

opdrachtgever:

DG Rijkswaterstaat

Dienst Weg- en Waterbouwkunde

**Turbulentie opwekking door  
drempels van steenbestorting**

Berekeningen met Delft3D

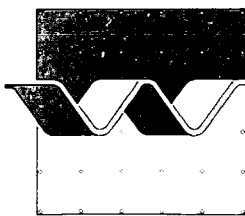
Rapport

Februari 1998

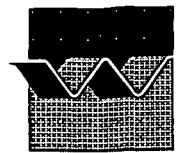
# Turbulentie opwekking door drempels van steenbestorting

Berekeningen met Delft3D

ir. A. Verwey  
drs. R.C. Agtersloot



**wl | delft hydraulics**



OPDRACHTGEVER : Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouw					
TITEL : Turbulentie opwekking door drempels van steenbestorting					
SAMENVATTING :  Met behulp van het CFD-programma CFX is nagegaan hoe groot de door drempel opgewekte turbulentie is. Er zijn 3 verschillende geometriën en drie verschillende aanstroomsituaties beschouwd. Omdat de CFX resultaten teveel bleken af te wijken van meetgegevens zijn de berekeningen vervolgens nogmaals uitgevoerd met Delft3D. De belangrijkste conclusie is dat de verhouding $D/h$ een grotere invloed heeft op de diepte gemiddelde turbulentie intensiteit ( $\bar{v}_0$ ) dan de dieptegemiddelde snelheid $\bar{U}$ .					
REV.	AUTEUR	DATUM	OPMERKINGEN	REVIEW	GOEDKEURING
1.0	R. Agtersloot	14-11-1997		R. J. de Jong	A. Verwey
2.0	R. Agtersloot	16-12-1998		R.J. de Jong	H. Opdam
TREFWOORD(EN)			INHOUD		STATUS
CFX, Delft3D, turbulentie opwekking, drempels, steenbestortingen, $k-\epsilon$ -model			TEKST : 16 TABELLEN : 6 FIGUREN : 32 APPENDICES :-		<input type="checkbox"/> VOORLOPIG <input type="checkbox"/> CONCEPT <input checked="" type="checkbox"/> DEFINITIEF
PROJECTNUMMER: Q2369					

# Inhoudsopgave

Figurenlijst

Tabellenlijst

Symbolenlijst

<b>1</b>	<b>Inleiding</b> .....	<b>1-1</b>
<b>2</b>	<b>Model opzet</b> .....	<b>2-1</b>
2.1	Modelranden .....	2-1
2.1.1	Bovenstroomse randvoorwaarden .....	2-1
2.1.2	Benedenstroomse randvoorwaarden .....	2-1
2.1.3	Randvoorwaarden aan de bodem .....	2-1
2.1.4	Randvoorwaarden aan de vrije waterspiegel .....	2-1
2.2	Rekenrooster .....	2-2
2.3	Modelvalidatie .....	2-2
<b>3</b>	<b>Resultaten</b> .....	<b>3-1</b>
3.1	Drempel met $D/h = 0.1$ .....	3-1
3.2	Drempel met $D/h = 0.2$ .....	3-2
3.3	Drempel met $D/h = 0.3$ .....	3-4
<b>4</b>	<b>Conclusies</b> .....	<b>4-1</b>
<b>5</b>	<b>Literatuurlijst</b> .....	<b>5-1</b>

**Figurenlijst**

Figuur 1	Situatieschets drempel
Figuur 2	Rooster voor de turbulentie opwekkings berekeningen met Delft3D
Figuur 3	Waterstanden voor $D/h = 0.1$
Figuur 4	Waterstanden voor $D/h = 0.2$
Figuur 5	Waterstanden voor $D/h = 0.3$
Figuur 6	$D/h = 0.1$ , $\bar{U} = 1.0$ m/s: profielen $U$
Figuur 7	$D/h = 0.1$ , $\bar{U} = 2.0$ m/s: profielen $U$
Figuur 8	$D/h = 0.1$ , $\bar{U} = 3.0$ m/s: profielen $U$
Figuur 9	$D/h = 0.1$ , $\bar{U} = 1.0$ m/s: profielen $k$
Figuur 10	$D/h = 0.1$ , $\bar{U} = 2.0$ m/s: profielen $k$
Figuur 11	$D/h = 0.1$ , $\bar{U} = 3.0$ m/s: profielen $k$
Figuur 12	$D/h = 0.1$ : contourplots $k$
Figuur 13	$D/h = 0.1$ : contourplots $r_0$
Figuur 14	$D/h = 0.1$ : profielen $\bar{r}_0$
Figuur 15	$D/h = 0.2$ , $\bar{U} = 1.0$ m/s: profielen $U$
Figuur 16	$D/h = 0.2$ , $\bar{U} = 2.0$ m/s: profielen $U$
Figuur 17	$D/h = 0.2$ , $\bar{U} = 3.0$ m/s: profielen $U$
Figuur 18	$D/h = 0.2$ , $\bar{U} = 1.0$ m/s: profielen $k$
Figuur 19	$D/h = 0.2$ , $\bar{U} = 2.0$ m/s: profielen $k$
Figuur 20	$D/h = 0.2$ , $\bar{U} = 3.0$ m/s: profielen $k$
Figuur 21	$D/h = 0.2$ : contourplots $k$
Figuur 22	$D/h = 0.2$ : contourplots $r_0$
Figuur 23	$D/h = 0.2$ : profielen $\bar{r}_0$
Figuur 24	$D/h = 0.3$ , $\bar{U} = 1.0$ m/s: profielen $U$
Figuur 25	$D/h = 0.3$ , $\bar{U} = 2.0$ m/s: profielen $U$
Figuur 26	$D/h = 0.3$ , $\bar{U} = 1.0$ m/s: profielen $k$
Figuur 27	$D/h = 0.3$ , $\bar{U} = 2.0$ m/s: profielen $k$
Figuur 28	$D/h = 0.3$ : contourplots $k$
Figuur 29	$D/h = 0.3$ : contourplots $r_0$
Figuur 30	$D/h = 0.3$ : profielen $\bar{r}_0$

## Tabellenlijst

Tabel 3.1	Maximale lokale $r_0$ voor $D/h = 0.1$
Tabel 3.2	Dieptegemiddelde $r_0$ ( $\bar{r}_0$ ) voor $D/h = 0.1$
Tabel 3.3	Maximale lokale $r_0$ voor $D/h = 0.2$
Tabel 3.4	Dieptegemiddelde $r_0$ ( $\bar{r}_0$ ) voor $D/h = 0.2$
Tabel 3.5	Maximale lokale $r_0$ voor $D/h = 0.3$
Tabel 3.6	Dieptegemiddelde $r_0$ ( $\bar{r}_0$ ) voor $D/h = 0.3$
Tabel 4.1	Maximale toename lokale turbulentie-intensiteit (in %)
Tabel 4.2	Maximale toename dieptegemiddelde turbulentie-intensiteit (in %)

## Symbolenlijst

- $c_\mu$  - coëfficiënt in het k- $\epsilon$  model
- $C$  - Chézy coëfficiënt
- $D$  - hoogte van de drempel
- $\epsilon$  - dissipatie van turbulente energie
- $g$  - versnelling ten gevolge van de zwaartekracht
- $h$  - waterdiepte
- $\kappa$  - Von Karman constante
- $k$  - locale turbulente kinetische energie
- $\bar{k}$  - dieptegemiddelde turbulente kinetische energie
- $k_s$  - Nikuradse ruwheidslengte
- $q$  - specifiek debiet
- $r_0$  - locale turbulentie-intensiteit
- $\bar{r}_0$  - dieptegemiddelde turbulentie-intensiteit
- $U$  - locale stroomsnelheid in x-richting
- $\bar{U}$  - dieptegemiddelde stroomsnelheid in x-richting
- $x$  - coördinaat in lengte richting van het model
- $U_*$  - schuifspanningsnelheid
- $z_0$  - ruwheidslengte in rivierbed

# I Inleiding

In het kader van bodempeil verlagingen in de Maas dienen kruisende leidingen afgedekt te worden. Deze afdekkingen bestaan uit steenbestortingen die drempels in de rivier vormen. Benedenstreams van deze drempels ontstaan doorgaans neren met horizontale assen. Op het grensvlak van deze neren wordt door grote snelheidsgradiënten energie gedissipeerd. De grootte van deze energie is gerelateerd aan een referentiesnelheid (dieptegemiddeld of nabij de bodem).

Bij RWS/DWW is ruimte gereserveerd voor het verrichten van onderzoek naar de drempels door numerieke modellering van turbulentie. Deze werkzaamheden maken deel uit van het project Turbo. Per type constructie zal het stromings- en turbulentieveld in detail worden berekend. Hierbij zal onderscheid worden gemaakt tussen vertragingengebied, versnellingsgebied en overige kenmerkende gebieden (hoofdstroom, menglaag, neer, watersprong, kerngebied van de straal etcetera). De plaats met de maatgevende belasting op de bestorting hangt sterk af van de grootte van de turbulentie en de grootte van de snelheid nabij de bodem en zal moeten worden vastgesteld.

Het modelleren is gebaseerd op  $k$ - $\varepsilon$ -berekeningen. Aandacht gaat met uit naar de verdelingen van zowel de locale snelheid  $U$  als de turbulente kinetische energie  $k$ . Uit deze waarden wordt vervolgens de verdeling van de dieptegemiddelde turbulentie-intensiteit  $\bar{\tau}_0$  bepaald langs de rivieras. Met deze informatie kunnen de gebieden met de grootste aanval op de bodem worden getraceerd. De gevonden waarden van  $\bar{\tau}_0$  zijn namelijk een noodzakelijke input in de bij dit type onderzoek gebruikte ontgrondingsformules van Breusers (zie Hoffmans en Verhey, [1]).

De berekeningen en de rapportage van de resultaten worden uitgevoerd onder de volgende eisen en afspraken (zie ook figuur 1):

1. De berekeningen worden uitgevoerd met het programma Delft3D (de in eerste instantie voorgestelde uitvoering met CFX bleek niet de juiste resultaten op te leveren).
2. Er worden drie verschillende geometrieën beschouwd, waarbij de verhouding  $D/h$  de waarden 0.1, 0.2 en 0.3 aanneemt (hierbij is  $D$  de drempelhoogte en  $h$  de waterdiepte).
3. Voor elke geometrie worden berekeningen uitgevoerd met drie verschillende snelheden:  $\bar{U} = 1.0, 2.0$  en  $3.0$  m/s. Voor de waterdiepte wordt bij deze snelheden de waarde  $h = 5.0$  m aangehouden.
4. Het gebruikte turbulentiemodel is het zogenaamde  $k$ - $\varepsilon$ -model.
5. De bestorting is hydraulisch ruw. Deze ruwheid ( $k_s$ ) is evenredig met de waterdiepte en wordt gesteld op  $k_s/h = 0.05$ . Voor de rivierbodembodem wordt een bodemruwheid van  $k_s/h = 0.03$  aangehouden.
6. In de rapportage wordt informatie gegeven omtrent de dieptegemiddelde turbulentie-intensiteit ( $\bar{\tau}_0$ ) direct benedenstreams van de kruin van de drempel tot de overgang van het vaste naar het erodeerbare bed. De hiervoor benodigde turbulentie-intensiteit ( $\bar{\tau}_0$ ) wordt bepaald met  $\bar{\tau}_0 = \sqrt{k} / \bar{U}$ .
7. Naast figuren met isolijnen van snelheden en turbulente kinetische energie worden ook verticale profielen van bovengenoemde grootheden gegeven.



In eerste instantie werden de berekeningen uitgevoerd met het CFX-model. Tijdens het onderzoek zijn in het gebruik van CFX enkele problemen aan het licht gekomen met betrekking tot de verticale verdeling van  $k$ . Omdat uit controle van de met CFX berekende verticale snelheidsverdeling benedenstrooms van de drempel geconstateerd werd dat daar geen neer ontstaat, is in overleg met de opdrachtgever besloten de volledige  $k$ - $\varepsilon$  modellering uit te voeren met het Delft3D pakket van WL | DELFT DYDRAULICS.

Verder is gebleken dat de combinatie van  $D/h = 0.3$  en  $\bar{U} = 3.0$  m/s bij een waterdiepte van  $h = 5$  m fysisch gezien onmogelijk is. Het hiervoor gedefinieerde debiet van  $q = 15$  m<sup>2</sup>/s kan alleen over de drempel stromen bij een minimale waarde van  $h = 5.35$  m.

De combinatie van  $D/h = 0.3$  en  $\bar{U} = 2.0$  m/s is nog juist mogelijk als ook rekening wordt gehouden met het wrijvingsverlies over de drempel. In overleg met de opdrachtgever is daarom besloten de berekening voor de combinatie  $D/h = 0.3$  en  $\bar{U} = 3.0$  m/s te laten vervallen.

Dit onderzoek is uitgevoerd door WL | DELFT HYDRAULICS onder leiding van ir. A. Verwey door drs. R.C. Agtersloot.

## 2 Model opzet

Voor de modellering van de stroming over de drempel en de optredende turbulentie-intensiteit is gebruik gemaakt van een 2DV-instelling van het Delft3D pakket [2]. Dit pakket maakt gebruik van de sigma-transformatie voor de aanpassing van het rekenrooster aan de vrije waterspiegel. Verder biedt Delft3D de mogelijkheid turbulentie te simuleren met het  $k$ - $\varepsilon$ -model.

Voor de simulaties zijn de gegevens gebruikt, zoals weergegeven in de inleiding. De diepte  $h$  is hierbij op 5 m gezet. Hiermee komt op de bestorting de waarde van  $k_s$  op 0.25 m. terwijl voor het onverdedigde rivierbed is uitgegaan van een waarde  $k_s = 0.15$  m.

### 2.1 Modelranden

Het model strekt zich uit van 100 m bovenstrooms van de bovenstroomse voet van de drempel tot 300 m benedenstrooms van de benedenstroomse voet van de drempel.

#### 2.1.1 Bovenstroomse randvoorwaarden

Aan de bovenstroomse rand van het model is een waterdiepte opgelegd van 5 m. Randvoorwaarden voor het  $k$ - $\varepsilon$  model voor de bovenstroomse rand worden door Delft3D automatisch gegenereerd uit een logaritmische snelheidsverdeling. Deze randvoorwaarden voor het  $k$ - $\varepsilon$  model zorgen ervoor dat het model zich snel (binnen enkele roostercellen) instelt op de evenwichtstoestand.

#### 2.1.2 Benedenstroomse randvoorwaarden

Aan de benedenstroomse rand wordt het gewenste debiet opgelegd. Dit debiet wordt bepaald uit de gewenste gemiddelde instromende snelheden over de verticaal, gecombineerd met de bovenstroomse waterdiepte. De randvoorwaarden van het turbulentiemodel volgen uit de vrije uitstromingscondities en worden standaard binnen Delft3D bepaald.

#### 2.1.3 Randvoorwaarden aan de bodem

Aan de bodem wordt in het stromingsmodel als randvoorwaarde de stroomsnelheid loodrecht op de wand gelijk aan nul gezet. In het turbulentiemodel wordt de  $k$ -waarde bepaald uit de opgelegde ruwheid van de bodem. In dit model is hiervoor de waarde  $z_0$  ingevoerd, bepaald uit  $z_0 = k_s/30$  [2]. Voordeel van het gebruik van  $z_0$  is dat ook op boven- en benedenstroomse taluds van de drempel de ruwheid eenvoudig kan worden ingevoerd.

#### 2.1.4 Randvoorwaarden aan de vrije waterspiegel

Aan de vrije waterspiegel wordt de randvoorwaarde bepaald door de snelheid verticaal gelijk te stellen aan de snelheid waarmee de waterspiegel zich verplaatst. In het turbulentiemodel wordt  $k$  opgelegd aan het wateroppervlak. Uit metingen van Nezu en Rodi [3] volgt dat de  $k$ -waarde benaderd kan worden door  $k_{\text{oppervlak}} = k_{\text{bodem}} * \sqrt{c_\mu}$ . In het hier gebruikte model is dit

benaderd door aan de vrije waterspiegel een dwars op de as van de rivier staande windschuifspanning op te leggen die de gewenste  $k$ -waarde levert.

## 2.2 Rekenrooster

Het rekenrooster is opgezet door in de verticaal bij de bodem de eerste celgrootte 1% van de waterdiepte te nemen en deze in opwaartse richting voor iedere volgende cel exponentieel toe te laten nemen met een factor 1.15. In de lengterichting varieert de celgrootte van 2 meter rond de drempel tot 30 meter aan de in- en uitstroomzijde. Het hiermee gegenereerde rooster wordt voor het gebied rond de drempel weergegeven in figuur 2.

Een gevoeligheidsanalyse met een (in lengterichting) vier keer fijner rooster leverde geen significant andere resultaten op. Het verschil in  $r_0$  (en  $\bar{r}_0$ ) op het grove en op het fijne rooster was minder dan 2%.

## 2.3 Modelvalidatie

Figuren 3, 4 en 5 laten de waterstanden zien zoals die berekend zijn door Delft3D voor de verschillende situaties.

Uit metingen van Hoffmans en Booij [4] volgt dat voor de dieptegemiddelde turbulentie-intensiteit de volgende formule kan worden afgeleid:

$$\bar{r}_0 = 1.2 * \frac{\sqrt{g}}{C} \quad (1.1)$$

Voor de Chézy coëfficiënt  $C$  geldt de volgende uitdrukking:

$$C = \frac{\sqrt{g}}{\kappa} \ln\left(\frac{12h}{k_s}\right) \quad (1.2)$$

Invullen van  $\kappa = 0.4$ ,  $k_s/h = 0.03$  en  $g = 9.81 \text{ m}^2/\text{s}$  leidt tot een Chézy-waarde van  $46.9 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ . Hieruit volgt voor  $\bar{r}_0$  een waarde van 0.080.

Uit de Delft3D-berekeningen volgt dat de ongestoorde dieptegemiddelde turbulentie-intensiteit ongeveer 0.091 is. Met andere woorden, de door Delft3D berekende intensiteit is ruim 10% hoger dan volgt uit vergelijking (1.1). Geconcludeerd mag worden dat de berekeningen hiermee een veiligheids-marge bevatten voor  $\bar{r}_0$ .

Verder levert de berekening voor de combinaties met  $U = 3.0 \text{ m/s}$  een waarde voor de turbulente kinetische energie  $k_{\text{bodem}} = 0.134 \text{ m}^2/\text{s}^2$  op. De verwachte waarde volgt uit de vergelijking  $k_{\text{bodem}} = U_*^2 / \sqrt{c_\mu}$ . Voor  $k_s = 0.15 \text{ m}$  geeft dit de waarde  $k = 0.134 \text{ m}^2/\text{s}^2$ . Het model voldoet hiermee aan de verwachting. Bij dezelfde waarde van  $U$  wordt aan het oppervlak een waarde  $k = 0.038 \text{ m}^2/\text{s}^2$  gevonden. Ook deze waarde voldoet nagenoeg aan de verwachte waarde  $k = 0.040 \text{ m}^2/\text{s}^2$ .

## 3 Resultaten

### 3.1 Drempel met $D/h = 0.1$

#### Locale turbulentie-intensiteit

Figuren 6, 7 en 8 (snelheidsprofielen) en 9, 10 en 11 (turbulente kinetische energie profielen) laten duidelijk de invloed van de drempel op de stroming zien. Contourplots van de turbulente kinetische energie worden weergegeven in figuur 12. Figuur 13 laat zien dat de intensiteit van de ongestoorde stroming vlak boven de bodem ongeveer 0.41 is bij alle snelheden. De intensiteit op de voet van de bovenstroomse zijde van de drempel ligt ongeveer 15% hoger. Op de drempel neemt de intensiteit toe en de maximale intensiteit wordt gevonden aan het einde van de bovenkant van de drempel. Daar bedraagt de intensiteit ongeveer 0.60 voor alle snelheden, dat wil zeggen een toename van ongeveer 50%. Op de benedenstroomse zijde neemt de intensiteit iets af tot aan de voet van de drempel. Daar ligt de intensiteit nog circa 45% boven die van de ongestoorde stroming.  $6h$  benedenstrooms van de drempel wijkt de intensiteit minder dan 2% af van die van de ongestoorde stroming.

In tabel 3.1 staat voor verschillende locaties de maximale  $r_0$  waarde. Voor een specificering van de locaties wordt verwezen naar figuur 1.

Locatie	$\bar{U} = 1.0$ m/s	$\bar{U} = 2.0$ m/s	$\bar{U} = 3.0$ m/s
A	0.408	0.410	0.412
B	0.503	0.503	0.505
C	0.507	0.515	0.525
D	0.550	0.556	0.565
E	0.581	0.593	0.607
F	0.567	0.570	0.579
G	0.553	0.562	0.573
H	0.410	0.413	0.418
I	0.409	0.412	0.417

Tabel 3-1 Maximale  $r_0$  voor  $D/h = 0.1$

#### Dieptegemiddelde turbulentie-intensiteit

Profielen van de dieptegemiddelde turbulentie-intensiteit worden gepresenteerd in figuur 14. De intensiteit van de ongestoorde stroming bedraagt ongeveer 0.092. Aan de bovenstroomse voet van de drempel neemt de intensiteit iets af. Bovenop de drempel ligt de intensiteit 9% (bij  $\bar{U} = 1.0$  m/s) tot 12% ( $\bar{U} = 3.0$  m/s) onder die van de ongestoorde stroming. Vanaf het begin van de benedenstroomse zijde van de drempel neemt de intensiteit toe tot een afstand van  $h$  meter benedenstrooms van de drempel. Daar is de intensiteit met 6% ( $\bar{U} = 1.0$  m/s) tot 11% ( $\bar{U} = 3.0$  m/s) toegenomen ten opzichte van die van de ongestoorde stroming.  $6h$  benedenstrooms van de drempel is het verschil afgenomen tot 5% bij  $\bar{U} = 1.0$  m/s en 10% bij

$\bar{U} = 3.0$  m/s. Na een afstand van  $30h$  is het verschil met de ongestoorde turbulentie-intensiteit minder dan 1%.

In tabel 3.2 wordt voor verschillende locaties de dieptegemiddelde turbulentie-intensiteit gepresenteerd.

Locatie	$\bar{U} = 1.0$ m/s	$\bar{U} = 2.0$ m/s	$\bar{U} = 3.0$ m/s
A	0.093	0.092	0.091
B	0.090	0.088	0.087
C	0.085	0.083	0.082
D	0.085	0.083	0.080
E	0.089	0.087	0.085
F	0.095	0.095	0.095
G	0.097	0.098	0.098
H	0.097	0.097	0.098
I	0.093	0.093	0.091

Tabel 3-2 Dieptegemiddelde  $r_0(\bar{r}_0)$  voor  $D/h = 0.1$

Uit figuren 9 t/m 11 kan geconcludeerd worden dat de aan de vrije waterspiegel opgegeven empirische  $k$ -waarden aan de hoge kant zouden kunnen zijn. Een mogelijke fout hierin zal echter geen noemenswaardige afwijking in de gevonden  $\bar{r}_0$ -waarden opleveren.

## 3.2 Drempel met $D/h = 0.2$

### Locale turbulentie-intensiteit

Figuren 15 t/m 20 tonen respectievelijk de snelheidsprofielen en de turbulente kinetische energie profielen. Contourplots van de turbulente kinetische energie worden weergegeven in figuur 21. Figuur 22 laat zien dat de turbulentie-intensiteit van de ongestoorde stroming vlak boven de bodem gelijk is aan 0.41 bij alle snelheden. De intensiteit op de voet van de bovenstroomse zijde van de drempel ligt ongeveer 20% hoger. Op de drempel blijft de intensiteit toenemen en de maximale intensiteit wordt gevonden op de benedenstroomse zijde van de drempel. Daar varieert de intensiteit van 0.64 bij  $\bar{U} = 1.0$  m/s tot 0.74 bij  $\bar{U} = 3.0$  m/s. Na een afstand van  $6h$  benedenstrooms van de drempel is de toename ten opzichte van ongestoorde stroming ongeveer 10%. Na ongeveer  $10h$  is de turbulentie-intensiteit weer die van de ongestoorde stroming.

In tabel 3.3 staat voor verschillende locaties de maximale  $r_0$  waarde. Voor een specificering van de locaties wordt verwezen naar figuur 1.

locatie	$\bar{U} = 1.0 \text{ m/s}$	$\bar{U} = 2.0 \text{ m/s}$	$\bar{U} = 3.0 \text{ m/s}$
A	0.407	0.408	0.412
B	0.503	0.513	0.501
C	0.543	0.556	0.554
D	0.591	0.603	0.627
E	0.635	0.657	0.696
F	0.601	0.613	0.704
G	0.576	0.587	0.635
H	0.439	0.444	0.449
I	0.410	0.413	0.420

Tabel 3-3 Maximale lokale  $r_0$  voor  $D/h = 0.2$ 

### Dieptegemiddelde turbulentie-intensiteit

Profielen van de dieptegemiddelde turbulentie-intensiteit worden gepresenteerd in figuur 23. De intensiteit van de ongestoorde stroming bedraagt ongeveer 0.09. Aan de bovenstroomse voet van de drempel neemt de intensiteit iets af. Bovenop de drempel ligt de intensiteit 20% (bij  $\bar{U} = 1.0 \text{ m/s}$ ) tot 35% ( $\bar{U} = 3.0 \text{ m/s}$ ) onder die van de ongestoorde stroming. Vanaf het begin van de benedenstroomse zijde van de drempel neemt de intensiteit toe tot ongeveer  $h$  meter benedenstrooms van de drempel. Daar is intensiteit met 15% ( $\bar{U} = 1.0 \text{ m/s}$ ) tot 30% ( $\bar{U} = 3.0 \text{ m/s}$ ) toegenomen ten opzichte van de ongestoorde stroming. Na een afstand van  $10h$  benedenstrooms van de drempel is het verschil nog circa 15%. Na  $30h$  is het verschil met de ongestoorde turbulentie-intensiteit minder dan 3%.

In tabel 3.4 wordt voor verschillende locaties de dieptegemiddelde turbulentie-intensiteit gepresenteerd.

Locatie	$\bar{U} = 1.0 \text{ m/s}$	$\bar{U} = 2.0 \text{ m/s}$	$\bar{U} = 3.0 \text{ m/s}$
A	0.092	0.092	0.091
B	0.083	0.081	0.080
C	0.076	0.073	0.070
D	0.076	0.073	0.069
E	0.082	0.081	0.077
F	0.103	0.108	0.114
G	0.105	0.112	0.117
H	0.105	0.109	0.111
I	0.095	0.094	0.094

Tabel 3-4 Dieptegemiddelde  $r_0$  ( $\bar{r}_0$ ) voor  $D/h = 0.2$

### 3.3 Drempel met $D/h = 0.3$

#### Locale turbulentie-intensiteit

Figuren 24 t/m 27 (respectievelijk de snelheids- en turbulente kinetische energieprofielen) geven de stromings situatie weer bij een drempel met  $D/h = 0.3$ . Contourplots van de turbulente kinetische energie worden weergegeven in figuur 28. Figuur 29 laat zien dat de turbulentie-intensiteit van de ongestoorde stroming vlak boven de bodem ongeveer 0.41 is bij alle snelheden. De intensiteit op de voet van de bovenstroomse zijde van de drempel ligt ongeveer 20% hoger. Op de drempel blijft de intensiteit toenemen en de maximale intensiteit wordt gevonden op de benedenstroomse zijde van de drempel. De intensiteit is dan 0.69 bij  $\bar{U} = 1.0$  m/s en 0.76 bij  $\bar{U} = 2.0$  m/s. Na dit punt neemt de intensiteit in alle gevallen weer af.  $6h$  benedenstrooms van de drempel is de toename ten opzichte van ongestoorde stroming ongeveer 30%. Na een afstand  $30h$  is de turbulentie-intensiteit bij  $\bar{U} = 1.0$  en  $\bar{U} = 2.0$  m/s vrijwel die van de ongestoorde stroming.

In tabel 3.5 staat voor verschillende locaties de maximale  $r_0$  waarde. Voor een specificering van de locaties wordt verwezen naar figuur 1.

Locatie	$\bar{U} = 1.0$ m/s	$\bar{U} = 2.0$ m/s
A	0.407	0.410
B	0.490	0.482
C	0.587	0.593
D	0.644	0.675
E	0.691	0.732
F	0.647	0.719
G	0.607	0.667
H	0.415	0.421
I	0.410	0.416

Tabel 3-5 Maximale locale  $r_0$  voor  $D/h = 0.3$

#### Dieptegemiddelde intensiteit

Profielen van de dieptegemiddelde turbulentie-intensiteit worden gepresenteerd in figuur 30. De intensiteit van de ongestoorde stroming bedraagt ongeveer 0.09. Aan de bovenstroomse voet van de drempel neemt de intensiteit iets af. Bovenop de drempel ligt de intensiteit 25% (bij  $\bar{U} = 1.0$  m/s) tot 30% ( $\bar{U} = 2.0$  m/s) onder die van de ongestoorde stroming. Vanaf het begin van de benedenstroomse zijde van de drempel neemt de intensiteit toe tot ongeveer  $h$  meter benedenstrooms van de drempel. Daar is intensiteit met 35% ( $\bar{U} = 1.0$  m/s) respectievelijk 50% ( $\bar{U} = 2.0$  m/s) toegenomen ten opzichte van de ongestoorde stroming. Na een afstand van  $10h$  benedenstrooms van de drempel varieert het verschil nog van 25% bij  $\bar{U} = 1.0$  m/s tot 35% bij  $\bar{U} = 2.0$  m/s. Na  $50h$  is het verschil met de ongestoorde turbulentie-intensiteit nog ongeveer 5%.

In tabel 3.6 wordt voor verschillende locaties de dieptegemiddelde turbulentie-intensiteit gepresenteerd.

Locatie	$\bar{U} = 1.0 \text{ m/s}$	$\bar{U} = 2.0 \text{ m/s}$
A	0.092	0.092
B	0.081	0.081
C	0.068	0.065
D	0.069	0.066
E	0.077	0.075
F	0.118	0.129
G	0.122	0.135
H	0.120	0.130
I	0.097	0.097

Tabel 3-6 Dieptegemiddelde  $r_0$  ( $\bar{r}_0$ ) voor  $D/h = 0.3$



## 4 Conclusies

### Locale turbulentie-intensiteit

De grootste turbulentie-intensiteit blijkt op te treden op de benedenstroomse zijde van de drempel. Langs de bovenstroomse zijde en over het vlakke stuk van de drempel neemt de intensiteit toe tot aan het begin van de benedenstroomse zijde van de drempel. De toename op de benedenstroomse zijde van de drempel hangt af van zowel de verhouding  $D/h$  als de dieptegemiddelde snelheid  $\bar{U}$ . Tabel 4.1 toont dit voor de lokale turbulentie-intensiteit waarbij de toename is gegeven ten opzichte van de ongestoorde turbulentie-intensiteit.

	$D/h = 0.1$	$D/h = 0.2$	$D/h = 0.3$
$\bar{U} = 1.0 \text{ m/s}$	42.4	57.3	70.3
$\bar{U} = 2.0 \text{ m/s}$	45.0	60.7	86.6
$\bar{U} = 3.0 \text{ m/s}$	47.2	80.3	-

Tabel 4-1 Maximale toename lokale turbulentie-intensiteit (in %)

De maximale toename bevindt zich op de benedenstroomse zijde van de drempel (tussen de punten E en F uit figuur 1). Uit Tabel 4.1 is duidelijk zichtbaar dat de hoogte van de drempel een grotere invloed heeft op de toename in lokale turbulentie-intensiteit op de benedenstroomse zijde van de drempel dan de dieptegemiddelde snelheid  $\bar{U}$ .

### Dieptegemiddelde intensiteit

De grootste turbulentie-intensiteit blijkt op te treden benedenstrooms van de drempel. Langs de bovenstroomse zijde en over het vlakke stuk van de drempel neemt de intensiteit af tot aan het begin van de benedenstroomse zijde van de drempel in de stroomrichting. Vanaf de benedenstroomse voet van de drempel neemt de intensiteit toe over een afstand van ongeveer  $h$  meter. De toename hangt af van zowel de verhouding  $D/h$  als de dieptegemiddelde snelheid  $\bar{U}$ . Tabel 4.2 toont dit voor de turbulentie-intensiteit waarbij de toename is gegeven ten opzichte van de ongestoorde turbulentie-intensiteit. De locatie waar de maximale toename wordt gevonden ligt in het algemeen  $h$  meter benedenstrooms van de drempel.

	$D/h = 0.1$	$D/h = 0.2$	$D/h = 0.3$
$\bar{U} = 1.0 \text{ m/s}$	6.5	14.9	34.4
$\bar{U} = 2.0 \text{ m/s}$	7.8	22.3	49.2
$\bar{U} = 3.0 \text{ m/s}$	11.1	29.1	-

Tabel 4-2 Maximale toename dieptegemiddelde turbulentie-intensiteit (in %)

Uit Tabel 4.2 blijkt duidelijk dat de verhouding  $D/h$  een grotere invloed heeft op de toename van de turbulentie-intensiteit dan de dieptegemiddelde snelheid  $\bar{U}$ .

naam	locatie
A	-2h
B	-
C	4D
D	6D
E	4D + 2h
F	12D + 2h
G	12D + 2.5h
H	12D + 8h
I	12D + 32h

B is het begin van de drempel

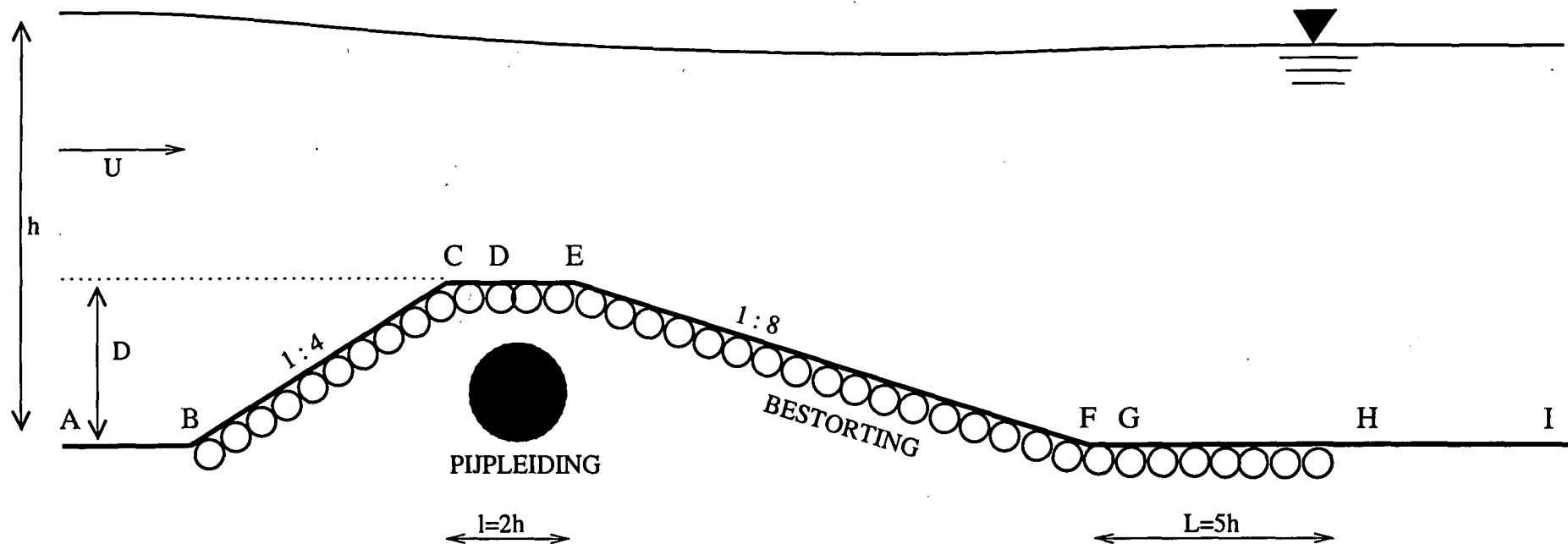


Fig. 1 Situatieschets drempel (niet op schaal)

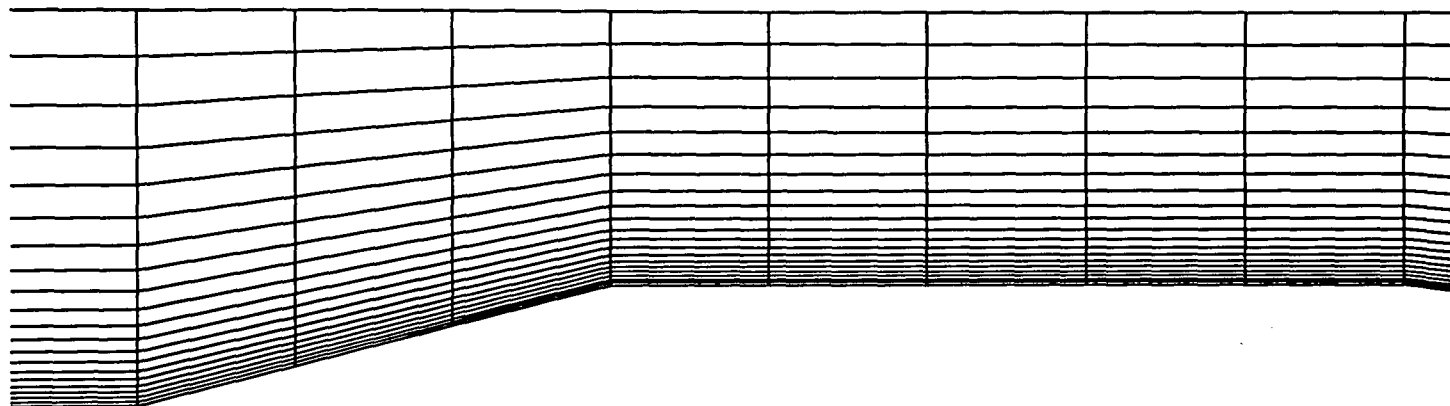


Fig. 2 Rooster voor de turbulentie opwekkings berekeningen met Delft3D

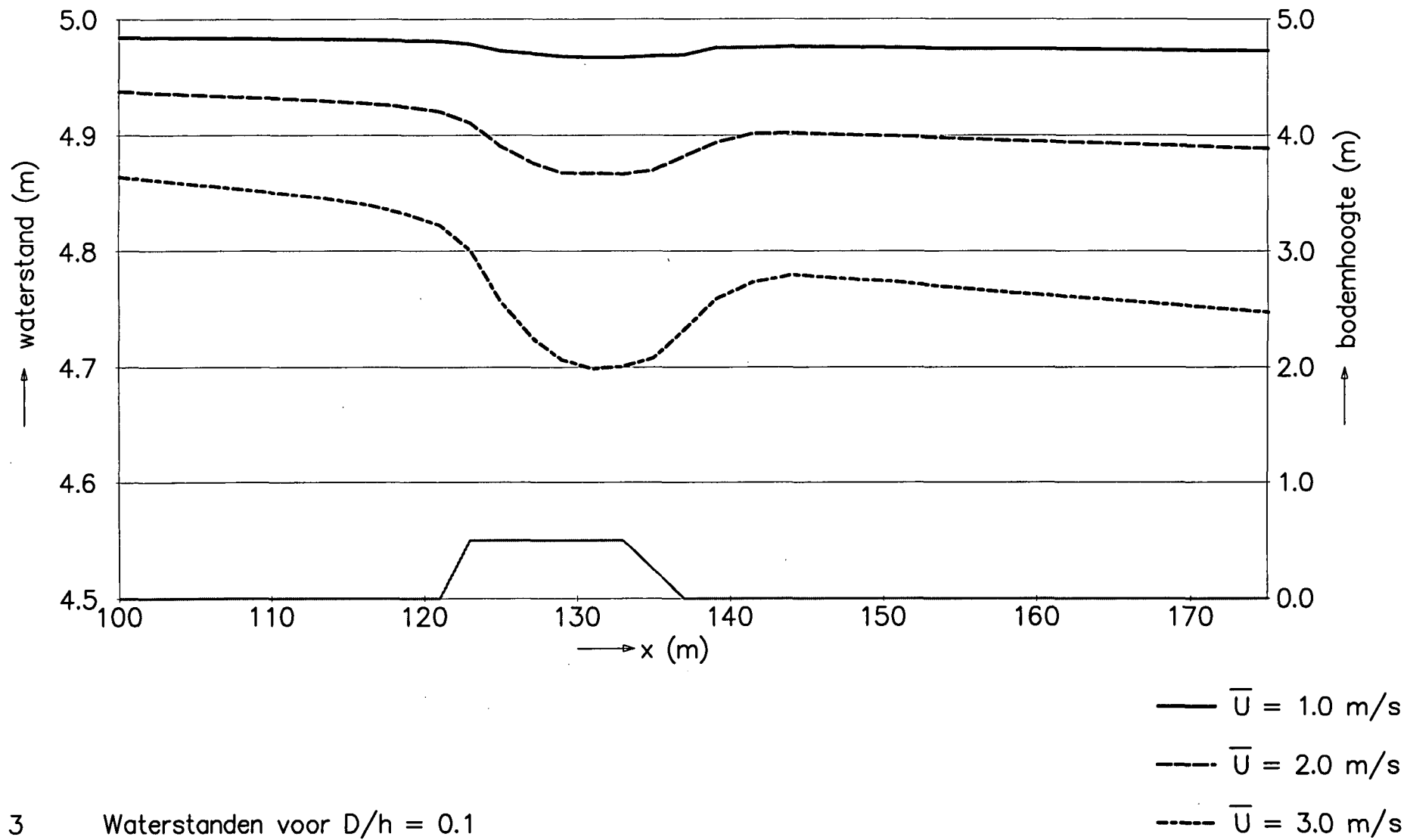


Fig. 3 Waterstanden voor  $D/h = 0.1$

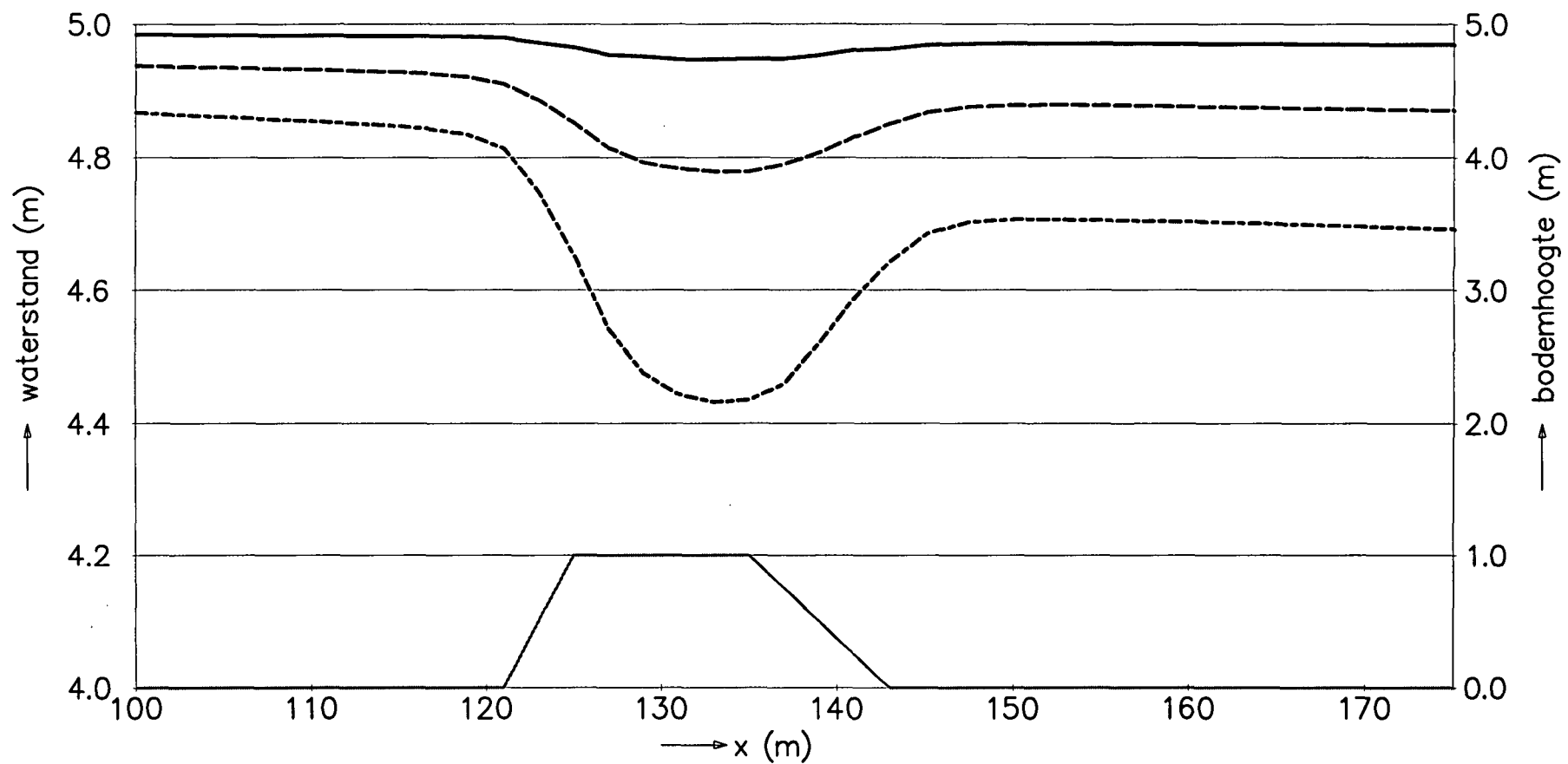


Fig. 4 Waterstanden voor  $D/h = 0.2$

—  $\bar{U} = 1.0$  m/s  
 - - -  $\bar{U} = 2.0$  m/s  
 - · -  $\bar{U} = 3.0$  m/s

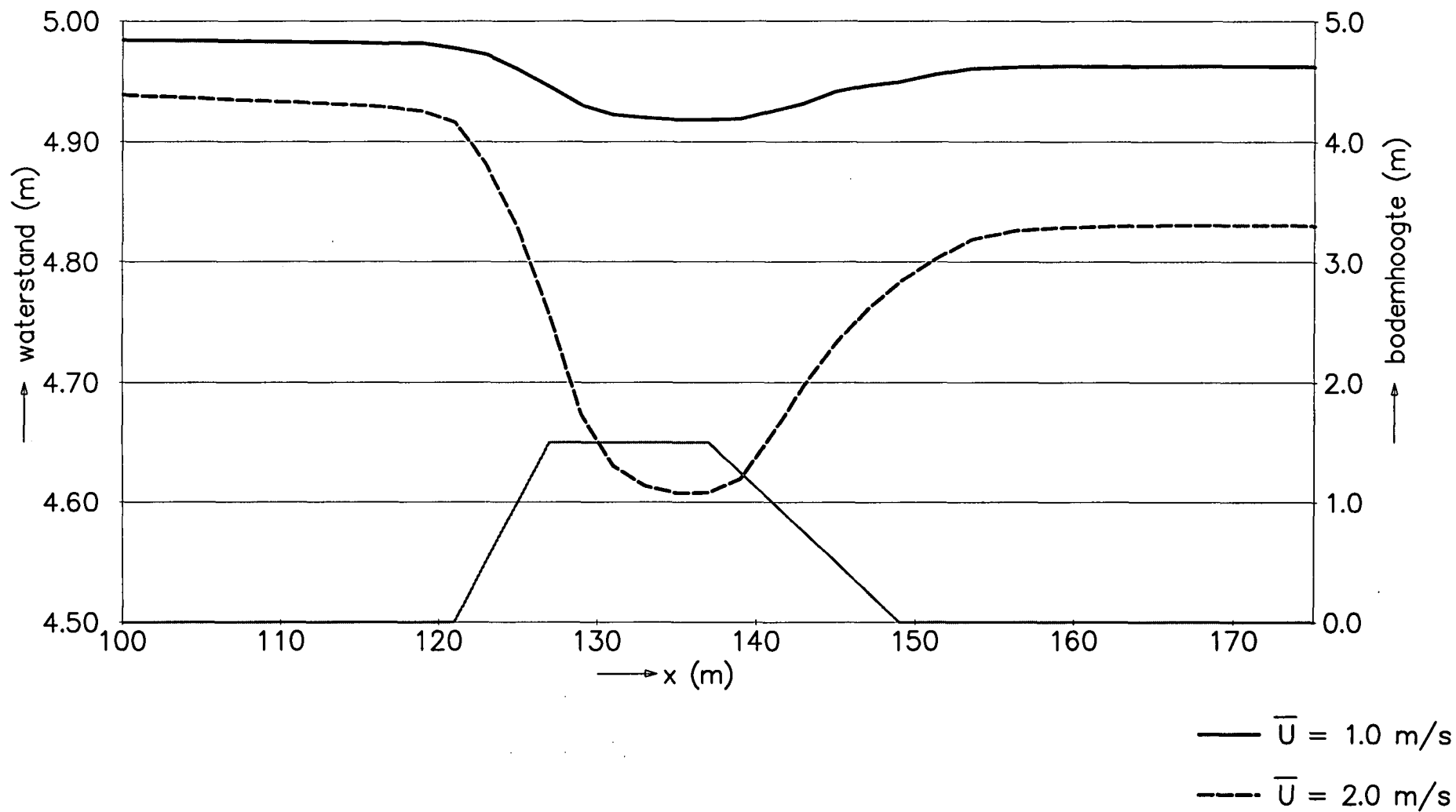


Fig. 5 Waterstanden voor  $D/h = 0.3$

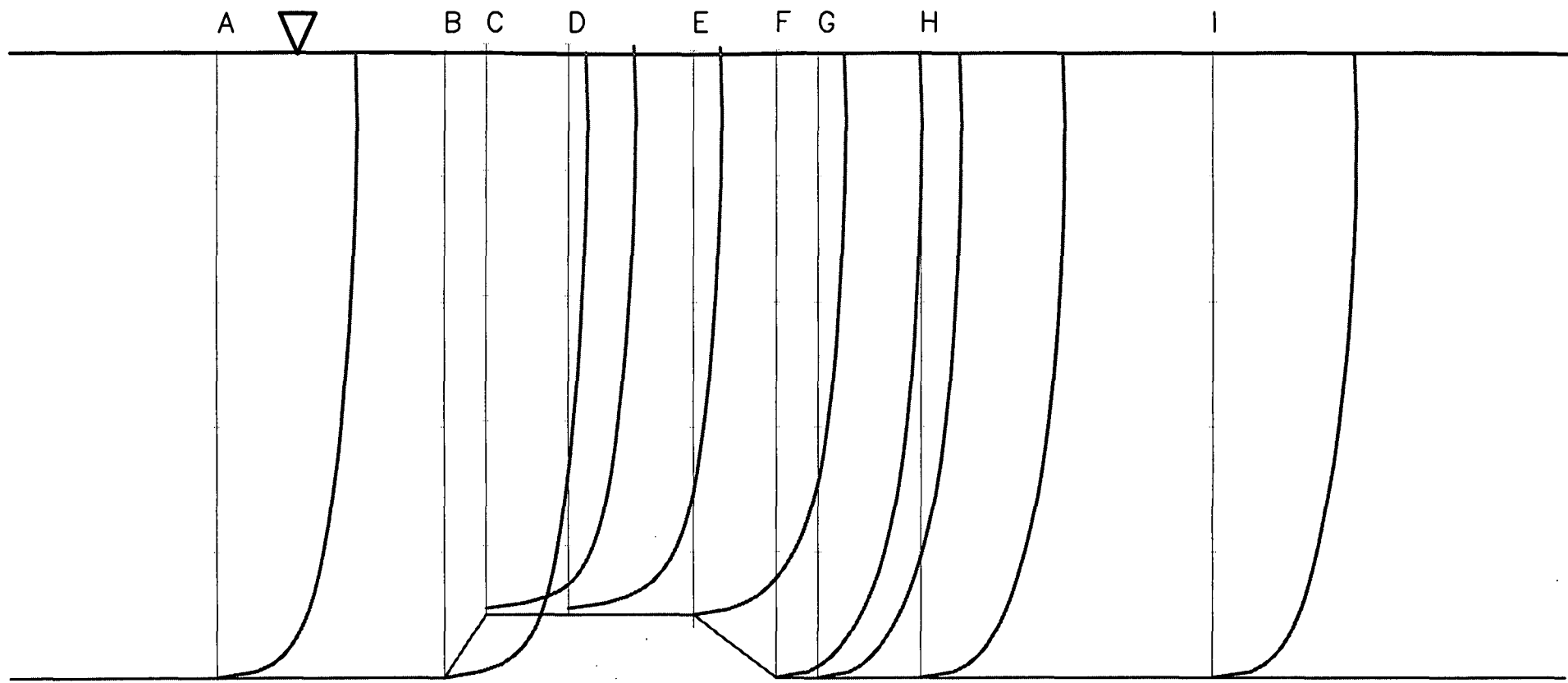


Fig. 6  $D/h = 0.1, \bar{U} = 1.0$  m/s: profielen U

1 cm = 0.5 m/s

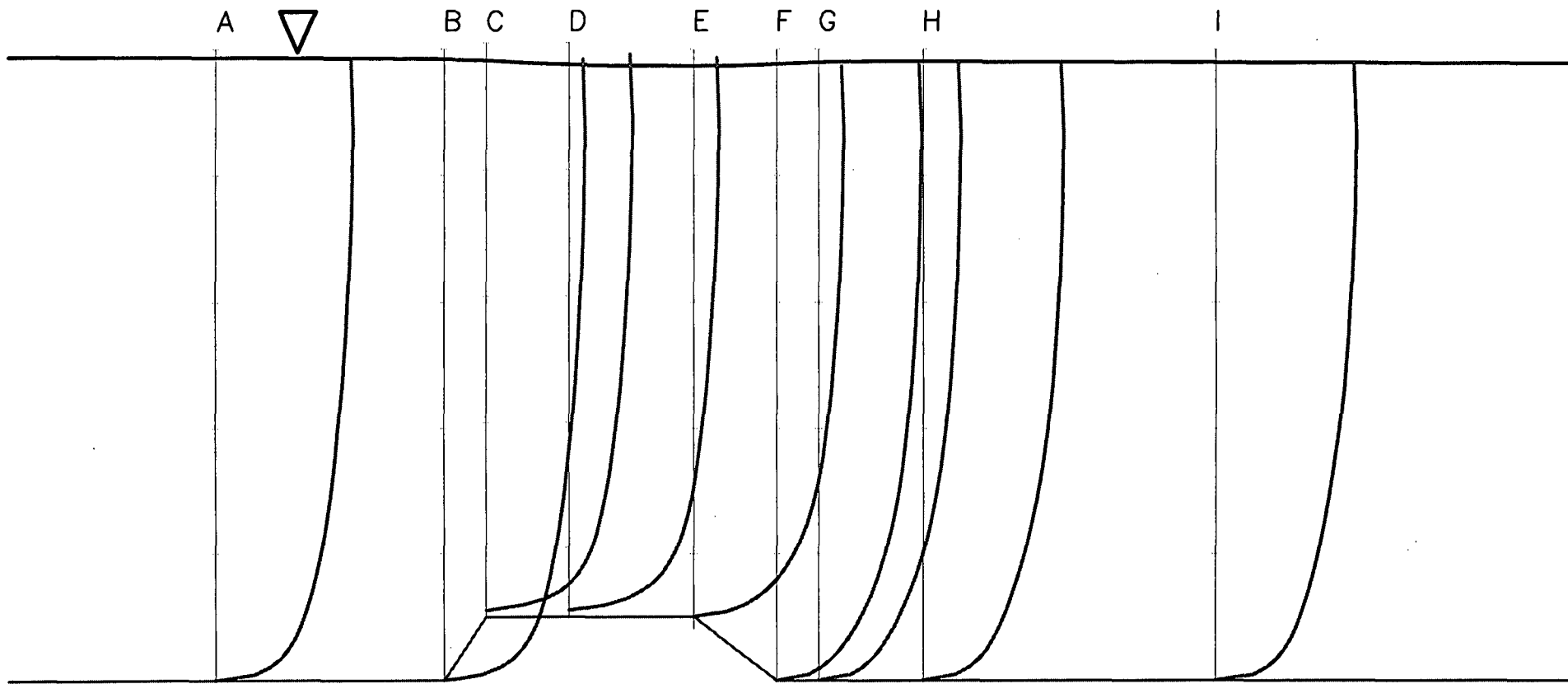


Fig. 7  $D/h = 0.1, \bar{U} = 2.0 \text{ m/s}$ : profielen U

1 cm = 1.0 m/s



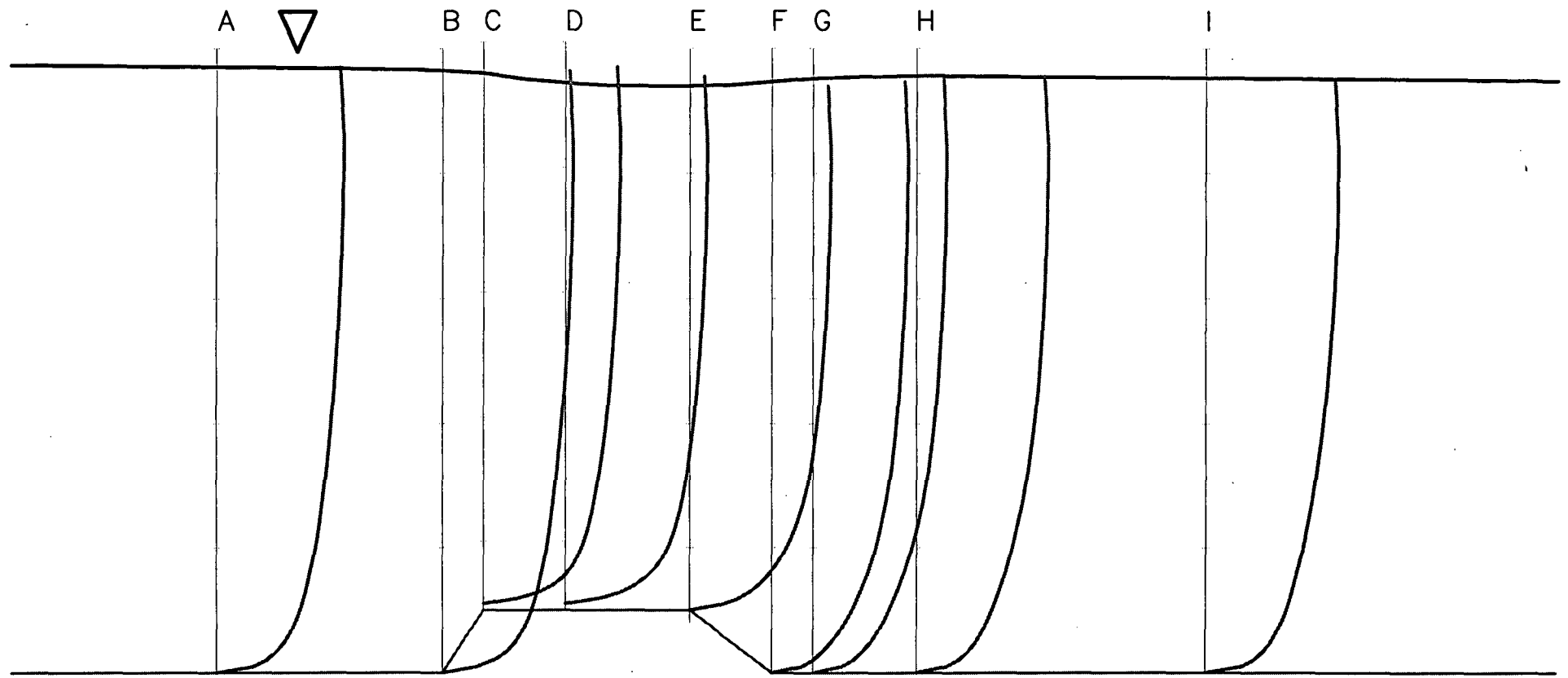


Fig. 8  $D/h = 0.1, \bar{U} = 3.0 \text{ m/s}$ : profielen U

1 cm = 1.5 m/s

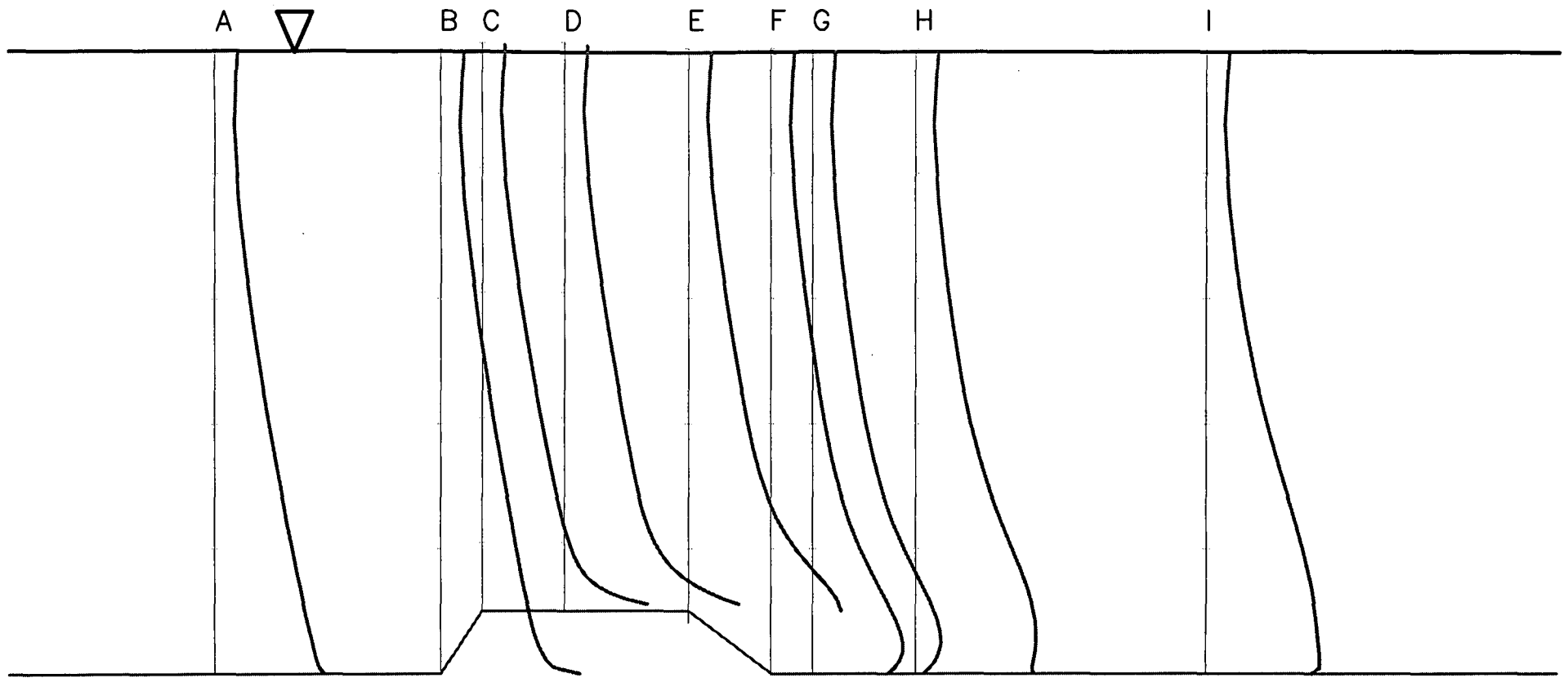


Fig. 9  $D/h = 0.1, \bar{U} = 1.0 \text{ m/s}$ : profielen k

1 cm =  $0.0025 \text{ m}^2/\text{s}^2$

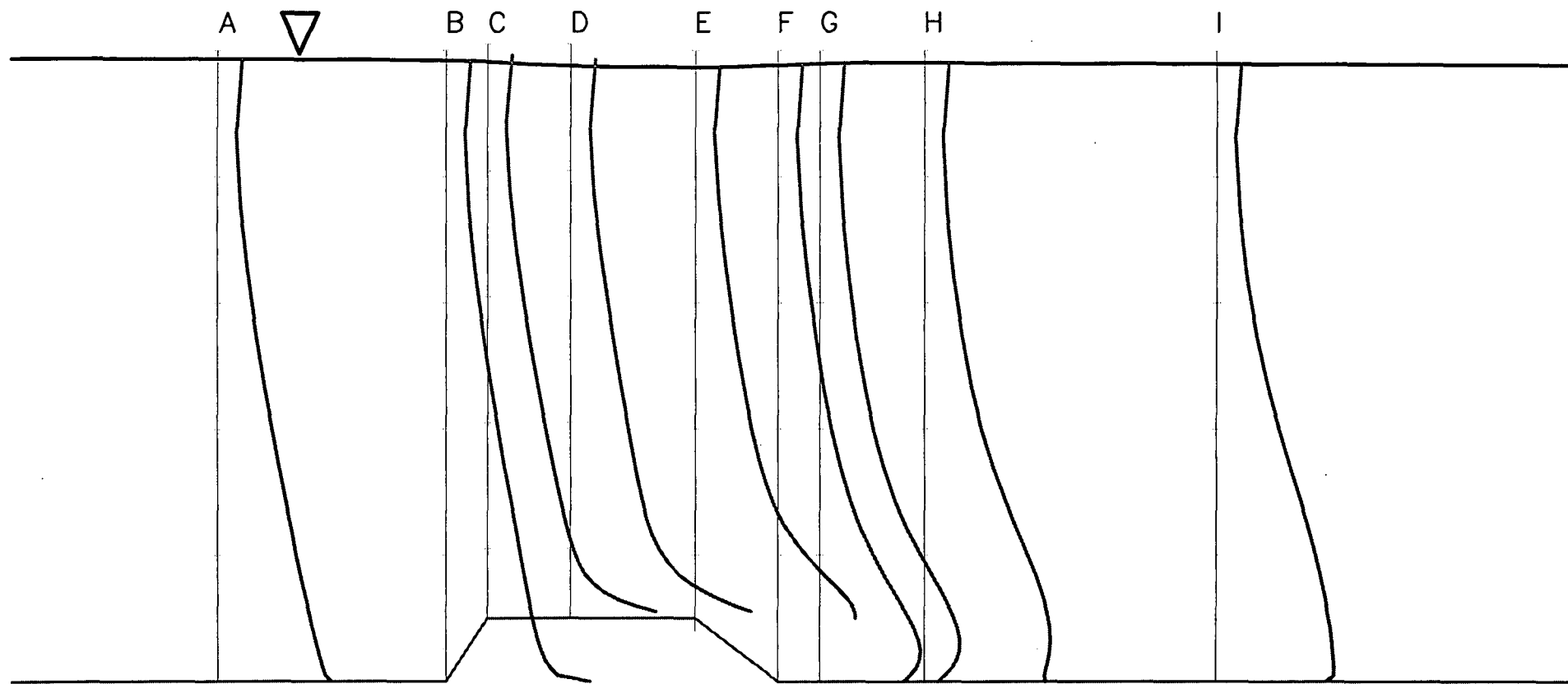


Fig. 10  $D/h = 0.1, \bar{U} = 2.0 \text{ m/s}$ : profielen k

1 cm =  $0.0375 \text{ m}^2/\text{s}^2$

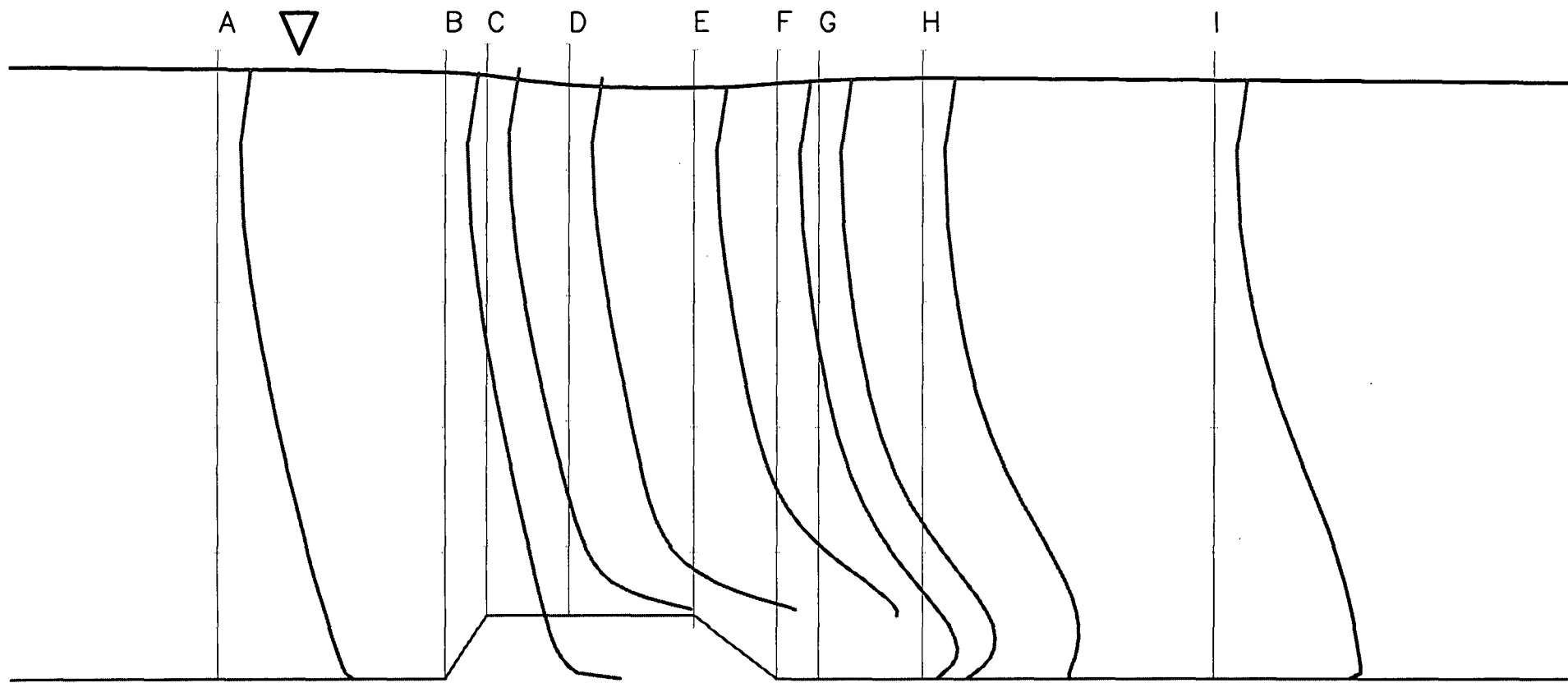


Fig. 11  $D/h = 0.1, \bar{U} = 3.0 \text{ m/s}$ : profielen k

1 cm =  $0.0625 \text{ m}^2/\text{s}^2$

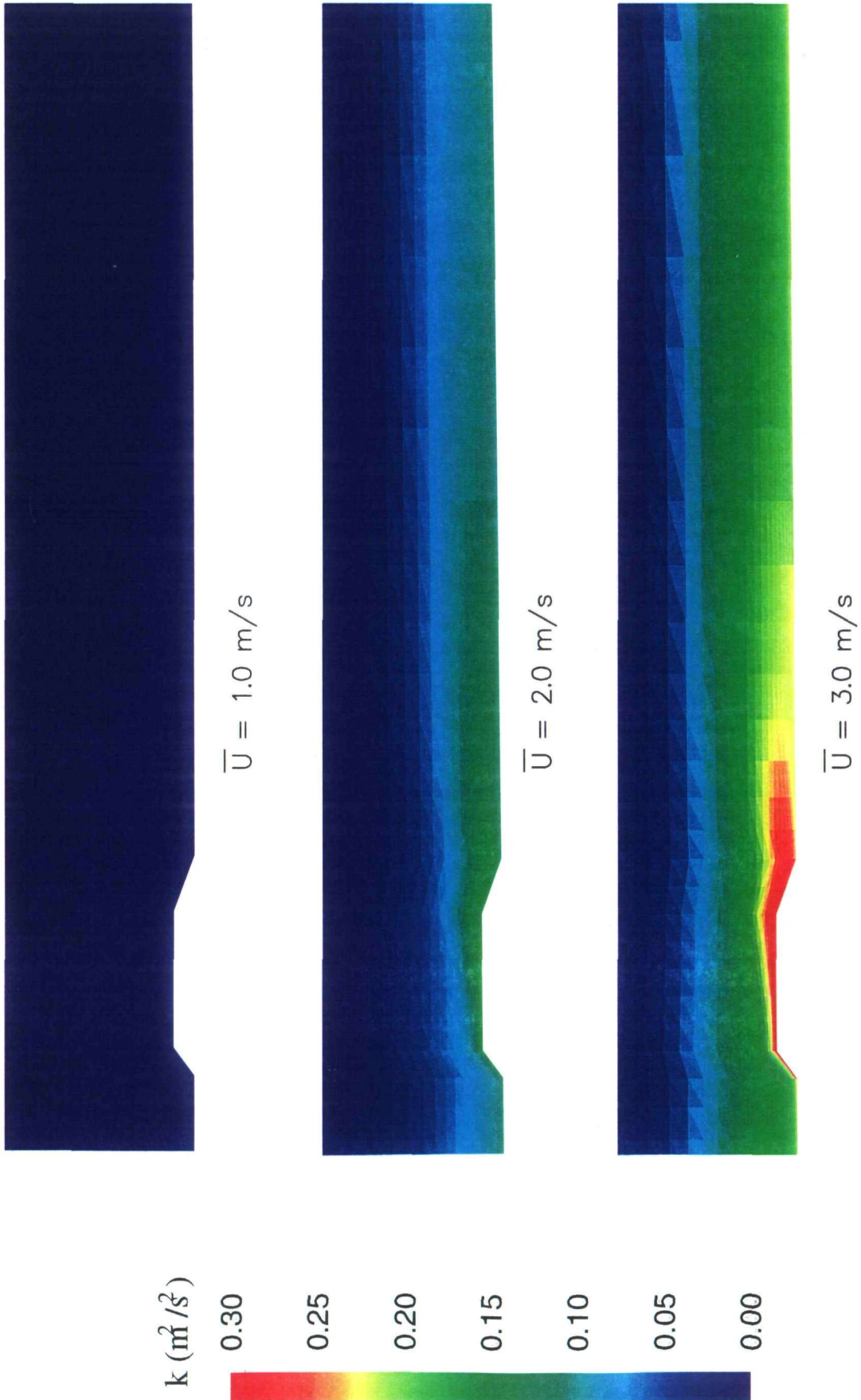


Fig. 12  $D/h = 0.1$ : contourplots  $k$  ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ )

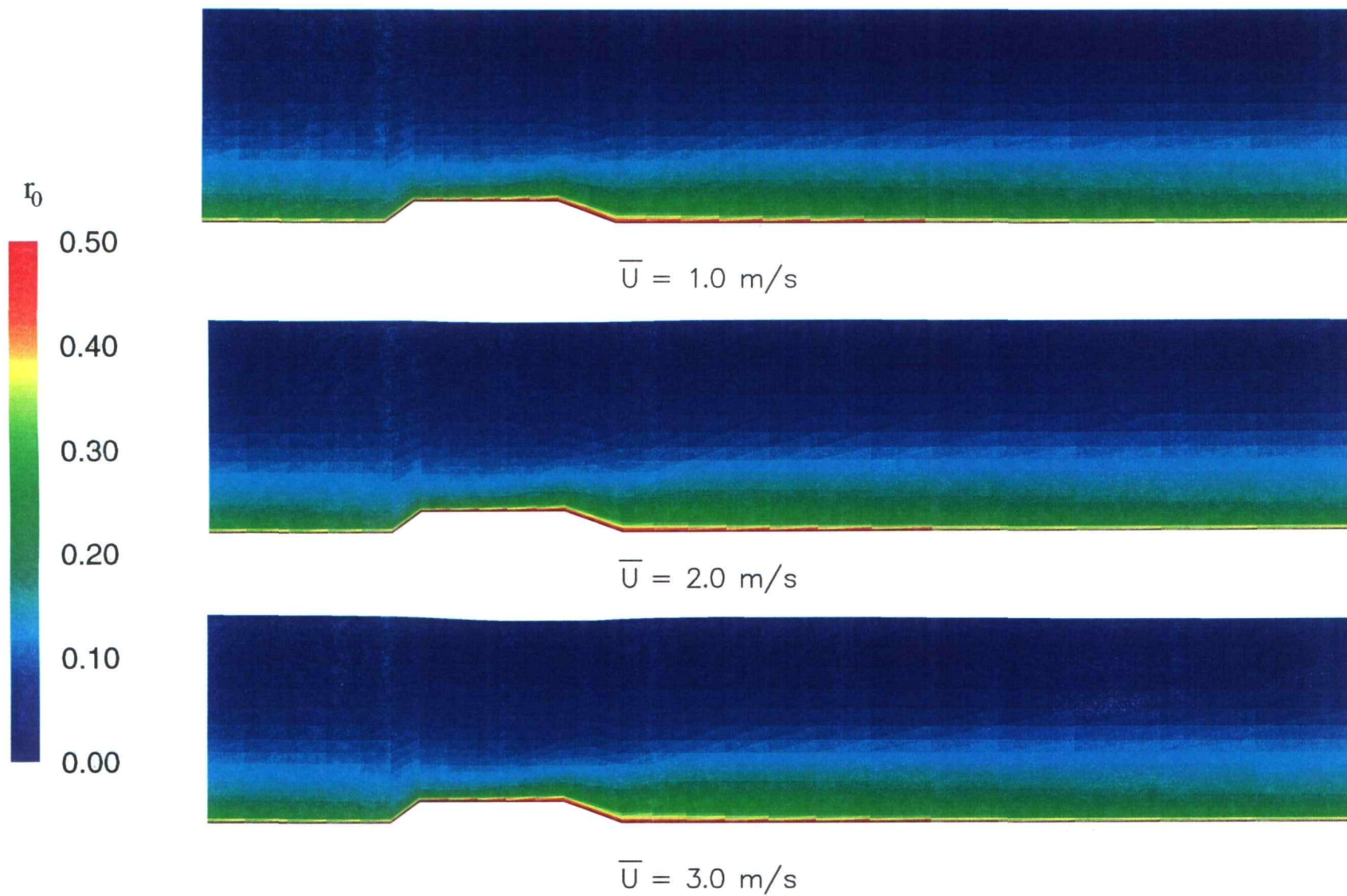
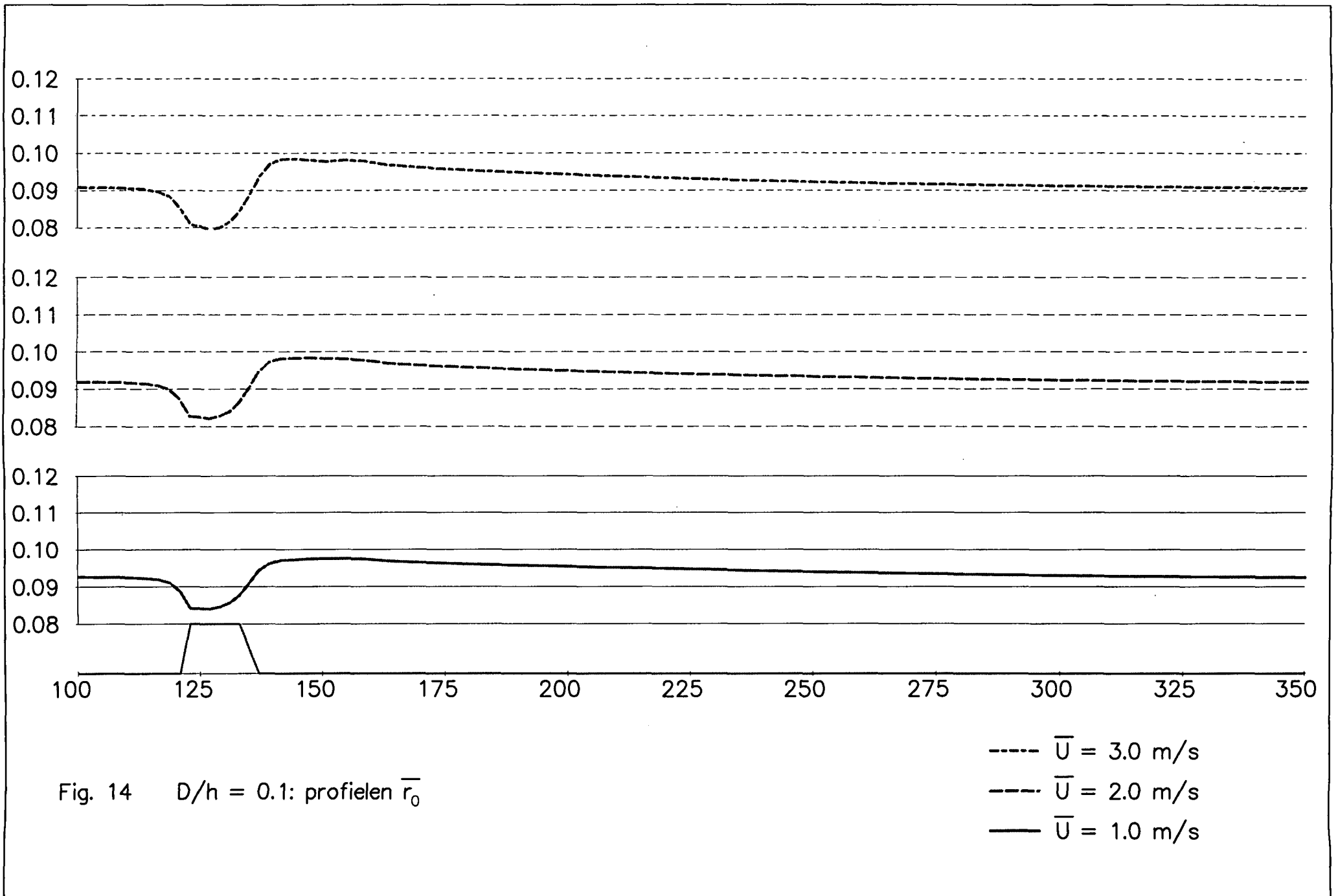


Fig. 13  $D/h = 0.1$ , contourplots  $r_0$



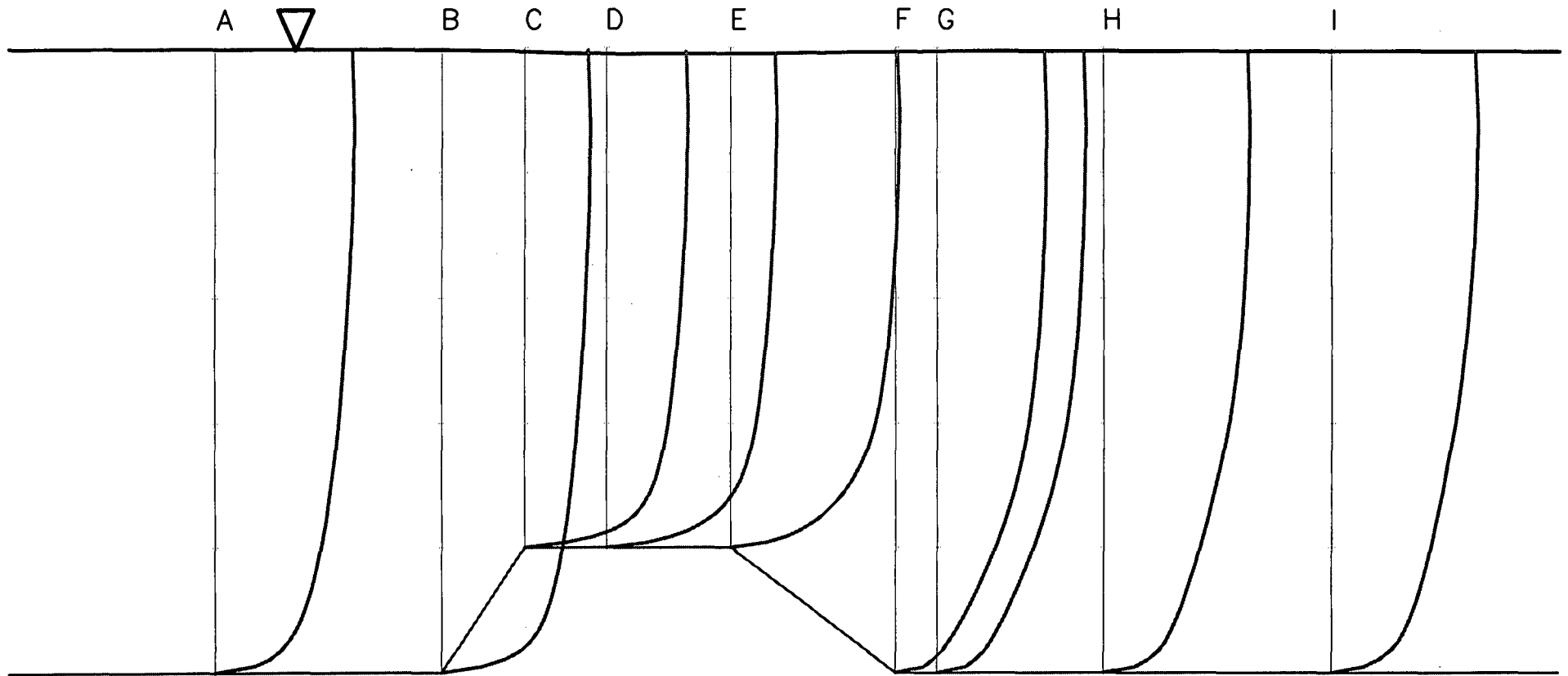


Fig. 15  $D/h = 0.2, \bar{U} = 1.0 \text{ m/s}$ : profielen U

1 cm = 0.5 m/s



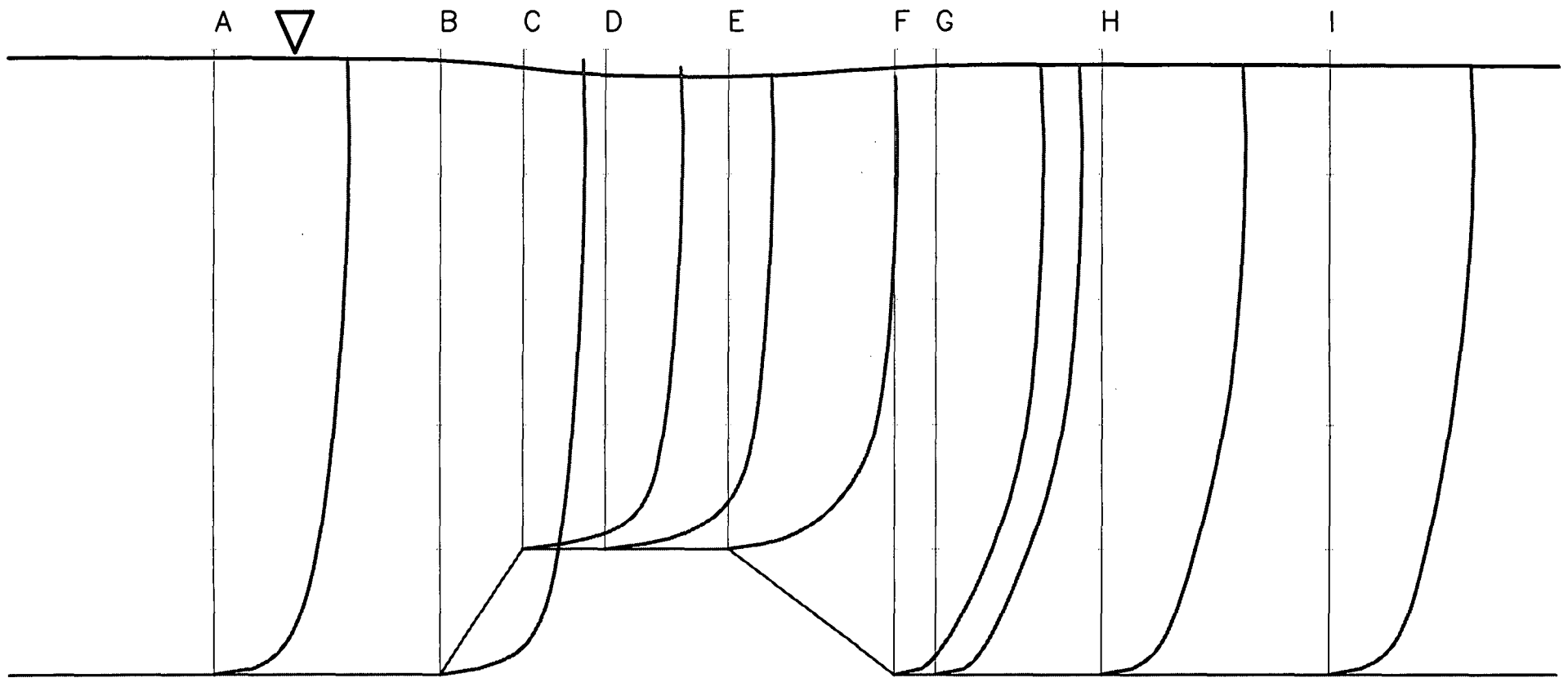


Fig. 16  $D/h = 0.2, \bar{U} = 2.0$  m/s: profielen U

1 cm = 1.0 m/s

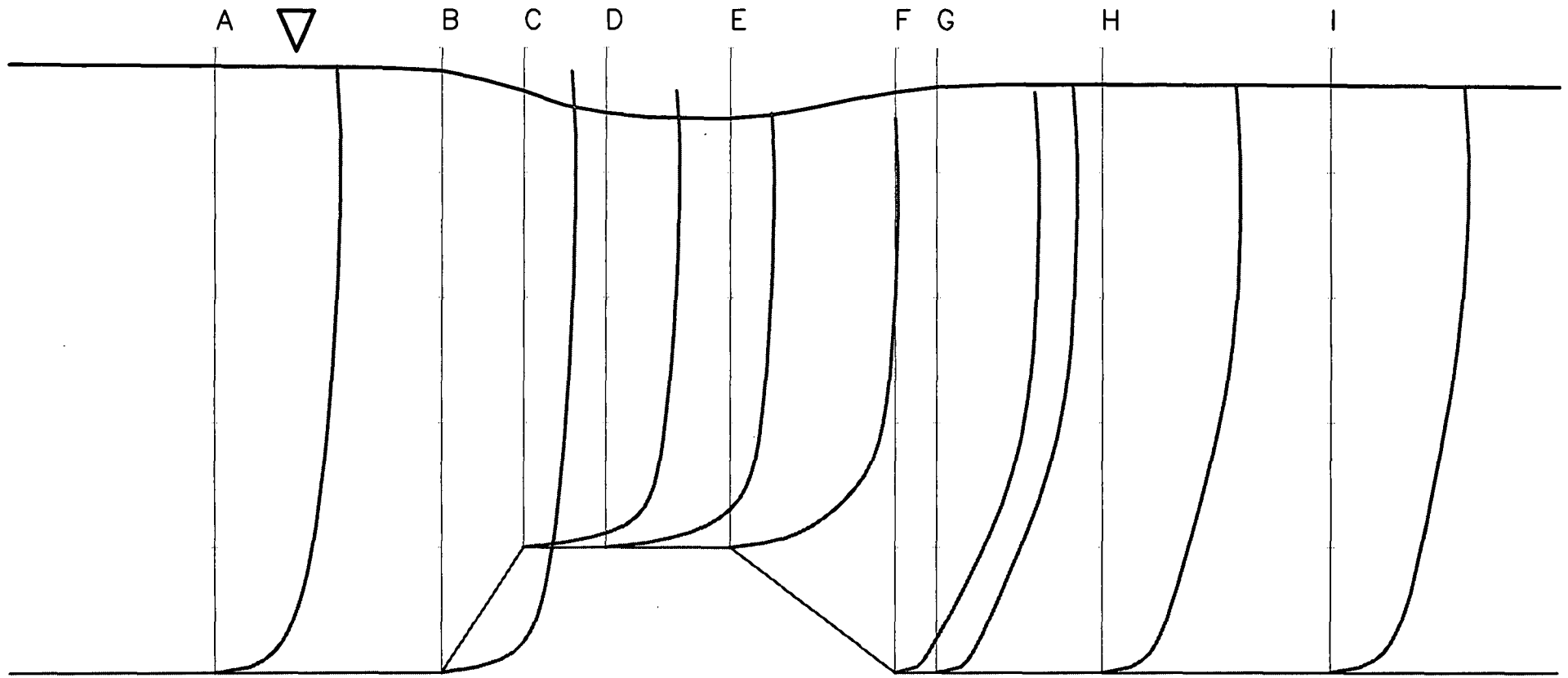


Fig. 17  $D/h = 0.2, \bar{U} = 3.0$  m/s: profielen  $U$

1 cm = 1.5 m/s

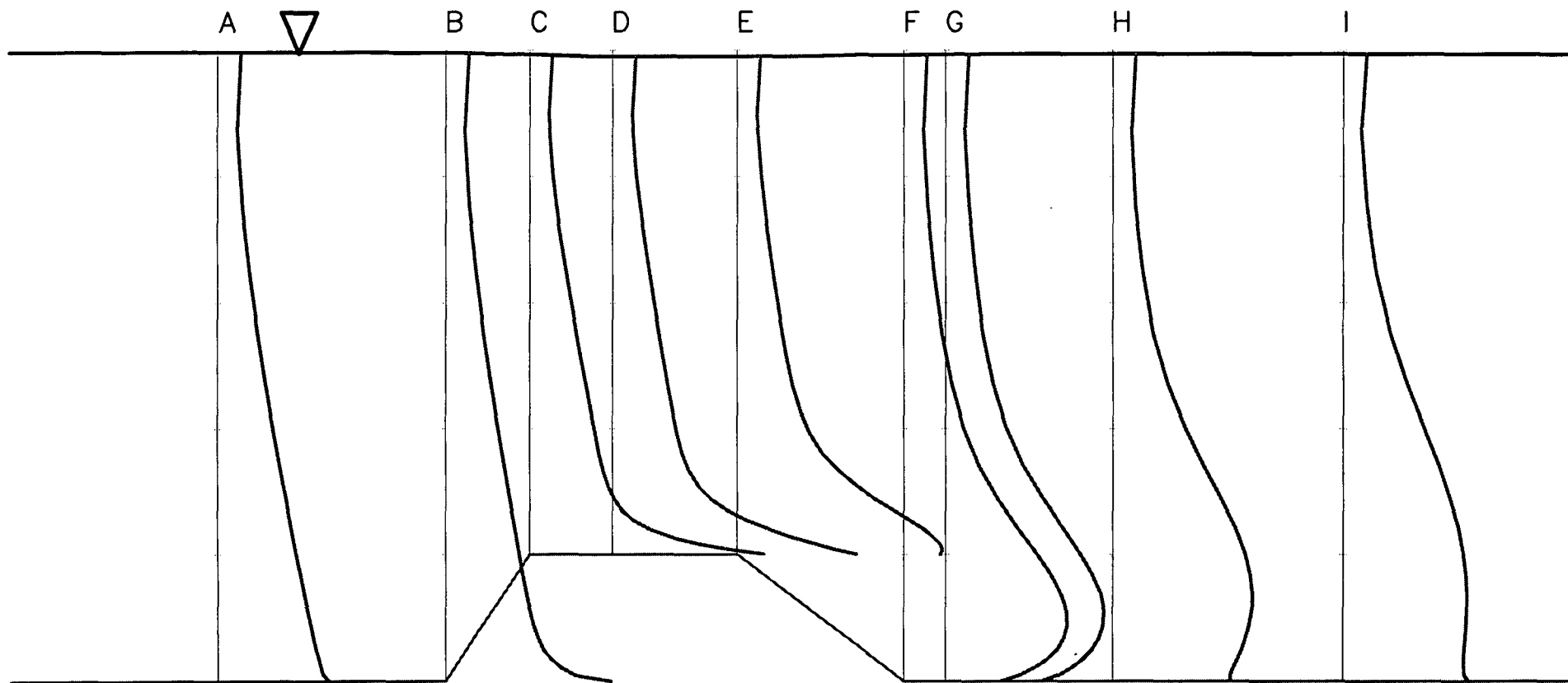


Fig. 18  $D/h = 0.2, \bar{U} = 1.0 \text{ m/s}$ : profielen k

1 cm =  $0.010 \text{ m}^2/\text{s}^2$

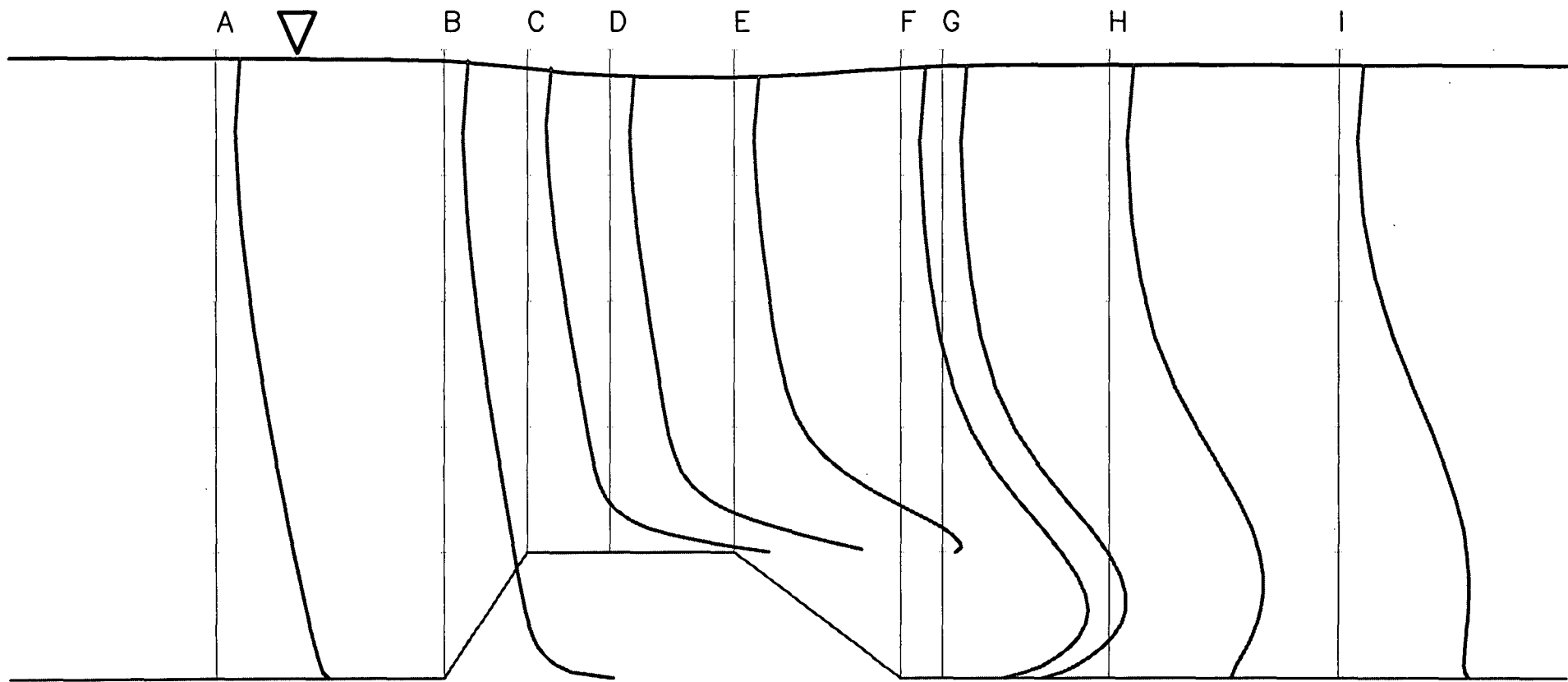


Fig. 19  $D/h = 0.2, \bar{U} = 2.0 \text{ m/s}$ : profielen k

1 cm =  $0.0375 \text{ m}^2/\text{s}^2$

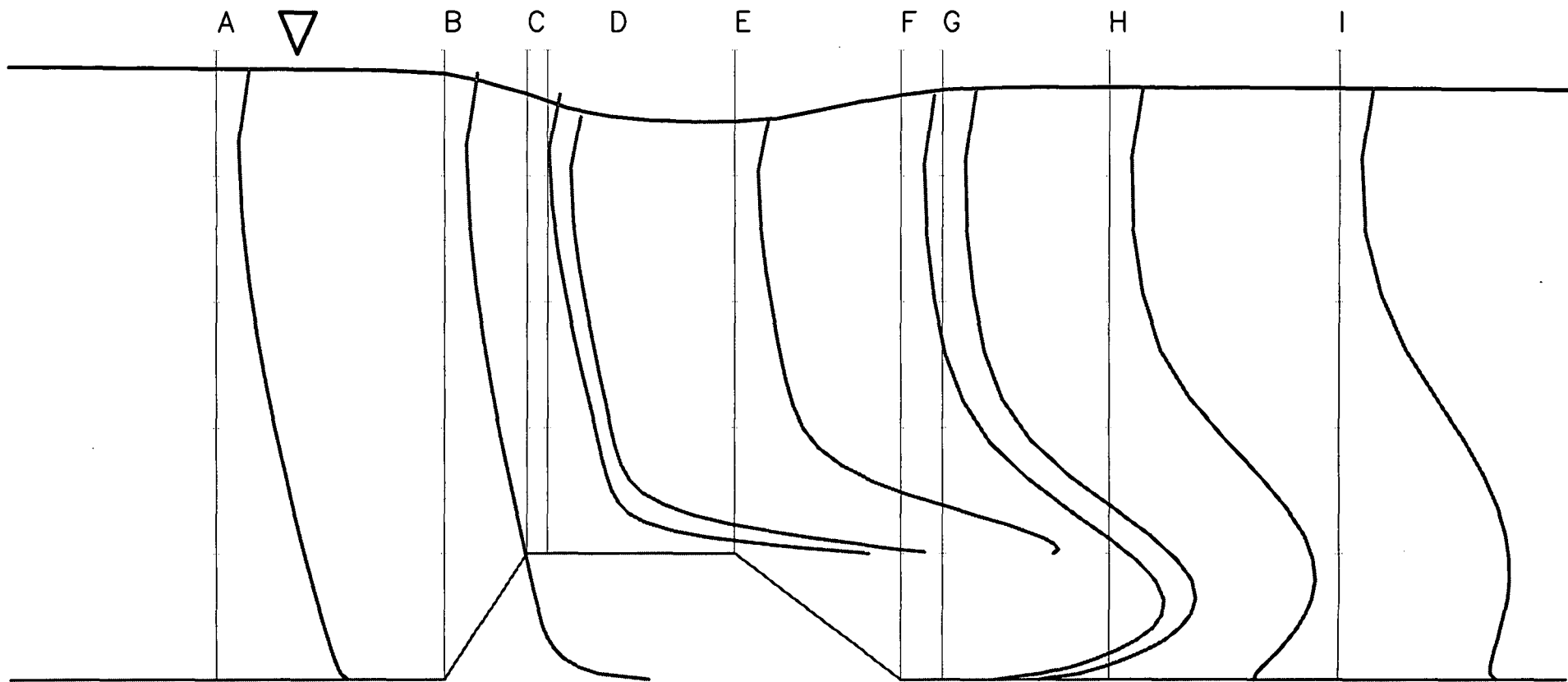


Fig. 20  $D/h = 0.2, \bar{U} = 3.0 \text{ m/s}$ : profielen k

1 cm = 0.0625 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>

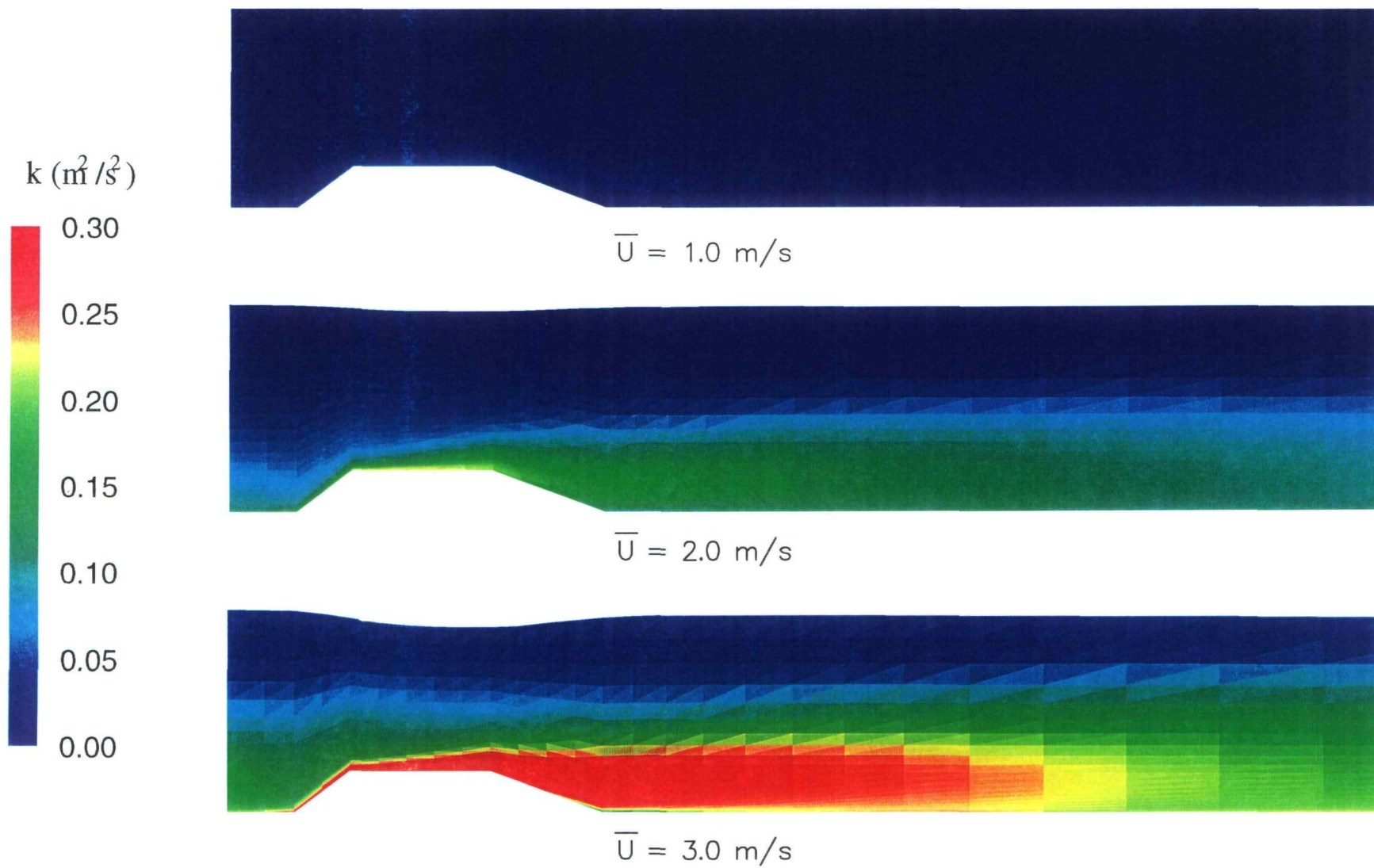


Fig. 21  $D/h = 0.2$ : contourplots  $k \text{ (m}^2/\text{s}^2\text{)}$

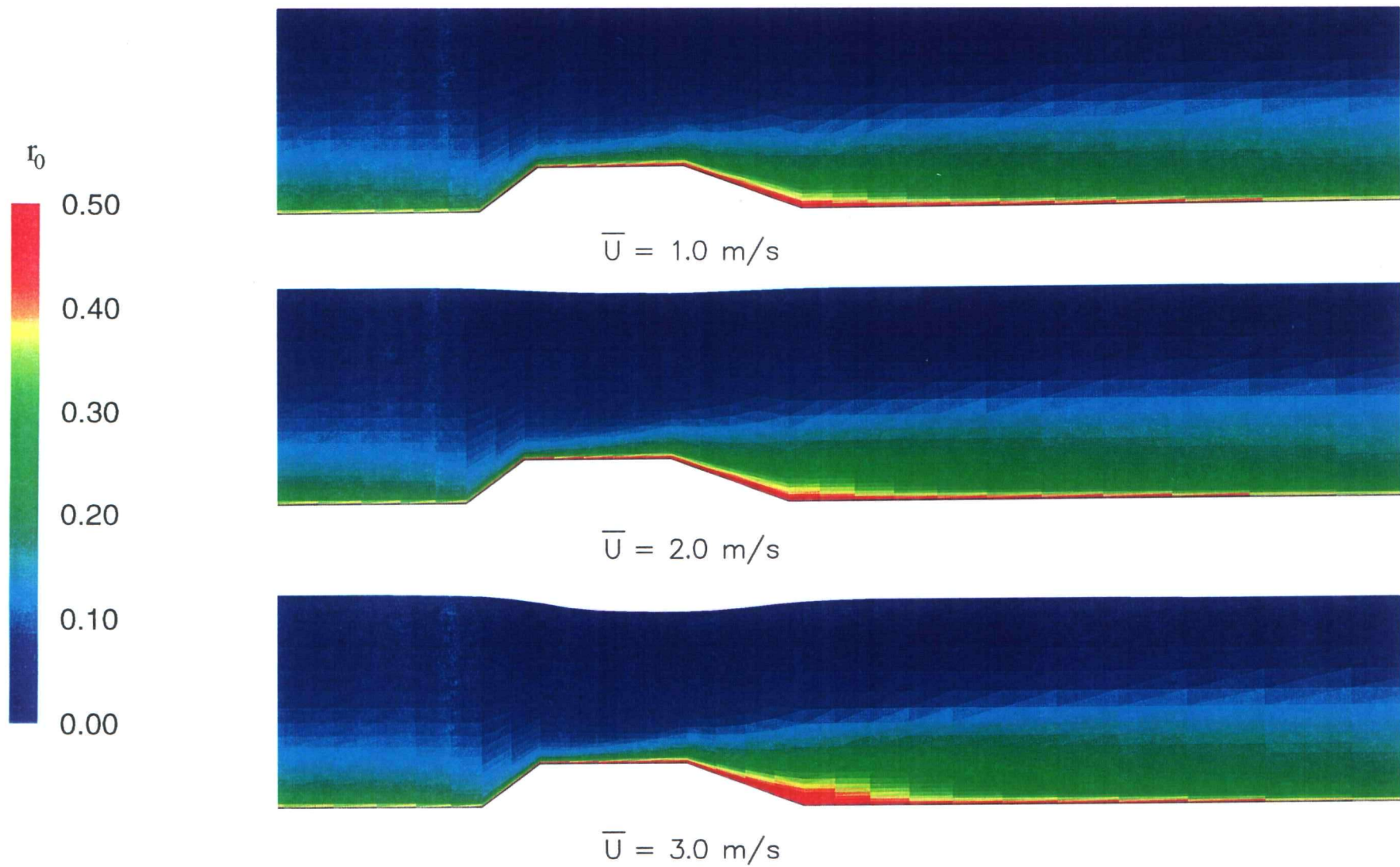
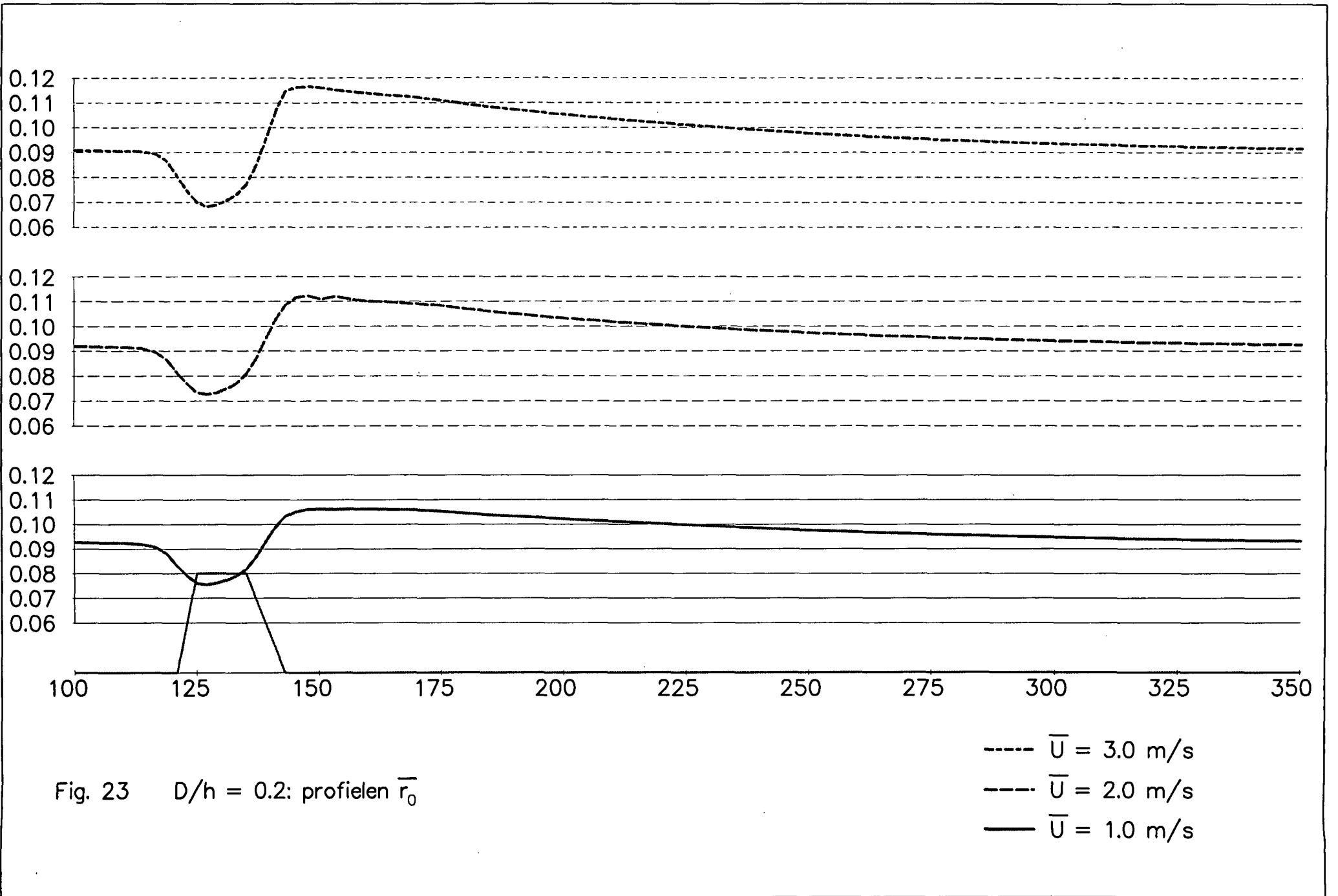


Fig. 22  $D/h = 0.2$ , contourplots  $r_0$





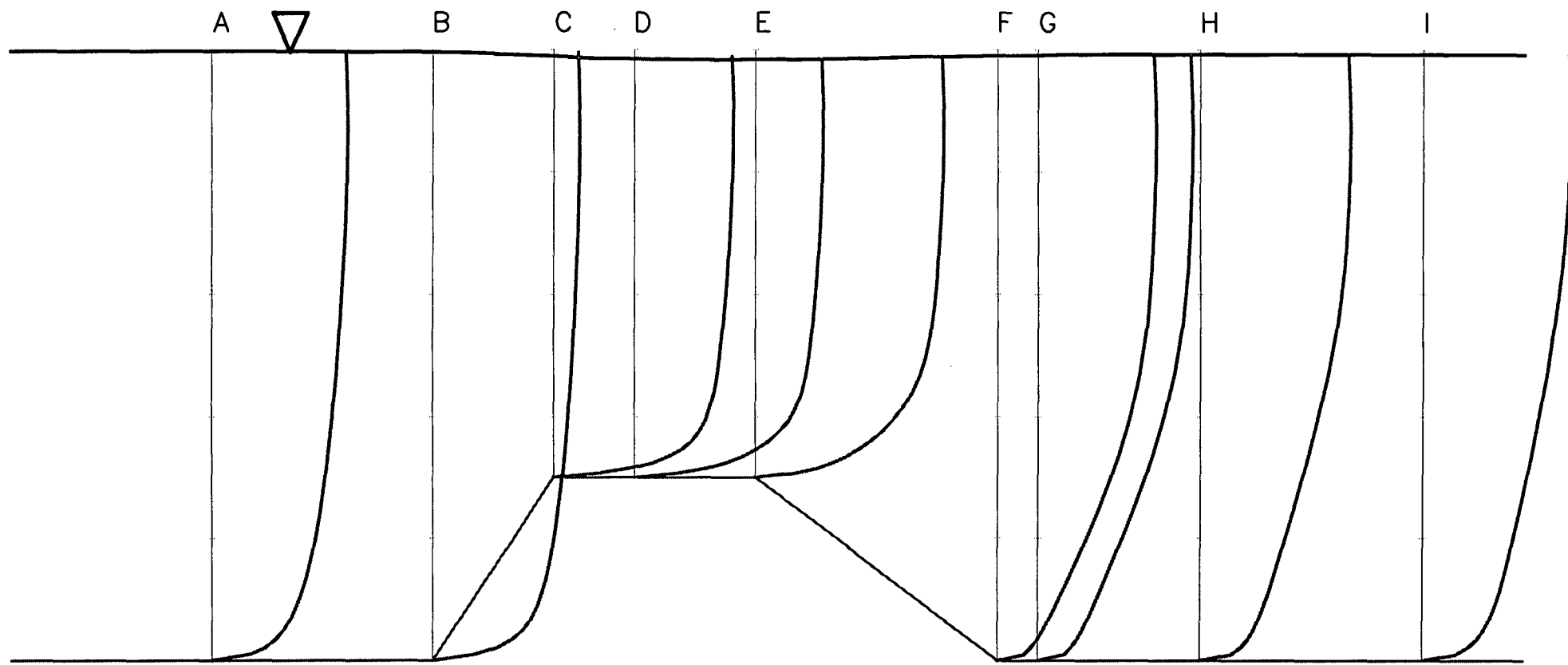


Fig. 24  $D/h = 0.3, \bar{U} = 1.0$  m/s: profielen U

1 cm = 0.5 m/s

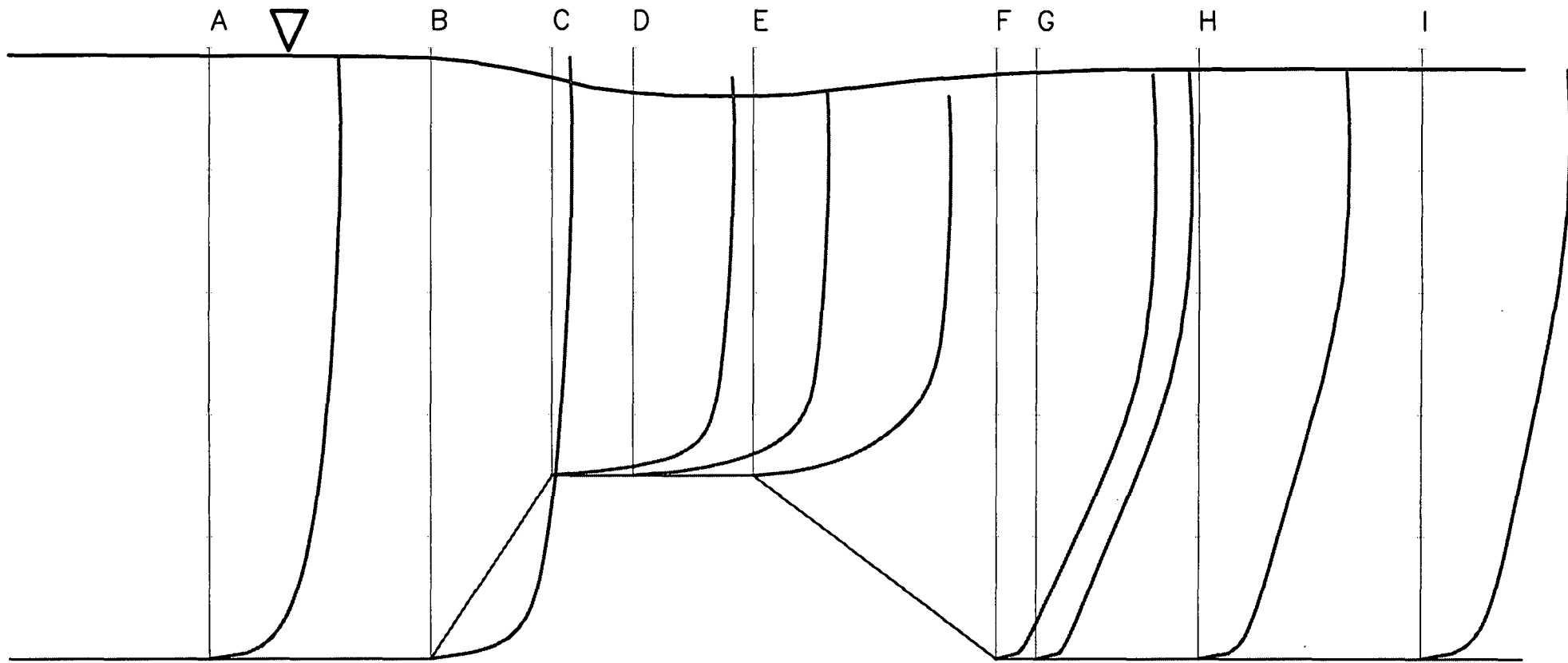


Fig. 25  $D/h = 0.3, \bar{U} = 2.0$  m/s: profielen  $U$

1 cm = 1.0 m/s

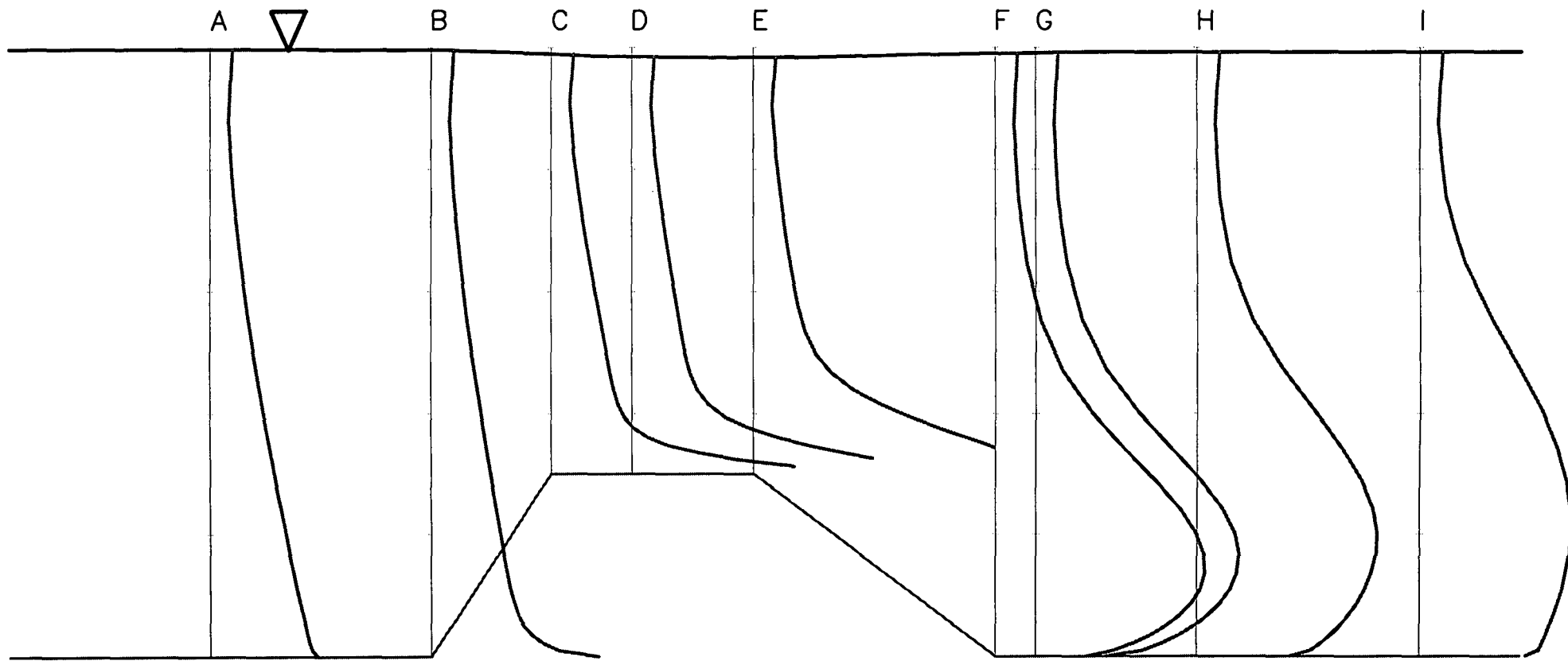


Fig. 26  $D/h = 0.3, \bar{U} = 1.0 \text{ m/s}$ : profielen  $k$

1 cm =  $0.01 \text{ m}^2/\text{s}^2$

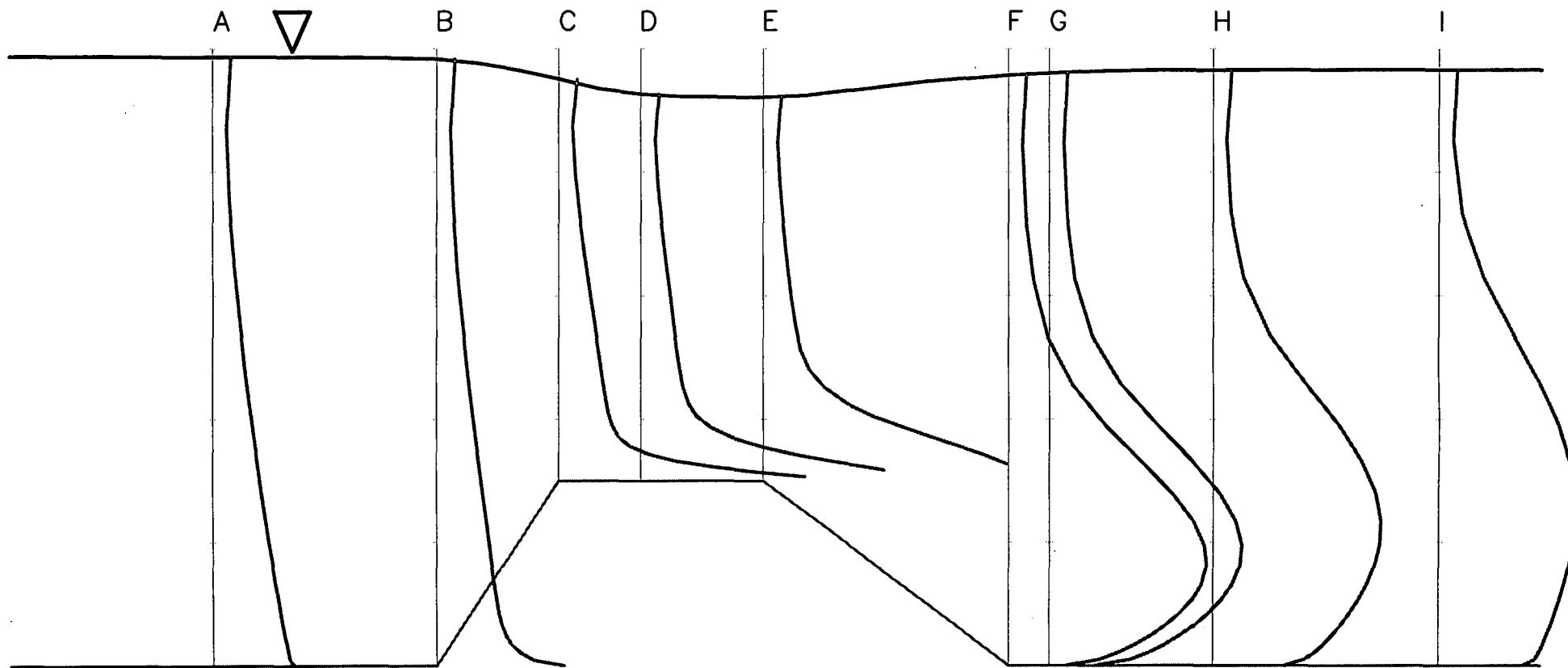


Fig. 27  $D/h = 0.3, \bar{U} = 2.0 \text{ m/s}$ : profielen k

1 cm =  $0.05 \text{ m}^2/\text{s}^2$

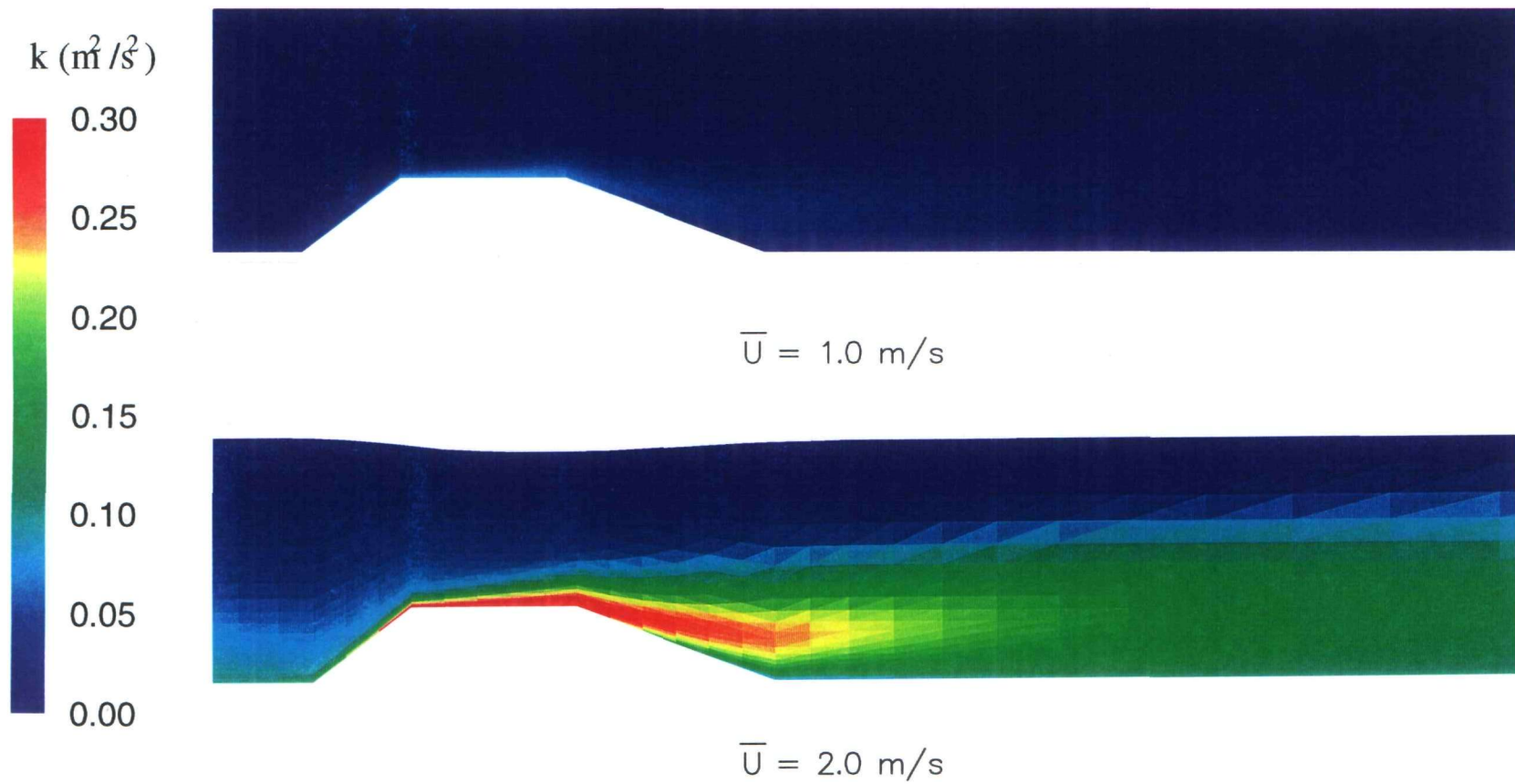


Fig. 28  $D/h = 0.3$ : contourplots  $k$  ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ )

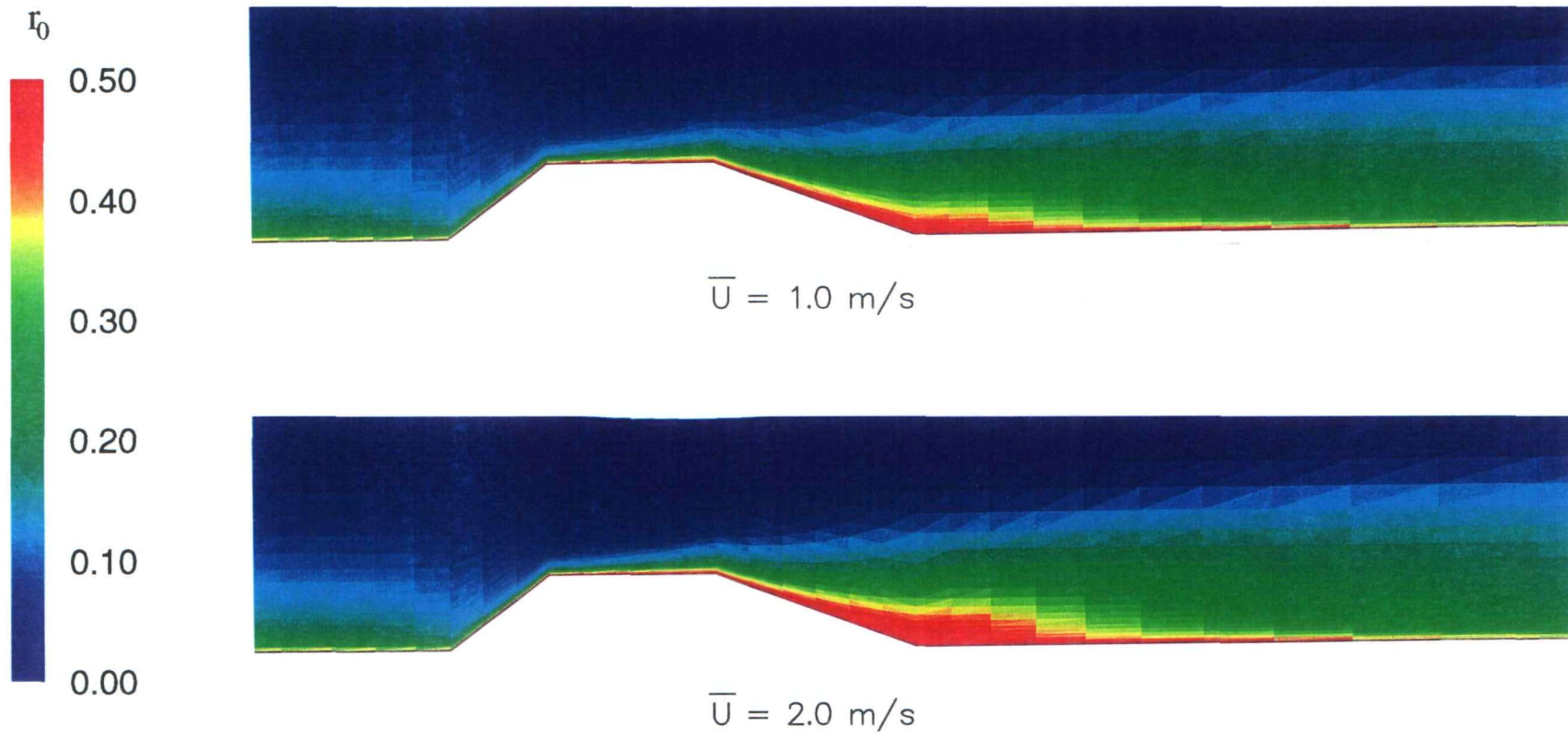


Fig. 29  $D/h = 0.3$ , contourplots  $r_0$

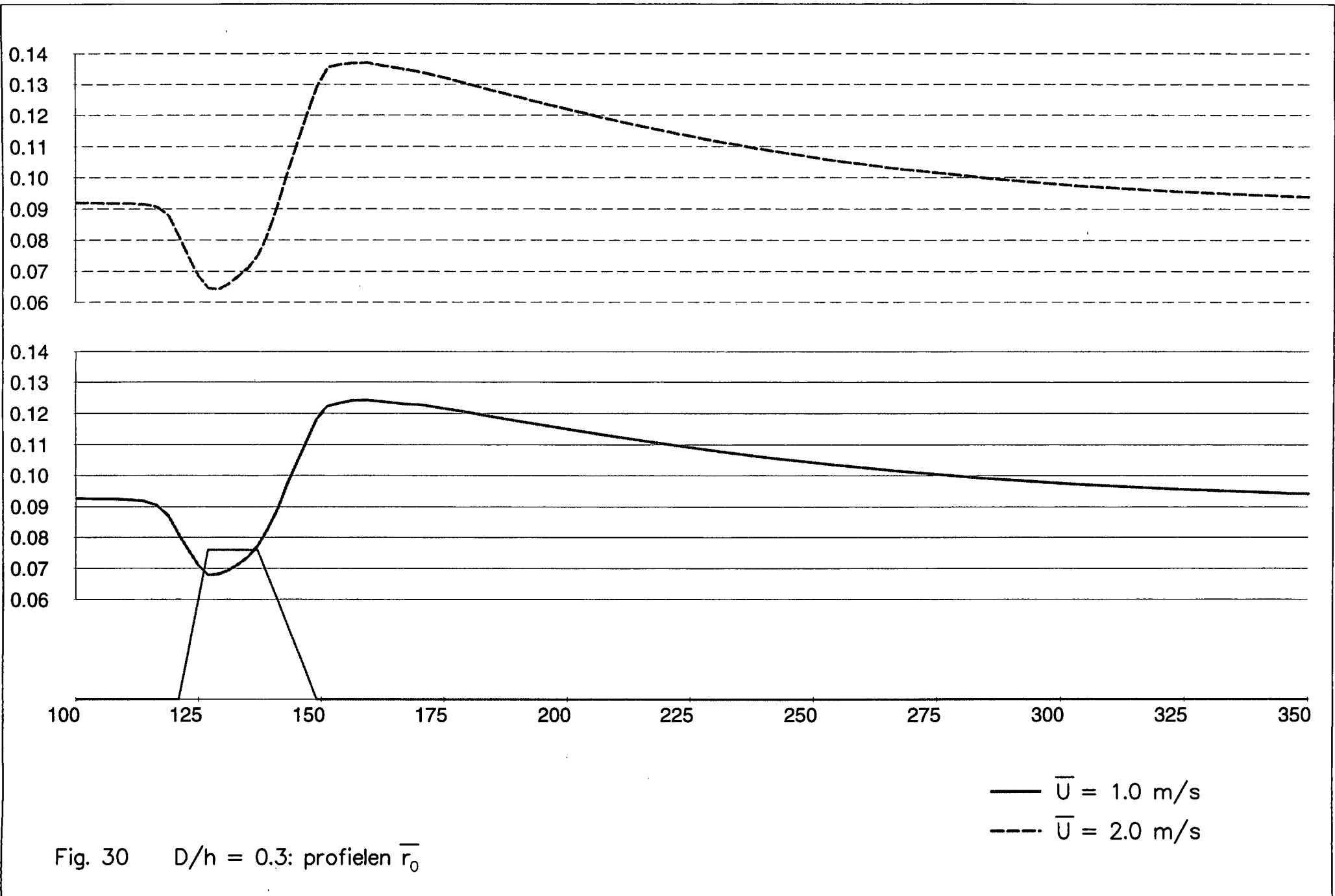


Fig. 30  $D/h = 0.3$ : profielen  $\bar{r}_0$

—  $\bar{U} = 1.0$  m/s  
 - - -  $\bar{U} = 2.0$  m/s



## **wL | delft hydraulics**

**Rotterdamseweg 185  
postbus 177  
2600 MH Delft  
telefoon 015 285 85 85  
telefax 015 285 85 82  
e-mail [info@wdelft.nl](mailto:info@wdelft.nl)  
internet [www.wdelft.nl](http://www.wdelft.nl)**

**Rotterdamseweg 185  
p.o. box 177  
2600 MH Delft  
The Netherlands  
telephone +31 15 285 85 85  
telefax +31 15 285 85 82  
e-mail [info@wdelft.nl](mailto:info@wdelft.nl)  
internet [www.wdelft.nl](http://www.wdelft.nl)**

