

134 | August 1964

SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

Maria Kirsch

Flachwassereffekte und Kanalkorrekturen

TUHH

Technische Universität Hamburg-Harburg

Flachwassereffekte und Kanalkorrekturen

Maria Kirsch, 1. Auflage, Hamburg, Technische Universität Hamburg-Harburg, 1964

© Technische Universität Hamburg-Harburg

Schriftenreihe Schiffbau

Schwarzenbergstraße 95c

D-21073 Hamburg

<http://www.tuhh.de/vss>

INSTITUT FÜR SCHIFFBAU DER UNIVERSITÄT HAMBURG

Bericht Nr. 134

Flachwassereffekte und Kanalkorrekturen.

von

Dr.-Ing. Maria Kirsch

Hamburg, August 1964

Flachwassereffekte und Kanalkorrekturen

von Dr.-Ing. Maria Kirsch

Institut für Schiffbau der Universität Hamburg

Inhaltsverzeichnis:

Verbemerkung	S. 1
Einleitung	S. 1
Die Widerstandsintegrale	S. 3
a) Der Wellenwiderstand in unbegrenzter Flüssigkeit	S.44
b) Der Wellenwiderstand im Flachwasser	S. 6
c) Der Wellenwiderstand im Kanal	S. 7
Die Wahl der Beispiele	S. 9
Die Ergebnisse	S.11
Die Bestimmung des Widerstandes eines Schiffmodells aus den R^*-Kurven	S.16
Schlußbemerkung	S.19
Literaturverzeichnis	S.20
Verzeichnis der Abbildungen	S.22

Vorbemerkung: Die vorliegende Arbeit stellt einen Versuch dar, auf Grund eingehender Rechnungen gewisse Korrekturfaktoren anzugeben, durch die der Einfluß der Tankwände und des Tankbodens bei der Bestimmung des Wellenwiderstandes aus Schleppversuchen berücksichtigt werden soll.

Einleitung

Die Grundlage der Untersuchungen bilden die Wellenwiderstandstheorie von Michell [1] und die Erweiterungen, welche diese Theorie im Laufe der folgenden Jahre erfahren hat (Havelock [2], Weinblum [3], Lunde [4] u.a.). Von besonderem Interesse sind in unserem Fall die Arbeiten von Sretenski [5,6], weil in der vorliegenden Veröffentlichung der Wellenwiderstand im Flachwasser und im Kanal aus den von Sretenski formulierten Ausdrücken errechnet wird. Erläuterungen zu dem Wellenwiderstandsintegral für den Kanal finden sich bei Wigley [7]. Zunächst wurde eine systematische Auswertung des Wellenwiderstandes im Kanal mit Hilfe der elektronischen Rechenanlage IBM 650 durchgeführt. Eine Reihe von Ergebnissen dieser Rechnungen sind bereits in [8] veröffentlicht; dabei war es möglich, einige der ermittelten Wellenwiderstandsbeiwerte ζ_w mit den Ergebnissen aus Rechnungen von Woitkumski und Apuchtin [9] zu vergleichen und eine gute Übereinstimmung festzustellen.

Für die vorliegende Arbeit wurde der Umfang der Rechnungen erheblich erweitert, einmal durch Berücksichtigung verschiedener L/B-Verhältnisse, zum anderen durch eine Auswertung des Wellenwiderstandsintegrals für Flachwasser in der von Sretenski angegebenen Form [6]. Die hierfür notwendigen Rechnungen wurden auf der elektronischen Rechenanlage TR4 durchgeführt. Für die bei diesen Rechnungen zugrundegelegten Modelle wurde schließlich noch der Wellenwiderstand in unbegrenzter Flüssigkeit ermittelt, wofür -soweit möglich- die von Weinblum aufgestellten \bar{W} -Funktionen [10] benutzt wurden. Aus dem Vergleich der Ergebnisse erkennt man die

Einflüsse der Flüssigkeitsbegrenzung sowohl in der Tiefe als auch in der Breite auf den Wellenwiderstand, und man ist in der Lage, einige Korrekturfaktoren anzugeben, die bei der Bestimmung des Wellenwiderstandes aus Schlepptversuchen zu berücksichtigen sind. Als Ergebnis der vorliegenden Arbeit sind Korrekturfaktoren in Diagrammen dargestellt für Schlepptkanäle mit Rechteckquerschnitten unterschiedlicher Breite und Tiefe.

Damit sind die Aufgabenstellung und das Ziel der vorliegenden Arbeit kurz erläutert. Es ist somit klar, daß eine allgemeine Erörterung des Fragenkomplexes bezüglich der Strömung und der Widerstandsverhältnisse in beschränktem Wasser hier nicht beabsichtigt ist. Es darf aber an dieser Stelle auf die wertvollen Beiträge von Schuster [11], Graff [12] und Kolberg [13] zur Klärung dieser Probleme hingewiesen werden.

Die Widerstandsintegrale.

Die Theorie Des Wellenwiderstandes wird als bekannt vorausgesetzt. Hier werden nur diejenigen Formeln gebracht, die für das Verständnis des Folgenden notwendig sind. Auf die Herleitung dieser Ausdrücke wird nicht eingegangen. Es sei dafür auf die in der Einleitung zitierte Literatur verwiesen. Es folgt zunächst eine Liste der Bezeichnungen, die in den Wellenwiderstandsintegralen benutzt werden:

ρ = Dichte der Flüssigkeit

g = Erdbeschleunigung

Daten des Schiffes:

L = Länge

B = Breite

T = Tiefgang

$f(x, z)$ = Gleichung der Schiffsoberfläche

F_{H} = Hauptspantfläche

Daten des Kanals:

K = Kanalbreite

H = Wassertiefe

F_k = Kanalquerschnitt

Die Froudeschen Zahlen

$$F = \frac{v}{\sqrt{g \cdot L}}$$

$$F_h = \frac{v}{\sqrt{g \cdot H}} \quad \text{mit}$$

v = Geschwindigkeit des Schiffes, bzw. des Modells

R_w = Wellenwiderstand

R_w^* = normierte, dimensionslose Form des Wellenwiderstandes nach Weinblum [10]

ζ_w = Wellenwiderstandsbeiwert

3.1. Der Wellenwiderstand in unbegrenzter Flüssigkeit

Das Michellsche Widerstandsintegral für unbegrenzte Flüssigkeit [1] lautet

$$R = \frac{4 \rho g^2}{\pi v^2} \int_0^{\infty} [J^2 + \bar{J}^2] \frac{\lambda^2 d\lambda}{\sqrt{\lambda^2 - 1}}$$

mit

$$J = \int_{-L/2}^{+L/2} \int_0^T e^{-\frac{\lambda^2 gz}{v^2}} \cos \frac{gx}{v^2} \lambda \frac{\partial f(x,z)}{\partial x} dx dz$$

$$\bar{J} = \int_{-L/2}^{+L/2} \int_0^T e^{-\frac{\lambda^2 gz}{v^2}} \sin \frac{gx}{v^2} \lambda \frac{\partial f(x,z)}{\partial x} dx dz$$

Für zum Hauptspant symmetrische Schiffe wird der Ausdruck $I = 0$.

Folgende Substitutionen werden eingeführt:

$$\xi = \frac{x}{L/2} \quad \eta = \frac{f(x,z)}{B/2} \quad \zeta = \frac{z}{T}$$

$$\gamma_0 = \frac{1}{2F^2} \quad \vartheta = 2 \frac{T}{L} \frac{\gamma^2}{\gamma_0} \quad \gamma = \gamma_0 \lambda$$

Damit wird der Wellenwiderstand für symmetrische Schiffe:

$$(1) \quad R_w = 8 \rho g \frac{B^2 T^2}{L} \int_{\gamma_0}^{\infty} \frac{(\gamma/\gamma_0)^2}{\sqrt{(\gamma/\gamma_0)^2 - 1}} \cdot J^{*2} d\gamma$$

mit

$$J^* = \int_0^1 \int_0^1 \frac{\partial \eta}{\partial \xi} \cdot e^{-\vartheta \zeta} \sin \gamma \xi d\xi d\zeta$$

Die normierte, dimensionslose Form des Wellenwiderstandes wird dann nach Weinblum [10]:

$$(1a) \quad R^* = \frac{R_w}{\frac{8}{\pi} \rho g \frac{B^2 T^2}{L}} - \int_{\gamma_0}^{\infty} \frac{(\gamma/\gamma_0)^2}{\sqrt{(\gamma/\gamma_0)^2 - 1}} J^{*2} d\gamma$$

Die Gleichung der Oberfläche von 'Elementarschiffen' wird durch zwei Faktoren dargestellt, von denen der eine nur mit der Länge, der andere nur mit der Tiefe veränderlich ist, d.h.

$$f(x, z) = g(x) \cdot h(z)$$

Weinblum [10] gibt für die normierte Gleichung der Oberfläche den Ausdruck

$$\eta = (1 - e^* \zeta^m) (1 - \sum_n a_n \xi^n)$$

mit $0 \leq e^* \leq 1$ -der Koeffizient e^* ergibt sich aus der Völligkeit des Hauptspants- und den bereits genannten Substitutionen ξ, η, ζ .

Diese Darstellungsart gestattet die Aufspaltung des Doppelintegrals für J^* in zwei getrennte Integrale, so daß gilt:

$$J^* = \int_0^1 e^{-\beta \zeta} (1 - e^* \zeta^m) d\zeta \cdot \int_0^1 (-\sum_n n a_n \xi^{n-1}) \sin \gamma \xi d\xi$$

Von diesem Ausdruck ausgehend stellt Weinblum in [10] sogenannte \mathfrak{W} -Funktionen auf, die er für verschiedene gebräuchliche Potenzen m und n von ζ und ξ , sowie für einige Parameterwerte von $2T/L$ und eine systematische Reihe von γ_0 -Werten tabelliert vorlegt. Mit Hilfe dieser \mathfrak{W} -Funktionen ist der Wellenwiderstand symmetrischer Elementarschiffe, deren normierte Oberfläche durch Potenzen von ξ und ζ in der für η angegebenen Form dargestellt ist, sehr einfach zu berechnen.

In der vorliegenden Veröffentlichung sind für die Berechnung des Wellenwiderstandes in unbegrenzter Flüssigkeit diese \mathfrak{W} -Funktionen benutzt worden, sofern die T/L -Verhältnisse

mit den in dieser Arbeit verwendeten T/L-Werten übereinstimmen. In den anderen Fällen erfolgte die Rechnung mit Hilfe eines kleinen Programms auf der TR4, wobei das Integral für R_w durch folgende Substitution umgeformt wurde:

$$\gamma = z^2 + \gamma_0$$

Aus der Beziehung

$$R_w = \zeta_w \frac{\rho}{2} v^2 \Omega$$

ergibt sich der Wellenwiderstandsbeiwert

$$(1b) \quad \zeta_w = \frac{R_w}{\frac{\rho}{2} v^2 \Omega} = \frac{16 B^2 T^2}{F^2 L^2 \Omega} \int_{\gamma_0}^{\infty} \frac{(\gamma/\gamma_0)^2}{\sqrt{(\gamma/\gamma_0)^2 - 1}} \cdot]^{*2} d\gamma$$

b) Der Wellenwiderstand im Flachwasser.

Der Ausdruck für den Wellenwiderstand im Flachwasser lautet in der Form von Sretenski [6]:

$$(2) \quad R_w = \frac{8 \pi \rho g}{v^2} \int_{\bar{r}_0}^{\infty} \frac{J^2 +]^2}{[\bar{r}^2 - \frac{g \bar{r}}{v^2} \gamma_{\text{amy}} \bar{r} H]^{1/2}} \frac{\bar{r} d\bar{r}}{\text{Log}^2 \bar{r} H}$$

mit

$$J = \int_{-L/2}^{+L/2} \int_0^T F(x, z) \text{Log} [\bar{r} (H-z)] \cos \left[x \left(\frac{g \bar{r}}{v^2} \gamma_{\text{amy}} \bar{r} H \right)^{1/2} \right] dx dz$$

$$] = \int_{-L/2}^{+L/2} \int_0^T F(x, z) \text{Log} [\bar{r} (H-z)] \sin \left[x \left(\frac{g \bar{r}}{v^2} \gamma_{\text{amy}} \bar{r} H \right)^{1/2} \right] dx dz$$

und

$$F(x, z) = + \frac{v}{2 \pi} \frac{\partial f(x, z)}{\partial x}$$

Der angegebene Ausdruck gilt nicht für $v = \sqrt{gH}$; für $v < \sqrt{gH}$ ist \bar{r}_0 die Wurzel der transzendenten Gleichung

$$\gamma_{\text{aug}} \bar{\gamma}_0 H = \frac{v^2}{g H} \bar{\gamma}_0 H$$

für $v > \sqrt{gH}$ ist $\bar{\gamma}_0 = 0$.

Bei Hauptspantsymmetrie wird wie im Falle unbegrenzter Flüssigkeit das Doppelintegral $I = 0$.

Mit den Substitutionen

$$\frac{\partial f(x, z)}{\partial x} = \frac{2\pi}{v} F(x, z), \quad \xi = \frac{x}{L/2}, \quad \eta = \frac{f(x, z)}{B/2}, \quad \zeta = \frac{z}{T}$$

erhält man für den normierten Wellenwiderstand symmetrischer Schiffe

$$(2a) \quad R^* = \frac{L}{4 B^2 T^2} \int_{\bar{\gamma}_0}^{\infty} \frac{J^2}{\left[\bar{\gamma}^2 - \frac{\bar{\gamma}}{F^2 L} \gamma_{\text{aug}} \bar{\gamma} H \right]^{1/2}} \frac{\bar{\gamma} d\bar{\gamma}}{\cos^2 \bar{\gamma} H}$$

mit

$$J = B \cdot T \cdot \iint \frac{\partial \eta}{\partial \xi} \cos \left[\bar{\gamma} (H - T \zeta) \right] \sin \left[\frac{L}{2} \xi \left(\frac{\bar{\gamma}}{F^2 L} \gamma_{\text{aug}} \bar{\gamma} H \right)^{1/2} \right] d\xi d\zeta$$

und für den Wellenwiderstandsbeiwert

$$\zeta_w = \frac{4}{\pi F^2 L \Omega} \int_{\bar{\gamma}_0}^{\infty} \frac{J^2}{\left[\bar{\gamma}^2 - \frac{\bar{\gamma}}{F^2 L} \gamma_{\text{aug}} \bar{\gamma} H \right]^{1/2}} \frac{\bar{\gamma} d\bar{\gamma}}{\cos^2 \bar{\gamma} H}$$

*)

c) Der Wellenwiderstand im Kanal.

Für den Wellenwiderstand im Kanal gibt Sretenski die folgende Formel

$$(3) \quad R = \frac{4 \rho g}{K} \left[J_0^2 + J_0^2 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (J_n^2 + J_n^2) \right]$$

*) Es ist zu beachten, daß im Falle des Flachwassers die Größen $\bar{\gamma}$ und $\bar{\gamma}_0$ die Dimension Länge^{-1} haben, im Unterschied zu den dimensionslosen Größen γ und γ_0 bei unbegrenzter Flüssigkeit.

mit

$$J_n = \frac{\int_{(G)} \cos \gamma_n (H-z) \cos \left[x \sqrt{\frac{g \gamma_n}{v^2} \tanh \gamma_n H} \right] \frac{\partial f(x,z)}{\partial x} dx dz}{\left[\left(1 + \frac{4\pi^2 n^2}{K^2 \gamma_n^2} \right) \cos^2 \gamma_n H - \frac{gH}{v^2} \right]^{1/2}}$$

$$J_n = \frac{\int_{(G)} \cos \gamma_n (H-z) \sin \left[x \sqrt{\frac{g \gamma_n}{v^2} \tanh \gamma_n H} \right] \frac{\partial f(x,z)}{\partial x} dx dz}{\left[\left(1 + \frac{4\pi^2 n^2}{K^2 \gamma_n^2} \right) \cos^2 \gamma_n H - \frac{gH}{v^2} \right]^{1/2}}$$

γ_n ist die Wurzel der charakteristischen Gleichung

$$\frac{1}{F_h^2} \tanh \gamma_n H = \gamma_n H - \frac{4\pi^2 n^2 H^2}{K^2 \gamma_n H}$$

Für symmetrische Schiffe gilt auch hier wieder $I_n = 0$.

Mit den gleichen Substitutionen wie im Falle des Flachwassers erhält man für den normierten Wellenwiderstand im Kanal

$$(3a) \quad R^* = \frac{\pi L}{2KB^2T^2} \left[J_0^2 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_n^2 \right]$$

mit

$$J_n = \frac{B \cdot T \cdot \int_{-1}^1 \frac{\partial \eta}{\partial \xi} \cos \gamma_n (H-T\xi) \sin \left[\frac{1}{2} \xi \left(\frac{\gamma_n}{F^2 L} \tanh \gamma_n H \right)^{1/2} \right] d\xi}{\left[\left(1 + \frac{4\pi^2 n^2}{K^2 \gamma_n^2} \right) \cos^2 \gamma_n H - \frac{1}{F_h^2} \right]^{1/2}}$$

und für den Wellenwiderstandsbeiwert

$$(3b) \quad \zeta_w = \frac{8}{F^2 L K \Omega} \left[J_0^2 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_n^2 \right]$$

Die Formeln (3a) und (3b) gelten nicht für $v = \sqrt{gH}$; für $v \gg \sqrt{gH}$ ist $J_0 = 0$.

Die Wahl der Beispiele.

Berechnet wurden die Größen R^* und ζ_w für Schiffsmo-
delle in unbegrenzter Flüssigkeit, im Flachwasser und in Kanälen mit
Rechteckquerschnitten und den Verhältnissen

$$H/K = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 1.0.$$

Diese Werte von Wassertiefe zu Kanalbreite dürften zur Be-
stimmung von Kanalkorrekturen für Schleppkanäle ausreichend
sein. Für die Hamburgische Schiffbauversuchsanstalt gilt
etwa $H/K = 0.3$ (-dies ist ein weithin üblicher Wert-)
und für den ausgesprochenen Flachwasserkanal der Versuchs-
anstalt für Binnenschiffbau in Duisburg ungefähr $H/K = 0.1$.

Für die Berechnung wurden mathematische, zum Hauptspant sym-
metrische Modelle mit parabolischen Wasserlinien und Rechteck-
spanten gewählt; für die Oberfläche dieser Modelle erhält man
folglich den Ausdruck

$$f(x, z) = \frac{BT}{2} \left[1 - \left(\frac{x}{L/2} \right)^2 \right]$$

Bei der Berechnung unterscheiden wir ferner zwei Serien, die
sich durch das Verhältnis B/T voneinander unterscheiden. Für
die eine Serie gilt

$$B/T = 3,$$

für die andere Serie

$$B/T = 2.$$

Innerhalb jeder Serie wurden die Verhältnisse

$$L/B = 10, 7.5, 5$$

berücksichtigt.

Zur Festlegung der Größenverhältnisse zwischen Schiff und
Kanal wurde zunächst -für die Berechnung des Wellenwider-
standes der Modelle mit dem Verhältnis $L/B = 10$ - das Ver-
hältnis H/T der Wassertiefe zum Tiefgang des Schiffmodells
gewählt, wie das gleicherweise auch Apuchtin und Woitkumski
[9] getan haben.

Zwar ist es im allgemeinen bei der Berechnung des Widerstandes im Kanal üblich, andere Verhältniswerte zugrunde zu legen, z.B. das Verhältnis von Schiffsquerschnitt zu Kanalquerschnitt $F_{\text{S}}/F_{\text{K}}$ oder das Verhältnis von Schiffslänge zu Kanaltiefe L/H , bzw. den reziproken Wert H/L , aber mit Rücksicht auf den Grenzübergang zum Flachwasser $K/B \rightarrow \infty$ wurde hier das Verhältnis H/T gewählt. Grundsätzlich ist es gleichgültig, von welchem Verhältniswert ausgegangen wird, da durch die Vorgabe eines dieser Werte auch alle anderen Verhältnisse zwischen Schiff und Kanal festgelegt sind. Deshalb sind in den Diagrammen mit den Ergebnissen auch stets die zugehörigen Größen L/H und für $L/B = 10$ auch die Verhältnisse $F_{\text{S}}/F_{\text{K}}$ angegeben.

Für eine systematische Auswertung der vorliegenden Ergebnisse empfiehlt sich besonders die Zugrundelegung der Größen L/H oder H/L , da nicht nur jedem H/T -Wert eines Modells nur ein L/H -Wert entspricht, sondern auch vor allem deshalb, weil sich für das Verhältnis L/H die Möglichkeit eines Vergleiches verschiedener Modelle ergibt, da die Sprungstelle $F_{\text{h}} = 1$ für alle Modelle für den gleichen Wert L/H bei derselben Froudeschen Zahl F liegt.

Das Verhältnis $F_{\text{S}}/F_{\text{K}}$, das für viele andere Untersuchungen von ausschlaggebender Bedeutung ist, kommt zu Vergleichszwecken für die vorliegende Arbeit weniger in Frage, da der Wert $F_{\text{S}}/F_{\text{K}}$ für einen bestimmten Wert L/H oder H/T nicht konstant ist, sondern sich mit der Kanalbreite ändert.

In die Verhältnisse L/H und H/T geht nur die Wassertiefe des Kanals ein, nicht aber seine Breite. Zur Berücksichtigung dieser Größe wurde das Verhältnis K/B gebildet und für die Rechnungen benutzt. Hierbei bildete der Wert $K/B = 5$ die untere Grenze.

Durch die angegebenen Größen und Verhältniswerte ist das Programm der Wellenwiderstandsberechnungen umrissen.

Die Ergebnisse.

Für die genannten Beispiele wurde der Wellenwiderstand in der normierten, dimensionslosen Form nach Weinblum, entsprechend den Gleichungen (1a), (2a) und (3a) berechnet und jeweils für ein Modell in einem Kanal mit einer fest vorgegebenen Tiefe über der Froudeschen Zahl aufgetragen, d.h. für jedes Diagramm gilt eine ganz bestimmte Kombination der Größen L/B , B/T und H/L , bzw. H/T . Die Kanalbreite K dient als Parameter, d.h. jedes Diagramm enthält eine Kurvenschar, und jeder Kurve entspricht ein ganz bestimmter Wert H/K , bzw. K/B . Dabei wurde, wie bereits erwähnt, die Flachwasserkurve als Grenzfall $K/B \rightarrow \infty$ stets mit eingeschlossen.

Jedes Diagramm enthält außerdem die zugehörige R^* -Kurve für unbegrenzte Flüssigkeit, so daß man sofort aus jeder Zeichnung die prozentuale Erhöhung des Wellenwiderstandes eines vorgegebenen Schiffes in einem Kanal mit einer bestimmten Tiefe und Breite gegenüber unbegrenzter Flüssigkeit entnehmen kann.

Es soll noch erwähnt werden, daß der Wellenwiderstand in unbegrenzter Flüssigkeit R_∞^* bei gleichem analytischen Ausdruck für die Modelloberfläche eine Funktion des Verhältnisses L/T ist; daher gilt die gleiche R_∞^* -Kurve für alle Modelle mit gleichem L/B und B/T .

Die systematische Gliederung der Zeichnungen ist folgende; Die Diagramme sind nach wachsenden L/H -Werten geordnet; jeweils einem L/H -Wert entspricht eine bestimmte Abbindeungsnummer; die weitere Unterteilung innerhalb eines L/H -Verhältnisses erfolgt durch Buchstaben a, b, c, ... Wenn die Rechnung für beide B/T -Verhältnisse durchgeführt worden ist, so werden zuerst die R^* -Kurven für $B/T = 3$ und anschließend für $B/T = 2$ angegeben. Für jedes B/T ist die Reihenfolge der L/B -Werte $L/B = 10, 7.5, 5$.

Aus dieser Aufstellung ist ersichtlich, daß zuerst diejenigen Fälle gezeigt werden, in denen die Wassertiefen groß sind,

relativ zum Schiff oder Modell. Daher nähern sich in diesen Fällen die Widerstandsverhältnisse denen in unbegrenzter Flüssigkeit, bzw. erreichen sie vielfach praktisch schon. Allerdings ist aus den Kurven, z.B. für $L/H = 1.2$, ersichtlich, daß selbst hier noch der Breiteneinfluß eine merkliche Rolle spielt, obwohl doch im allgemeinen der Einfluß verschiedener Kanalbreiten auf den Wellenwiderstand wesentlich geringer ist als der Einfluß unterschiedlicher Wassertiefen.

In der Umgebung von $F_h = 1$, etwa in dem von Kreitner [14] definierten kritischen Bereich, sieht man in den Diagrammen, -speziell bei großen L/H -Werten-, ein starkes Anwachsen des Wellenwiderstandes bei Verringerung der Kanalbreite. Aber da hier vermutlich die linearisierte Wellenwiderstandstheorie versagt, lassen sich über die Zuverlässigkeit der auf Grund dieser Methode erhaltenen Ergebnisse im kritischen Bereich keinerlei Aussagen machen.

Den höheren L/H -Werten entsprechen die extremeren Verhältnisse geringer Kanaltiefen; als extremster Fall wurde das Verhältnis $H/T = 2$ berücksichtigt. In diesen Fällen ist die Anwendung der linearisierten Theorie erheblich problematischer als bei Vorhandensein größerer Kanaltiefen.- Es wäre interessant, durch einen Vergleich mit Versuchsergebnissen festzustellen, wie weit auch diese Ergebnisse noch brauchbar sind, d.h. für welchen Bereich der Froudeschen Zahlen bei einem bestimmten, kleinen H/T -Verhältnis die Ergebnisse der Rechnung mit entsprechenden Versuchsergebnissen noch übereinstimmen.

Aus den Diagrammen ist ersichtlich, daß beim Kanal der größte R^* -Wert im allgemeinen bei der Sprungstelle auftritt, d.h. direkt bei $F_h = 1$. Das muß nicht unbedingt so sein. Wenn nämlich der Wert $F_h = 1$ gerade bei einer Froudeschen Zahl F liegen würde, die bei unbegrenzter Flüssigkeit einem Minimum der R^* -Kurve entspräche oder hinter einem großen Maximum läge, so wäre es denkbar, daß der größte R^* -Wert im Kanal schon vor $F_h = 1$ auftreten würde und bei $F_h = 1$ bereits eine leichte Abnahme des Wellenwiderstandes zu verzeichnen wäre. Bei den

vorhandenen Ergebnissen tritt diese Möglichkeit allerdings nicht deutlich zutage; allenfalls findet sich eine solche Tendenz in Abb. 5e für $H/K = 0.1$ angedeutet.

Die Größe des Sprunges ΔR^* bei $F_h = 1$, die sich aus den Berechnungen der vorliegenden Arbeit ergibt, stimmt überein mit den Werten, die aus einer Formel von Inui [15] errechnet wurden.

Betrachten wir die Kurven der Reihe nach im Einzelnen, so erkennen wir, daß für das Verhältnis $L/H = 0.8$ praktisch der Zustand unbegrenzter Flüssigkeit erreicht wurde; diese Feststellung ist auch für $L/H = 1.2$ weitgehend zutreffend, speziell für $H/T = 25$ (Abb. 2a); zu beachten wäre nur der Breiteneinfluß; besonders für $H/K = 1.0$ zeigt sich schon von etwa $F = 0.33$ an eine merkliche Erhöhung des Wellenwiderstandes, der eine starke Widerstandsverringerung im überkritischen Bereich entspricht.- In den Abbildungen 2b und 2c haben wir die R^* -Kurven für $L/B = 7.5$, $B/T = 3$, $H/T = 18.75$ und für $L/B = 5$, $B/T = 3$, $H/T = 12.5$. Im Unterschied zu dem in Abb. 2a dargestellten Fall, in dem eine allmähliche und verhältnismäßig geringe Widerstandserhöhung für $H/K = 0.1$ erst ungefähr ab $F = 0.62$ festzustellen ist, beginnt in Abb. 2c diese Erhöhung bereits bei $F = 0.4$. Dieses Verhalten ist ganz erklärlich, da wir in Abb. 2c das Verhältnis von Wassertiefe zu Tiefgang $H/T = 12.5$ haben, in Abb. 2a dagegen $H/T = 25$. Das bedeutet, daß im Verhältnis zum Tiefgang des Modells im Falle 2a die Wassertiefe doppelt so groß ist wie bei 2c. Demzufolge macht sich in letzterem Fall der Kanal-, bzw. Flachwassereinfluß früher bemerkbar als im Falle 2a. Dabei gilt in beiden Fällen der gleiche L/H -Wert.

Vergleicht man die absoluten Werte R^* der Kurven a, b, c für die einzelnen Froudeschen Zahlen miteinander, so stellt man fest, daß diese bei a am größten und bei c am kleinsten sind, Das mag merkwürdig erscheinen, da bei a das größte H/T -Verhältnis, also die größte Wassertiefe und bei c das kleinste H/T -Verhältnis, demnach die kleinste Wassertiefe vorliegt. Deshalb muß

man sich vor Augen führen, daß es sich bei diesen Kurven um normierte Werte des Wellenwiderstandes handelt. Der tatsächliche Wellenwiderstand ergibt sich hieraus erst durch Multiplikation mit dem Faktor $\frac{8}{\pi} \rho g \frac{B^2 T^2}{L}$, welcher für die Kurven a wegen der größeren Verhältnisse L/B und L/T erheblich kleiner ausfallen wird als für die Kurven b und c. Aus diesem Grunde sind auch die Kurven R^* für unbegrenzte Flüssigkeit in allen drei Fällen unterschiedlich, da R^* bei gleichem B/T und gleicher Oberflächengleichung eine Funktion des Verhältnisses L/T ist.- Ein Vergleich der prozentualen Erhöhungen des Wellenwiderstandes gegenüber dem Wellenwiderstand in unbegrenzter Flüssigkeit bietet eine bessere Anschaulichkeit, da hierbei der Vorfaktor keine Rolle spielt. Deshalb wurden für einige L/H -Verhältnisse die prozentualen Erhöhungen berechnet und für jeweils einen L/H -Wert in drei Abbildungen zusammengefaßt. Die erste dieser Abbildungen zeigt die prozentualen Erhöhungen des Wellenwiderstandes im Flachwasser, die zweite die Prozentzahlen für $H/K = 0.1$ und die dritte für $H/K = 0.4$ und teilweise für $H/K = 0.2$ (Abb. 14 bis 17a,b,c).

Diese Kurven lassen deutlich erkennen, daß für einen konstanten L/H -Wert die prozentualen Erhöhungen bei den einzelnen Froudeschen Zahlen weitgehend von dem Verhältnis H/T abhängen und bei Berücksichtigung verschiedener B/T -Verhältnisse bei gleichem H/T etwa die gleichen Größen aufweisen; eine Verringerung von H/T ergibt eine Vergrößerung des Widerstandes. Eventuelle Unstimmigkeiten in den Kurven können wahrscheinlich durch Rechenungenauigkeit erklärt werden, da die Berechnung der Prozentzahlen erst nachträglich auf Grund der vorhandenen R^* -Kurven erfolgte. Davon abgesehen ist die Betrachtung der prozentualen Erhöhungen auch nicht völlig befriedigend, da diese Prozentzahlen ja nur relative Größen sind. Bei kleinen R^* -Werten wird eine verhältnismäßig hohe prozentuale Erhöhung nur eine geringe absolute Erhöhung des Wellenwiderstandes bedeuten.- Aus

den genannten Gründen ist darauf verzichtet worden, für sämtliche der Rechnung zugrundegelegten Fälle die prozentuale Erhöhung des Wellenwiderstandes zu berechnen; stattdessen wurde diese Rechnung auf einige charakteristische L/H -Werte beschränkt.

Die weitere Betrachtung der R^* -Kurven in den Abbildungen 1 bis 13 läßt die Tendenz erkennen, daß mit wachsenden L/H -Werten, d.h. mit Verschiebung des Wertes $F_h = 1$ zu kleineren Froudeschen Zahlen F , die Erhöhung des Wellenwiderstandes ein immer größeres Ausmaß annimmt, sowohl hinsichtlich der Ausdehnung über den Bereich der Froudeschen Zahlen als auch bezüglich der Größenordnung der R^* -Werte. Dem entspricht eine immer stärkere Verringerung des Wellenwiderstandes im überkritischen Bereich. Dabei tritt bei den kleineren Froudeschen Zahlen teilweise eine Verschiebung der Maxima und Minima der R^* -Kurven gegenüber unbegrenzter Flüssigkeit auf. So erklärt es sich, daß in diesem Bereich in einigen Fällen die R^* -Kurve für unbegrenzte Flüssigkeit höhere Werte aufweist als die Kurven für Flachwasser und für den Kanal (Beispiel: R^* für $F = 0.31$ in Abb. 10b, $L/H = 6.66\dots$, $L/B = 7.5$, $B/T = 3$, $W = 0.25$). Weiterhin ist aus den R^* -Kurven ersichtlich, daß das Maximum der Flachwasserkurve stets vor $F_h = 1$ auftritt. Wegen des stetigen Verlaufs dieser Kurve bleibt die Erhöhung des Wellenwiderstandes auch für $F_h > 1$ zuerst noch bestehen. Dieser Teil des überkritischen Bereichs, in welchem noch eine Erhöhung des Wellenwiderstandes im Flachwasser zu verzeichnen ist, fällt umso größer aus, je extremer die Wasserverhältnisse sind, d.h. je größer der Wert L/H ist.

Fernerhin ergibt sich aus den Abbildungen 1 bis 13, daß im kritischen Bereich, d.h. in der Umgebung von $F_h = 1$, auch bei großen Kanalbreiten der Breiteneinfluß immer noch erheblich bleibt und man daher in diesem Bereich die R^* -Kurve für den Kanal kaum durch die Flachwasserkurve annähern kann. Als Beispiel hierfür sei der Fall $L/H = 2.5$, $L/B = 10$, $B/T = 3$,

$H/T = 13$ (Abb. 5a) genannt, der mit seinem relativ niedrigen L/H - und hohen H/T -Wert doch schon recht nahe an die Verhältnisse in unbegrenzter Flüssigkeit herankommt. Betrachten wir die Flachwasserkurve und die Kurve a, der ein Verhältnis $K/B = 40$ entspricht, was bedeutet, daß die Breite des Kanals gleich der 40-fachen Modellbreite ist, so sehen wir, daß von etwa $F = 0.54$ an diese Kurven sich erheblich voneinander unterscheiden. Man erkennt daraus, daß im kritischen Bereich selbst große Kanalbreiten noch einen Einfluß auf den Wellenwiderstand ausüben und deshalb bei der Widerstandsbestimmung berücksichtigt werden müssen. Leider war es zum Zeitpunkt der Fertigstellung der vorliegenden Veröffentlichung nicht möglich, zum Vergleich geeignete experimentelle Ergebnisse zu erhalten.

Es soll hier noch ein Wort gesagt werden zu dem kritischen Bereich, in welchem die Strömungsvorgänge nicht mehr stationär sind. Die Ergebnisse der linearisierten Theorie sind in diesem Gebiet nicht zuverlässig. Kreitner hat in [14] den kritischen Bereich als eine Funktion des Verhältnisses F_w/F_k aufgestellt. Da in den Abbildungen 1 bis 13 für $L/B = 10$ stets die Größen F_w/F_k angegeben sind, wurde mit Hilfe eines nach Kreitner in [16] aufgestellten Diagramms der kritische Bereich für alle Modelle mit $L/B = 10$ und $B/T = 3$ berechnet und in die entsprechenden Abbildungen eingezeichnet. Dadurch kann man sich ein ungefähres Bild davon machen, wie weit die hier aufgestellten R^* -Kurven brauchbar und in welchem Gebiet die Ergebnisse mit Vorsicht zu betrachten sind.

Die Bestimmung des Wellenwiderstandes eines Schiffmodells aus den R^* -Kurven.

An dieser Stelle soll ein Beispiel gebracht werden für die näherungsweise Bestimmung des Wellenwiderstandes eines konkreten Schiffmodells aus den Diagrammen der Abbildungen 1-13.

Voraussetzung für die Benutzung der vorliegenden R^* -Kurven ist natürlich, daß die Daten des Schiffes, für das der Wellenwiderstand ermittelt werden soll, nicht gar zu sehr abweichen von den Daten der hier behandelten Modelle. Das bedeutet, daß der Wert L/B möglichst in dem Intervall $5 \leq L/B \leq 10$ liegen müßte, da bei den vorliegenden Rechnungen die Verhältnisse $L/B = 5, 7.5$ und 10 berücksichtigt worden sind; B/T dürfte nicht viel kleiner als 2 und nicht viel größer als 3 werden. Sehr wichtig ist fernerhin, daß der Völligkeitsgrad der Verdrängung δ und der Schärfegrad φ sich nicht allzu stark voneinander unterscheiden und ungefähr bei dem Wert $2/3$ liegen und daß das Schiff vorwiegend U-Spanten hat, weil für die vorliegenden Rechnungen Modelle mit Rechteckspanten zugrundegelegt wurden. Ein Vergleich der hierfür erzielten Ergebnisse mit denen von Sretensk⁴ [6], der den Wellenwiderstand für Modelle mit Dreieckspanten ~~wesen~~, zeigte, daß die Ergebnisse für Dreieckspanten wesentlich niedriger sind als für Rechteckspanten.

Nach Begrenzung des Rahmens, in welchem die vorliegenden R^* -Kurven verwendet werden können, soll nun an Hand eines Beispiels die Benutzung der Kurven erläutert werden.

Gegeben seien folgende Daten eines Schiffmodells:

$$L = 7.20 \text{ m}$$

$$B = 0.90 \text{ m}$$

$$T = 0.30 \text{ m}$$

$$\varphi = 0.64, \quad \beta = 0.963.$$

Die Abmessungen des Schleppkanals seien:

$$K = 6.00 \text{ m}$$

$$H = 1.80 \text{ m}$$

Damit ergeben sich folgende Verhältnisse:

$$L/B = 8, \quad B/T = 3, \quad H/K = 0.3, \quad L/H = 4.$$

Der Schärfegrad $\varphi = 0.64$ und die Hauptspantvölligkeit $\beta = 0.963$ entsprechen zwar nicht völlig den Werten $\varphi = 0.66\dots$ und $\beta = 1$, die unseren Berechnungen zugrundegelegt wurden, sollen aber hier diesen Werten gleichgesetzt werden.

R^* -Kurven sind vorhanden für $B/T = 3$ und $L/H = 3, 3.75$ und 5 . Die Werte für $L/H = 4$ müssen aus diesen Kurven interpoliert werden. Doch vorher müssen noch für $L/H = 3, 3.75$ und 5 aus den Kurven a, b, c, für $L/B = 10, 7.5$ und 5 die Werte für $L/B = 8$ interpoliert werden. Interpolationen für H/K und B/T erübrigen sich in diesem Fall, da die Eingangsdaten der Einfachheit halber so gewählt wurden, daß sich $H/K = 0.3$ und $B/T = 3$ ergaben, Werte, die bei den vorliegenden R^* -Kurven direkt berücksichtigt wurden.

Der Wellenwiderstand soll bei diesem Beispiel für die Froudesche Zahl $F = 0.37$ ermittelt werden. Die Bestimmung von R^* für andere Froudesche Zahlen erfolgt ganz analog. Schwierigkeiten könnten sich nur dann ergeben, wenn eine Froudesche Zahl F bei irgendeinem L/H -Verhältnis direkt auf $F_h = 1$ treffen würde. Zunächst werden aus den Abbildungen 6a, b, c für $L/H = 3$ die Werte R^* aus der Kurve $H/K = 0.3$ bei $F = 0.37$ für $L/B = 10, 7.5$ und 5 abgelesen.

Man erhält die Werte der folgenden Tabelle:

L/B	10	7.5	5
R^*	0.50	0.47	0.33
R_∞^*	0.43	0.37	0.28

Die graphische Interpolation ergibt für $L/B = 8$ die Werte $R^* = 0.485$ und $R_\infty^* = 0.39$.

Analog erhält man für $L/H = 3.75$ und $L/B = 8$ den Wert $R^* = 0.6$ und für $L/H = 5$ und $L/B = 8$ den Wert $R^* = 1.74$. Für R_∞^* ergeben sich für die verschiedenen L/H -Werte keine unterschiedlichen Werte, da R_∞^* nur eine Funktion von L/T , nicht aber von L/H ist.

Aus den drei R^* -Werten für $L/B = 8$ bei $L/H = 3, 3.75$ und 5 wird der R^* -Wert für $L/H = 4$ graphisch interpoliert. Man erhält $R^* = 0.69$.

Der Vergleich dieses Wertes mit dem Wert für unbegrenzte Flüssigkeit $R_\infty^* = 0.39$ ergibt für das Schiffmodell unseres Beispiels in dem gegebenen Kanal bei $F = 0.37$ eine Zunahme

des Wellenwiderstandes um rund 77%. Diese relativ hohe Widerstandszunahme erklärt sich daraus, daß der Froudeschen Zahl $F = 0.37$ die recht hohe Froudesche Tiefenzahl $F_h = 0.74$ entspricht. Die Froudesche Tiefenzahl $F_h = 1$ liegt bei $F = 0.5$. Eine Berechnung des kritischen Bereichs nach Kreitner ergibt für seine untere Grenze die Froudesche Zahl $F = 0.426$, was besagt, daß die Froudesche Zahl $F = 0.37$, für welche der Wellenwiderstand ermittelt wurde, noch im unterkritischen Bereich liegt.

Schlußbemerkung.

Die bei der Auswahl des Beispiels aufgestellte Begrenzung, innerhalb deren die vorliegenden R^* -Kurven verwendbar sind, bezieht sich nur auf die Ergebnisse hier. Eine Erweiterung der Rechnung auf andere L/B-, B/T- und L/H-Verhältnisse ist ohne Änderung des verwendeten Rechenprogramms möglich, eine Ausdehnung auf andere Wasserlinien- und Hauptspantvölligkeiten (bei Vorgabe dieser beiden Größen durch Polynome) durch eine geringe Programmänderung. Die Berücksichtigung speziellerer Schiffsförmungen würde allerdings eine völlig neue Gestaltung des Rechenprogramms und damit einen sehr großen Arbeitsaufwand erfordern. Jedoch ist zu hoffen, daß bereits mit dem hier vorliegenden Material ein kleiner Beitrag zur Ermittlung des Kanaleinflusses bei der Bestimmung des Wellenwiderstandes aus Schleppversuchen geleistet worden ist.

Zum Schluß möchte ich der Deutschen Forschungsgemeinschaft danken, durch welche die Benutzung der genannten elektronischen Rechenanlagen ermöglicht wurde. Weiterhin möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.H.G. Weinblum danken für seine Anregung zu dieser Arbeit und Fräulein Dörte Sohnholz für ihre Unterstützung bei der Arbeit an der TR4.

Literaturverzeichnis:

- [1] Michell, J.H.: The Wave Resistance of a Ship.
(Philosophical Magazine, London. 45, S.106-123, 1898.)
- [2] Havelock, T.: The Theory of Wave Resistance.
(Proceedings of the Royal Society of London. A 118,
S.24 ff., 1928)
und zahlreiche weitere Veröffentlichungen in den
'Proceedings' und in 'SNAME'.
- [3] Weinblum, G.: Anwendungen der Michellschen Widerstands-
theorie. (Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesell-
schaft. 31, S.389-440, 1930)
und weitere Veröffentlichungen, z.B. in 'VDI-Zeitschrift'
1932, 'Schiffbau' 1936, 1938, 'Jb. STG' 1937, 'Schiffs-
technik' 1958.
- [4] Lunde, J.K.: The Linearized Theory of Wave Resistance
and Its Application to Ship-Shaped Bodies in Motion on
the Surface of a Deep, Previously Undisturbed Fluid.
(The Society of Naval Architects and Marine Engineers,
New York. Technical and Research Bulletin. No 1-18, 1957).
- [5] Sretenski, L.N.: Theoretische Untersuchung des Wellen-
widerstandes. Moskau 1937. (Trudi Zentraln. Aero-Gidrodyn.
Inst. im. Prof. N.E. Joukowskogo 319.) Russisch
- [6] Sretenski, L.N.: Zur Theorie des Wellenwiderstandes.
Moskau 1939. (Trudi Zentraln. Aero-Gidrodyn. Inst. im.
Prof. N.E. Joukowskogo 458.) Russisch
- [7] Wigley, W.C.S.: L'etat actuel des calculs de resistance
de vagues. (Bulletin de l'Association technique maritime
et aeronautique. 48, S.533-587, 1949.)
- [8] Kirsch, M.: Ein Beitrag zur Berechnung des Wellenwider-
standes im Kanal. (Schiffstechnik. 9, 47, S.123-127, 1962.)
- [9] Apuchtin, P.A. und J.I. Woitkunski: Der Widerstand des
Wassers bei der Bewegung von Schiffen. 7.Kapitel:

Widerstand bei Bewegung in begrenztem Fahrwasser.
Moskau, Leningrad 1953. Russisch

- [10] Weinblum, G.: Ein Verfahren zur Auswertung des Wellenwiderstandes vereinfachter Schiffsförmern. (Schiffstechnik. 3,18, S.278-287, 1956.)
- [11] Schuster, S.: Untersuchungen über Strömungs- und Widerstandsverhältnisse bei Fahrt von Schiffen in beschränktem Wasser. (Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft. 1952, S.244-288.)
- [12] Graff, W.: Die Zunahme des Reibungswiderstandes auf flachem Wasser. (Schiffstechnik. 3, 14/15, S.99-101, 1955/56.)
- [13] Kolberg, F.: Der Wellenwiderstand von Schiffen auf flachem Wasser. (Ingenieur-Archiv. 27,4, S.268-275, 1959.)
- [14] Kreitner, J.: Über den Schiffswiderstand auf beschränktem Wasser. (Werft, Reederei, Hafen. 15,7, S.2582, 1934.)
- [15] Inui, T.: Japanese Developments of the Theory of Wave-Making and Wave Resistance. (Seventh International Conference on Ship Hydrodynamics, Oslo. 19-20 August, 1954.)
- [16] Lap, A.J.W. and J.D. van Manen: Fundamentals of Ship Resistance and Propulsion. (International Shipbuilding Progress. 4, S.43-58, speziell S.48, 1957.)

Verzeichnis der Abbildungen.

R*-Kurven: Abb. 1 bis 13

Abb.	L/H	B/T	L/B	H/T
1a	0.8	2	10	25
1b	0.8	2	7.5	18.75
1c	0.8	2	5	12.5
2a	1.2	3	10	25
2b	1.2	3	7.5	18.75
2c	1.2	3	5	12.5
3a	1.666..	2	10	12
3b	1.666..	2	7.5	9
3c	1.666..	2	5	6
4a	2	2	10	10
4b	2	2	7.5	7.5
4c	2	2	5	5
5a	2.5	3	10	12
5b	2.5	3	7.5	9
5c	2.5	3	5	6
5d	2.5	2	10	8
5e	2.5	2	7.5	6
5f	2.5	2	5	4
6a	3	3	10	10
6b	3	3	7.5	7.5
6c	3	3	5	5
7a	3.333..	2	10	6
7b	3.333..	2	7.5	4.5
7c	3.333..	2	5	3
8a	3.75	3	10	8
8b	3.75	3	7.5	6
8c	3.75	3	5	4
9a	5	3	10	6
9b	5	3	7.5	4.5
9c	5	3	5	3

Abb.	L/H	B/T	L/B	H/T
9d	5	2	10	4
9e	5	2	7.5	3
9f	5	2	5	2
10a	6.666..	2	10	3
10b	6.666..	2	7.5	2.25
11a	7.5	3	10	4
11b	7.5	3	7.5	3
11c	7.5	3	5	2
12a	10	3	10	3
12b	10	3	7.5	2.25
12c	10	2	10	2
13a	15	3	10	2

Prozentuale Erhöhungen: Abb. 14 bis 17

14a	1.666..	Flachwasser
14b	1.666..	H/K = 0.1
14c	1.666..	H/K = 0.4
15a	2.5	Flachwasser
15b	2.5	H/K = 0.1
15c	2.5	H/K = 0.4 und H/K = 0.2
16a	3.75	Flachwasser
16b	3.75	H/K = 0.1
16c	3.75	H/K = 0.4 und H/K = 0.2
17a	5	Flachwasser
17b	5	H/K = 0.1
17c	5	H/K = 0.2

Abb. 1a

$$L/H = 0,8$$

$$L/B = 10; \quad B/T = 2; \quad H/T = 25$$

----- R^*_{∞} für unbegrenzte Flö

----- R^*_{Fl} für Flachwasser

	K/B	H/K	F_{∞}/F_K
a	125	0,1	0,00032

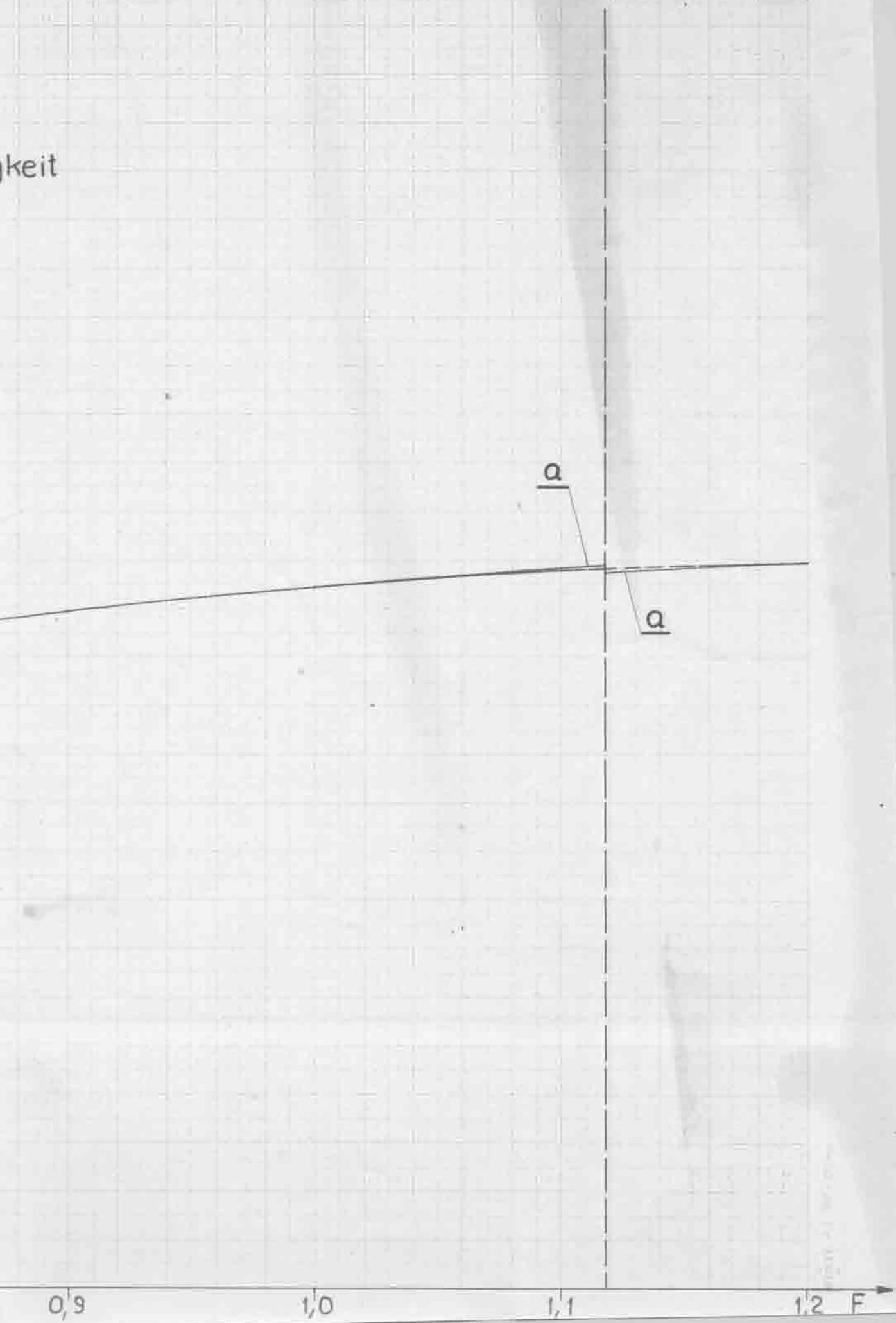
0,5

0,6

0,7

0,8

keit



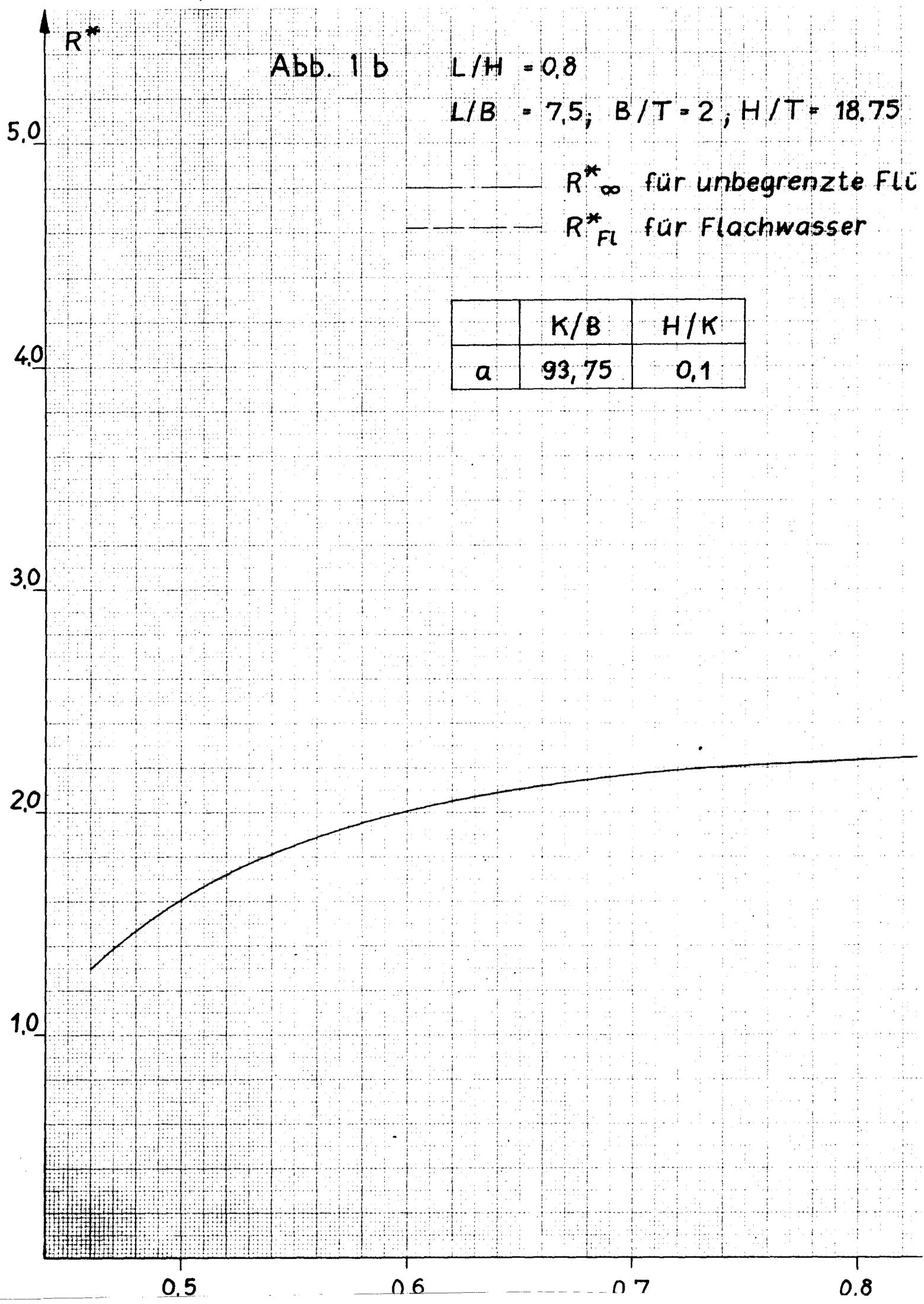


Abb. 1 b

$L/H = 0,8$

$L/B = 7,5; B/T = 2; H/T = 18,75$

R^*_∞ für unbegrenzte FLÜ

R^*_{FL} für Flachwasser

	K/B	H/K
a	93,75	0,1

0.5

0.6

0.7

0.8

issigkeit

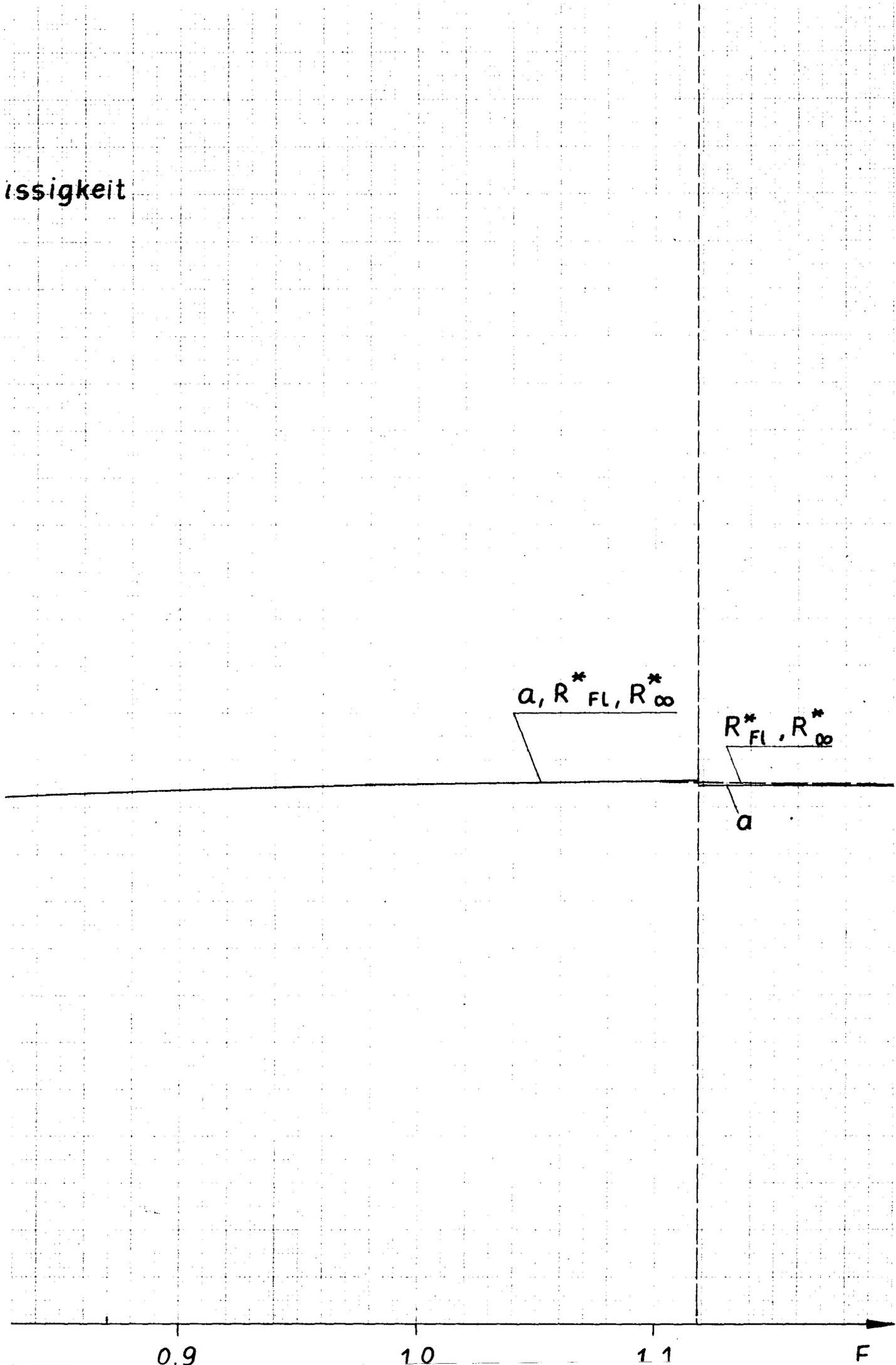


Abb. 1 c

$$L/H = 0,8$$

$$L/B = 5; \quad B/T = 2; \quad H/T = 12,5$$

R^*

— R^*_∞ für unbegrenzte Flüssigkeit
— R^*_{Fl} für Flachwasser

	K/B	H/K
α	62,5	0,1

5,0

4,0

3,0

2,0

1,0

$\alpha, R^*_\infty, R^*_{Fl}$

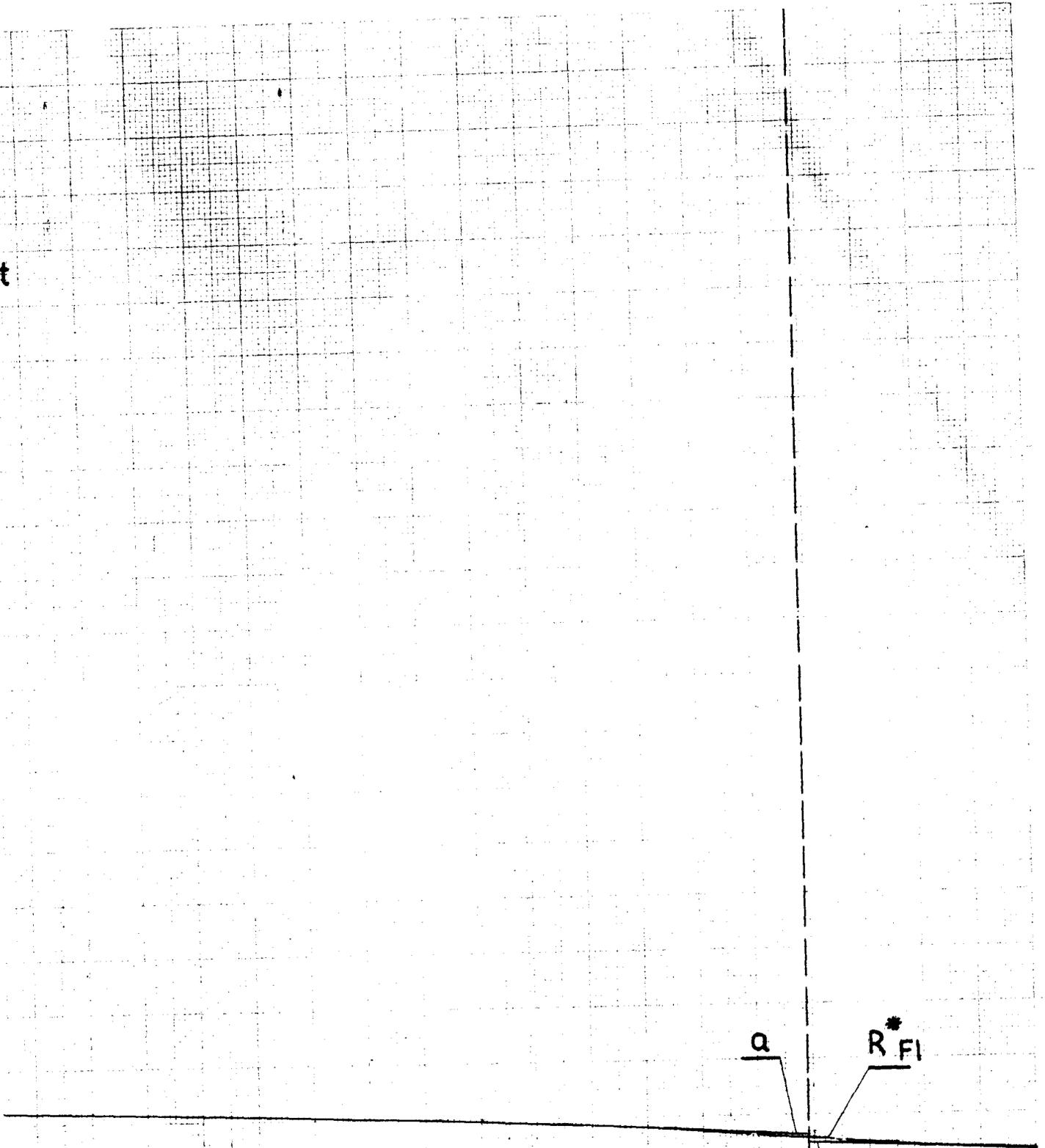
0,5

0,6

0,7

0,8

dit



a

R FI

a

0,9

1,0

1,1

F

1,2

27 x 420 mm



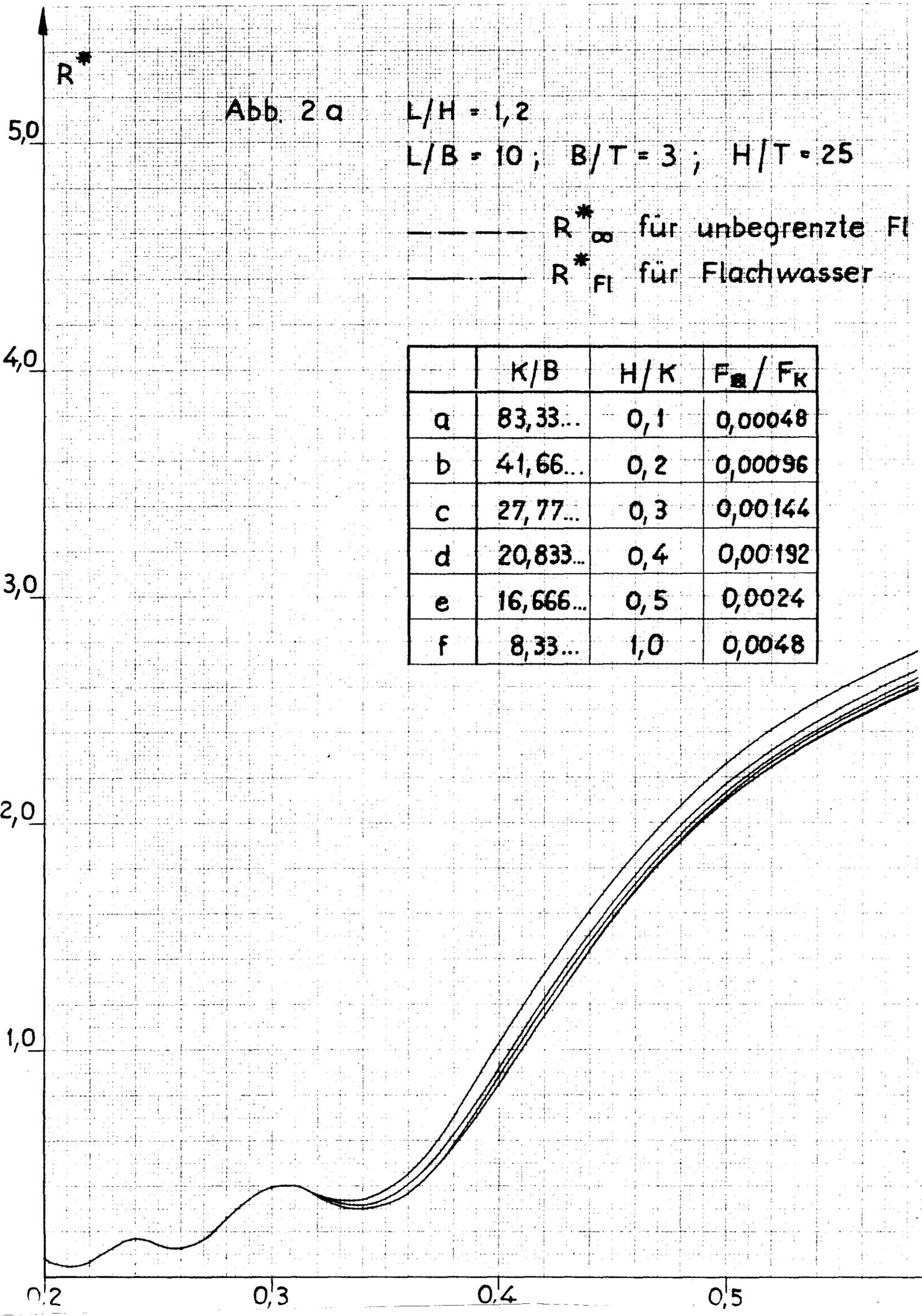
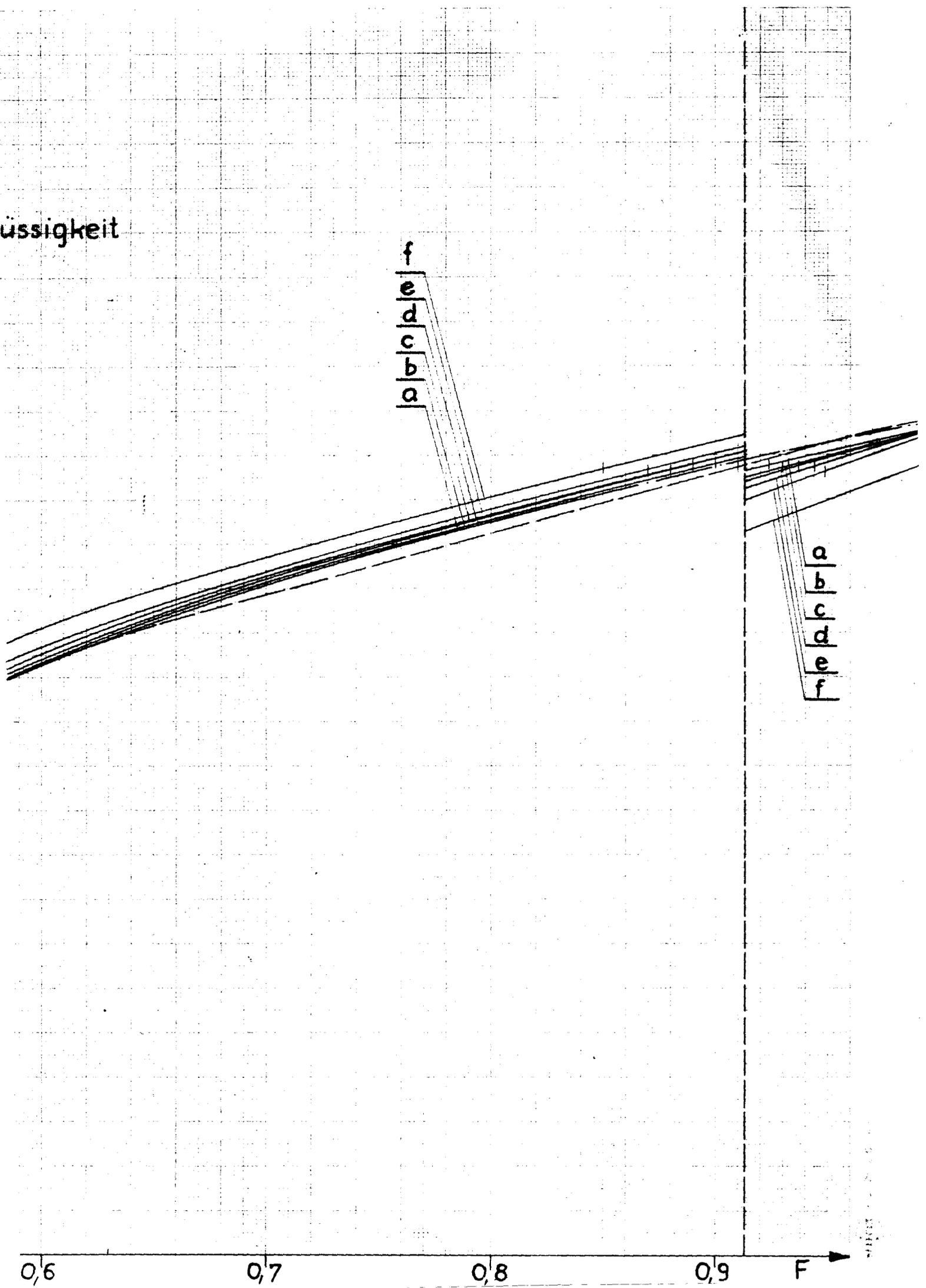


Abb. 2 a $L/H = 1,2$
 $L/B = 10$; $B/T = 3$; $H/T = 25$

----- R^*_{∞} für unbegrenzte Fl
 _____ R^*_{Fl} für Flachwasser

	K/B	H/K	F_{fl}/F_K
a	83,33...	0,1	0,00048
b	41,66...	0,2	0,00096
c	27,77...	0,3	0,00144
d	20,833...	0,4	0,00192
e	16,666...	0,5	0,0024
f	8,33...	1,0	0,0048

üssigkeit

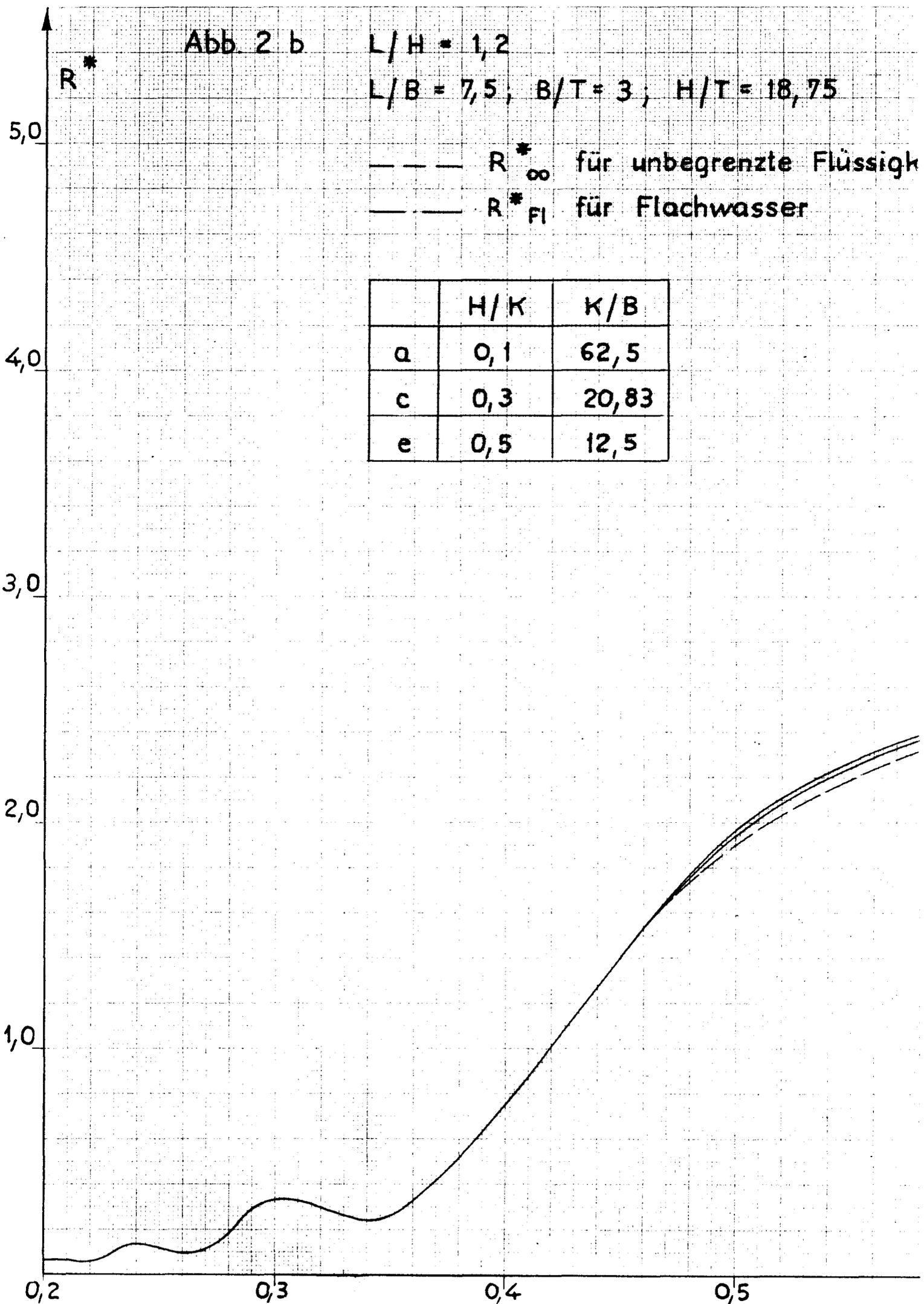


1000000

Abb. 2 b

$L/H = 1,2$

$L/B = 7,5; B/T = 3; H/T = 18,75$



Zeit

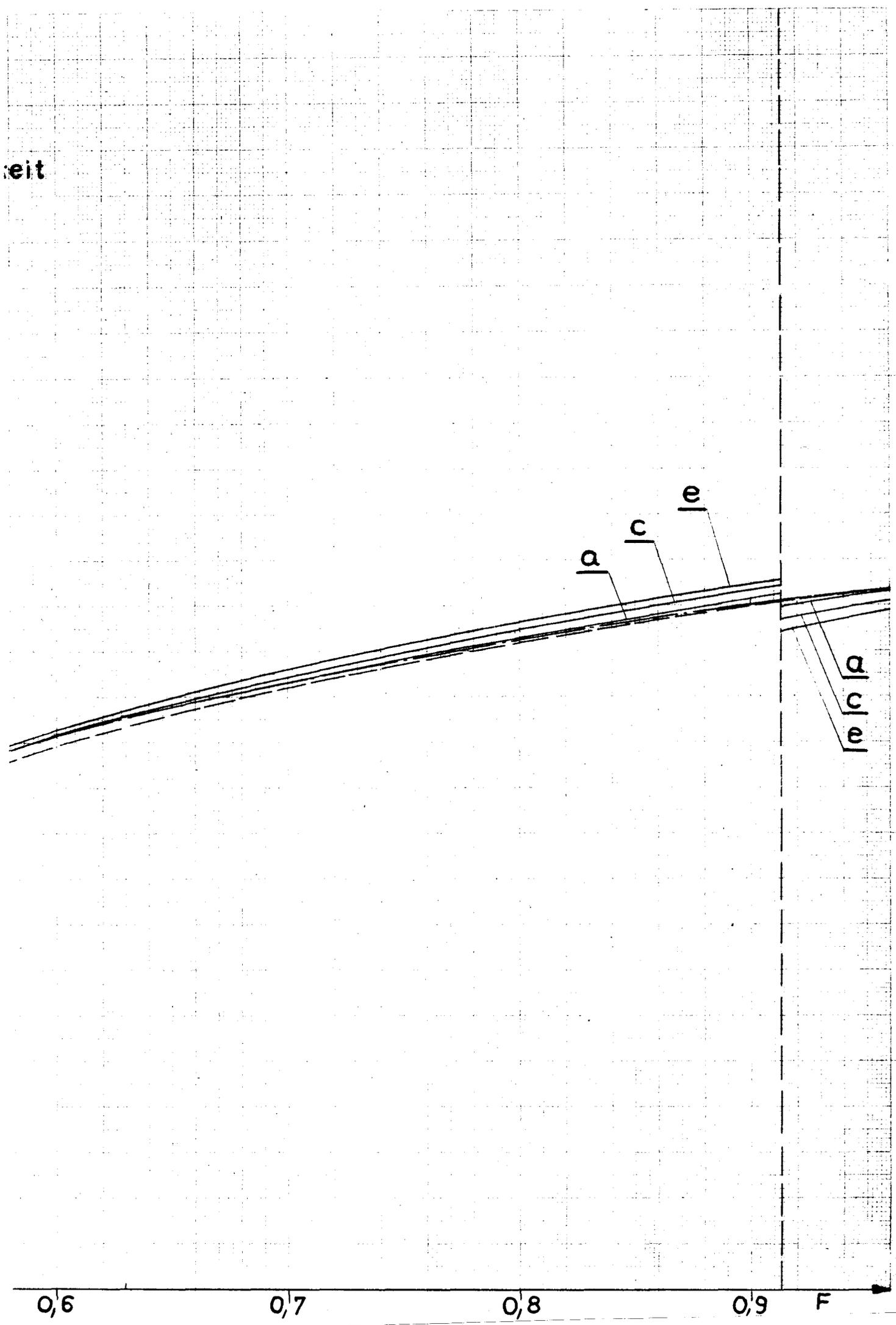


Abb. 2 c

$L/H = 1,2$

$L/B = 5; B/T = 3; H/T = 12,5$

R^*

5,0

— R^*_∞ für unbegrenzte

— R^*_{Fl} für Flachwasser

4,0

	H/K	K/B
a	0,1	41,66...
c	0,3	13,89
e	0,5	8,33...

3,0

2,0

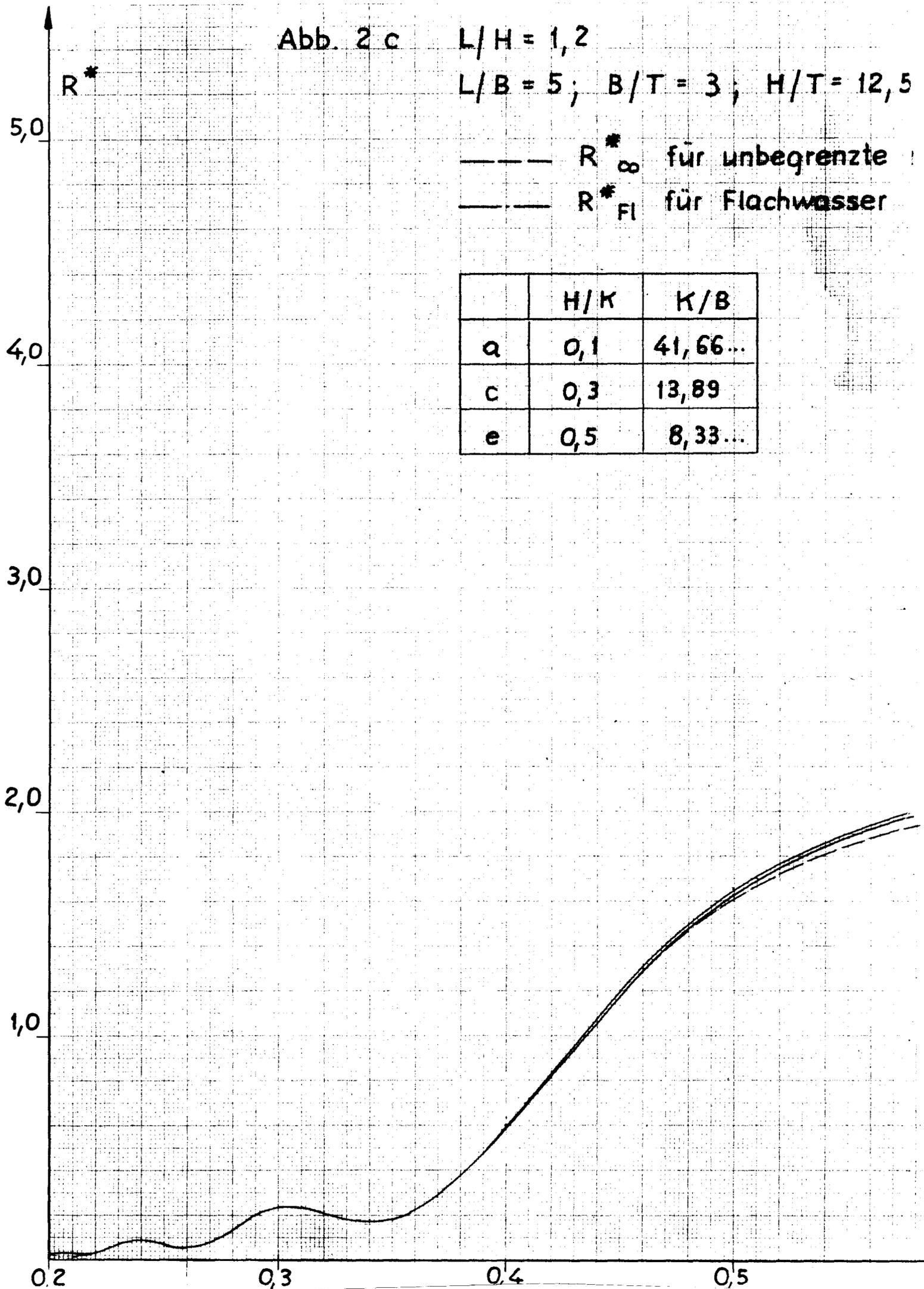
1,0

0,2

0,3

0,4

0,5



Flüssigkeit

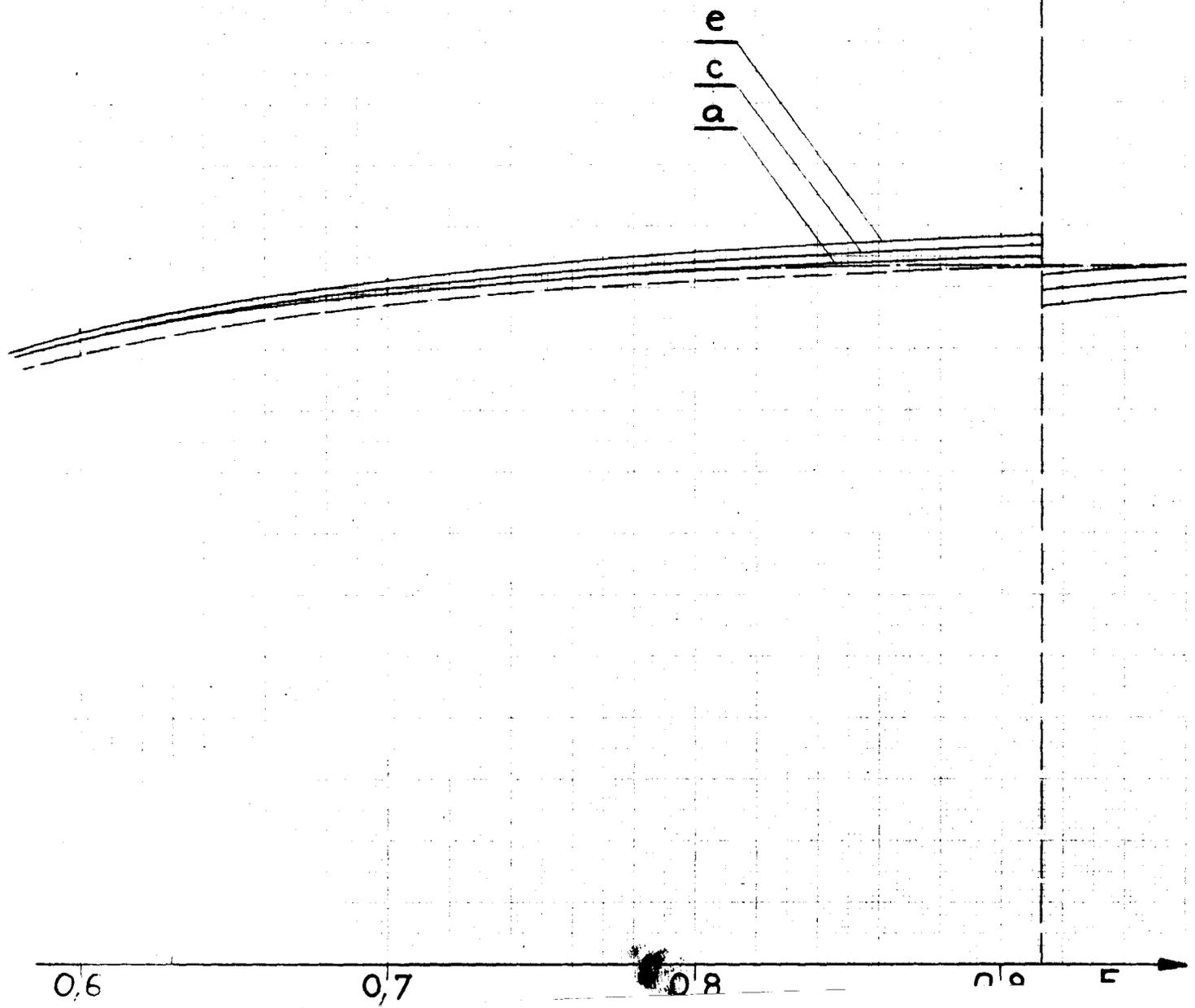


Abb. 3 a

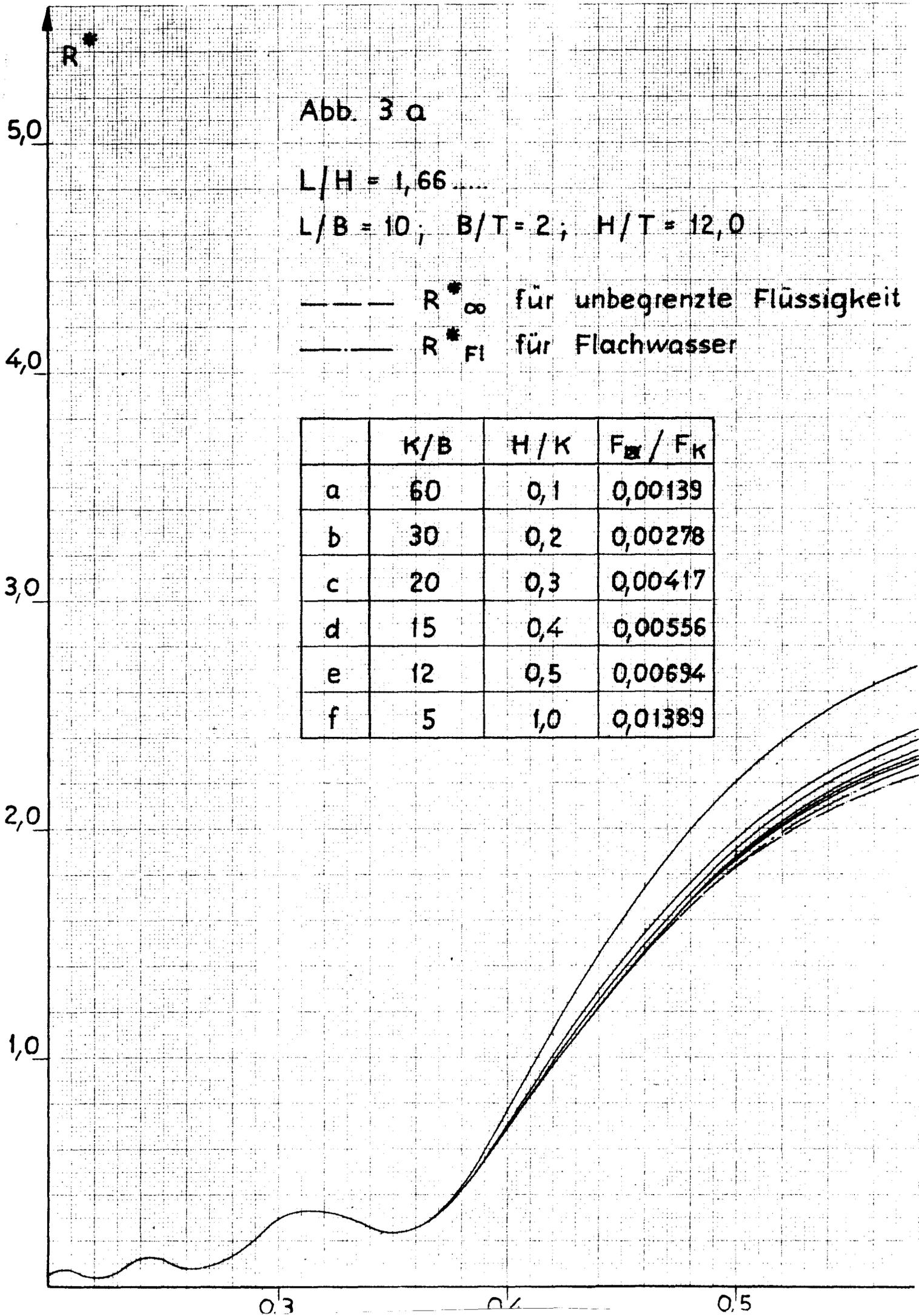
$L/H = 1,66$

$L/B = 10; B/T = 2; H/T = 12,0$

----- R^*_{∞} für unbegrenzte Flüssigkeit

..... R^*_{Fl} für Flachwasser

	K/B	H/K	F_{gr} / F_K
a	60	0,1	0,00139
b	30	0,2	0,00278
c	20	0,3	0,00417
d	15	0,4	0,00556
e	12	0,5	0,00694
f	5	1,0	0,01389



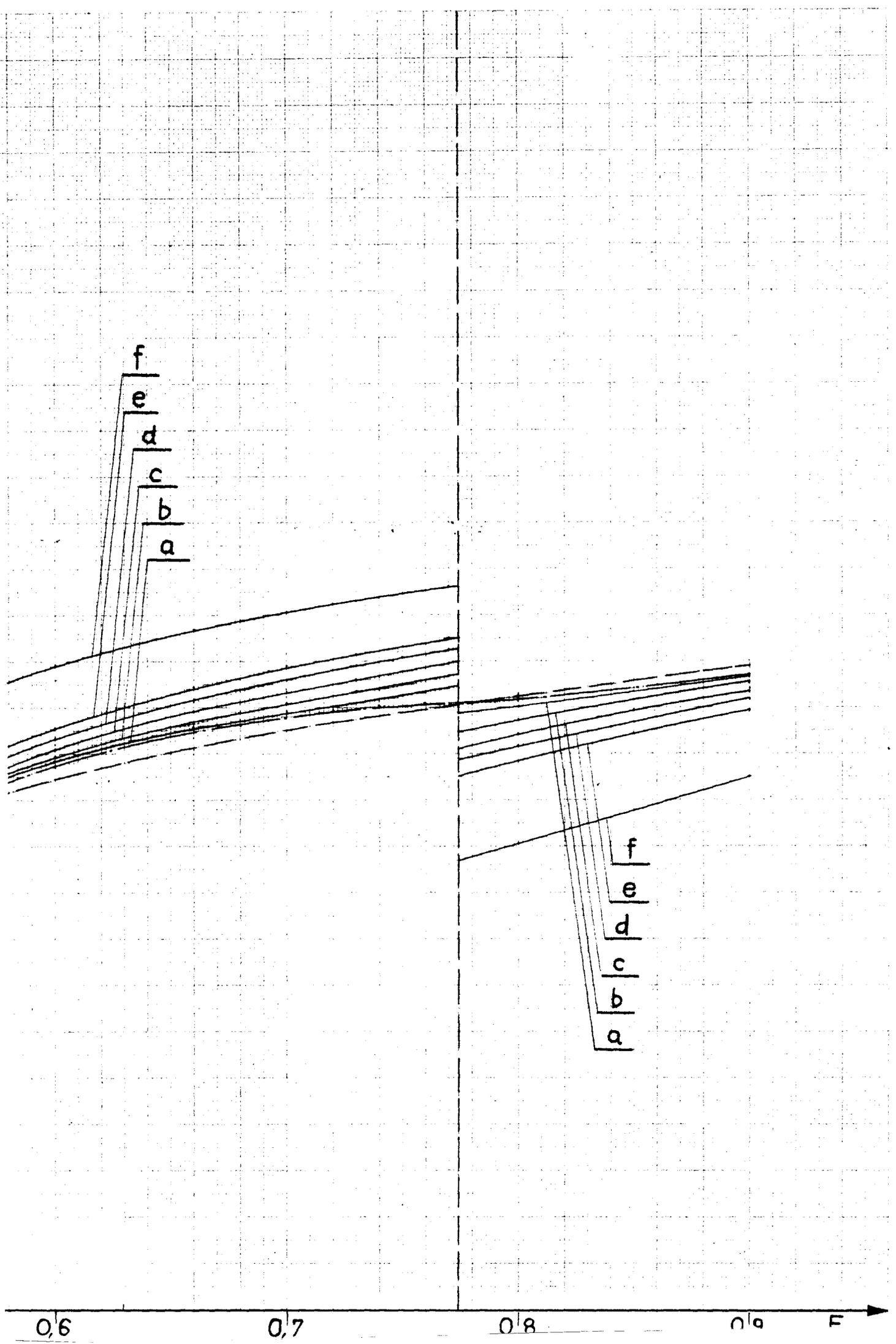


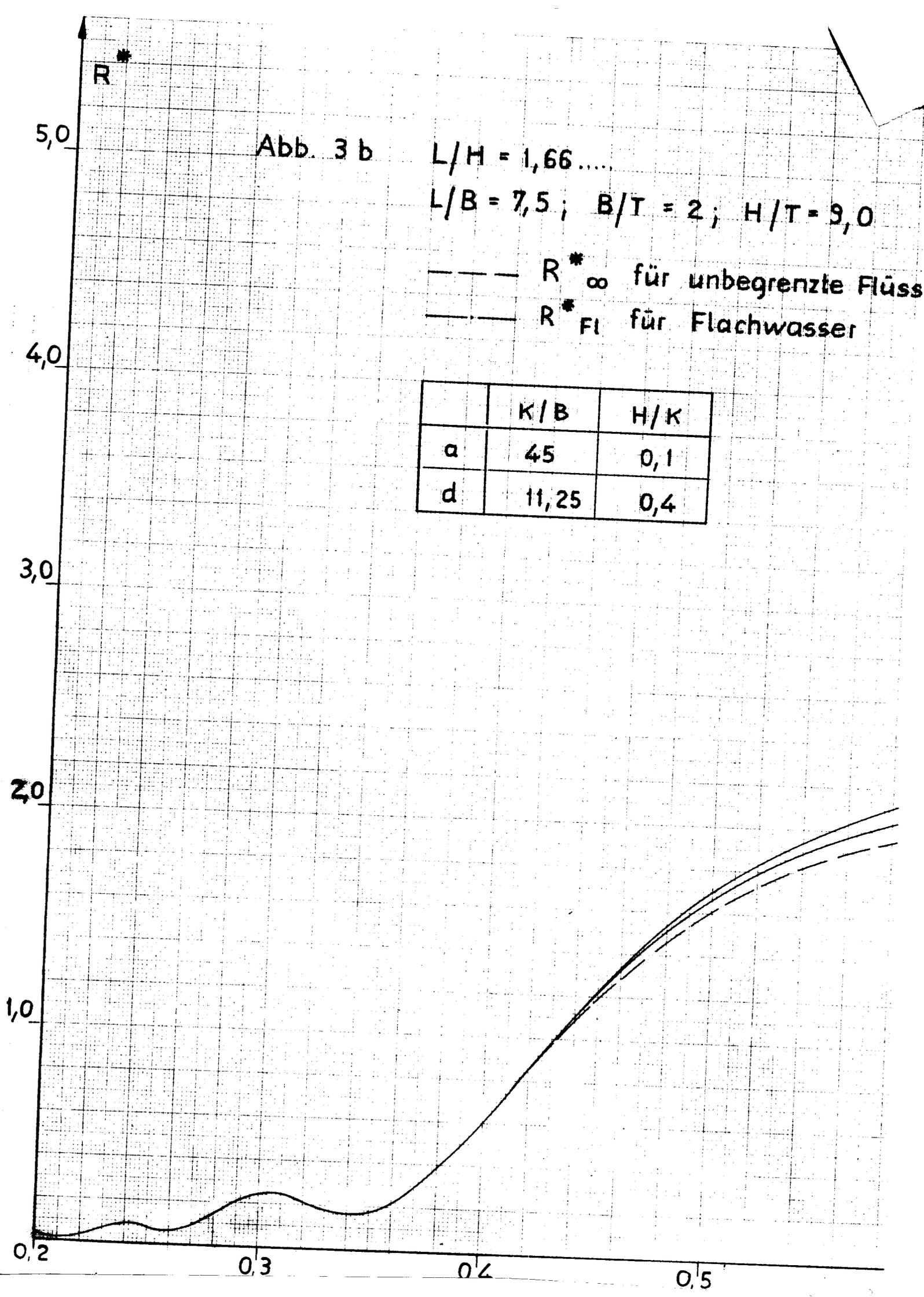
Abb. 3 b

$L/H = 1,66 \dots$

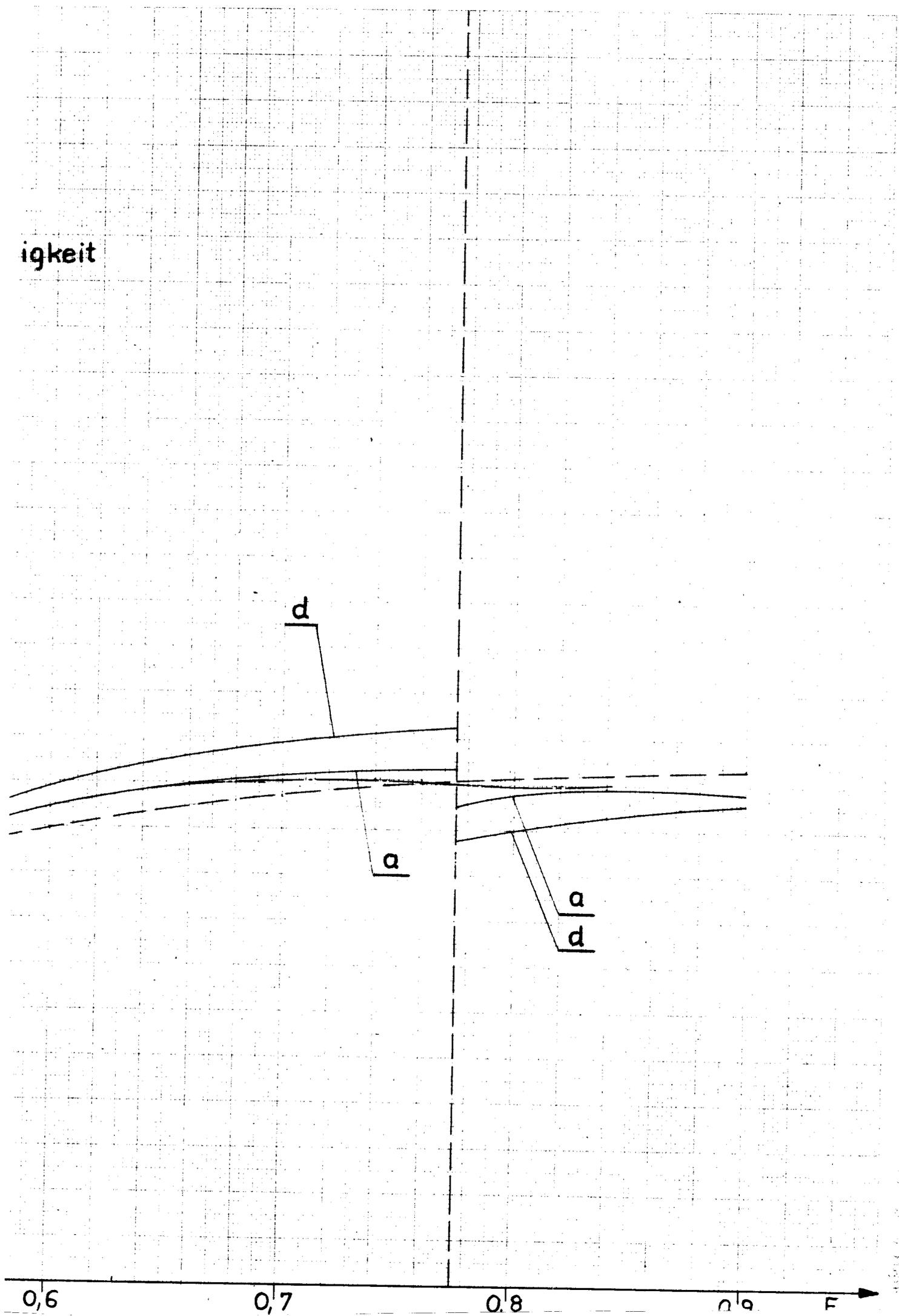
$L/B = 7,5; B/T = 2; H/T = 9,0$

--- R^*_{∞} für unbegrenzte Flüsse
— R^*_{Fl} für Flachwasser

	K/B	H/K
a	45	0,1
d	11,25	0,4



igkeit



R^*

Abb. 3c

$L/H = 1,66$

$L/B = 5; B/T = 2; H/T = 6,0$

— R^*_{∞} für unbegrenzte Flüssigkeit

— R^*_{Fl} für Flachwasser

	K/B	H/K
a	30	0,1
d	7,5	0,4

5,0

4,0

3,0

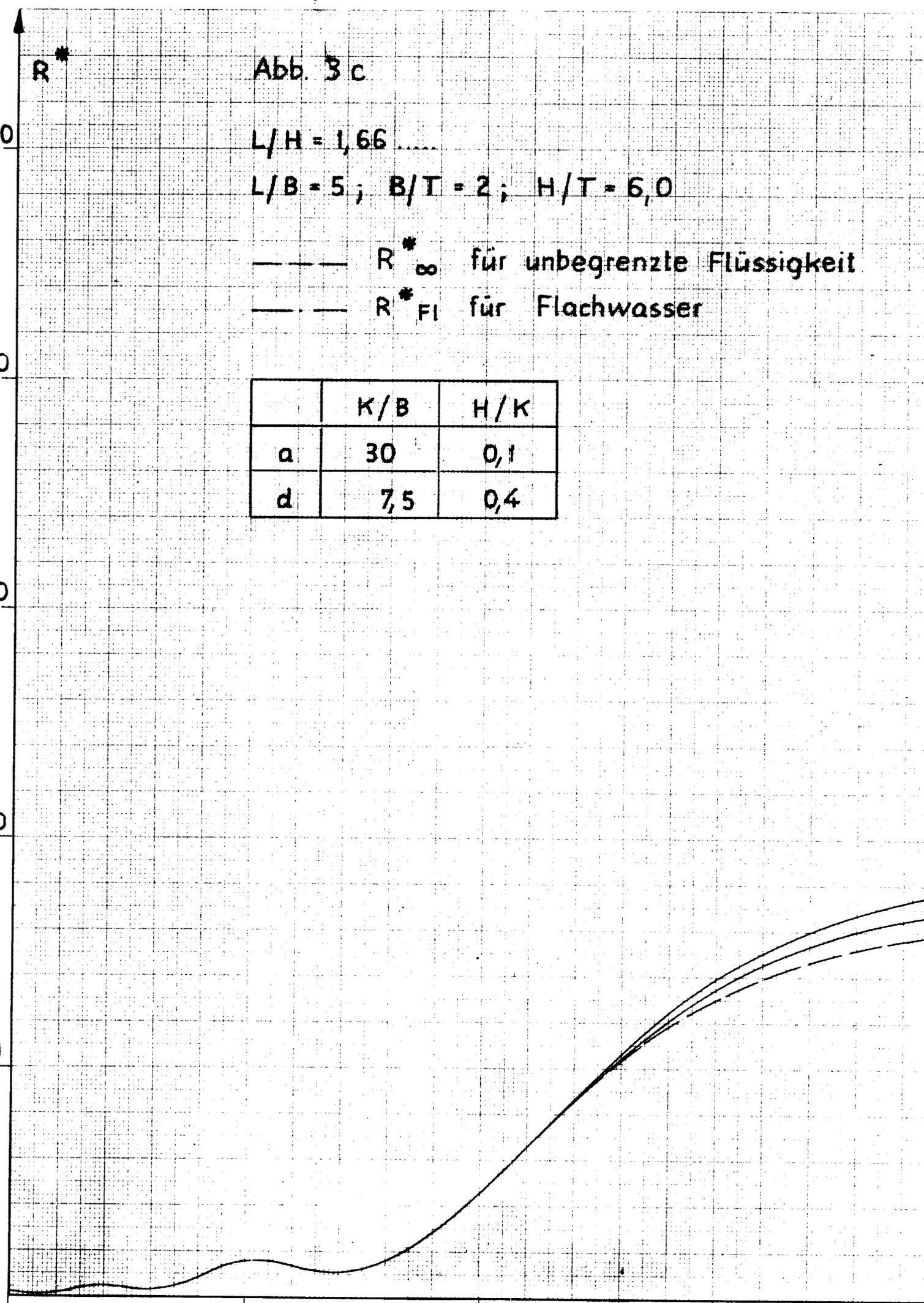
2,0

1,0

0,3

0,4

0,5



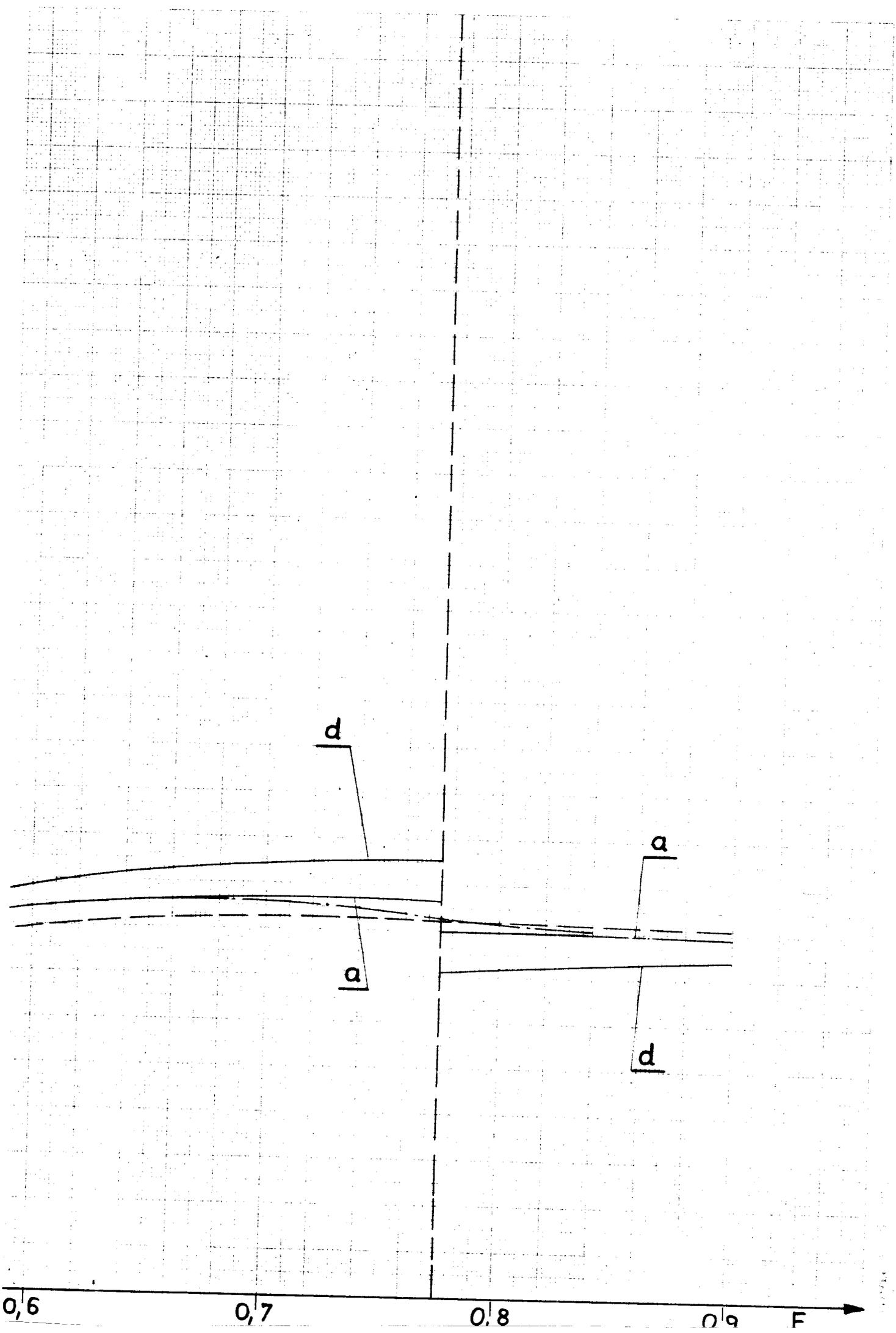


Abb. 4 a

$L/H = 2$

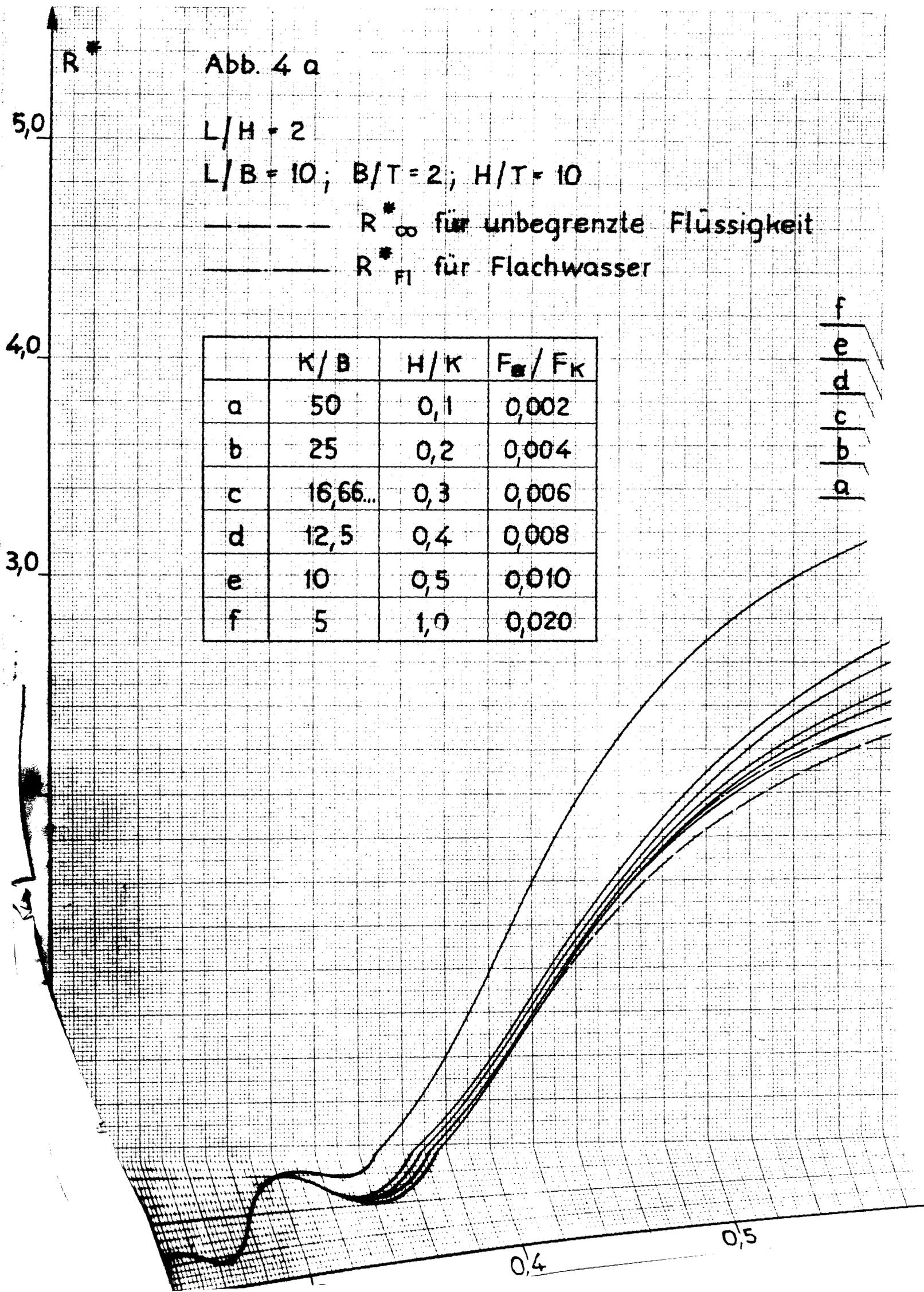
$L/B = 10; B/T = 2; H/T = 10$

----- R^*_{∞} für unbegrenzte Flüssigkeit

----- R^*_{Fl} für Flachwasser

	K/B	H/K	F_{∞}/F_K
a	50	0,1	0,002
b	25	0,2	0,004
c	16,66..	0,3	0,006
d	12,5	0,4	0,008
e	10	0,5	0,010
f	5	1,0	0,020

f
e
d
c
b
a



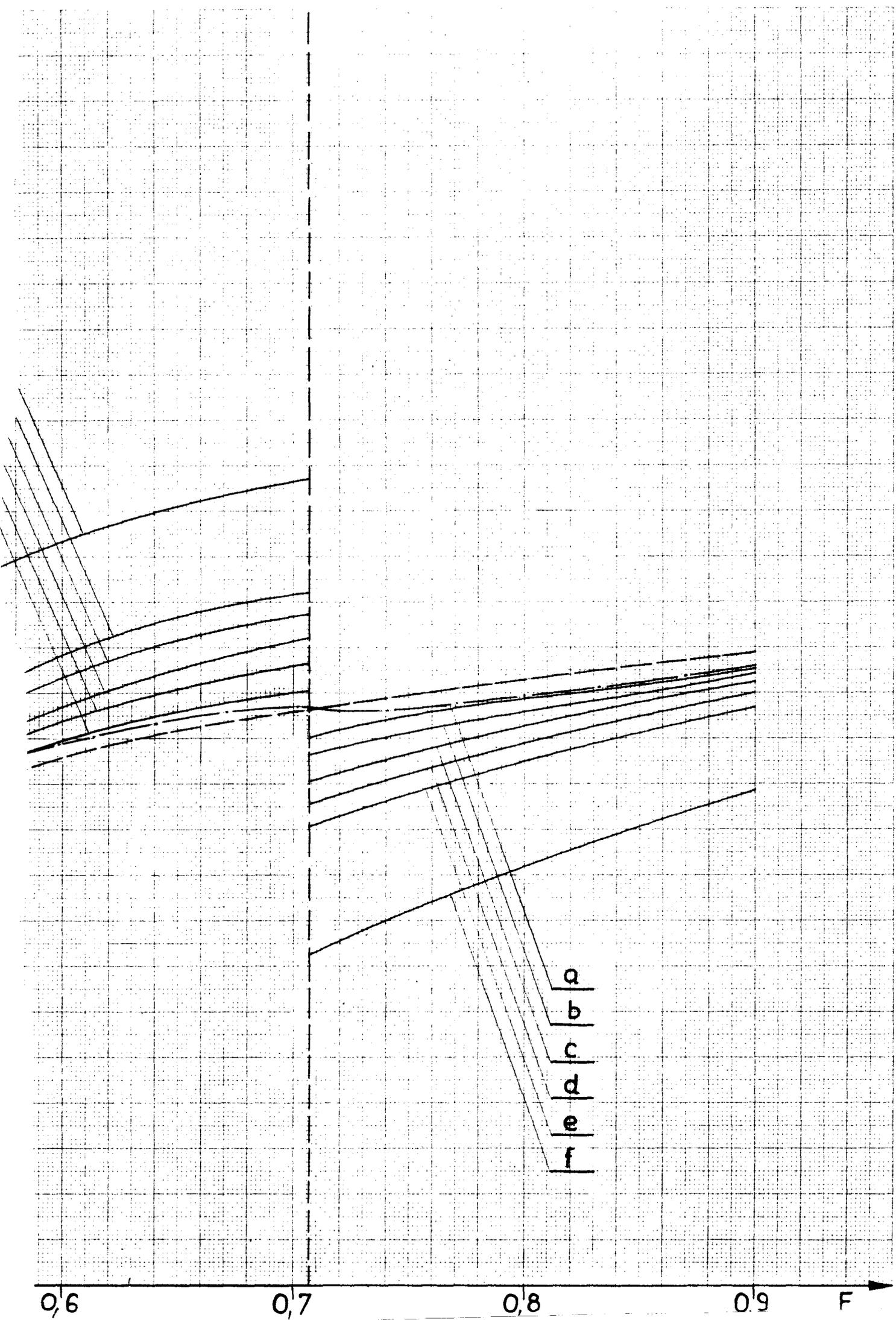
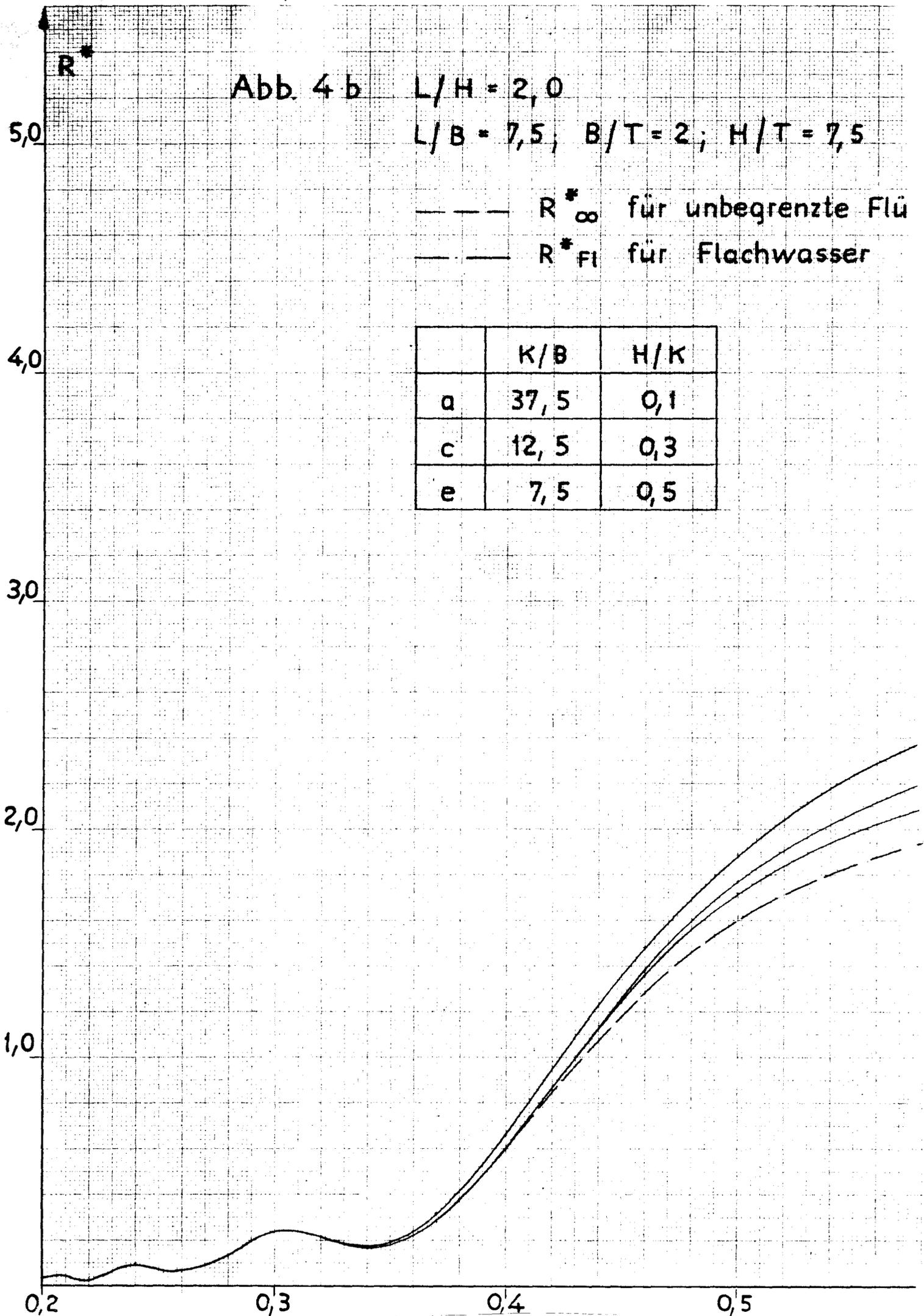


Abb. 4 b $L/H = 2,0$

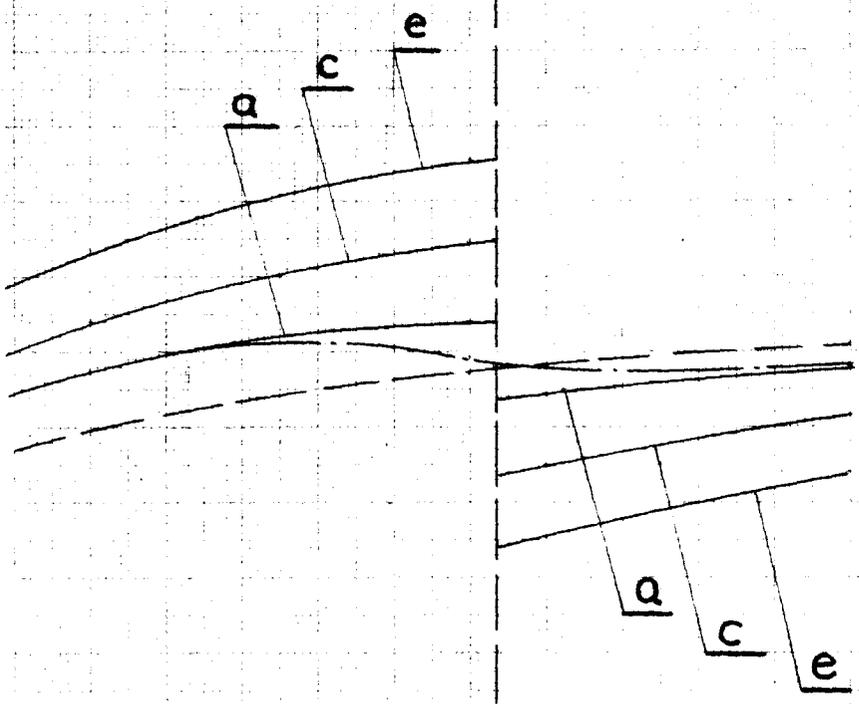
$L/B = 7,5$; $B/T = 2$; $H/T = 7,5$

— — — R^*_{∞} für unbegrenzte Flü
— — — R^*_{Fl} für Flachwasser

	K/B	H/K
a	37,5	0,1
c	12,5	0,3
e	7,5	0,5



ssigkeit



0,6

0,7

0,8

0,9

F →

R*

Abb. 4 c

L/H = 2,0

L/B = 5; B/T = 2; H/T = 5

—* ∞ für unbegrenzte Flüssig
—*Fl für Flachwasser

	K/B	H/K
a	25	0,1
c	8,33...	0,3
e	5	0,5

4,0

3,0

2,0

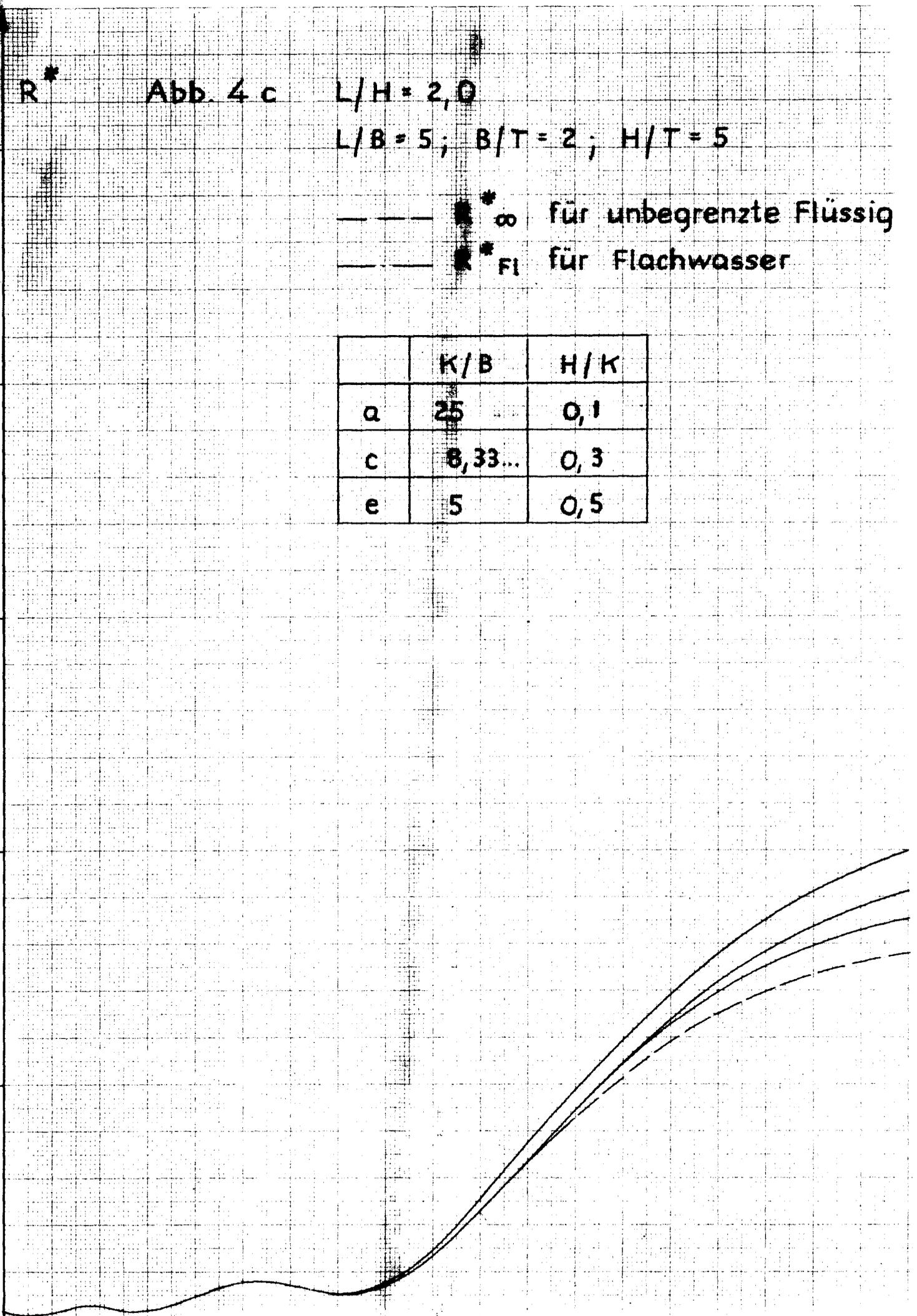
1,0

0,2

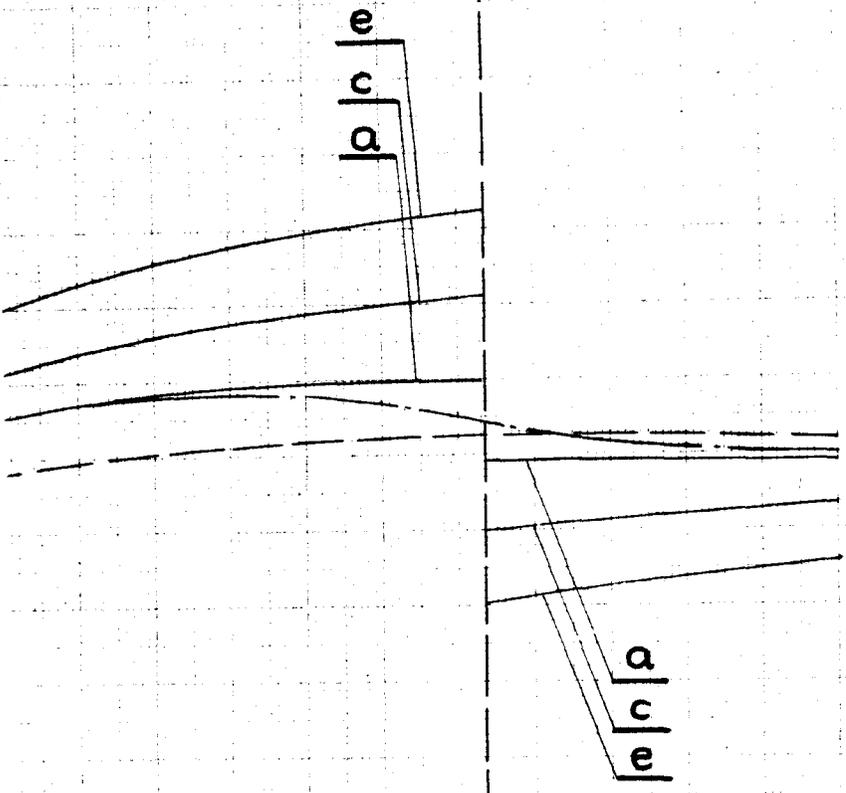
0,3

0,4

0,5



keit



0.6 0.7 0.8 0.9

R^*

7,0

5,0

3,0

1,0

Abb. 5 a

$L/H = 2,5$

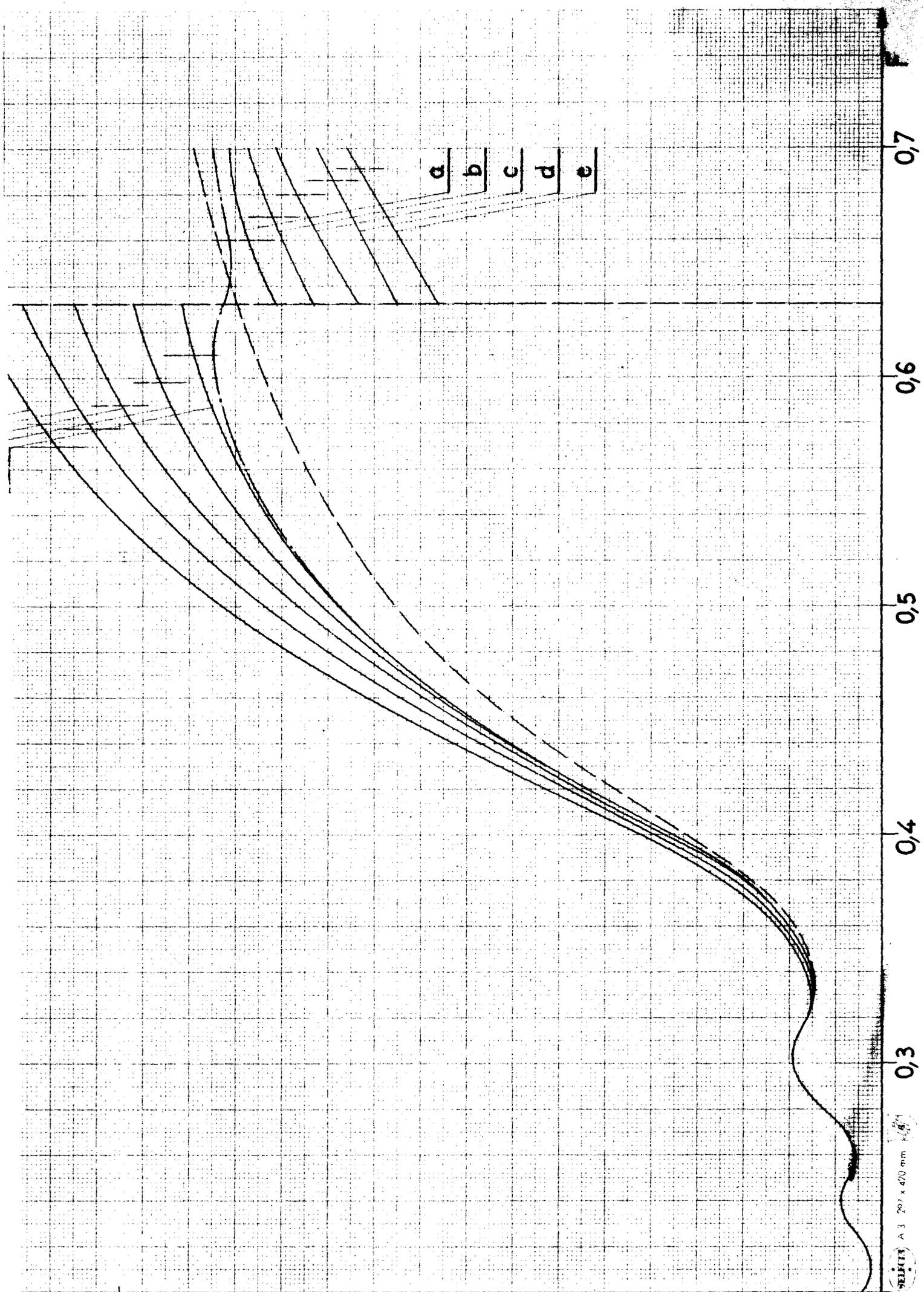
$L/B = 10; B/T = 3; H/T = 12$

— R_{∞}^* für unbegrenzte Flüssigkeit

— R_{FL}^* für Flachwasser

	K/B	H/K	F_{∞} / F_K
a	40	0,1	0,002083...
b	20	0,2	0,004166...
c	13,33...	0,3	0,00625
d	10	0,4	0,00833...
e	8	0,5	0,0104





R*

Abb. 5 b

L/H = 2,5

70

L/B = 7,5; B/T = 3; H/T = 9,0

--- R^{*} ∞ für unbegrenzte Flüssigkeit

— R^{*} Fl für Flachwasser

	H/K	K/B
a	0,1	30
b	0,2	15
c	0,3	10
d	0,4	7,5
e	0,5	6

50

30

e
d
c
b
a

10

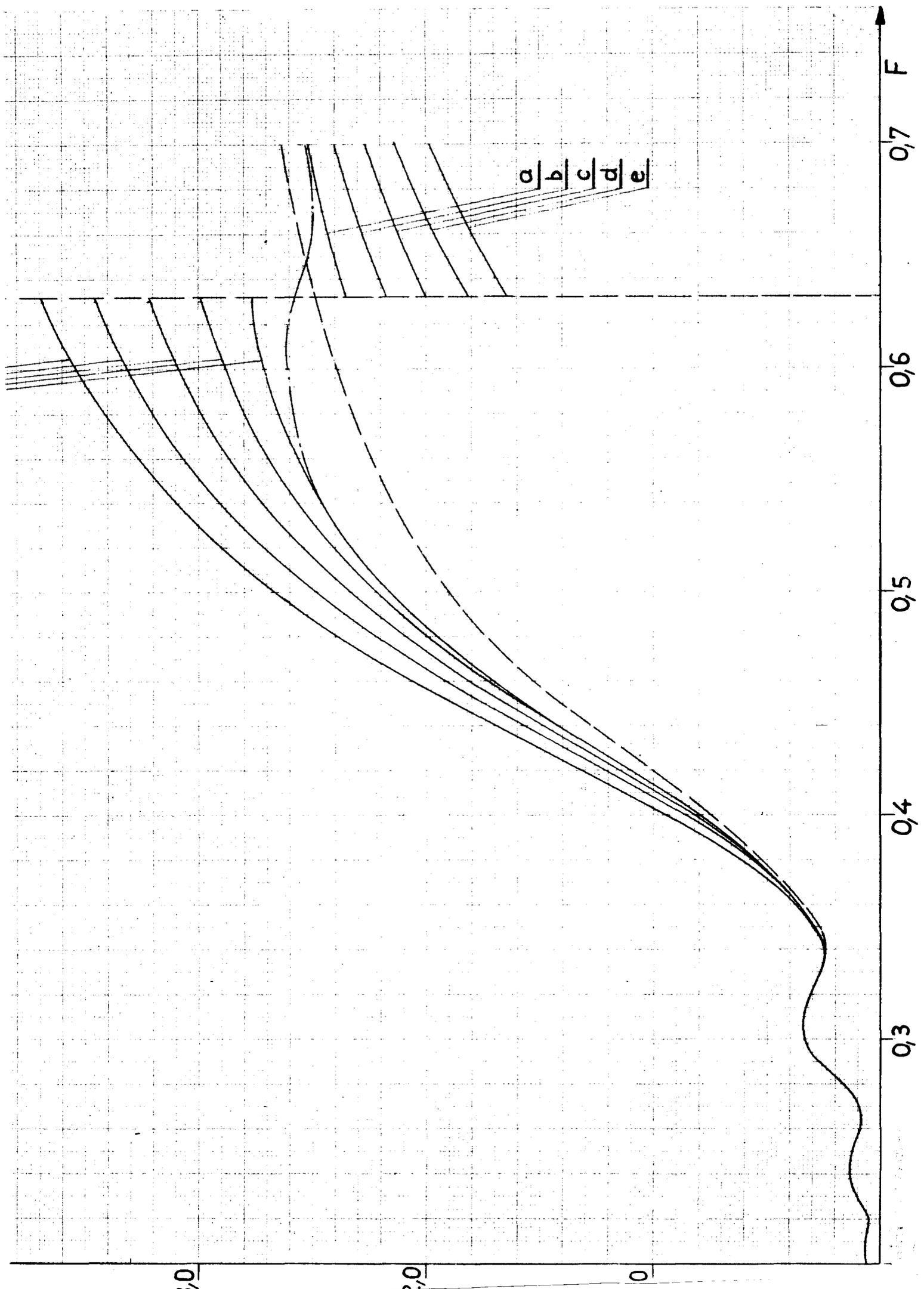


Abb. 5 c

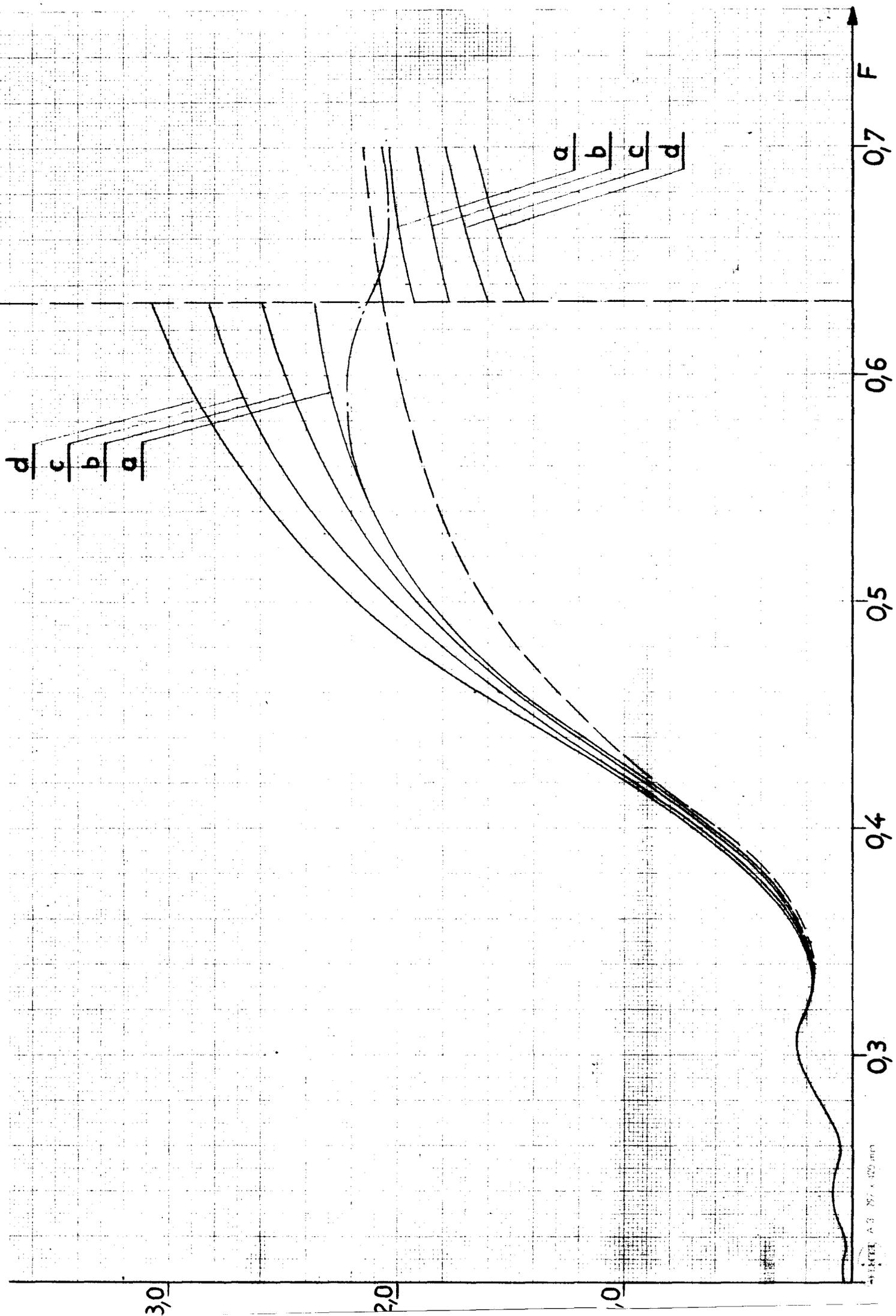
$$L/H = 2,5$$

$$L/B = 5,0; \quad B/T = 3; \quad H/T = 6,0$$

--- R^* für unbegrenzte Flüssigkeit

— R^*_{Fl} für Flachwasser

	H/K	K/B
a	0,1	20
b	0,2	10
c	0,3	6,66...
d	0,4	5



R*

Abb. 5 d

$L/H = 2,5$

$L/B = 10 ; B/T = 2 ; H/T = 8,0$

— R^* für unbegrenzte Flüssigkeit

— R^* Fl für Flachwasser

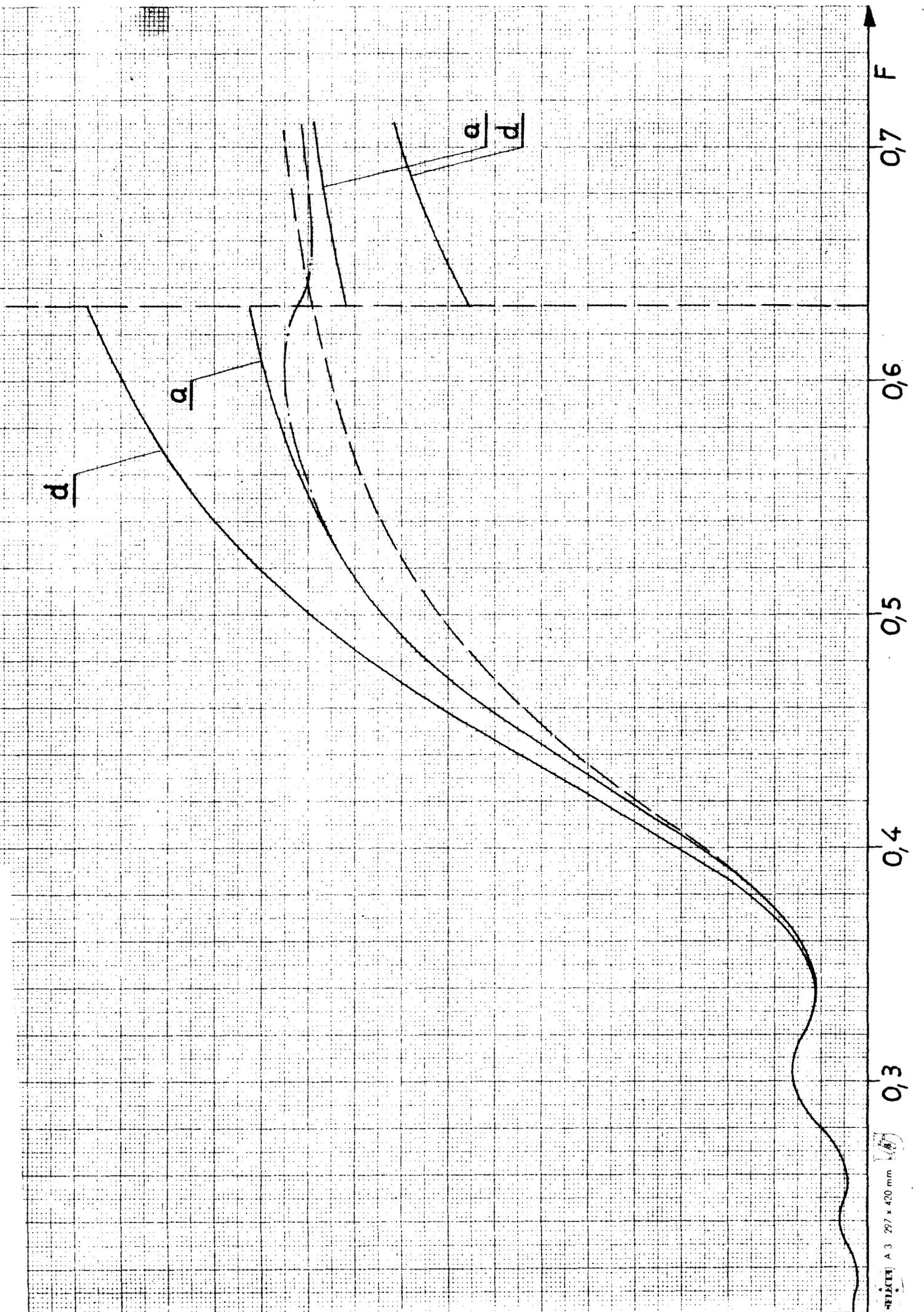
	K/B	H/K	F_m/F_k
a	40	0,1	0,003125
d	10	0,4	0,0125

7,0

5,0

3,0

1,0



R^*

70

50

30

10

Abb. 5 e

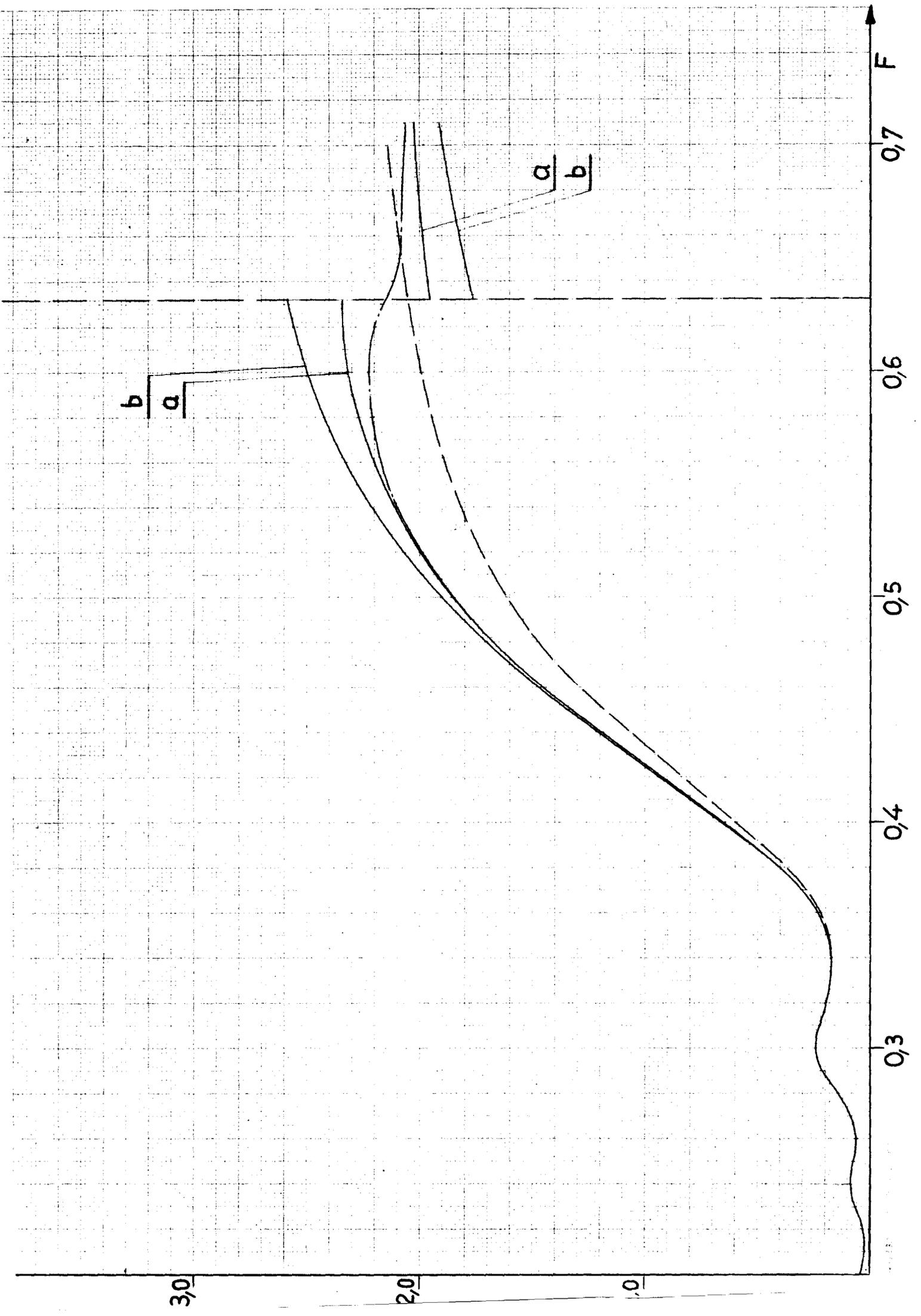
$L/H = 2,5$

$L/B = 7,5$; $B/T = 2$; $H/T = 6,0$

--- R^*_{∞} für unbegrenzte Flüssigkeit

--- R^*_{Fl} für Flachwasser

	K/B	H/K
a	30	0,1
b	15	0,2



R^*

Abb. 5 f

$L/H = 2,5$

$L/B = 5; B/T = 2; H/T = 4,0$

--- R^* für unbegrenzte Flüssigkeit

--- R^* Fl für Flachwasser

	K/B	H/K
a	20	0,1
b	10	0,2

7,0

5,0

3,0

1,0

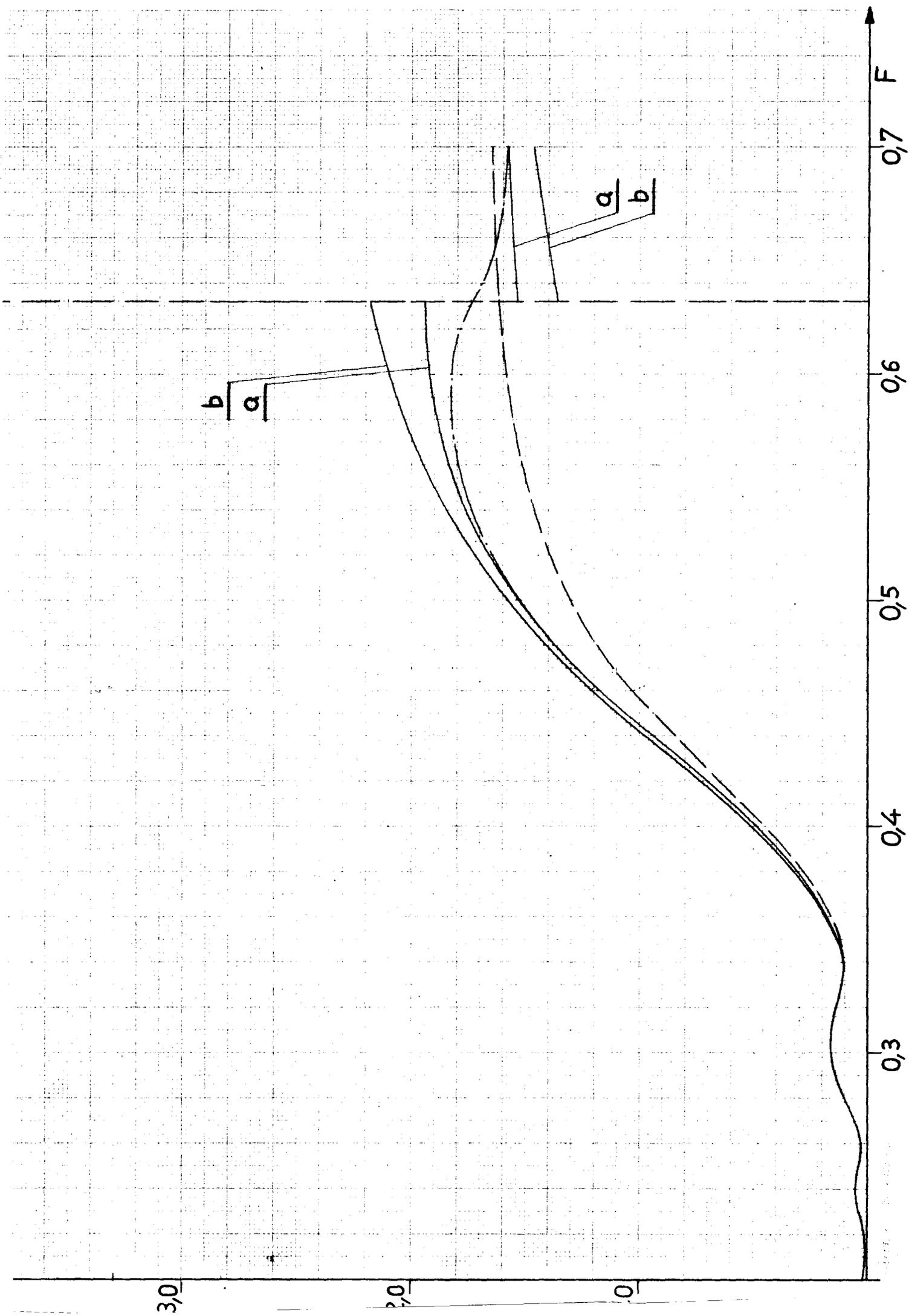


Abb. 6 a

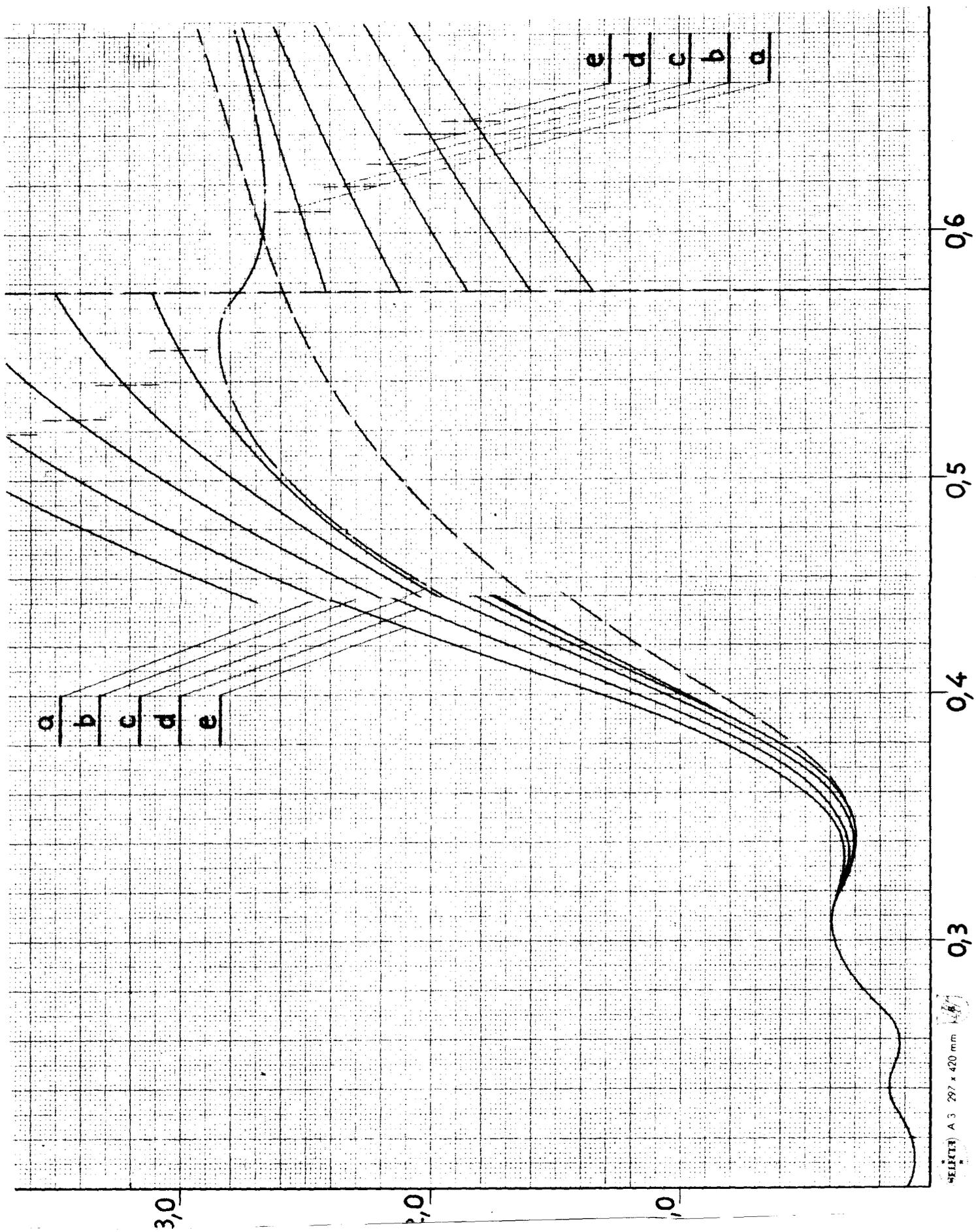
$$L/H = 3,0$$

$$L/B = 10; \quad B/T = 3; \quad H/T = 10,0$$

--- R_{∞}^* für unbegrenzte Flüssigkeit

--- R_{Fl}^* für Flachwasser

	K/B	H/K	F_B/F_K
a	33,33...	0,1	0,003
b	16,66...	0,2	0,006
c	11,11...	0,3	0,009
d	8,33...	0,4	0,012
e	6,66...	0,5	0,015



R^*

Abb. 6 b

$L/H = 3;$

$B/T = 7,5; H/T = 7,5$

--- R^*_{∞} für unbegrenzte Flüssigkeit

— R^*_{FJ} für Flachwasser

	H/K	K/B
a	0,1	25
b	0,2	12,5
c	0,3	8,33...
d	0,4	6,25
e	0,5	5

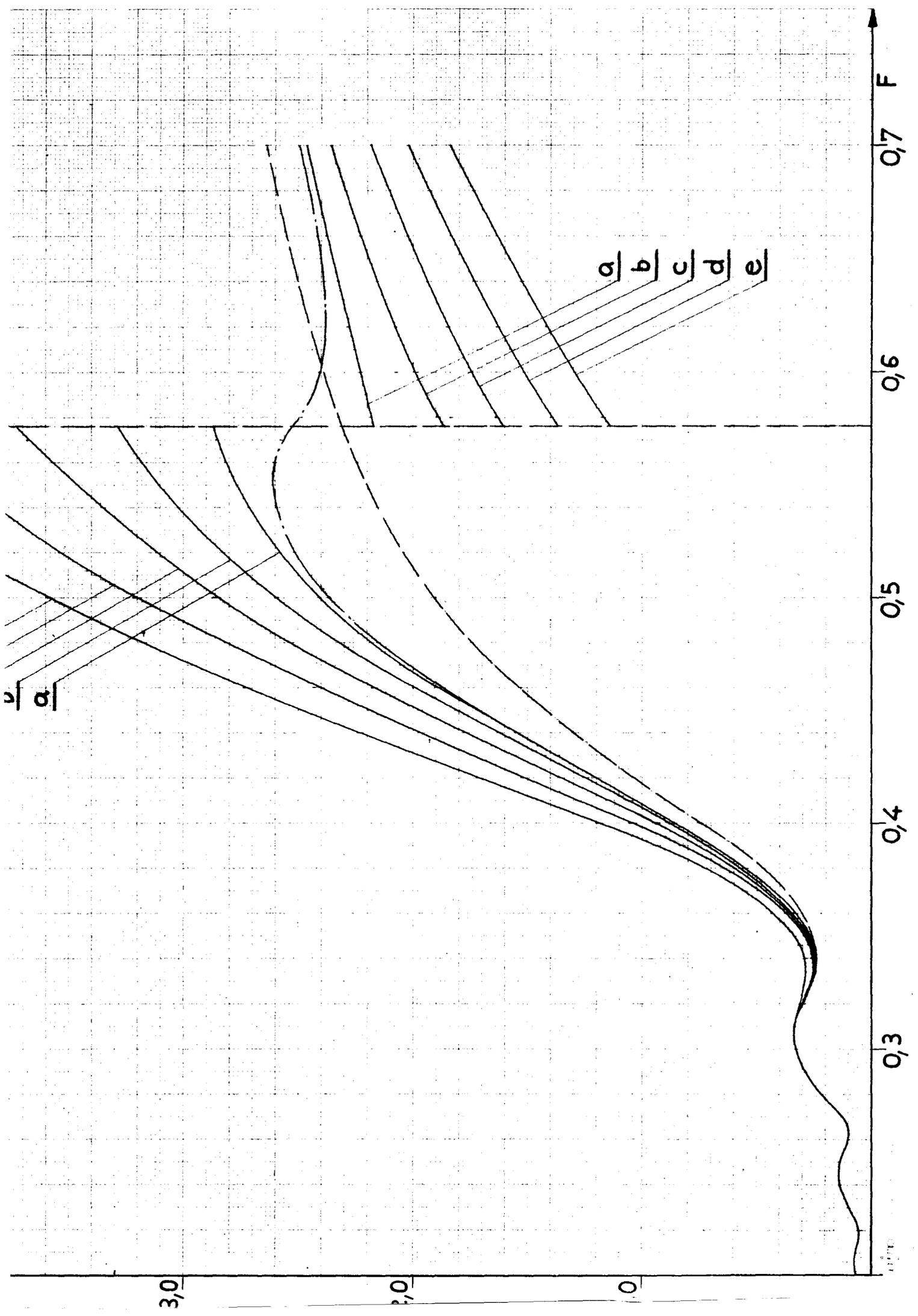
e
d
c
b

70

60

50

40



7,0

R^*

6,0

5,0

4,0

Abb. 6 c

$L/H = 3$

$L/B = 5; B/T = 3; H/T = 5$

--- R^*_{∞} für unbegrenzte Flüssigkeit

--- R^*_{Fl} für Flachwasser

	H/K	K/B
a	0,1	16,66...
b	0,2	8,33...
c	0,3	5,55...

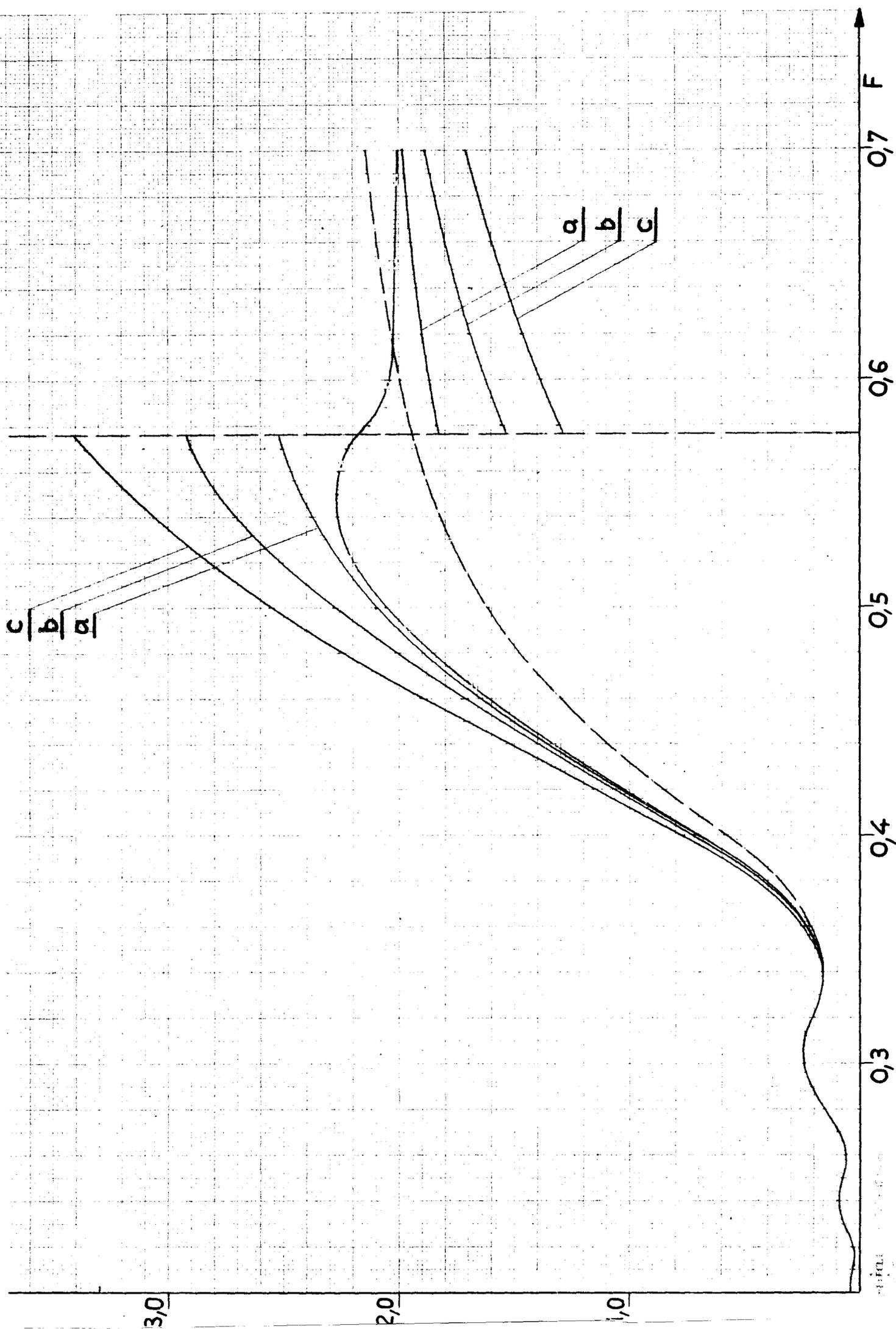


Abb. 7 a

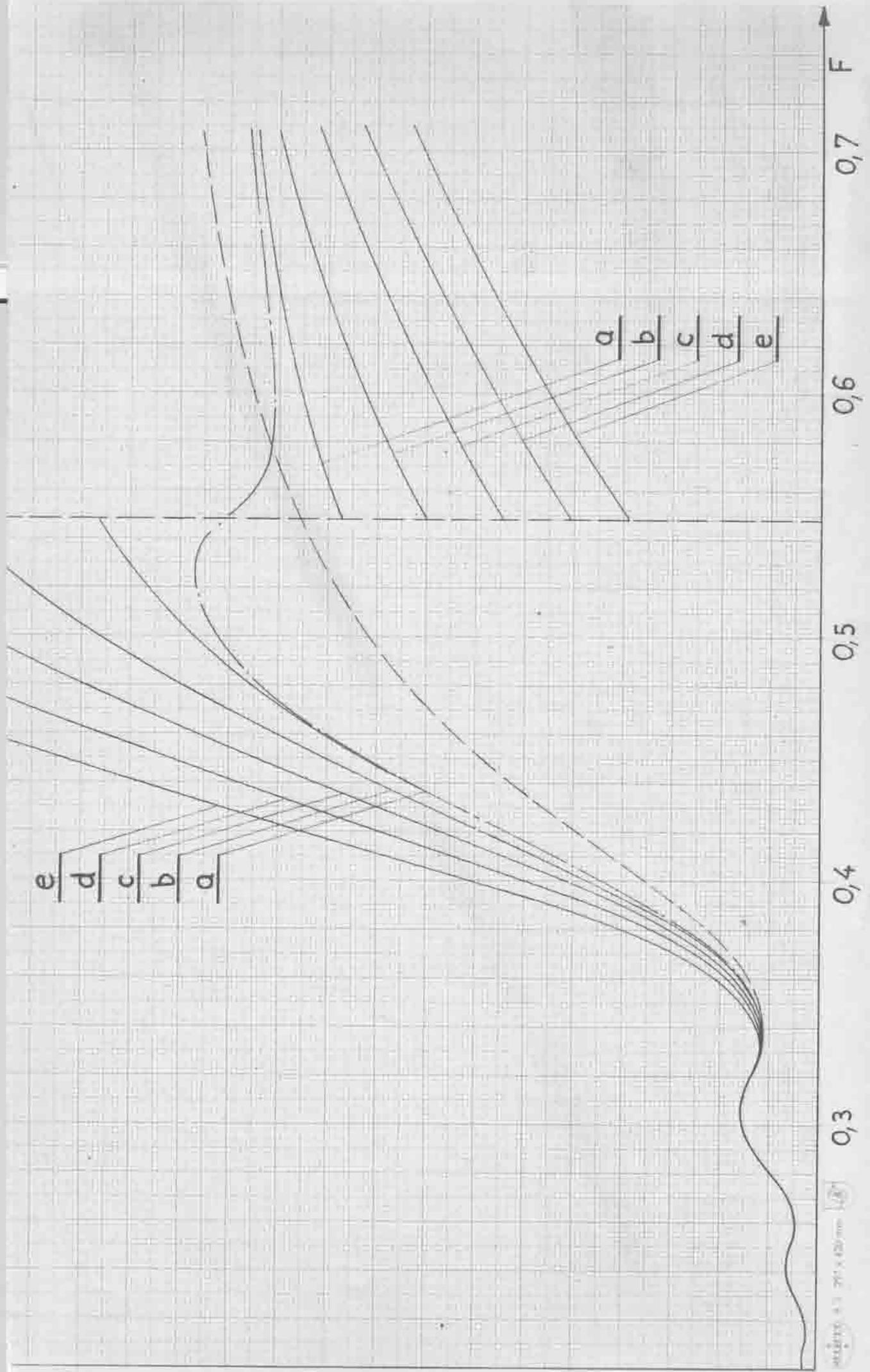
$L/H = 3,33 \dots$

$L/B = 10; B/T = 2; H/T = 6,0$

— R^*_{∞} für unbegrenzte Flüssigkeit

— R^*_{Fl} für Flachwasser

	K/B	H/K	F_{∞}/F_K
a	30	0,1	0,00555...
b	15	0,2	0,01111...
c	10	0,3	0,01666...
d	7,5	0,4	0,02222...
e	6	0,5	0,02777...



R^*

7,0

5,0

3,0

1,0

Abb. 7 b

$L/H = 3,33 \dots$

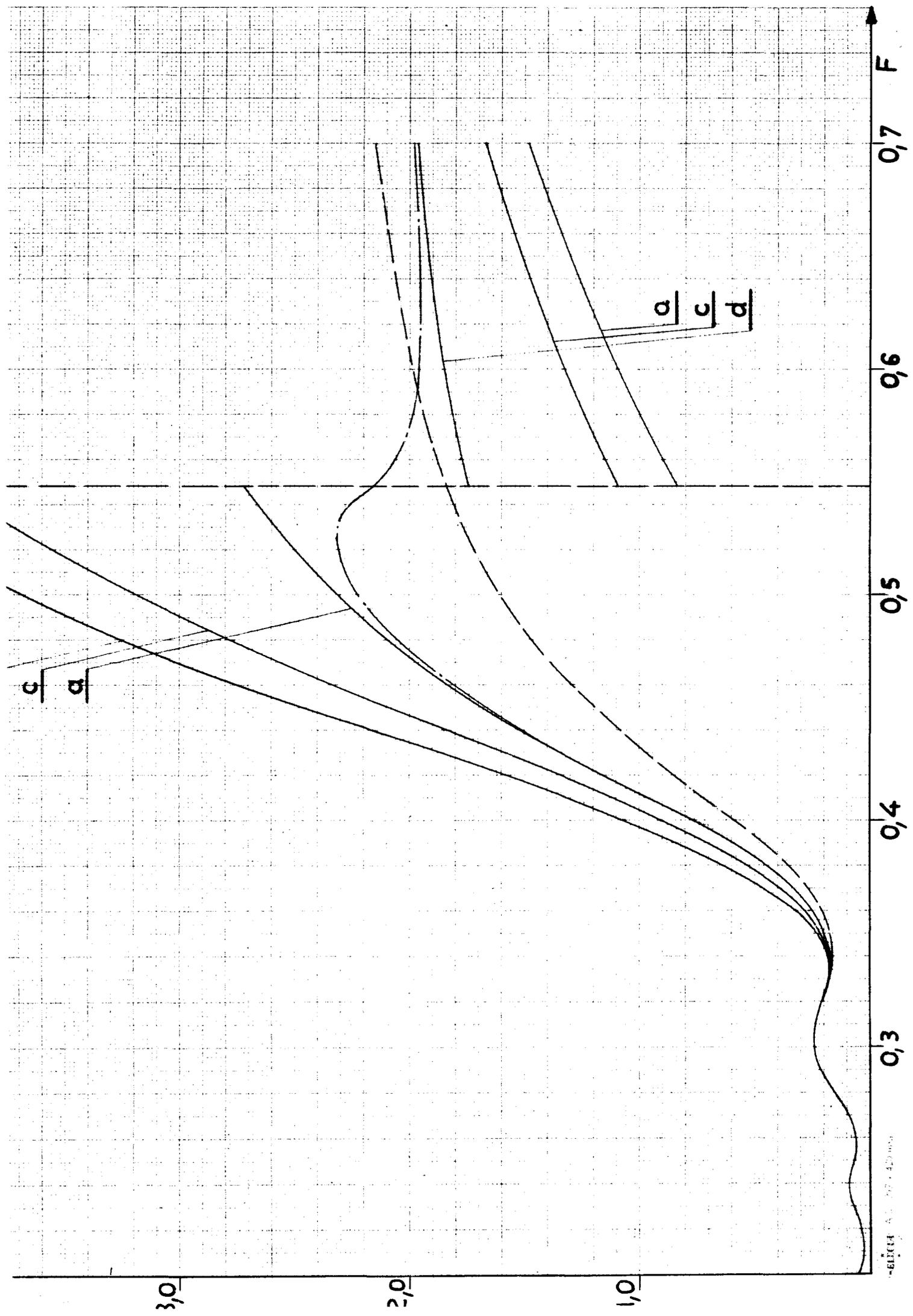
$L/B = 7,5; B/T = 2; H/T = 4,5$

--- R_∞^* für unbegrenzte Flüssig-

keit
-.-.- R_{FI}^* für Flachwasser

	K/B	H/K
a	22,5	0,1
c	7,5	0,3
d	5,625	0,4

d



R^*

7,0

6,0

5,0

4,0

Abb. 7 c

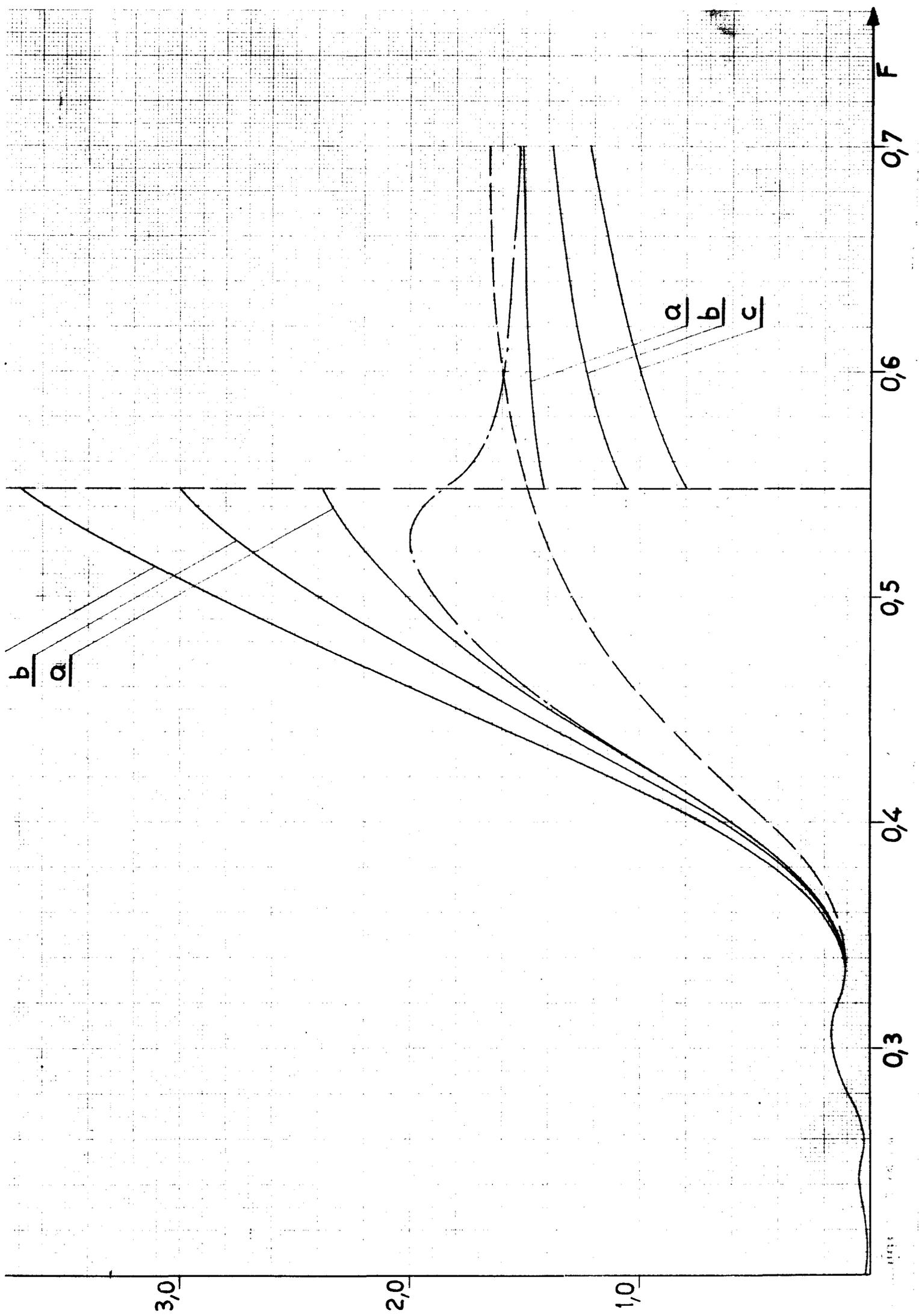
$L/H = 3,33 \dots$

$L/B = 5; B/T = 2; H/T = 3$

— R^* für unbegrenzte Flüssigkeit

— R^* für Flachwasser

	K/B	H/K
a	15	0,1
b	7,5	0,2
c	5	0,3



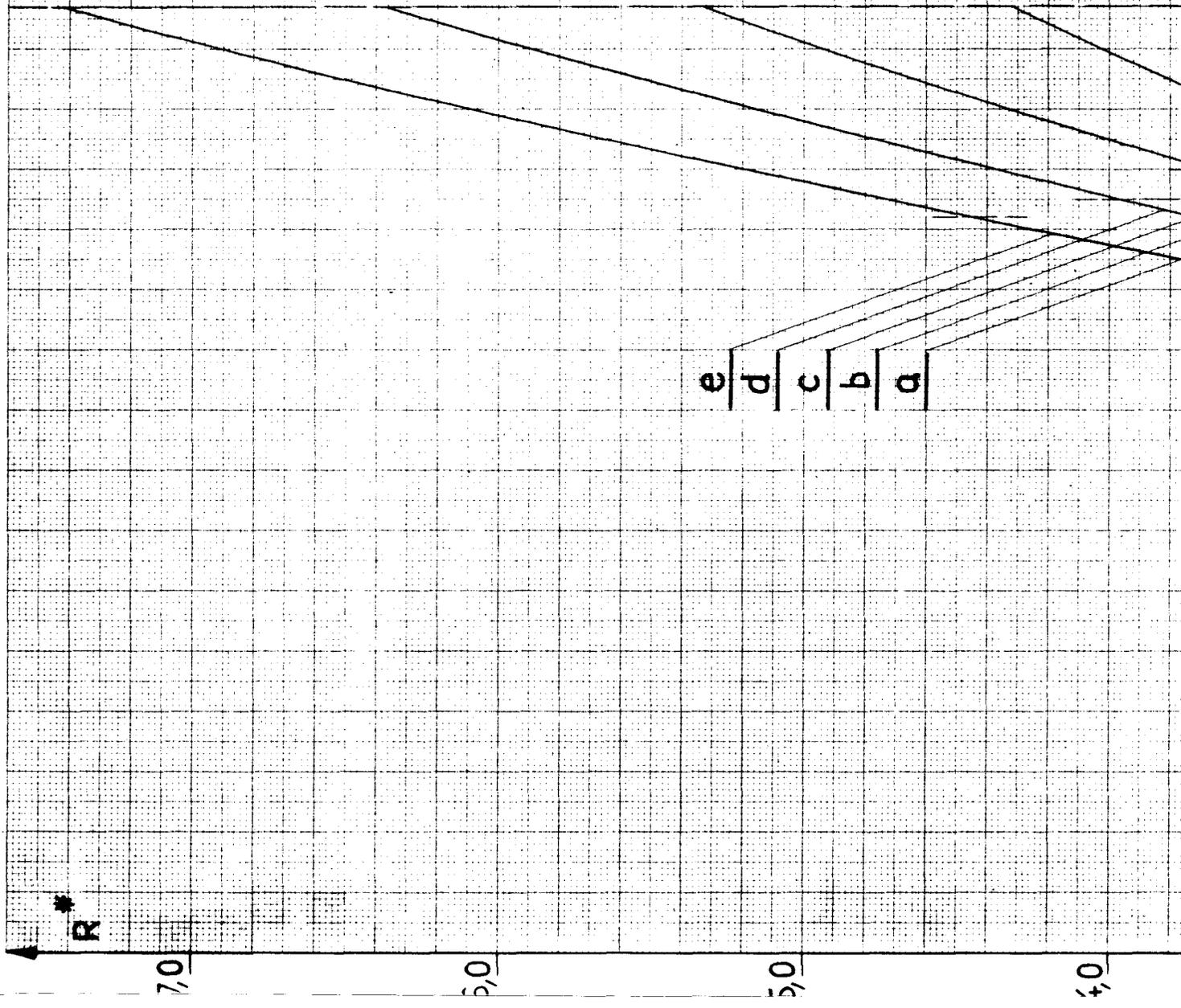


Abb. 8 a

$L/H = 3,75$

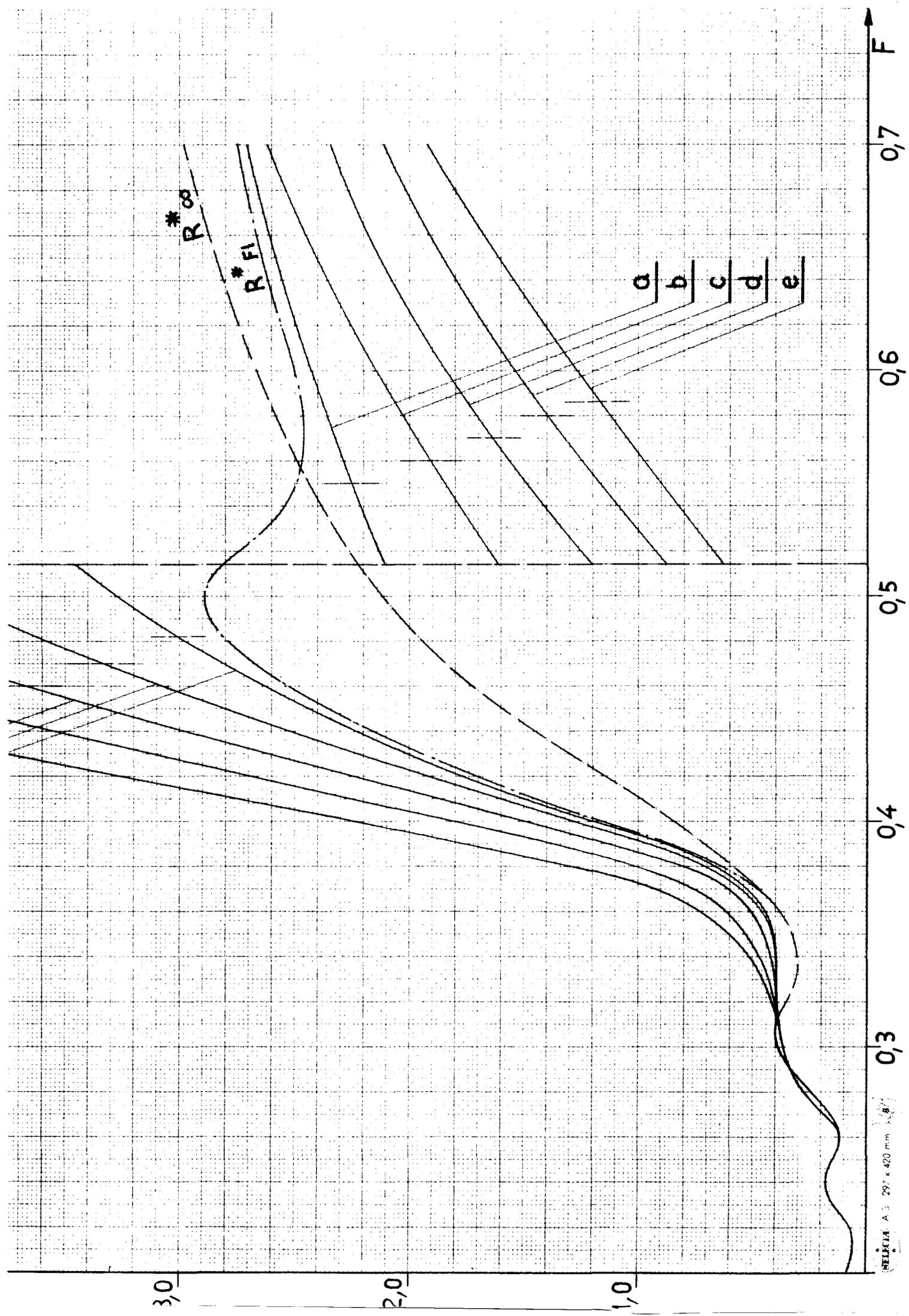
$L/B = 10; B/T = 3; H/T = 8,0$

--- R_{∞}^* für unbegrenzte Flüssigkeit

— R_{FI}^* für Flachwasser

e
d
c
b
a

	K/B	H/K	F_{FI} / F_K
a	26,66...	0,1	0,0045875
b	13,33...	0,2	0,0093375
c	8,88...	0,3	0,0140625
d	6,66...	0,4	0,018750
e	5,33...	0,5	0,0234375



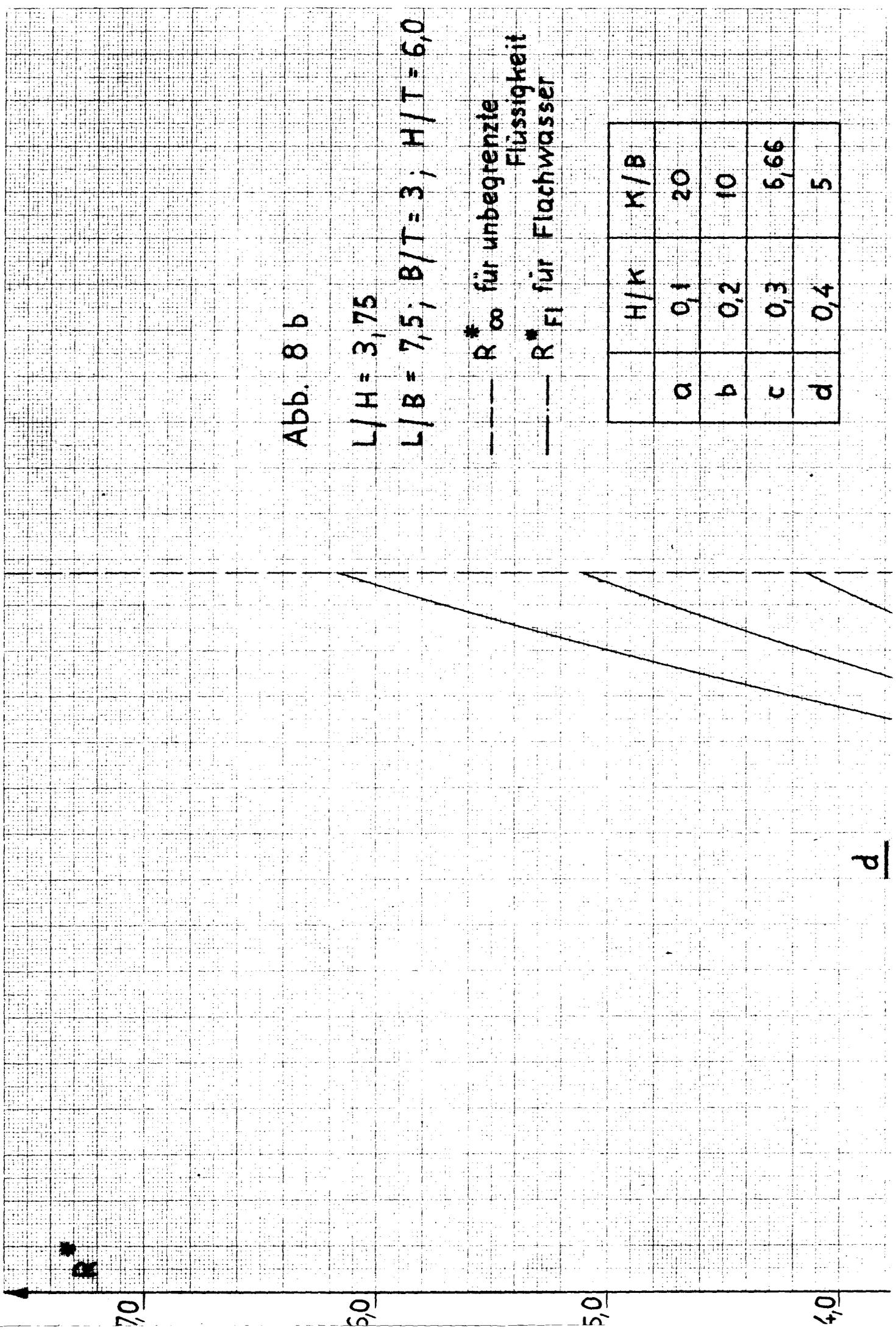


Abb. 8 b

$L/H = 3,75$

$L/B = 7,5; B/T = 3; H/T = 6,0$

--- R^*_{∞} für unbegrenzte Flüssigkeit
 — R^*_{Fi} für Flachwasser

	H/K	K/B
a	0,1	20
b	0,2	10
c	0,3	6,66
d	0,4	5

d

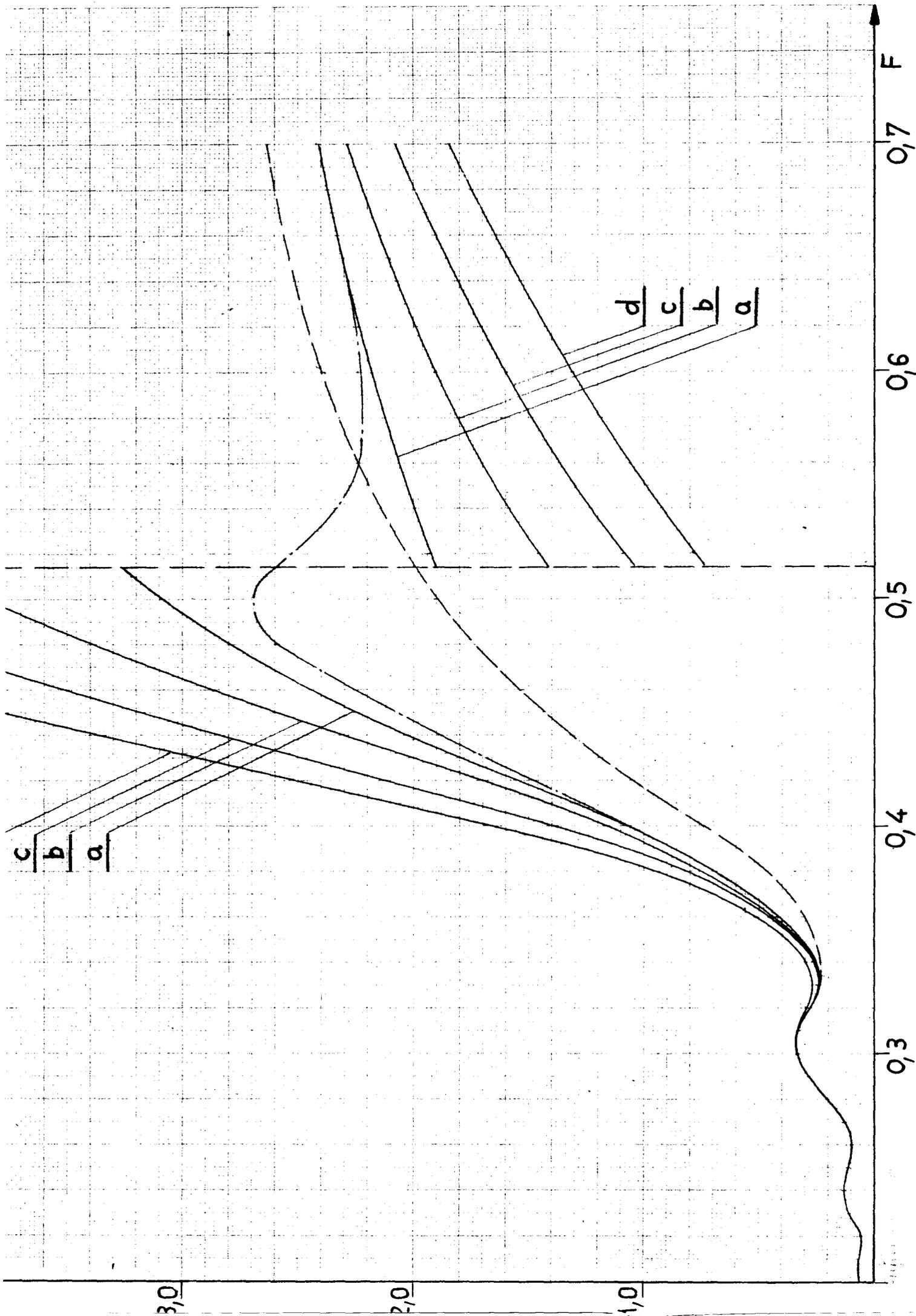


Abb. 8 c

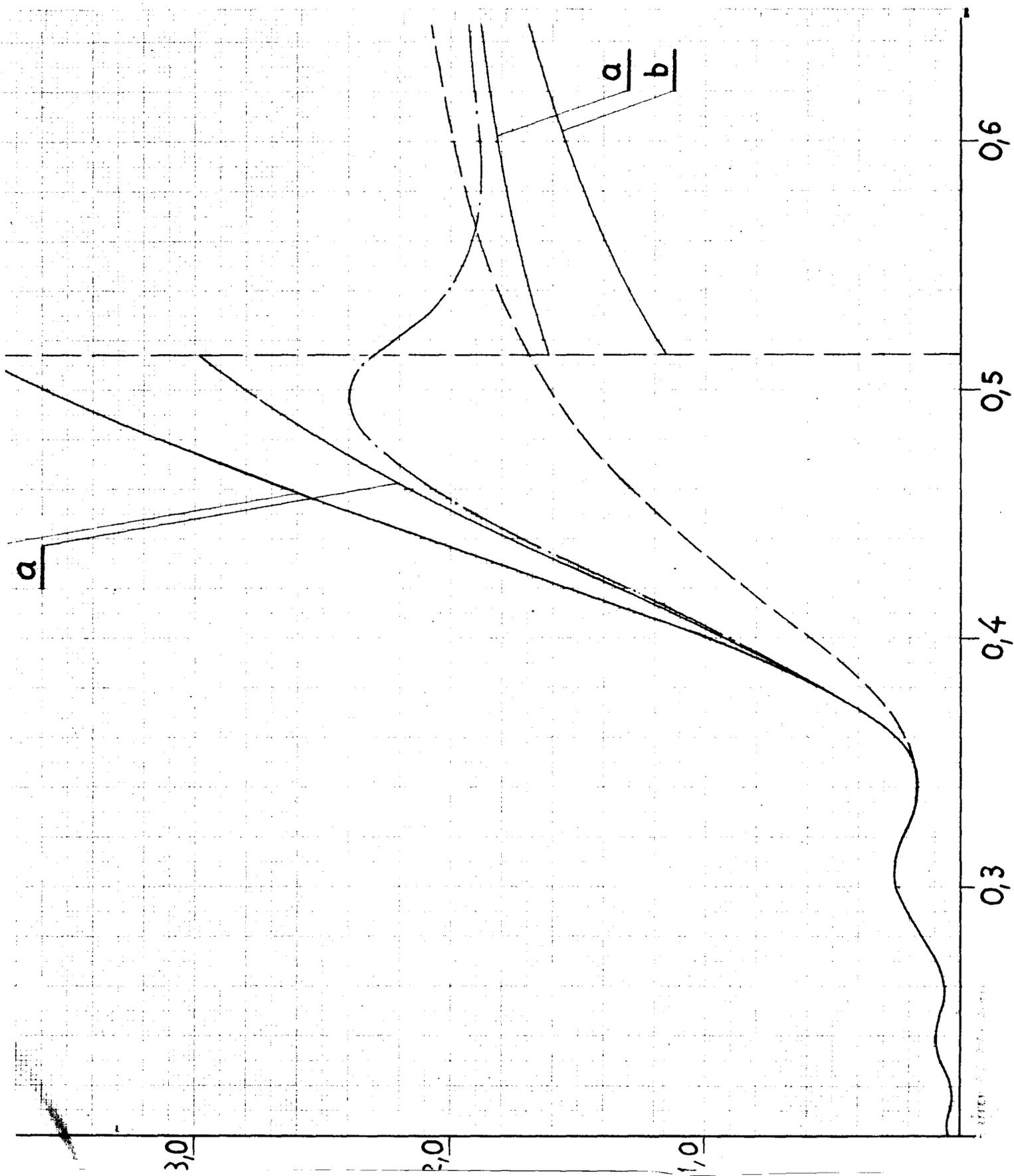
$$L/H = 3,75$$

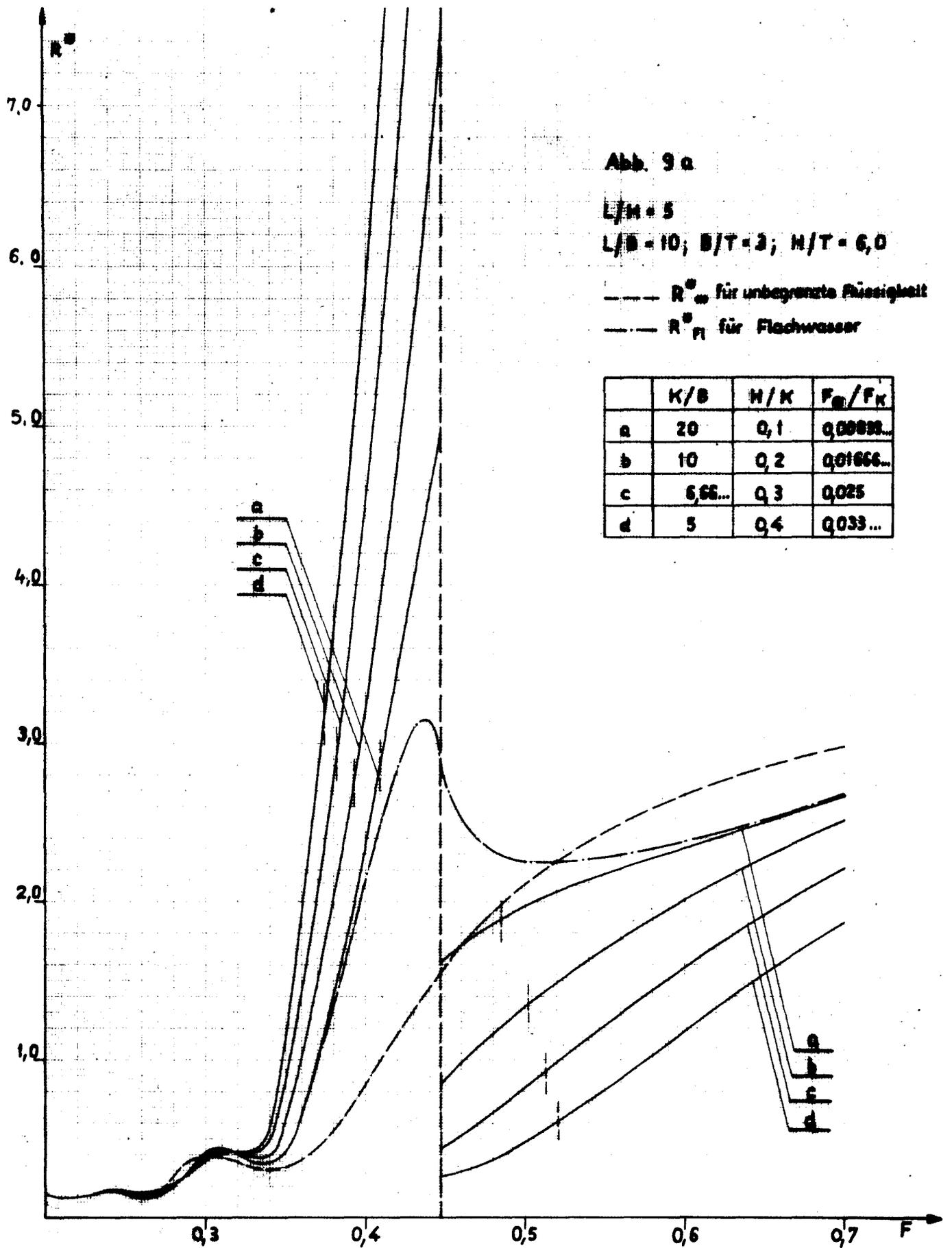
$$L/B = 5; B/T = 3; H/T = 4,0$$

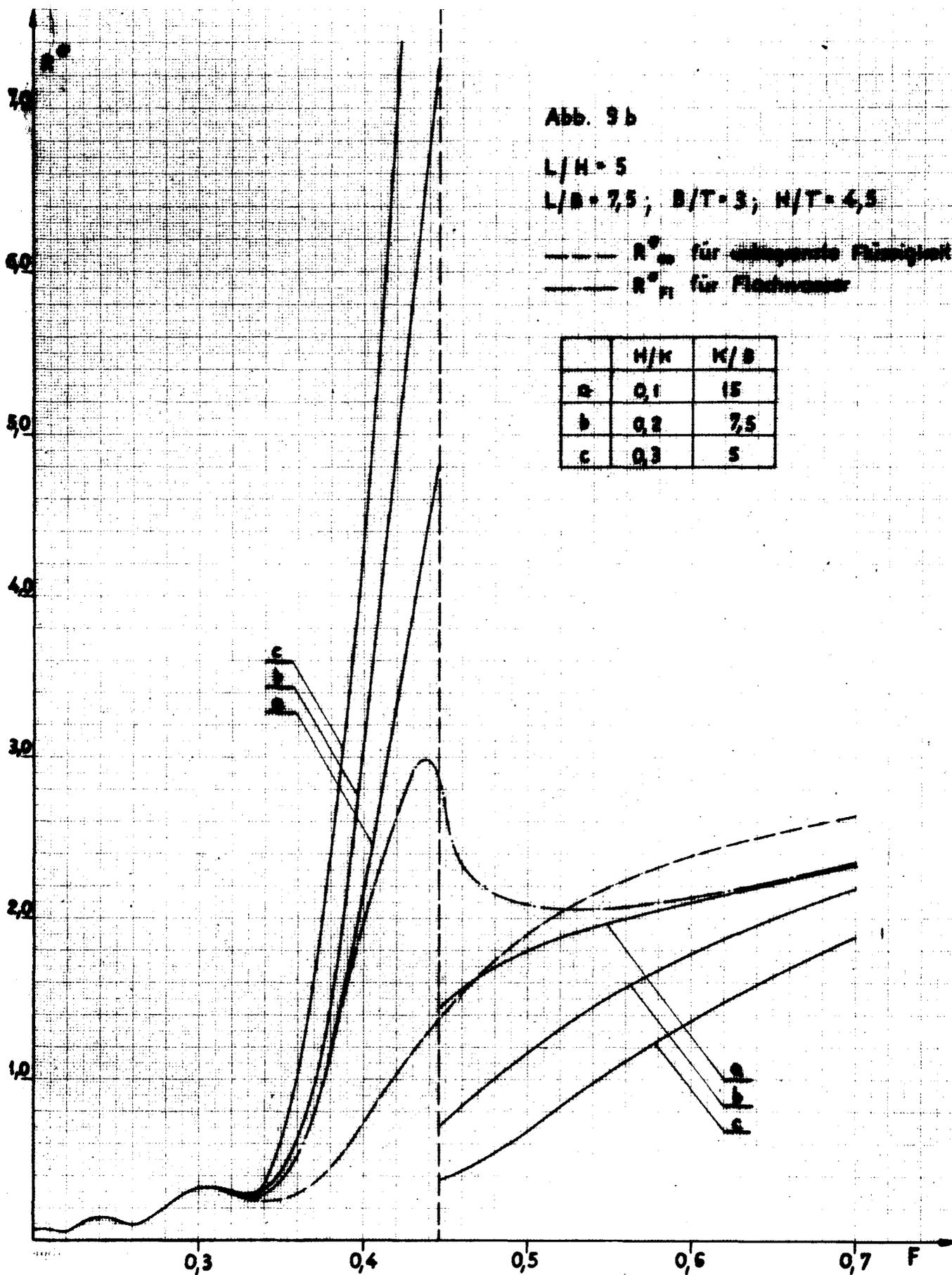
--- R^* für unbegrenzte
Flüssigkeit

— R^*_{Fl} für Flachwasser

	H/K	K/B
a	0,1	13,33
b	0,2	6,66







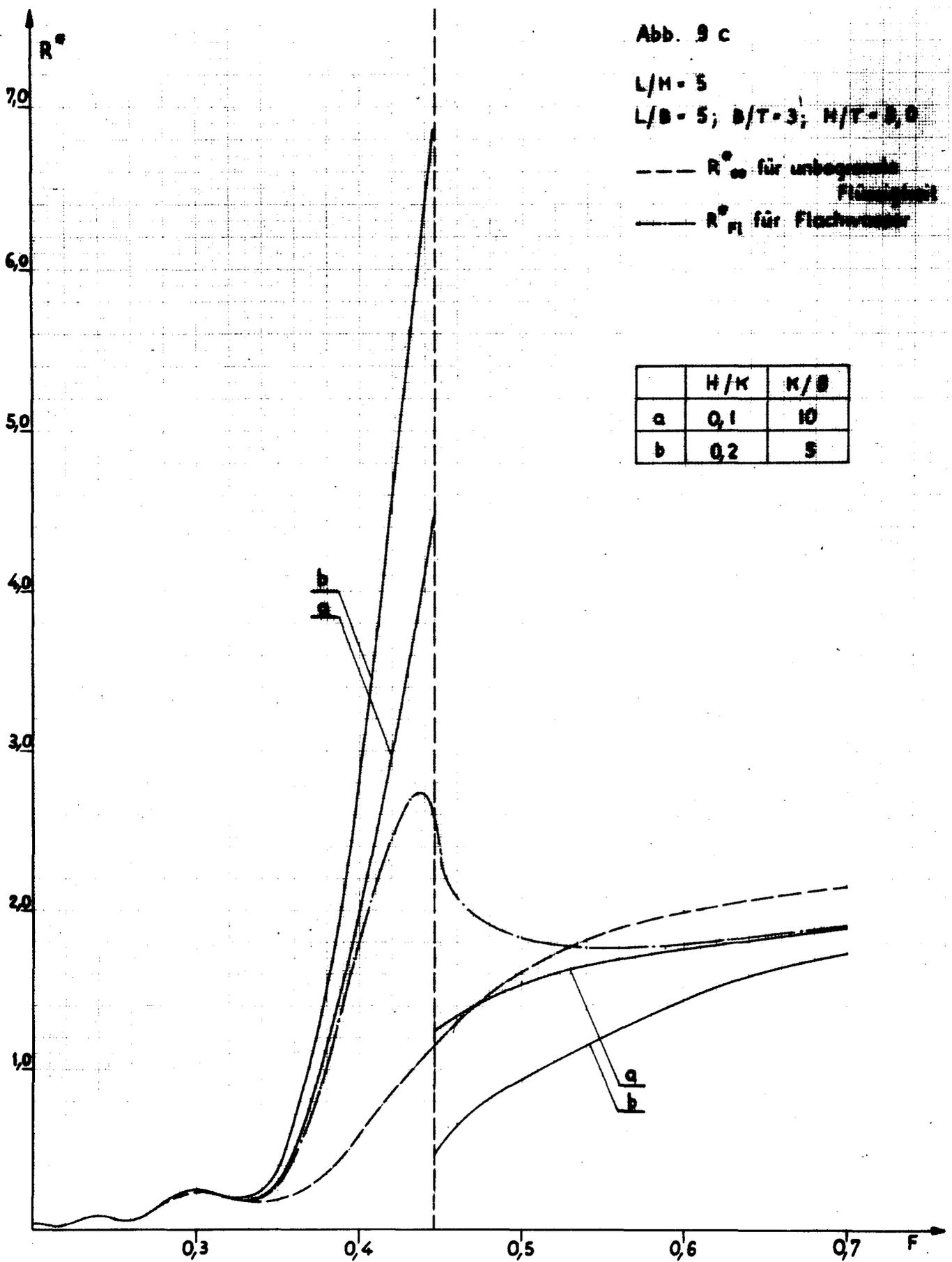


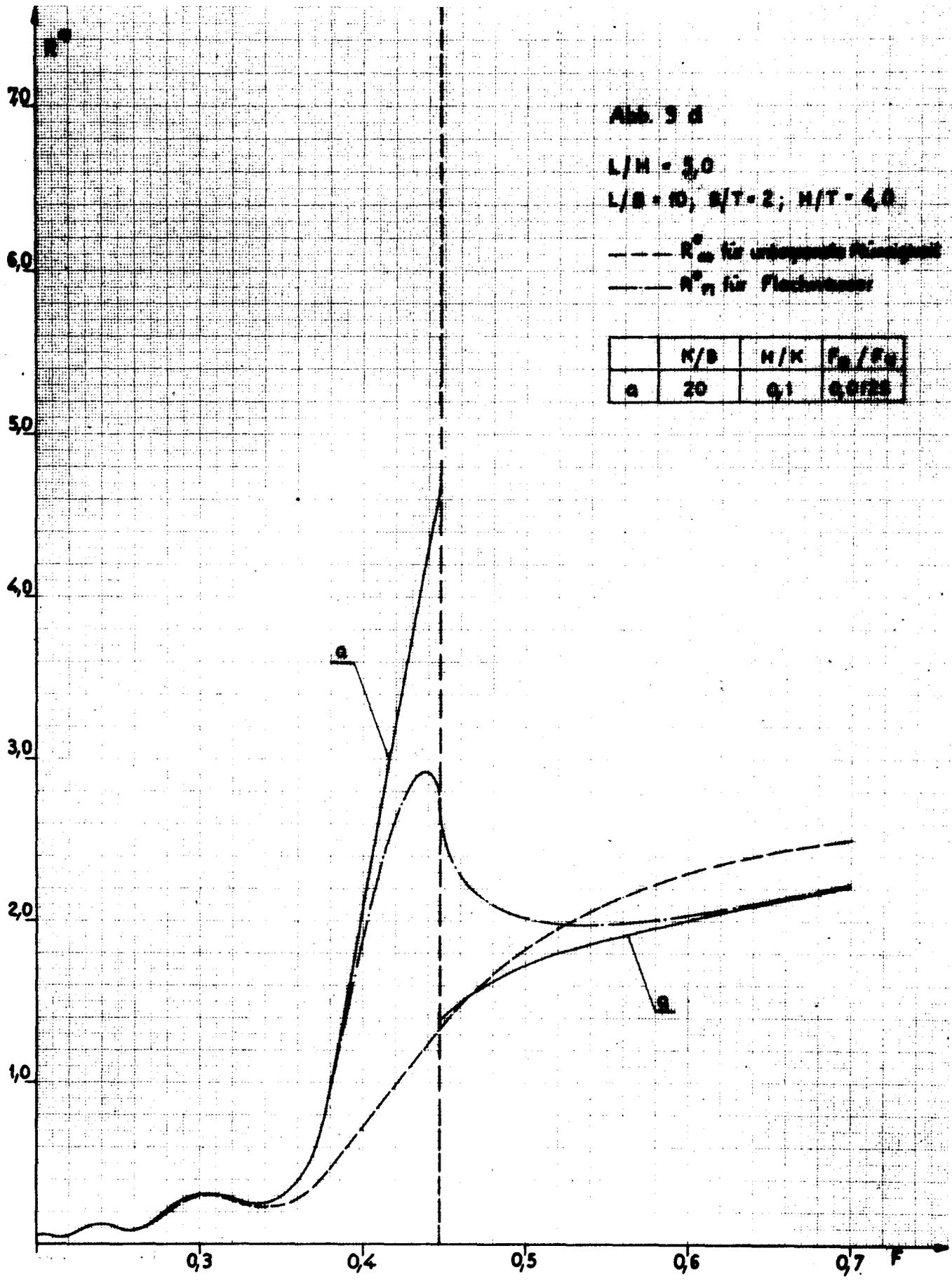
Abb. 3 d

$L/H = 3,0$

$L/B = 10, S/T = 2, H/T = 4,0$

--- R_{un} für ungetriggerte Flammigkeit
 — R_{fl} für Flachbrenner

	K/B	H/K	$R_{\text{un}}/R_{\text{fl}}$
a	20	0,1	0,0125



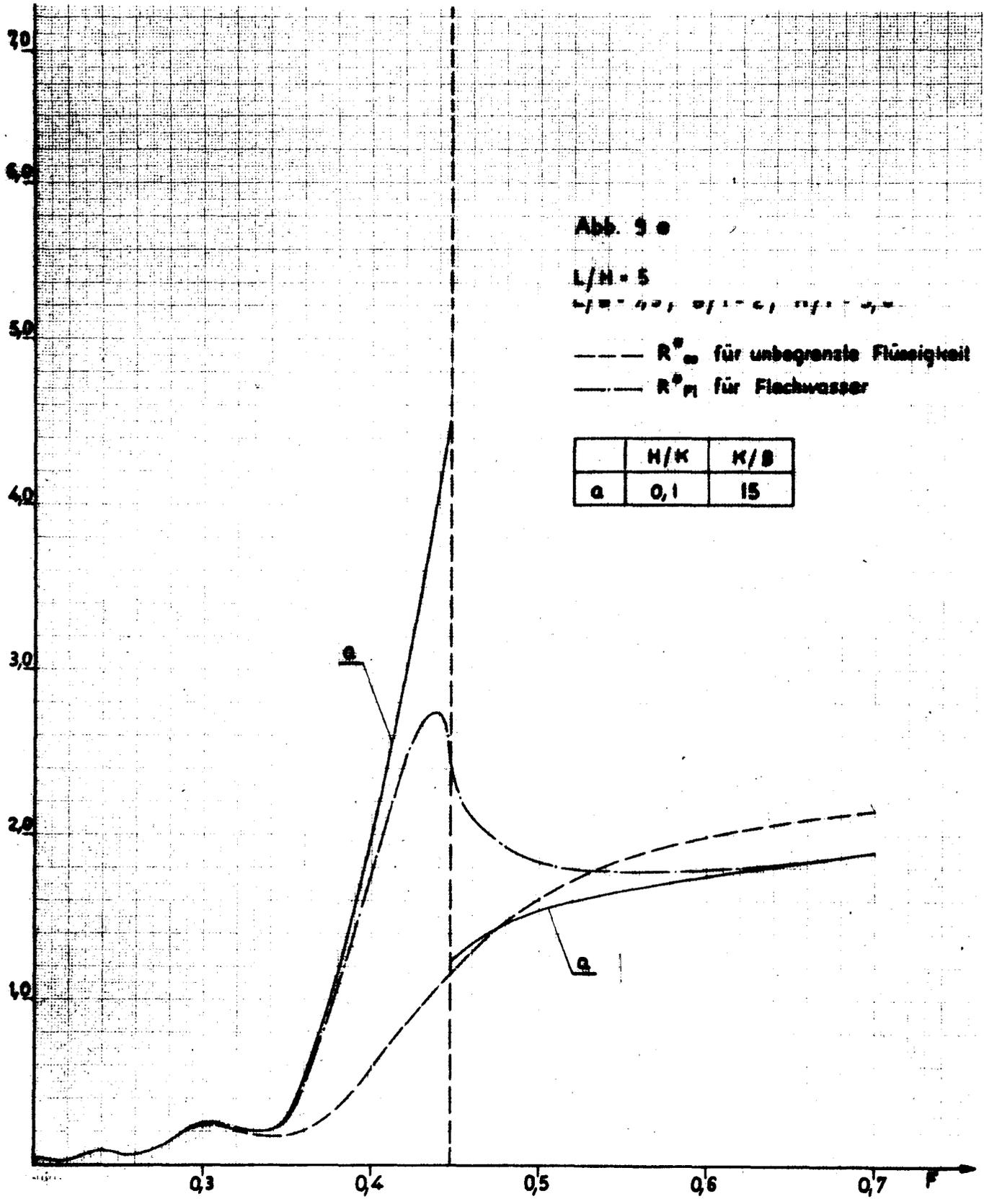


Abb. 9 a

$L/H = 5$

$\mu = 0.01, \sigma = 0.1, \gamma = 0.1$

--- R^*_{∞} für unbegrenzte Flüssigkeit
 — R^*_{p1} für Flachwasser

	H/K	K/B
a	0,1	15

Abb. 37

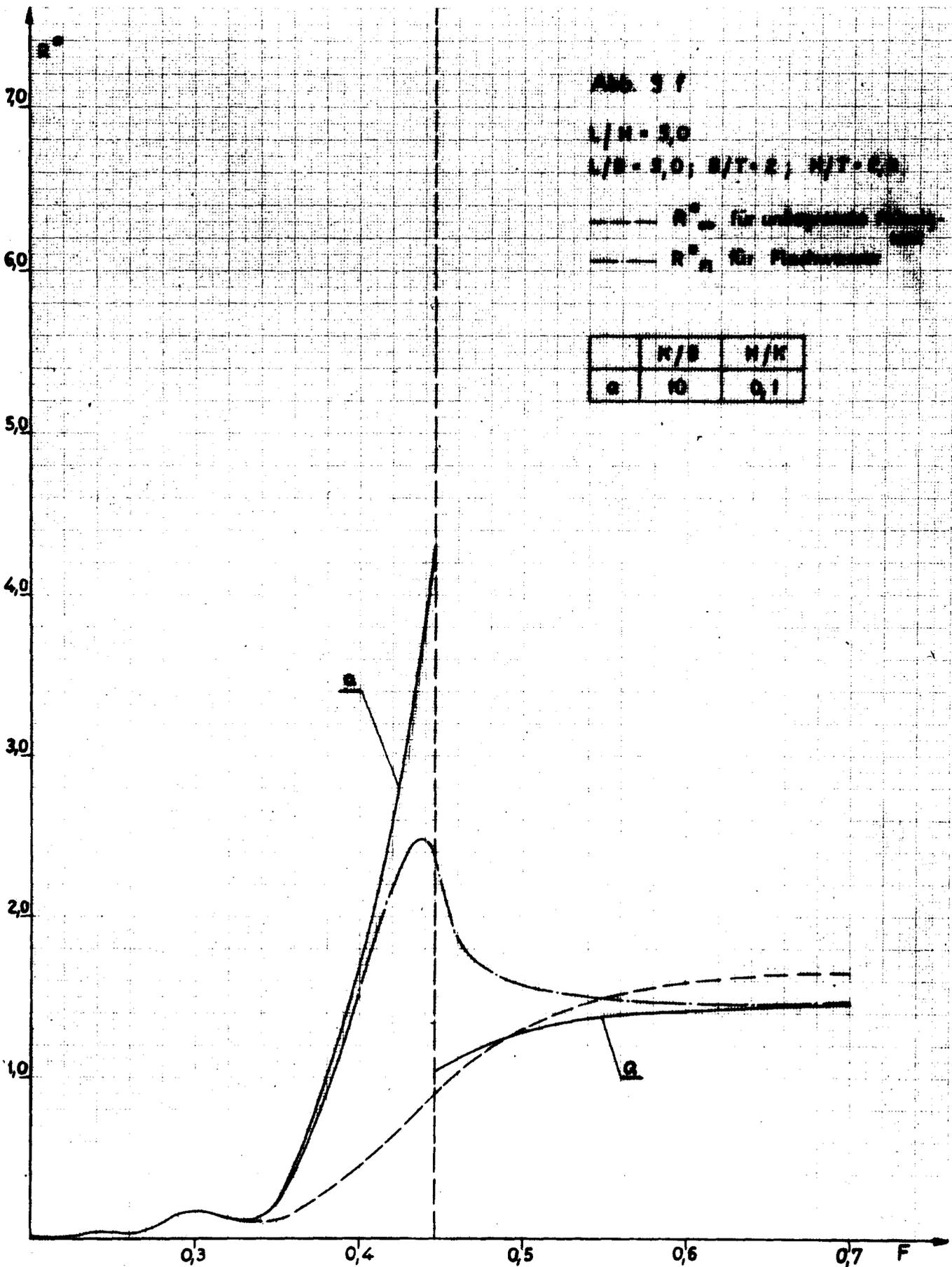
$L/K = 3,0$

$L/B = 3,0; B/T = 2; H/T = 0,2$

— R^* für ungespanntes Material

— R^* für Plastmaterial

	R/B	H/K
a	10	0,1



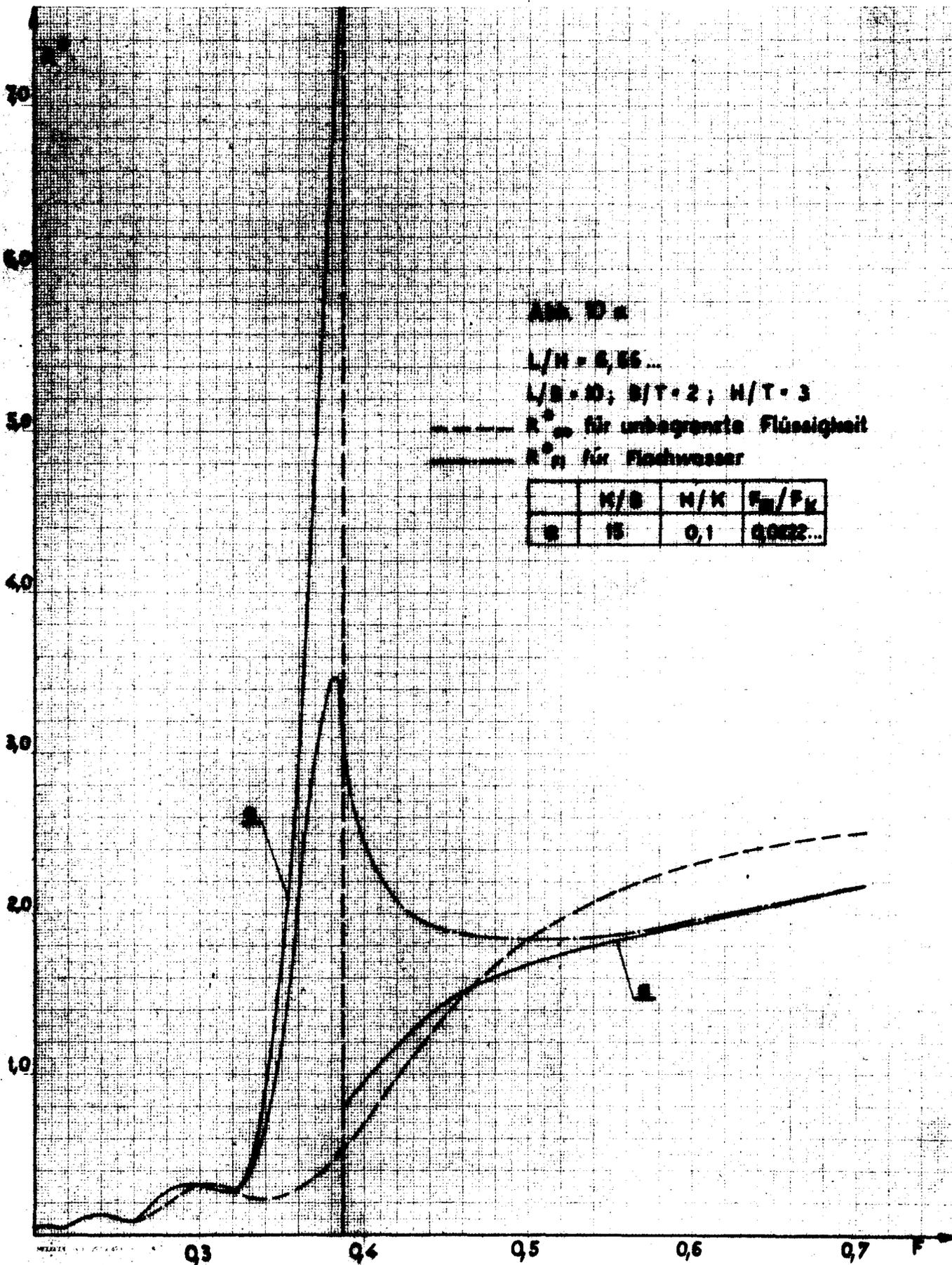


Abb. 10 b

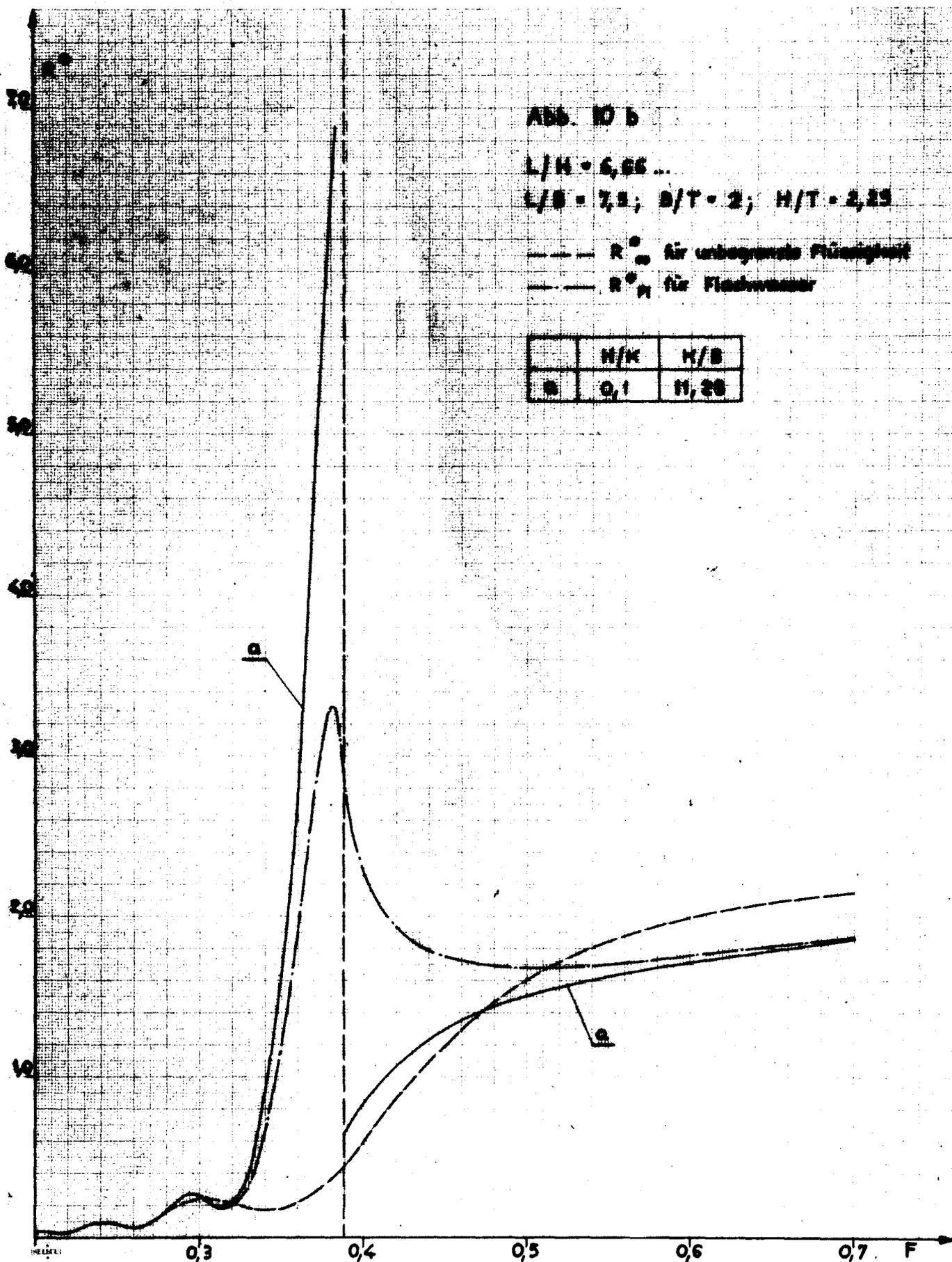
$L/H = 6,66 \dots$

$L/B = 7,5; B/T = 2; H/T = 2,25$

--- R_{∞}° für unbegrenzte Flüssigkeit

— R_{μ}° für Flachwasser

	H/K	H/B
0	0,1	11,25



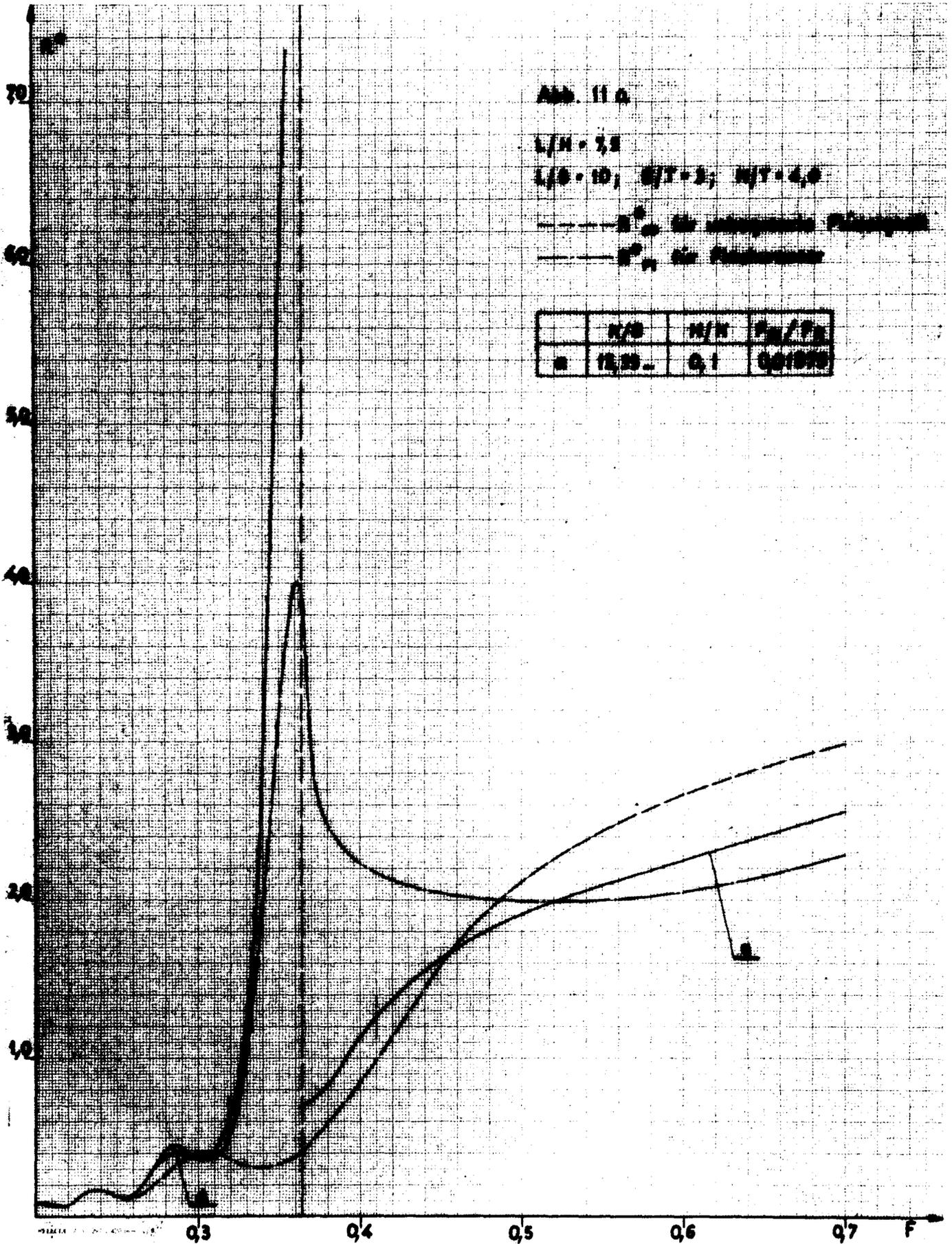


Abb. 11 a

$L/H = 7.5$

$L/S = 10; G/T = 1; H/T = 4.0$

--- P^* für ungesättigte Flüssigkeit
 — P^* für Polymerer

	H/S	H/H	P_a/P_b
a	10.00	0.1	0.01000

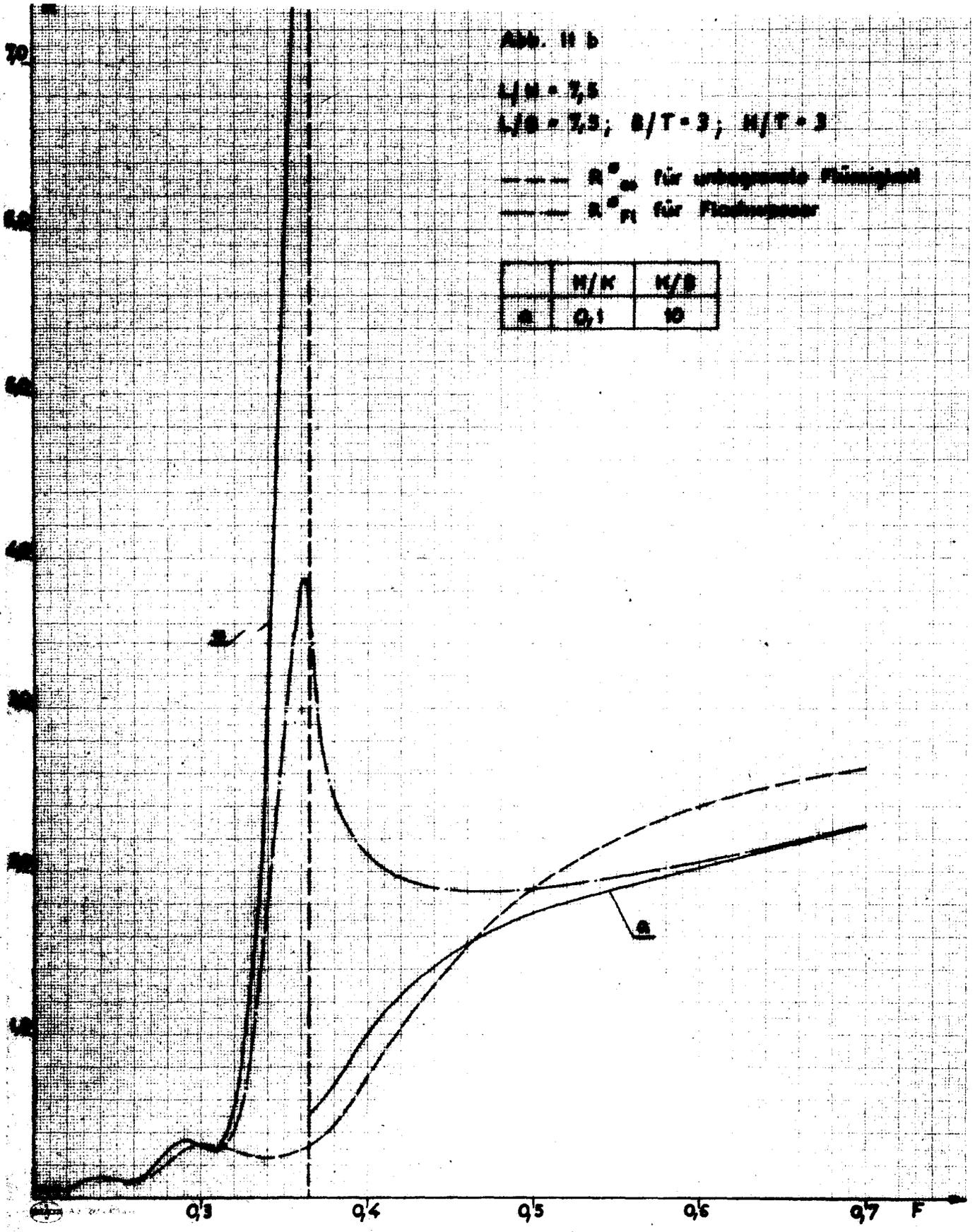
Abb. H 6

$L/B = 3,5$

$L/B = 3,5; B/T = 3; H/T = 3$

--- R_{ab} für unbelastete Flammhöhe
--- R_{fl} für Flammhöhe

	M/K	M/B
■	0,1	10



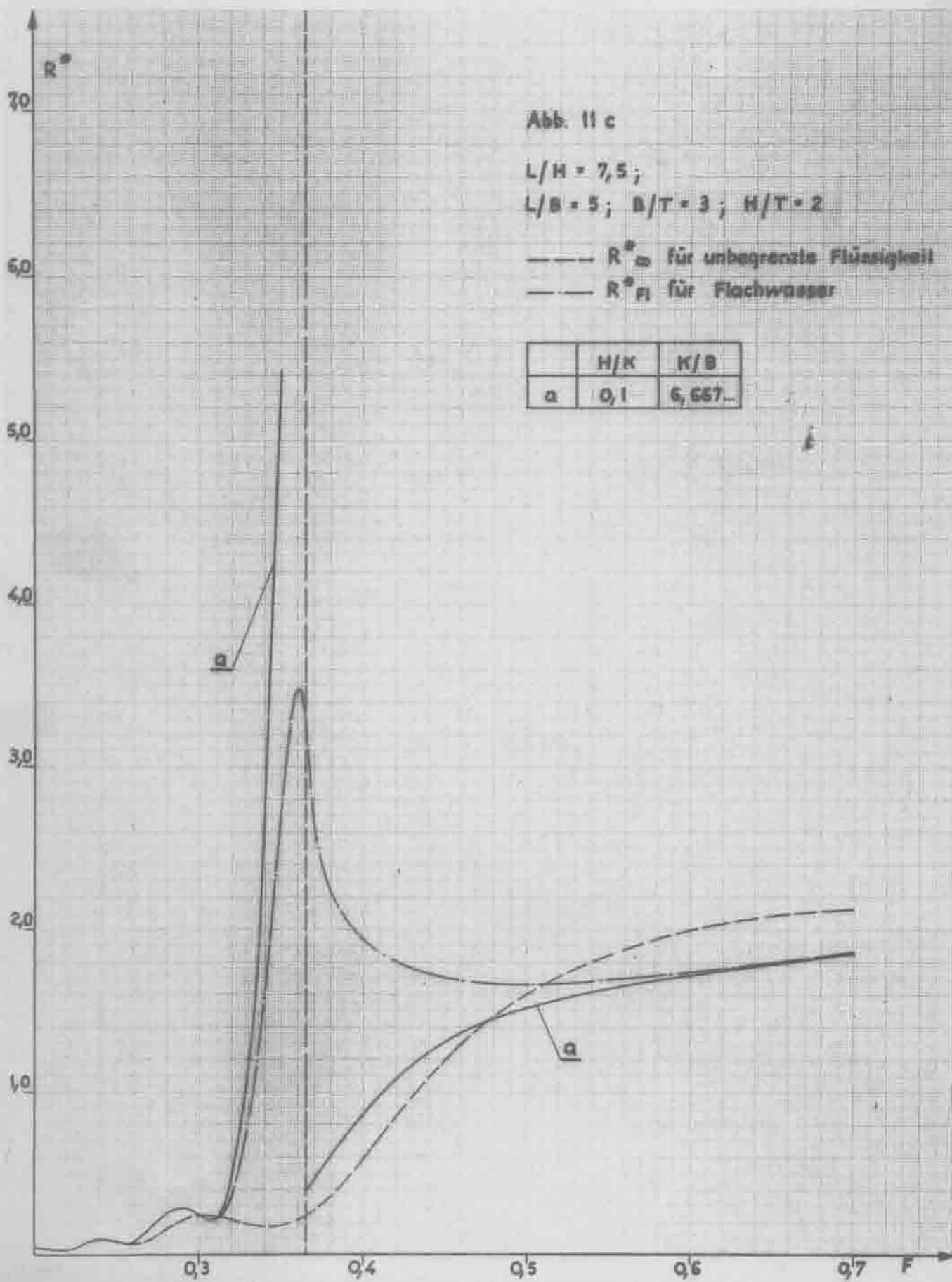


Abb. 11 c

$L/H = 7,5;$

$L/B = 5; B/T = 3; H/T = 2$

— R^*_u für unbegrenzte Flüssigkeit

- - - R^*_fl für Flachwasser

	H/K	K/B
a	0,1	6,667

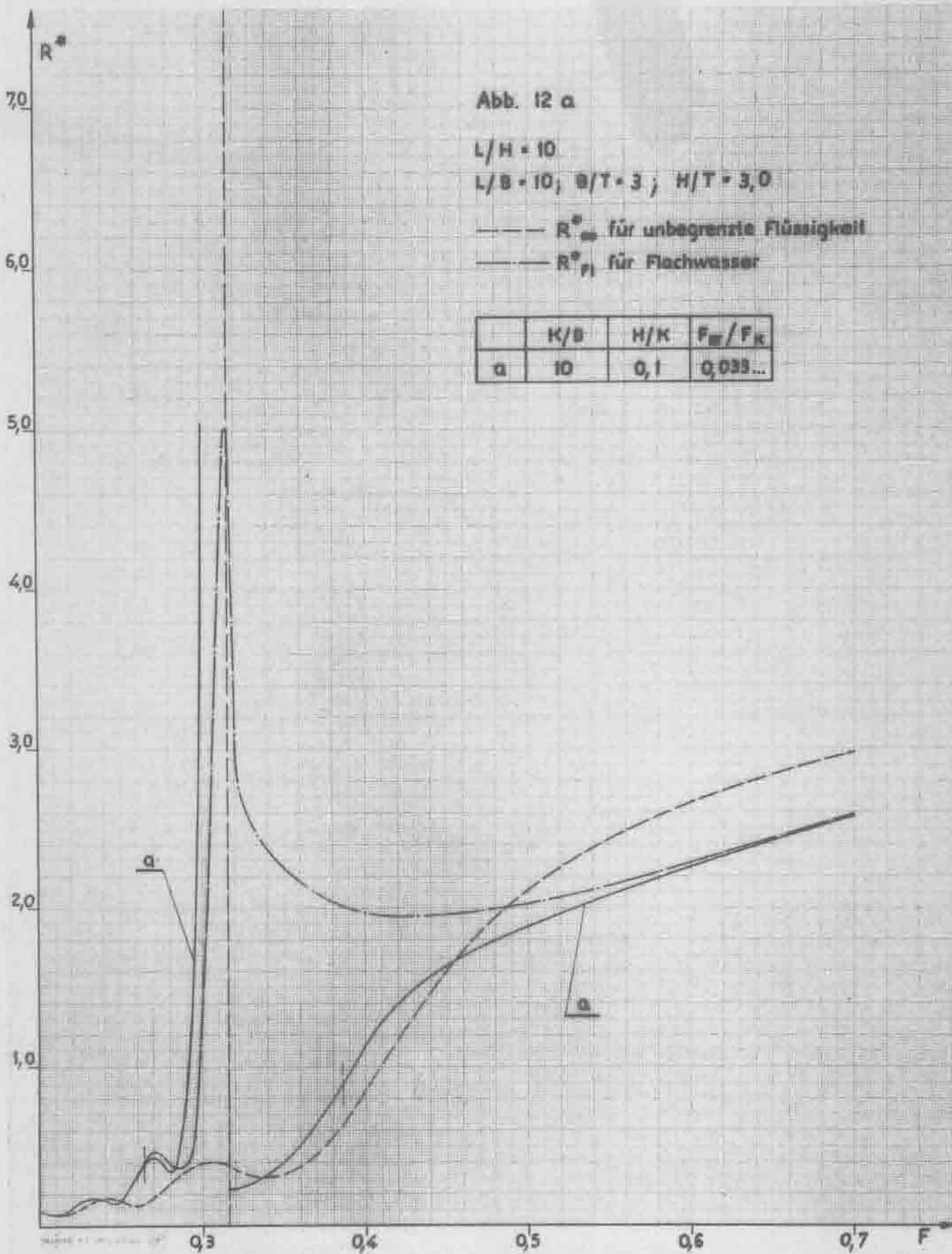


Abb. 12 a

$L/H = 10$

$L/B = 10; g/T = 3; H/T = 3,0$

--- R^* für unbegrenzte Flüssigkeit

— R^* für Flachwasser

	K/B	H/K	F_{II}/F_K
a	10	0,1	0,033...

$$L/H = 10$$

$$L/B = 7,5; B/T = 3; H/T = 2,25$$

--- R^*_{∞} für unbegrenzte Flüssigkeit

— R^*_{η} für Flachwasser

	H/ κ	κ/B
a	0,1	7,5

6,0

5,0

4,0

3,0

2,0

1,0

0,3

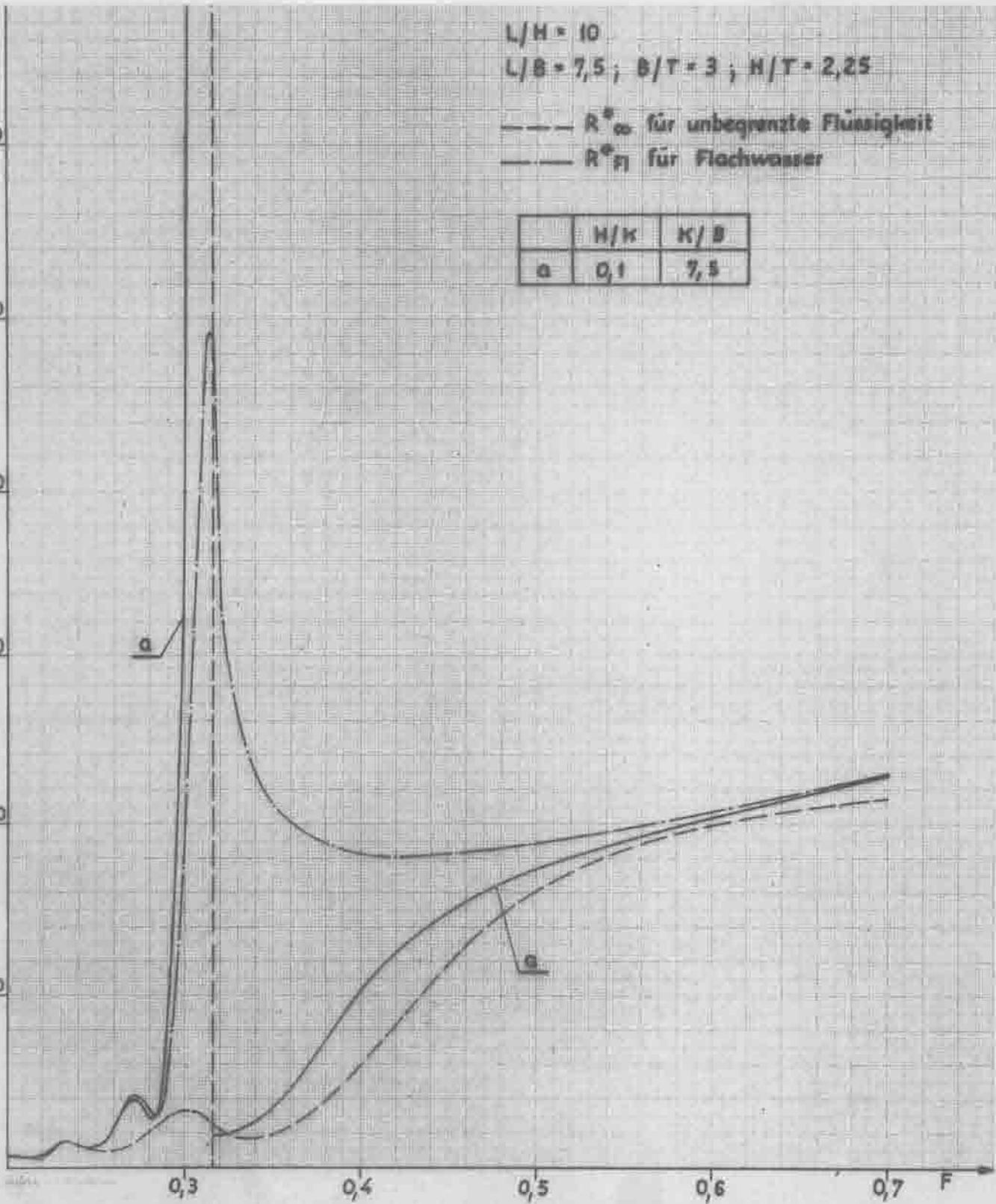
0,4

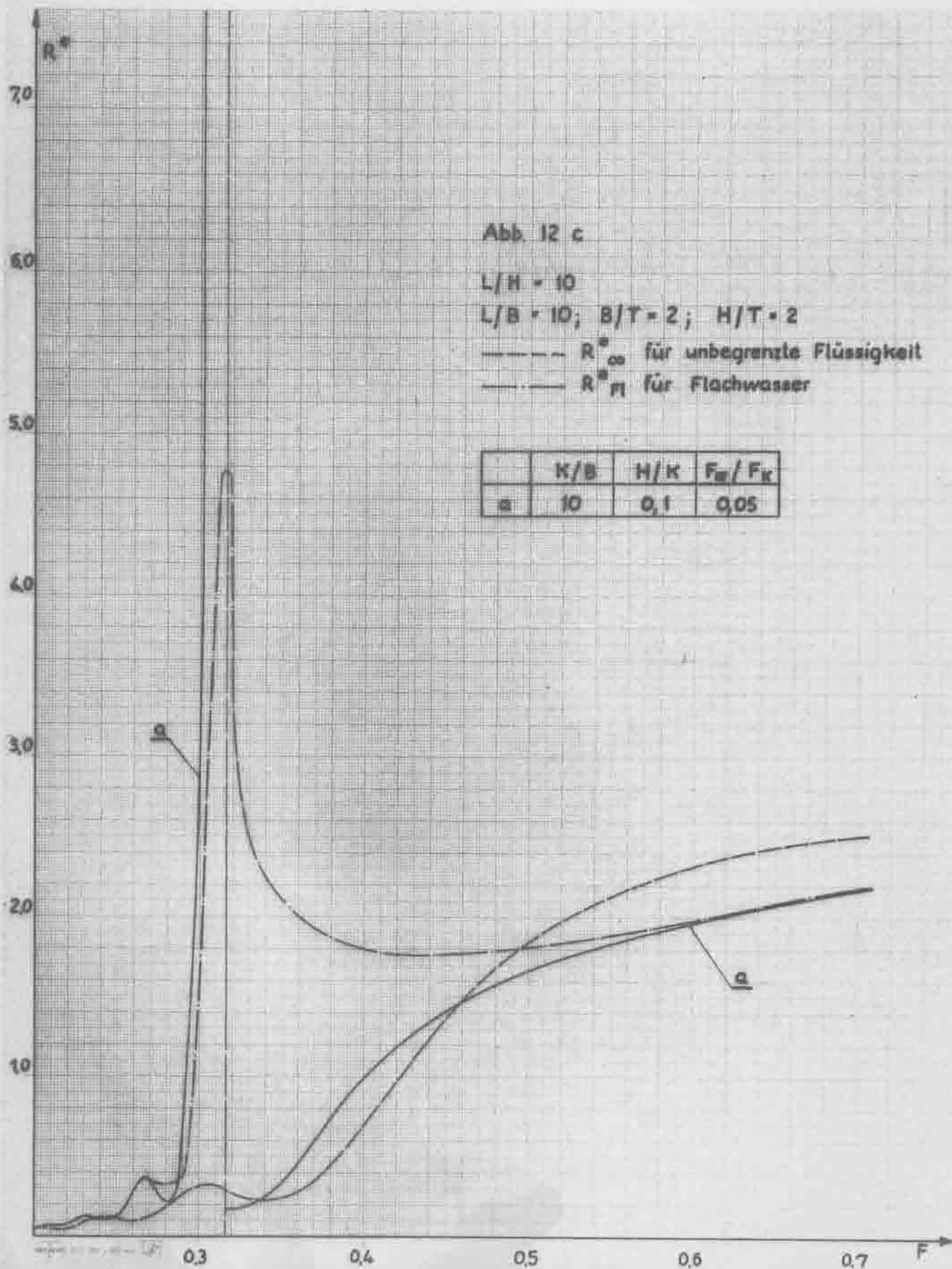
0,5

0,6

0,7

F





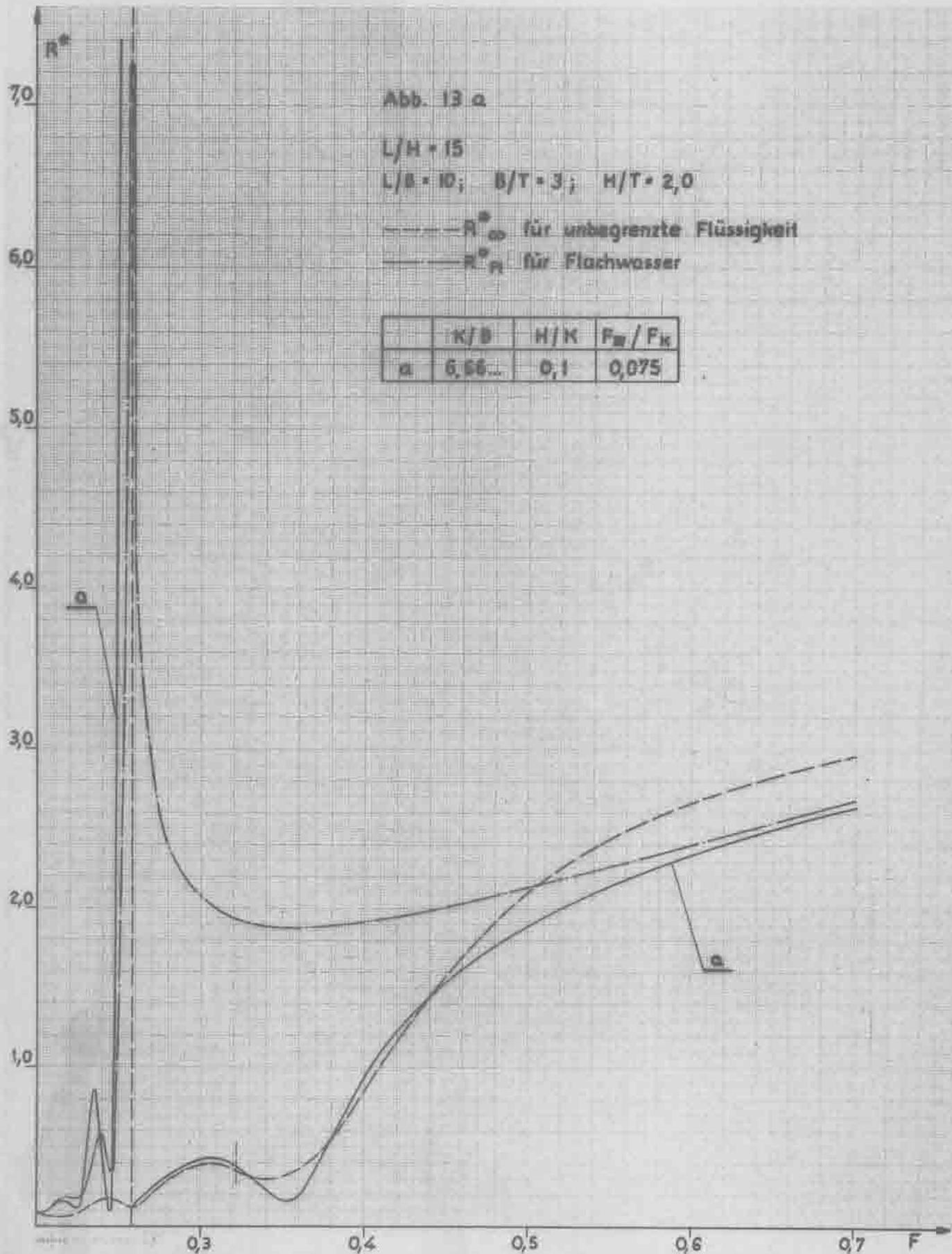
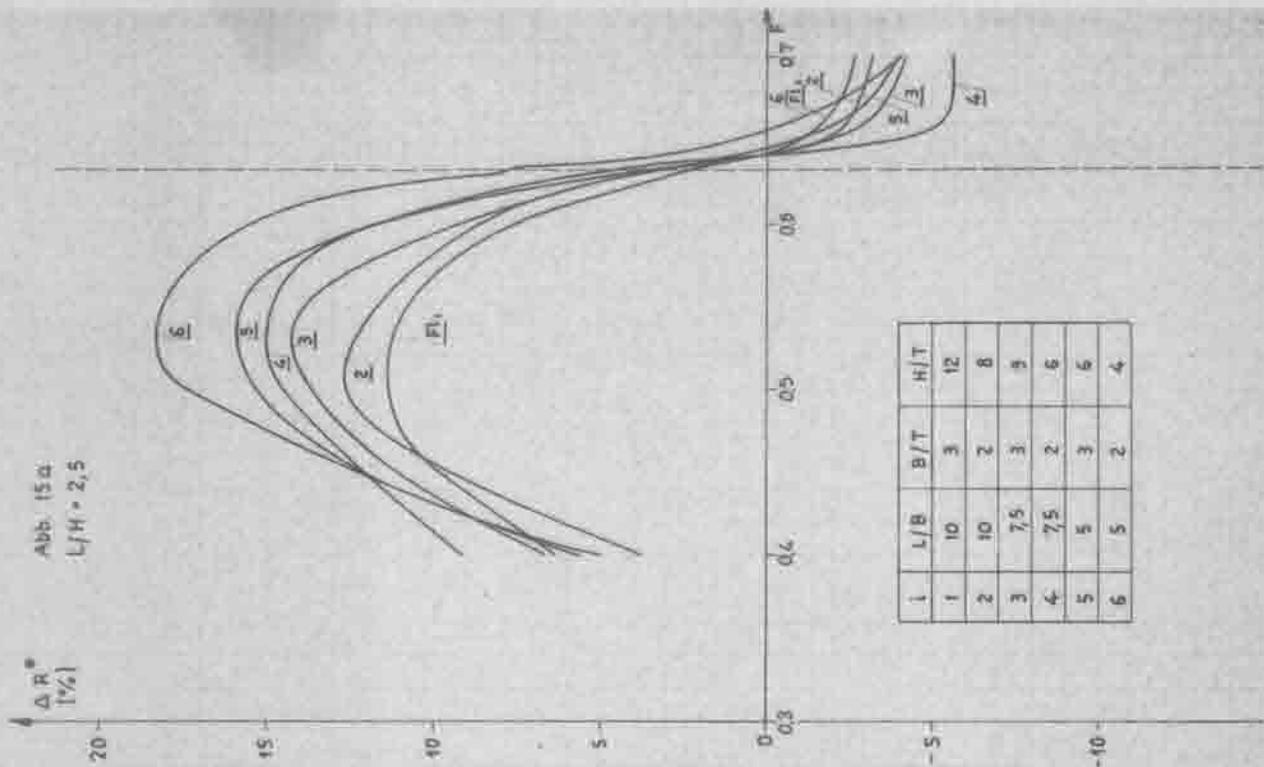
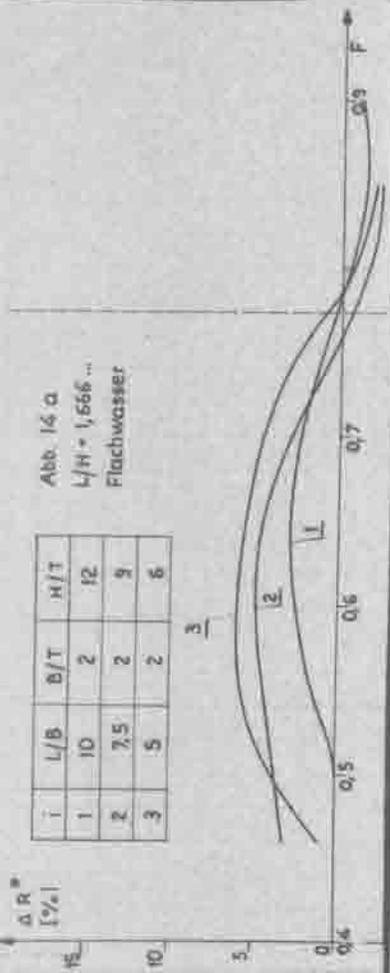


Abb. 15 a
L/H = 2,5



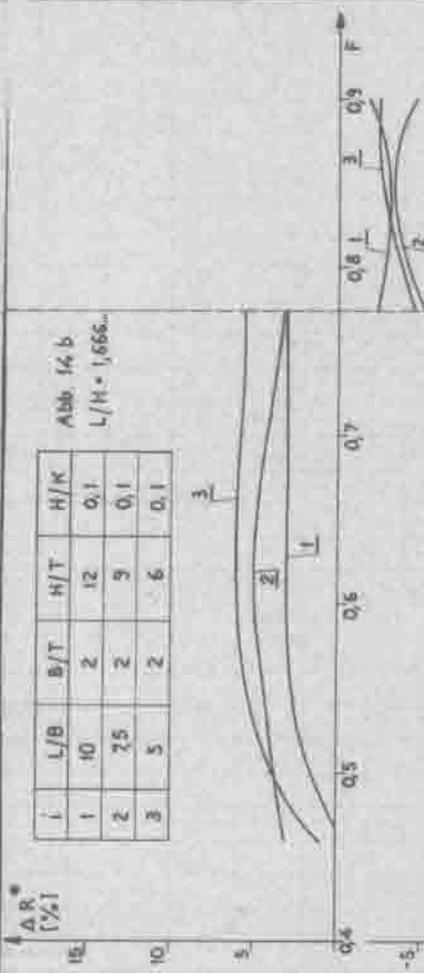
i	L/B	B/T	H/T
1	10	3	12
2	10	2	8
3	7,5	3	9
4	7,5	2	6
5	5	3	6
6	5	2	4

Abb. 14 a
L/H = 1,666 ...
Flachwasser



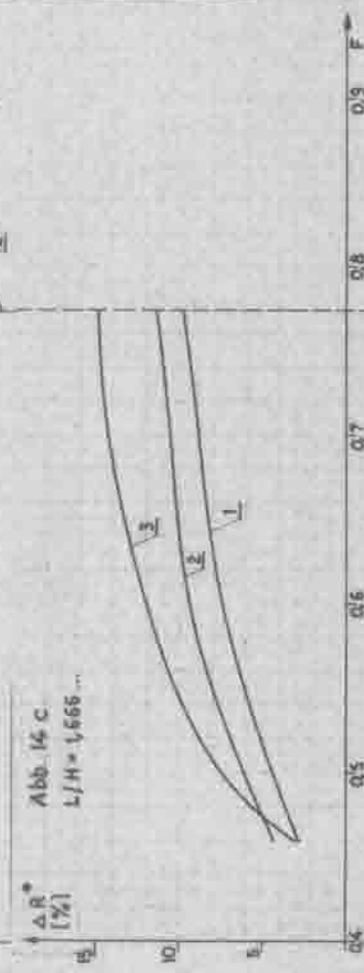
i	L/B	B/T	H/T
1	10	2	12
2	7,5	2	9
3	5	2	6

Abb. 14 b
L/H = 1,666 ...



i	L/B	B/T	H/T	H/K
1	10	2	12	0,1
2	7,5	2	9	0,1
3	5	2	6	0,1

Abb. 14 c
L/H = 1,666 ...

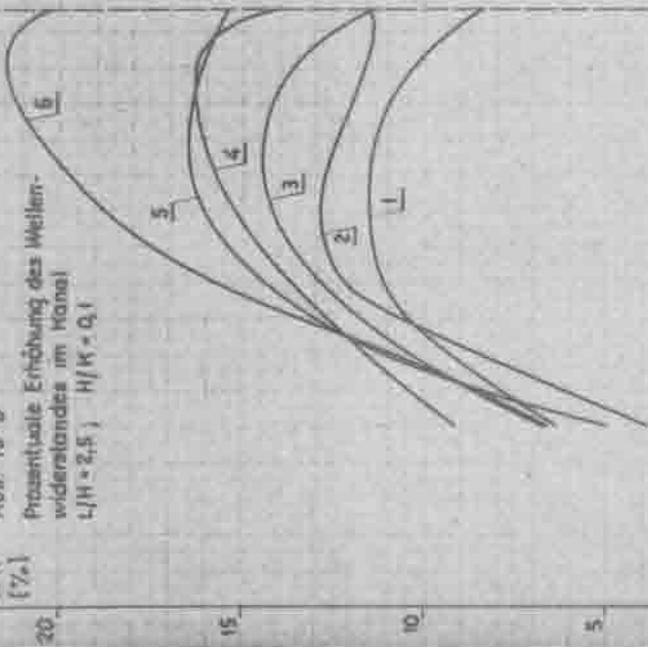


i	L/B	B/T	H/T	H/K
1	10	2	12	0,4
2	7,5	2	9	0,4
3	5	2	6	0,4

Abb. 15 b

Prozentuale Erhöhung des Wellenwiderstandes im Kanal
 $L/H = 2,5$ $H/K = 0,1$

ΔR (%)



i	L/B	B/T	H/T
1	10	3	12
2	10	2	6
3	7,5	3	9
4	7,5	2	6
5	5	3	6
6	5	2	4

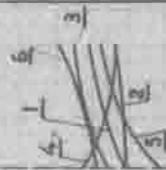
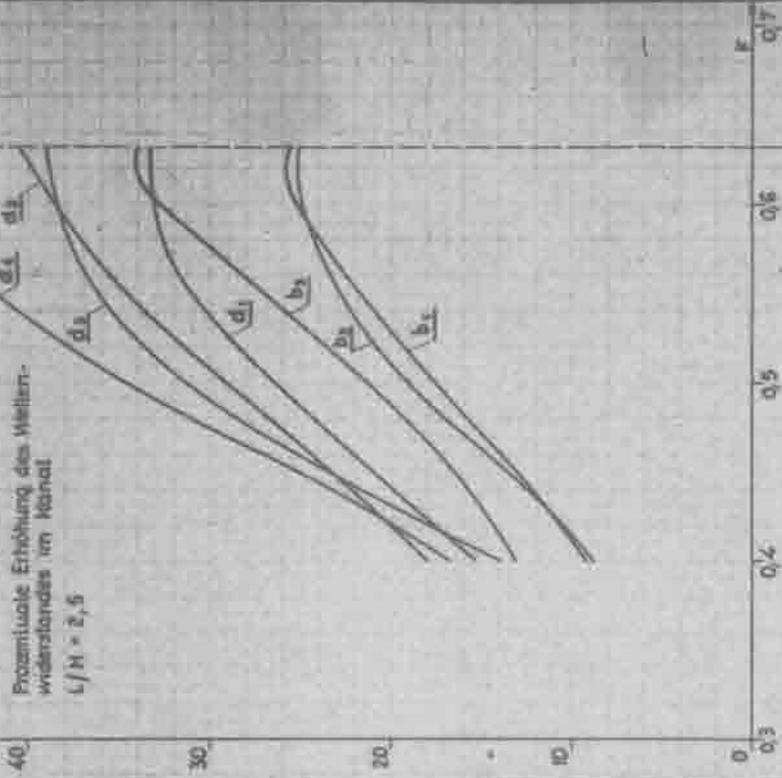


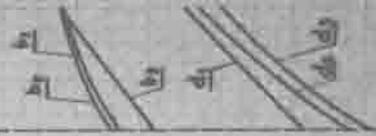
Abb. 15 c

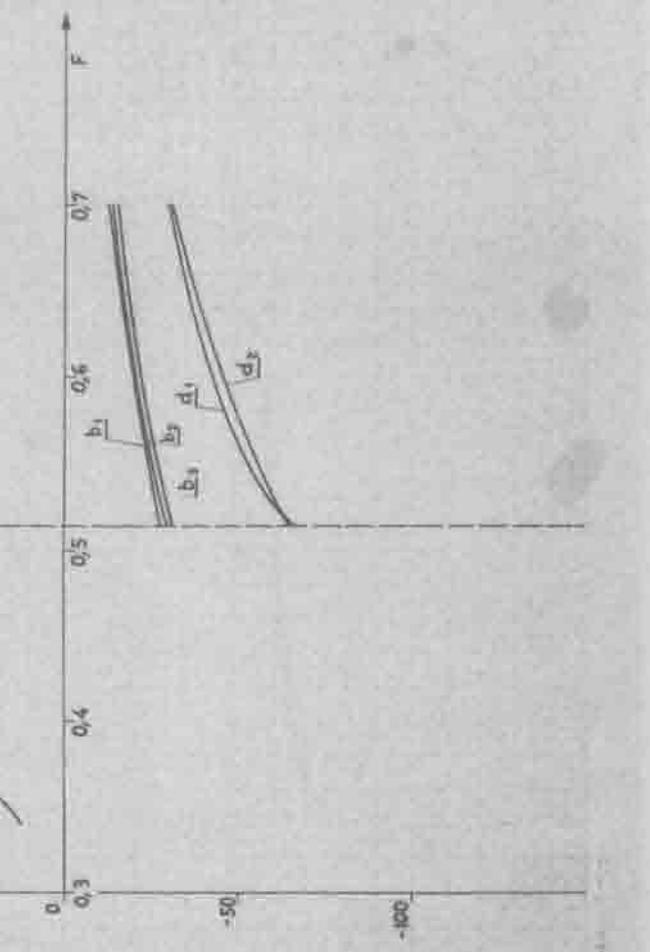
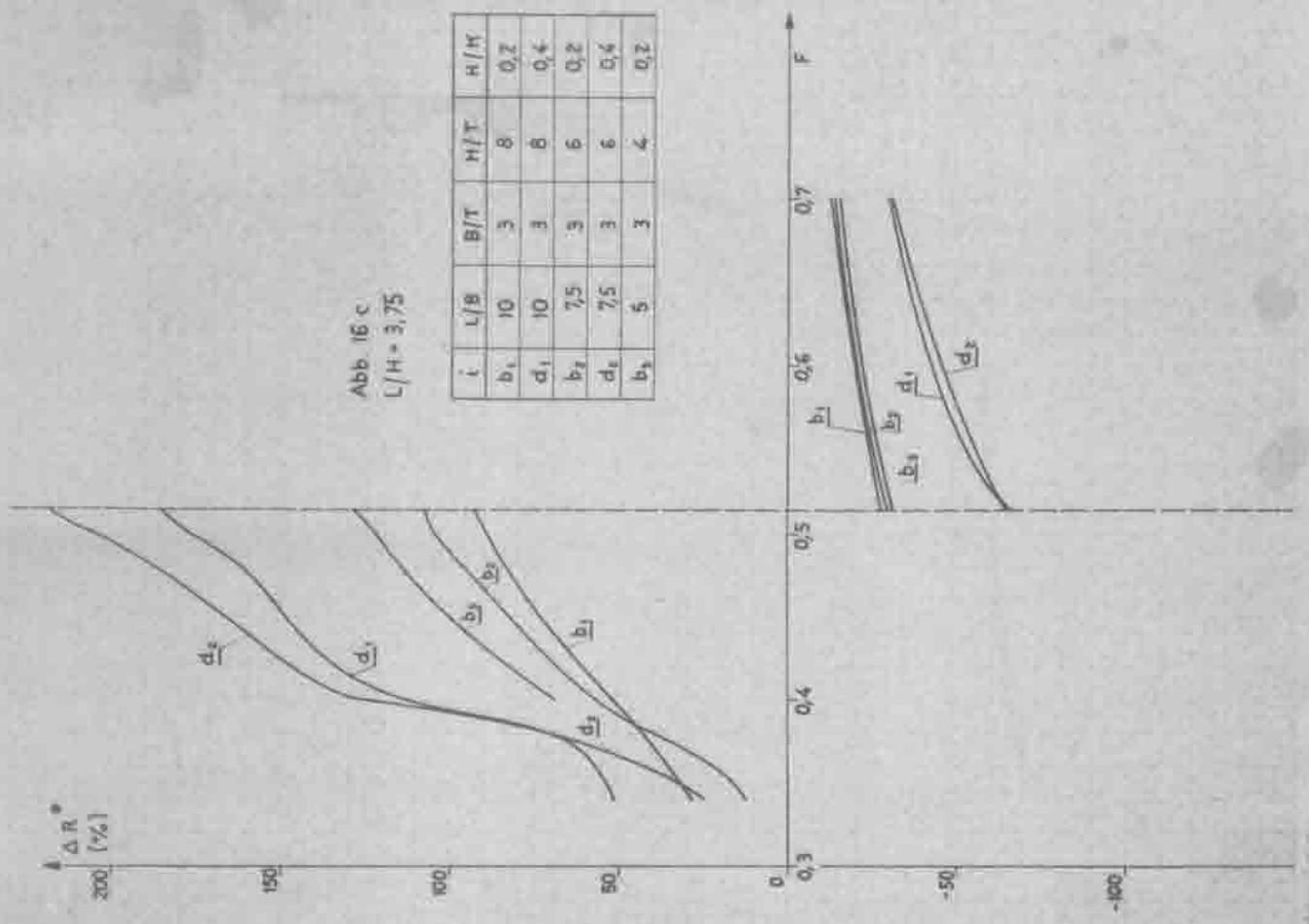
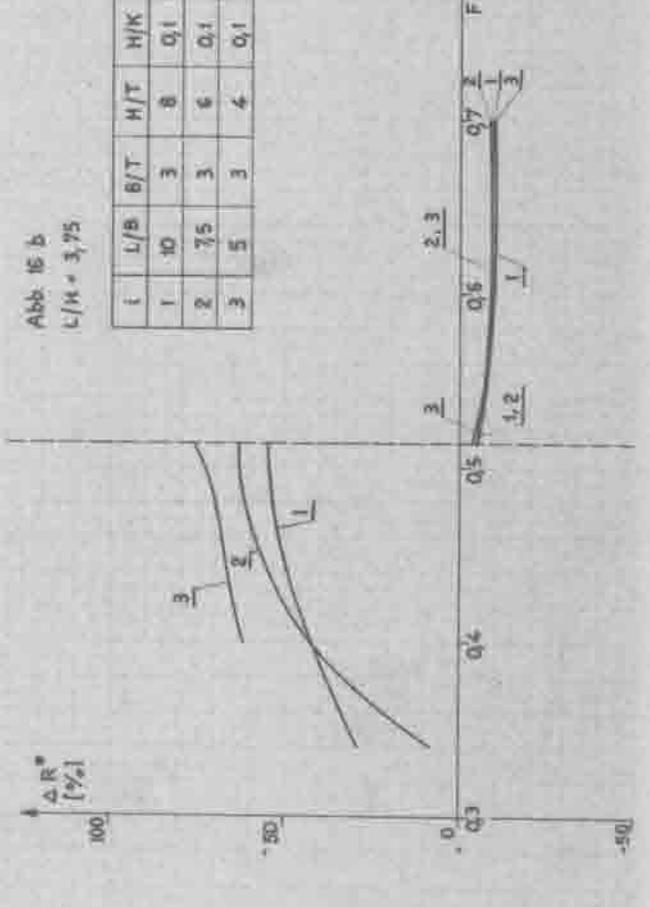
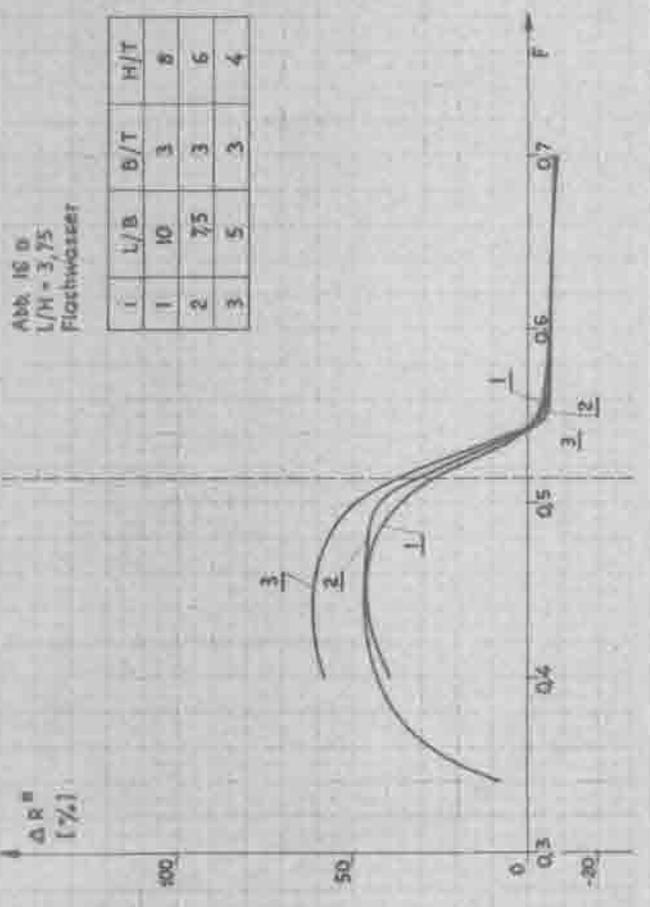
Prozentuale Erhöhung des Wellenwiderstandes im Kanal
 $L/H = 2,5$

ΔR (%)



	L/B	B/T	H/T	N/K
d ₁	10	3	12	0,4
d ₂	10	2	8	0,4
d ₃	7,5	3	9	0,4
d ₄	5	3	6	0,4
b ₁	7,5	2	6	0,2
b ₂	5	3	6	0,2
b ₃	5	2	4	0,2





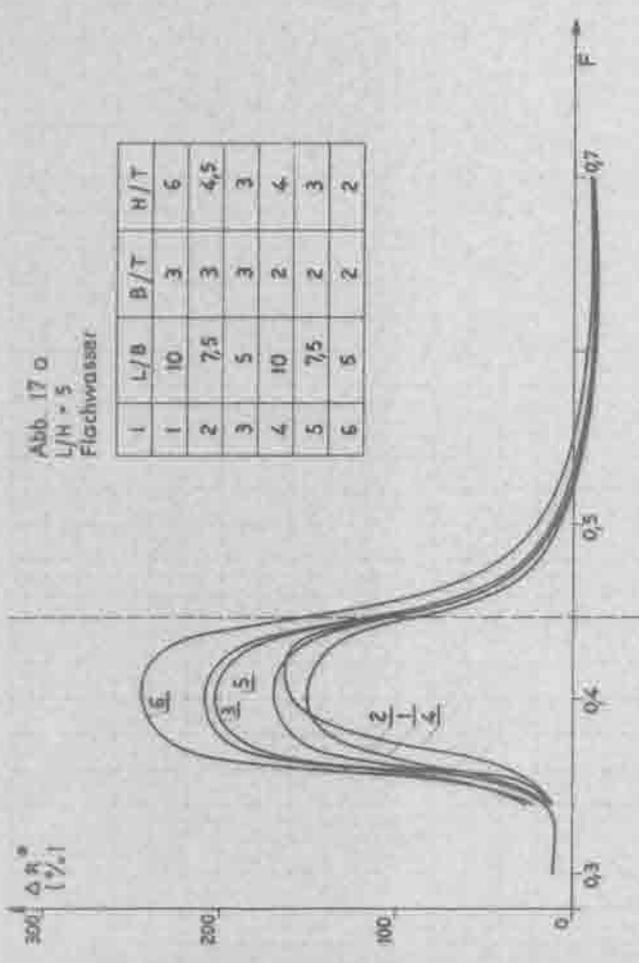


Abb. 17 a
L/H = 5
Flachwasser

i	L/B	B/T	H/T
1	10	3	6
2	7.5	3	4.5
3	5	3	3
4	10	2	4
5	7.5	2	3
6	5	2	2

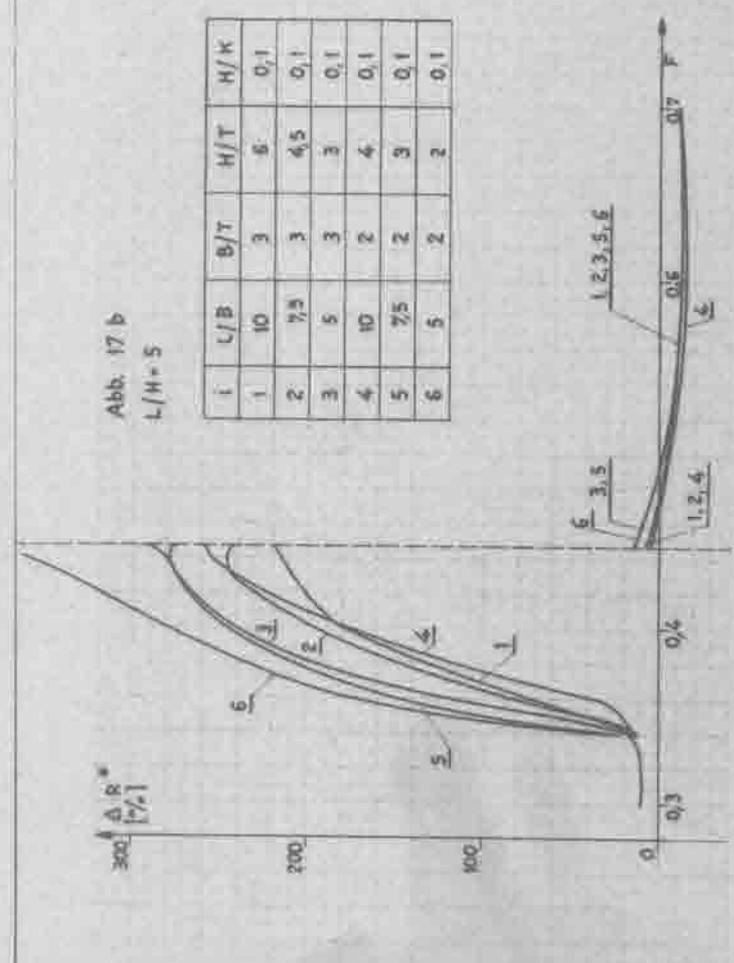


Abb. 17 b
L/H = 5

i	L/B	B/T	H/T	H/K
1	10	3	6	0.1
2	7.5	3	4.5	0.1
3	5	3	3	0.1
4	10	2	4	0.1
5	7.5	2	3	0.1
6	5	2	2	0.1

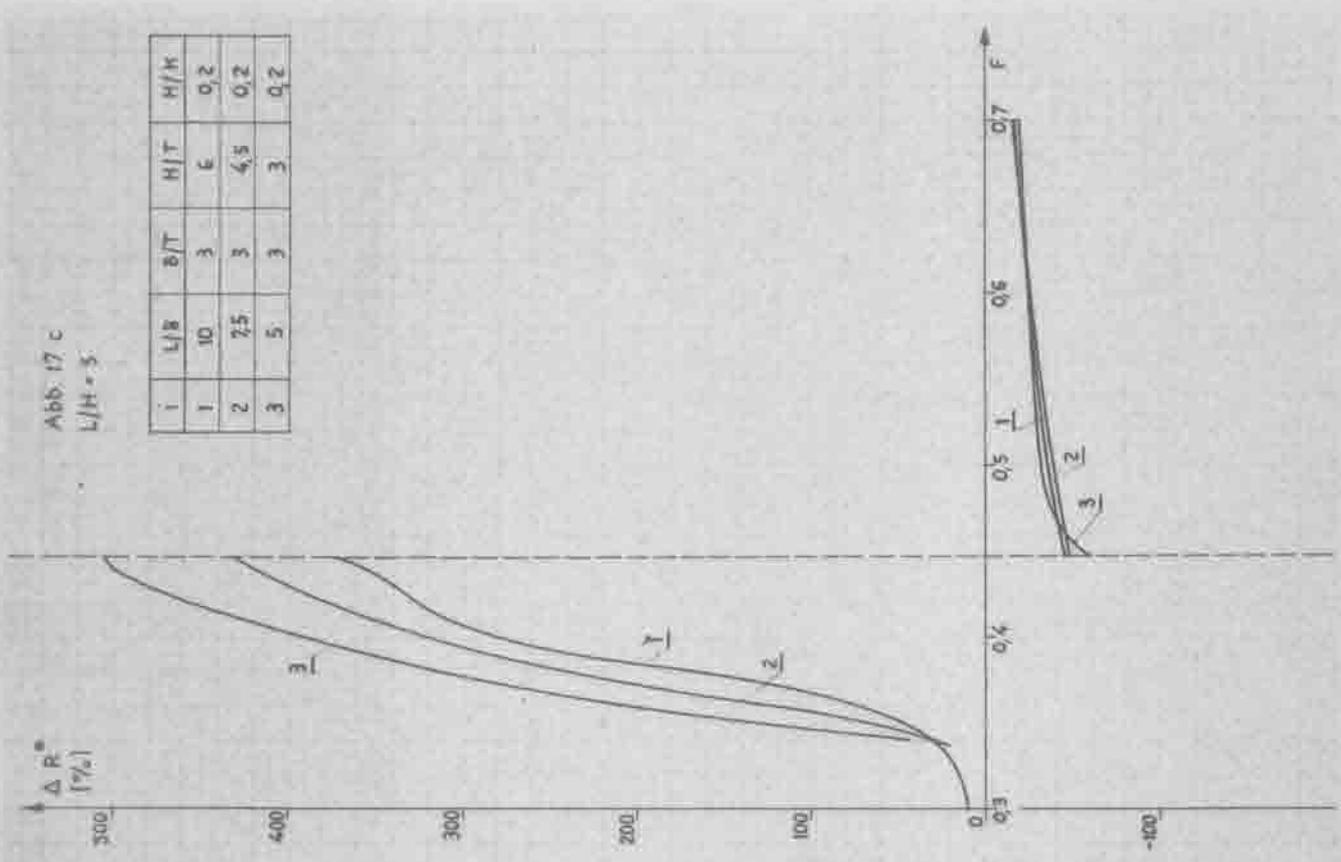


Abb. 17 c
L/H = 5

i	L/B	B/T	H/T	H/K
1	10	3	6	0.2
2	7.5	3	4.5	0.2
3	5	3	3	0.2