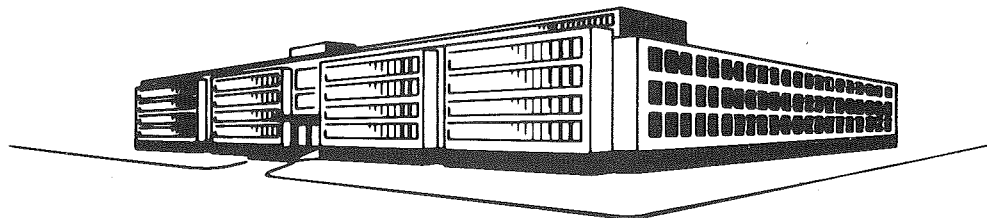


TECHNISCHE HOGESCHOOL DELFT

Laboratorium voor Fysische Technologie

ENIGE FYSISCHЕ MODELLEN VAN DE MIKRO-BIOLOGISCHE WATERZUIVERING  
IN HET RIJNWATERSPAARBEBKEN "DE BEERENPLAAT"



Afstudeerverslag

januari 1972

L.P.B.M. Janssen

**LABORATORIUM VOOR TECHNISCHE NATUURKUNDE**

**LORENTZWEG**

**DELFT**

ERATA, behorende bij afstudeerverslag L.P.B.M. Janssen.

Blz.	Staat	Moet staan
Blz. 13 formule (9)	$C_p$	$C_R$
Blz. 15 regel 8 v.o.	(9) (10)	(9)
blz. 16 formule (22)	$dC_{2s}$	$dC_{1s}$
formule (27) 2e lid	$+ C_{2s} + C_{1m} + C_{2s} C_{2m}$	$+ C_{2s} C_{1m} + C_{2s} C_{2m}$
Blz. 17 formule (28) 1e lid	noemer moet worden	$C_{1s} + C_{2s} + \beta$
formule (29) 2 <sup>e</sup> regel, 2 <sup>e</sup> gedeelte	teller moet worden	$C_{1m} C_{2s} C_{1s} + C_{1s} C_{2m} C_{2s} + C_{2s}^2 C_{1m}$
formule (30)	toevoegen	$+ K_{\infty} \frac{C_{1s} C_{2m}}{C_{1s} + \beta}$

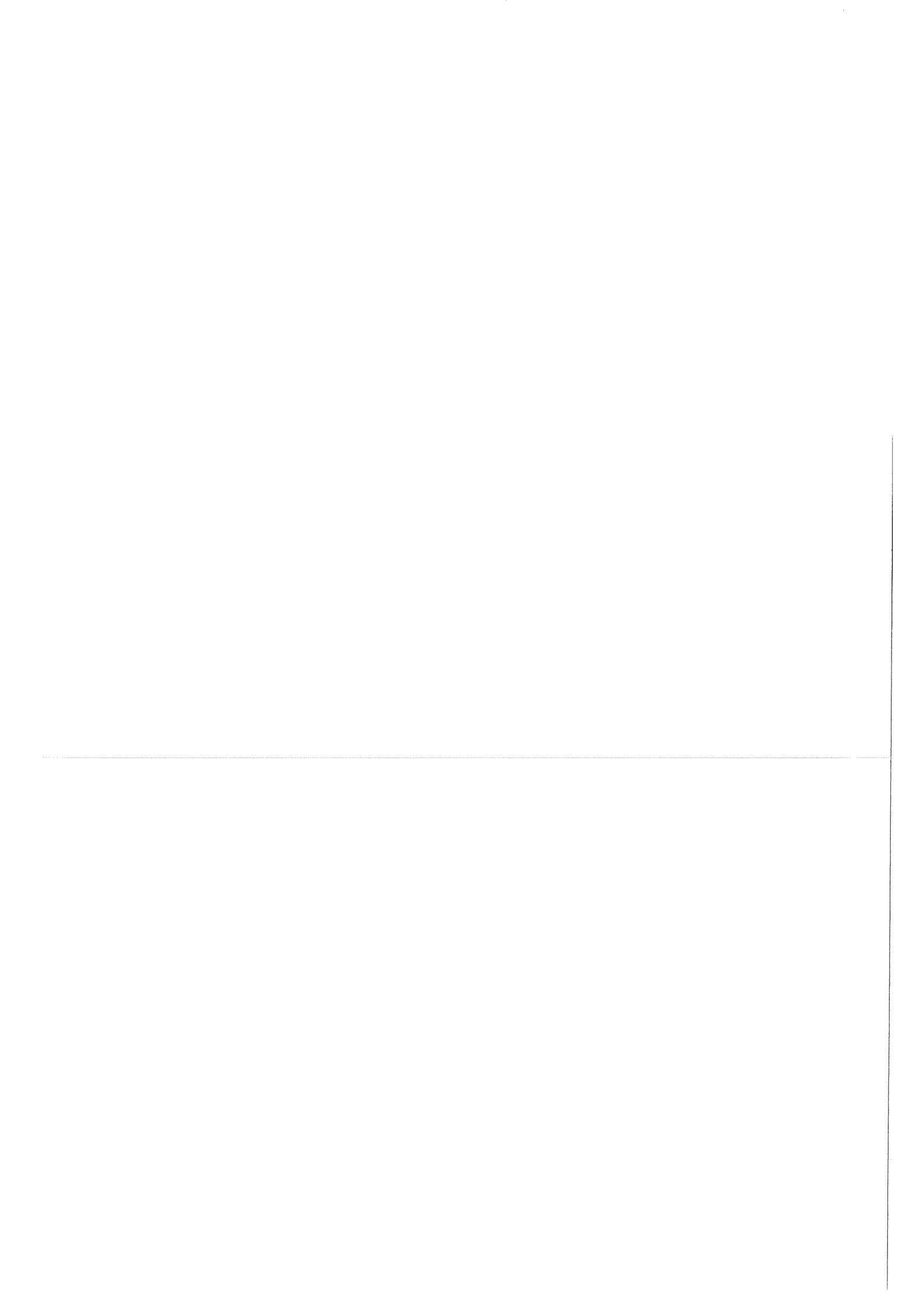
TECHNISCHE HOGESCHOOL DELFT  
Laboratorium voor Fysische Technologie

*Cl. Weel*

ENIGE FYSISCHЕ MODELLEN VAN DE MIKRO-BIOLOGISCHE WATERZUIVERING  
IN HET RIJNWATERSPAARBEEKEN "DE BEERENPLAAT".

Afstudeerverslag  
L.P.B.M. Janssen

januari 1972.



## SUMMARY

To acquire some insight in the influence of different parameters that may be of importance in the natural purification process of water, various mathematical models have been postulated for the Beerenplaat water-storage reservoir near Rotterdam.

The kinetics of the micro-organisms were central in these calculations. Models are proposed to account for different wind directions and for negligible air velocity. Numerical results are presented. Attention is also paid to the influence of a predator-prey relation, in which the pollution is being eaten by the prey and the prey is being eaten by the predator. It appears that the most important parameters are the constants which are used to describe the reaction kinetics. The rate of mixing is found to be of minor importance for the mass transfer process in the reservoir. It is also concluded that by using simple mathematical models considerable insight can be obtained on the influence of various parameters on the mass-transfer process. These theoretical results can be of great value in setting up a programme for experimental verification.

Met dank aan allen, die door hun raadgevingen en inbreng van ideeën dit onderzoek mogelijk hebben gemaakt, met name aan:

Dr.Ir. G. Abraham

Drs. G.C. van Dam

Ir. Z. Kolar

Prof.Dr.Ir. N.W.F. Kossen

Drs. G. Oskam

Drs. J.J. Rook

H. de Swaan Arons

Prof.Dr. R. Timman

Ir. J.H.G. Verhagen

M. Viergever.

INHOUDSOPGAVE

blz.

Summary	1
Inhoudsopgave	3
Lijst van symbolen	4
I Inleiding	5
II Het spaarbekken "De Beerenplaat"	6
III Programma's en modellen	8
1. programma's algemeen	8
2. modellen	9
3. windstil weer	10
4. noorden- of zuidenwind	12
5. westen- of oostenwind	13
6. roofdier-prooirelatie	13
7. propstroom met axiale dispersie	14
IV Resultaten en discussie	20
V Konklusies	23
Literatuurlijst.	25

LIJST VAN SYMBOLEN

C	zuurstofconcentratie	kg/m <sup>3</sup>
C <sub>m</sub>	concentratie mikro-organismen	kg/m <sup>3</sup>
C <sub>r</sub>	concentratie roofdieren	kg/m <sup>3</sup>
C <sub>s</sub>	concentratie substraat	kg/m <sup>3</sup>
C <sub>1m</sub>	bijdrage tot C <sub>m</sub> door konvektie	kg/m <sup>3</sup>
C <sub>2m</sub>	bijdrage tot C <sub>m</sub> door diffusie	kg/m <sup>3</sup>
C <sub>1s</sub>	bijdrage tot C <sub>s</sub> door konvektie	kg/m <sup>3</sup>
C <sub>2s</sub>	bijdrage tot C <sub>s</sub> door diffusie	kg/m <sup>3</sup>
C <sup>x</sup>	verzadigingsconcentratie van zuurstof in water	kg/m <sup>3</sup>
K	zuurstofoverdrachtscoëfficiënt	l/s
K <sub>m</sub>	voedselafhankelijke groeisnelheid der mikro-organismen	l/s
K <sub>∞</sub>	voedselonafhankelijke groeisnelheid der mikro-organismen	l/s
v	over-all snelheid in het bekken	m/s
V	volume van één ideaal gemengde eenheid	m <sup>3</sup>
x	axiale afstand in het bekken	m
x <sub>1</sub>	afstand in het bekken na één integratie-stap	m
Δx	lengte van een integratie-stap	m
y	evenredigheidskonstante, die aangeeft, welk gedeelte van het afgebroken substraat gebruikt wordt om nieuwe mikro-organismen op te bouwen	----
α	ademhalingscoëfficiënt der mikro-organismen	l/s
β	groeibeperkende faktor voor mikro-organismen	kg/m <sup>3</sup>
ε	interpolatie grootheid	kg/m <sup>3</sup>
φ <sub>v</sub>	volumedebiet	m <sup>3</sup> /s



## I INLEIDING

Men is momenteel in west-Nederland en in het bijzonder in Rotterdam en omgeving in een ernstige agglomeratie, vanwege het ontbreken van voldoende grote hoeveelheden zoet grondwater, voor zijn watervoorziening aangewezen op de rivier de Rijn. Omdat de mate van verontreiniging van deze rivier groot is en men bovendien last kan hebben van een incidenteel tot voorbij Rotterdam vanuit zee binnendringende zouttong, is bij de splitsing van de Oude Maas en het Spui een spaarbekken gebouwd, de Beerenplaat genaamd. Een gemiddelde verblijftijd van het water in dit bekken van twintig dagen geeft aan mikro-organismen de kans een redelijk gedeelte van het biologisch en chemisch afval te mineraliseren. Omdat dit spaarbekken een te groot en te gekompliceerd geheel is om door middel van een voldoende groot aantal relatief eenvoudige metingen een inzicht te krijgen in de oorspronkelijke oorzaken van variaties van de verschillende uitwendige invloeden, is het plan opgevat om enige mathematische modellen op te stellen en met de komputer door te rekenen. Hierin kunnen ceteris paribus de invloed en betekenis van verschillende fysische, chemische en biologische konstanten onderzocht worden door de verschillende parameters te variëren. In het kader hiervan is bij het onderzoek, dat aan dit rapport ten grondslag ligt, vooral aandacht besteed aan de afbraak door mikro-organismen. Er zijn geen onderzoekingen gedaan naar de smaakverbetering van het water door verdamping, adsorptie aan slib of bezinking van vaste stof. Tevens is voorbijgegaan aan de invloed, die algen kunnen hebben op de zuurstofhuishouding in het bekken.

In tegenstelling tot de veel toegepaste vergelijkingen, die een rechtstreeks verband leggen tussen de substraat concentratie en de zuurstofconcentratie in een waterloop (1, 2, 3), is bij dit onderzoek de mikrobiologische activiteit in het water centraal gesteld. De invloed van de mikro-organismen op de vervuiling manifesteert zich, doordat deze organismen, om zich te kunnen vermenigvuldigen, substraat afbreken. Hun invloed op de zuurstofhuishouding blijft beperkt tot het onttrekken van opgeloste zuurstof uit het water door ademhaling. Door deze opzet is getracht een betere aansluiting bij het werkelijke gebeuren van natuurlijke waterzuivering te verkrijgen.

## II HET SPAARBEEKEN "DE BEERENPLAAT".

Nederland heeft twee bronnen voor zijn watervoorziening: het diepe grondwater en het oppervlaktewater (4) (5). Van deze twee is de kwaliteit van het zoete diepe grondwater verreweg de beste. Helaas is juist onder de randstad het grondwater niet zoet, maar brak. De enkele uitzonderingen hierop, zoals de duinen en de infiltratie-strook langs de grote rivieren, hebben bij lange na niet voldoende capaciteit om in de waterbehoefte van het dichtbevolkte West-Nederland te voorzien. Een mogelijke oplossing voor dit probleem, om een dergelijke grote hoeveelheid zoet water te onttrekken aan de zoetwaterbekkens in het oosten des lands, zoals bijvoorbeeld de Veluwe is, blijkt in de praktijk niet toepasbaar te zijn, aangezien het niet alleen economisch zeer onrendabel is, maar tevens tot gevolg zou hebben, dat de flora daar ter plaatse, wegens een daling van het grondwaterpeil, aangetast zou worden. Daarom is men in het dichtbevolkte en sterk geïndustrialiseerde gebied van Rotterdam en agglomeratie aangewezen op watervoorziening uit het oppervlaktewater (fig. 1).

Reeds in 1874 werd een aanvang gemaakt met het exploiteren van het toen nog zeer weinig vervuilde water van de Nieuwe Maas. Door de Rotterdamse havenwerken kwam de zouttong vanuit zee bij vloed steeds verder het binnenland in. Dit had tot gevolg, dat in 1938 een aanvang werd gemaakt met een klein spaarbekken. Enkele jaren geleden kon, onder ongunstige omstandigheden, de zouttong gedurende een zolang tijd zover stroomopwaarts blijven, dat het toen bestaande bekken ontoereikend was. Een tweede aanslag op de consumeerbaarheid van het oppervlaktewater was de steeds voortschrijdende vervuiling van de Rijn (fig. 2). Een steeds groeiende bevolking en een steeds uitbreidende industrie lozen hun afval op de Rijn. Hoewel in iedere rivier mikro-organismen voorkomen, die een groot deel van het biologische en chemische afval kunnen afbreken, is dit in de Rijn nauwelijks merkbaar, aangezien de vervuiling zo groot is, dat een gemiddelde verblijftijd tussen het Ruhrgebied en Rotterdam van ongeveer vier dagen niet voldoende is voor een merkbare biologische afbraak van het vuil.

Doordat men in 1963-1964 een groot spaarbekken, de Beerenplaat genaamd,

gebouwd heeft, worden de problemen aangaande de zoutpenetratie en de vervuiling grotendeels ondervangen. Dit bekken heeft bij de huidige stand van het waterverbruik een gemiddelde verblijftijd van 20 dagen. Daardoor kan men enerzijds enige dagen wachten met het innemen van water, indien de zouttong tot voorbij de prise d'eau landinwaarts is gedrongen, terwijl anderzijds de grote gemiddelde verblijftijd aan de mikro-organismen de kans geeft adequaat te werken en een ruime hoeveelheid afval te mineraliseren. De toename van de kwaliteit van het water wordt nog verder gestimuleerd door verdamping van min of meer vluchtige verontreinigingen, adsorptie aan slib en bezinking van vaste stof. Een nadeel van het bekken is, dat er algengroei in kan ontstaan, waardoor de kwaliteit van het water kan verminderen. (6).

Het spaarbekken is gebouwd op een eiland bij de splitsing van Oude Maas en Spui, de Beerenplaat genaamd, dat sedert de bouw van het bekken verbonden is met het vaste land (fig. 3). De eisen, dat het bedrijf een produktie capaciteit moest hebben van  $90 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{jaar}$  en een watervoorraad voor tenminste één maand (op basis van de verbruikscijfers in 1963) terwijl de kans op het ontstaan van kortsluitstromen zo klein mogelijk moest zijn, leidde tesamen met de gegeven oppervlakte van het eiland tot een bekken met een oppervlakte van omstreeks 130 ha. en een diepte van gemiddeld 6 meter (7). Om kortsluitstromen te voorkomen waren twee dammen in oost-west richting geprojecteerd. Omdat echter bij een overwegende westenwind bij een dergelijke grote strijklengte tussen wind en water hoge golven kunnen ontstaan, heeft men, op advies van het Waterloopkundig Laboratorium te Delft, besloten het bekken door middel van zes dwarsdammen in noord-zuid richting in zeven kompartimenten te verdelen. Hierdoor is het gevaar op ontstaan van kortsluitstroming praktisch uitgeschakeld.

### III PROGRAMMA'S EN MODELLEN

#### III.1 Programma's algemeen

De programma's voor het oplossen van de modellen zijn geschreven voor de I.B.M. 360/65 digitale rekenmachine. Zolang er met zekere waarschijnlijkheid gesteld kon worden, dat zij nog gebruikt zouden worden, werden ze bewaard in het magnetisch achtergrondgeheugen. Dit had als voordeel, dat de programma's gemakkelijk en snel toegankelijk waren om veranderingen via de terminal aan te brengen.

Er is naar gestreefd om de rekestijd per programma minder dan één minuut te laten bedragen en de benodigde hoeveelheid kerngeheugen de 128 kilobytes niet te laten overschrijden. Zodra bleek, dat een programma niet binnen een afzienbare tijd nogmaals gebruikt zou worden, werd het op ponskaarten overgebracht en uit het magnetische geheugen verwijderd. De eenvoudige, lineair opgezette programma's werden geschreven in conversational programming system (C.P.S./PL 1), voor de uitgebreidere programma's werd gebruik gemaakt van algol 60.

De meest gebruikte subroutine is de procedure "Runner", die met de methode van Runge-Kutta meerdere gekoppelde eerste orde differentiaalvergelijkingen oplost.

III.2 Modellen

Om een indruk te krijgen van de microbiologische processen, die een rol spelen bij de afbraak van het substraat (de vervuiling) in de Beerenplaat zijn enkele eenvoudige modellen opgesteld, waarin de parameters gevarieerd konden worden. Teneinde hanteerbare vergelijkingen te krijgen moesten aangaande de stroming en de kinetiek in het bekken enkele veronderstellingen ter vereenvoudiging van het geheel worden gedaan.

*aan model*

Het getal van Reynolds voor de stroming in de Beerenplaat ligt in de orde van grootte van  $5 \times 10^4$ . Deze hoge waarde leidde tot de aanname dat de compartimenten van het bekken in de breedte en in de diepte zeer goed gemengd zijn, waardoor in de vergelijkingen, die de processen in de Beerenplaatbekken beschrijven, slechts één onafhankelijke lengte variabele voorkomt. Uit metingen van het Rotterdamse drinkwaterbedrijf bleek, dat zelfs in ongunstige gevallen (lange tijd van windstil weer) het temperatuurverschil tussen oppervlaktewater en het water bij de bodem nooit meer bedroeg dan  $0,5^\circ\text{C}$ . Een dergelijk geringe temperatuurstratificatie is een extra rechtvaardiging van bovenstaande aanname.

Met betrekking tot de kinetiek van het model is, omdat er nog geen concrete kinetiek gegevens bekend zijn, de beperking opgelegd, dat er in de meeste programma's slechts sprake is van één soort mikro-organisme, dat slechts één soort substraat afbreekt. Tevens zijn de processen stationair verondersteld, zodat de vergelijkingen tijdsonafhankelijk werden en met slechts één onafhankelijke variabele kon worden volstaan.

*how can model be elaborated*

Omdat in grote bekkens kan worden aangenomen dat reeds bij tamelijk geringe windsnelheid de menging volledig is, blijft de invloed van de windsterkte beperkt tot de grootte van de zuurstofoverdrachtscoëfficiënt. Uit bepalingen van gas-overdrachtscoëfficiënten in geroerde vaten (8) kon een schatting worden gemaakt van de zuurstofoverdrachtscoëfficiënt door windinvloeden op de Beerenplaat. Uit metingen op de Beerenplaat is gebleken, dat nergens in het bekken de zuurstofconcentratie zo laag was, dat dit een beperkende faktor kon vormen in de groei van de mikro-organismen. Daarom is in de modellen geen terugkoppeling van zuurstof naar mikro-organismen gebruikt. Zo ontstonden in de modellen twee wederzijds

afhankelijke vergelijkingen voor substraat en mikro-organismen en één vergelijking voor zuurstof, die slechts afhankelijk was van de konzentratie aan mikro-organismen en de windsterkte. Er ontstonden drie basis modellen: één voor windstil weer, één voor noorden- of zuidenwind en één voor oosten- of westenwind. In deze modellen is nagegaan, wat de invloed is van de grootte van het waterverbruik door Rotterdam en agglomeratie en van de grootte van het Rijngebied op de kwaliteit van het water aan de uitgang van de "Beerenplaat".

Op basis van het model voor windstil weer zijn twee afgeleide modellen gemaakt: in het eerste model is rekening gehouden met axiale dispersie en in het tweede model is een roofdier-prooi relatie ingebouwd. Hierbij wordt onderzocht, wat de invloed is van een tweede organisme in het bekken, het roofdier, bijv. protozoën, dat zich slechts voedt met het eerste mikro-organisme, het prooidier, dat zich op zijn beurt slechts voedt met substraat. Tot slot is op basis van het model voor noorden- of zuidenwind onderzocht hoe gevoelig de modellen zijn voor variaties in de groeisnelheid en in de groeibeperkende faktor.

### III.3 Windstil weer

Als basis voor het model voor windstil weer is, met het oog op het zeer hoge Reynoldsgetal, een zuivere propstroming genomen.

De balansvergelijkingen over een volume element leiden tot de volgende differentiaalvergelijkingen:

$$-v \frac{dC}{dx} + K (C^x - C) = C_m \alpha \quad (1) (1)$$

$$v \frac{dC_m}{dx} = K_m C_m \quad (2) (2)$$

$$\frac{dC_s}{dx} = -\frac{1}{y} \frac{dC_m}{dx} \quad (3) (3)$$

$$\text{met } K_m = K_\infty \frac{C_s}{C_s + \beta} \quad (4) (4)$$

Hierin zijn:

C	zuurstofkonzentratie	kg/m <sup>3</sup>
C <sub>m</sub>	konzentratie mikro-organismen	kg/m <sup>3</sup>

*inbrengen*

$C_s$	koncentratie substraat	$\text{kg/m}^3$
$v$	stroomsnelheid in het bekken	$\text{m/s}$
$K$	zuurstofoverdrachtskoefficiënt	$1/\text{s}$
$C^x$	verzadigingskoncentratie van zuurstof in water	$\text{kg/m}^3$
$\alpha$	ademhalingskoefficiënt van de mikro-organismen	$1/\text{s}$
$K_m$	voedselafhankelijke groeisnelheid	$1/\text{s}$
$y$	evenredigheidskonstante	---
$\beta$	groeibeperkende faktor	$\text{kg/m}^3$
$K_\infty$	voedselonafhankelijke groeisnelheid	$1/\text{s}$

De termen in vergelijking (1) geven resp. aan:

De bijdrage aan de zuurstofkoncentratie ter plaatse  $x$  door konvektie, de diffusie van zuurstof door het oppervlak en het verdwijnen van zuurstof door ademhaling van de mikro-organismen. Vergelijking (2) laat zien, dat de groei van de mikro-organismen evenredig is met hun aantal. Uit vergelijking (3) volgt, dat er een bepaalde hoeveelheid substraat afgebroken moet worden om een kleinere hoeveelheid mikro-organismen te kunnen vormen. De evenredigheidskonstante  $y$  geeft aan, welk deel van het afgebroken substraat gebruikt wordt om nieuwe mikro-organismen op te bouwen. Vergelijking (4) geeft aan, hoe de groeisnelheid van de mikro-organismen afhankelijk is van de beschikbare hoeveelheid substraat. Is dit in overvloed aanwezig

( $C_s \gg \beta$ ) dan nadert  $K_m$  tot  $K_\infty$ . Bij kleine hoeveelheden substraat is de groeisnelheid evenredig met de hoeveelheid voedsel.

Een stapgrootte van ongeveer 25 meter bleek klein genoeg te zijn, om het bekken tot op 3 decimalen nauwkeurig door te rekenen, zodat kleinere intervallen voor  $\Delta x$  in de numerieke programma's in verband met de daarbij optredende vergroting van de benodigde rekentijd niet zinvol waren.

III.4 Noorden- of Zuidenwind

Als de wind evenwijdig aan de dammen van de Beerenplaat waait, dus bij noorden- of zuidenwind, kan aangenomen worden, dat er een cirkulatiestroming zal ontstaan over de volle breedte van het bekken. De bovenstroming van het water zal, door impulsoverdracht van wind naar water, bij voldoende grote strijklengte cirka 2% van de windsnelheid bedragen.

*nie to  
absolu  
cirkulatie*

Bij een lichte koelte (windkracht 3 volgens de schaal van Beaufort) is de windsnelheid omstreeks 6 m/s. Dit resulteert in cirkulatiestroming in de kompartimenten van het bekken met een snelheid van  $120 \times 10^{-3}$  m/s bedraagt. Deze beschouwing leidt, samen met de reeds eerder gedane veronderstelling, dat de menging over de hoogte en in de richting loodrecht op de stroomrichting ideaal is, tot de konklusie, dat ieder kompartiment van de Beerenplaat bij noorden- of zuidenwind als een ideale menger kan worden opgevat. Het gedrag van het Beerenplaat-bekken bij noorden- of zuidenwind kan dus beschreven worden met de processen, zoals ze in zeven in serie geschakelde ideale mengers plaatsvinden.

Noemt men de concentraties aan zuurstof, mikro-organismen en substraat in de  $n^e$  menger respektievelijk  $C_{(n)}$ ,  $C_{m(n)}$  en  $C_{s(n)}$ , dan is een logisch gevolg van het feit, dat de mengers in serie geschakeld zijn, dat de ingangconcentraties van de  $n^e$  menger respektievelijk  $C_{(n-1)}$ ,  $C_{m(n-1)}$  en  $C_{s(n-1)}$  zijn. Balans vergelijkingen over de  $n^e$  menger geven de volgende vergelijkingen:

$$\phi_v C_{(n-1)} + K V (C^x - C_{(n)}) = \phi_v C_{(n)} + C_{m(n)} \alpha V \quad (5)$$

$$C_{s(n)} - C_{s(n-1)} = \frac{1}{y} (C_{m(n-1)} - C_{m(n)}) \quad (6)$$

$$\phi_v C_{m(n-1)} + V K_m C_{m(n)} = \phi_v C_{m(n)} \quad (7)$$

$$K_m = K_\infty \frac{C_{s(n)}}{C_{s(n)} + \beta} \quad (8)$$

waarin:  $V$  = volume van één compartiment  $(m^3)$   
 $\phi_v$  = volumedebiet in het bekken  $(m^3/s)$

Invullen van (8) in (7) geeft drie vergelijkingen met drie onbekenden, die in principe oplosbaar zijn.



### III.5 Westen of oostenwind

Indien de wind uit een richting waait, die loodrecht op de stroomlijnen in een waterloop staat, zullen er loodrecht op de as van deze waterloop cirkulatiestromen ontstaan. Deze cirkulatiestromen dragen echter niet bij tot menging in axiale richting.

Daarom wordt in het Beerenplaatmodel voor westen- of oostenwind, mede gezien het hoge getal van Reynolds, de stroming in het gedeelte A B C G (zie fig. 4) beschreven met een zuivere propstroom. Omdat in het door D E F G begrensde gedeelte van het bekken de wind globaal in de richting van de stroomlijnen staat, terwijl de strijklengte tussen wind en water redelijk groot is (+ 440 m), is voor de beschrijving van dit gebied in het model een ideale menger genomen. Het model voor westen- of oostenwind wordt dus gevormd uit zeven propstromen en zes ideale mengers, die om en om in serie geschakeld zijn.

Het systeem kan nu beschreven worden met de vergelijkingen, zoals die in de modellen voor windstil weer en noorden- of zuidenwind worden gebruikt.

### III.6 Roofdier-prooi relatie.

Het programma voor een roofdier-prooi relatie is een uitbreiding op de programma's voor windstil weer. Balansvergelijkingen over een volume-element leveren de volgende differentiaalvergelijkingen:

Voor de zuurstofconcentratie:

$$v \frac{dc}{dx} = K (C^x - C) - (C_m + C_R) \alpha \quad (9)$$

Voor de concentratie prooidieren:

$$v \frac{dC_m}{dx} = K_{m1} C_m - \frac{1}{y_2} K_{m2} C_R \quad (10)$$

Voor de concentratie roofdieren:

$$v \frac{dC_R}{dx} = K_{m2} C_R \quad (11)$$

Voor de concentratie substraat:

$$v \frac{dC_s}{dx} = - \frac{1}{y_1} K_{m1} C_m \quad (12)$$

met:

$$K_{m1} = K_{\infty 1} \frac{C_s}{C_s + \beta_1} \quad (13)$$

$$K_{m2} = K_{\infty 2} \frac{C_m}{C_m + \beta_2} \quad (14)$$

In deze vergelijkingen is:

C	zuurstofconcentratie	kg/m <sup>3</sup>
C <sub>m</sub>	concentratie prooidier	kg/m <sup>3</sup>
C <sub>R</sub>	concentratie roofdier	kg/m <sup>3</sup>
C <sub>s</sub>	concentratie substraat	kg/m <sup>3</sup>
v	stroomsnelheid	m/s
K	zuurstofoverdrachtscoëfficiënt	1/s
K <sub>m</sub>	voedselafhankelijke groeisnelheid	1/s
K <sub>∞</sub>	voedselonafhankelijke groeisnelheid	1/s
α	ademhalingscoëfficiënt	1/s
y	omzettings evenredigheidsconstante	---
β	groeibeperkende faktor	kg/m <sup>3</sup>

De indices 1 en 2 geven aan, of de konstanten betrekking hebben op het prooidier of het roofdier.

Het verschil tussen dit stelsel vergelijkingen en het stelsel zoals dat gebruikt werd voor het model voor windstil weer en één soort mikro-organisme bestaat hieruit, dat de volgende veranderingen zijn aangebracht: In vergelijking (9) vindt zuurstof-onttrekking aan het water plaats door ademhaling van roofdieren én van prooidieren. Vergelijking (10) bevat een extra term, die aangeeft, dat de prooidieren door de roofdieren worden opgegeten. Vergelijking (11) is nieuw. Aan vergelijking (12) is niets veranderd. Vergelijkingen (13) en (14) geven de voedselafhankelijkheid van de groeisnelheid aan.

### III.7 Propstroom met axiale dispersie.

Uit de balansvergelijkingen voor mikro-organismen, substraat en zuurstof en de aanname, dat de processen stationair zijn (niet met de tijd verlopen), zijn de volgende differentiaalvergelijkingen af te leiden:

Voor mikro-organismen:

$$D \frac{d^2 C_m}{dx^2} - v \frac{dC_m}{dx} = -K_m C_m \quad (15)$$

Voor zuurstof:

$$D \frac{d^2 C}{dx^2} - v \frac{dC}{dx} = \alpha C_m - K (C^x - C) \quad (16)$$

En voor substraat:

$$D \frac{d^2 C_s}{dx^2} - v \frac{dC_s}{dx} = K_m \frac{C_m}{y} \quad (17)$$

waarin:

$$K_m = K_\infty \frac{C_s}{C_s + \beta} \quad (18)$$

*what?*  
 In deze vergelijkingen is D de dispersiecoëfficiënt ( $m^2/s$ ). De grote moeilijkheid bij dit stelsel differentiaalvergelijkingen is, dat er voor een numerieke oplossing zes randvoorwaarden nodig zijn, terwijl het gehele probleem uit fysisch oogpunt door de drie ingangskoncentraties één-eenduidig bepaald moeten zijn. Mathematisch gezien is deze schijnbare tegenspraak te verklaren uit het feit, dat, indien de koppeling tussen de vergelijkingen verwaarloosd wordt, de oplossingen in eerste orde benadering uit twee exponentiële termen zullen bestaan; één met een positieve exponent en één met een negatieve exponent. Deze termen moeten beiden vermenigvuldigd worden met een verschillende konstante, welke bepaald wordt door de randvoorwaarden. Omdat concentraties nooit oneindig groot kunnen worden, zal de konstante, waarmee de exponentiële functie met positieve exponent vermenigvuldigd moet worden, gelijk aan nul zijn. De oplosmethoden, die in analoge situaties bij een chemische reaktor gebruikt worden, (9) (10) falen hier, omdat de differentiaalvergelijkingen (15) en (16) door (18) niet lineair zijn. Aangezien de oplossingen van het stelsel differentiaalvergelijkingen, naar men op grond van de resultaten uit de vergelijkingen voor propstroom mag aannemen, asymptotisch naar konstante waarden zullen lopen, lijkt de veronderstelling, dat het diffusief transport op een plaats ver van het instroompunt zéér klein wordt, gerechtvaardigd. Om tot een linearisatie van de differentiaalvergelijkingen te komen, wordt aan-

genomen, dat de concentraties als volgt te splitsen zijn:

$$C_m(x) = C_{1m}(x) + C_{2m}(x) \quad (19)$$

$$C_s(x) = C_{1s}(x) + C_{2s}(x) \quad (20)$$

Hierin zijn  $C_{1m}$  en  $C_{1s}$  de bijdragen tot  $C_m$  en  $C_s$  door konvektief transport en  $C_{2m}$  en  $C_{2s}$  de bijdragen door diffusief transport. Indien als eerste orde benadering aangenomen wordt, dat het diffusief transport verwaarloosd mag worden ten opzichte van het konvektief transport, worden (15) en (17) gereduceerd tot (21) en (22), de vergelijkingen voor zuivere propstroom:

$$\frac{dC_{1m}}{dx} = \frac{K_\infty}{v} \frac{C_{1s}}{C_{1s} + \beta} C_{1m} \quad (21)$$

$$\frac{dC_{1s}}{dx} = - \frac{K_\infty}{y \cdot v} \frac{C_{1s}}{C_{1s} + \beta} C_{1m} \quad (22)$$

De bijbehorende randvoorwaarden zijn:

$$C_{1m}(0) = a C_m(0) \quad (23)$$

$$C_{1s}(0) = a C_s(0) \quad (24)$$

$a$  is een konstante, waarvan de waarde tussen 0 en 1 ligt.

Samenstelling van (15) en (17) met (19) en (20) geeft:

$$ID \frac{d^2 C_{1m}}{dx^2} + ID \frac{d^2 C_{2m}}{dx^2} - v \frac{dC_{1m}}{dx} - v \frac{dC_{2m}}{dx} + K_\infty \frac{(C_{1s} + C_{2s})(C_{1m} + C_{2m})}{C_{1s} + C_{2s} + \beta} = 0 \quad (25)$$

$$ID \frac{d^2 C_{1s}}{dx^2} + ID \frac{d^2 C_{2s}}{dx^2} - v \frac{dC_{1s}}{dx} - v \frac{dC_{2s}}{dx} - \frac{K_\infty}{y} \frac{(C_{1s} + C_{2s})(C_{1m} + C_{2m})}{C_{1s} + C_{2s} + \beta} = 0 \quad (26)$$

Uitwerking van de meest rechtse term van het linkerlid van vergelijking (25) geeft:

$$K_\infty \frac{(C_{1s} + C_{2s})(C_{1m} + C_{2m})}{C_{1s} + C_{2s} + \beta} = K_\infty \frac{C_{1s} C_{1m} + C_{1s} C_{2m} + (C_{2s} C_{1m} + C_{2s} C_{2m})}{C_{1s} + C_{2s} + \beta} \quad (27)$$

Uit de uitbreiding van de aanname, dat het diffusief transport ver van het instroompunt klein is ten opzichte van het konvektief transport, tot de veronderstelling dat dit over het gehele trajekt geldt, volgt, dat hogere orde termen van  $C_{2s}$  en  $C_{2m}$  verwaarloosd mogen worden. Uit vergelijking (27) volgt dan:

$$K_{\infty} \frac{C_{1s} C_{1m} + C_{1s} C_{2m} + C_{2s} C_{1m}}{C_{1s} + C_{2s} + \beta} =$$

$$K_{\infty} (C_{1s} C_{1m} + C_{1s} C_{2m} + C_{2s} C_{1m}) \times \frac{1}{C_{1s} + \beta} \times \left( \frac{1}{1 + \frac{C_{2s}}{C_{1s} + \beta}} \right) \quad (28)$$

Reeksontwikkeling met verwaarlozing van hogere orde termen leidt tot:

$$K_{\infty} (C_{1s} C_{1m} + C_{1s} C_{2m} + C_{2s} C_{1m}) \times \frac{1}{C_{1s} + \beta} \times \left( 1 - \frac{C_{2s}}{C_{1s} + \beta} \right) =$$

$$K_{\infty} \left( \frac{C_{1s} C_{1m} + C_{1s} C_{2m} + C_{2s} C_{1m}}{C_{1s} + \beta} - \frac{C_{1m} C_{2s} C_{1s} + C_{1s} C_{2m} C_{2s} + C_{2s} C_{1m} C_{2s}}{(C_{1s} + \beta)^2} \right) =$$

$$K_{\infty} \left( \frac{C_{1s} C_{1m} + C_{1s} C_{2m}}{C_{1s} + \beta} + \frac{C_{1s} C_{1m} C_{2s} + C_{2s} C_{1m} \beta}{(C_{1s} + \beta)^2} - \frac{C_{2s} C_{1s} C_{1m}}{(C_{1s} + \beta)^2} \right) =$$

$$K_{\infty} \left( \frac{(C_{1s} C_{1m} + C_{1s} C_{2m})}{C_{1s} + \beta} + \frac{C_{2s} C_{1m} \beta}{(C_{1s} + \beta)^2} \right) \quad (29)$$

Een combinatie van (29), (21) en (25) geeft:

$$ID \frac{d^2 C_{2s}}{dx^2} - v \frac{dC_{2m}}{dx} + K_{\infty} \frac{\beta C_{1m} C_{2s}}{(C_{1s} + \beta)^2} + ID \frac{d^2 C_{1s}}{dx^2} = 0 \quad k_D \frac{C_{1s} C_{2m}}{C_{1s} + \beta} \quad (30)$$

Een combinatie van (29) (22) en (26) geeft:

$$ID \frac{d^2 C_{2s}}{dx^2} - v \frac{dC_{2s}}{dx} - \frac{K_{\infty}}{y} \frac{C_{1s} C_{2m}}{C_{1s} + \beta} - \frac{K_{\infty}}{y} \frac{\beta C_{1m} C_{2s}}{(C_{1s} + \beta)^2} + ID \frac{d^2 C_{1s}}{dx^2} = 0 \quad (31)$$

Omdat uit vergelijkingen (21) en (22) de waarden van  $C_{1s}$  en  $C_{1m}$  als functie van de plaats bekend zijn en in de numerieke procedure van stap tot stap ingevuld kunnen worden, zijn vergelijkingen (30) en (31) lineair.

De drie differentiaalvergelijkingen zijn nu oplosbaar met de zogenaamde "inschietmethode"

Bij deze methode maken we gebruik van het feit, dat de differentiaalvergelijkingen assymtotisch tot bepaalde eindwaarden naderen.

Indien gesteld wordt, dat:

$$C_s(\infty) = 0 \quad (32)$$

Dan volgt hieruit:

$$C_m(\infty) = C_m(0) + y C_s(0) \quad (33)$$

en

$$C(\infty) = C^x - \frac{\alpha}{K} (C_m(0) + y C_s(0)) \quad (34)$$

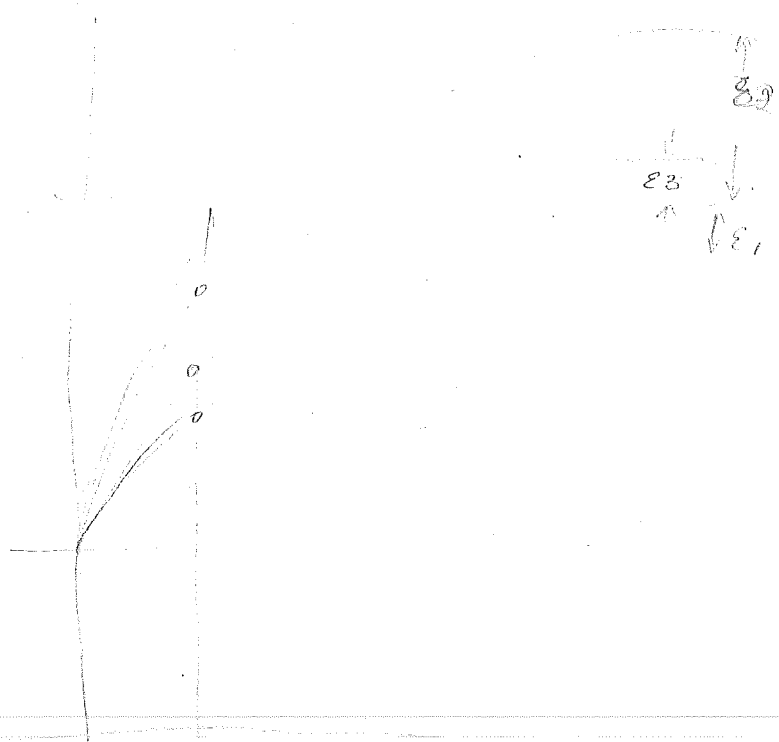
Wordt voor het punt oneindig een punt genomen, dat voldoende ver van het instroompunt ligt, bijv.  $5 \times 10^4$  m, dan kan als eerste benadering van de afgeleide op het punt  $x = 0$  de richtingscoëfficiënt van de verbindingslijn tussen de concentratie op  $x = 0$  en de concentratie op  $x \simeq \infty$  genomen worden. Met deze waarden wordt het bekken doorgerekend. Het verschil tussen de eindwaarden van deze berekening op  $x \simeq \infty$  en de voorspelde eindwaarden op  $x \simeq \infty$  worden  $\epsilon_1$  genoemd. Daarna wordt de beginafgeleide iets veranderd. Uit deze berekening volgt  $\epsilon_2$ . Indien de waarden van de concentraties na één integratiestap in het bekken  $C_1(x_1)$  en  $C_2(x_1)$  genoemd worden volgt hieruit door interpolatie:

$$C_3(x_1) = \frac{\epsilon_1 C_2(x_1) - \epsilon_2 (C_1(x_1))}{\epsilon_1 - \epsilon_2} \quad (35)$$

Uit deze nieuwe waarde van de concentratie na één stap wordt de afgeleide op  $x = 0$  berekend. Hiermee wordt het bekken opnieuw doorgerekend. Steeds kan hierna uit de nieuwe en uit de voorlaatste waarden van  $\epsilon_n$  en  $C_n(x_1)$  door interpolatie de nieuwe beginafgeleiden en daarmee de waarden op  $x \simeq \infty$  worden berekend.

Dit proces wordt zolang herhaald, totdat het verschil tussen de waarden voor  $x \simeq \infty$  en de vooraf berekende assymptotiekonzentraties klein genoeg is. Dit programma is erg reken intensief en vraagt een geruime rekentijd.

Bovendien is deze methode van berekenen erg kritisch voor de grootte van de parameters. Deshalve is om budgettaire redenen besloten, om dit kant en klare programma te bewaren tot er voldoende meetresultaten bekend zijn.



How about biomass in competition between species?

influence of initial conditions — hence that of  
stock mixing deliberately introduced

Competition for substrate Penetration

IV RESULTATEN EN DISCUSSIE

Op basis van de resultaten, zoals deze uit de mathematische modellen volgen, kan geconcludeerd worden, dat de kinetische processen in het bekken weinig beïnvloed worden door de dynamica van het systeem. De invloed van de windrichting op de substraatconcentratie aan de uitgang van het bekken ligt in de orde van 7% (zie figuren 5, 6 en 7). Opvallend is het verschil in zuurstofconcentratie bij zwakke en bij sterke wind. Hoewel de zuurstofconcentratie afhankelijk is van de parameter-keuze, blijkt in de hier gebruikt modellen, dat bij windstil weer of bij zwakke wind de zuurstofconcentratie, na in het begin van het bekken een sterke stijging te hebben vertoond, tegen het einde van het bekken iets afneemt. Dit is te verklaren uit het sterk gestegen aantal micro-organismen aan het eind van het bekken, waardoor er zich een nieuw en lager zuurstof-evenwicht instelt. Zoals in hoofdstuk (III.7) is afgeleid, bedraagt de asymptotische waarde, waartoe de zuurstof-concentratie nadert op een voldoende grote afstand van het ingangspunt:

$$C = C^{\infty} - \frac{\alpha}{K} (C_m(o) + y C_s(o)) \quad (36)$$

Voor grote bekkens met een zeer lange verblijftijd volgt hieruit, dat, indien de substraatconcentratie bij de ingang groter is dan:

$$C_s(o) = \frac{1}{y} \left( \frac{K}{\alpha} C^{\infty} - C_m(o) \right) \quad (37)$$

de processen anaëroob worden en het bekken volledig ongeschikt wordt om voor de waterhuishouding te worden gebruikt, tenzij de zuurstofconcentratie in het bekken kunstmatig wordt verhoogd.

Figuren 8, 9 en 10 geven het verloop weer tussen de substraatconcentratie, zuurstofconcentratie en concentratie aan micro-organismen aan de uitgang van het bekken enezijds en het Rijndebiet anderzijds. Hoewel er tijdens de grote najaarsdroogte van 1971 een beroep is gedaan op de in de Rijn lozende instellingen om het spuien van afval zoveel mogelijk te beperken totdat het Rijndebiet weer groter geworden was, leek de aanname, dat de hoeveelheid geloosd afval niet afhankelijk was van de Rijnwaterstand, wel gerechtvaardigd. Het uitgangspunt van de aan figuren 8, 9 en 10 ten grondslag liggende berekeningen was, dat in normale situaties de substraatconcentratie aan de ingang van de Beerenplaat  $10^{-3}$  kg/m<sup>3</sup> bedroeg bij een rijndebiet van 3000 m<sup>3</sup>/s. Tijdens de droge tijd in het najaar van 1971 bedroeg de gemiddelde rijnafvoer 1000 m<sup>3</sup>/s. Dit betekende een verslechtering van het rijnwasser met ongeveer een factor 3.



Het gevolg hiervan was, dat het water aan de uitgang van de Beerenplaat verslechterd was met een factor 3,3 ten opzicht van de kwaliteit van het water in normale situaties. Indien de effectieve werking van het bekken gedefinieerd wordt als de verhouding van de ingangconcentratie van het substraat tot de uitgangconcentratie van het substraat, blijkt uit het voorafgaande, dat deze afneemt naarmate de vervuiling groter wordt. In normale omstandigheden is de effectieve werking van het bekken 1,79. Indien de rijnafvoer slechts  $500 \text{ m}^3/\text{s}$  zou bedragen, of, wat op hetzelfde neer zou komen, als de vervuiling van de Rijn een factor zes groter zou zijn, zou de effectieve werking van de Beerenplaat gedaald zijn tot 1.59, zoals uit de grafieken volgt. Uit figuur 11 volgt, dat de werking van de Beerenplaat nauwelijks afhankelijk is van de windrichting. Figuur 12 laat het verband zien tussen het verloop van de substraatconcentratie aan de uitgang van het bekken en het waterverbruik door Rotterdam en omgeving bij noorden of zuidenwind. Ook hier is de invloed van de windrichting zeer klein. Het verbruik van water door Rotterdam en omgeving zal binnen enkele jaren  $5 \text{ m}^3/\text{s}$  bedragen. Indien dit op zou lopen tot  $8 \text{ m}^3/\text{s}$  zou bij de in dit programma gebruikte parameters de effectieve werking teruglopen tot 1,46.

Met de programma's voor noorden- of zuidenwind is ook onderzocht, wat de invloed van de groeisnelheid en groeibeperkende factor van de micro-organismen is op de uitgangconcentratie van het substraat is. Het resultaat hiervan is te zien in de figuren 13 en 14. Aangezien blijkt, dat deze factoren een grote invloed hebben op het kinetische gebeuren in het Beerenplaat bekken, lijkt het zinvol om bij het opstellen van een meetprogramma het eerst de grootte van deze parameters te bepalen.

Tot slot is uit inleidende berekeningen met de programma's, waarin een roofdierprooi relatie is opgenomen, gebleken, dat de hieruit te verkrijgen resultaten zeer sterk afhangen van de keuze van de ingevoerde parameters. Van essentieel belang voor de goede werking van het bekken bleek te zijn, dat, of de ingangconcentratie van de roofdieren zeer laag was, of, dat hun groeisnelheid zeer klein of hun groeibeperkende factor zeer groot was, aangezien anders reeds in het eerste compartiment van het bekken de concentratie van de substraatafbrekende micro-organismen tot nul zou naderen en er daarna in het gehele bekken niets meer zou gebeuren.

*because we have a number there  
new flow flow*

Helaas waren bij het afsluiten van dit gedeelte van het onderzoek door verschillende externe factoren de waarden van de verschillende kinetische en dynamische parameters, zoals die zijn in de Beerenplaat, nog niet bekend, zodat de resultaten niet direkt kwantitatief geïnterpreteerd kunnen worden, maar meer als een globale beschouwing van de Beerenplaat gezien moeten worden.

### Conclusies

Het is gebleken het zeer goed mogelijk is om, voordat men een experimenteel onderzoek gaat verrichten naar de microbiologische activiteiten bij de natuurlijke waterzuivering in een spaarbekken, eerst door middel van het opstellen van mathematische modellen, een indruk te krijgen van de gevoeligheid van de uitgangskoncentratie op variatie van de verschillende parameters, die in het proces een rol spelen. Op grond daarvan kan een prioriteitenschema voor het onderzoek worden opgesteld.

Indien wordt besloten om met het onderzoek naar de werking van ondiepe spaarbekken door te gaan, zou het volgende werkschema als richtlijn aangehouden kunnen worden:

In eerste opzet valt de grootste prioriteit toe aan het achterhalen van de stof, die het sterkste smaakbedervend werkt. Is deze stof gevonden, dan kunnen eerst op laboratoriumschaal de kinetische parameters van de zich met deze stof voedende micro-organismen worden bepaald, met name: de groeisnelheid ( $K^\infty$ ), de groeibeperkende factor ( $\beta$ ), de omzettingsevenredigheidsconstante ( $\gamma$ ) en eventueel de ademhalingscoëfficiënt ( $\alpha$ ). Bovendien is het belangrijk om de temperatuurafhankelijkheid van voornoemde parameters te onderzoeken. De aldus gevonden constanten kunnen ingevoerd worden in de programma's en de resultaten hiervan kunnen gecorreleerd worden met concentratiebepalingen van substraat en micro-organismen in de Beerenplaat. Indien hieruit zou blijken, dat de correlatie grote afwijkingen geeft, dan kan men de uitgebreidere programma's met roofdier-prooi relaties benutten. Door aanpassing van de kinetiek van het roofdier kan getracht worden om de resultaten, zoals die volgen uit de modellen en uit de metingen met elkaar tot dekking te brengen. Om het aantal parameters niet te groot te laten worden kan de afsterving van de micro-organismen in het bekken in de roofdier-prooi relatie "ondergebracht" worden. Indien dit relevante bezwaren zou opleveren, is het alsnog mogelijk om afsterving van de micro-organismen op laboratoriumschaal te onderzoeken en in de programma's een afsterffunctie in te passen. Met de aldus gevonden constanten zouden daarna de resultaten van de programma's voor de verschillende windrichtingen en van de metingen in het Beerenplaatbekken met elkaar kunnen worden vergeleken. Zouden tussen de theoretische resultaten en de gemeten waarden grote verschillen bestaan, dan zal dit waarschijnlijk te wijten zijn aan stukken dood water in het bekken. Deze zouden opgespoord kunnen worden met drijvers, waaraan op verschillende diepten weerstandskruisen zijn bevestigd. Aan de hand van de hiermee verkregen gegevens kan een correctie in de modellen worden aangebracht.

Het aldus verkregen model zou goede diensten kunnen bewijzen bij optimalisatie van de ontwerpen van eventueel in de toekomst te bouwen ondiepe bekken of als uitgangspunt voor een onderzoek naar de werking van diepe bekken, zoals bijvoorbeeld het Biesbosch bekken.

Het voordeel van de hier geschetste opzet is, dat gestart kan worden met relatief goedkope en eenvoudige metingen. Naar alle waarschijnlijkheid kan door het volgen van het bovenstaande onderzoekschema vermeden worden, dat, ter bepaling van de dynamica van het systeem tracers in het bekken ingebracht zouden moeten worden. Dit heeft een dubbel voordeel. In de eerste plaats hoeft geen extra verontreiniging in het drinkwaterbekken aangebracht te worden. Bovendien zou de eis, dat zeer grote hoeveelheden niet-radioactief en niet-carcinogeen werkende tracers gebruikt moeten worden, aanzienlijke kosten met zich mee brengen.

In het aldus opgesteld schema zit één grote onzekerheid; de mogelijkheid om de smaakbedervende stoffen te achterhalen. Indien het niet mogelijk zou blijken te zijn om deze stoffen op te sporen, zou dit het onderzoek wel bemoeilijken, maar niet principieel onmogelijk maken. Als kwantificeerbare grootte voor de smaakbedervende stoffen kan het "smaakgetal" worden genomen. Dit smaakgetal is gedefinieerd als het aantal malen, dat het te onderzoeken monster water moet worden verdund met zuiver water, totdat er geen verschil tussen het verdunde monster en zuiver water meer te proeven is. Op basis van dit smaakgetal zou een hypothetische smaakstof in de modellen geïntroduceerd kunnen worden. Voor het onderzoek naar de dynamica van het systeem kan natuurlijk een gemakkelijk te detecteren stof worden gebruikt.

Literatuur

1. Dam, G.C. van                      Enkele formules voor één dimensionale behandeling van de zuurstofhuishouding in een rivier of andere waterloop, waarin oxidabel materiaal geloosd wordt.  
Nota Rijkswaterstaat MFA 6701
2. Hoover, T.E.,                      Computer model of Connecticut river pollution,  
Arnoldi, R.A.                      J. Water Poll. Contr. Fed. 42 R67 1970
3. O'Connor, D.J.                      Organic Pollution of New York Harbor - Theoretical considerations,  
J. water Poll. Contr. Fed. 34 905 1962
4. Bijker, J.J.B.                      Drinkwater voor Rotterdam, verleden, heden en toekomst,  
De Ingenieur 40 967 1963
5. Rook, J.J., Oskam, G.              Biological and Chemical Aspects of Rhine water in the Beerenplaat Reservoir,  
J. American Water Works ass. 62 249 1970
6. Oskam, G.                          An kinetic model of phytoplankton growth, and its use in algal control by reservoir mixing,  
Int. symp. on man made lakes (Knoxville, Tennessee 1971)
7. Knoppert, P.L.                      Drinkwater voor Rotterdam, Opzet en inrichting van het drinkwaterproductiebedrijf Beerenplaat,  
De Ingenieur 42 981 1963
8. Kataoka, H., Miyanchi, T.        Gas absorption into free liquid surface of agitated vessels in turbulent region,  
Kagaku Kōgaku (Eng. editie) 4 335, 1966
9. Wehner, J.F.,                      Boundary conditions of flow reactor,  
Wilhelm, R.H.                      Chem. Eng. Sci. 6 89 1956

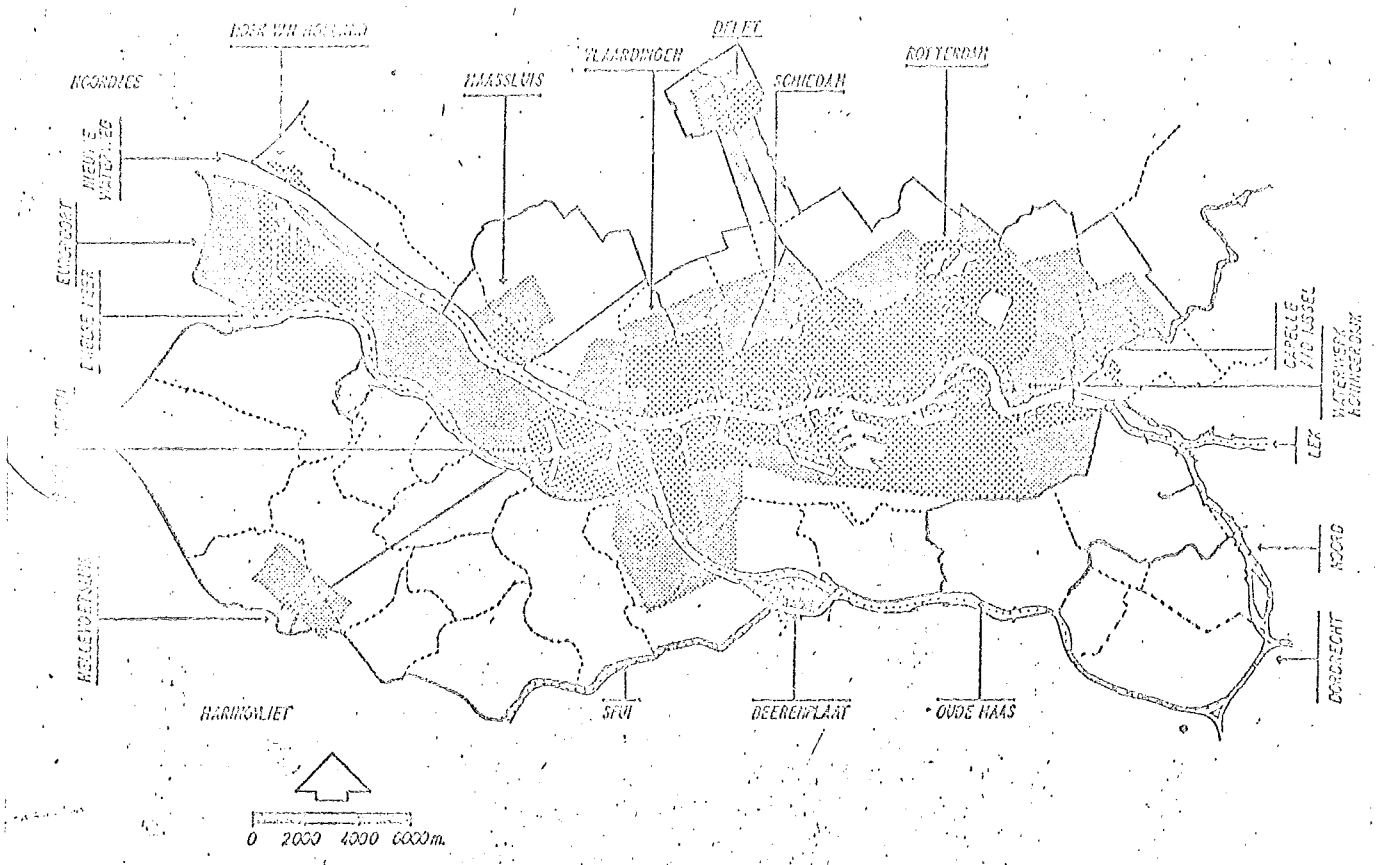


fig 1 Voorzieningsgebied van de Rotterdamse Drinkwaterleiding.

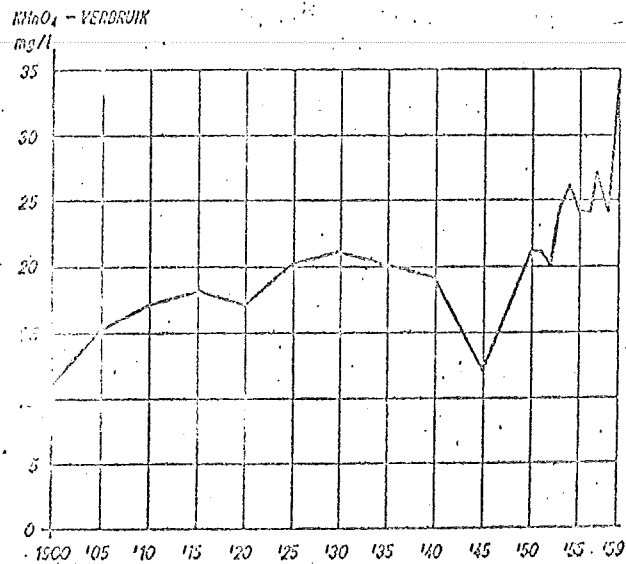


Fig. 2. Verloop van het KMnO<sub>4</sub>-verbruik, over de periode 1900-1959.

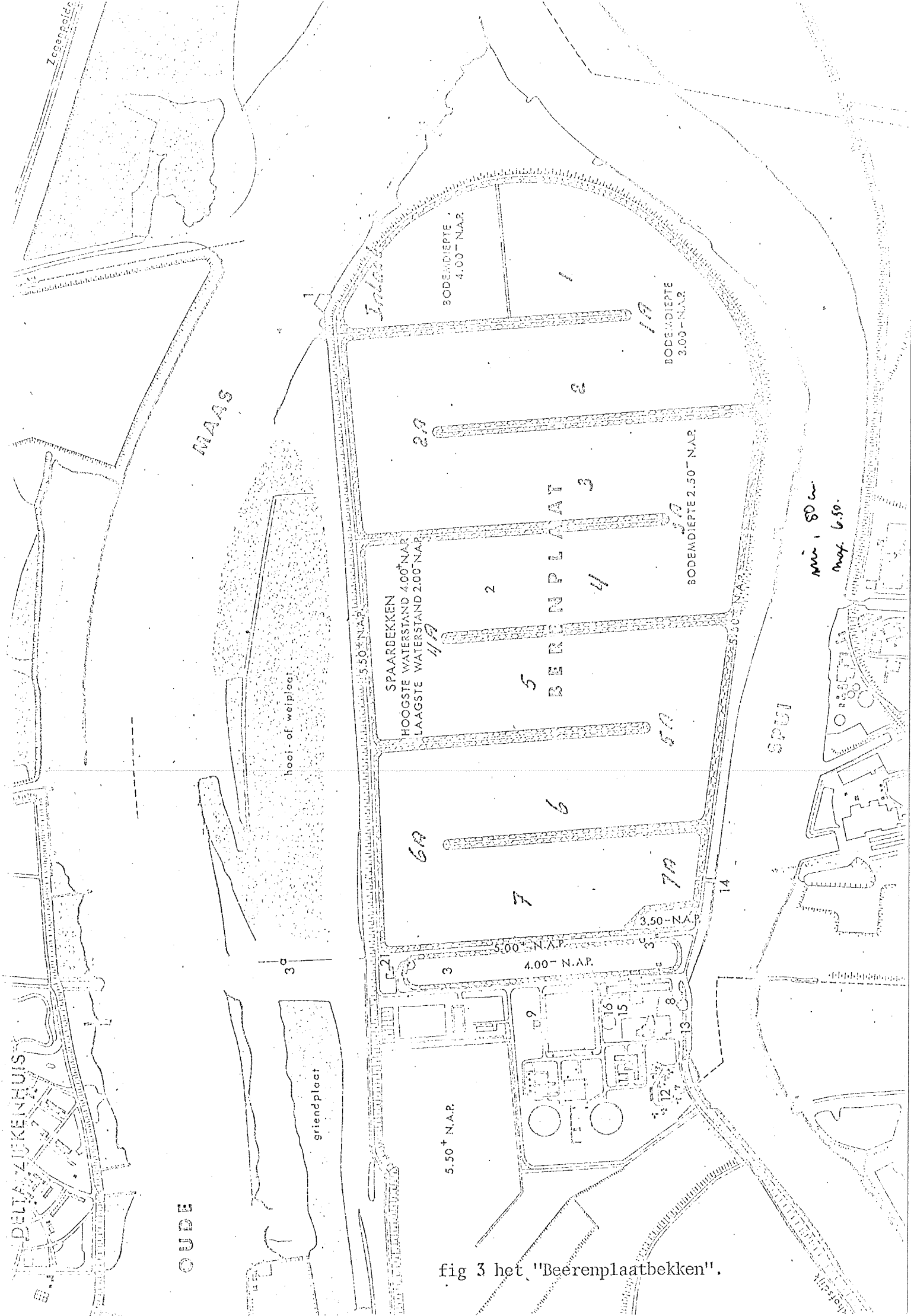


fig 3 het "Beerenplaatbeken".

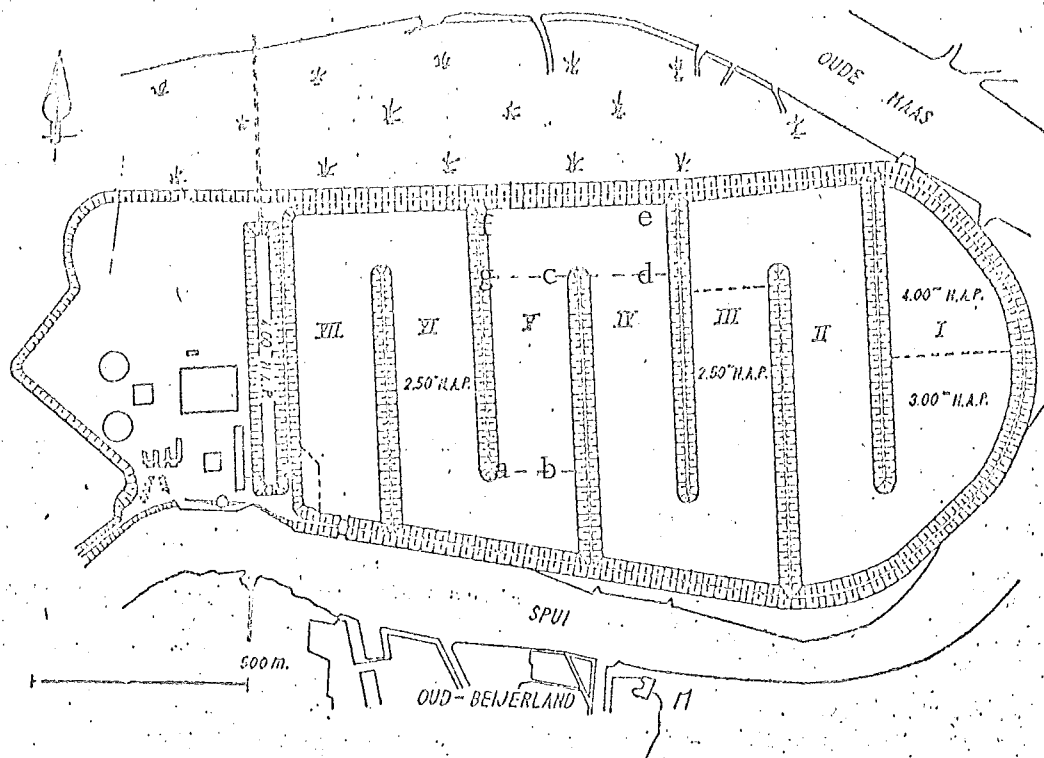
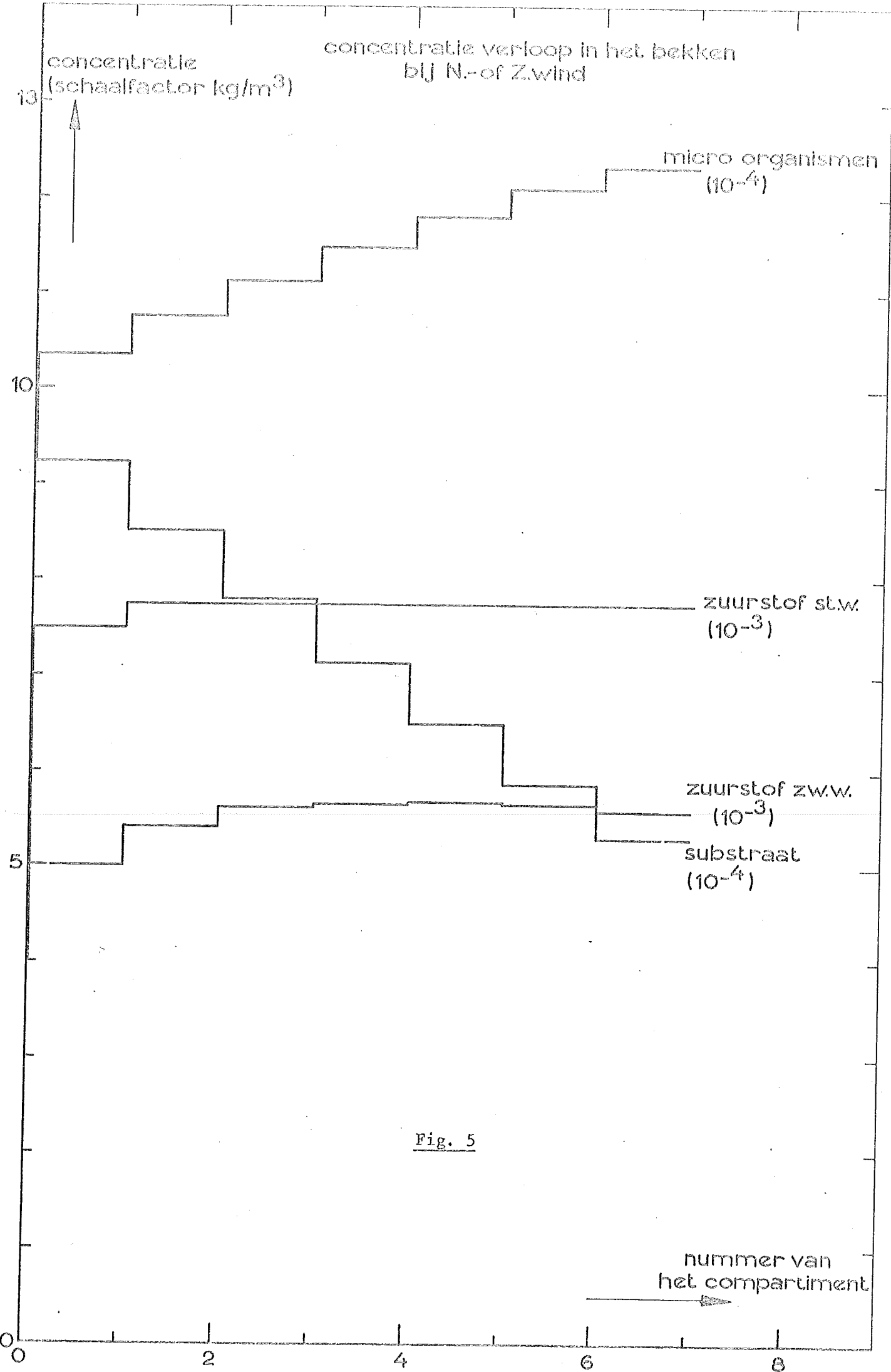


fig 4 indeling bij O-W wind.





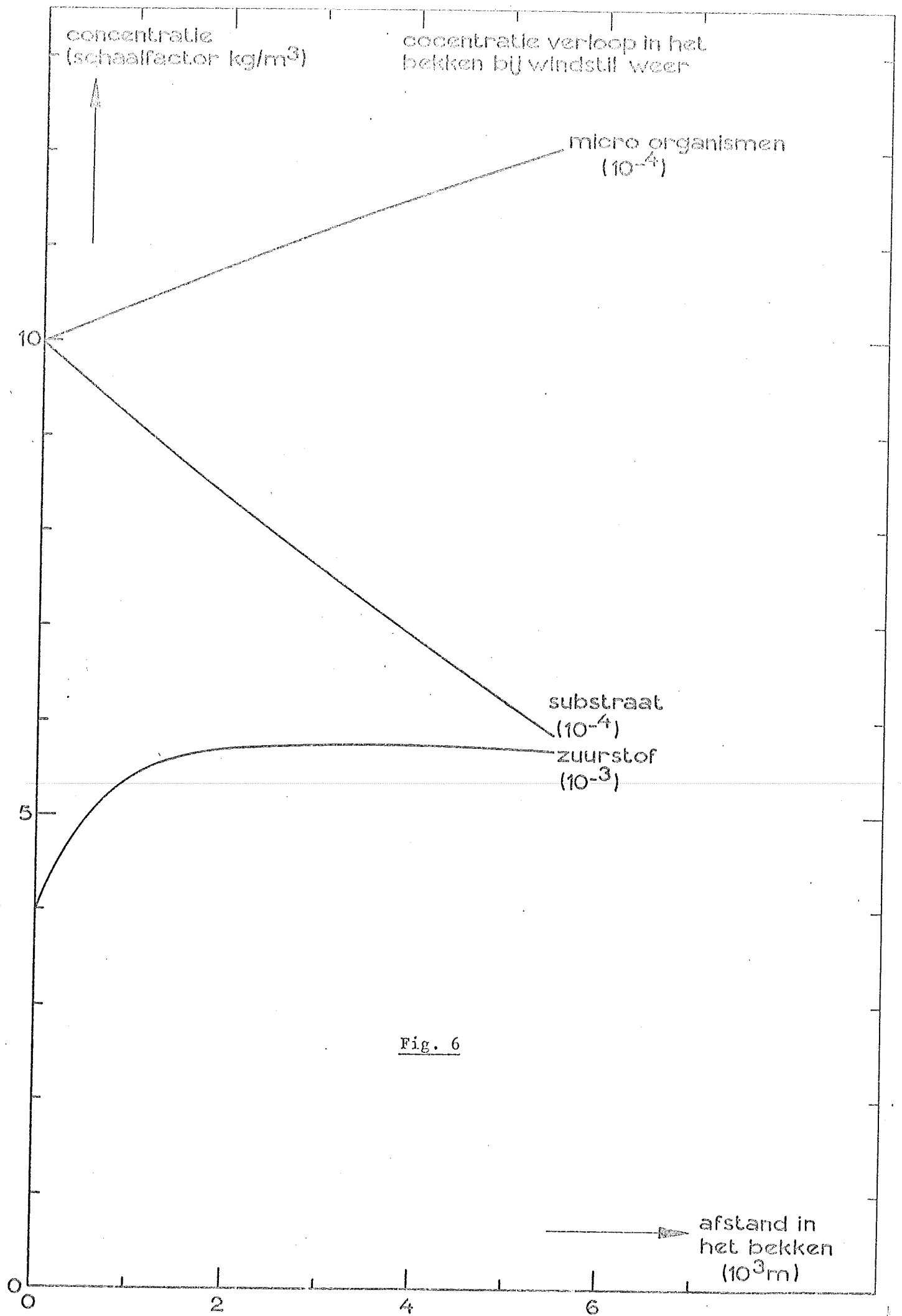


Fig. 6

concentratie verloop in het bekken  
bij O.-W.wind

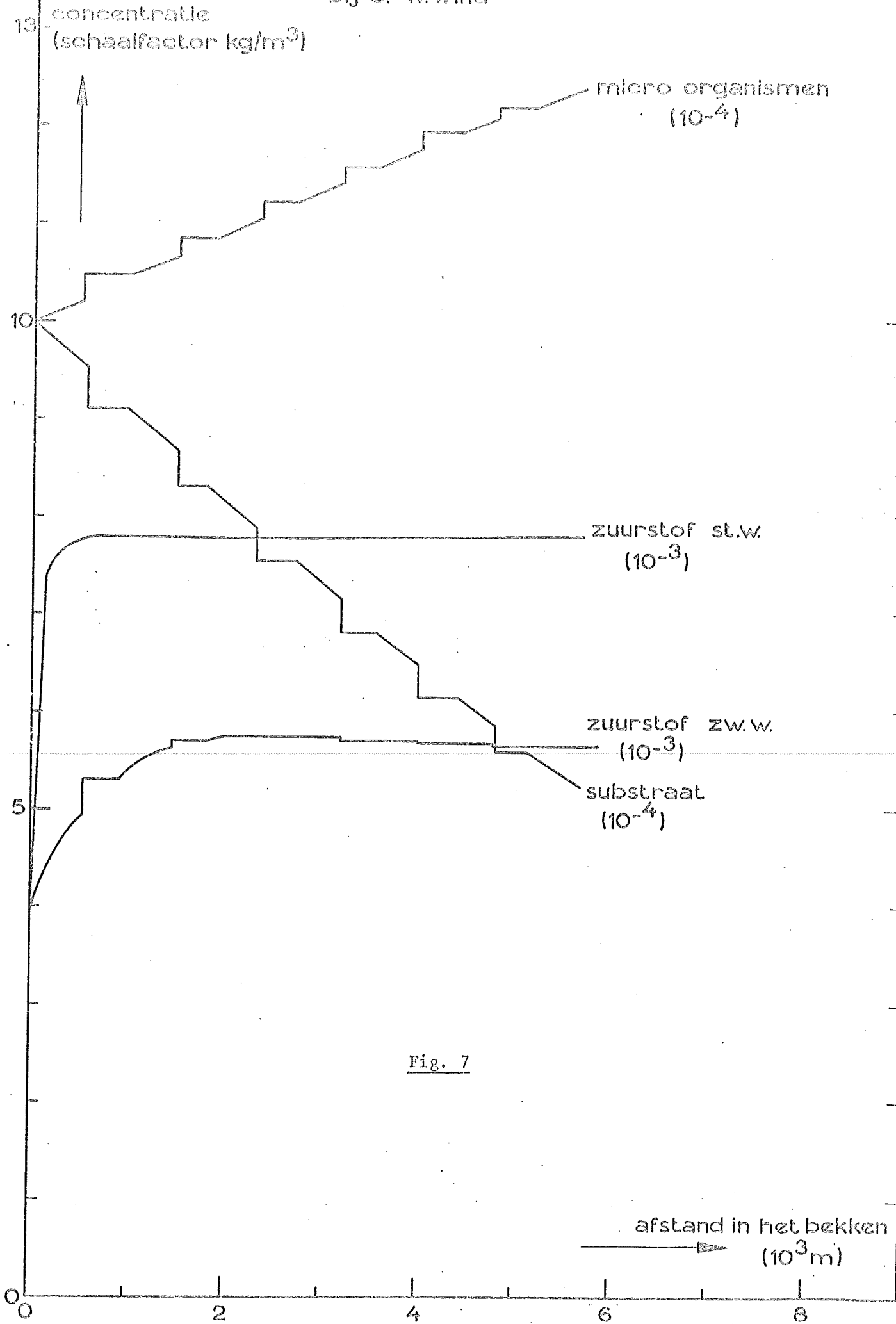
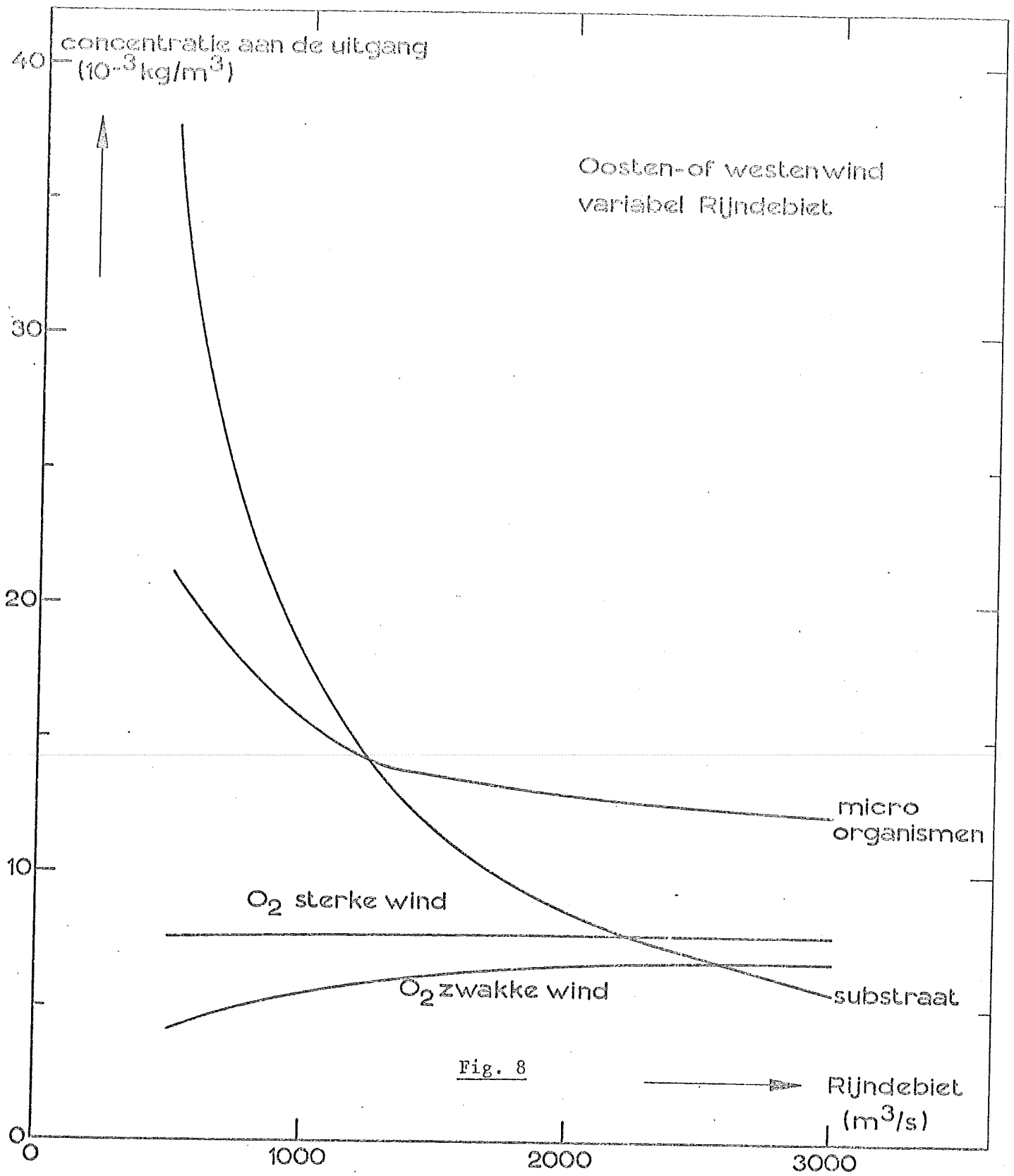


Fig. 7



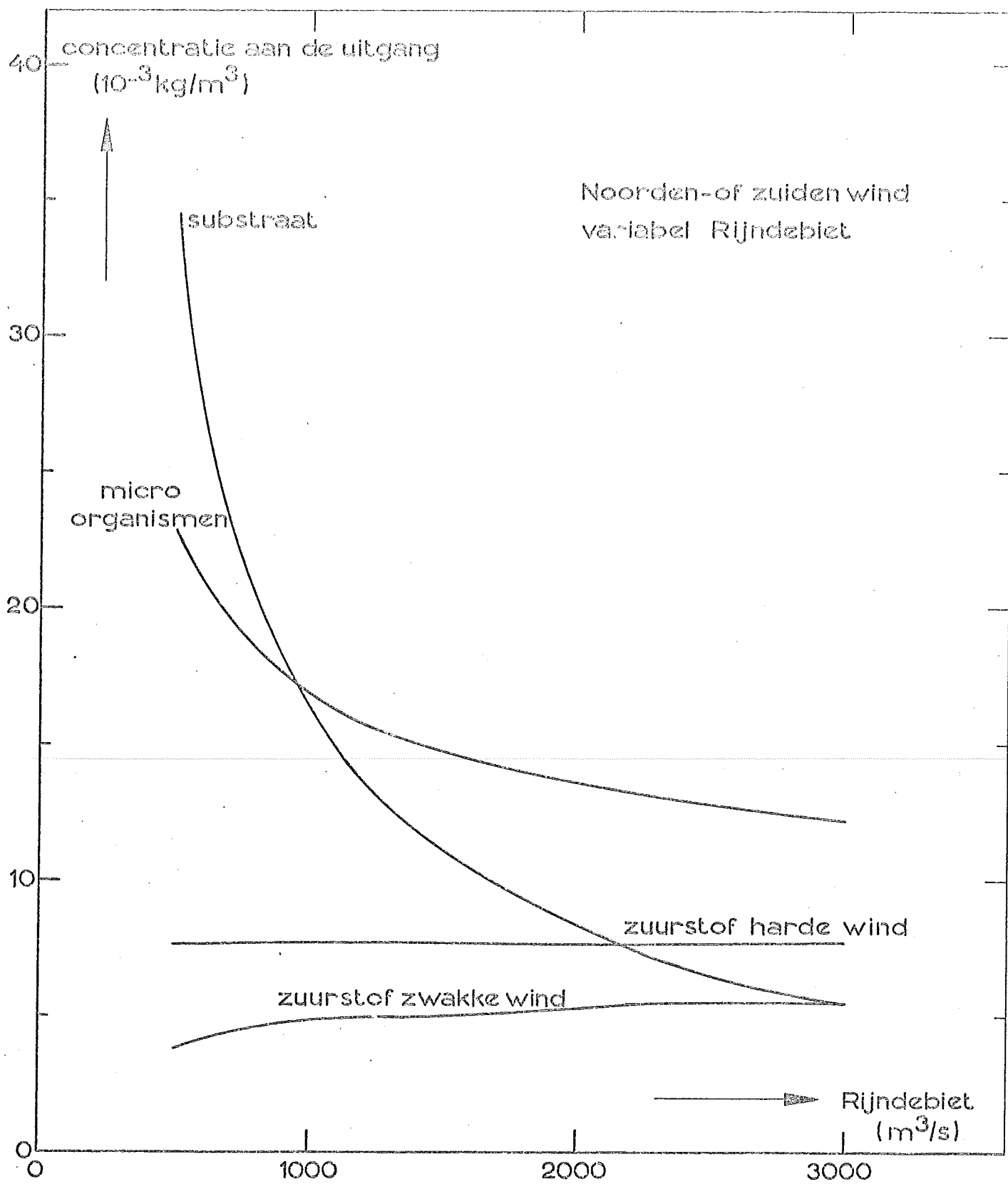


Fig. 9

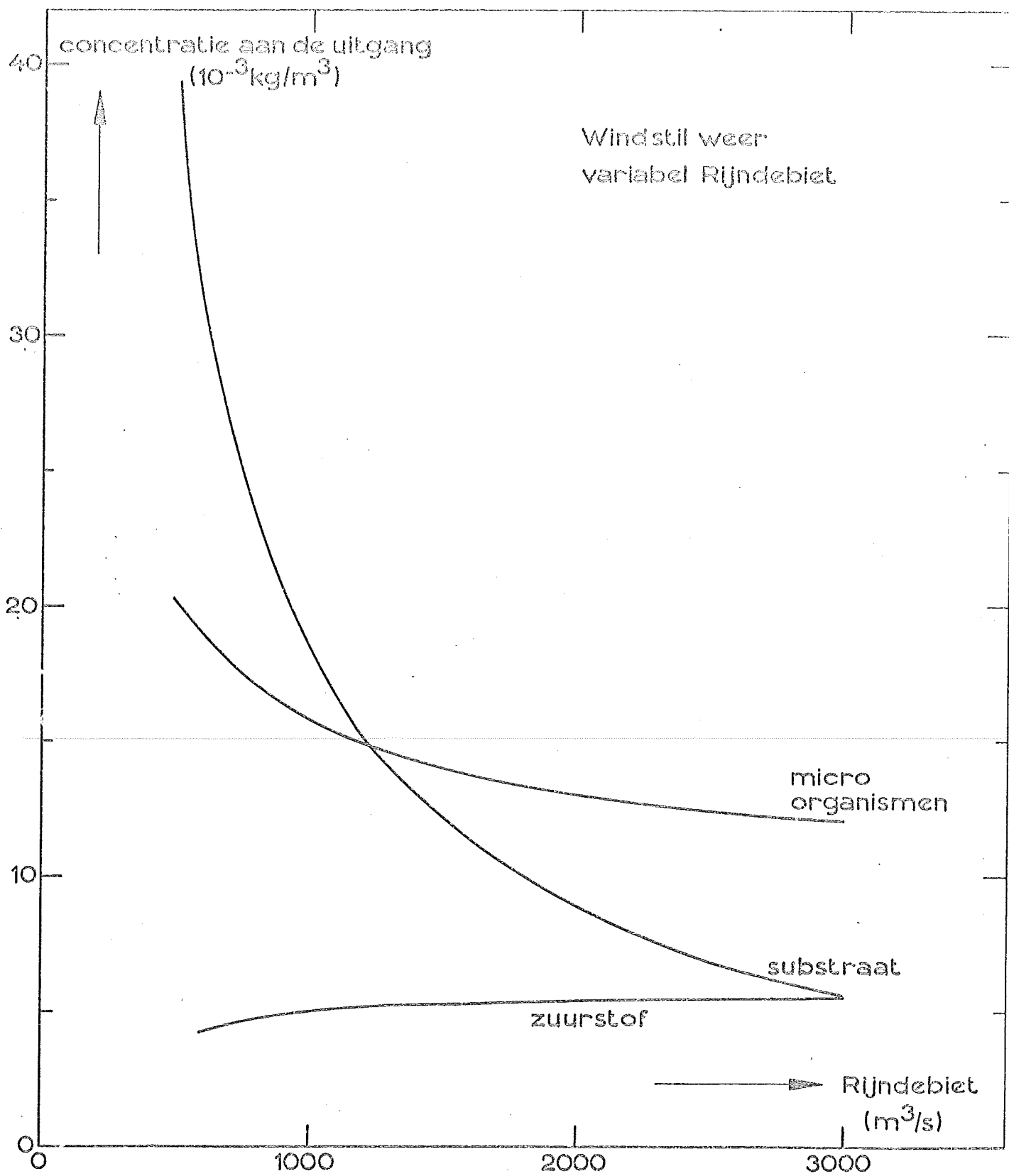


Fig. 10

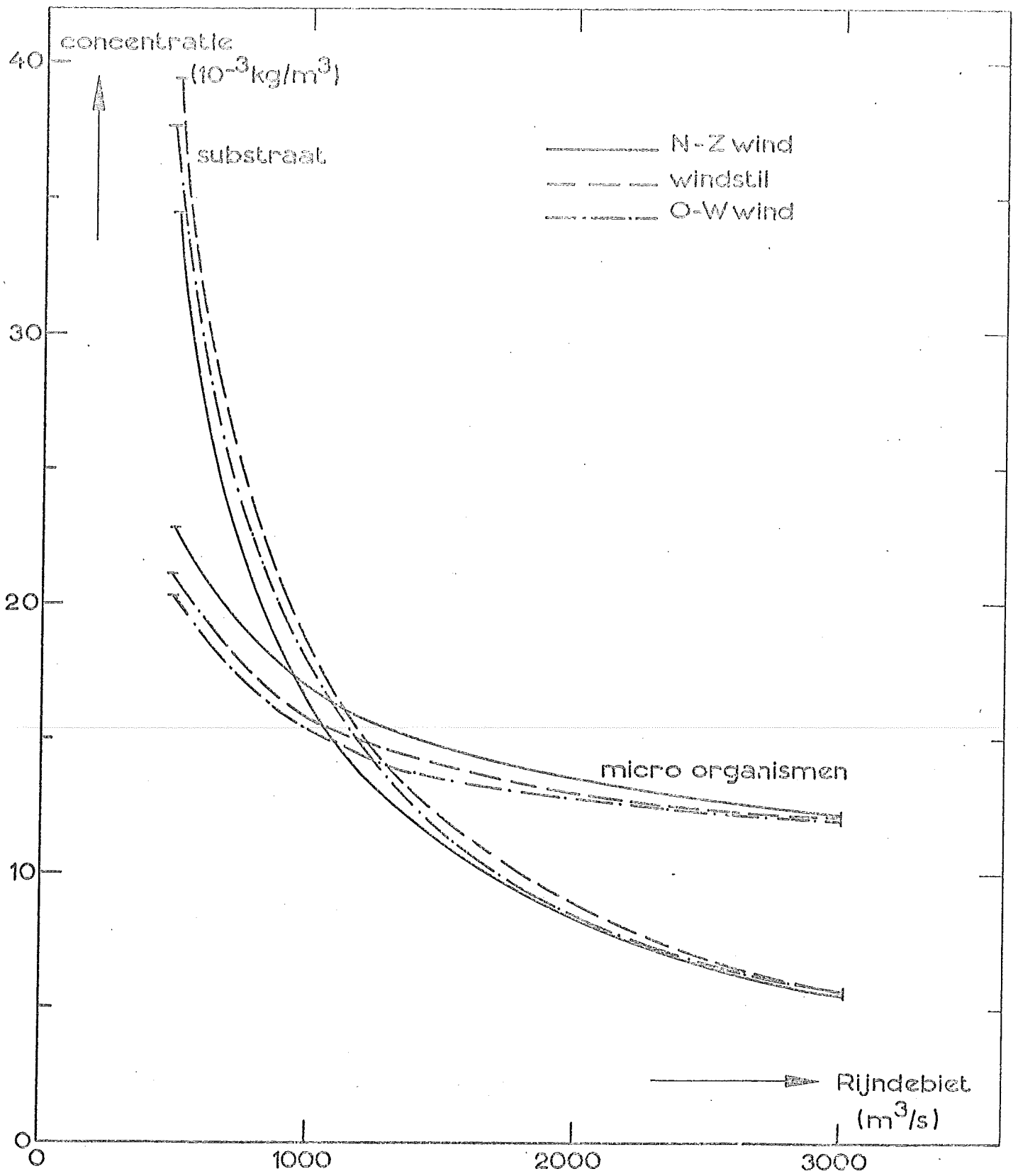


Fig. 11

concentratie ad uitgang  
(schaalfactor  $\text{kg}/\text{m}^3$ )



Noorden of zuiden wind  
variabel watergebruik

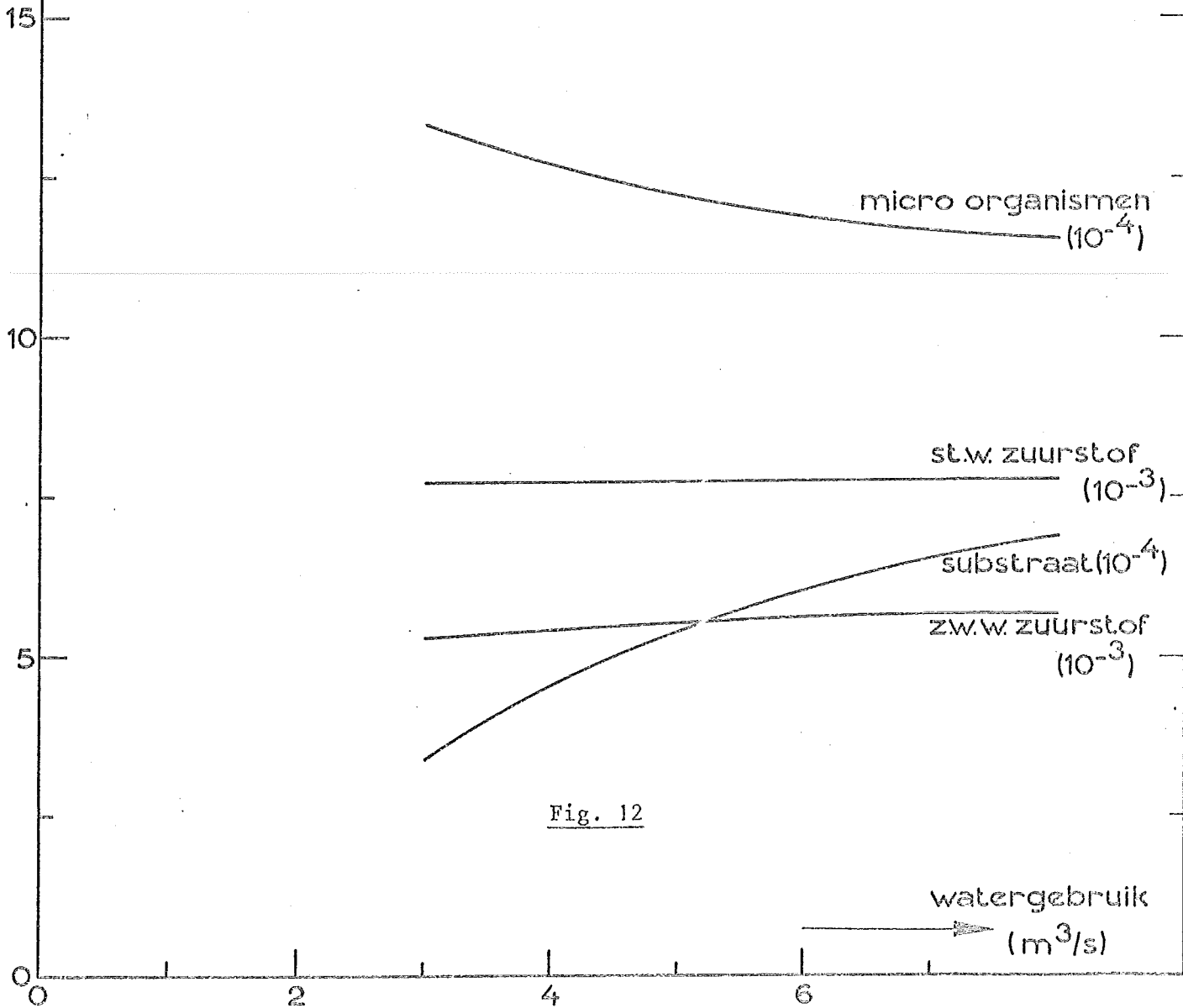
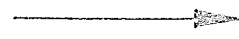


Fig. 12

watergebruik  
 $(\text{m}^3/\text{s})$





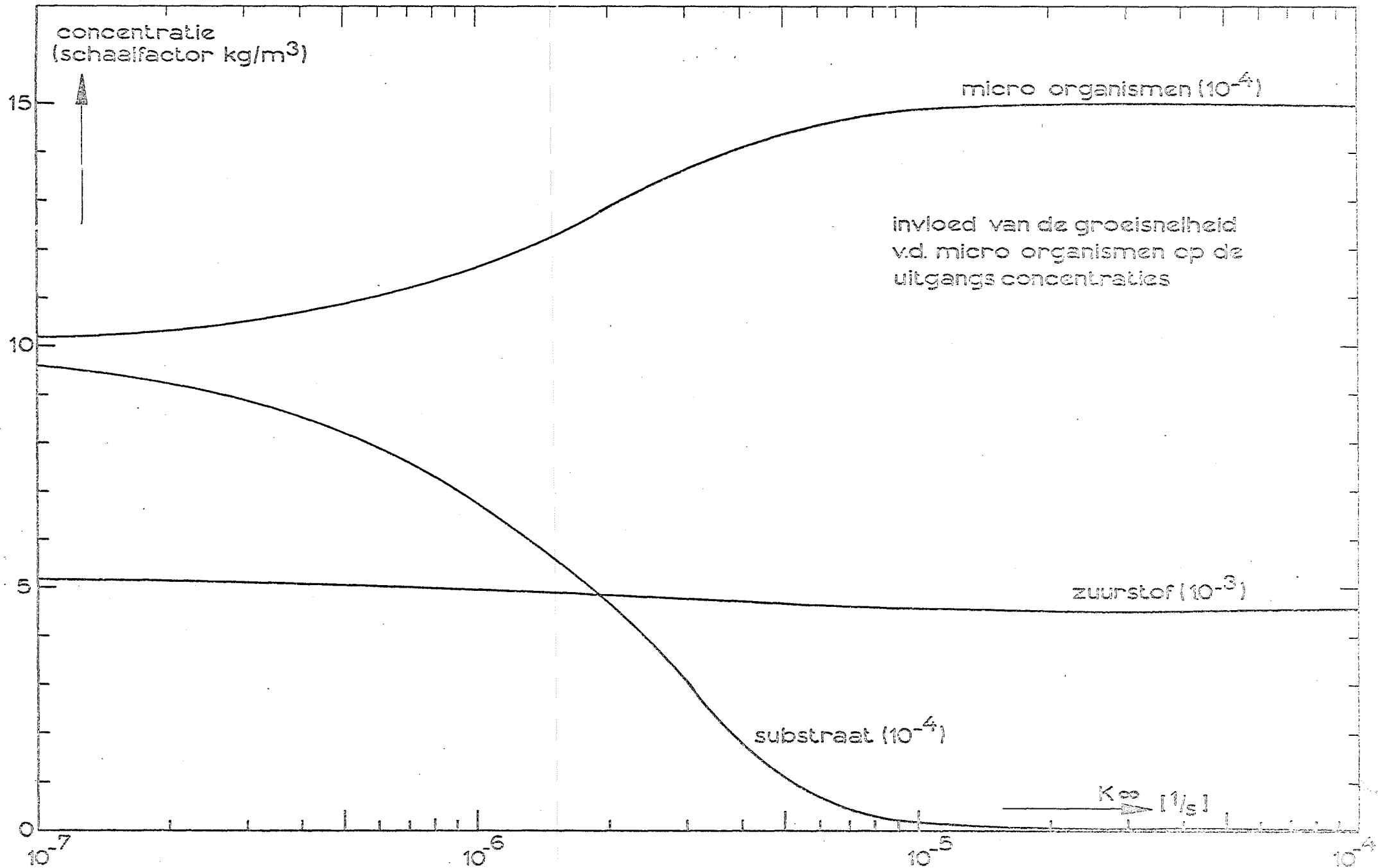


Fig. 13

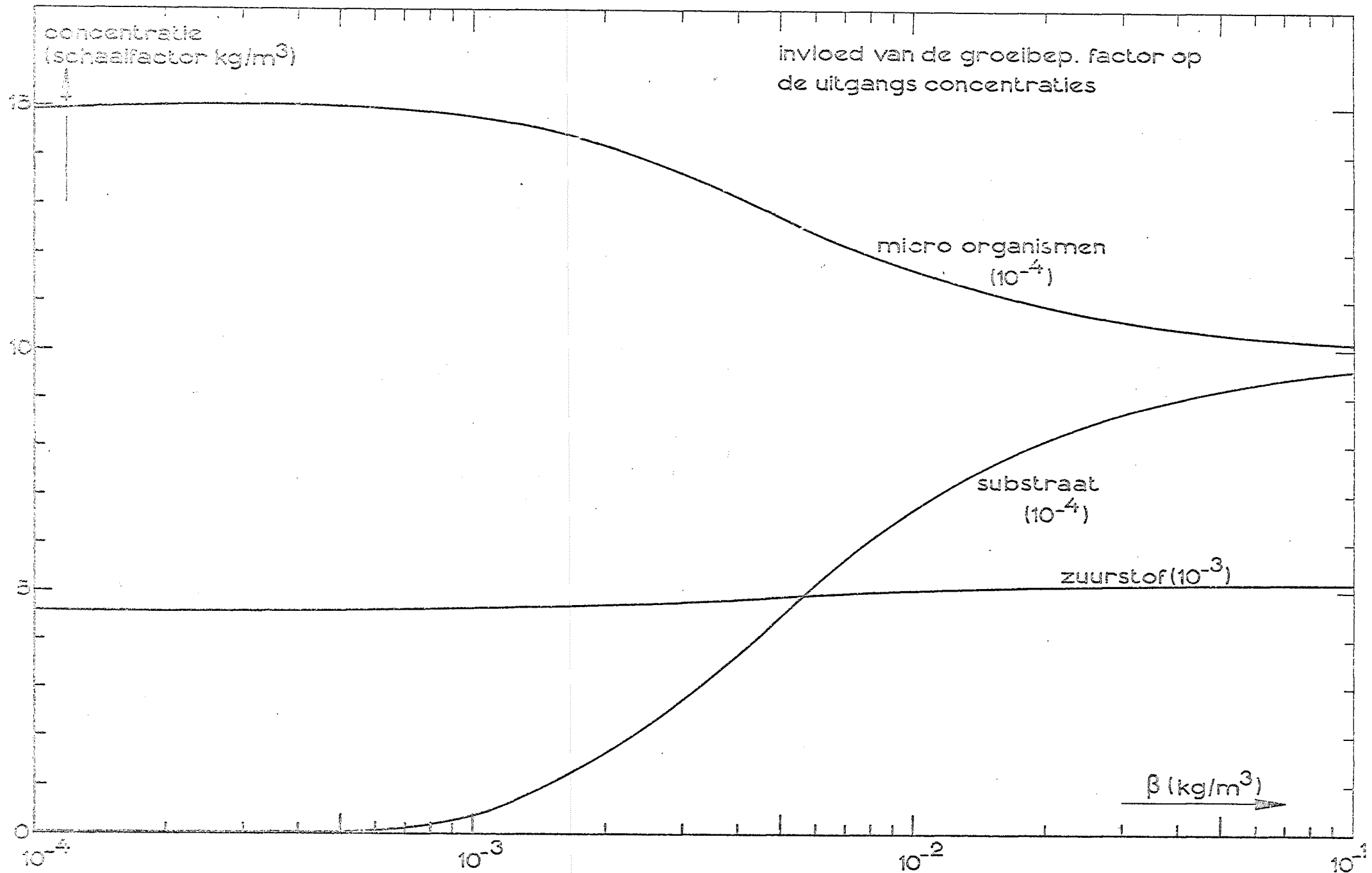


Fig. 14