

Rijkswaterstaat

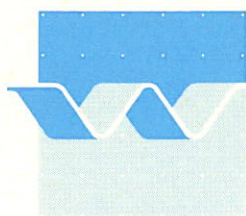
WBC

dimensionering bodemverdedigingen

de simulatie van het stroombeeld bij een plotselinge verwijding met behulp van een numeriek stromings model

Q 709
januari 1988

verslag modelonderzoek



dimensionering bodemverdedigingen

de simulatie van het stroombeeld bij een
plotselinge verwijding met behulp van een
numeriek stromings model

verslag modelonderzoek

F.A. van Beek

INHOUD

	blz.
1. <u>Inleiding</u>	1
2. <u>Probleemstelling</u>	2
3. <u>Berekeningen</u>	4
3.1 Stromingsmodel en randvoorwaarden.....	4
3.2 Drempel.....	5
3.3 Drempel met schuif.....	6
3.4 Beoordeling resultaten.....	6
3.5 Stabiliteit van de stortsteen.....	8
4. <u>Conclusies en aanbevelingen</u>	9

LITERATUUR

FIGUREN

BIJLAGE: ODYSSEE, a program system for the computation of complex
twodimensional turbulent flows

FIGUREN

- 1.1 Rekenroosters a en b, drempel
- 1.2 Rekenrooster c, drempel en schuif
- 2.1 Vectoren, geval a en b, drempel
- 2.2 Vectoren, geval c, drempel en schuif
- 3.1 Stroomlijnen, geval a en b, drempel
- 3.2 Stroomlijnen, geval c, drempel en schuif
- 4.1 Turbulente kinetische energie k, geval a en b, drempel
- 4.2 Turbulente kinetische energie k, geval c, drempel en schuif
- 5.1 Turbulente viscositeit, geval a en b, drempel
- 5.2 Turbulente viscositeit, geval c, drempel en schuif
- 6 Druk, geval b en c
- 7 Waarnemingen, drempel (lit. II, geval I 8c2)
- 8 Verloop bodemschuifspanningssnelheid.

1. Inleiding

Met de toepassing van rekenmodellen bij het ontwerp van constructieonderdelen, zoals bodemverdedigingen nabij kunstwerken, is nog betrekkelijk weinig ervaring opgedaan. Het onderzoek aan deze constructieonderdelen is meestal op fysisch modelonderzoek of voor globale schattingen op vuistregels gebaseerd, met de nadruk op de benodigde steenzwaarte op de zwaarst aangevallen locatie.

In oktober 1987 is van de zijde van WL een nota door ir. M. van der Wal en ir. F.A. van Beek (lit. [1]) opgesteld, waarin mogelijke toepassingen van numerieke modellen op dit probleemgebied worden aangegeven; tevens wordt ook een opzet van de benodigde werkzaamheden voor de verkenning van die toepasbaarheid beschreven.

Deze nota is begin november 1987 door ir. J.L.M. Konter en ir. H.E. Klatter van Rijkswaterstaat becommentarieerd. Hierbij bleek, dat de nota in grote lijnen in het programma van TOW/BS op het gebied van bodemverdedigingen kan worden ingepast. Eén van de twee sporen van dit programma betreft het onderzoek naar de samenhang tussen de stabiliteit van stortsteen en "lokale belasting parameters": dat zijn lokale belasting kenmerken bij de stortsteen.

Het onderhavige project heeft in het kader van het onderzoeksspoor plaats gevonden. In het projectvoorstel Q 709-95 (bij brief RS 6244/Q 709.95) worden twee fasen onderscheiden:

1. onderzoek naar de mogelijkheden van momenteel beschikbare numerieke modellen voor de reproductie van lokale stromingsparameters;
2. onderzoek naar het verband tussen de steenstabiliteit en lokale parameters.

De in het verslag beschreven werkzaamheden betreffen de eerste fase.

In de brief 8547/BSW van Rijkswaterstaat (hoofdafdeling Bouwspeurwerk) is opdracht verleend voor de uitvoering van de genoemde werkzaamheden. Het onderzoek is uitgevoerd en gerapporteerd door ir. F.A. van Beek.

2. Probleemstelling

Het doel van dit onderzoek is een indruk te verschaffen over de toepasbaarheid van een tot dusverre nog niet toegepaste methode voor gedetailleerd onderzoek naar de stabiliteit van stortsteenconstructies. Dergelijke constructies worden benedenstrooms van waterbouwkundige kunstwerken aangelegd, waarbij sprake is voor een sterke stroomvertraging. Voorbeelden van deze kunstwerken zijn: drempels, stuwen, keringen en doorlaatwerken.

Deze methode betreft de toepassing van numerieke technieken voor de simulatie van complexe stroombeelden. Het is de bedoeling met berekende waarden van bepaalde belastingparameters tot een optimale dimensionering van de steenconstructie te komen.

Momenteel zijn er enkele stabiliteitsformules beschikbaar, waarmee op globale wijze de steenconstructies kunnen worden gedimensioneerd. Voor verfijning van deze formules en voor het bepalen van nieuwe relaties, alsmede uitbreiding tot andere situaties en omstandigheden, kunnen numerieke technieken voor de simulatie van complexe stroombeelden een belangrijk hulpmiddel gaan vormen. Tevens moet in het oog gehouden worden, dat op deze manier ook op een andere ontwikkeling wordt aangesloten: de toepassing van dezelfde technieken voor onderzoek aan de vormgeving van de waterbouwkundige constructies zelf.

In het onderhavige onderzoek staan twee vragen centraal:

1. Hoe betrouwbaar kan het stroombeeld worden gesimuleerd?
2. Kan met het resultaat van de berekeningen, tesamen met geëigende stabiliteitscriteria, de stabiliteit van de steenconstructie worden onderzocht.

In aansluiting op de bovenstaande vragen is de volgende stroombeeldconfiguratie als toetsprobleem uitgekozen: het stroombeeld benedenstrooms van een rechte drempel naar beneden (figuur 1, a en b; literatuur [2]: geval I 8c2). Kenmerkend aan dit stroombeeld zijn de neer direct benedestrooms van de drempel en de hoofdstroom daarboven; bovendien blijft deze hoofdstroom aan het oppervlak.

Om ook de haalbaarheid van de simulatie van een duikende straal aan te geven is dezelfde configuratie aangepast volgens figuur 1, geval c. Hierbij is boven de drempel van figuur 1a een schuif aangebracht, waarmee het bovenstroomse

doorstroom profiel met de helft wordt gereduceerd.

Uiteraard zijn van beide gevallen de waarden van belastingparameters die een rol kunnen spelen bij de stabiliteit van stortsteenconstructies, vastgelegd en ten dele geanalyseerd.

Met de hier uitgevoerde berekeningen kunnen deze vragen voor de specifiek gesimuleerde stroombeeldconfiguraties worden beantwoord. Tevens is hiermee een indicatie verkregen over de toepassingsmogelijkheden van deze techniek in onderzoek aan andere stroombeeldconfiguraties.

3. Berekeningen

3.1 Stromingsmodel en randvoorwaarden

Met het programmapakket "ODYSSEE" (zie bijlage) worden de Navier-Stokes vergelijkingen in het twee-dimensionale vlak opgelost. Voor de simulatie van de in ruimte variërende turbulentie in het stroombeeld wordt gebruik gemaakt van een k, ϵ -modellering. De numerieke oplossingsmethode is gebaseerd op eindige differenties in de ruimte en op fractionele stappen in de tijd.

ODYSSEE maakt gebruik van "boundary-fitted" gekromde rekenroosters, die niet-orthogonaal kunnen zijn. Eén van de consequenties hiervan is, dat bij berekeningen in het verticale vlak het waterspiegelverloop slechts indirect op iteratieve wijze met behulp van berekende waarden van de druk kan worden vastgelegd. Zoals in de paragrafen 3.2 en 3.3 zal worden uiteengezet, is dit principe bij de onderhavige berekeningen gehanteerd.

De belangrijkste randvoorwaarden van de numerieke modellen zijn ontleend aan de literatuur, waar het toetsprobleem staat beschreven (geval I 8c2 uit [2]):

1. Bodemruwheid

Vlak boven de bodem wordt verondersteld, dat het stroomsnelheidsprofiel een logaritmisch verloop heeft. De hoogte boven de bodem, waar de snelheid volgens deze theorie gelijk is aan 0, wordt aangeduid met het symbool z_0 . Deze heeft in de gevallen a, b en c (figuur 1) de volgende waarden:

Drempel (bestaat uit gladgeschuurd hout en is dus tamelijk glad):

$$z_0 = 0,00005 \text{ m.}$$

Deze waarde volgt uit callibratie van het logaritmische stroomsnelheidsverloop aan het gemeten bovenstroomse verloop.

Stortebed:

$z_0 = \frac{1}{33} * k_n = \frac{1}{33} * 2D_{50}$, waarbij $D_{50} = 0,02$ m de gemiddelde korreldiameter en k_n de equivalente zandruwheid volgens Nikuradse is.

Om rekentechnische redenen is een iets hogere z_0 dan volgens bovenstaande formule ingesteld (0,0018 m), zonder dat dit afbreuk doet aan de nauwkeurigheid van de simulatie van het stroombeeld dicht bij de bodem.

2. Instroming

Drempel (zonder schuif; geval a en b)

Hier is een debiet ter grootte van $0,21 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}'$ ingesteld. Tesamen met het gegeven van de hoogte van de instroming ($0,17 \text{ m}$) volgt hieruit een gemiddelde stroomsnelheid van $1,24 \text{ m/s}$. Het verloop over de hoogte van de stroomsnelheid u en de parameters k en ϵ van het turbulentiemodel zijn vastgesteld met behulp van de theorie van het logaritmische stroomsnelheidsprofiel en van het gegeven van z_0 bij de drempel.

Drempel (met schuif; geval c)

Het hier ingestelde debiet is $0,051 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}'$ groot. Omdat er bovenstrooms van de schuif sprake is van sterke gradienten in het stroomsnelheids- en turbulentieverloop, is het niet nodig ter plaatse van de instroomrand een nauwkeurige benadering hiervan op te leggen. Daarom is gekozen voor een homogene instroming, hetgeen bij een doorstroomhoogte van $0,17 \text{ m}$ resulteert in een instroomsnelheid van $0,29 \text{ m/s}$.

Een kenmerk van deze stromingsconfiguraties met de bovenstaande randvoorwaarden is, dat er voor gezorgd is het Froudegetal nergens in het rekengebied de waarde 1 overschrijdt.

3.2 Drempel

De figuren 2 t/m 6 bevatten de resultaten van de berekeningen met ODYSSEE. Met betrekking tot de simulatie van de stroming bij de drempel zonder schuif zijn de onderdelen a en b van deze figuren van belang.

Het verschil tussen de gevallen a en b bestaat uit de positie van de bovenrand, die ter plaatse van het wateroppervlak ligt. In b is het waterspiegelverloop vastgesteld op basis van het drukverloop in het rekengebied.

Het verschil in positie van de bovenrand bij a en bij b is niet erg groot (hoogstens $2 \text{ à } 3 \text{ cm}$ op een totale hoogte van 25 cm). Desalniettemin zijn er frappante verschillen waarneembaar in het stroombeeld:

- De neer is in geval b langer dan in geval a.
- De hoofdstroom gedraagt zich in geval b meer als oppervlaktestraal dan in geval a.

3.3 Drempel met schuif

De resultaten van de berekeningen aan deze configuratie zijn zichtbaar gemaakt in het onderdeel c van de figuren 2 t/m 6. Ook hier is de positie van de bovenrand bepaald met behulp van het berekende drukveld.

Het resultaat van de simulatie heeft de volgende kenmerken:

- Er is sprake van een naar de bodem duikende straal, die zich in benedenstroomse richting over de hoogte van het doorstroomprofiel herverdeelt.
- Direct achter de schuif is een dekneer zichtbaar.

3.4 Beoordeling resultaten

De resultaten van deze berekeningen worden beoordeeld aan de hand van waarnemingen (geval I 8c2 uit [2]) en van bekende analytische relaties. Het waargenomen stroombeeld staat in figuur 7.

1. Neerlengte

In de simulatie van het stroombeeld bij de drempel zonder schuif (geval b; waterspiegelverloop in rekening gebracht) is te zien, dat de neer ongeveer 0,60 m lang is (figuur 2c). Dit is bijna 7.5 keer de hoogte van de drempel.

Het deel van de neer tussen $x = 0,40$ en $x = 0,65$ m (figuur 2c) wordt gekenmerkt door een warrig stroombeeld. Hetzelfde verschijnsel is zichtbaar in figuur 7 met de waarnemingen. Om deze reden is in figuur 7 de lengte van de neer moeilijk te bepalen.

Als de neer wordt bepaald volgens de theorie van onder andere N. Rajarathnam (bijlage 5 uit [3]), dan wordt een neerlengte van 4,6 keer de drempelhoogte berekend. De simulatie (geval b) en de waarnemingen laten echter eenduidig een grotere neerlengte zien.

Geval c laat daarentegen een veel kortere neerlengte zien dan die volgens Rajarathnam. Omdat er sprake is van een duikende straal is de neerlengte niet groter dan 1,5 keer de drempelhoogte.

2. Waterspiegelverloop

Het in de simulatie iteratief bepaalde verloop van de bovenrand (geval b) komt goed met de waarnemingen overeen. Een geringe verhoging ten opzichte van geval a (slechts 2 à 3 cm op een totale hoogte van 25 cm), heeft een grote invloed op het stroombeeld. Het stroombeeld in geval b komt dan ook veel beter met de waarnemingen (figuur 7) overeen dan het stroombeeld in geval a.

Het waterspiegelverloop blijkt derhalve een essentiële randvoorwaarde voor een correcte simulatie van het stroombeeld te zijn.

3. Energieverlies

Het gesimuleerde energieverlies bij geval c (drempel met schuif) wordt beoordeeld aan de hand van de volgende formule:

$$q = A_n \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta H}, \quad (1)$$

waarbij

q	= debiet per eenheid van breedte	$[m^3/s/m']$
A_m	= netto doorstroomprofiel onder de schuif	$[m]$
ΔH	= energieverlies	$[m]$
g	= versnelling van de zwaartekracht	$[m/s^2]$

Het energieverlies ΔH wordt berekend met:

$$\Delta H = h_{bov} + \frac{\bar{u}_{bov}^2}{2g} - h_{ben} - \frac{\bar{u}_{ben}^2}{2g} \quad (2)$$

waarbij

h_{bov}	= bovenstroomse waterstand	$[m]$
\bar{u}_{bov}	= bovenstroomse stroomsnelheid, gemiddeld over de hoogte en in de tijd	$[m/s]$
h_{ben}	= benedenstroomse waterstand	$[m]$
\bar{u}_{ben}	= benedenstroomse stroomsnelheid, gemiddeld over de hoogte en in de tijd	$[m/s]$

De simulatie heeft de volgende waarden van de genoemde parameters opgeleverd:

$$\begin{aligned}h_{\text{bov}} &= 0,251 \text{ m;} \\ \bar{u}_{\text{bov}} &= 0,300 \text{ m/s;} \\ h_{\text{ben}} &= 0,0231 \text{ m;} \\ \bar{u}_{\text{ben}} &= 0,222 \text{ m/s}\end{aligned}$$

Uit vergelijking (2) volgt dan een energieverlies $\Delta H = 0,022 \text{ m}$.

Met behulp van figuur 4c is de grootte van A_n bepaald. Deze blijkt 0,76 m te zijn, hetgeen 89% is van de werkelijke opening tussen de schuif en de drempel (0.85 m).

Wanneer de waarden van A_n en ΔH in vergelijking (1) worden ingevuld, volgt een debiet $q = 0,050 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}'$. Dit analytisch bepaalde debiet wijkt slechts 2% af van het bij de simulatie ingestelde debiet.

3.5 Stabiliteit van de stortsteen

In principe kunnen diverse parameters, die in de simulatie worden berekend, als indicator worden gebruikt om de stabiliteit van de steenconstructie vast te stellen. Een belangrijke parameter is de schuifspanningssnelheid u_* aan de bodem. Hieraan wordt in deze paragraaf aandacht gegeven.

In figuur 8 staat het gesimuleerde verloop van u_* langs de bodem uitgezet voor de gevallen a, b en c.

1. Drempel zonder schuif

Zowel geval a als b laten zien, dat in benedenstroomse richting u_* de evenwichtswaarde van 0,077 m/s asymptotisch benadert. Dit is kenmerkend voor een oppervlaktestraal, die zich in benedenstroomse richting over de hoogte herverdeelt. Er is een groot verschil waarneembaar in het verloop tussen a en b.

De opbouw van de grenslaag aan de bodem geschiedt in geval b op grotere afstand van de drempel dan in geval a, hetgeen met de grotere neerlengte in geval b samenhangt. Daarnaast is het opmerkelijk, dat in geval b de maximum waarde van u_* onder de neer groter is dan in geval a.

2. Drempel met schuif

Omdat de straal naar de bodem duikt heeft u_* de neer op ongeveer 0,25 m afstand van de drempel een maximum waarde. Op grotere afstand neemt u_* asymptotisch af naar de evenwichtswaarde van 0,027 m/s. Over dit traject is sprake van herverdeling van de bodemstraal over de hoogte.

Bij de metingen aan geval I 8c2 uit [2] is waargenomen, dat benedenstrooms van de neer de stenen in trillende beweging zijn. Dit betekent, dat de bodemverdediging daar vrij zwaar wordt belast.

Een dergelijke conclusie kan niet worden getrokken op basis van het gesimuleerde u_* -verloop (geval b), omdat u_* in benedenstroomse richting asymptotisch naar de evenwichtswaarde toeneemt. Nader onderzoek is gewenst om vast te stellen welke lokale belastingparameters naast u_* een substantiële rol spelen bij de belasting op de bodemverdediging voor situaties als geval b.

Het bij geval c gesimuleerde u_* -verloop geeft een indicatie van de plaats, waar de bodemverdediging het zwaarst wordt belast (ongeveer 0.25 m benedenstrooms van de drempel). Hoewel ook hier nader onderzoek gewenst is, wordt op voorhand geconcludeerd dat het u_* -verloop in gevallen met duikende stralen van groot belang is voor het verkrijgen van inzicht in de belasting op de bodemverdediging.

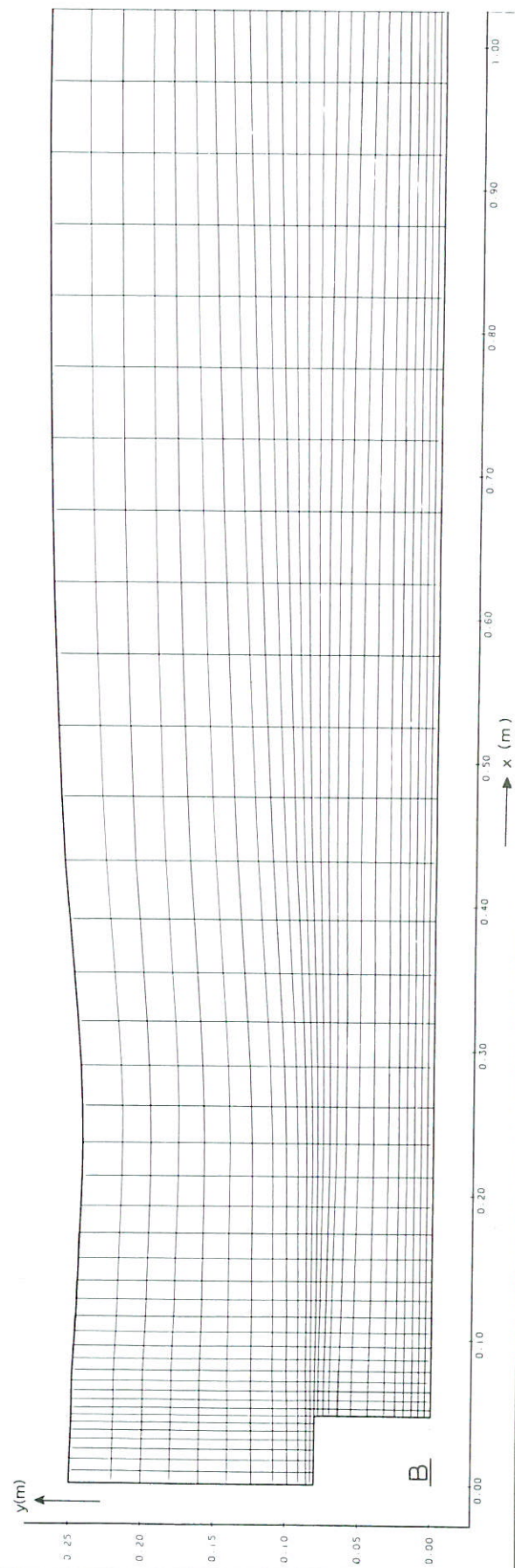
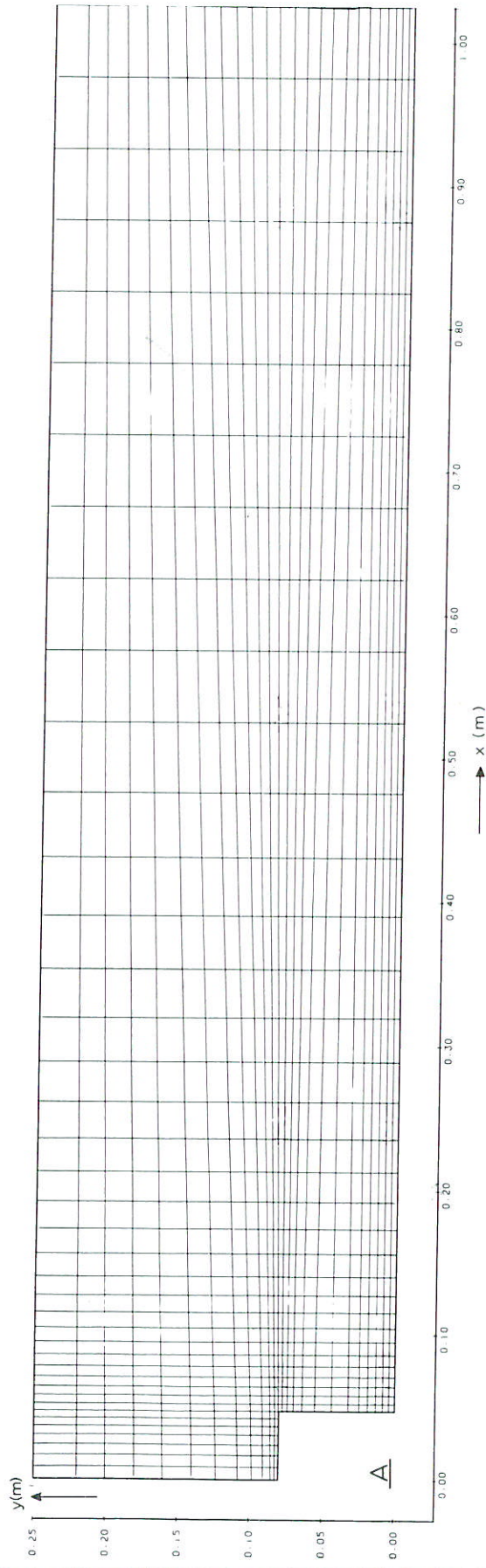
4. Conclusies en aanbevelingen

1. In het onderhavige onderzoek is aangetoond, dat een numeriek model (in dit geval ODYSSEE) een goede simulatie van het stroombeeld kan opleveren.
2. De juiste reproductie van het verloop van de waterspiegel is een essentiële randvoorwaarde voor een goede simulatie.
3. Verder onderzoek kan worden toegespitst op:
 - a. het vergroten van het inzicht in de betrouwbaarheid van de stroombeeldsimulatie bij andere geometriën (waarbij ook het Froudegetal plaatselijk de waarde 1 overschrijdt);
 - b. het nader uitwerken van relaties tussen de gesimuleerde waarden van belasting parameters en de steenstabiliteit.

Hierbij kan overwogen worden in een later stadium, naast de toepassing van 2D-modellen, modellen voor de simulatie van stromingen in 3 dimensies toe te passen.

LITERATUUR

- 1 Voorstel voor onderzoek aan bodemverdedigingen met behulp van een rekenmodel.
Waterloopkundig Laboratorium: M. van der Wal en F.A. van Beek
Delft, oktober 1987
- 2 Stabiliteit stortsteen onmiddellijk na konstrukties
verslag modelonderzoek M1834/S543.
Waterloopkundig Laboratorium
Delft, december 1982
- 3 Compartimenteringswerken Oesterdam steenstabiliteit van afsluitdammen bij stroomaanval, methode van verticale opbouw
verslag litteratuuronderzoek M1741, deel 1
Waterloopkundig Laboratorium
Delft, november 1981

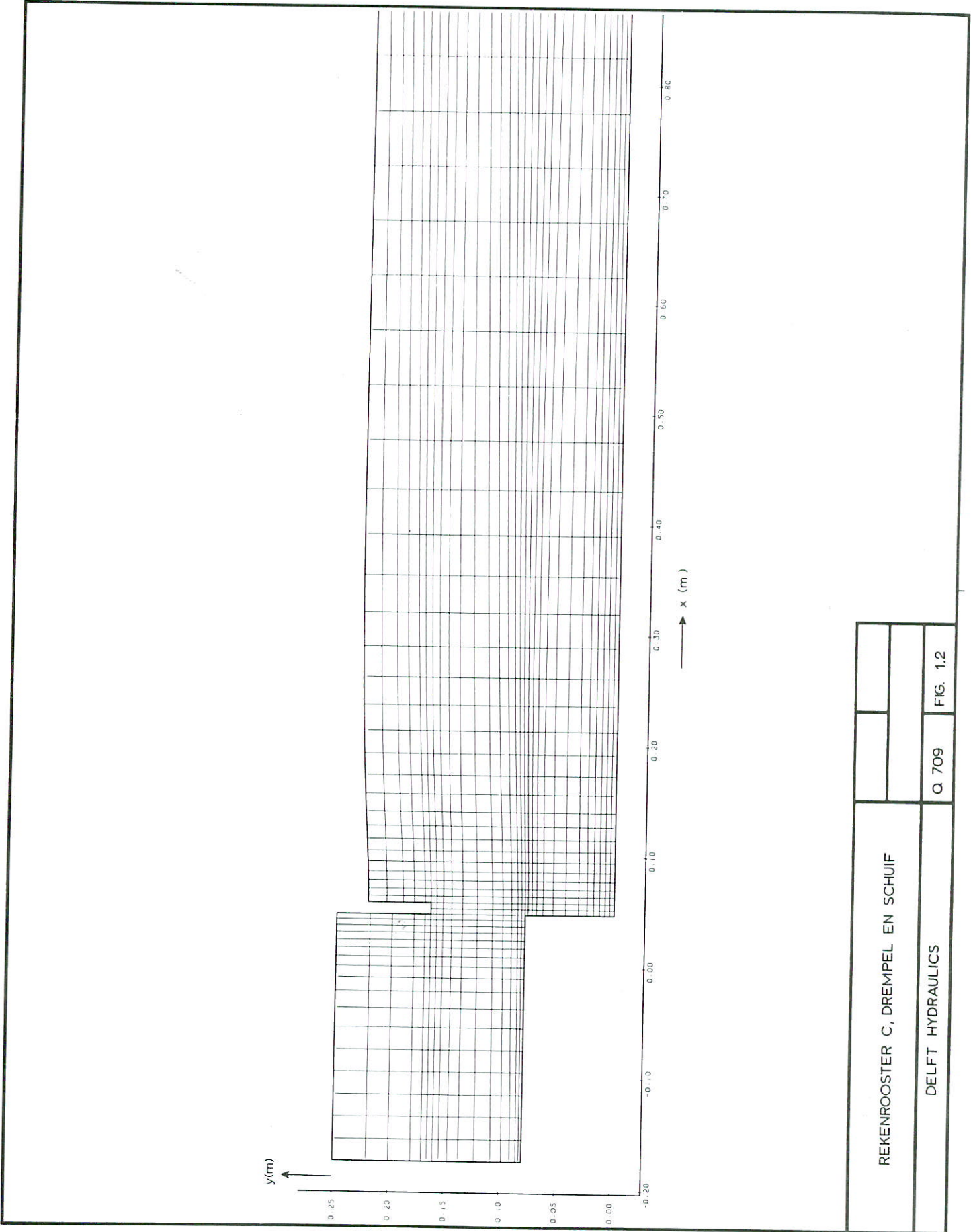


REKENROOSTERS A EN B, DREMPEL

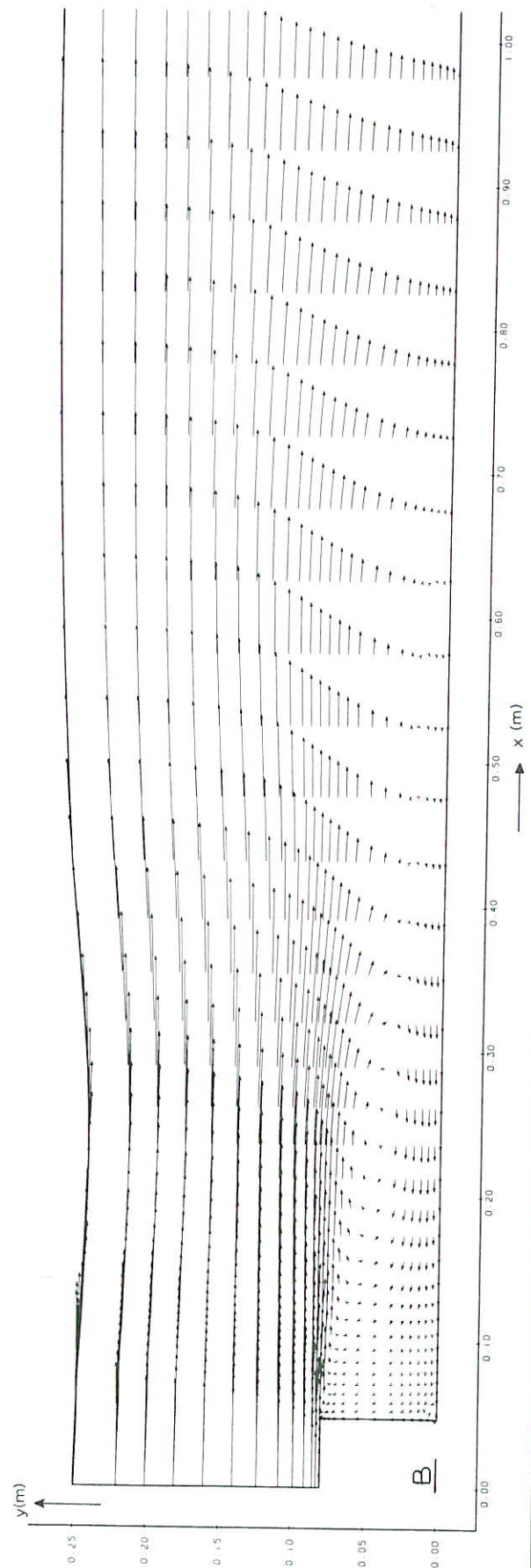
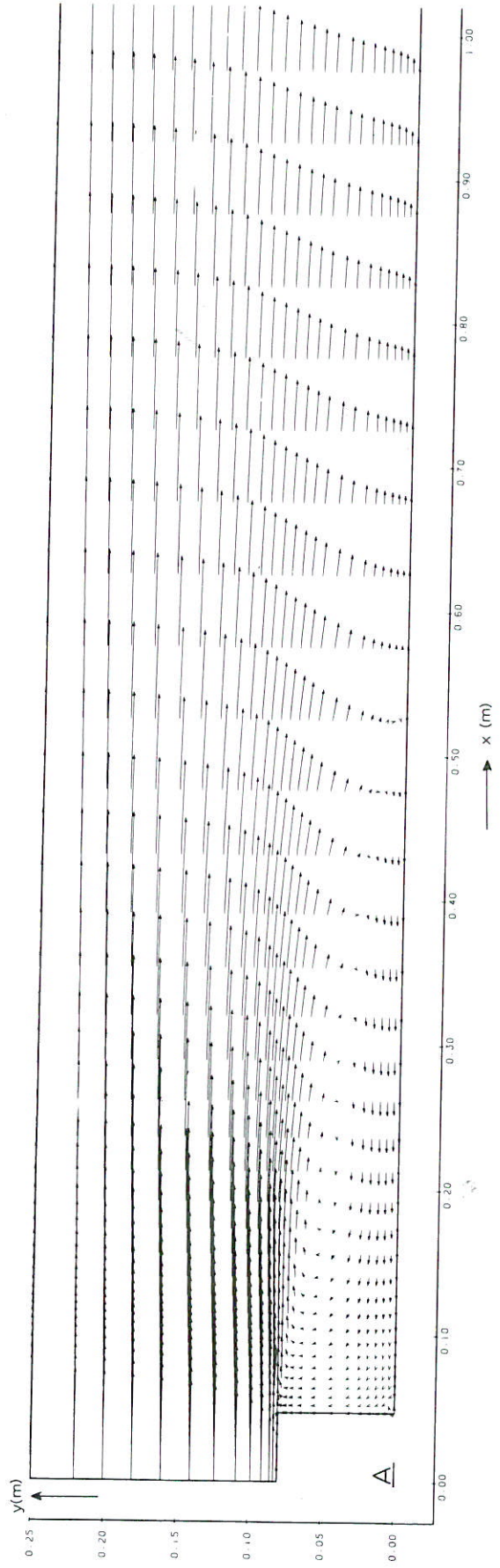
DELFT HYDRAULICS

Q 709

FIG. 1.1



REKENROOSTER C, DREMPEL EN SCHUIF			
DELFT HYDRAULICS		O 709	FIG. 1.2



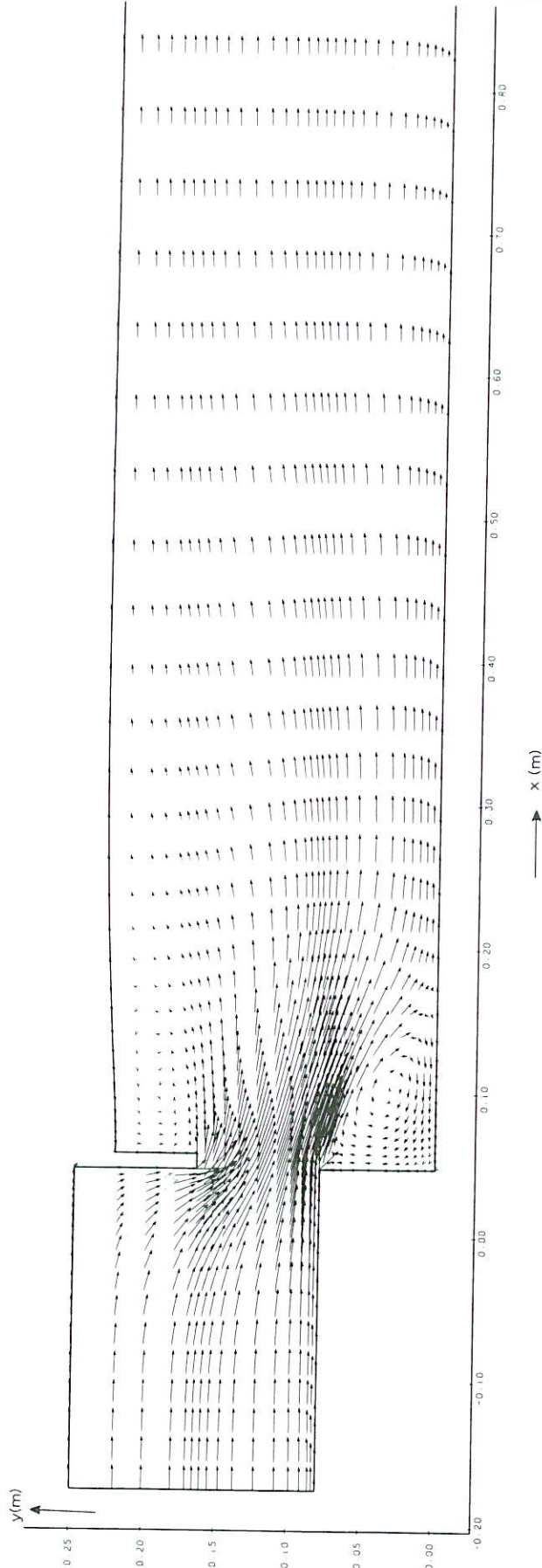
→ $\hat{v} = 1.0 \text{ m/s}$

VECTOREN, GEVAL A EN B, DREMPEL

DELFT HYDRAULICS

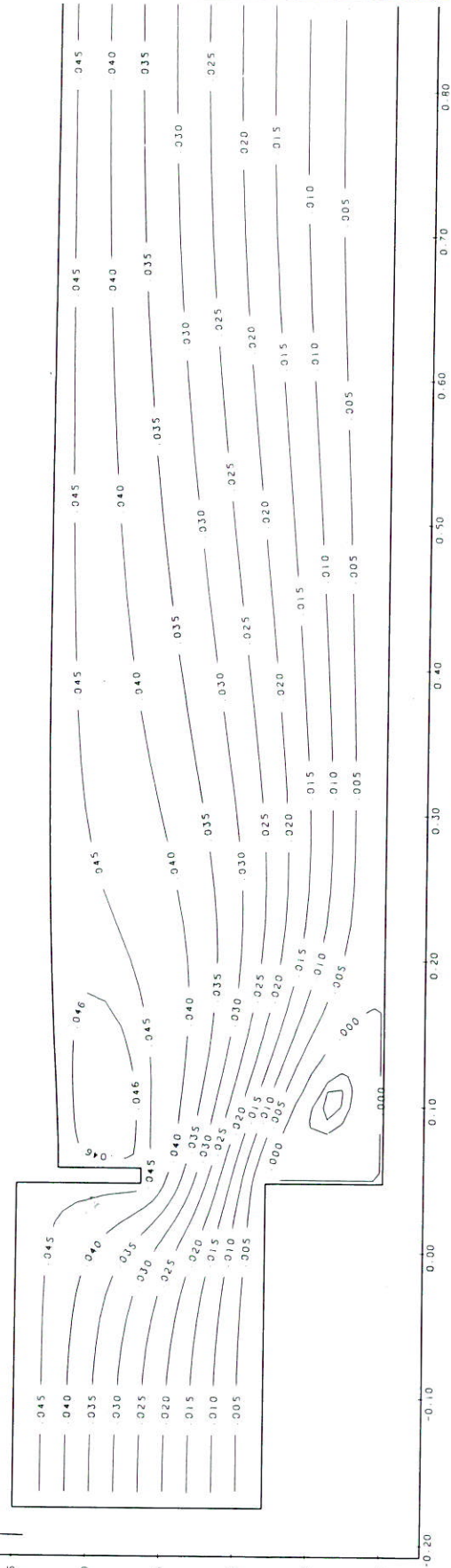
Q 709

FIG. 2.1



VECTOREN, GEVAL C, DREMPEL EN SCHUIF			
DELFT HYDRAULICS		Q 709	FIG. 2.2

y(m)



x(m)



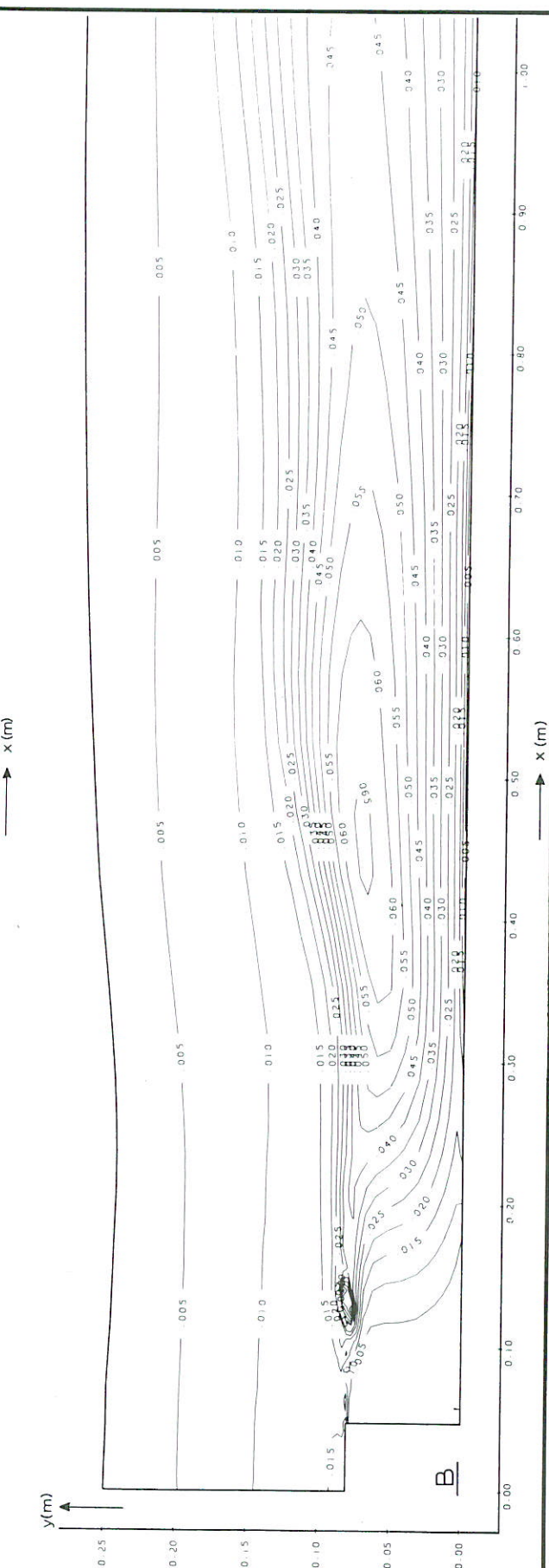
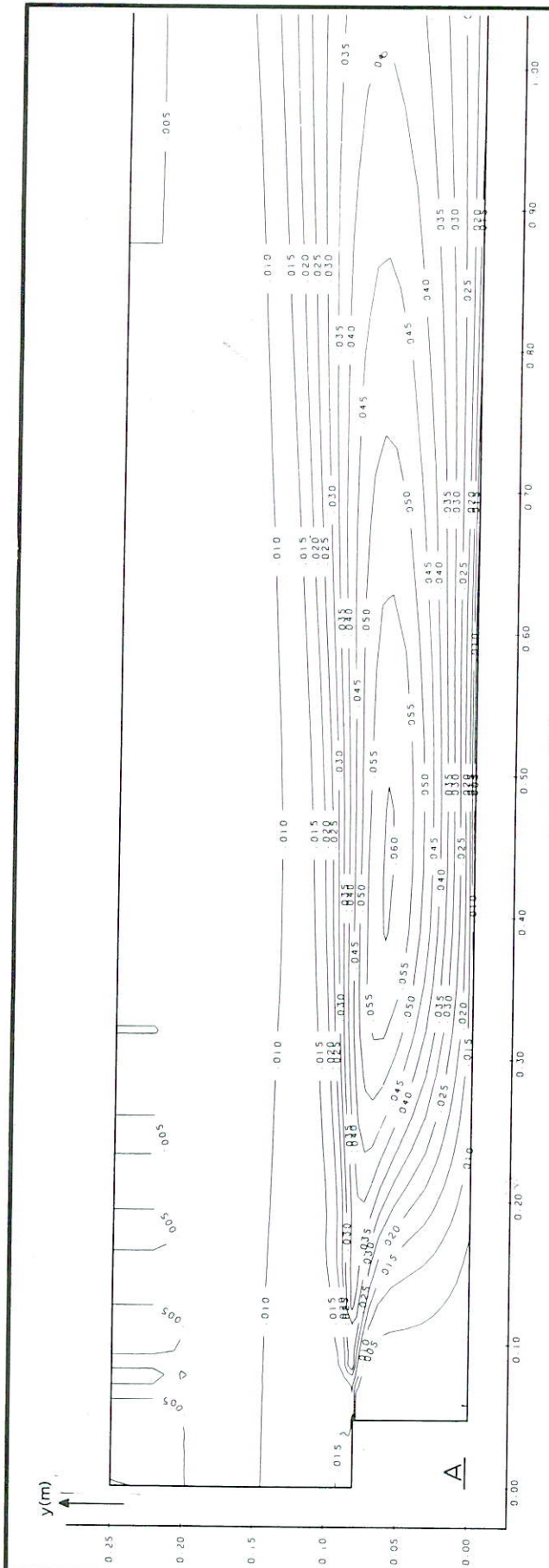
STROOMLIJNEN, GEVAL C, DREMPEL EN SCHUIF

m³/s/m¹

DELFT HYDRAULICS

Q 709

FIG. 3.2



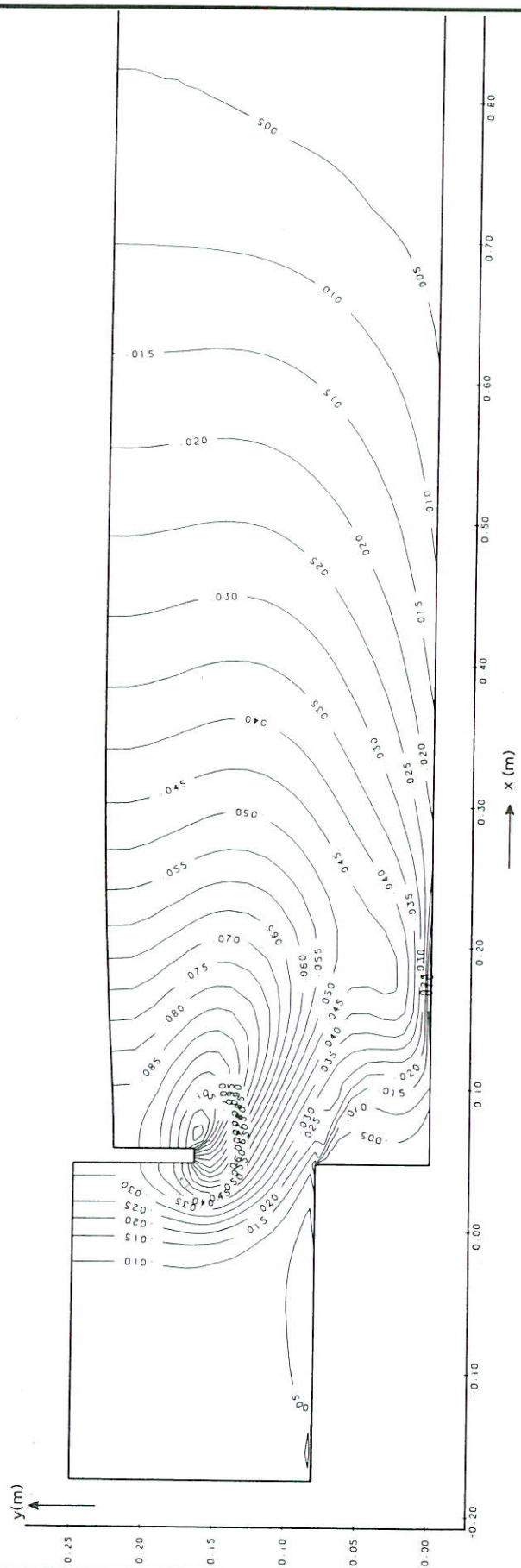
TURBULENTE KINETISCHE ENERGIE K,
 GEVAL A EN B, DREMPEL

DELFT HYDRAULICS

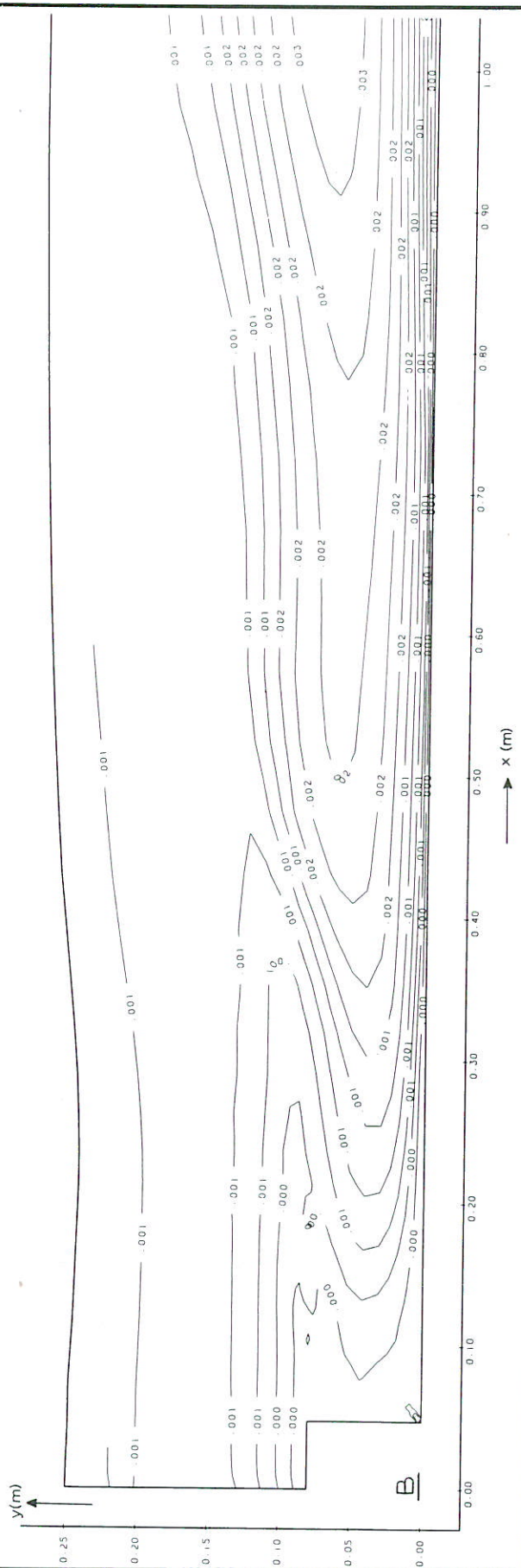
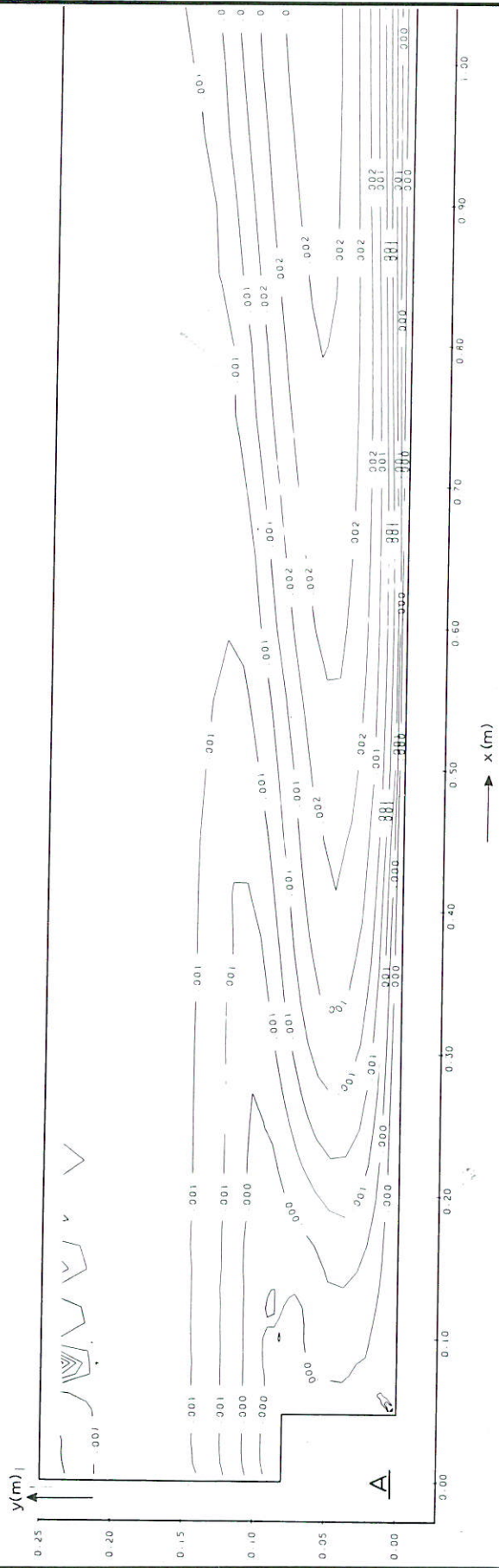
Q 709

FIG. 4.1

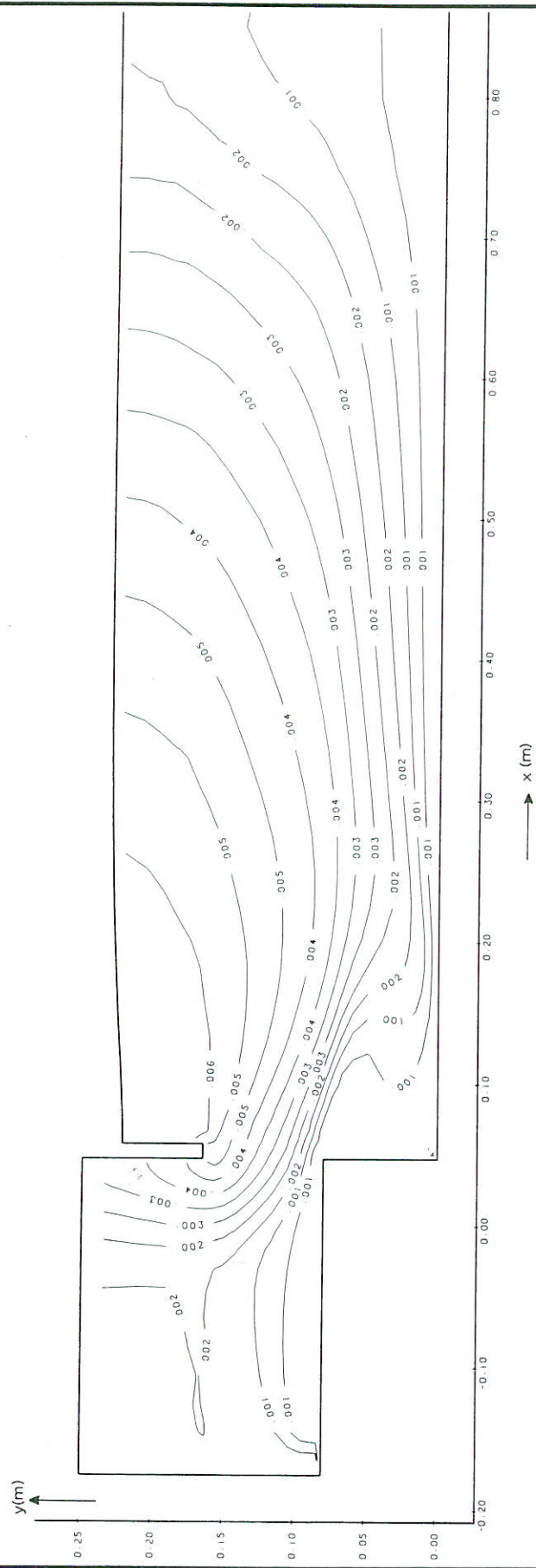
m^2/s^3



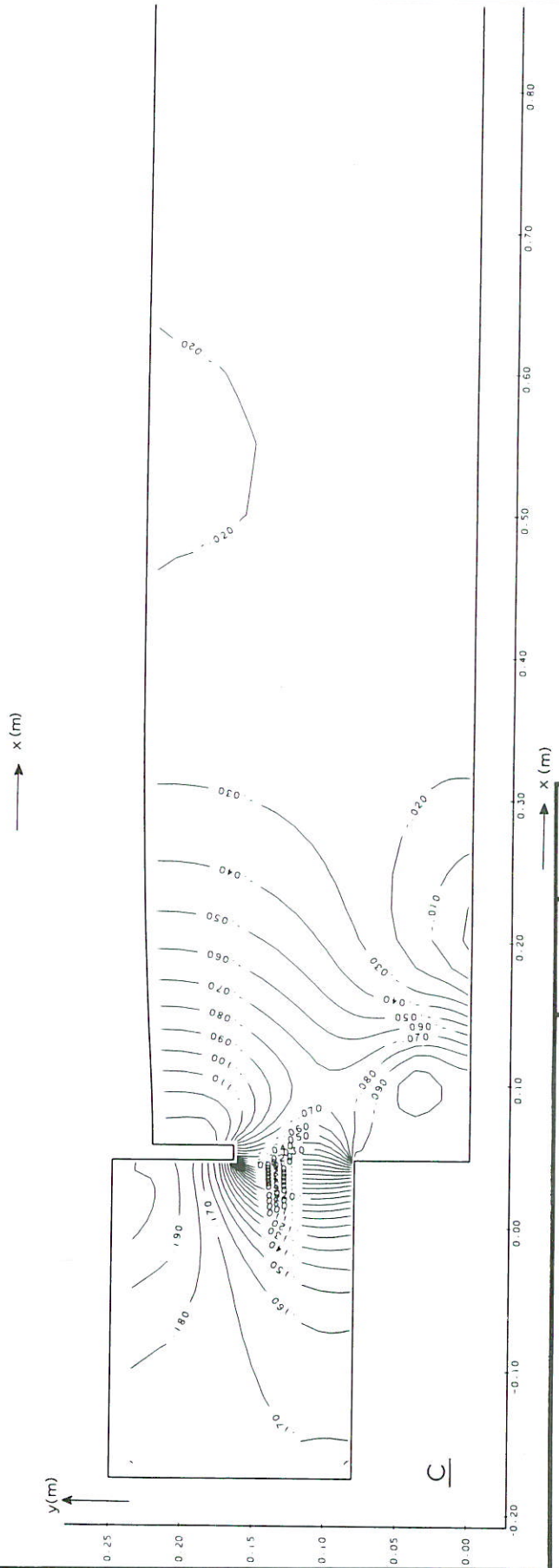
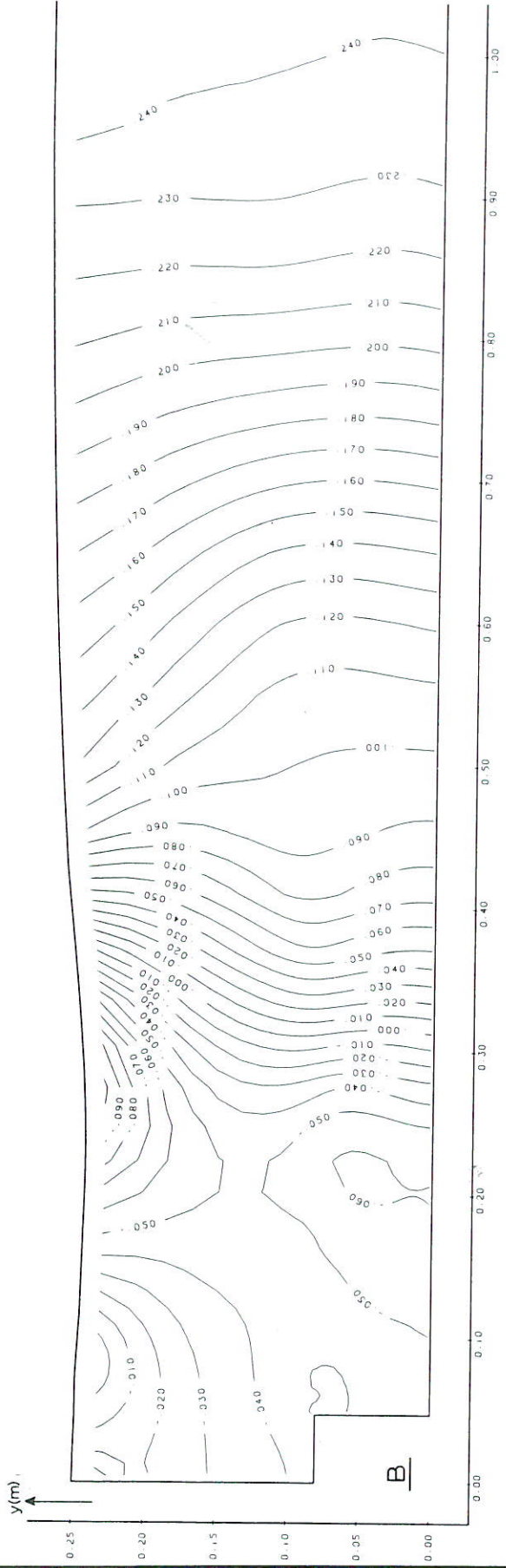
TURBULENTE KINETISCHE ENERGIE K, GEVAL C, DREMPEL EN SCHUIF		m ² /s ³
	Q 709	FIG. 4.2
DELFT HYDRAULICS		



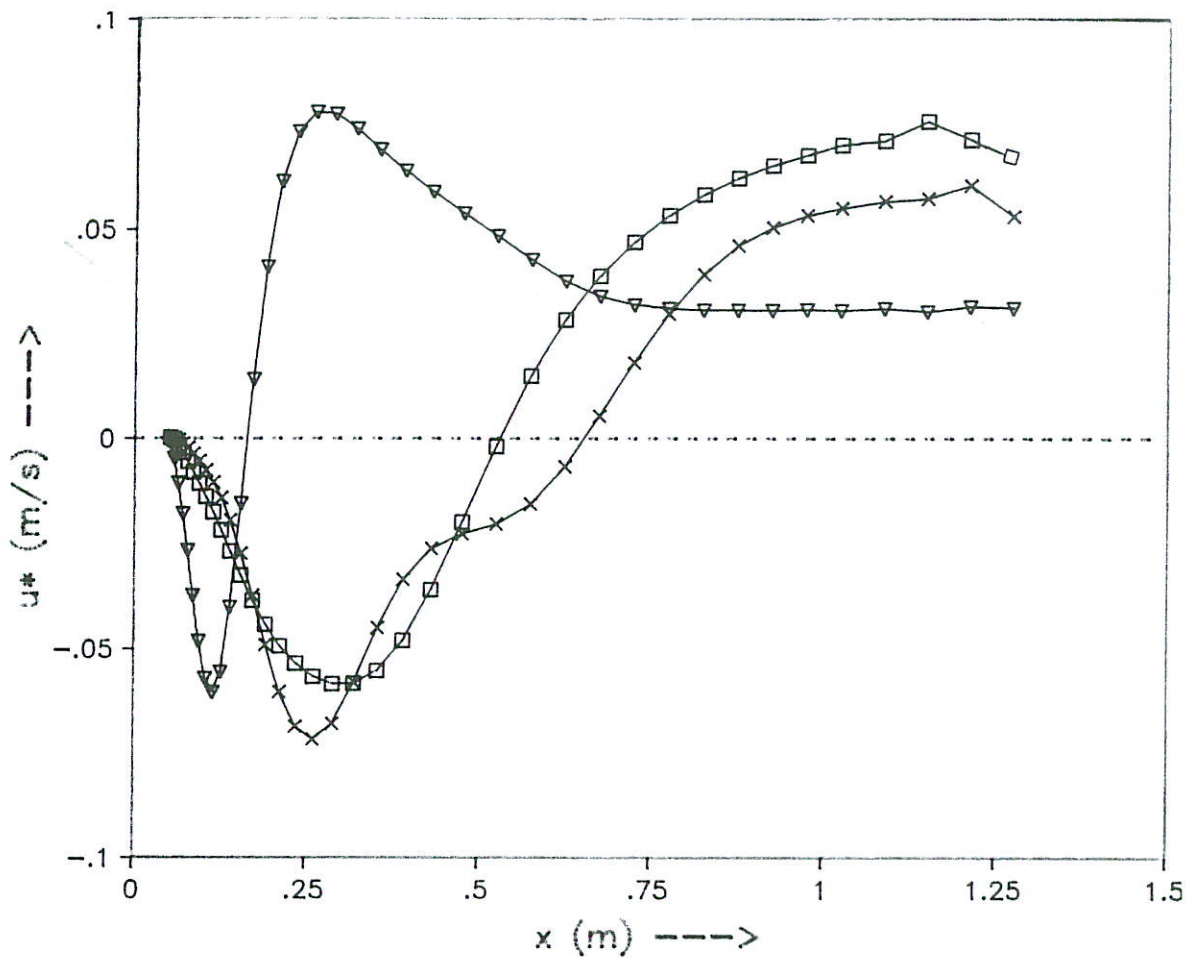
TURBULENTE VISCOSITEIT, GEVAL A EN B, DREMPEL	m ² /s	
DELFT HYDRAULICS	Q 709	FIG. 5.1



TURBULENTE VISCOSITEIT, GEVAL C, DREMPEL EN SCHUIF	m ² /s	
	Q 709	FIG. 5.2
DELFT HYDRAULICS		



DRUK, GEVAL B EN C	m^2/s^2	Q 709	FIG. 6
	DELFT HYDRAULICS		



- a
- ×— b
- ▽— c

VERLOOP SCHUIFSPANNINGSSNELHEID u

A, B & C

DELFT HYDRAULICS

Q 709

FIG. 8

ODYSSEE

A program system for the computation of
complex two-dimensional turbulent flow

A. General description

The program system ODYSSEE has been designed for the simulation of complex flows, where the complexity may be due either to the geometry of the computational area and its boundaries or to the turbulence properties of the flow itself. In the set-up of the system much attention has been paid to operational flexibility, so that also non-standard applications can be easily dealt with. The standard system comprises the following features:

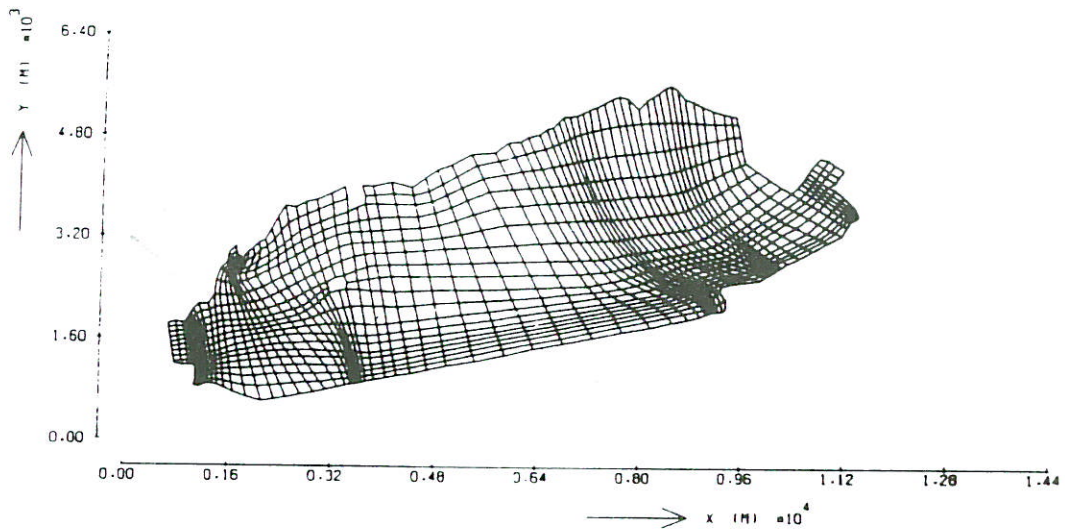
- various methods for the generation of general curvilinear, boundary-fitted computational grids
- the possibility to treat steady and unsteady flows, and time varying solid boundary locations
- modules for the computation of 2D and rotationally symmetric flows or of 2D depth-averaged flows
- modules for the computation of heat or mass transfer and a coupling with the momentum equations in case of density currents
- various turbulence descriptions ranging from a simple constant viscosity model to a two-equation model
- powerful post-processing facilities for the inspection and presentation of the results.

B. Grid-generation

In applying the ODYSSEE system much attention is paid to the construction of the computational grid. In general this grid is curvilinear and non-orthogonal, although a method for generating an orthogonal grid is implemented.

A number of grid generation methods is implemented in the ODYSSEE system. The choice of the method depends strongly on the requirements made by the specific application, as is shown in the following examples.

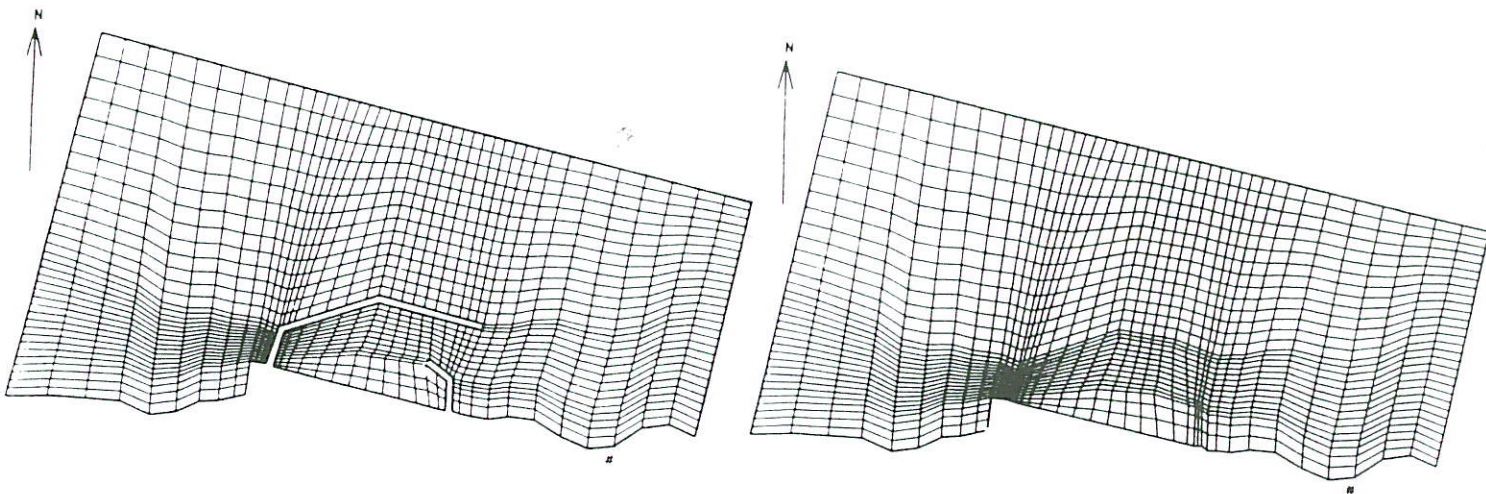
i) Grid generation by hand



Computational grid for Lac Tunis, Tunisia

For the computation of tide- and wind-induced flows in Lac Tunis, Tunisia a grid has been designed which can represent the flow details near the in- and outlets of the lake and which has enough resolution in areas where the bathymetry varies strongly. On a bathymetric map a grid was drawn by hand and with a graphic tablet the coordinates of the grid points have been transferred to the ODYSSEE system for further processing.

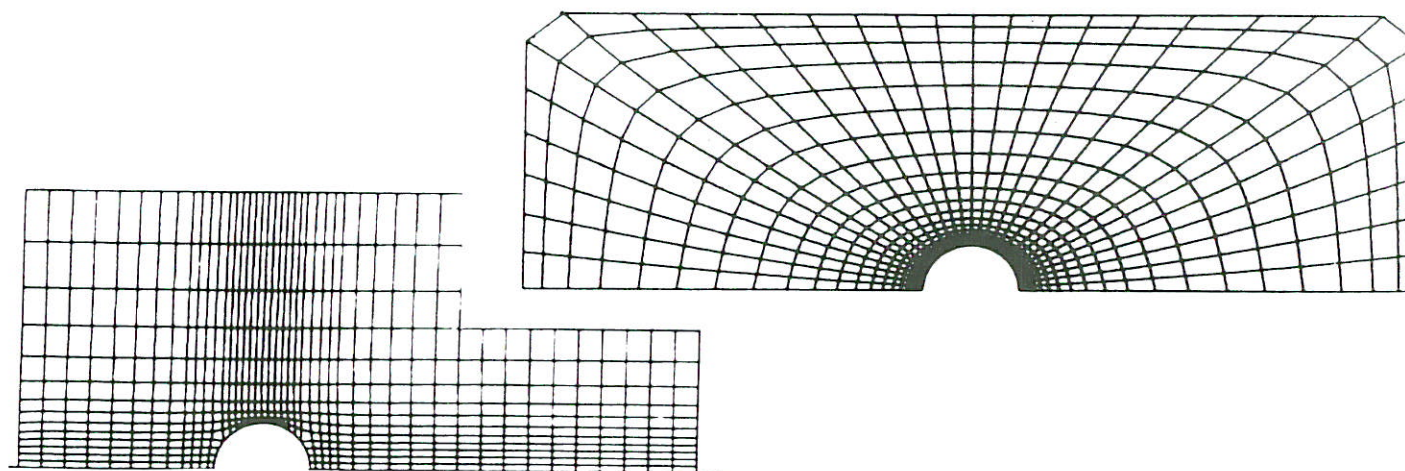
ii) Grid generation by the method of blenden shearing



Computational grid for coastal area with and without breakwaters

In the design phase of breakwaters usually a comparison is made between the future and present current speeds in order to assess the risk of scour. In the example shown the computational grid for the present situation is designed in such a way that the proposed breakwaters can be exactly incorporated, by which an easy comparison can be made between current speeds before and after construction of the breakwaters. This grid has been made with the method of blended shearing (Ref. [1]), in which the location of particular grid lines (e.g. for the breakwaters) can be easily fixed.

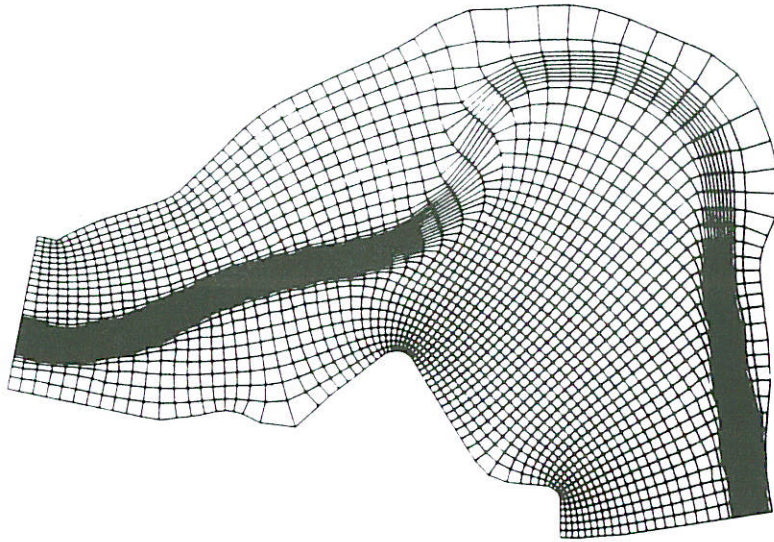
iii) Grid generation with Thompson's method



Computational grids for flow around a cylinder

The above two grids have been made with Thompson's method (Ref. [2]). They were used to study grid dependence in the computation of turbulent separating flow around cylinder.

iv) Orthogonal grid generation



Orthogonal grid for the River IJssel, The Netherlands

The orthogonal grid for the River IJssel has been generated with a special version of Thompson's method. By hand a grid system was drawn, with a contraction of grid lines in the main river bed. This grid system was used as a first approximation for the above orthogonal grid.

C. Mathematical formulation

i) The differential equations

The equations of motion which are solved, are the equations for unsteady turbulent flow in two dimensions, possibly with an additional average over depth. In an orthogonal Cartesian righthanded coordinate system (x, y) they read:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f v + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \beta(T-T_o)g_x + c_f \frac{Vu}{h} + \\ - \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} (2v_t h \frac{\partial u}{\partial x}) - \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} (v_t h (\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x})) = F_x \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + f u + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \beta(T-T_o)g_y + c_f \frac{Vv}{h} + \\ - \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} (v_t h (\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x})) - \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} (2v_t h \frac{\partial v}{\partial y}) = F_y \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (hu) + \frac{\partial}{\partial y} (hv) = 0 \quad (3)$$

The notation is explained below. In case of pure 2D flow, the depth h is constant and the bottom friction and Coriolis terms are omitted. For buoyant flows, the temperature T is computed from:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} - \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_t} h \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_t} h \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0 \quad (4)$$

In fact this is the general advection-diffusion equation for dissolved matter, and hence T may be any dissolved quantity.

Notation:

- u : velocity component in x-direction
- v : velocity component in y-direction
- V : $\sqrt{u^2 + v^2}$
- p : pressure
- T, T_0 : temperature and reference temperature for buoyancy
- h : waterdepth
- f : Coriolis parameter
- ρ : density
- β : buoyancy coefficient
- g_x, g_y : gravity acceleration in x- and y-direction
- c_f : bottom friction coefficient
- ν_t : (turbulent) viscosity coefficient
- σ_t : (turbulent) Prandtl number
- F_x, F_y : external forces, e.g. windstress, wavestress

In case of turbulent flows the viscosity coefficient ν_t can either be given a constant value, or it can be computed by a mixing length model or a (depth averaged) $k-\epsilon$ model, with or without algebraic stress. In depth-averaged version, the rigid-lid approximation is applied as can be observed from the absence of a time-dependent term in the continuity equation (3). This implies that in tidal applications the area to be modelled should be small compared with the tidal wavelength, since phase differences cannot be taken into account. The actual free surface elevation is simulated by the pressure head $p/\rho g$, exerted on the rigid lid.

ii) Boundary conditions

At inflow boundaries the velocities and the temperature distribution (or any dissolved quantity) have to be specified, while at outflow boundaries the conditions are free. At solid boundaries the velocities can have no-slip, free-slip or law-of-the-wall conditions. The temperature can be specified at solid boundaries, or a relation for its normal derivative can be given. In any application the user can specify his own boundary conditions by adding the proper subroutine(s) to the program input.

iii) Numerical solution

In general a curvilinear non-orthogonal coordinate system will be applied in the physical plane. By a transformation of the equations (1) through (4), a square grid can be used in the computational plane. In the computational plane the equations are split into functional parts and solved in fractional time steps, where each part is solved with the most appropriate numerical method. For details, see reference [3]. The successive fractional steps are:

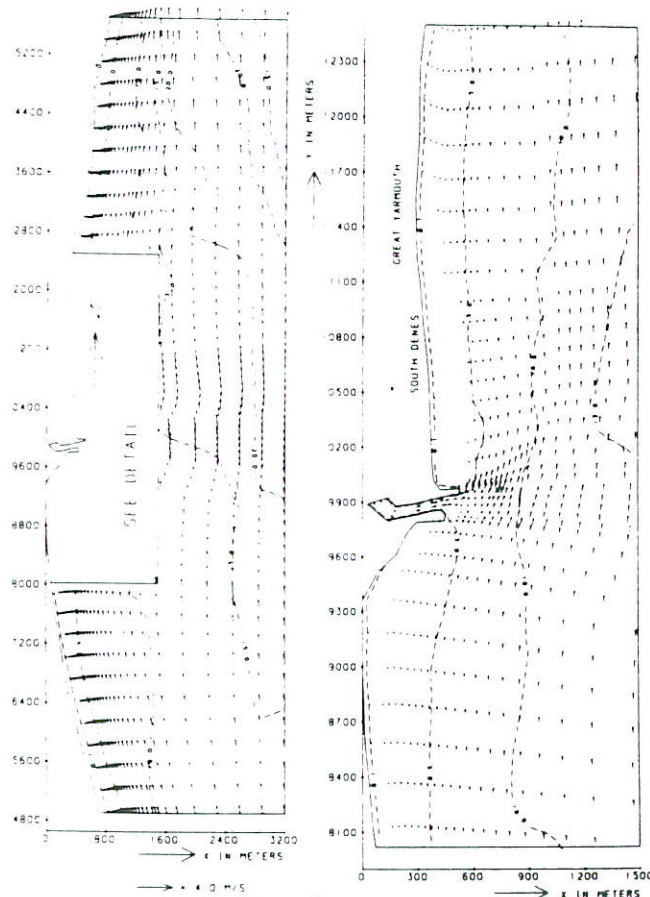
- advection , which is solved by the method of characteristics
- diffusion , which is solved by an implicit method
- source terms, which are solved by a Runge Kutta method with self-adjusting time step
- continuity , which can be solved as desired with a pressure or a stream function formulation by an implicit method.

By the choice of the computational methods numerical stability is guaranteed and only accuracy may put constraints on the computational timesteps.

D. Examples of applications

- i) Computation of tide- and wave induced depth-averaged currents.

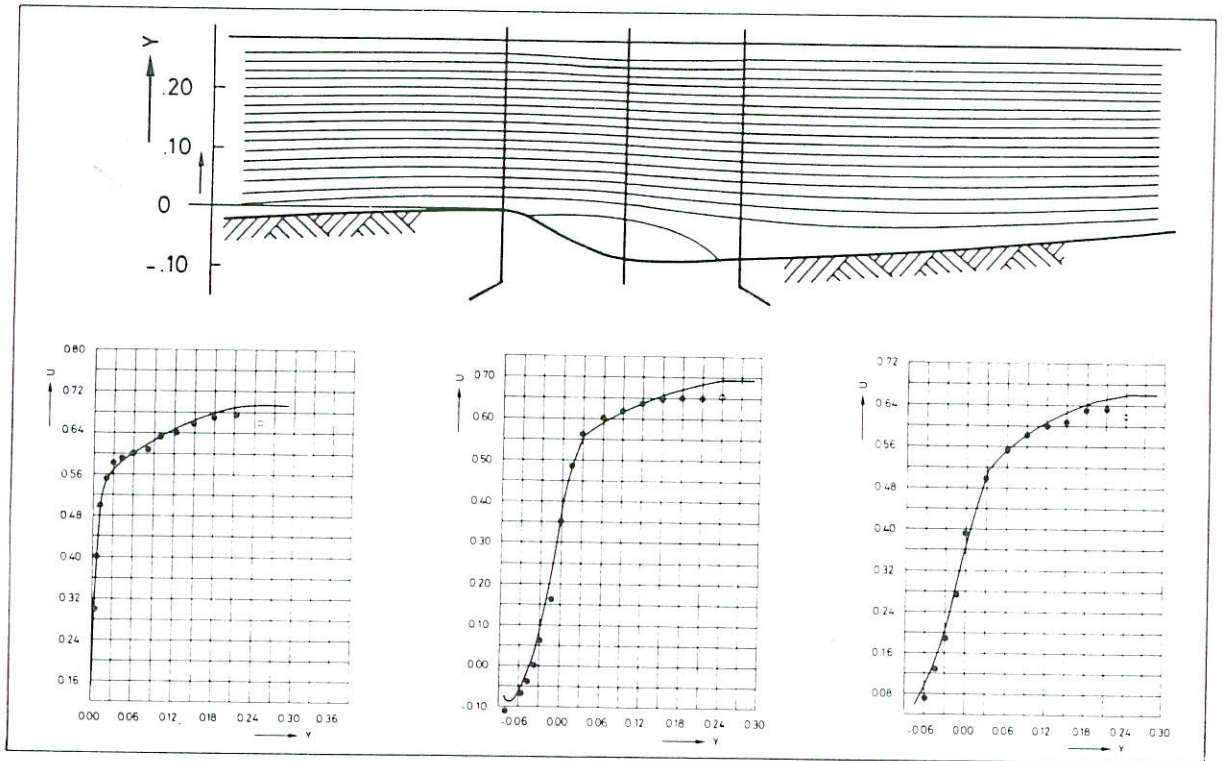
In the Great Yarmouth hydraulic and morphological study for a new outer harbour a coarse grid tidal model (made with DHL's DELFLO system) provided boundary conditions for a detailed flow model, made with the ODYSSEE system. Moreover, a wave model provided wave forces in the breaker zone.



Flow pattern with tide- and wave-induced currents, Great Yarmouth, Great Britain

In its turn the ODYSSEE model provided flow input for a morphological model (made with DHL's COMOR system, Ref. [4]), which computed the expected morphological changes due to the harbour extension.

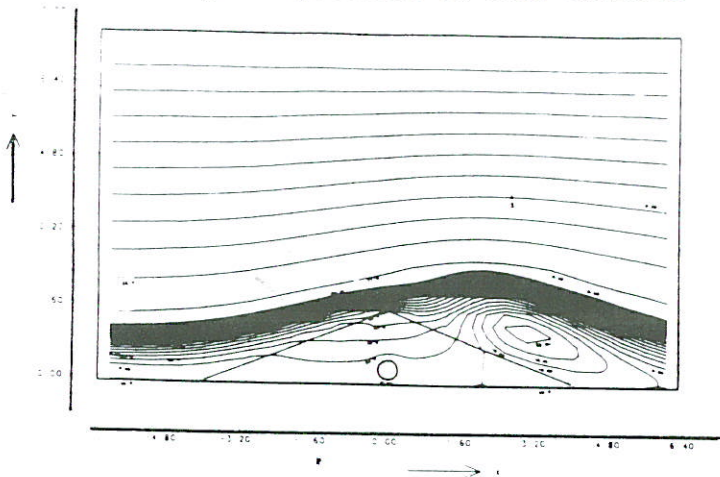
ii) Computation of separating flow over a sand dune.



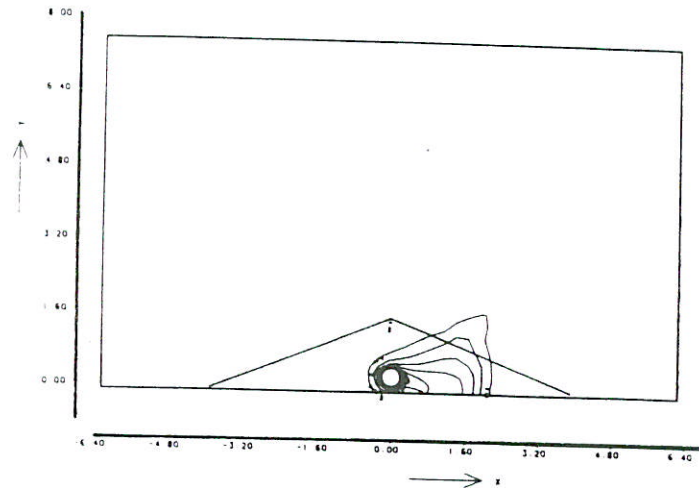
Separating flow over a sand dune

In one of DHL's flumes accurate measurements have been done on velocity field currents and turbulence properties of flow over a series of periodic dunes. This flow has been simulated. With the pure 2D version of ODYSSEE. Although no distinct separation point is present, flow separation is computed very well by use of a $k-\epsilon$ turbulence model and a special version of Van Driest's law-of-the-wall. Other computed quantities like the shear stress velocity and the turbulence intensity also agree very well with measurements.

iii) Computation of heat transfer



streamlines

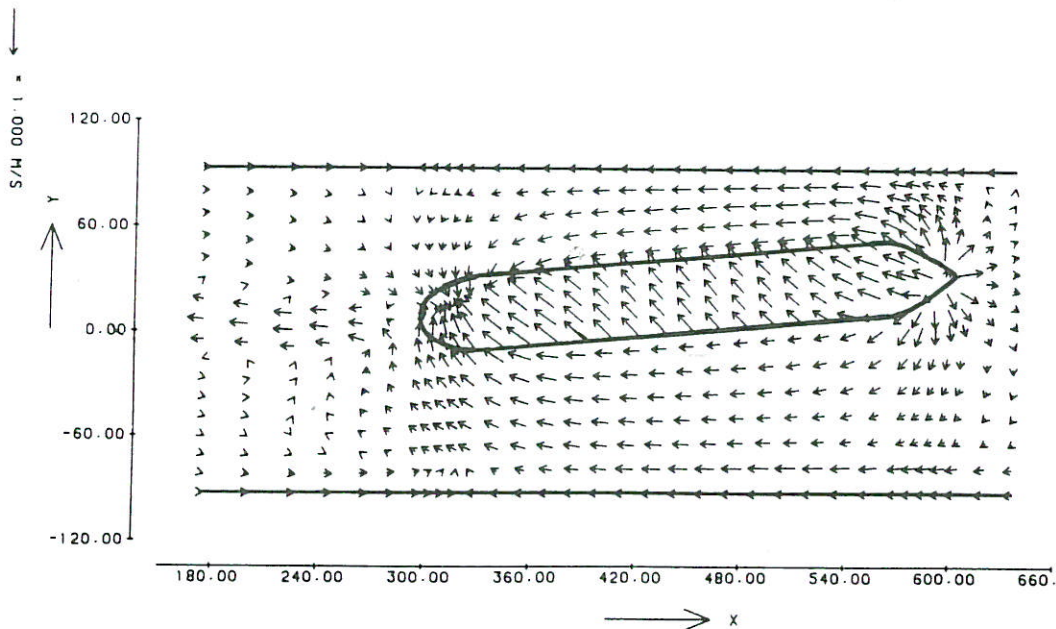


temperature isolines

Computation of heat transfer from a pipe to flow through a gravel bed

In the above application the combined flow over and through a gravel bed has been computed (Reference [5]). By a special use of the fractional step algorithm, the pore water flow in the gravel bed could be simulated. With the computed flow field the conductive and convective heat transport from the pipe to the gravel surrounding the pipe has been simulated.

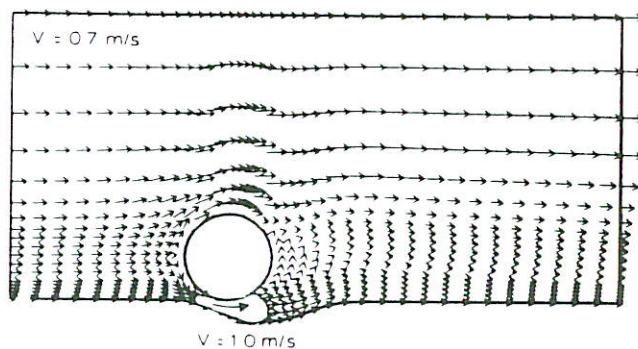
iv) Computation of current pattern around a ship.



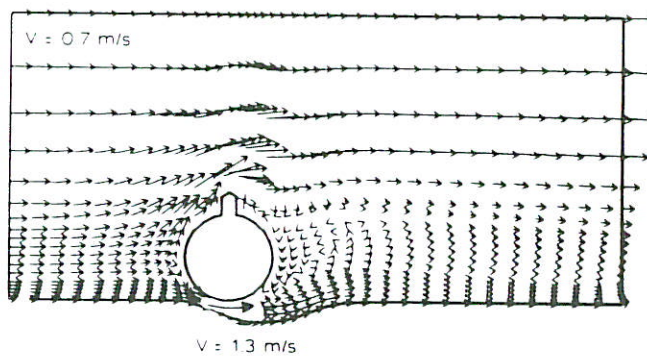
Computation of current pattern around a ship

In order to calculate bank suction effects acting to a ship in a relatively narrow channel, the ODYSSEE system was used. The figure shows the return current pattern around a ship. Pressures were also calculated, and these can be used either for the determination of ship-manoeuving coefficients, necessary in ship-manoeuving studies, or to determine the effect of ship induced translation waves to banks or bank protections.

v) Computation of flow around pipeline



pipeline without spoiler



pipeline with spoiler

Computation of flow around pipeline in tunnel erosion phase.

In the above application the flow around a pipe on the seabed subjected to the so-called tunnel erosion process has been computed. From the pressures on the circumference of the pipeline the hydrodynamic forces have also been computed. The computation which forms part of a serie of computations was used to investigate the effect of a spoiler on the self burial process of a pipeline and its hydrodynamic stability.

References

1. B.H. Gilding
"A numerical grid generation technique"
submitted for publication in Journal of Computational Physics
2. J.F. Thompson, Z.U.A. Warsi, C.W. Mastin
"Boundary fitted coordinate systems for numerical solutions of partial differential equations, a review" (1982)
Journal of Computational Physics, 47, 1, 1982, pp 1-108
3. M.J. Officier, C.B. Vreugdenhil, H.G. Wind
"Applications in hydraulics of numerical solutions of the Navier-Stokes equations" (1984)
in: C. Taylor (ed.), Recent advances in numerical fluid dynamics. Swansea, Pineridge Press.
4. S. Boer, H.J. de Vriend and H.G. Wind
"A system of mathematical models for the simulation of morphological processes in the coastal area"
Proc. 19th International Conference on Coastal Engineering
3-7 Sept. 1984, Houston
5. S. Boer, C.H. Hulsbergen, D.M. Richards, A. Klok and J.P. Biaggi
"Buckling considerations in the design of the gravel cover for a high temperature oil line"
Proc. Offshore Technology Conference
5-8 May, 1986, Houston



amsterdam ■



■ locatie de voorst
voorsterweg 28
marknesse

postbus 152
8300 ad emmeloord

telefoon (05274) 2922
telex 42290 hylvo-nl
telefax (05274) 3573

■ hoofdkantoor
rotterdamseweg 185
delft

postbus 177
2600 mh delft

telefoon (015) 569353
telex 38176 hydel-nl
telefax (015) 619674

**waterloopkundig laboratorium | wl
advisering & research**