



DT: 484401

waterloopkundig laboratorium delft hydraulics laboratory

VOORLOPIG

Inventarisatie getijrivieren en getijmodellen

Verslag onderzoek

M896

oktober 1980

Inventarisatie getijrivieren en getijmodellen

Verslag onderzoek

M896

oktober 1980

187

187

187

187

187

187

187

187

187

187

187

187

187

187

187

187

187

187

187

187

INHOUD

Lijst van symbolen

Lijst van figuren

	blz.
1 <u>Inleiding</u>	1-1
2 <u>Doel onderzoek</u>	2-1
3 <u>Klassifikatie van estuaria</u>	3-1
4 <u>Inventarisatie Nederlandse getijrivieren</u>	4-1
5 <u>Inventarisatie buitenlandse getijrivieren</u>	5-1
5.1 Thames-estuarium.....	5-1
5.2 Mersey-estuarium.....	5-2
6 <u>Overzicht maatgevende karakteristieken voor de zoutverdeling</u> ..	6-1
6.1 Kentallen.....	6-2
6.2 Stratifikatie-circulatie-diagram.....	6-6
6.3 Zoutindringing.....	6-8
6.4 Vertikale uitwisselingscoëfficiënten.....	6-11
6.5 Dispersiecoëfficiënten.....	6-12
✓ 7 <u>Slibverschijnselen</u>	7-1
8 <u>Mengmechanismen</u>	8-1
9 <u>Aanpak onderzoek getijrivieren</u>	9-1
✓ 10 <u>Toepassing wiskundige modellen voor beschrijving c.q. voorspel- ling zouttoestand en slibgedrag in getijrivieren</u>	10-1
11 <u>Modellering in hydraulische schaalmodellen</u>	11-1
12 <u>Samenvatting, konklusies en aanbevelingen</u>	12-1

LITERATUUR

APPENDIX A: klassifikatie naar stratifikatie en circulatie (stratifikatie-circulatie-diagram)

Lijst van symbolen

A	amplitude vertikaal getij bij uitmonding in zee	m
A	oppervlakte van de dwarsdoorsnede	m ²
A _B	amplitude vertikaal getij	m
b	breedte	m
C	Chezy koëfficiënt voor homogeen water	m ^{1/2} /s
c	concentratie gesuspendeerde deeltjes	p.p.m.
D	longitudinale dispersiekoëfficiënt	m ² /s
D'	longitudinale dispersiekoëfficiënt voor rivier zonder inhammen	m ² /s
d	totale waterdiepte in twee-lagen model	m
d ₁	hoogte onderlaag in twee-lagen model	m
d ₅₀	gemiddelde korreldiameter	µm
E	estuariumgetal	-
F _m	intern Froudegetal	-
F _o	Froudegetal	-
f _B	wrijvingsfaktor	-
G	energiedissipatie per eenheid van massa en per tijdseenheid	m ² /s ³
g	zwaartekrachtversnelling	m/s ²
h	waterdiepte	m
h _o	gemiddelde waterdiepte bij uitmonding in zee	m
I	toename potentiële energie per massa en tijdseenheid	m ² /s ³
K _x	longitudinale stofuitwisselingskoëfficiënt	
K _{xo}	K _x t.p.v. x = 0	
K _z	vertikale stofuitwisselingskoëfficiënt	
k	konstante in toestandvergelijking	-
L	rivier- of gootlengte	m
L _i	minimale zoutindringingslengte	m
L _R	resonantielengte = $\frac{1}{4} T \sqrt{gh_o}$	m
M	verhoudingsgetal tussen menging t.g.v. getijwerking en rivierafvoer	
N ₂	vertikale uitwisselingskoëfficiënt van impuls	
P	U_f/U_t	-
P _T	vloedvolume	m ³
p	druk	Pa
Q _f	rivierafvoer	m ³ /s
q _s	transport gesuspendeerde deeltjes per eenheid van breedte	kg/ms
q _w	waterdebiet per m breedte	m ² /s
q _{eb}	maximum ebdebiet per eenheid van breedte bij uitmonding in zee	m ² /s
q _r	rivierdebiet per eenheid van breedte = $\frac{Q_f}{A}$	m ² /s

Ra	estuarium analogon van Rayleigh getal	-
Ri	lokale Richardson getal	-
RiE	estuarium Richardson getal	-
S	zoutgehalte	°/oo
S ₀	gemiddeld zoutgehalte in doorsnede	°/oo
δS	verschil in zoutgehalte tussen bodem en oppervlak	°/oo
T	getijperiode	s
T	dimensieloze schuifspanning t.g.v. wind	-
t	tijd	
U ₀	amplitude van de getijsnelheid in de mond tijdens vloed	m/s
u	snelheid in x-richting	m/s
u ₀	snelheid, gemiddeld over de doorsnede en over het getij	m/s
u ₁	de afwijking van de over de doorsnede gemiddelde snelheid op een bepaald tijdstip t.o.v. U ₀	m/s
u ₂	de afwijking t.o.v. de over de doorsnede gemiddelde snelheid	m/s
u''	turbulente afwijkingen in de snelheid	
u _s	getijgemiddelde waarde van u ₂	m/s
u'	afwijkingen in u ₂ t.o.v. de getijgemiddelde waarde u _s	m/s
u _{st}	over de vertikaal gemiddelde waarde van u _s	m/s
u _{sv}	afwijking van u _s t.o.v. de over de vertikaal gemiddelde waarde u _{st}	m/s
u' _t	over de vertikaal gemiddelde waarde van u'	m/s
u' _v	afwijking van u' t.o.v. de over de vertikaal gemiddelde waarde u' _t	m/s
u _f	rivierafvoer gedeeld door dwarsdoorsnede	m/s
u _s	getijgemiddelde stroomsnelheid aan oppervlak	m/s
u _t	rms getijsnelheid	m/s
u _L	horizontale snelheid in onderlaag van twee-lagen model	m/s
u _u	horizontale snelheid in bovenlaag van twee-lagen model	m/s
u _T	over getij gemiddelde longitudinale snelheid	m/s
v	vertikale snelheid op grensvlak in twee-lagen model	m/s
v _T	over getij gemiddelde laterale snelheid	
W	vertikale snelheid op grensvlak in twee-lagen model	m/s
w	valsnelheid deeltjes	m/s
w ₅₀	medianane valsnelheid gesuspendeerde deeltjes	m/s
x	lengtekoördinaat	m
y	breedtekoördinaat	m
z	diepte-koördinaat	m
α	estuariumgetal	-

ε	$\Delta\rho/\rho = (\text{zee} - \text{rivier}) / \text{rivier}$	-
η	$z/h = \text{dimensieloze verticale koördinaat}$	-
ζ	vertikale verplaatsing wateroppervlak	m
λ	schaalfaktor = waarde in prototype: waarde in model	-
ν	gedeelte van stroomopwaartse zouttransport, dat niet door gravitatiecirculatie wordt veroorzaakt	-
ξ	dimensieloze longitudinale koördinaat	-
ρ	dichtheid	kg/m ³
$\Delta\rho$	$\rho_{\text{zeewater}} - \rho_{\text{rivierwater}}$	kg/m ³
ρ_f	dichtheid rivierwater	kg/m ³
τ	schuifspanning	Re
τ_w	schuifspanning t.g.v. wind	Re
\emptyset	stroomfunctie voor de circulatiestromen	-

The first part of the paper discusses the importance of the study and the objectives of the research. It also outlines the methodology used in the study and the results obtained. The second part of the paper discusses the implications of the study and the conclusions drawn from the research. The third part of the paper discusses the limitations of the study and the areas for future research. The fourth part of the paper discusses the significance of the study and the contributions it makes to the field. The fifth part of the paper discusses the practical applications of the study and the recommendations made for practice. The sixth part of the paper discusses the ethical considerations of the study and the measures taken to ensure ethical standards. The seventh part of the paper discusses the funding of the study and the acknowledgments made to the funders. The eighth part of the paper discusses the distribution of the study and the availability of the data. The ninth part of the paper discusses the copyright of the study and the permissions granted for its use. The tenth part of the paper discusses the contact information of the author and the ways in which the author can be reached for further information.

Lijst van figuren

- fig. 3-1 Resultaten berekeningsmethode Hansen en Rattray; snelheids- en zoutprofielen
- fig. 3-2 Stratifikatie-circulatiediagram; v-waarden en klassifikatie
- fig. 3-3 Stratifikatie-circulatiediagram met lijnen van konstante P , F_m en R_iE
- fig. 5-0 Overzicht Engelse estuaria
- fig. 5-1 Thames estuarium
- fig. 5-2 Mersey estuarium
- fig. 5-3 Tay estuarium
- fig. 6-1 Geometrie estuaria: $\frac{h}{L}$ als functie van $\frac{b}{L}$
- fig. 6-2 Weergave geïnterpreteerde estuaria in stratifikatie-circulatie diagram
- fig. 6-3 Mersey estuarium - Stratifikatie-circulatie diagram
- fig. 6-4 De minimale zoutindringingslengte L_i als functie van A , C , q_r , h_o en $\Delta\rho$ bij $\frac{L}{L_R} = 0,884$
- fig. 6-5 Resultaten gootproeven ter bepaling van de minimale zoutindringingslengte L_i
- fig. 6-6 Mersey estuarium - $\frac{K_z}{N_z}$ als functie van R_i
- fig. 7-1 Thames estuarium - netto waterbewegingen en suspensietransporten
- fig. 7-2 Thames estuarium - resultaten erosieproeven
- fig. 7-3 Thames estuarium - gemeten valsnelheden van Thames slib
- fig. 7-4 Mersey estuarium - verloop concentratie gesuspendeerde deeltjes over de getijperiode voor diverse plaatsen in de Narrows
- fig. 8-1 Mersey estuarium - Queen Elisabeth II haven
- fig. 8-2 Thames estuarium - Tilbury Docks en Tidal Basin
- fig. 8-3 Getijgemiddelde snelheids- en zoutverdeling in een bocht in de Mersey
- fig. 8-4 Thames estuarium - verloop suspensietransport over de doorsnede als functie van de getijslag te Long Reach
- fig. 8-5 Mersey estuarium - invloed variatie diepte over de doorsnede op het snelheidsprofiel
- fig. 8-6 Mersey estuarium - eb- en vloedkanalen
- fig. 10-1 Twee-lagen model voor de Thames
- fig. 10-2 Vergelijking berekende en gemeten slibconcentraties voor twee-lagen model van de Thames
- fig. 10-3 Resultaten 2D-berekeningen voor een hypothetisch estuarium
- fig. 11-1 Thames estuarium - resultaten modelonderzoek

- fig. 11-2 Thames estuarium - vergelijking bewegingen van celluloid ballen in model en radioactieve tracers in prototype
- fig. 11-3 Thames estuarium - invloed stormvloedkering op rivier (resultaten modelonderzoek).
- fig. 11-4 Mersey estuarium - resultaten modelproeven ($\lambda_L = 3200$; $\lambda_h = 120$)
- fig. 11-5 Mersey estuarium - reststromen in model bij proeven met en zonder dichtheidsverschillen
- fig. 11-6 Mersey estuarium - resultaten modelproeven ($\lambda_L = 550$; $\lambda_h = 60$).

1 Inleiding

Om het proces van zoutindringing in getijrivieren te leren begrijpen zijn in rapport M896-40 voorstellen gepresenteerd tot principe-onderzoek naar de diverse hierbij van belang zijnde fysische mechanismen. In werkelijkheid zullen verschillende mechanismen tegelijkertijd optreden. Aangezien ook een inventarisatie van deze geïntegreerde effecten in de diverse prototypen een bijdrage kan leveren aan het inzicht in het zoutindringingsproces is besloten tot een inventarisatie van de hierover beschikbare gegevens (zie M896-40: blz. 15).

Naast het onderzoek naar zoutindringing zal de komende jaren ook het onderzoek naar slibverschijnselen een hoge prioriteit hebben. Bij de inventarisatie zullen daarom ook gegevens over slibgedrag in estuaria worden meegenomen.

Het fundamentele onderzoek met betrekking tot dichtheidsstromen en slibverschijnselen kan in de volgende hoofdgroepen worden onderverdeeld:

- I Principe-onderzoek naar de mechanismen bij dichtheidsstromen (M896-deelproject 60)
- II Wiskundige beschrijvingen:
 - 1-D (M896-deelproject 20)
 - 2-D vert. (M896-deelproject 30)
 - 2-L (M896-deelproject 40)
 - 2-D hor. (WAQUA)
 - 3-D
- III Slibonderzoek PS (M896-deelproject 50)
- IV Modellering in hydraulische schaalmodellen (M896-deelproject 70)

De studie "inventarisatie getijrivieren en getijmodellen" is zodanig opgezet, dat deze binnen het kader van de doelstelling aansluit bij de lijn in het getijgootonderzoek. Het onderzoek is in het kader van het getijgootonderzoek M896 uitgevoerd in opdracht van de Hoofdafdeling Waterloopkunde van de Deltadienst van Rijkswaterstaat. Het verslag is geschreven door ir. W. van Leussen.

Overeenkomstig de afspraken in de getijgootvergadering d.d. 16 juni 1980 zal de studie gefaseerd worden uitgevoerd. Het voorliggende rapport betreft de eerste fase en heeft zich beperkt tot twee estuaria, te weten de Thames en de Mersey. Wanneer overeenstemming bestaat over de uiteindelijke vorm-

geving van deze inventarisatie zal de eerstvolgende fase bestaan uit een viertal Engelse estuaria (Tay, Severn, Clyde en Southampton estuarium) en de Nederlandse getjewateren (Rotterdamse Waterweg, Oosterschelde, Westerschelde, Eems).

2 Doel onderzoek

Doel van de studie is een overzicht te krijgen van de maatgevende karakteristieken van de diverse getijrivieren en de daarvan gebouwde zoutindringings- en slibmodellen, zoals getij-, rivier-, slib- en zoutgehalterandvoorwaarden en geometrische bijzonderheden, alsmede de hieruit resulterende snelheids-, zout- en slibconcentratieverdelingen.

Tevens kan zo een indruk worden verkregen hoe elders in de wereld de problemen van zoutindringing en sedimentatie van slib in getijrivieren onderzoekstechnisch worden aangepakt.

Onderstreept dient hierbij te worden, dat deze studie beperkt blijft tot een inventarisatie van de in de literatuur gepresenteerde gegevens van getijrivieren en getijmodellen. Voor zover mogelijk zal onderlinge vergelijking van kentallen van estuaria plaatsvinden. Studie naar de achtergronden van gesignaleerde mechanismen hoort thuis bij de diverse in rapport M896-40 [108] genoemde onderwerpen en zal dus niet hier plaatsvinden.

3 Klassifikatie van estuaria

Een algemeen aanvaarde definitie van een estuarium is die welke door Pritchard [136] is ingevoerd:

"Een estuarium is een gedeeltelijk ingesloten kustwater dat een vrije verbinding heeft met de open zee en meetbaar verdund is met vanuit het land aangevoerd zoet water".

De topografie, de rivierafvoer en de getijwerking zijn de belangrijkste factoren die de menging in het estuarium beïnvloeden, terwijl ook de aardrotatie (Coriolis-effekt) en wind van invloed kunnen zijn. Als gevolg hiervan zal een bepaalde zoutverdeling in het estuarium optreden, terwijl deze weer, samen met de genoemde invloedsfactoren, van invloed is op de in het estuarium optredende circulatiestromen.

Het zijn met name de grillige vormen van de topografie die het moeilijk maken om voor de estuaria een indeling te maken. Er zijn in de literatuur dan ook diverse vormen van klassifikatie te vinden:

a. Geomorfologische klassifikatie

Uitgaande van de geomorfologische structuur is door Pritchard in [137] een indeling in drie groepen gemaakt:

a.1 Coastal plain estuaries

Deze zijn gevormd door verdrinking van vroegere riviervalleien, hetzij door daling van het land of door rijzing van de zeespiegel. Deze estuaria zijn meestal niet diep (< 30 m) en de breedte-diepte verhouding is vaak groot. Het gehele estuarium is meestal bedekt met recent afgezet sediment in variërende dikte, meestal slib in het bovenstroomse gedeelte, overgaand naar zand, naarmate men dichterbij de monding komt. Over het algemeen is de per getij aangevoerde hoeveelheid rivierwater klein ten opzichte van het volume water dat per getij het estuarium in- en uitstroomt.

a.2 Fjorden

Fjorden zijn gevormd in gebieden, die met pleistoceen ijs bedekt zijn geweest. Zij zijn zeer diep en bij de mond voorzien van een drempel, waar de diepte veel geringer is. Deze drempel beperkt de vrije uitwissel-

ling met de zee. De breedte-diepte verhouding is meestal klein (vaak ca. 10 : 1). De wanden zijn steil en de doorsnede is bijna rechthoekig. De rivierafvoer is klein vergeleken met het totale volume van de fjord, maar, omdat binnen in de fjord de getijwerking meestal niet groot is, dikwijls groot in vergelijking met het vloedvolume. De fjorden zijn daarom sterk gestratificeerd.

a.3 Bar-built estuaries

Deze estuaria onderscheiden zich van het type a.1 door een voor de kust gevormde zandbank. Ze zijn meestal zeer ondiep en worden door een klein kanaal met de zee verbonden. Vanwege de kleine doorsnede zijn bij de mond de stroomsnelheden als gevolg van de getijwerking groot, maar relatief klein in het estuarium zelf. De rivierafvoer is over het algemeen groot en sterk variabel met het seizoen, waarbij, op tijden van grote rivierafvoer, grote hoeveelheden sediment worden meegevoerd. Dergelijke estuaria komen voornamelijk voor in tropische gebieden of in gebieden met een actieve sedimentatie voor de kust.

a.4 Overige estuaria

Hieronder vallen de estuaria, die ontstaan zijn door aardverschuivingen, vulkaanuitbarstingen etc.

Aangezien de Nederlandse estuaria vallen onder het onder punt a.1 genoemde type, zal de inventarisatie in eerste instantie op dit soort estuaria gericht zijn. Aan dit soort estuaria is overigens ook het meeste onderzoek verricht.

b. Klassifikatie naar gelaagdheid

Een veel gebruikte methode is de estuaria in te delen naar de wijze waarop de voor de zout- en snelheidsverdeling verantwoordelijke fysische processen in het estuarium zich manifesteren. Centraal hierbij staat de interactie van de getijwerking en de rivierafvoer, waarbij de geometrie van het estuarium vanzelfsprekend een zeer belangrijke rol speelt. De rivierafvoer zal de neiging hebben als een laag zoet water over de zwaardere onderlaag naar zee te stromen. De getijstromen daarentegen zorgen voor de opwekking van turbulentie en daardoor menging van de zoute onderlaag met de zoetere bovenlaag. Bij sterke getijwerking en lage bovenafvoer leidt dit tot een nagenoeg vertikaal volledig gemengde situatie.

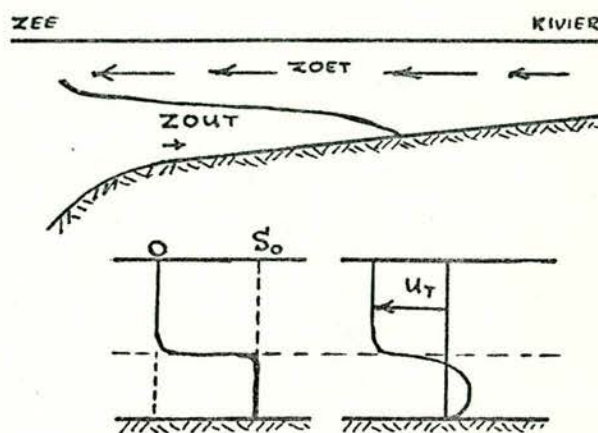
Overeenkomstig Pritchard [112] worden de volgende gevallen onderscheiden:

b.1 Zoutwig

In deze situatie wordt het circulatiepatroon nagenoeg volledig beheerst door de bovenafvoer.

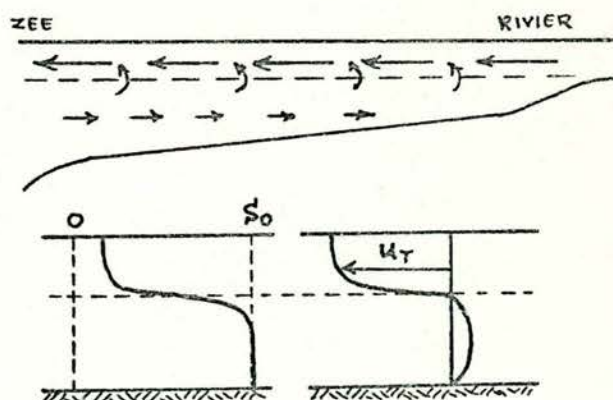
(geen of relatief geringe getijwerking). Het zoute water dringt als een wig langs de bodem de rivier binnen, waarbij de totale indringing wordt bepaald door wrijving tussen de zoute tong en de naar zee stromende zoete bovenlaag. De sterke dichtheidsgradiënt

op het zeer scherpe grensvlak heeft een sterk dempende werking op de turbulentie en de menging tussen het zoute en zoete water.



b.2 Sterk gelaagde situatie

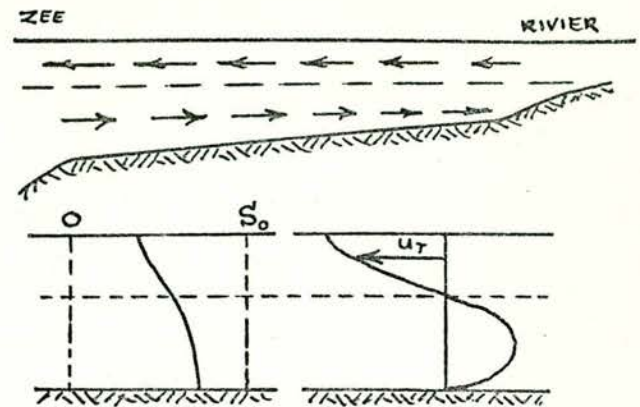
Bij een zekere waarde van de snelheid van het zoete water over het zoute water zullen op het grensvlak brekende golven ontstaan, waardoor "entrainment" plaatsvindt van het zoute water in de zoete bovenlaag. Aangezien entrainment een eenrichtingsproces is, zal in de zoute onderlaag een landwaartse stroming optreden. Het zoutgehalte in de bovenlaag zal hierdoor iets toenemen, evenals het zeewaarts gericht debiet in de bovenlaag. Naast de entrainment zal er op het grensvlak ook een zekere uitwisseling (turbulente diffusie) optreden, waardoor het grensvlak niet geheel scherp meer zal zijn, maar meer als een tussenlaag zich zal voordoen met een grote verticale dichtheidsgradiënt.



b.3 Gedeeltelijk gemengde situatie

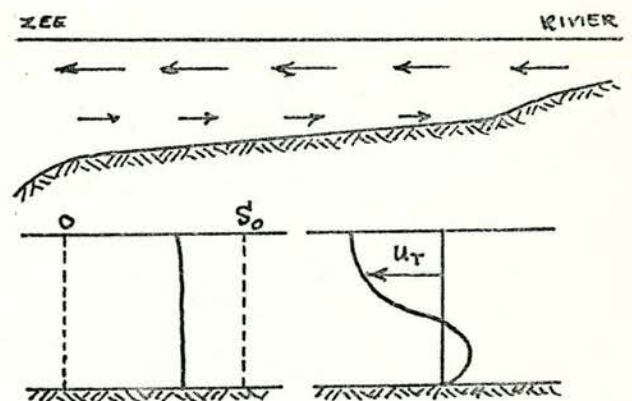
Een toename van de getijamplitude doet nu een grotere menging ontstaan tussen het zoete en zoute water. Er is geen duidelijk grensvlak meer tussen het zoute en zoete water, maar de verticale zoutverdeling toont

een continue toename van het zoutgehalte vanaf het oppervlak tot aan de bodem. De maximale verticale dichtheidsgradiënt zal ongeveer optreden waar de netto stroomsnelheid nul is. Het verschil tussen het zoutgehalte aan de bodem en dat aan het oppervlak zal, behalve van de geometrie van het estuarium (bijv. breedte-diepte verhouding), vanzelfsprekend met name afhangen van de hoeveelheid door de rivier geleverde zoete water en de per getij in- en uitgaande hoeveelheid zeewater.



b.4 Volledig gemengde situatie

Als de getijdebieten zeer groot zijn in vergelijking met de rivierafvoer zal de verticale menging zo sterk worden dat het zout nagenoeg homogeen verdeeld is over de vertikaal. Wel zal er natuurlijk een dichtheidsgradiënt in longitudinale richting aanwezig zijn. Deze laatste zorgt ervoor, dat, ook in een vertikaal volledig gemengd estuarium, er bij de bodem dikwijls een netto stroming landwaarts en bij het oppervlak een netto stroming zeewaarts optreedt.



Bij gemengde estuaria met een grote breedte-diepte verhouding komt, als gevolg van Corioliskrachten, vaak een laterale variatie in het zoutgehalte voor. Op het noordelijk halfrond ontstaat dan een netto zeewaartse stroom van een lager zoutgehalte aan de rechterzijde van de rivier, gezien in de richting van de zee, en een compenserende landwaartse stroming met een hoger zoutgehalte aan de linkerzijde.

Het zal niet altijd mogelijk zijn om de estuaria in een der bovengenoemde klassen in te delen. Gezien de variaties in de bovenafvoer zal een estuarium in de ene periode anders worden ingedeeld dan in de andere periode, terwijl ook over de getijperiode de stratifikatie zodanig kan verlopen dat meerdere

klassen worden bestreken.

c. Klassifikatie naar stratifikatie en circulatie (stratifikatie-circulatie diagram)

Een methode om de estuaria niet alleen te klassificeren naar de stratifikatie, maar ook naar de in het estuarium door dichtheidsverschillen optredende circulatiestromen wordt gepresenteerd door Hansen en Rattray [117]. Uitgangspunt is hierbij een analytische studie van de verticale zout- en snelheidsverdeling ([115], [116]), waarvan in Appendix A een samenvatting is gegeven.

Om de wiskundige bewerkingen niet te ingewikkeld te doen zijn wordt bij deze beschouwingen aangenomen:

b = breedte = konstant

h = waterdiepte = konstant

Q_f = rivierafvoer = konstant

uitwisselingscoëfficiënten N_z , K_x en K_z zijn onafhankelijk van de diepte.

De karakteristieken van het analytische model worden in [117] uitgedrukt in twee dimensieloze parameters:

$$\begin{aligned} \text{circulatieparameter} \quad \frac{u_s}{u_f} &= \frac{\text{netto snelheid aan oppervlak}}{\text{gemiddelde snelheid t.g.v. rivierafvoer}} \\ \text{stratifikatieparameter} \quad \frac{\delta S}{S_o} &= \frac{\text{verschil in zoutgehalte tussen oppervlak en bodem}}{\text{gemiddelde zoutgehalte}} \end{aligned}$$

Verder wordt een parameter v ingevoerd, die aangeeft welk gedeelte van het stroomopwaartse zouttransport niet ten gevolge van gravitatiecirculatie plaatsvindt (zgn. "diffusive krachten").

In figuur 3-2^a zijn de waarden van v weergegeven als funktie van de beide bovengenoemde parameters. Een probleem is vaak de netto snelheid u_s aan het oppervlak te meten.

In het aldus ontstane stratifikatie-circulatie diagram worden, min of meer arbitrair, de volgende gebieden onderscheiden: (zie fig. 3-2^b):
type 1 : netto stroomsnelheden zijn over de gehele diepte zeewaarts gericht.

type 2 : de netto stroomsnelheden zijn aan de bodem landwaarts en aan het oppervlak zeewaarts gericht, terwijl v varieert van 0,01 tot 0,99. Dit wil zeggen dat zowel gravitatiecirculatie als andere oorzaken een rol spelen in het stroomopwaartse zouttransport.

type 3 : $v < 0,01$, d.w.z. dat het stroomopwaartse zouttransport ongeveer volledig wordt veroorzaakt door gravitatiecirculatie.

type 4 : zoutwig, met zeer sterke stratifikatie, waarbij het zoete rivierwater over de zoute tong naar zee stroomt.

Tevens wordt onderscheid gemaakt tussen type -a en type -b, aangevende weinig ($\frac{\delta S}{S_0} < 0,1$) of meer gestratificeerd ($\frac{\delta S}{S_0} > 0,1$).

Uit de figuur blijkt dat ook bij goed gemengde situaties belangrijke circulatiestromen kunnen optreden. Een weergave van een estuarium in een stratifikatie-circulatie diagram geeft dan ook een betere indruk van het estuarium dan alleen een beoordeling naar stratifikatie. Aangezien de in de analytische afleiding gebruikte kentallen moeilijk meetbaar zijn in prototype, is door Hansen en Rattray gezocht naar correlaties met parameters die eenvoudiger zijn te bepalen. Uit de resultaten van een zestal estuaria bleek dat:

$$vRa = 16 F_m^{-\frac{3}{4}} \quad \left(\text{voor betekenis } vRa \text{ en } \frac{M}{v} \right.$$

$$\frac{M}{v} = 0,05 \cdot P^{-\frac{7}{5}} \quad \left. \text{zie Appendix A) } \right.$$

, waarbij

$$F_m = \frac{u_f}{\sqrt{g \cdot h \frac{\Delta \rho}{\rho}}} = \text{intern Froude getal}$$

$$P = \frac{u_f}{u_t}$$

, met : $\Delta \rho$ = dichtheidsverschil tussen rivier- en zee-water

u_t = rms getijsnelheid

u_f = gemiddelde riviersnelheid ($= \frac{Q_f}{B \cdot D}$)

h = waterdiepte

In fig. 3-3^a zijn in het stratifikatie-circulatie diagram de lijnen voor konstante P en F_m weergegeven. De circulatieparameter $\frac{U_s}{U_f}$ hangt alleen af van F_m , terwijl de stratifikatieparameter $\frac{\delta S}{S_0}$ zowel van F_m als van P afhangt. Door Fischer [118] wordt aangetoond dat $\frac{\delta S}{S_0}$ voornamelijk afhangt van het estuarium - Richardson getal R_{iE} :

$$R_{iE} = \frac{\frac{\Delta \rho}{\rho} \cdot g \cdot Q_f}{b \cdot u_t^3} = \frac{P^3}{F_m},$$

hetgeen ervoor pleit om F_m en R_{iE} als parameters te kiezen ter karakterisering van de stratifikatie en circulatie. In fig. 3-3^b zijn in het stratifikatie-circulatiediagram de lijnen van konstante F_m en R_{iE} weergegeven. Op de klassifikatie van estuaria in een stratifikatie-circulatie diagram zal in hoofdstuk 6 worden teruggekomen.

Bij de beschouwingen van Hansen en Rattray is aangenomen dat het estuarium een rechthoekige doorsnede heeft en dat er in laterale richting geen variaties zijn in snelheid of zoutgehalte. In werkelijkheid is dit evenwel niet het geval en treden circulatiestromen behalve in het verticale vlak in langsrichting van het estuarium ook op in de doorsnede van het estuarium (zie bijv. [128]).

De oorzaken van deze dwarscirculatiestromen zijn hoofdzakelijk het gevolg van de topografie van het estuarium: [128] :

1. de vorm van de doorsnede varieert in lengte-richting van het estuarium, waardoor de stroming afgebogen wordt naar de diepere gedeelten van de doorsnede.
2. de doorsnede van het estuarium is niet rechthoekig, waardoor de verticale uitwisseling tussen het zoute water in de diepere gedeelten en het zoetere water niet gelijkmatig is verdeeld.
3. bochten in het estuarium hebben tot gevolg dat de lijn van maximale stroming naar de buitenzijde van de bocht verschuift.

Ook Corioliskrachten en schuifspanningen t.g.v. wind kunnen een belangrijke bijdrage leveren aan het ontstaan van dwarscirculatiestromen.

Naast deze dwarscirculatiestromen kunnen ook allerlei macro-mengmechanismen als havens, kribben, plaatselijke vernauwingen of verwijdingen, etc. een belangrijke invloed hebben op de menging en daarmee op de zoutindringing.

Al deze verschijnselen leiden ertoe dat een goede eenduidige klassifikatie niet eenvoudig is, en maken het vertalen van de resultaten van het ene estuarium naar het andere nagenoeg tot een onmogelijkheid.

4 Inventarisatie Nederlandse getijrivieren

Aangezien het toepassingsgebied van de door het getijgootonderzoek verkregen inzicht in de fysische processen bij zoutindringings- en slibverschijnselen in de eerste plaats ligt in de Nederlandse getijwateren, worden in dit hoofdstuk eerst deze geïnterpreteerd. Aan de hand van kentallen (zie hoofdstuk 6) kunnen vergelijkingen worden gemaakt met de in hoofdstuk 5 gepresenteerde buitenlandse estuaria.

Deze estuaria betreffen de Rotterdamse Waterweg, de Oosterschelde, de Westerschelde en de Eems.

Vanwege de gekozen gefaseerde opzet van het onderzoek zullen de Nederlandse getijwateren pas in de tweede fase in de inventarisatie worden meegenomen.

5 Inventarisatie buitenlandse getijrivieren

In dit hoofdstuk zal van elke getijrivier, die in de inventarisatie is meegenomen, een zeer korte beschrijving worden gegeven. De karakteristieke gegevens zullen in een figuur worden verzameld. (geometrie, getijkromme, snelheids-, zout- en slibkonsentratieverdelingen, etc.)

Het onderlinge vergelijken van de karakteristieke gegevens van de diverse estuaria, het signaleren van fysische mechanismen, het aangeven van de wijze waarop elders het onderzoek in getijrivieren wordt aangepakt, alsmede de beschrijving in wiskundige en hydraulische modellen zal in de volgende hoofdstukken aan de orde komen.

Begonnen is met de inventarisatie van Engelse estuaria. Fig. 5-0 geeft hiervan een overzicht met de daarbij optredende gemiddelde getijslagen. Vanzelfsprekend zullen alleen die estuaria worden meegenomen waar voldoende gegevens over in de literatuur beschikbaar zijn. Voor de eerste fase van de studie is de inventarisatie beperkt tot de Thames en de Mersey, welke zullen worden gevolgd door de Tay, Severn, Clyde en Southampton estuaria.

5.1 Thames-estuarium

Literatuur: [1] t/m [24], [42].

Fig. 5-1 geeft een overzicht van enkele karakteristieke gegevens van het Thames-estuarium. De getijwerking loopt tot Teddington Weir, 100 km bovenstrooms van Southend (zie fig. 5-1^a). De getijslag van het dubbeldaags getij is voor springtij en doodtij gemiddeld resp. 5,0 en 3,3 m. De gemiddelde bovenafvoer Q_f bedraagt ca. $70 \text{ m}^3/\text{s}$, variërend van $14 \text{ m}^3/\text{s}$'s zomers tot $241 \text{ m}^3/\text{s}$'s winters. Enige extreme waarden zijn: $0,9 \text{ m}^3/\text{s}$ (1934) en $1048 \text{ m}^3/\text{s}$ (1894).

De rivier is vertikaal goed gemengd: het verschil in zoutgehalte tussen bodem en oppervlak is kleiner dan 1 à 2‰ (vgl. fig. 1^g).

Fig. 5-1^h geeft een representatief beeld van het verloop van de stroomsnelheden, het zoutgehalte en de concentratie gesuspendeerd materiaal over twee getijperiodes. Bij de concentraties van het gesuspendeerde materiaal blijken bij de bodem hoge concentraties op te treden vlak na laag water, wanneer het sediment bij deze lage snelheden de gelegenheid krijgt om naar de bodem te zakken. Bij de zoutgehalten blijkt duidelijk het kleine verschil tussen de metingen bij de bodem en die aan het oppervlak. Uit stroomsnelheidsmetingen is gebleken dat t.g.v. de in het estuarium optredende dichtheidsverschillen een netto landwaarts gericht transport bij de bodem ontstaat.

Behalve in de diverse havens blijkt op twee plaatsen in de rivier sterke afzetting van slib op te treden. Middels baggeren wordt hier de vereiste diepte gehandhaafd. Dit betreffen de "Mud Reaches" en de "Gravesend Reach", resp. 10 - 15 en 28 - 29 mijl beneden strooms van London Bridge.

Grote onderzoeken van de Thames zijn om verschillende redenen uitgevoerd:

- aanslibbings- en baggerproblemen ([6]).
- ontwikkelen van voorspellende mathematische modellen i.v.m. beheer van het estuarium (m.n. verbetering waterkwaliteit) [11].
- onderzoek naar de invloed van de bouw van een stormvloedkering [22].

5.2 Mersey-estuarium

Literatuur: [26] t/m [46], [114] en [138].

Het estuarium van de Mersey mondt uit in de Liverpool Bay, gelegen aan de westkust van Engeland. Het is van belang voor een aantal grote havens: Liverpool, Birkenhead, Manchester, Garston en Bromborough.

Fig. 5-2 geeft een overzicht van het estuarium.

Het estuarium is in feite in drie gebieden te splitsen: (vgl. fig. 5-2^a)

- a. Liverpool Bay : ca. 180 km^2 , bestaande uit zandbanken met daartussen andere kanalen. Het scheepvaartkanaal wordt middels aangebrachte stortsteen dammen op z'n plaats en door baggeren op diepte gehouden.
- b. The Narrows : verbinding tussen het bovengedeelte van het estuarium en de Liverpool Bay. Dit is een smal, diep kanaal, lang 9,7 km, 1200 m breed op het smalste gedeelte en ca. 20 meter diep.
- c. Bovengedeelte estuarium: ondiep gedeelte met grote gebieden met zand en modder, die bij laag water droog vallen. De max. breedte is hier ca. 5 km. De lengte van dit gedeelte tot Warrington is ca. 42 km.

De overgang van de Liverpool Bay naar de Narrows wordt als de mond van het estuarium gerekend.

De getijslag van het dubbeldaagsgetij is voor springtij en doortij gemiddeld resp. 8,20 en 4,63 m. De gemiddelde bovenafvoer Q_f bedraagt voor de Narrows $56 \text{ m}^3/\text{s}$, waarvan de rivier Mersey ca. 52% voor haar rekening neemt. Deze kan oplopen tot ca. $1200 \text{ m}^3/\text{s}$.

Het estuarium is te klassificeren als goed gemengd tot gedeeltelijk gelaagd, afhankelijk van het tijdstip en van de grootte van de bovenafvoer (vgl. fig. 5-2^f voor resp. $Q_f = 60$ en $24 \text{ m}^3/\text{s}$ en $2a_0 = 3,81$ en $9,14 \text{ m}$).

Fig. 2-5g geeft de variatie van de bovenafvoer over 1963 en de daarbij op twee plaatsen in de Narrows gemeten zoutgehaltes.

Het in het Mersey-estuarium uitgevoerde onderzoek had tot doel de oorzaken van aanslibbingsproblemen op te sporen en aanbevelingen te doen om deze pro-

blemen op te lossen (zie [36], [44]). Daarnaast is veel onderzoek gedaan om meer inzicht te verkrijgen in de optredende mengprocessen (bijv. [32], [35]). Dit laatste betreft dan altijd de Narrows, omdat deze de simpele vorm van een kanaal heeft, in tegenstelling tot het overige gedeelte van het estuarium.

Fig. 5-2ⁱ geeft op drie plaatsen in raai C (fig. 5-2^h) de gemeten residuele snelheden weer, waaruit blijkt dat er in dwarsrichting verschil in snelheid en zoutgehalte bestaat. Er blijkt hier een dwarscirculatie op te treden: westwaarts bij het oppervlak en oostwaarts bij de bodem. Als oorzaak wordt genoemd de kromming van de rivier ter plaatse.

Fig. 5-2^{i,k,l} geven resultaten van in de Narrows gemeten concentraties gesuspendeerde deeltjes.

6 Overzicht maatgevende karakteristieken voor de zoutverdeling

Na een afzonderlijke beschrijving per estuarium in de vorige hoofdstukken zal nu geprobeerd worden uit de in de literatuur beschikbare gegevens een overzicht te krijgen van de maatgevende karakteristieken van de zoutin-dringing, zoals getij-, rivier- en zoutgehalterandvoorwaarden en geometrische bijzonderheden, alsmede de hieruit resulterende snelheids- en zoutverdelingen.

Dit overzicht heeft duidelijk een inventariserend en vergelijkend karakter. Studie voor de achtergronden vindt elders plaats (zie rapport M896-40 [108]).

Afgezien van de invloeden als wind en Coriolis-krachten, wordt het gedrag in het estuarium bepaald door de gegevens aan de beide randen van het estuarium, te weten de getijbeweging en de zoutverdeling aan de zeezijde en het zoet-water debiet aan de rivierzijde, en de vormgeving van het estuarium tussen deze beide randen, alsmede lozingen en onttrekkingen in het estuarium (zgn. "inter-ne randvoorwaarden"). Het is vooral de vormgeving van het estuarium die moeilijk in een kental is te vangen. Immers deze is vaak zeer grillig, waarbij m.n. te denken valt aan plotselinge verwijdingen en vernauwingen, platen- en geulenstelsels, de aanwezigheid van havens, etc.

In fig. 6-1 zijn voor de geïnterpreteerde estuaria, althans voorzover gegevens beschikbaar waren, de breedte en gemiddelde diepte weergegeven, beide geschaald met de estuariumlengte L . Deze figuur geeft zo tegelijk de breedte/diepte verhouding van het estuarium weer.

In hoofdstuk 4 en 5 werden per estuarium zoveel mogelijk de gemiddeld voor het estuarium geldende karakteristieke gegevens vermeld. Bij het vergelijken van estuaria middels kentallen zal in dit hoofdstuk worden uitgegaan van in de estuaria uitgevoerde vrij uitgebreide metingen. Dit betekent in feite een momentopname van het estuarium, die belangrijk kan afwijken van de gemiddeld optredende situatie. Bovendien zal de zoutverdeling afhangen van de situatie, zoals die was op de dagen voorafgaand aan de meting. Hierbij valt bijv. te denken aan de variatie van de bovenafvoer, die als functie van de tijd een zeer grillig verloop kan hebben.

Een groot probleem bij het vergelijken van kentallen van estuaria wordt gevormd door het feit dat alle artikelen in de literatuur met een bepaald doel zijn geschreven, en daardoor vaak onvoldoende gegevens bevatten om deze vergelijkingen uit te voeren. In sommige gevallen zal, om toch een vergelijking

mogelijk te maken, voor bepaalde parameters een zo goed mogelijke schatting worden gegeven.

6.1 Kentallen

Een van de meest voor de hand liggende kentallen om het mengproces in het estuarium vast te leggen is de verhouding van het volume van het per getijperiode door de rivier aangevoerde zoete water en het volume zeewater, dat gedurende de vloedperiode het estuarium binnendringt.

Simmons [109] voerde hiervoor het volgende kental in:

$$\text{vloedgetal } \alpha : \quad \alpha = \frac{Q_f \cdot T}{P_t}$$

$$\begin{aligned} \text{met: } P_t &= \text{vloedvolume} & (\text{m}^3) \\ Q_f &= \text{bovenafvoer} & (\text{m}^3/\text{s}) \\ T &= \text{getijperiode} & (\text{s}) \end{aligned}$$

Ten aanzien van de stratifikatie werd hierbij de volgende globale indeling gemaakt:

$$\begin{aligned} \alpha > 1,0 &: \text{ sterk gelaagde situatie} \\ \alpha \approx 0,25 &: \text{ gedeeltelijk gemengde situatie} \\ \alpha < 0,1 &: \text{ gemengde situatie.} \end{aligned}$$

Om estuaria te klassificeren overeenkomstig hun gelaagdheid is door Ippen en Harleman [110] het zgn. gelaagdheidsgetal $\frac{G}{J}$ ingevoerd:

$$\frac{G}{J} = \frac{\text{energiedissipatie per eenheid van massa- en per tijdseenheid}}{\text{toename potentiële energie per massa en per tijdseenheid}}$$

G werd hierbij bepaald uit de faseverschuiving en de demping van het vertikale getij, terwijl J gelijk is aan $g \frac{\Delta\rho}{\rho} \frac{h \cdot u_f}{L}$, zijnde de toename van de potentiële energie t.g.v. het zout worden van het rivierwater, als dit door het estuarium stroomt.

Een grote waarde van het gelaagdheidsgetal ($\frac{G}{J} > 100$) betekent dan een gemengde situatie. Naarmate $\frac{G}{J}$ kleinere waarden heeft treedt er een meer gelaagde situatie op.

Voor een getijrivier is $\frac{G}{J}$ zeer moeilijk te bepalen. Harleman en Abraham [111] hebben evenwel voor proeven in een rechte goot aangetoond dat dit gelaagdheidsgetal evenredig is met een door hen gedefinieerd estuariumgetal:

estuariusumgetal E :

$$E = \frac{P_t \cdot F_o^2}{Q_f \cdot T} = \frac{F_o^2}{\alpha}$$

met: $F_o = \text{Froude getal} = \frac{U_o}{\sqrt{gh}}$

U_o = amplitude van de getijsnelheid in de mond
tijdens vloed (m/s)

h = gemiddelde waterhoogte in de mond (m)

g = gravitatiekonstante (m/s^2).

In het estuariusumgetal komt de invloed van de getijbeweging sterker tot uiting dan in het vloedgetal. In [111] vindt de volgende indeling plaats:

$E < 0,005$	gelaagde situatie
$0,005 < E < 0,2$	gedeeltelijk gemengde situatie
$E > 0,2$	gemengde situatie.

Om met name de verticale gelaagdheid in het estuariusumgetal tot uitdrukking te brengen is door Thatcher en Harleman [141] het interne estuariusumgetal gedefinieerd:

Intern estuariusumgetal E_D :

$$E_D = \frac{P_t \cdot F_i^2}{Q_f \cdot \tau} = \frac{F_i^2}{\alpha} = \frac{E}{\Delta\rho/\rho}$$

met: $F_i = \text{interne Froudegetal} = \frac{U_o}{\sqrt{g_h \frac{\Delta\rho}{\rho}}}$

$\Delta\rho = \rho_{\text{zeewater}} - \rho_{\text{rivierwater}}$

$\rho = \rho_{\text{rivierwater}}$

De volgende indeling kan nu gemaakt worden:

$E_D < 0,25$	gelaagd situatie
$0,25 < E_D < 10$	gedeeltelijk gemengde situatie
$E_D > 10$	gemengde situatie

In analogie met het zgn. "Pipe Richardson Number", gedefinieerd door Ellison en Turner [113], is door Fisher [114] het "Estuarine Richardson number" R_{iE} ingevoerd:

estuarium Richardson getal:

$$R_{iE} = \frac{\frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot g \cdot Q_f}{b \cdot u_t^3}$$

met: u_t = rms getijsnelheid (m/s)

b = breedte estuarium (m)

Q_f = rivierafvoer (m^3/s)

$\Delta\rho = \rho_{\text{zeewater}} - \rho_{\text{rivierwater}}$ (kg/m^3)

In feite vormt dit getal de verhouding tussen de door de rivier toegevoerde potentiële energie als gevolg van dichtheidsverschillen ($\Delta\rho \cdot g \cdot Q_f$) en de uit het getij beschikbare kinetische energie. Grote waarden van R_{iE} betekenen dus een sterke gelaagdheid, terwijl kleine waarden van R_{iE} wijzen op een gemengde situatie. Ruwweg geldt de volgende indeling:

goed gemengd	$0,08 < R_{iE} < 0,8$	sterk gelaagd
--------------	-----------------------	---------------

Voor de beschouwde estuaria zijn in onderstaande tabel de kentallen berekend:

	estuaria			
	THAMES	MERSEY		
datum metingen	2-11-'48	22/25-5-'56	21/22-3-'57	
literatuur	[5], [6]	[30]	[30]	
Q_f (m ³ /s)	35,5	25,7	151,8	
getijslag (m)	5,49	9,4	9,4	
T (s)	44700	44700	44700	
P_T (m ³)	659.10 ⁶	400.10 ⁶	400.10 ⁶	
U_o (m/s)	0,88	1,6	1,6	
h (m)	7,38	15,60	15,60	
b (m)	5800	1583	1583	
$\frac{\Delta\rho}{\rho}$ (-)	0,025	0.025	0,025	
U_t (m/s)	0,67	0,80	0,80	
$F_o = \frac{U_o}{\sqrt{gh}}$	0,102	0,128	0,128	
$F_i = \frac{U_o}{\sqrt{gh \frac{\Delta\rho}{\rho}}}$	0,648	0,810	0,810	
$\alpha = \frac{F_o^2}{E}$	0,0024	0,0029	0,017	
$E = \frac{F_o^2}{\alpha}$	4,32	5,65	0,96	
$E_D = \frac{F_i^2}{\alpha}$	174	228	39	
R_{iE}	0,0051	0,0079	0,047	

Alle kentallen duiden voor beide estuaria op een volledig gemengde situatie. Voor de Thames is dit inderdaad het geval. Voor de Mersey geldt bij hoge bovenafvoer evenwel een gedeeltelijk gemengde situatie, met een δS van soms 4 ‰ (vgl. fig. 5-2f). Aangezien de vaak grillige geometrie van een estuarium, alsmede de breedte-diepte verhouding (vgl. [112]), van invloed is op de menging, is het niet verwonderlijk dat deze kentallen niet precies een voorspelling geven van de te verwachten stratifikatie in een estuarium.

6.2 Stratifikatie-circulatie diagram

Een klassificatie van estuaria naar gelaagdheid én circulatiestromen is voorgesteld door Hansen en Rattray in een zgn. stratifikatie-circulatie diagram [117]. Een beschrijving van de hiertoe leidende analyse is weergegeven in Appendix A, terwijl uiteenzetting over het stratifikatie-circulatie-diagram wordt verwezen naar hoofdstuk 3. De karakteristieke parameters hierbij zijn:

stratifikatie parameter:

$$\frac{\delta S}{S_o}$$

met: δS = verschil in saliniteit tussen oppervlak en bodem

S_o = gemiddelde saliniteit

circulatie parameter:

$$\frac{u_s}{u_f}$$

met: u_s = getijgemiddelde stroming aan oppervlak

$u_f = \frac{Q_f}{A}$ = gemiddelde snelheid t.g.v. bovenafvoer

Op grond van metingen van een zestal estuaria worden door Hansen en Rattray de inwendige mengprocessen gekoppeld aan een tweetal parameters: P en F_m of R_{iE} en F_m (zie hoofdstuk 3: blz. 3-7). Met deze parameters wordt het dan mogelijk om het stratifikatie-circulatie-diagram op een voorspellende wijze te gebruiken.

In onderstaande tabel staan voor de beschouwde estuaria deze parameters weergegeven:

	estuaria			
	THAMES	MERSEY		
datum metingen	2-11-'48	22/25-5-'56	21/22-3-'57	
literatuur	[5], [6]	[30]	[30]	
P	$1,14 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$7,7 \cdot 10^{-3}$	
F_m	$5,6 \cdot 10^{-4}$	$5,3 \cdot 10^{-4}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$	
R_{iE}	$5,1 \cdot 10^{-3}$	$7,9 \cdot 10^{-3}$	$4,7 \cdot 10^{-2}$	

In fig. 6-2 zijn deze waarden als punten in het stratifikatie-circulatie diagram weergegeven. In werkelijkheid zijn het geen punten, maar lijnen, omdat de omstandigheden (bovenafvoer, getijslag) voortdurend veranderen (vgl. fig. 6-3). Deze lijnen blijken overigens steeds ongeveer evenwijdig te lopen aan de lijnen voor konstante v . In onderstaande tabel zijn uit dit diagram de waarden voor $\frac{\delta S}{S}$ en $\frac{u_s}{u_f}$ afgeleid:

waarde uit stratifikatie-circulatie diagram (fig. 6-3)	estuaria			
	THAMES	MERSEY		
$\delta S / S_0$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{-2}$	$7,6 \cdot 10^{-2}$	
u_s / u_f	120	79	25	

In alle gevallen blijkt v ongeveer 0,6 te zijn (zie fig. 6-2), hetgeen betekent dat voor het stroomopwaartse zouttransport slechts ca. 40% wordt veroorzaakt door gravitatiecirculatie.

Volgens het stratifikatie-circulatie diagram behoren alle beschreven estuaria tot het type 2 d.w.z. gedeeltelijk gemengde situatie. De stratifikatie zou bij de Thames het kleinst zijn, terwijl de circulatiestromingen hier het grootst zouden zijn.

De uit het stratifikatie-circulatie diagram afgeleide stratifikatie- en circulatie parameters stemmen redelijk overeen met de uit de metingen verkregen waarden:

gemeten waarden	estuaria			
	THAMES	MERSEY		
$\delta S / S_0$	0 - 0,03	0 - 0,04	0,01 - 0,2	
u_s / u_f	?	144	32	

De kleine waarde van F_m en bijgevolg grote waarde voor $\frac{u_s}{u_f}$ voor de Thames wordt in belangrijke mate veroorzaakt door het feit dat de waarden genomen zijn in de mond van de Thames, waar de doorsnede A zeer groot is.

Gekonkludeerd kan worden dat uit de beschouwde estuaria is gebleken dat met behulp van de stratifikatie-circulatie diagrammen van Hansen en Rattray reeds een goede indruk verkregen kan worden over de in het estuarium optredende

stratifikatie en circulatie, of wel van de verticale zout- en snelheidsverdeling. Wel moet bedacht worden dat Hansen en Rattray in hun beschouwing uitgaan van een rechthoekige doorsnede en een stationaire toestand, hetgeen in werkelijkheid nooit het geval zal zijn.

6.3 Zoutindringing

In het kader van de studie naar zoutindringing in estuaria is in de getijgoot aan het eind van de zestiger jaren een uitgebreid systematisch onderzoek uitgevoerd, waarbij de randvoorwaarden en stromingskondities zijn gevarieerd (zie rapport M896-X [119]). In rapport M896-XV [120] wordt een dimensieanalyse uitgevoerd om te komen tot een verband tussen de zoutindringingslengte en enkele karakteristieke kentallen. Bij de proeven werden de volgende parameters gevarieerd:

A = amplitude vertikaal getij bij uitmonding in zee

C = Chezy coefficient in homogeen water

L = rivier- of gootlengte

q_r = rivierdebiet per eenheid van breedte

h_o = gemiddelde waterdiepte bij uitmonding in zee

$\Delta\rho$ = dichtheidsverschil tussen zee- en rivierwater.

Dit onderzoek leidde uiteindelijk tot de volgende formule voor de minimale zoutindringingslengte L_i :

$$\frac{L_i}{h_o} \frac{g}{C^2} = f \left(\frac{L}{L_R}, \frac{\hat{q}_{eb}}{h_o \sqrt{\epsilon g h_o}}, \frac{q_r}{h_o \sqrt{\epsilon g h_o}} \right)$$

(ook gerapporteerd in [121]).

Hierbij zijn: L_R = resonantielengte = $\frac{1}{4} T \sqrt{g h_o}$

\hat{q}_{eb} = maximum ebdebiet bij uitmonding in zee per eenheid van breedte

$$\epsilon = \frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\rho_{zee} - \rho_{rivier}}{\rho_{rivier}}$$

Voor $\frac{L}{L_R} = 0,884$ zijn de resultaten grafisch weergegeven in fig. 6-4.

Door Fischer [122] zijn deze resultaten opnieuw bewerkt. Hij stelt dat de invloed van $\frac{L}{L_R}$ via \hat{q}_{eb} tot uitdrukking komt, zodat de dimensie-analyse zodanig kan worden uitgevoerd dat deze parameter kan worden weggelaten. Een verdere analyse voert dan uiteindelijk tot de relatie:

$$\frac{L_i \cdot q_r \cdot C}{\hat{q}_{eb} \cdot g^{\frac{1}{2}}} = f \left(\frac{\varepsilon \cdot q_r \cdot h_o^3 \cdot C^3}{\hat{q}_{eb}^3 \cdot g^{\frac{1}{2}}} \right)$$

In fig. 6-5 staan deze resultaten weergegeven. Binnen een afwijking van $\pm 30\%$ kunnen alle proefresultaten worden beschreven door: (vlgs. [122])

$$L_i = 3,7 \left(\frac{h_o^{13} \cdot C^5 \cdot \varepsilon^3 \cdot \sqrt{g}}{q_r \cdot \hat{q}_{eb}^5} \right)^{\frac{1}{4}}$$

In de volgende tabel worden de aldus berekende minimale zoutindringingslengten vergeleken met de in de estuaria gemeten waarden.

	estuaria			
	THAMES	MERSEY		
Q_f (m ³ /s)	35,5	25,7	151,8	
h_o (m)	7,38	15,6	15,6	
C (m ^{1/2} /s)	64	64	64	
q_r (m ² /s)	0,00613	0,0162	0,0959	
\hat{q}_{eb} (m ² /s)	7,91	19,8	19,8	
ε (-)	0,025	0,025	0,025	
L (km)	100	51,7	51,7	
L_R (km)	96	139,5	139,5	
L/L_R (-)	1,04	0,37	0,37	
L_i berekend (km)	1	21,3	13,6	
L_i gemeten (km)	70	ca. 30 km bij $Q_f \approx 100$ m ³ /s		



Bij de Thames blijkt er een zeer groot verschil te bestaan tussen de berekende en gemeten zoutindringingslengte. De oorzaak hiervan moet gezocht worden in het feit dat hier blijkbaar niet de gravitatiecirculatie van overheersende invloed is op de zoutindringing, maar dat andere mechanismen een overheersende rol spelen, zodat de invloed van havens, onregelmatige oevervormen, interactie getijbeweging en beddingvorm, etc. In [107] wordt een overzicht van deze mechanismen gegeven. Uit de beschikbare meetgegevens van de geïnventariseerde estuaria is niet af te leiden welke mechanismen hier dominant zijn. Voor de Mersey is de overeenkomst tussen de berekende en gemeten zoutindringingslengte beter. Vermoedelijk houdt dit verband met de kanaalvormige afmetingen van het benedenstroomse gedeelte van het estuarium (the Narrows) en de vervolgens snelle afname van de diepte in het bovenstroomse gedeelte van het estuarium, waardoor daar ook de zoutindringing snel afneemt (zie fig. 5-2^c).

Opmerking: Dat naast de gravitatiecirculatie ook andere mechanismen een belangrijke invloed op de zoutindringing kunnen hebben blijkt ook uit het in de getijgoot uitgevoerde havenonderzoek. Het aanwezig zijn van een enkele haven blijkt al een belangrijke toename van de zoutindringing tengevolge te kunnen hebben (zie rapport M896-36 [123] en de hierna volgende tabel).

		proef T401 (geen haven)	proef T441 (met haven)
Q_f	(m^3/s)	0,00175	
h_o	(m)	0,239	
C	($m^{1/2}/s$)	19	
q_r	(m^2/s)	0,0026	
\hat{q}_{eb}	(m^2/s)	0,0543	0,0545
ϵ	(-)	0,0215	
L	(m)	182,8	
L_R	(m)	216,0	
L/L_R	(-)	0,85	
L_{imin} berekend	(m)	17,72	17,64
L_{imin} gemeten	(m)	20,50	35,30



6.4 Vertikale uitwisselingscoëfficiënten

Er van uitgaande, zoals aangegeven in [124] en [125], dat de dominante processen, die de zout-en snelheidsverdeling beïnvloeden, de horizontale advectie en de verticale diffusie zijn, geldt voor de zoutbalansvergelijking in de twee-dimensionale situatie, gemiddeld over het getij:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial S_T}{\partial z} \right) = \frac{1}{T} \int_0^T \left(U \frac{\partial S}{\partial x} - \overline{U \frac{\partial S}{\partial x}} \right) dt$$

De uit prototype-metingen in de Mersey verkregen waarden voor de verticale uitwisselingscoëfficiënt van stof K_z , alsmede de verticale uitwisselingscoëfficiënt van impuls N_z , waarbij geldt: $\tau_T = -\rho N_z \frac{\partial U_T}{\partial z}$, staan weergegeven in onderstaande tabel (gegevens uit [33]).

(vgl. fig. 5-2 voor de plaatsen van station 1 t/m 3).

	station 1.			station 2.			station 3.			gemiddeld over doorsnede N_z (cm ² /s)
$\frac{z}{h}$	K_z (cm ² /s)	N_z (cm ² /s)	R_i (-)	K_z (cm ² /s)	N_z (cm ² /s)	R_i (-)	K_z (cm ² /s)	N_z (cm ² /s)	R_i (-)	
0,1	8	1?	0,24	6	240?	0,38	5	8	0,30	8,5
0,3	12	15	0,53	15	4	0,62	13	14	0,26	20
0,5	22	8	0,21	28	23	0,13	17	14	0,23	27
0,7	22	23	0,26	23	113	0,04	9	11	0,24	29
0,9	1	5	0,07	3	49	0,02	1	22	0,01	20

Uit de tabel blijkt dat de maximale waarden ongeveer halverwege de waterdiepte bereikt worden. Deze waarden zijn een orde kleiner dan in een homogene stroming mag worden verwacht.

In de tabel zijn ook de waarden van het lokale Richardson getal weergegeven:

$$R_i = \frac{g \frac{\partial \rho}{\partial z}}{\rho \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2}$$

Aangezien de variatie van de over het getij gemiddelde snelheid u_T met de diepte gering is in vergelijking met de over het getij optredende snelheden, is de nauwkeurigheid van $\frac{\partial u_T}{\partial z}$ en daarmee van N_z niet groot.

In fig. 6-6 zijn de waarden van $\frac{K_z}{N_z}$ weergegeven als functie van het Richardson getal. De waarden blijken wat groter dan volgt uit de door Munk en Anderson [142] gegeven relatie.

6.5 Dispersie coëfficiënten

Om het transport in een bepaalde doorsnede van de rivier te bestuderen is het gebruikelijk de snelheden en zoutgehaltes te splitsen in tijd- en ruimtegemiddelden, en afwijkingen hiervan:

$$u = u_0 + u_1 + u_2 + u''$$

$$S = S_0 + S_1 + S_2 + S''$$

, waarbij u_0 = snelheid, gemiddeld over de doorsnede en over het getij

u_1 = de over de doorsnede gemiddelde snelheid op een bepaald tijdstip t.o.v. U_0

u_2 = afwijking van de over de doorsnede gemiddelde snelheid

u'' = turbulente afwijkingen in de snelheid, meestal verwaarloosd

en voor S evenzo.

De snelheid u_2 kan dan nog worden gesplitst in u_s en u' :

$$u_2 = u_s + u'$$

, met : u_s = getijgemiddelde waarde van u_2

u' = afwijking van getijgemiddelde waarde.

Vervolgens zijn u_s en u' nog te splitsen in een over de vertikaal gemiddelde waarde u_{st} , u_t' en een afwijking van dit vertikaal gemiddelde:

$$u_s = u_{st} + u_{sv}$$

$$u' = u_t' + u_v'$$

Voor een uitgebreide weergave van deze exercitie wordt verwezen naar [114].

Voor de stationaire situatie geldt nu:

$$- u_f \cdot S = \langle u_1 S_1 \rangle + \langle \overline{u_2 S_2} \rangle$$

, waarbij: $\langle \rangle$ = getijgemiddelde waarde

— = over de doorsnede gemiddelde waarde.

Veelal wordt $\langle u_1 S_1 \rangle$ verwaarloosd, hoewel in werkelijke estuaria door allerlei mengmechanismen c.q. faseverschuivingen deze term toch belangrijk kan zijn (vergelijk [126]).

Wordt nu de dispersiecoëfficiënt D ingevoerd als $\langle \overline{u_2 S_2} \rangle = D \frac{dc_0}{dx}$, dan geldt voor D :

$$D = \frac{1}{\frac{dc_0}{dx}} \left[\overline{u_{st} S_{st}} + \overline{u_{sv} S_{sv}} + \langle \overline{u_t' S_t'} \rangle + \langle \overline{u_v' S_v'} \rangle \right]$$

$$= D_1 + D_2 + D_3 + D_4$$

, met: D_1 = transport t.g.v. getijgemiddelde dwarscirculatie

D_2 = transport t.g.v. getijgemiddelde verticale circulatie

D_3 = transport t.g.v. laterale variaties in u en S over getij

D_4 = transport t.g.v. verticale variaties in u en S over getij

} schuif-
spannings-
dispersie

Met een aantal aannamen komt Fischer voor de Mersey tot de volgende af-schatting van deze bijdragen aan de dispersie-coëfficiënt: (zie [114])

(situatie $Q_f = 80 \text{ m}^3/\text{s}$; getijslag 6 m).

$$D_1 = 430 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$D_2 = 32 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$D_3 = 6 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$D_4 = 23 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\hline D = 491 \text{ m}^2/\text{s} +$$

Uit de door Bowden en Sharaf el Din [33] gepresenteerde meetresultaten komt Dyer [126] tot de volgende waarden voor deze dispersiecoëfficiënten:

$$\begin{array}{rcl}
 D_1 & = & 79 \text{ m}^2/\text{s} \\
 D_2 & = & 95 \text{ m}^2/\text{s} \\
 D_3 & = & 61 \text{ m}^2/\text{s} \\
 D_4 & = & 78 \text{ m}^2/\text{s} \\
 \hline
 D & = & 313 \text{ m}^2/\text{s} +
 \end{array}$$

Er blijkt een belangrijk verschil met de door Fischer gemaakte schatting. Met name blijkt de schatting voor de bijdrage t.g.v. de getijgemiddelde dwars-circulatie aan de hoge kant. Wel kan gekonkludeerd worden dat de verticale gravitatiecirculatie niet noodzakelijk het belangrijkste mechanisme behoeft te zijn.

N.B.: Uit een door Dyer [144] uitgevoerde analyse van meetgegevens van twee meetstations blijkt dat voor de Thames de relatieve bijdrage aan de dispersiecoëfficiënt een zelfde beeld vertonen dan voor de Mersey.

Wanneer het resultaat van alle mechanismen wordt samengebracht in een enkele dispersiecoëfficiënt, luidt de zoutbalans voor de stationaire situatie:

$$u_f \cdot S = D \frac{\partial S}{\partial x}$$

zodat D bepaald kan worden volgens: $D = \frac{u_f \cdot S}{\frac{\partial S}{\partial x}}$

Van belang is het te weten op welk tijdstip D nu bepaald is (bijv. ten tijde van hoogwaterkentering, laagwaterkentering, of getijgemiddeld).

Getijgemiddeld werden voor de geïnterpreteerde estuaria op deze wijze de volgende dispersiecoëfficiënten bepaald: (uit [29]).

estuarium	D (m ² /s)	opmerkingen
Thames	53	kleine Q _f ; 10 mijl benedenstrooms van Londen Bridge
	84	kleine Q _f ; 25 mijl benedenstrooms van Londen Bridge
	338	grote Q _f ; 30 mijl benedenstrooms van Londen Bridge
Mersey	161	mei '56 ; Q _f = 26 m ³ /s
	360	maart '57; Q _f = 70-200 m ³ /s

Uit deze getallen blijkt de grote invloed van de rivierafvoer op de dispersiecoëfficiënt.

7 Slibverschijnselen

Bij het beheer van estuaria is het zowel vanuit milieu-oogpunt als voor het op voldoende diepte houden van scheepvaartkanalen van belang voorspellingen te kunnen maken van de concentraties van gesuspendeerde deeltjes en de afzettingssnelheid als functie van de randvoorwaarden, of veranderingen daarin.

Over de processen die bij slibverschijnselen in estuaria een rol spelen bestaan nog vele onduidelijkheden, met name wat een kwantitatieve beschrijving betreft. Als meest waarschijnlijke invloeden op het transport en de afzetting worden veelal genoemd:

1. dynamische processen van het water in het estuarium: cirkulatiestromen en menging, alsmede golven ten gevolge van wind.
2. agglomeratieprocessen, die de valsnelheid van de deeltjes doen toenemen.
3. eigenschappen van de deeltjes zelf.

Op de invloed van getij, rivierafvoer en dichtheidsverschillen op de hydrodynamische processen is ingegaan in hoofdstuk 3 en 6. Een in estuaria karakteristiek beeld van de longitudinale verdeling van concentraties van gesuspendeerde deeltjes als gevolg van deze processen ziet er uit als voor de Thames in figuur 5.1^j is aangegeven. Het maximum in de concentratie wordt het zogenaamde "turbidity maximum" genoemd. Zeewaarts van dit punt is de gemiddelde stroming bij de bodem landwaarts gericht, terwijl bovenstrooms van dit punt de stroming gemiddeld een zeewaartse richting heeft. Ook bij nagenoeg vertikaal volledig gemengde estuaria, zoals de Thames, treedt deze landinwaartse stroming bij de bodem op. De sterkte van dit turbidity maximum blijkt over het algemeen afhankelijk van: [13]

- a. de hoeveelheid gesuspendeerde deeltjes in de rivier en in de zee.
- b. de sterkte van de cirkulatiestromen in het estuarium.
- c. de valsnelheid van de deeltjes.

In dit hoofdstuk zal een vergelijking worden gemaakt tussen de in de literatuur gepresenteerde resultaten van in de diverse estuaria uitgevoerde onderzoeken naar slibverschijnselen. Met name zal gezocht worden naar gegevens over mechanismen die hierbij een rol spelen. Voor de resultaten van de bij deze studies toegepaste hydraulische modellen wordt verwezen naar hoofdstuk 10 en voor de wiskundige modelleringen naar hoofdstuk 9.

Ook voor dit hoofdstuk geldt dat de studie beperkt zal blijven tot het inventariseren, ordenen en vergelijken van in de literatuur gepubliceerde gegevens.

De eigenlijke studie naar de transportmechanismen van slib zal plaatsvinden bij de studie "slibonderzoek" (zie M 896-40 blz. 21 e.v. [108]).

Thames

Verschijselen gedurende getijperiode

In figuur 5.1^h is het verloop van de concentratie gesuspendeerde deeltjes over het getij op verschillende diepten weergegeven. Bij laagwaterkentering neemt de turbulentie-intensiteit af en krijgen de deeltjes de gelegenheid naar beneden te vallen. Dit leidt tot hoge concentraties in de onderste lagen (ca. 1000 p.p.m.: zie fig. 5.1^h). Vlak boven de bodem vormt zich een laag slib van zeer hoge concentratie: 100.000 à 150.000 p.p.m. ("fluid mud"). Deze laag heeft meestal een scherpe afscheiding met het bovenliggende water, en is op echo-registraties dan ook te herkennen. Deze laag met zeer hoge concentraties heeft de neiging om langzaam te konsolideren onder haar eigen gewicht. Alzo ontstaat ter plaatse een verondieping in de rivier.

Bij doodtij blijkt dit konsolidatieproces door te gaan gedurende de gehele getijperiode, maar tijdens springtij vindt verstoring van deze laag plaats vlak na de laagwaterkentering om vervolgens gedeeltelijk gemengd te worden met het bovenliggende water. Hierdoor treedt op ca. 1,00 m boven de bodem transport op van gesuspendeerde deeltjes in concentraties van ca. 2000-3000 p.p.m. of meer. Ten gevolge van dit proces kunnen de concentraties zeer sterk in de tijd variëren. Ook komt het materiaal soms in wolken van hoge concentraties voor, gescheiden door relatief helder water. Figuur 5.1^k geeft een beeld van de verdeling van het transport over de diepte op verschillende tijdstippen over het getij.

Invloed dichtheidseffekten

Het belangrijkste mechanisme in het transport van de gesuspendeerde deeltjes bleek te zijn de gemiddelde stroomopwaartse waterbeweging nabij de bodem als gevolg van dichtheidsverschillen (gravitatiecirkulatie). In figuur 7.1^a staan voor Gravesend Reach (27,8 mijl beneden stroomse van London Bridge) de netto waterverplaatsingen over een getij weergegeven. Deze blijkt in de onderste lagen ca. 10.000 ft (~ 3 km) landinwaarts te zijn. De waterverplaatsing in de bovenste lagen is steeds zeewaarts gericht. Sterke sedimentatie treedt op bij de "Mud Reaches" (10-15 mijl benedenstrooms van London Bridge), waar de gemiddelde landinwaartse stroming van de bodem overgaat in een zeewaartse.

dit gaat waarschijnlijk gepaard
met sedimentatie ingebroeken
verder zeewaarts.
in analogie met R.W.W.



Invloed getijslag

De getijslag is met name van invloed op de hoeveelheid in suspensie gebracht materiaal. In figuur 7.1^{b,c} zijn de transporten van gesuspendeerde deeltjes uitgezet als functie van de getij-amplitude voor metingen aan de Noord- en Zuidzijde in de genoemde doorsnede. Hieruit blijkt dat de transporten lateraal niet homogeen verdeeld zijn over de doorsnede. Aan de ^{zuidel} rivierzijde treedt er een netto zeewaarts transport op, terwijl dit aan de noordzijde landinwaarts is gericht. Totaal blijkt er in deze doorsnede een landinwaartse beweging van deeltjes gedurende springtij op te treden en een neutrale situatie of een gering zeewaarts transport gedurende doottij.

Invloed rivierafvoer

Bij hoge rivierafvoeren van langere duur (> 1 à 2 weken) blijkt er een toename van de kanaaldiepte van vele tientallen centimeters op te treden in de "kritische gebieden". De oorzaken hiervan zijn:

- a. het water met de hoge concentraties wordt zeewaarts weggedrukt, waardoor "schoon" water in de kritische gebieden voor erosie zorgt.
- b. de grote rivierafvoer doet de dominante ebstroom merkbaar toenemen.
- c. het zoete rivierwater zorgt voor deflokkulatie van de bovenste lagen van het gekonsolideerde slib, waardoor er een kleinere kracht nodig is voor erosie.

Herkomst van het slib

Uit een zorgvuldig uitgevoerde slibbalans bleek van de jaarlijks gebaggerde hoeveelheid de volgende herkomst:

- 15% aangevoerd door de rivier de Thames en zijrivieren.
- 8% rioolslib, gedumpt aan de noordelijke oever bij Mucking.
- 22-27% huisvuil en industrieel afvalwater, alsmede in de rivier gestorte baggerspecie.

Hieruit bleek dat 50 à 55% van het gebaggerde materiaal afkomstig moest zijn vanuit zee. Uit modelonderzoek en metingen in prototype is gebleken (zie ook hoofdstuk 11), dat deze hoeveelheid afkomstig is van de stortplaats van baggerspecie, Black Deep, vlak voor de kust. Het advies om de specie niet meer voor de kust te storten, maar op het land, leidde uiteindelijk tot een vermindering van het baggerwerk met zo'n 50%.

Fysische eigenschappen slib

Bij de slibverschijnselen is een viertal processen te onderscheiden:

- a. erosie

als dit de Owen-tube is
dan wordt de invloed van turbulentie
op de val snelheid niet meegenomen.

- b. transport
- c. afzetting
- d. consolidatie

Goede voorspellingen over het slibgedrag zijn alleen mogelijk, indien deze processen op de juiste wijze in het model zijn verwerkt (vergelijk hoofdstuk 9). Onderstaand volgen de voor het slib uit de Thames bepaalde parameters om deze processen te beschrijven.

a. erosie

Erosie wordt gedacht op te treden wanneer de schuifspanning τ , die door het stromende water op de bodem wordt uitgeoefend, een zekere kritieke schuifspanning τ_e overschrijdt.

Voor de snelheid van erosie geldt dan de uitdrukking (vlgs. [132]):

$$\frac{dm}{dt} = M \left\{ \frac{\tau}{\tau_e} - 1 \right\}$$

, met: M = konstante (=erosiesnelheid bij $\tau = 2 \tau_e$)
 τ_e = kritieke schuifspanning.

De parameter M en τ_e werden bepaald in een stroomgootje. Resultaten van dergelijke proeven staan weergegeven in fig. 7.2. Het slib had hierbij drie dagen de gelegenheid gehad om te consolideren.

Voor het slib uit de Thames gold: $2 < \tau_e < 5$ dyne/cm²
 of: $0,2 < \tau_e < 0,5$ Pa.
 en: $M \approx 2 \cdot 10^{-4}$ kg m⁻² s⁻¹

b. transport

Een belangrijke parameter bij het transport van slibdeeltjes is de valsnelheid w . Deze is geen konstante parameter, maar een complexe funktie van de concentratie, het zoutgehalte en de turbulentie-intensiteit, omdat deze de flocculatieverschijnselen sterk beïnvloeden. Proeven in het laboratorium hebben het nadeel dat de turbulentie niet goed kan worden gereproduceerd. Door Owen [133] is daarom een apparaat ontwikkeld om de valsnelheid direkt in prototype te meten. In fig. 7-3 zijn resultaten van bepalingen van de valsnelheid weergegeven. De in prototype bij een bepaalde concentratie gemeten waarden blijken ongeveer 10 maal zo groot te zijn als die bepaald in het laboratorium.

De valsnelheid kan variëren van de 1 mm/s bij zeer lage concentraties tot ongeveer 10 mm/s bij hoge concentraties (deze laatste waarde komt overeen

dit kan niet alleen het verschil zijn als gevolg van al dan niet aanwezige turbulentie

met die voor fijn zand).

c. afzetting

Afzetting wordt gedacht op te treden wanneer de schuifspanning τ aan de bodem kleiner is dan de grenswaarde van de schuifspanning voor sedimentatie τ_d . Voor het slib uit de Thames bleek uit proeven in een stroomgootje:

$$\tau_d \approx 0,06 \text{ Pa.}$$

Overeenkomstig [134] kan voor situaties, waarbij $\tau < \tau_d$, de snelheid van sedimentatie beschreven worden door:

$$\frac{dm}{dt} = c.w. \left(1 - \frac{\tau}{\tau_d}\right),$$

er is dus een duidelijk verschil tussen afzetting en het bereiken van de bodem.

waaruit blijkt dat deze sterk afhangt van de concentratie c (kg/m^3) van gesuspendeerde deeltjes.

d. consolidatie

Gedurende de formatie van een bodem van cohesieve deeltjes, zetten continu vlokken zich af op de bodem, terwijl daaronder liggende vlokken consolideren. Dit leidt tot verloop van dichtheid en sterkte in het gevormde bed. Hierbij is een aantal fasen te onderscheiden [135]:

- initiële fase (ca. 10 uur): snelle toename van de dichtheid, wegens ontsnappen water door de ruimten tussen de vlokken
- tweede fase (ca. 500 uur): langzamer proces van consolidatie, waarbij water ontsnapt door het bed en door drainagekanalen.
- derde fase : zeer langzame consolidatie.

Aangezien in estuaria met grote concentraties gesuspendeerde deeltjes bij de kentering de afzetting meestal aanzienlijk groter is dan de snelheid waarmee het consolidatieproces zich voltrekt, vormt zich een dikke laag met lage dichtheid, in de literatuur bekend als "fluid mud", "sling mud" en "liquid mud". Deze laag gedraagt zich als een Bingham-vloeistof met een initiële schuifsterkte, die overwonnen moet worden alvorens uitschuring of beweging kan optreden. Voor het slib uit de Thames werd voor deze schuifsterkte gevonden:

$$\tau_B \approx 4,3 \cdot 10^{-5} c^{\frac{5}{2}} \quad (\text{dyne/cm}^2)$$

, met c = concentratie (kg/m^3)
 $(15 < c < 120 \text{ kg/m}^3)$

?
 voor concentraties tussen 15 en 45 kg/m^3 is $\tau_B < \tau_d$.

koppeling τ en d ? , dit is juist het belangrijkste door erosie niet los te zien van consolidatie

oek geconstateerd bij kop v.d.
Noorderdijk (Hoeve v. Holland)

MERSEY ([36], [44])

In 1965 zijn in de Mersey uitgebreide metingen uitgevoerd, waarbij werden gemeten:

- stroomsnelheden
- concentraties gesuspendeerde deeltjes
- zoutgehalte
- temperatuur.

Wat betreft de metingen van concentraties gesuspendeerde deeltjes is een aantal resultaten verzameld in fig. 5-2.

De invloed van de dichtheidsverschillen, het getij en de rivierafvoer hadden een overeenkomstige invloed als bij de Thames. (Ook hier de landinwaartse stroming bij de bodem t.g.v. dichtheidsverschillen (gravitatie-circulatie) als belangrijkste oorzaak van de aanslibbingsproblemen).

invloed temperatuur

De temperatuur bleek ook een belangrijke invloed te hebben op de concentraties van gesuspendeerde deeltjes. Dit blijkt duidelijk uit fig. 5-2^j, waar het enige verschil tussen beide weergegeven situaties de temperatuur is: resp. 14,4 °C (eind zomer) en 2,8 °C (vroeg in voorjaar). De concentratie blijkt hier in het voorjaar ruim 4 maal zo groot te zijn als in de zomer. Ook fig. 5-2^k waar getijgemiddelde waarden van de concentratie staan weergegeven, duidt op grotere concentraties tijdens de winter dan in de zomerperiode. In deze figuur blijkt ook duidelijk de invloed van het getij op de concentratie van gesuspendeerde deeltjes (getijamplitude $a_0 \approx H-4,6$ (m)).

De invloed van de temperatuur wordt in [44] verklaard uit een reductie van de viscositeit van het water bij toename van de temperatuur. Hierdoor ontstaat een toename van de valsnelheid van de deeltjes. Ook zal bij lagere viscositeit de kans op botsingen van de deeltjes in suspensie toenemen en daarmee de flocculatie. Een toenemende valsnelheid van de deeltjes betekent dat het afgezette slib langer de gelegenheid krijgt te consolideren, hetgeen met de lagere viscositeit van het water leidt tot een hogere schuifsterkte van het geconsolideerde slib in de zomerperiode.

Bij vergelijking van de zomer- met de winterperiode moet wel bedacht worden dat de rivierafvoer tijdens de zomerperiode over het algemeen het laagst is,

en daarmee ook de leverantie van fijne deeltjes. Daarnaast kunnen ook de in de winter veelvuldig voorkomende stormen middels opgewekte golven zorgen voor de opwerveling van afgezet slib.

vertikale concentratieverdeling

In fig. 5-2¹ is de concentratie op een drietal diepten weergegeven als functie van de tijd. De erosie vindt m.n. plaats in het bovenstroomse gedeelte van het estuarium, terwijl het meetpunt zich bevindt in de Narrows. De eerste piek betreft plaatselijk geerodeerd slib, terwijl de grotere piek betrekking heeft op materiaal uit het bovenstroomse gedeelte van het estuarium. Dit verklaart ook waarom de tweede piek eerder bereikt wordt naarmate het meetpunt zich dichterbij het oppervlak bevindt. De concentratieverdeling in een bepaalde doorsnede wordt dus duidelijk bepaald door het plaatselijk geerodeerde slib en het advectief transport van slib uit elders gelegen gebieden. De laatste bijdrage kan dominant zijn wanneer ter plaatse een beperkte hoeveelheid te eroderen slib beschikbaar is. Dit kan ertoe leiden dat er concentratieverdelingen ontstaan met de kleinste concentratie aan de bodem en de grootste nabij het oppervlak (zie fig. 5-2¹ op 2,5 uur na hoog water).

variatie slibconcentratie over doorsnede

Uit metingen in enige doorsneden van de Narrows is gebleken dat het verloop van de slibconcentratie als functie van de tijd bij de oevers sterk kan verschillen van die midden in de rivier [45]. Fig. 7-4 geeft de plaats van de meetpunten en de daar gemeten slibconcentraties over de getijperioden, waarbij resultaten in één doorsnede naast elkaar staan weergegeven. De metingen zijn helaas niet op dezelfde dag uitgevoerd, maar beweerd wordt dat de resultaten onderling goed vergelijkbaar zijn vanwege nagenoeg identieke omstandigheden. De oorzaken van de verschillen zijn niet geheel duidelijk. Wel kan hieruit worden afgeleid dat resultaten van bij de oevers gemeten slibconcentraties niet representatief zijn voor de slibverschijnselen in de rivier.

8 Mengmechanismen

Bij een gegeven stelsel randvoorwaarden van een getijrivier, te weten bovenafvoer, getij, zout- en slibgehalte, worden de hydrodynamische processen en dientengevolge de zout/zoet verdeling en de slibverschijnselen, met name bepaald door de geometrie van het tussengelegen gebied. Tot deze geometrie kunnen in principe worden gerekend allerlei onregelmatige oevervormen (verbredingen en versmallingen, gebieden tussen kribben, havens, etc.). Tussen deze geometrische onregelmatigheden en de rivier treedt een wisselwerking op als gevolg van de vertikale en horizontale getijbeweging en als gevolg van dichtheidsverschillen. Ook kunnen allerlei externe factoren als wind, aardrotatie en scheepvaart een belangrijke invloed hebben.

Deze invloedsfactoren hebben door hun opgewekte variaties in de snelheidsverdeling een belangrijke uitwerking op de menging en dispersie, en worden daarom mengmechanismen genoemd.

In dit hoofdstuk zou geprobeerd worden uit de verzamelde prototype-gegevens af te leiden hoe deze factoren doorwerken op de zoutindringing en slibtransporten. In analogie met de lijst van onderwerpen, gepland voor het principe-onderzoek in de zout-zoet goot, is de volgende lijst van mechanismen opgesteld, waaraan bij de inventarisatie van gegevens aandacht zou worden besteed:

- geometrieveranderingen
- verspreiding van stoffen - "hakeffekten"
- verspreiding stoffen in stroming met dichtheidsverschillen
- menging door scheepvaart
- invloed kribben
- invloed havens
- plaat- en geuleffekten
- windinvloed
- invloed zijrivieren.

Een probleem hierbij is dat, zoals reeds verwacht, onderlinge vergelijking van de estuaria tot weinig harde konklusies leidt, omdat vele oorzaken tegelijk tot een verschillend gedrag leiden (vergelijk grote verschil in zoutindringing bij rechte goot en in werkelijk estuarium in hoofdstuk 6.3).

De meeste gegevens over de invloed van bepaalde omstandigheden zullen waarschijnlijk te verkrijgen zijn uit resultaten van metingen voor en na een bepaalde ingreep (bijvoorbeeld voor en na een verdieping, voor en na de aanleg van een haven, etc.), dan wel uit vergelijking van prototypemetingen bij extreme omstandigheden (bijv. hoge en lage rivierafvoer, geen en zeer harde wind, etc.).

Bij de tot nu toe geïnterpreteerde getijrivieren (Thames en Mersey) bleken niet zodanige meetgegevens beschikbaar, dat de invloed van een der bovengenoemde mechanismen op de zoutindringing of het slibtransport in de rivier kon worden aangegeven. Wel waren plaatselijk bij sommige van deze mechanismen nadere gegevens beschikbaar. Deze zullen onderstaand in het kort worden gepresenteerd.

havens

In het kader van het onderzoek naar de achtergronden van aanslibbingsproblemen in havens zijn in [127] resultaten van metingen van stroomsnelheden, zoutgehalten en concentraties gesuspendeerde deeltjes gepresenteerd. Dit betrof de Queen Elizabeth II haven in het Mersey estuarium en het Tidal Tilbury Basin in de Thames. De eerstgenoemde wordt door een sluis, voorzien van roldeuren, met de rivier verbonden, terwijl de laatstgenoemde in open verbinding staat met de rivier.

Resultaten van deze metingen staan resp. weergegeven in fig. 8-1 en 8-2.

Van overheersend belang hierbij is het verschil in zoutgehalte en dus in dichtheid van het water in de haven en in de rivier, hetgeen leidt tot een stroming nabij de bodem in de richting van het water met de kleinste dichtheid. Hierdoor zal bij de Queen Elizabeth II haven na opening van de sluisdeur aan de bodem van de haven ingaande stroming ontstaan, waardoor het in de onderste lagen in grote concentraties aanwezige slib wordt meegevoerd. Bij het Tilbury Tidal Basin wordt halverwege de vloedperiode het zoutgehalte kleiner dan in de rivier, hetgeen de binnenkomende stroming bij de bodem versterkt met hetzelfde effect als bij de Queen Elizabeth haven. De in de Tilbury Tidal Basin aan het eind van de ebperiode de haven uitgaande stroming, welke versterkt wordt door de grotere dichtheid in de haven dan in de rivier, is niet voldoende sterk om het in de vloedperiode binnengekomen en bij hoogwater afgezette slib te eroderen en af te voeren.

bochten

In [33] worden door Bowden en Sharaf El Din resultaten gepresenteerd van metingen in de Narrows van de Mersey (doorsnede C: zie fig. 8-3^a). In de punten 1, 2 en 3 werden diepte-gemiddelde amplitudes van de stroomsnelheden gemeten van resp. 1,70; 1,58 en 1,29 m/s. De over het getij gemiddelde stroomsnelheden staan weergegeven in fig. 8-3^{b,c}. De snelheden u_T zijn in de richting van het kanaal en v_T in dwarsrichting. De gemiddelde laterale snelheden geven een duidelijke stroming in oostelijke richting te zien, hetgeen wordt toegeschreven aan de kromming van het kanaal ter plaatse. Ook wijst de figuur voor v_T op een dwarscirculatie: westwaarts aan het oppervlak en oostwaarts bij de bodem. De getij gemiddelde zoutgehaltenes geven aan dat de hoogste concentraties voorkomen aan de oostzijde van het kanaal.

Wegens de invloed op de netto stromingen kunnen bochten aanleiding geven tot grote verschillen in het netto transport van gesuspendeerde deeltjes over de doorsnede, soms zelfs tot een landwaarts transport aan de ene en een zeewaarts transport aan de andere zijde van het estuarium ([6], [36]). Om dit na te gaan zijn voor de Thames in Long Reach (19 mijl benedenstroms van London Bridge) in een doorsnede uitgebreid metingen gedaan bij diverse getijamplitudes. De resultaten hiervan zijn weergegeven in fig. 8-4. Waarschijnlijk zullen ook variaties in de diepte over de doorsnede hierbij een rol hebben gespeeld.

variatie diepte over de doorsnede

Wanneer de diepte varieert over de doorsnede van het estuarium, heeft de landinwaartse stroming de neiging zich te concentreren in de diepere gedeelten van de doorsnede, terwijl in de ondiepe gedeelten de getijgemiddelde stroming over de gehele diepte vaak zeewaarts is gericht. Resultaten van metingen in de punten A en D in de Narrows van het Mersey estuarium staan weergegeven in fig. 8-5 (uit [35]). De laterale variatie van de diepte-gemiddelde snelheid geeft aanleiding tot dwarscirculatie en is daarom van invloed op dispersie, zoutindringing en slibtransport. Dit leidt tevens tot variatie van het zoutgehalte over de doorsnede, waarbij de getijgemiddelde zoutconcentratie het laagst is in de ondiepste gebieden (vgl. ook [128]).

eb- en vloedkanalen

Een belangrijke oorzaak voor de variatie in reststromen over de doorsnede zijn de in brede estuaria vaak voorkomende eb- en vloedkanalen. Dergelijke kanalen worden aangetroffen in het bovenstroomse gedeelte van de Mersey, als weergegeven in fig. 8-6, en hun invloed strekt zich uit tot in de Narrows.

Ter plaatse van deze kanalen en zandbanken treedt een grote variatie van het zoutgehalte op over de doorsnede, zoals blijkt uit de in fig. 8-6^b weergegeven zoutgehaltes in het gebied van 14-16 km boven Rock-Lighthouse. Ook in de mond van de Thames komen eb- en vloedkanalen voor (zie tabel 10 uit [6]).

Dat bovengenoemde verschijnselen een belangrijke invloed kunnen hebben op de dispersie, de zoutindringing en de slibverschijnselen hoeft geen betoog. Kwantitatieve gegevens hierover zijn evenwel niet bekend.

oevervormen

Door Okubo [129] is een analyse uitgevoerd naar de invloed van oeveronregelmatigheden, in de vorm van inhammen, op de longitudinale dispersie in de hoofdstroom. Uitgaande van een snelheid $u = U_0 \sin \sigma t$ in de rivier komt hij tot de volgende formule voor de longitudinale dispersie:

$$D = \frac{D'}{1+r} + \frac{r U_0^2}{2k(1+r)^2 (1+r+\sigma/k)}$$

, met: D' = longitudinale dispersie in rivier
zonder de inhammen

r = verhouding volume inham/volume rivier

k^{-1} = karakteristieke uitwisselingstijd tussen
inham en rivier.

σ = frekwentie riviersnelheid $u = U_0 \cos \sigma t$

Voor de Mersey komt hij tot de volgende waarden:

$$U_0 = 1,5 \text{ m/s}$$

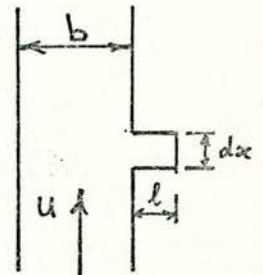
$$\sigma = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$$

$$k^{-1} = 10^4 \text{ s}$$

$$D' = 9,3 \text{ m}^2/\text{s}$$

, hetgeen voor een reële waarde van de verhouding volume inham/volume rivier van 10% ($r = 0,1$) leidt tot:

$$D = 0,9 D' + 370 \text{ m}^2/\text{s}.$$



Aangezien de tweede term hierin overeenkomt met de grootste uit prototype metingen afgeleide waarden, wordt gesteld dat dit mechanisme alleen reeds de longitudinale dispersie in de Mersey kan verklaren.

9 Aanpak onderzoek getijrivieren

Op grond van de geïnterpreteerde gegevens van onderzoeken aan getijrivieren zal in dit hoofdstuk een indruk worden gegeven van hoe elders in de wereld het probleem van zoutindringing en afzetting van slib in getijrivieren onderzoektechnisch wordt aangepakt.

Het spreekt vanzelf dat de gevolgde aanpak sterk zal afhangen van het doel waarvoor in een bepaald estuarium onderzoek werd uitgevoerd.

Bij de onderzochte estuaria waren de volgende redenen aanleiding tot onderzoek:

- a. aanslibbings- en baggerproblemen [6], [36], [44]
- b. onderzoek naar de dynamika van mengprocessen en het zouttransport [30], [31], [32], [33], [35]
- c. ontwikkelen van voorspellende mathematische modellen i.v.m. beheer van het estuarium (m.n. verbetering waterkwaliteit) [11]
- d. onderzoek naar de invloed van de bouw van een stormvloedkering [22].

De gevolgde aanpak van het onderzoek was hierbij als volgt:

ad a: Het onderzoek in de Thames i.v.m. aanslibbingsproblemen richtte zich op de vraag naar de factoren die het transport van slib beïnvloeden en de vraag of de voor de kust gedumpte baggerspecie weer in de rivier terugkwam. Het onderzoek is uitgevoerd door H.R.S.-Wallingford en gestart in 1949 met de aankoop van een meetboot om prototype-gegevens te verzamelen. Uitgebreid onderzoek is uitgevoerd in hydraulische modellen, te weten:

1. proefmodel $\lambda_L = 3000$; $\lambda_h = 120$, ter bepaling van de getijden en stromingen
2. model $\lambda_L = 600$; $\lambda_h = 120$, om uitgebreid onderzoek te doen naar de achtergronden van de slib- en baggerproblemen.

Het onderzoek in de Mersey naar de oorzaken van de aanslibbingsproblemen, de herkomst van het materiaal en om te komen tot aanbevelingen om deze ongewenste effecten zoveel mogelijk te minimaliseren had de volgende aanpak:

1. Prototype-metingen: - snelheden
- zoutgehalte

- concentraties gesuspendeerde deeltjes
- temperatuur.

2. Bestudering van meetgegevens van de afgelopen jaren, om de optredende processen beter te leren begrijpen.

3. Hydraulisch modelonderzoek. Hiervoor zijn twee modellen gebouwd :
(H.R.S.-Wallingford [36])

a. model met vaste bodem: $\lambda_L = 3200$

$$\lambda_h = 120$$

, met name om de veranderingen in het circulatie stromingspatroon te bestuderen, die optreden in Liverpool Bay als gevolg van daar aan te brengen geleidewerken van stortsteen.

b. model met beweeglijke bodem: $\lambda_L = 550$

$$\lambda_L = 60$$

, om het stromingspatroon in het bovenstroomse gedeelte van het estuarium te bestuderen, m.n., de aanslibbingsproblemen in Garston en Eastham channel.

In hoofdstuk 10 zal nader worden teruggekomen op de hydraulische modellen, terwijl aan de slibverschijnselen reeds in hoofdstuk 7 aandacht is besteed.

ad b: Menging in estuaria, als resultaat van een combinatie van waterbewegingen en turbulente diffusie, is door diverse onderzoekers bestudeerd. Een probleem bij deze studies in estuaria is dat de zgn. steady-state nooit wordt bereikt (bijv. variatie bovenafvoer), de snelheden steeds veranderen als gevolg van de getijwerking en de vormgeving vaak zeer grillig is (eb- en vloedkanalen, platen, etc.). Bij de Mersey is het de Narrows (vgl. fig. 5-2^{a,h}) die zich door zijn kanaalachtige vorm m.n. leent voor een dergelijk onderzoek. Uitgebreid zijn hier in verschillende verticale en horizontale raaien de snelheden en zoutgehalten gemeten. Door medewerkers van de Universiteit van Liverpool zijn de resultaten van deze metingen grondig geanalyseerd (zie [31], [32], [33] en [35]). Resultaten van deze analyses zijn vermeld in hoofdstuk 6.

ad c: Een gebruikelijke aanpak is uit te gaan van de advektie-diffusievergelijking en de hierin benodigde diffusie-koëfficiënten te bepalen uit prototype-metingen. In [11] wordt voor de Thames een andere methode gevolgd. Hierbij wordt er van uitgegaan dat elk punt van het estuarium een distributie-kromme bezit, die de menging op dit punt precies weer-

geeft. Vanuit een bepaald punt wordt een gedeelte P1 over een lengte L stroomopwaarts verspreid en een gedeelte P2 over dezelfde lengte stroomafwaarts, terwijl het overige gedeelte (1-P1-P2) wordt gedacht op zijn plaats te blijven. De lengte L wordt voor het estuarium konstant verondersteld. (Voor de Thames gekozen: $L = 6 \text{ mijl} \approx 9,6 \text{ km}$). De frakties P1 en P2 worden voor elk punt van de rivier bepaald uit prototype-meetgegevens (zie voor de Thames: fig. 7.14 uit [11]). In dit onderzoek voor de Thames staat de concentratie van opgeloste zuurstof centraal. Op deze wijze wordt bij verschillende omstandigheden c.q. toelaatbare afvalwaterlozingen de zuurstofconcentratie bepaald als functie van de plaats.

ad d: In de jaren '68 - '75 zijn uitgebreide onderzoeken uitgevoerd door H.R.S.-Wallingford i.v.m. de invloed van de bouw van een stormvloedkering op het getij, de stromingssituatie, het zoutgehalte en het slibgedrag in de Thames [22].

De aanpak van het onderzoek was als volgt:

- a. het bouwen van twee hydraulische modellen om de juiste plaats van deze stormvloedkering vast te stellen en om mogelijkheden na te gaan om de stormvloedkering ook te gebruiken als een instrument om het getij te beïnvloeden: "Thames estuary model": $\lambda_L = 600$; $\lambda_L = 60$ (Teddington-Southend) "Silvertown barrier model": $\lambda_L = 300$; $\lambda_L = 60$ (Teddington-Tilbury)
- b. ontwikkeling mathematisch slib-model
Dit betreft het door Odd en Owen [15] ontwikkelde twee-lagen model (zie hoofdstuk 10). Vanwege diverse onbekendheden in het gedrag van slib en de strenge schematisatie in twee lagen, moeten nogal wat aannamen gedaan worden (bijv. t.a.v. de verticale uitwisseling van slib tussen de lagen).
- c. instellen van meetstations om op diverse plaatsen in het estuarium kontinu de hoeveelheid gesuspendeerde deeltjes vast te leggen.
- d. uitvoering van proeven om de eigenschappen van het slib uit de Thames te bepalen, welke nodig zijn in het matematische model (bijv. coëfficiënten van erosie en sedimentatie).

In de hoofdstukken 7, 10 en 11 wordt op diverse aspecten van bovengenoemde wijze van onderzoektechnische aanpak van de problemen nader ingegaan.

10 Toepassing wiskundige modellen voor beschrijving c.q. voorspelling zout- toestand en slibgedrag in getijrivier

Sinds de komst van de digitale computer in de vijftiger jaren worden wiskundige modellen in toenemende mate toegepast. De keuze van het model zal sterk afhangen van het probleem, waarvoor het dient te worden gebruikt. Afhankelijk van het aantal dimensies is de volgende indeling te maken:

- . 1-dimensionale modellen: alle parameters gemiddeld over de doorsnede
- . 2-dimensionale modellen: - horizontaal gemiddeld
- vertikaal gemiddeld
- twee lagen beschrijving
- . 3-dimensionale modellen.

Voorts is er bij deze modellen onderscheid te maken tussen getijgemiddelde modellen en die welke de processen in het estuarium momentaan beschrijven.

Naarmate over meer dimensies wordt gemiddeld, zal het model eenvoudiger en goedkoper zijn. De informatie die wordt verkregen zal echter minder gedetailleerd zijn, terwijl dan diverse in het estuarium optredende processen gevangen worden in nog nader te bepalen coëfficiënten, m.n. de effectieve dispersiecoëfficiënten. Belangrijk is dat de bij het probleem, waarvoor het model wordt toegepast, optredende belangrijkste (meng)mechanismen goed in het model worden weergegeven.

In dit hoofdstuk zal een overzicht worden gegeven van welke wiskundige modellen en met welk resultaat zijn toegepast bij de in deze studie geïventariseerde estuaria. Met name zal hierbij gekeken worden naar modellen die de zoutindringing of slibverschijnselen beschrijven. Modelleringen, waarbij alleen getijberekeningen worden uitgevoerd zullen niet worden behandeld. Hierover bestaat reeds een uitgebreide literatuur (zie [103], [104]).

Opgemerkt zij, dat een dergelijk overzicht nooit volledig kan zijn en beperkt moet blijven tot in de literatuur gepresenteerde gegevens. Voor een overzicht, waarbij een groot aantal in de literatuur gepresenteerde modellen is gerangschikt naar het aantal dimensies, wordt verwezen naar [105].

Thames

In het kader van het onderzoek naar de invloed van een stormvloedkering op het gedrag van de rivier is door Odd en Owen een twee-lagen model ontwikkeld, om het gedrag van het slibtransport te berekenen (zie [15]). Besloten is tot een twee-lagen benadering, omdat de gravitatiecirculatie in een estuarium een belangrijke rol speelt bij de beweging en longitudinale verdeling van gesuspendeerde deeltjes. Aangezien de interne circulatie bij een goed gemengd estuarium van weinig invloed is op de voortplanting van het getij, is voor de berekening van de waterdiepte en de gemiddelde snelheid uitgegaan van een 1 D-benadering. Hiervoor is de methode, als beschreven door Rossiter en Lennon, gevolgd (zie [12]). De hierbij behorende zgn. "bulk flow equations" luiden:

$$\text{bewegingsvergelijking:} \quad \frac{1}{g} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{f_B |\bar{u}| \bar{u}}{8gd} = 0 \quad (10.1)$$

$$\text{continuïteitsvergelijking:} \quad \frac{\partial [b(x) \bar{u}]}{\partial x} + b(x) \frac{\partial \zeta}{\partial t} = 0 \quad (10.2)$$

met: f_B = wrijvingsfactor

\bar{u} = snelheid, gemiddeld over de totale doorsnede

$b(x)$ = breedte

ζ = verticale verplaatsing oppervlak

d = waterdiepte.

Vervolgens wordt de beschouwing in twee lagen voortgezet, waarbij voor de dikte aan de onderste laag een vaste waarde is gekozen: $d_L = 1,22$ m (zie fig. 9-1). Voor de onderste laag gelden nu de volgende vergelijkingen:

$$\text{bewegingsvergelijking:} \quad \frac{1}{g} \frac{\partial u_L}{\partial t} + \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{d}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} \right)_{\text{bed}} + \frac{f_L |u_L| u_L}{8gd} = 0 \quad (10.3)$$

$$\text{continuïteitsvergelijking:} \quad d_L \frac{\partial [u_L b(x)]}{\partial x} + b(x) \cdot v = 0 \quad (10.4)$$

met: v = verticale snelheid op grensvlak van de twee lagen

u_L = horizontale snelheid in onderste laag.

De term $\left(\frac{\partial \rho}{\partial x} \right)_{\text{bed}}$ wordt bepaald uit metingen in het prototype, terwijl de snelheid u_u van de bovenste laag volgt uit de continuïteit:

$$u_u = \frac{\bar{u} \cdot d - u_L \cdot d_L}{(d - d_L)} .$$

De in de beide lagen gemiddeld optredende concentraties van gesuspendeerde deeltjes volgen nu uit de voor de beide lagen op te stellen massabalansvergelijkingen, waarbij aannamen gedaan zijn voor het massatransport door het grensvlak en de transporten t.g.v. erosie en afzetting (zie voor deze laatste processen hoofdstuk 7). In fig. 10-1^b worden resultaten van berekeningen vergeleken met meetgegevens bij springtij en een bovenafvoer $Q_f = 170 \text{ m}^3/\text{s}$. Resultaten van berekende hoeveelheden afgezette slibdeeltjes en een vergelijking tussen berekende en gemeten slibconcentraties staan weergegeven in fig. 9-2. In absolute waarde blijken er belangrijke verschillen te bestaan tussen gemeten en berekende concentraties. Evenwel de plaats van meeste aanslibbing, de scheefheid van de concentratie-verdeling en de grootte-orde van de variatie van de concentratie over de getijperiode worden goed weergegeven. Rondom de beschrijvingen van de erosie, sedimentatie en transportprocessen van het slib bestaan nog vele vraagtekens wegens de onbekendheid met deze processen.

Mersey

In de literatuur worden geen wiskundige modellen gepresenteerd die de zoutindringing en/of het slibgedrag in de Mersey beschrijven. Wel worden door Bowden en Hamilton [106] numerieke berekeningen uitgevoerd voor een hypothetische estuarium met rechthoekige doorsnede, dat qua afmetingen en waarden van andere parameters enige gelijkenis met de Mersey vertoont. Dit betreft een twee-dimensionaal model, waarbij in laterale richting is gemiddeld. De geometrie van dit hypothetisch estuarium is weergegeven in fig. 10-3^a. Om het effect van de fysische parameters op de circulatie en menging na te gaan, zijn de coëfficiënten voor de verticale uitwisseling van impuls en stof, resp. N_z en K_z als volgt gevarieerd:

- N_z en K_z konstant gedurende de getijperiode.
- N_z en K_z afhankelijk van de gemiddelde stroomsnelheid en waterdiepte
- N_z en K_z afhankelijk van de gemiddelde stroomsnelheid en waterdiepte, alsmede van het totale Richardson getal Ri .

De toegepaste waarden waren als volgt: (cm^2/s)

a) $N_z = 40$

$K_z = 20$

b) $N_z = 5 + 0,25 h |u|$

$K_z = 2,5 + 0,125 h |u|$

c) $N_z = 5 + 0,25 h |u| (1+7.Ri)^{-\frac{1}{4}}$

$K_z = 2,5 + 0,125 h |u| (1+Ri)^{-\frac{2}{4}}$

,met: h = waterdiepte (m)

u = gemiddelde stroomsnelheid (cm/s)

$$Ri = \frac{g H \Delta \rho}{\rho U^2}$$

$\Delta \rho$ = dichtheidsverschil tussen bodem en oppervlak.

In fig. 10-3^c zijn de resultaten van de berekeningen weergegeven. In de situatie met niet konstante coëfficiënten blijkt de verticale menging gedurende vloed sterker te zijn dan bij eb, hetgeen overeenstemt met resultaten van metingen in de Mersey. In fig. 10-3^b is de variatie van N_z en K_z alsmede van Ri over het getij weergegeven. Gezien de grote verschillen in geometrie en omstandigheden in een directe vergelijking tussen de resultaten van de berekeningen en van de metingen in het prototype niet mogelijk. Wel kan gekonkludeerd worden dat de gebleken belangrijke invloed van de verticale uitwisselingscoëfficiënten op de circulatie en zoutverdeling vraagt om meer inzicht in de grootte van deze coëfficiënten voor prototype-estuaria.

11 Modellerings in hydraulische schaalmodellen

Zoals vermeld in hoofdstuk 9 wordt bij de bestudering c.q. oplossing van problemen in estuaria dikwijls gebruik gemaakt van onderzoek in een hydraulisch model. Om middels dit "gereedschap" antwoorden te kunnen geven op de gestelde vragen, zullen in dit model de voor het probleem belangrijkste processen c.q. mechanismen goed op schaal moeten worden weergegeven. Een probleem bij estuaria is dat de lengte en breedte veel groter zijn dan de diepte. Door Reynolds is reeds in de vorige eeuw aangetoond, dat de verticale schaal voldoende groot moet zijn, om een turbulente stroming te handhaven gedurende het grootste gedeelte van de getijperiode. Om nu modellen van niet te grote afmetingen te krijgen wordt met een zgn. vertrokken model gewerkt, waarbij de horizontale schaal $\lambda_L = \frac{\text{lengte prototype}}{\text{lengte model}}$ een orde groter is dan de verticale schaal $\lambda_h = \frac{\text{waterdiepte prototype}}{\text{waterdiepte model}}$. Dit heeft tot gevolg dat extra ruwheid d.m.v. staafjes of blokjes op de bodem aan het model moet worden toegevoegd. Wanneer in het model tevens zout en zoet water wordt toegepast hebben deze staafjes ook tot doel de menging te bevorderen, opdat een juiste verticale zoutverdeling wordt verkregen, m.n. in gedeeltelijk gemengde situaties. De turbulente mengprocessen zullen in een vertrokken model evenwel nooit geheel op schaal zijn. Fischer et al ([100], [101]) tonen aan dat in een vertrokken model de longitudinale dispersie t.g.v. verticale snelheidsgradiënten niet op dezelfde wijze wordt verschaald als die t.g.v. transversale snelheidsgradiënten. Nauwkeurige kalibratie van het model aan prototype-gegevens leidt ertoe dat, ondanks het niet volkomen juist simuleren van de diverse mengprocessen, het totale effect van deze mengprocessen in het model wel juist wordt weergegeven, zodat hiermee een belangrijk gereedschap is verkregen om problemen in estuaria op te lossen, alsmede om onderzoek te doen naar de invloed van macro-mengmechanismen, zoals bijv. havens, op de zoutindringing.

De belangrijkste schaalregel voor deze modellen is de zgn. Froude-schaal, waardoor de zwaartekracht en de draagheidskrachten op gelijke wijze worden verschaald. Bij de geïnventariseerde hydraulische modellen werden geen voorzieningen getroffen om de invloed van corioliskrachten in rekening te brengen.

Van de geïnventariseerde estuaria werden de hierna volgende hydraulische modellen gebouwd:

	λ_L	λ_h	vertrekking λ_L/λ_h	Referentie
THAMES	3000	120	25	[6]
	600	60	10	[6]
	600	120	5	[6]
	600	60	10	[10]
	300	60	5	[22]
MERSEY	550	60	9,17	[36]
	3200	120	26,7	[36]

Onderstaand volgt een korte beschrijving van deze onderzoeken.

Thames

Het in [6] beschreven modelonderzoek is uitgevoerd i.v.m. navigatieproblemen door aanslibbing en vanwege de hoge kosten voor baggerwerk. Het model ($\lambda_L = 3000$; $\lambda_h = 120$), gereed in 1950, diende voor het verkrijgen van gegevens over de reproductie van getijden en stromingen voor de later te bouwen grotere modellen (o.a. keuze van de randen). Het was gemodelleerd in zand ($d_{50} = 180 \mu\text{m}$) en cement mortel. Er werd alleen met zoet water gestroomd, terwijl het getij en de bovenafvoer konstant worden ingesteld: resp. gemiddeld springtij en $Q_f = 84 \text{ m}^3/\text{s}$. Het model ($\lambda_L = 600$; $\lambda_h = 60$), om de aanslibbingsproblematiek te onderzoeken, kwam gereed in 1951. Voor de modellering is $290 \mu\text{m}$ -zand gebruikt. Door de ribbels in het zandbed ontstonden krachtige wervels, die een natuurlijke formatie en beweging van hoge slibconcentraties onmogelijk maakten. Omdat dit model juist bedoeld was voor onderzoek i.v.m. aanslibbing werd besloten de verticale schaal te reduceren tot 1 : 120, waarbij de bodem, om een vergelijkbare ruwheid te krijgen als de geribbelde zandbodem, werd gevormd uit $\frac{3}{4}$ " gravel, ondoorlaatbaar en ook iets gladder gemaakt door de openingen op te vullen met zand en cement mortel. In deze grote modellen werd met zout en zoet water gestroomd. Hoewel de verschillen niet groot waren, bleek de longitudinale en verticale zoutverdeling bij het 600/120-model zelfs iets beter dan in het 600/60-model.

In fig. 11-1 worden resultaten van metingen in het model vergeleken met die in het prototype, zowel voor getijkrommen als de longitudinale zoutverdeling bij verschillende bovenafvoeren. I.v.m. het onderzoek naar slibtransporten is vooral de nettowaterbeweging van belang. Er bleek bij de bodem gemiddeld een stroomopwaartse stroming te bestaan en nabij het oppervlak een stroomaf-

waartse stroming (zie fig. 11-1^e). Uit deze figuur blijkt dat nabij de zgn. "Mud Reaches", waar veel aanslibbing plaatsvindt, de netto stroming nabij de bodem juist omslaat van bovenstroomse naar benedenstroomse richting. Om het stroomopwaartse transport van slib bij de bodem te verifiëren zijn in prototype experimenten uitgevoerd met radioactieve tracers (zie fig. 11-2). Simultaan hiermee zijn in het model proeven uitgevoerd, waarbij holle celluloid ballen ($\hat{=} d = 2,25$ m-prototype), gevuld met water (effektieve dichtheid slechts iets groter dan van het omringende water), op overeenkomstige plaats en tijd werden geïnjecteerd. Deze ballen belandden uiteindelijk in de "Mud Reaches", waar de eb- en vloedbewegingen bij de bodem ongeveer gelijk zijn.

Uit het onderzoek is gebleken dat een groot deel van de in Black Deep voor de kust gedumpte baggerspecie via de door gravitatiecirculatie ontstane stroomopwaartse stroming nabij de bodem de rivier weer wordt op getransporteerd. De aanbeveling om de gebaggerde specie op het land te storten heeft uiteindelijk geleid tot een vermindering van het baggerwerk met ca. 50%.

Het in [10] en [22] gerapporteerde onderzoek m.b.v. het model ($\lambda_L = 600$; $\lambda_h = 60$) had tot doel de invloed na te gaan van een stormvloedkering op de aanslibbing, afhankelijk van de plaatskeuze, zowel wanneer deze alleen bij zeer hoog water werd gebruikt als bij continu gebruik om gedurende de helft van het getij gesloten te zijn. Het model was gemodelleerd in cement mortel. Middels bolletjes perspex ($\rho = 1180 \text{ kg/m}^3$; $d_{50} = 300 \text{ }\mu\text{m}$) werd de sedimentatie gesimuleerd. Een tijdschaal voor de sedimentbeweging werd afgeleid door in model en prototype een gedeelte weg te baggeren en vervolgens de processen in beide gevallen te vergelijken. Op deze manier werd kwantitatieve informatie verkregen over de aanslibbingssnelheid, om gebruikt te worden bij studies voor verschillende situeringen van de stormvloedkering. Het onderzoek werd uitgevoerd in de periode '68-'75.

Het model ($\lambda_L = 300$; $\lambda_h = 60$) is gebouwd om meer gedetailleerde informatie te verkrijgen over de invloed van een stormvloedkering op de rivier, en m.n. in de onmiddellijke omgeving van de stormvloedkering en de aanlegsteigers bij Woolwich. Vanwege de grotere schaal werden nu houten korrels toegepast met $\rho = 1100 \text{ kg/m}^3$ en een gemiddelde korreldiameter $d_{50} = 800 \text{ }\mu\text{m}$. De eerste proeven werden uitgevoerd in '72-'73. In fig. 11-3 staan resultaten weergegeven van de invloed van het sluiten van de stormvloedkering, van halverwege eb tot halverwege vloed, op de getijkromme, waterbeweging, zoutindringing en sedimentatie.

Mersey

Voor het onderzoek naar de oorzaken van aanslibbingsproblemen en het doen van aanbevelingen tot verbetering van de situatie zijn voor het Mersey-estuarium twee hydraulische modellen gebouwd:

a. model $\lambda_L = 3200$; $\lambda_h = 120$

b. model $\lambda_L = 550$; $\lambda_h = 60$

Het grote model ($\lambda_L = 3200$; $\lambda_h = 120$) omvatte tevens de Liverpool Bay en had tot doel het stromingspatroon hierin te bestuderen en na te gaan hoe de voor de scheepvaart in de periode 1911-1957 aangebrachte geleidewerken van stortsteen mogelijk hebben bijgedragen aan de toenemende sedimentatie in het bovenstroomse gedeelte van het estuarium. In dit model is zowel de situatie van 1911 als die van 1957 nagebouwd. Het model had een vaste bodem. Een vergelijking van de getijkrommes in model en prototype is gegeven in fig. 11-4^a. Fig. 11-4^{b,c} geeft een beeld van het patroon van reststromen in beide perioden, waaruit blijkt dat in 1911 de in site 53 gedumpte baggerspecie de tendens heeft verder naar zee te worden afgevoerd, terwijl in de situatie van '57 de stroming juist tegengesteld is gericht. De aldus bij de mond van het estuarium aangekomen baggerspecie zal door de door gravitatiecirculatie ontstane opwaartse stroming bij de bodem vervolgens verder het estuarium in worden getransporteerd.

Het model ($\lambda_L = 550$; $\lambda_h = 60$) had tot doel meer inzicht te verkrijgen in circulatiestromen in het bovenstroomse gedeelte van het estuarium en m.n. de aanslibbingsproblemen in de Eastham en Garston Channels te bestuderen. Het model had een beweeglijke bodem van zand. In het model werd met zout en zoet water gestroomd, nadat eerst gebleken was dat met alleen zoet water de stromingen niet goed werden weergegeven. In fig. 11-5 is dit weergegeven. Hieruit blijkt een stroomopwaartse residuele stroming over de gehele diepte in het midden van het kanaal aan aan zeewaartse drift aan weerszijden bij uitsluitend zoetwater. Bij toepassing van een zoute randvoorwaarde aan de zeezijde blijkt er een landwaartse stroming te zijn bij de bodem over de gehele breedte en een zeewaartse residuele stroming nabij het oppervlak. Dit laatste stromingsbeeld bleek goed overeen te stemmen met gemeten waarden in het prototype. Aangezien het grootste gedeelte van het in het bovenstroomse deel van het estuarium afgezette sediment uit zee afkomstig bleek, onderstreept dit nog eens het belang van het toepassen van zout-zoet modellen bij de bestudering van sedimentatieproblemen

Een vergelijking tussen de in het model en in het prototype gemeten longitudinale zoutverdeling is weergegeven in fig. 11-6^a.

Middels het meten van snelheden en het volgen van tracers is uitgebreid onderzoek gedaan naar het patroon van reststromen in de drie hoofdkanalen in het bovenste gedeelte van het estuarium: Eastham Channel, Middle Deep en Garston Channel. De tracer bestond hier uit zandkorrels, gelijk aan die waaruit de modelbodem was opgebouwd, gecoat met een fluoriserende verf. Resultaten hiervan staan weergegeven in fig. 11-6^b. De eb- en vloed kanalen zijn hier duidelijk te herkennen. De plaatsen waar deze reststromen juist omkeren van landwaartse naar zeewaartse richting blijken goed overeen te stemmen met die waar in prototype sterke aanslibbing optreedt.

Het onderzoek resulteerde in het niet meer storten van baggerspecie op site 53 in de Liverpool Bay en het overgaan op andere baggermethoden, waardoor een belangrijke besparing in hoeveelheid baggerwerk werd verkregen.

Enige beelden van de in dit hoofdstuk beschreven hydraulische modellen staan weergegeven in fotoblad 1 en 2.

12 Samenvatting, konklusies en aanbevelingen

12.1 Samenvatting

1. Om het proces van zoutindringing in getijrivieren te leren begrijpen zijn in rapport M896-40 voorstellen gepresenteerd tot principe-onderzoek naar de diverse hierbij van belang zijnde fysische mechanismen. In werkelijkheid zullen verschillende mechanismen tegelijkertijd optreden. Aangezien ook een inventarisatie van deze geïntegreerde effecten in de diverse prototypen een bijdragen kan leveren aan het inzicht in het zoutindringingsproces is besloten tot een inventarisatie van de hierover beschikbare gegevens (zie M896-40: blz. 15).
2. Naast het onderzoek naar zoutindringing zal de komende jaren ook het onderzoek naar slibverschijnselen een hoge prioriteit hebben. Bij de inventarisatie zijn daarom gegevens verzameld over beide onderwerpen.
3. Het doel van de studie is een overzicht te krijgen van de maatgevende karakteristieken van de diverse getijrivieren en de daarvan gebouwde zoutindringings- en slibmodellen, zoals getij-, rivier-, slib- en zoutgehalte randvoorwaarden en geometrische bijzonderheden, alsmede de hieruit resulterende snelheids-, zout- en slibconcentratieverdelingen.

Tevens kan zo een indruk worden verkregen hoe elders in de wereld de problemen van zoutindringing en sedimentatie van slib in getijrivieren onderzoektechnisch worden aangepakt.

4. De topografie, de rivierafvoer en de getijwerking zijn de belangrijkste factoren die de menging in het estuarium beïnvloeden, terwijl ook de aardrotatie (Coriolis-effekt) en wind van invloed kunnen zijn. Als gevolg hiervan zal een bepaalde zoutverdeling in het estuarium optreden, terwijl deze weer, samen met de genoemde factoren, van invloed is op de in het estuarium optredende circulatiestromen.

Het zijn met name de grillige vormen van de topografie die het moeilijk maken om voor de estuaria een indeling te maken. Er zijn in de literatuur dan ook diverse vormen van klassifikatie van estuaria te vinden:

- a. geomorfologische klassifikatie
- b. klassifikatie naar gelaagdheid

c. klassifikatie naar stratifikatie en circulatie (stratifikatie-circulatiediagram).

In werkelijkheid blijken allerlei verschijnselen, die niet in de klassifikatie worden meegenomen, een belangrijke rol te kunnen spelen m.b.t. de in het estuarium optredende mengprocessen, zoals dwarscirculatiestromen als gevolg van de topografie van het estuarium, Corioliskrachten of wind, macro-mengmechanismen als havens, kribben, plaatselijke vernauwingen of verwijdingen etc.

Al deze verschijnselen leiden ertoe dat een goede eenduidige klassifikatie niet eenvoudig is, en maken het vertalen van de resultaten van het ene estuarium naar het andere nagenoeg tot een onmogelijkheid.

5. In hoofdstuk 4 en 5 is van elke resp. Nederlandse en buitenlandse getijrivier, die in de inventarisatie is meegenomen, een zeer korte beschrijving gegeven, waarbij de karacteristieke gegevens in een figuur zijn verzameld (geometrie, getijkromme, snelheids-, zout- en slibconcentratieverdelingen, etc.).

Wegens de gefaseerde opzet van het onderzoek is de rapportage in eerste instantie beperkt tot de Thames en Mersey estuaria. De volgende fase zal bestaan uit de Nederlandse estuaria (Rotterdamse Waterweg, Oosterschelde, Westerschelde en Eems) en een aantal Engelse (Tay, Severn, Clyde en Southampton estuary).

6. In hoofdstuk 6 worden de estuaria middels kentallen vergeleken. De hiervoor benodigde gegevens komen van in deze estuaria uitgevoerde vrij uitgebreide metingen. Bedacht moet worden dat dit in feite een momentopname van het estuarium is, die belangrijk kan afwijken van de gemiddeld optredende situatie. Bovendien zal de zoutverdeling afhangen van de situatie, zoals die was op de dagen, voorafgaand aan de meting. Hierbij valt m.n. te denken aan de variatie van de bovenafvoer, die als functie van de tijd een zeer grillig verloop kan hebben.

De vergelijking vond plaats via de volgende kentallen:

- het vloedgetal α :
$$\alpha = \frac{Q_f \cdot T}{P_t \cdot F_o^2}$$

- het estuariumgetal E:
$$E = \frac{P_t \cdot F_o^2}{Q_f \cdot T} = \frac{F_o^2}{\alpha}$$

- het interne

estuariumgetal E_D :

$$E_D = \frac{P_t \cdot F_i^2}{Q_f \cdot T} = \frac{F_i^2}{\alpha} = \frac{E}{\Delta\rho/\rho}$$

- het estuarium Richardson getal R_{iE} :

$$R_{iE} = \frac{\frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot g \cdot Q_f}{W \cdot U_t^3}$$

Het bleek dat deze kentallen een eerste indruk geven van het estuarium, doch niet precies een voorspelling geven van de te verwachten stratifikatie. (vergelijk Mersey-estuarium bij grote rivierafvoer, dat volgens deze kentallen volledig gemengd zou zijn, maar in werkelijkheid als gedeeltelijk gemengd moet worden beschouwd).

7. Uit de beschouwde estuaria is gebleken dat met behulp van het stratifikatie-circulatie-diagram van Hansen en Rattray reeds een goede indruk verkregen kan worden over de in het estuarium optredende stratifikatie en circulatie, resp. uitgedrukt in de parameters $\frac{\delta s}{s_0}$ en $\frac{U_s}{U_f}$, of wel van de verticale zout- en snelheidsverdeling. Wel moet bedacht worden dat Hansen en Rattray in hun beschouwing uitgaan van een rechthoekige doorsnede en een stationaire toestand, hetgeen in werkelijkheid nooit het geval zal zijn.

Bij de aan dit diagram ter grondslag liggende analyse worden de inwendige mengprocessen gekoppeld aan twee parameters P en F_m , of nog beter: P en R_{iE} :

$$P = \frac{U_f}{U_t}$$

$$F_m = \frac{Q_f}{A \sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot g \cdot d}}$$

$$R_{iE} = \frac{P^3}{F_m^2}$$

Bij beide geïntervariseerde estuaria blijken de uit het diagram volgende waarden van v (zgn. "diffusive fraction") ongeveer 0,6 te zijn, hetgeen betekent dat slechts ca. 40% wordt veroorzaakt door gravitatiecirculatie.

8. Om te komen tot een verband tussen de zoutindringingslengte en enkele karakteristieke kentallen is in rapport M896-XV een dimensieanalyse uitgevoerd. Dit leidde uiteindelijk tot de volgende formule voor de minimale zoutindringingslengte L_i :

$$\frac{L_i}{h_o} \cdot \frac{g}{C^2} = f \left(\frac{L}{L_R}, \frac{\hat{q}_{eb}}{h_o \sqrt{\epsilon g h_o}}, \frac{q_r}{h_o \sqrt{\epsilon g h_o}} \right)$$

Door Fischer [122] zijn de bij dit onderzoek gepresenteerde proefresultaten opnieuw bewerkt, hetgeen leidde tot de uitdrukking:

$$L_i = 3,7 \left(\frac{h_o^{13} \cdot C^5 \cdot \epsilon^3 \cdot \sqrt{g}}{q_r \cdot \hat{q}_{eb}^5} \right)^{\frac{1}{4}}$$

, waarmee alle toen beschikbare, in een rechte goot uitgevoerde, proeven binnen een afwijking van $\pm 30\%$ beschreven konden worden.

Bij de Thames bleek er een zeer groot verschil te bestaan tussen de berekende en gemeten zoutindringingslengte. De oorzaak hiervan moet gezocht worden in het feit dat hier blijkbaar niet de gravitatiecirculatie van overheersende invloed is op de zoutindringing, maar dat andere mechanismen een overheersende rol spelen, zoals de invloed van havens, onregelmatige oevervormen, interactie getijbeweging en beddingvorm, etc. Uit de beschikbare meetgegevens van de geïnterpreteerde estuaria is niet af te leiden welke mechanismen hier dominant zijn.

9. Onder de aanname dat de verticale zoutverdeling, gemiddeld over de getijperiode, het gevolg is van een balans tussen horizontale advektie en verticale turbulente diffusie, zijn uit metingen in de Mersey vertikale uitwisselingskoëfficiënten berekend. Deze staan weergegeven in de tabel op blz. 6 - 10. De maximale waarden worden ongeveer halverwege de waterdiepte bereikt en zijn een orde kleiner dan in een homogene stroming mag worden verwacht. De uit de metingen volgende waarden van $\frac{z}{N_z}$, als functie van het Richardson getal Ri , blijken iets groter te zijn dan volgt uit de door Munk en Anderson gegeven relatie.
10. Een effectieve methode om meer inzicht te krijgen in de dispersie bepalende mechanismen blijkt te zijn het splitsen van de snelheden en zoutgehaltes in tijd- en ruimtgemiddelden, en afwijkingen hiervan. Voor de stationaire situatie leidt dit tot de volgende formule voor de longitudinale getijgemiddelde dispersiekoëfficiënt:

$$D = \frac{1}{\frac{dC_o}{dx}} \left[\overline{u_{st} S_{st}} + \overline{u_{sv} S_{sv}} + < \overline{u_t' S_t'} > + < \overline{u_v' S_v'} > \right]$$

$$= D_1 + D_2 + D_3 + D_4$$



- , met: D_1 = transport t.g.v. getijgemiddelde dwarscirculatie
 D_2 = transport t.g.v. getijgemiddelde verticale circulatie
 D_3 = transport t.g.v. laterale variaties in U en C over getij
 D_4 = transport t.g.v. verticale variaties in U en C over getij.

Onderstaand zijn voor de Mersey deze bijdrage aan de dispersiecoëfficiënt weergegeven, resp. een door Fischer [114] op grond van diverse aannamen gemaakte afschatting en door Dyer [116] van meetgegevens afgeleide waarden:

$$\begin{array}{rcl} D_1 & = & 430 \text{ m}^2/\text{s} \\ D_2 & = & 32 \text{ m}^2/\text{s} \\ D_3 & = & 6 \text{ m}^2/\text{s} \\ D_4 & = & 23 \text{ m}^2/\text{s} \\ \hline D & = & 491 \text{ m}^2/\text{s} \end{array} +$$

$$\begin{array}{rcl} D_1 & = & 79 \text{ m}^2/\text{s} \\ D_2 & = & 95 \text{ m}^2/\text{s} \\ D_3 & = & 61 \text{ m}^2/\text{s} \\ D_4 & = & 78 \text{ m}^2/\text{s} \\ \hline D & = & 313 \text{ m}^2/\text{s} \end{array} +$$

Hoewel er belangrijke verschillen zijn tussen de schatting van Fischer en de waarden van Dyer, blijkt wel dat de verticale gravitatiecirculatie niet noodzakelijk het belangrijkste mechanisme behoeft te zijn.

11. Het is gebruikelijk het resultaat van alle mengmechanismen samen te brengen in een enkele longitudinale dispersiecoëfficiënt. Voor de stationaire situatie luidt de zoutbalans dan:

$$u_f \cdot S = D \cdot \frac{\partial S}{\partial x}$$

Voor de geïnventariseerde estuaria staan in de tabel op blz. 6 - 14 de getijgemiddelde op deze wijze bepaalde longitudinale dispersiecoëfficiënten weergegeven. Uit deze getallen blijkt een grote invloed van de rivierafvoer op de dispersiecoëfficiënt.

12. Over de processen die bij slibverschijnselen in estuaria een rol spelen bestaan nog vele onduidelijkheden, m.n. wat een kwantitatieve beschrijving betreft. Als meest waarschijnlijke invloeden op het transport en de afzetting worden genoemd:

1. dynamische processen van het water in het estuarium, circulatiestromen en menging, alsmede golven t.g.v. wind.
2. agglomeratieprocessen, die de valsnelheid van de deeltjes doen toenemen.
3. eigenschappen van de deeltjes zelf.

13. Karakteristiek voor het beeld van de longitudinale verdeling van de concentratie van gesuspendeerde deeltjes in estuaria, als gevolg van de optredende hydrodynamische processen, is het zgn. "turbidity maximum",

een maximum in de concentratie, waarbij zeewaarts van dit punt de gemiddelde stroming bij de bodem landwaarts is gericht en bovenstrooms van dit punt de stroming gemiddeld een zeewaartse richting heeft. (Ook bij nagenoeg vertikaal volledig gemengde estuaria, zoals de Thames).

14. Bij de geïnterpreteerde estuaria bleek het belangrijkste mechanisme in het transport van de gesuspendeerde deeltjes de gemiddelde stroomopwaartse waterbeweging nabij de bodem te zijn als gevolg van dichtheidsverschillen (gravitatiecirculatie).
15. De getijslag is met name van invloed op de hoeveelheid in suspensie gebracht materiaal.
16. In de gebieden waar veel aanslibbing optreedt bleek bij hoge rivierafvoeren van langere duur (> 1 à 2 weken) er een toename van de kanaal diepte op te treden van vele tientallen centimeters.
17. M.b.t. de herkomst van het slib werd zowel bij de Thames als bij de Mersey middels een zorgvuldig uitgevoerde slibbalans vastgesteld dat een groot gedeelte afkomstig was vanuit zee. Het niet meer storten van baggerspecie vlak voor de kust bleek bij beide estuaria te leiden tot een belangrijke besparing op het onderhoudsbaggerwerk.
18. Bij de Mersey werd een belangrijke invloed gekonstateerd van de temperatuur op de concentraties van gesuspendeerde deeltjes, hetgeen verklaard werd uit een reductie van de viscositeit van het water bij toename van de temperatuur. In het voorjaar ($T = 2,8^{\circ}\text{C}$) bleek de concentratie ruim 4 maal zo groot als in de zomer ($T = 14,4^{\circ}\text{C}$). Bij vergelijking van de zomer- met de winterperiode moet wel bedacht worden dat de rivierafvoer tijdens de zomerperiode over het algemeen het laagst is, en daarmee ook de leverantie van fijne deeltjes. Daarnaast kunnen ook de in de winter veelvuldig voorkomende stormen middels opgewekte golven zorgen voor de opwerveling van afgezet slib.
19. De vertikale concentratieverdeling van gesuspendeerde deeltjes in een bepaalde doorsnede wordt bepaald door het plaatselijk geerodeerde slib en het advektief transport van slib uit elders gelegen gebieden. De laatste bijdrage kan dominant zijn wanneer ter plaatse een beperkte hoeveelheid te eroderen slib beschikbaar is.

20. Uit metingen in enige doorsneden van de Narrows (Mersey Estuarium) is gebleken dat het verloop van de slibconcentratie als functie van de tijd bij de oevers sterk kan verschillen van die midden in de rivier. De oorzaken van deze variatie in slibconcentratie over de doorsnede zijn niet geheel duidelijk. Wel kan hieruit worden afgeleid dat resultaten van bij de oevers gemeten slibconcentraties niet representatief zijn voor de slibverschijnselen in de rivier.

21. Bij de slibverschijnselen is een viertal fysische processen te onderscheiden:

- erosie
- transport
- afzetting
- consolidatie.

Goede voorspellingen over slibgedrage zijn alleen mogelijk, indien deze processen op de juiste wijze in het model zijn verwerkt. In hoofdstuk 7 zijn over het slib uit de Thames bepaalde parameters gegeven, die deze processen moeten beschrijven.

22. In hoofdstuk 8 zijn gegevens verzameld van in estuaria optredende mengmechanismen. Zoals reeds verwacht leidde onderlinge vergelijking van estuaria tot weinig harde konklusies omtrent hun invloed op de zoutindringing en het slibtransport, omdat vele oorzaken tegelijk tot een bepaald gedrag leiden. Wel waren bij de geïnventariseerde estuaria bij sommige van de optredende mechanismen nadere gegevens beschikbaar. Deze zijn in het betreffende hoofdstuk in het kort gepresenteerd en betreffen:

- havens
- bochten
- variatie diepte over de doorsnede
- eb- en vloedkanalen
- oevervormen.

23. In hoofdstuk 9 is op grond van de geïnventariseerde gegevens een overzicht gegeven van de aanpak van onderzoek aan getijrivieren elders in de wereld i.v.m. problemen van zoutindringing en afzetting van slib.

Het spreekt vanzelf dat de gevolgde aanpak sterk afhangt van het doel waarvoor in een bepaald estuarium onderzoek wordt uitgevoerd.

Algemeen kwamen de volgende elementen naar voren:

- prototype-metingen (incidenteel en kontinu)

- bestudering beschikbare meetgegevens over groot aantal jaren
- hydraulisch modelonderzoek
- ontwikkeling wiskundig model
- bepaling fysische eigenschappen van slib (benodigd in wiskundig model).

24. In hoofdstuk 10 is een overzicht gegeven van wiskundige modellen die zijn toegepast bij de in deze studie geïnterpreteerde estuaria. Omdat de gravitatiecirculatie in een estuarium een belangrijke rol speelt bij de beweging en longitudinale verdeling van gesuspendeerde deeltjes is voor de berekening van het slibtransport in de Thames een twee-lagen model ontwikkeld. T.g.v. de sterke schematisatie en de vele vraagtekens die er nog bestaan rondom de transportprocessen van slib bleken er in absolute waarden belangrijke verschillen te bestaan tussen de gemeten en berekende slibconcentraties. De plaats van meeste aanslibbing, de scheefheid van de concentratie-verdeling en de grootte-orde van de variatie van de concentratie over de getijperiode worden goed weergegeven.

Voor de Mersey werd in de literatuur geen wiskundige beschrijving gevonden. Wel werden met een 2D, lateraal gemiddeld, model berekeningen uitgevoerd voor een hypothetisch estuarium met afmetingen en andere parameters die enige gelijkenis met dit estuarium vertonen. Uit een variatie van de verticale uitwisselingscoëfficiënten bleek dat deze een belangrijke invloed hebben op de circulatie en zoutverdeling, hetgeen vraagt om meer inzicht in de grootte van deze coëfficiënten voor prototype-estuaria.

25. In hoofdstuk 11 is een overzicht gegeven van de voor de in deze studie geïnterpreteerde hydraulische modellen, en werden de in deze modellen verkregen resultaten vergeleken met de meetgegevens uit het prototype. Zowel voor de Thames als voor de Mersey is hydraulisch modelonderzoek uitgevoerd in zgn. vertrokken modellen. Aangezien het stromingspatroon in belangrijke mate bepaald wordt door dichtheidsverschillen en voor slibtransport de netto waterbeweging van overheersend belang is, is voor het onderzoek naar slibtransporten het stromen in het model met zowel zout als zoet water noodzakelijk. Na tunen van het model, d.m.v. aanbrengen van extra ruwheid etc., aan prototype-gegevens, blijkt de zoutindringing goed te kunnen worden weergegeven. Onderzoek naar het transport van slib vindt meestal plaats d.m.v. het volgen van tracers (balletjes perspex ($\rho = 1180 \text{ kg/m}^3$), holle celluloid ballen, houten

korrels ($\rho = 1100 \text{ kg/m}^3$), gekleurde zandkorrels, etc.).

26. Onderstreept dient te worden dat de onderhavige studie bewust beperkt is tot een inventarisatie van de in de literatuur gepresenteerde gegevens van getijrivieren en getijmodellen. Wel zijn, voor zover mogelijk onderlinge vergelijkingen gemaakt van kentallen van de geïnterpreteerde estuaria. Studie naar de achtergronden van de gesignaleerde processen of mechanismen vindt plaats bij de diverse in rapport M896-40 [108] genoemde onderwerpen.

12.2 Aanbevelingen

Uit de in de samenvatting genoemde punten kunnen de volgende aanbevelingen gedestilleerd worden:

(de tussen haakjes vermelde getallen verwijzen naar de vorenstaand in de samenvatting genoemde punten)

1. *De grillige vormen van de estuaria en hun invloed op de mengprocessen leiden ertoe dat het vertalen van de resultaten van het ene estuarium naar het andere nagenoeg tot een onmogelijkheid behoort (4). Van de inventarisatie kan daarom ook niet verwacht worden dat iets over een bepaald estuarium kan worden gezegd door gegevens uit een "soortgelijk" estuarium op te zoeken. Wel kan van de inventarisatie een belangrijke bijdrage verwacht worden aan de overbrugging van de stap tussen het fundamentele onderzoek in de zout-zoet goot en de in werkelijkheid optredende verschijnselen. Met dit doel voor ogen lijkt het zinvol de inventarisatie voort te zetten. Gezien de grote invloeden op de zout-indringing pleit punt (8) dan in feite ook voor een diepgaand onderzoek naar de in estuaria dominante mengmechanismen.*
2. *Uit prototype-gegevens blijkt dat gravitatiecirculatie niet noodzakelijk meest dominante verschijnsel hoeft te zijn dat zorgdraagt voor het stroomopwaartse zouttransport (zie (7), (8) en (10)). Het onderzoek in de zout-zoet goot dient zich dan ook mede te richten op de andere van invloed zijnde mechanismen, zoals de invloed van havens, onregelmatige oevervormen, interactie getijbeweging en beddingvorm, etc.*
3. *Van de in hoofdstuk 8 vermelde mengmechanismen konden, m.n. doordat*

vele mechanismen tegelijkertijd werkzaam zijn en geen vergelijking aanwezig is met situaties waarbij een of meerdere van deze mechanismen zijn uitgeschakeld, geen harde konklusies worden getrokken omtrent hun invloed op de zoutindringing en het slibtransport (22). Het onderzoek naar de laatstgenoemde invloeden dient in een hydraulisch model nadere aandacht te krijgen.

4. Over de processen die bij slibverschijnselen in estuaria een rol spelen bestaan nog vele onduidelijkheden, m.n. wat een kwantitatieve beschrijving betreft. Wel blijkt dat de dynamische processen van het water in het estuarium, als circulatiestromen en menging, hierin een hoofdrol spelen (zie (12) t/m (19)). Aangezien de dichtheidsverschillen op deze waterbewegingen een belangrijke invloed hebben en het zoutgehalte bovendien van invloed is op de agglomeratieprocessen van de deeltjes kan gekonkludeerd worden dat onderzoek naar slibtransporten in estuaria alleen zinvol is, wanneer dit wordt uitgevoerd in combinatie met onderzoek naar stromingen in zout-zoet omstandigheden.
5. Het slibtransport in estuaria wordt voornamelijk bepaald door de in het estuarium optredende reststromen ((14), (17) en (19)). Inzicht in deze stromingen is bij het onderzoek naar slibverschijnselen dan ook een eerste vereiste.
6. Om m.b.v. wiskundige modellen goede voorspellingen voor het slibgedrag te kunnen maken, zullen hierin de fysische processen, zoals erosie, transport, afzetting en konsolidatie, op de juiste wijze moeten zijn verwerkt. Hierover bestaan evenwel nog vele onduidelijkheden ((21), (24)). Het onderzoek dient erop gericht te worden deze processen beter te leren begrijpen en parameters te vinden waarmee deze processen kunnen worden beschreven. Aan de bepalingsmethoden van deze parameters dient vanzelfsprekend daarbij ook de nodige aandacht te worden geschonken.
7. Aangezien uit berekeningen met een 2D-lateraal gemiddeld-model wiskundig model is gebleken dat een variatie in de verticale uitwisselingscoëfficiënten een belangrijke invloed heeft op de circulatie en zoutverdeling, verdient het aanbeveling meer inzicht te verwerven in de grootte van deze coëfficiënten voor prototype-estuaria. (N.B.: deze invloed bleek ook bij de met 2D-model DISTRO uitgevoerde berekeningen: zie [143])

Referenties

1. Preddy, W.S.; 1954.
The mixing and movement of water in the estuary of the Thames.
Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 33 , pp. 645-662.
2. Preddy, W.S. and B. Webber; 1963.
The calculation of Pollution of the Thames estuary by a theory of quantized mixing.
International Journal of Air and Water Pollution, 7 , pp. 829-843.
3. Gameson, A.L.H., H. Hall and W.S. Preddy; 1957.
Effects of heated discharges on the temperature of the Thames estuary.
The Engineer, 204 , pp. 816-819, 850-852, 893-896.
4. Bowden, K.F.; 1963.
The mixing processes in a tidal estuary.
International Journal of Air and Water Pollution, 7 , pp. 343-356.
5. Hunt, J.N.; 1964.
Tidal oscillations in estuaries.
Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 8 , pp. 440-455.
6. Inglis, C.C. and F.H. Allen; 1957.
The regimen of the Thames estuary as effected by currents, salinities, and river flows.
Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 7 , pp. 827-868.

7. Dyer, K.R. and P.A. Taylor; 1973
A simple segmented prism model of tidal mixing in well-mixed estuaries.
Estuarine and Coastal Marine Science, 1 , 411-418.
8. Abbot, M.R.; 1960.
Boundary layer effects in estuaries.
Journal of Marine Research, 18 , pp. 83-100.
9. Abbot, M.R.; 1960.
Salinity effects in estuaries.
Journal of Marine Research, 18 , pp. 101-111.
10. Kendrick, M.P.; 1972.
Siltation problems in relation to the Thames barrier.
Phil. Trans. Royal Soc. London, Series A, 272 , pp. 223-243.
11. Ward, P.H. and W.H. Espey; 1971.
The Thames:
Hoofdstuk VIII "Case studies"
uit: G.H. Ward and W.H. Espey (ed.):
Estuarine Modeling: An assessment.
Washington, Water Quality Office,
Environmental Protection Agency; pp. 311-340.
12. Rossiter, J.R. and G.W. Lennon; 1965.
Computation of tidal conditions in the Thames Estuary by the Initial Value Method.
Proceedings, Institution of Civil Engineer, Vol. 31; pp. 25-56.
13. Odd, N.V.M. and Rosson, C.L.; 1966.
Discussion of Computations of tidal conditions in the Thames by the Initial Value Method.
Proceedings of the Institution of Civil Engineers, London, England, Vol. 34; pp. 51-56.

14. Water Pollution Research Laboratory; 1964.

The effects of Polluting Discharges on the Thames Estuary.

Department of Scientific and Industrial Research.
Water Pollution Research Technical Paper no. 11.
Her Majesty's Stationary Office, London, England.

15. Odd, M.V.M. and Owen, M.W.; 1972.

A two layer model of mud transport in the Thames Estuary.

Proceedings of the Institution of Civil Engineer,
Supplement 1972 (IX), Paper 7517 S; pp. 175-205.

16. Kendrick, M.P. and Derbyshire, B.V.; 1976.

Factors influencing estuary sediment distribution.
Chapter 121 uit:

Proceedings of the fifteenth Coastal Engineering
Conference, 11-17 July 1976, Honolulu, Hawaii; ASCE.

17. Owen, M.W. and Odd, M.V.M.; 1970.

A mathematical model of the effect of a tidal barrier
on siltation in an estuary.

Int. Conf. Utilization Tidal Power,
Atlantic Ind. Res. Inst., Halifax, Nova Scotia.

18. Downing, A.L.; 1971.

Forecasting the effects of Polluting Discharges on
Natural Waters, II.

Int. J. Environmental Studies; 2 , Part II.

19. McDowell, D.M. and B.A. O'Conner; 1977.

Hydraulic Behaviour of Estuaries.
Macmillan Press, London.

20. McGregor, R.C.; 1971.

The influence of topography and pressure gradients on
shoaling in a tidal estuary.

Geo J. Roy. Ast. Soc. 25.

21. Barrett, M.J. and Mollowney, B.M.; 1972.
Pollution problems in relation to the Thames Barrier.
Phil. Trans. Roy. Soc. London A; 272 ,
22. Kendrick, M.P. and Derbyshire, B.V.; 1977.
Effects of a barrier on existing estuary regime.
Uit: "Thames barrier design".
Proc. of the conference held in London on oct. 1977.
The Institution of coastal Engineers, London, 1978.
23. Officer, C.B.; 1976.
Physical Oceanography of Estuaries (and associated
Coastal Waters).
John Wiley & Sons; New York.
24. Odd, M.V.M. and Owen, M.W.; 1972.
The simulation of Mud Transport in Estuaries.
Uit: A.L.H. Gameson (ed.):
Mathematical and Hydraulic Modelling of Estuary
Pollution.
Water Pollution Research; Technical paper no. 13.
25. Rossiter, J.R. and Lennon, G.W.; 1968.
An intensive analysis of shallow water tides.
Geophys. J.R. Ast. Soc. 16 , pp. 275-293.
26. Bowden, K.F.; 1947.
Some observations of waves and other fluctuations in
a tidal current.
Proc. of the Royal Soc. of London, A 192, pp. 403-425.
27. Bowden, K.F. and J. Proudman; 1949.
Observations in the turbulent fluctuations of a tidal
current.
Proceedings of the Royal Society of London, A 199 ,
pp. 311-327.

28. Bowden, K.F. and Fairbairn; 1952.

Further observations of the turbulent fluctuations in a tidal current.

Philosophical Transactions of the Roy. Soc. of London, A 244, pp. 334-356.

29. Bowden, K.F. and Howe, M.R.; 1963.

Observations of turbulence in a tidal current.

Journal of Fluid Mechanics, 17, 271-284.

30. Hughes, P.; 1958.

Tidal mixing in the Narrows of the Mersey estuary.

Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 1, pp. 271-283.

31. Bowden, K.F.; 1960.

Circulation and mixing in the Mersey estuary.

Proceedings of the Int. Ass. of Scientific Hydrology, 51, pp. 352-360.

32. Bowden, K.F.; 1963.

The mixing processes in a tidal estuary.

Proceedings of the First International Conference and Water Pollution Research.

in: Advances in Water Pollution Research, Vol. 3, Pelgamon Press, London, pp. 329-346.

33. Bowden, K.F. and S.H. Sharaf El Din; 1966.

Circulation, salinity and river discharge of the Mersey estuary.

Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 10, pp. 383-399.

34. Bowden, K.F. and S.H. Sharaf El Din; 1966.

Circulation and mixing processes in the Liverpool Bay area of the Irish Sea.

Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 11, pp. 279-292.

35. Bowden, K.F. and Gilligan, R.M.; 1971.

Characteristic features of estuarine circulation as represented in the Mersey estuary.

Limnology and Oceanography, 16 , pp. 490-502.

36. Price, W.A. and Kendrick, M.P.; 1963.

Field and model investigation into the reasons for siltation in the Mersey estuary.

Proc. of the Institution of Civil Engineers, 24 , pp. 473-518.

37. Agar, M and McDowell, D.M.; 1971.

The sea approaches to the port of Liverpool.

Proc. Inst. Civil Eng., 49 , June (1971).

38. Halliwell, A.R.; 1972.

Discussion on ref. 37.

Proc. Inst. Civil Eng., 51 , March (1972)

39. Ramster, J.W.; 1972.

Out of sight, out of mind.

Appendix 6, Vol. 2,

Dept. of the Environment, HMSO, London.

40. Heaps, N.S.; 1972.

Estimation of density currents in the Liverpool Bay area of the Irish Sea.

Geo. J. Roy. Astr. Soc., 30.

41. O'Connor, B.A.; 1968.

Discussion on Session B.

Dredging Symposium,

Proc. Inst. Civ. Eng., London.

42. McDowell, D.M. and O'Connor, B.A.; 1977.

Hydraulic Behaviour of Estuaries.

Macmillan.

43. Dyer, K.R.; 1973.
Estuaries: A Physical Introduction.
44. Halliwell, A.R. and O'Connor, B.A.; 1966.
Suspended sediment in a tidal estuary.
Proc. of the tenth Conference on Coastal Engineering;
Tokyo.
Am. Soc. Civil Eng.; pp. 687-706
45. Halliwell, A.R. and O'Dell, M.; 1969.
Differences in silt patterns across an estuary.
The Dock and Harbour Auth., 50, 1969, no. 585, July,
pp. 125-129.
46. Price, W.A. and Kendrick, M.P.; 1968.
Dredging and Siltation - cause and effect.
Dredging Symposium.
Proc. Inst. Civ. Eng.; London, 1968; pp. 31-36.

100. Fischer, H.B. and Holley, E.R.; 1971.
Analysis of the use of distorted hydraulic models for dispersion studies.
Water Resour. Res., 7 , pp. 46-51.
101. Fischer, H.B. and Hanamura, T.; 1975.
The effect of roughness strips on transverse mixing in hydraulic models.
Water Resour. Res., 2 , pp. 362-364.
102. Dronkers, J.J.; 1964.
Tidal computation in Rivers and Coastal Waters.
North Holland Publ., Amsterdam.
103. Dronkers, J.J.; 1969.
Tidal computations for rivers, coastal areas and seas.
J. Hydraul. Div., Proc. A.S.C.E., 95 , (HY 1), pp. 29-77.
104. Dronkers, J.J.; 1975.
Tidal theory and computations.
Adv. Hydrosoci. 10 , pp. 145-230.
105. Hinwood, J.B. and Wallis, I.G.; 1975.
Classification of models of tidal waters.
J. Hydraul. Div.; Proc. A.S.C.E.,
Vol. 101, no. HY10, pp. 1315-1331 en
Vol. 101, no. HY11, pp. 1405-1421.
106. Bowden, K.F. en Hamilton, P.; 1975.
Some experiments with a numerical model of circulation and mixing in a tidal estuary.
Estuarine and Coastal Marine Science 3 , pp. 281-301.
107. Fischer, H.B.; 1976.
Mixing and dispersion in Estuaries.
Ann. Rev. Fluid Mech., 8 , pp. 107-133.

108. Waterloopkundig Laboratorium en Rijkswaterstaat, Deltadienst, Hoofdafdeling Waterloopkunde; 1978
"Getijonderzoek: Projectenbeschrijving", M896-40,
F 7734 D00; november 1978.
109. Simmons, H.B.; 1955.
Some effects of upland discharge on estuarine hydraulics.
Proceedings of the American Society of Civil Engineers,
81 , 792, pp. 1-20.
110. Ippen, A.T. and Harleman, D.R.F.; 1961.
One-dimensional analysis of salinity intrusion in estuaries.
Techn. Bull. 5, Comm. Tidal Hydraul., Corps of Engineers, U.S. Army, Vicksburg, Mississippi.
111. Harleman, D.R.F. and Abraham, G.; 1966.
One-dimensional analysis of salinity intrusion in the Rotterdam Waterway.
Delft Hydraulics Laboratory Publication 44.
112. Pritchard, D.W.; 1955.
Estuarine circulation patterns.
Proc. Amer. Soc. Civil Eng., 81 , no. 717.
113. Ellison, T.H. and Turner, J.S.; 1960.
Mixing of dense fluid in a turbulent pipe flow.
J. Fluid Mech., 6 , pp. 423-448.
114. Fisher, H.B.; 1972.
Mass transport mechanisms in partially stratified estuaries.
J. Fluid Mech.. 53, pp. 671-687.
115. Rattray, M. and Hansen, D.V.; 1962.
A similarity solution for circulation in an estuary.
Journ. of Marine Research, 20 , pp. 121-133.

116. Hansen, D.V. and Rattray, M.; 1965.
Gravitational circulation in estuaries.
Journ. of Marine Research, 23 , pp. 104-122.
117. Hansen, D.V. and Rattray, M.; 1966.
New dimensions in estuary classification.
Limnol. Oceanogr., 11 , pp. 319-326.
118. Fischer, H.B.; 1976.
Mixing and dispersion in estuaries.
Ann. Review of Fluid Mech. 8 , pp. 107-133
119. Waterloopkundig Laboratorium; 1974.
Systematisch onderzoek variaties randvoorwaarde en
stromingscondities.
Rapport M896-10.
120. Waterloopkundig Laboratorium; 1971.
Dimensieanalyse zoutindringing-systematisch onderzoek.
Rapport M896-15.
121. Rigter, B.P.; 1973.
Minimum length of salt intrusion in estuaries.
J. Hydraul. Div. Proc.; Am. Soc. Civ. Eng., 99 ,
pp. 1475-1496.
122. Fischer, H.B.; 1974.
Discussion of "Minimum length of salt intrusion in
estuaries" by Ben P. Rigter.
J. Hydraul. Div. Proc.; A.S.C.E., 100 , pp. 708-712.
123. Waterloopkundig Laboratorium; 1977.
Havenonderzoek: onderzoek naar de invloed van een
haven op de zouttoestand op de rivier en naar de uit-
wisseling tussen haven en rivier.
Rapport M896-36.

124. Pritchard, D.W.; 1954.
A study of the salt balance in a coastal plain estuary.
Journ. of Marine Research, 13 , pp. 133-144.
125. Pritchard, D.W.; 1956.
The dynamic structure of a coastal plain estuary.
Journ. of Marine Research, 15 , pp. 33-42.
126. Dyer, K.R.; 1974.
The salt balance in stratified estuaries.
Estuarine Coastal Mar. Sci.; 2 , pp. 273-281.
127. Allen, F.H. and Price, W.A.; 1959.
Density currents and siltation in docks and tidal basins.
Dock and Harbour Authority, 40, pp. 72-76.
128. Dyer, K.R.; 1977.
Lateral circulation effects in estuaries.
In: Estuaries, geophysics and the environment,
pp. 22-29; National Academy of Sciences, Washington.
129. Okubo, A.; 1973.
Effect of shoreline irregularities on streamrise dispersion in estuaries and other embayments.
Netherlands Journal of Sea Research, 6 , pp. 213-224.
130. Bowden, K.F.; 1978.
Mixing processes in estuaries.
In: Estuarine Transport Processes,
B. Kjerfje (ed.); University of South Carolina Press,
Columbia, pp. 11-36.

131. Postma, H.; 1967.
Sediment transport and sedimentation in the estuarine environment.
In: Estuaries, G.H. Lauf (ed.), pp. 158-179, Amer. Assoc. Advanc. Sci., Publ. 83, Washington.
132. Partheniades, E.; 1962.
A study of erosion and deposition of cohesive soils in salt water.
Ph. D. Thesis, University of California.
133. Queen, M.W.; 1971.
The effect of turbulence on the settling velocity of silt flocs.
Int. Ass. Hydraul. Res. Conf., Paris, 1971, Vol. 4; pp. 27-32.
134. Krone, R.B.; 1963.
A study of the rheological properties of estuarial sediments.
SERL report no. 63-8; University of California, Berkeley, 1963.
135. Owen, M.W.; 1977.
Problems in modeling of transport, erosion and deposition of cohesive sediments.
In: The Sea, Vol. 6, Marine Modeling, ed.: E.D. Goldberg, I.N. McCave, J.J. O'Brian and J.H. Steel, pp. 515-537; John Wiley, New York.
136. Pritchard, D.W.; 1967.
Observations of circulation in coastal plain estuaries.
in: Estuaries (ed. G.H. Lauff), Amer. Ass. for the Advancement of Science, Washington D.C., Publ. no. 85, pp. 37-44.

137. Pritchard, D.W.; 1952.
Estuarine hydrography.
Advancer in Geophysics, 1 , 243-280.
138. Bowden, K.F.; 1967.
Circulation and diffusion.
In: Estuaries (G.H. Lauff, ed.), Amer. Ass. for the
Advancement of Science, Washington D.C., Publ. no.
85, pp. 15-36.
139. Wallingford, Hydraulics Research Station; 1956.
Hydraulics Research 1955.
140. Wallingford, Hydraulics Research Station; 1958.
Hydraulics Research 1957.
141. Thatcher, M.L., Harleman, D.R.F.; 1972.
A mathematical model for the prediction of unsteady
salinity intrusion in estuaries. R.M. Parsons Laboratory
Rep. No. 144, Massachusetts Institute of Technology,
Cambridge, Massachusetts.
142. Munk, W.H., Anderson, E.R.; 1948.
Notes on the theory of the thermocline.
J. of Marine Res. , vol. 1, pp. 276-295.
143. Waterloopkundig Laboratorium; 1980.
Computations of density currents in estuaries;
calibration for inhomogeneous flow in a tidal flume;
report and mathematical investigation; R897 part. VI
144. Dyer, K.R., 1978.
The balance of suspended sediment in the Gironde and
Thames Estuaries.
In: Estuarine Transport Processes,
B. Kjerfve (ed.); University of South Carolina Press,
pp. 135-145.

Appendix A.Klassifikatie naar stratifikatie en circulatie (stratifikatie-circulatie diagram)

Een methode om de estuaria niet alleen te klassificeren naar de stratifikatie, maar ook naar de in het estuarium door dichtheidsverschillen optredende circulatiestromen wordt gepresenteerd door Hansen en Rattray [117].

Uitgangspunt is hierbij een analytische studie van de verticale zout- en snelheidsverdeling ([115], [116]), welke hieronder in het kort zal worden weergegeven.

Uitgaande van een rechthoekig estuarium dat voldoende smal is, opdat het als lateraal homogeen kan worden opgevat, gelden getijgemiddeld de volgende vergelijkingen:

$$\text{bewegingsvergelijkingen} \quad : \quad \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(N_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (3.1)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = g \quad (3.2)$$

$$\text{continuïteitsvergelijking} \quad : \quad \frac{\partial}{\partial x} (bu) + \frac{\partial}{\partial z} (bw) = 0 \quad (3.3)$$

$$\text{zoutbalansvergelijking} \quad : \quad b \left(u \frac{\partial S}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(bK_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(bK_z \frac{\partial S}{\partial z} \right) \quad (3.4)$$

$$\text{toestandsvergelijking} \quad : \quad \rho = \rho_f (1 + k S) \quad (3.5)$$

, met : N_z = verticale uitwisselingscoëfficiënt van impuls
 K_x = longitudinale uitwisselingscoëfficiënt van stof
 K_z = verticale uitwisselingscoëfficiënt van stof

Om de wiskundige bewerkingen niet te ingewikkeld te doen zijn wordt verder aangenomen:

b = breedte = konstant

h = waterdiepte = konstant

Q_f = rivierafvoer = konstant

N_z , K_x en K_z zijn onafhankelijk van de diepte

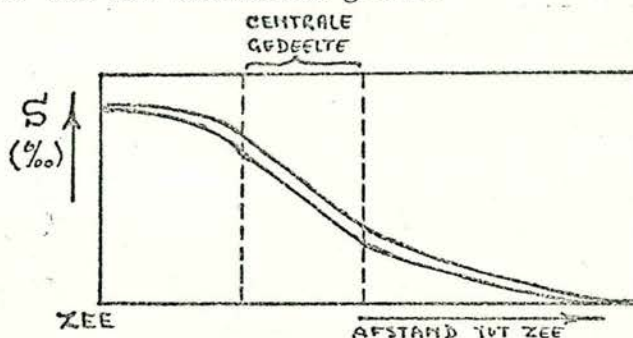
Verder worden de volgende dimensieloze coördinaten ingevoerd:

$$\eta = \frac{z}{h} \quad (3.6)$$

$$\xi = \frac{Q_f \cdot x}{b \cdot h \cdot K_{x0}} \quad (3.7)$$

In het centrale gedeelte van het estuarium geldt:

$$\frac{\partial S}{\partial x} = \text{konstant}$$



Voor de uitwisselingscoëfficiënten geldt dan:

$$N_z = \text{konstant}$$

$$K_z = \text{konstant}$$

$$K_x \text{ varieert langs estuarium: } \frac{dK_x}{dx} = u_f = \frac{Q_f}{b \cdot h} \quad (3.9)$$

Met behulp van gelijkvormigheidsrelaties, waarvan de vorm geïnspireerd is door de in estuaria waargenomen zoutverdelingen, worden de gekoppelde partiële differentiaalvergelijkingen omgezet in gewone differentiaalvergelijkingen.

De verkregen vergelijkingen worden dan gekarakteriseerd door drie dimensieloze parameters:

$$T = \frac{b \cdot h^2}{N_z} \cdot \frac{\tau_w}{Q_f} \quad \text{dimensieloze schuifspanning t.g.v. wind} \quad (3.10)$$

$$Ra = \frac{g \cdot k \cdot S_o \cdot h^3}{N_z \cdot K_{x0}} \quad \text{estuarium analogon van Rayleigh getal (een maat voor de gravitatie-circulatie)} \quad (3.11)$$

$$M = \frac{K_z \cdot K_{x0} \cdot b^2}{Q_f^2} \quad \text{een verhouding tussen menging t.g.v. getijwerking en rivierafvoer} \quad (3.12)$$

, met S_o = tijdsgemiddelde zoutgehalte t.p.v. $x = 0$.

De oplossingen voor de verticale snelheids- en zoutverdeling luiden als volgt:

$$\frac{u}{u_f} = - \frac{d\phi}{d\eta} \quad (3.13)$$

$$\frac{S}{S_0} = 1 + v\xi + \frac{v}{M} \left[(\eta - \frac{1}{2}) - \frac{1}{2}(\eta^2 - \frac{1}{3}) - \int_0^\eta \phi d\eta + \int_0^1 \int_0^\eta \phi d\eta^1 d\eta \right] \quad (3.14)$$

, waarbij voor de stroomfunctie ϕ van de circulatiestromen geldt:

$$\phi(\eta) = \frac{1}{2} (2 - 3\eta + \eta^3) - \frac{T}{4} (\eta - 2\eta^2 + \eta^3) - \frac{vRa}{48} (\eta - 3\eta^3 + 2\eta^4) \quad (3.15)$$

stroomfunctie	rivieraaf-	schuifspan-	gravitatiecirculatie
voor de circu-	voer	ning t.g.v.	(Rayleigh getal)
latiestromen		wind	

Alleen de rivieraafvoer draagt bij aan het netto water transport.

v is een konstante, die aangeeft welk gedeelte van het stroomopwaartse zouttransport niet tengevolge van gravitatiecirculatie plaatsvindt (zgn. "diffusive fraction").

M.b.v. deze formule is in fig. 3-1^a het snelheidsprofiel weergegeven voor de situatie zonder wind voor diverse waarden van vRa . Naarmate vRa groter is, is de invloed van gravitatiecirculatie duidelijker te zien. Een stroming in twee richtingen treedt op voor $vRa > 30$. Het hierbij horende zoutprofiel, dat zowel van vRa als van $\frac{M}{v}$ afhangt, staat weergegeven in fig. 3-1^b. De stratifikatie neemt toe met vRa , maar is ook evenredig met $\frac{v}{M}$.

De waarde van v is te bepalen uit:

$$1680 M(1-v) = (32+10T+T^2) v + (76+14T) \frac{Ra}{48} v^2 + \frac{152}{3} \left(\frac{Ra}{48}\right)^2 v^3$$

Voor situaties zonder wind is in fig. 3-1^e de oplossing van deze vergelijking weergegeven. Tevens zijn in deze figuur waarden geplot voor de Mersey Narrows, de James River en de Columbia River.

In fig. 3-1^{a,b} zijn ook waarnemingen van de James River geplot. Hieruit volgen waarden voor νRa en $\frac{M}{\nu}$ van ca. 750 en 8. Voor de waarde $\nu Ra = 750$ zijn in fig. 3-1^{c,d} de berekende snelheids- en zoutprofielen getekend, bij verschillende schuifspanningen t.g.v. wind. (Voor de James River komt $\tau = 40$ overeen met een schuifspanning $\tau_w \approx 0,01$ Pa, hetgeen een betrekkelijk kleine schuifspanning t.g.v. wind is).

De bepaling van de horizontale en verticale uitwisselingscoëfficiënten uit de verticale zout- en snelheidsverdelingen en horizontale zoutgradiënt wordt als volgt voorgesteld:

1. plot de meetresultaten in fig. 3-1^{a,b} en bepaal daaruit de meest waarschijnlijke waarden voor νRa en $\frac{M}{\nu}$
2. bereken ν m.b.v. de formule

$$\nu = 1 - \frac{32 + 10T + T^2 + (76+14T) \frac{\nu Ra}{48} + \frac{152}{3} \left(\frac{\nu Ra}{48} \right)^2}{1680 \frac{M}{\nu}}$$

(voor situatie zonder wind: $T = 0$).

3. bepaal K_x :

$$K_{x0} = \frac{\nu u_f}{S_0 \frac{\partial S}{\partial x}} \longrightarrow K_x = K_{x0} + u_f \cdot x$$

4. de waarden van K_z en N_z volgen uit:

$$N_z = \frac{g k S_0 h^3}{K_{x0} Ra}$$

$$K_z = \frac{M \cdot Q_f^2}{K_{x0} \cdot b^2}$$

Voor de James River en de Mersey Narrows zijn in onderstaande tabel de aldus bepaalde waarden verzameld: (uit [116]):

	νRa	$\frac{M}{\nu}$	ν	N_z (cm ² /s)	K_z (cm ² /s)	K_{x0} (m ² /s)
James River	750	8	0,1	2,5	1	24
Mersey Narrows	3000	270	0,5	30	12	100

Om grote onnauwkeurigheden te voorkomen wordt in [116] als toepassingsgebied aangegeven:

voor bepaling N_z, K_z : $vRa > 30$

voor bepaling K_x : $v > 0,1$

De karakteristieken van het analytische model worden in [177] uitgedrukt in twee dimensieloze parameters:

$$\text{circulatieparameter} \quad \boxed{\frac{u_s}{u_f}} = \frac{\text{netto snelheid aan oppervlak}}{\text{gemiddelde snelheid t.g.v. rivierafvoer}}$$

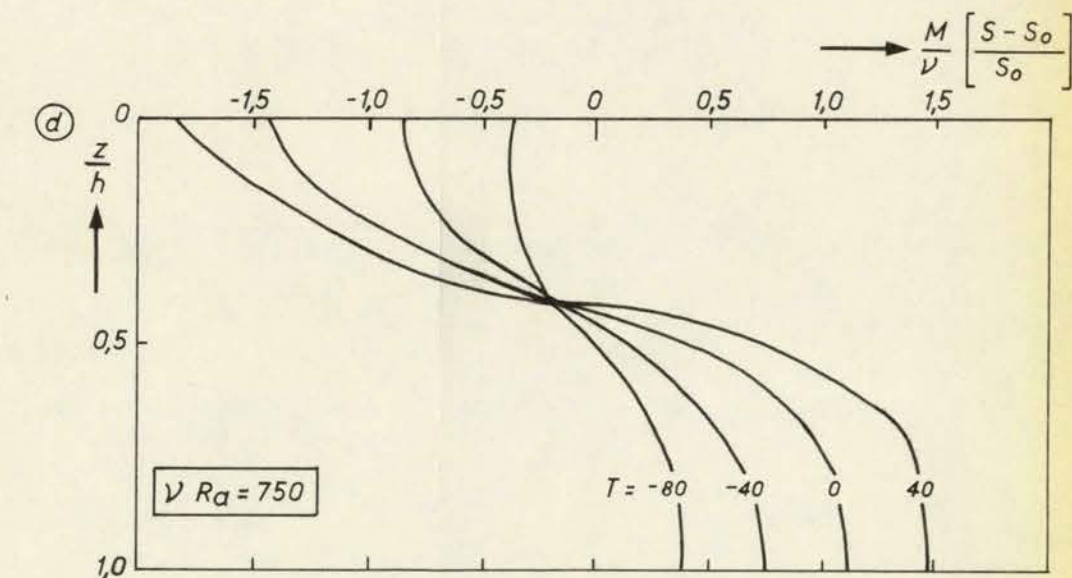
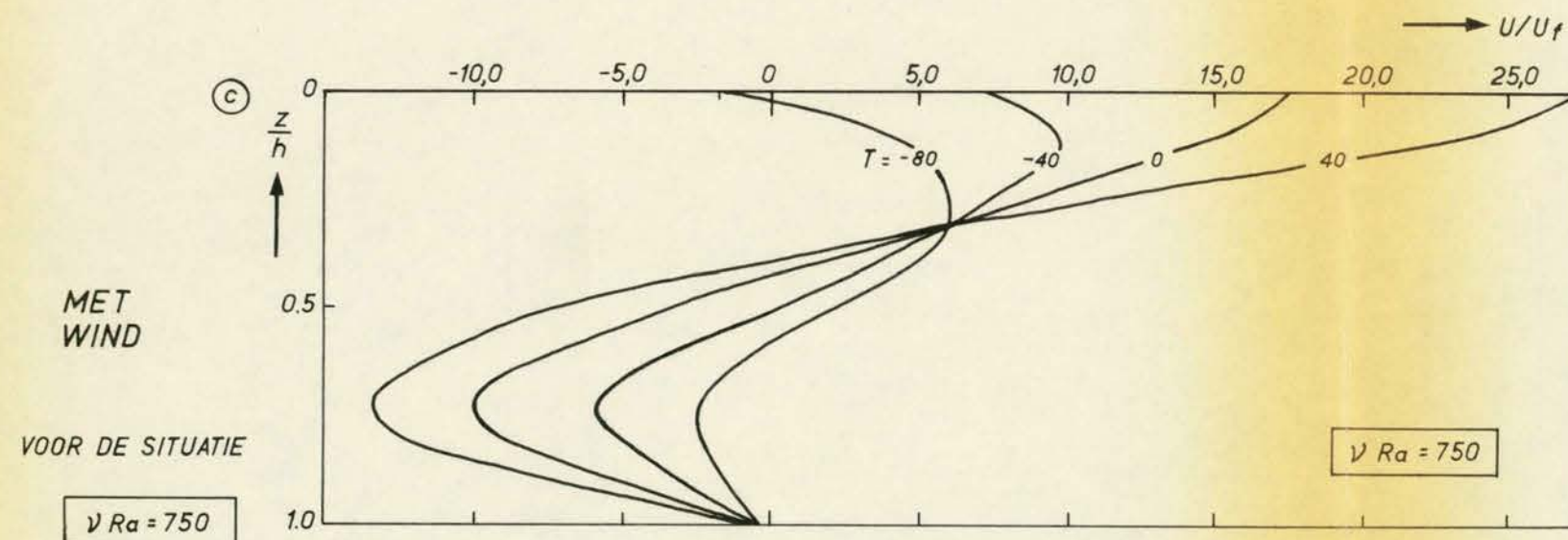
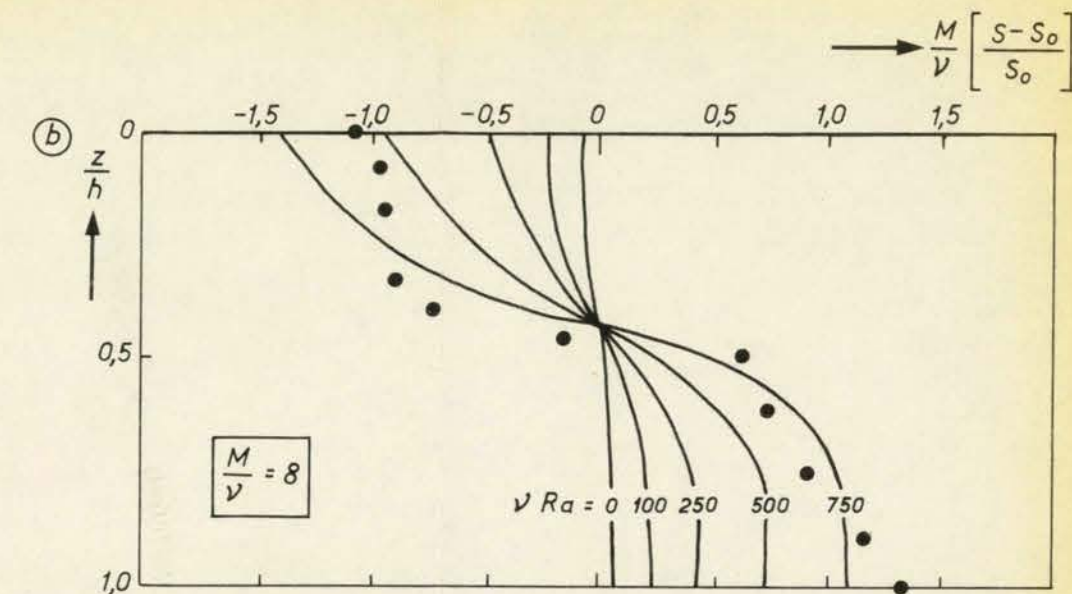
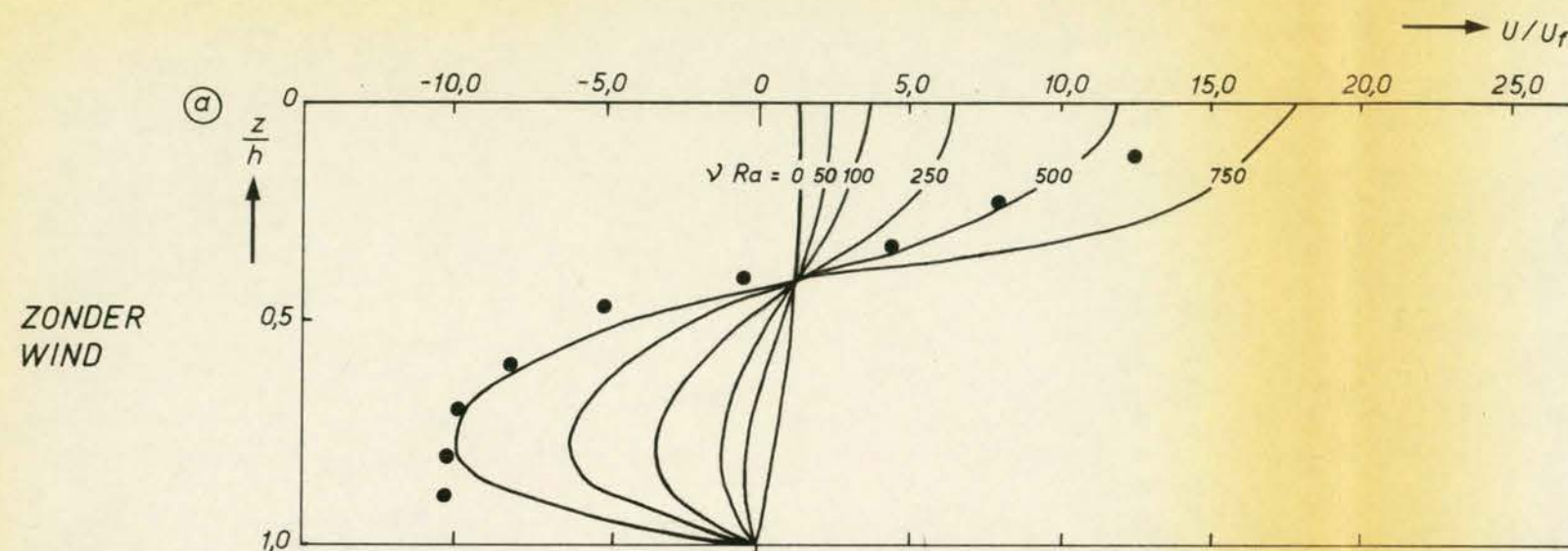
$$\text{stratifikatieparameter} \quad \boxed{\frac{\delta S}{S_o}} = \frac{\text{verschil in zoutgehalte tussen oppervlak en bodem}}{\text{gemiddelde zoutgehalte}}$$

In fig. 3-2^a zijn de waarden van v weergegeven als functie van deze twee parameters. Een probleem is vaak de netto snelheid u_s aan het oppervlak te meten.

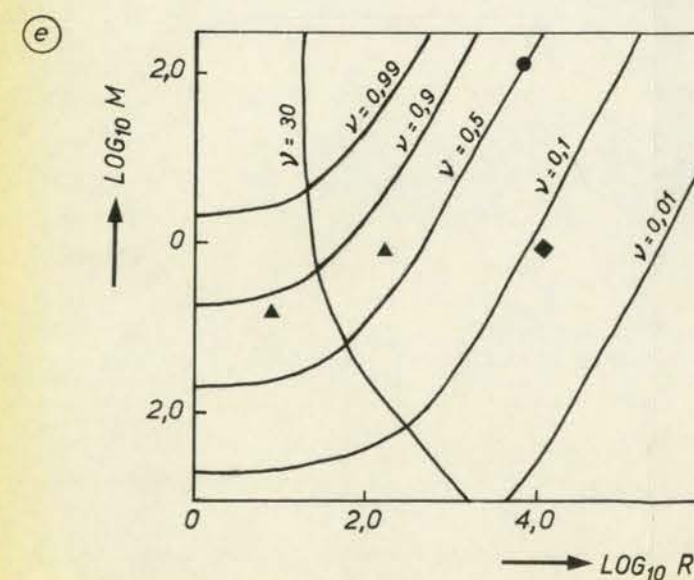
Voor een verdere beschrijving van het aldus ontstane stratifikatie-circulatie diagram wordt verwezen naar hoofdstuk 3 (blz. 3-5 e.v.).

VERTIKALE SNELHEIDSVERDELING

VERTIKALE ZOUTVERDELING



• = GEMETEN WAARDE VOOR THAMES RIVIER



OPLOSSEN ν VOLGENS FORMULE (3.16)
VOOR DE SITUATIE ZONDER WIND ($T=0$)

- MERSEY NARROWS
- ◆ THAMES RIVER ESTUARY
- ▲ COLUMBIA RIVER ESTUARY

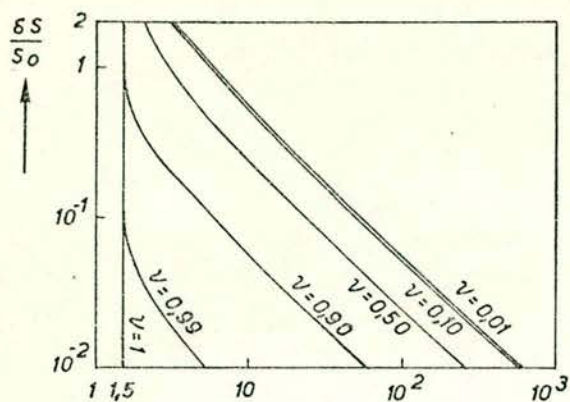
RESULTATEN BEREKENINGSMETHODE HANSEN EN RATTRAY
SNELHEIDS- EN ZOUTPROFIELEN

A3

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

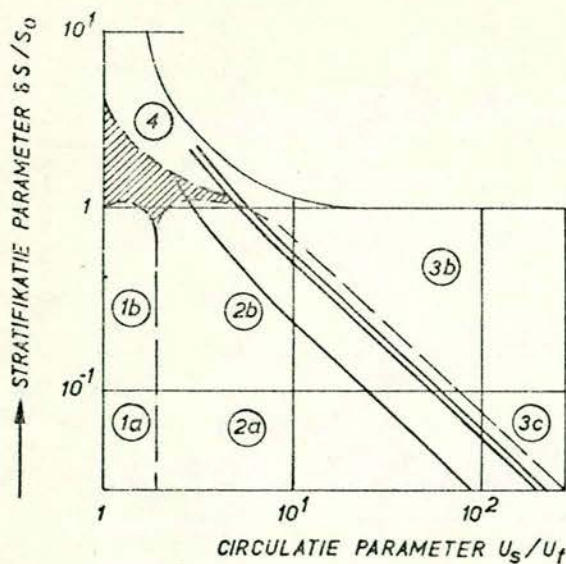
M896-2941

FIG.3-1



ν = GEDEELTE VAN STROOMOPWAARTSE
ZOUTTRANSPORT, DAT NIET DOOR
GRAVITATIECIRCULATIE WORDT
VEROORZAAKT

(a) ν ALS FUNKTIE VAN DE STRATIFIKATIE
EN DE CIRCULATIE VOOR EEN
RECHTHOEKIG KANAAL



δS = GEMIDDELDE VERSCHIL IN ZOUTGEHALTE
TUSSEN OPPERVLAKE EN BODEM

S_0 = GEMIDDELDE ZOUTGEHALTE
OVER DE DOORSNEDE

U_s = GEMIDDELDE ZEEWAARTSE
SNELHEID AAN HET OPPERVLAKE

U_f = GEMIDDELDE SNELHEID t.g.v.
BOVENAFVOER

(b) ESTUARIA KLASSEFIKATIE VOLGENS HET
STRATIFIKATIE -CIRCULATIEDIAGRAM
VAN HANSEN EN RATTRAY

UIT : [117]

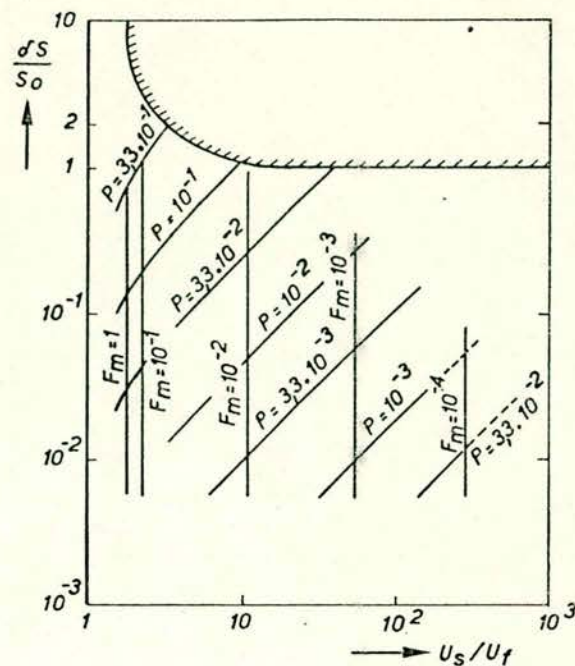
STRATIFIKATIE -CIRCULATIE DIAGRAM
 ν - WAARDEN EN KLASSEFIKATIE

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M896- 2942

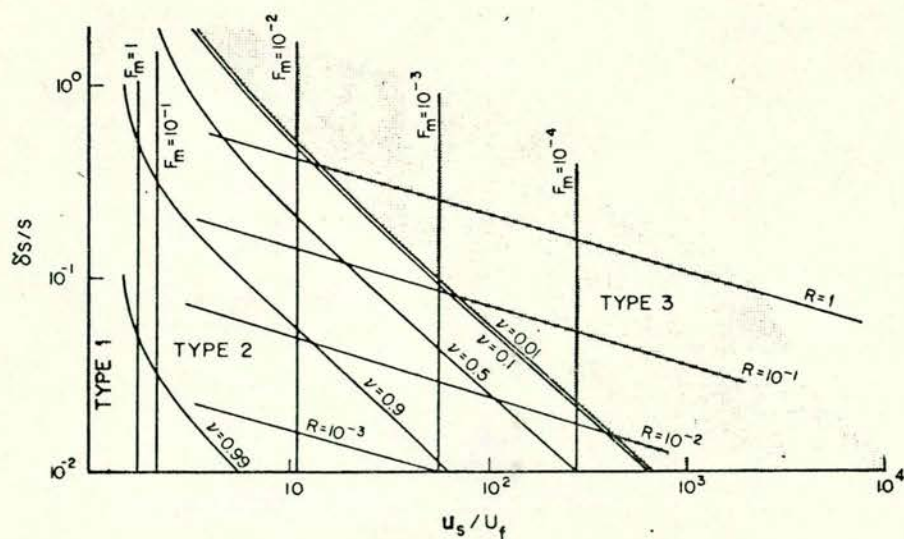
FIG.3-2

A4



a. STRATIFICATIE - CIRCULATIEDIAGRAM
MET LUNEN VAN KONSTANTE F_m EN P

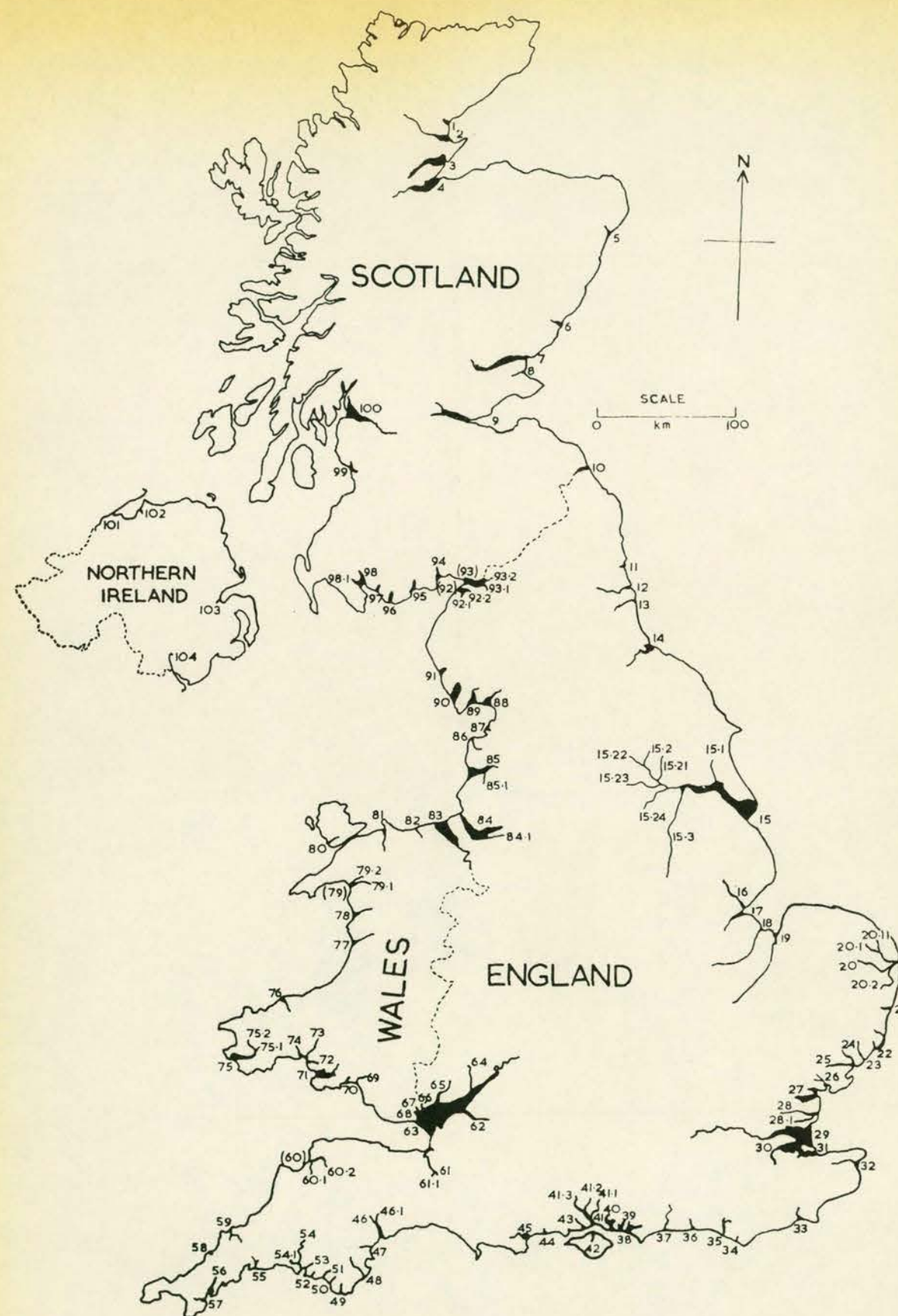
UIT : [117]



b. STRATIFICATIE - CIRCULATIEDIAGRAM
MET LUNEN VAN KONSTANTE F_m EN R_{IE}

UIT : [107]

STRATIFIKATIE- CIRCULATIE DIAGRAM,
MET LUNEN VAN KONSTANTE P, F_m EN R_{IE}



Estuaries of the United Kingdom

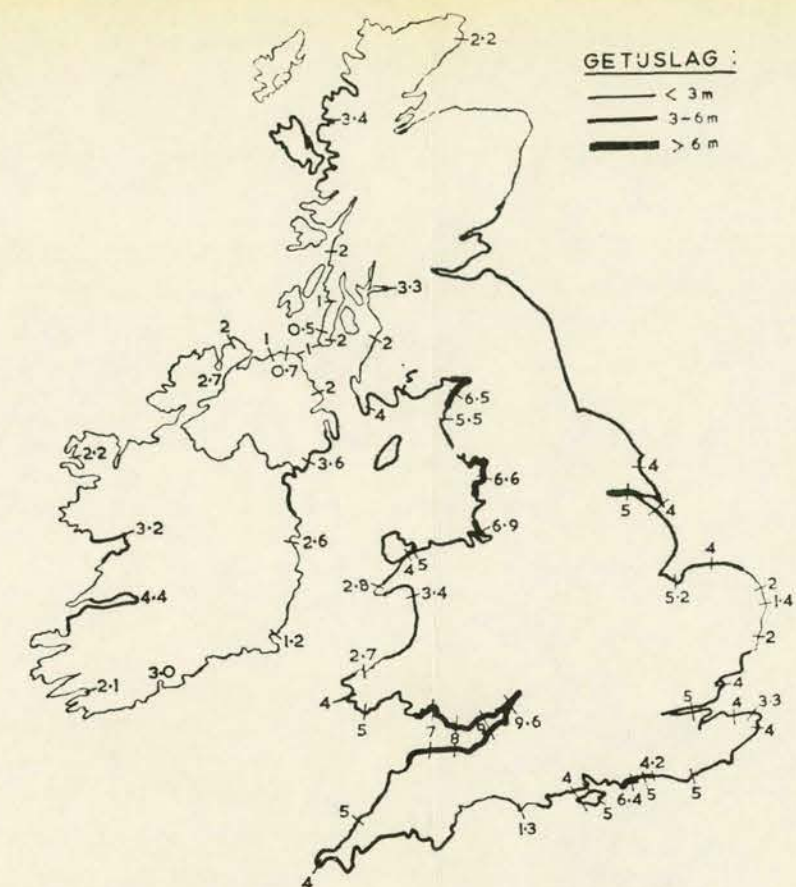
OVERZICHT ENGELSE ESTUARIA

A3

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M896-2943

FIG.5-0



GETUSLAG :

< 3 m
3-6 m
> 6 m

Scotland

- 1 Loch Fleet
- 2 Dornoch Firth
- 3 Cromarty Firth
- 4 Beaully & Inverness Firths
- 5 R. Ythan
- 6 South Esk
- 7 Firth of Tay
- 7.1 R. Earn
- 8 R. Eden
- 9 R. Forth
- 9.1 R. Carron

England

- 10 R. Tweed
- 11 R. Blyth
- 12 R. Tyne
- 13 R. Wear
- 14 R. Tees
- 15 R. Humber
- 15.1 R. Hull
- 15.2 R. Ouse
- 15.2.1 R. Derwent
- 15.2.2 R. Wharfe
- 15.2.3 R. Aire
- 15.2.4 R. Don
- 15.3 R. Trent
- 16 R. Witham
- 17 R. Welland
- 18 R. Nene
- 19 Great Ouse
- 20 R. Yare
- 20.1 R. Bure
- 20.1.1 R. Ant
- 20.2 R. Waveney
- 21 R. Blyth
- 22 R. Alde

- 23 R. Deben
- 24 R. Orwell
- 25 R. Stour
- 26 R. Colne
- 27 R. Blackwater
- 28 R. Crouch
- 28.1 R. Roach
- 29 R. Thames
- 30 R. Medway
- 31 R. Swale
- 32 R. Stour
- 33 R. Rother
- 34 R. Cuckmere
- 35 R. Ouse
- 35.1 Glynde Reach
- 36 R. Adur
- 37 R. Arun
- 38 Chichester Harbour
- 39 Langstone Harbour
- 40 Portsmouth Harbour
- 41 Southampton Water
- 41.1 R. Hamble
- 41.2 R. Itchen
- 41.3 R. Test
- 42 R. Medina
- 43 R. Beaulieu
- 44 Christchurch Harbour
- 45 Poole Harbour
- 46 R. Exe
- 46.1 R. Clyst
- 47 R. Teign
- 48 R. Dart
- 49 Kingsbridge Estuary
- 50 R. Avon

- 51 R. Erme
- 52 R. Yealm
- 53 R. Plym
- 54 R. Tamar
- 54.1 R. Lynher
- 55 R. Fowey
- 56 R. Fal
- 56.1 R. Porthcuel
- 57 R. Helford
- 58 R. Gannel
- 59 R. Camel
- 60.1 R. Torridge
- 60.2 R. Taw
- 61 R. Parrett
- 61.1 R. Tone
- 62 R. Avon
- 63 R. Severn
- 64 R. Wye
- 65 R. Usk

Wales

- 66 R. Rhymney
- 67 R. Taff
- 68 R. Ely
- 69 R. Neath
- 70 R. Tawe
- 71 R. Loughor
- 72 R. Gwendraeth
- 73 R. Towy
- 74 R. Taf
- 75 Milford Haven
- 75.1 E. Cleddau
- 75.2 W. Cleddau
- 76 R. Teifi
- 77 R. Dovey
- 78 R. Mawddach
- 79.1 R. Dwyrdd
- 79.2 R. Glaslyn

- 80 R. Cefny
- 81 R. Conway
- 82 R. Clwyd
- 83 R. Dee

England

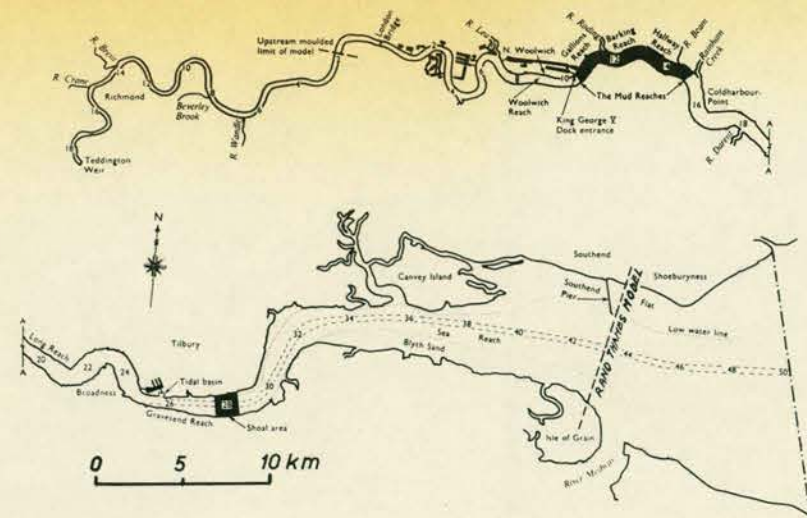
- 84 R. Mersey
- 84.1 Manchester Ship Canal
- 85 R. Ribble
- 85.1 R. Douglas
- 86 R. Wyre
- 87 R. Lune
- 88 R. Kent
- 89 R. Leven
- 90 R. Duddon
- 91 R. Esk
- 92.1 R. Waver
- 92.2 R. Wampool
- 93.1 R. Eden
- 93.2 R. Esk

Scotland

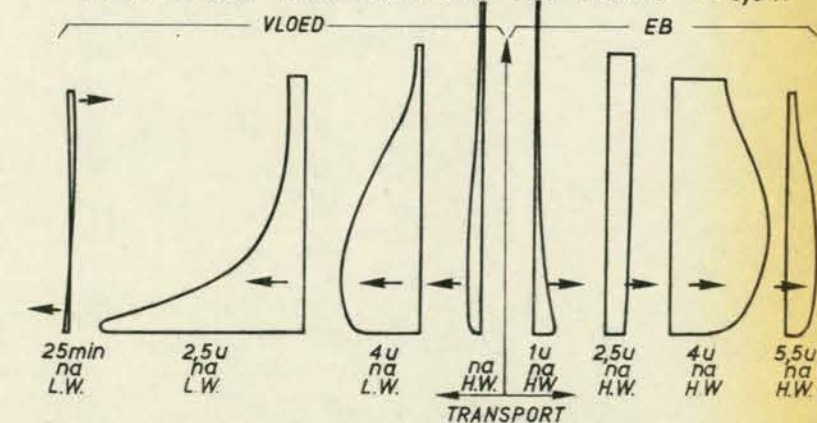
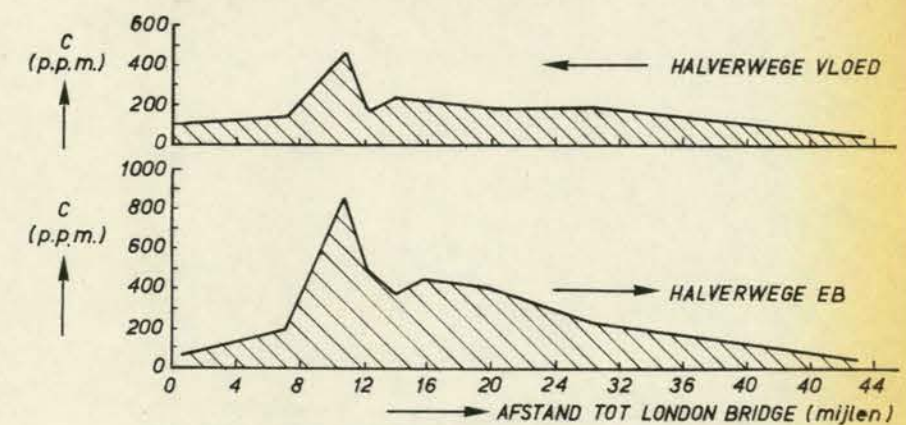
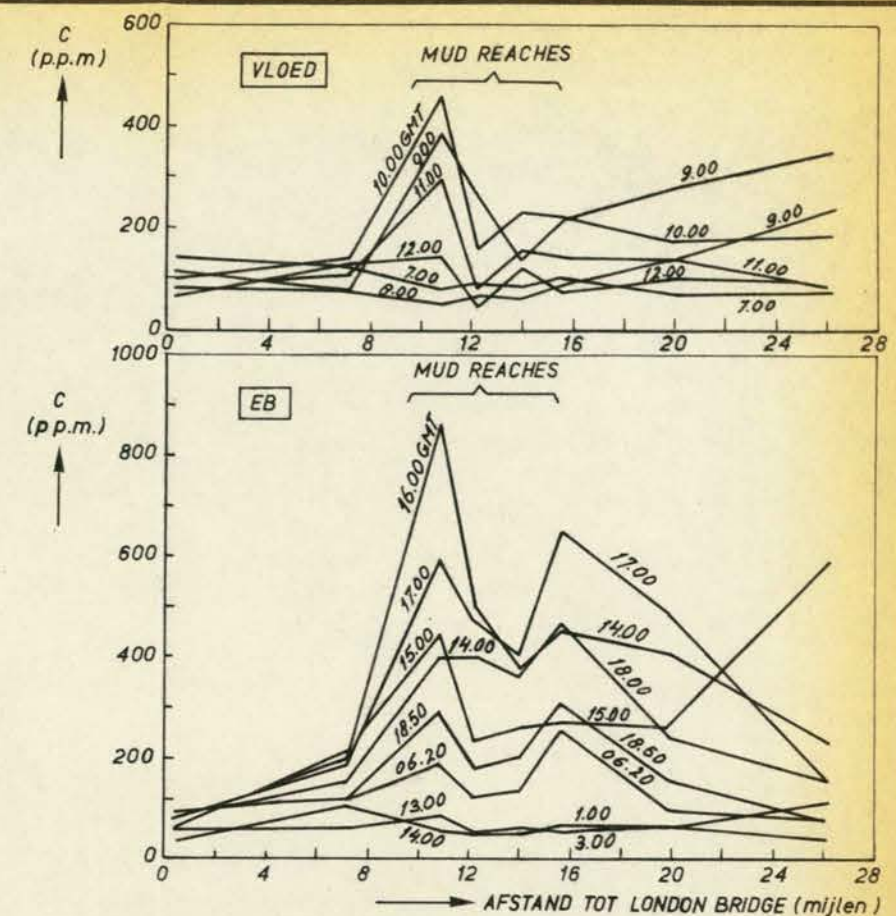
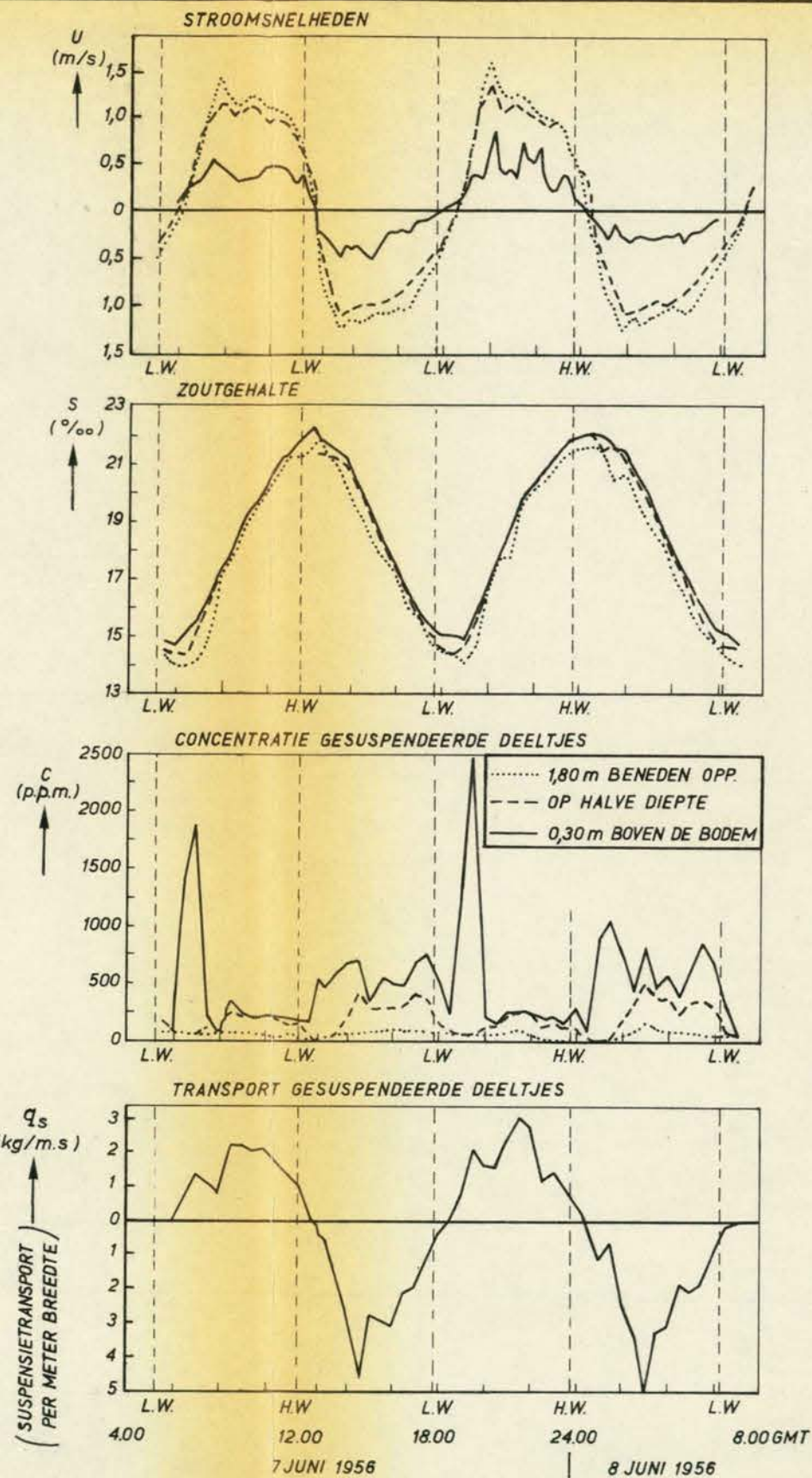
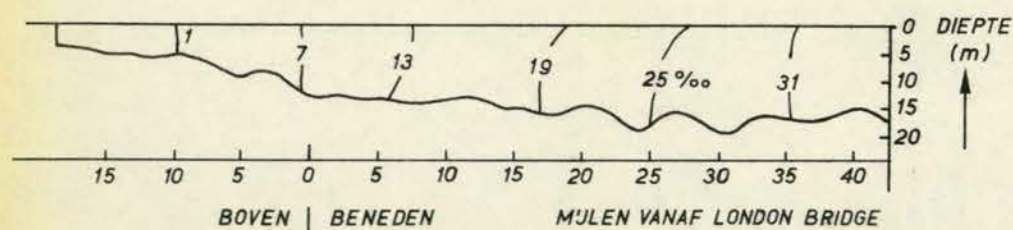
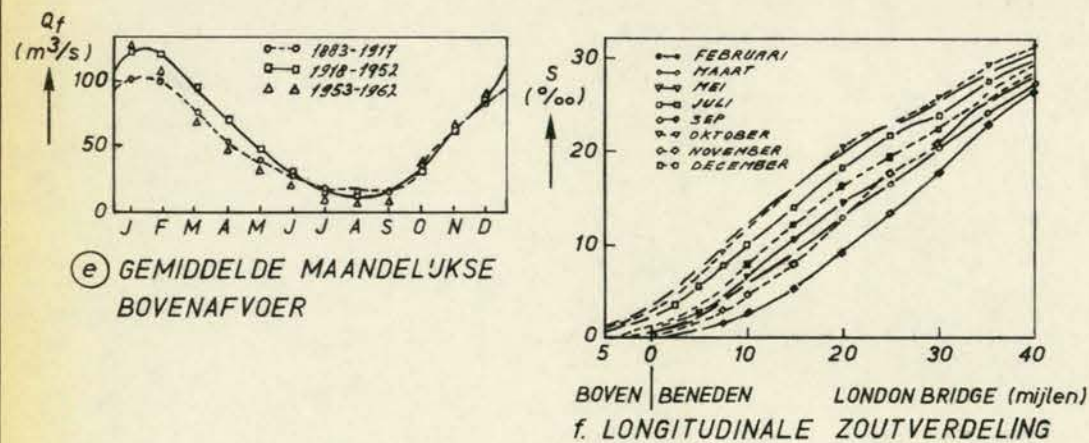
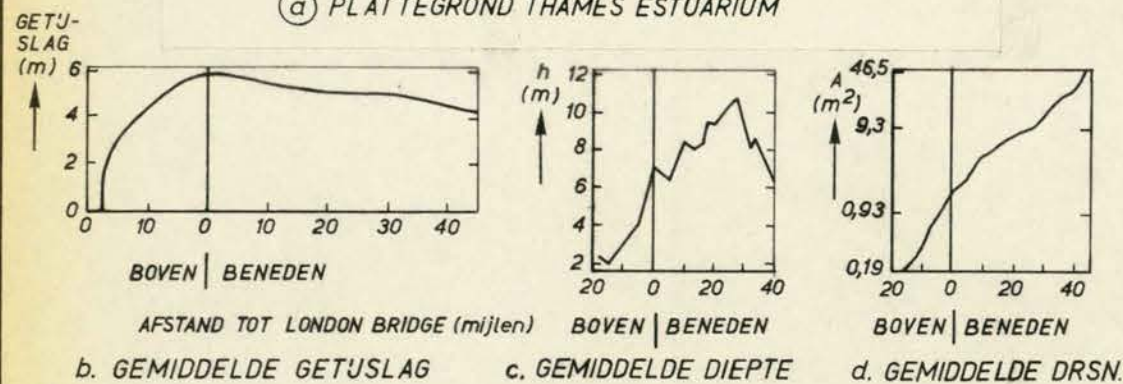
- 94 R. Nith
- 95 R. Urr
- 96 R. Dee
- 97 R. Fleet
- 98 R. Cree
- 98.1 R. Bladnoch
- 99 R. Garnoch
- 100 R. Clyde

Northern Ireland

- 101 R. Foyle
- 102 R. Roe
- 103 R. Lagan
- 104 R. Newry



(a) PLATTEGROND THAMES ESTUARIUM



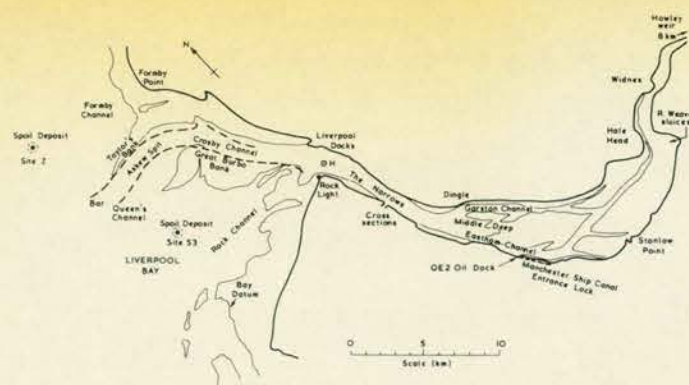
THAMES-ESTUARIUM

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

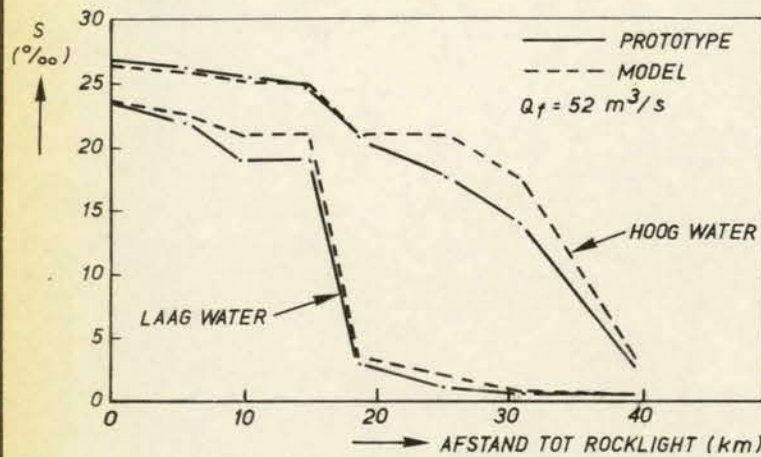
M896-2944

FIG.5-1

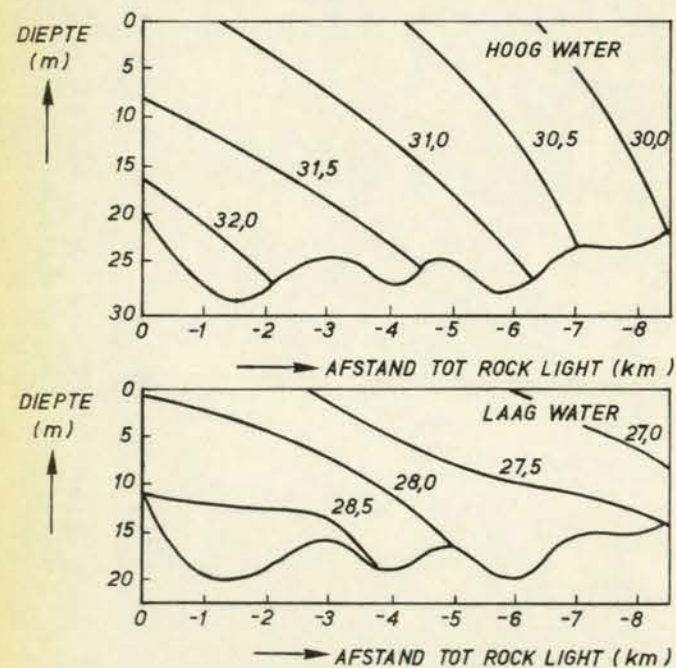
A3



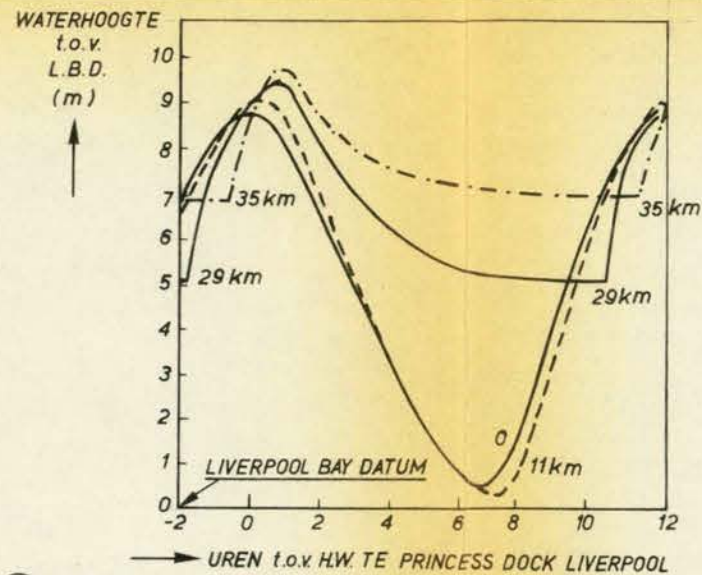
(a) PLATTEGROND MERSEY ESTUARIUM



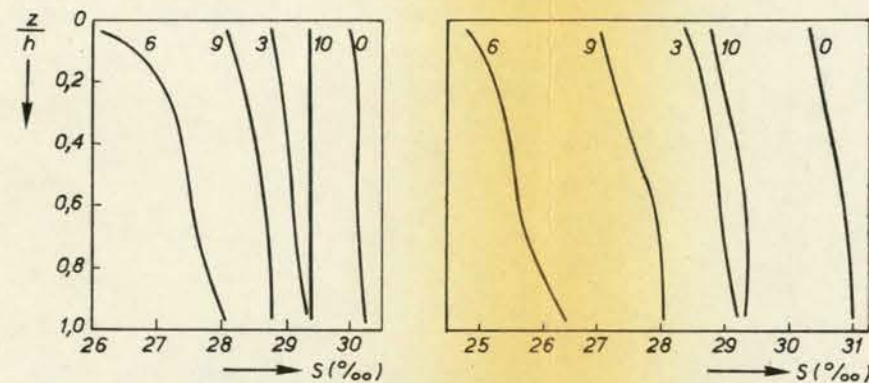
(c) LONGITUDINALE ZOUTVERDELING IN MODEL EN PROTOTYPE



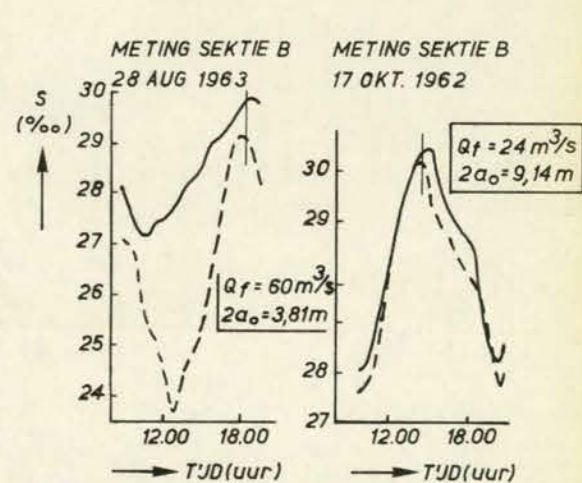
(e) LIJNEN VAN KONSTANT ZOUTGEHALTE IN HET MIDDEN VAN DE NARROWS



(b) GETUWERKING OP DIVERSE PLAATSEN IN ESTUARIUM (SPRINGTUJ) AFSTANDEN VANAF PRINCESS DOCK STAAN BIJGESCHREVEN

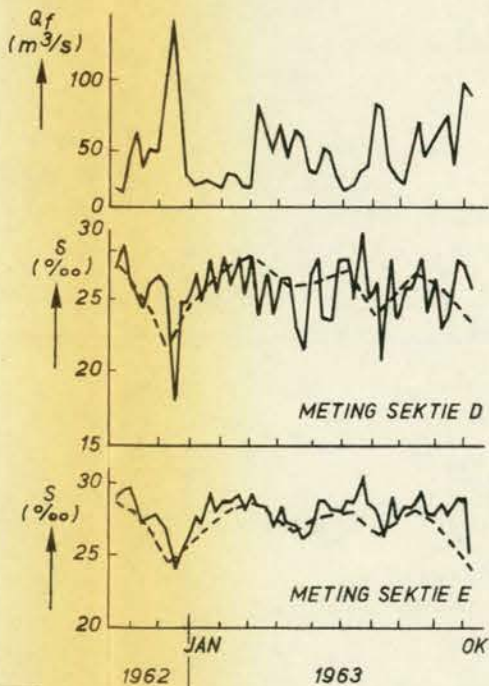


(d) VERTIKALE ZOUTPROFIELEN OP 0, 3, 6, 9 EN 10 UUR 1959 NA HOOGWATER RESP. OP 30 juni - 2 juli EN 6-8 juli



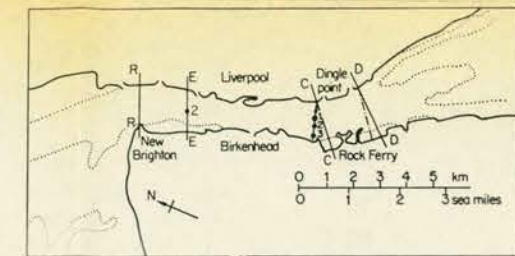
(f) VARIATIE ZOUTGEHALTE GEDURENDE GETUJPERIODE

--- = 1m BENEDEN HET OPPERVLAK
— = 1m BOVEN DE BODEM

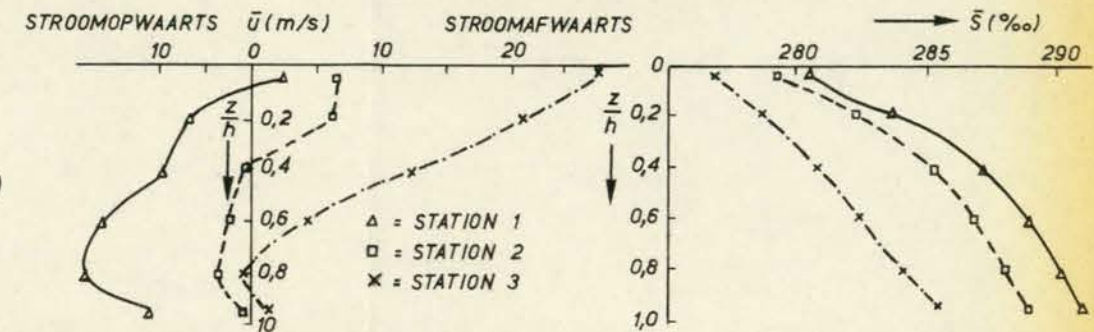


(g) GEMETEN BOVENAFVOER EN ZOUTCONCENTRATIES IN 1962 EN 1963

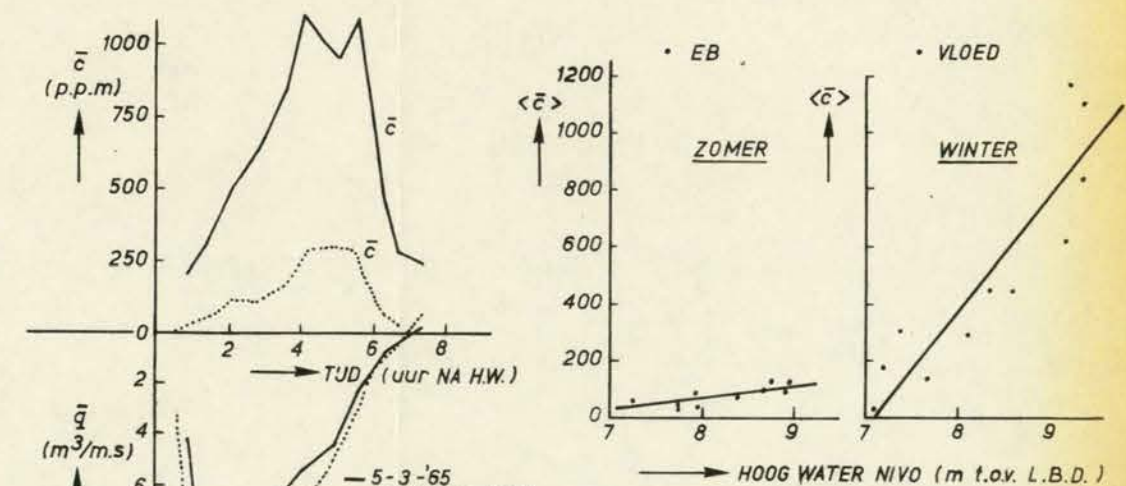
— = WEKELUKSE WAARDEN
--- = MAANDELUKSE WAARDEN
(VOOR PLAATS SEKTIES : ZIE FIG. 5-2h)



(h) PLATTEGROND MERSEY NARROWS MET MEETSTATIONS EN SEKTIES
..... = LAAGWATERLUN BIJ SPRINGTUJ

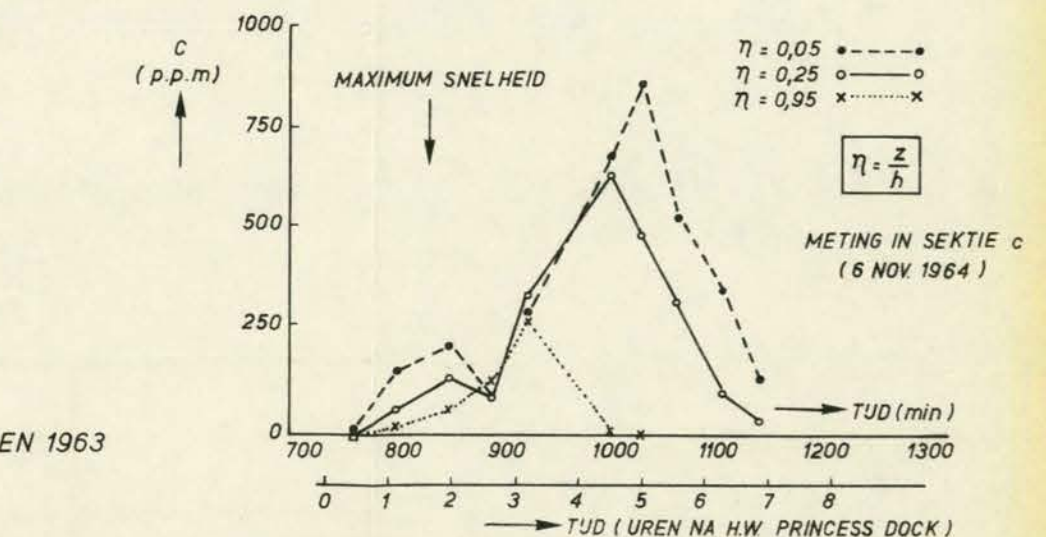


(i) GEMIDDELDE STROOMSNELHEDEN ZOUTGEHALTE IN SEKTIE C VAN DE MERSEY NARROWS



(j) VARIATIE VAN \bar{c} MET HET SEIZOEN

(k) VARIATIE VAN $\langle \bar{c} \rangle$ MET HOOG WATER NIVO VOOR ZOMER EN WINTER SITUATIE



(l) VARIATIE SLIBCONCENTRATIE MET DE DIEPTE EN DE TJD

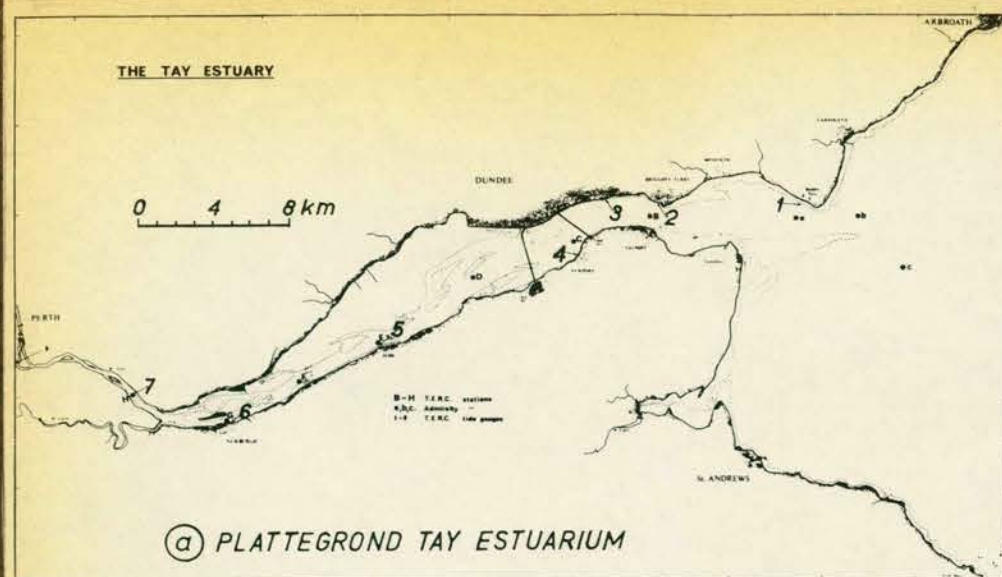
MERSEY-ESTUARIUM

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

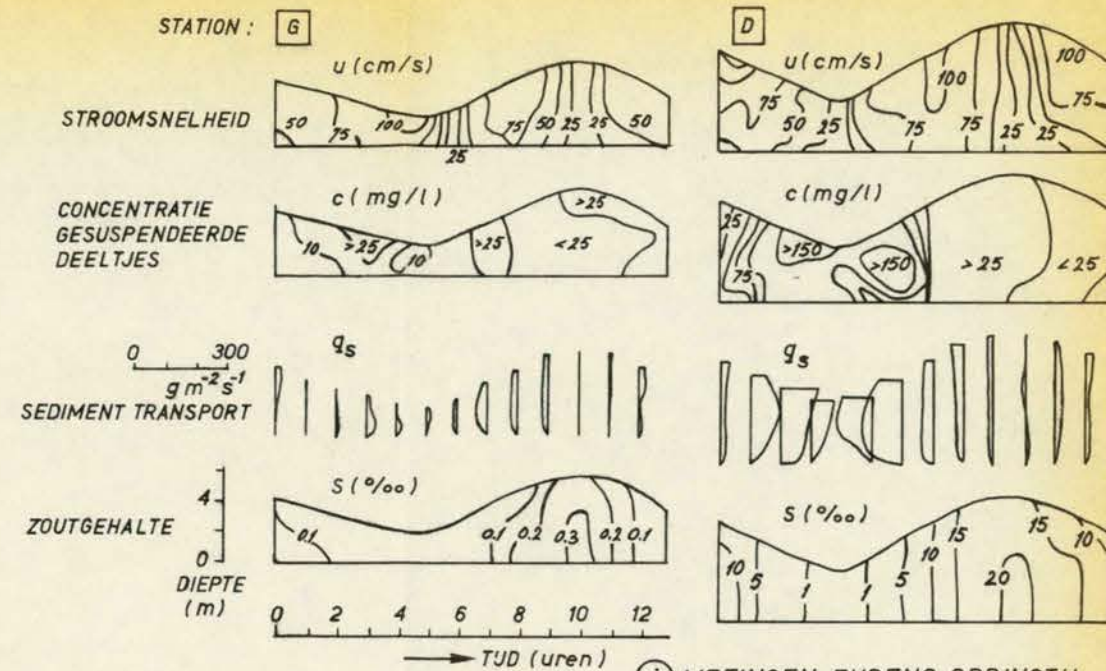
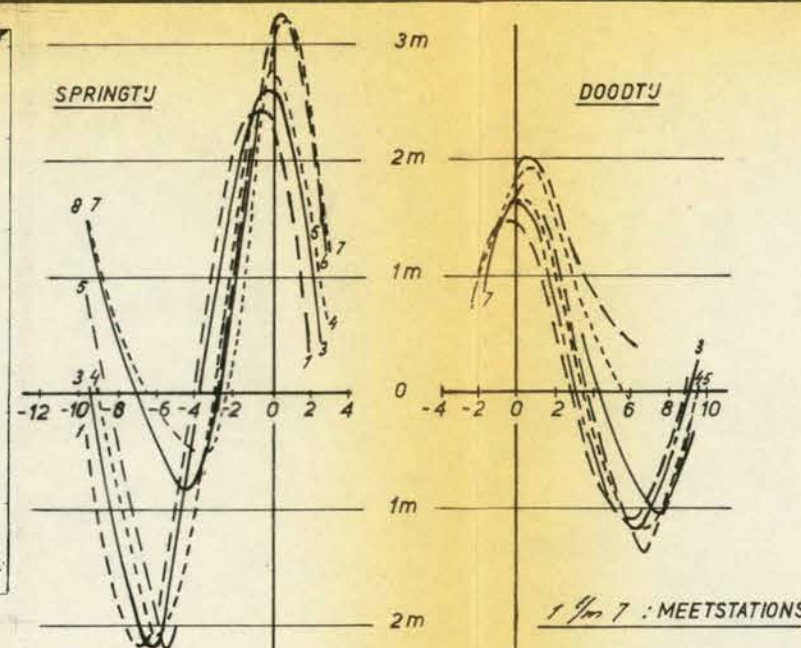
M896-2945

FIG. 5-2

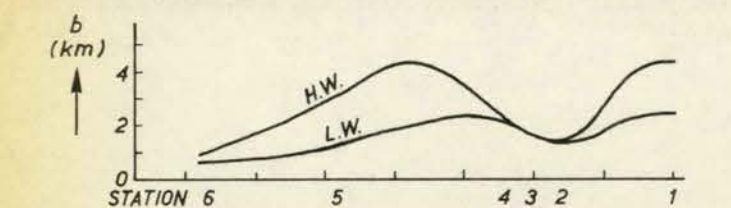
A3



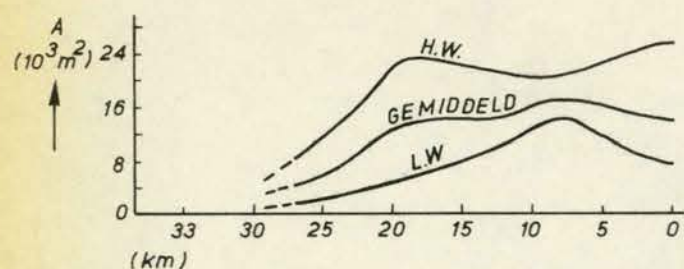
(a) PLATTEGROND TAY ESTUARIUM



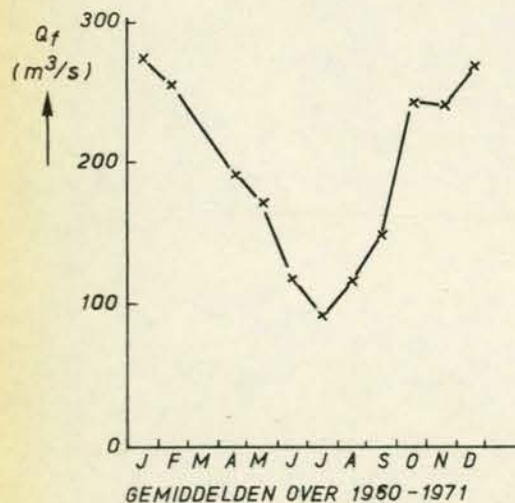
(i) METINGEN TIJDENS SPRINGTJ



(c) BREEDTE ESTUARIUM ALS FUNKTIE VAN DE PLAATS

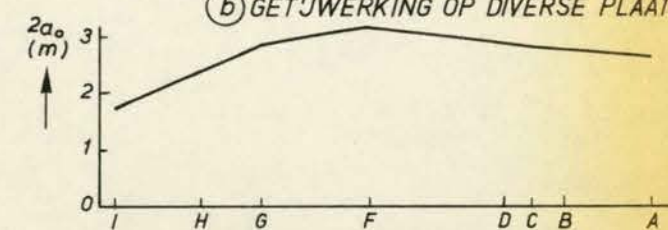


(d) DOORSNEDEN ESTUARIUM ALS FUNKTIE VAN DE PLAATS

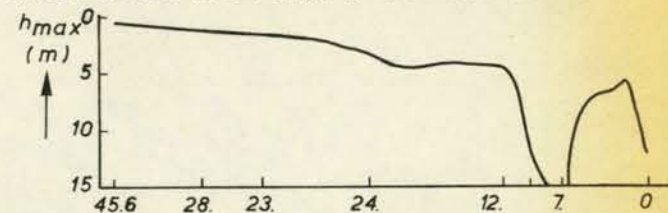


(g) VARIATIE RIVIERAFVOER

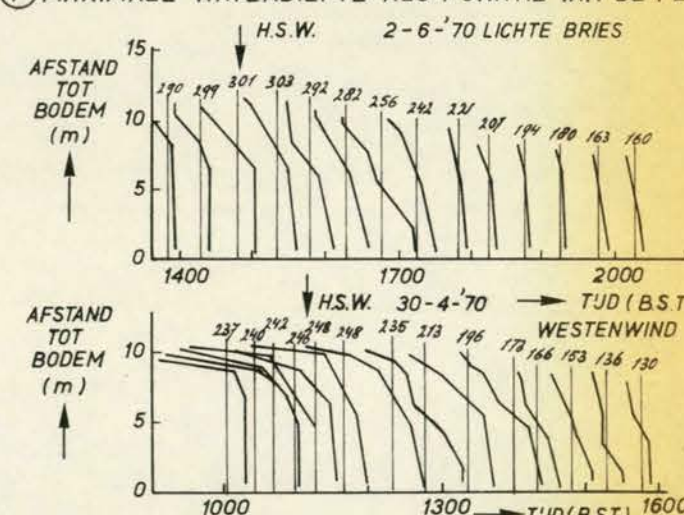
(b) GETJWERKING OP DIVERSE PLAATSEN IN HET ESTUARIUM



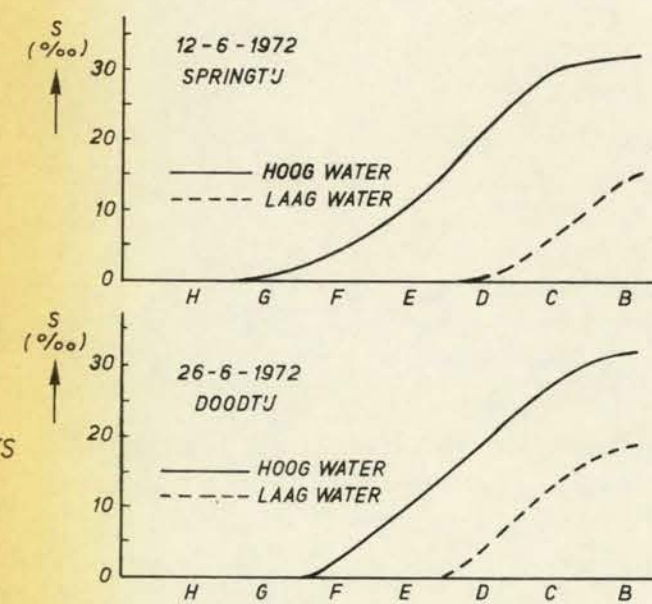
e. GETJSLAG ALS FUNKTIE VAN DE PLAATS



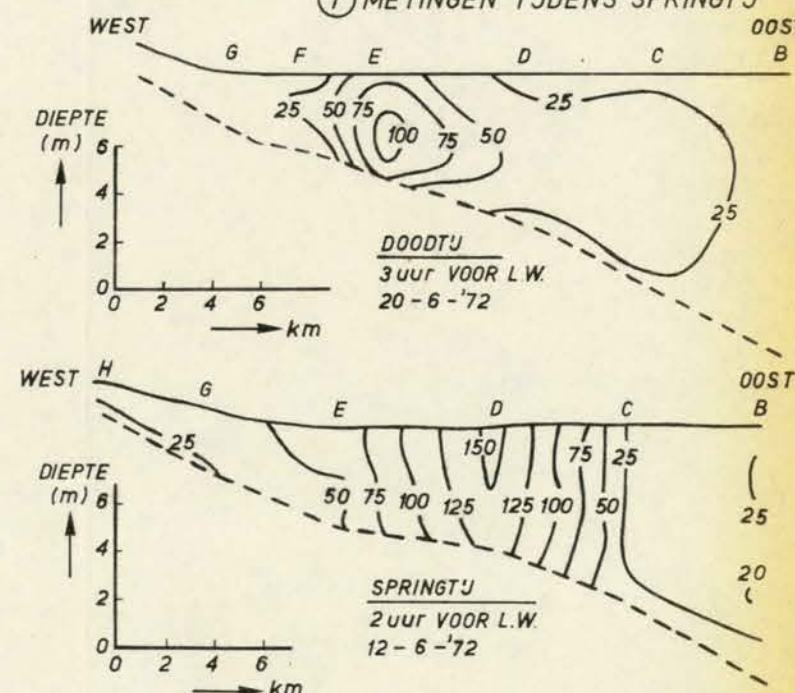
(f) MAXIMALE WATERDIEPTE ALS FUNKTIE VAN DE PLAATS



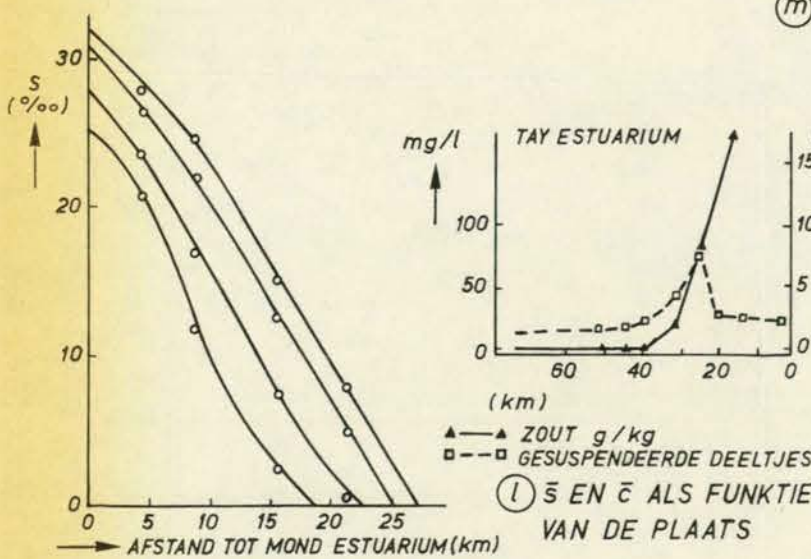
(h) GEMIDDELD ZOUTGEHALTE EN VARIATIE OVER DE VERTIKAAL ALS FUNKTIE VAN DE TJD BIJ TWEE WINDOMSTANDIGHEDEN (WAARDEN VAN \bar{s} STAAN BIJGESCHREVEN (0,1 g/kg); SCHAAL AFWIJING VAN GEMIDDELDE 0,25 g/kg)



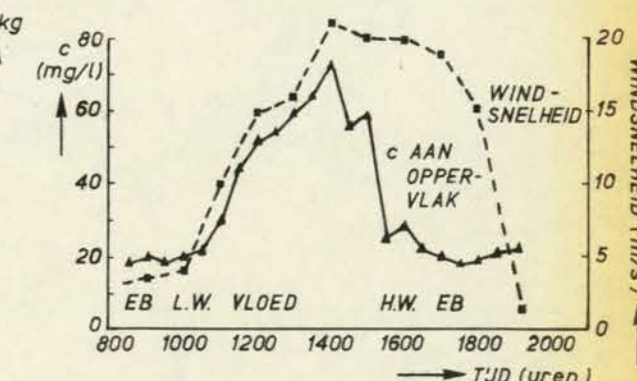
(j) LONGITUDINALE ZOUTVERDELING BIJ HOOG EN LAAG WATER VOOR SPRINGTJ EN DOODTJ



(m) LIJNEN VAN KONSTANTE CONCENTRATIE GESUSPENDEERDE DEELTJES (mg/l)

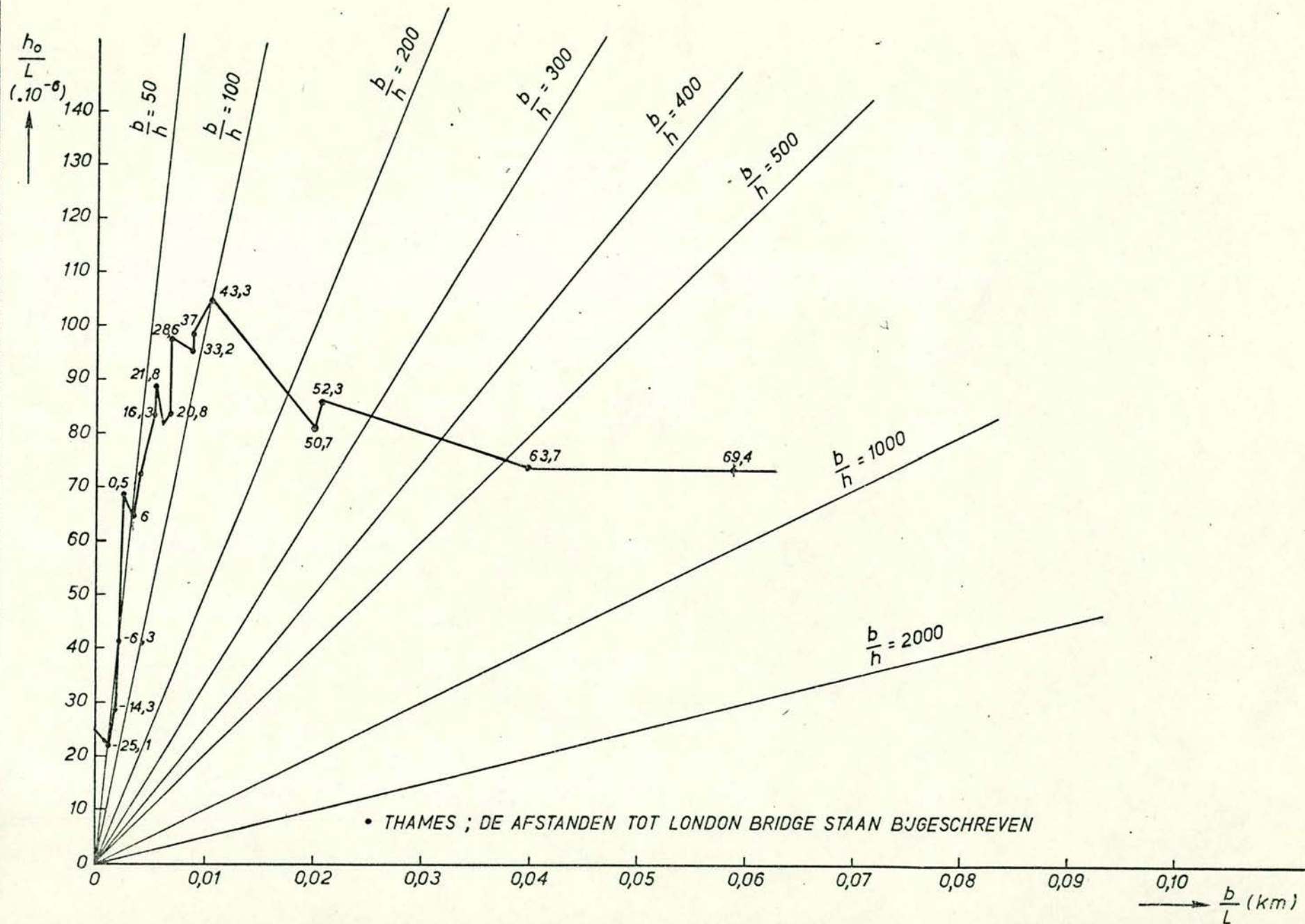


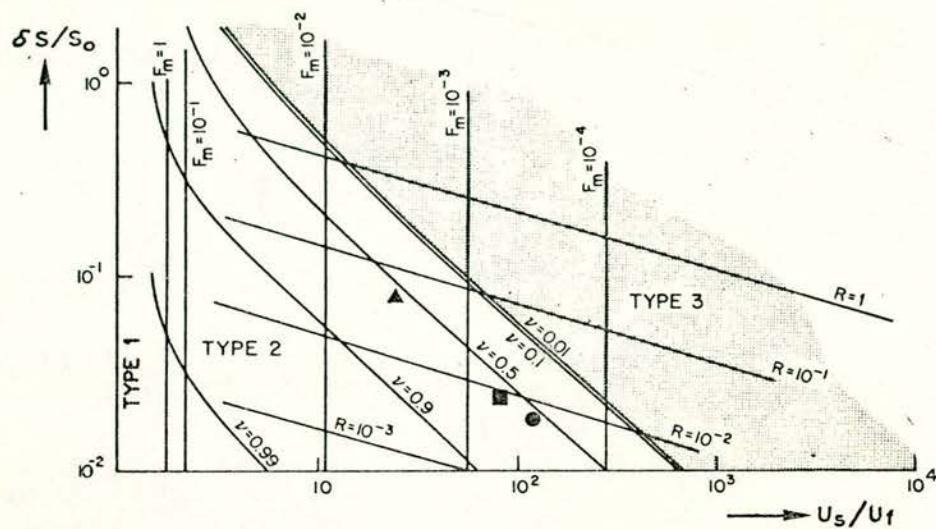
(l) \bar{s} EN \bar{c} ALS FUNKTIE VAN DE PLAATS



(h) CONCENTRATIE GESUSPENDEERDE DEELTJES AAN HET OPPERVLAK ALS FUNKTIE VAN DE WINDSNELHEID

GEOMETRIE ESTUARIE : $\frac{h}{L}$ ALS FUNKTIE VAN $\frac{b}{h}$





● THAMES $Q_f = 35,5 \text{ m}^3/\text{s}$

■ MERSEY $Q_f = 25,7 \text{ m}^3/\text{s}$

▲ MERSEY $Q_f = 151,8 \text{ m}^3/\text{s}$

WEERGAVE GEINVENTARISEERDE ESTUARIA IN
STRATIFIKATIE - CIRCULATIEDIAGRAM

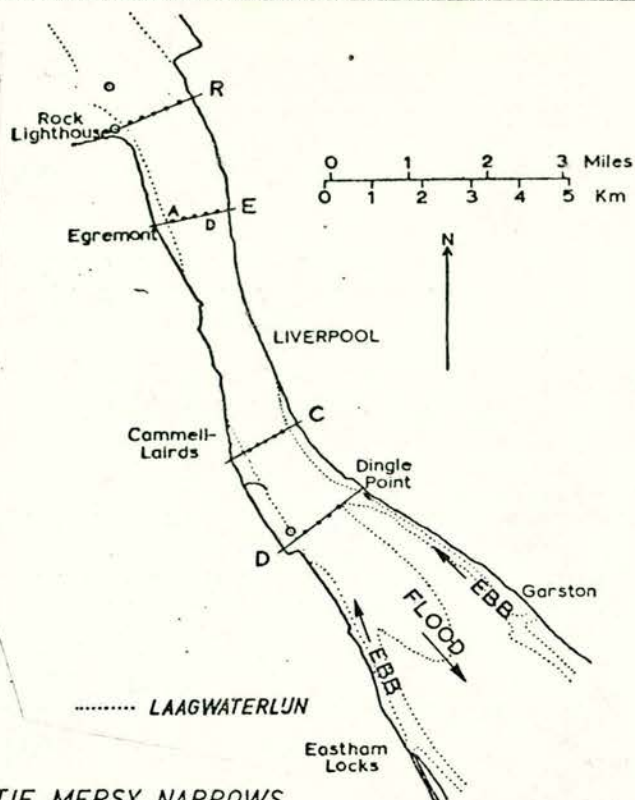
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M896-2948

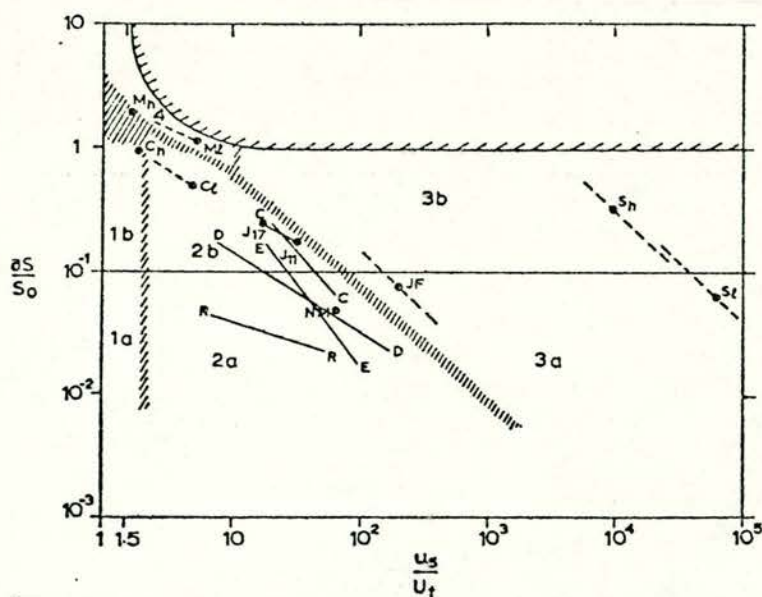
FIG.6.2

A4

[Faint, illegible text covering the majority of the page, possibly bleed-through from the reverse side.]



a. SITUATIE MERSY NARROWS
MET MEETSEKTIES RR, EE, CC, EN DD

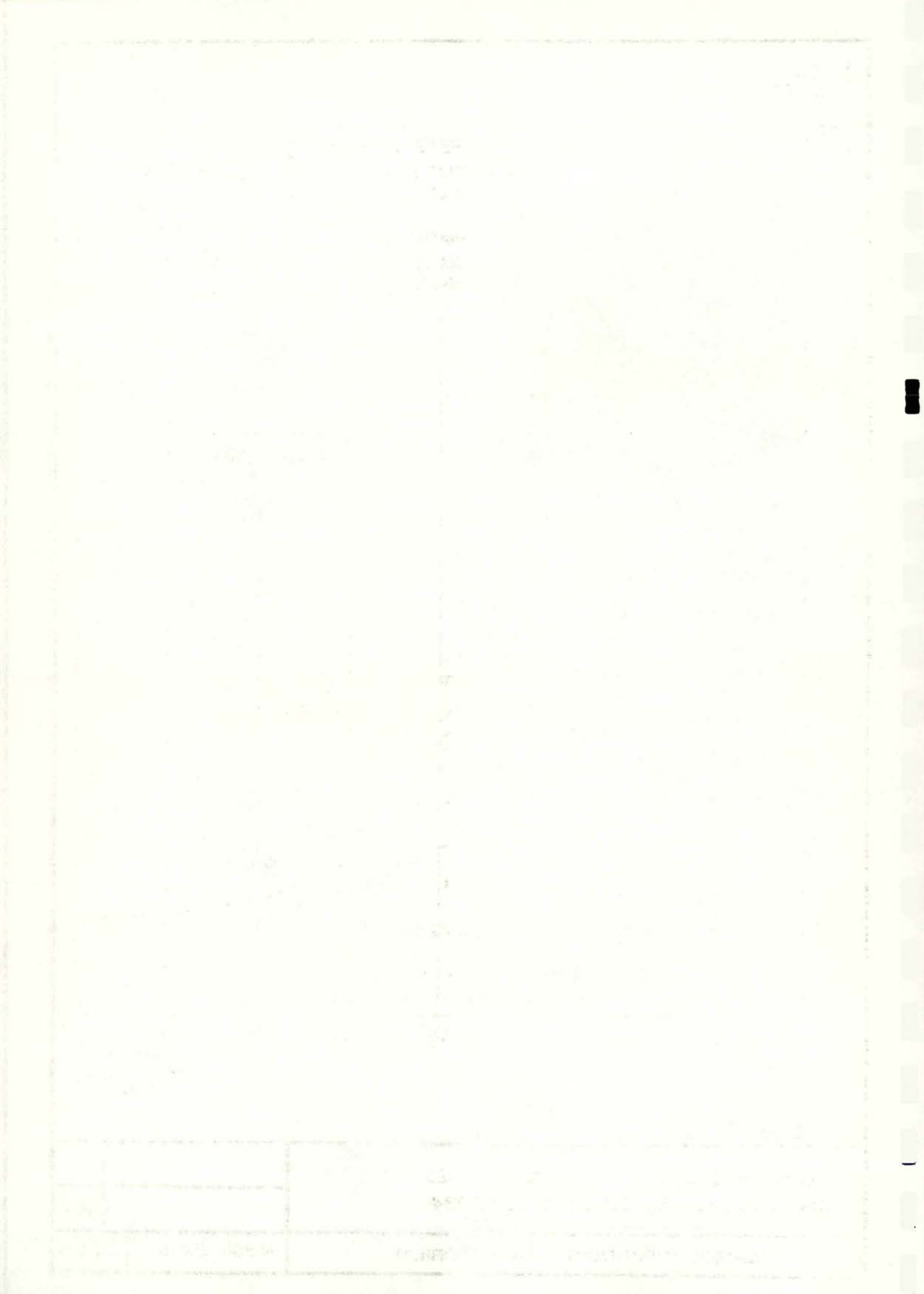


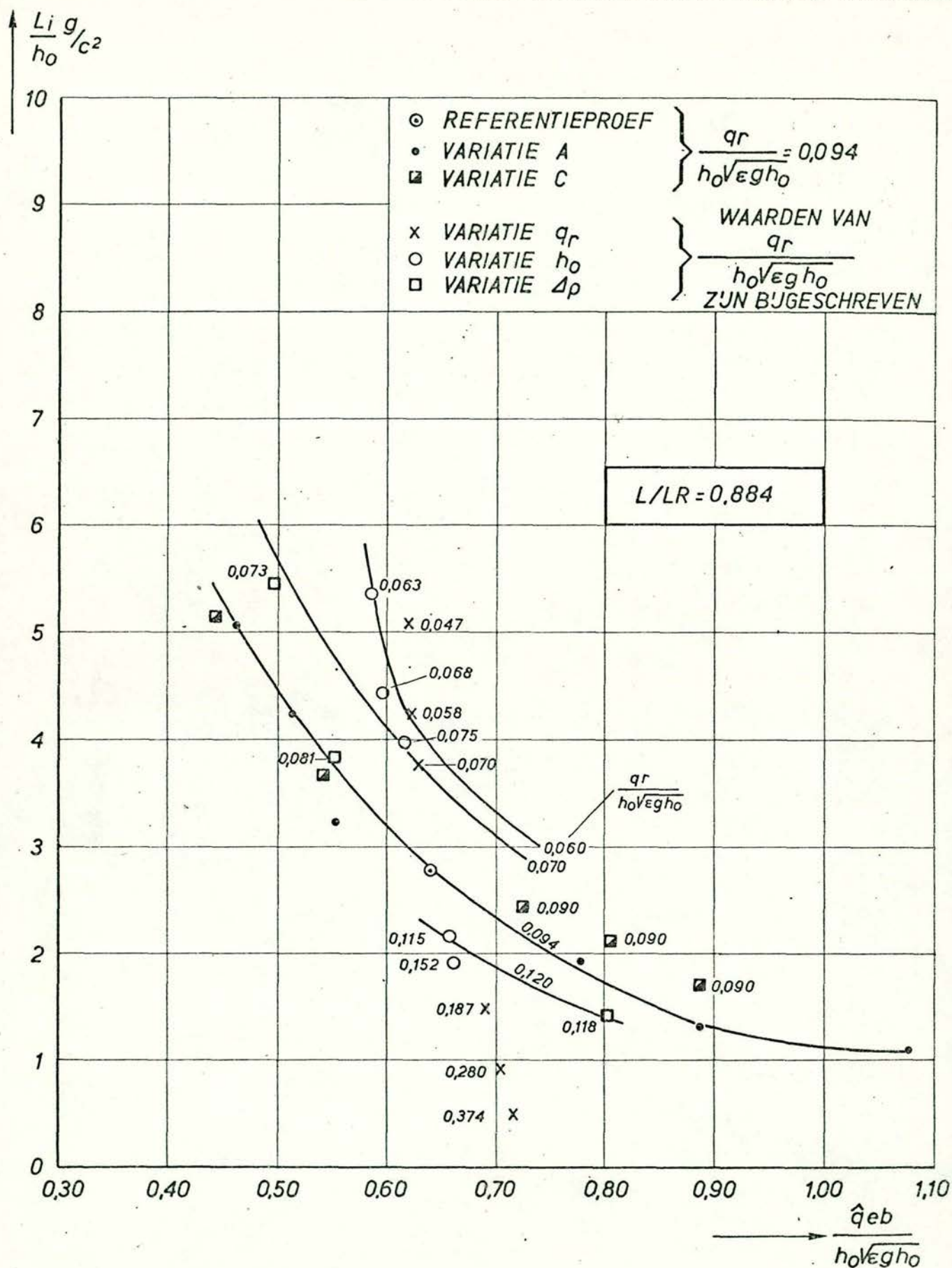
b. STRATIFIKATIE - CIRCULATIE DIAGRAM

RR, EE, CC, DD = MEETSEKTIES IN MERSEY NARROWS
M = MISSISSIPPI RIVER MONDING
C = COLUMBIA RIVER
J = JAMES RIVER
JF = STRAIT OF JUAN DE FUCA
S = SILVER BAY

UIT: [35]

MERSEY ESTUARIUM
STRATIFIKATIE - CIRCULATIE - DIAGRAM

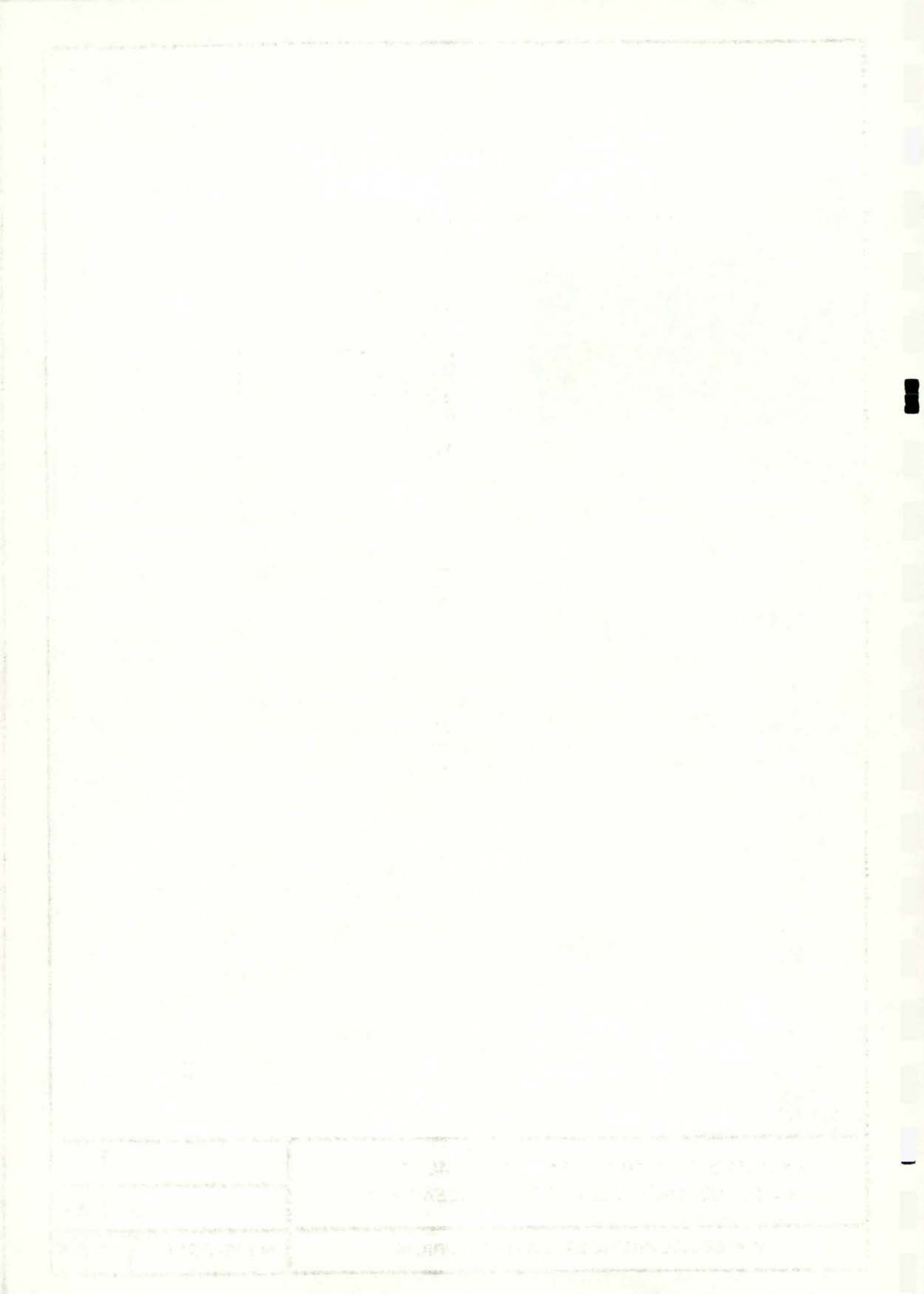


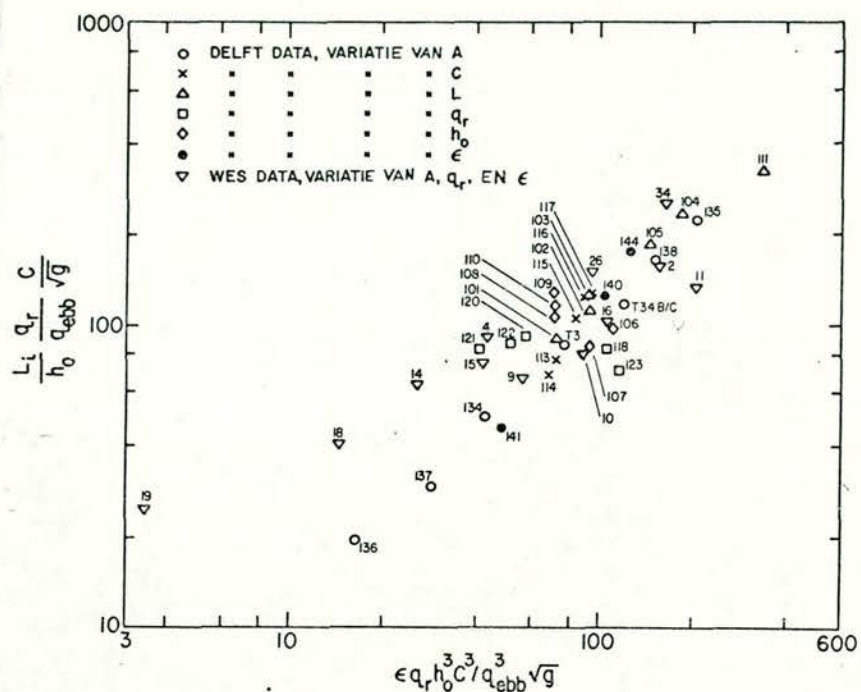


UIT: [120]

DE MINIMALE ZOUTINDRINGSLENGTE L_i ALS FUNKTIE
VAN A, c, q_r, h_0 EN Δp $L/L_R = 0,884$

A4





$$L_i \approx 3,7 \left(\frac{h_0^{13} \cdot c^5 \cdot \epsilon^3 \cdot \sqrt{g}}{q_r \cdot q_{ebb}^5} \right)^{1/4}$$

UIT: [122]

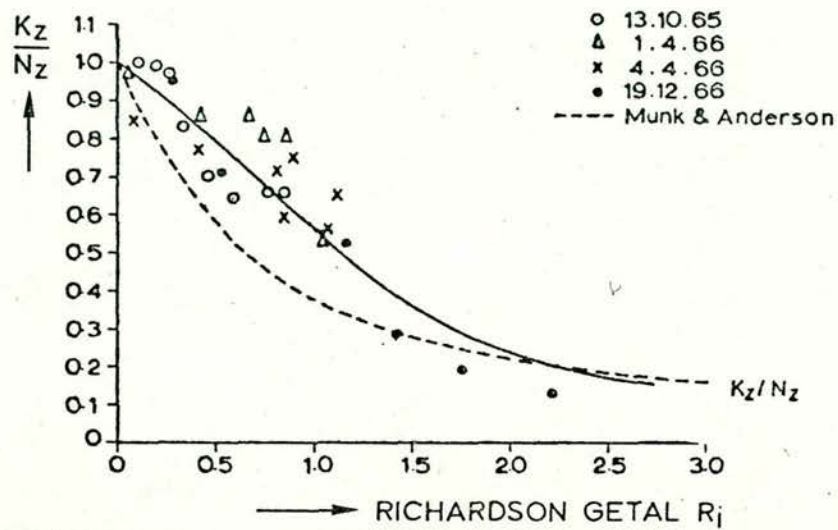
RESULTATEN GOOTPROEVEN TER BEPALING
AAN DE MINIMALE ZOUTINDRINGINGSLENGTE L_i

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M896-2951

FIG. 6-5

A4



UIT : [35]

(METINGEN IN DE NARROWS)

MERSEY ESTUARIUM

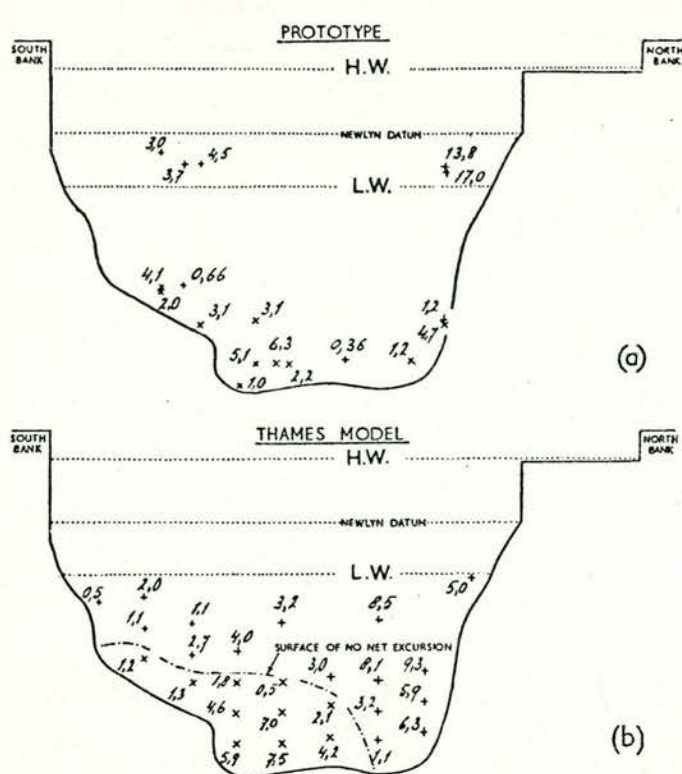
$\frac{K_z}{N_z}$ ALS FUNKTIE VAN R_i

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M896-2952

FIG.6-6

A4

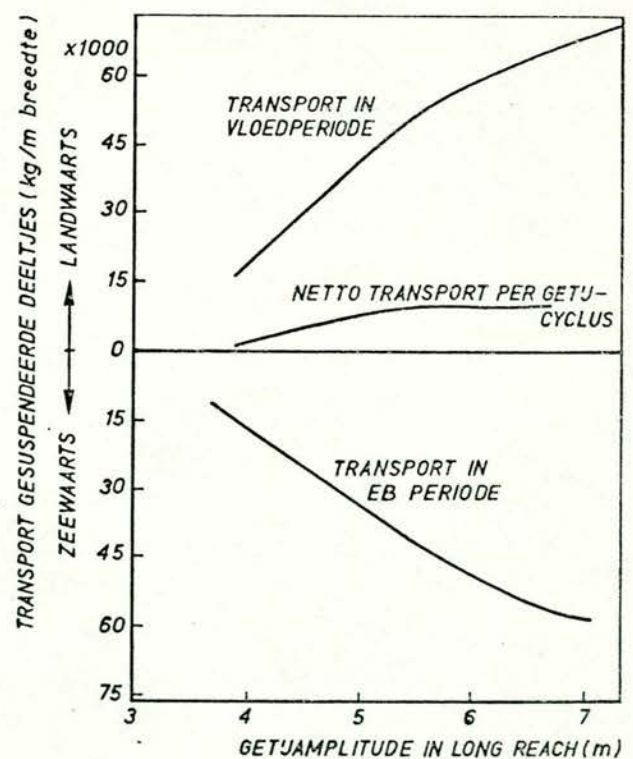
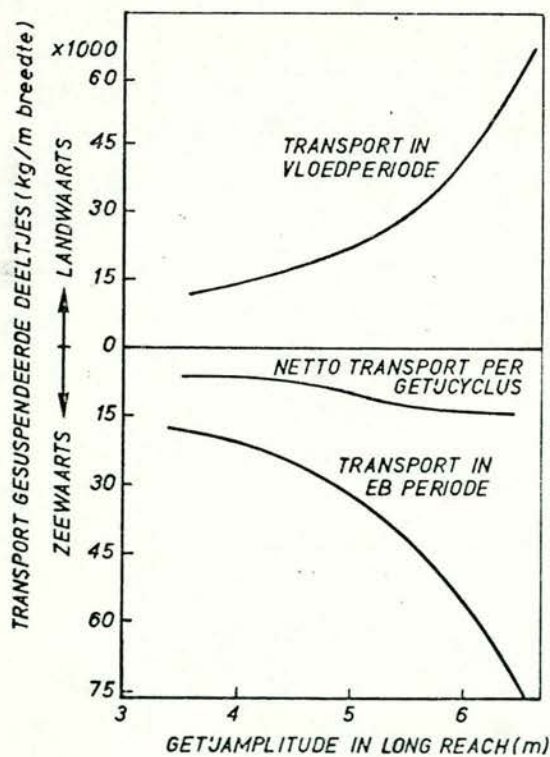


NETTO WATERBEWEGINGEN UITGEDRUKT
IN km PER GETJ

+ : NETTO WATERBEWEGING ZEEWAARTS
X : NETTO WATERBEWEGING LANDWAARTS

$Q_f = 71 \text{ m}^3/\text{s}$ (BU TEDDINGTON)

a.) NETTO WATERBEWEGINGEN TE GRAVESAND REACH (27.8 mijl BENEDEN LONDEN BRIDGE)



b) TRANSPORT GESUSPENDEERDE DEELTJES
IN ZUIDELIJKE VERTIKAAL TE LONG REACH

c) TRANSPORT GESUSPENDEERDE DEELTJES
IN NOORDELJKE VERTIKAAL TE
LONG REACH

UIT : [6]

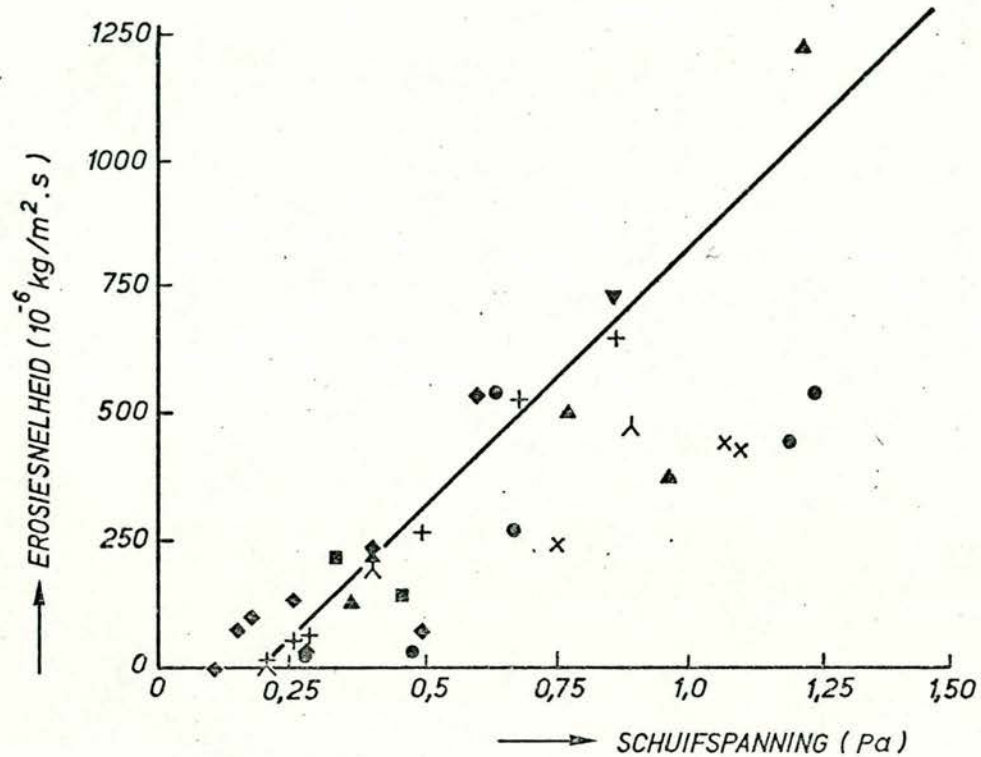
THAMES ESTUARIUM
NETTO WATERBEWEGINGEN EN SUSPENSIE TRANSPORTEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M896-2953

FIG.7-1

A4



UIT: [10]

THAMES ESTUARIUM
RESULTATEN EROSIEPROEVEN

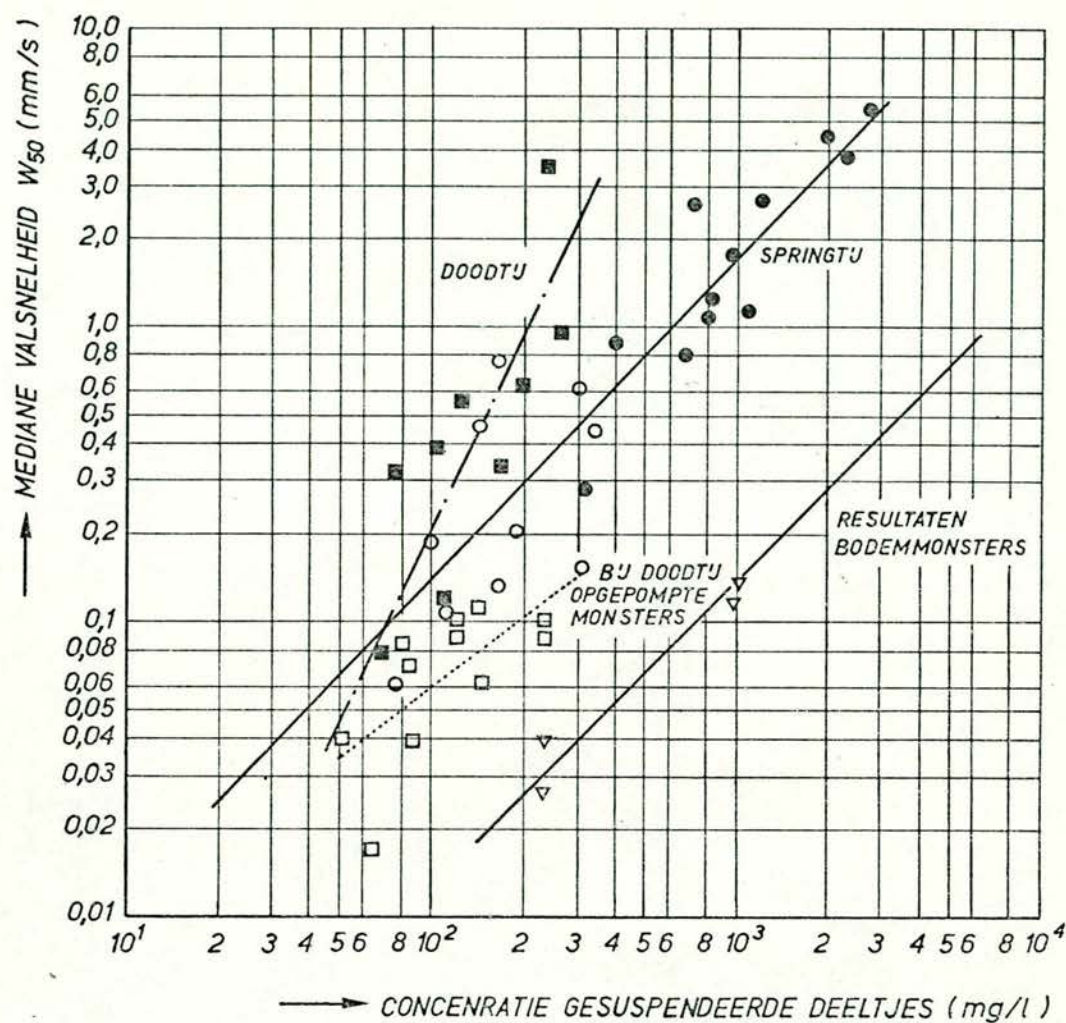
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M896-2954

FIG.7.2

A4





- SPRINGTJ, WOOLWICH, BEPALING MET MONSTERBUIS VAN OWEN
- SPRINGTJ, TILBURY, BEPALING MET MONSTERBUIS VAN OWEN
- DOODTJ, WOOLWICH, BEPALING MET MONSTERBUIS VAN OWEN
- DOODTJ, WOOLWICH, OPGEPOMPTE MONSTERS
- ▼ BODEM GESTOKEN MONSTERS

UIT: [133]

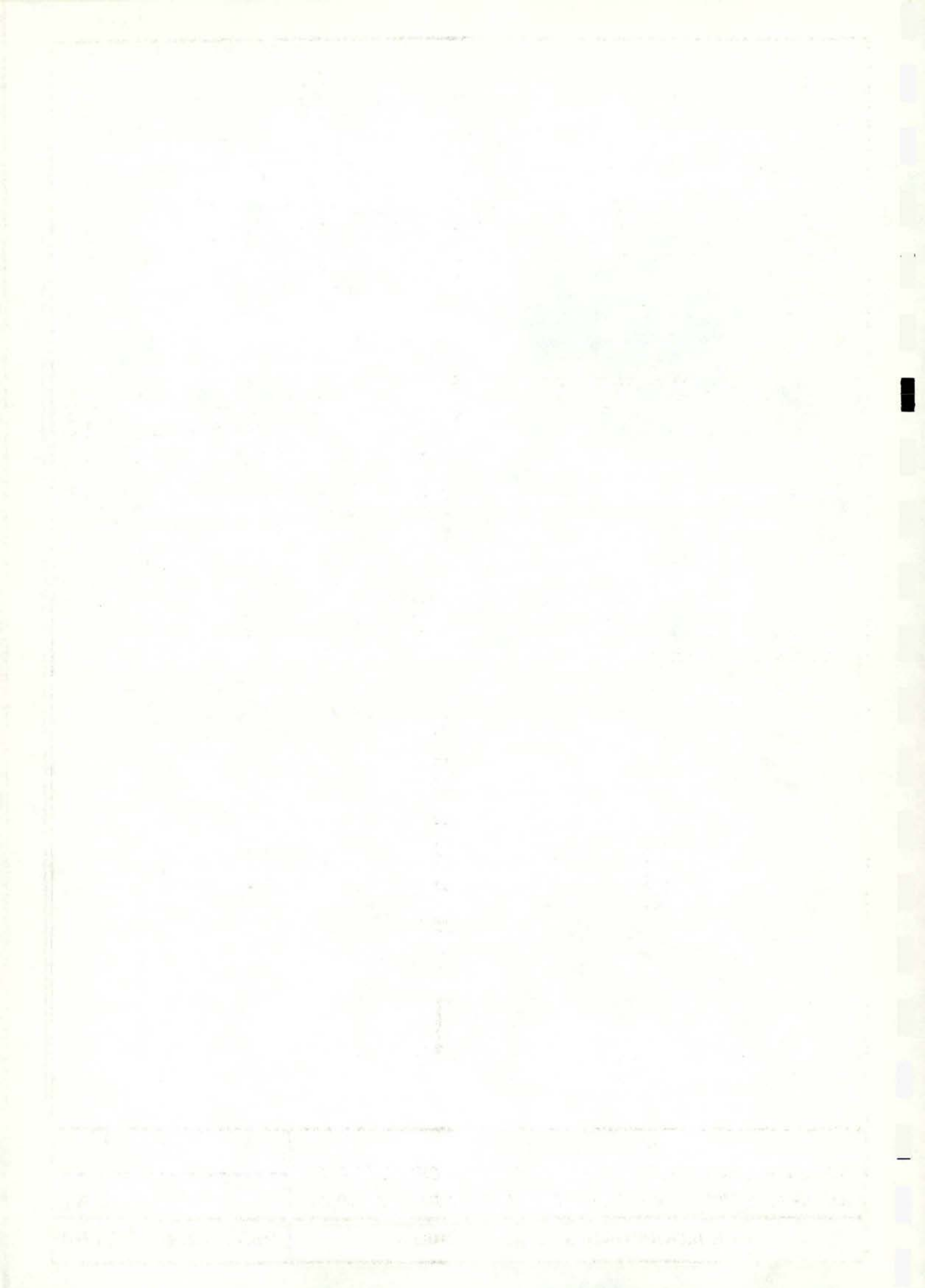
THAMES ESTUARIUM
GEMETEN VALSNELHEDEN VAN THAMES SLIB

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

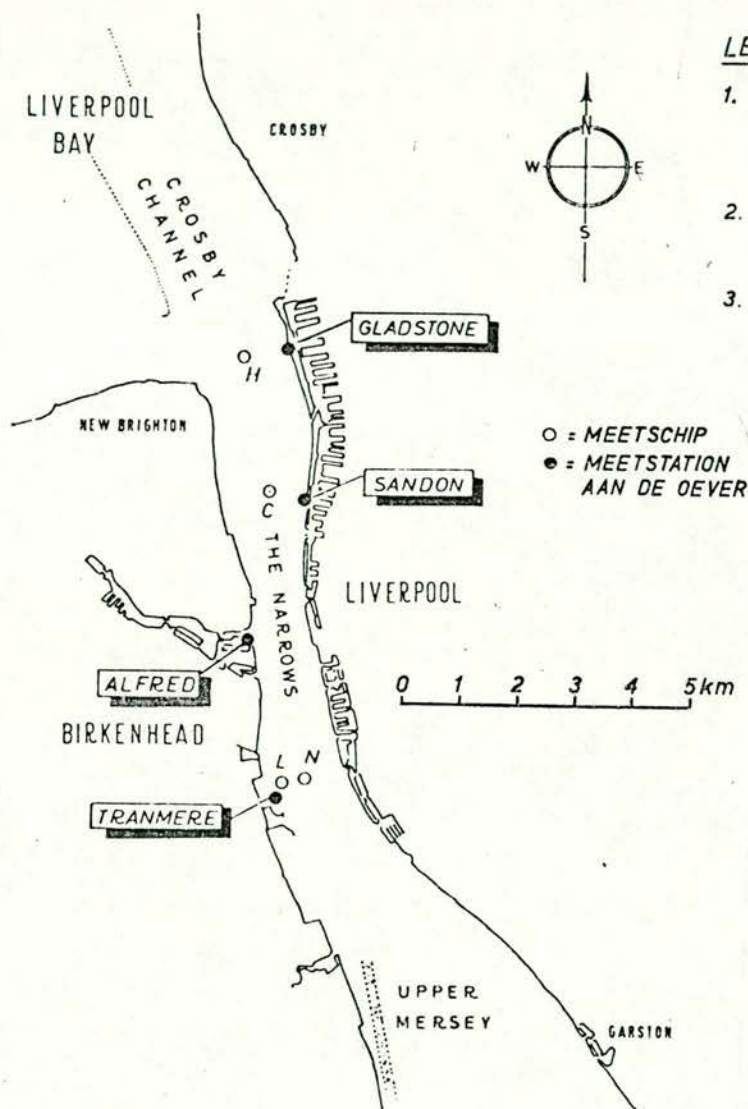
M896-2955

FIG.7-3

A4



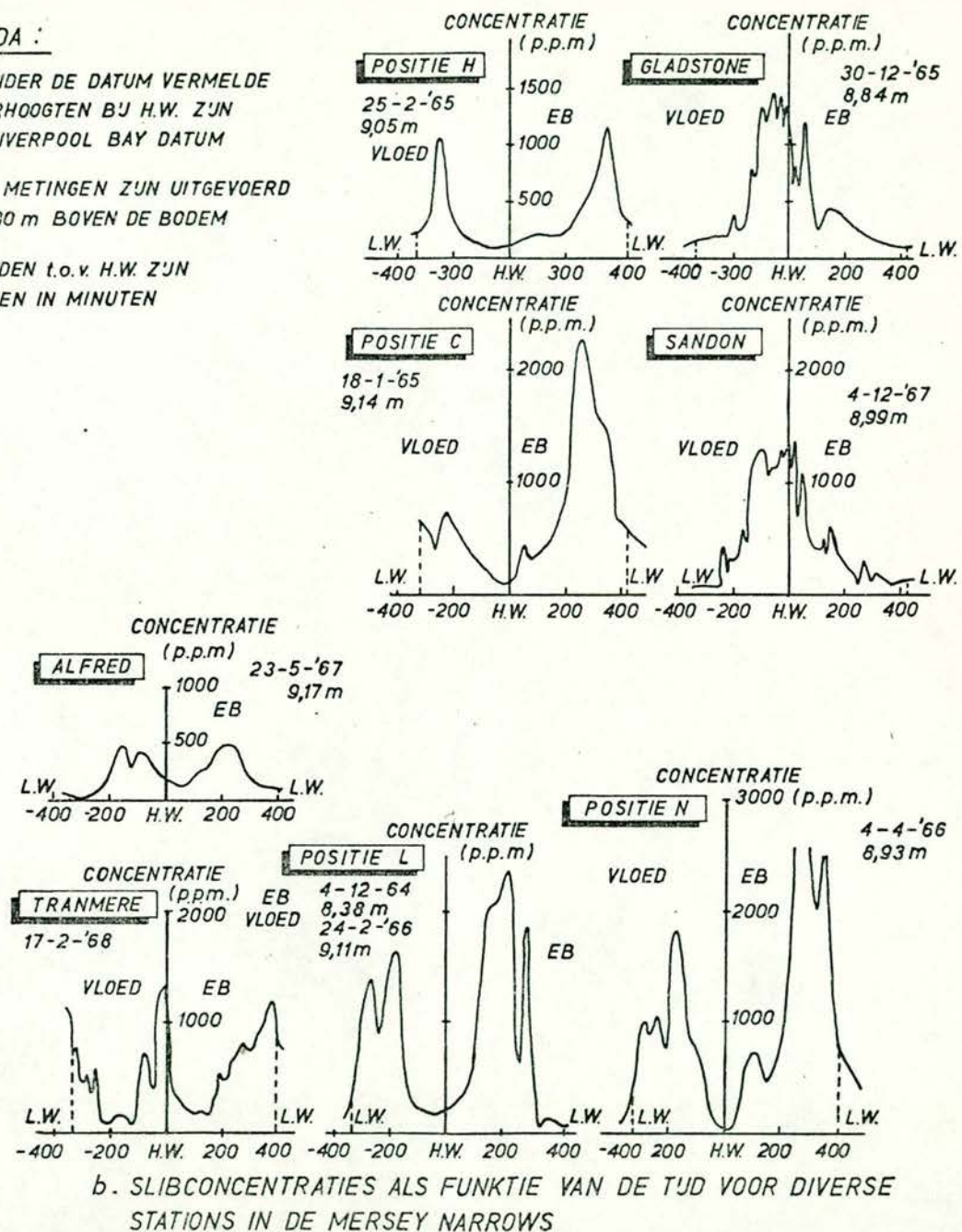
MERSEY ESTUARIUM
VERLOOP CONCENTRATIE GESUSPENDEERDE DEELTJES OVER
DE GETYPERIDE VOOR DIVERSE PLAATSEN IN DE NARROWS



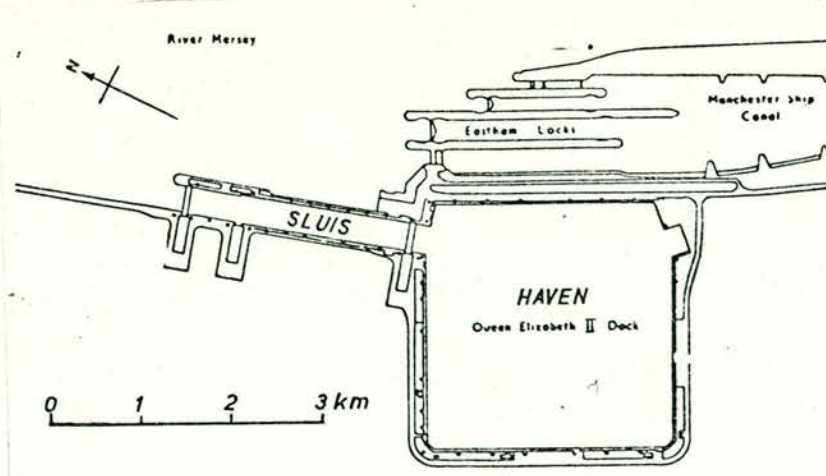
a) MEETSTATIONS VOOR SLIBCONCENTRATIE
IN DE MERSEY NARROWS

LEGENDA :

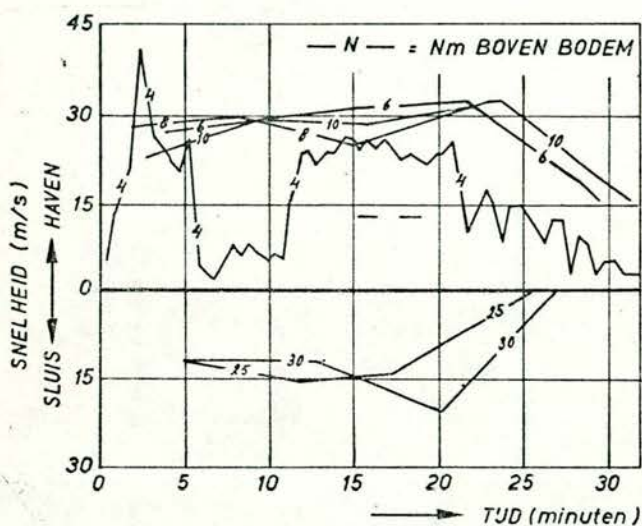
1. DE ONDER DE DATUM VERMELDE WATERHOOGTEN BJ H.W. ZIJN t.o.v. LIVERPOOL BAY DATUM
2. ALLE METINGEN ZIJN UITGEVOERD ca. 1,80 m BOVEN DE BODEM
3. DE TIJDEN t.o.v. H.W. ZIJN GEGEVEN IN MINUTEN



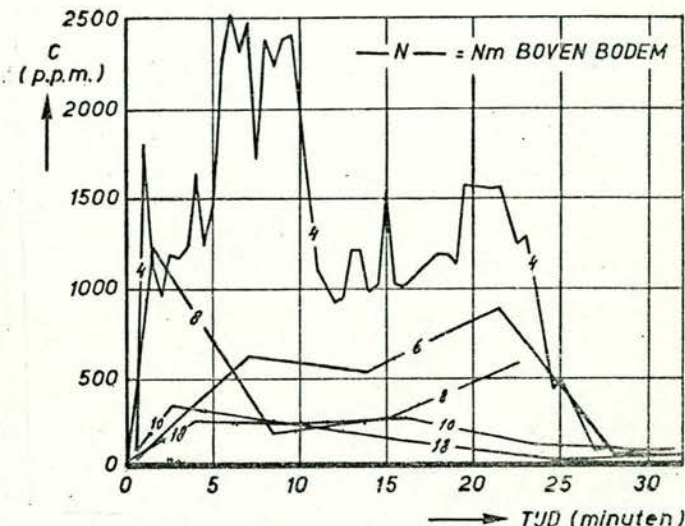
b. SLIBCONCENTRATIES ALS FUNKTIE VAN DE TIJD VOOR DIVERSE
STATIONS IN DE MERSEY NARROWS



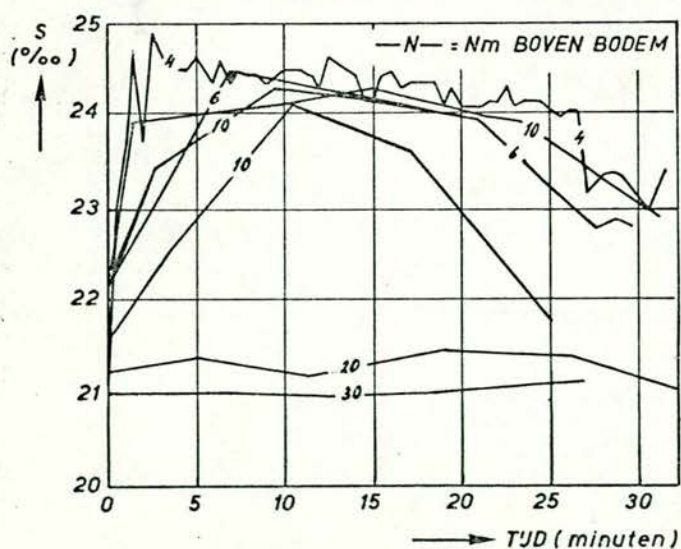
a) PLATTEGROND QUEEN ELIZABETH II HAVEN



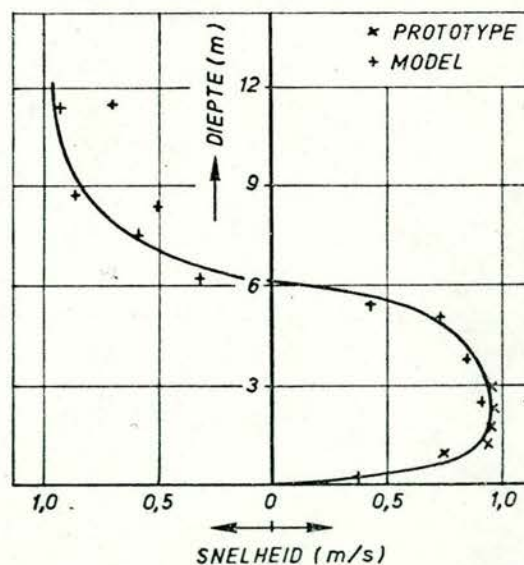
b) STROOMSNELHEDEN OP GRENS VAN SLUIS EN HAVEN NA OPENING SLUISDEUR



c) CONCENTRATIES GESUSPENDEERDE DEELTJES NA OPENING VAN DE SLUISDEUR



d) ZOUTGEHALTE NA OPENING VAN DE SLUISDEUR



e) VERTIKAAL SNELHEIDSPROFIEL VAN MODEL EN PROTOTYPE

UIT: [127]

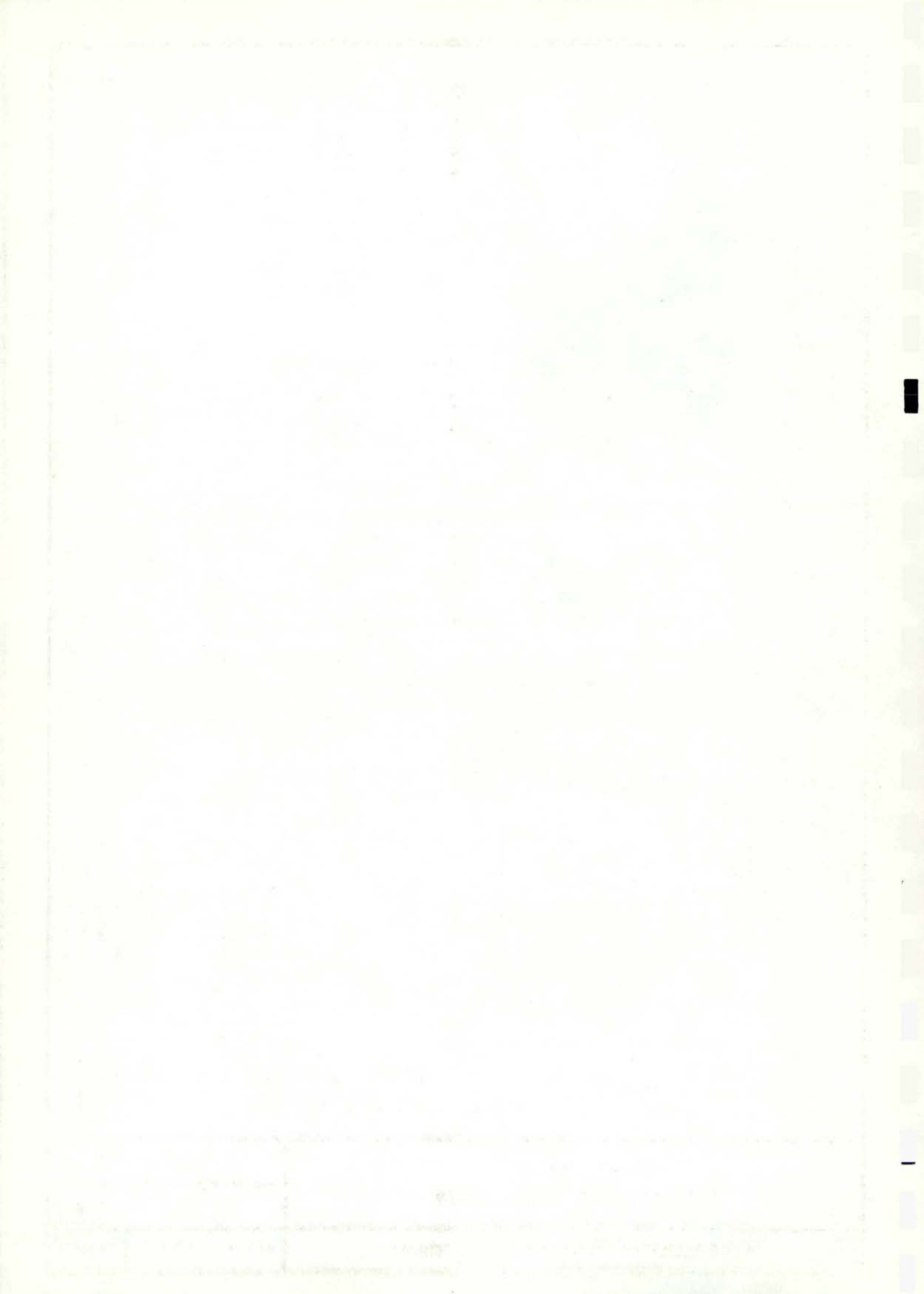
MERSEY ESTUARIUM
QUEEN ELIZABETH II HAVEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

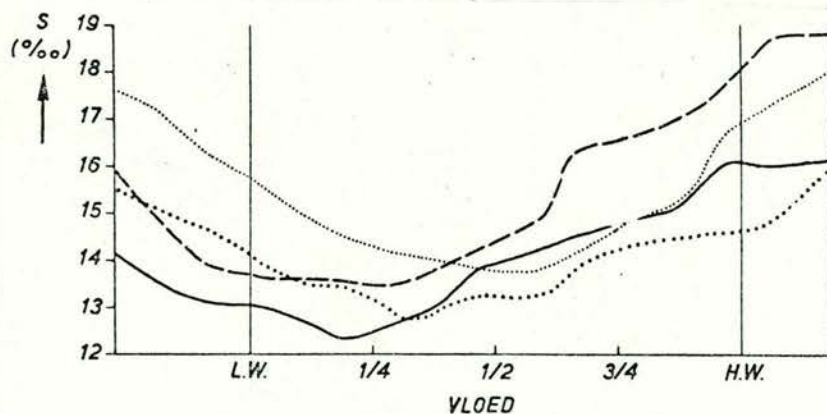
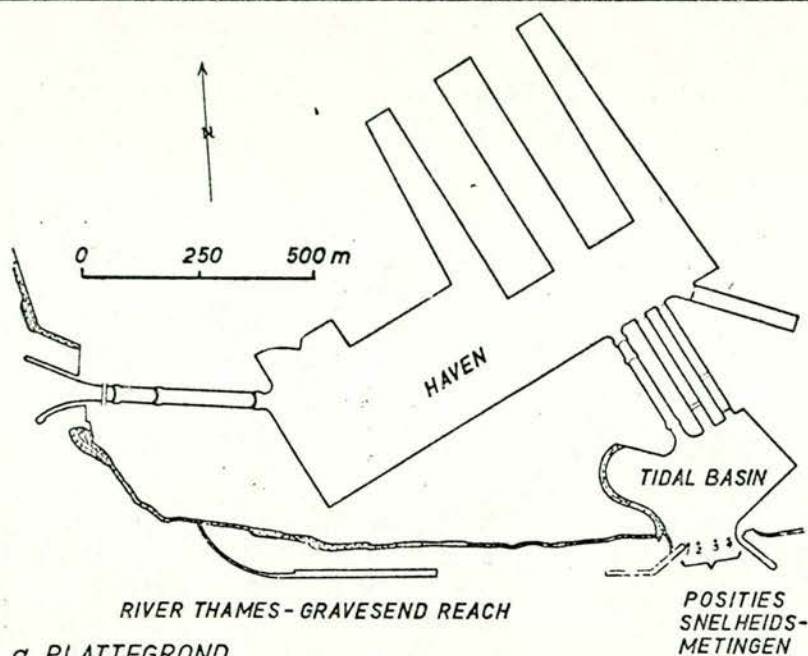
M896-2957

FIG.8-1

A4

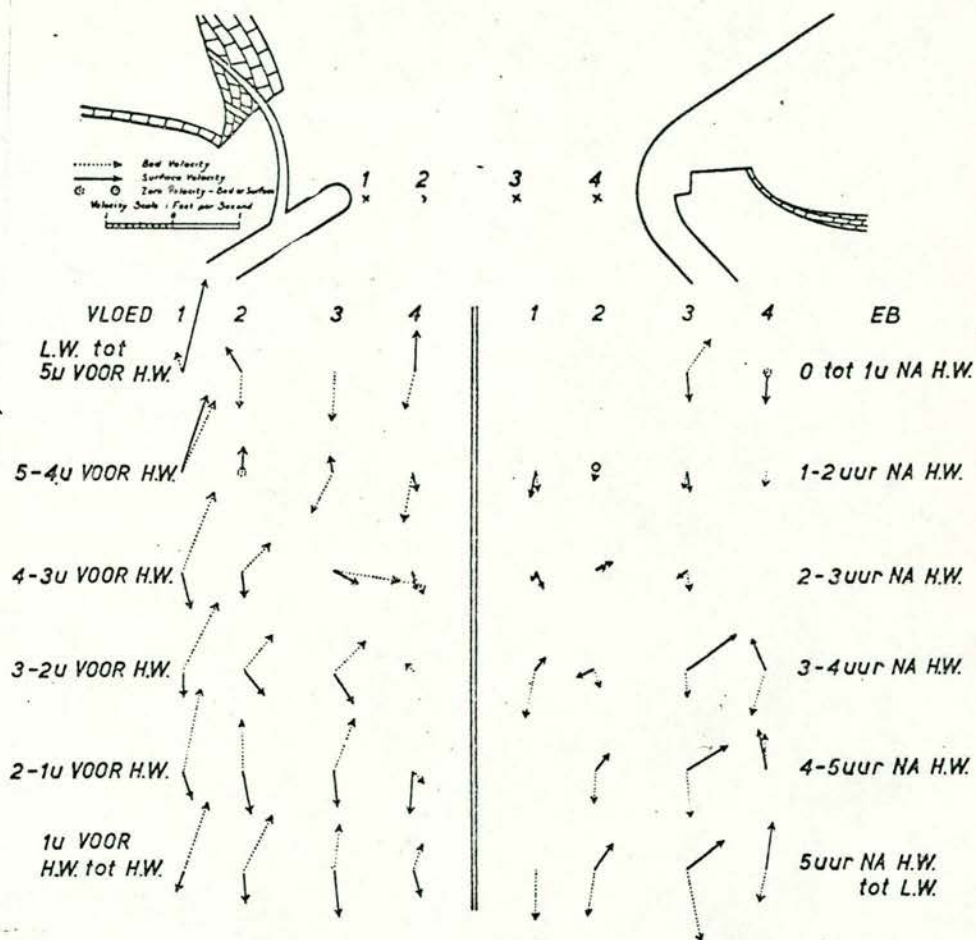


THAMES ESTUARIUM
TILBURY DOCKS - TIDAL BASIN



b) ZOUTGEHALTE ALS FUNKTIE EN DE TJD

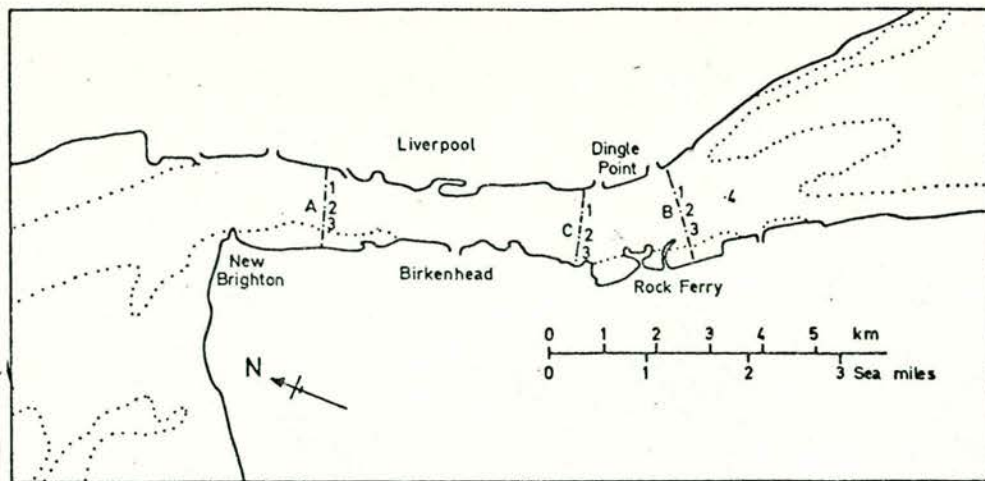
- = BIJ OPPERVAK IN RIVIER
- - - = BIJ BODEM IN RIVIER
- = BIJ OPPERVAK IN MODEL BASIN
- · - · - = BIJ BODEM IN MODEL BASIN



c) GROOTTE EN RICHTING VAN DE GEMETEN STROOMSNELHEDEN

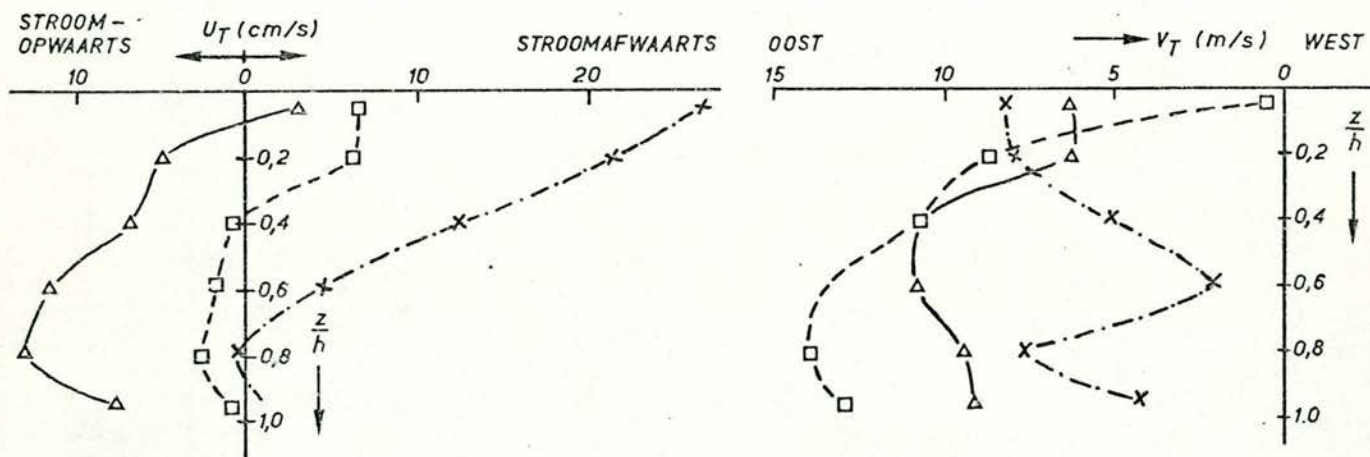
- = SNELHEID BIJ DE BODEM
- = SNELHEID BIJ HET OPPERVAK

0 0,5 m/s



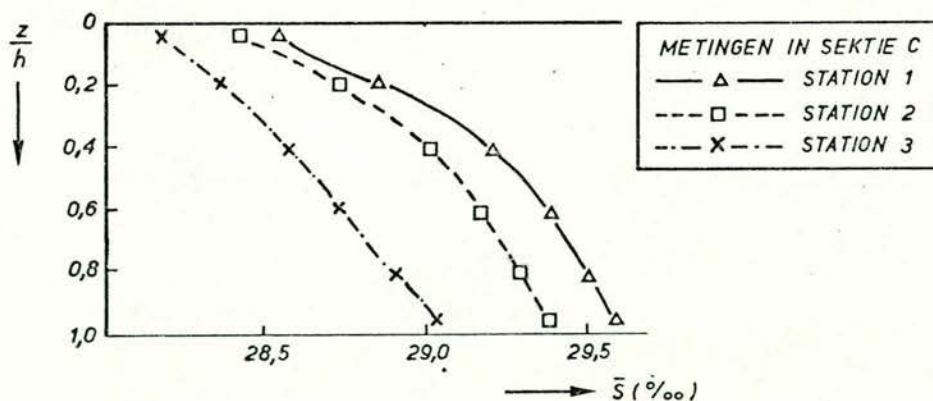
a) PLATTEGROND MERSEY NARROWS MET MEETSTATIONS EN MEETSEKTIES

..... = LAAGWATERLIJN BIJ SPRINGTJ



b) VERTIKAAL PROFIEL VAN DE OVER HET GETJ-
GEMIDDELDE LONGITUDINALE SNELHEID

c) VERTIKAAL PROFIEL VAN OVER HET GETJ-
GEMIDDELDE LATERALE SNELHEID

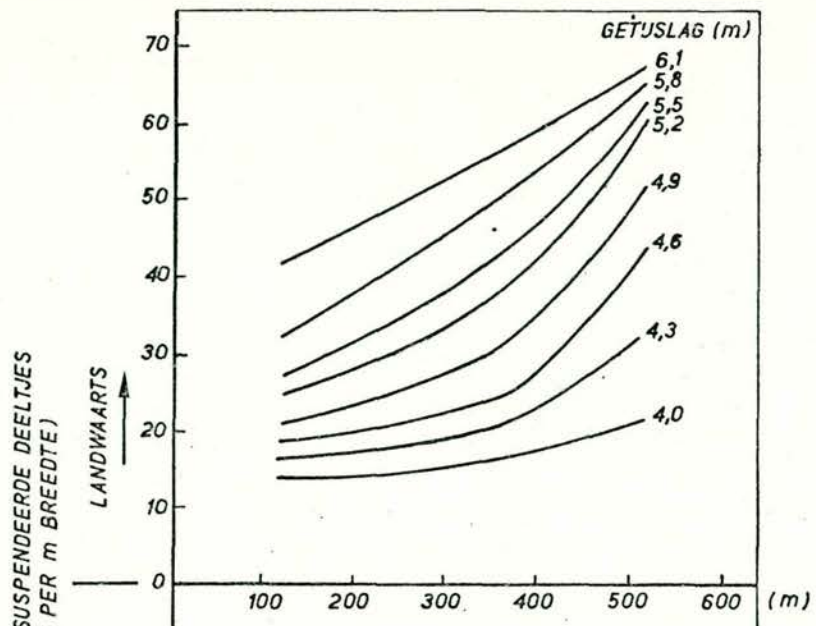


d) VERTIKAAL PROFIEL VAN OVER HET GETJ
GEMIDDELDE ZOUTCONCENTRATIE

UIT: [33]

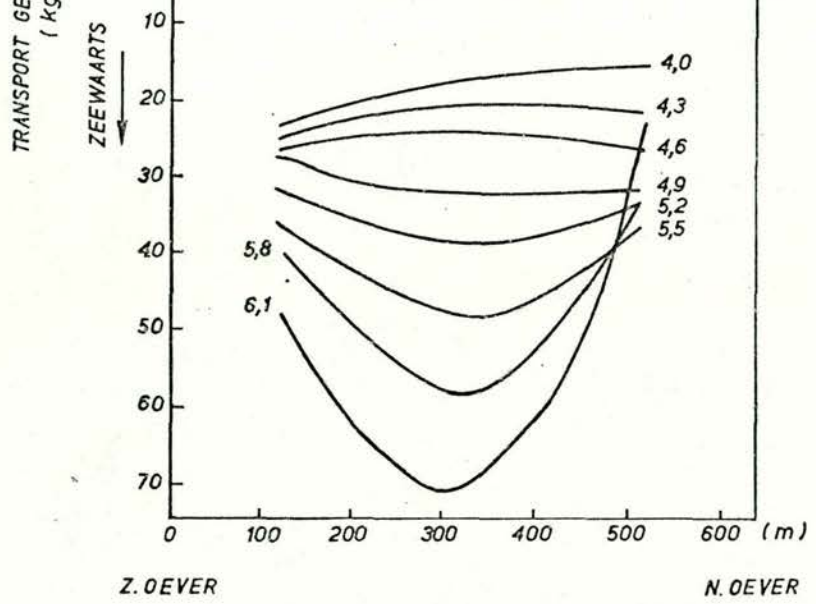
GETJGEMIDDELDE SNELHEID- EN ZOUTVERDELING
IN EEN BOCHT IN DE MERSEY

(a)



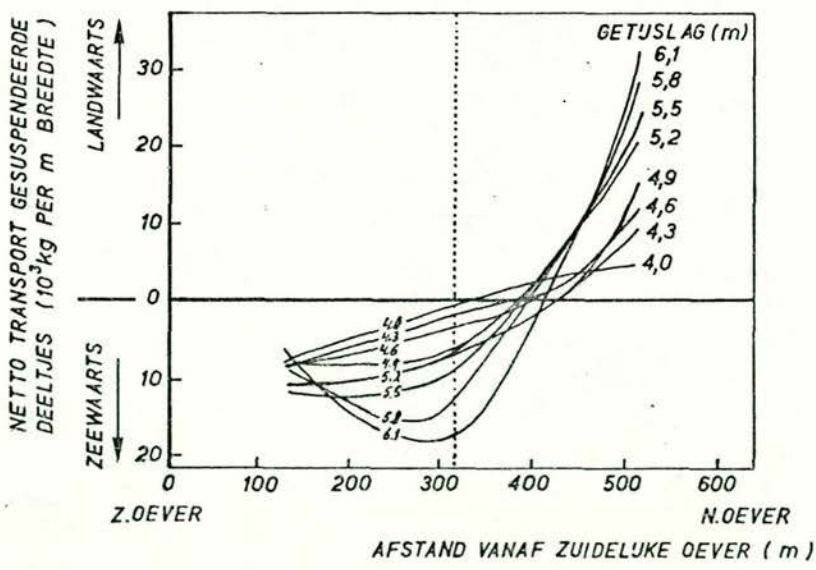
TRANSPORT PER
VLOED PERIODE

(b)



TRANSPORT PER
EB PERIODE

(c)



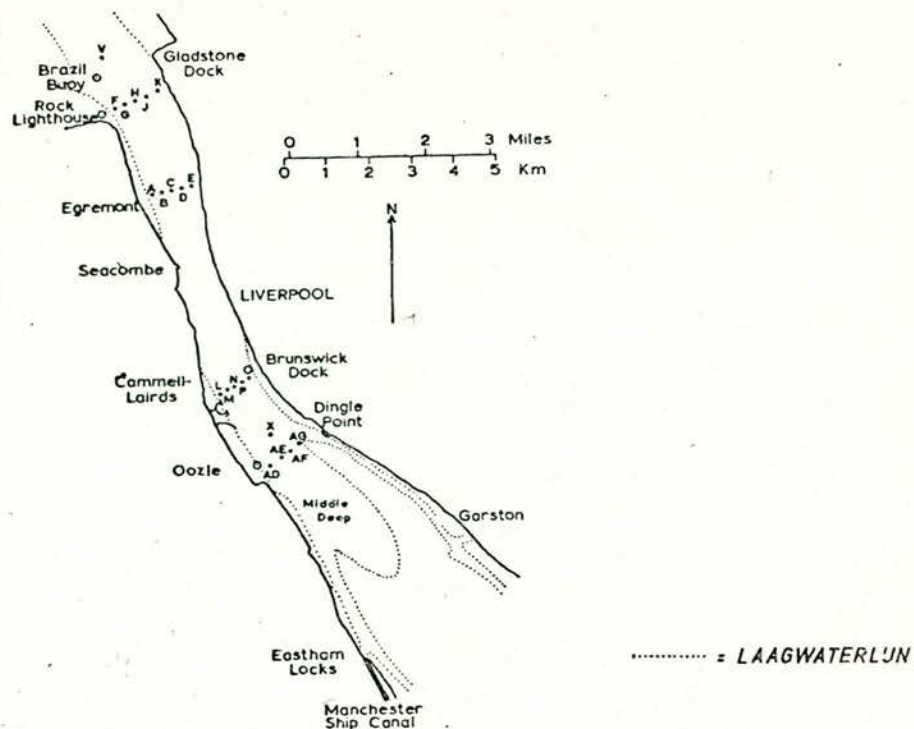
NETTO TRANSPORT
PER GETIJPERIODE

UIT : [6]

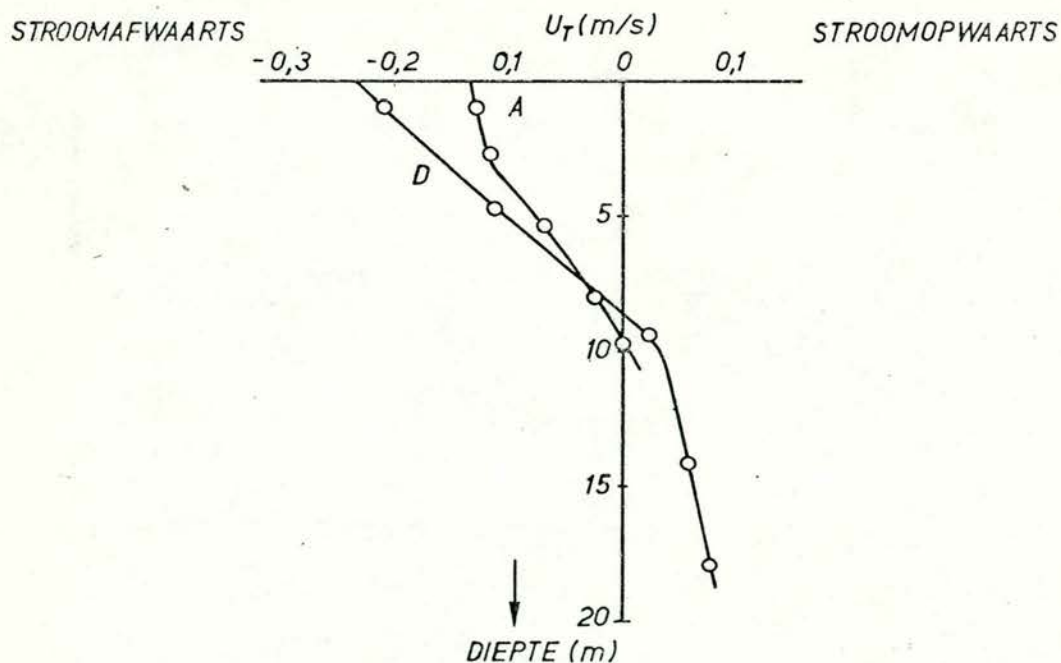
THAMES ESTUARUM
VERLOOP SUSPENTIE-TRANSPORT OVER DE DOORSNEDE
ALS FUNKTIE VAN DE GETUSLAG TE LONG REACH

[Faint, illegible text covering the majority of the page, possibly bleed-through from the reverse side.]

<p><i>[Faint text in the bottom left corner, possibly a date or reference number.]</i></p>	<p><i>[Faint text in the bottom middle section.]</i></p>	<p><i>[Faint text in the bottom right corner.]</i></p>
--	--	--



a) PLATTEGROND MERSEY NARROWS MET MEETSTATIONS



b) RESIDUELE STROMINGEN, GEMETEN IN DE STATIONS A EN D

UIT: [35]

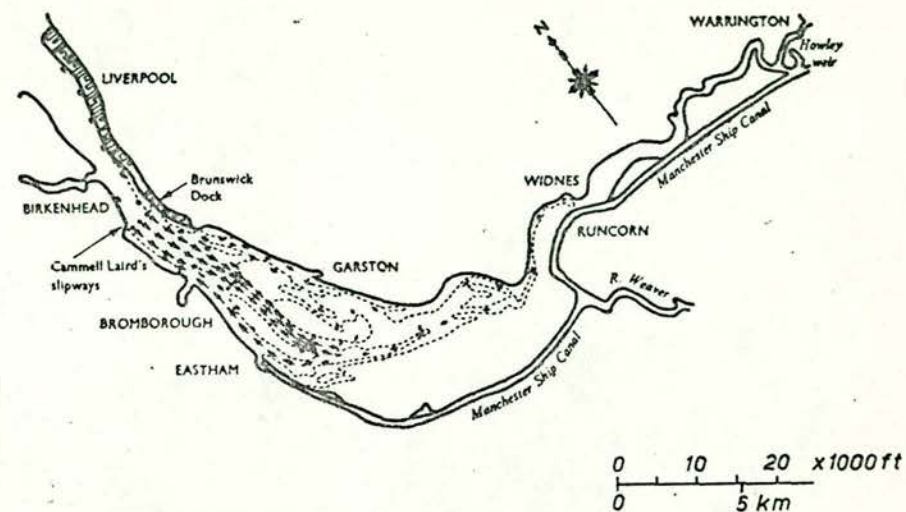
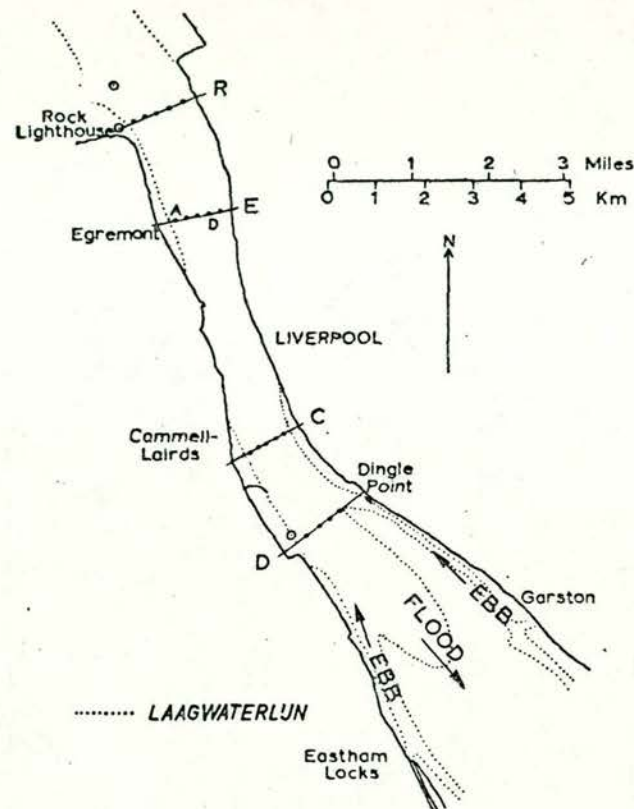
MERSEY ESTUARIUM
INVLOED VARIATIE DIEPTE OVER DE DOORSNEDE
OP HET SNELHEIDSPROFIEL

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M896-2961

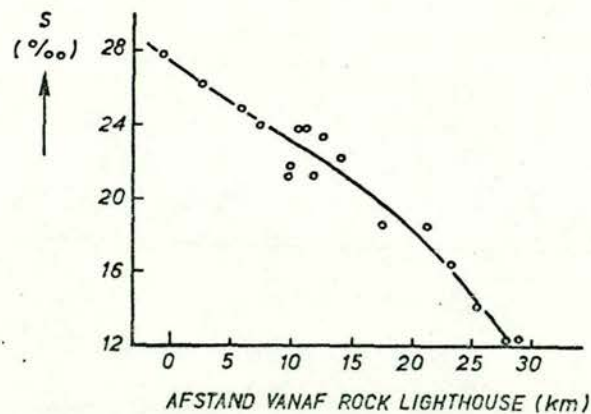
FIG.8-5

A4



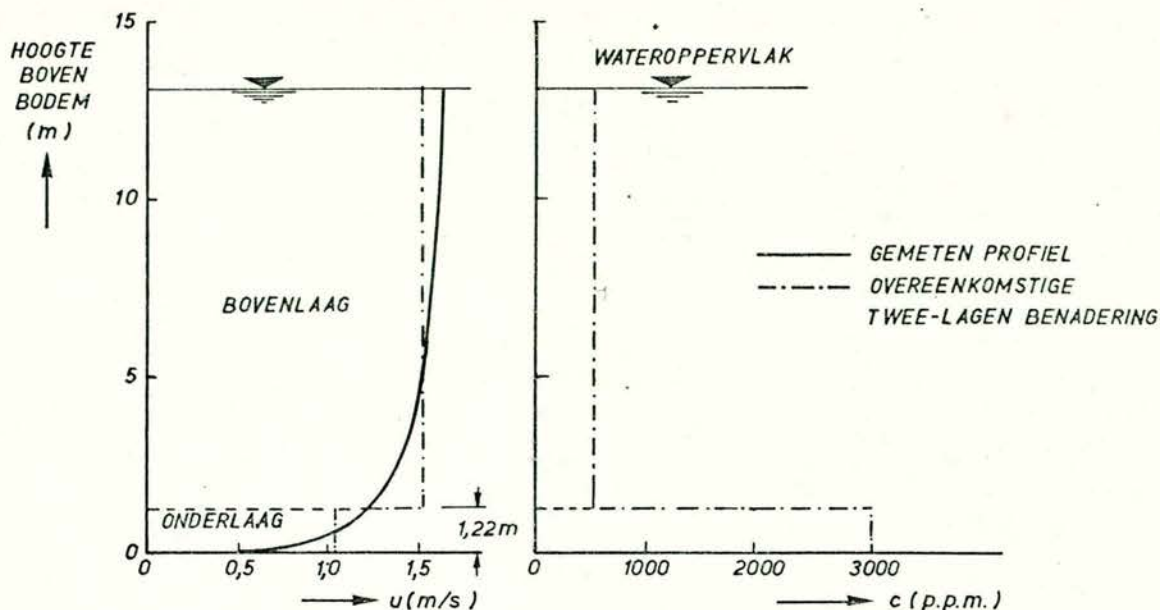
RESULTATEN IN HYDRAULISCH MODEL UITGEVOERDE
TRACERPROEVEN OM STROMINGSPATRONEN IN EB- EN
VLOEDKANALEN VAST TE LEGGEN

a) PLATTE GROND MERSEY NARROWS MET EB- EN VLOEDKANALEN

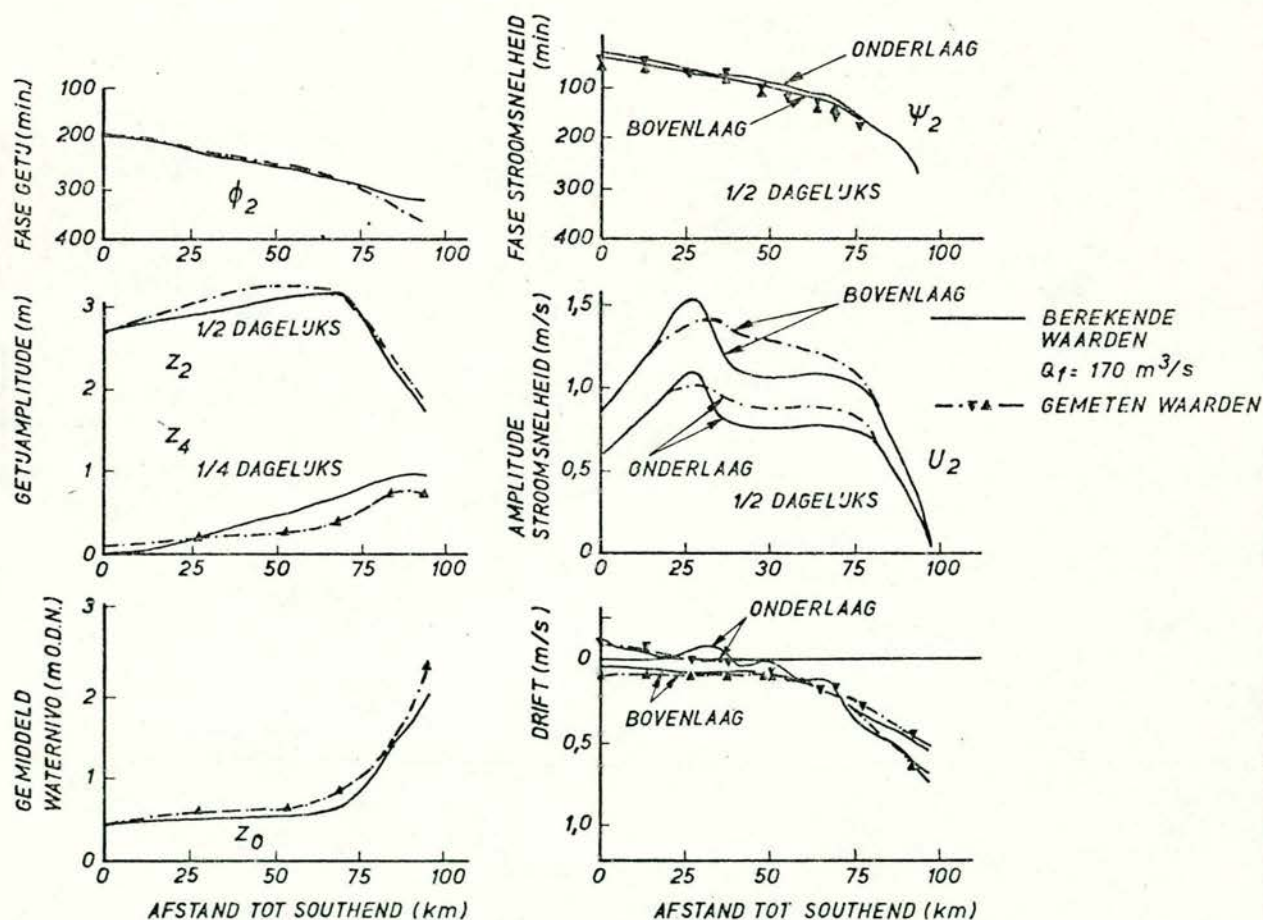


c. LONGITUDINALE ZOUTVERDELING
AAN HET OPPERVLAKE (24 april 1967)

UIT: [35], [36]



a. SCHEMATISATIE VAN SNELHEID EN CONCENTRATIE GESUSPENDEERDE DEELTJES IN TWEE LAGEN-MODEL

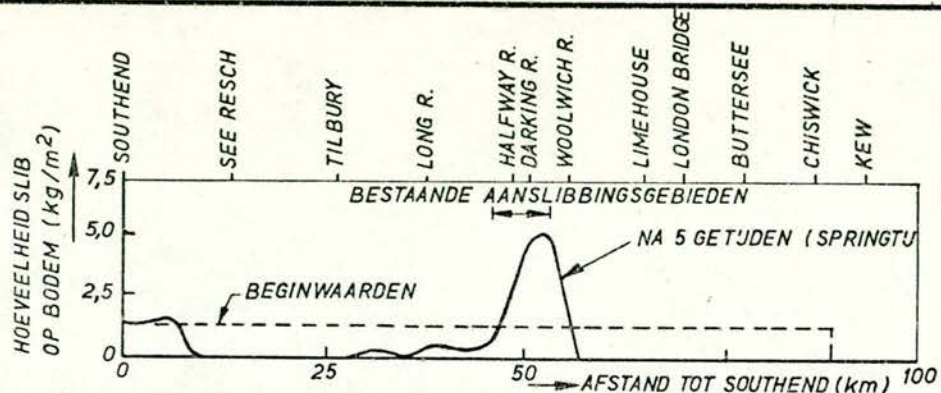


b) VERGELUKING BEREKENDE EN GEMETEN WAARDEN VOOR GETIJ EN STROOMSNELHEDEN. (SPRINGTIJ)

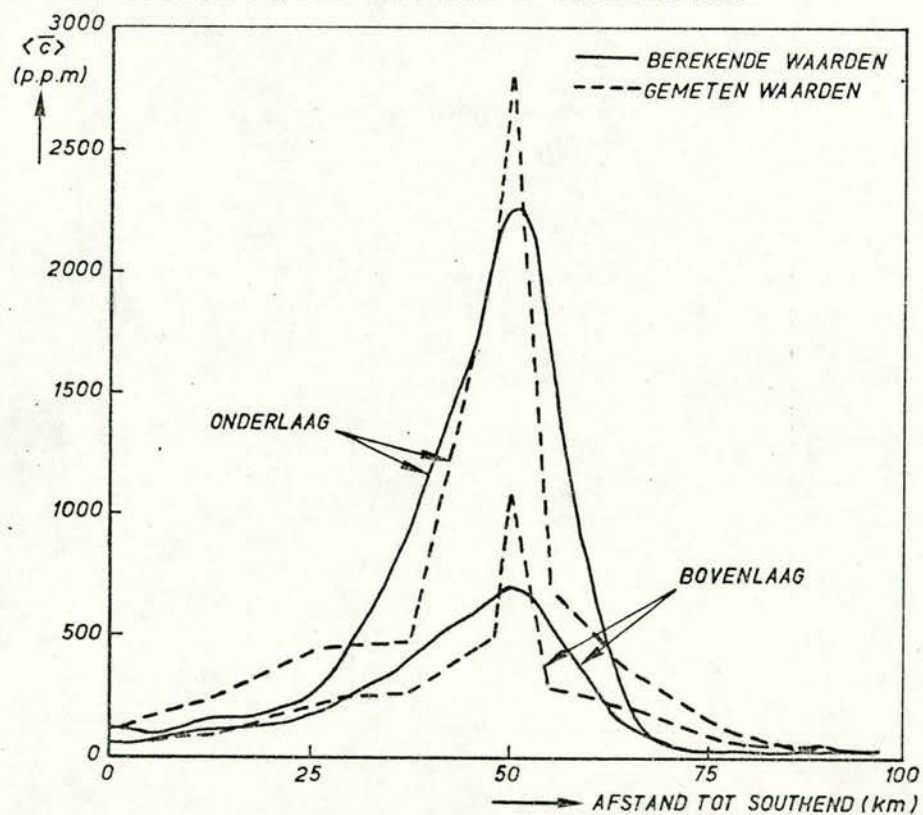
UIT : [15]

VERGELIJKING BEREKENDE EN GEMETEN SLIBCON-
CENTRATIES VOOR TWEE-LAGEN MODEL VAN DE THAMES

A4

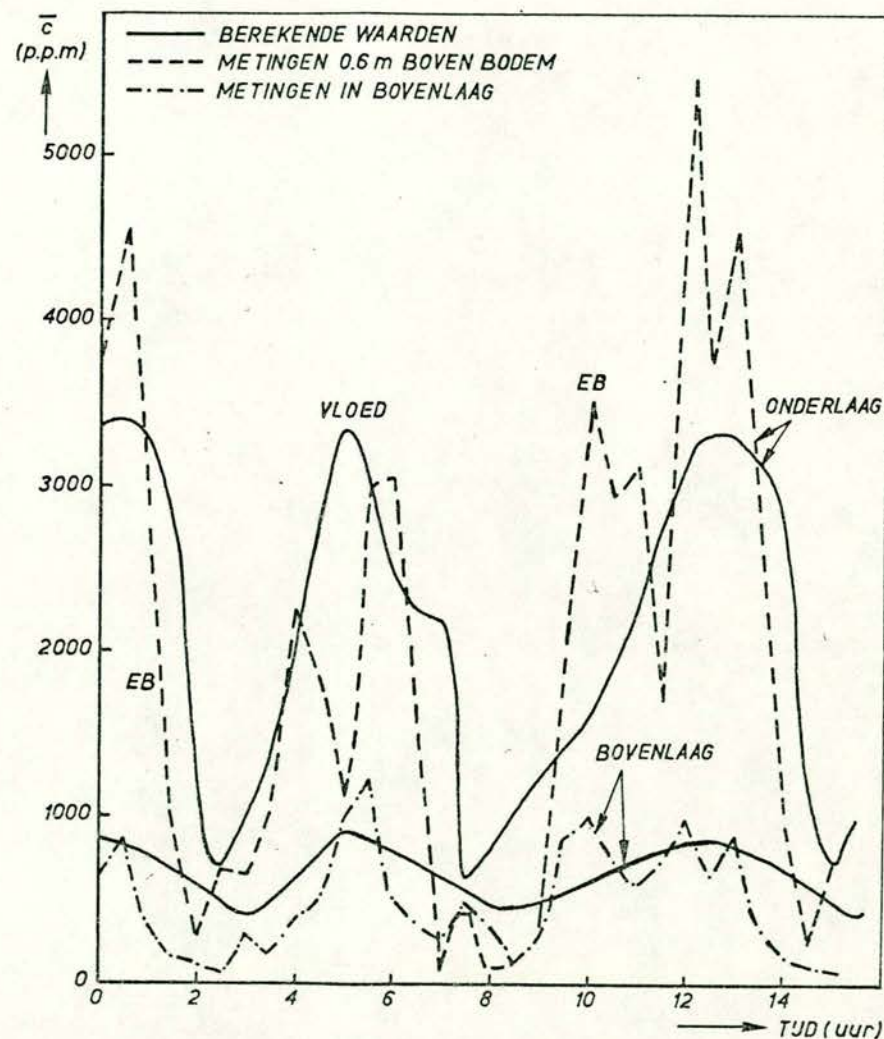


a.) BEREKENING INVLOED GETJDEN OP SLIBVERDELING



b.) LONGITUDINALE VERDELING VAN OVER HET GETJ
GEMIDDELTE CONCENTRATIE GESUSPENDEERDE DEELTJES
(SPRINGTJ)

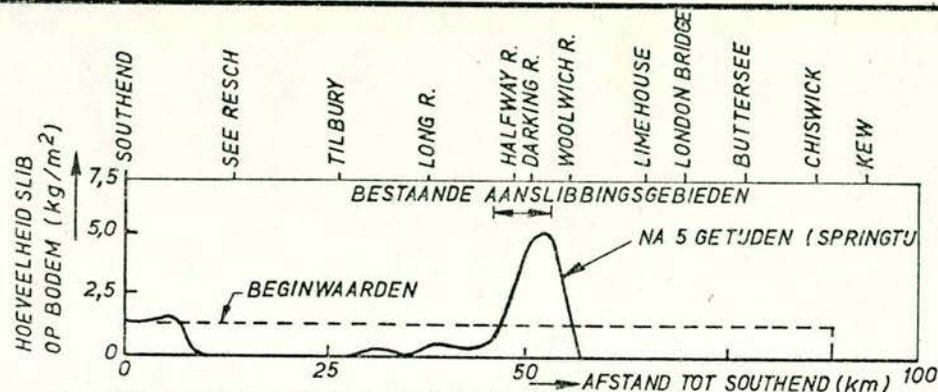
UIT: [15]



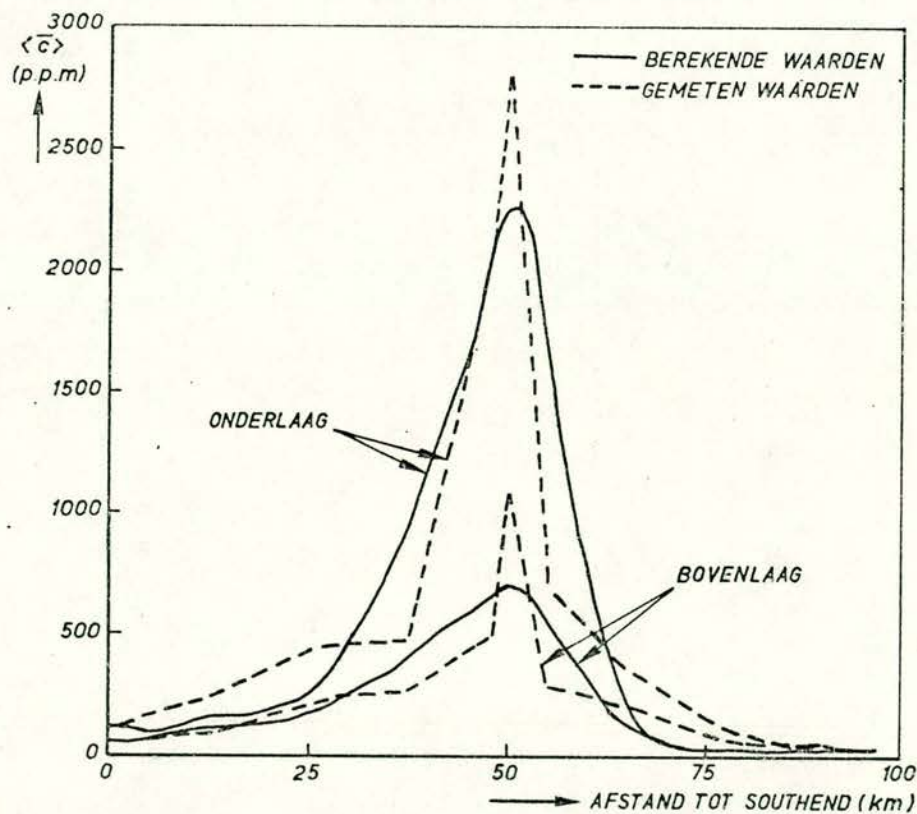
c. VERLOOP VAN CONCENTRATIE GESUSPENDEERDE DEELTJES
OVER DE GETJPERIODE TE HALFWAY REACH
(SPRINGTJ)

VERGELIJKING BEREKENDE EN GEMETEN SLIBCON-
CENTRATIES VOOR TWEE-LAGEN MODEL VAN DE THAMES

A4

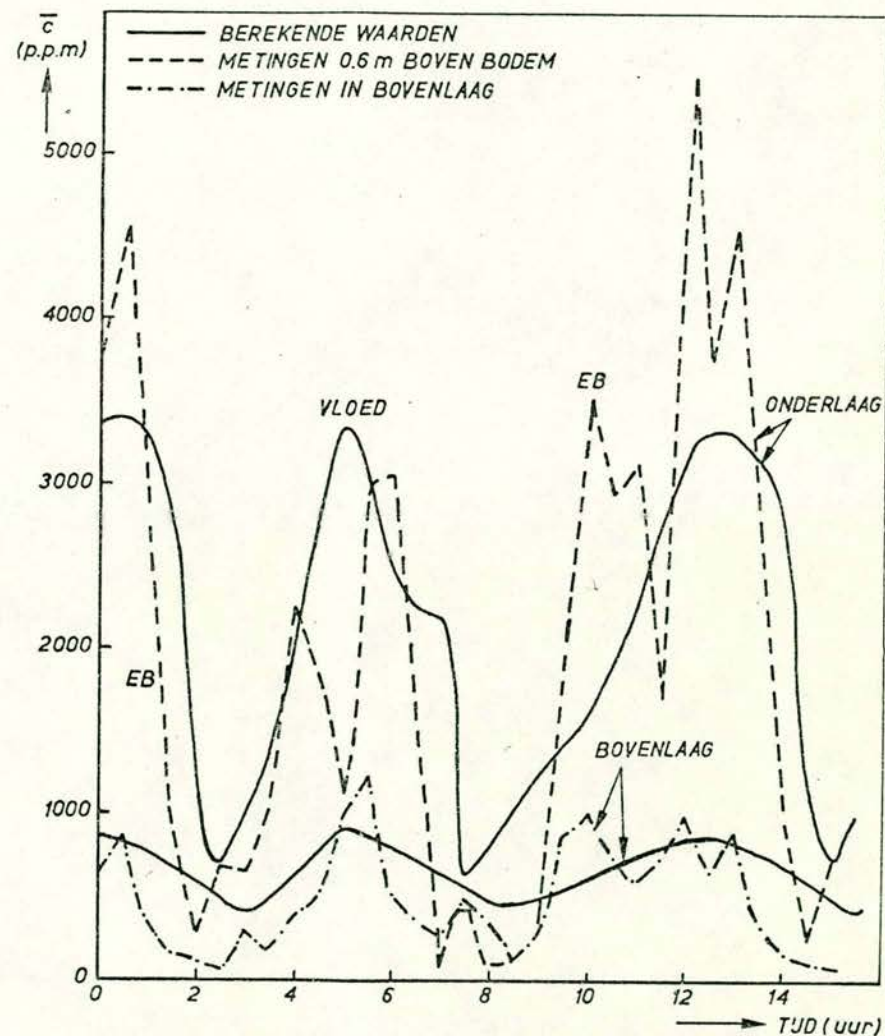


a.) BEREKENING INVLOED GETJDEN OP SLIBVERDELING

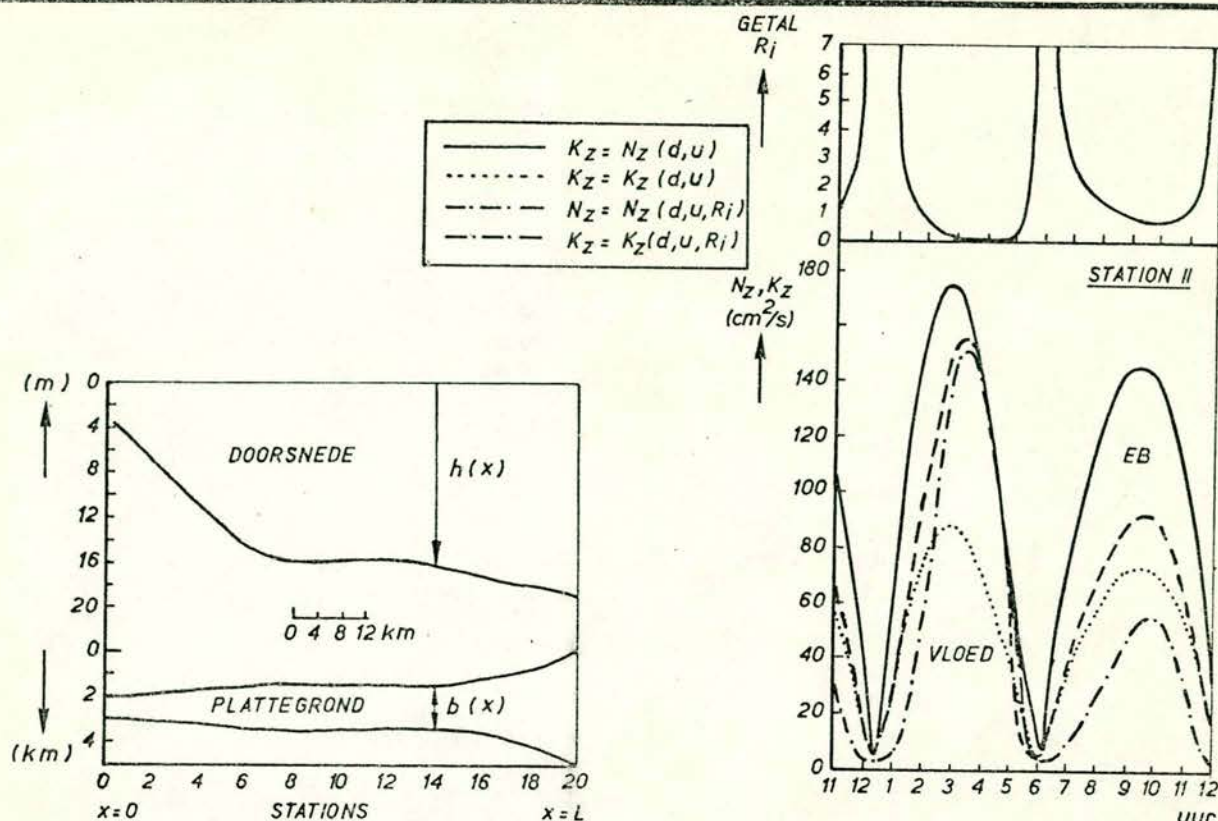


b) LONGITUDINALE VERDELING VAN OVER HET GETJ
GEMIDDELDE CONCENTRATIE GESUSPENDEERDE DEELTJES
(SPRINGTJ)

UIT : [15]

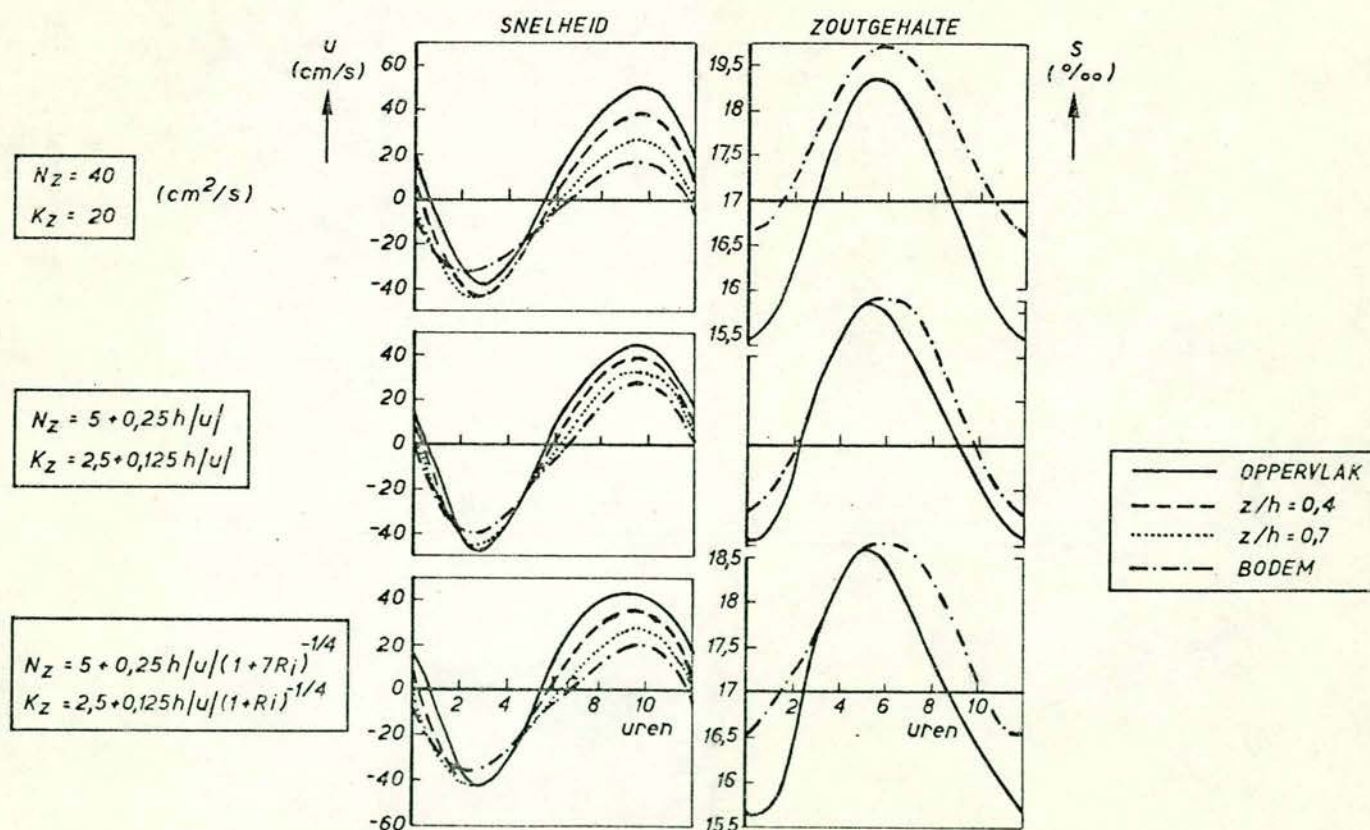


c. VERLOOP VAN CONCENTRATIE GESUSPENDEERDE DEELTJES
OVER DE GETJPERIODE TE HALFWAY REACH
(SPRINGTJ)



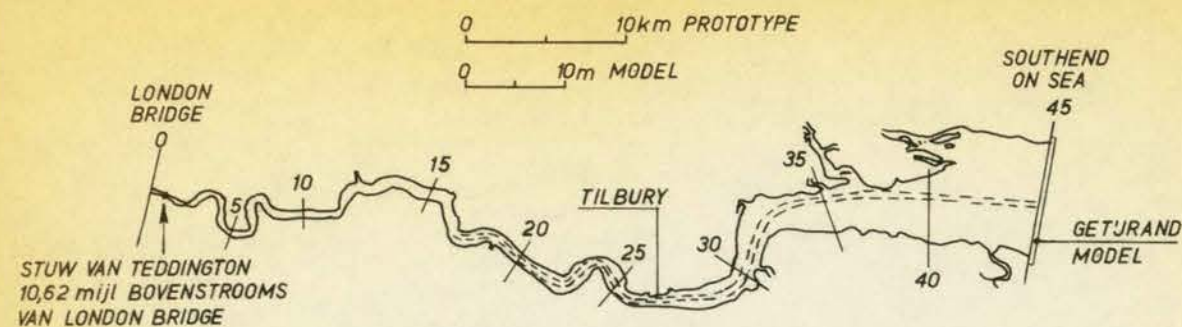
(a) GEOMETRIE HYPOTETISCH ESTUARIUM

(b) VERLOOP VAN N_z , N_z , R_i OVER DE GETYPERIODE

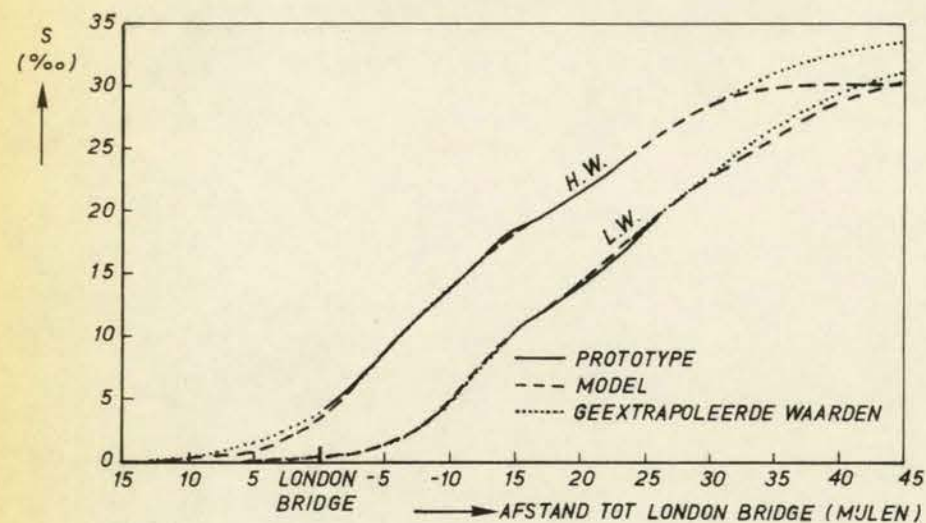


c. BEREKENDE SNELHEDEN EN ZOUTGEHALTES ALS FUNKTIE VAN DE TIJD BIJ VARIATIE VAN DE UITWISSELINGSCOEFFICIENTEN

RESULTATEN 2D-BEREKENINGEN VOOR EEN
HYPOTHETISCH ESTUARIUM



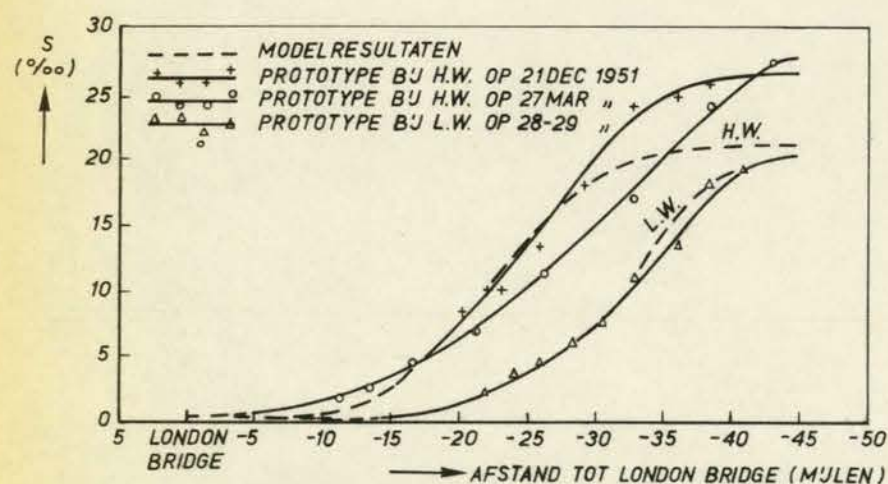
(a) PLATTEGROND MODEL - $\lambda_l = 3000$, $\lambda_h = 120$



$Q_f = 19 \text{ m}^3/\text{s}$

(c) VERGELIJING LONGITUDINALE ZOUTVERDELING IN MODEL EN PROTOTYPE

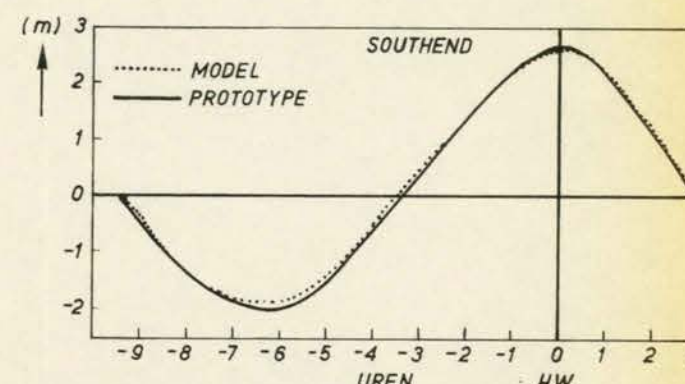
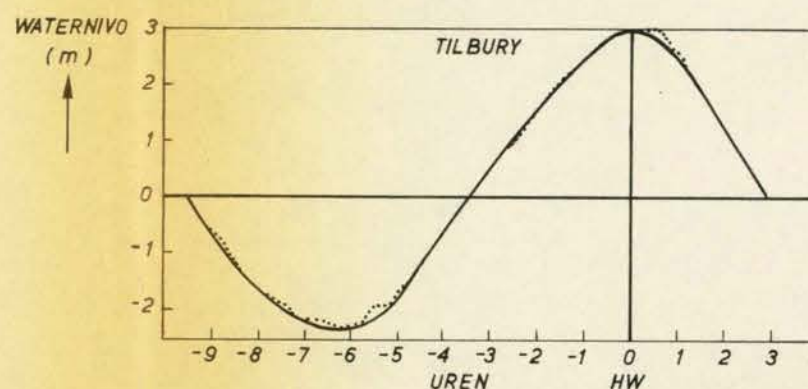
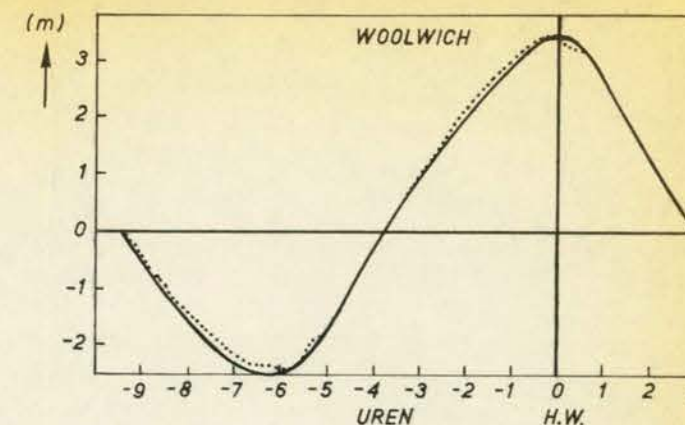
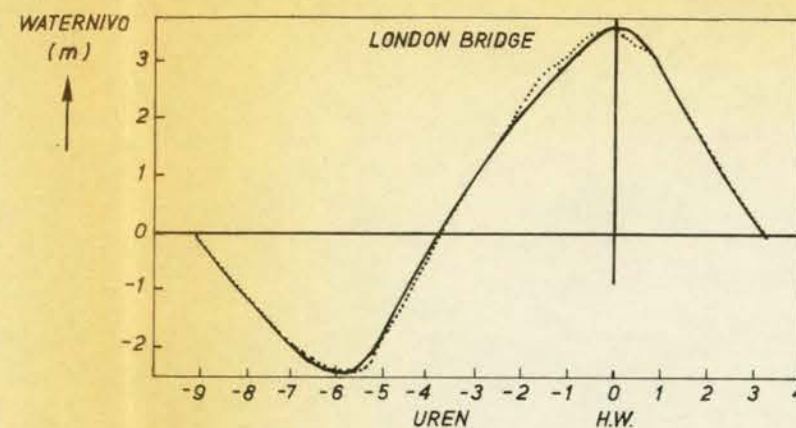
MODELSCHALEN $\lambda_L = 3000$
 $\lambda_h = 120$



$Q_f = 210 \text{ m}^3/\text{s}$

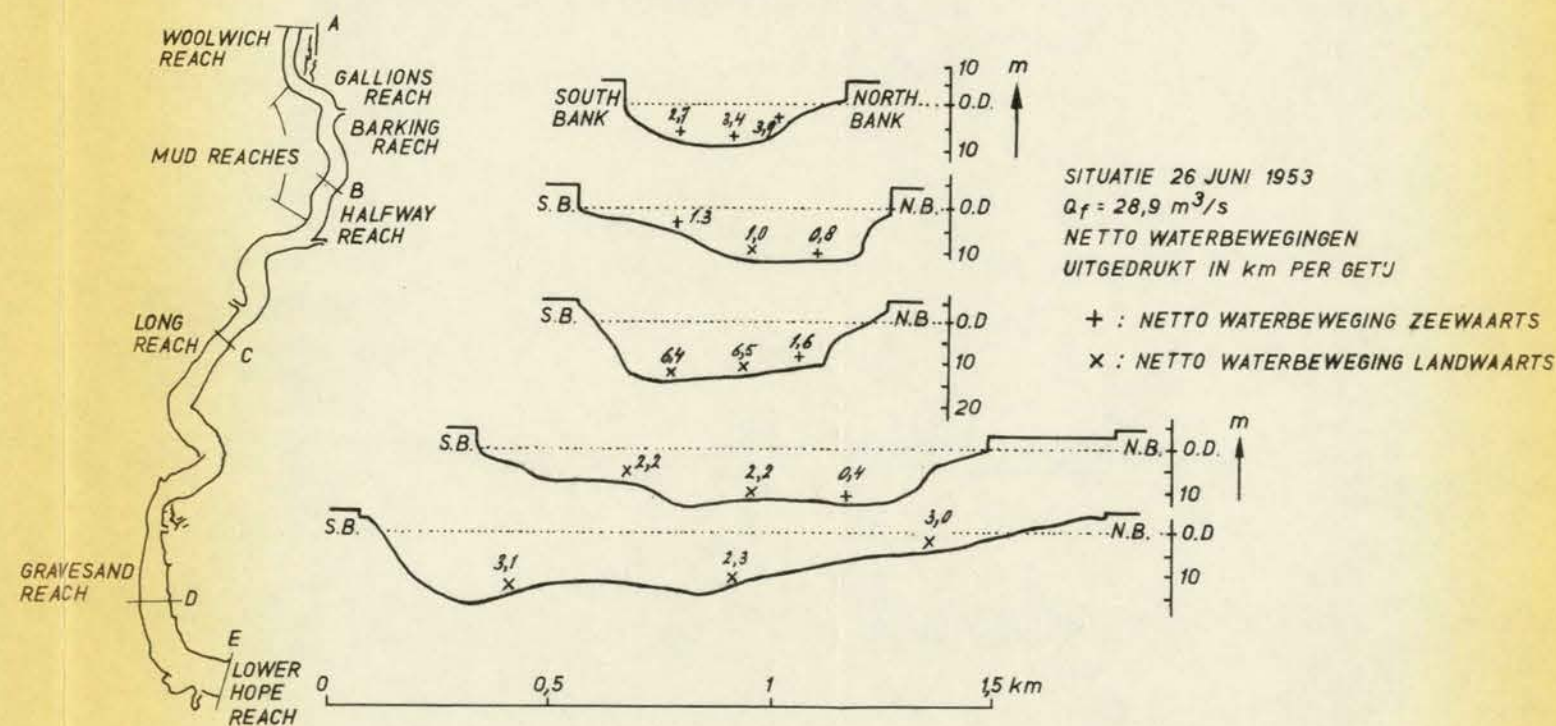
(d) VERGELIJING LONGITUDINALE ZOUTVERDELING IN MODEL EN PROTOTYPE

MODELSCHALEN $\lambda_L = 3000$
 $\lambda_h = 120$



b. VERGELIJING GETJUKROMMEN IN MODEL EN PROTOTYPE

MODEL $\lambda_L = 3000$
 $\lambda_h = 120$



e. NETTO WATERBEWEGINGEN BIJ DE BODEM IN THAMES MODEL

MODELSCHALEN $\lambda_L = 6000$
 $\lambda_h = 120$

THAMES ESTUARIUM
RESULTATEN MODELONDERZOEK

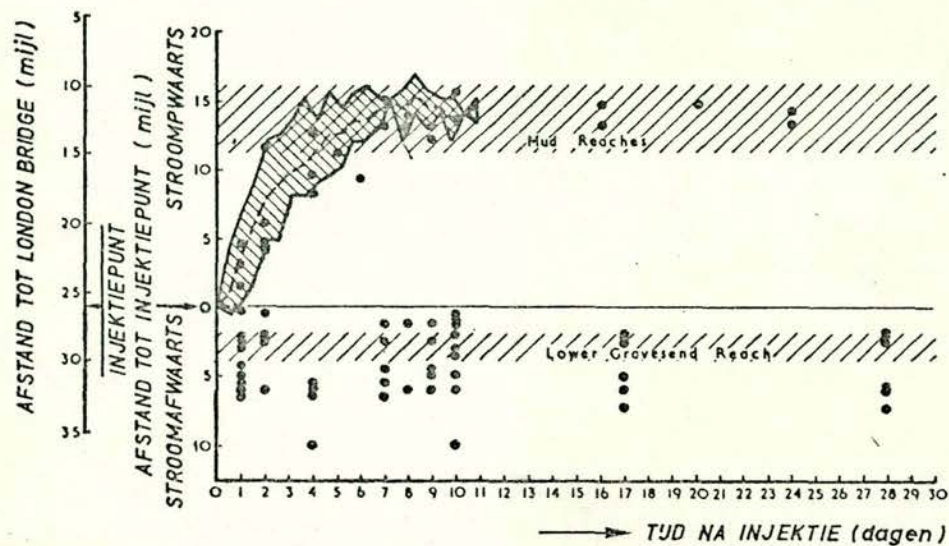
A3

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M896-2966

FIG.11-1

UIT : [6]



● BELANGRIJKE TOENAME IN RADIOAKTIVITEIT BIJ DE BODEM VAN HET ESTUARIUM NA TRACER-INJEKTIE IN PROTOTYPE

----- GEMIDDELDE POSITIE CELLULOID BALLEN IN MODEL TJDENS H.W.

////// BAND, WAARBINNEN DE CELLULOID BALLEN ZICH BEVINDEN IN HET MODEL TJDENS H.W.

////// AANSLIBBINGSGBIED IN PROTOTYPE

UIT : [140]

THAMES ESTUARIUM
VERGELIJING BEWEGINGEN VAN CELLULOID BALLEN
IN MODEL EN RADIOACTIEVE TRACERS IN PROTOTYPE

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

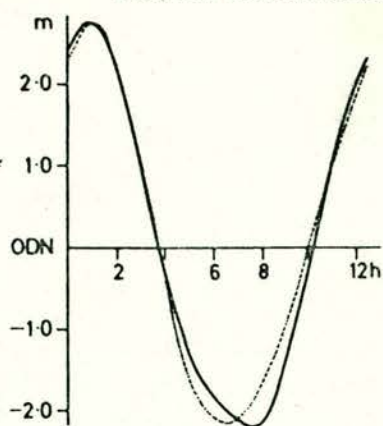
M896-2967

FIG.11-2

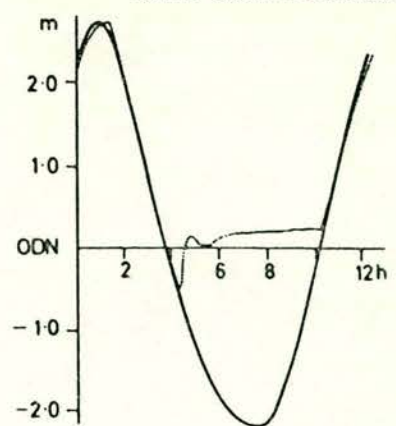
A4

GETIJ

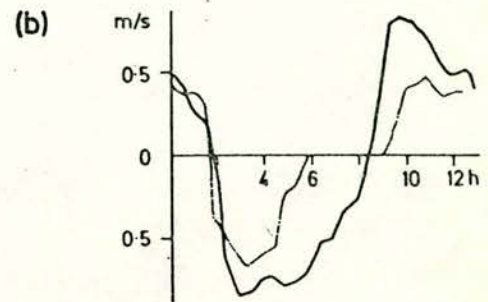
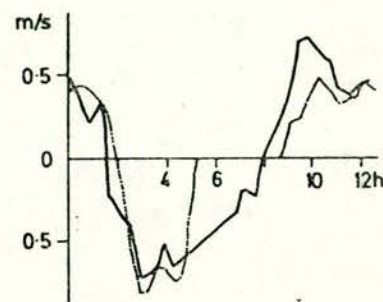
BENEDEN STORMVLOEDKERING



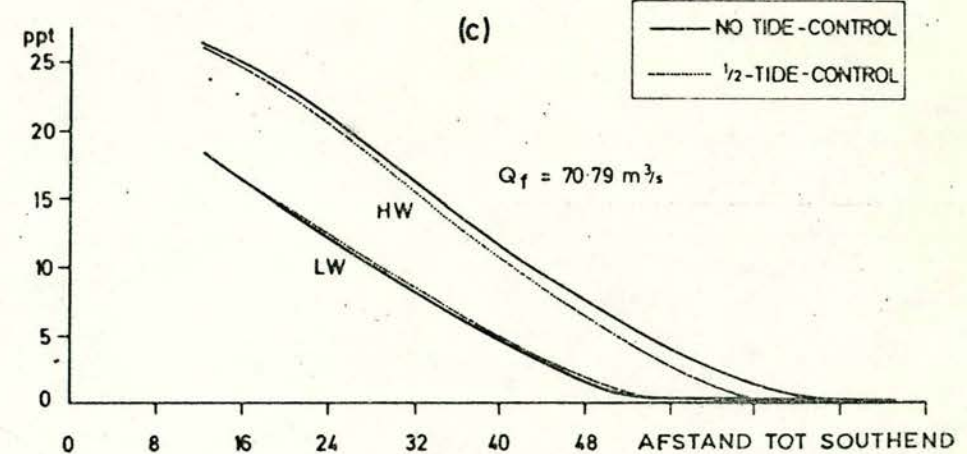
BOVEN STORMVLOEDKERING



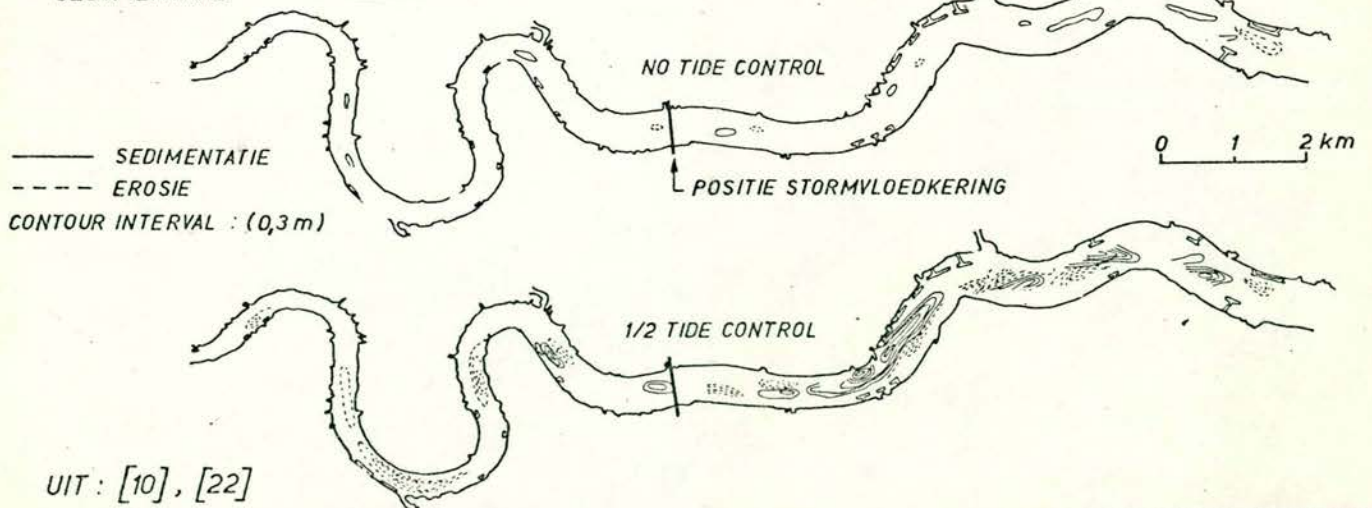
STROOMSNELHEID



LONGITUDINALE
ZOUTVERDELING



EROSIE EN
SEDIMENTATIE



UIT : [10], [22]

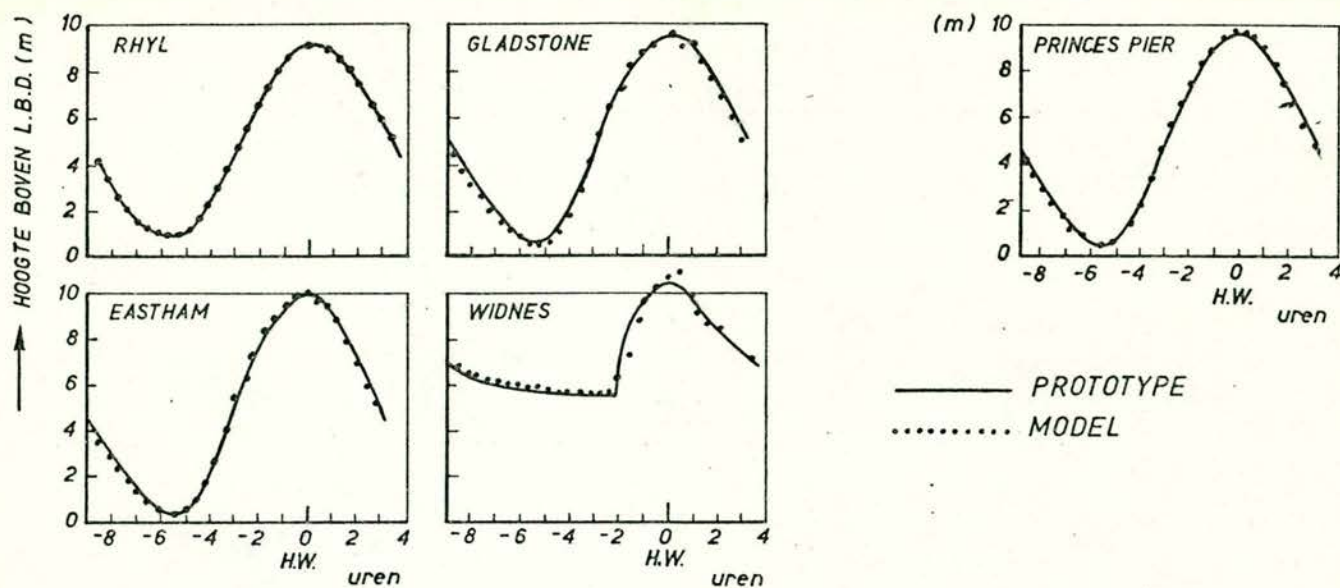
THAMES ESTUARIUM
INVLOED STORMVLOEDKERING OP RIVIER
(RESULTATEN MODELONDERZOEK)

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

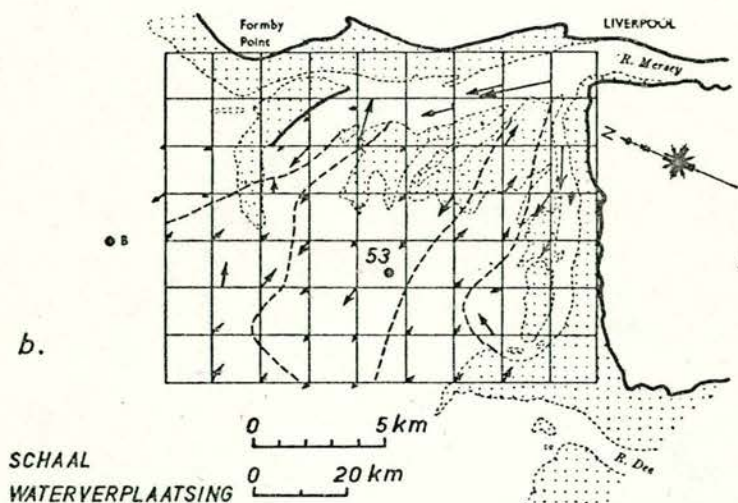
M896-2968

FIG.11-3

A4

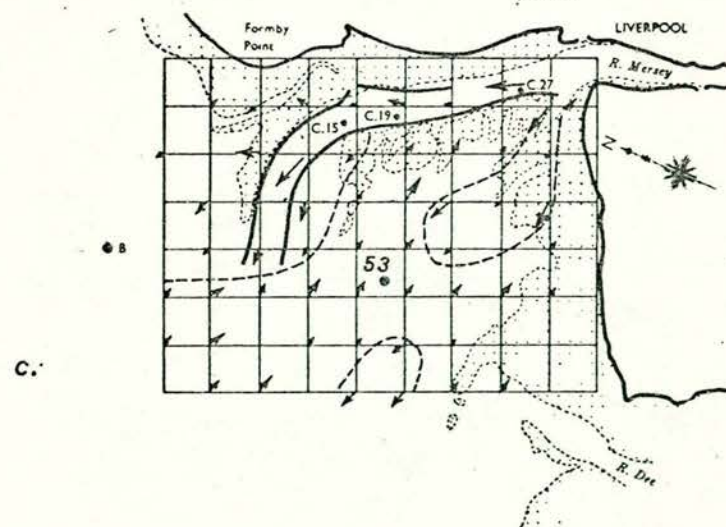


a. GETJUKROMMEN : VERGELUKING MODEL EN PROTOTYPE



SITUATIE 1911

SITUATIE 1911



SITUATIE 1957

SITUATIE 1957

b.c. NETTO WATERVERPLAATSINGEN PER GETJ BIJ DE BODEM, VOLGEND UIT HYDRAULISCH MODEL

UIT: [36]

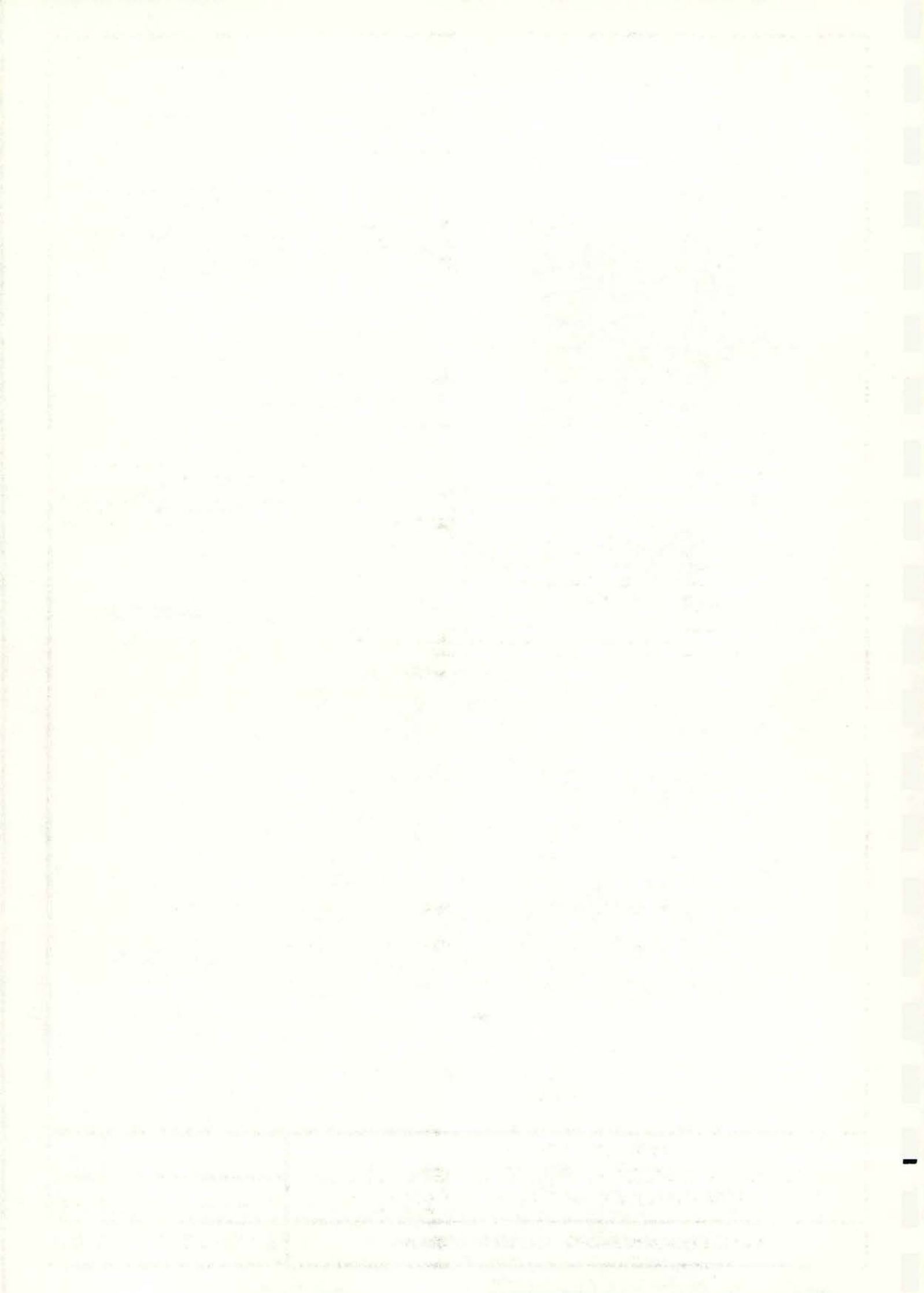
MERSEY ESTUARIUM
RESULTATEN MODEL PROEVEN $\left(\begin{array}{l} \lambda_L = 3200 \\ \lambda_h = 120 \end{array} \right)$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

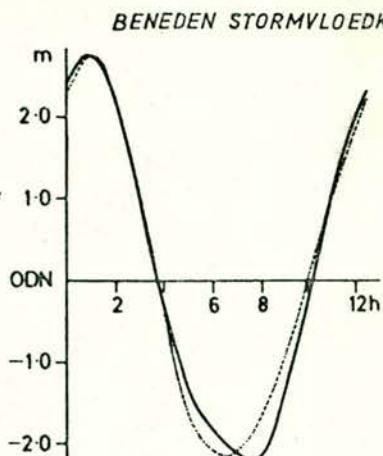
M896-2969

FIG. 11-4

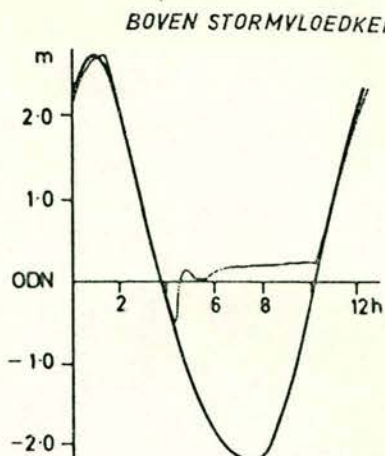
A4



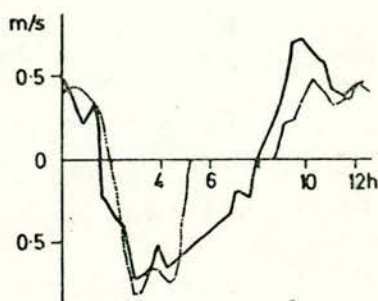
GETIJ



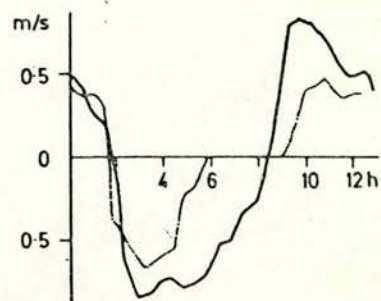
(a)



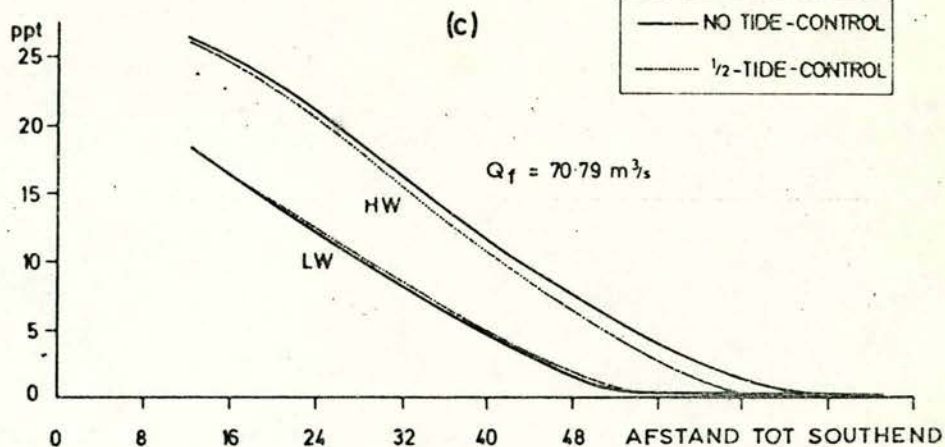
STROOMSNELHEID



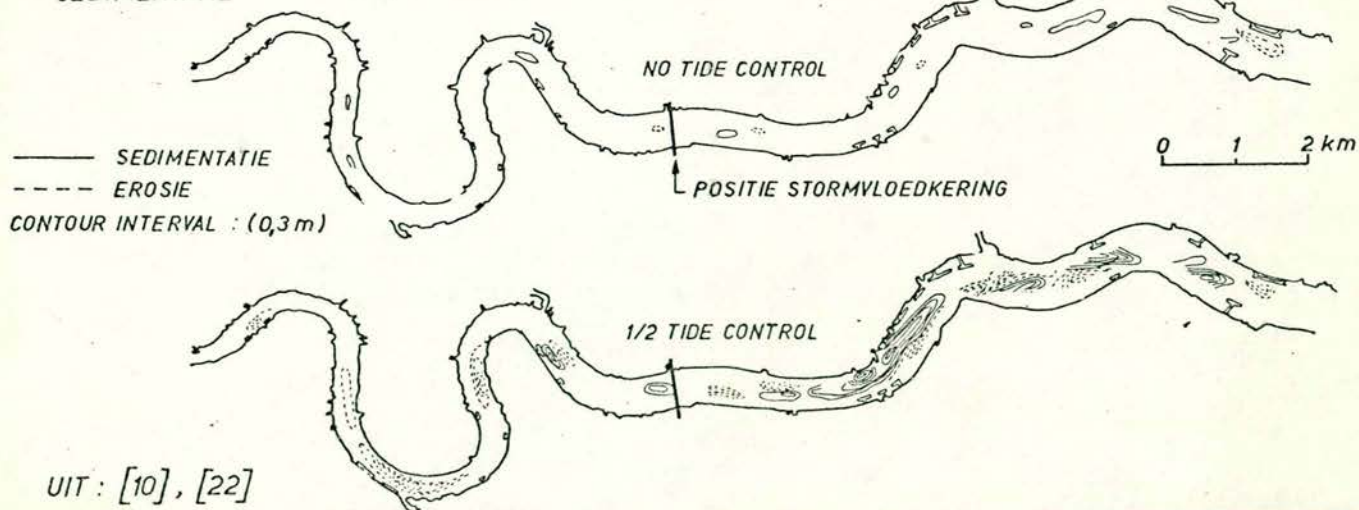
(b)



LONGITUDINALE
ZOUTVERDELING



EROSIE EN
SEDIMENTATIE



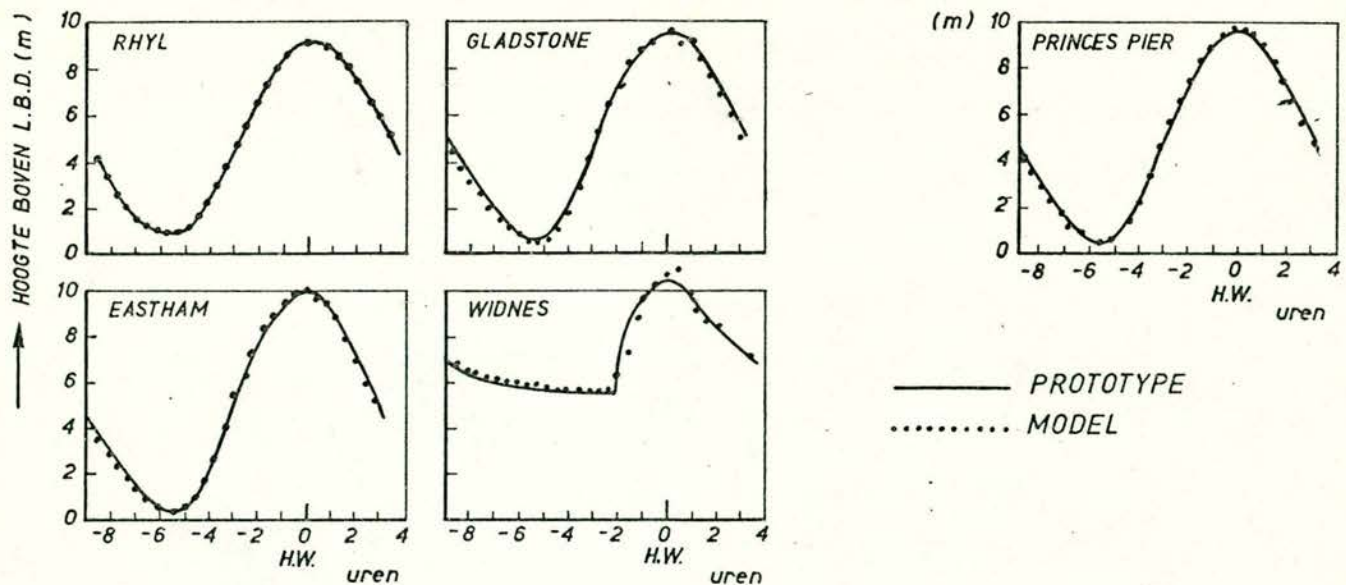
THAMES ESTUARIUM
INVLOED STORMVLOEDKERING OP RIVIER
(RESULTATEN MODELONDERZOEK)

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

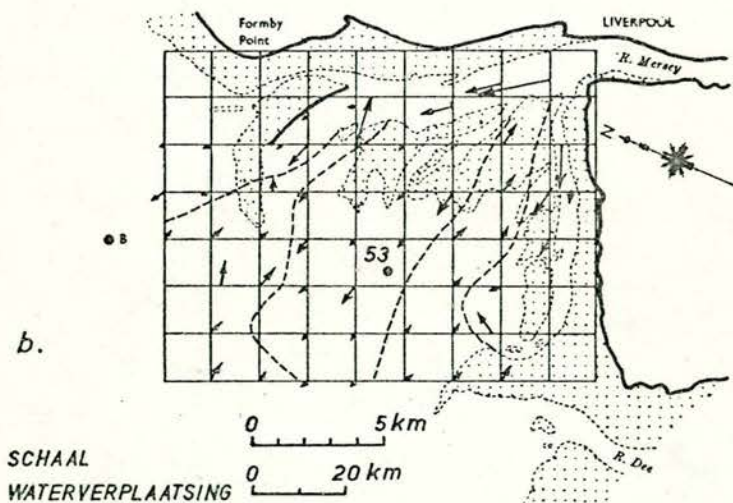
M896-2968

FIG.11-3

A4

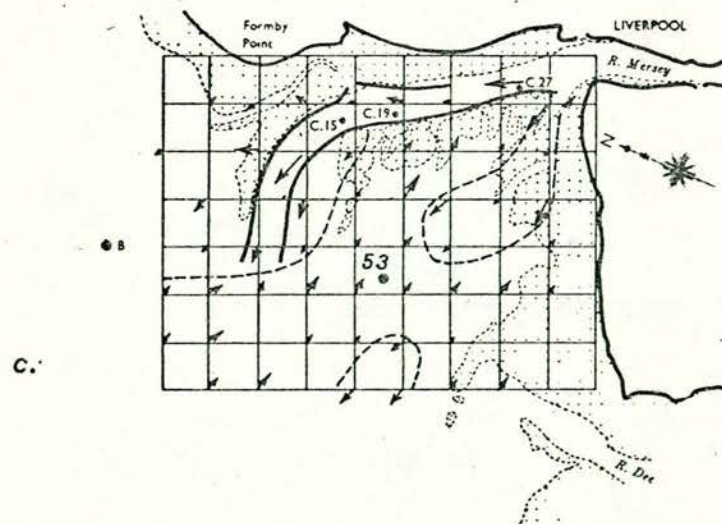


a. GETUJKROMMEN : VERGELUKING MODEL EN PROTOTYPE



SITUATIE 1911

SITUATIE 1911



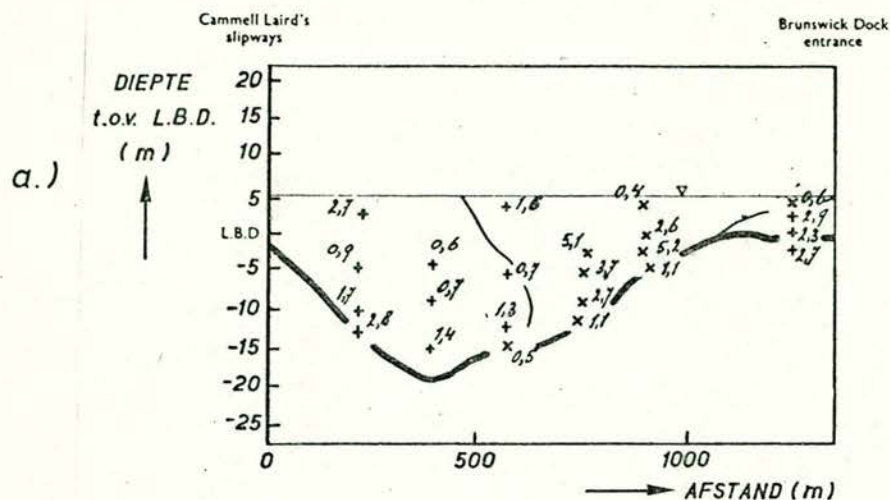
SITUATIE 1957

SITUATIE 1957

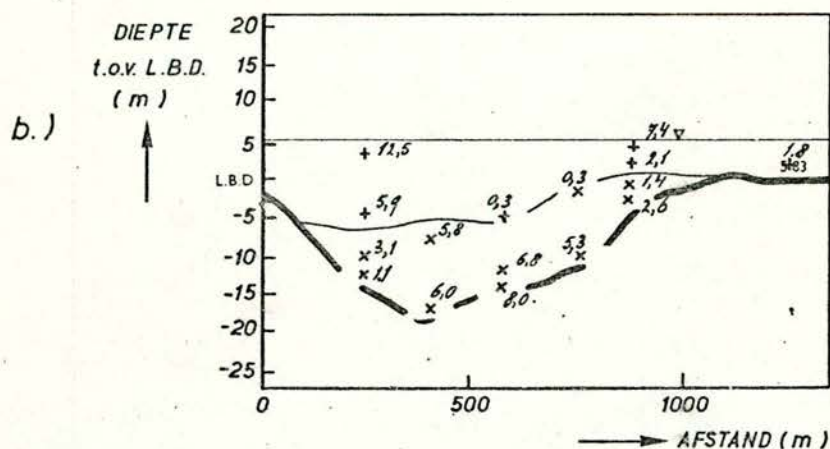
b.c. NETTO WATERVERPLAATSINGEN PER GETIJ BIJ DE BODEM, VOLGEND UIT HYDRAULISCH MODEL

UIT: [36]

MERSEY ESTUARIUM
RESULTATEN MODEL PROEVEN $\left(\begin{array}{l} \lambda_L = 3200 \\ \lambda_h = 120 \end{array} \right)$



MODELRESULTATEN
ZONDER DICHTHEIDSVerschillen



MODELRESULTATEN
MET DICHTHEIDSVerschillen

+ NETTO ZEEWAARTSE WATERVERPLAATSING PER GETIJ (km)

x NETTO LANDWAARTSE WATERVERPLAATSING PER GETIJ (km)

$$Q_f = 51,8 \text{ m}^3/\text{s}$$

MERSEY ESTUARIUM

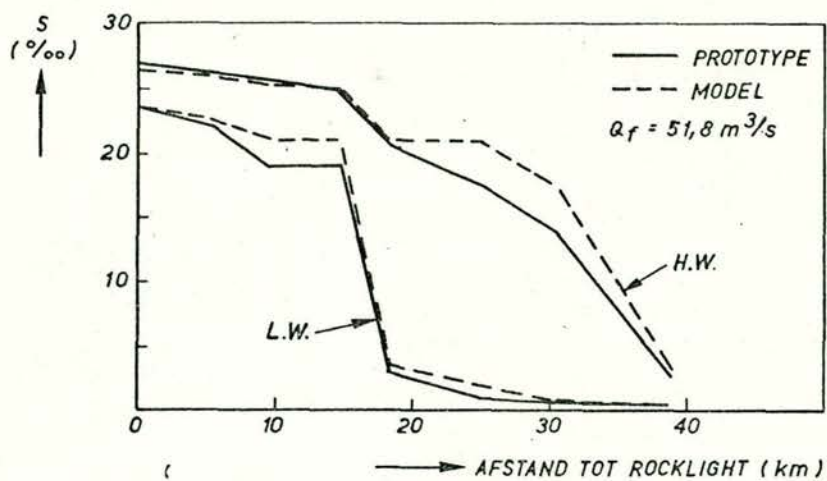
RESTSTROMEN IN MODEL VOOR PROEVEN MET EN ZONDER
DICHTHEIDSVerschillen IN HET MODEL ($\lambda_L = 550$
 $\lambda_L = 60$)

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

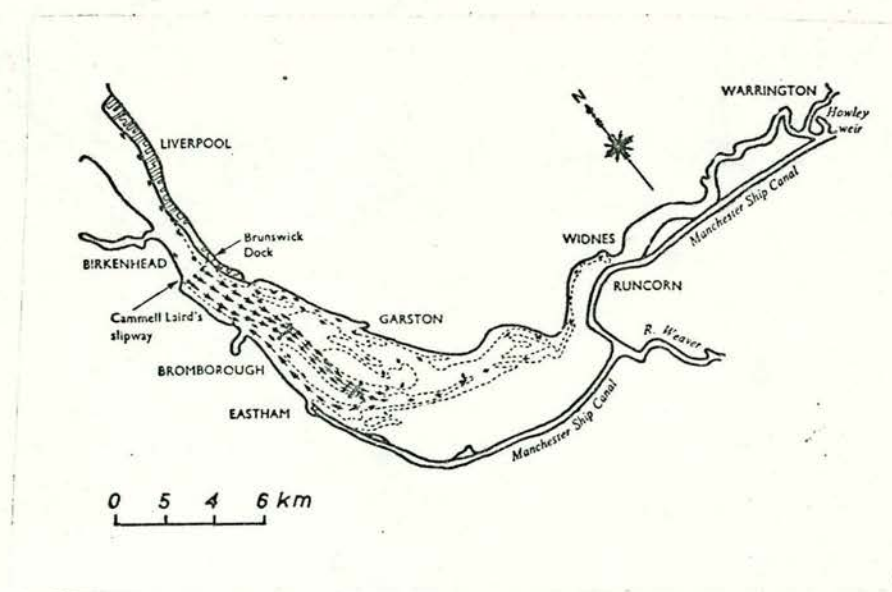
M896-2970

FIG.11-5

A4



α. LONGITUDINALE ZOUTVERDELING IN MODEL EN PROTOTYPE



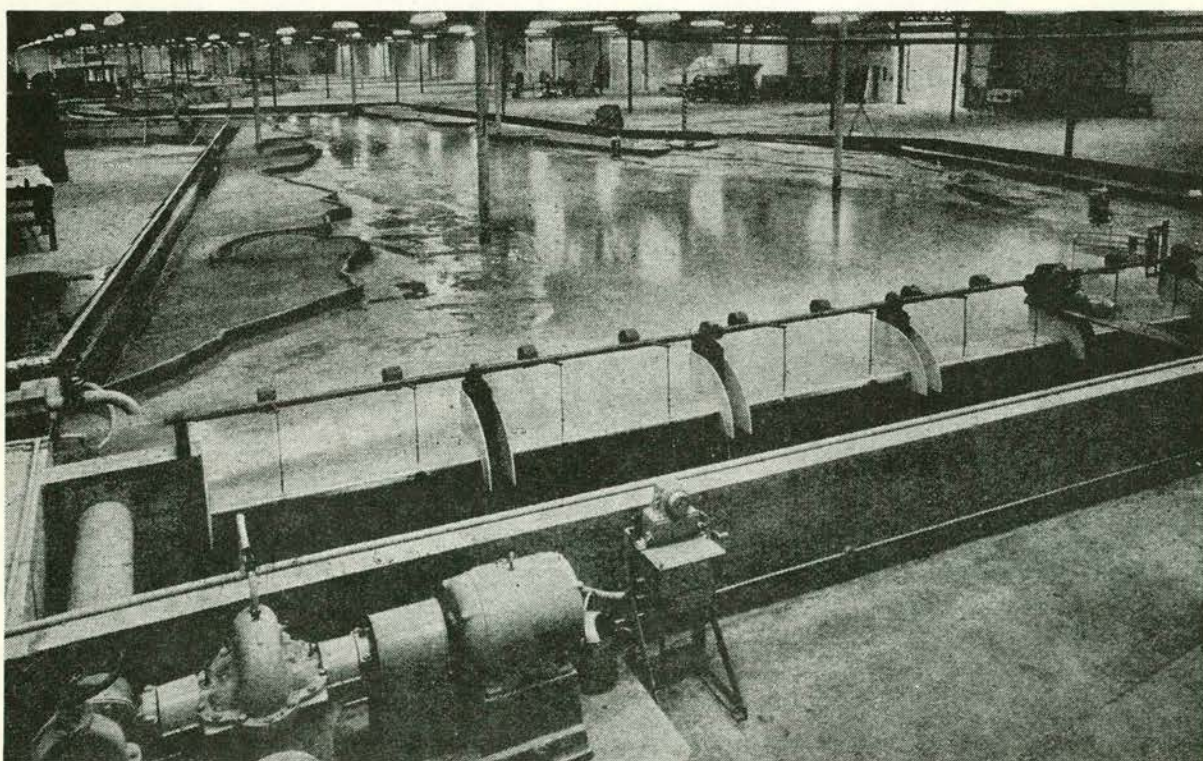
b. RESULTATEN TRACER PROEVEN

UIT : [36]

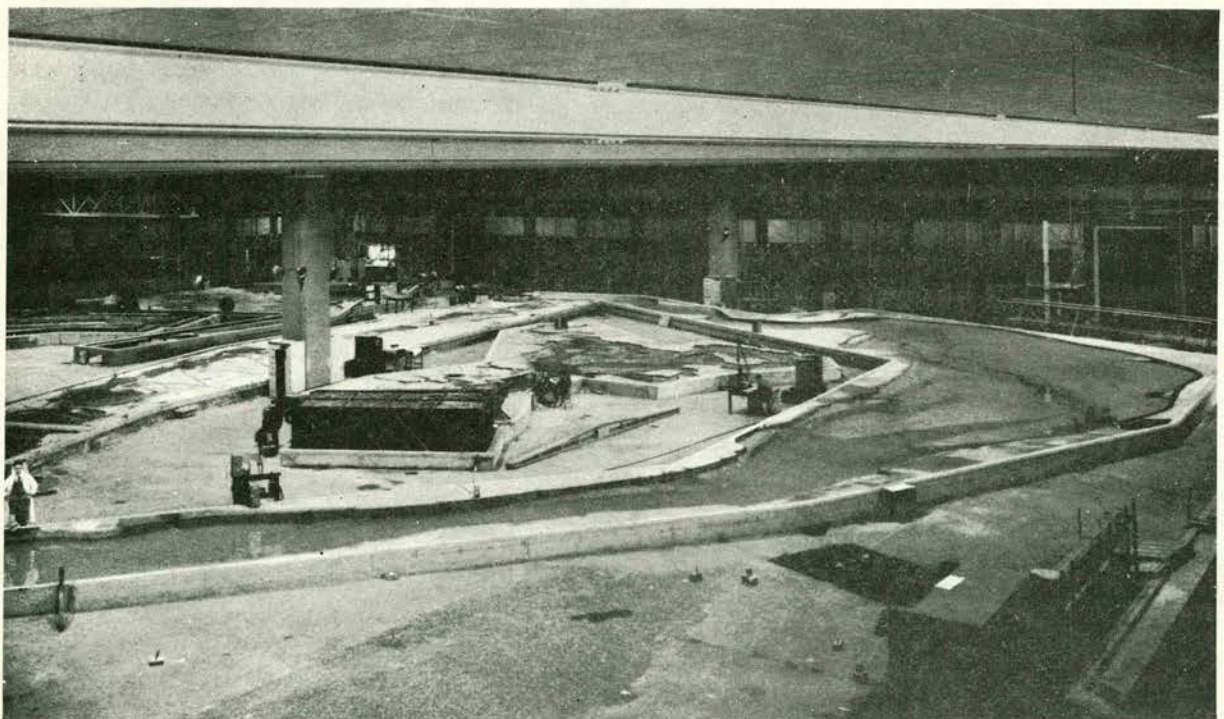
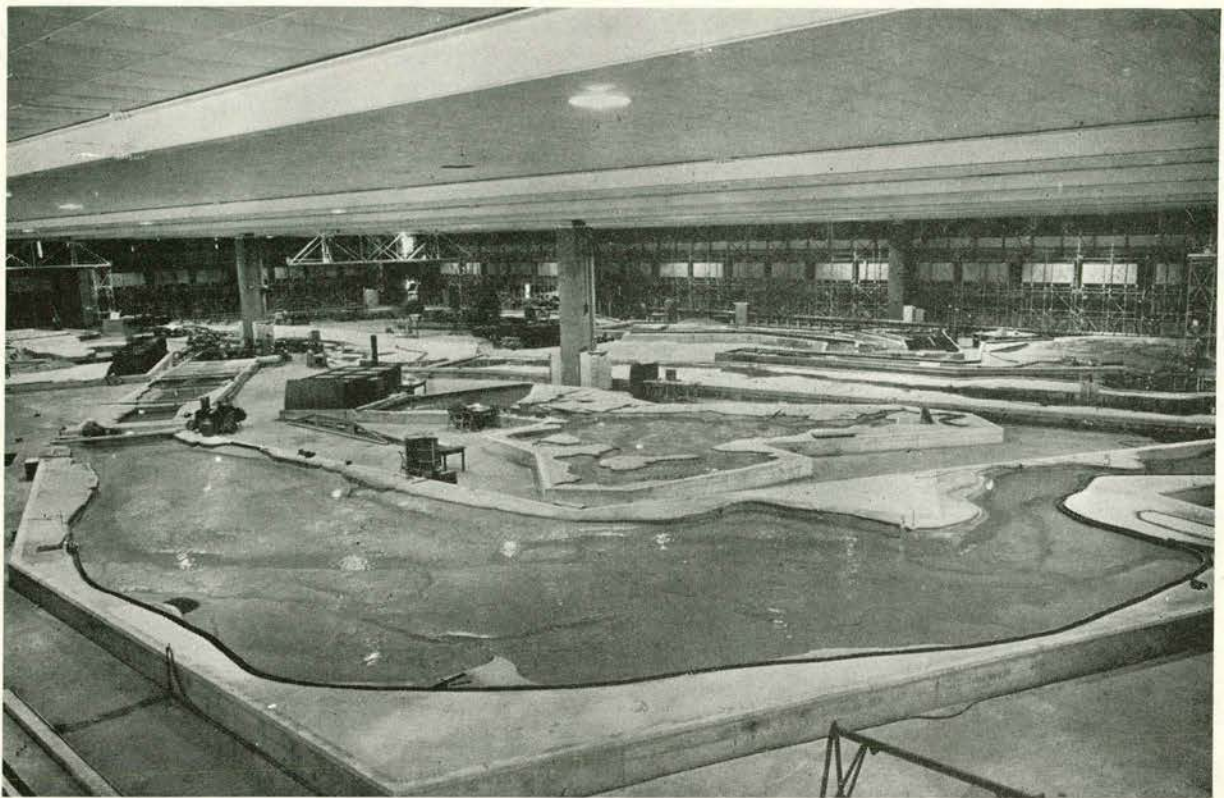
MERSEY ESTUARIUM
 RESULTATEN MODELPROEVEN $\left(\begin{matrix} \lambda_L = 550 \\ \lambda_h = 60 \end{matrix} \right)$



THAMES MODEL $\begin{cases} \lambda_1 = 600 \\ \lambda_h = 120 \end{cases}$; vanaf mile 20 (Long Reach)



THAMES MODEL $\begin{cases} \lambda_1 = 600 \\ \lambda_h = 60 \end{cases}$



MERSEY MODEL (Upper Estuary) $\left\{ \begin{array}{l} \lambda_1 = 550 \\ \lambda_h = 60 \end{array} \right.$

MERSEY MODEL

FOTOBŁAD 2

