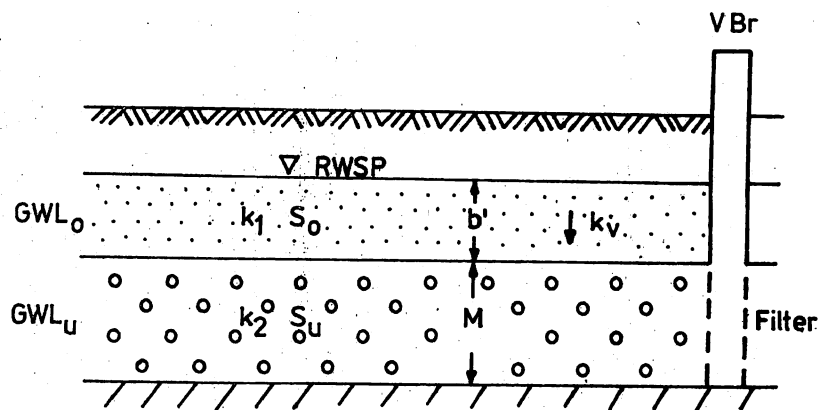


A2. Geschichtete Grundwasserleiter, bei denen eine verzögerte Wasserabgabe aus den weniger durchlässigen in den durchlässigen Grundwasserleiter erfolgt

A2.1. Allgemeine Ausführungen

Nachfolgend soll die Pumpversuchsauswertung für ein Grundwasserleitersystem vorgestellt werden, wo eine gut durchlässige Schicht von einer schwach durchlässigen Schicht überlagert wird (s. Bild A2/1). Diese Verhältnisse kommen in der Natur relativ oft vor, wurden bei der Pumpversuchsauswertung bisher jedoch häufig nicht berücksichtigt.



- VBr: Versuchsbrunnen
 RWSP: Ruhewasserspiegel
 GWL_o: } Grundwasserleiter $\left\{ \begin{array}{l} \text{oben} \\ \text{unten} \end{array} \right.$
 GWL_u: }
- b': Grundwasserleitermächtigkeit GWL_o (wassergefüllt) (m)
 M: Grundwasserleitermächtigkeit GWL_u (m)
 k: Durchlässigkeitsbeiwert (m/s)
 k₁: k für GWL_o (m/s)
 k₂: k für GWL_u (m/s)
 k_v: k für vertikale Durchströmung des GWL_o (m/s)
 S_o: Speicherkoeffizient oben = Gravitationspeicherkoeffizient
 S_u: Speicherkoeffizient unten = elastischer Speicherkoeffizient

Bild A2/1: Geologisches Musterprofil

Bei diesen Verhältnissen, die in der internationalen Literatur als halbgespannt bzw. halbungespannt bezeichnet werden, wird vorausgesetzt, daß der obere GWL praktisch keinen Anteil am horizontalen Fließvorgang hat und demzufolge nur vertikal durchströmt wird. Wenn Pumpversuche unter derartigen Bedingungen genügend lang durchgeführt werden, zeigt sich das typische im Bild A2/2 angegebene Absenkungsverhalten, bei dem 3 Absenkungsphasen ausgrenzbar sind.

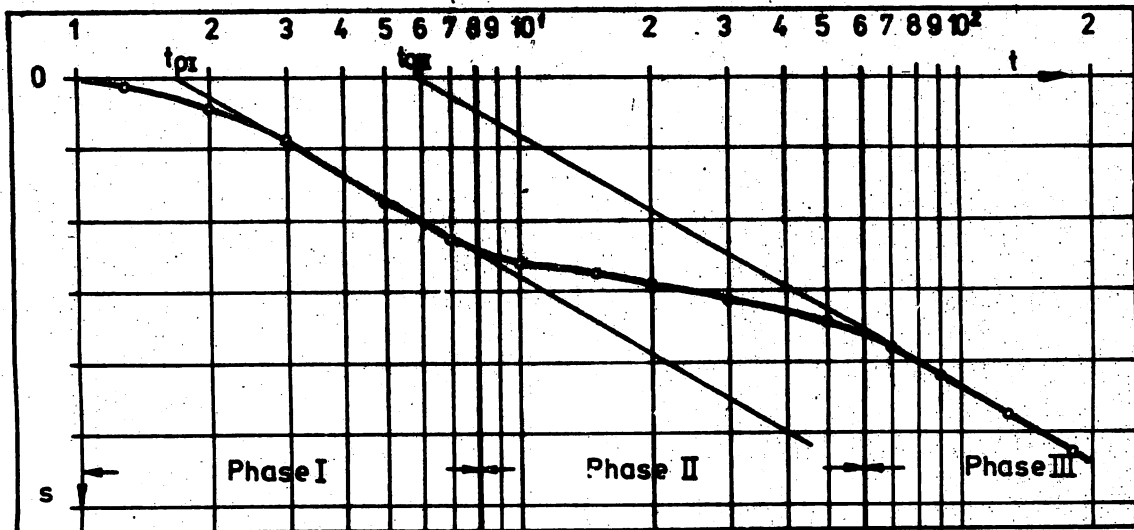


Bild A2/2 : GW-Absenkungsverlauf im Musterprofil $s = f(lgt)$

Phase I - elastisches Regime

Mit Beginn des PV erfolgt im GWL_u mit seiner günstigen Durchlässigkeit und in Abhängigkeit vom elastischen Speicherkoeffizient eine Druckentlastung. Die dadurch eintretende GW-Absenkung spiegelt nur die Verhältnisse dieses GWL wider.

Phase II - falschstationäres Regime

Durch die auf den GWL_o wirkende Druckentlastung beginnt die verzögerte systematische Entwässerung dieses GWL und damit eine Speisung des GWL_u . Dieser Vorgang bewirkt das harmonische Abweichen der Funktion $s = f(lgt)$ nach oben.

Phase III - Gravitationsregime

In dieser Phase erfolgt der zeitliche Verlauf der Absenkung so langsam, daß er dem Entwässerungsverhalten des GWL_o entspricht. Das System reagiert wie ein homogener GWL, bei dem der Speicherkoeffizient der entwässerten Porosität des GWL_o entspricht.

Länge, Dauer und Ausbildung der drei Phasen hängen von folgenden Kenngrößen ab:

- k-Wert-Verhältnis GWL_u zu GWL_o
- S-Wert-Verhältnis GWL_u zu GWL_o
- Entfernung r des GWBR zum Entnahmehrunnen
- Geometrische Abmessungen der GWL

Der Einfluß der einzelnen Größen ist gut aus Bild A2/3 zu erkennen, wo die typische Kurvenschar gezeigt wird, welche der zeitlichen Auswertung nach Abschnitt A2.3. zugrunde liegt.

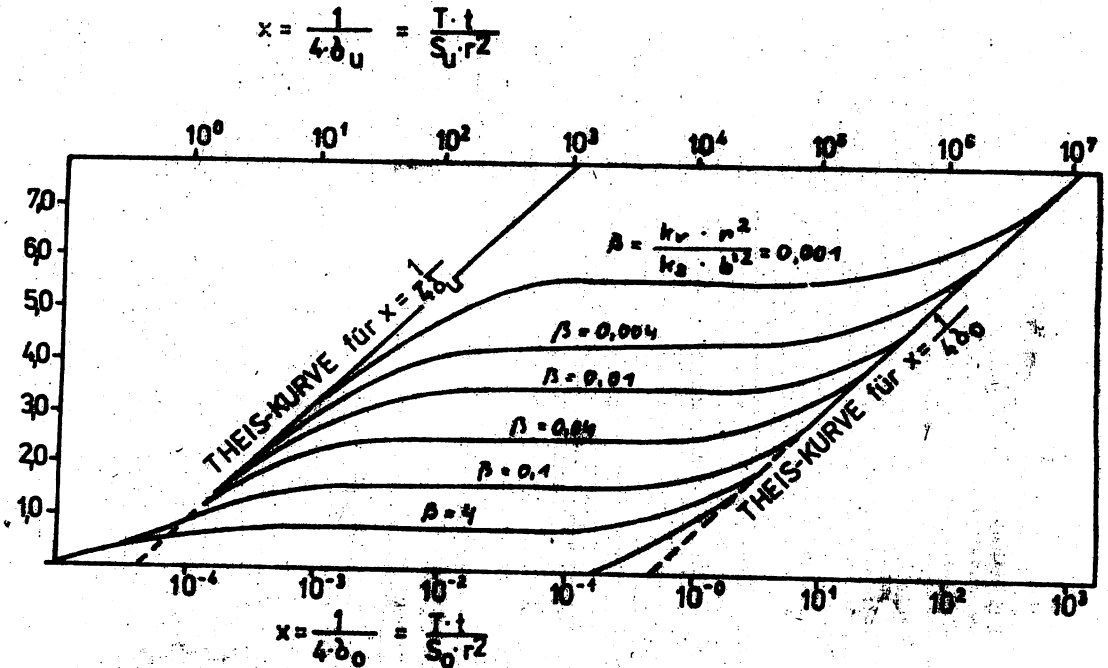


Bild A2/3 : Typische Kurvenschar nach NEUMANN

Erklärungen zu den verwendeten Formeln und Bezeichnungen :

$$W(\delta) = \frac{4 \cdot \pi \cdot T}{Q \cdot s_2}$$

Brunnenfunktion nach THEIS
s. TGL 23864/04 P.18

$$\delta = \frac{s \cdot r^2}{4 \cdot t}$$

bzw. s. TGL 23864/04 P.19

$$\delta = \frac{S \cdot r^2}{T \cdot 4t}$$

Aufgetragen wird die Funktion

$$y = W\left(\frac{1}{\delta}\right) \quad \text{über} \quad x = \frac{1}{4 \cdot \delta} = \frac{T \cdot t}{S \cdot r^2}$$

wobei gilt (s. Bild A2/3) :

S_u : Speicherkoeffizient des GWL_u (elastischer S)

S_0 : Speicherkoeffizient des GWL_0 (Gravitations-S)

$$\beta = \frac{k_v \cdot r^2}{k_2 \cdot b^2} \quad : \quad \text{Speisungsfaktor}$$

r : Entfernung Entnahmsbrunnen/GWR.

Alle anderen Bezeichnungen werden in Bild A2/1 erklärt

So ist beispielsweise die Phase I umso kürzer, je größer r ist, je kleiner b' ist und je größer $k_v : k$ wird.

Die Phase III bildet sich umso später aus, je größer S_0 ist.

Oder auch die Phase II ist umso ausgeprägter, je größer das Verhältnis $S_0 : S_u$ wird. Dabei gilt es noch zu beachten, daß die Phase II nur horizontal verläuft, wenn γ gegen ∞ strebt ($\gamma = 1 + S_0/S_u$).

Für $\gamma > 100$ verläuft die Phase II nahezu horizontal und für $10 < \gamma < 100$ sind aus einer horizontalen Ausgleichsgeraden die gesuchten Parameter noch gut interpretierbar.

Bei dem betrachteten Strömungssystem handelt es sich um einen typischen Fall, bei dem ausreichende Sensivität für jeden der Parameter nur in einem bestimmten Bereich der unabhängigen Variablen gegeben ist und demzufolge die Parameter bei der Lösung der Umkehraufgabe auch nur aus diesem Bereich identifizierbar sind. Bei der Auswertung des zeitlichen Absenkungsverlaufes entsprechend Bild A2/2 (t - unabhängige Variable) ergeben sich somit als identifizierbare Parameter.

Phase I : Profildurchlässigkeit GWL_u : T
 elastischer Speicherkoeffizient des GWL_u : S_u

Phase II: Speisungsgröße für den GWL_0 , in der der vertikale k -Wert k_v enthalten ist: B, \curvearrowright
 (gibt dabei die Leitwertunterschiede in vertikaler und horizontaler Strömungsrichtung an)
 Profildurchlässigkeit (nur bei stationärer Auswertung) GWL_u : T

Phase III: Profildurchlässigkeit GWL_u : T
 Gravitationspeicherkoeffizient des GWL_0 : S_0

Während die Auswertung der Phasen I und III nach der TGL 23864 erfolgen kann, wird das Hauptaugenmerk bei der Auswertung in den Abschnitten A2.2 und A2.3 auf die Bestimmung der Speisungsgröße des GWL_0 und damit des Wertes k_v aus der Phase II gelegt.

Die Phase II ist sowohl nach dem Schema einer stationären Strömung bei konstanter Speisung (HANTUSH) als auch nach dem einer nichtstationären Strömung mit verzögerter Wasserabgabe (NEUMANN) auswertbar. Dabei ist die Annahme wichtig, daß die Züsickerung aus der oberen Schicht der Druckhöhenabnahme im GWL_u proportional ist. Das bedeutet, daß der freie Wasserspiegel im GWL_0 konstant sein sollte, was in der Praxis heißt, daß die Absenkung des freien Grundwasserspiegels im GWL_0 weniger als 5% der wassererfüllten Mächtigkeit des GWL_0 ist

(KRUSEMANN/DE RIDDER). Unter diesen Bedingungen ist ein stationärer (falschstationärer) oder Gleichgewichtszustand über eine gewisse Zeit real möglich.

Für die genannten Verhältnisse läßt sich sowohl eine räumliche als auch eine zeitliche Auswertung durchführen.

A2.2 Auswertung des räumlichen Absenkungsverhaltens

A2.2.1. PV-Auswertung im geschichteten GWL und bei vollkommenem Brunnenausbau

Die Entwicklung der Auswertemethodik und der speziellen Formeln geht von der im WAPRO 1.42, Blatt 2, genannten Grundgleichung für Einzelbrunnen aus.

Absenkungsgleichung:

$$\phi_n - \phi = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot k} \psi(r, t) \quad (\text{A2/1}) \quad (1.42/02/1)$$

$$\psi = \psi_1 + \psi_2 : \text{spezifische Potentialdifferenz } (\psi_1 = 0) \quad (\text{A2/2})$$

$$\psi_2 = 2 \cdot K_0(r/B) \text{ (bei Speisung des GWL aus liegenden oder/und hangenden Schichten)} \quad (\text{A2/3}) \quad (1.42/02/10c)$$

Die Auswertung erfolgt nach TGL 23864/06 Abschnitt 1.1.2.2.

$$s = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot T} \cdot K_0(r/B) \quad (\text{A2/4}) \quad (6/3)$$

$$\text{Für } r/B \leq 0,05 \text{ gilt } K_0 \sim \ln(1,12 B/r) \quad (\text{A2/5}) \quad (1.42/\text{Tab.3})$$

$$s = \frac{0,366 \cdot Q}{T} \lg(1,12 B/r) \quad (\text{A2/6}) \quad (6/7)$$

Nach Auftragen der Funktion $s = f(\lg r)$ kann für den GWL_u T bestimmt werden:

$$T = \frac{0,366 \cdot Q}{\Delta s} \quad (\text{A2/7}) \quad (6/11)$$

Der Speisungsfaktor B für den GWL_0 wird bestimmt, indem aus dem Abschnitt $\lg r$ der graphischen Darstellung $s = f(\lg r)$ die Ausgleichsgerade mit der Achse $s = 0$ zum Schnitt gebracht und r_0 abgelesen wird, s. hierzu Bild A2/4

$$B = \frac{r_0}{1.12} = 0.9 \cdot r_0 \quad (A2/8) \quad (6/12)$$

Der k-Wert für die vertikale Durchströmung des GWL₀ wird abgeleitet aus der Formel für den B-Wert lt. TGL 23864/06 Pkt.1.1.

$$B = \sqrt{\frac{k_2 \cdot H \cdot b^0}{k_v}} \quad (A2/9) \quad (6/Bild 1)$$

$$k_v = \frac{k_2 \cdot M \cdot b^0}{B^2} \quad (A2/10)$$

A2.2.2. PV-Auswertung in geschichteten GWL und bei unvollkommenem Brunnenausbau

Die bei der Betrachtung des vollkommenen Brunnens abgeleitete Formel (A2/8) wird durch die Beachtung der Unvollkommenheit φ_1 erweitert:

$$s = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot T} \left[K_0(r/B) + 0.5 \cdot \varphi_1 \right] \quad (A2/11) \quad (6/3)$$

Die Größe φ_1 kann für GWBR aus der Größe σ berechnet werden, wobei σ aus den Tabellen der TGL 23864/08 entnommen wird.

Ausgehend von der Gleichung 1 der TGL 23864/08 und der Gleichung

$$\delta_n - \delta = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot k} (\varphi_1 + \varphi_2) \quad (1.42/02/1)$$

erhält man durch Umwandlung des natürlichen Logarithmus nach Wapro 1.42 in den dekadischen Logarithmus nach TGL 23864/08 den Ausdruck

$$\varphi_1 = 4.6 \cdot \sigma \quad (A2/12)$$

Setzt man (A2/12) in (A2/11) ein, so folgt:

$$s = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot T} \left[K_0(r/B) + 2.3 \cdot \sigma \right] \quad (A2/13)$$

für $0,1 < r < 0,34 B$ vereinfacht sich (A2/13) zu:

$$s = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot T} \left[\ln \frac{r^*}{r} + 2,3 \sigma \right] \quad (A2/14)$$

wobei r_0^* der Speisungsradius unter Beachtung der Unvollkommenheit ist. Bei vollkommenen Brunnen gilt: $r_0^* = 1,12 B$.

Für $r > M$ gilt immer $r_0^* = r_0$, analog dem Hinweis in TGL 23864/08

Da in A2/14) beide Summanden von r abhängen, folgt:

$$s = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot T} \cdot \ln \frac{r_0^*}{r^*} \quad (\text{A2/15})$$

$$\text{wobei } r^* = r \cdot e^{-2,3 \cdot d} \text{ bzw. } r_0^* = r_0 \cdot e^{-2,3 \cdot d} \quad (\text{A2/16})$$

die Berechnungsentfernung für einen Meßpunkt unter Beachtung der Unvollkommenheit des Brunnens ist.

Der Ausdruck (A2/15), grafisch aufgetragen, ergibt mit den Koordinaten s und $\lg r$ eine Gerade. Nach der Konstruktion der Ausgleichsgeraden ergibt sich bei bekannter Fördermenge Q der T -Wert des GWL_u aus zwei beliebigen Punkten dieser Geraden, z.B. $(s_1, \lg r_1^*)$ und $(s_2, \lg r_2^*)$ zu

$$T = \frac{0,366 \cdot Q}{d \cdot r^*} \quad \text{analog (A2/7)}$$

$$\text{Hierbei gilt: } d \cdot r^* = \frac{s_1 - s_2}{\lg r_1^* - \lg r_2^*} \quad (\text{A2/17})$$

Bild A2/4 zeigt die grafische Darstellung der Funktion $s = s(\lg r)$

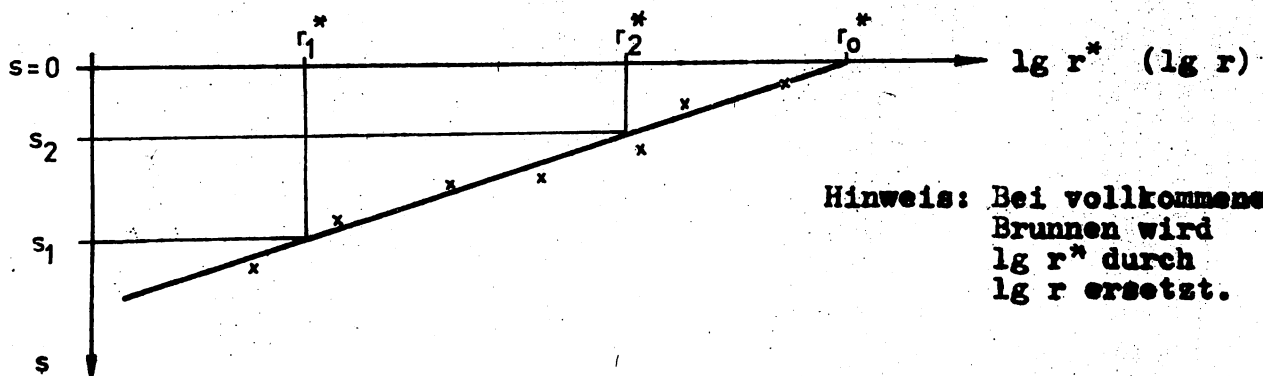


Bild A2/4 : Grafische Auftragung der Meßwerte für eine räumliche Auswertung

Der Speisungsfaktor wird aus dem Abschnitt $\lg r_0^*$ ermittelt, der sich auf der Achse $\lg r^*$ ergibt, wenn die Gerade bis $s = 0$ verlängert wird (siehe Bild A2/4).

$$B = \frac{r_0^*}{1,12} = 0,9 \cdot r_0^* \quad \text{analog (A2/8)}$$

Die Einbeziehung der Absenkungsmessung am Brunnen in die räumliche Auswertung ist nicht zu empfehlen, da der wirksame Brunnenradius nicht exakt erfassbar ist.

Die Absenkungen in den GWBR sind durch die Anordnung der Filterstrecken und dem unvollkommenen Versuchsbrunnenausbau stark beeinflusst. Eine räumliche Auswertung des PV ist ohne Umrechnung der Entfernungen, d.h. der Ermittlung der Berechnungsentfernungen nicht möglich.

Berechnung von T- und S-Werten unter Beachtung der Unvollkommenheit. Auswertung der Phase II (Der Verlauf der Phase II kann nur über die der Funktion $s=f(\lg t)$, s. Bild A2/2 festgelegt werden.) Auswertung nach TGL 23864/08.

GWBR 2

1. Bestimmung der Korrekturfaktors σ , s. TGL 23864/08, S.17, und Ermittlung der Berechnungsentfernungen.

$$\begin{aligned}\bar{l}_1 &= l_1/M = 28,0/36,7 = 0,76 \\ \bar{l}_2 &= l_2/M = 36,7/36,7 = 1 \\ \bar{r} &= r_2/M = 9/36,7 = 0,24 \\ \bar{z} &= z/M = 1/36,7 = 0,03\end{aligned}$$

Entsprechend den Tabellen auf S.18 ff gilt für

$$\bar{l}_1 : 0,8, \quad \bar{l}_2 : 1; \quad \bar{z} : 0; \quad \bar{r} : 0,25$$

ein Korrekturfaktor $\sigma = -0,37$

interpoliert für die realen Werte

$$\bar{l}_1 : 0,76; \quad \bar{l}_2 : 1; \quad \bar{z} : 0,03; \quad \bar{r} : 0,24$$

beträgt $\sigma = -0,39$

Die für die Auftragung der s-Werte zur Festlegung der Ausgleichsgeraden veränderte Entfernung r^* des GWBR 2 wird wie folgt bestimmt:

$$r^* = r \cdot e^{-2,3 \sigma} \quad (A2/16)$$

$$r^* = 9 \cdot e^{-2,3 (-0,39)} = 9 \cdot e^{0,9} = 22,1 \text{ m}$$

GWBR 1

$$\bar{r} = r_1/M = 5/36,7 = 0,14$$

$$\bar{z} = z_1/M = 36/36,7 = 0,98$$

$$\sigma = 1,20$$

$$r^* = 5 \cdot e^{-2,3 (1,20)} = 5 \cdot e^{-2,76} = 0,32 \text{ m}$$

GWBR 3

$$\bar{r} = 10/36,7 = 0,27$$

$$\bar{z} = 36/36,7 = 0,98$$

$$\sigma = 0,53$$

$$r^* = 10 \cdot e^{-2,3 (0,53)} = 10 \cdot e^{-1,22} = 2,95 \text{ m}$$

Ergebniszusammenfassung

GWBR	1	2	3
Entfernung r (m) vom Brunnen	5	9	10
Berechnungsent- fernung r^* (m)	0,32	22,10	2,95
Absenkung s (m)	0,97	0,5	0,79

Es wird die Kurve $s = f(\lg r^*)$ aufgetragen, s. Bild A2/6.

$$T = - \frac{0,366 \cdot Q}{d_r^*} = - \frac{0,366 \cdot 9 \cdot 10^{-3}}{-0,27} = 12 \cdot 10^{-3} \text{ m/s} \quad (6/11)$$

$$k = \frac{T}{M} = \frac{12 \cdot 10^{-3}}{36,7} = 0,33 \cdot 10^{-3} \text{ m/s} \quad (4/6)$$

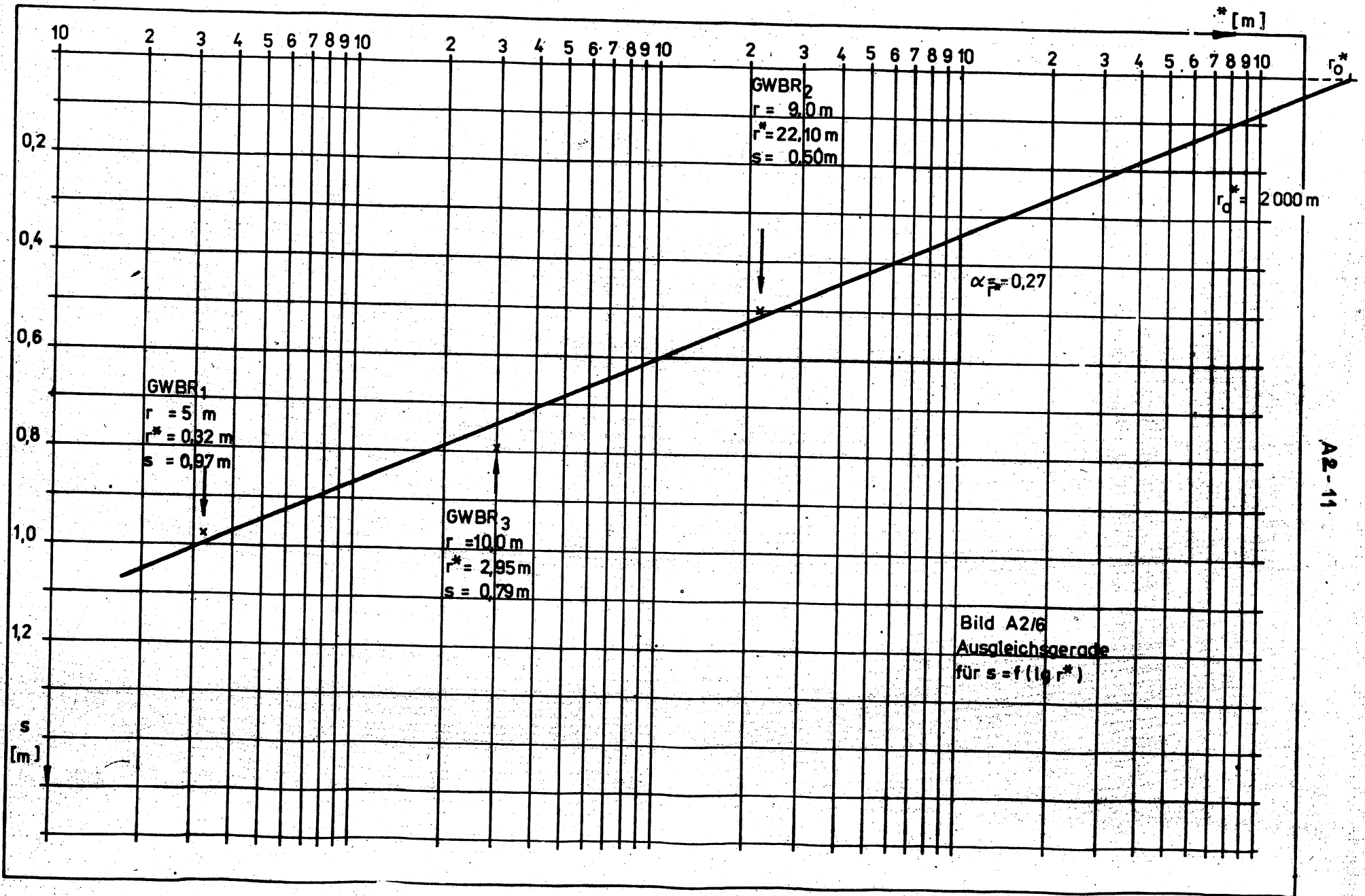
Da der Speisungsfaktor B aus dem Abschnitt $\lg r^*$ ermittelt wird ist die Ausgleichsgerade bis zur Achse $s = 0$ zu verlängern, es ergibt sich r_0^* . Aus Bild A2/6 erhält man:

$$r_0^* = 1190 \text{ m}$$

$$B = \frac{r_0^*}{1,12} = 1062,5 \text{ m} \quad (6/12)$$

$$k_v = \frac{k_2 \cdot M \cdot b^i}{B^2} = \frac{0,33 \cdot 10^{-3} \cdot 36,7 \cdot 14,6}{1062,5^2} = 0,16 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$$

(A2/10)



A2.3. Auswertung des zeitlichen Absenkungsverhaltens

A2.3.1. Vollkommener Brunnen und vollkommene GWBR

Die Auswertung erfolgt anhand des in Bild A2/7 dargestellten typischen zeitlichen Absenkungsverlaufes mit der Phaseinteilung.

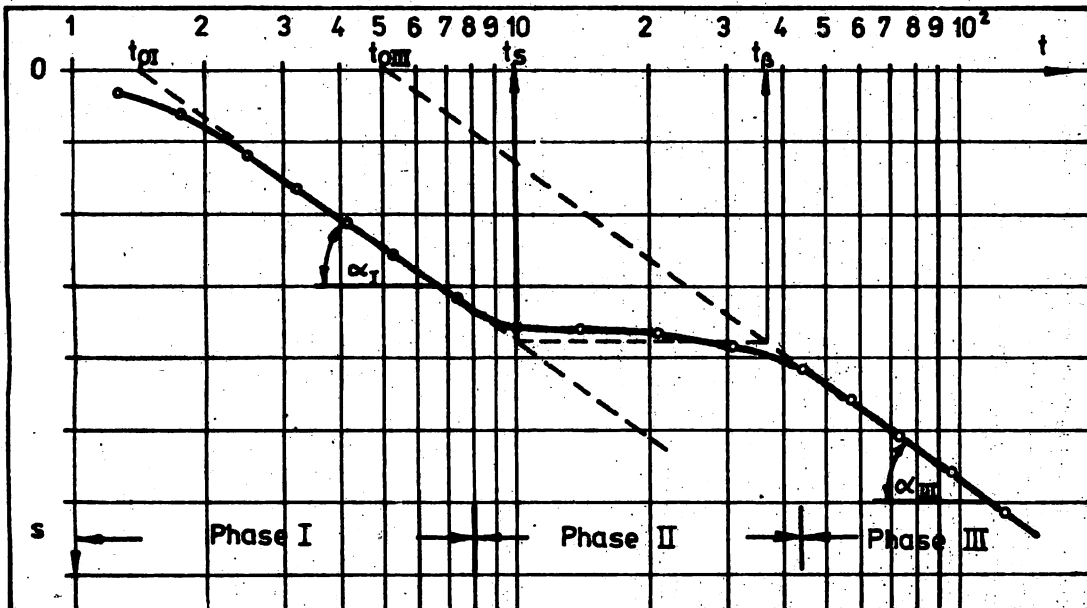


Bild A2/7 : Schema des zeitlichen Absenkungsverlaufes

Aus Phase I ergibt sich entsprechend TGL 23864 für den GWL_u

$$T_u = \frac{0,183 \cdot Q}{\alpha_I} \quad (\text{A2/18}) \quad (4/5)$$

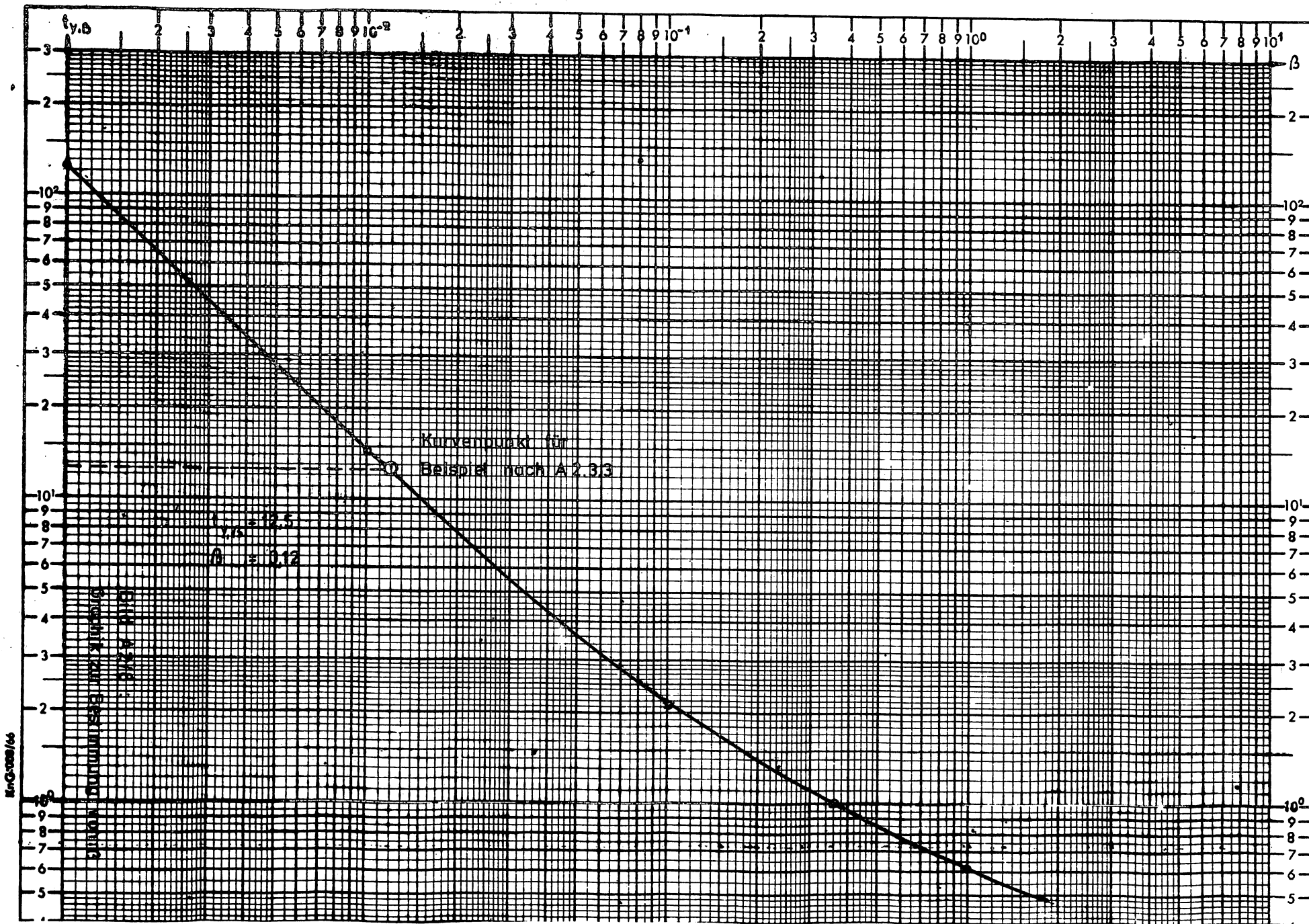
$$S_u = \frac{2,25 \cdot T_u \cdot t_{0,I}}{r^2} \quad (\text{A2/19}) \quad (4/7)$$

Aus Phase III ergibt sich entsprechend TGL 23864 für GWL_u

$$T_u = \frac{0,183 \cdot Q}{\alpha_{III}} \quad (\text{A2/20}) \quad (4/5)$$

und

$$S_o = \frac{2,25 \cdot T_u \cdot t_{0,III}}{r^2} \quad \text{für } GWL_o \quad (\text{A2/21}) \quad (4/7)$$



Zur Auswertung der Phase II wird die Hilfsgröße

$$t_{y,\beta} = \frac{T_u \cdot t_\beta}{S_o \cdot r^2} \quad (A2/22)$$

gebildet. Der dabei benötigte Wert t_β ergibt sich aus dem Schnittpunkt der horizontalen Ausgleichsgeraden der Phase II mit der Ausgleichsgeraden der Phase III, s. Bild A2/7. Wenn die Phase III nicht soweit ausgeprägt ist, daß eine Ausgleichsgerade bestimmbar ist, dann kann anstelle der Größe $t_{y,\beta}$ die Größe

$$t_{s,\beta} = \frac{T_u \cdot t_s}{S_u \cdot r^2} \quad (A2/23)$$

gebildet werden.

Der Wert t_s ergibt sich dann aus dem Schnittpunkt der horizontalen Ausgleichsgeraden der Phase II mit der Ausgleichsgeraden der Phase I, s. Bild A2/7

Im nächsten Arbeitsschritt wird eine weitere Hilfsgröße β gebildet, welche die Leitwertunterschiede in vertikaler und horizontaler Strömungsrichtung erfasst. Für

$$4 \leq \frac{t_{y,\beta}}{t_{s,\beta}} \leq 100$$

ergibt sich aus

$$\beta = \frac{0,195}{t_{y,\beta}^{1,105}} \quad \text{bzw.} \quad \beta = \frac{0,195}{t_{s,\beta}^{1,105}} \quad (A2/24)$$

Der Wert von β läßt sich auch aus der Graphik Bild A2/8 ermitteln, die einen weiteren Geltungsbereich hat und im Bedarfsfall auch über den dargestellten Bereich hinaus extrapolierbar ist.

Den k-Wert für die vertikale Durchströmung des GWL_o erhält man schließlich aus

$$k_v \approx 3 \cdot \frac{\beta \cdot b' \cdot T_u}{r^2} \quad (A2/25)$$

Der Faktor "3" in Gleichung A2/25 wurde hypothetisch aus numerischen Berechnungen und Vergleichen mit dem Auswerteschema nach dem mathematischen Modell von HANTUSH gewonnen. Der Grund liegt darin, daß das mathematische Modell von NEUMANN für den homogenen anisotropen GWL abgeleitet wurde und bei dem hier betrachteten zweischichtigen GWL andere Strömungsverhältnisse auftreten. Bei dem in der Literatur sehr

verbreiteten Auswerteverfahren von BOULTON hat dieser Unterschied keine Bedeutung, da im BOULTON'schen Dränfaktor B , der der Größe von NEUMANN entspricht, ein hypothetisch gewonnener "BOULTON'scher Verzögerungsindex" enthalten ist. Dieser gestattet es nicht, den Wert B nach dem k -Wert des GWL_0 aufzulösen.

A2.3.2. Unvollkommener Brunnen und unvollkommene GWBR

Das Verfahren der Ausgleichsgeraden, entsprechend Abschnitt A2.3.1., gilt in vollem Maße auch für unvollkommene Brunnen und GWBR, wenn die Bedingung

$$r_{GWBR} > M$$

eingehalten ist. Für den brunnennahen Bereich kann die Auswertung insbesondere bei ausgeprägter Unvollkommenheit des Brunnens, nach dem Verfahren der typischen Kurven erfolgen. Diese sind dann für die konkreten Ausbauverhältnisse nach der von NEUMANN angegebenen Gleichung zu berechnen.

A2.3.3. Praktisches Beispiel

Bei einem Pumpversuch an einem Hochleistungsbrunnen wurden die in Bild A2/9 dargestellten geologischen Verhältnisse angetroffen.

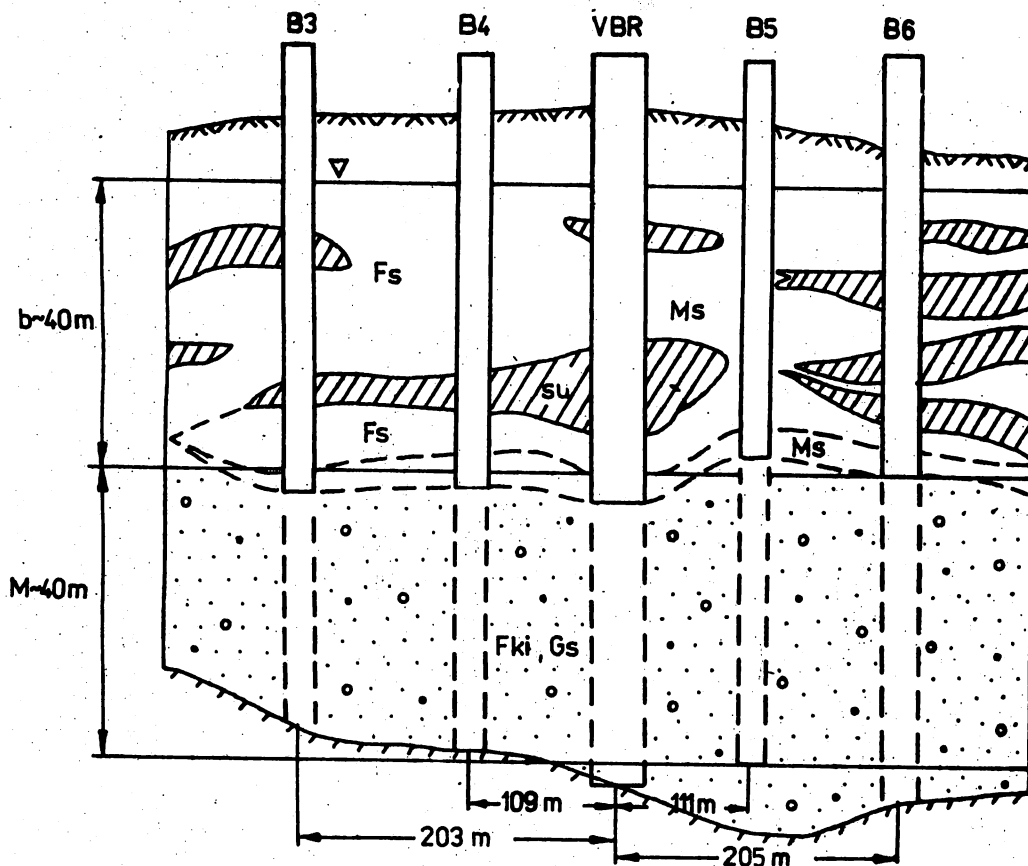


Bild A2/9 : Schema der geologischen Verhältnisse

Dieser Aufbau lässt sich bezüglich der Durchlässigkeitsverhältnisse sehr gut in ein Zweischichtmodell überführen und auf der Grundlage der angegebenen Lösung auswerten. Die eingetragenen Brunnen 3....6 einer neuen Fassung wurden als GWBR benutzt. Der GWL ist als theoretisch unendlich ausgedehnt zu betrachten. Die Auswertung erfolgt für das GWBR "B 3", dessen zeitlicher Absenkungsverlauf im Bild A2/10 eingetragen ist. Als charakteristische Größen für die Auswertung ergeben sich :

$t_{0, I}$	=	90 s
$t_{0, III}$	=	1500 s
t_{β}	=	42000 s
d_{I}	=	0,28 m
d_{III}	=	0,28 m

die weiteren benötigten Größen sind:

$$Q = 0,150 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$r = 203 \text{ m}$$

$$M = 40 \text{ m}$$

Bei der Auswertung des Gravitationsregimes der Phase III ergibt sich:

$$\text{Für } \text{GWL}_u : T_u = \frac{0,183 \cdot Q}{\alpha_{III}} = \frac{0,183 \cdot 0,150}{0,28} = 0,098 \text{ m}^2/\text{s} \quad (\text{A2/20})$$

$$k_2 = \frac{T_u}{M} = \frac{0,098}{40} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s} \quad (4/6)$$

$$\text{GWL}_o : S_o = \frac{2,25 \cdot T_u \cdot t_{o,III}}{r^2} = \frac{2,25 \cdot 0,098 \cdot 1500}{203^2} = 8 \cdot 10^{-3} \quad (\text{A2/21})$$

Bei der Auswertung des elastischen Regimes der Phase I ergibt sich:

$$\text{Für } \text{GWL}_u : T_u = \frac{0,183 \cdot Q}{\alpha_I} = \frac{0,183 \cdot 0,150}{0,28} = 0,098 \text{ m}^2/\text{s} \quad (\text{A2/18})$$

$$S_u = \frac{2,25 \cdot T_u \cdot t_{o,I}}{r^2} = \frac{2,25 \cdot 0,098 \cdot 90}{203^2} = 4,8 \cdot 10^{-4} \quad (\text{A2/19})$$

Bei der Auswertung des Regimes mit verzögerter Wasserabgabe der Phase II erhält man aus der dimensionslosen Zeit $t_{y,\beta}$

$$t_{y,\beta} = \frac{T_u \cdot t_n}{(S_o \cdot r^2)} = \frac{0,098 \cdot 42000}{(8 \cdot 10^{-3} \cdot 203^2)} = 12,5 \quad (\text{A2/22})$$

den Wert von β zu

$$\beta = \frac{0,195}{t_{y,\beta}^{1,105}} = \frac{0,195}{12,5^{1,105}} = 0,012 \quad (\text{A2/24})$$

oder aus Graphik Bild A2/8 : $\beta = 1,2 \cdot 10^{-2} = 0,012$

Hieraus ergibt sich dann der Wert für die vertikale Durchströmung des GWL_o :

$$k_v \sim 3 \cdot \frac{\beta \cdot b' \cdot T_u}{r^2} = 3 \cdot \frac{0,012 \cdot 40 \cdot 0,098}{203^2} \quad (\text{A2/25})$$

$$k_v \sim 3,4 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$$

Der Wert γ zur Einschätzung der Auswertbarkeit der Phase II ergibt sich zu (s. Abschn.A2.1)

$$\gamma = 1 + S_o / S_u = 1 + 8 \cdot 10^{-3} / 4,8 \cdot 10^{-4} = 18$$

was bedeutet, daß ein horizontaler Ausgleich der Phase II zulässig ist.

Wenn Messungen von mehreren GWBR vorliegen, dann sollte unbedingt eine Auftragung des zeitlichen Absenkungsverlaufes in der Form $s = f(\lg t/r^2)$ erfolgen. Das dabei entstehende Bild ist ein wichtiges Diagnosekriterium dafür, ob der angenommene zweischichtige GWL-Aufbau auch tatsächlich zutrifft. Das Bild A2/11 zeigt diese Auftragung für die gemessenen GWBR "B3"..."B6". Dabei ist deutlich zu erkennen, daß die Meßpunkte der Phase I auf einer Kurve liegen, daß in der Phase II eine Auffächerung in Abhängigkeit von der Entfernung r erfolgt und in der Phase III die Meßwerte wieder in eine einheitliche Kurve übergehen. Dieses Verhalten ist charakteristisch für einen zweischichtigen GWL und bestätigt die durchgeführte zeitliche Auswertung. Eine weitere Diagnosemöglichkeit erhält man, wenn die in der nachfolgenden Skizze gezeigten GWBR in einem Diagramm ausgewertet werden. Während dabei das GWBR im unteren Grundwasserleiter das typische 3-Phasen Verhalten zeigt, beginnt die Absenkung des GWBR in der Nähe der freien Oberfläche wesentlich später und ist dann identisch mit dem Absenkungsverhalten der Phase III des unteren GWBR.

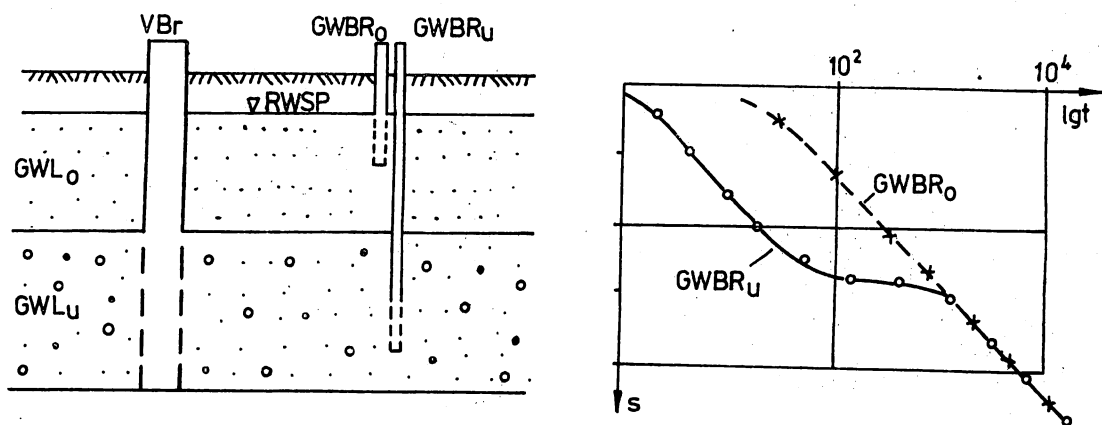
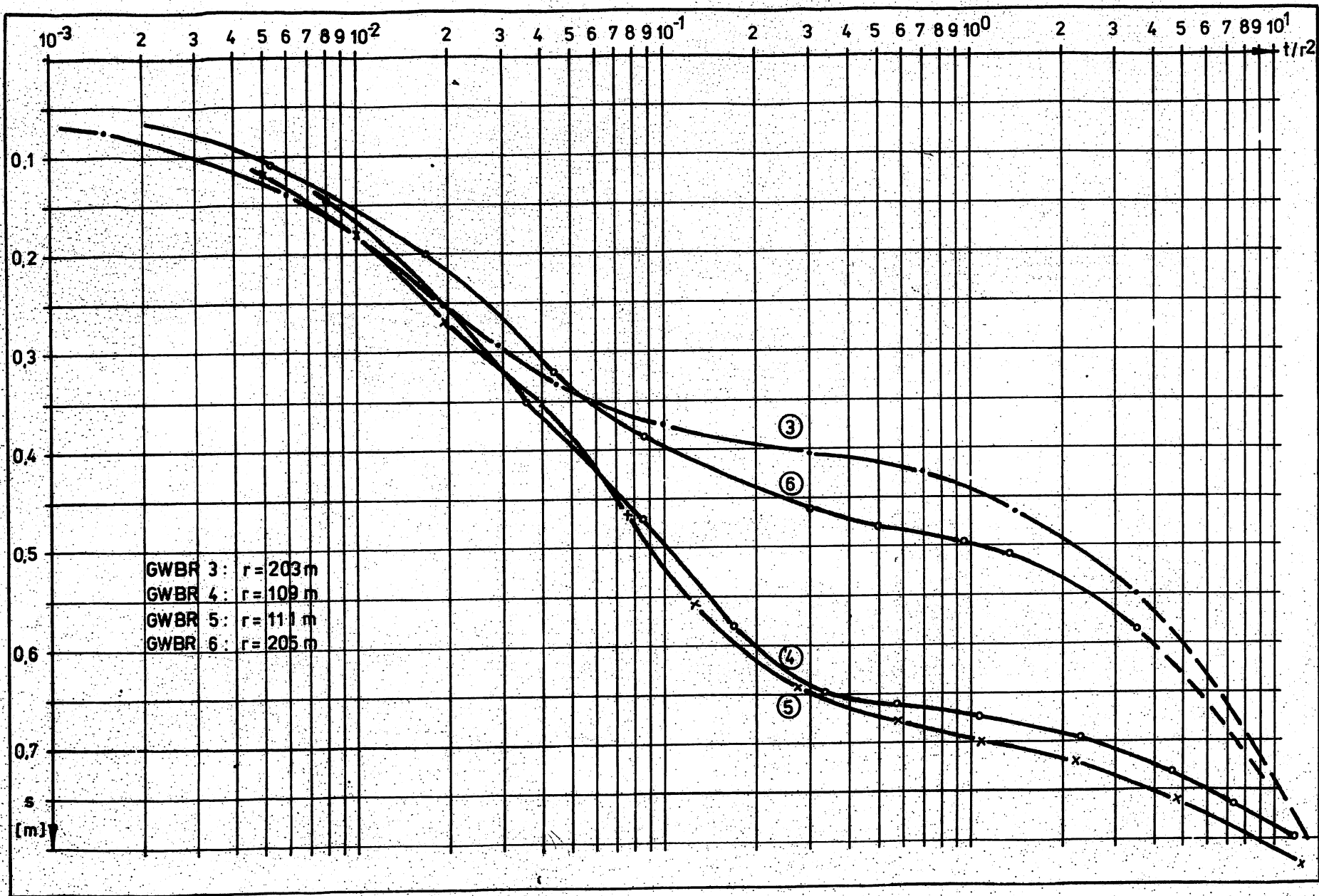


Bild A2/11 Zeitlicher Absenkungsverlauf $s = f[\log(t/r^2)]$



A3. Auswertung von Messungen am Versuchsbrunnen unter Beachtung des instationären Anteils der spezifischen Potentialdifferenz \mathcal{P}_1 infolge der Unvollkommenheit

A3.1. Allgemeine Ausführungen

Liegen nur Meßergebnisse eines unvollkommenen Versuchsbrunnens vor und keine Messungen an GWBR, so ist zur T-bzw.a-Wertbestimmung ein iteratives Herangehen notwendig.

Der Berechnungsweg wird nachfolgend unter Beachtung des Bildes A3/13 entwickelt. (B. A3/13 gehört zum praktischen Beispiel, s. Pkt. A3.3.)

In diesem Bild stellt die Kurve 1 die Absenkung im Brunnen dar, und zwar als $s_u = f(\lg t)$. Diese Kurve zeigt eine Krümmung, welche aus dem nichtstationären Charakter der spezifischen Potentialdifferenz \mathcal{P}_1 resultiert. Die Konstruktion einer Ausgleichsgeraden zur Parameterberechnung ist nicht mehr möglich, und es muß aus diesem Grunde die Funktion $s \hat{=} s_u - f(\lg t)$ entzerrt werden. Die dafür erforderlichen Betrachtungen sind sehr zeitaufwendig, aber notwendig, um zu gültigen Parametern zu gelangen. Für den Fall aber, daß die Absenkungskurve nachfolgend in einen linearen Kurvenverlauf übergeht, sollte nur dieser, wenn er durch genügend Meßpunkte belegt ist, nach der TGL 23864/04 + für den Wiederanstieg 05 ausgewertet werden.

Die spezifische Potentialdifferenz \mathcal{P}_1 muß bei der Brunnenberechnung unbedingt beachtet werden.

$$\mathcal{P}_1 = \mathcal{P}_{01} - \mathcal{P}_{t1} \quad (\text{A3/1}) \quad (1.42/02/7)$$

\mathcal{P}_{01} : stationärer Anteil

\mathcal{P}_{t1} : instationärer Anteil

In dem Bild A3/14 im Pkt. A3.3 sind die Anteile \mathcal{P}_{01} u. \mathcal{P}_{t1} für die Kurve $\mathcal{P}_1(\sigma)$ dargestellt.

Da \mathcal{P}_{t1} eine Funktion von t, somit auch von σ ist, gilt dasselbe auch für \mathcal{P}_1 .

Um \mathcal{P}_1 ermitteln zu können, wurden für verschiedene Verhältnisse L/M und M/r₀ die Funktionen $\mathcal{P}_1(\sigma)$ errechnet. Diese sind als Kurven in den Bildern A3/1 bis A3/9 dargestellt und sind ein wichtiges Arbeitsmaterial.

L : Filterlänge
M : Grundwasserleiternächtigkeit
 r_0 : Bohrlochdurchmesser

Für δ gilt :

$$\delta = \frac{r_0^2 \cdot a}{4 \cdot t} \quad ; \quad a = \frac{S}{T} \quad (A3/2) \quad (1.42/02/Seite$$

Aus dem Bild A3/14 und den Bildern A3/1 ... A3/9 wird erkannt, daß für

$$\lim_{\delta \rightarrow 0} \text{ gilt: } \varphi_1(\delta) \rightarrow \varphi_{01}$$

Das bedeutet, φ_{01} stellt den stationären Endzustand der Funktion $\varphi_1(\delta)$ dar.

Die Kurve 2 im Bild A3/13 zeigt die Absenkungsfunktion des Brunnens für $\varphi_1(\delta) = \varphi_{01}$.

Es gelten folgende Absenkungsgleichungen

- vollkommener Brunnen

$$s_v = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \left(\ln \frac{2,25 \cdot t}{a \cdot r^2} \right) \quad (A3/3) \quad (1.42/02/1+9b)$$

- unvollkommener Brunnen

$$s_u = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \left[\ln \frac{2,25 \cdot t}{a \cdot r^2} + \varphi_1(\delta) \right] \quad (A3/4) \quad (1.42/02/1+9b+7)$$

spezifische Potentialdifferenz infolge Unvollkommenheit :

$$\varphi_1(\delta) = \frac{2}{\pi^2} \left(\frac{M}{L} \right)^2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{n} \sin \left(n \cdot \pi \cdot \frac{L}{M} \right) \right]^2 \cdot W(\delta, b_n) \quad (A3/5)$$

$W(\delta, b_n)$ - Brunnenfunktion von HANTUSH

$$b_n = \pi \cdot n \cdot \frac{r_0}{M} \quad (A3/6)$$

Zur Bestimmung von T sind folgende Teilschritte notwendig :

- Annahme eines wahrscheinlichen a-Wertes
- Bestimmung von δ für ausgewählte Zeitpunkte nach Formel 2 (siehe dazu Bild A3/13)
- Bestimmung der Verhältnisse L/M und M/r₀ unter Beachtung der speziellen Hinweise in A3.2.
- Ablesen der Werte für φ_1 (δ) aus den Kurvenscharen der Bilder A3/1 ...A3/9 für jeden ausgewählten Zeitpunkt.
- Berechnung der Hilfsgrößen

$$\frac{\varphi_1}{2,3} ; \lg t \text{ und } t^* = \lg t + \frac{\varphi_1}{2,3}$$

für jeden ausgewählten Zeitpunkt

- Auftragung der Absenkung über den berechneten t* -Werten auf Millimeterpapier.
- Stellt die Funktion $s_u = s_u(t^*)$ eine Gerade dar, so kann wie im Bild A3/15 der Anstieg der Geraden nach

$$\alpha_{t^*} = \frac{s_2 - s_1}{\lg(t_2^*/t_1^*)} = \frac{\Delta s}{\Delta t^*} \quad (\text{analog 4/4})$$

bestimmt werden. (Bild A3/15 gehört zum praktischen Beispiel, s. Pkt. A3.3.)

Nach der Gleichung

$$T = \frac{0,183 \cdot Q}{\alpha_{t^*}} \quad (\text{analog 4/5})$$

wird somit die Transmissibilität errechnet.

Der angenommene a-Wert kann dann als exakt angesehen werden.

Anschließend ist das Gültigkeitskriterium

$$t \geq 3,8 a r_0^2 \quad (4/2)$$

zu überprüfen.

- Weist $s_u = s_u(t^*)$ eine Krümmung auf (siehe Bild A3/15 Kurve V₁), so sind alle Teilschritte mit einem anderen geschätzten a-Wert durchzuführen.

A3.2. Beachtung der Filterlage

Die Anordnung des Filters im unvollkommenen ausgebauten Brunnen ist unbedingt bei der Bestimmung der Verhältnisse $\frac{L}{M}$ und $\frac{M}{r_0}$ zu beachten, um den gültigen Wert $\varphi_1(\delta)$ ablesen zu können.

Liegt der Filter am liegenden oder hangenden Stauer an bzw. schließt er mit der freien Grundwasseroberfläche ab, so werden die Brunnenparameter $\frac{L}{M}$ und $\frac{M}{r_0}$ unverändert zur $\varphi_1(\delta)$ -Bestimmung benutzt. Liegt der Filter nicht an den genannten Grenzen an, so muß die Größe

$$\frac{M}{r_0} \text{ durch } \frac{M}{f \cdot r_0}$$

ersetzt werden.

Der Faktor f hängt dabei von der Lage des Filters ab, die wiederum durch die Größe μ definiert wird. Im Bild A3/10 werden die diesbezüglichen Zusammenhänge dargestellt.

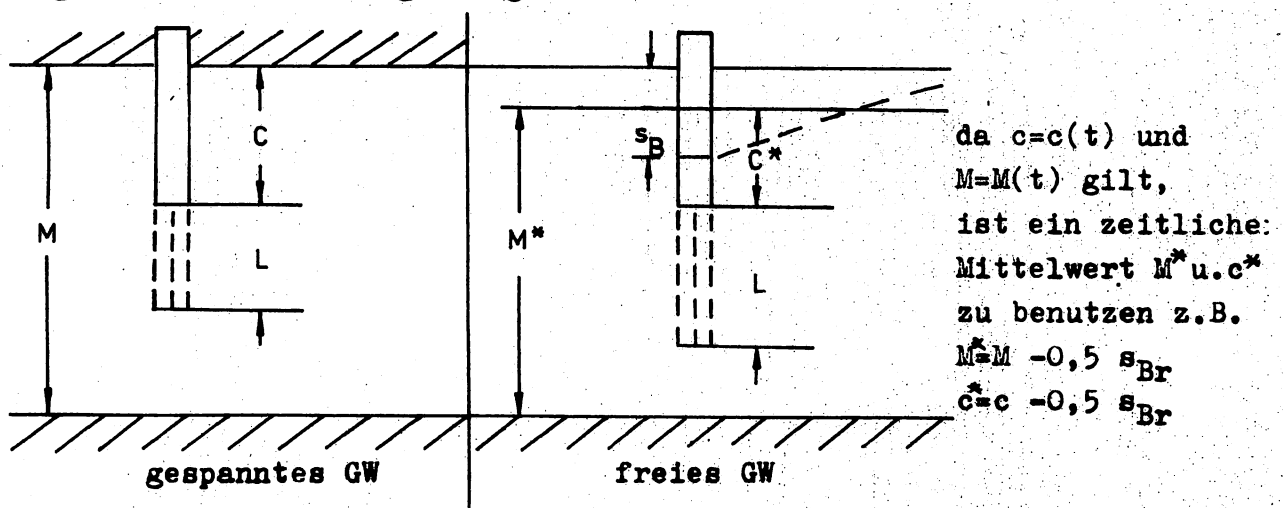


Bild A3/10: Hilfsgrößen zur Bestimmung des Filterfaktors f

Für μ gilt

$$\mu = \frac{2c}{M-L} \quad (A3/7)$$

sobald μ bekannt ist, kann f aus der Graphik des Bildes A3/11 bestimmt werden

Mit dem Wertepaar

$$\frac{M}{f \cdot r_0} \quad \text{und} \quad \frac{L}{M}$$

kann aus den Bildern A3/1...A3/9 $\varphi_1(\delta)$ abgelesen oder durch Interpolation berechnet werden.

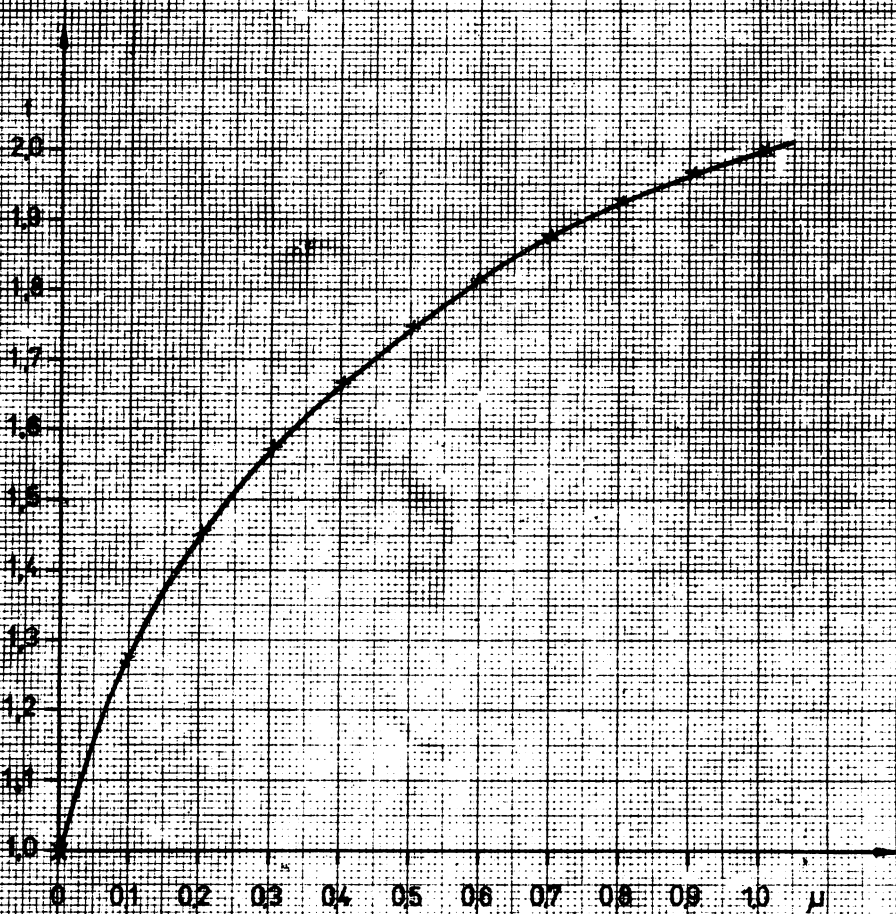


Bild A3/11 :

Bestimmung des Filtergefaktors f

A3.3. Praktisches Beispiel

Pumpversuchsauswertung für den nach Bild A3/12 ausgebauten Brunnen und Förderdaten .

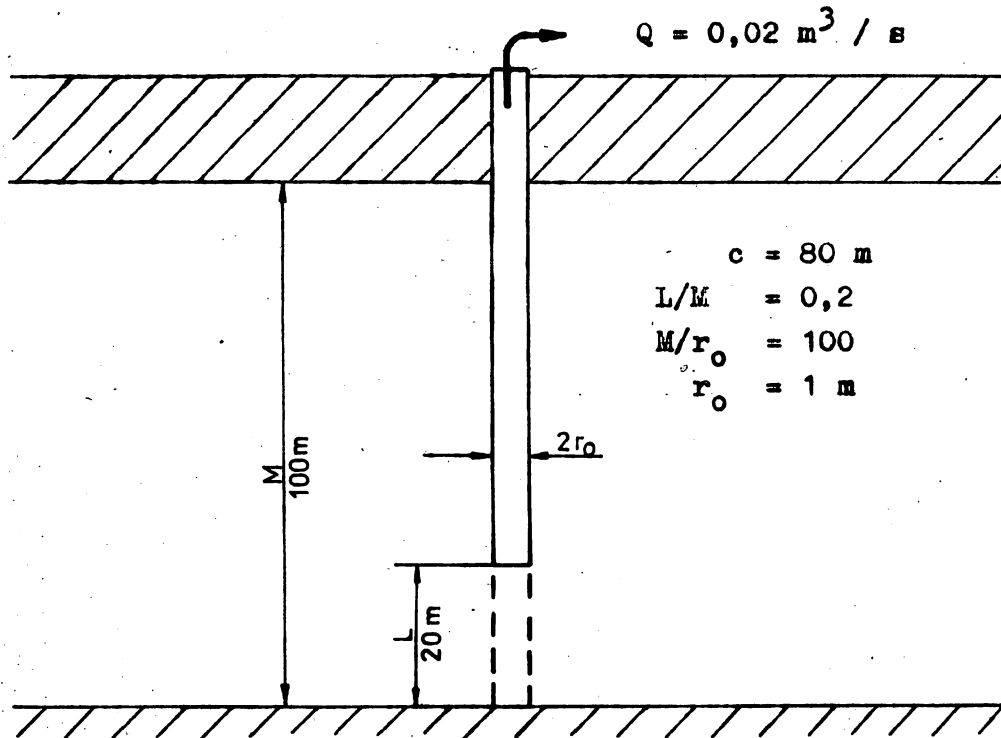
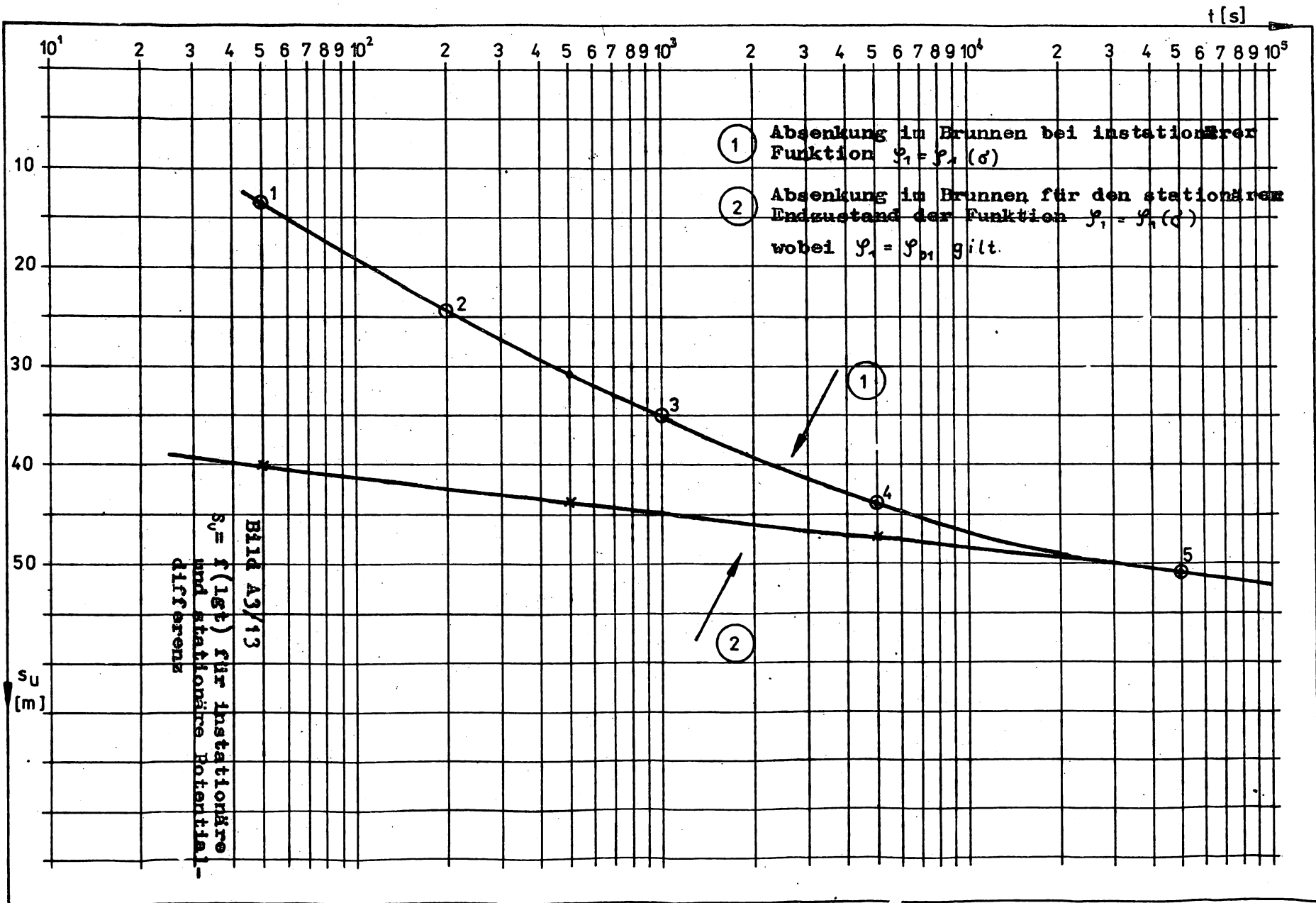


Bild A3/12 Brunnenausbau für Beispielsrechnung

Die Absenkung im Brunnen beträgt zu den ausgewählten Zeitpunkten :

Punkt Nr.	t (sec)	s (m)
1	50	1,40
2	200	2,45
3	1000	3,55
4	5000	4,40
5	50000	5,10



Im Bild A3/13 sind diese Werte aufgetragen und als Kurve 1 dargestellt. Die Krümmung der Kurve weist darauf hin, daß der nichtstationäre Teil der Unvollkommenheit des Brunnens beachtet werden muß, indem die Potentialdifferenz φ_1 in die Parameterberechnung mit aufzunehmen ist.

$$s = f(\lg t) \text{ wird zu } s_u = f(\lg t)$$

In der Variante 1 wird $a = 5,0 \text{ s/m}^2$ gewählt.

Für die o.a. ausgewählten Zeitpunkte werden die Hilfsgrößen errechnet.

Punkt Nr.	t (sec)	δ	φ_1	$\frac{\varphi_1}{2,3}$	$\lg t$	t^*	$s(t^*)$
1	50	$2,5 \cdot 10^{-2}$	12,0	5,22	1,7	6,92	1,40
2	200	$6,25 \cdot 10^{-3}$	16,4	7,13	2,3	9,43	2,45
3	1000	$1,25 \cdot 10^{-3}$	20,7	9,00	3,0	12,00	3,55
4	5000	$2,5 \cdot 10^{-4}$	22,8	9,91	3,7	13,61	4,40
5	50000	$2,5 \cdot 10^{-5}$	23,2	10,09	4,7	14,79	5,10

Bestimmung von

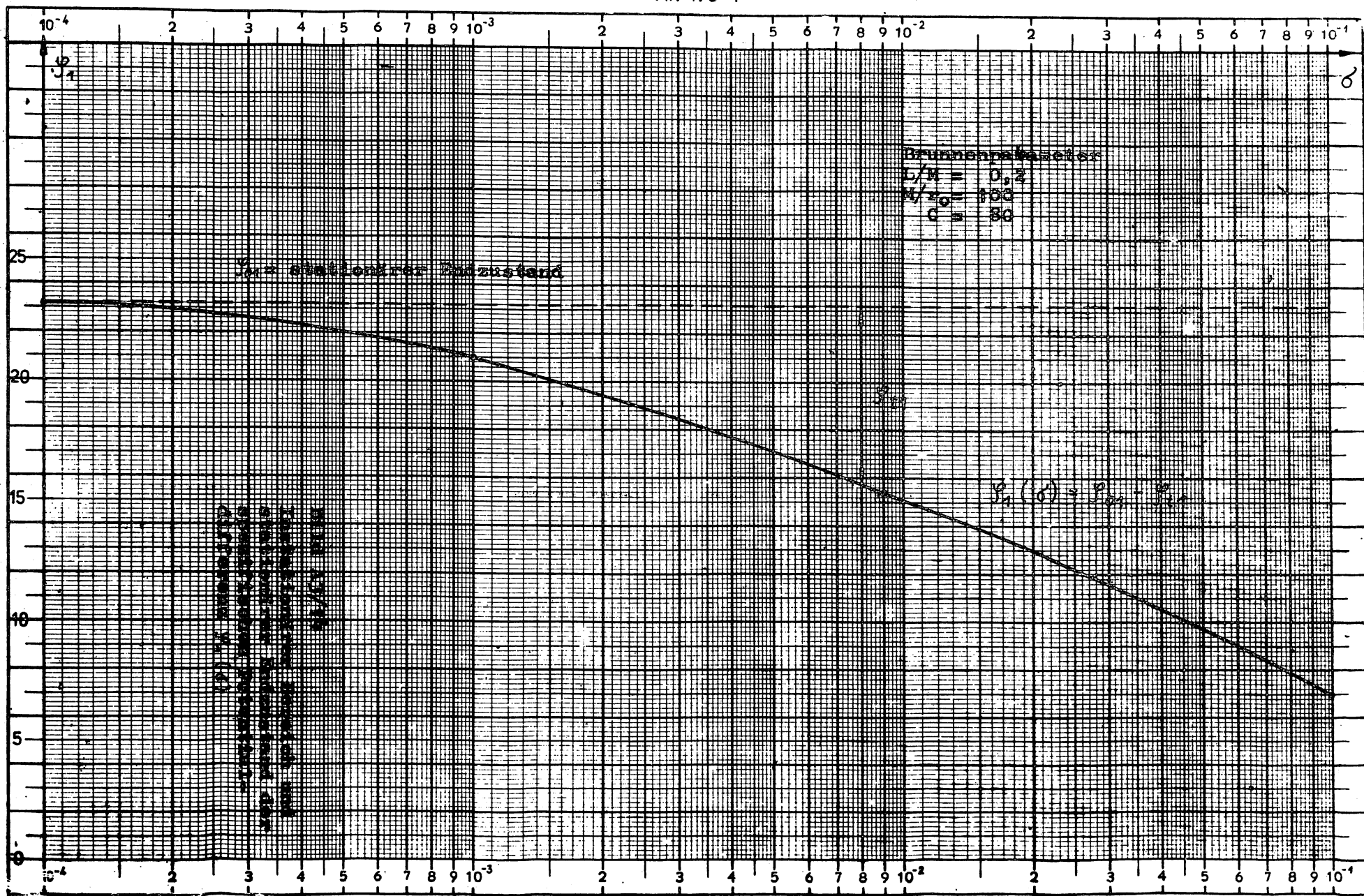
$$\delta = \frac{r_0 \cdot a}{4 \cdot t} = \frac{1 \cdot 5}{4 \cdot t} = \frac{1,25}{t} \quad (\text{A3/2})$$

- $\varphi_1(\delta)$: Werte werden aus der Kurvenschar der Bilder A3/1bis A3/9 abgelesen, hierfür werden benötigt:

$$\frac{M}{r_0} = \frac{100}{1} = 100; \quad \frac{L}{M} = \frac{20}{100} = 0,2;$$

Es gilt die spezielle Kurve im Bild A3/8 für die o.a. Verhältnisse. Für dieses Beispiel wurde die Kurve im Bild A3/14 noch einmal besonders dargestellt. (Die Bilder A3/1...A3/9 zeigen nur φ_1 -Werte für $\delta < 1 \cdot 10^{-2}$; größere Werte sind selten und wurden in die Kurven nicht mit aufgenommen.)

$$t^* = \lg t + \frac{\varphi_1}{2,3}$$



Mit der durchgeführten Umrechnung wurde die Entzerrung der Kurve 1, $s_u = f(\lg t)$, s. Bild A3/13, vorgenommen. Auf Millimeterpapier wird die Funktion $s_u = s_u(t^x)$ aufgetragen, s. Bild A3/15, Kurve V₁. Die gewählte Variante ergibt aber keine Gerade; es wird eine Krümmung erkannt, das bedeutet, daß der a-Wert falsch angenommen wurde, eine Neuberechnung wird erforderlich.

Variante 2 : a-Wert : 20 s/m²

Berechnung der Hilfsgrößen :

Punkt Nr.	t (sec)	δ	φ_1	$\frac{\varphi_1}{2,3}$	lg t	t^x	s_u (m)
1	50	$1 \cdot 10^{-4}$	7,0	3,04	1,7	4,74	1,40
2	200	$2,5 \cdot 10^{-2}$	12,0	5,22	2,3	7,52	2,45
3	1000	$5 \cdot 10^{-3}$	17,2	7,48	3,0	10,48	3,55
4	5000	$1 \cdot 10^{-3}$	21,2	9,22	3,7	12,92	4,40
5	50000	$1 \cdot 10^{-4}$	23,2	10,09	4,7	14,79	5,10

Die Auftragung von $s_u = s_u(t^x)$ ergibt die Kurve V 2 im Bild A3/15. Es handelt sich um eine Gerade, das heißt, der angenommene a-Wert ist exakt. Die Iteration wird abgebrochen. T kann berechnet werden. Aus Kurve V 2 ergibt sich ein Anstieg von

$$\alpha_{t^x} = \frac{\Delta s}{\Delta t^x} = 0,375$$

$$T = \frac{0,183 \cdot 0,02}{0,375} = \underline{\underline{0,00976 \text{ m}^2/\text{s}}} \sim \underline{\underline{1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}}} \quad (\text{analog 4/5})$$

$$k = T/M = \underline{\underline{9,76 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}}} \sim \underline{\underline{1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}}} \quad (4/6)$$

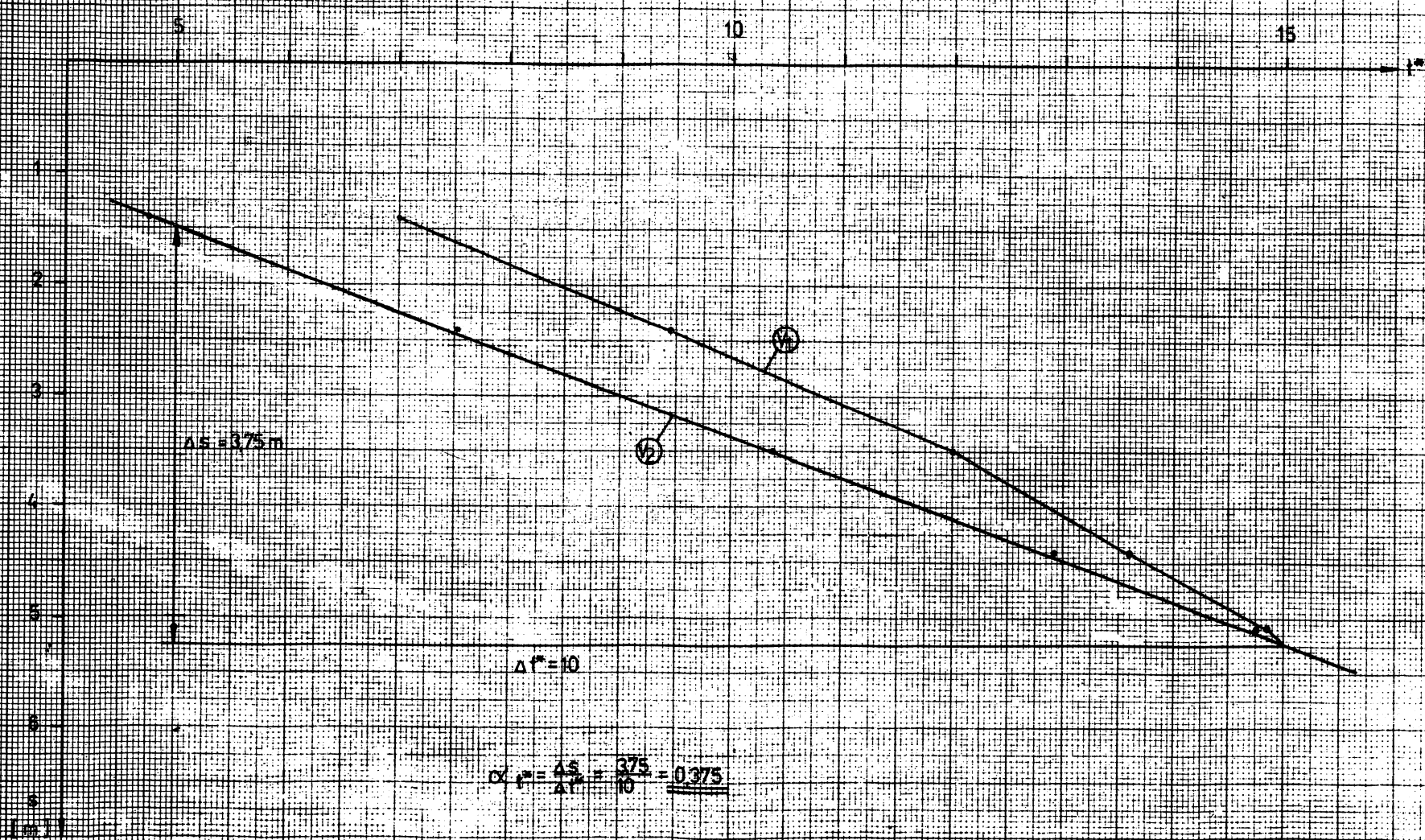
Erfüllung des Gültigkeitskriteriums :

$$t \geq 3,8 \cdot a \cdot r^2$$

$$3,8 \cdot 20 \cdot 1^2 = \underline{\underline{76 \text{ s}}} \quad (4/2)$$

Die Meßergebnisse ab der 76.sec liegen im gültigen Bereich. Somit ist die Auswertung der Geraden aus Bild A3/15 zwecks T-Berechnung exakt.

SOLID ANGLE DISTRIBUTION OF RADIATION FROM SURFACE



Nr. 495 T

L/M = 0,9

Zunahme in % 0 5 100 200 250 300 usw. → Abnahme in % usw. ← 8 50 40 30 20 10 0

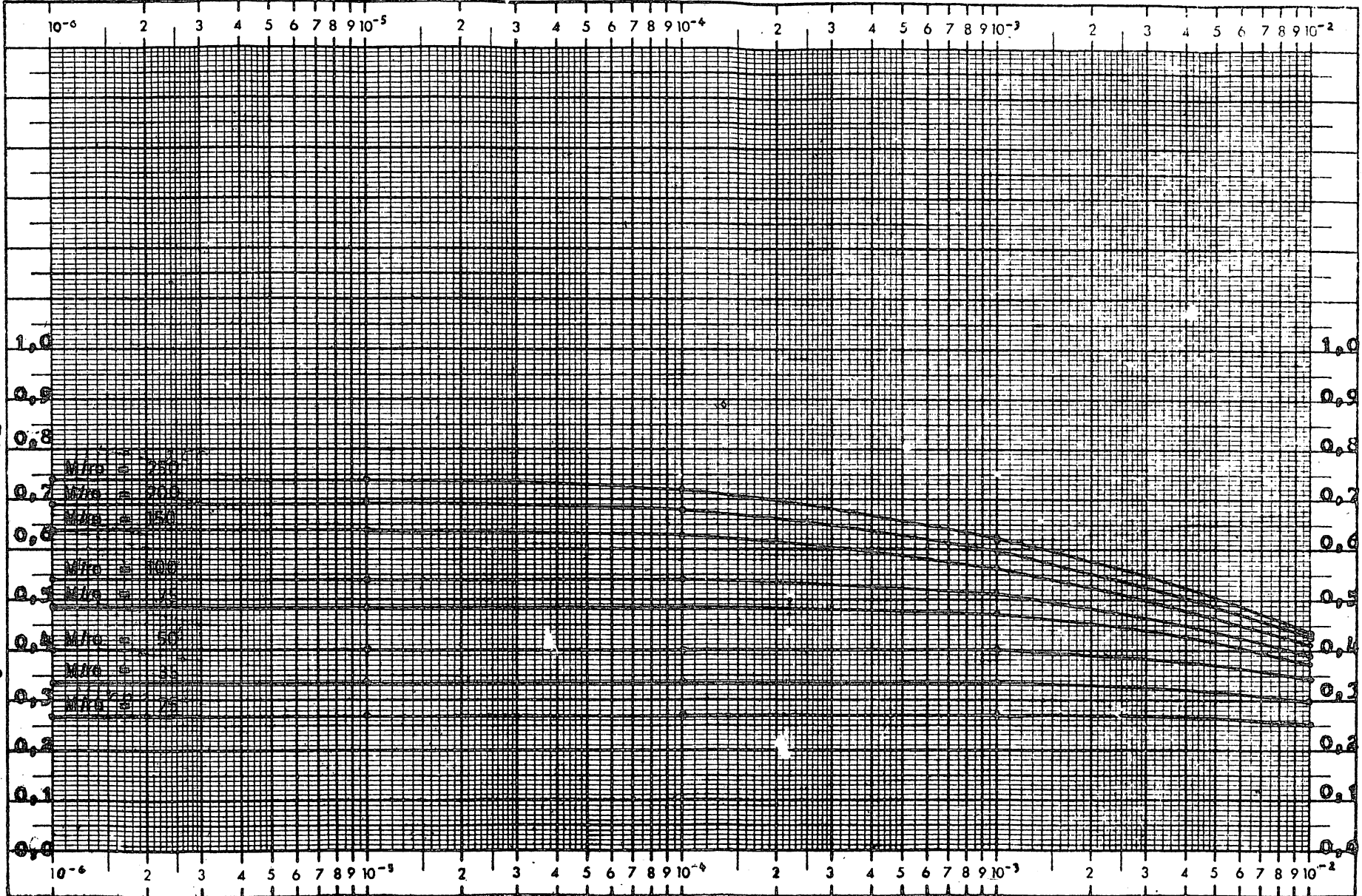


BILD 537, Funktion $\varphi_1(\delta)$ für L/M=0,9

Die Achse logar. geteilt von 1 bis 10^4 Einheit 62,5 mm, die andere in cm mit Prozentmaßstab

3 →

1
9
1

A3-12

Nr. 495 T

$L/M = 0,6$

Zunahme in % 0 5 100 200 300 → US%
← US% 0 5 100 200 300 Abnahme in %

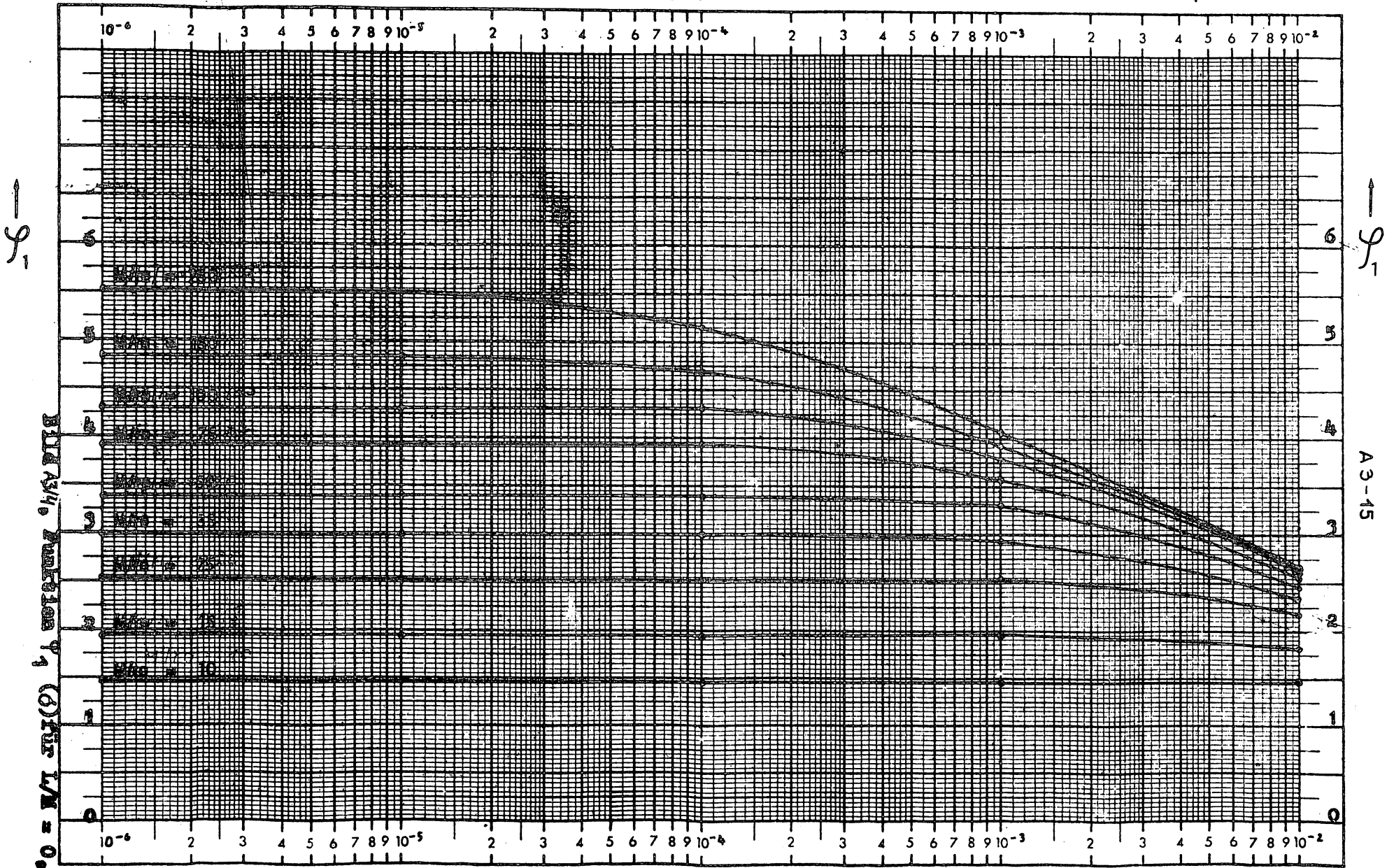


BILD A3/15, Funktion $y_1(0)$ für $L/M = 0,6$

Eine Achse logar. geteilt von 1 bis 10^4 Einheit 62,5 mm, die andere in mm mit Prozentmaßstab

6 →

Nr. 495 T

$L/M = 0,4$

Zunahme in % 0 50 100 200 250 300 usw. → Abnahme in % ← usw. 8 5 3 2 1 0

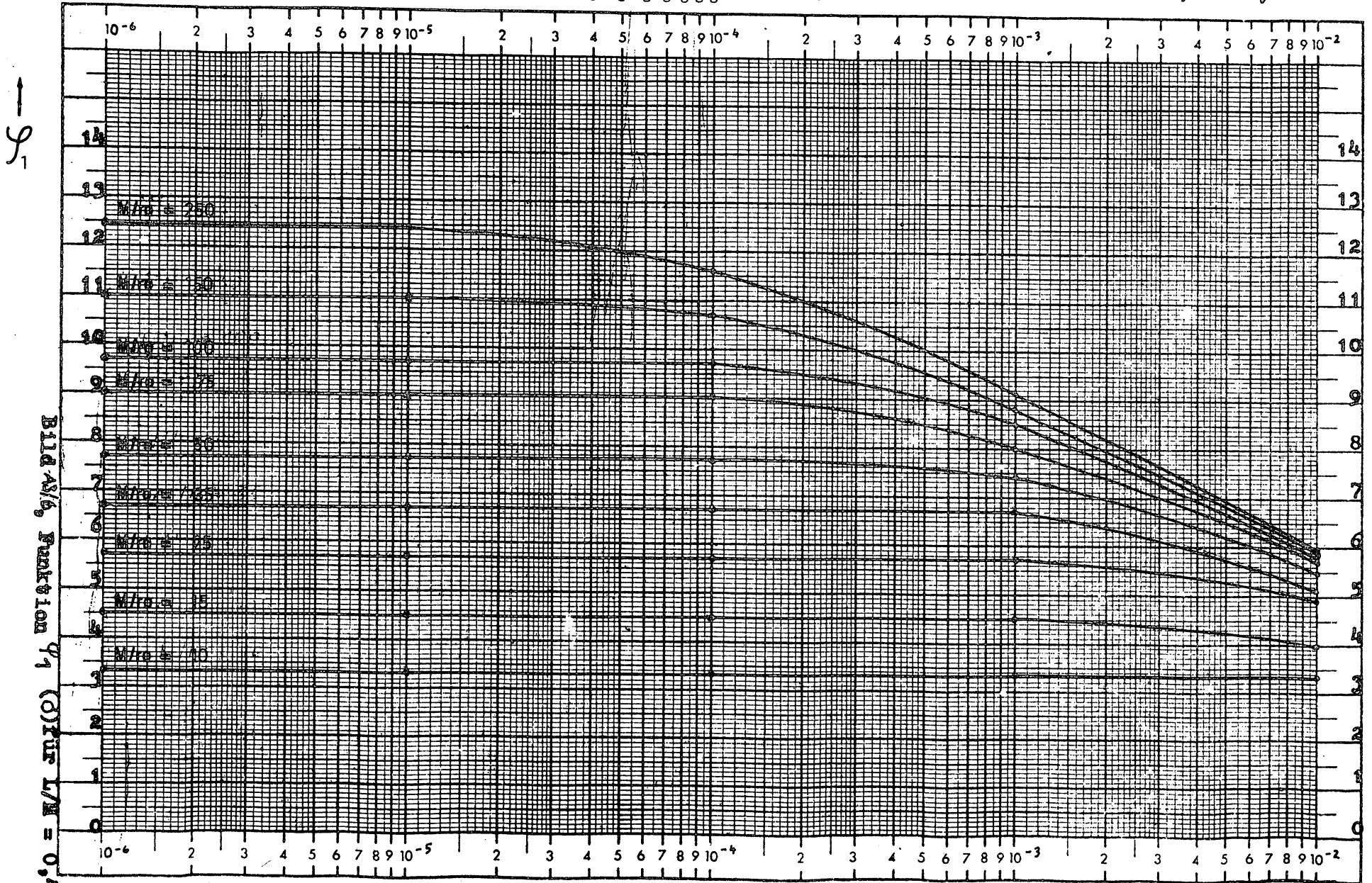


Bild A3/6, Funktion ϕ_1 (0) für $L/M = 0,4$

Eine Achse logar. geteilt von 1 bis 10^4 Einheit 62,5 mm, die andere in mm mit Prozentmaßstab

6 →

Nr. 495 T

L/M = 0,3

Zunahme in % 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 200 250 300 ————— Abnahme in %

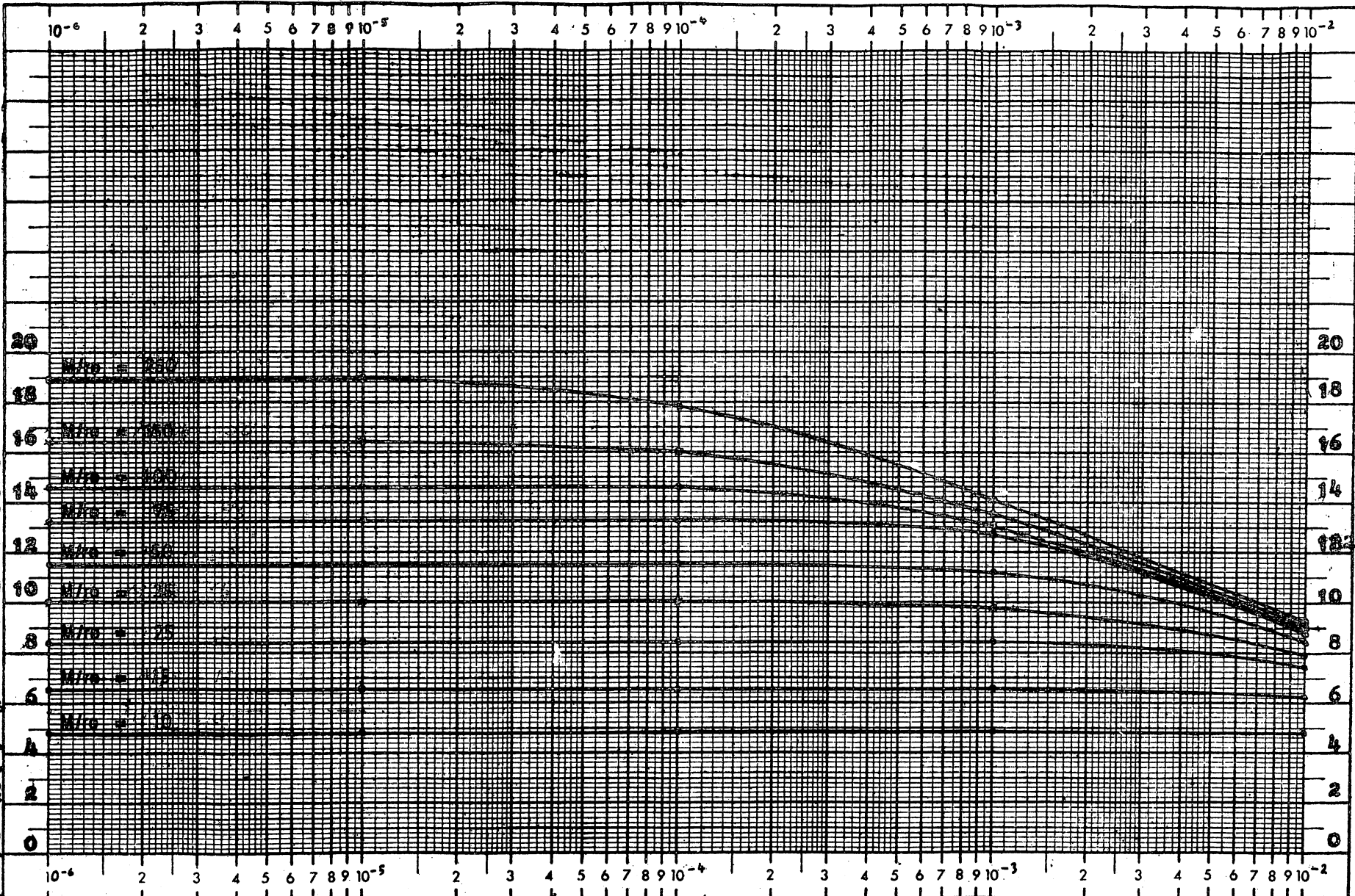


BILD 495 T, Punktion q_1 (δ) für $L/M=0,3$

Eine Achse logar. geteilt von 1 bis 10^4 Einheit 62,5 mm, die andere in mm mit Prozentmaßstab

6-

1-8

1-8

A 3-18

Nr. 495 T

L/M = 0,2

Zunahme in % 0 50 100 200 300 ————— Abnahme in % 0 5 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

81

81

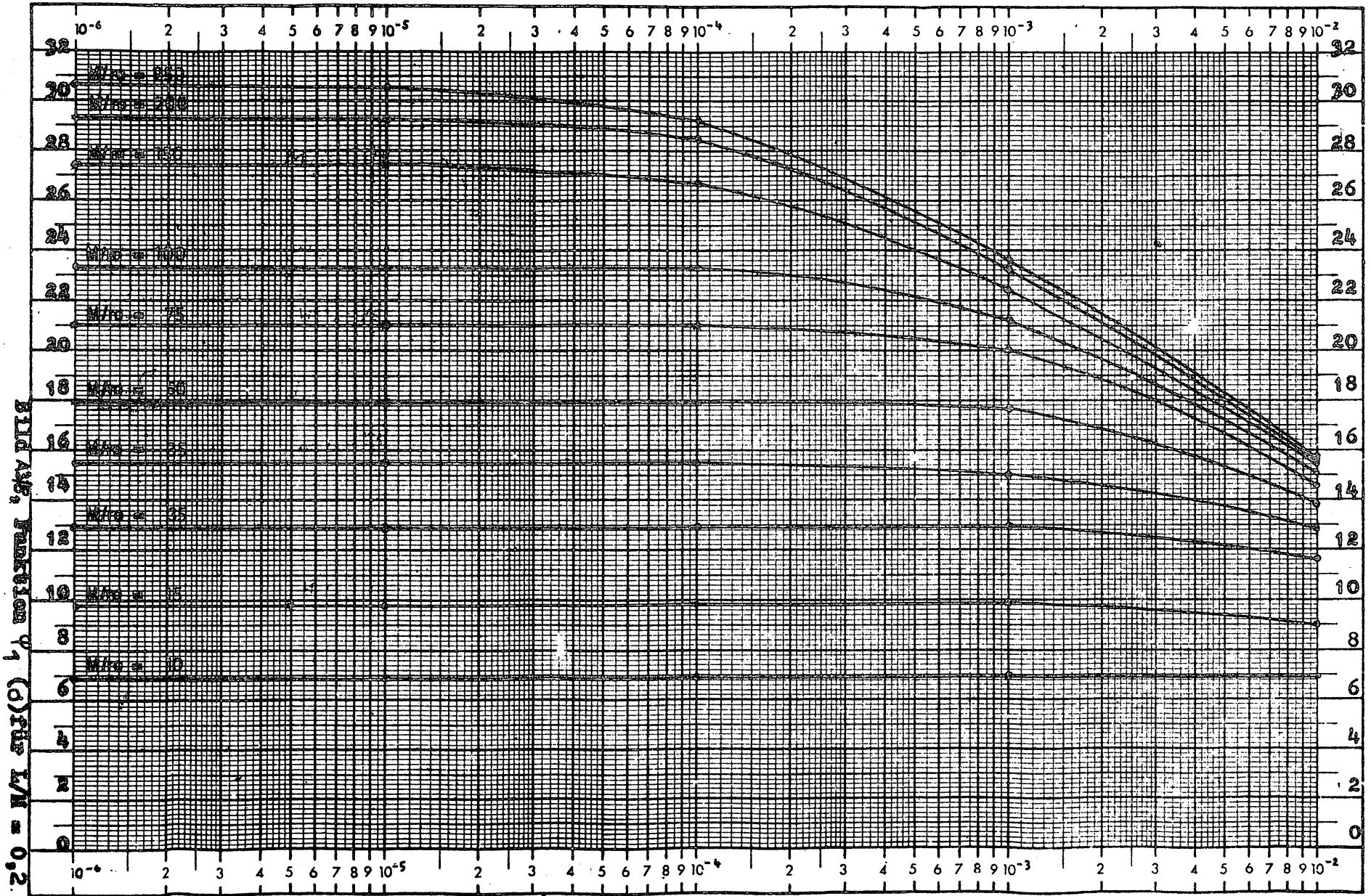


BILD Nr. 1, Funktion φ_1 (D) für L/M = 0,2

A3-19

Eine Achse logar. geteilt von 1 bis 10^4 Einheit 62,5 mm, die andere in mm mit Prozentmaßstab

6

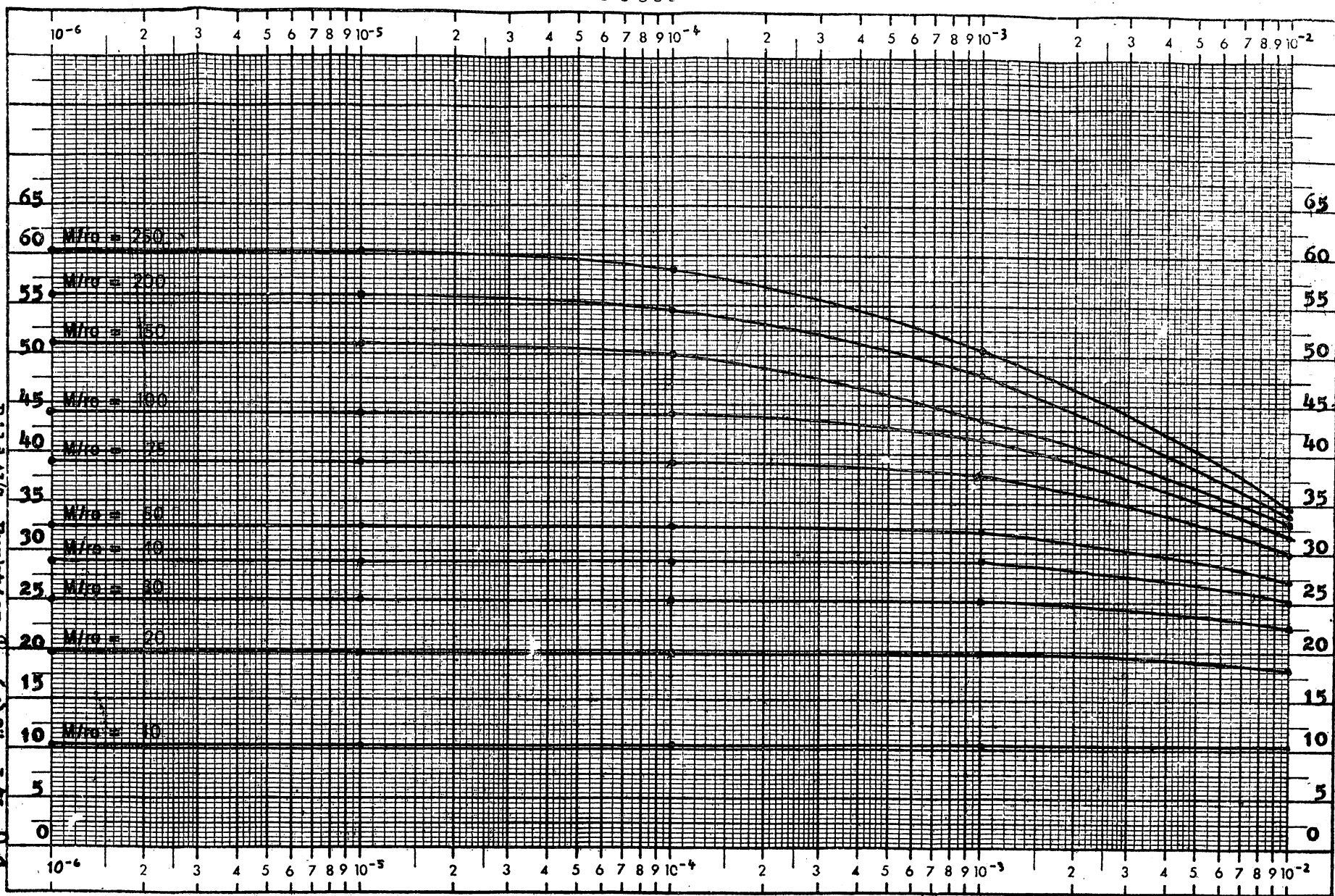
Zunahme in % 0 5 100 200 300 usw. → Abnahme in % usw. ← 50 50 40 30 20 0

↑
ϕ₁

↑
ϕ₁

Bilds/5, Funktion ϕ₁ (ϕ) für L/M = 0,1

A-3-20



Eine Achse logar. geteilt von 1 bis 10⁴ Einheit 62,5 mm, die andere in mm mit Prozentmaßstab

6 →