

Kwaliteitsaspecten van het  
retourwater bij de berging  
van baggerspecie in een  
grootschalige locatie op  
de Maasvlakte

R/1984/D/1

*P.H.J. Goetjens*

Vakgroep Vloeistofmechanica  
Afdeling der Civiele Techniek  
Technische Hogeschool Delft

Kwaliteitsaspecten van het retourwater bij de berging van  
baggerspecie in een grootschalige locatie op de Maasvlakte

Rapport nr.: R / 1984 / D / 1

Vakgroep Vloeistofmechanica  
Afdeling Civiele Techniek  
Technische Hogeschool Delft

## Voorwoord

Dit verslag is een deelontwerp verricht door R.R.J. Goetjaar in het kader van de eindstudie voor civiel ingenieur.

Ten behoeve van de studie heeft er een literatuuronderzoek plaatsgevonden naar de processen die een rol spelen bij het suspensiegedrag van slib in een grootschalige bergingslocatie van baggerspecie op de Maasvlakte.

Getracht is een numeriek model te ontwikkelen voor de beschrijving van de optredende verschijnselen.

Mijn begeleider bij de studiegroep retourwater was ir. J.R. Bos van Gemeentewerken Rotterdam, Ingenieursbureau Havenwerken.

Afstudeerhoogleraar was prof. dr. ir. J.P.Th. Kalkwijk van de Vakgroep Vloeistofmechanica van de Technische Hogeschool te Delft.

Mijn coach was dr. ir. C.Kranenburg van het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de Technische Hogeschool te Delft.

Delft, december 1983

R.R.J. Goetjaar

	<u>Inhoudsopgave</u>	<u>Blz.</u>
1.	Inleiding	3
1.1	Probleemstelling	4
2.	Eigenschappen van havenslib	5
2.1	De korrelverdeling	5
2.2	Bezinkeigenschappen en uitvlokking	5
2.3	Uitschuring	6
2.4	Stromingsgedrag van slib op de bodem	6
2.4.1	Slibstroming ten gevolge van externe factoren	7
2.4.2	Slibstroming onder invloed van de zwaartekracht	8
2.5	Consolidatie	9
3.	Hydraulische eigenschappen van het bassin	10
3.1	Stromingscondities/dichtheidsverschillen/windgolven	10
3.1.1	Circulatiestroming en debietstroming	10
3.1.2	Kortsluitstromingen	11
3.1.3	Dichtheidsverschillen	11
3.1.4	Windgolven	11
3.2	Kwaliteit van het retourwater	12
3.2.1	Concentratie van opgeloste stoffen	12
3.2.2	Concentratie van gesuspendeerde slibdeeltjes	14
3.2.2.1	Randvoorwaarde vrij oppervlak	15
3.2.2.2	Randvoorwaarde op de bodem	15
3.3	Algemene beschouwingen	18
3.4	Aannamen en vereenvoudigingen	19
4.	Numeriek model voor de bepaling van het concentratie- verloop van gesuspendeerde deeltjes	20
4.1	Randvoorwaarde aan het vrije oppervlak	21
4.2	Randvoorwaarde aan de bodem	21
4.3	Schuifspanningssnelheden $u_{*0}$ en $u_{*b}$	23
4.4	Turbulente diffusiecoëfficiënt $\epsilon$	25
4.5	Stabiliteit van het numerieke model	25
4.6	Nauwkeurigheid van het numerieke model	25
5.	De diffusor	26
5.1	De invloed van de diffusor	26
5.2	Locatiekeuze inbreng en uitvoer	26
5.3	Conclusie	28

<u>Inhoudsopgave (vervolg)</u>		<u>Blz.</u>
6.	Praktijkgeval numeriek model	29
6.1	Controleberekening Westeinderplas	30
6.1.1	Controleberekening met behulp van analytische methode	30
6.1.2	Controle door middel van vergelijking met praktijkmetingen in de Westeinderplas	31
6.2	Algemene beschouwing	31
6.3	Tekortkomingen van het numerieke model	32
7.	Berekening van de concentraties van opgeloste stoffen in de sluffer	33
7.1	Invoergegevens	33
7.2	Concentraties van opgeloste stoffen in het retourwater uit de grootschalige locatie	33
8.	Berekening deeltjesconcentratie in de sluffer	34
8.1	Windveldverdeling	34
8.2	Strijk lengten	34
8.3	Golfkarakteristieken	34
8.4	Invoergegevens numeriek model	35
8.5	Concentraties slibdeeltjes in het retourwater uit de grootschalige locatie	35
9.	Discussie en conclusies	36
	Literatuur	
	Symbolen	
	Bijlagen	
	Figuren	

1. Inleiding

Deze studie heeft betrekking op de kwaliteit van lozingswater (retourwater) bij de berging van baggerspecie in een grootschalige locatie op de Maasvlakte, ook wel het "Slufterplan" genoemd, in het kustgebied bij Voorne.

Wat betreft de locatie van de berging is er sprake van een viertal varianten, te weten: varianten I, II en III t.p.v. de Maasvlakte en variant IV in de monding van het Haringvliet (zie figuren 1 tot en met 9).

De oppervlakte van de verschillende varianten bedraagt ongeveer 300 ha. De berging is bedoeld om gedurende 15 jaar het aanbod van specie uit de oostelijke havens en middenhavens (klasse II en III specie) te kunnen verwerken.

De benodigde bergingscapaciteit voor deze periode bedraagt ca. 150 miljoen m<sup>3</sup>.

De diepte in het bassin zal bij aanvang van de berging + 18 m -N.A.P. bedragen en de bedoeling is dat tot +15 m +N.A.P. het storten van baggerspecie door zal gaan. Ten gevolge van verdringing zal in het oorspronkelijk zoute bekken verzoeting optreden door het ontsnappen van poriënwater uit de baggerspecie. Bij het omhoogkomen van het bodemniveau zal de waterdiepte van het bassin in de tijd afnemen. Externe factoren zoals wind, stroming en golven zullen een steeds grotere rol gaan spelen in het suspensiegedrag van het slib.

De specie uit de oostelijke havens en middenhavens is sterk verontreinigd met zware metalen, PCB's, enz.

De verontreinigingen komen zowel gebonden aan het slib als in opgeloste fase voor.

De lozing van het retourwater zal gevolgen hebben voor het milieu. Daarom hebben een aantal initiatiefnemers o.l.v. Rijnmond, gemeente Rotterdam en Rijkswaterstaat directie Benedenrivieren de minister van Verkeer en Waterstaat gevraagd richtlijnen vast te stellen ten behoeve van een milieu-effectrapportage.

Ten behoeve van de behandeling in de Raad van de Waterstaat dient een projectnota te worden opgesteld. Het milieu-effectrapport dient hierin herkenbaar te zijn opgenomen.

De studie dient op 1 januari 1984 afgerond te zijn. De projectnota/MER zal op 1 april 1984 gereed zijn.

De grootschalige locatie dient op 1 januari 1987 gereed te zijn voor de aanvoer van de eerste specie. Uitgaande van een aanlegduur van twee jaar, dienen procedures en werkvoorbereiding op 1 januari 1985 te zijn afgerond.

1.1      Probleemstelling  
-----

Gevraagd wordt op basis van bestaande literatuur een voorspelling te doen ten aanzien van de kwaliteit van het retourwater bij de berging van baggerspecie in een grootschalige locatie.

De kwaliteit van het retourwater wordt bepaald door twee factoren; concentraties van opgeloste stoffen en van gesuspendeerde deeltjes. Voor de concentratie van opgeloste stoffen wordt aangenomen dat bij inbreng directe menging optreedt over heel het bekken. De concentratie van gesuspendeerde deeltjes hangt af van een aantal factoren, te weten: stroming, wind, golven en inbrengtechniek.

Ten aanzien van inbrengtechniek is het belangrijk dat er zo weinig mogelijk ontmenging optreedt. Een van de mogelijkheden is daarom het toepassen van een diffusor, die moet zorgen dat de specie met zo min mogelijk ontmenging in het bekken ingebracht wordt.

De toepassing van een diffusor zal dan ook nader bekeken worden.

## 2. Eigenschappen van havenslib

Het te bergen slib is afkomstig uit de oudere havens, te weten: Botlek- en Waalhaven (zie figuur 10). Ten aanzien van de eigenschappen van dit slib zullen de volgende aspecten belicht worden:

- korrelverdeling;
- bezinkeigenschappen en uitvloeking;
- uitschuringsgedrag;
- stromingsgedrag van het slib op de bodem.

Er zal uitsluitend gebruik gemaakt worden van bestaande metingen en literatuurgegevens.

### 2.1 De korrelverdeling

De korrelverdelingsdiagrammen voor de verschillende soorten slib zoals bepaald door de afdeling Grondmechanica van Gemeentewerken Rotterdam zijn weergegeven in figuren 11, 12 en 13.

De fractie  $< 63 \mu\text{m}$  is van belang. De fractie  $\geq 63 \mu\text{m}$  wordt geacht zo snel te bezinken dat het voor het suspensiegedrag in het bassin een ondergeschikte rol speelt.

### 2.2 Bezinkeigenschappen en uitvloeking

De valsnelheid van baggerspecie wordt onder andere bepaald door grootte, vorm, structuur en dichtheid van de deeltjes. Verder wordt de valsnelheid nog beïnvloed door de concentratie van het sediment, de temperatuur en de dichtheid en chemische samenstelling van het water.

Met behulp van valsnelheidsproeven lit. [2] is de relatie  $\frac{c(t)}{c(o)}$

weergegeven voor onder andere Botlekslib (figuur 14).

Daarbij werd in een 0,3 m hoge cilinder slib met een roerder gemengd met gefilterd water uit Europoort in een concentratie  $c(o)$  op  $t = 0$  van 1 g/l.

Door op tijdstip  $t$  de concentratie  $c(t)$  te bepalen is de relatie  $\frac{c(t)}{c(o)}$  met de valsnelheid  $w$  te bepalen:

Daaruit blijkt dat Botlekslib voor 70% bestaat uit deeltjes met een valsnelheid (in Europoortwater)  $\leq 10^{-4}$  m/s.

Een zoutgehalte van  $\pm 3$  ‰ is al voldoende om flocculatie te doen optreden. Migniot [9] heeft gevonden dat vlokken in zout water een valsnelheid hebben variërend van  $0,1 - 1 \cdot 10^{-3}$  m/s.

Nedeco [12] geeft het verband tussen concentratie en de valsnelheid voor verschillende waarden van de dichtheid van het water. Figuur 15a laat zien dat de valsnelheid toeneemt:

- bij een toename van de concentratie;
- bij een toename van de dichtheid (zoutgehalte) van het medium.



Figuur 15b toont apart de invloed van de toename van het zoutgehalte van het water. Volgens Krone [1] beginnen bij een deeltjesconcentratie van  $\geq 10$  g/l de deeltjes elkaar te hinderen, wat een lagere valsnelheid tot gevolg heeft.

Het poriënwater van slib uit de Botlekhaven heeft gemiddeld een chloridegehalte van 6000 mg/l en uit de Waalhaven gemiddeld 2000 mg/l [3].

Voor het geval van de slufter krijgt het water in het bekken na enkele jaren dezelfde saliniteit als het poriënwater van het slib (2 tot 6 g/l lit. [3]). Bij het ontstaan van grotere ondiepte ( $< 4$  à  $5$  m) zal de saliniteit vanaf dat moment dan ook vrijwel constant zijn.

Uitgaande van Migniot [9] kunnen we dan stellen dat de valsnelheid zal variëren tussen de grenzen van  $0,1 - 1 \cdot 10^{-3}$  m/s.

Vers bezonken slib zal volgens lit. [1] een dichtheid van 1100 - 1200 kg/m<sup>3</sup> bezitten.

### 2.3

#### Uitschuring

Als de bodem van het bassin enige samenhang vertoont, zal deze pas eroderen als de schuifkrachten die erop uitgeoefend worden een bepaalde waarde overschrijden. De kritieke schuifspanningssnelheid  $u_{*kr}$  blijkt een functie te zijn van de droge dichtheid  $\rho_d$  (= concentratie droge stof) zie lit. [3] en [8].

In bijlage 1 zijn de relaties tussen  $u_{*kr}$  en  $\rho_d$  weergegeven voor zout water.

Uit diverse onderzoeken blijkt dat het zoutgehalte een belangrijke invloed heeft op de grootte van  $u_{*kr}$  (zie figuur 16) voor een droge dichtheid  $\rho_d > 300$  kg/m<sup>3</sup>.

Samenvattend blijkt uit [3] en [8] dat slib wordt geërodeerd als de optredende schuifspanningssnelheid  $u_{*b}$  groter is dan de kritische schuifspanningssnelheid  $u_{*kr}$  volgens:

$$u_{*kr} \approx \rho_d \cdot 10^{-4} \quad \text{[m/s]} \quad (2.4)$$

waarin:  $\rho_d$  = droge dichtheid [kg/m<sup>3</sup>]  
= concentratie droge stof [g/l]

Als de droge dichtheid echter groter wordt dan  $\rho_d = 300$  kg/m<sup>3</sup> gaat het verband voor zout water niet meer op.

### 2.4

#### Stromingsgedrag van slib op de bodem

Bij stromingsgedrag van slib op de bodem kunnen we een tweetal aspecten onderscheiden:

- stroming ten gevolge van externe factoren zoals waterstroming en golfwerking;
- stroming ten gevolge van de invloed van de zwaartekracht.

### 2.4.4 Slibstroming ten gevolge van externe factoren

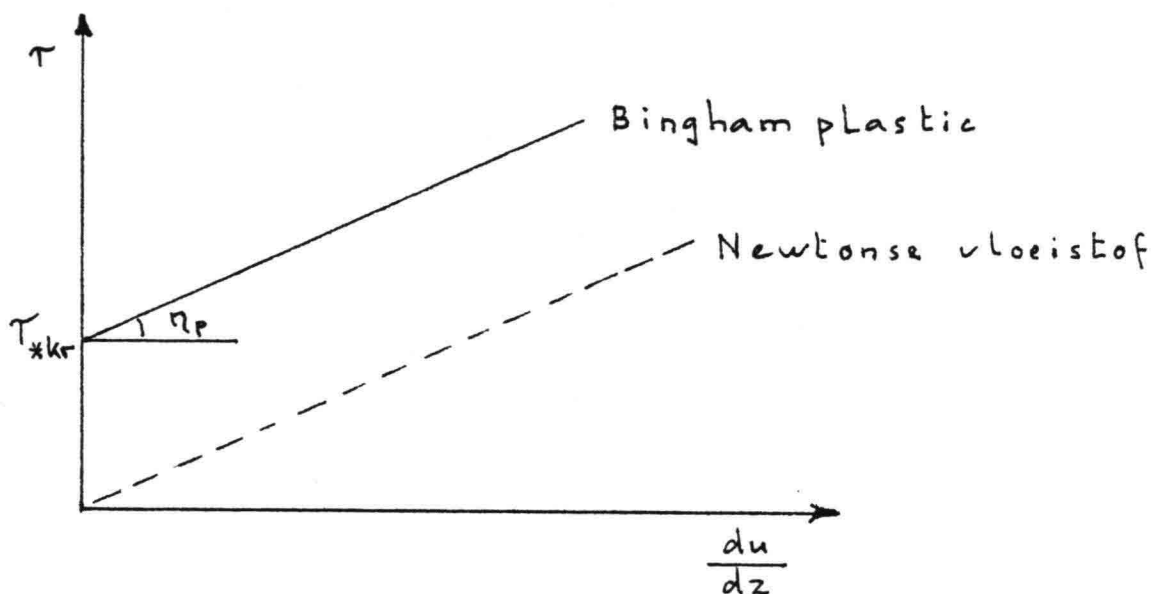
Uit proeven op slib met een viscositeitsmeter blijkt dat we bij benadering te maken hebben met een Binghamse stof. De rheologische vergelijkingen voor een Binghamse stof zijn:

$$\frac{du}{dz} = 0 \quad \text{voor} \quad \tau \leq \tau_{*kr}$$

$$\tau = \tau_{*kr} + \eta_p \frac{du}{dz} \quad \text{voor} \quad \tau > \tau_{*kr}$$

Zie figuur

$\eta_p$  = plastische viscositeit



Het slib stroomt als de bezwijkschuifspanning voor slibstroming  $\tau_{*kr}$  is overschreden. Uit de bezwijkschuifspanningen zijn kritieke schuifspannings-snelheden voor het begin van slibstroming te bepalen volgens [8]:

$$u_{*s} = \sqrt{\frac{\tau_{*kr}}{\rho_w}} \quad (2.5)$$

In figuur 17 is de kritieke schuifspanningssnelheid voor slibstroming  $u_{*s}$  vergeleken met die voor erosie  $u_{*kr}$ . De conclusie is dat eerst erosie optreedt en pas als de schuifspanningssnelheid toeneemt kan er sprake zijn van slibstroming.

Volgens berekeningen [8] blijkt dat de meebewegende sliblaagdikte klein is, maar sterk toeneemt bij een kleine toename van de schuifspanning.

De snelheid aan de bovenzijde van de sliblaag neemt dan sterk toe. Mogelijk ontstaan door onderlinge beïnvloeding van het water met het slib golven in het grensvlak.

2.4.2 Slibstroming ten gevolge van de invloed van de zwaartekracht

Als de slibstroom de diffusor verlaat zal deze zich als een dichtheidsstroom radiaal over de bodem verspreiden. Tot op een bepaalde afstand vanaf de diffusor zal er sprake zijn van een lopende kop waarachter ten gevolge van turbulentie enig materiaal in suspensie zal gaan. Voorwaarde is wel dat de diffusor ook zodanig ontworpen is dat de specie vrijwel niet ontmengt (klein Froudegetal; subkritische uitstroming).

Volgens onderzoek lit. [6] zal dan  $\pm 98\%$  van het slib in de slibstroom blijven voor concentraties  $> 10 \text{ g/l}$ ;  $\pm 2\%$  zal in suspensie gaan.

Op grotere afstand zal de kop steeds minder geprononceerd zijn, de turbulentie neemt af, en ook het suspenderend vermogen neemt af.

$t = t_1$                        $t = t_2$                        $t = t_3$                        $t = t_4$



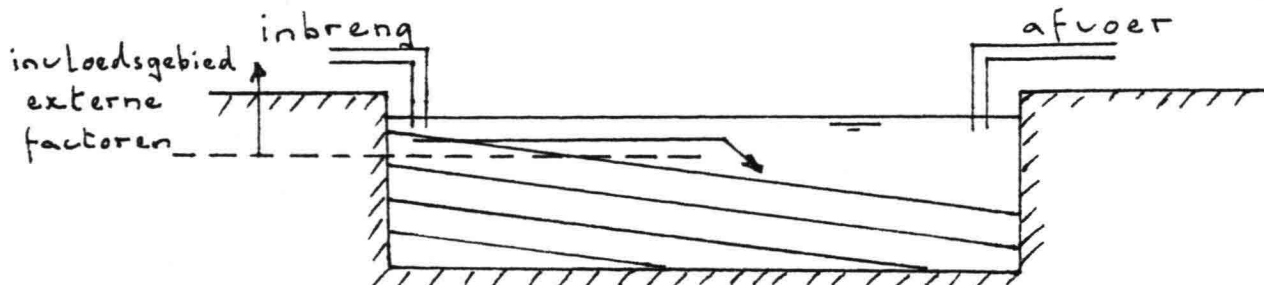
Een en ander hangt ook af van de bodemhelling ter plaatse; slibstromen tegen een opgaande helling zullen sneller vertragen dan slibstromen op een neergaande helling.

Uit onderzoek [6] en [8] blijkt dat voor hellingen  $< 1:80$  de loopsnelheid vrijwel constant is ( $\approx 0,1$  à  $0,3 \text{ m/s}$ ).

Uiteindelijk zal de sliblaag zich instellen op een evenwichtshelling van ca.  $1:100$  à  $1:500$ .

Concluderend kunnen we stellen dat er in het bassin een laagsgewijze opbouw plaatsvindt onder evenwichtshelling, totdat de slibbodem op dat niveau komt dat externe factoren, golven, stroming, een rol gaan spelen. Vanaf dat niveau zullen de externe factoren een afvlakkende werking uitoefenen; zie principeschets + figuur 17.

Principeschets



2.5 Consolidatie

Bij toename van de dichtheid van de bovenste laag ten gevolge van consolidatie moet gedacht worden aan perioden van enkele weken en meer, zie lit. [3]. Een toename in dichtheid van 1200 kg/m<sup>3</sup> tot bijvoorbeeld 1210 kg/m<sup>3</sup> zal + 2 weken duren. In deze tijd zal ten gevolge van het continu inbrengen van slib de bodem met een nieuwe laag bedekt zijn. Uit kwantitatieve beschouwingen blijkt, dat zelfs erosie ten gevolge van zware storm niet in staat is om zoveel te eroderen, dat een laag bereikt wordt die een zekere consolidatiegraad bezit. De dichtheid van de bovenste laag wordt dan ook bepaald door de dichtheid van het slib uit de diffusor, en dan vooral door de dichtheid van de zich radiaal van de diffusor verspreidende laag.

Globaal geldt voor de dichtheid van de bovenste laag de dichtheid in [kg/m<sup>3</sup>] van het mengsel in de persleiding - 50 [kg/m<sup>3</sup>]. De dichtheid van de bovenlaag zal ten gevolge van enige menging namelijk iets lager liggen dan de dichtheid in de persleiding (een en ander bij toepassing van optimale diffusortechniek).

3. Hydraulische eigenschappen van het bassin

Hiernavolgend zullen verschillende aspecten behandeld worden met betrekking tot de eigenschappen van het bassin.

Deze aspecten zijn:

- stromingscondities/dichtheidsverschillen/windgolven;
- kwaliteit van het retourwater.

3.1 Stromingscondities/dichtheidsverschillen/windgolven

Ten gevolge van slibstorting zal het bassinvolume afnemen, het niveau van de bodem komt hoger te liggen. Als een bepaalde bodemhoogte bereikt is, zullen windgolven en circulatiestromen erosie kunnen veroorzaken.

De bepaling van golfhoogten en -karakteristieken zal geschieden met behulp van lit. [13] "Zeegolven van Groen en Dorrestein" en lit. [14] "Shore Protection Manual".

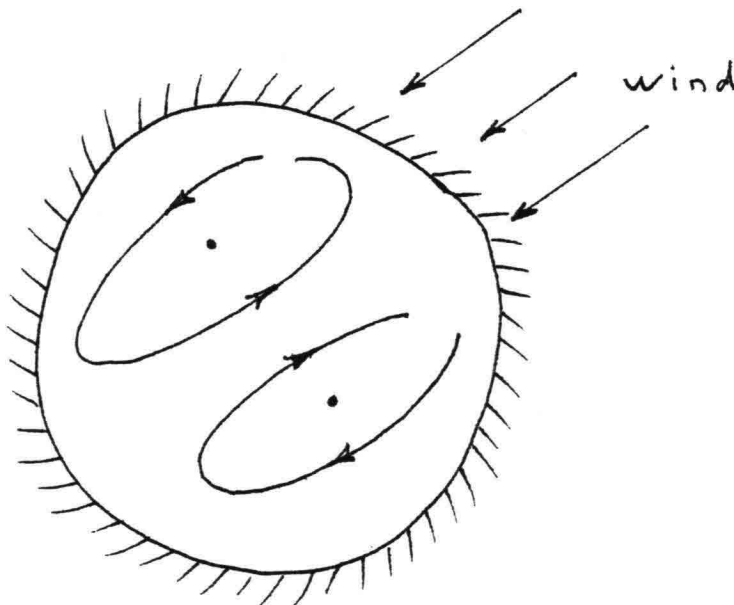
Voor windgegevens en hun kans van voorkomen zie § 8.1 en bijlage 2. Strijk lengten worden bepaald door opmetingen van kaarten van de "Projectgroep Grootschalige Locatie Berging Baggerspecie, Rijkswaterstaat, directie Benedenrivieren".

De optredende stromingen, dichtheden en windgolven staan in direct verband met elkaar. Elk van deze invloeden zal nu apart behandeld worden.

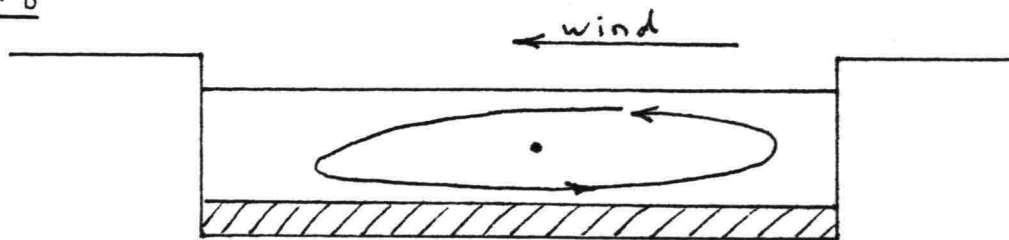
3.1.1 Circulatiestroming en debietstroming

Ten gevolge van het storten van baggerspecie in het bassin zal er een netto debietstroming in het bassin ontstaan. Ten gevolge van windinvloeden ontstaan circulatiestromingen. De stromingen kunnen zowel plaatsvinden met een verticale (figuur a) als met een horizontale (figuur b) as.

Figuur a

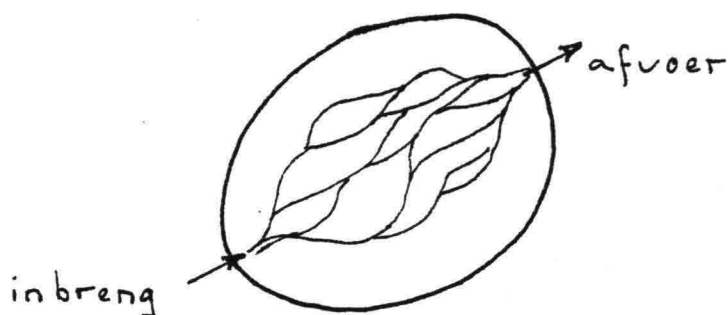


Figuur b



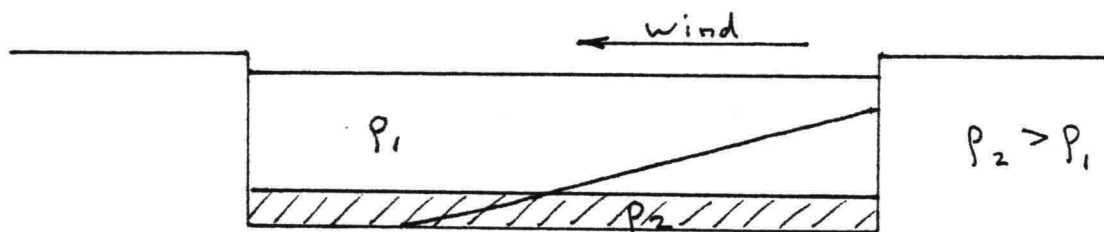
3.1.2 Kortsluitstromingen

Bij grotere ondiepten zal de stroom zich als het ware concentreren in "geulen" in plaats van stroming over het gehele bassin.



3.1.3 Dichtheidsverschillen

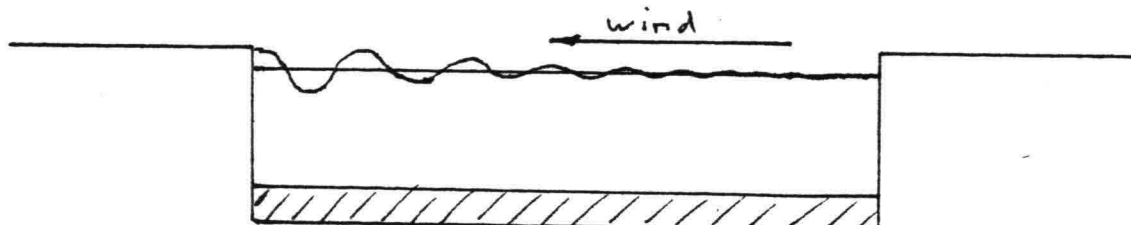
Als in een tweelagenstructuur de dichtheidsverschillen klein zijn, kan ten gevolge van externe invloeden het grensvlak gaan hellen:



Aangezien de dichtheidsverschillen niet klein zijn, zal dit verschijnsel niet optreden.

3.1.4 Windgolven

Ten gevolge van windinvloeden zullen zich in het bassin golven ontwikkelen:



### 3.2 Kwaliteit van het retourwater

De kwaliteit van het retourwater wordt bepaald door een tweetal factoren, te weten:

- concentraties van opgeloste stoffen;
- concentratie van gesuspendeerde deeltjes.

#### 3.2.1 Concentratie van opgeloste stoffen

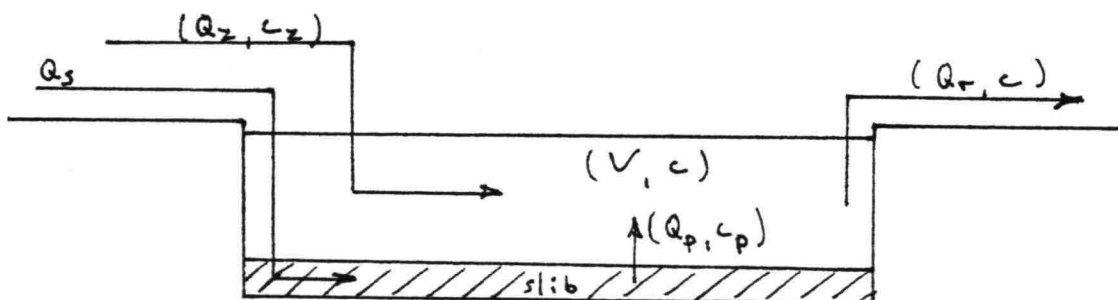
Voor de bepaling van de concentraties van opgeloste stoffen zal gebruik gemaakt worden van een model zoals beschreven in lit. [3] en lit. [11].

De concentraties van verontreinigingen in het water zullen veranderen doordat door inklinking van de ingebrachte baggerspecie poriënwater met daarin opgeloste verontreinigingen in het bovenstaande water terechtkomen. Hieronder wordt een model opgesteld voor het bepalen van deze concentraties.

De gebruikte symbolen zijn:

$Q_z$	= doorspoeldebiet	(m <sup>3</sup> /s)
$Q_p$	= debiet uittredend poriënwater	(m <sup>3</sup> /s)
$c_z$	= concentratie in het doorspoelwater	(mg/l)
$c_p$	= concentratie in het poriënwater	(mg/l)
$c$	= concentratie in het bassinwater	(mg/l)
$V$	= watervolume van het bassin	(m <sup>3</sup> )
$Q_s$	= stortdebiet van het slib	(m <sup>3</sup> /s)
$Q_r$	= overstortdebiet	(m <sup>3</sup> /s)
$V_o$	= watervolume op tijdstip $t = 0$	(m <sup>3</sup> )
$c_o$	= concentratie in het water op $t = 0$	(mg/l)
$V_s$	= totaal slibvolume na het storten van het slib	(m <sup>3</sup> )

Er wordt uitgegaan van een volledig gemengd systeem



Het bassin wordt gevuld met slib, met een debiet van  $Q_s$  m<sup>3</sup>/s. Hierdoor zal het waterniveau in het meer stijgen, hetgeen gecompenseerd moet worden door water over te storten. Nadat het slib in het meer is gebracht, gaat het consolideren, waardoor poriënwater met een debiet  $Q_p$  m<sup>3</sup>/s zal uittreden. Aangenomen wordt, dat dit poriënwater direct gemengd wordt met het bassinwater. Het watervolume in het meer boven de sliblaag zal afnemen ten gevolge van het storten van slib. Deze afname is gelijk aan  $(Q_s - Q_p)$  m<sup>3</sup>/s. Eventueel kan het concentratieverloop in het bassin beheerst worden door water in het bassin te pompen met een debiet  $Q_z$  m<sup>3</sup>/s. Deze hoeveelheid water moet extra overgestort worden om het waterniveau in het bassin constant te houden. Het concentratieverloop in het meer wordt bepaald door het opstellen van massabalansen voor het water boven het slibniveau en voor in het water aanwezige stoffen.

Massabalans voor een in het water aanwezige stof:

$$\frac{d(Vc)}{dt} = Q_p c_p + Q_z c_z - Q_r c \quad (3.1)$$

Volumebalans voor het water boven het slibniveau:

$$\frac{dV}{dt} = Q_p + Q_z - Q_r \quad (3.2)$$

Omdat het waterniveau gelijk moet blijven is

$$Q_r = Q_s + Q_z \quad (3.3)$$

$$\text{Dan is } \frac{dV}{dt} = - (Q_s - Q_p) \quad (3.4)$$

$$V \frac{dc}{dt} + c \frac{dV}{dt} = Q_p c_p + Q_z c_z - (Q_z + Q_s)c \quad (3.5)$$

Neem aan:

1. de hoeveelheid uittredend poriënwater is constant in de tijd

$$\frac{dQ_p}{dt} = 0$$

2. de kwaliteit van het poriënwater is constant in de tijd

$$\frac{dc_p}{dt} = 0$$



Dan volgt uit (3.4) en de randvoorwaarde, dat op  $t = 0$   $V = V_0$ :

$$V = V_0 - (Q_s - Q_p) t \quad (3.6)$$

Na uitwerking en uit de randvoorwaarde, dat op  $t = 0$   $c = c_0$  volgt voor de concentratie  $c$  ten tijde  $t$ :

$$c = \left( \frac{Q_p c_p + Q_z c_z}{Q_z + Q_p} \right) - \left( \frac{Q_p c_p + Q_z c_z}{Q_z + Q_p} - c_0 \right) \left[ \frac{V_0 - (Q_s - Q_p) t}{V_0} \right]^{(Q_z + Q_p) / (Q_s - Q_p)} \quad (3.7)$$

Stel:

$$\begin{aligned} Q &= Q_z + Q_p \\ B &= Q_s - Q_p \\ M &= Q_p c_p + Q_z c_z \end{aligned}$$

Dan wordt:

$$c = \frac{M}{Q} - \left( \frac{M}{Q} - c_0 \right) \left( \frac{V_0 - B t}{V_0} \right)^{Q/B} \quad (3.8)$$

Voor deze situatie is formule 3.8 algemeen geldig, omdat wanneer geen slib gestort wordt, het watervolume van het meer weer toeneemt als gevolg van inklinking van het slib:

$$\frac{dV}{dt} = + Q_p$$

### 3.2.2 Concentratie van gesuspendeerde slibdeeltjes

De processen die onder andere het suspensiegedrag van de slibdeeltjes bepalen zijn beschreven in § 3.1. Deze processen zijn:

- circulatiestroming en netto debietstroming;
- kortsluitstromingen;
- windgolven.

Voor de beschrijving van het suspensiegedrag van de slibdeeltjes in het bassin zullen een aantal aannamen en vereenvoudigingen gedaan worden (zie § 3.4).

Ter bepaling van de concentratie van gesuspendeerde slibdeeltjes zal gebruik gemaakt worden van een eendimensionaal diffusiemodel.



$$\text{Alg. verg. } \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \varepsilon \frac{\partial c}{\partial y} + w c \right) \quad (3.9)$$

waarin:  $c$  = slibconcentratie [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\varepsilon$  = turbulente diffusiecoëfficiënt [m<sup>2</sup>/s]  
 $w$  = valsnelheid slibdeeltjes [m/s]

De valsnelheid  $w$  is afhankelijk van de deeltjesgrootte.

We kunnen in principe twee gevallen onderscheiden:

- sedimentatie/erosie ongeconsolideerd slib;
- erosie geconsolideerd slib.

Een duidelijke grens tussen beide gevallen is niet precies aan te geven. Uit onderzoek lit. [3] blijkt dat voor  $\rho_s$  op de bodem  $< \text{ca. } 1200 \text{ kg/m}^3$  de kritieke schuifspanningssnelheid relatief gering is (zie ook § 2.3); we spreken van ongeconsolideerd slib. Voor  $\rho_s > \text{ca. } 1200 \text{ kg/m}^3$  neemt de kritieke schuifspanningssnelheid sterk toe; we spreken van geconsolideerd slib.

In hoofdstuk 2 is al een beschouwing over de dichtheid van het slib op de bodem opgenomen; deze dichtheid zal ten hoogste ca.  $1200 \text{ kg/m}^3$  zijn.

### 3.2.2.1 Randvoorwaarde vrij oppervlak

Als randvoorwaarde aan het vrije oppervlak geldt ( $y = h$ ), dat het transport gelijk aan nul is:

$$\varepsilon \frac{\partial c}{\partial y} + wc = 0 \quad (3.10)$$

### 3.2.2.2 Randvoorwaarde aan de bodem

Sedimentatie: zie literatuur [20], [21], [22] en [23].

Als randvoorwaarde op de bodem ( $y = 0$ ) voor sedimentatie wordt gekozen:

$$\varepsilon \frac{\partial c}{\partial y} + wc = Awc \quad (3.11)$$

$A$  is de waarschijnlijkheid (kans) dat een bezinkend deeltje op de bodem blijft.

- Lit. [20] geeft voor  $A \approx 0,2$  en vindt dat variatie van  $A$  niet veel invloed heeft op de concentratie bij het oppervlak.
- Lit. [22] geeft een coëfficiënt  $\alpha = 1-A$ ,  $\alpha$  varieert van 0,65 tot 0,90 ( $A = 0,10$  tot  $0,35$ ).
- Lit. [23] laat  $A$  nog afhangen van een verhouding schuifspanning/kritische schuifspanning volgens

$$A = \left( 1 - \frac{u_{*b}^2}{u_{*kr}^2} \right)$$

waarin  $u_{*b}$  = optredende schuifspanningssnelheid op de bodem in m/s

$u_{*kr}$  = kritische schuifspanningssnelheid van de bodem in m/s.

Voor dit verslag zal als randvoorwaarde aan de bodem voor sedimentatie voor

$$A = \left( 1 - \frac{u_{*b}^2}{u_{*kr}^2} \right)$$

gehanteerd worden met een minimale waarde A van 0,2.

Erosie: zie literatuur [23], [24], [25] en [26].

Als randvoorwaarde aan de bodem voor het erosieverschijnsel zouden twee theorieën gehanteerd kunnen worden.

a. Partheniades

Hierbij wordt ervan uitgegaan dat de bodem een zodanige dichtheid heeft dat er een kritische schuifspanning ontwikkeld wordt. Voor het transport aan de bodem wordt dan gesteld:

$$\varepsilon \frac{\partial c}{\partial y} + w_c = -M \left[ \left( \frac{u_{*b}}{u_{*kr}} \right)^2 - 1 \right] \quad \begin{array}{l} \text{voor } u_{*b} > u_{*kr} \\ \text{voor } u_{*b} < u_{*kr} \end{array} \quad (3.12)$$

$$= 0$$

waarin M een constante is.

Lit. [23] is pessimistisch over praktische toepassing door de vele onbekenden en onduidelijkheden.

Lit. [25] geeft M = 1,7 - 2 g/m<sup>2</sup>/s maar ook 10 x lagere waarden, zie lit. [26] komen voor.

b. Entrainmenttheorie

Hierbij wordt aangenomen dat de lagen zich als het ware gedragen als dikke vloeistoffen zonder dat een kritische schuifspanning aanwezig is.

De entrainmentsnelheid ten gevolge van wind (snelheidsdaling grensvlak) bedraagt voor zoet-zoutgelaagdheid, lit. [24]:

$$w_e \approx B \frac{u_{*o}^3}{\rho_s g h} \quad \left( \text{mits } \frac{u_{*o}^2}{\rho_s g h} < ca \ 1 \right) \quad (3.13)$$

We nemen aan dat formule (3.13) ook geldt voor een gelaagdheid van water met slib (zie ook § 4.2).

waarin:

$u_{*o}$  = schuifspanningssnelheid ten gevolge van wind aan het oppervlak in m/s

$$\Delta \rho = \frac{\rho_k - \rho_w}{\rho_k} \cdot c$$

$\rho_k$  = dichtheid droge stof, 2500 kg/m<sup>3</sup>

$\rho_s$  = dichtheid slib in kg/m<sup>3</sup>

$\rho_w$  = dichtheid water in kg/m<sup>3</sup>

c = concentratie slibdeeltjes in kg/m<sup>3</sup>

B = empirische coëfficiënt [dimensieloos].

Volgens lit. [24] is  $B = 0,07$ .

Volgens Wu [39] is  $B = 0,23$  (te hoog).

Literatuur [27] laat  $B$  van de diepte afhangen; uit metingen wordt afgeleid dat voor een diepte van 15 m geldt  $B \approx 0,02$  en voor een diepte van 5 m  $B \approx 0,13$ .

Dit verschil is mogelijk te verklaren uit het feit dat golfwerking bij grotere ondiepte een rol gaat spelen.

Een eenduidig verband tussen waterdiepte met  $B$  is nog niet vastgelegd. Daarom zal voor  $B$  een constante waarde van 0,07 lit. [24] aangehouden worden.

Formule (3.13) houdt alleen rekening met de windschuifspanning ten gevolge van wind over het oppervlak.

Bij wind over grotere strijklengten zullen golven ontwikkeld worden die ook invloed zullen uitoefenen op de entrainmentsnelheid.

Voor het schatten van de entrainmentsnelheid ten gevolge van golven wordt gebruik gemaakt van experimentele resultaten verkregen met turbulentie ten gevolge van een oscillerend rooster [28]. De r.m.s.-waarde en lengteschaal van de turbulentie worden vervangen door overeenkomstige grootheden van de golfbeweging aan de bodem.

Ten gevolge van golfwerking (mits  $\frac{\overline{u^2}}{\frac{\Delta p}{\rho_s} g L} < 0,6$ )

$$\sqrt{\frac{w_e}{\overline{u^2}}} \approx 2 \left( \frac{\overline{u^2}}{\frac{\Delta p}{\rho_s} g L} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (3.14)$$

waarin  $\overline{u^2} = \overline{(u - \bar{u})^2}$

$u$  = stroomsnelheid in m/s (praktisch nul)

$\bar{u}$  = is snelheid op bodem ten gevolge van orbitaalbeweging golf

$L$  = orbitaallengte op de bodem in m

$$\overline{u^2} = \bar{u}^2$$

waarin:  $\bar{u} = \sin x \cdot u_{\max}$

$u_{\max}$  = maximale orbitaalsnelheid op bodem

$$\bar{u}^2 = \sin^2 x \cdot u_{\max}^2 \Rightarrow \overline{u^2} = \frac{1}{2} u_{\max}^2$$

We nemen aan dat de verschijnselen van entrainment ten gevolge van windschuifspanning en ten gevolge van golfwerking elkaar niet beïnvloeden, ze zijn als stochastisch onafhankelijk te beschouwen. Daarom kunnen zij gesommeerd worden.

$$w_e = B \frac{u_{*0}^3}{\frac{\Delta p}{\rho_s} g h} + \sqrt{2} \left( \frac{\frac{1}{2} u_{\max}^2}{\frac{\Delta p}{\rho_s} g L} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot u_{\max} \text{ [m/s]} \quad (3.15)$$

Dus als randvoorwaarde op de bodem ( $y = 0$ ) voor erosie met beschrijving volgens het entrainmentmodel geldt:

$$\begin{aligned} \mathcal{E} \frac{\partial c}{\partial y} + w c &= - w_e \cdot c = \\ &= - B \frac{\rho_k \rho_s}{\rho_k - \rho_w} \frac{u_{*0}^3}{g h} - \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{c}} \left( \frac{\rho_k \rho_s}{\rho_k - \rho_w} \cdot \frac{\frac{1}{2} u_{\max}^2}{g L} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot u_{\max} \end{aligned} \quad (3.16)$$

De factor  $\frac{\rho_k \rho_s}{\rho_k - \rho_w}$  ontstaat omdat we de entrainmentsnelheid  $w_e$

omwerken naar een transport.

Uit globale beschouwingen blijkt dat de bijdrage van de tweede term vrijwel te verwaarlozen is t.o.v. de eerste, dus uiteindelijk:

$$\mathcal{E} \frac{\partial c}{\partial y} + w c = - B \frac{\rho_k \rho_s}{\rho_k - \rho_w} \frac{u_{*0}^3}{g h} \quad (3.17)$$

Er wordt gekozen voor de benadering met behulp van het entrainmentmodel; zie ook § 4.2.

### 3.3

#### Algemene beschouwingen

De diepte van het bassin zal in de loop van de tijd afnemen. Dit heeft gevolgen voor alle in § 3.1 beschreven verschijnselen. Het is vooralsnog niet mogelijk om de combinatie van horizontale circulatiestroom, verticale circulatiestroom, debietstroom te beschrijven. Elk van deze processen echter zal een bepaalde invloed uitoefenen op de concentraties.

Daarbij komt dan nog het verschijnsel dat ook de tweelagenstructuur water-specie invloed zal uitoefenen op de erosie waarbij dan ook weer de "tweelagenstructuur" niet helemaal opgaat; de dichtheid van de specielaag neemt met de diepte toe.

De invloed van windgolven zal slechts over een gedeelte van het bassin optreden.

De verticale turbulente diffusiecoëfficiënt  $\mathcal{E}$  is afhankelijk van alle hiervoor beschreven verschijnselen. Het is vooralsnog niet mogelijk de invloed van turbulentie ten gevolge van golfwerking goed in de diffusiecoëfficiënt  $\mathcal{E}$  te verwerken. In § 4.4 zal een nadere beschouwing van  $\mathcal{E}$  plaatsvinden.

Gezien het grote aantal variabelen benodigd voor de beschrijving van de optredende sedimenttransporten is het niet mogelijk met behulp van handberekeningen uitspraken te doen met betrekking tot de kwaliteit van het retourwater. Ook bij gebruik van numerieke methoden dient men erop bedacht te zijn geen schijnbare nauwkeurigheid na te streven; bepaalde verschijnselen zijn (nog) niet in modellen weer te geven.

Getracht zal worden door het aanbrengen van bepaalde vereenvoudigingen en aannamen een handzaam numeriek model te ontwikkelen waarmee conclusies getrokken kunnen worden met betrekking tot de kwaliteit van het retourwater. Het model moet met behulp van metingen geverifieerd worden.

3.4

#### Aannamen en vereenvoudigingen

- Circulatiestromen met een verticale as worden verwaarloosd. Bij een homogeen windveld (= over heel het gebied dezelfde windsnelheid uit dezelfde richting en constant in de tijd) en vrijwel horizontale bodem is het optreden van circulatiestromen met een verticale as niet waarschijnlijk.
- Het verschijnsel kortsluitstroming zal buiten beschouwing gelaten worden. Het is niet voorspelbaar hoe en wanneer en waar golvorming op zal treden.
- Debietstromingsinvloeden worden verwaarloosd. De invloed van debietstroming zal pas bij grotere ondiepten (bijvoorbeeld  $< 1$  m waterdiepte) een rol gaan spelen. Tegen die tijd zal ten gevolge van moeilijk kwantificeerbare processen zoveel onduidelijkheid in het verschijnsel optreden dat wiskundige beschrijving ervan op zich dan al moeilijk wordt.
- De dichtheid van de bovenlaag van de bodem varieert (zie ook hoofdstuk 2) van 1100 tot 1200 kg/m<sup>3</sup>, De dichtheid van het water zal (na enige tijd)  $\approx 1005$  kg/m<sup>3</sup> (saliniteit  $\approx 6000$  mg/l) bedragen, dit is ongeveer de saliniteit van het poriënwater dat ontsnapt uit het gestorte havenslib.
- De valsnelheid  $w$  varieert volgens lit. [9] van 0,1 tot  $1 \cdot 10^{-3}$  m/s. Voor de valsnelheid van Botlekslib in het Oostvoornse Meer (saliniteit  $\approx 10.000$  mg/l) wordt  $1,0 \cdot 10^{-3}$  m/s gehanteerd [3].

4. Numeriek model voor de bepaling van het concentratieverloop van gesuspendeerde deeltjes

Voor de bepaling van het concentratieverloop van gesuspendeerde slibdeeltjes in het bassin zal een eendimensionaal numeriek model beschreven worden waarbij uitgegaan wordt van de theorie zoals beschreven in § 3.2.2.

De algemene vergelijking van het eendimensionaal diffusiemodel is als volgt:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \mathcal{E} \frac{\partial c}{\partial y} + w c \right) \quad (4.1)$$

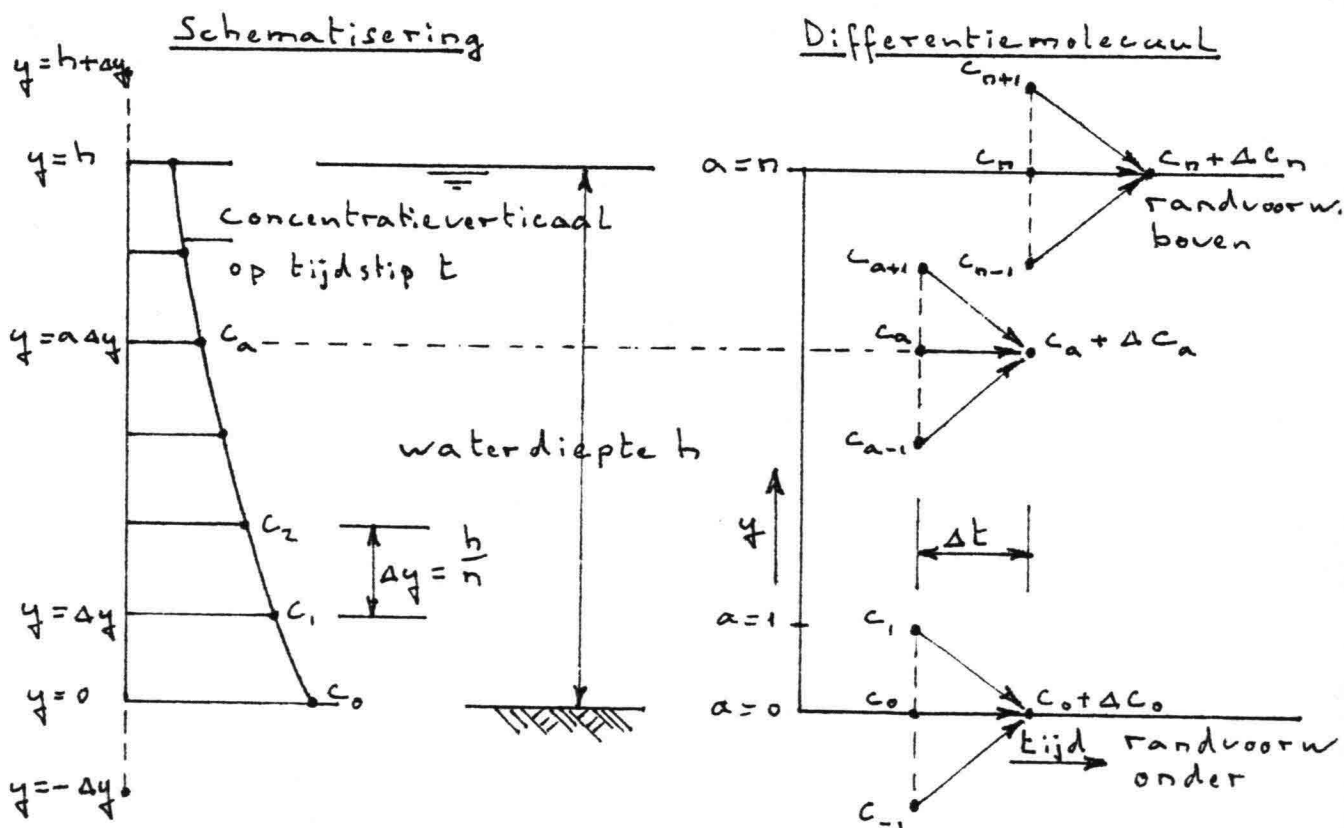
hierin is:

- $c$  = concentratie gesuspendeerde slibdeeltjes [kg/m<sup>3</sup>]
- $w$  = valsnelheid deeltjes, afhankelijk van deeltjesgrootte, saliniteit, enz. [m/s]
- $\mathcal{E}$  = turbulente diffusiecoëfficiënt, over de diepte constant verondersteld [m<sup>2</sup>/s]

Het volgende expliciete differentieschema wordt gehanteerd (zie ook figuur a):

$$\frac{\Delta c_a}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta y} \left\{ \mathcal{E} \left( \frac{c_{a+1} - c_a}{\Delta y} \right) + \left( \frac{w_{a+1} c_{a+1} + w_a c_a}{2} \right) - \mathcal{E} \left( \frac{c_a - c_{a-1}}{\Delta y} \right) - \left( \frac{w_a c_a + w_{a-1} c_{a-1}}{2} \right) \right\} \quad (4.2)$$

Figuur a



hierin is:

$c_a$  = concentratie gesuspendeerde slibdeeltjes  
 op hoogte  $y = a\Delta y$  [kg/m<sup>3</sup>]  
 $h$  = totale waterdiepte [m]  
 $n$  = aantal stappen waarin de verticaal verdeeld is.

Hieruit volgt:

$$\Delta c_a = \frac{\Delta t}{\Delta y} \left\{ \varepsilon \left( \frac{c_{a+1} - c_a}{\Delta y} \right) + \left( \frac{w_{a+1} c_{a+1} + w_a c_a}{2} \right) - \varepsilon \left( \frac{c_a - c_{a-1}}{\Delta y} \right) - \left( \frac{w_a c_a + w_{a-1} c_{a-1}}{2} \right) \right\} \quad (4.2)$$

In een tijdje  $\Delta t$  vindt een toename (of afname) van de deeltjesconcentratie plaats met  $\Delta c_a$ .

Voor de deeltjes concentratie  $c_a$  op tijdstip  $t + \Delta t$  geldt:

$$c_a(t + \Delta t) = c_a(t) + \Delta c_a \quad (4.3)$$

#### 4.1 Randvoorwaarde aan het vrije oppervlak

Als randvoorwaarde aan het vrije oppervlak ( $y = h$ ) (zie "Hydraulische eigenschappen van het bassin" § 3.2.2.1) geldt:

$$\varepsilon \frac{\partial c}{\partial y} + wc = 0 \quad (4.4)$$

In differentievorm wordt dit:

$$\varepsilon \frac{c_{n+1} - c_{n-1}}{2 \Delta y} + w_n c_n = 0$$

$$\text{of } c_{n+1} = c_{n-1} - \frac{2 \Delta y}{\varepsilon} w_n c_n \quad (4.5)$$

#### 4.2 Randvoorwaarde aan de bodem

Zie ook "Hydraulische eigenschappen van het bassin" § 3.2.2.2.

Sedimentatie

$$\varepsilon \frac{\partial c}{\partial y} + wc = A wc \quad (4.6)$$



waarin  $A = \left(1 - \frac{u_{*b}^2}{u_{*kr}^2}\right)$  mits het rechter lid  $> 0,2$ . Als dat niet zo is, dan  $A = 0,2$ .

$u_{*b}$  = optredende schuifspanningssnelheid aan de bodem in m/s.

$u_{*kr}$  = kritieke schuifspanningssnelheid van het bodem-materiaal in m/s.

### Erosie

Als randvoorwaarden aan de bodem voor het erosieverschijnsel zouden twee theorieën gehanteerd kunnen worden, te weten:

Partheniades: is van toepassing bij stroming van water langs een bodem waarbij turbulentie aan de bodem wordt opgewekt.

Entrainment-benadering:

kan toegepast worden in het geval dat ten gevolge van windschuifspanning turbulentie aan het vrije wateroppervlak opgewekt wordt. Deze turbulentie diffundeert naar de bodem en veroorzaakt daar een verticaal transport van slib. De invloed van windgolven wordt verwaarloosd (zie § 3.2.2.2).

Uit voorgaande beschouwingen is reeds gebleken dat debietstroming een ondergeschikte rol speelt. Voor de situatie in de slufter zal daarom de entrainmentbenadering gehanteerd worden (zie ook § 3.2.2.2.). Dan geldt:

$$\varepsilon \frac{\partial c}{\partial y} + w_c = -B \frac{\rho_k \rho_s}{\rho_k - \rho_w} \frac{u_{*0}^3}{g h} \quad (4.7)$$

waarin:  $\rho_k$  = dichtheid droge stof ( $= 2500$ ) [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\rho_s$  = dichtheid slib [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\rho_w$  = dichtheid water [kg/m<sup>3</sup>]  
 $h$  = waterdiepte [m]  
 $u_{*0}$  = schuifspanningssnelheid aan het oppervlak in m/s  
 $B$  = empirische coëfficiënt ( $= 0,07$ ) [ - ]

Ook wordt gesteld dat de verschijnselen sedimentatie en erosie elkaar niet beïnvloeden. Dit houdt in dat als randvoorwaarde aan de bodem voor de volgende uitdrukking gekozen wordt:

$$\varepsilon \frac{\partial c}{\partial y} + w_c = A w_c - B \frac{\rho_k \rho_s}{\rho_k - \rho_w} \frac{u_{*0}^3}{g h} \quad (4.8)$$

Door Onishi lit. [32] wordt een soortgelijke aanpak gehanteerd met het verschil dat voor het erosieverschijnsel Partheniades toegepast wordt.

(4.8) wordt in differentievorm:

$$\varepsilon \frac{c_1 - c_0}{2 \Delta y} + w_0 c_0 = A w_0 c_0 - B \frac{\rho_k \rho_s}{\rho_k - \rho_w} \frac{u_{*0}^3}{g h} \quad (4.9)$$

Opm. Voor de entrainmentbenadering geldt dat de lagen als vloeistof beschouwd worden zonder dat zij een kritische schuifspanningssnelheid  $u_{*kr}$  bezitten. In de coëfficiënt A wordt echter wel gerekend met een zekere kritische schuifspanningssnelheid  $u_{*kr}$ . Ook uit praktijkmetingen blijkt dat zelfs vers bezonken slib al een zekere kritische schuifspanningssnelheid bezit. Op het eerste gezicht is dit dus een niet-consequente benadering van het probleem. We moeten ons echter realiseren dat turbulente diffusie van het wateroppervlak naar de bodem een statistisch verschijnsel is, het is een zeldzame gebeurtenis. Voor de berekening nemen we echter aan dat de optredende bodemschuifspanningen over heel het bodemoppervlak van toepassing zijn, en dat als de kritische bodemschuifspanning overschreden wordt, er slibdeeltjes in suspensie gaan. De hoeveelheid die in suspensie gaat, hangt sterk af van de grootte van de optredende bodemschuifspanningssnelheden. Aangezien de optredende schuifspanningssnelheden lokaal fluctueren, en niet uniform over heel het bodemoppervlak optreden, moeten zij veel hoger zijn dan de theoretisch gemiddelde schuifspanningen. De kritieke schuifspanningssnelheid van de bodem zal vergeleken met de werkelijk optredende schuifspanningssnelheid tijdens menging te verwaarlozen zijn. In dat geval is de entrainmenttheorie aanvaardbaar want zij veronderstelt eveneens dat de lagen geen kritische schuifspanningssnelheid bezitten. Zo wordt dus het ongunstigste geval beschouwd.

4.3 Schuifspanningssnelheden  $u_{*o}$  en  $u_{*b}$

Voor de schuifspanningssnelheid in de entrainmentbenadering wordt de schuifspanningssnelheid ten gevolge van wind over het wateroppervlak genomen.

Volgens lit. [15]

$$\tau_o = \tau_s + \tau_w \quad (4.11)$$

$\tau_o$  = schuifspanning op lucht-watergrensvlak gerelateerd aan windsnelheidsprofiel.

$\tau_s$  = schuifspanning op lucht-watergrensvlak gerelateerd aan watersnelheidsprofiel

$\tau_w$  = bijdrage door winddruk op de aanwezige golven.

Volgens Stewart lit. [39] bedraagt de drukcomponent  $\approx 20\%$  van de oppervlakteschuifspanning, of

$$\tau_w = 0,2 \tau_o$$

$$\text{of } \tau_o = \tau_s + 0,2 \tau_o \quad (4.12)$$

$$\tau_s = 0,8 \tau_o$$

De schuifspanningssnelheid van de driftstroom aan het wateroppervlak is gedefinieerd als

$$u_{*o}^2 = \frac{\tau_s}{\rho_w} = \frac{0,8 \tau_o}{\rho_w} \quad (4.13)$$

Voor de door de wind opgewekte schuifspanning wordt gesteld:

$$\tau_o = C_z \cdot \rho_a \cdot u_w^2 \quad (4.14)$$

waarin:  $u_w$  = windsnelheid op 10 m hoogte

$\rho_a$  = dichtheid lucht = 1,2 kg/m<sup>3</sup>

$C_z$  = windschuifspanningscoëfficiënt [ - ]

Voor  $C_z$  geldt [39]

$$5 < u_w < 15 \text{ m/s} \quad C_z = 0,0007 u_w^{0,3}$$

met een minimum van 0,0008 en een maximum van 0,0020.

Voor de schuifspanningssnelheid aan het wateroppervlak geldt dan (4.13) + (4.14):

$$u_{*o} = \sqrt{\frac{0,8}{\rho_w} \cdot C_z \cdot 1,2 \cdot u_w^2} \quad (4.15)$$

Voor de optredende schuifspanningssnelheid op de bodem  $u_{*b}$  geldt:

$$u_{*b} = \sqrt{\frac{\tau_b}{\tau_s}} u_{*o} \quad (4.16)$$

De verhouding  $\tau_b/\tau_s$  bedraagt volgens Francis lit. [40] 0,015.

Volgens Hjelström lit. [40] varieert de verhouding van 0,15 - 0,8.

Door lit. [41] wordt 0,1 aangenomen. Aangenomen wordt:

$$u_{*b} = \sqrt{0,1} u_{*o} \quad (4.17)$$

#### 4.4 Turbulente diffusiecoëfficiënt

We nemen aan dat de diffusiecoëfficiënt  $\mathcal{E}$  constant is over de diepte.

Voor de diffusiecoëfficiënt  $\mathcal{E}$  wordt gebruik gemaakt van de betrekking:

$$\mathcal{E} = \frac{h}{15} \cdot u_* + 0,02 \frac{H^2}{T} \quad (4.18)$$

bijdrage wind-                      bijdrage  
schuifspanning                      golfwerking

waarin:

$\mathcal{E}$  = turbulente diffusiecoëfficiënt                      [m<sup>2</sup>/s]  
h = waterdiepte    [m]  
 $u_*$  = grootste schuifspanningssnelheid  
vrij oppervlak of bodem hier  $u_{*0}$                       [m/s]  
H = golfhoogte    [m]  
T = golfperiode    [s]  
0,02 = empirische coëfficiënt lit. [20]                      [-]

#### 4.5 Stabiliteit van het numerieke model

Als stabiliteitscriterium van de gewone diffusievergelijking geldt:

$$\text{tijdstep } \Delta t \leq \frac{\Delta y^2}{2\mathcal{E}}$$

De valsnelheid  $w$  is relatief klein, zodat de invloed ervan op het stabiliteitscriterium verwaarloosbaar is.

#### 4.6 Nauwkeurigheid van het numeriek model

Een methode voor de controle van de nauwkeurigheid is de stapgrootten  $\Delta t$  en  $\Delta y$  voor eenzelfde situatie te variëren.  $\Delta t$  en  $\Delta y$  moeten zo klein gekozen worden dat de resultaten er niet meer afhankelijk van zijn (convergentie).

5. De diffusor

Hierna volgend zal een beschouwing plaatsvinden met betrekking tot de invloed van de diffusor op het suspensiegedrag in het bassin.

Tevens zal globaal bekeken worden waar de specie het best ingebracht kan worden, en waar het retourwater het best onttrokken kan worden.

5.1 De invloed van de diffusor  
-----

Per dag wordt in het bassin + 30.000 m<sup>3</sup> slib ingebracht. Als de slibstroom de diffusor verlaat zal deze zich als een dichtheidsstroom radiaal over de bodem verspreiden.

Volgens lit. [6] zal dan maximaal 2,5% in suspensie gaan, dus

$$\frac{2,5}{100} \cdot 30000 = 800 \text{ m}^3.$$

De dichtheid van de slibstroom uit de diffusor bedraagt ongeveer 1200 kg/m<sup>3</sup>. De droge dichtheid is dan  $\approx$  300 kg/m<sup>3</sup>, dus

$$800 \cdot 300 = 240.000 \text{ kg/dag}$$

gaat in suspensie in het bassin.

We nemen aan dat er gelijkmatige verspreiding plaatsvindt.

Het oppervlak van het bassin bedraagt ongeveer

$$300 \text{ ha} = 300 \cdot 10^4 \text{ m}^2.$$

De diepte bedraagt bijvoorbeeld 2 m.

De bijdrage tot de slibconcentratie ten gevolge van de diffusor bedraagt dan per dag:

$$\frac{240.000}{600 \cdot 10^4 \cdot 1000} = 40 \text{ mg/l}$$

Uit globale beschouwingen blijkt, dat bij opstekende storm de sedimentconcentratie in enkele uren van 0 naar bijvoorbeeld 100 mg/l kan oplopen.

De extra slibconcentratiebelasting ten gevolge van de diffusor bedraagt over die paar uur enkele (2 à 3) mg/l.

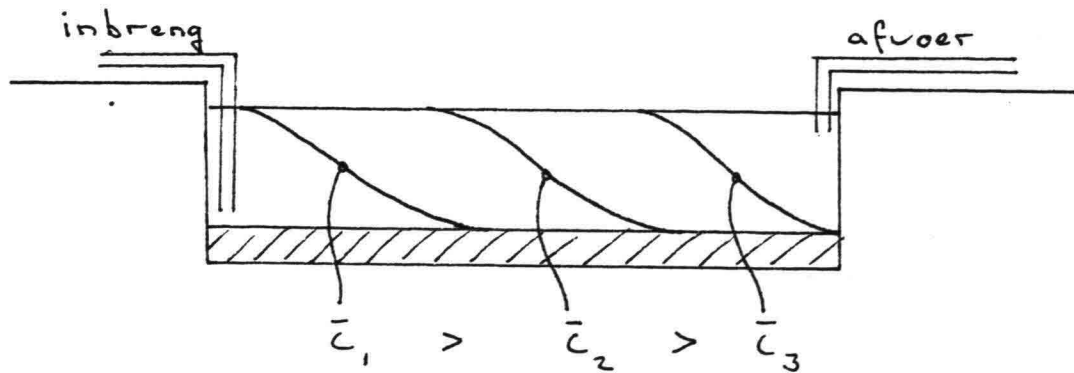
Als de storm gaat liggen, zal de concentratie in korte tijd ook weer kunnen afnemen met tientallen mg/l, met andere woorden uit deze beschouwing blijkt, dat de invloed van gesuspenseerd slib ten gevolge van inbreng met behulp van de diffusor, duidelijk ondergeschikt is aan de invloed van suspensiegedrag ten gevolge van wind.

5.2 Locatiekeuze inbreng en uitvoer  
-----

We kunnen in principe twee situaties onderscheiden.

1. Rustige omstandigheden; geen wind.

In dit geval zal er stratificatie in langsrichting optreden ten aanzien van het concentratieverloop in het bassin.

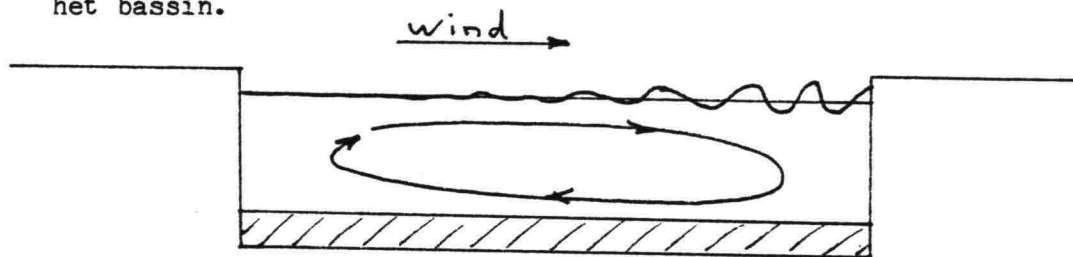


De concentraties zijn relatief laag.

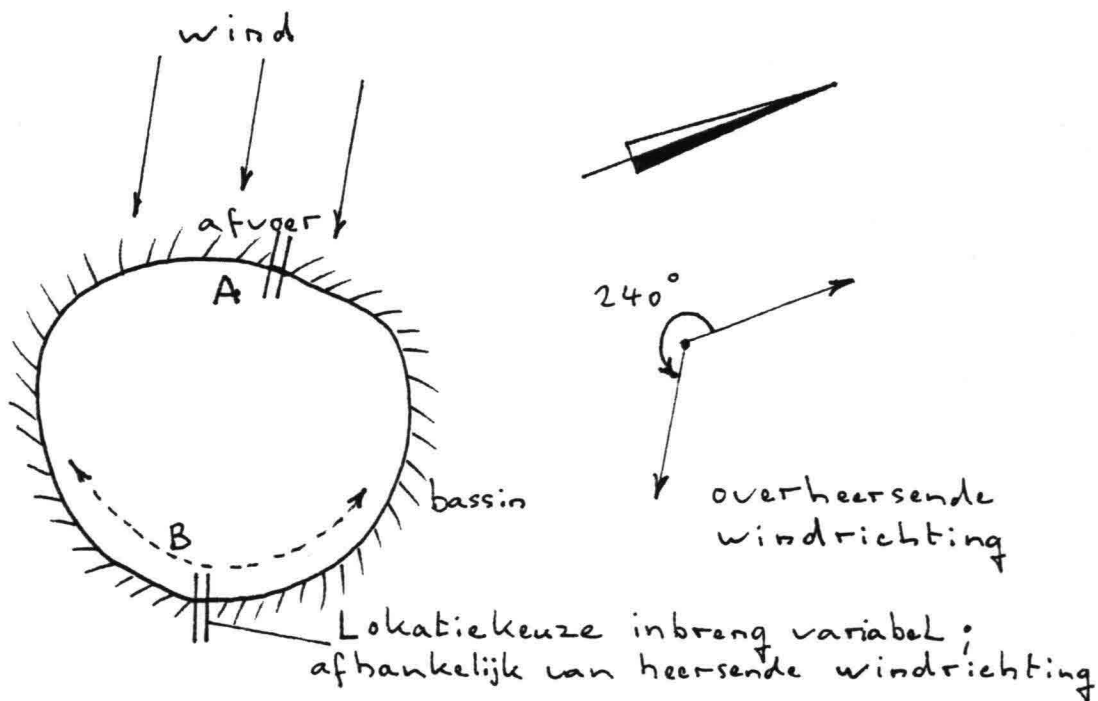
Randvoorwaarde (1). De uitlaat moet zo ver mogelijk van de diffusor verwijderd zijn.

2. Aanwezigheid van wind.

Ten gevolge van circulatiestroom + golfwerking zal er slib in suspensie gaan. De golfinvloed is afhankelijk van de plaats in het bassin.



Locatiekeuze: strijklengte zo kort mogelijk, uit beschouwing van de tekeningen van de verschillende alternatieven blijkt dat hier weinig variatie in zit; overheersende windrichting tussen 210° en 270° t.o.v. het noorden.



De golfwerking in het bassin ter plaatse van punt A is het kleinst, ter plaatse van punt B het grootst; dus de concentratie ter plaatse van A is het kleinst.

Randvoorwaarde (2). De uitlaat ter plaatse van punt A.

5.3. Conclusie

De invloed van de diffusor op het suspensiegedrag in het bassin is van ondergeschikt belang in vergelijking met externe factoren (wind). Het is wel zo dat ten gevolge van het extra suspensievermogen (inbreng met diffusor = bron) de evenwichtssituatie bij beginvoorwaarde  $c = 0$ , een fractie van de tijd eerder bereikt wordt en ook iets hoger zal liggen. Voor de volledigheid zal de invloed van de diffusor als bronterm ingevoerd worden in het numerieke model.

Algemene formule:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \varepsilon \frac{\partial c}{\partial y} + w c \right) + BD \quad (4.1)$$

Bronterm BD:

- per dag ten gevolge van invoertechniek in suspensie (zie § 5.1): 240.000 kg;
- inhoud bassin = oppervlak ( $\approx 300$  ha) maal diepte h.

Dan gaat per seconde in suspensie (per m<sup>3</sup>):

$$BD = \frac{240.000}{24.3600 \cdot 300 \cdot 10^4 \cdot h} \text{ kg/s}$$

Het uiteindelijk differentieschema is dan als volgt:  
(zie ook hoofdstuk 4)

$$\Delta c_a = \frac{\Delta t}{\Delta y} \left\{ \varepsilon \left( \frac{c_{a+1} - c_a}{\Delta y} \right) + \left( \frac{w_{a+1} c_{a+1} + w_a c_a}{2} \right) - \varepsilon \left( \frac{c_a - c_{a-1}}{\Delta y} \right) - \left( \frac{w_a c_a + w_{a-1} c_{a-1}}{2} \right) \right\} + BD \cdot \Delta t \quad (5.1)$$

Verdere optimalisatie ten aanzien van inbrengtechniek lijkt overbodig; de bestaande inbrengtechniek met behulp van diffusoren voldoen goed. Een betere inbreng, waarbij nog minder slib in suspensie gaat, heeft een te verwaarlozen invloed ten aanzien van het suspensiegedrag in het bassin.

6. Praktijkgeval numeriek model

Om na te gaan wat de praktische waarde is van het numeriek model zoals beschreven is in de hoofdstukken 4 en 5 worden er testprogramma's uitgevoerd. De berekeningen hebben betrekking op slibgehalten in de Westeinderplas.

De berekeningen zijn uitgevoerd op de Harris H 800 van Gemeentewerken Rotterdam in de taal Fortran.

De testen die uitgevoerd worden zijn de volgende:

- a. controle met behulp van analytische methode.

In de evenwichtssituatie wordt voldaan aan de vergelijking

$$\epsilon \frac{dc}{dy} + w c = 0$$

Geïntegreerd met een bekende randvoorwaarde op de bodem geeft dit:

$$c = c_b e^{-\frac{wy}{\epsilon}} \tag{6.1}$$

- waarin  $c_b$  = concentratie op de bodem [kg/m<sup>3</sup>]  
(zie § 6.1.1)
- $w$  = valsnelheid korrel [m/s]
- $\epsilon$  = turbulente diffusiecoëfficiënt [m<sup>2</sup>/s]
- $y$  = plaatshoogte vanaf bodem, omhoog positief [m]

De evenwichtssedimentatieverticaal volgens het numerieke model moet voldoen aan bovenstaand analytisch bepaald evenwichtsverloop.

- b. Controle door middel van vergelijking van numeriek bepaalde resultaten met praktijkmetingen.  
In de Westeinderplas zijn metingen gedaan naar het concentratieverloop over de diepte bij bekende omstandigheden; windsnelheid en richtingen zijn dus gegeven.  
De waarden verkregen met de numerieke simulatie zullen vergeleken worden met de praktijkmetingen.
- c. Gevoeligheidsanalyse; wat is de invloed van het variëren van de diverse parameters.
- d. Controle of verschillende beginvoorwaarden na verloop van tijd dezelfde evenwichtsconcentraties opleveren.  
Dus zowel een beginconcentratie kleiner dan de evenwichtsconcentratie (bijvoorbeeld  $c = 0$  over hele verticaal) als groter moeten, na kortere of langere tijd dezelfde evenwichtsconcentratie opleveren.
- e. Transport door grensvlak moet gelijk zijn aan wat er in de sedimentverticaal bijgekomen of afgegaan is.
- f. Convergentiesnelheid voor verschillende tijdstappen  $\Delta t$  en stapgrootten  $\Delta y$  moet gelijk zijn.



6.1 Controleberekening Westeinderplas

Als testgeval wordt de situatie op de Westeinderplas beschouwd. Metingen en omstandigheden waaronder deze verricht zijn, zijn bekend zie lit. [15].

De metingen zijn verricht op donderdag 8 mei 1980.

De effectieve strijklengte  $F_{eff}$  bedroeg  $\approx 1125$  m.

De windsnelheid bedroeg  $\approx 7$  m/s over meerdere uren.

De significante golfhoogte  $\approx 0,20$  m.

De periode  $T \approx 1,4$  s.

De dichtheid van het water  $\rho_w$  bedraagt  $1005$  kg/m<sup>3</sup>.

De dichtheid van de bodem  $\rho_s$  bedraagt  $1200$  kg/m<sup>3</sup>.

De waterdiepte bedraagt  $2,80$  m.

Concentratie van slibdeeltjes van de bodem  $300$  kg/m<sup>3</sup>.

Tijdstapgrootte  $\Delta t = 16$  s.

Stapgrootte  $\Delta y = 0,4$  m.

De beginconcentratie  $c$  over heel de verticaal is nul.

Er worden zoveel tijdstappen genomen tot dat de evenwichtsconcentratie bereikt is.

6.1.1 Controleberekening met behulp van analytische methode

Met behulp van het numerieke model wordt, uitgaande van bekende gegevens (zie § 6.1) de evenwichtssituatie voor de Westeinderplas bepaald (zie bijlage 3). De deeltjesconcentratie  $c_b$  op de bodem bedraagt dan  $25,4$  mg/l.

Met behulp van formule 6.1 wordt dan de concentratie in de verticaal analytisch bepaald. De deeltjesconcentraties volgens het numerieke model en volgens de analytische uitwerking worden weergegeven in tabel 1.

Tabel 1

hoogte h boven bodem	numerieke uitwerking (zie bijlage 3)	analytische uitwerking (volgens formule (6.1))
0,00 [m]	25,4 [mg/l]	25,4 [mg/l]
0,40	24,9	24,9
0,80	24,4	24,4
1,20	23,9	24,0
1,60	23,5	23,5
2,00	23,0	23,0
2,40	22,6	22,6
2,80	22,1	22,2

De waarden van de numerieke uitwerking van de evenwichtsverticaal komen goed overeen met de analytische uitwerking.

6.1.2 Controle door middel van vergelijking met praktijkmetingen in de Westeinderplas

Op de Westeinderplas zijn er tijdens de omstandigheden zoals beschreven in § 6.1 op verschillende diepten metingen verricht. De omstandigheden op 8 mei 1980 variëren niet veel over meerdere uren. Aangenomen wordt dat uiteindelijk de evenwichtssituatie bereikt is. Uit de metingen bleek ook dat de variatie van de concentraties uiteindelijk gering werden.

De deeltjesconcentraties volgens het numerieke model en volgens de praktijkmetingen worden weergegeven in tabel 2.

Tabel 2

hoogte h boven bodem	numerieke uitwerking (zie bijlage 3)	praktijkmeting
0,00 [m]	25,4 [mg/l]	26 [mg/l]
0,80	24,4	24
2,80	22,1	26

De waarden van de numerieke uitwerking van de evenwichtsverticaal komen goed overeen met de praktijkmetingen.

6.2 Algemene beschouwing

- In de gemeten waarden bedraagt de absolute onnauwkeurigheid 6 mg/l.
- Halvering van tijdstapgrootte  $\Delta t$  geeft vrijwel dezelfde resultaten.
- Halvering van stapgrootte  $\Delta y$  geeft vrijwel dezelfde resultaten.
- Zowel beginvoorwaarde kleiner dan de evenwichtsconcentratie (bijvoorbeeld  $c = 0$  over hele verticaal) als beginvoorwaarde groter dan de evenwichtsconcentratie geven na verloop van tijd dezelfde evenwichtsconcentratie.
- Ten tijde van de metingen (8 en 9 mei 1980) schijnt er sprake geweest te zijn van algen in de bovenlaag.  
Dit zou een reden kunnen zijn waarom de concentratie in de praktijkmeting iets toeneemt bij het oppervlak.

Globaal geldt dus dat voor de Westeinderplas voor een diepte kleiner dan  $\approx 3,00$  m een aantal stappen van  $\approx 7$  voldoet als daarbij dan ook het stabiliteitscriterium  $\Delta t \leq \Delta y^2 / 2E$  Een daarbij ook nog eens  $\frac{1}{2} \Delta t$  stapgrootte vrijwel gelijke resultaten geven. Voor ondieper dan bijvoorbeeld 2,00 m zullen weer nieuwe beschouwingen gemaakt moeten worden.

Als beginvoorwaarde kan elke willekeurige situatie gegeven worden; de beginconcentratie als functie van de diepte moet ingelezen worden. Als we de evenwichtssituatie willen weten, maakt het niet uit wat als beginconcentratie ingevoerd wordt (opmerking: een negatieve concentratie kan niet ingelezen worden); uiteindelijk zal na verloop van tijd dezelfde evenwichtsverticaal verkregen worden. Het tijdstip waarop die evenwichtsverticaal bereikt wordt is echter wel afhankelijk van de beginvoorwaarde; een gegeven beginverticaal die al in de buurt van de evenwichtsverticaal ligt, zal veel sneller de evenwichtssituatie opleveren dan een beginverticaal die ver van de evenwichtsverticaal af ligt.

### 6.3 Tekortkomingen van het numeriek model

Ondanks het feit dat de eerste resultaten redelijk te noemen zijn, dient opgepast te worden voor teveel optimisme. Er is sprake van zo'n groot scala van (niet te bepalen) onbekenden dat er nog noodzakelijk teveel aannamen en empirische benaderingswijzen toegepast moeten worden. Zwakke punten in het numerieke model zijn:

- turbulente diffusiecoëfficiënt  $\epsilon$   
Met name de invloed van golfwerking is moeilijk te beschrijven;
- schuifspanningssnelheid aan oppervlakte wordt bepaald met onder andere empirische constanten. Uit gevoeligheidsanalyse blijkt dat de invloed van  $u_{*0}$  aanzienlijk is (3e macht in bepaling entrainmentsnelheid  $w_e$ );
- schuifspanningssnelheid op de bodem. Volgens literatuur geldt  $u_{*b} = \sqrt{0,1}$  tot  $\sqrt{0,01}$  maal  $u_{*0}$ .  
In het numerieke model is de bovengrens  $u_{*b} = \sqrt{0,1} u_{*0}$  genomen.  
Ook de invloed van  $u_{*b}$  is aanzienlijk (2e macht in de bepaling van kans A (zie § 3.2.2.2));
- de kritieke schuifspanningssnelheid op de bodem hebben we constant genomen (behorende bij een dichtheid van bijvoorbeeld 1200 kg/m<sup>3</sup>). Het is niet helemaal duidelijk hoe  $u_{*kr}$  zich in de tijd precies ontwikkeld evenals de optredende schuifspanningssnelheid  $u_{*b}$  die ook constant genomen is en die waarschijnlijk ook afhangt van de variatie in de concentratie in de tijd. Uit gevoeligheidsanalyse blijkt wel dat variatie van dichtheid van de bodem niet zoveel invloed heeft op het concentratieverloop.

7. Berekening van de concentraties van opgeloste stoffen

De verontreinigingen (zware metalen, PCB's, enz.) kunnen zowel in opgeloste fase als gebonden aan de gesuspendeerde deeltjes voorkomen.

De verontreinigingen die in oplossing zijn zullen hierna volgend bepaald worden met behulp van de methode zoals beschreven in § 3.2.1.

De methode gaat uit van conservatief gedrag.

7.1 Invoergegevens

Voor de concentraties  $c_p$  van de verontreinigingen in het poriënwater wordt gebruik gemaakt van gegevens uit [43] het W.L.-rapport "Modellering Waterkwaliteit van de punt van Heenvliet in relatie tot de voorgenomen berging van havenslib, nr. 1942, oktober 1983" (zie bijlage 4).

Voor de concentratie  $c_o$  van de verontreinigingen in het bassin op  $t = 0$  wordt gebruik gemaakt van gegevens uit [44] het "Kwaliteitsonderzoek in de Rijkswateren Kwartaalverslagen Rijkswaterstaat R.I.D., R.I.V." (zie bijlage 4 "Ontvangend milieu".)

Het watervolume  $V$  van het bassin op  $t = 0$  (tot N.A.P.) bedraagt  $38.10^6$  m<sup>3</sup>.

Er is geen doorspoeldebiet  $Q_z$ .

Het debiet van uittredend poriënwater  $Q_p$  bedraagt 15.000 m<sup>3</sup>/dag.

Er wordt uitgegaan van een volledig gemengd systeem.

7.2 Concentraties van opgeloste stoffen in het retourwater uit de grootschalige locatie

De concentratie van opgeslote stoffen wordt bepaald met de volgende formule:

$$c = \frac{M}{Q} - \left( \frac{M}{Q} - c_o \right) \left( \frac{V_o - B t}{V_o} \right)^{Q/B} \quad (3.8)$$

$$\text{waarin: } Q = Q_p + Q_z = 15.000$$

$$B = Q_s - Q_p = 15.000$$

$$M = Q_p \cdot c_p + Q_z \cdot c_z = 15.000 C_p$$

zodat

$$c = c_p - (c_p - c_o) \left( 1 - \frac{15.000}{38.10^6} t \right) \quad (7.1)$$

Tijd  $t$  in dagen.

Na ongeveer 7 jaar zal het bekken tot N.A.P. opgevuld zijn. De concentraties van opgeloste stoffen zijn weergegeven in bijlage 5.

8. Berekening deeltjesconcentraties in de slufter

Ten aanzien van de bepaling van de kwaliteit van het retourwater zal over een bepaalde periode voor verschillende diepten een aantal simulaties plaatsvinden.

In principe kunnen we twee soorten omstandigheden onderscheiden:

- gemiddelde omstandigheden

De overschrijdingsfrequenties van windsnelheden en windrichting als functie van de tijd voor gemiddelde omstandigheden;

- stormomstandigheden

De overschrijdingsfrequenties van windsnelheden en windrichting als functie van de tijd voor herfst- en winterseizoen.

De door te rekenen periode bedraagt 2 weken.

Bij een langere periode zou de bodemvariatie ten gevolge van slibophoging te groot worden.

De frequentieverdelingen van de windsnelheid en windrichting (distributief in aantallen en in percentages) per seizoen en voor het jaar zijn samengesteld door het K.N.M.I. uit metingen te Hoek van Holland in het tijdvak 1954 tot en met 1970. (zie bijlage 2) Voor de duurregistraties zal gebruik gemaakt worden van metingen verricht door het K.N.M.I. te Hoek van Holland over de periode 1974 tot 1982.

De simulaties zullen voor verschillende diepten doorgerekend worden. Deze diepten zijn 1,50 m, 3,00 m en 4,50 m.

8.1 Windveldverdeling

Uit beschouwingen blijkt dat de windsnelheidsoverschrijdingen voor gemiddelde omstandigheden en voor stormperioden (winterseizoen) niet veel met elkaar verschillen (zie bijlage 2). Voor de simulaties zal gebruik worden gemaakt van een representatieve windveldverdeling over 2 weken voor het winterseizoen (zie bijlage 6 figuur 1).

8.2 Strijk lengten

De grootste effectieve strijk lengten  $F_{eff}$  van de vier varianten I, II, III en IV variëren van 1650-1750 m.

Voor andere richtingen zijn de strijk lengten iets korter maar niet veel. Voor de berekening zal een strijk lengte van 1700 m gehanteerd worden.

8.3 Golfkarakteristieken

Uitgaande van een bekende effectieve strijk lengte  $F_{eff}$ , een bepaalde waterdiepte  $h$ , en een zekere windsnelheid  $u_w$  is het mogelijk golfkarakteristieken  $H_{sig}$  en  $T$  te bepalen (lit. [14]). Deze golfkarakteristieken zijn voor verschillende waterdiepten  $h$  en verschillende windsnelheden  $u_w$  weergegeven in bijlage 7.

#### 8.4 Invoergegevens numeriek model

De gegevens die ingevoerd worden in het numerieke model zijn de volgende (zie ook bijlage 8);

- windveldverdeling; zie bijlage 6 figuur 1;
- golfhoogten en golfperioden behorend bij een bepaalde windsnelheid; zie bijlage 7;
- waterdiepten; 1,50 m, 3,00 m en 4,50 m;
- oppervlakte bassin; 300 ha;
- dichtheid water  $\rho_w = 1005 \text{ kg/m}^3$ ;
- dichtheid slib  $\rho_s = 1200 \text{ kg/m}^3$ ;
- dichtheid korrel  $\rho_k = 2500 \text{ kg/m}^3$ ;
- concentratie slibdeeltjes van de bodem = 300 kg/m<sup>3</sup>;
- bijdrage diffusor (hoofdstuk 5) = 10.000 kg/uur;
- valsnelheid slibdeeltjes; 0,0001 m/s en 0,0005 m/s.

Er vinden simulaties plaats bij 1,50 m diepte, 3,00 m diepte en 4,50 m diepte, en dat bij twee verschillende valsnelheden, de grenzen 0,0001 en 0,0005 m/s. Er zullen dus totaal 6 simulaties plaatsvinden.

#### 8.5 Concentraties slibdeeltjes volgens numeriek model

Het verloop van de over de diepte gemiddelde concentratie  $c$  wordt weergegeven in bijlage 6 figuren 2, 3 en 4.

Voor de tijdstippen 72 uur, 80 uur, 88 uur, 180 uur en 248 uur worden de concentratieverticalen voor de verschillende diepten in bijlage 9 grafisch weergegeven. Voor andere tijdstippen zie bijlage 10.

Uitgaande van de figuren 2, 3 en 4 van bijlage 6 is het mogelijk globale overschrijdingsfrequenties voor de gemiddelde concentratie  $c$  voor verschillende diepten en valsnelheden samen te stellen (zie bijlage 11).

9. Discussie en conclusies

In voorgaande hoofdstukken is getracht een model te ontwikkelen voor het voorspellen van de concentratie van opgeloste stoffen en gesuspendeerde slibdeeltjes in het retourwater uit de "Grootschalige berging baggerspecie" op de Maasvlakte (Slufterplan).

Uit de studie blijkt, dat de variatie van de deeltjesconcentratie over de verticaal gering is. Praktijkmetingen bevestigen dit. In het model zoals beschreven in dit verslag is bij de numerieke uitwerking ook de diepte in een aantal stappen verdeeld. Aangezien de deeltjesconcentratie over de verticaal niet veel varieert is het eenvoudiger om te werken met een dieptegemiddeld model; de deeltjesconcentratie over de verticaal wordt constant genomen. De turbulente diffusie is niet bepalend voor het verloop in de verticaal omdat  $\mathcal{E}$  zo groot is, dat de deeltjesconcentratie over de verticaal hoofdzakelijk wordt bepaald door de randvoorwaarde op de bodem.

Na integratie van (4.1) van  $y = 0$  tot  $y = h$  ontstaat met (4.7) en  $c \approx \bar{c}$

$$h \frac{d\bar{c}}{dt} \approx -A_w \bar{c} + B \frac{\rho_k \rho_s}{\rho_k - \rho_w} \frac{u_{*0}^3}{gh} \quad (9.1)$$

waarin  $\bar{c}$  de gemiddelde concentratie over de verticaal is.

Uit (9.1) volgt de volgende differentiaalvergelijking:

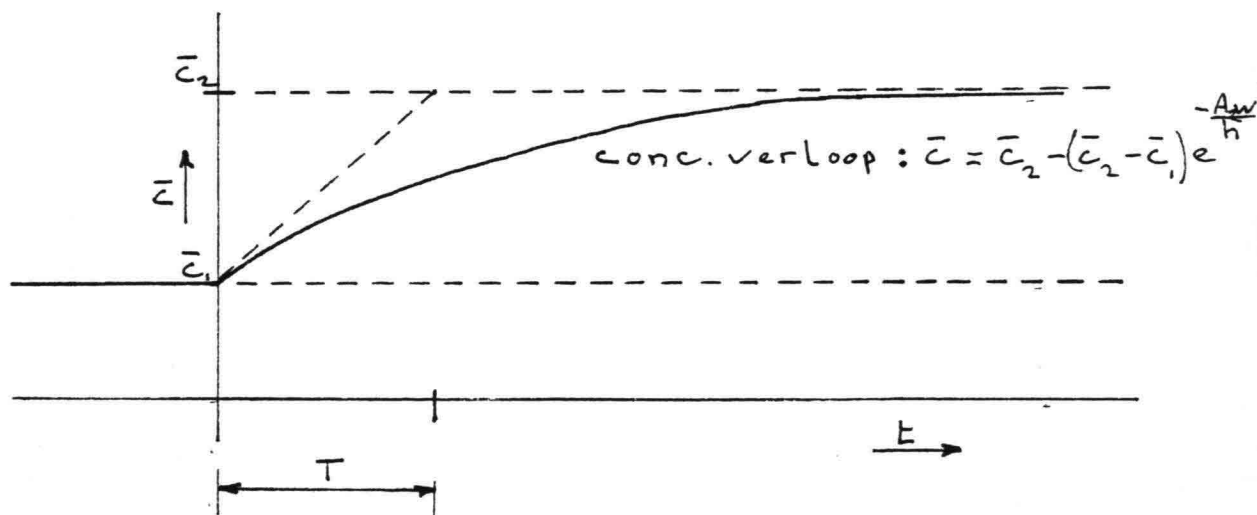
$$\frac{d\bar{c}}{dt} + \frac{A_w}{h} \bar{c} \approx \frac{B}{h} \frac{\rho_k \rho_s}{\rho_k - \rho_w} \frac{u_{*0}^3}{gh}$$

waarin  $\frac{h}{A_w}$  dan een tijdschaal van de aanpassing is bij een verandering van windschuifspanningssnelheid.

Globaal geldt voor het concentratieverloop  $\bar{c}$  bij een plotselinge toename van  $u_{*0}$ :

$$\bar{c} = \bar{c}_2 - (\bar{c}_2 - \bar{c}_1) e^{-\frac{A_w}{h} t}$$

Zie ook figuur.



Stel dat de diepte  $h$  2,50 m bedraagt en de valsnelheid van slibdeeltjes 0,0001 m/s dan zou  $T \approx 7$  uur zijn. In orde van grootte komt deze waarde van  $T$  redelijk overeen met uitkomsten verkregen met het numerieke model (zie bijlage 6, figuur 2,3).

Het onderzoek leidt tot de volgende conclusies.

Het behandelde numerieke model is onvoldoende verifieerd. Het blijkt dat goede praktijkmetingen niet voorhanden zijn. Er zijn wel enkele metingen verricht (Zevenhuizerplas, Westeinderplas, enz.) maar deze zijn zo onvolledig of onnauwkeurig dat we slechts mogen spreken van een globale weergave van de werkelijkheid. Voor deze situaties met bekende omstandigheden (windsnelheid, golfhoogten, enz.) hebben simulaties plaatsgevonden en de uitkomsten van het numerieke model zijn vergeleken met de praktijkmetingen (voor bijvoorbeeld Westeinderplas zie hoofdstuk 6). Het was niet mogelijk het model te verifiëren aan de hand van een groot aantal praktijkmetingen, wat de betrouwbaarheid van het model zou kunnen vergroten. Ook de korte tijdsduur voor de uitvoering van dit deelontwerp (3 maanden) liet verificatie door veel numerieke simulaties niet toe. Ook het verschijnsel van twee- en driedimensionale effecten is niet in dit verslag betrokken. Circulatiestromen om een verticale as zijn verwaarloosd.

De randvoorwaarde op de bodem is een onzekere factor. Omdat de randvoorwaarde op de bodem de concentratie over heel de verticaal bepaalt, zou het zinnig zijn voortgezet onderzoek te plegen.

De invloed van de diffusor ten aanzien van gesuspenderde deeltjes is van ondergeschikt belang, de concentraties van gesuspenderde deeltjes worden hoofdzakelijk bepaald door de externe factor wind.

Omdat de variatie van deeltjesconcentratie over de diepte gering is, is het niet zinvol om selectief af te zuigen.

Uit gevoeligheidsanalyse blijkt dat de slibdeeltjesconcentratie in de verticaal sterk afhankelijk is van de valsnelheid van de slibvlokdeeltjes (zie ook bijlage 6 figuur 2, 3 en 4).

De verontreinigingen in het slib zullen hoofdzakelijk gebonden zijn aan de kleinere korrelfracties in de slibvlokken. De slibvlokken met kleinste valsnelheid zullen het gemakkelijkst in suspensie gaan of blijven.

In het retourwater zullen vooral deze vlokken met kleine valsnelheden vertegenwoordigd zijn.

De concentratie van gesuspenderde deeltjes in het bekken blijkt o.a. afhankelijk te zijn van de wind en waterdiepte (zie bijlage 6). De concentratie van gesuspenderde deeltjes als overschrijdingsfrequentie van de tijd is weergegeven in bijlage 11.

De concentraties van opgeloste stoffen in het bekken worden weergegeven in bijlage 5.

Als voortgezet onderzoek naar de kwaliteit van het retourwater uit de slufter zou bekeken kunnen worden of er een relatie bestaat tussen de valsnelheid van de vlokken en de korrelverdeling in de vlokken. Op deze manier zou er een eenduidige relatie ontstaan tussen het retourwater en de daarin aan de gesuspenderde deeltjes geadsorbeerde verontreinigingen.



Tezamen met de verontreinigingen in oplossing wordt de totale verontreinigingslast op het milieu gegeven.

Als de verontreinigingslast op het milieu te groot wordt, zal een voortgezette zuivering plaats moeten vinden. Aangezien het toepassen van pompen voor de afvoer van het retourwater als randvoorwaarde is gesteld, is het interessant om onderzoek te plegen naar de toepassing van een snelfilter. De kosten die bij een snelfilterinstallatie spelen worden voor een aanzienlijk deel bepaald door de pompinstallatie.

De concentratie van gesuspendeerde slibdeeltjes in het effluent van het snelfilter zal gering zijn (2-10 mg/l).

De aan de slibdeeltjes gerelateerde verontreinigingen zullen dan ook sterk gereduceerd worden in het effluent van het snelfilter.

De concentraties van opgeloste verontreinigingen zullen bij toepassing van een snelfilter niet of nauwelijks gereduceerd worden.

Literatuur

1. Waterloopkundig Laboratorium (1976)  
Onderzoek eigenschappen van slib.  
Vooronderzoek betreffende flocculatie, sedimentatie,  
consolidatie en erosie. Rapport R 988.
2. Waterloopkundig Laboratorium (1980)  
Milieu-chemische aspecten van het storten van  
baggerslib uit de Maasmond, de Botlek- en de  
Waalhaven in het Oostvoornse Meer.  
Rapport M 1501/M 1549.
3. M.K.O.-projectgroep Oostvoornse Meer (1981)  
Bijlagen bij het rapport "Opvulling van het  
Oostvoornse Meer met onderhoudsbaggerspecie".
4. Gemeentewerken Rotterdam (1977)  
Info-slib.
5. Gemeentewerken Rotterdam (1981)  
Toestromen van slib.
6. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station (1978)  
Prediction and control of dredged material dispersion  
around dredging and open-water pipeline disposal  
operations.
7. Rijncommissie Waterleidingbedrijven R.I.W.A. (1979)  
Slib in Rijn en Maas.
8. Cox, C.M. (1981)  
Beschouwing aanslibbingsproblematiek.  
Afstudeerverslag, Technische Hogeschool Delft
9. Migniot, C (1968)  
Etude des propriétés physiques de différents  
sediments très fins et de leur comportement  
sous des actions hydrodynamiques.  
Communication présentée au Comité technique de  
La Société Hydrotechnique de France le  
22 mars 1968.
10. Swart, C.J. (1977)  
Het opvullen van het Oostvoornse Meer met  
baggerspecie.  
Afstudeerverslag Kustwaterbouwkunde  
Technische Hogeschool Delft.
11. Gemeentewerken Rotterdam ( - )  
Openbaar Lichaam Rijnmond.  
Rijkswaterstaat.  
Milieu-aspecten bij het bergen van baggerspecie in  
het slufferspeciedepot.
12. Nedeco (1965)  
Siltation Bangkok Port Channel.  
The Hague.

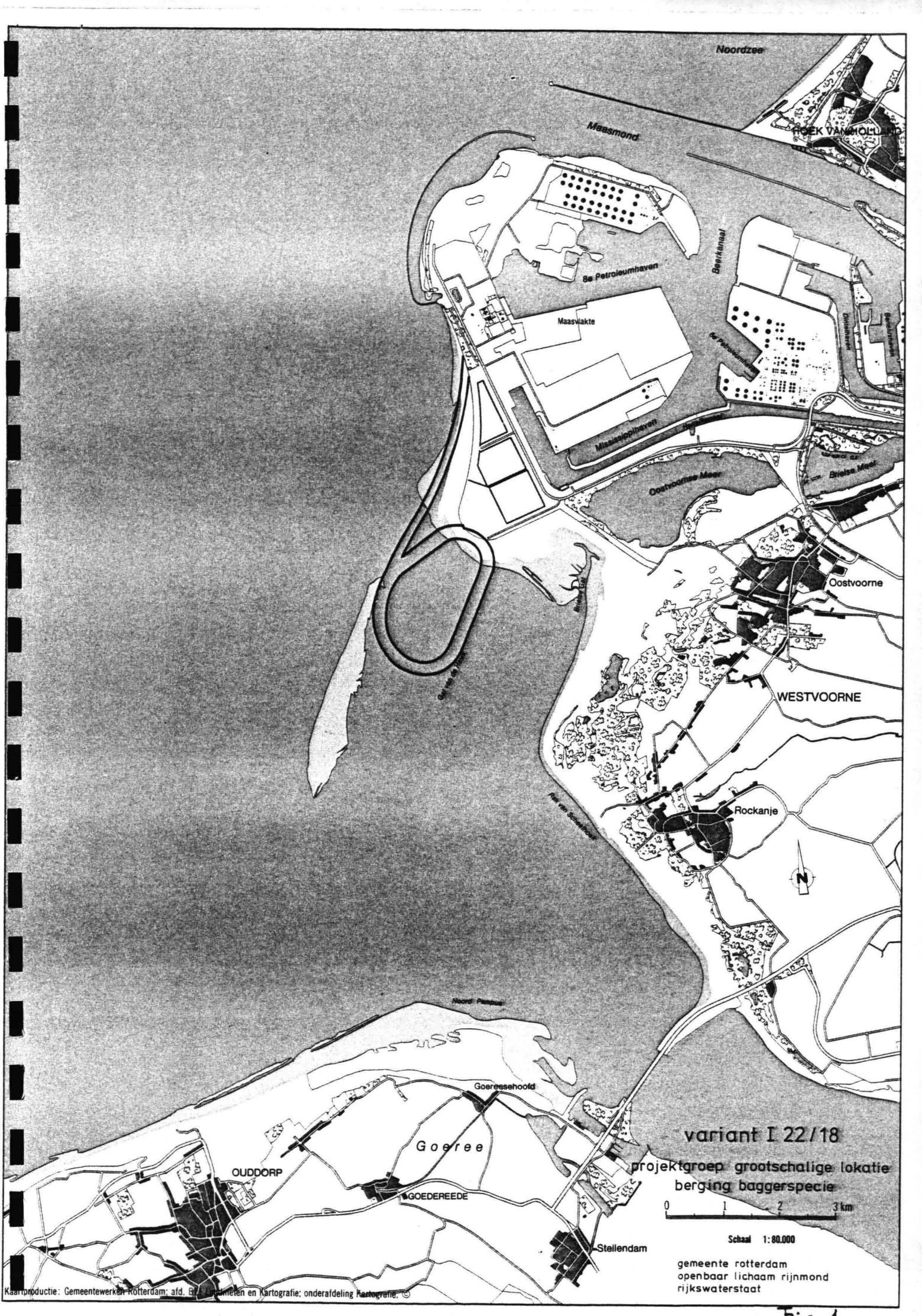
13. Groen, P. en Dorrestein, R (1976)  
Zeegolven.
14. U.S. Army Coastal Engineering Research Center (1975)  
Shore Protection Manual Vol. I, II, III.
15. P.M. van Damme (1980)  
Onderzoek naar een eventueel verband tussen de  
wind en het suspensie-evenwicht in de Westeinderplas.  
Afstudeerverslag vloeistofmechanica,  
Technische Hogeschool Delft.
16. W.L. (1978)  
Morphological computations for suspended  
sediment transport.
17. Lars Bengtsson (1981)  
Circulation in small lakes.  
Water Recour. Eng. Lulea  
Publ. Ser. A nr. 76, 21 pp.
18. NASA-Technical note (1972)  
Effect of Eddy diffusivity on wind-driven  
currents in a two-layer stratified lake.
19. Jacobs, S.J. (1974)  
On wind-driven lake circulation.  
J. of Phys. Oceanography, 4, nr. 3 pp 392-399
20. Jobson, H.E. Sayre, W.W. (1970)  
Predicting concentration profiles in open channels.  
J. Hydr.Div., ASCE 96 HY 10 pp 1983-1996.
21. Harleman, D.R.F. (1971)  
Mathematical Model for Sediment Distribution.  
Proc. 14e Congres IAHR deel 6 pp 350-351.
22. Smith, T.J., O'Connor, B.A. (1977)  
A two-dimensional model for suspended sediment transport.  
Proc. 17e Congres IAHR deel 1 pp 79-86.
23. Cole, P., Miles, G.V. (1983)  
Two-dimensional model of mud transport.  
J. Hydr. Engng. ASCE 109, 1, pp 1-12.
24. W.L. (1974)  
Menging bij een tweelagensysteem veroorzaakt  
door wind.  
Verslag modelonderzoek M 1235.
25. O'Connor, B.A. (1975)  
Sediment intension in a tidal lock.  
Proc. 16e Congres IAHR deel 3 pp 301-308.
26. Cormault, P. (1971)  
Determination experimentale de debit solide  
dérosion de sediments fins cohesifs.  
Proc. 14e Congres IAHR deel 4 pp 9-16.

27. Imberger, J., Patterson, J., Hebbert, R.H.B.,  
Loh, J. (1978)  
Dynamics of reservoir of medium size.  
J. Hydr. Div., ASCE 104<sup>HY5</sup> pp 725-743.
28. Long, R.R., Fernando, H.J.S. (1983)  
The growth of a grid-generated turbulent mixed  
layer in a two-fluid system.  
J. Fluid Mechanics 133 pp 377-395.
29. Hopfinger, E.J., Toly, J.A. (1976)  
Spatially decaying turbulence and its relation to  
mixing across density interfaces.  
J. Fluid Mechanics 78 pp 155-175.
30. Thimakoru, P. (1980)  
An experiment on clay suspension under water waves.  
Proc. 17e Coastel Eng. Couf. Sydney, Vol. III  
pp 2894-2906.
31. Sly, P.O. (1981)  
Sediment/Freshwater interaction.  
Proc. 2nd international symposium, Kingston, June 1981.
32. Onishi, Y. (1981)  
Sediment-Contaminant Transport model.  
J. Hydr. Div. ASCE 107 HY 9 pp. 1089-1107.
33. Sprong, T.A. (1971)  
Onderzoek van menging bij dichtheidsverschillen.  
Afstudeerverslag vloeistofmechanica,  
Technische Hogeschool Delft.
34. Sheng, Y.P. (1980)  
Modeling sediment transport in a shallow lake.  
Marine Science Series, Vol. 11, pp. 299-337.
35. Ali, K.K.M., Pateman, D. (1981)  
Prediction of the circulation in reservoirs.  
Proc. Intn. Civ. Engrs. Part 2 71 pp. 427-461.
36. W.L. (1970)  
Sedimentatie en erosie van sliblagen, M 1034.
37. W.L. (1973)  
Erosiebestendigheid van slib, M1181.
38. Davis, P.G.J., Stam, F. (1978)  
Onderzoek minimalisering kosten onderhoudsbagger-  
werk, onderzoek naar het consolidatiegedrag van  
havenslib, Delft, rapport L.G.M.
39. Wu, J. (1973)  
Prediction of Near-Surface Drift Currents from  
Wind Velocity.  
J. Hydr. Div., Vol 99 HY 9 pp.1291-1302.

40. W.L. (1974)  
Invloed van wind op snelheidsverdeling in  
homogene stromingen, Rapport W 152.
41. W.L. (1978)  
Windeffect on the distribution of velocity and  
temperature in stratified enclosed systems.  
Rapport R 898-2.
42. Valioulis, I.A. (1983)  
Particle collisions and coalescence in fluids.  
W.M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources  
Division of Engineering and Applied Science  
California Institute of Technology  
Pasadena, California  
Report nr. KH-R-44.
43. W.L. (1983)  
Modellering waterkwaliteit van de put van  
Heenvliet in relatie tot de voorgenomen berging  
van havenslib, nr. 1942.
44. Rijkswaterstaat R.I.D., R.I.V. ( - )  
Kwaliteitsonderzoek in de rijkswateren.  
Kwartaalverslagen.

<u>Symbolen</u>		dimensie
A	waarschijnlijkheid dat een bezinkend deeltje op de bodem blijft	(-)
B	constante	(-)
BD	bijdrage diffusor	$(ML^{-3}T^{-1})$
c	concentratie	$(ML^{-3})$
$c_a$	concentratie op de hoogte $a\Delta y$ boven de bodem	$(ML^{-3})$
$c_b$	concentratie op de bodem	$(ML^{-3})$
$c_o$	concentratie op tijdstip $t = 0$	$(ML^{-3})$
$c_p$	concentratie in het poriënwater van het slib	$(ML^{-3})$
$c_z$	concentratie in het doorspoelwater	$(ML^{-3})$
$C_z$	windschuifspanningscoëfficiënt	(-)
$F_{eff}$	effectieve strijklengte	(L)
g	versnelling van de zwaartekracht	$(L^2T^{-1})$
h	waterdiepte	(L)
$H_s$	significante golfhoogte	(L)
L	orbitaalengte op de bodem t.g.v. golfwerking	(L)
M	constante	$(ML^{-2}T)$
n	aantal stappen waarin de verticaal verdeeld is	(-)
$Q_p$	debiet uittredend poriënwater	$(L^3T^{-1})$
$Q_r$	overstortdebiet	$(L^3T^{-1})$
$Q_s$	stortdebiet van het slib	$(L^3T^{-1})$
$Q_z$	doorspoeldebiet	$(L^3T^{-1})$
t	tijd	(T)
T	golfperiode	(T)
u	orbitaalsnelheid op bodem	$(LT^{-1})$
u	stroomsnelheid	$(LT^{-1})$
$u_{max}$	maximale orbitaalsnelheid op bodem	$(LT^{-1})$
$u_w$	windsnelheid op 10 m hoogte	$(LT^{-1})$
$u_{*b}$	bodemschuifspanningssnelheid	$(LT^{-1})$
$u_{*kr}$	kritieke schuifspanningssnelheid	$(LT^{-1})$
$u_{*o}$	oppervlakteschuifspanningssnelheid	$(LT^{-1})$
$u_{*s}$	kritieke schuifspanningssnelheid voor slibstroming	$(LT^{-1})$
V	watervolume van het bassin	$(L^3)$
$V_o$	watervolume op tijdstip $t = 0$	$(L^3)$
$V_s$	totaal slibvolume na het storten van het slib	$(L^3)$
w	valsnelheid slibdeeltjes	$(LT^{-1})$
$w_e$	entrainmentsnelheid/snelheid daling grensvlak	$(LT^{-1})$
y	plaatshoogte vanaf bodem, omhoog positief	(L)
$\epsilon$	turbulente diffusiecoëfficiënt	$(L^2T^{-1})$
$\rho_a$	dichtheid lucht	$(ML^{-3})$
$\rho_d$	droge dichtheid slib	$(ML^{-3})$
$\rho_k$	dichtheid korrel	$(ML^{-3})$
$\rho_s$	dichtheid slib	$(ML^{-3})$
$\rho_w$	dichtheid water	$(ML^{-3})$
$\tau$	coëfficiënt die afhangt van $\rho_k \rho_w$ en c	$(ML^{-3})$
	schuifspanning	$(ML^{-1}T^{-2})$
$T_o$	schuifspanning op het lucht-watergrensvlak gerelateerd aan windsnelheidsprofiel	$(ML^{-1}T^{-2})$

$\tau_{*kr}$	bezwijkschuifspanning voor slibstroming	(ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup> )
$\tau_s$	schuifspanning op lucht-watergrensvlak gerelateerd aan watersnelheidsprofiel	(ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup> )
$\tau_w$	bijdrage schuifspanning door winddruk op de aanwezige golven	(ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup> )
$\Delta t$	tijdstap	(T)
$\Delta y$	hoogte stap	(L)
$\eta_p$	plastische viscositeit	(ML <sup>-1</sup> T <sup>-1</sup> )



Noordzee

Maasmond

De Petroleumhaven

Maasvlakte

Mississippihaven

Beertkanaal

Oostvoornse Meer

Brielse Meer

Oostvoorne

WESTVOORNE

Rockanje

Noord-Panama

Goereeshoofd

Goeree

OUDDORP

GOEDEREDE

Stellendam

variant I 22/18

projectgroep grootschalige lokatie berging baggerspecie

0 1 2 3 km

Schaal 1:80.000

gemeente rotterdam  
openbaar lichaam rijnmond  
rijkswaterstaat



projectgroep grootschalige lokatie  
 berging baggerspecie  
 variant I 22/18



gemeente rotterdam  
 openbaar lichaam rijnmond  
 rijkswaterstaat

inhoud	ca 91,65 × 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
damhoogte	22 m
bodemdiepte	18 m
oppervlakte speciedepôt	319 ha
oppervlakte potentiële massivakke uitbreiding	360 ha

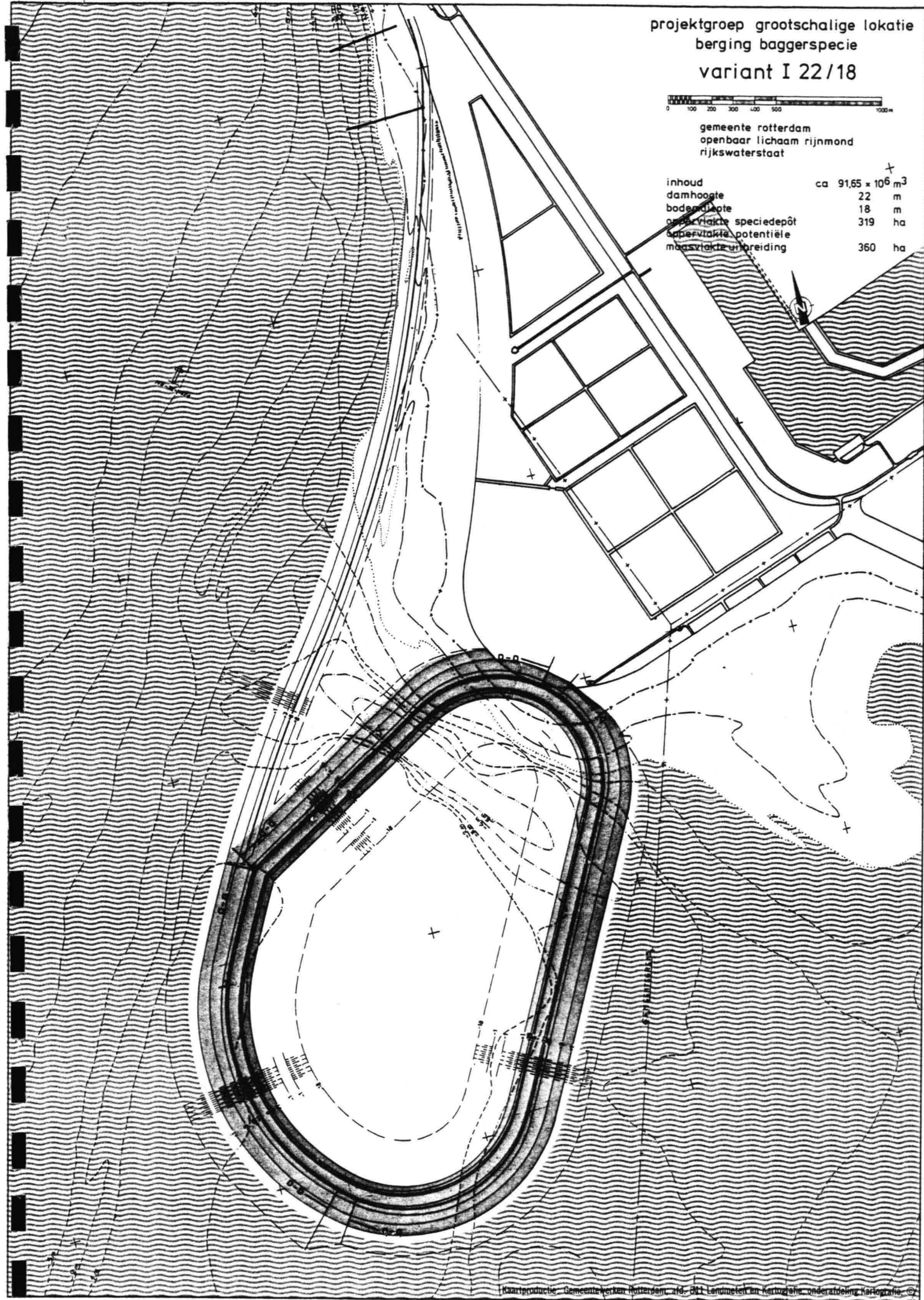
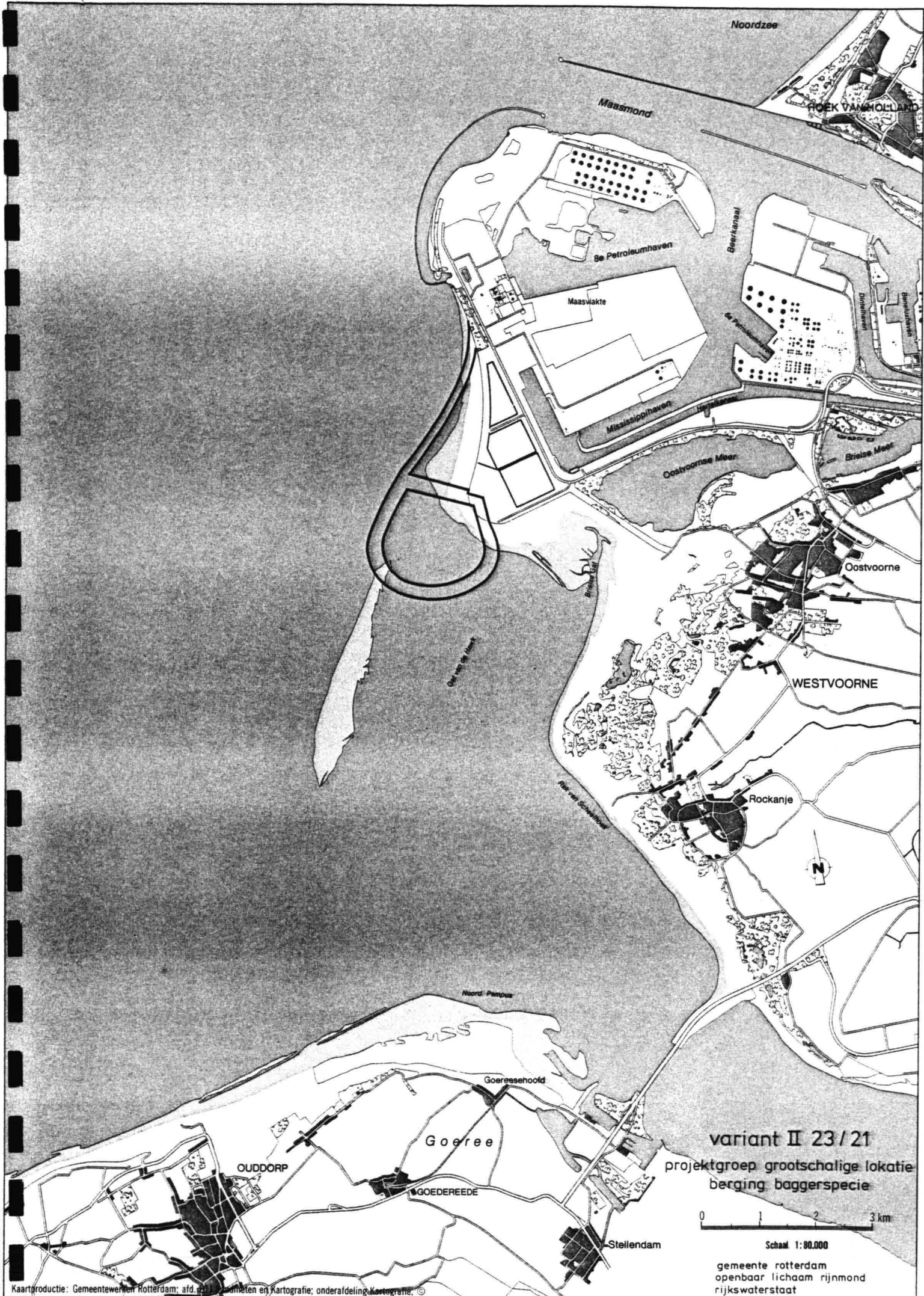


Fig. 2



Noordzee

Maasmond

ROEK VAN HOLLAND

3e Petroleumhaven

Maaswakte

Beertkreeft

Mississippihaven

Oostvoornse Meer

Brielse Meer

Oostvoorne

WESTVOORNE

Rockanje



Noord-Panor

Goeressehoofd

Goeree

OUDDORP

GOEDEREDE

Stellendam

variant II 23/21

projectgroep grootschalige lokatie  
berging baggerspecie



Schaal 1:80.000

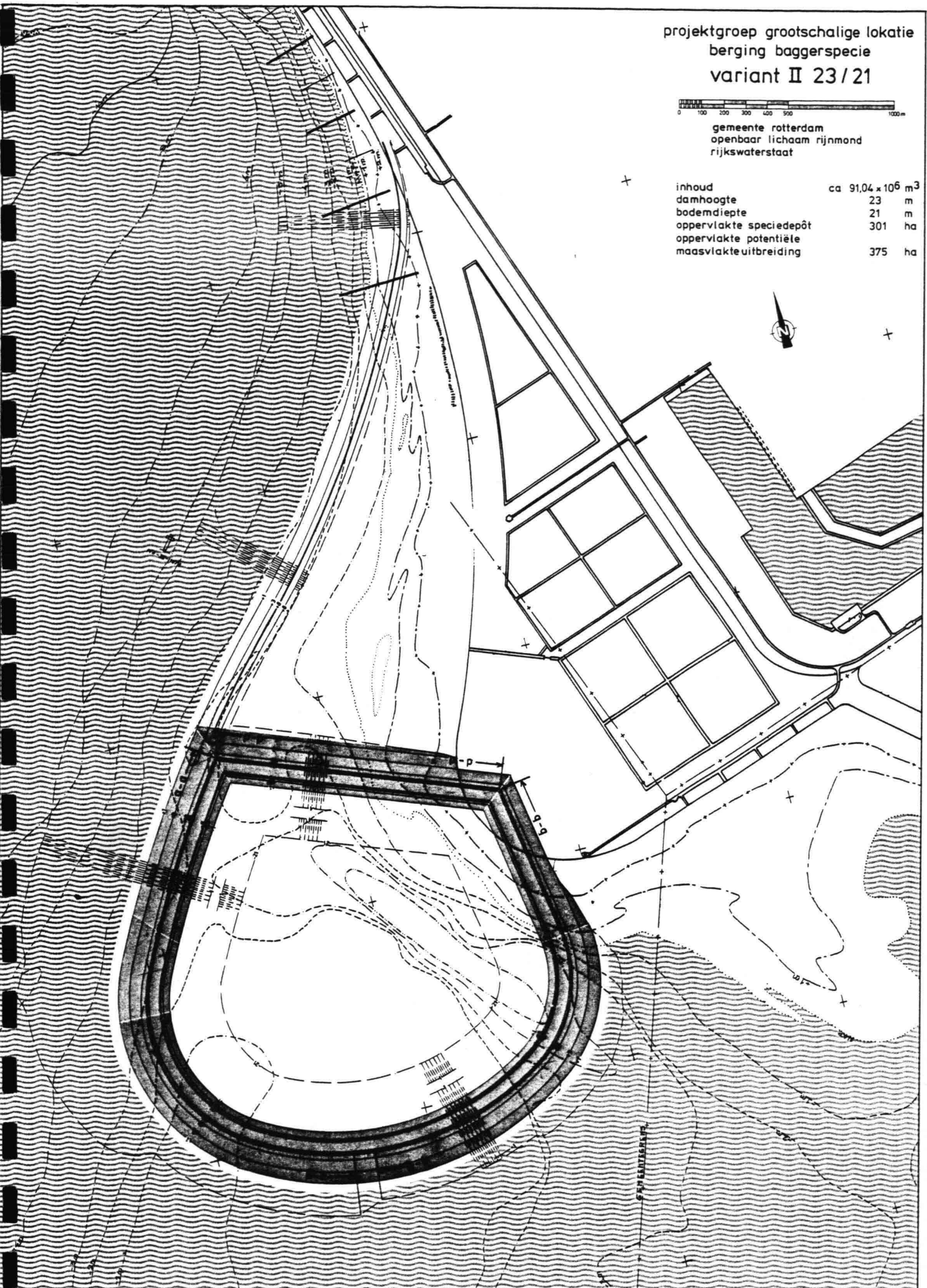
gemeente rotterdam  
openbaar lichaam rijnmond  
rijkswaterstaat

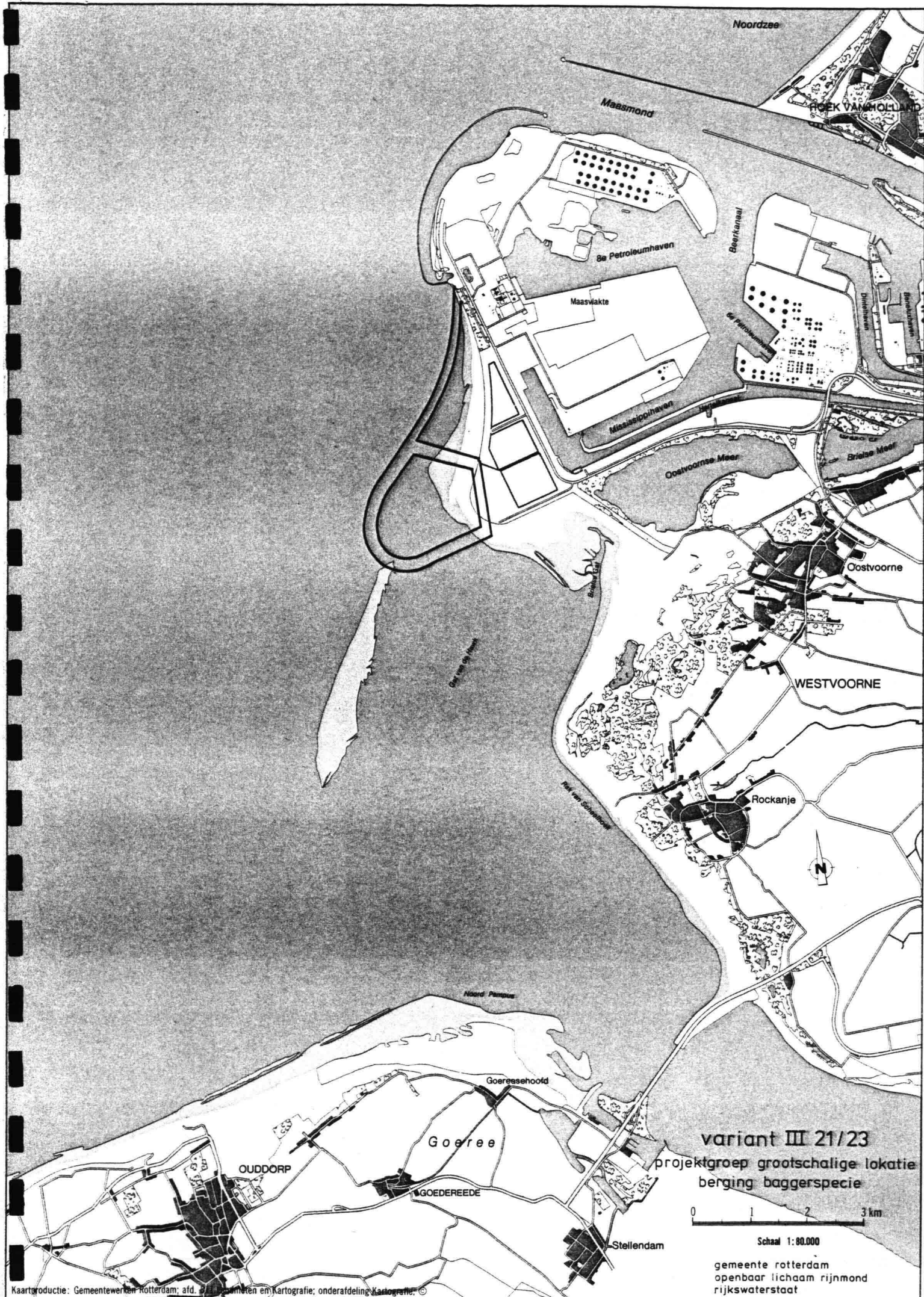
projektgroep grootschalige lokatie  
 berging baggerspecie  
 variant II 23/21



gemeente rotterdam  
 openbaar lichaam rijnmond  
 rijkswaterstaat

inhoud	ca 91,04 × 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
damhoogte	23 m
bodemdiepte	21 m
oppervlakte speciedepôt	301 ha
oppervlakte potentiële maasvlakteuitbreiding	375 ha





Noordzee

Maasmond

ROEK VAN HOLLAND

Be Petroleumhaven

Beekhaven

Maasvlakte

Mississippihaven

Oostvoornse Meer

Oostvoorne

WESTVOORNE

Rockanje



Noord Polder

Goereseshoofd

Goeree

OUDDORP

GOEDEREDE

Stellendam

variant III 21/23

projectgroep grootschalige lokatie berging baggerspecie

0 1 2 3 km

Schaal 1:80.000

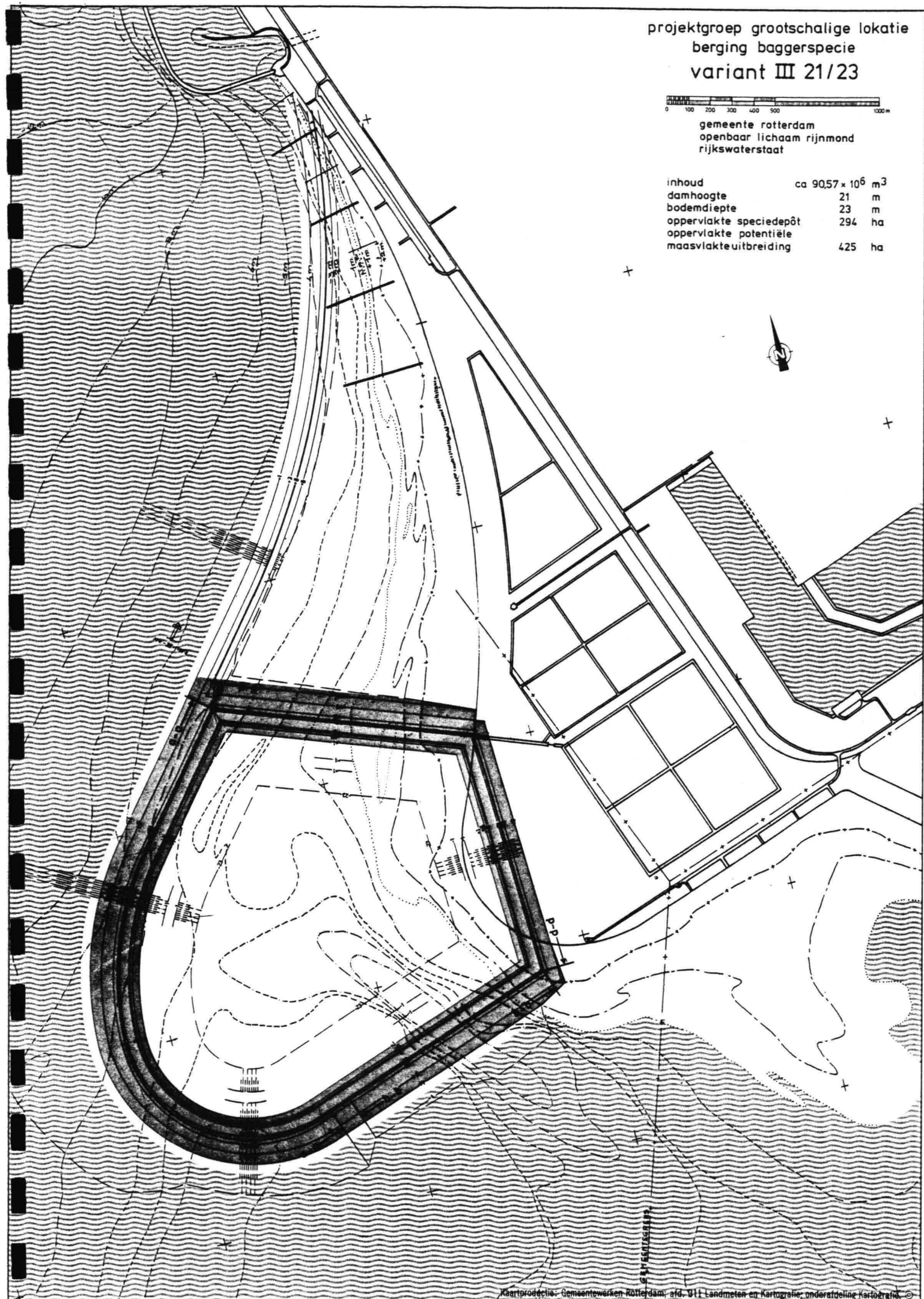
gemeente rotterdam  
openbaar lichaam rijnmond  
rijkswaterstaat

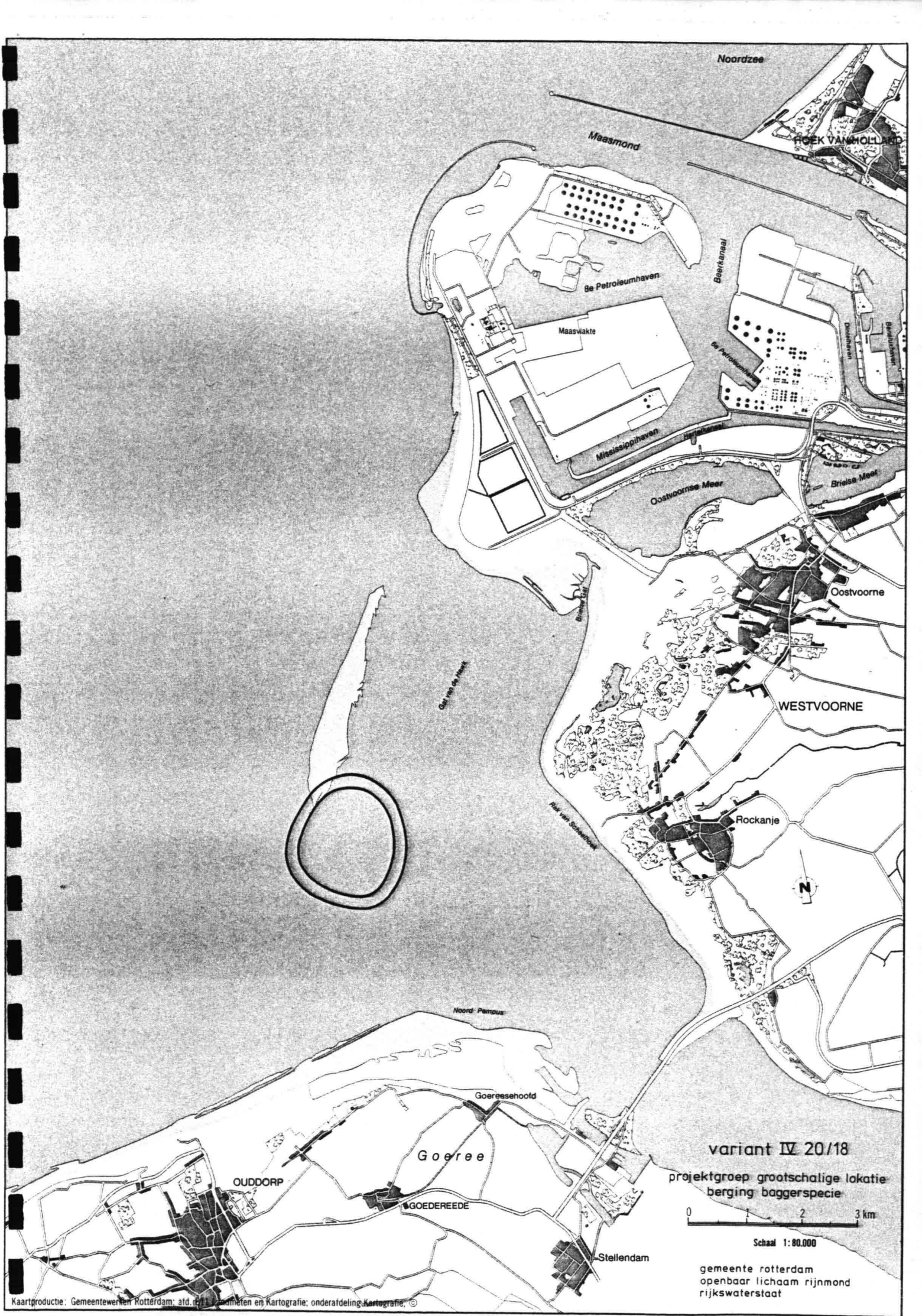
projektgroep grootschalige lokatie  
 berging baggerspecie  
 variant III 21/23



gemeente rotterdam  
 openbaar lichaam rijnmond  
 rijkswaterstaat

inhoud	ca 90,57 x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
damhoogte	21 m
bodemdiepte	23 m
oppervlakte speciedepôt	294 ha
oppervlakte potentiële maasvlakteuitbreiding	425 ha





Noordzee

Maasmond

ROEK VAN HOLLAND

Be Petroleumhaven

Maaswakte

Beertkanaal

Mississippihaven

Oostvoornse Meer

Brielse Meer

Oostvoorne

WESTVOORNE

Rockanje

Op de Maas

Noord Pampus

Goereesehoofd

Goeree

OUDDORP

GOEDEREDE

Stellendam

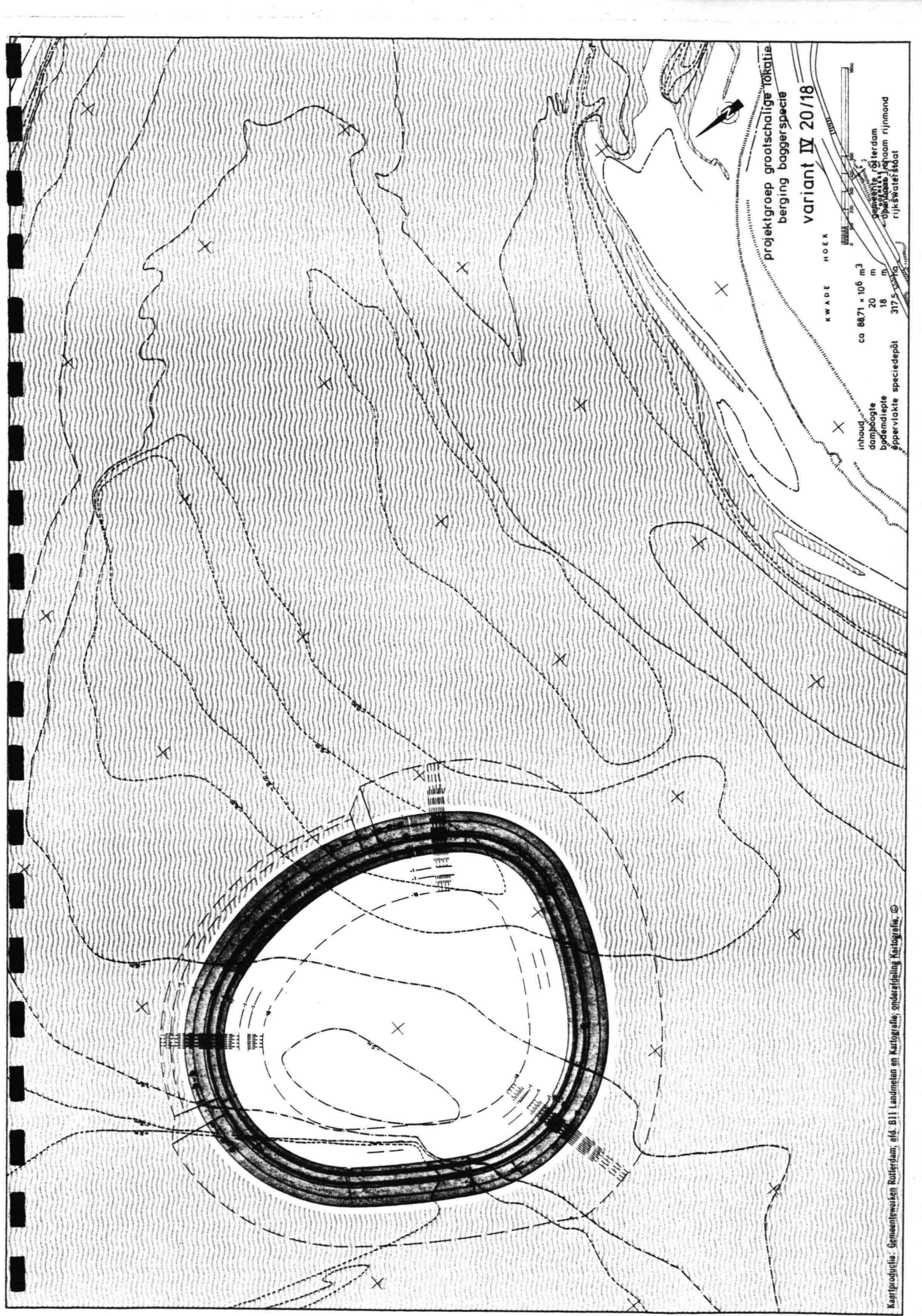
variant IV 20/18

projectgroep grootschalige lokatie  
berging baggerspecie



Schaal 1:80.000

gemeente rotterdam  
openbaar lichaam rijnmond  
rijkswaterstaat



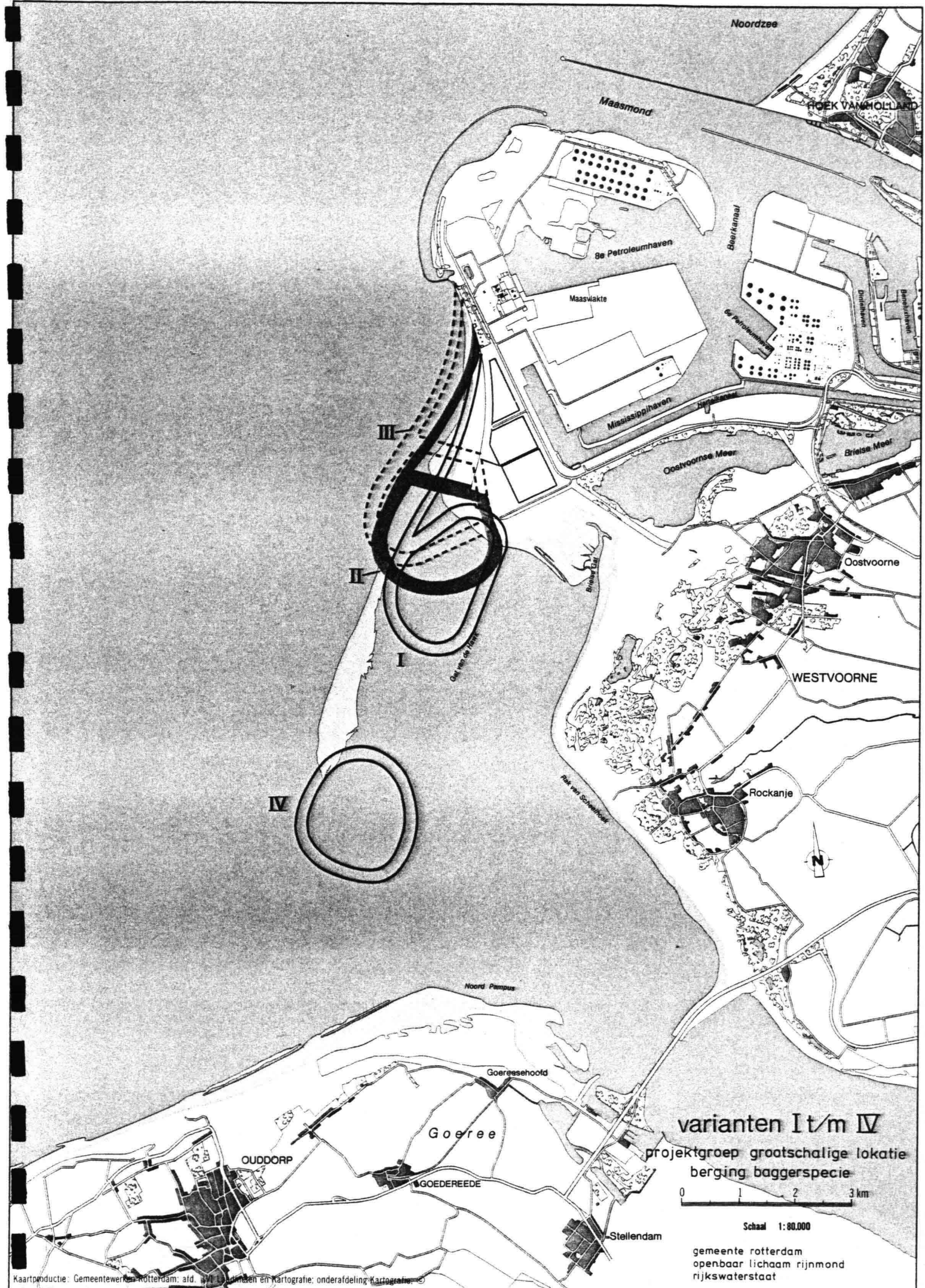
projektgroep grootschalige toekantie  
 berging baggerspecie  
 variant IV 20/18

inhoud ca 8871 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>  
 damhoogte 20 m  
 bodembedpte 18 m  
 oppervlakte speciedepot 317,5 ha

KWADE HOEK



Gemeente Rotterdam  
 afd. Waterbouw  
 rijkswaterstaat



Noordzee

Maasmond

ROEK VAN HOLLAND

8e Petroleumhaven

Maasvlakte

Baerkanal

Mississippihaven

6e Petroleumhaven

Oostvoorse Meer

Brielse Meer

Dunelhaven

Banijshaven

Oostvoorne

WESTVOORNE

Rockanje



Noord Pampus

Goereesehoofd

Goeree

OUDDORP

GOEDEREDEE

Stellendam

varianten I t/m IV  
 projectgroep grootschalige lokatie  
 berging baggerspecie



Schaal 1:80.000

gemeente rotterdam  
 openbaar lichaam rijnmond  
 rijkswaterstaat



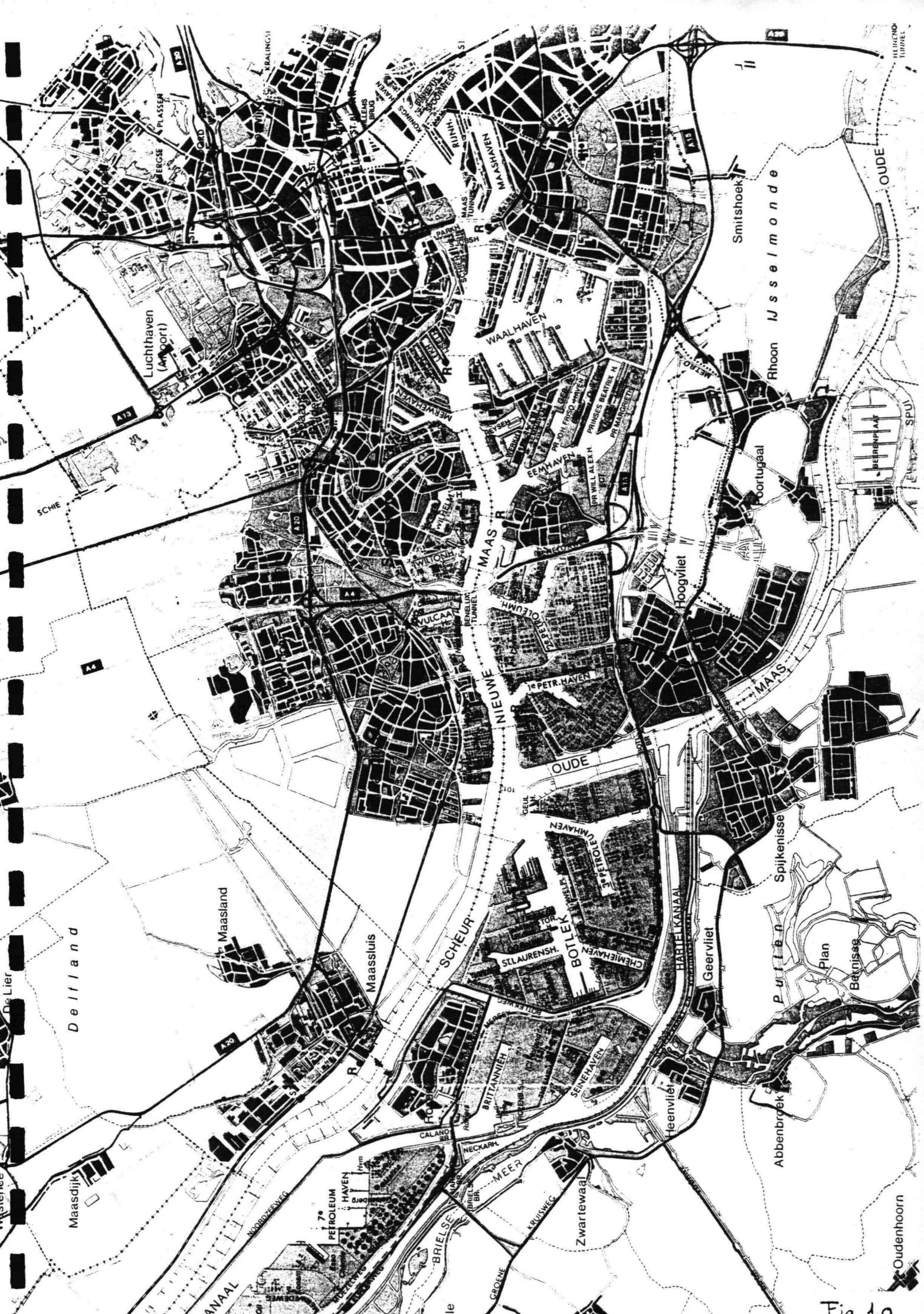
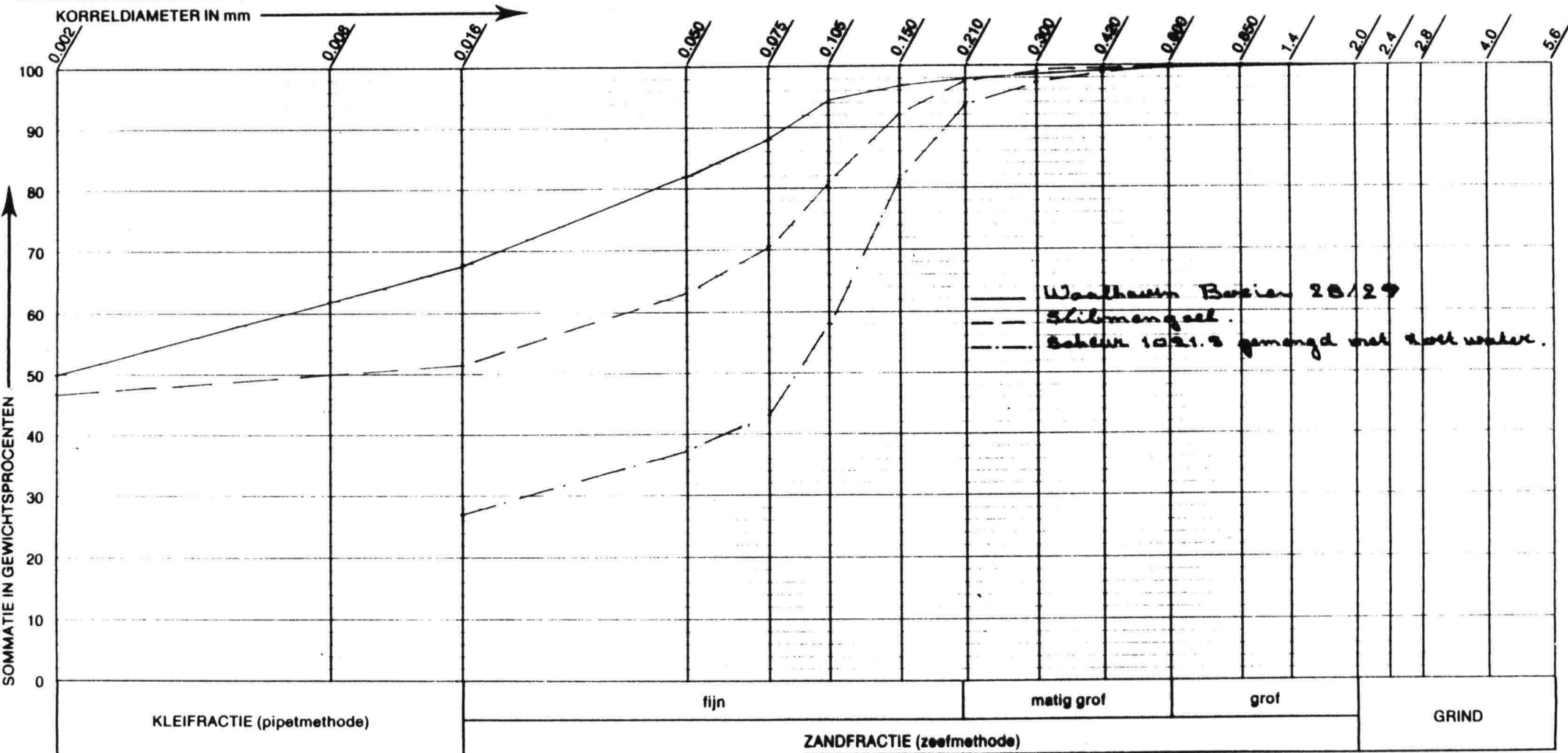
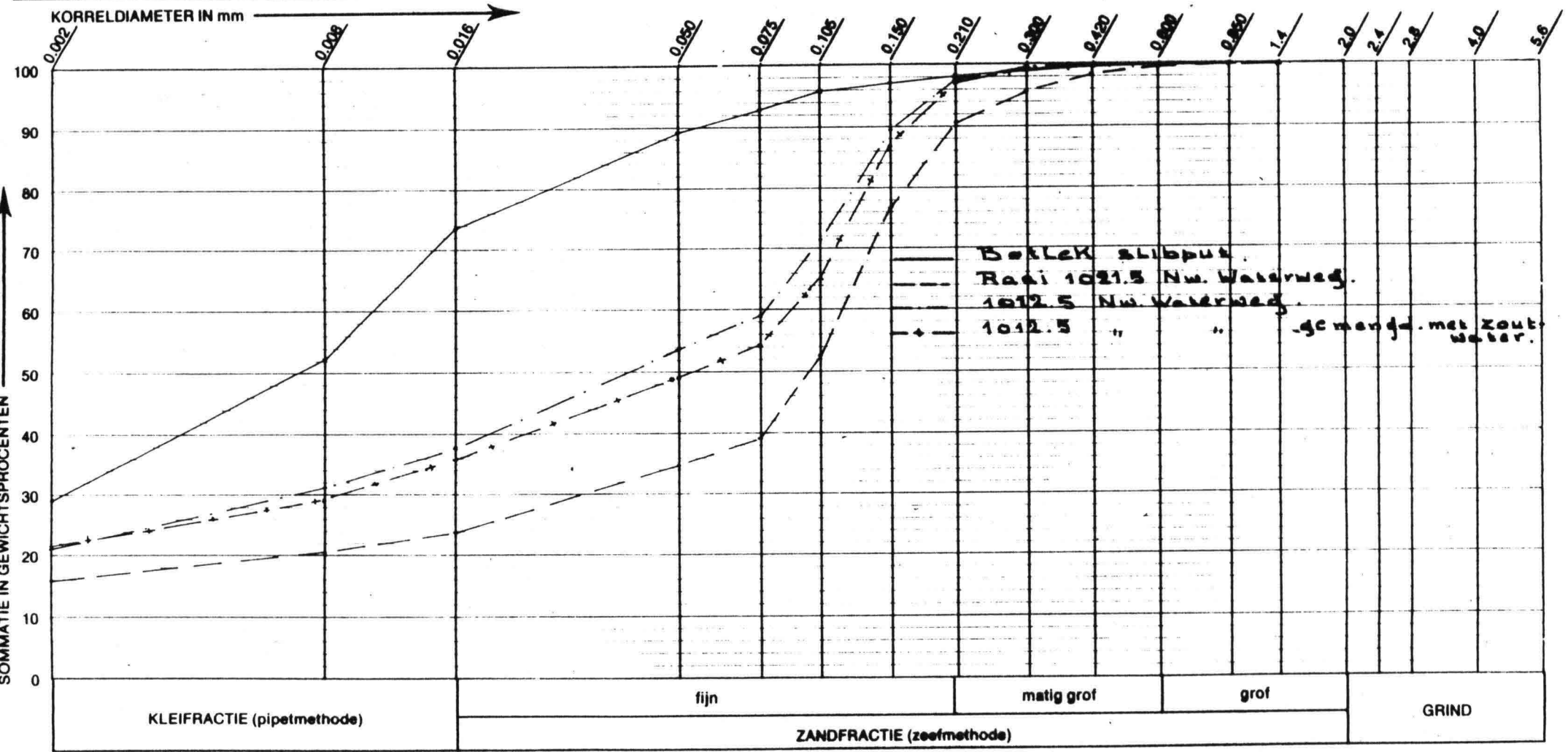


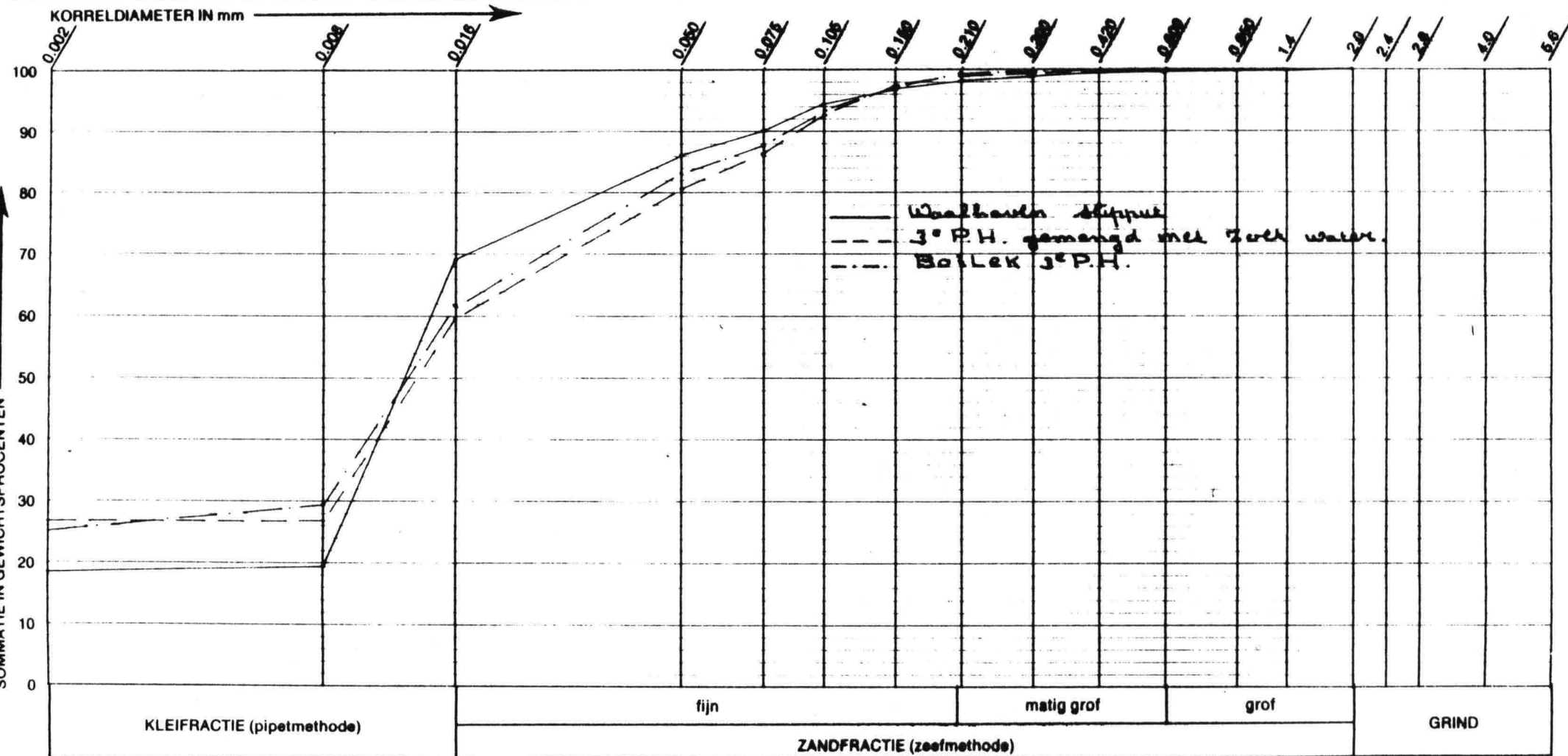
Fig. 10



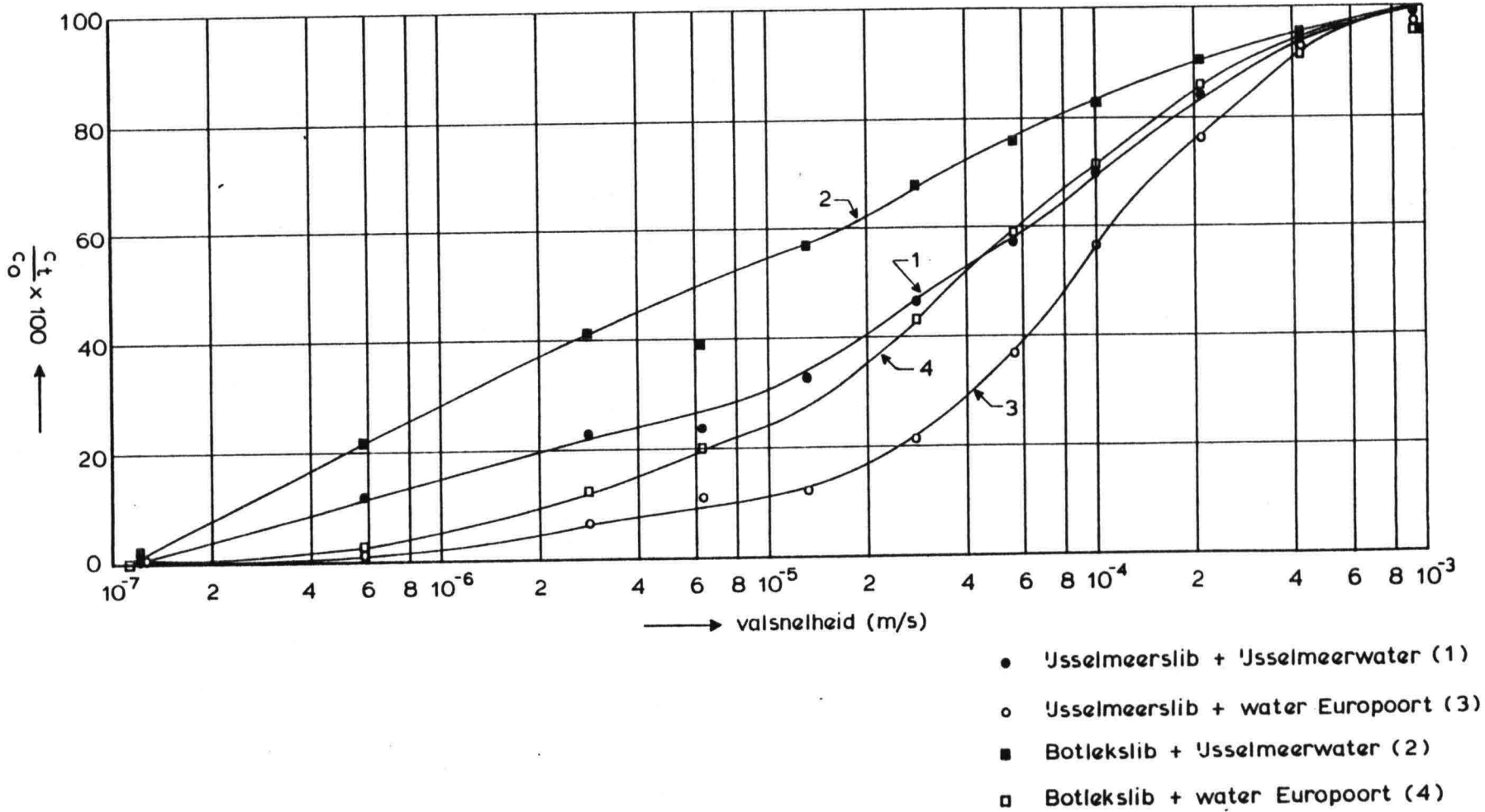
	DIEPTE IN m —	ZAND IN %	SLIB IN %	HUMUS IN %	Ca Co <sub>3</sub> IN %	U cijfer	GRONDSOORT
—	A	25.23	53.00	9.70	12.07	227.1	KLEI. v. f ZAND S.G. 2.4340
---	F	37.42	40.12	8.33	14.12	164.8	" " " 2.5299
- · -	D'	59.05	21.69	6.77	12.53	127.9	" " " 2.5437

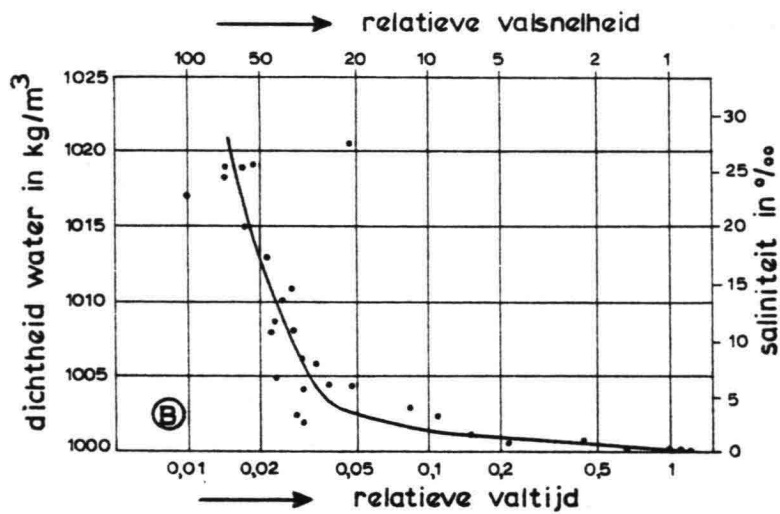
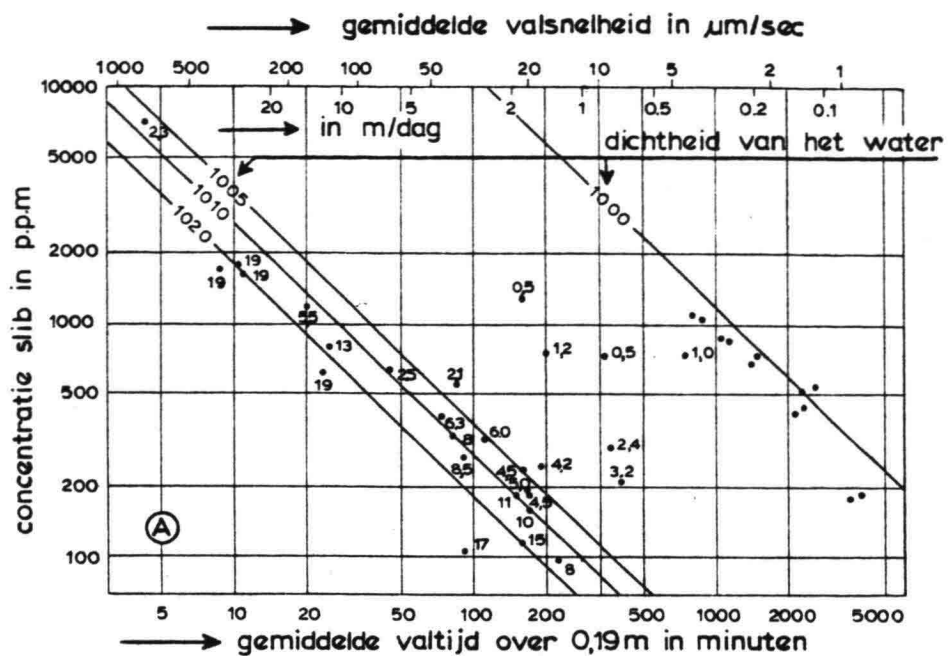


	DIEPTE IN m—	ZAND IN %	SLIB IN %	HUMUS IN %	Ca Co <sub>3</sub> IN %	U cijfer	GRONDSOORT
————	C	19.78	55.17	9.07	15.98	264.7	KLEI. v. p. ZAND S.G. 2.5142
-----	D	62.54	19.67	4.26	13.53	123.2	" " " " 2.6014
-----	R	50.90	30.83	5.28	12.99	164.4	" " " " 2.5608
- + - + -	F	51.88	29.10	6.11	12.91	146.8	" " " " 2.5732



	DIEPTE IN m —	ZAND IN %	SLIB IN %	HUMUS IN %	Ca Co <sub>3</sub> IN %	U cijfer	GRONDSOORT
—	A'	24.13	54.05	9.96	11.86	253.4	KLEI. v. f. ZAND SG. 2.4362
- - -	B'	31.07	46.25	7.81	14.87	246.9	" " " 2.4245
—	B.	29.19	47.30	8.47	15.07	257.9	" " " 2.3400



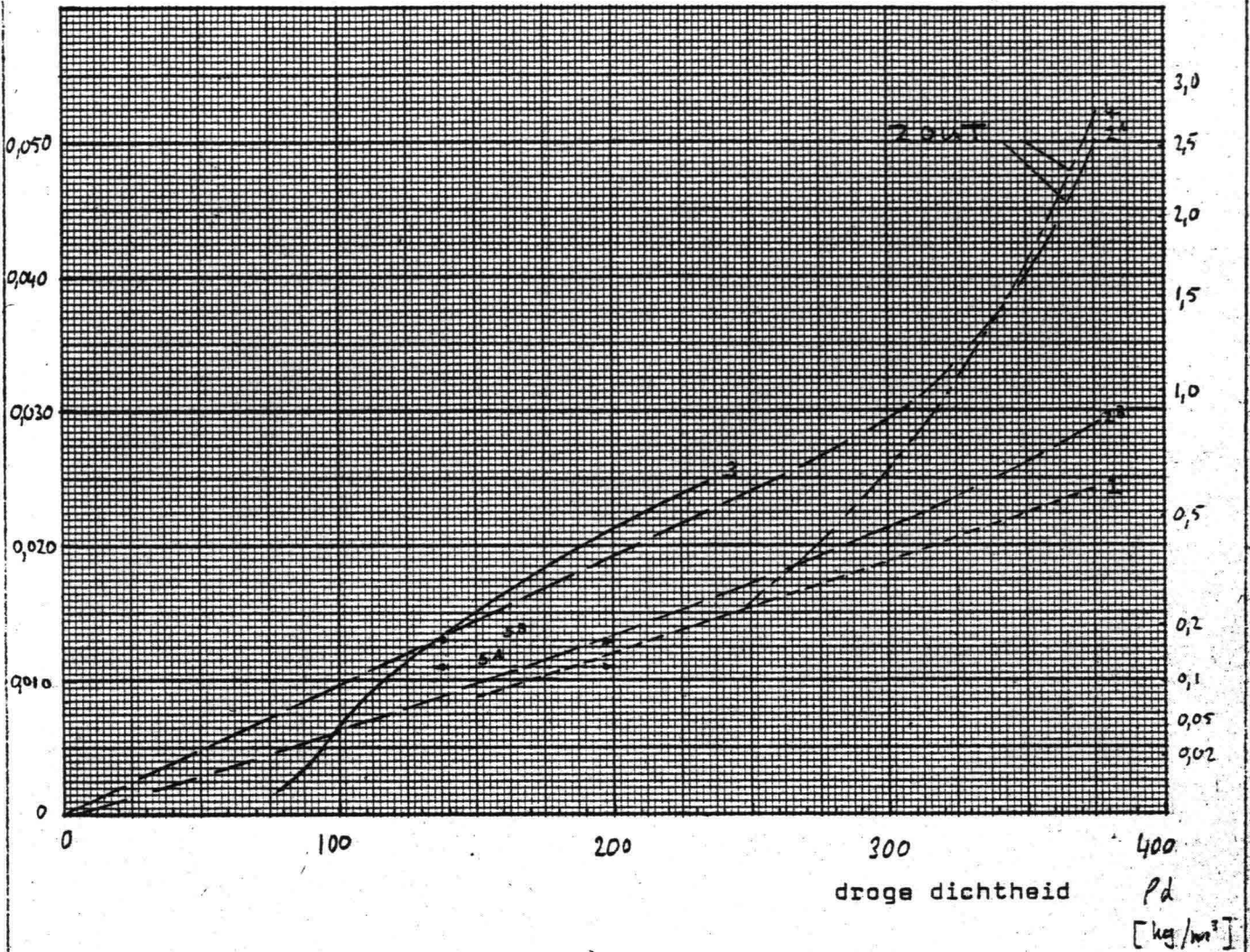


GEMETEN VALSNELHEDEN IN  
HET CHAO PHYA ESTUARIUM

kritieke schuifspanningssnelheid

$u_{kr}$   
[m/s]

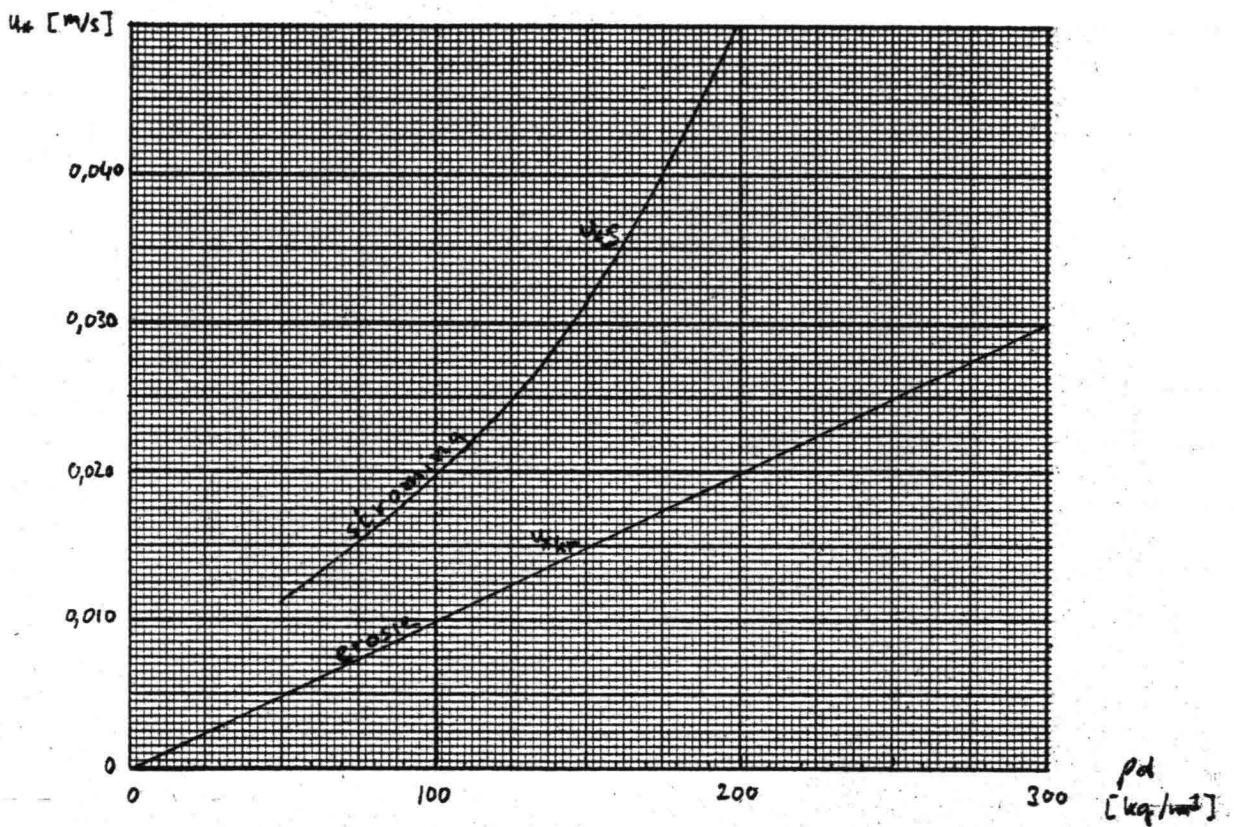
$\tau_{bkr}$   
[N/m<sup>2</sup>]



- 1 Cormault [26]
- 2 Migniot [9]
- 3 W.L. [36]
- 4 W.L. [37]
- 5 Waarnemingen GWR

KRITIEKE SCHUIFSPANNINGSSNELHEID ALS FUNCTIE VAN DE DROGE DICHTHEID VOOR SLIBMENGSELS.

Fig. 16



Kritieke schuifspanningsnelheid voor erosie en slibstroming als functie van de droge dichtheid. Lit [38]



droge stof	dichtheid	kr. schuif- sp.snelheid
c [g/l]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$u_{*k}$ [cm/s]
400	1262	4,1
300	1200	2,6
250	1169	2,0
200	1138	1,6
150	1108	1,2
100	1077	0,8
75	1061	0,6
50	1046	0,4
40	1040	0,32
30	1034	0,24
20	1027	0,16
10	1021	0,08

Kritieke schuifspanningsnelheid  
als functie van de sedimentconcentratie.

Bron Lit [3]  
Botlek slib en Maasmondslib in Oostvoornse  
meer (Chloridegehalte 10.000 mg/L)

WINDRICHTING EN WINDSNELHEID PER JAAR HOORKANT  
 UIT KNMI GEGEVENS VAN STATION HOEK VAN HOLLAND.  
 PERIODE : 01-01-1971 T/M 31-12-1980

WINDSNELHEID IN M/SEC.  
 WINDRICHTING IN GRADEN T.O.V. NOORD.

GR.	<5 M.	5 M.	6 M.	7 M.	8 M.	9 M.	10 M.	11 M.	12 M.	13 M.
10	107.3	34.6	29.1	21.7	14.8	6.3	2.9	1.6	2.3	1.0
20	133.0	31.1	23.8	16.3	10.8	6.1	1.9	1.3	0.8	0.1
30	162.8	34.2	24.4	13.1	8.4	6.5	3.3	2.2	0.6	0.0
40	159.4	38.7	32.9	18.3	12.4	7.3	6.5	3.4	1.3	0.6
50	181.9	41.5	31.7	25.0	15.7	11.1	8.8	4.5	3.6	0.7
60	136.7	37.7	32.1	26.2	22.6	12.3	7.6	5.7	5.1	1.0
70	91.2	22.7	19.4	17.0	11.8	9.3	7.1	3.6	2.6	1.1
80	81.4	24.3	24.7	18.3	13.5	8.2	7.6	4.5	2.2	0.1
90	73.3	21.3	17.6	15.6	9.2	5.5	3.0	3.1	0.8	0.3
100	84.6	23.1	17.7	12.0	8.8	5.0	2.4	1.4	0.9	0.2
110	71.7	19.7	12.6	13.6	7.2	6.3	2.6	0.7	0.2	0.1
120	65.9	15.0	12.5	9.4	6.3	3.1	3.0	0.4	0.1	0.1
130	68.2	14.0	15.1	9.5	6.6	3.8	2.2	0.5	0.5	0.2
140	65.1	14.7	15.3	10.5	4.7	2.7	1.9	1.1	0.3	0.2
150	69.1	17.3	17.4	10.9	6.3	5.9	2.4	2.1	1.2	0.2
160	67.7	20.3	15.0	13.0	9.2	5.5	4.8	3.1	2.1	0.9
170	72.6	26.7	23.8	15.3	14.1	8.9	9.1	6.7	3.4	1.7
180	77.0	30.2	30.6	28.4	17.8	15.8	12.0	12.2	6.4	3.7
190	81.2	34.6	34.9	34.5	28.8	20.7	19.4	16.5	9.2	6.7
200	87.9	38.1	43.1	42.5	35.0	30.3	23.6	20.7	13.5	10.4
210	90.7	38.6	43.0	46.8	37.1	32.8	27.2	21.3	15.8	10.7
220	99.1	48.8	54.7	61.8	55.8	45.6	33.2	23.5	15.5	8.7
230	105.3	49.4	57.7	63.6	52.6	43.3	31.5	26.1	17.6	9.7
240	106.3	31.2	30.9	33.4	32.9	30.1	25.7	25.0	18.1	10.5
250	105.9	27.2	20.7	22.1	22.6	22.4	26.4	23.6	20.0	17.1
260	101.3	34.2	36.3	34.0	33.1	30.8	27.9	26.9	17.6	13.5
270	95.3	48.9	42.7	39.2	32.1	25.4	18.9	12.0	11.4	9.7
280	77.0	35.6	35.4	25.4	20.7	15.0	8.6	8.1	8.0	5.6
290	76.9	32.2	27.9	23.2	19.0	11.0	10.2	5.5	6.7	3.8
300	70.7	25.4	22.2	17.1	11.7	6.4	4.6	2.1	2.2	1.2
310	96.9	25.2	19.8	14.0	8.3	4.9	3.8	2.0	1.2	0.7
320	119.4	25.2	19.9	16.3	10.8	6.3	3.0	1.7	0.9	0.6
330	119.3	28.2	21.4	15.5	12.6	7.7	2.3	1.8	0.5	0.5
340	121.1	28.5	26.0	17.5	11.3	7.3	4.0	1.1	1.0	0.3
350	105.9	29.0	25.8	16.3	11.1	5.1	3.0	0.9	0.4	0.1
360	108.7	33.5	29.7	18.1	14.6	7.5	3.2	1.5	1.1	0.3
TOTAAL	3538.5	1080.0	987.0	634.9	649.8	481.8	365.3	278.2	194.9	122.2

Bijlage 2

GR.	14 M.	15 M.	16 M.	17 M.	18 M.	19 M.	20 M.	>20 M.	TOTAAL
10	0.2	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	222.1
20	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	225.2
30	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	255.4
40	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	280.9
50	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	324.4
60	0.5	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	287.9
70	0.7	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	186.7
80	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	184.8
90	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	149.8
100	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	156.2
110	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	134.9
120	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	115.9
130	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	120.6
140	0.2	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	117.0
150	0.9	0.5	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	134.6
160	0.6	0.3	0.5	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	143.1
170	1.3	0.5	0.5	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	184.7
180	2.7	2.6	1.3	1.1	0.9	0.2	0.0	0.0	242.8
190	6.5	4.3	1.8	1.4	0.7	0.1	0.7	0.2	302.1
200	5.8	3.6	2.3	1.4	0.8	0.3	0.2	0.1	359.4
210	7.1	4.8	2.8	1.8	0.5	0.4	0.0	0.0	381.2
220	6.2	4.1	2.8	0.5	1.2	0.5	0.2	0.2	462.2
230	4.8	3.4	1.8	1.4	0.6	1.1	0.4	0.4	470.5
240	8.2	5.8	4.0	2.5	1.7	1.2	0.8	1.6	369.7
250	13.8	10.1	6.5	4.9	3.4	1.4	1.2	1.0	350.1
260	10.1	6.5	5.2	2.9	1.4	1.2	0.3	0.5	383.5
270	5.4	2.8	2.8	2.0	1.1	0.7	0.2	0.3	350.7
280	4.8	2.9	1.5	0.8	0.4	0.8	0.2	0.1	250.8
290	1.5	1.1	1.0	0.8	0.0	0.0	0.3	0.1	221.1
300	0.2	0.5	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	164.7
310	0.7	0.3	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	178.0
320	0.3	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	204.7
330	0.2	0.0	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	210.2
340	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	218.1
350	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	197.7
360	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	218.2
TOTAAL	83.6	55.9	35.9	22.2	13.0	7.9	4.5	4.5	8760.0 = 1 jaar

Bijlage 3 (versola)

WINDSNEELHEIDSVERDELING

TOTAAL : 8760. UUR. = 100.00 %  
 >= 5 M/SEC : 5222. UUR. = 59.61 %  
 >= 6 M/SEC : 4141. UUR. = 47.28 %  
 >= 7 M/SEC : 3155. UUR. = 36.01 %  
 >= 8 M/SEC : 2320. UUR. = 26.48 %

GR.	>= 5		>= 6		>= 7		>= 8		TOTAAL	
	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%
1.	114.81	1.311	80.23	0.916	51.16	0.584	29.48	0.336	222.12	2.536
2.	92.22	1.053	61.15	0.698	37.37	0.427	21.08	0.241	225.21	2.571
3.	92.62	1.057	58.45	0.667	34.07	0.389	20.98	0.240	255.39	2.915
4.	121.50	1.387	82.83	0.946	49.96	0.570	31.67	0.362	280.87	3.206
5.	142.56	1.628	101.12	1.154	69.44	0.793	44.46	0.508	324.43	3.704
6.	151.18	1.726	113.51	1.296	81.43	0.930	55.25	0.631	287.86	3.286
7.	95.52	1.090	72.84	0.832	53.46	0.610	36.47	0.416	186.75	2.132
8.	103.42	1.181	79.13	0.903	54.46	0.622	36.17	0.413	184.85	2.110
9.	76.44	0.873	55.15	0.630	37.57	0.429	21.98	0.251	149.78	1.710
10.	71.54	0.817	48.46	0.553	30.77	0.351	18.78	0.214	156.17	1.783
11.	63.15	0.721	43.46	0.496	30.87	0.352	17.29	0.197	134.89	1.540
12.	49.96	0.570	34.97	0.399	22.48	0.257	13.09	0.149	115.90	1.323
13.	52.36	0.598	38.37	0.438	23.28	0.266	13.79	0.157	120.60	1.377
14.	51.86	0.592	37.17	0.424	21.88	0.250	11.39	0.130	117.00	1.336
15.	65.45	0.747	48.16	0.550	30.77	0.351	19.88	0.227	134.59	1.536
16.	75.34	0.860	55.05	0.628	40.07	0.457	27.08	0.309	143.08	1.633
17.	112.11	1.280	85.43	0.975	61.65	0.704	46.36	0.529	184.75	2.109
18.	165.76	1.892	135.59	1.548	105.01	1.199	76.64	0.875	242.80	2.772
19.	220.82	2.521	186.25	2.126	151.38	1.728	116.90	1.335	302.05	3.448
20.	271.48	3.099	233.41	2.664	190.34	2.173	147.88	1.688	359.40	4.102
21.	290.46	3.316	251.89	2.875	208.93	2.385	162.17	1.851	381.19	4.351
22.	363.10	4.145	314.34	3.588	259.69	2.964	197.84	2.258	462.22	5.276
23.	365.20	4.169	315.84	3.605	258.19	2.947	194.54	2.221	470.51	5.371
24.	263.38	3.007	232.21	2.651	201.33	2.298	167.96	1.917	369.70	4.220
25.	244.20	2.788	217.02	2.477	196.34	2.241	174.26	1.989	350.11	3.997
26.	282.17	3.221	248.00	2.831	211.73	2.417	177.75	2.029	383.48	4.378
27.	255.39	2.915	206.53	2.358	163.87	1.871	124.70	1.423	350.71	4.004
28.	173.76	1.984	138.19	1.577	102.82	1.174	77.44	0.884	250.79	2.863
29.	144.18	1.646	112.01	1.279	84.13	0.960	60.95	0.696	221.12	2.524
30.	93.92	1.072	68.54	0.782	46.36	0.529	29.28	0.334	164.66	1.880
31.	81.03	0.925	55.85	0.638	36.07	0.412	22.08	0.252	177.95	2.031
32.	85.33	0.974	60.15	0.687	40.27	0.460	23.98	0.274	204.73	2.337
33.	90.93	1.038	62.75	0.716	41.37	0.472	25.88	0.295	210.23	2.400
34.	97.02	1.108	68.54	0.782	42.57	0.486	25.08	0.286	218.12	2.490
35.	91.82	1.048	62.85	0.717	37.07	0.423	20.78	0.237	197.74	2.257
36.	109.51	1.250	76.04	0.868	46.36	0.529	28.28	0.323	218.22	2.491
	5221.51	59.606	4141.50	47.277	3154.51	36.010	2319.59	26.479	8760.00	100.000

Bijlage 2 (verslag)

TOTAAL : 8760. UUR. = 100.00 %  
 v= 9 M/SEC : 1670. UUR. = 19.06 %  
 v= 10 M/SEC : 1188. UUR. = 13.56 %  
 v= 11 M/SEC : 823. UUR. = 9.39 %  
 v= 12 M/SEC : 545. UUR. = 6.22 %

GR.	>= 9		>= 10		>= 11		>= 12		TOTAAL	
	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%
1.	14.69	0.168	8.39	0.096	5.50	0.063	3.90	0.044	222.12	2.536
2.	10.29	0.117	4.20	0.048	2.30	0.026	1.00	0.011	225.21	2.571
3.	12.59	0.144	6.09	0.070	2.80	0.032	0.60	0.007	255.39	2.915
4.	19.28	0.220	11.99	0.137	5.50	0.063	2.10	0.024	280.87	3.206
5.	28.78	0.328	17.69	0.202	8.89	0.102	4.40	0.050	324.43	3.704
6.	32.67	0.373	20.38	0.233	12.79	0.146	7.09	0.081	287.86	3.286
7.	24.68	0.282	15.39	0.176	8.29	0.095	4.70	0.054	186.75	2.132
8.	22.68	0.259	14.49	0.165	6.89	0.079	2.40	0.027	184.85	2.110
9.	12.79	0.146	7.29	0.083	4.30	0.049	1.20	0.014	149.78	1.710
10.	9.99	0.114	5.00	0.057	2.60	0.030	1.20	0.014	156.17	1.783
11.	10.09	0.115	3.80	0.043	1.20	0.014	0.50	0.006	134.89	1.540
12.	6.79	0.078	3.70	0.042	0.70	0.008	0.30	0.003	115.90	1.323
13.	7.19	0.082	3.40	0.039	1.20	0.014	0.70	0.008	120.60	1.377
14.	6.69	0.076	4.00	0.046	2.10	0.024	1.00	0.011	117.00	1.336
15.	13.59	0.155	7.69	0.088	5.30	0.060	3.20	0.036	134.59	1.536
16.	17.89	0.204	12.39	0.141	7.59	0.087	4.50	0.051	143.08	1.633
17.	32.27	0.368	23.38	0.267	14.29	0.163	7.59	0.087	184.75	2.109
18.	58.85	0.672	43.06	0.492	31.07	0.355	18.88	0.216	242.80	2.772
19.	88.13	1.006	67.44	0.770	48.06	0.549	31.57	0.360	302.05	3.448
20.	112.91	1.289	82.63	0.943	59.05	0.674	38.37	0.438	359.40	4.103
21.	125.10	1.428	92.32	1.054	65.15	0.744	43.86	0.501	381.19	4.351
22.	142.08	1.622	96.52	1.102	63.35	0.723	39.87	0.455	462.22	5.276
23.	141.98	1.621	98.72	1.127	67.24	0.768	41.17	0.470	470.51	5.371
24.	135.09	1.542	105.01	1.199	79.33	0.906	54.36	0.620	369.70	4.220
25.	151.68	1.731	129.29	1.476	102.92	1.175	79.33	0.906	350.11	3.997
26.	144.68	1.652	113.91	1.300	86.03	0.982	59.15	0.675	383.48	4.378
27.	92.62	1.057	67.24	0.768	48.36	0.552	36.37	0.415	350.71	4.004
28.	56.75	0.648	41.77	0.477	33.17	0.379	25.08	0.286	250.79	2.863
29.	41.97	0.479	30.97	0.354	20.78	0.237	15.29	0.175	221.12	2.524
30.	17.59	0.201	11.19	0.128	6.59	0.075	4.50	0.051	164.66	1.880
31.	13.79	0.157	8.89	0.102	5.10	0.058	3.10	0.035	177.95	2.031
32.	13.19	0.151	6.89	0.079	3.90	0.044	2.20	0.025	204.73	2.337
33.	13.29	0.152	5.60	0.064	3.30	0.038	1.50	0.017	210.23	2.400
34.	13.79	0.157	6.49	0.074	2.50	0.029	1.40	0.016	218.12	2.490
35.	9.69	0.111	4.60	0.052	1.60	0.018	0.70	0.008	197.74	2.257
36.	13.69	0.156	6.19	0.071	3.00	0.034	1.50	0.017	218.22	2.491
	1669.83	19.062	1188.02	13.562	822.72	9.392	544.55	6.216	8760.00	100.000

Bijlage 2 (vervolg)

TOTAAL : 8760. UUR. = 100.00 %  
 >= 13 M/SEC : 350. UUR. = 3.99 %  
 >= 14 M/SEC : 227. UUR. = 2.60 %  
 >= 15 M/SEC : 144. UUR. = 1.64 %  
 >= 16 M/SEC : 88. UUR. = 1.00 %

GR.	>= 13		>= 14		>= 15		>= 16		TOTAAL	
	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%
1.	1.60	0.018	0.60	0.007	0.40	0.005	0.10	0.001	222.12	2.536
2.	0.20	0.002	0.10	0.001	0.00	0.000	0.00	0.000	225.21	2.571
3.	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	255.39	2.915
4.	0.80	0.009	0.20	0.002	0.00	0.000	0.00	0.000	280.87	3.206
5.	0.80	0.009	0.10	0.001	0.00	0.000	0.00	0.000	324.43	3.704
6.	2.00	0.023	1.00	0.011	0.50	0.006	0.00	0.000	287.86	3.286
7.	2.10	0.024	1.00	0.011	0.30	0.003	0.00	0.000	186.75	2.132
8.	0.20	0.002	0.10	0.001	0.00	0.000	0.00	0.000	184.85	2.110
9.	0.40	0.005	0.10	0.001	0.00	0.000	0.00	0.000	149.78	1.710
10.	0.30	0.003	0.10	0.001	0.00	0.000	0.00	0.000	156.17	1.783
11.	0.30	0.003	0.20	0.002	0.10	0.001	0.00	0.000	134.89	1.540
12.	0.20	0.002	0.10	0.001	0.00	0.000	0.00	0.000	115.90	1.323
13.	0.20	0.002	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	120.60	1.377
14.	0.70	0.008	0.50	0.006	0.30	0.003	0.20	0.002	117.00	1.336
15.	2.00	0.023	1.80	0.021	0.90	0.010	0.40	0.005	134.59	1.536
16.	2.40	0.027	1.50	0.017	0.90	0.010	0.60	0.007	143.08	1.633
17.	4.20	0.048	2.50	0.029	1.20	0.014	0.70	0.008	184.75	2.109
18.	12.49	0.143	8.79	0.100	6.09	0.070	3.50	0.040	242.80	2.772
19.	22.38	0.255	15.69	0.179	9.19	0.105	4.90	0.056	302.05	3.448
20.	24.88	0.284	14.49	0.165	8.69	0.099	5.10	0.058	359.40	4.103
21.	28.08	0.321	17.39	0.198	10.29	0.117	5.50	0.063	381.19	4.351
22.	24.38	0.278	15.69	0.179	9.49	0.108	5.40	0.062	462.22	5.276
23.	23.58	0.269	13.89	0.159	9.09	0.104	5.70	0.065	470.51	5.371
24.	36.27	0.414	25.78	0.294	17.59	0.201	11.79	0.135	369.70	4.220
25.	59.35	0.678	42.27	0.482	28.48	0.325	18.38	0.210	350.11	3.997
26.	41.57	0.474	28.08	0.321	17.99	0.205	11.49	0.131	383.48	4.378
27.	24.98	0.285	15.29	0.175	9.89	0.113	7.09	0.081	350.71	4.004
28.	17.09	0.195	11.49	0.131	6.69	0.076	3.80	0.043	250.79	2.863
29.	8.59	0.098	4.80	0.055	3.30	0.038	2.20	0.025	221.12	2.524
30.	2.30	0.026	1.10	0.013	0.90	0.010	0.40	0.005	164.66	1.880
31.	1.90	0.022	1.20	0.014	0.50	0.006	0.20	0.002	177.95	2.031
32.	1.30	0.015	0.70	0.008	0.40	0.005	0.10	0.001	204.73	2.337
33.	1.00	0.011	0.50	0.006	0.30	0.003	0.30	0.003	210.23	2.400
34.	0.40	0.005	0.10	0.001	0.10	0.001	0.10	0.001	218.12	2.490
35.	0.30	0.003	0.20	0.002	0.10	0.001	0.00	0.000	197.74	2.257
36.	0.40	0.005	0.10	0.001	0.10	0.001	0.00	0.000	218.22	2.491
	349.61	3.991	227.41	2.596	143.78	1.641	87.93	1.004	8760.00	100.000

Bijlage 2 (versie)

TOTAAL : 8760. UUR. = 100.00 %  
 >= 17 M/SEC : 52. UUR. = 0.59 %  
 >= 18 M/SEC : 30. UUR. = 0.34 %  
 >= 19 M/SEC : 17. UUR. = 0.19 %  
 >= 20 M/SEC : 9. UUR. = 0.10 %

GR.	>= 17		>= 18		>= 19		>= 20		TOTAAL	
	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%
1.	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	222.12	2.536
2.	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	225.21	2.571
3.	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	255.39	2.915
4.	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	280.87	3.206
5.	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	324.43	3.704
6.	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	287.86	3.286
7.	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	186.75	2.132
8.	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	184.85	2.110
9.	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	149.78	1.710
10.	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	156.17	1.783
11.	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	134.89	1.540
12.	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	115.90	1.323
13.	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	120.60	1.377
14.	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	117.00	1.336
15.	0.10	0.001	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	134.59	1.536
16.	0.10	0.001	0.10	0.001	0.00	0.000	0.00	0.000	143.08	1.633
17.	0.20	0.002	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	184.75	2.109
18.	2.20	0.025	1.10	0.013	0.20	0.002	0.00	0.000	242.80	2.772
19.	3.10	0.035	1.70	0.019	1.00	0.011	0.90	0.010	302.05	3.448
20.	2.80	0.032	1.40	0.016	0.60	0.007	0.30	0.003	359.40	4.103
21.	2.70	0.031	0.90	0.010	0.40	0.005	0.00	0.000	381.19	4.351
22.	2.60	0.030	2.10	0.024	0.90	0.010	0.40	0.005	462.22	5.276
23.	3.90	0.044	2.50	0.029	1.90	0.022	0.80	0.009	470.51	5.371
24.	7.79	0.089	5.30	0.060	3.60	0.041	2.40	0.027	369.70	4.220
25.	11.89	0.136	6.99	0.080	3.60	0.041	2.20	0.025	350.11	3.997
26.	6.29	0.072	3.40	0.039	2.00	0.023	0.80	0.009	383.48	4.378
27.	4.30	0.049	2.30	0.026	1.20	0.014	0.50	0.006	350.71	4.004
28.	2.30	0.026	1.50	0.017	1.10	0.013	0.30	0.003	250.79	2.863
29.	1.20	0.014	0.40	0.005	0.40	0.005	0.40	0.005	221.12	2.524
30.	0.20	0.002	0.10	0.001	0.00	0.000	0.00	0.000	164.66	1.880
31.	0.10	0.001	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	177.95	2.031
32.	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	204.73	2.337
33.	0.20	0.002	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	210.23	2.400
34.	0.10	0.001	0.10	0.001	0.00	0.000	0.00	0.000	218.12	2.490
35.	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	197.74	2.257
36.	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	218.22	2.491
	52.06	0.594	29.88	0.341	16.89	0.193	8.99	0.103	8760.00	100.000

Bijlage 2 (vervolg)

only Bijlage 2

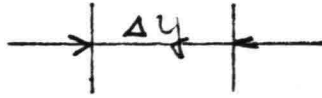
Frequentieverdeling van de windsnelheid voor alle windrichtingen voort het jaar • samengesteld uit metingen te Hoek van Holland in het tijdvak 1954 t/m 1970 en 1971 t/m 1980

Windsnelheid [m/s]	Aantal uren (gemiddeld over 2 weken = 336 uur)	Cumulatief
0 - 0,9	9	9
1 - 1,9	18	27
2 - 2,9	36	63
3 - 3,9	42	106
4 - 4,9	40	146
5 - 5,9	36	182
6 - 6,9	33	215
7 - 7,9	29	244
8 - 8,9	20	264
9 - 9,9	19	283
10 - 10,9	16	299
11 - 11,9	11	310
12 - 12,9	9	319
13 - 13,9	6	325
14 - 14,9	4	329
15 - 15,9	2	331
16 - 16,9	2	333
17 - 17,9	1	334
18 - 18,9	1	335
> 19	1	336



Frequentieverdeling van de windsnelheid voor alle windrichtingen voor het winterseizoen, samengesteld uit metingen te Hoek van Holland in het tijdvak 1954 t/m 1994

Windsnelheid [m/s]	Aantal uren (gemiddeld over 2 weken = 336 uur)	Cumulatief
0 - 0,9	11	11
1 - 1,9	16	27
2 - 2,9	32	59
3 - 3,9	39	98
4 - 4,9	39	137
5 - 5,9	37	174
6 - 6,9	33	207
7 - 7,9	29	236
8 - 8,9	21	257
9 - 9,9	19	276
10 - 10,9	15	291
11 - 11,9	12	303
12 - 12,9	10	313
13 - 13,9	7	320
14 - 14,9	5	325
15 - 15,9	3	328
16 - 16,9	3	331
17 - 17,9	2	333
18 - 18,9	1	334
19 - 19,9	1	335
>20	1	336



471	0.0254	0.0249	0.0244	0.0239	0.0235	0.0230	0.0226	0.0221
472	0.0254	0.0249	0.0244	0.0239	0.0235	0.0230	0.0226	0.0221
473	0.0254	0.0249	0.0244	0.0239	0.0235	0.0230	0.0226	0.0221
474	0.0254	0.0249	0.0244	0.0239	0.0235	0.0230	0.0226	0.0221
475	0.0254	0.0249	0.0244	0.0239	0.0235	0.0230	0.0226	0.0221
476	0.0254	0.0249	0.0244	0.0239	0.0235	0.0230	0.0226	0.0221
477	0.0254	0.0249	0.0244	0.0239	0.0235	0.0230	0.0226	0.0221
478	0.0254	0.0249	0.0244	0.0239	0.0235	0.0230	0.0226	0.0221
479	0.0254	0.0249	0.0244	0.0239	0.0235	0.0230	0.0226	0.0221
480	0.0254	0.0249	0.0244	0.0239	0.0235	0.0230	0.0226	0.0221
481	0.0254	0.0249	0.0244	0.0239	0.0235	0.0230	0.0226	0.0221

h = 0    0,40    0,80    1,20    1,60    2,00    2,40    2,80

h = hoogte boven bodem

Waterkwaliteitsgegevens van het porieuwwater (van klasse III havenel1b) en van het ontvangend milieu. (gebaseerd op metingen in de Oosterschelde en het Haringvliet)

Variabele	Porieuwwater	Ontvangend milieu
Hg (mg/L)	-	0,02
Cr (mg/L)	4,10	1,00
As (mg/L)	63,00	3,70
Cu (mg/L)	1,90	3,00
Zn (mg/L)	11,00	13,00
Cd (mg/L)	0,91	0,20
HCH (mg/L)	0,020	0,004
PCB (mg/L)	0,035	0,234

- = niet bepaald

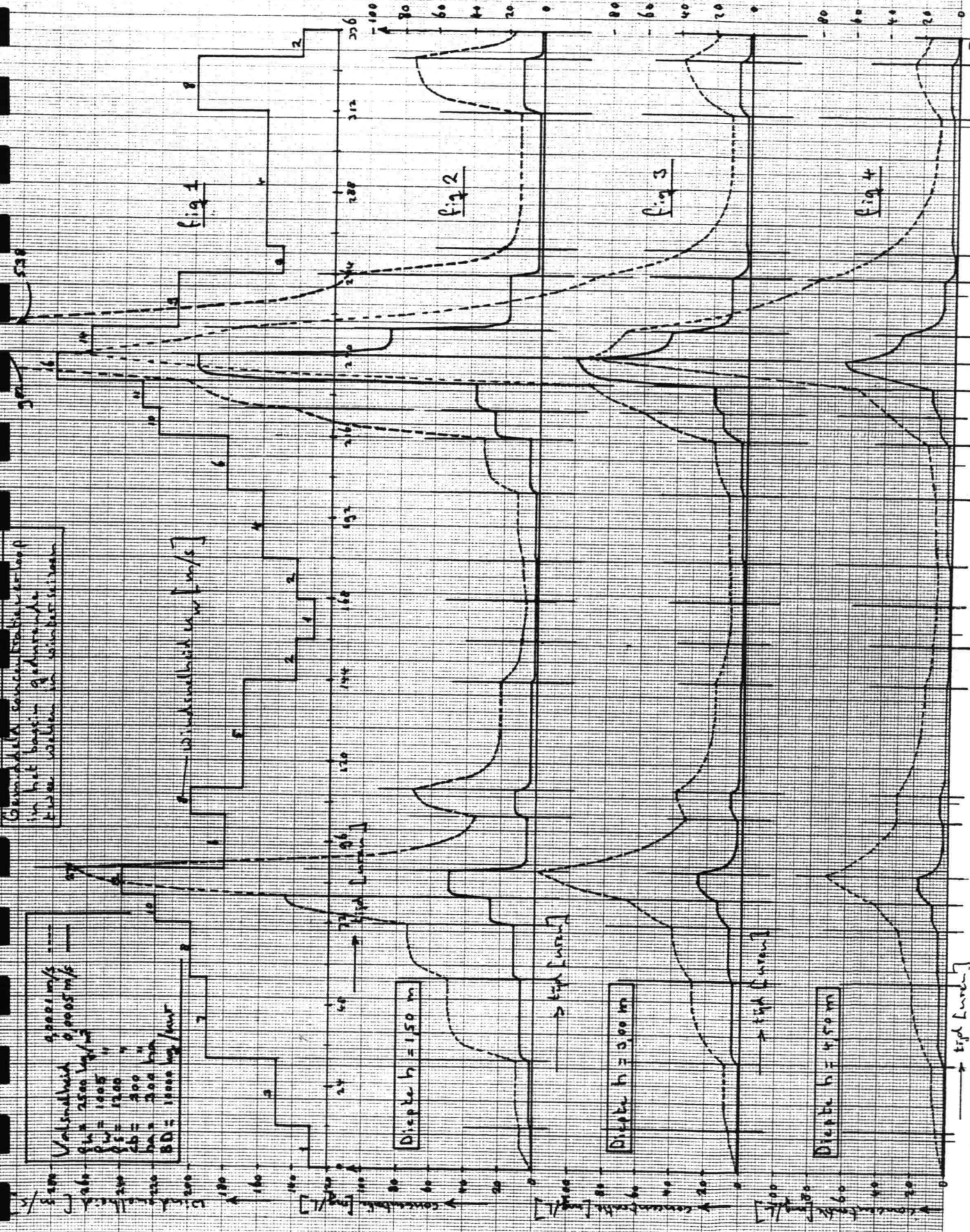
Concentratieverloop in het bassin als functie van de tijd voor de verschillende variabelen.

Tijd [jaar]	Hg [mg/L]	Cr [mg/L]	As [mg/L]	Cu [mg/L]	Zn [mg/L]	Cd [mg/L]	HCH [mg/L]	PCB [mg/L]
0	0,02	1,00	3,70	3,00	12,00	0,20	0,004	0,234
1	-	1,44	12,17	2,84	12,82	0,20	0,006	0,206
2	-	1,89	20,64	2,69	12,66	0,40	0,009	0,177
3	-	2,33	29,11	2,53	12,49	0,50	0,011	0,149
4	-	2,77	37,59	2,37	12,31	0,61	0,013	0,121
5	-	3,21	46,06	2,21	12,14	0,71	0,015	0,092
6	-	3,66	54,53	2,06	11,97	0,81	0,018	0,064
7	-	4,10	63,00	1,90	11,80	0,91	0,020	0,035

- = niet bepaald.

Gesamtdiskontabilitätsverlauf  
im mit basin gedrehten  
Phase werden im winterstehen

Vollzahlzeit	9000 m/s
$q_n$	2500 kg/m <sup>3</sup>
$\rho_n$	1000
$\rho_s$	1200
$c_b$	300
$h_n$	200 km
$BD$	10000 kg/cm <sup>2</sup>



Windsnelheid [m/s]	Diepte 1,50 m		Diepte 3,00 m		Diepte 4,50 m	
	Golf hoogte [m]	Periode [s]	Golf hoogte [m]	Periode [s]	Golf hoogte [m]	Periode [s]
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0
2	0,08	1,0	0,10	1,1	0,10	1,2
3	0,10	1,1	0,10	1,2	0,10	1,2
4	0,12	1,2	0,12	1,3	0,13	1,4
5	0,12	1,3	0,14	1,4	0,16	1,5
6	0,15	1,4	0,16	1,5	0,17	1,6
7	0,18	1,5	0,19	1,6	0,19	1,6
8	0,20	1,6	0,21	1,7	0,22	1,8
9	0,22	1,7	0,23	1,8	0,26	1,9
10	0,25	1,8	0,27	1,9	0,30	2,0
11	0,27	1,9	0,34	2,1	0,35	2,2
12	0,30	2,0	0,39	2,2	0,39	2,3
13	0,33	2,0	0,41	2,2	0,42	2,4
14	0,34	2,1	0,42	2,3	0,44	2,4
15	0,36	2,2	0,44	2,3	0,46	2,4
16	0,38	2,3	0,46	2,4	0,49	2,5

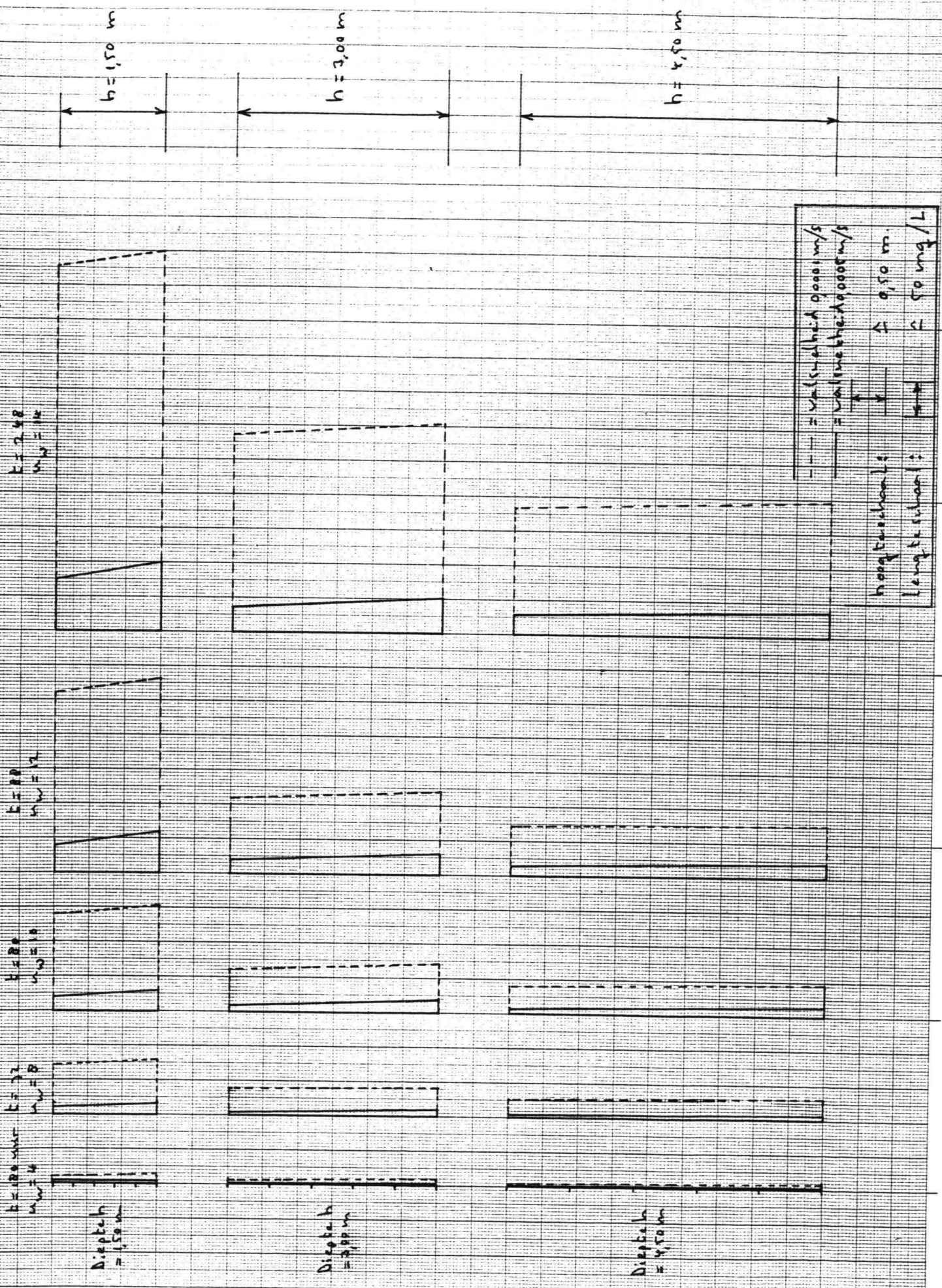
DIT PROGRAMMA DIEN TER BEREKENING VAN HET CONCENTRATIE-  
VERLOOP IN EEN BASSIN ONDER WISSELENDE EXTERNE FACTOREN

DE IN DIT PROGRAMMA IN TE LEZEN OF TE BEREKENEN  
VARIABLEN ZIJN DE VOLGENDE :

AANTAL	AANTAL OP ELKAAR VOLGENDE VARIERENDE WINDVELDEN
DIEP	TOTALE WATERDIEPTE IN M
HA	OPPERVLAKTE BASSIN IN HA
NSTR	AANTAL DIEPTESTROKEN
MAXTYD	TOTALE TIJDSDUUR VAN HET EXPERIMENT IN UREN
NTYD	AANTAL TYDSTAPPEN
G	GOLFHOOGTE IN M
P	GOLFPERIODE IN S
UW	WINDSNELHEID IN M/S
USO	SCHUIFSPANNINGSSNELHEID OPPERVLAKTE
USB	SCHUIFSPANNINGSSNELHEID BODEM
RW	DICHTHEID WATER IN KG/M**3
RS	DICHTHEID SLIB IN KG/M**3
RK	DICHTHEID KORREL IN KG/M**3
SB	SLIBCONCENTRATIE BODEM IN KG/M**3
BD	BIJDRAGE DIFFUSOR IN KG/UUR
CZ	WINDSCHUIFSPANNINGSCOEFFICIENT
EPS	TURBULENTE DIFFUSIECOEFFICIENT
GE	GEMIDDELDE CONCENTRATIE
UK	KRITIEKE SCHUIFSPANNINGSSNELHEID
WO	VALSNELHEID IN WATER BIJ C=0 IN M/S
CONC(J)	CONCENTRATIE BIJ HOOGTE J HIERBIJ LOOPT J VAN 1 TOT NSTR+3
TIME(K)	TIJDSTIP K WAAROP NIEUW WINDVELD VAN TOEPASSING WORDT
WIND(K)	WINDSNELHEID VANAF TIJDSTIP K
GOLF(K)	GOLFHOOGTE VANAF TIJDSTIP K
PERI(K)	GOLFPERIODE VANAF TIJDSTIP K

Bijlage 8

Concentratieverticalen op verschillende tijden t bij verschillende diepten.





Simulatie retourwater

- Waterdiepte  $h = 1,50$  m  
 - Watermelheid  $w = 0,0001$  m/s

Einde windsnelheid met windsnelheid $u_w$ op tijdstip $t$		Concentratieverloop over de diepte [mg/L]						Gemiddelde concentratie $\bar{c}$ [mg/L]
$u_w$ [m/s]	$t$ [uur]	oedem $c_0$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	opper- vlak $c_5$	$\bar{c}$
1	12	9	9	8	7	6	4	7
3	32	11	11	11	10	10	9	10
7	56	52	51	50	49	48	47	50
8	72	78	76	75	73	72	70	74
10	80	151	148	146	144	141	139	145
12	88	280	276	272	269	265	262	271
6	104	37	36	35	35	34	33	35
8	112	74	73	72	70	69	67	71
5	144	23	22	22	21	20	20	21
2	156	10	10	10	9	9	8	9
1	168	10	9	8	7	6	4	7
2	180	10	10	9	9	8	8	9
4	200	13	13	13	12	12	11	12
6	216	34	34	33	32	31	30	32
10	224	147	144	142	140	138	135	141
11	232	211	208	205	202	199	196	203
16	240	1004	995	986	977	968	960	982
14	248	551	546	540	535	529	524	538
9	264	117	115	113	111	109	107	112
3	272	23	23	22	22	21	19	22
4	312	13	13	13	12	12	11	13
8	328	77	76	74	73	72	70	74
2	336	18	18	17	16	15	14	16

Simulatie retourwater

- Waterdiepte  $h = 1,50 \text{ m}$   
 - Val snelheid  $w = 0,0005 \text{ m/s}$

Einde windveld met wind snelheid $u_w$ op tijdstip $t$		Concentratiecerloop over de diepte [mg/L]						Gemiddelde concentratie $\bar{c}$ [mg/L]
$u_w$ [m/s]	$t$ [uur]	bodem $c_0$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	oppervlakte $c_5$	$\bar{c}$
1	12	2	2	1	1	1	0	1
3	32	2	2	2	2	1	1	2
7	56	10	9	8	8	7	6	8
8	72	16	14	13	12	11	9	12
10	80	32	29	27	25	23	21	26
12	88	58	55	51	48	45	42	50
6	104	7	6	5	5	4	4	5
8	112	16	14	13	12	11	9	12
5	144	5	4	4	3	3	2	3
2	156	2	2	2	1	1	1	1
1	168	2	2	1	1	1	0	1
2	180	2	2	2	1	1	1	1
4	200	3	2	2	2	2	1	2
6	216	7	6	5	5	4	4	5
10	224	32	29	27	25	23	21	26
11	232	43	40	38	35	33	30	37
16	240	220	211	202	193	185	177	198
14	248	99	94	89	84	80	76	87
9	264	22	21	19	17	15	14	18
3	272	2	2	2	2	1	1	2
4	312	3	2	2	2	2	1	2
8	328	16	14	13	12	11	9	12
2	336	2	2	2	1	1	1	1

Simulatie retourwater

- Waterdiepte  $h = 3,00$  m  
 - Walvelheid  $w = 0,0001$  m/s

Einde windveld met windvelheid $u_w$ op tijdstip $t$		Concentratieverloop over de diepte [mg/L]						Gemiddelde concentratie $\bar{c}$ [mg/L]
$u_w$ [m/s]	$t$ [uur]	bodem $c_0$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	opper- vlak $c_5$	$\bar{c}$
1	12	8	8	7	6	5	4	6
3	32	9	9	9	9	8	8	9
7	56	29	29	28	27	27	26	28
8	72	42	41	40	39	38	37	40
10	80	69	68	66	65	64	63	66
12	88	120	121	119	117	115	113	118
6	104	34	34	33	32	31	30	32
8	112	40	40	39	38	37	36	38
5	144	16	16	16	15	15	14	15
2	156	11	11	11	10	9	9	10
1	168	10	10	9	8	6	5	8
2	180	9	9	9	9	8	7	9
4	200	11	11	11	10	10	9	10
6	216	21	20	20	19	18	18	19
10	224	62	61	59	58	57	56	59
11	232	96	94	92	91	89	88	92
16	240	401	396	391	387	383	379	390
14	248	302	299	296	293	289	286	294
9	264	91	90	89	87	85	84	88
3	272	40	39	38	37	35	32	37
4	312	12	11	11	11	10	10	11
8	328	40	39	38	37	36	35	38
2	336	20	20	19	19	17	16	19

Simulatie retourwater - Waterdiepte  $h = 3,00 \text{ m}$   
 - Watersnelheid  $w = 0,0005 \text{ m/s}$

Einde windveld met windsnelheid $u_w$ op tijdstip $t$		Concentratiewoog over de diepte [mg/L]						Gemiddelde concentratie $\bar{c}$ [mg/L]
$u_w$ [m/s]	$t$ [uur]	boven $c_0$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	oppervlakte $c_5$	$\bar{c}$
1	12	2	2	1	1	1	0	1
2	32	2	2	2	1	1	1	1
7	56	6	6	5	4	4	3	5
8	72	9	8	7	6	6	5	7
10	80	17	15	14	13	12	11	14
12	88	20	28	26	25	23	21	25
6	104	4	4	4	3	3	2	3
8	112	9	8	7	6	6	5	7
5	144	3	3	3	2	2	2	2
2	156	2	2	2	1	1	1	1
1	168	2	2	1	1	1	0	1
2	180	2	2	2	1	1	1	1
4	200	2	2	2	2	1	1	2
6	216	4	4	4	3	3	2	3
10	224	17	15	14	13	12	11	14
11	232	22	21	19	18	17	15	19
16	240	111	105	101	96	91	87	98
14	248	51	48	45	42	40	37	44
9	264	14	12	10	8	7	6	10
3	272	2	2	2	1	1	1	1
4	312	2	2	2	2	1	1	2
8	328	9	8	7	6	6	5	7
2	336	2	2	2	1	1	1	1

Simulatie retourwater - Waterdiepte  $h = 4,5 \text{ m}$   
 - Valsnelheid  $w = 0,0001 \text{ m/s}$

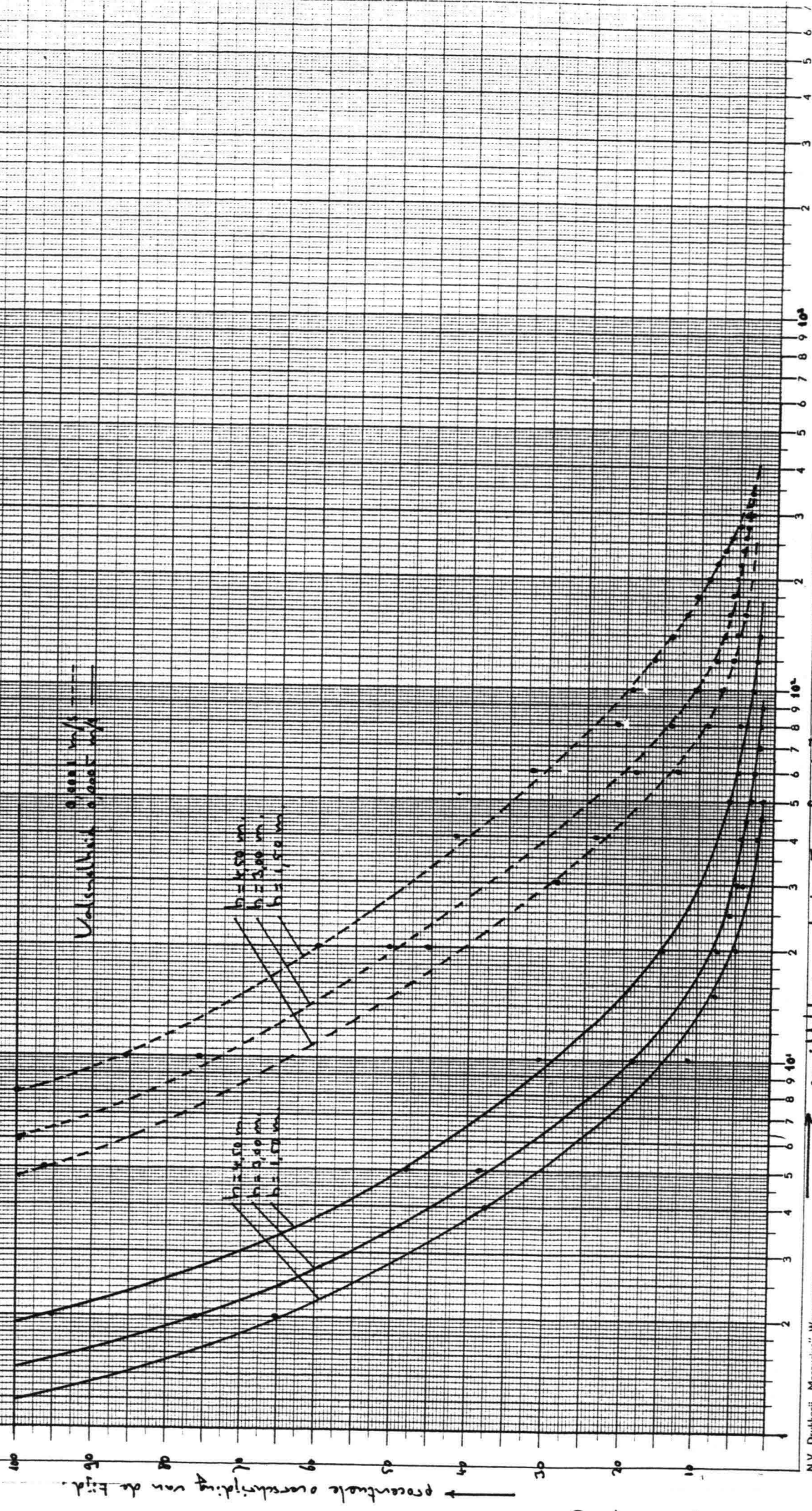
Einde windveld met windsnelheid $u_w$ op tijdstip $t$		Concentratieverloop over de diepte [mg/L]						Gemiddelde concentratie $\bar{c}$ [mg/L]
$u_w$ [m/s]	$t$ [uur]	$c_0$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$\bar{c}$
1	12	7	6	6	5	4	3	5
3	32	9	9	9	8	8	7	8
7	56	21	21	20	20	19	18	20
8	72	29	29	28	27	27	26	28
10	80	44	43	42	42	41	40	42
12	88	74	72	72	70	69	68	71
6	104	52	52	51	50	29	28	30
8	112	52	52	51	50	29	29	30
5	144	15	15	14	14	13	12	14
2	156	12	11	11	10	10	9	10
1	168	11	10	9	8	7	5	8
2	180	9	9	9	8	8	7	8
4	200	10	10	10	10	9	9	10
6	216	16	16	15	15	14	14	15
10	274	38	37	36	35	34	34	36
11	232	58	57	56	55	54	53	56
16	240	221	217	214	211	208	206	212
14	248	195	192	190	188	185	183	189
9	264	82	81	80	78	77	75	79
3	272	47	47	46	45	41	37	44
4	312	12	12	11	11	10	10	11
8	328	27	27	26	25	25	24	26
2	336	19	19	18	17	15	14	17

Simulatie retourwater

- Waterdiepte  $h = 4,5 \text{ m}$   
 - Valsnelheid  $w = 0,0005 \text{ m/s}$

Einde windveld met windsnelheid $u_w$ op tijdstip $t$		Concentratieverloop over de diepte [mg/L]						Gemiddelde concentratie $\bar{c}$ [mg/L]
$u_w$ [m/s]	$t$ [uur]	$c_0$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$\bar{c}$
1	12	2	2	1	1	1	0	1
3	32	2	2	2	1	1	1	1
7	56	5	4	4	3	3	3	4
8	72	6	6	5	5	4	4	5
10	80	12	11	10	9	8	7	9
12	88	20	19	18	16	15	14	17
6	104	4	4	3	3	2	2	3
8	112	6	6	5	5	4	4	5
5	144	3	3	2	2	2	1	2
2	156	2	2	2	1	1	1	1
1	168	2	2	1	1	1	0	1
2	180	2	2	2	1	1	1	1
4	200	4	3	3	2	2	2	3
6	216	4	4	3	3	2	2	3
10	224	12	11	10	9	8	7	9
11	232	16	14	13	12	11	10	13
16	240	73	69	66	62	59	56	64
14	248	35	33	31	29	27	26	30
9	264	9	9	8	7	6	6	7
3	272	2	2	2	1	1	1	1
4	312	4	3	3	2	2	2	3
8	328	6	6	5	5	4	4	5
2	336	2	2	2	1	1	1	1

Over schrijftijd van eenheden van gemiddelde concentratie  $Z$   
 naar verschillende diepten en verschillende breedtes



Bijlage 11



inhoud ca 90,57 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>  
 damhoogte 21 m  
 bodemdiepte 23 m  
 oppervlakte speciedepôt 294 ha  
 oppervlakte potentiële 425 ha  
 maasvlakteuitbreiding

projectgroep grootschalige lokatie berging baggerspecie					
opg.	getek.	gecalc.	gecont.	gezien	accorde
d.d.	juli 83				
par.	D				
gemeente rotterdam openbaar lichaam rijnmond rijkswaterstaat					
variant III 21/23					met bladen blad
rijkswaterstaat directie benedenrivieren					schaal 1:10.000 a1 nr belt 83.1104



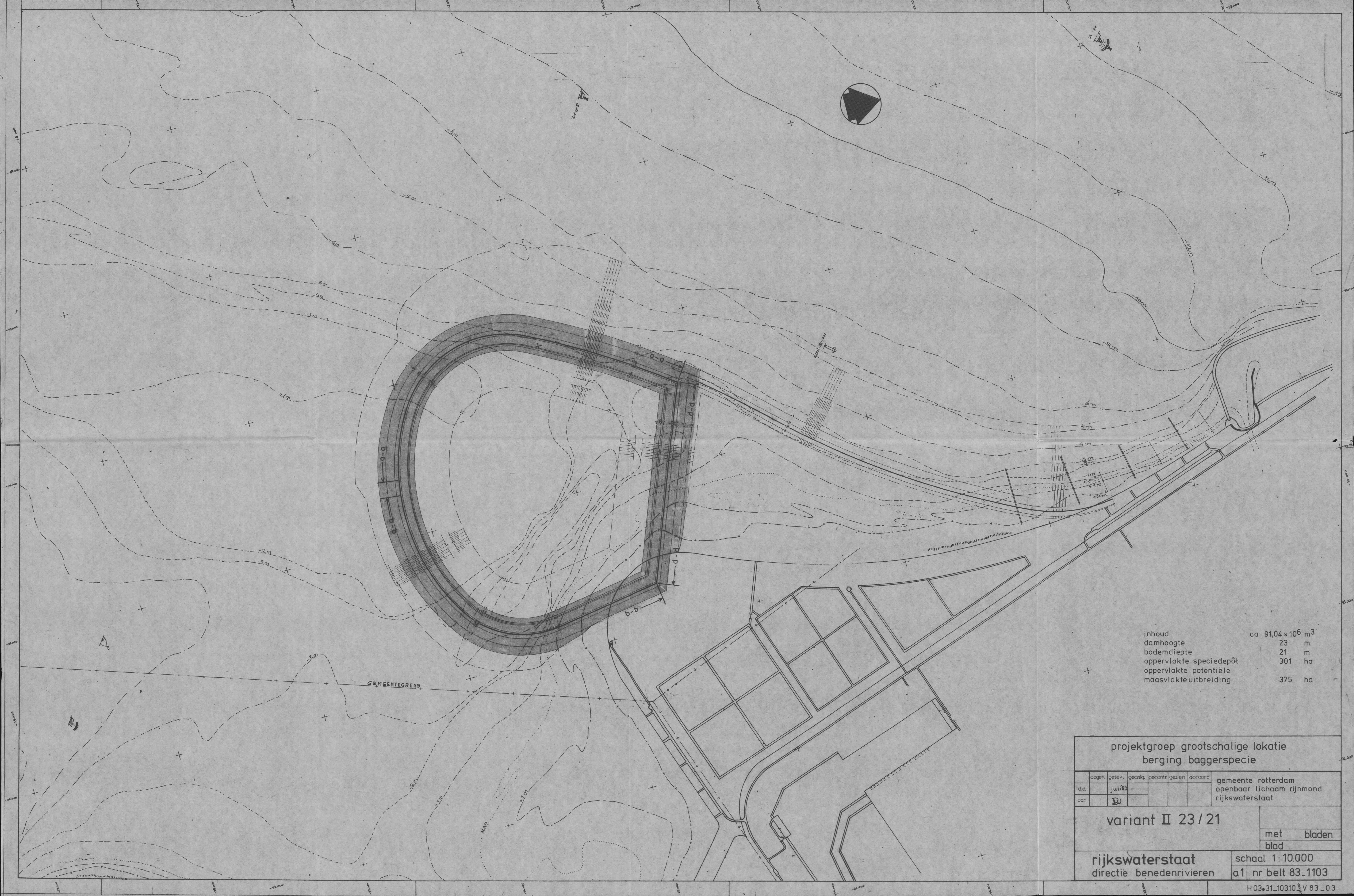


inhoud ca  $91,00 \times 10^6$  m<sup>3</sup>  
 damhoogte 20 m  
 bodemdiepte 18 m  
 oppervlakte speciedepôt 305 ha

**verklaring**

- nap +100m
- nap
- nap -100m
- nap -200m
- nap -300m
- nap -400m
- nap -500m
- nap -600m
- nap -800m
- nap -10,00m

<b>projectgroep grootschalige lokatie berging baggerspecie</b>							
opg.	getex.	gecalc.	gecontr.	gezien	accorde	gemeente rotterdam openbaar lichaam rijnmond rijkswaterstaat	
d.d.	juli 83						
par.	Bw						
<b>variant IV 20/18</b>					met bladen		
					blad		
rijkswaterstaat					directie benedenrivieren	594	nr belt 83_1105
					1051		



inhoud	ca 91,04 × 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
damhoogte	23 m
bodemdiepte	21 m
oppervlakte speciedepôt	301 ha
oppervlakte potentiële maasvlakte uitbreiding	375 ha

<p>projectgroep grootschalige lokatie berging baggerspecie</p>					
opg.	getek.	gecalq.	gecontr.	gezien	accoord
d.d.	1 juli 83				
par.	D				
					gemeente rotterdam openbaar lichaam rijnmond rijkswaterstaat
variant II 23/21					met bladen blad
rijkswaterstaat directie benedenrivieren					schaal 1:10.000 a1 nr belt 83.1103



inhoud ca  $91,65 \times 10^6 \text{ m}^3$   
 damhoogte 22 m  
 bodemdiepte 18 m  
 oppervlakte speciedepôt 319 ha  
 oppervlakte potentiële maasvlakte uitbreiding 360 ha

projectgroep grootschalige lokatie berging baggerspecie					
opge.	getek.	gecal.	gecont.	gezien	accord
d.d.	juli 83				
par.	DW				
gemeente rotterdam openbaar lichaam rijnmond rijkswaterstaat					variant I 22/18
					met bladen blad
rijkswaterstaat directie benedenrivieren					schaal 1:10000 a1 nr belt 83.1102

