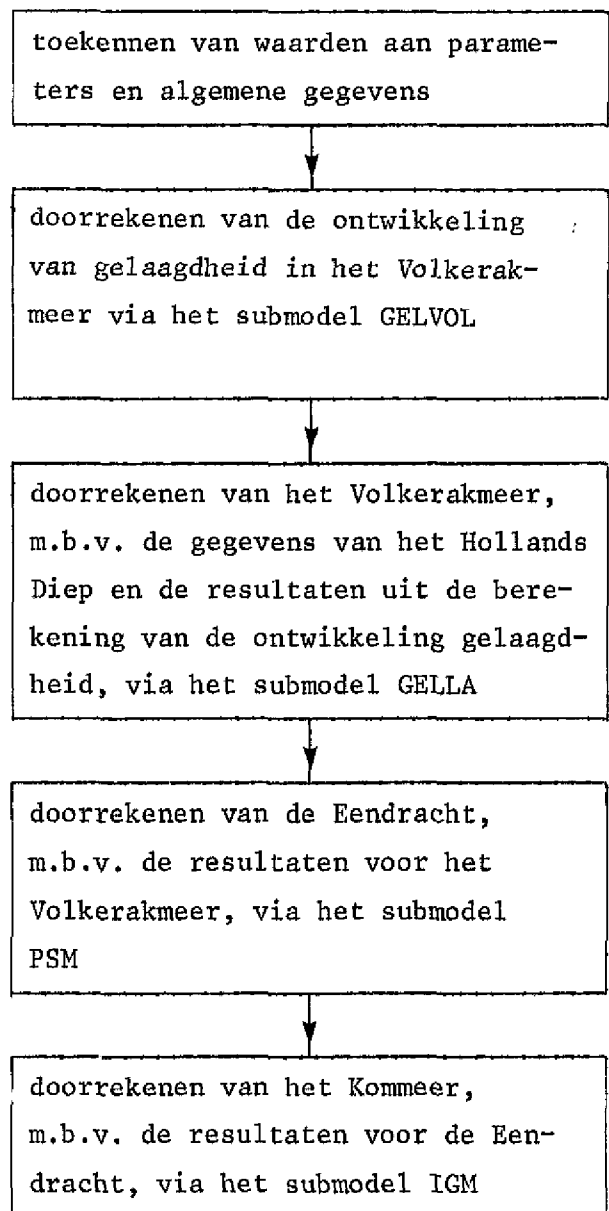
### 6.1 Modelstructuur

De modellen IGPRIG en GEPRIG zijn opgebouwd uit een aantal submodellen waarvan de samenhang in de onderstaande blokschema's is weergegeven.

#### IGPRIG



#### GEPRIG



Met betrekking tot de modelstructuur kan worden opgemerkt dat het model IGPRIG is opgebouwd uit een 2-tal subroutines, waarmee een ideaal gemengd (IGM) en

een propstroommodel (PSM) kan worden doorgerekend. Deze subroutines worden ook gebruikt in het model GEPRIG.

Voor het doorrekenen van de ontwikkeling van de gelaagdheid in het Volkerakmeer tijdens ontziltling wordt een submodel (GELVOL) gebruikt dat de hydrodynamische randvoorwaarden levert voor een submodel (GELLA), waarmee het verloop van het B-gehalte en zuurstofgehalte kan worden berekend onder gelaagde omstandigheden.

## 6.2 Nadere beschouwing submodellen

Voor de opbouw van de voornoemde submodellen is gebruik gemaakt van de in hoofdstuk 3 beschouwde modelschematisaties. De in dit hoofdstuk geformuleerde vergelijkingen zijn over het algemeen op analytische wijze verder uitgewerkt door bepaalde coëfficiënten als constant te veronderstellen. Door discretisering van de analytische oplossingen, waarbij deze coëfficiënten stapsgewijs worden aangepast, is het verloop in de tijd van de verschillende grootheden doorgerekend.

Met betrekking tot het propstroommodel (PSM) dient te worden opgemerkt dat de invloed van dispersie is verwaarloosd, aangezien het model alleen wordt toegepast op de Eendracht waarin de verblijftijd vrij gering is. Doordat de concentraties aan het begin van de Eendracht worden bepaald door het Volkerakmeer zullen tevens de concentraties over het algemeen vrij geleidelijk veranderen, waardoor het dispersief transport mogelijk beperkt zal zijn.

Het principe van het submodel GELVOL is nader beschreven in Appendix I. Met betrekking tot dit model dient te worden opgemerkt dat met name de keuze voor de beginsituatie vrij arbitrair is.

Dit heeft tot gevolg dat een keuze noodzakelijk is voor de dichtheid van de bovenlaag op de beginsituatie ( $\rho_{1s}$ ). Uit een gevoeligheidsanalyse zal moeten blijken in welke mate de resultaten van de berekeningen worden beïnvloed door deze keuze. Verder is er slechts een schatting mogelijk voor de duur van het ontziltingsproces tijdens de beschouwde beginsituatie.

In het submodel is de uitstroming uit de onderlaag ingebouwd volgens vergelijking (3.3.15).

Met het model worden o.a. de volgende grootheden berekend, die als randvoorwaarden fungeren voor het submodel GELLA,

- dichtheid bovenlaag

- dichtheid onderlaag
- dikte bovenlaag
- volume bovenlaag
- grootte uitwisselingsoppervlak onder- en bovenlaag
- entrainmentdebiet
- uitstroomdebiet onderlaag.

Aangezien geen gelaagdheid wordt beschouwd in de Eendracht (grotere menging tussen de lagen ten gevolge van grotere stroomsnelheid en scheepvaart) is als beginvoorwaarde voor de Eendracht het opgemengde totaal genomen van het uitstromende water uit de onder- en bovenlaag.

### 6.3 Gevoeligheidsanalyse

Ten einde inzicht te verkrijgen in de gevoeligheid van de modellen voor de keuze van de verschillende parameters, zijn in eerste instantie berekeningen uitgevoerd voor jaargemiddelde omstandigheden.

De gevoeligheid van de parameterconstanten zal voornamelijk worden gerelateerd aan de mate waarin de minimale zuurstofgehalten voor de verschillende delen van het Zoommeer veranderen ten opzichte van die van de standaard situatie. Voor de standaard situatie zijn de waarden van de parameters zo gekozen dat deze zoveel mogelijk voldoen aan de uit de literatuur afgeleide waarden.

De belangrijkste parameters voor het model IGPRIG zijn:

- |  |           |
|--|-----------|
| - reaeratieparameter   | $pK_L$    |
| - afbraakconstante ( $20^{\circ}\text{C}$ )                    | $K_I(20)$ |
| - dichtheid waarbij afsterving van bodemorganismen begint      | $\rho_a$  |
| - dichtheid waarbij afsterving van bodemorganismen is voltooid | $\rho_b$  |
| - achtergrond-zuurstofgebruik                                  | $R_w$     |
| - bodemrespiratieparameter                                     | $pR_b$    |
| - startwaarde zuurstofgehalte vóór ontzilting                  | $C_z$     |

Voor het model GEPRIG zijn tevens de volgende parameters van belang:

- |                                   |             |
|-----------------------------------|-------------|
| - startwaarde dichtheid bovenlaag | $\rho_{1S}$ |
| - entrainmentparameter            | $pQ_e$      |
| - verticale diffusiecoëfficiënt   | $D_z$       |
| - uitstroming uit de onderlaag    | $pQ_2$      |

De parameters die zijn aangeduid met 'p...' hebben geen fysische betekenis, maar geven in feite de onzekerheid aan in de relaties waarmee de betreffende parameters worden berekend. Deze zijn derhalve te beschouwen als factoren waarmee de voor de berekening gehanteerde relaties (zie hoofdstuk 2 en 3) worden vermenigvuldigd bij de gevoeligheidsanalyse. Per definitie is de waarde van de factor in de standaardsituatie dus gelijk aan 1.

De waarden van de parameters en variabelen, zoals die zijn gebruikt voor de berekening van de standaardsituatie, zijn opgenomen in de onderstaande tabellen. Tevens is in de tabel het geschatte spreidingsgebied en de gevoeligheid vermeld met betrekking tot de invloed op het minimale zuurstofgehalte (opmerking: de ongunstigste waarden m.b.t. het minimale zuurstofgehalte zijn onderstreept).

parameter	waarde in standaard-situatie	geschatte spreidingsgebied	gevoeligheid
$pK_L$	1	<u>0,5</u> - 3	+++
$K_1(20)$	0,3	0,1 - <u>0,4</u>	+
$\rho_a$	1010	1008 - <u>1013</u>	o
$\rho_a - \rho_b$ <sup>1)</sup>	5	<u>2</u> - 9	++
$R_w$	0,5	0,1 - <u>1,4</u>	++
$pR_b$	1	0,5 - <u>2</u>	+
$C_z$	6	<u>5</u> - 10	o
2)			
$\rho_{1S}$	<u>1011</u>	(1005) - 1013	o
$pQ_e$	1	<u>0,5</u> - 2	+
$D_z$	$10^{-7}$	$10^{-5}$ - <u><math>10^{-8}</math></u>	o
$pQ_2$	1	0 - <u>1</u>	o

1)  $\rho_a = 1010$

2) in verband met de keuze van het afstervingstraject is

$\rho_{1S} = 1005$  niet nader beschouwd

variabele	waarde in standaard-situatie	spreidingsgebied (maandgemiddelden)	gevoeligheid	
T	12,2	5,6 - <u>20,6</u> °C	+++	
W <sub>10</sub>	5,8	<u>5,1</u> - 6,7 m/s	++	
UOD <sub>v</sub>	5,8	4,0 - <u>7,2</u> gr/m <sup>3</sup>	}	
UOD <sub>e</sub>	16,0	10,5 - <u>20,2</u> gr/m <sup>3</sup>		+
UOD <sub>k</sub>	23,2	15,4 - <u>29,2</u> gr/m <sup>3</sup>		
C <sub>o</sub>	7,3	<u>5,0</u> - 9,4 gr/m <sup>3</sup>	o	
Q	150	50 - <u>200</u> m <sup>3</sup> /s	+	
L <sub>o</sub>	0,1	0,04- <u>0,15</u> gr/m <sup>3</sup> . dag	o	

- +++ erg gevoelig
- ++ gevoelig
- + beperkt gevoelig
- o ongevoelig

De belangrijkste conclusiesten aanzien van de gevoeligheidsanalyses zijn:

Parameters

- De reaeratieparameter is mede gezien de onzekerheid in deze parameter erg gevoelig. Deze parameter moet tevens in relatie worden gezien met de windsnelheid, die mede door de onvoorspelbaarheid van deze grootte een extra onzekerheid in de mate van reaeratie veroorzaakt.
- De afbraakconstante is betrekkelijk ongevoelig, hetgeen erop duidt, dat de grootte van het zuurstofverbruik ten gevolge van het afbraakproces niet zozeer afhangt van de snelheid waarin het materiaal wordt afgesproken, als wel de snelheid waarmee het afbreekbaar organisch materiaal beschikbaar komt.
- De afstervingscriteria zijn in zoverre gevoelig dat de grootte van het afstervingstraject ( $\rho_a - \rho_b$ ) een gevoelige parameter is, aangezien deze

voornamelijk de grootte van de afstervingsperiode bepaalt. Indien de afsterving namelijk plaatsvindt over een kortere periode dan zal het organisch materiaal ook in een korter tijdsbestek worden afgebroken, waardoor in die periode het zuurstofverbruik groter zal zijn.

- De parameter voor het achtergrond-zuurstofverbruik is eveneens een gevoelige parameter. Voor het bepalen van de orde van grootte van deze parameter is o.a. gebruik gemaakt van de mate van reaeratie in het Hollands Diep, zodat deze parameter niet onafhankelijk kan worden gezien ten opzichte van de reaeratieparameter.
- De grootte van de bodemrespiratie heeft slechts een beperkte invloed op het zuurstofgehalte. Dit is tevens af te leiden uit de in paragraaf 5.5 afgeleide percentages waarin de processen bijdragen tot het zuurstofdeficiet onder jaargemiddelde omstandigheden.
- De grootte van het veronderstelde zuurstofgehalte vóór ontziltiging heeft weinig invloed vanwege de tijdschaal met betrekking tot de aanpassing van het zuurstofgehalte aan gewijzigde omstandigheden.
- De parameters die specifiek van toepassing zijn op de ontwikkeling van de gelaagdheid hebben betrekkelijk weinig invloed. Mogelijk is dit te verklaren door het beperkte verschil ten aanzien van de minimale zuurstofgehalte berekend met IGPRIIG en GEPRIIG (zie paragraaf 6.4).

#### Grootheden

- De temperatuur is één van de gevoeligste grootheden. Deze grootheid heeft ondermeer invloed op het reaeratieproces, afbraakproces en de bodemrespiratie. Vanwege de gevoeligheid van de overige processen zal vooral de invloed op de reaeratie (d.m.v. de afname van de zuurstofverzadigingswaarde) overheersend zijn.
- De windsnelheid is eveneens een gevoelige grootheid die invloed heeft op het reaeratieproces en de ontwikkeling van de gelaagdheid. Vooral de invloed op het reaeratieproces is overheersend.
- De hoeveelheid biomassa is minder gevoelig in vergelijking met de wind en temperatuur.



- Het doorspoeldebiet heeft invloed op o.a. de snelheid van de ontziltling en daarmee op de tijdsduur van het afstervingstraject.

In de beschouwde situatie is dit aspect overheersend ten opzichte van de beïnvloeding via de doorspoeling (zie opmerking hieronder).

- Het zuurstofgehalte van het doorspoelwater (Hollands Diep) en de grootte van de lozingen hebben weinig invloed op de minimale zuurstofgehalten.

Opmerking:

Ten einde de invloed van het debiet op het zuurstofgehalte te kunnen verklaren, is het zuurstofdeficiet ten gevolge van het afbraakproces nader beschouwd. Uit de relaties met betrekking tot het minimale zuurstofgehalte voor het ideaal gemengd model (paragraaf 5.1.1), is de volgende relatie af te leiden met betrekking tot het aandeel in het zuurstofdeficiet, dat specifiek kan worden toegeschreven aan de afbraak van de bodemorganismen.

$$\Delta C_{\text{afbr.}} = \frac{1}{\frac{Q}{V} + K_2} K_1 B^{\text{max}} \quad (6.3.1)$$

Substitutie van de vergelijkingen (5.1.6) en (5.1.7) geeft na enige omwerkingen

$$\Delta C_{\text{afbr.}} = \frac{1}{\frac{\left(\frac{Q}{V}\right)}{K_1} + 1 + \frac{K_2}{K_1} + \frac{K_2}{\left(\frac{Q}{V}\right)}} \cdot \frac{\rho - \rho_o}{\rho_a - \rho_b} \cdot \text{UOD} \quad (6.3.2)$$

Het zuurstofdeficiet ten gevolge van het afbraakproces neemt toe met het debiet als,

$$\frac{K_2}{\left(\frac{Q}{V}\right)} > \frac{\left(\frac{Q}{V}\right)}{K_1} \quad \text{of} \quad Q < v \cdot \sqrt{K_1 K_2} \quad (6.3.3)$$

Hoewel bij een dergelijk gesimplificeerde benadering een aantal factoren niet in beschouwing is genomen kan hieruit evenwel worden afgeleid dat bij niet al te grote doorspoeldebieten (voor het Volkerak, < 300 m<sup>3</sup>/s) het gunstiger lijkt met een kleiner debiet door te spoelen.

Deze constatering hangt echter nauw samen met de aanname dat de afsterving van

de bodemorganismen over een bepaald traject evenredig is met de verandering van het zuurstofgehalte. Aangezien deze aanname niet kan worden geverifieerd, is bij een dergelijke interpretatie de nodige voorzichtigheid geboden.

#### Enkele kanttekeningen

De aangegeven gevoeligheid van de verschillende parameters en grootheden is afgeleid uit een gemiddelde beschouwing van de verandering van de minimale zuurstofgehalten voor de verschillende delen van het Zoommeer. Hierbij is telkens één parameter gewijzigd ten opzichte van de standaardsituatie.

Door deze opgelegde beperkingen kan slechts een soort gemiddelde gevoeligheid voor een parameter worden afgeleid. Het is derhalve mogelijk dat voor bepaalde delen van het Zoommeer of in bepaalde perioden een parameter een veel grotere gevoeligheid heeft in het systeem, als uit deze gevoeligheidsanalyse kan worden afgeleid.

Zo zal bijvoorbeeld de parameter voor de bodemrespiratie in de zomerperiode gevoeliger zijn dan in de winter (zie o.a. paragraaf 5.5.).

Ook de aard van de gevoeligheid, in de zin dat een grotere waarde gunstiger of ongunstiger is voor het zuurstofgehalte kan voor enkele parameters mede afhankelijk zijn van de beschouwde situatie.

### 6.4 Berekeningsresultaten

#### a. Standaardsituaties voor IGPRIG en GEPRIG en vergelijking van de berekeningen op basis van jaargemiddelden en gegevens voor de maand juni

Ten einde inzicht te verkrijgen in het verloop van het zuurstofgehalte gedurende het ontziltingsproces zijn in eerste instantie de berekeningsresultaten bestudeerd voor het geval de ontziltiging plaatsvindt onder jaargemiddelde omstandigheden danwel onder omstandigheden zoals die te verwachten zijn voor de maand juni. Bij deze berekeningen is uitgegaan van de parameterwaarden en andere gegevens in de standaardsituatie (paragraaf 6.3), waarbij de gegevens die afhankelijk zijn van de periode waarin de ontziltiging plaatsvindt zijn aangepast. In de figuren 6.1 en 6.2 (blz. 77 en 78) zijn de resultaten uitgezet die zijn berekend met respectievelijk de modellen IGPRIG en GEPRIG.

Met betrekking tot deze figuren kan onder meer het volgende worden opgemerkt.

#### Berekeningen met het model IGPRIG (figuur 6.1)

- Het verloop van de dichtheid is in overeenstemming met hetgeen op grond van

de oriënterende berekeningen is afgeleid, met dien verstande dat voor het Kommeer de dichtheid vóór ontzilting gelijk is gesteld aan  $\rho_z = 1020 \text{ kg/m}^3$  (d.w.z. zoutgehalte ca.  $15.000 \text{ gr/m}^3$ ).

- Het verloop van het B-gehalte is duidelijk te onderscheiden in 3 fasen, t.w.
  - . de periode vóór afsterving waarin het B-gehalte alleen wordt beïnvloed door de afzonderlijk beschouwde lozingen
  - . de afstervingsperiode waarin het B-gehalte tevens wordt beïnvloed door de belasting ten gevolge van afsterving
  - . de periode na de afsterving, waarin het verloop gekarakteriseerd wordt door de afname tengevolge van afbraak en uitspoeling.

De overgang tussen de verschillende perioden correspondeert met het bereiken van de afstervingscriteria  $\rho_a = 1010 \text{ kg/m}^3$  en  $\rho_b = 1005 \text{ kg/m}^3$  (zoutgehalten ca.  $7.500$  en  $3.750 \text{ gr/m}^3$ ).

Aangezien in het Kommeer deze criteria in een later stadium worden bereikt dan in het Volkerakmeer en de Eendracht, wordt ten gevolge van de instroming de overgang tussen de verschillende perioden enigszins vervaagd.

- In het verloop van het zuurstofgehalte is de invloed van het afbraakproces duidelijk terug te vinden, waarbij het tijdstip waarop het minimale zuurstofgehalte wordt bereikt nagenoeg samenvalt met het bereiken van de maximale waarde voor het B-gehalte.

Het verloop van het zuurstofgehalte vóór de afstervingsperiode is zeer arbitrair vanwege de keuze van het zuurstofgehalte vóór de ontzilting. Vanwege de aanpassing van het zuurstofgehalte in de periode tot het afstervingsproces is de invloed van deze keuze voor het verdere verloop vrij gering.

- Opmerkelijk is het verschil in het verloop van het zuurstofgehalte voor de omstandigheden gebaseerd op het jaargemiddelde en de maand juni, terwijl het verschil voor het B-gehalte erg gering is.

Aangezien in de maand juni vanwege de hogere temperatuur het afbraakproces sneller verloopt zal bij een zelfde waarde voor het B-gehalte het zuurstofverbruik groter zijn. Als gevolg hiervan zal het zuurstofgehalte in de maand juni lager zijn hetgeen wordt versterkt door de invloed van de geringere zuurstofverzadigingswaarde alsmede de grotere bodemrespiratie. Tevens is ten gevolge van de geringere windsnelheid de grootte van de reaeratieconstante in de maand juni kleiner dan op basis van het jaargemiddelde.

Berekeningen met het model GEPRIG (figuur 6.2)

- Het verloop van de dichtheid in deze modelbeschouwing is vergelijkbaar met het dichtheidsverloop in het model IGPRIG, met dien verstande dat de ontzilting voor het Volkerakmeer alleen van toepassing is op de bovenlaag. De dichtheid van de onderlaag blijft nagenoeg gelijk aan die van het oorspronkelijke zoute water. Opgemerkt dient te worden dat het verloop van de dichtheid en het zakken van de begrenzing tussen de onder- en bovenlaag enigszins wordt beïnvloed door de arbitraire keuze van de dichtheid in de bovenlaag op de beginsituatie. Uit Appendix I is echter af te leiden dat deze invloed gering is ten opzichte van de beïnvloeding door andere factoren. Uit de figuur blijkt dat de begrenzing tussen onder- en bovenlaag gedurende de eerste 10 dagen zakt tot ca. 5 m onder het oppervlak waarna het zakken van deze begrenzing beduidend langzamer gaat. Het effect van de uitstroming uit de onderlaag zal daardoor alleen in de beginfase invloed hebben op de ontwikkeling van de gelaagdheid in het Volkerakmeer en het verloop van de dichtheid in de Eendracht.
- Met betrekking tot het verloop van het B-gehalte kan worden opgemerkt dat de waarde die maximaal wordt bereikt over het algemeen hoger is dan in het model IGPRIG. Dit is toe te schrijven aan het geringere volume (bovenlaag) waarin de afsterving plaatsvindt in het Volkerakmeer en de enigszins kortere afsterfingsperiode.
- Het verloop van het zuurstofgehalte is eveneens vergelijkbaar met het model IGPRIG. Het zuurstofgehalte in de onderlaag van het Volkerakmeer neemt echter continu af tot anaërobie wordt bereikt. Volgens de berekening treedt dit reeds op na ca. 10 dagen waarbij dient te worden opgemerkt dat dit een ongunstige situatie voorstelt aangezien het achtergrond-zuurstofverbruik voor het oorspronkelijke zoute water gelijk is gesteld aan het AZV in het Hollands Diep (zie paragraaf 2.5).
- Ook in dit model is het opmerkelijk dat het verloop van het B-gehalte berekend voor de ontzilting onder jaargemiddelde omstandigheden en onder omstandigheden voor de maand juni nauwelijks van elkaar verschilt. Daarentegen is het verschil ten aanzien van het verloop van het zuurstofgehalte duidelijk aanwezig, waarbij het zuurstofgehalte vooral in het Kommeer gedurende een 10-tal dagen erg laag kan zijn onder de omstandigheden behorende bij de maand juni.

b. Berekening van de minimale zuurstofgehalten met maandgemiddelde gegevens

Voor maandgemiddelde omstandigheden zijn berekeningen gedaan teneinde hieruit af te kunnen leiden welke de gunstigste periode is voor ontziltling met betrekking tot de zuurstofhuishouding. Voor een onderling vergelijk van de verschillende maanden zijn uit deze berekeningen de minimale zuurstofgehalten afgeleid voor de verschillende delen van het Zoommeer. Deze berekeningen zijn gedaan met zowel het model IGPRIG als met model GEPRIG. De resultaten van deze berekeningen zijn opgenomen in tabel 6.1 (blz. 79), waarin tevens de gehanteerde specifieke maandelijkse gegevens zijn vermeld. Voor de overige gegevens en parameters zijn dezelfde waarden gebruikt als in de standaardsituatie.

In figuur 6.3 (blz. 80) zijn de resultaten grafisch uitgezet.

Ten aanzien van deze berekeningsresultaten kan worden opgemerkt dat over het algemeen het verschil tussen de berekeningen met het model IGPRIG en GEPRIG vrij gering is. Voor het Volkerak geeft het model GEPRIG voor de bovenlaag althans, enigszins gunstigere resultaten, terwijl dit model voor de Eendracht en het Kommeer over het algemeen een ongunstiger beeld geeft.

Duidelijk blijkt uit de figuur dat het minimale zuurstofgehalte van de zomermaanden beduidend lager is dan in de wintermaanden.

Hoewel er geen sprake is van anaërobie, zijn de minimale zuurstofgehalten in de maanden mei t/m september dermate laag dat de kans op plaatselijke anaërobie vrij groot lijkt. Dit geldt vooral voor het Kommeer.

c. Berekening van de minimale zuurstofgehalten onder maandgemiddelde omstandigheden met  $W_{10} = 4$  m/s

Aangezien uit de gevoeligheidsanalyse is gebleken dat de windsnelheid een sterke invloed heeft op het zuurstofgehalte zijn tevens berekeningen gedaan met een waarde voor de windsnelheid die over een maand gemiddeld minimaal op zal kunnen treden. Aan de hand van de windgegevens voor het station Vlissingen over de periode 1961 t/m 1977 is deze minimale waarde voor de windsnelheid gesteld op 4,0 m/s ( zie par. 4.5 ).

De voor deze windsnelheid berekende minimale zuurstofgehalten zijn opgenomen in tabel 6.2 (blz. 79) en uitgezet in figuur 6.4 (blz. 81).

Uit de figuur blijkt dat voor een dergelijk uitgangspunt anaërobie wordt berekend voor de periode mei t/m oktober.

Aangezien deze wijze van berekenen een vrij ongunstige situatie voorstelt, lijkt de kans voor het optreden van anaërobie voor de overige periode (november t/m april) vrij gering.

d. Berekeningen met een waterverlies van  $25 \text{ m}^3/\text{s}$  via de Philipssluisen

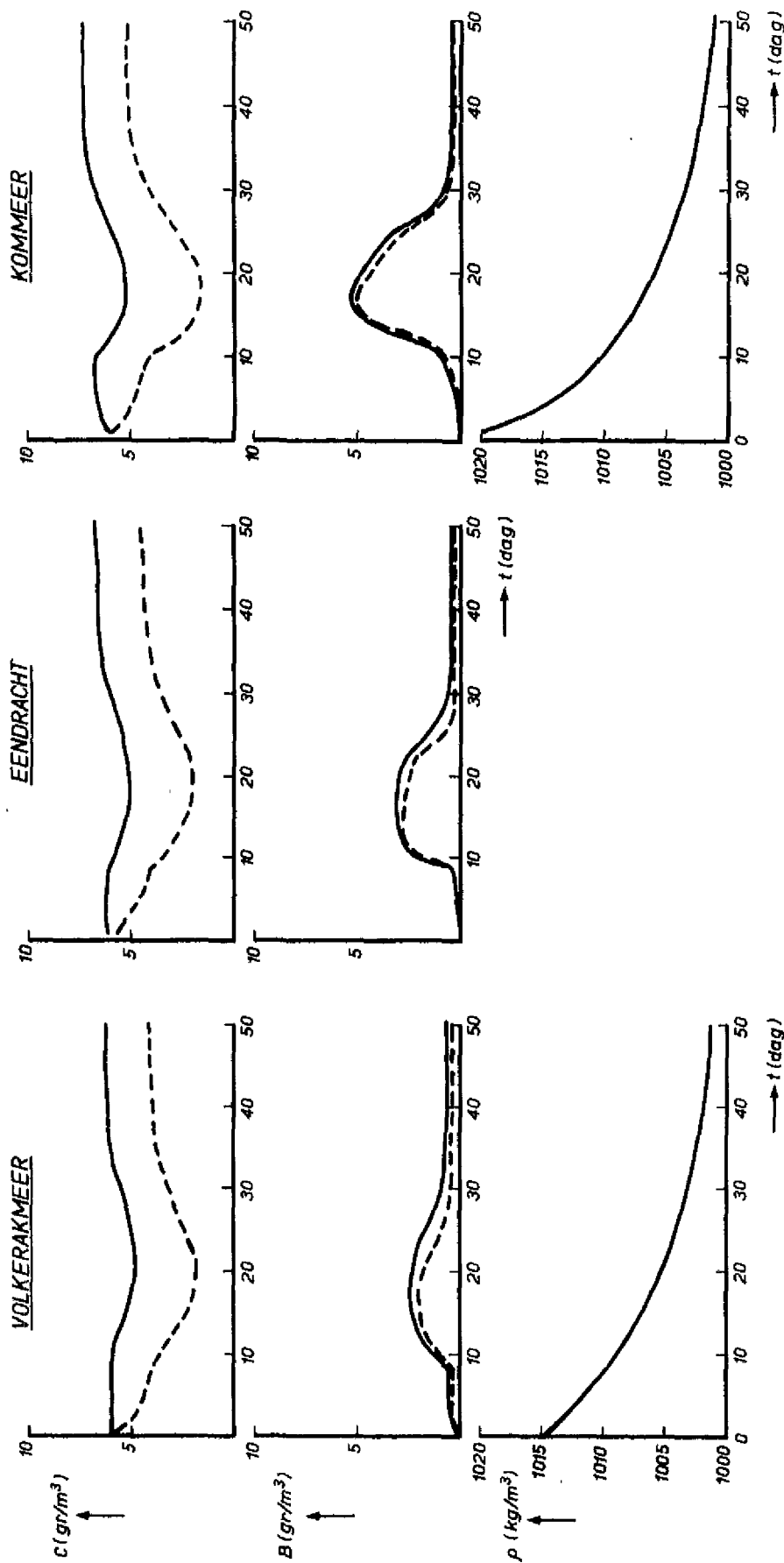
Teneinde na te gaan wat de invloed is van de wijze van doorspoeling, zijn voor de maand juni berekeningen gedaan met een voor het Volkerakmeer instromend totaal debiet van  $150$  en  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ . Het waterverlies via de Philipssluisen is gesteld op  $25 \text{ m}^3/\text{s}$ , zodat het overige deel van het Zoommeer wordt doorspoeld met respectievelijk  $125$  en  $25 \text{ m}^3/\text{s}$ . De resultaten van deze berekeningen, die zowel met het model IGPRIG als GEPRIG zijn gedaan, zijn uitgezet in de figuren 6.5 en 6.6 (blz. 82 en 83).

Uit figuur 6.5 (doorspoeling  $150 \text{ m}^3/\text{s}$ ) blijkt dat het verschil tussen de berekeningen met IGPRIG en GEPRIG voor een belangrijk deel is toe te schrijven aan een fase-verschuiving als gevolg van een eerdere verzoeting van de bovenlaag bij het model GEPRIG. De tendensen zijn echter gelijk. Uit een vergelijk met de berekeningen zonder waterverlies via de Philipssluisen (figuur 6.1 en 6.2) blijkt dat dit zoetwaterverlies geen significante invloed heeft op het zuurstofmodel.

Uit figuur 6.6 (doorspoeling  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ ) blijkt dat voor een kleiner doorspoeldebiet het zuurstofgehalte minder daalt, dan bij een groter doorspoeldebiet. De tijdschaal waarover het zuurstofgehalte zich op een laag niveau bevindt wordt echter beduidend vergroot.

Dat de snelheid waarmee het zoutgehalte verandert door de koppeling met het afstervingsproces in het model een belangrijke invloed heeft op het zuurstofgehalte blijkt uit het verloop van het zuurstofgehalte in de Eendracht van de berekening met het model GEPRIG. Door de veronderstelde uitstroming uit de onderlaag verandert de dichtheid gedurende de eerste 25 dagen beduidend sneller, dan na deze periode. Doordat als gevolg van het zakken van de bovenlaag dan geen uitstroming uit de onderlaag meer plaatsvindt. Het gevolg is dat in het begin het afstervingsproces zich beduidend sneller voltrekt, waardoor het zuurstofverbruik ten behoeve van de afbraak groter is.

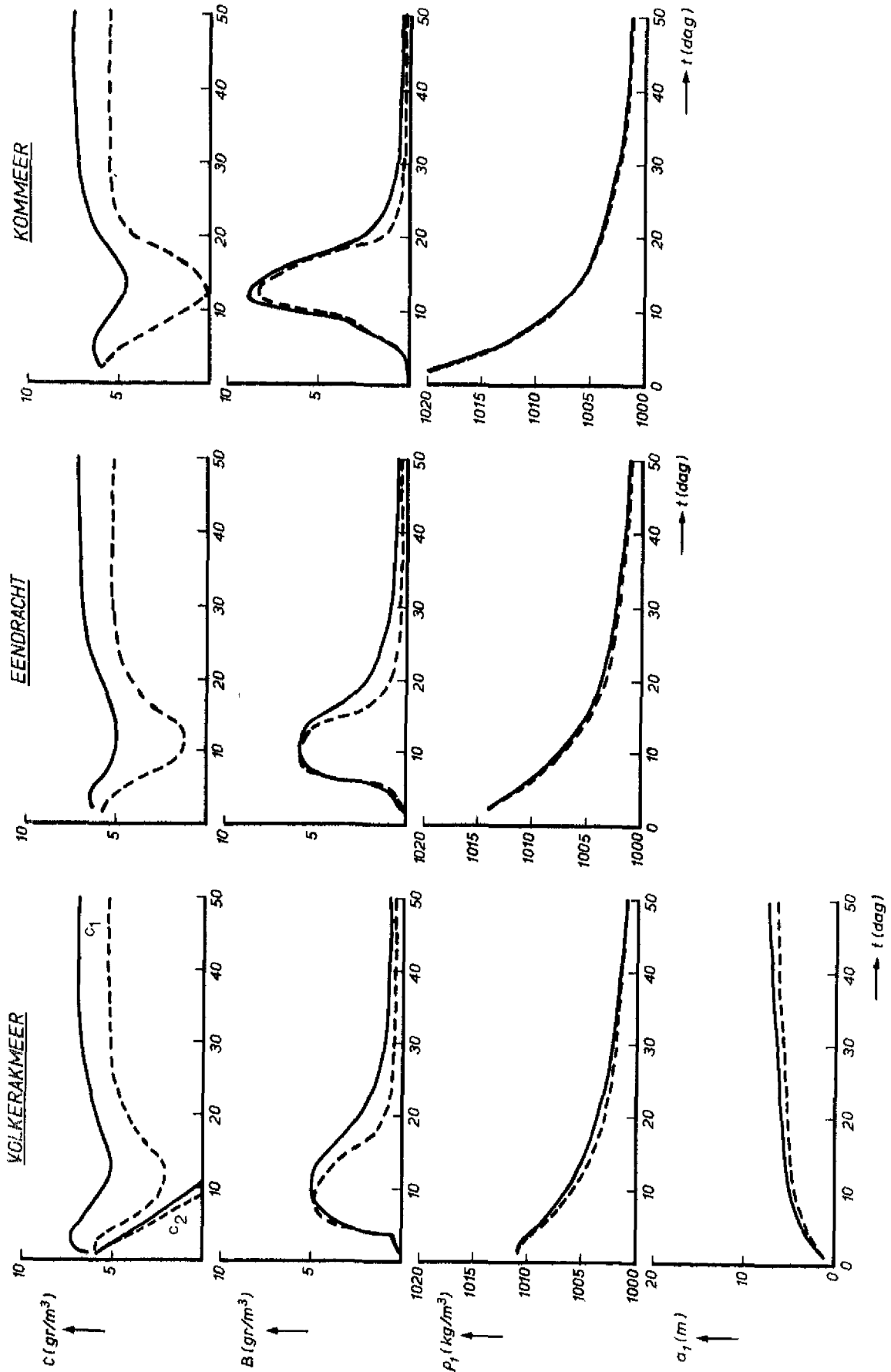
Opmerkelijk is dat de verschillen tussen de beide modellen in het Kommeer, op faseverschuivingen na, uiterst gering zijn.



VERLOOP VAN HET ZUURSTOFGEHALTE, ZUURSTOF-BEHOEFTTE EN DICHTHEID, BEREKEND MET HET MODEL IGPRIG ( — JAARGEMIDDELDE, --- JUNI )

JB

A4



VERLOOP VAN HET ZUURSTOFGEHALTE, ZUURSTOF-  
 BEHOEFTE EN DICHTHEID, BEREKEND MET HET  
 MODEL GEPRIG (— JAARGEMIDDELDE, --- JUNI)

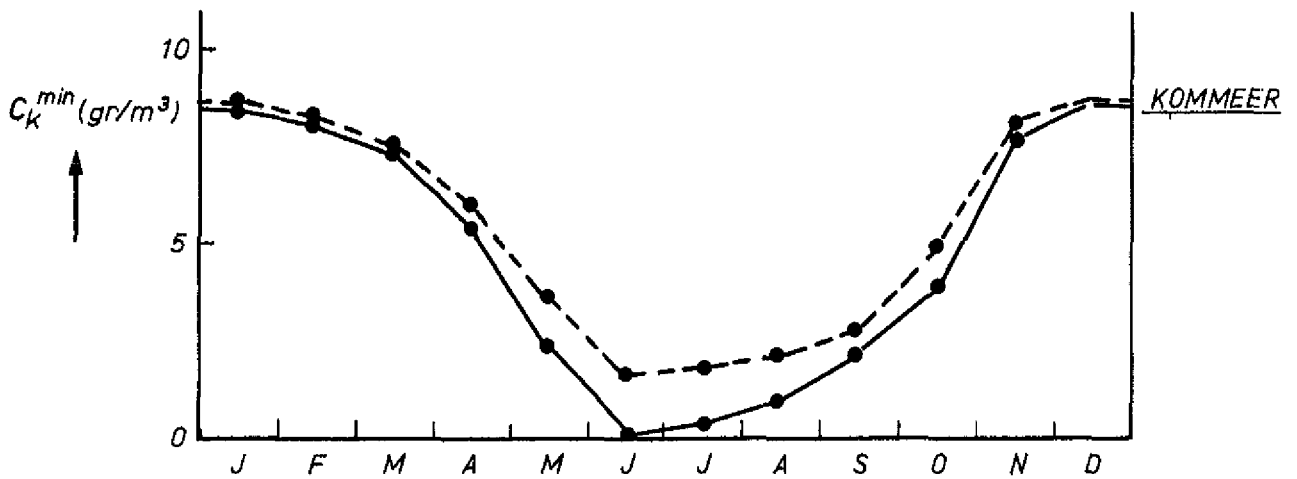
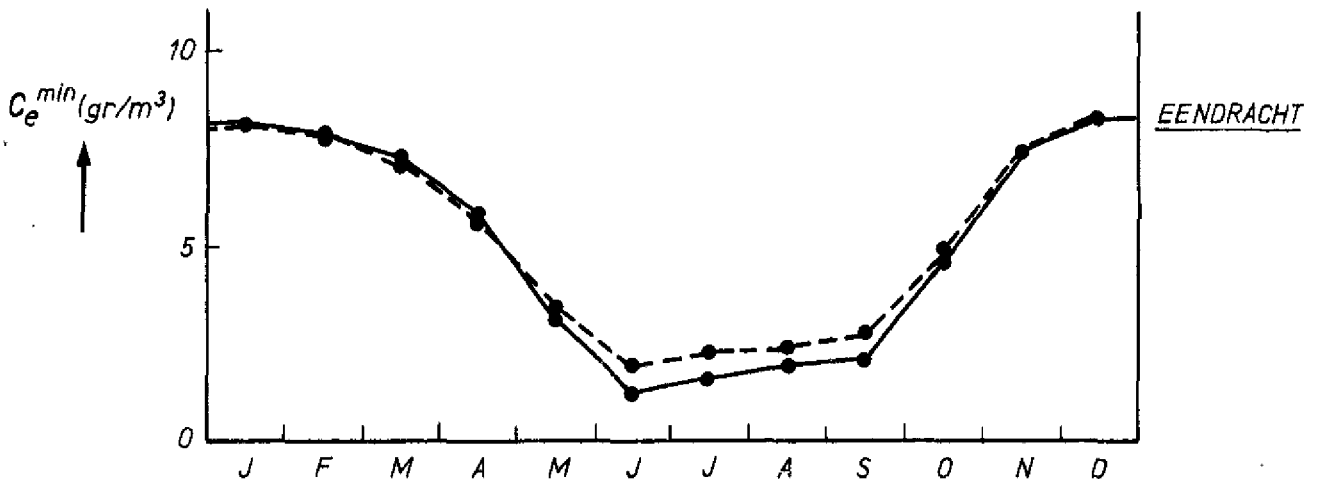
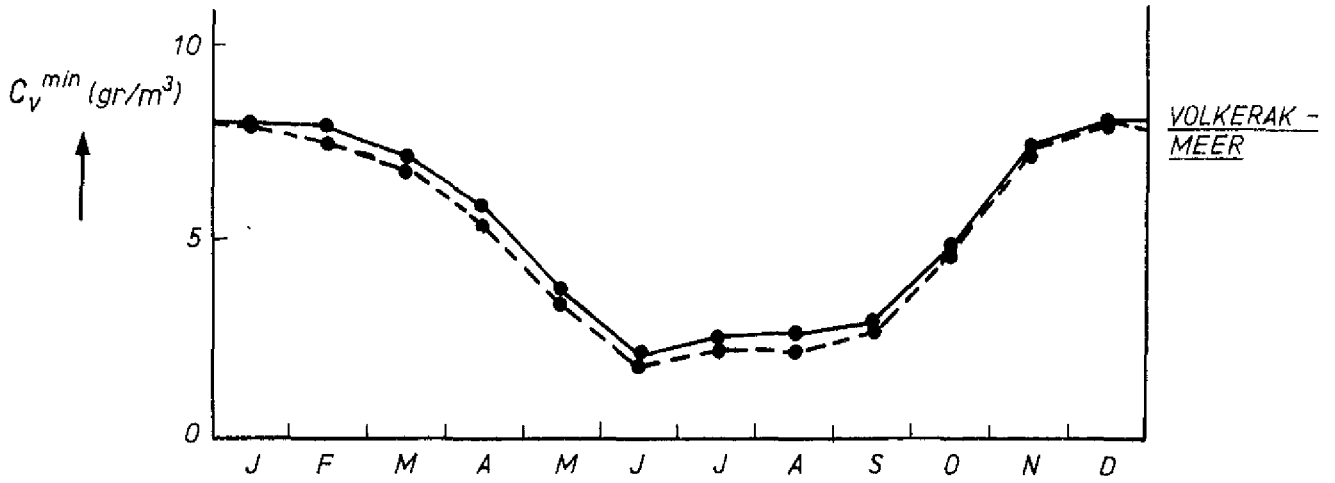


	Maandelijkse gegevens									model IGPRIG		model GEPRIG		
	$C_o$ gr/m <sup>3</sup>	T °C	$W_{10}$ m/c	$UOD_v$ gr/m <sup>3</sup>	$UOD_e$ gr/m <sup>3</sup>	$UOD_k$ gr/m <sup>3</sup>	$C_{v}^{min}$ gr/m <sup>3</sup>	$C_e^{min}$ gr/m <sup>3</sup>	$C_k^{min}$ gr/m <sup>3</sup>	Bijzonderheden	$C_v^{min}$ gr/m <sup>3</sup>	$C_e^{min}$ gr/m <sup>3</sup>	$C_k^{min}$ gr/m <sup>3</sup>	
januari	8,8	5,6	6,4	5,0	12,6	18,5	7,9	8,2	8,6		8,0	8,1	8,4	
februari	8,9	5,5	6,0	4,4	11,2	16,9	7,5	7,8	8,2		7,9	7,9	8,0	
maart	8,3	7,8	6,0	4,0	10,5	15,4	6,8	7,1	7,5		7,2	7,3	7,3	
april	7,8	10,5	5,7	4,9	13,1	19,1	5,5	5,7	6,0		5,9	5,9	5,5	
mei	6,1	14,6	5,4	6,4	17,5	25,5	3,4	3,6	3,6		3,7	3,2	2,4	
juni	5,9	18,7	5,1	7,2	20,2	29,2	2,0	2,0	1,7	8 dagen < 2 gr/m <sup>3</sup>	2,2	1,3	0,1	8 dagen < 2 gr/m <sup>3</sup>
juli	6,9	20,6	5,2	6,7	19,6	28,2	2,3	2,3	1,8	7 dagen < 2 gr/m <sup>3</sup>	2,6	1,6	0,3	8 dagen < 2 gr/m <sup>3</sup>
augustus	5,0	20,0	5,3	6,0	18,1	26,0	2,2	2,4	2,1		2,7	1,9	0,9	7 dagen < 2
september	5,5	17,6	5,4	6,9	20,0	28,7	2,7	2,8	2,6		2,9	2,2	1,2	6 dagen < 2
oktober	7,4	12,0	5,7	7,0	19,7	28,5	4,7	4,9	4,9		4,8	4,6	3,9	
november	8,4	8,0	6,7	5,7	15,8	22,9	7,3	7,6	7,9		7,3	7,5	7,6	
december	9,4	5,9	6,6	5,1	13,6	19,7	8,0	8,3	8,6		8,1	8,3	8,5	
jaarge- middelde	7,3	12,2	5,8	5,8	16,0	23,2	4,9	5,1	5,3		5,3	5,2	4,7	

Tabel 6.1 Berekende minimale zuurstofgehalten voor de verschillende delen van het Zoommeer op basis van maandgemiddelde gegevens

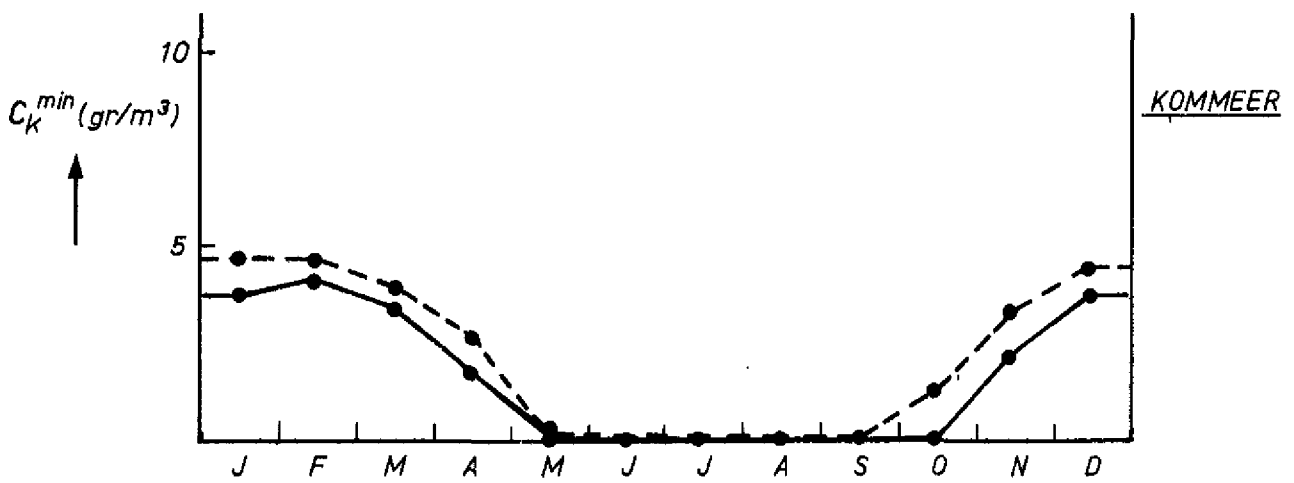
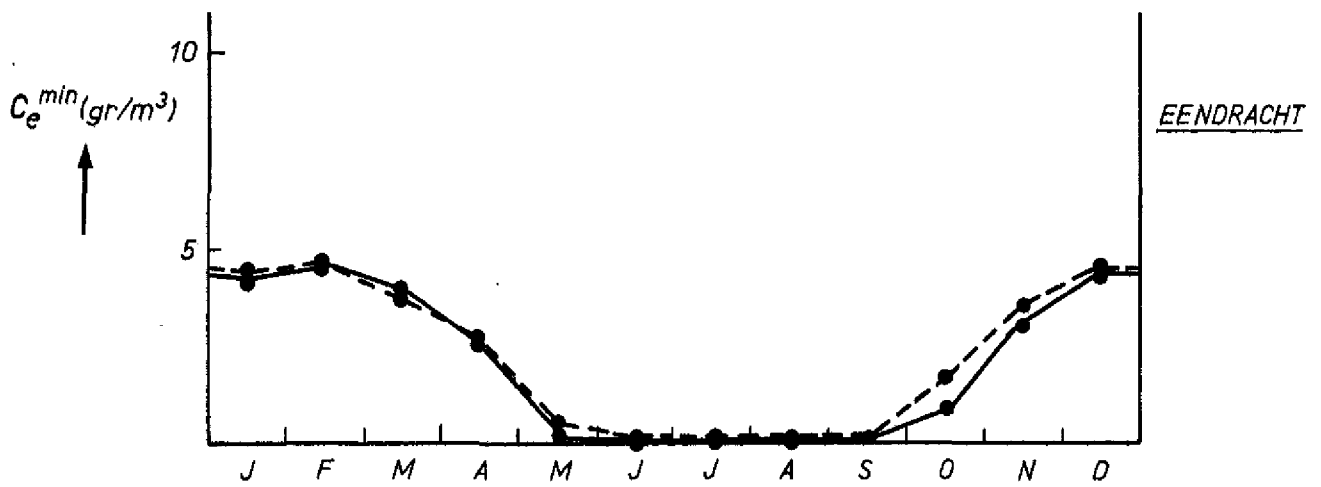
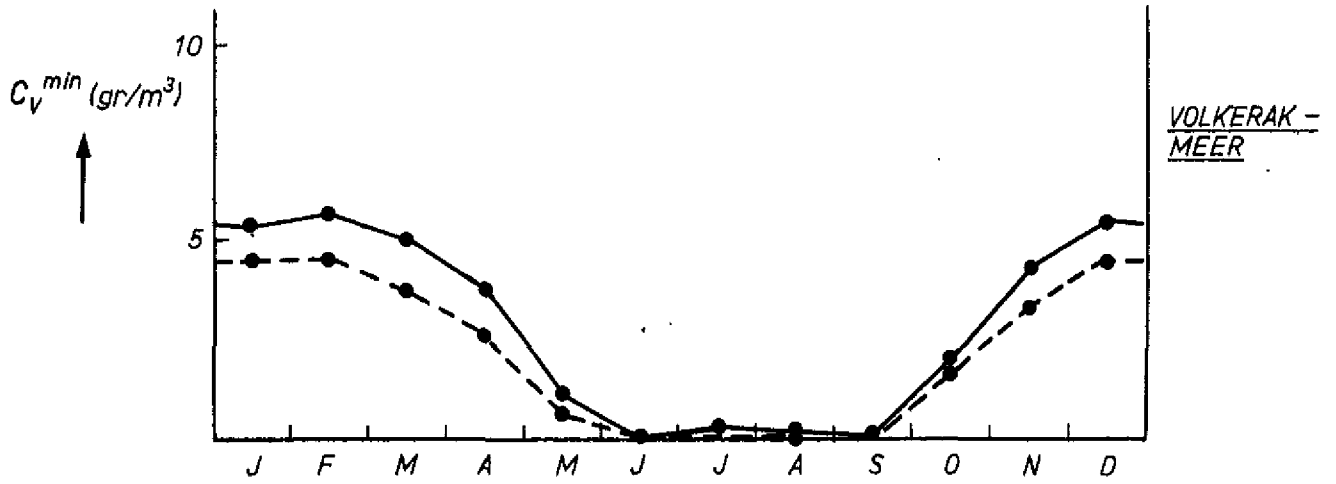
	model GEPRIG					model IGPRIG				
	$C_v^{min}$ gr/m <sup>3</sup>	$C_e^{min}$ gr/m <sup>3</sup>	$C_k^{min}$ gr/m <sup>3</sup>	< 2 dag	0 dag	$C_v^{min}$ gr/m <sup>3</sup>	$C_e^{min}$ gr/m <sup>3</sup>	$C_k^{min}$ gr/m <sup>3</sup>	< 2 dag	0 dag
januari	5,4	4,3	3,8			4,5	4,5	4,7		
februari	5,7	4,6	4,2			4,5	4,6	4,7		
maart	5,1	4,0	3,5			3,8	3,8	4,0		
april	3,8	2,6	1,8	4	6	2,7	2,7	2,7	16	
mei	1,2	0,1	0	13	8	0,7	0,6	0,3	21	10
juni	0	0	0	15	9	0	0	0	21	11
juli	0,3	0	0	14	8	0	0	0	24	10
augustus	0,2	0	0	15	8	0	0	0	19	8
september	0,1	0	0	14	7	0	0	0	11	
oktober	2,0	0,8	0	11		1,7	1,7	1,3		
november	4,3	3,1	2,3			3,4	3,5	3,4		
december	5,5	4,4	3,8			4,5	4,5	4,5		

Tabel 6.2 Berekende minimale zuurstofgehalten onder maandgemiddelde omstandigheden met  $W_{10} = 4$  m/s



MINIMALE ZUURSTOFGEHALTEN  
 $Q = 150 \text{ m}^3/\text{s}$ , MAANDGEMIDDELDEN

---	IGPRIG	JB
—	GEPRIG	A4



MINIMALE ZUURSTOFGEHALTEN

$Q = 150 \text{ m}^3/\text{s}$  ,  $W_{10} = 4,0 \text{ m/s}$  ( MAANDGEMIDDELDEN )

--- IGPRIG

JB

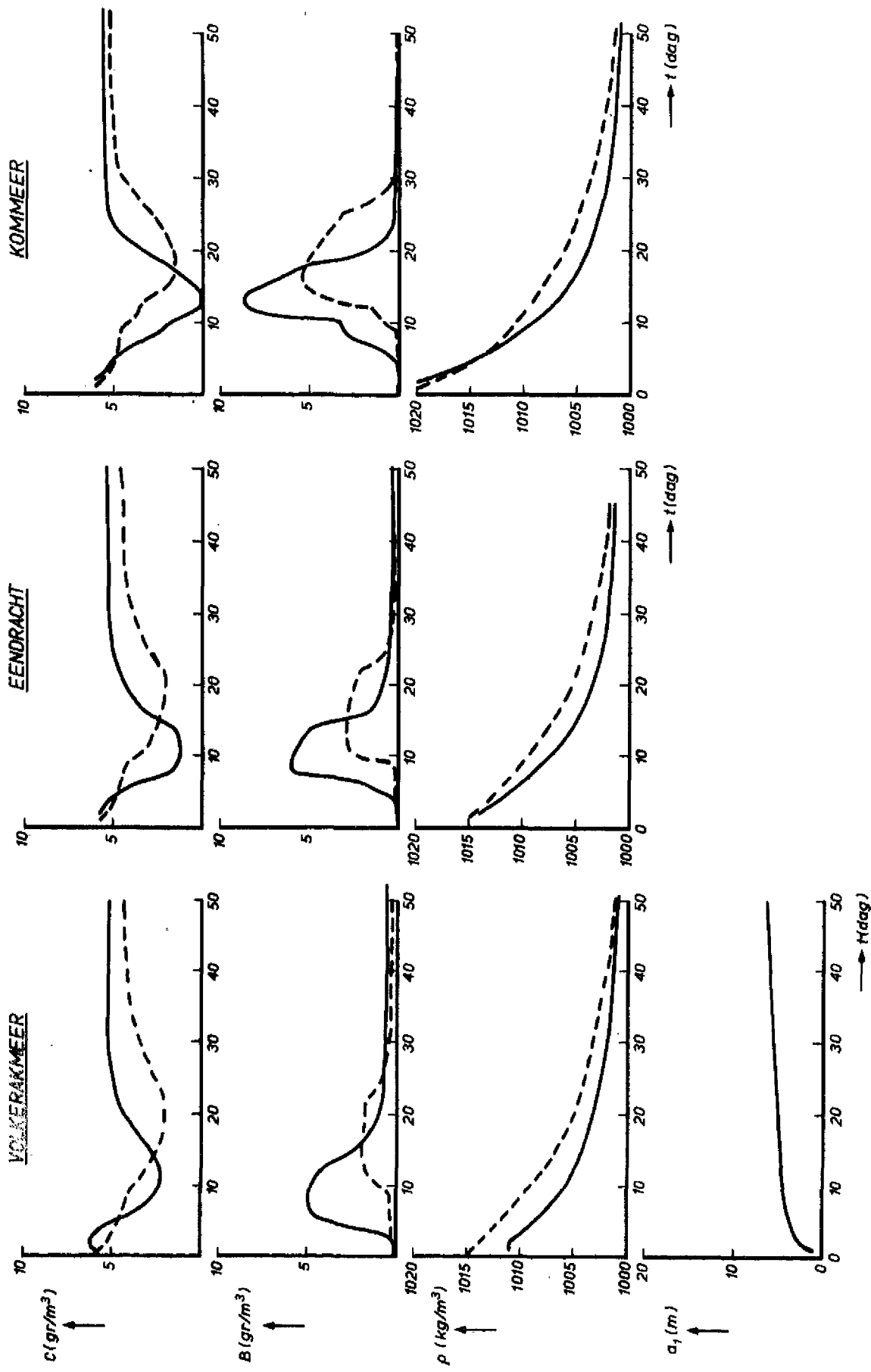
— GEPRIG

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

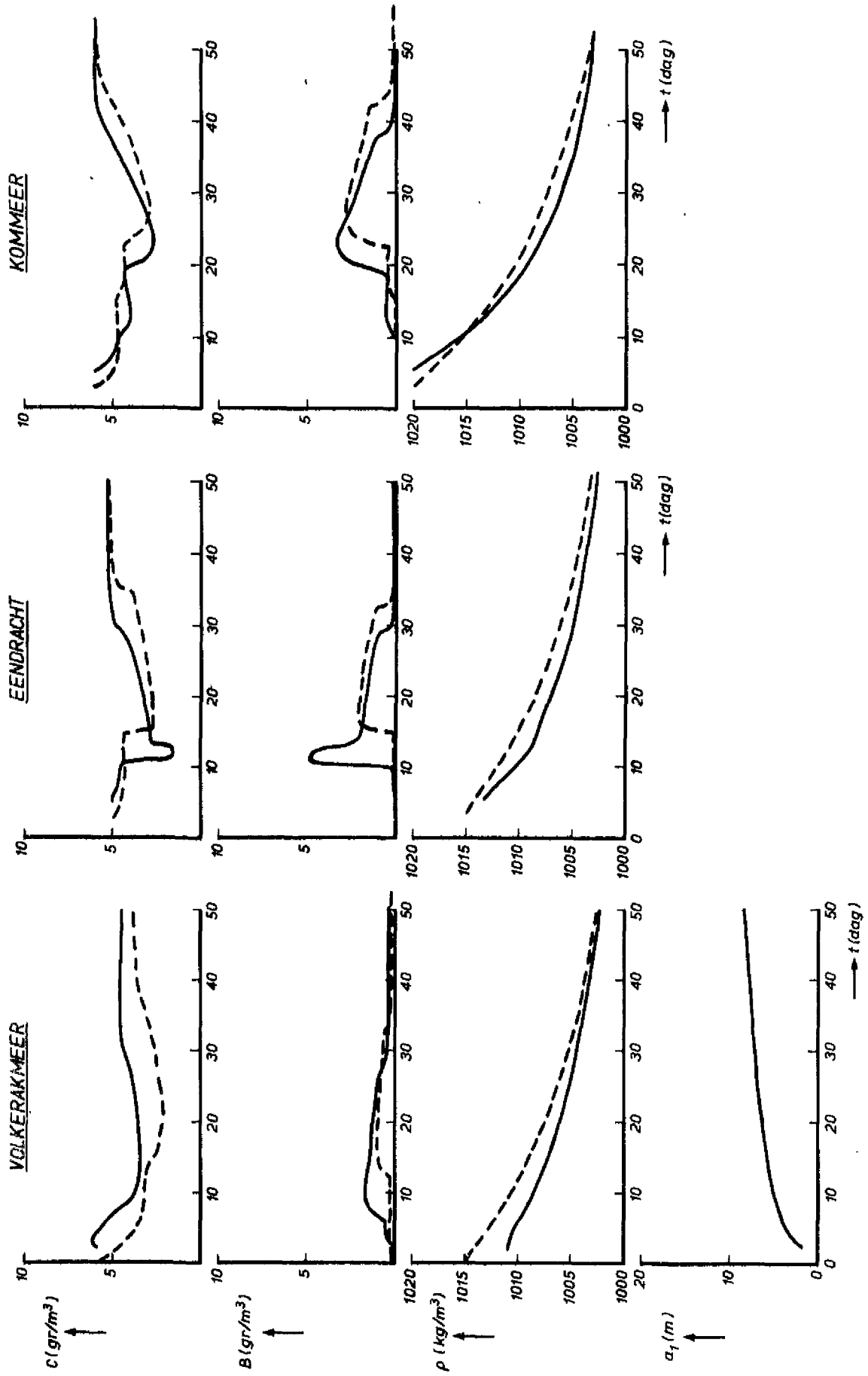
R 1318-1007

FIG.6.4



VERLOOP VAN DE CONCENTRATIES E.D. VOOR DE MAAND JUNI MET  $Q=150 \text{ m}^3/\text{s}$  EN EEN WATERVERLIES VIA DE PHILIPSDAMSLUIZEN VAN  $25 \text{ m}^3/\text{s}$ . — GEPRIG, --- IGPRIG

JB  
A4



VERLOOP VAN DE CONCENTRATIES E.D. VOOR DE MAAND JUNI MET  $Q = 50 \text{ m}^3/\text{s}$  EN EEN WATERVERLIES VIA DE PHILIPSDAMSLUIZEN VAN  $25 \text{ m}^3/\text{s}$ . — GEPRIIG, --- IGPRIIG

JB  
A4

## 7 Discussie en Conclusies

Met betrekking tot deze studie kan worden opgemerkt dat het voorspellen van het verloop van het zuurstofgehalte van het Zoommeer tijdens de ontziltingsfase slechts mogelijk is door gebruik te maken van diverse aannamen en simplificaties. Dit heeft tot gevolg dat de berekeningsresultaten met de nodige voorzichtigheid dienen te worden geïnterpreteerd.

Aangezien over het algemeen bij diverse aannamen en *simplificaties* er zoveel mogelijk naar is gestreefd dat het zuurstofgehalte hierdoor niet in gunstige zin wordt beïnvloed, is voor bepaalde omstandigheden een voorspelling mogelijk van de minimaal te verwachten zuurstofgehalten. Verder kunnen uit de berekeningen tendensen worden afgeleid, waarmee met het ontwikkelen van de ontziltingsstrategie rekening kan worden gehouden.

Een belangrijke tendens in deze is dat de kans op anaërobie bij ontziltiging gedurende de zomermaanden beduidend groter is dan gedurende de wintermaanden. De ongunstigere situatie bij ontziltiging in de zomerperiode wordt veroorzaakt door diverse factoren waarvan de belangrijkste zijn:

- . geringere windsnelheid hetgeen een nadelige invloed heeft op het reaeratieproces.
- . hogere temperatuur, met als gevolg een lagere zuurstofverzadigingswaarde, waardoor de zuurstoftoevoer middels het reaeratieproces aanmerkelijk wordt verminderd.  
De hogere temperatuur heeft tevens een hoger zuurstofverbruik tot gevolg vanwege de grotere bodemrespiratie en de grotere afbraakconstante.
- . grotere biomassaconcentraties, waardoor meer organisch materiaal moet worden afgebroken.

Mede omdat uit de berekeningen blijkt dat de kans reëel is dat het zuurstofgehalte in de maanden mei t/m oktober erg laag kan worden of zelfs anaërobie kan ontstaan, verdient het aanbeveling deze maanden met betrekking tot de ontziltiging te mijden. De kans op anaërobie in de overige maanden is weliswaar aanmerkelijk geringer, maar het is niet uitgesloten dat door onvolledige menging plaatselijk lage zuurstofgehalten kunnen voorkomen.

Dit geldt in het bijzonder voor het Volkerakmeer, waarvoor het ontstaan van gelaagdheid tijdens de ontziltingsfase vrij reëel lijkt. Weliswaar heeft dit

weinig invloed op het zuurstofgehalte in de bovenlaag, de bovenlaag zal vrijwel zeker anaëroob worden. Bij een plotselinge toename van de wind bestaat de mogelijkheid dat de onderlaag aan de oppervlakte komt. Hierdoor is het zelfs mogelijk dat de Eendracht en het Kommeer alleen worden doorgespoeld met het water uit de onderlaag, waardoor ook die gedeelten van het Zoommeer nadelig worden beïnvloed.

Een andere mogelijkheid is dat de horizontale menging in het Volkerakmeer tijdens de ontzilting gering is, waardoor een soort propstroming ontstaat. Uit de oriënterende berekeningen blijkt dat dit kan leiden tot een meestromende 'prop' waarin het zuurstofgehalte erg laag kan worden.

Ondanks dat bij de berekeningen van de minimale zuurstofgehalten over het algemeen is uitgegaan van een vrij ongunstige situatie, zijn er toch een aantal aspecten die mogelijk de kans op lage waarden voor het zuurstofgehalte nadelig kunnen beïnvloeden.

Een belangrijk aspect in deze is dat bij de berekeningen gebruik is gemaakt van maandgemiddelde gegevens. Met name de windsnelheid is een grootte die verre van constant is. Dit kan belangrijke konsekwenties hebben voor zowel de mate van menging (gelaagdheid) als voor de mate van reaeratie. Zo is het bijvoorbeeld denkbaar dat indien gedurende een langere periode de windsnelheid beduidend kleiner is dan de beschouwde minimale maandgemiddelde waarde van 4 m/s dit kan leiden tot beduidend lagere zuurstofgehalten dan op basis hiervan is berekend. Dit geldt in sterkere mate voor die delen van het Zoommeer die ondiep zijn, aangezien de gevoeligheid voor de mate van reaeratie hier aanzienlijk groter is dan voor de diepere delen.

Een ander aspect is de wijze van afsterving, welke evenredig verondersteld wordt met de verandering van het zoutgehalte. Het is namelijk denkbaar dat door zuurstofarmoede bij de bodem, bijvoorbeeld tengevolge van de afbraak van eerder afgestorven organismen, nagenoeg alle organismen gelijktijdig afsterven en in suspensie komen.

De organismen zullen hierdoor in een korter tijdsbestek worden afgebroken, waardoor het zuurstofverbruik tijdelijk beduidend groter zal zijn.

Uit laboratoriumproeven met betrekking tot de zuurstofopname door de bodem en bodemorganismen na ontzilting (20) is echter gebleken dat het afbraakproces vrij geleidelijk verloopt en voor een belangrijk deel wordt bepaald door de mate waarin het organisch materiaal wordt toegevoegd aan de waterfase. De mate van menging heeft dus een sterke invloed op de snelheid waarmee de afbraak van de organismen zich voltrekt.

Het afstervingsproces (waaronder het suspenderen van het organisch materiaal is inbegrepen) is derhalve een functie van het zoutgehalte, het zuurstofgehalte en de mate van menging.

Uitgaande van een constante menging en een voldoende hoog zuurstofgehalte lijkt de evenredigheid van de afsterving met de verandering van het zoutgehalte een redelijk uitgangspunt. Deze aanname is echter arbitrair zodat eventueel hieruit voortvloeiende tendensen met de nodige voorzichtigheid dienen te worden geïnterpreteerd.

Dit geldt met name voor de tendens die uit de berekeningen naar voren komt ten aanzien van het doorspoeldebiet. Bij een groter doorspoeldebiet zal het zoutgehalte sneller veranderen zodat tevens het afstervingsproces zich sneller zal voltrekken. Als gevolg van het feit dat het afbraakproces afhangt van de snelheid waarmee het afbreekbaar organisch materiaal beschikbaar komt, is daardoor de tendens dat het doorspoelen met een groter debiet ongunstiger is.

Puntsgewijze samengevat zijn voor het ontwikkelen van de ontziltingsstrategie de volgende zaken van belang:

1. De kans op anaërobie is bij ontziltiging in de periode van november t/m april beduidend geringer dan in de periode mei t/m oktober.
2. Het ontstaan van een zout/zoet-gelaagdheid in het Volkerakmeer lijkt vrij reëel en kan zich gedurende enkele maanden handhaven. De kans is derhalve groot dat de onderlaag hierbij anaëroob wordt.
3. Tijdens het afstervingstraject lijkt doorspoeling met een groot debiet ten behoeve van het zuurstofgehalte weinig zinvol. Waarschijnlijk heeft een continue doorspoeling met een klein debiet een gunstige invloed op het minimaal te verwachten zuurstofgehalte.

ad 1 Onder maandgemiddelde omstandigheden lijkt de kans op anaërobie voor de periode november t/m april uiterst gering.

Uit oogpunt van de beschikbaarheid van water voor doorspoeling wordt in de nota 'Duur Ontziltiging van het Oostmeer (model C3)' (18) aangegeven dat het najaar in deze ongunstig is, terwijl de periode januari t/m maart de gunstigste periode is.



ad 2 Doordat de zoutwatervissen zich mogelijk ophopen in de zoute putten en geulen kan dit leiden tot een plotselinge massale vissterfte. Bij opdrijven van de dode vissen kan dit leiden tot stankoverlast aan de oevers. Het lijkt derhalve, mede uit oogpunt van een snelle ontziltting, raadzaam door middel van kunstmatige menging de diepe geulen in het Volkerak op te mengen, voordat anaërobie optreedt.

## LITERATUUR

- 1 PAGEE, J.A. van. Natuurlijke beluchting van open water tengevolge van wind.  
Waterloopkundig Laboratorium, Rapport R 1318-II, Delft, 1978.
- 2 TRUESDALE, G.A., DOWNING, A.L. and LOWDEN, G.F. The solubility of oxygen in pure water and sea-water.  
J. Appl. Chem., 5, Febr. 1955, p. 53.
- 3 FAIR, G.M., GEIJER, J.C. and OKUN, D.A. Water and Waste Water Engineering. Vol. 2.  
John Wiley and Sons Inc., New York, 1968.
- 4 HORNE, R.A. Marine Chemistry, The structure of water and the chemistry of the hydrosphere.  
John Wiley and Sons, New York.
- 5 Effects of Polluting Discharges on the Thames Estuary, Water Pollution Research Techn. Paper no. 11.  
Thames Survey Committee and Water Pollution Research Lab., Her Majesty's Stationary Offices, London, 1964.
- 6 RINGELBERG, J. Aquatische oecologie in het bijzonder van het zoete water.  
Bohn, Scheltema & Holkema, Utrecht, 1976.
- 7 VEGTER, L. Ongepubliceerd rapport betreffende "Oostmeer".
- 8 BEUKEMA, J.J. De voedselrijkdom van de Waddenzee.  
Waddenbulletin 1977, p. 304.
- 9 GOTAAS, H.B. The Effect of Sea Water on Biochemical Oxidation of Sewage.  
Sewage Works Journal, Vol. 21, 1949, p. 818.

LITERATUUR (vervolg)

- 10 MARTIN, J.M., Meybeck, M., SALVADORI, F., THOMAS, A.J.  
Pollution Chimique des Estuarines, Rapport Scient. et Techn.No. 22.  
Lab. de Géologie, Paris, 1974, p. 193.
- 11 BEEK, E. van. Modelling Rijnwaterkwaliteit, processenzuurstof-  
modelling.  
Waterloopkundig Laboratorium, Rapport R 1056-II/S 321-II, Delft, 1977.
- 12 WOLF, P. Simulation des Sauerstoffhaushaltes in Fließgewässern  
Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Band 53.  
Kommissionsverslag R. Oldenbourg - München, 1974.
- 13 THOMANN, R.W. System Analysis & Water Quality Management.  
Mcgraw-Hill Inc., New York, 1972.
- 14 BREWER, W.S., ABERNATHY, A.R., PAYNTER, M.J.B. Oxygen consumption  
by fresh water sediments.  
Water Research, Vol. 11, 1977, p. 471-473.
- 15 STRALEN, M. van., KERSTING, K. De  $BOD_5^{20}$ -test, een onbruikbare maat-  
staf voor de bepaling van de kwaliteit van oppervlaktewater.  
 $H_2O$  (10) nr. 14, 1977. p. 329-331.
- 16 De milieukundige aspecten van de compartimentering van de Ooster-  
schelde, Rijkswaterstaat (Deltadienst, afdeling Milieu-Onderzoek),  
's Heer - Arendskerke, 1975.
- 17 Kwaliteitsonderzoek in de Rijkswateren, Rijkswaterstaat, Rijks-  
instituut voor de Volksgezondheid en Rijksinstituut voor Drinkwater-  
voorziening, kwartaaloverzichten 1972 t/m 1976.
- 18 Duur van de ontziltiging van het Oostmeer.  
Rijkswaterstaat (W & W, distr. ZW), nota nr. 24.001.04, 1976.

LITERATUUR (vervolg)

- 19        Situering lozingsmiddel Zoommeer, concept rapport commissie compartimentering Oosterschelde, Bergen op Zoom, 1977.
- 20        HOLLAND, A.M.B. en AL, J.P. Zuurstofopname door bodem en bodemdieren bij ontziltiging van het Zoommeer.  
Rijkswaterstaat, notitie DOMI-77.304, Middelburg, 1977.

## APPENDIX

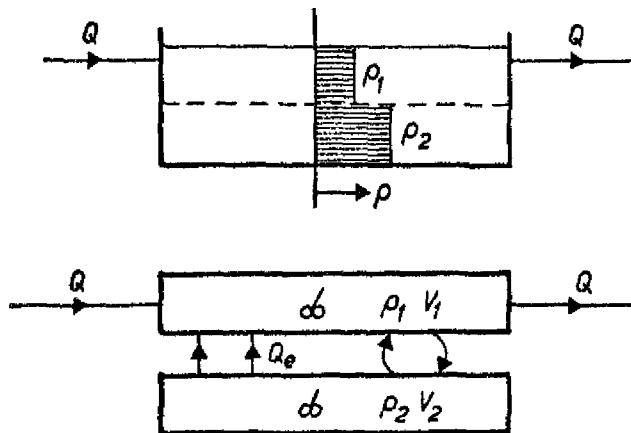
I	<u>Gelaagdheid in het Volkerak tijdens ontziling</u>	
I.1	modelschematisatie	I-1
I.2	entrainment t.g.v. wind	I-2
I.3	entrainment t.g.v. doorstroming in de bovenlaag	I-6
I.4	nadere uitwerking balansvergelijkingen	I-8
I.5	toepassing op het Volkerakmeer	I-12
I.6	keuze beginsituatie	I-15
I.7	invloed diffusie	I-18
I.8	modificatie m.b.v. de doorspoeling	I-20
I.9	resultaten van enkele berekeningen	I-22
I.10	helling van het grensvlak	I-26

literatuur

## 1 Modelschematisatie

Ten einde na te gaan of tijdens de ontziltng van het Zoommeer in het Volkerakmeer een eventuele gelaagdheid gedurende lange tijd gehandhaafd kan blijven, is een gesimplificeerd model opgesteld waarmee een schatting kan worden gemaakt ten aanzien van de tijdschaal gedurende welke een dergelijke gelaagdheid zich zal kunnen handhaven. Tevens kan een dergelijk model mogelijk als basis dienen voor een zuurstofmodel onder gelaagde omstandigheden. In een eerste beschouwing zal worden verondersteld dat zich reeds een gelaagdheid heeft gevormd die tengevolge van menging geleidelijk aan verdwijnt. Ter vereenvoudiging zullen de volgende aannamen worden gedaan:

- boven- en onderlaag zijn horizontaal homogeen gemengd
- boven- en onderlaag zijn vertikaal homogeen gemengd met scherpe overgang tussen beide lagen (fig. 1)
- geen diffusie tussen beide lagen (zie hiervoor paragraaf I.7)
- geen stroming in de onderlaag (zie hiervoor paragraaf I.8)
- instromend doorspoeldebiet in bovenlaag konstant in de tijd
- volume van het meer konstant
- entrainment van "stilstaande" onderlaag naar turbulente bovenlaag



Figuur 1 Geschematiseerd gelaagd model

Aan de hand van de hierboven vermelde aannamen zijn de volgende balansen opgesteld.

Volume balansen

$$\frac{dV}{dt} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{dV_1}{dt} = Q_e \quad (2)$$

$$\frac{dV_2}{dt} = - Q_e \quad (3)$$

$$V_1 + V_2 = V \quad (4)$$

V is het volume gehele meer,  $V_1$  volume bovenlaag,  $V_2$  het volume onderlaag, Q het doorspoeldebiet en  $Q_e$  het entrainment-debiet van water uit de onderlaag naar de bovenlaag.

Massa balansen

$$\frac{d\rho_1 V_1}{dt} = \rho_o Q + \rho_2 Q_e - \rho_1 Q \quad (5)$$

$$\frac{d\rho_2 V_2}{dt} = - \rho_2 Q_e \quad (6)$$

$\rho_o$ ,  $\rho_1$  en  $\rho_2$  zijn resp. de dichtheid van het doorspoelwater, dichtheid van het water in de bovenlaag en de onderlaag.

Met behulp van de vergelijkingen (2) en (3) zijn deze vergelijkingen te schrijven als,

$$\frac{d\rho_1}{dt} = - \frac{Q}{V_1} (\rho_1 - \rho_o) + \frac{Q_e}{V_1} (\rho_2 - \rho_1) \quad (7)$$

$$\frac{d\rho_2}{dt} = 0 \quad (8)$$

## 2 Entrainment ten gevolge van wind

In de literatuur zijn verschillende experimenten bekend betreffende de entrainment van water uit een "stilstaande" onderlaag en een onder invloed van wind stromende bovenlaag. Over het algemeen wordt hierbij de entrainment-snelheid beschouwd als een functie van de schuifspanningssnelheid in de waterfase ( $u_*$ ) en het kengetal van Richardson ( $Ri$ ).

Dit kengetal is de verhouding van de toegevoerde kinetische energie ten opzichte van de potentiële energie als gevolg van dichtheidsverschillen.

Algemeen geldt,

$$\frac{w_e}{u_*} = f(Ri) \quad (9)$$

$w_e$  is de snelheid waarmee de onderlaag zakt ten gevolge van opmenging van deze laag in de turbulente bovenlaag (= entrainmentsnelheid).

Veel gebruikt is de relatie die door Kato en Philips (1) experimenteel is afgeleid.

$$\frac{w_e}{u_*} = 2,5 Ri^{-1} \quad (10)$$

waarbij

$$Ri = \frac{g \frac{\Delta\rho}{\rho} a_1}{u_*^2} \quad (11)$$

$g$  is de gravitatiekonstante,  $\frac{\Delta\rho}{\rho}$  is het relatieve dichtheidsverschil tussen de beide lagen en  $a_1$  is de dikte van de bovenlaag.

De metingen zijn gedaan in een range waarbij het Richardsongetal varieert van ca. 20 tot 350.

Door Wu (2) en het Waterloopkundig Laboratorium (9) zijn soortgelijke experimenten gedaan. De grootte van de entrainment is bij hen een faktor 10 kleiner dan de entrainment bij Kato en Philips (1).

Kantha (3) wijt dit aan de beperkte strijklengte, waardoor de turbulente laag niet over de gehele diepte indringt. Kato en Philips gebruikten namelijk een cirkelvormige goot, zodat hierbij de strijklengte zeer groot kan worden genomen.



Turner (4) geeft aan dat voor bepaalde Richardsongetallen de entrainment-snelheid niet evenredig is met  $Ri^{-1}$  maar met  $Ri^{-3/2}$ . Ook Baines (5) en Linden (6) vinden een dergelijke afhankelijkheid.

Dit komt overeen met de resultaten van Kantha (3) die vindt,

$$\frac{w_e}{u_*} \div Ri^{-n} \quad \text{waarbij } n = \frac{1}{2} \text{ voor } Ri \sim 60, \quad (12)$$

$$n = 1 \text{ voor } Ri \sim 220,$$

$$n = \frac{3}{2} \text{ voor } Ri \sim 500,$$

$$n = 2 \text{ voor } Ri \sim 750.$$

De door Kantha (3) gevonden entrainmentsnelheden zijn over het algemeen iets hoger dan die van Kato en Philips (1).

Ottesen Hansen (7) leiden uit diverse experimenten de volgende relatie af

$$\frac{w_e}{u_*} = \frac{0,2}{\sqrt{1 + 0,0083 Ri^2}} \quad (13)$$

voor  $Ri > 50$  gaat de relatie over in

$$\frac{w_e}{u_*} \approx 2,2 Ri^{-1} \quad (14)$$

zodat deze nauw overeenkomt met die van Kato en Philips (1).

In de figuren 2 en 3 zijn de experimentele gegevens opgenomen die respectievelijk door Kantha (3) en Ottesen Hansen (7) zijn gebruikt.

In het Zoommeer zijn de Richardsongetallen mogelijk ter grootte van  $10^3$  à  $10^4$ . Uit de gegevens van Kantha (3) blijkt dat voor dergelijke Richardsongetallen mogelijk de entrainment evenredig is met  $Ri^{-2}$ .

Uit de gegevens van Ottesen Hansen blijkt eveneens een hogere afhankelijkheid voor wat betreft de laboratoriumexperimenten. De prototype-experimenten vertonen deze tendens echter veel minder duidelijk.

Mede omdat ook uit andere onderzoeken met betrekking tot het bepalen van de grenslaag bij thermische stratifikatie de relatie waarin de entrainment evenredig wordt gesteld aan  $Ri^{-1}$  goed overeenkomt met metingen (zie bijv. WL R 870 - L.H. 2214 (8)) is vooralsnog de voorkeur gegeven aan de relatie

$$\frac{w_e}{u_*} = C_1 \cdot \frac{1}{Ri} \quad (15)$$

Uit de gegevens van Ottesen Hansen (zie fig. 3) blijkt dat  $C_1$  in de orde ligt van 1 à 2, terwijl

$$Ri = \frac{g \frac{\Delta \rho}{\rho} a_1}{\frac{2}{u_*^2}}$$

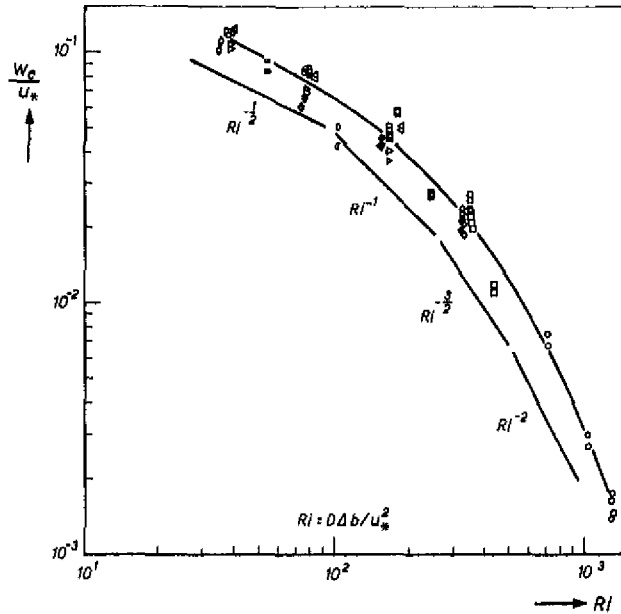


Fig. 2 Entrainment t.g.v. wind als functie van het kental van Richardson (3)

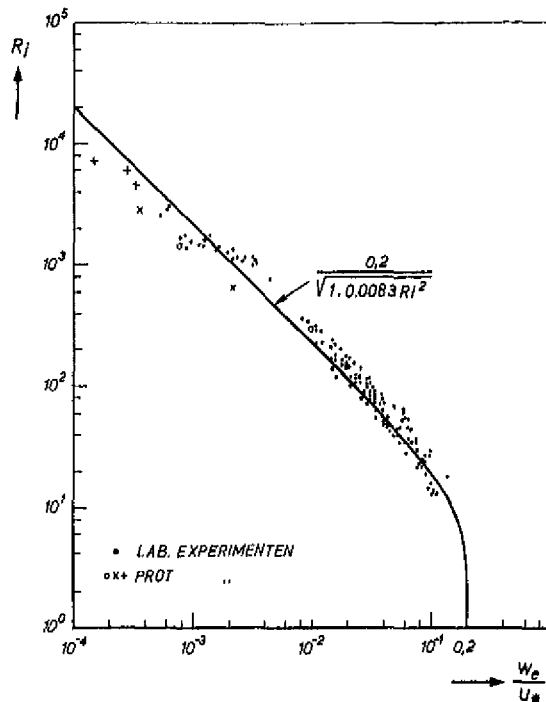


Fig. 3 Verband tussen de entrainment t.g.v. wind en het kental van Richardson (7)

### 3 Entrainment ten gevolge van doorstroming in de bovenlaag

Evenals bij windstroming kan de entrainment bij een stromende bovenlaag worden gekoppeld aan een kental van Richardson.

Aangezien echter de schuifspanningssnelheid in dit geval een grootte is die veel minder nauwkeurig is gedefinieerd, wordt hiervoor door Ottesen en Hansen (7) een dichtheids-Froudegetal ( $F_{\Delta}$ ) gebruikt.

Uit hun experimentele gegevens blijkt

$$\frac{w_e}{u_1} = C_2 F_{\Delta}^2 \quad (16)$$

waarbij

$$F_{\Delta} = \sqrt{\frac{u_1^2}{g \frac{\Delta\rho}{\rho} a_1}}$$

met  $C_2 = 1-3 \cdot 10^{-3}$ .

$u_1$  is de gemiddelde stroomsnelheid in de bovenlaag.

Uit figuur 4 blijkt dat indien rekening wordt gehouden met afwijkingen ten gevolge van de beperkingen van de modelexperimenten de relatie

$$\frac{w_e}{u_1} = 2 \cdot 10^{-3} F_{\Delta}^2 \quad (18)$$

een redelijke orde van grootte aangeeft.

Moore en Long (8) vinden een soortgelijke afhankelijkheid voor de entrainment bij een stromende onder- en bovenlaag,

$$\frac{w_e}{\Delta u} \sim Ri_o^{-n} \quad \text{waarbij } n \sim 1 \quad (19)$$

en  $Ri_o = \frac{g \frac{\Delta\rho}{\rho} a}{\Delta u^2}$

$\Delta u$  is het snelheidsverschil tussen onder- en bovenlaag,  $a$  is de totale diepte. De relatie komt min of meer overeen met die van Ottesen Hansen aangezien  $Ri_o$

en  $\frac{1}{F_{\Delta}^2}$  nauw verwant zijn.

In verband met de analogie van entrainment ten gevolge van wind zal de vergelijking (16) worden geschreven als

$$\frac{w_e}{u_1} = C_2 \frac{1}{Ri_o} \quad (20)$$

waarbij

$$Ri_o = \frac{g \frac{\Delta\rho}{\rho} a_1}{u_1^2} \quad \text{en} \quad C_2 = 1-3 \cdot 10^{-3}.$$

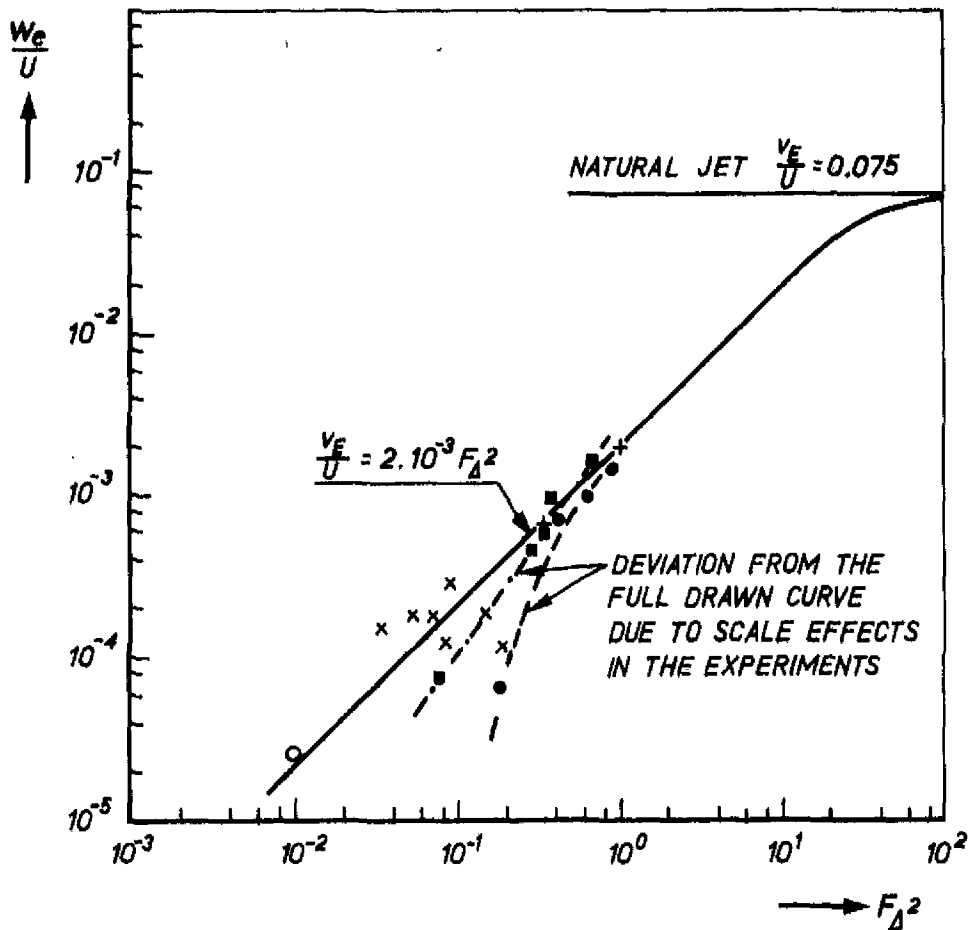


Fig. 4 Verband tussen entrainment en het dichtheids-Froudegetal (7)

#### 4 Nadere uitwerking van de balansvergelijkingen

Aangezien de diffusie tussen de beide lagen vooralsnog is verwaarloosd, zal in het beschouwde model de dichtheid van de onderlaag niet veranderen, wel zal als gevolg van het zakken van de grenslaag het volume van deze laag geleidelijk aan afnemen volgens vergelijking (3).

De afname van het volume van de onderlaag is gelijk aan de volume toename van de bovenlaag, zodat in feite kan worden volstaan met het beschouwen van de verandering van de dichtheid en het volume in de bovenlaag.

Hiertoe zijn reeds de volgende relaties afgeleid

$$\frac{dV_1}{dt} = Q_e \quad (2)$$

$$\frac{d\rho_1}{dt} = -\frac{Q}{V_1} (\rho_1 - \rho_0) + \frac{Q_e}{V_1} (\rho_2 - \rho_1) \quad (7)$$

Eenvoudig is af te leiden dat het entrainmentdebiet gelijk is aan,

$$Q_e = w_e \cdot A_{12} \quad (21)$$

$A_{12}$  is de grootte van het uitwisselingsoppervlak tussen onder- en bovenlaag.

Uit paragraaf 2 en 3 blijkt dat de entrainmentsnelheid te schrijven is als

$$w_e = \frac{f(u)}{g \frac{\Delta\rho}{\rho} a_1} \quad (22)$$

$f(u)$  is een snelheidsfunctie die afhangt van de snelheid in de bovenlaag ten gevolge van doorstroming en de schuifspanningssnelheid ten gevolge van wind.

Aangezien vanwege de afhankelijkheid van de dichtheid in de bovenlaag de mate van entrainment moeilijk is te voorspellen zal in het onderstaande een minimale entrainmentdebiet ( $Q_{em}$ ) worden ingevoerd, dat wordt bepaald door in vergelijking (22) het maximale dichtheidsverschil aan te nemen, hetgeen gelijk is aan  $\rho_z - \rho_0$  ( $\rho_z$  is de dichtheid van het oorspronkelijke zoute water en  $\rho_0$  de dichtheid van het instromende zoete water).

Het werkelijke entrainmentdebiet is dan gelijk aan,

$$Q_e = \frac{\rho_z - \rho_o}{\rho_z - \rho_1} Q_{em} \quad (23)$$

Substitutie in vergelijking (7) geeft,

$$\frac{d\rho_1}{dt} = -\frac{Q}{V_1} (\rho_1 - \rho_o) + \frac{Q_{em}}{V_1} (\rho_z - \rho_o) \quad (24)$$

Voor  $Q_{em}$  zijn aan de hand van paragraaf 2 en 3 de relaties af te leiden, waarbij het entrainmentdebiet wordt gekoppeld aan bekende grootheden.

Voor windstroming:

Uit de gegevens van Wu (11) is de volgende relatie voor  $u_*$  af te leiden,

$$u_* = 7 \cdot 10^{-4} W_{10}^{1,25} \quad (25)$$

$W_{10}$  is de windsnelheid op 10 m boven het wateroppervlak.

Met behulp van vergelijking (21) en (15) met  $C_1 \approx 2$  volgt hieruit

$$Q_{em} = 6,9 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{W_{10}^{3,75}}{g \frac{\rho_z - \rho_o}{\rho_o} a_1} \cdot A_{12} \quad (26)$$

Voor doorspoeling in de bovenlaag:

De stroomsnelheid in de bovenlaag is gelijk aan

$$u_1 = \frac{Q}{A_v} \quad (27)$$

$A_v$  is het oppervlak van de verticale doorsnede van de bovenlaag.

Bij benadering geldt hiervoor bij een kanaalachtige geometrie

$$A_v = \frac{V_1}{X} \quad (28)$$

waarbij de lengte van het kanaal gelijk is aan X.

Uit vergelijkingen (21), (27), (28) en (20) volgt met  $C_2 \approx 2 \cdot 10^{-3}$

$$Q_{em} = 2 \cdot 10^{-3} \frac{\left(\frac{Q}{V_1} X\right)^3}{g \frac{\rho_z - \rho_o}{\rho_o} a_1} \cdot A_{12} \quad (29)$$

Voor het doorrekenen van de gelaagdheid zijn de volgende vergelijkingen beschikbaar

$$\frac{dV_1}{dt} = Q_e \quad (2)$$

$$\frac{d\rho_1}{dt} = -\frac{Q}{V_1} (\rho_1 - \rho_o) + \frac{Q_{em}}{V_1} (\rho_z - \rho_o) \quad (24)$$

$$Q_e = \frac{\rho_z - \rho_o}{\rho_z - \rho_1} Q_{em} \quad (23)$$

$$Q_{em} = 6,9 \cdot 10^{-10} \frac{W_{10}^{3,75}}{g \frac{\rho_z - \rho_o}{\rho_o} a_1} \cdot A_{12} \quad (26)$$

$$\delta f \quad Q_{em} = 2 \cdot 10^{-3} \frac{\left(\frac{Q}{V_1} X\right)^3}{g \frac{\rho_z - \rho_o}{\rho_o} a_1} \cdot A_{12} \quad (29)$$

Uit de geometrie van het meer volgen relaties voor  $A_{12} = f(a_1)$ ,  $V_1 = f(a_1)$  en  $X$ .

Verder worden  $Q$ ,  $\rho_z$ ,  $\rho_o$ ,  $W_{10}$  bekend verondersteld.

De vergelijkingen zijn hiermee dus oplosbaar indien de startwaarden voor  $V_1$  ( $\delta f$   $a_1$ ) en  $\rho_1$  bekend zijn.

Opmerking: In verband met het onderscheid tussen entrainment ten gevolge van wind en doorspoelstroming kan worden opgemerkt dat niet met zekerheid kan worden voorspeld, in hoeverre beide entrainmentmechanismen elkaar versterken. Aangenomen is dat van beide mechanismen er steeds één onderschikt is aan de ander, zodat steeds dat mechanisme wordt gekozen dat het grootste entrainmentdebiet geeft.

Aangezien echter de doorspoelstroming in verband met de afvoer via de Eendracht niet over het gehele Volkerakmeer plaatsvindt zal de entrainment in de Krammer alleen ten gevolge van wind kunnen plaatsvinden. Met dit aspekt is, voor zover noodzakelijk, rekening gehouden.



### 5 Toepassing op het Volkerakmeer

In verband met de diepte van het Volkerak en het feit dat in dit meer het zoete water wordt ingelaten, lijkt hier het ontstaan van een zoete bovenlaag op een zoute onderlaag vrij realistisch.

Gegevens betreffende het Volkerakmeer zijn:

$$\text{Volume-diepterelatie: } V_1 = V - 5,18 \cdot 10^3 (20 - a_1)^{3,6} \text{ m}^3 \quad (30)$$

$$0 < a_1 < 20 \text{ m}$$

$$\text{Oppervlakte-diepterelatie: } A_{12} = 18,6 \cdot 10^3 (20 - a_1)^{2,6} \text{ m}^2 \quad (31)$$

$$0 < a_1 < 20 \text{ m}$$

$$\text{Volume: } V = 249,9 \text{ Mm}^3$$

$$\text{Lengte: } X = 18 \text{ km.}$$

Het maximale dichtheidsverschil is gelijk aan  $\rho_z - \rho_o \approx 15 \text{ kg/m}^3$ .

Met behulp van de vergelijkingen (26) en (29) zijn bij verschillende dikten van de bovenlaag met bovenstaande gegevens de minimale entrainmentdebieten te berekenen voor een bepaalde windsnelheid of doorspoeldebiet (zie tabel 1).

$a_1$ (m)	$V_1$ (Mm <sup>3</sup> )	$A_{12}$ (Mm <sup>2</sup> )	wind	doorspoeling
			$W_{10} = 6 \text{ m/s}$	$Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$
			$Q_{em}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{em}$ (m <sup>3</sup> /s)
0,5	21,6	42,0	320	648
0,75	32,0	40,6	206	96
1,0	42,0	39,3	150	41
1,25	51,7	38,0	116	21
1,5	61,0	36,7	93	13
2,0	78,8	34,1	65	5,4
3,0	110,6	29,4	37	1,7
4,0	137,9	25,1	24	0,7
5,0	161,1	21,2	16	0,4
7,5	203,9	13,2	6,7	0,1
10,0	229,3	7,4	2,9	0,1
15,0	248,2	1,2	0,3	0,0
20,0	249,9	0	0	0

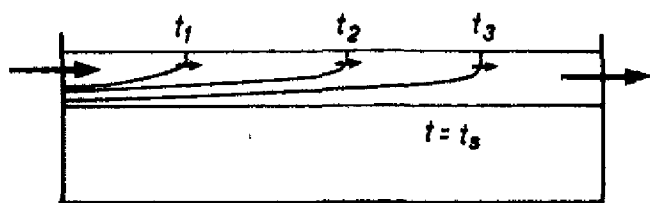
Tabel 1 Entrainmentdebiet ten gevolge van wind- en doorspoelstrooming

Uit de tabel blijkt dat de entrainment voor een geringe dikte van de bovenlaag vrij groot is in vergelijking met het doorspoeldebiet (max.  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Indien de dikte van de bovenlaag groter is dan 1 m wordt de entrainment bij een gemiddelde windsnelheid van 6 m/s voornamelijk veroorzaakt door de invloed van wind. De grootte van de windsnelheid heeft een sterke invloed op de entrainment ( $\sim W_{10}^{3,75}$ ) zodat bij kleinere windsnelheden de mate van entrainment sterk af zal nemen.

In dit model is aangenomen dat de gelaagdheid zich reeds heeft ingesteld.

Dit houdt in dat getracht moet worden een beginsituatie te bepalen waaruit de startwaarden voor  $\rho_1$  en  $a_1$  volgen.

In figuur 5 is geschetst op welke wijze de gelaagdheid aan het begin van het ontziltingsproces mogelijk kan ontstaan.

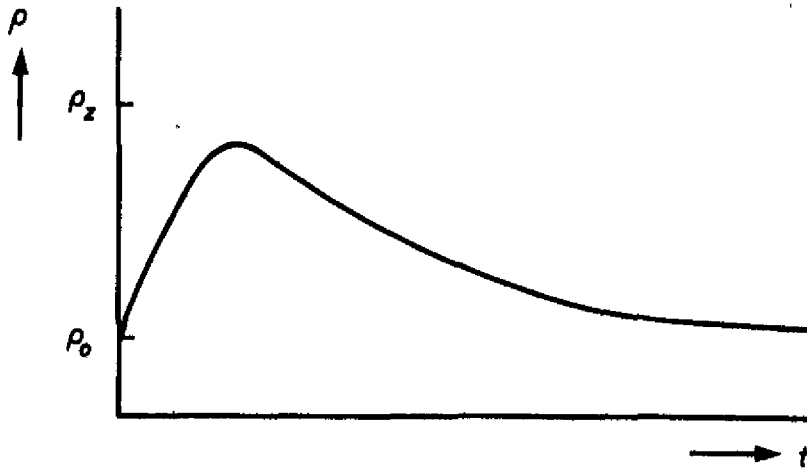


Geschematiseerd ziet de figuur er als volgt uit:



Figuur 5 Het ontstaan van gelaagdheid

De dichtheid in de zich uitbreidende bovenlaag zal als gevolg van de opname van water uit de onderlaag toenemen. Bij grotere dikten van de bovenlaag zal de entrainment echter afnemen zodat de dichtheid bij een bepaalde dikte weer geleidelijk aan af zal nemen, ten gevolge van het effect van doorspoelen met zoet water. Op een zeker moment zal er een evenwichtssituatie ontstaan, waarbij de dichtheid maximaal is. Het kwalitatieve verloop van  $\rho_1$  is daarom mogelijk als is weergegeven in figuur 6.



Figuur 6 Verloop van de dichtheid in de bovenlaag

## 6 Keuze beginsituatie

Onder andere in verband met het afstervingsproces verdient het aanbeveling om het systeem te beschouwen indien de dichtheid geleidelijk afneemt. Als beginsituatie wordt daarom verondersteld dat  $\rho_1$  maximaal is (dus  $\frac{d\rho_1}{dt} = 0$ ).

Uit vergelijking (24) volgt dan

$$\frac{\rho_{1s} - \rho_o}{\rho_z - \rho_o} = \frac{Q_{em}}{Q} \quad (32)$$

$\rho_{1s}$  is de waarde van  $\rho_1$  op de beginsituatie.

Aangezien  $\rho_o \leq \rho_{1s} \leq \rho_z$  moet dus gelden  $Q_{em} \leq Q$ .

Uit tabel 1 blijkt dat voor  $W_{10} = 6$  m/s en  $Q = 100$  m<sup>3</sup>/s hieraan wordt voldaan indien de dikte van de bovenlaag groter is dan 1,5 m, hetgeen redelijk lijkt.

In verband met het bepalen van de beginvoorwaarde van  $a_1$  is het noodzakelijk een keuze te doen voor de beginwaarde  $\rho_{1s}$  (= maximale waarde van  $\rho_1$ ). Aangezien de keuze van de startwaarde van  $\rho_1$  vrij willekeurig is zal uit een gevoeligheidsanalyse moeten blijken of de invloed van deze keuze groot is.

Een redelijke schatting lijkt,

$$\frac{\rho_{1s} - \rho_o}{\rho_z - \rho_o} \approx \frac{2}{3}$$

Met vergelijking (32) is hieruit bij een bepaald doorspoeldebiet de grootte van  $Q_{em}$  te berekenen voor de beginsituatie. Met behulp van de vergelijkingen (26) en (29) voor  $Q_{em}$  en de geometrische relaties (30) en (31), is bijbehorende waarde voor de dikte van de bovenlaag af te leiden. Bij deze diepte kunnen dan vervolgens met de relaties (30), (31) en (32), respectievelijk het volume van de bovenlaag, het uitwisselingsoppervlak en het werkelijke entrainmentdebiet worden berekend.

Onbekend is nog de duur van de ontziltling tot aan de beschouwde beginsituatie. In het onderstaande zal worden getracht een schatting hiervoor te maken. Hiertoe wordt gebruik gemaakt van de massa- en volumebalans van de bovenlaag.

waarvoor geldt,

ingestroomde massa = massa in de bovenlaag + uitgestroomde massa

ingestroomd volume = volume van de bovenlaag + uitgestroomd volume

zodat,

$$\rho_o \cdot Q \cdot t_s + \rho_z \int_0^{t_s} Q'_e dt = \rho_{1s} V_1 + \int_{t_o}^{t_s} \rho_1 Q' dt \quad (33)$$

$$Q t_s + \int_0^{t_s} Q'_e dt = V_1 + \int_{t_o}^{t_s} Q' dt \quad (34)$$

$t_s$  is de ontziltingsduur op de beschouwde beginsituatie,  $t_o$  is de tijd die de zoetwaterlaag nodig heeft om zich over het meer uit te spreiden,  $Q'_e$  en  $Q'$  zijn respectievelijk het entrainment- en uitstroomdebiet uit de bovenlaag vóór de beschouwde situatie.

Substitutie van vergelijking (34) in vergelijking (36) geeft

$$(\rho_z - \rho_o) Q t_s = (\rho_z - \rho_{1s}) V_1 + \int_{t_o}^{t_s} (\rho_z - \rho_1) Q' dt$$

zodat

$$t_s = \frac{\rho_z - \rho_{1s}}{\rho_z - \rho_o} \frac{V_1}{Q} + \int_{t_o}^{t_s} \frac{\rho_z - \rho_1}{\rho_z - \rho_o} \frac{Q'}{Q} dt \quad (35)$$

De grootte van de laatste term is moeilijk te kwantificeren aangezien  $\rho_1$ ,  $Q'$ ,  $t_s$  en  $t_o$  niet, of slechts ten dele bekend zijn.

Wel kan uit het bovenstaande worden afgeleid dat op de beginsituatie de ontziltingsduur in ieder geval groter is dan

$$t_s \geq \frac{\rho_z - \rho_{1s}}{\rho_z - \rho_o} \frac{V_1}{Q} \quad (36)$$

In onderstaande tabel zijn de minimale waarden voor  $t_s$  opgenomen van enkele berekeningen voor verschillende  $\rho_{1s}$ -waarden ( $W_{10} = 5 \text{ m/s}$ ,  $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

$\rho_{1s}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$a_1$ (m)	$t_s$ (dag)
1005	2,01	> 6,1
1010	1,13	> 1,8
1013	0,90	> 0,6

Een schatting voor  $t_o$  kan worden gemaakt indien de snelheid bekend is waarmee het zoetwaterfront zich over het meer uitspreidt.

Uit de theorie voor dichtheidsstromen blijkt dat deze snelheid een maximale waarde heeft, die afhangt van het dichtheidsverschil en de dikte van de laag. Vrij algemeen wordt aangenomen dat in een dergelijke stromingssituatie het interne Froudegetal van de laag bij benadering gelijk is aan 1 (voorwaarde voor kritische stroming) d.w.z.

$$F_{\Delta} = \sqrt{\frac{u^2}{\frac{\Delta\rho}{\rho} g a_1}} \approx 1$$

zodat  $u \approx \sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} g a_1}$  (meer algemeen  $u = k \sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} g a_1}$  waarbij  $k = 1 \text{ à } 2$ ).

De afstand die door het front wordt afgelegd is gelijk aan

$$X = \int_0^{t_o} u \, dt$$

Indien wordt aangenomen dat  $u$  vrijwel konstant is, geldt

$$t_o \approx \frac{X}{u} \approx \frac{X}{\sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} g a_1}}$$

Met  $X = 18.000 \text{ m}$ ,  $\Delta\rho = 10 \text{ kg/m}^3$  en  $a_1 = 0,5 \text{ m}$  volgt hieruit dat de tijd die nodig is voor het verspreiden van het zoete water over het gehele Volkerakmeer ca. 1 dag is.

## 7 Invloed van diffusie

Onder diffusie tussen de boven- en onderlaag wordt verstaan het proces dat tot gevolg heeft dat het dichtheidsverschil tussen de beide lagen geleidelijk aan afneemt als gevolg van een uitwisseling van volume-elementjes van onder- en bovenlaag. Het volume van onder- en bovenlaag verandert hierbij niet. De plaats van de begrenzing tussen de beide lagen zal door dit proces dus niet direkt worden beïnvloed. Wel zal de diffusie invloed hebben op de dichtheid van de onder- en bovenlaag.

Aangezien echter de entrainmentsnelheid omgekeerd evenredig is met het dichtheidsverschil tussen onder- en bovenlaag (zie vgl. (26), (29)) zal ten gevolge van diffusie het entrainmentdebit en daarmee de snelheid van het zakken van de grenslaag toenemen.

De invloed van diffusie kan op eenvoudige wijze worden ingevoerd in de vergelijkingen (7) en (8)

$$\frac{d\rho_1}{dt} = \frac{Q}{V_1} (\rho_0 - \rho_1) + \frac{Q_e}{V_1} (\rho_2 - \rho_1) + D_1 \quad (37)$$

$$\frac{d\rho_2}{dt} = D_2 \quad (38)$$

waarbij,

$$D_1 = \frac{\rho_2 - \rho_1}{H} D_z \frac{A_{12}}{V_1} \quad (39)$$

$$D_2 = - \frac{\rho_2 - \rho_1}{H} D_z \frac{A_{12}}{V_2} \quad (40)$$

H is de gemiddelde diepte van het Volkerak,  $D_z$  is de diffusiecoëfficiënt.

De grootte van de diffusie zal afhangen van de mate van turbulentie in de onderlaag.

Indien het water in de onderlaag volledig bewegingsloos is, zal geen (of slechts door moleculaire diffusie) zout over de diepte kunnen worden getransporteerd, zodat de dichtheid van de onderlaag niet of nauwelijks zal veranderen.

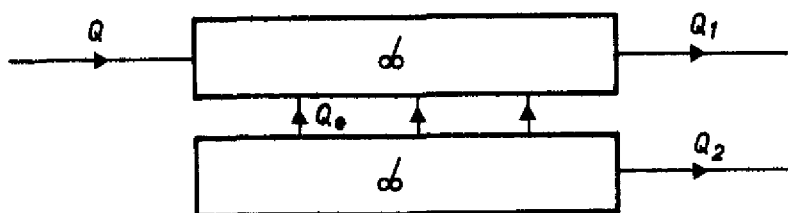
Indien er sprake is van alleen moleculaire diffusie is  $D_z \approx 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Getracht is een schatting voor  $D_z$  in de onderlaag te maken door uit te gaan van de grootte van de turbulentie-diffusiecoëfficiënt bij afwezigheid van dichtheidsverschillen. Met behulp van empirische relaties (b.v. Munk-Anderson) voor de reducering van de diffusie ten gevolge van dichtheidsverschillen is getracht de orde van grootte voor  $D_z$  te bepalen. Voor windsnelheden kleiner dan 10 m/s blijkt de aldus berekende grootte voor  $D_z$  kleiner te zijn dan de moleculaire diffusie. Weliswaar wordt dit veroorzaakt door het gebruik van de empirische relaties buiten het geldigheidsgebied, maar toch kan hieruit worden gekonkludeerd dat de diffusie waarschijnlijk erg gering zal zijn.



### 8 Modifikatie met betrekking tot de doorspoeling

In het voorgaande is aangenomen dat de doorspoeling alleen plaatsvindt in de bovenlaag. Het is echter niet ondenkbaar dat bij de uitstroming via de Eendracht ook water uit de onderlaag wordt meegesleurd. Dit zal zeker op kunnen treden indien de dikte van de bovenlaag kleiner is dan de diepte van de Eendracht. Het stromingsmodel is weergegeven in figuur 7.



Figuur 7 Gemodificeerd model met uitstroming uit de onderlaag

Eenvoudig zijn voor dit model de volgende balansen af te leiden:

#### Volume balansen

$$\frac{dV}{dt} = 0 \quad (41)$$

$$\frac{dV_1}{dt} = Q_e + Q - Q_1 \quad (42)$$

$$\frac{dV_2}{dt} = -Q_e - Q_2 \quad (43)$$

$$V_1 + V_2 = V \quad (44)$$

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (45)$$

#### Massa balansen

$$\frac{d\rho_1 V_1}{dt} = \rho_o Q + \rho_2 Q_e - \rho_1 Q_1 \quad (46)$$

$$\frac{d\rho_2 V_2}{dt} = -\rho_2 Q_e - \rho_2 Q_2 \quad (47)$$

Met behulp van de vergelijkingen (42) en (43) zijn deze vergelijkingen ook te schrijven als

$$\frac{d\rho_1}{dt} = -\frac{Q}{V_1} (\rho_1 - \rho_o) + \frac{Q_e}{V_1} (\rho_2 - \rho_1) \quad (48)$$

$$\frac{d\rho_2}{dt} = 0 \quad (49)$$

Deze relaties zijn dezelfde als de vergelijkingen (7) en (8) zodat de berekeningsmethode van het doorrekenen van de gelaagdheid dezelfde blijft als bij het vorige model, met dien verstande dat de gebruikte vergelijking (2) vervangen dient te worden door vergelijking (42).

De verhouding van  $Q_1$  en  $Q_2$  zal afhangen van de dikte van de bovenlaag en de diepte van de Eendracht. Voor een eenvoudige benadering is te veronderstellen dat de debieten zich verhouden als de grootte van de respektievelijke uitstroomoppervlakken (d.w.z. uitstroomsnelheid in onder- en bovenlaag gelijk).

Indien de Eendracht wordt benaderd door een rechthoekige goot met diepte  $H_e$  dan is af te leiden,

$$\text{voor } a_1 < H_e \quad Q_1 = \frac{a_1}{H_e} \cdot Q \quad (50)$$

$$Q_2 = \left(1 - \frac{a_1}{H_e}\right) Q \quad (51)$$

$$\text{voor } a_1 > H_e \quad Q_1 = Q \quad (52)$$

$$Q_2 = 0 \quad (53)$$

Aangezien ter plaatse van de uitstroming van het Volkerakmeer de diepte van de Eendracht maximaal ca. 5 m bedraagt, zal de invloed van deze modifikatie op de ontwikkeling van de gelaagdheid voor grotere dikten van de bovenlaag dan deze 5 m gering zijn.

Het is echter mogelijk dat met dit model ook voor grotere dikten van de bovenlaag rekening moet worden gehouden indien het grensvlak tussen de beide lagen niet horizontaal is maar bijvoorbeeld ten gevolge van wind enige helling vertoont. Dit aspect wordt nader beschouwd in paragraaf 10.

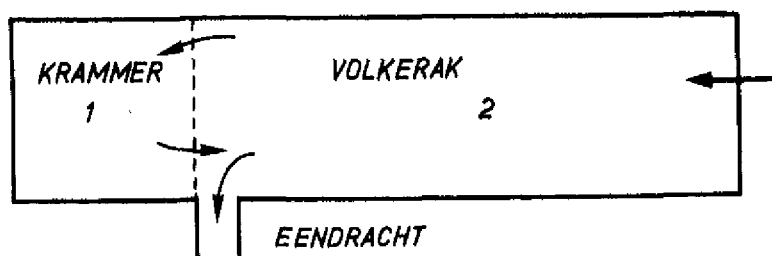
## 9 Resultaten van enkele berekeningen

Aan de hand van de theoretische beschouwingen uit de vorige paragrafen is een eenvoudig computermodel opgesteld waarmee de ontwikkeling van de gelaagdheid kan worden doorgerekend.

In het model is zowel de invloed van diffusie als die van de uitstroming met de onderlaag opgenomen.

Voor het entrainmentdebiet wordt de grootste waarde gekozen die kan worden berekend uit het entrainmentdebiet ten gevolge van wind voor het gehele Volkerakmeer en de som van het entrainmentdebiet in het Krammer ten gevolge van wind en het entrainmentdebiet ten gevolge van doorstroming in de bovenlaag van het gedeelte ten oosten van Eendracht.

(Zie onderstaande schets van het Volkerakmeer.)



Entrainment = Entrainment ten gevolge van wind (gebied 1 + 2) òf

Entrainment = Entrainment ten gevolge van wind (gebied 1) + entrainment ten gevolge van doorspoeling (gebied 2).

De resultaten van enkele berekeningen zijn grafisch uitgezet in de figuren 8, 9, 10 en 11.

In figuur 8 is de ontwikkeling van de dikte van de bovenlaag uitgezet tegen de tijd. Hierbij dient te worden opgemerkt dat de tijd-as de minimale tijd na het begin van de ontzilting aangeeft, dit omdat voor de tijdsduur tot de beschouwde beginsituatie slechts een minimale waarde wordt berekend (zie par. 6).

Ten einde de invloed van de keuze voor de startwaarde van de dichtheid in de bovenlaag te kunnen beschouwen zijn hiervoor berekeningen gedaan waarbij deze waarde is gevarieerd. Uit figuur 8 blijkt dat de berekende ontwikkeling van de gelaagdheid weliswaar wordt beïnvloed door deze arbitraire keuze doch deze invloed is betrekkelijk gering ten opzichte van de sterke afhankelijkheid van de windsnelheid. Bij deze berekeningen is de diffusie in de onderlaag verwaarloosd, terwijl de uitstroming alleen plaatsvindt vanuit de bovenlaag.

Uit de berekeningen blijkt dat ca. 50 dagen na de aanvang van de ontziltling de dikte van de bovenlaag ca. 5 à 6 m bedraagt indien de gemiddelde windsnelheid 5 m/s is. Bij een gemiddelde windsnelheid van 6 m/s is de dikte van de bovenlaag dan ca. 8 à 9 m.

Uit deze berekeningen blijkt dat de aanname van een gelaagdheid in het Volkerak vrij reëel lijkt, aangezien uit deze berekeningen blijkt dat onder gemiddelde omstandigheden ( $W_{10} = 6$  m/s en  $Q = 100$  m<sup>3</sup>/s) de gelaagdheid mogelijk gedurende 3 à 4 maanden zou kunnen optreden.

In figuur 9 is het verloop van de dichtheid uitgezet. Hieruit blijkt dat het dichtheidsverloop van de bovenlaag afhankelijk is van de gekozen dichtheid voor de beginsituatie. Bij een keuze van  $\rho_{1s} > 1010$  kg/m<sup>3</sup> is het verschil echter beperkt en voornamelijk toe te schrijven aan een verschuiving in de tijd.

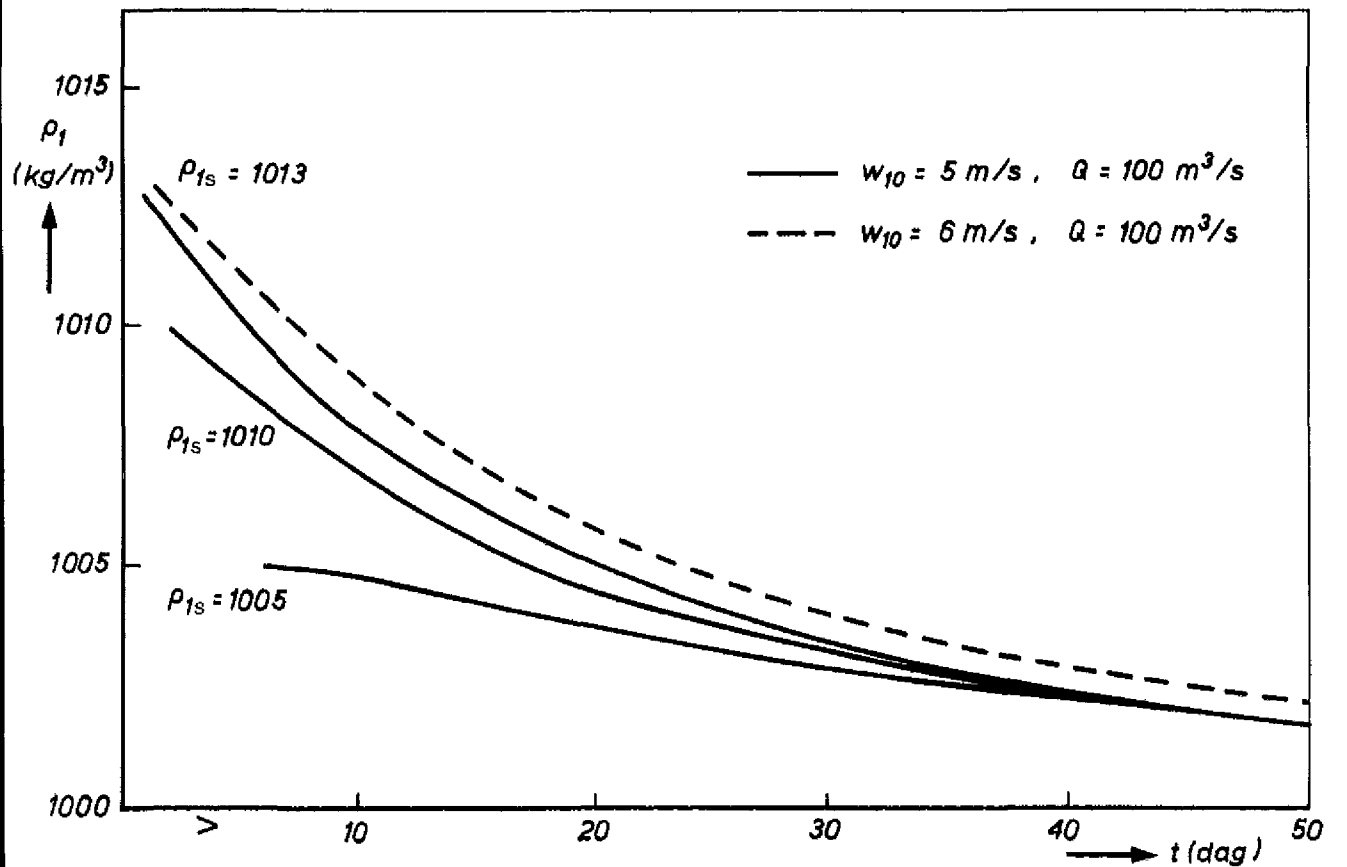
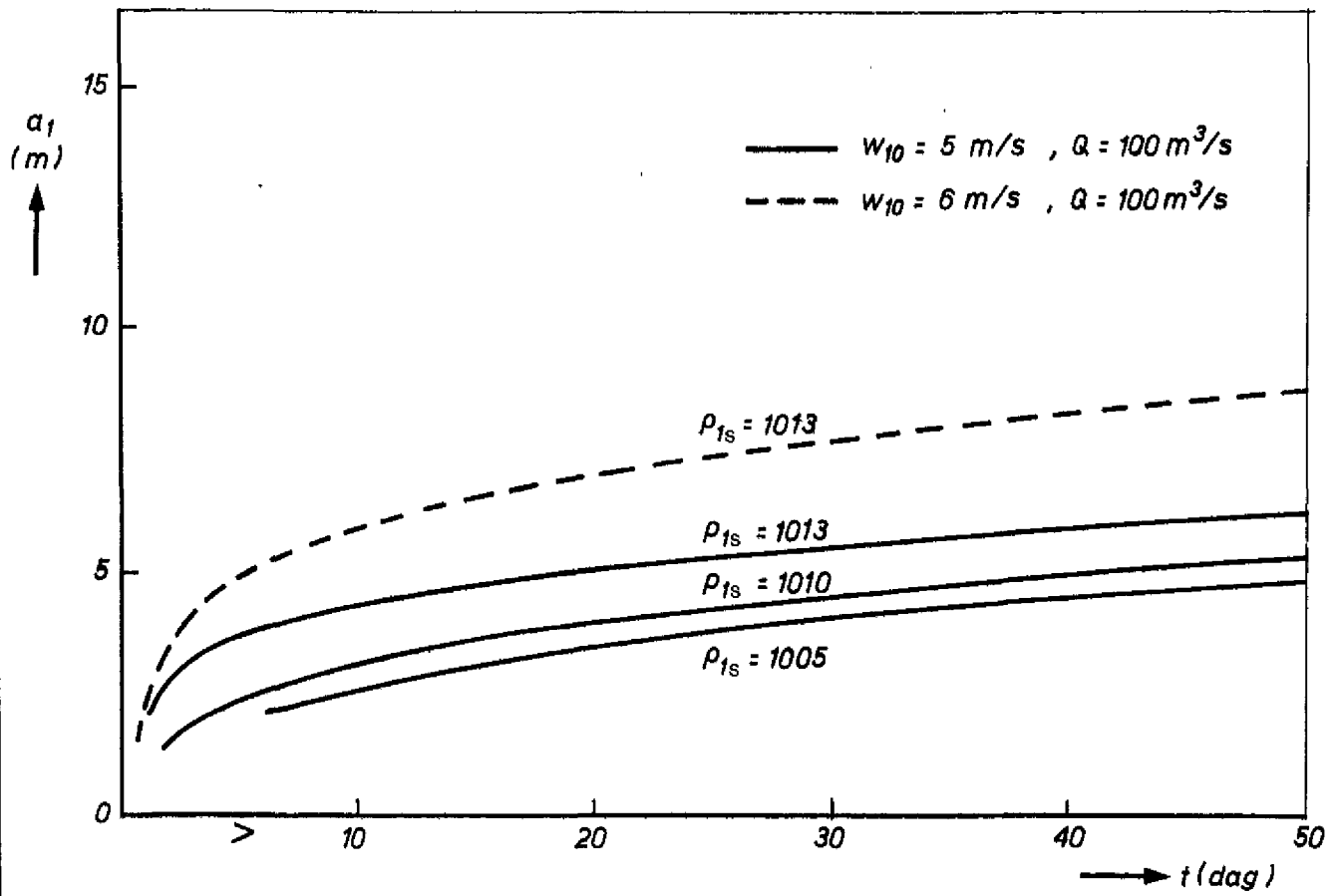
In figuur 10 zijn de resultaten van de berekeningen uitgezet voor verschillende waarden van de verticale diffusie in de onderlaag.

Indien de verticale diffusiecoëfficiënt kleiner is dan  $10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s, is de invloed van de diffusie op de berekening van de ontwikkeling van de dikte van de bovenlaag nauwelijks merkbaar gedurende een ontziltingsduur van ca. 100 dagen.

Grotere waarden voor de diffusiecoëfficiënt leiden tot een wezenlijke verandering in de snelheid waarmee de dikte van de bovenlaag toeneemt. Dit wordt veroorzaakt doordat als gevolg van diffusie het dichtheidsverschil tussen beide lagen afneemt waardoor de entrainment van het water uit de onderlaag naar de bovenlaag gemakkelijker gaat met als gevolg een snellere toename van de dikte van de bovenlaag.

De invloed van het uitstroomdebiet uit de onderlaag is nader beschouwd door deze al dan niet in de berekening te betrekken.

De invloed hiervan is gering in vergelijking met de ontwikkeling van de gelaagdheid bij verandering van de windsnelheid (zie figuur 11).

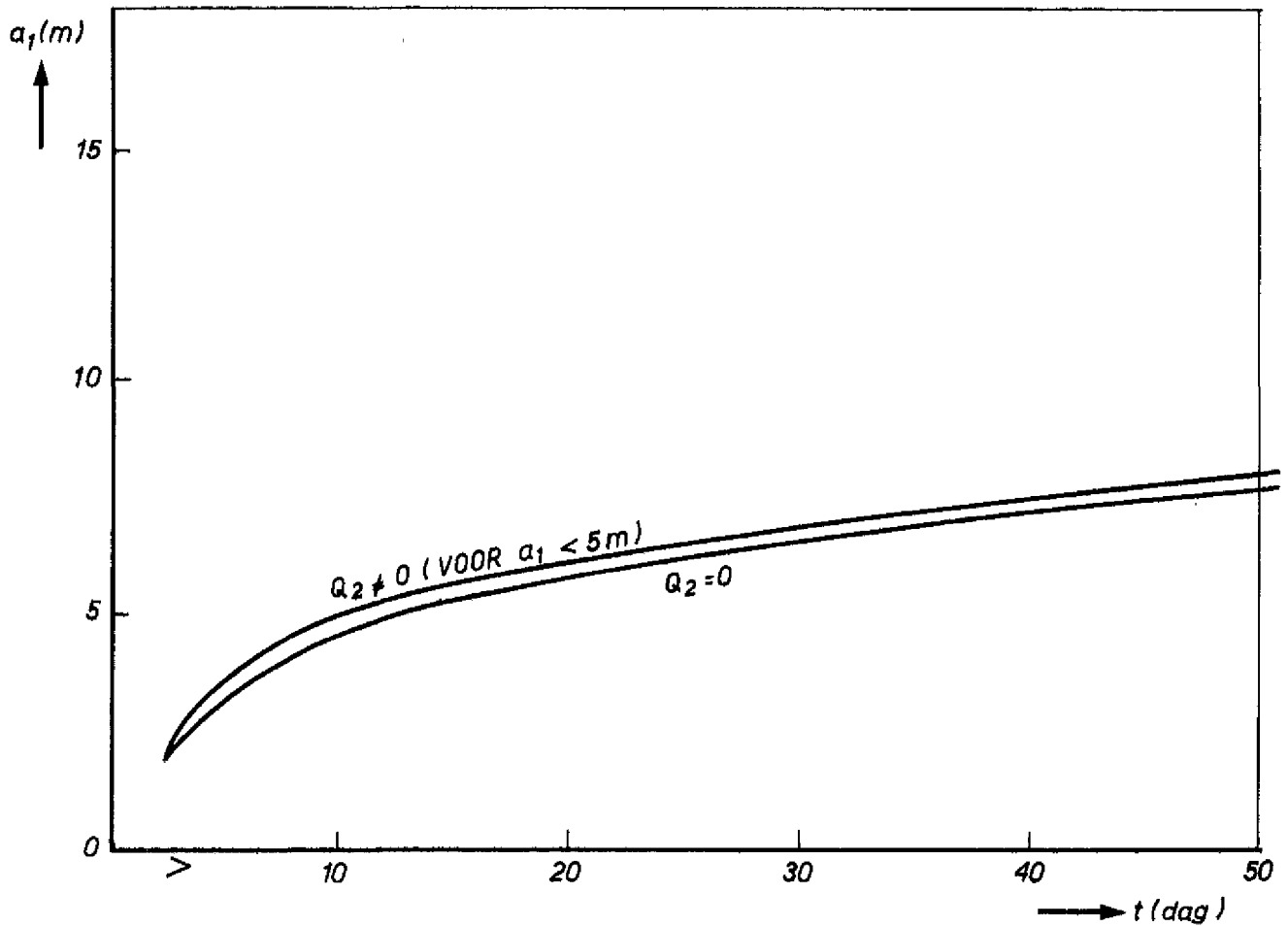
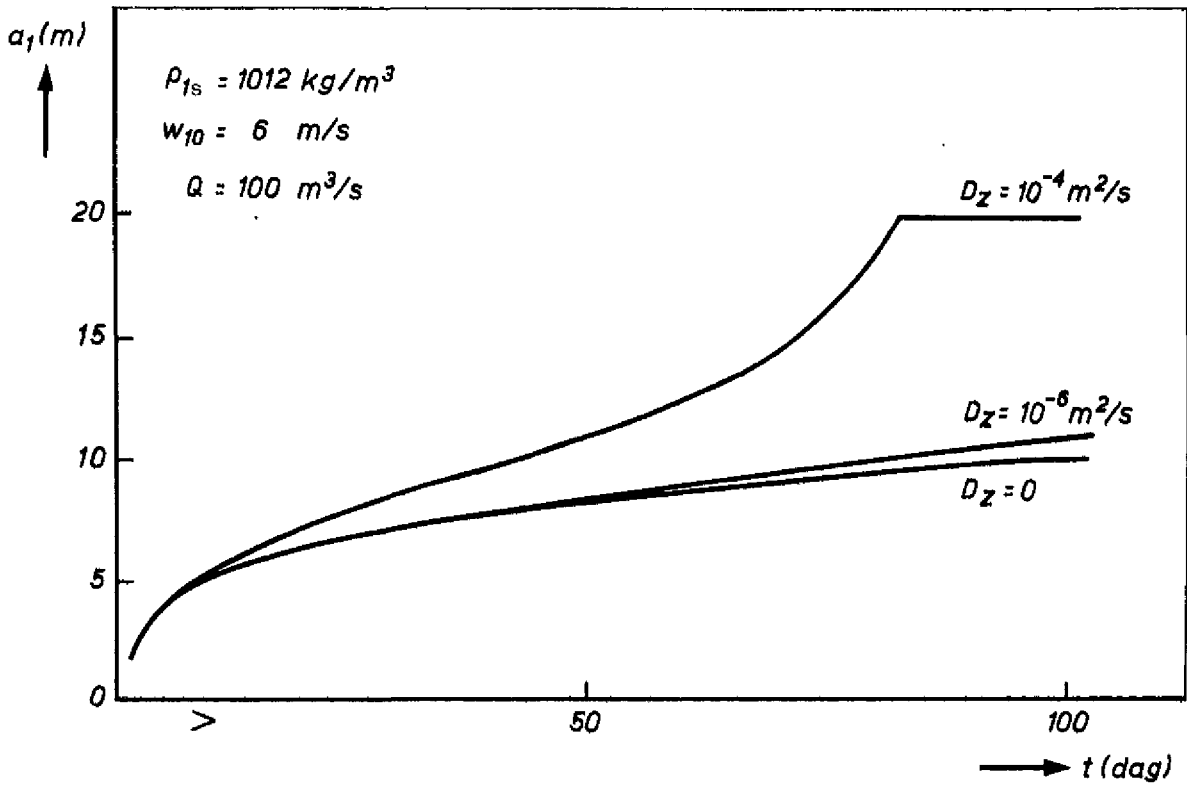


DIKTE VAN DE BOVENLAAG ALS FUNCTIE VAN DE ONTZILTINGSDUUR.

DICHTHEID VAN DE BOVENLAAG ALS FUNCTIE VAN DE ONTZILTINGSDUUR.

JB

A4



INVLOED VAN DIFFUSIE OP DE ONTWIKKELING VAN DE GELAAGDHEID.

JB

ONTWIKKELING v.d. GELAAGDHEID MET EN ZONDER UITSTROMING UIT DE ONDERLAAG

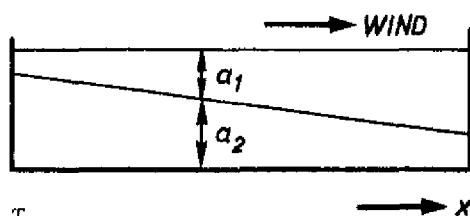
A4

### 10 Helling van het grensvlak

In het voorgaande is eenvoudigheidshalve aangenomen dat het grensvlak tussen de beide lagen horizontaal is. Het is echter mogelijk dat de wijze van doorspoeling en/of de wind een helling van het grensvlak tot gevolg heeft. In extreme situaties (bijv. bij een storm) is het denkbaar dat de helling van het grensvlak zo groot is dat de onderlaag plaatselijk aan het oppervlak komt. Indien de uitstroming in de Eendracht plaatsvindt zoals is aangegeven in paragraaf 10, zal de mate waarin uitstroming uit de onderlaag plaatsvindt afhangen van de helling van het grensvlak. Het zou mogelijk kunnen zijn dat het water dat de Eendracht instroomt voornamelijk uit de onderlaag afkomstig is. Aangezien de kans vrij groot lijkt dat de onderlaag anaeroob is, kan dit leiden tot een sterke daling van het zuurstofgehalte in het overige gedeelte van het Zoommeer.

### Helling van het grensvlak ten gevolge van wind

Voor een stagnante gelaagdheid zonder doorspoeling kunnen de volgende impulsbalansen worden opgesteld voor de onder- en bovenlaag.



$$\rho_1 g_1 \frac{d(a_1 + a_2)}{dx} + \frac{\tau_s}{a_1} = 0 \quad (54)$$

$$\rho_1 g \frac{da_1}{dx} + \rho_2 g \frac{da_2}{dx} = 0 \quad (55)$$

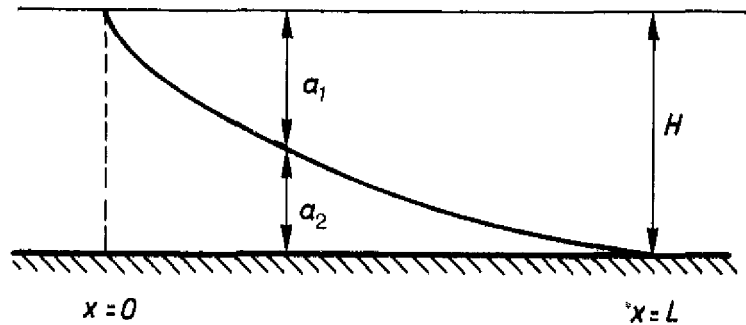
$\tau_s$  is de schuifspanning aan het oppervlak ten gevolge van wind.

Indien vergelijking (54) en (55) respektievelijk worden vermenigvuldigd met  $\rho_2$  en  $\rho_1$  en vervolgens van elkaar worden afgetrokken volgt hieruit de relatie

$$g \rho_1 (\rho_2 - \rho_1) \frac{da_1}{dx} = - \frac{\tau_s}{a_1} \rho_2 \quad (56)$$

Oplossing van de vergelijking (56) met de randvoorwaarde dat op  $x = 0$ ,  $a_1 = 0$  geeft.

$$a_1 = \sqrt{2 \frac{\rho_2}{\rho_2 - \rho_1} \frac{\tau_s}{\rho_1} g x} \quad (57)$$



De bovenlaag raakt de bodem als  $a_1 = H$ ,  
uit vergelijking (57) volgt,

$$x = L = \frac{1}{2} \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} \rho_1 g \frac{H^2}{\tau_s} \quad (58)$$

$$\tau_s = \rho_1 u_*^2$$

$$u_* = 7 \cdot 10^{-4} W_{10}^{1,25}$$

zodat,

$$L = 10^6 \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} \frac{g H^2}{W_{10}^{2,5}} \quad (59)$$

als  $W_{10} = 6$  m/s en  $H = 5,6$  m volgt hieruit  $L = 55$  km

als  $W_{10} = 15$  m/s en  $H = 5,6$  m volgt hieruit  $L = 5,5$  km.

De lengte van het Volkerak is ca. 18 km, zodat bij een windsnelheid van 6 m/s de grenslaag bij benadering horizontaal is. Bij een windsnelheid van 15 m/s is de kans reëel dat de onderlaag aan het oppervlak komt.



LITERATUUR (Appendix I)

- 1 KATO and PHILIPS, O.M. On the penetration of a turbulent layer into stratified fluid.  
J. Fluid Mech., 37, 1969, p. 643.
- 2 WU, J. Wind-induced turbulent entrainment across a stable density interface.  
J. Fluid Mech., 61, 1973, p. 275.
- 3 KANTHA, L.H. Turbulent entrainment at the density interface of a two-layer stably stratified fluid system.  
Department of Earth and Planetary Sciences, Johns Hopkins University, 1975, Baltimore, Maryland 21218.
- 4 TURNER, J.S. Buoyancy effects in fluids.  
Cambridge University Press, 1973.
- 5 BAINES, W.D. Entrainment by a plume or jet at a density interface.  
J. Fluid Mech., 68, 1975, p. 309.
- 6 LINDEN, P.F. The interaction of a vortex ring with a sharp density interface; a model for turbulent entrainment.  
J. Fluid Mech., 60, 1973, p. 467.
- 7 OTTESEN HANSEN, N.E. Entrainment in two-layer flows, report of Hydr. and Hydr. Eng.  
Techn. University Danmark, serial paper 7, 1975, 99 p.
- 8 MOORE, M.J. and LONG, R.R. An experimental investigation of turbulent stratified shearing flow.  
J. Fluid Mech., 49, 1971, p. 635.
- 9 Waterloopkundig Laboratorium. Menging bij een twee-lagensysteem veroorzaakt door de wind.  
Rapport M 1235, Delft, 1974.

LITERATUUR (Appendix I) (vervolg)

- 10 Waterloopkundig Laboratorium. Berekening van thermische stratifikatie bij variabele weersomstandigheden. Oostvoornsemeer 1972, 1974. Rapport R 870-LH 2214, Delft, 1976.

delft hydraulics laboratory p.o. box 177 delft