

5.2. Brunnenfunktion $W(\delta, \beta)$

Die Brunnenfunktion $W(\delta, \beta)$ ist folgendermaßen definiert

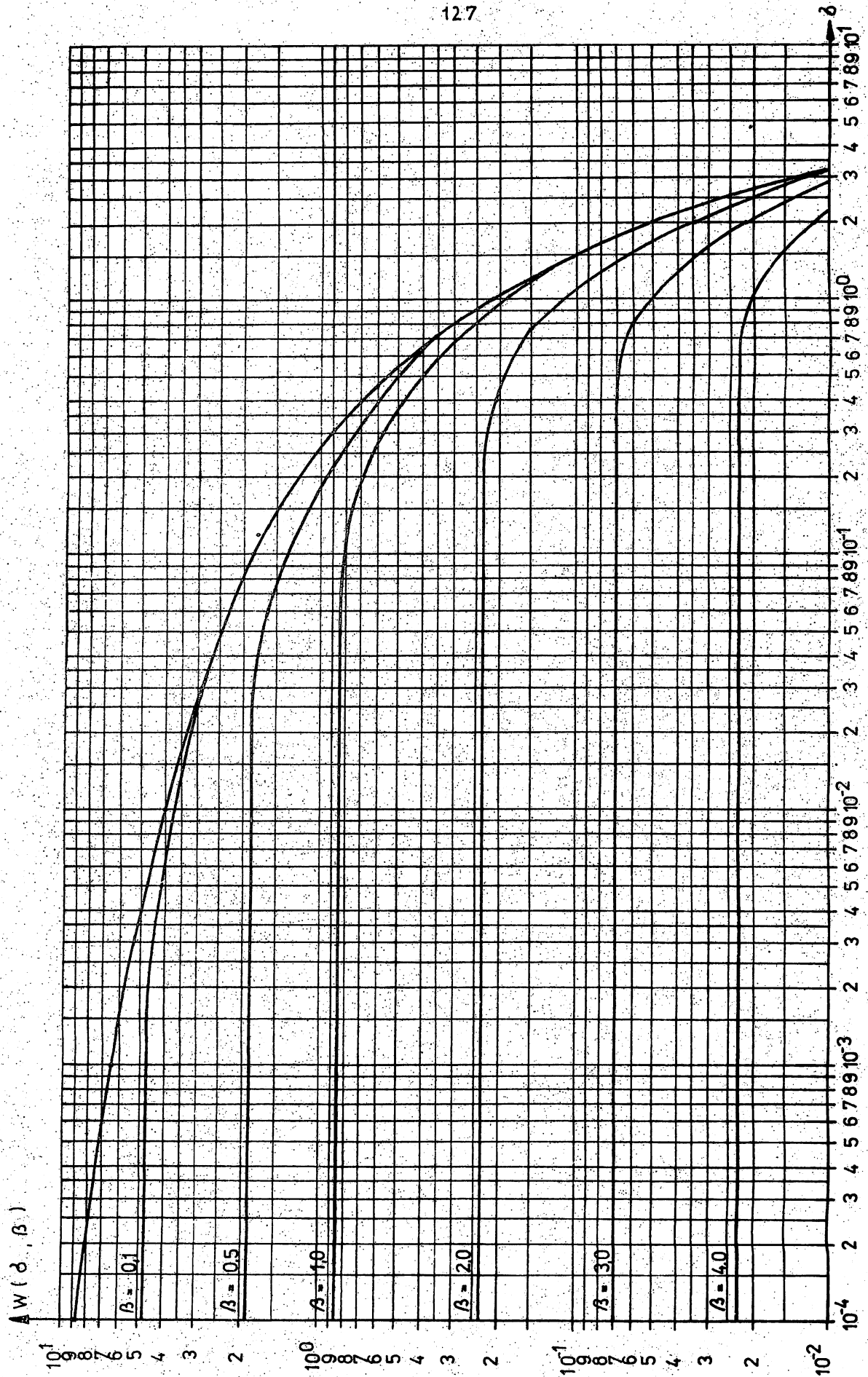
$$W(\delta, \beta) = \int_{\delta}^{\infty} \frac{1}{y} \exp\left(-y - \frac{\beta^2}{4y}\right) dy \quad (5/4)$$

Für die Berechnung des Wertes hat sich sowohl eine numerische Integration als auch die im FORTRAN-Unterprogramm im Bild (5/6) enthaltene iterative Lösung gut bewährt.

In Bild (5/4) ist die Wertetabelle von $W(\delta, \beta)$, im Bild (5/5) die graphische Darstellung von $W(\delta, \beta)$ und in Bild (5/6) sind die notwendigen FORTRAN-Unterprogramme für die iterative Lösung enthalten. Das sind neben der Funktion HAN die Besselfunktionen $BESS(x)$ [$K_0(x)$], $BEIO(x)$ [$I_0(x)$] und die Brunnenfunktion THEI (SIG).

$\delta \backslash \beta$	0,005	0,01	0,05	0,1	0,5	1,0	2,0	4,0
$1 \cdot 10^{-6}$	10,8	9,44	6,23	4,85	1,85	0,84	0,23	0,007
2°								
4°	10,7							
6°	10,6							
$1 \cdot 10^{-5}$	10,5	9,42						
2°	9,95	9,30						
4°	9,40	9,01						
6°	9,04	8,77						
$1 \cdot 10^{-4}$	8,57	8,40						
2°	7,91	7,82	6,22					
4°	7,23	7,19	6,14					
6°	6,83	6,80	6,02					
$1 \cdot 10^{-3}$		6,31	5,80	4,83				
2°		5,63	5,35	4,71				
4°		4,94	4,80	4,42				
6°			4,45	4,18				
$1 \cdot 10^{-2}$			3,98	3,81				
2°			3,33	3,24	1,84			
4°			2,67	2,63	1,76			
6°				2,26	1,63	0,84		
$1 \cdot 10^{-1}$				1,80	1,44	0,82		
2°				1,21	1,06	0,72	0,23	
4°				0,70	0,63	0,50	0,21	
6°					0,43	0,33	0,18	
1,0					0,21	0,19	0,11	0,007
2,0					0,05	0,04	0,03	0,005

Bild 5/4 : Wertetabelle von $W(\delta, \beta)$



Bild(5/5): Graphische Darstellung von $W(\delta, \beta)$

```

1 00000 FUNCTION HAN(E,X)
2 00011 F=X**2/4.
3 00025 HAN=2.*BESS(2.*SQRT(F))
4 00047 C=0.
5 00055 B=1.
6 00063 N=0
7 00065 F=F/E
8 00076 D=THEIS(F)
9 00104 IF(F**2.LE.30500) C=EXP(-F)
10 00144 A=D
11 00152 1 HAN=HAN-A
12 00163 IF(A**2.LE.1.E-10.AND.N/2*2.EQ.N) RETURN
13 00222 N=N+1
14 00225 B=-B*E/N
15 00257 D=(C-F*D)/N
16 00320 A=B*D
17 00331 GOTO 1
18 00366 END

```

BESS SEITE 1

```

1 00000 FUNCTION BESS(X)
2 00010 IF(X.GT.2.) GOTO 1
3 00023 T=(0.5*X)**2
4 00037 BESS=((((0.00000740*T+0.00010750)*T+0.00262698)*T
5 00056 * +0.03488590)*T+0.23069756)*T+0.42278420)*T
6 00100 * -0.57721566-ALOG(0.5*X)*BEIO(X)
7 00152 GOTO 2
8 00153 1 T=2.0/X
9 00164 BESS=((((0.0053208*T-0.00251540)*T+0.00587872)*T
10 00203 * -0.01062446)*T+0.02189568)*T-0.07832358)*T
11 00225 * +1.25331414)/EXP(X)/SQRT(X)
12 00274 2 CONTINUE
13 00274 RETURN
14 00351 END

```

BEIO SEITE 1

```

1 00000 FUNCTION BEIO(X)
2 00010 IF(ABS(X).GT.3.75) GOTO 1
3 00025 U=(X/3.75)**2
4 00041 BEIO=((((0.0045813*U+0.0360768)*U+0.2659732)*U
5 00060 * +1.2067492)*U+3.0899424)*U+3.5156229)*U+1.0
6 00113 GOTO 2
7 00114 1 U=3.75/X
8 00125 BEIO=((((0.00392377*U-0.01647633)*U+0.02635537)*U
9 00144 * -0.02057706)*U+0.00919281)*U-0.00157565)*U+0.00225319)*U
10 00174 * +0.01328592)*U+0.39894228)*EXP(3.75/U)/SQRT(3.75/U)
11 00265 2 CONTINUE
12 00265 RETURN
13 00346 END

```

PROGRAMM UEBERSATZT
FOR 4200/1P

Bild 5/6 Unterprogramme HAN, BESS und BEIO

5.3. Besselfunktion $K_0(x)$

Die Besselfunktion 2. Art, nullter Ordnung $K_0(x)$ stellt eine spezielle Lösung einer Bessel'schen Differentialgleichung dar.

Der Wert von $K_0(x)$ läßt sich für die Bereiche kleiner und größer als 2 durch 2 Tscheybyschew-Approximationen darstellen.

Für $x \leq 2$

$$K_0(x) = (((((0,00000740 \cdot \tilde{h} + 0,00010750) \cdot \tilde{h} + 0,0022698) \cdot \tilde{h} + 0,03488590) \cdot \tilde{h} + 0,23069756) \cdot \tilde{h} + 0,42278420) \cdot \tilde{h} - 0,57721566 - \ln(0,5 \cdot x) \cdot I_0(x) \quad (5/5)$$

$$\tilde{h} = (0,5 \cdot x)^2$$

Für $x > 2$

$$K_0(x) = ((((((0,00053208 \cdot \tilde{h} - 0,00251540) \cdot \tilde{h} + 0,00587872) \cdot \tilde{h} - 0,01062446) \cdot \tilde{h} + 0,02189568) \cdot \tilde{h} - 0,07832358) \cdot \tilde{h} + 1,25331414) / \exp(x) / \sqrt{x} \quad (5/6)$$

$$\tilde{h} = 2,0/x$$

Desweiteren gilt für

$$x \leq 0,05 \quad K_0(x) \sim \ln(1,12/x) \quad (5/7)$$

$$x > 5,0 \quad K_0(x) \sim \sqrt{\frac{\pi}{2x}} \left(1 - \frac{1}{8x}\right) e^{-x} \quad (5/8)$$

In Bild 5/7 ist die Wertetabelle von $K_0(x)$,
in Bild 5/8 die graphische Darstellung von $K_0(x)$ und
in Bild 5/9 das FORTRAN-Unterprogramm BESS(x) enthalten,
welches noch das FORTRAN-Unterprogramm BEIO(x) $[I_0(x)]$
benötigt.

x	$K_0(x)$	x	$K_0(x)$	x	$K_0(x)$
0,01	4,72	0,1	2,43	1,0	0,42
0,02	4,03	0,2	1,75	1,5	0,24
0,03	3,62	0,3	1,37	2,0	0,114
0,04	3,34	0,4	1,11	2,5	0,062
0,05	3,11	0,5	0,92	3,0	0,035
0,06	2,93	0,6	0,78	3,5	0,020
0,07	2,78	0,7	0,66	4,0	0,011
0,08	2,65	0,8	0,57	4,5	0,006
0,09	2,53	0,9	0,49	5,0	0,004

Bild 5/7 : Wertetabelle von $K_0(x)$

BESS SEITE 1

```

1  00000      FUNCTION BESS(X)
2  00010      IF(X.GT.2.) GOTO 1
3  00023      T=(0.5*X)**2
4  00037      BESS=((((0.00000740*T+0.00010750)*T+0.00262698)*T
5  00056      * +0.03488590)*T+0.23069756)*T+0.42278420)*T
6  00100      * -0.57721566-ALOG(0.5*X)*BEIO(X)
7  00152      GOTO 2
8  00153      1  T=2.0/X
9  00164      BESS=((((((0.00053208*T-0.00251540)*T+0.00587872)*T
10 00203      * -0.01062446)*T+0.02189568)*T-0.07832358)*T
11 00225      * +1.25331414)/EXP(X)/SQRT(X)
12 00274      2  CONTINUE
13 00274      RETURN
14 00351      END

1  00000      FUNCTION BEIO(X)
2  00010      IF(ABS(X).GT.3.75) GOTO 1
3  00025      U=(X/3.75)**2
4  00041      BEIO=((((((0.0045813*U+0.0360768)*U+0.2659732)*U
5  00060      * +1.2067492)*U+3.0899424)*U+3.5156229)*U+1.0
6  00113      GOTO 2
7  00114      1  U=3.75/X
8  00125      BEIO=((((((((0.00392377*U-0.01647633)*U+0.02635537)*U
9  00144      * -0.02057706)*U+0.00919281)*U-0.00157565)*U+0.00225319)*U
10 00174      * +0.01328592)*U+0.39894228)*EXP(3.75/U)/SQRT(3.75/U)
11 00265      2  CONTINUE
12 00265      RETURN
13 00346      END

```

Bild 5/9 : FORTRAN-Unterprogramme BESS und BEIO

14. 495 I

Abnahme in %

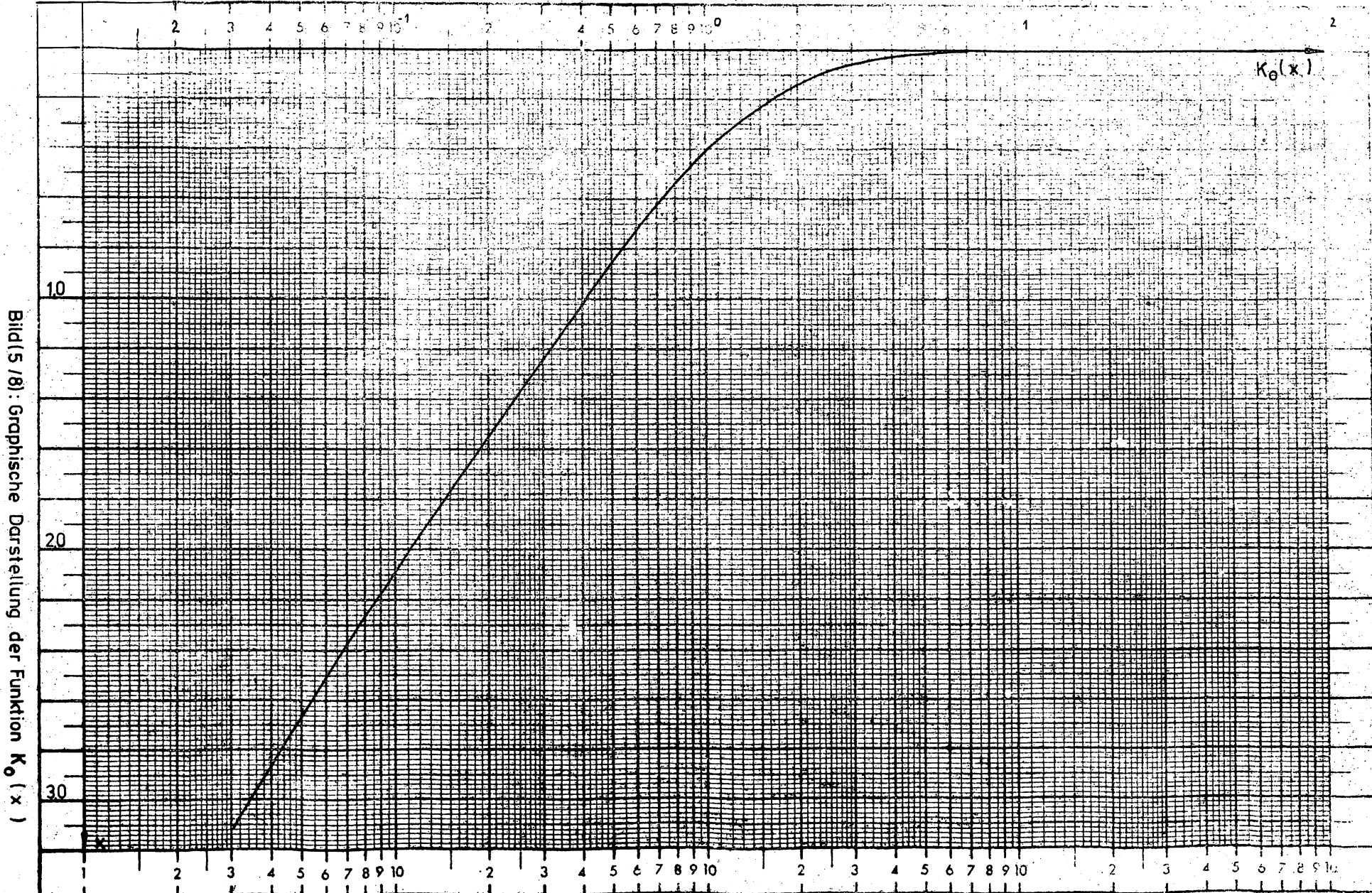


Bild (5/8): Graphische Darstellung der Funktion $K_0(x)$

131

58 800 B. G. X. 35 S. II

5.4. Die komplementäre Fehlerfunktion $\text{erfc}(x)$

Die komplementäre Fehlerfunktion $\text{erfc}(x)$ ist folgendermaßen definiert

$$\text{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_x^{\infty} e^{-y^2} dy \quad (5/9)$$

Desweiteren läßt sie sich aus dem Fehlerintegral berechnen.

$$\text{erfc}(x) = 1 - \text{erf}(x) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-y^2} dy \quad (5/10)$$

Für die beiden Funktionen gibt es eine größere Zahl von Näherungslösungen, z.B.

$$\text{erf}(x) = 1 - \frac{1}{\tilde{h}} \quad (5/11)$$

$$\tilde{h} = (((((0,000043064 \cdot x + 0,000276567) \cdot x + 0,000152014) \cdot x + 0,009270527) \cdot x + 0,042282012) \cdot x + 0,070523078) \cdot x + 1,0$$

Unter Beachtung der Bedingung $\text{erfc}(-x) = 2 - \text{erfc}(x)$ ergibt sich für $x \geq 0$

$$\text{erfc}(x) = (p_1 \cdot \tilde{h} + p_2 \cdot \tilde{h}^2 + p_3 \cdot \tilde{h}^3 + p_4 \cdot \tilde{h}^4 + p_5 \cdot \tilde{h}^5) \cdot e^{-x^2} \quad (5/12)$$

$$\tilde{h} = 1/(1+px)$$

$$p = 0,327591100$$

$$p_1 = 0,254829592$$

$$p_2 = -0,284496736$$

$$p_3 = 1,421413741$$

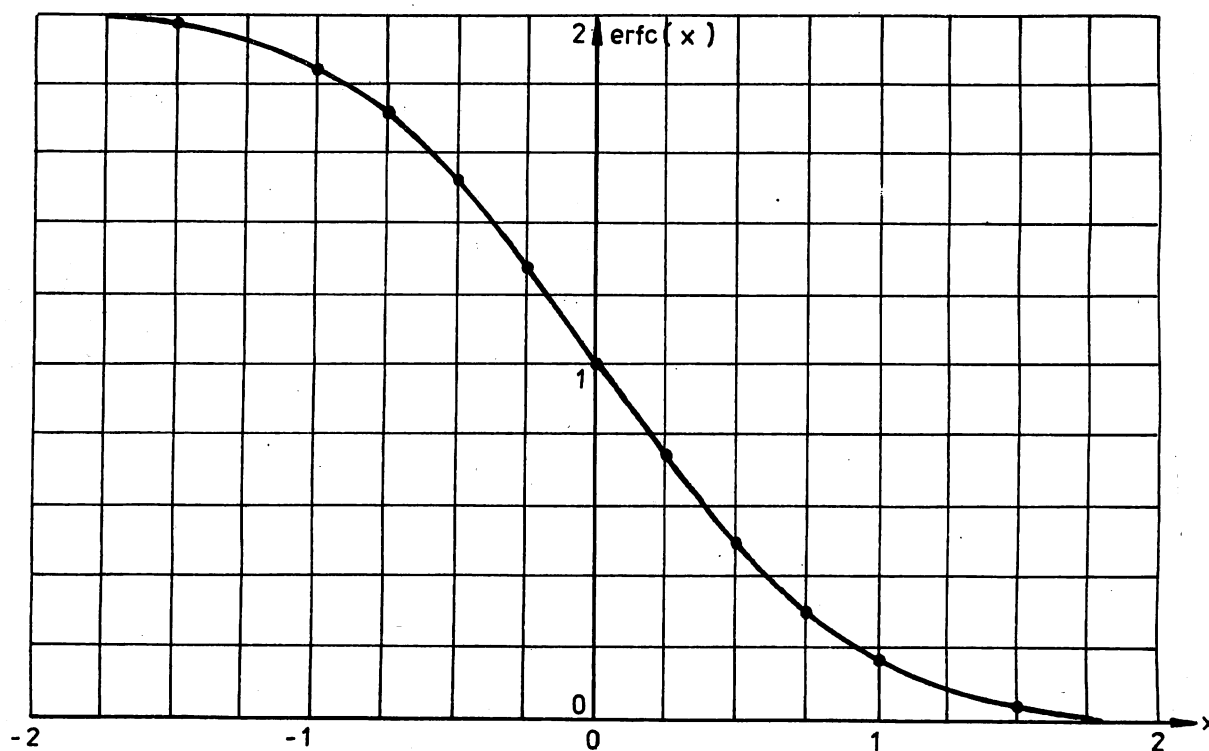
$$p_4 = -1,453152027$$

$$p_5 = 1,061405429$$

In Bild 5/10 ist eine Wertetabelle von $\text{erfc}(x)$, in Bild 5/11 die graphische Darstellung und in Bild 5/12 ein FORTRAN-Unterprogramm angegeben.

In diesem Unterprogramm sind die Tscheybyschew-Approximationen für 3 Bereiche enthalten, so daß für x keine Beschränkungen gelten.

x	erfc(x)	x	erfc(x)	x	erfc(x)
0	1,000	0,40	0,572	0,80	0,258
0,02	0,977	0,42	0,552	0,82	0,246
0,04	0,955	0,44	0,534	0,84	0,235
0,06	0,932	0,46	0,515	0,86	0,224
0,08	0,910	0,48	0,497	0,88	0,213
0,10	0,887	0,50	0,479	0,90	0,203
0,12	0,865	0,52	0,462	0,92	0,193
0,14	0,843	0,54	0,445	0,94	0,184
0,16	0,821	0,56	0,428	0,96	0,175
0,18	0,799	0,58	0,412	0,98	0,166
0,20	0,777	0,60	0,396	1,00	0,157
0,22	0,756	0,62	0,381	1,10	0,120
0,24	0,734	0,64	0,365	1,20	0,090
0,26	0,713	0,66	0,351	1,30	0,066
0,28	0,692	0,68	0,336	1,40	0,048
0,30	0,671	0,70	0,322	1,50	0,033
0,32	0,651	0,72	0,309	1,60	0,024
0,34	0,631	0,74	0,295	1,70	0,018
0,36	0,611	0,76	0,282	1,80	0,011
0,38	0,591	0,78	0,270	2,00	0,005

Bild 5/10 : Wertetabelle von $\text{erfc}(x)$ Bild 5/11 : Graphische Darstellung von $\text{erfc}(x)$

ERFC SEITE 1

```

1  00000  FUNCTION ERFC(X)
2  00010  Z=ABS(X)
3  00020  IF(Z.LE..5) GOTO 1
4  00033  IF(Z.GE.4.) GOTO 2
5  00045  P=7.37389+6.86502*Z+3.0318*Z*Z+5.6317E-01*Z*Z*Z+4.31878E-05*Z**4
6  00141  Q=7.37396+1.51849E+01*Z+1.27955E+01*Z*Z+5.35422*Z*Z*Z+Z**4
7  00232  ERFC=EXP(-(Z*Z))*P/Q
8  00261  GOTO 3
9  00262  1  P=3.20938E+03+3.77485E+02*Z*Z+1.13864 +02*Z**4+3.16112*Z**6
10 00315  * +1.85778E-01*Z**8
11 00356  Q=2.84424E+03+1.28262E+03*Z*Z+2.44025E+02*Z**4+2.36013*Z**6+Z**8
12 00447  ERFC=1-Z*P/Q
13 00474  GOTO 3
14 00475  2  P=-2.99611E-03-4.94731E-02/(Z*Z)-2.26957E-01/(Z**4)
15 00546  * -2.78661E-01/(Z**6)-2.23192E-02/(Z**8)
16 00661  Q=1.06209E-02+1.91309E-01/(Z*Z)+1.05168/(Z**4)+1.98733/(Z**6)
17 00741  * +1/(Z**8)
18 01005  ERFC=EXP(-(Z*Z))/Z*(5.641896E-01+1/(Z*Z))*P/Q
19 01067  3  IF(X.LT.0.) ERFC=2.-ERFC
20 01110  RETURN
21 01234  END

```

PROGRAMM UEBERSETZT
FOR 4200/1P

6. Symbole und Abkürzungen

An dieser Stelle werden nur die häufig verwendeten Grundsymbole aufgeführt. Alle anderen Symbole können unmittelbar aus dem Text entnommen werden.

a	[$s \cdot m^{-2}$]	geohydraulische Zeitkonstante, $a = S/T$
B	[m]	Speisungsfaktor
b_n	[-]	Argument der Brunnenfunktion
H	[m]	unbeeinflusste Grundwasserrichtigkeit
h	[m]	Höhe der freien Grundwasseroberfläche bzw. der Druckfläche über der Grund- wassersohle
k	[$m \cdot s^{-1}$]	Durchlässigkeitsbeiwert
L	[m]	Filterlänge des Brunnens
M	[m]	Mächtigkeit des Grundwasserleiters
Q	[$m^3 \cdot s^{-1}$]	Förderleistung des Brunnens
r	[m]	Abstand eines Punktes von der Brunnenachse
r_0	[m]	Brunnenradius
S	[-]	Speicherkoefizient des Grundwasserleiters
s	[m]	Grundwasserabsenkung
T	[$m^2 s^{-1}$]	Transmissibilität (Profildurchlässigkeit)
t	[s]	Zeit
t'	[s]	Zeitachse des Wiederanstieges
t_k	[s]	Zeit als Knickpunkt zweier Kurven
t_0	[s]	Durchstoßpunkt durch die Zeitachse
α	[m]	Richtungskoeffizient
β	[-]	Speisungsfaktor dimensionslos
λ	[m]	geometrische Entfernung des Brunnenradius von einer Randbedingung
λ^+	[m]	hydraulisch wirksame Randbedingungsentfernung
φ	[-]	spezifische Potentialdifferenz
ξ	[m]	Entfernung des fiktiven Brunnens vom GWB
ζ	[-]	Argument der Brunnenfunktion

Abkürzungen

Br	Brunnen
GWBR	Grundwasserbeobachtungsrohr
GWL	Grundwasserleiter
PV	Pumpversuch
RB	Randbedingung
VBR	Versuchsbrunnen

Randbedingungen

$\Delta q = 0$ vertikale Modellberandung durch Barriere
(geologische Störung, z.B. Grundgebirgsauftragung)

$\psi_2 = 0$ vertikale Modellberandung durch GWL-speisende
Wirkungen (Vorfluter, See, usw.)

A 1. Das Erfassen der Speicherkapazität im Brunnen

A 1.1. Allgemeines

In der Anfangsphase der Absenkung in einem Brunnen treten mitunter Störeffekte auf, die den Kurvenverlauf gegenüber dem Standardfall verzerren. Ohne die Berücksichtigung dieser Effekte bei der Auswertung ergeben sich falsche hydrogeologische Parameter. Eine Ursache dafür kann sein, daß der aus dem Brunnenvolumen und der Kiesschüttung entnommene Förderstrom Q_{Sp} nicht vernachlässigbar gegenüber dem Gesamtförderstrom Q_j ist. Hierbei gilt

$$Q_j = Q_{Sp} + Q_j \quad (A 1/1)$$

wobei Q_j den Förderstrom darstellt, der aus dem Grundwasserleiter stammt. Diese Erscheinung wird als Kapazitätseffekt bezeichnet. Die Quantifizierung des Effektes kann durch die Gleichung

$$U = \frac{Q_{Sp}}{Q_j} = \frac{V_{Bj} + V_{Kj}}{Q_j \cdot \Delta t} \quad (A 1/2)$$

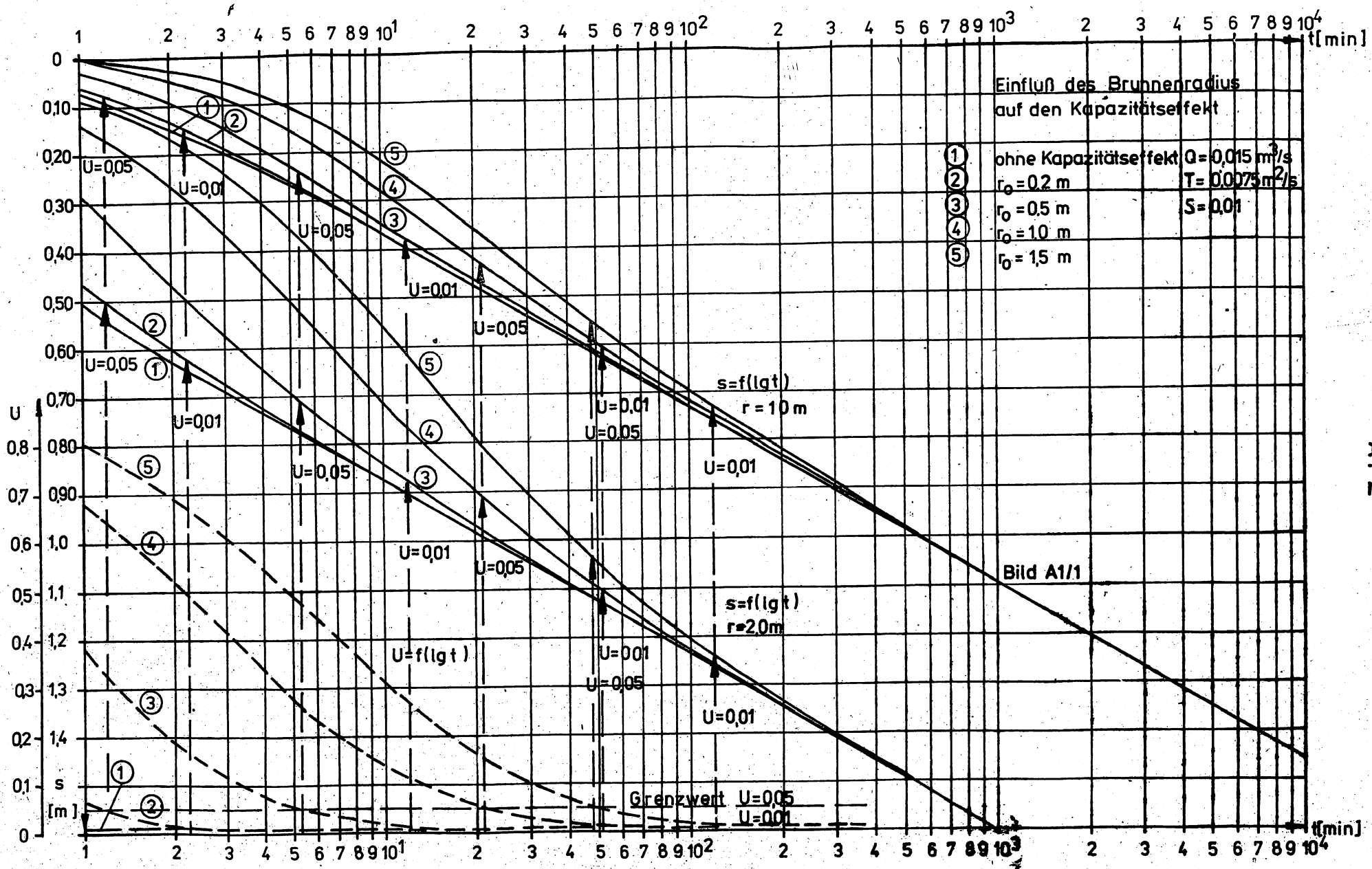
erfolgen.

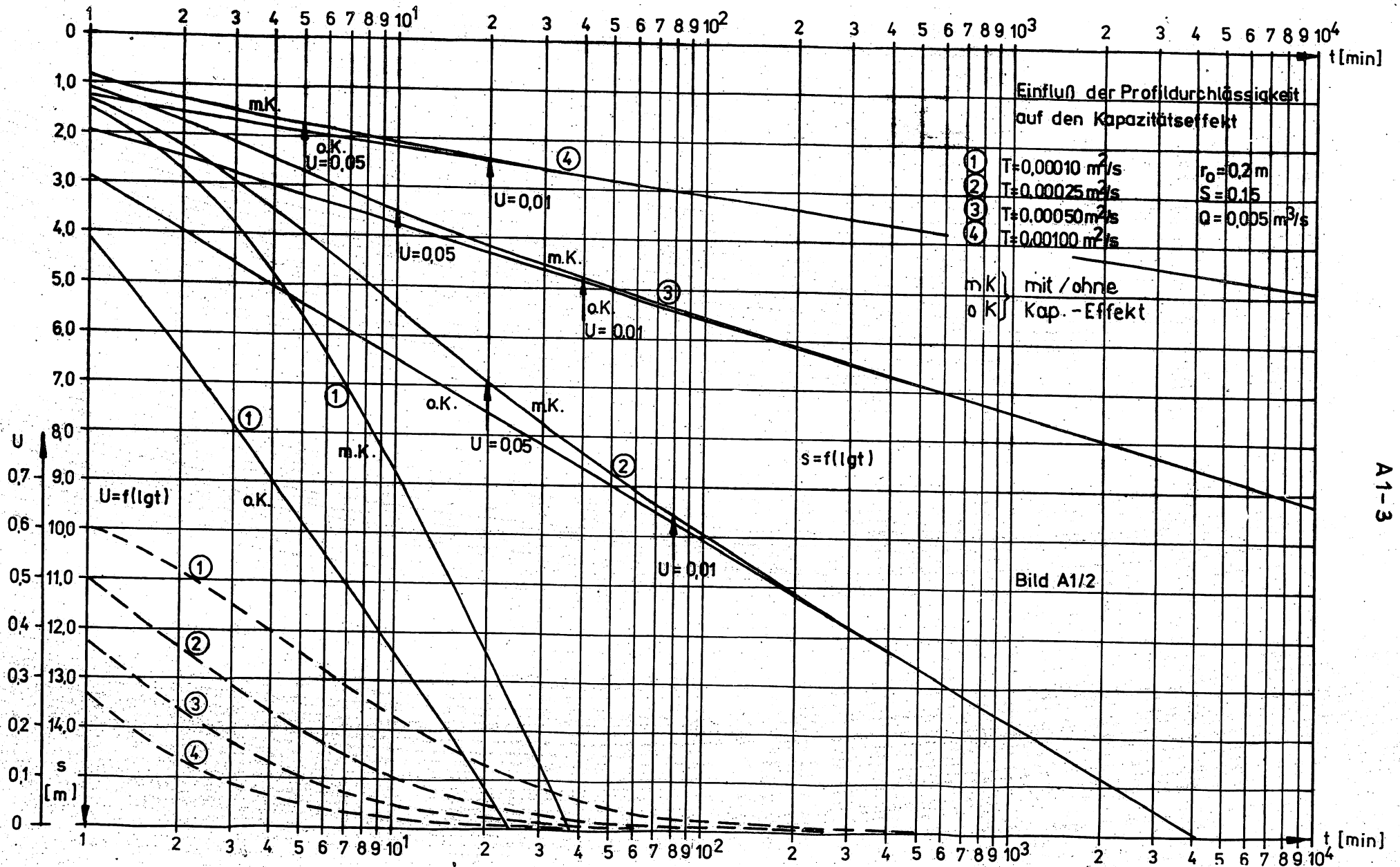
Der Wert U verringert sich während der Förderung, im stationären Endzustand ist er Null.

Analog dazu tritt der Kapazitätseffekt auch beim Wiederanstieg auf, indem die Wiederauffüllung des Volumens von Brunnen und Kiesschüttung die Meßwerte verfälscht.

Nichtvernachlässigbare Kapazitätseffekte sind typisch bei großdimensionierten Brunnen, aber auch bei Brunnen mit kleinen Durchmessern, falls das den Brunnen umgebende Gebirge einen niedrigen k -Wert aufweist.

Im Bild A 1/1 ist die Wirkung des Kapazitätseffektes bei großdimensionierten Brunnen für unterschiedliche Brunnenradien ($r_0 = 0,2 \dots 1,5$ m) für einen konkreten Fall dargestellt. Die Kurvenverläufe $s = f(1gt)$ beziehen sich dabei auf Meßstellen in einer Entfernung von 2,0 m und 10,0 m vom





A1-3

Mittelpunkt des Brunnens.

Bei der PV-Auswertung ist für die Bereiche der Funktion $s = f(lgt)$ bzw. $s' = f(lgt')$ mit

$$U > 0,05$$

(A 1/3)

ein Korrekturverfahren anzuwenden (GHEORGHE, A., Processing and Synthesis of Hydrological Data, ABACUS PRESS Kent, England 1978).

In Bild A 1/1 ist für die einzelnen Berechnungsvarianten die Funktion $U = f(lgt)$ dargestellt. Auch im Bereich des Grenzwertes von $U = 0,05$ ist noch ein deutlicher Einfluß des Kapazitätseffektes festzustellen. Wird der Bereich der Funktion mit $U < 0,05$ in der Nähe des Grenzwertes ohne Berücksichtigung des Kapazitätseffektes ausgewertet, so muß mit T-Wert-Fehlern bis zu 20 % gerechnet werden.

Es wird deshalb vorgeschlagen, den o.g. Grenzwert auf

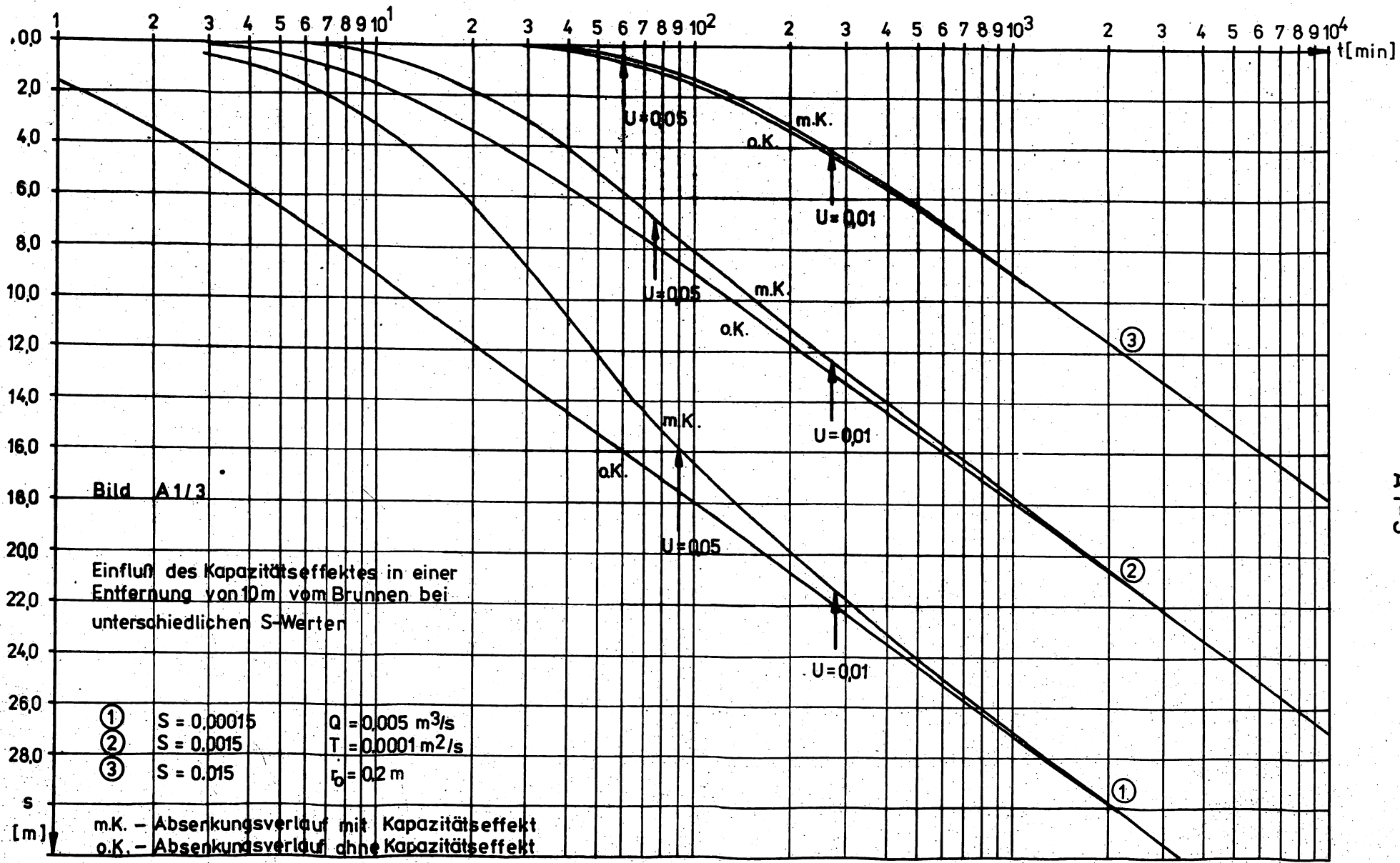
$$U > 0,01$$

(A 1/4)

herunterzusetzen.

Im folgenden wird der Bereich des Absenkungs- bzw. des Anstiegsverlaufes für den der Kapazitätseffekt bei der Auswertung zu berücksichtigen ist ($U > 0,05$ bzw. $U > 0,01$), mit Phase I und der Bereich, bei dem der Kapazitätseffekt vernachlässigt werden kann, mit Phase II bezeichnet.

Bild A 1/2 zeigt die Wirkung des Kapazitätseffektes bei unterschiedlichen T-Werten. Besonders im Festgestein weist das den Brunnen umgebende Gebirge einen niedrigen k-Wert, aber große Grundwasserleitermächtigkeiten auf. In diesen Fällen ist, wie aus Bild A 1/2 ersichtlich, ebenfalls mit einem über längere Zeit andauernden Kapazitätseffekt zu rechnen. Bei $U = 0,05$ ist auch hier noch ein deutlicher Einfluß des Kapazitätseffektes festzustellen.



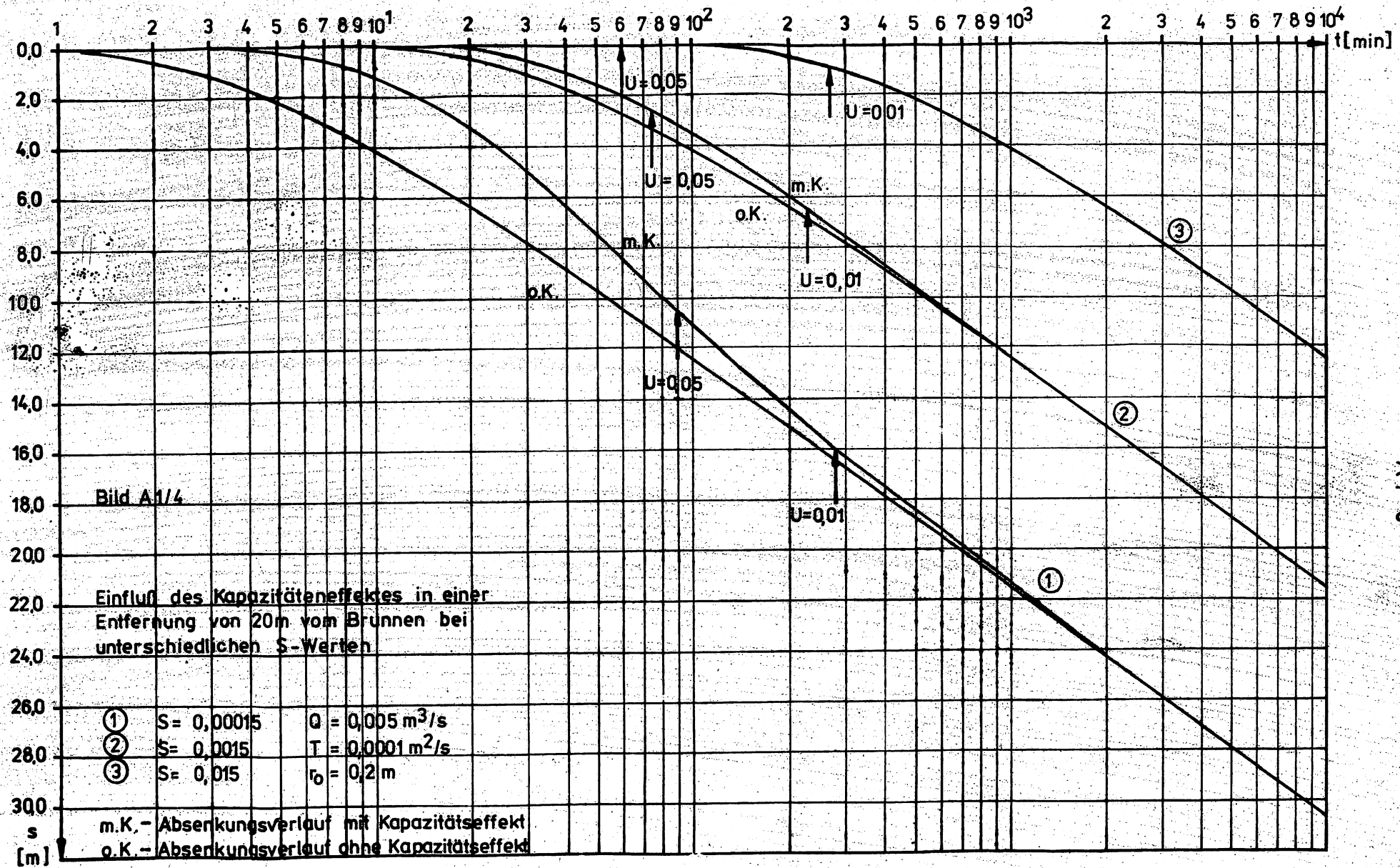


Bild A1/4

Einfluß des Kapazitätseffektes in einer Entfernung von 20m vom Brunnen bei unterschiedlichen S-Werten

①	S = 0,00015	Q = 0,005 m ³ /s
②	S = 0,0015	T = 0,0001 m ² /s
③	S = 0,015	r ₀ = 0,2 m

m.K. - Absenkungsverlauf mit Kapazitätseffekt
 o.K. - Absenkungsverlauf ohne Kapazitätseffekt

Der Kapazitätseffekt des Brunnens beeinflusst nicht nur den Absenkungs- bzw. Anstiegsverlauf des Brunnenwasserspiegels, sondern auch den Absenkungs- bzw. Anstiegsverlauf nahegelegener Grundwasserbeobachtungsrohre (die Eigenkapazität der GWBR wird vernachlässigt).

Die Größe der Beeinflussung hängt in entscheidendem Maße von der Größe des Speicherkoeffizienten ab.

Die Bilder A 1/3 und A 1/4 zeigen den Einfluß des Kapazitätseffektes auf den Spiegelverlauf von GWBR in 10,0 m und 20,0 m Entfernung vom Brunnen, bei unterschiedlichen S-Werten. Aus den Kurvenverläufen ergibt sich, daß bei kleinen S-Werten auch an den GWBR der Kapazitätseffekt des Brunnens bei der PV-Auswertung berücksichtigt werden muß. Wie unter Punkt A 1.2 erläutert, ist eine Auswertung des durch den Kapazitätseffekt beeinflussten Bereiches mittels eines grafisch-analytischen Verfahrens im Regelfall für das GWBR nicht möglich.

A 1.2. Auswertung mit Hilfe der Ausgleichsgeraden

Um den Einfluß des Kapazitätseffektes auf den Absenkungs- bzw. Anstiegsverlauf beurteilen zu können, muß für einige frei wählbare möglichst kurze Meßzeitintervalle Δt ab Pumpversuchsbeginn bzw. ab Wiederanstiegsbeginn der Wert U , s. Bild A 1/5 und A 1/6, berechnet werden.

Sind nach dem Meßzeitschritt Δt , für den $U < 0,01$ bestimmt wurde, noch genügend Messungen vorhanden, die die Konstruktion einer Ausgleichsgeraden gestatten, dann ist die Pumpversuchsauswertung unter Vernachlässigung des Kapazitätseffektes nach TGL 23 864/04 + 05 vorzunehmen.

Der vom Kapazitätseffekt unbeeinflusste Bereich (Phase II) ist unbedingt auszuwerten, da die hierfür anzuwendenden Verfahren wenig Aufwand erfordern und außerdem durch zu grobe Stufeneinteilung der Phase I Ungenauigkeiten bei der Auswertung auftreten.

Im ungünstigsten Fall gilt für die Dauer des gesamten Pumpversuches $U \cong 0,05$ bzw. $U \cong 0,01$, d.h. eine Auswertung ist nur bei Berücksichtigung des Kapazitätseffektes möglich.

Bei durch Kapazitätseffekt beeinflussten Kurvenverläufen besteht die Gefahr einer Fehlinterpretation, indem die Phase I als maßgebend für die Bestimmung der geohydraulischen Parameter angesehen wird und die Phase II fälschlich als ein Speisungseinfluß gedeutet wird.

Es empfiehlt sich, bei jedem Pumpversuch als ersten Auswertungsschritt die Entwicklung der Größe U zu verfolgen.

Ist nach den aufgeführten Kriterien ein Korrekturverfahren unumgänglich, so ist die PV-Auswertung nach TGL 23 864/09 durchzuführen. Danach ist es erforderlich, daß die Fördermenge Q_j um den Betrag der Förderung aus dem Speichervolumen Q_{Sp} , welches sich wiederum aus Q_B -Fördermenge aus dem Brunnenvolumen - und Q_K -Fördermenge aus dem

Volumen der Kiesschüttung - zusammensetzt, korrigiert wird. Mit diesen Werten kann eine Stufenfunktion entsprechend TGL 23 864/05, Bild 2, $Q_j = Q_j(t)$ aufgetragen werden. Bei der Stufeneinteilung ist nachträglich zu überprüfen, ob das Zeitkriterium

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

eingehalten wird. Die Auswertung von GWBR, deren Spiegelverlauf durch den Kapazitätseffekt eines nahegelegenen Brunnens beeinflusst ist, ist meist nicht möglich, da das Zeitkriterium nicht erfüllt ist.

Von grundsätzlicher Bedeutung für die Auswertung von Messungen am Brunnen selbst ist die Analyse der auftretenden Skineffekte. Darunter werden alle hydraulischen Einflußgrößen gezählt, die in Brunnennähe zusätzlich auf den Absenkungsprozeß einwirken.

$$s = 0,183 \frac{Q}{T} \lg \frac{2,25 \cdot T \cdot t}{r^2 \cdot S} + S_e \quad (A 1/5)$$

$S_e = \text{Skin - Effekt:}$

dabei handelt es sich z.B. um:

- a) Strömungswiderstände im Brunnenfilter;
- b) Strömungswiderstände im Filterkies;
- c) Kolmationsprozesse am Brunnen;
- d) Entsandung des Grundwasserleiters;
- e) Unvollkommenheit des Brunnens;
- f) Abweichungen von der DARCY-Strömung

Bei den Einflußfaktoren a) bis d) kann man davon ausgehen, daß bei einem nach WAPRO 1.42., Blatt 3, bemessenen und technisch ordnungsgemäß hergestellten Brunnen die S_e -Werte vernachlässigbar klein sind.

Die Einflußgröße e) ist quantitativ erfaßbar und somit in der Auswertung berücksichtigbar.

Die Einflußgröße f), die beispielsweise bei der Strömung im klüftigen Festgestein auftritt, kann in der Praxis Werte von mehreren Metern annehmen, wofür dann die in den Abschnitten A1.2 und A1.4 angegebenen Auswerteverfahren keine Gültigkeit mehr haben.

Die Auswertung des Wiederanstiegs ermöglicht auch die Bestimmung von S_e . Bei diesem Vorgang fließt in unmittelbarer Nähe des Brunnens kein Wasser, so daß das hydraulische Gefälle Null ist (nicht während der Wirkung des Kapazitätseffektes).

Aus diesem Grunde findet der dort auftretende T-Wert keine Berücksichtigung im Mittelwert und der S_e -Wert ist somit ebenfalls Null.

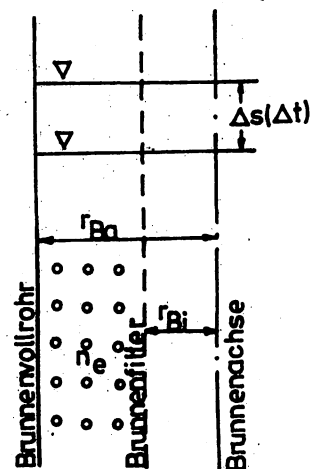
Setzt man den so ermittelten Wert T in Gleichung (A 1/5) ein, kann man S_e bestimmen.

A 1.3. Berechnungsbeispiel zur Auswertung mittels Ausgleichsgerade

Im folgenden wird anhand eines Beispiels die Auswertung der Absenkungs- und Anstiegsphase bei Berücksichtigung des Kapazitätseffektes erläutert.

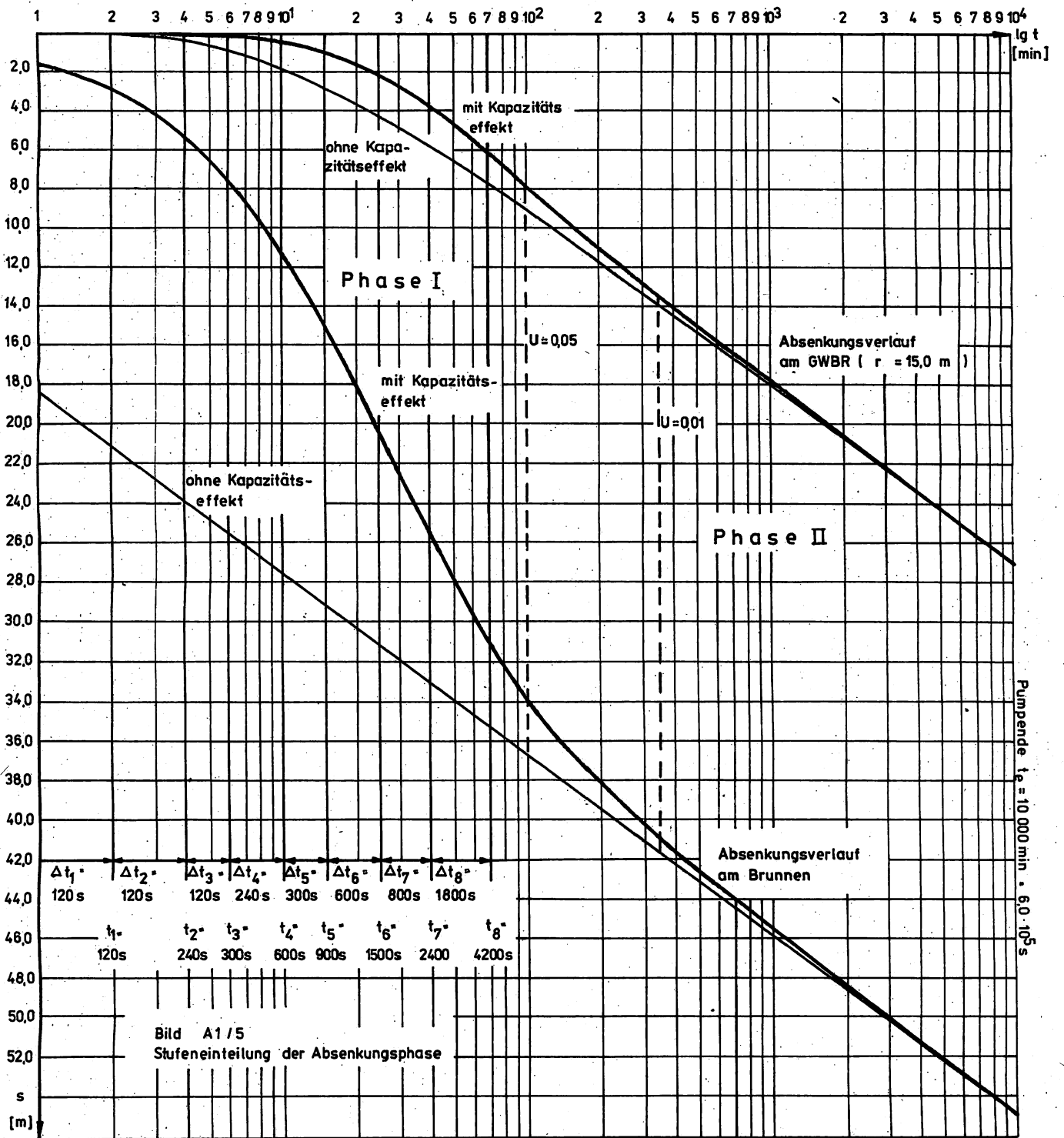
Ausgangsgrößen:

$$\begin{aligned}
 Q &= 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \text{ konstant} \\
 r_{Ba} &= 0,3 \text{ m} \\
 r_{Bi} &= 0,2 \text{ m} \\
 n_e &= 0,3 \text{ geschätzt} \\
 & \text{(Porosität des Filterkieses)}
 \end{aligned}$$



Bei der Auswertung sind folgende Arbeitsschritte durchzuführen:

1. Überprüfung der Voraussetzungen des Verfahrens
Wie aus Bild A1/5 und A 1/6 ersichtlich, ist der Einfluß des Kapazitätseffektes aus dem Absenkungs- und Anstiegsverlauf des Wasserspiegels des Brunnens und des 15 m entfernten GWBR deutlich zu erkennen.
2. Stufeneinteilung der Phase I
Die Stufeneinteilung sollte in Abhängigkeit von der Größe des Einflusses des Kapazitätseffektes vorgenommen werden, d.h. Bereiche mit großem Einfluß der Brunnenkapazität sollten möglichst mit einer feinen Stufeneinteilung versehen werden.
Mit der Abnahme des Einflusses ist die Stufeneinteilung zu vergrößern. Bei der Stufeneinteilung dürfen auch Bereiche der Phase II erfaßt werden.
Im vorliegenden Beispiel wäre eine Stufeneinteilung bis 1000 min nach Pumpbeginn (Auswertung des Absenkungsverlaufes) bzw. Pumpende (Auswertung des Anstiegsverlaufes) sehr sinnvoll. Allerdings würde sich damit der recht hohe Aufwand der Auswertung weiter erhöhen.



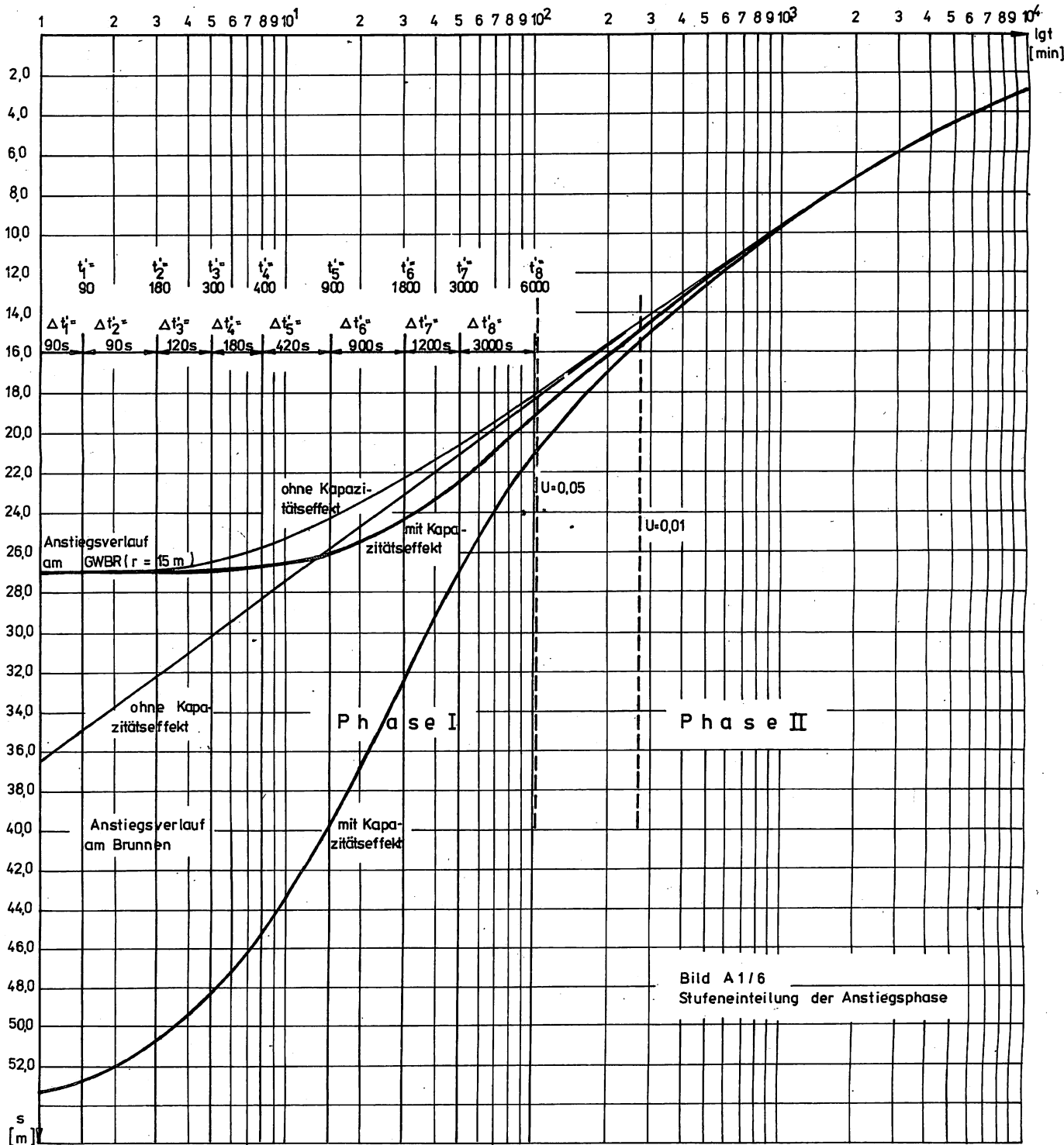


Bild A1/6
Stufeneinteilung der Anstiegsphase

3. Bestimmung der Stufenfunktion $Q_j = Q_j(t)$

Die Berechnung der Stufenfunktion $Q_j = Q_j(t)$ erfolgt zweckmäßigerweise in Tabellenform (siehe Tabelle A 1/1 und A 1/2).

Darin sind:

Δs - Wasserspiegeldifferenzen der einzelnen Stufen j [m]

Q - Entnahmemenge [$m^3 \cdot s^{-1}$]

Δt - Zeitintervalle der Stufen j [s]

V - im Verlauf der Stufe gefördertes Wasservolumen

$$V = Q \cdot \Delta t \quad (\text{A 1/6}) \quad [m^3]$$

V_{Br} - aus den Brunnen gefördertes Wasservolumen pro Stufe j [m^3]

$$V_{Br} = \Delta s \cdot \pi \cdot r_{Bi}^2 \quad (\text{A 1/7})$$

V_{Ki} - aus dem Kiesfilter gefördertes Wasservolumen pro Stufe j [m^3]

$$V_{Ki} = \Delta s \cdot \pi \cdot (r_{Ba}^2 - r_{Bi}^2) \cdot n_e \quad (\text{A 1/8})$$

V_{korr} - korrigiertes Entnahmevermögen pro Stufe j [m^3]

$$V_{korr} = V - V_{Br} - V_{Ki} \quad (\text{A 1/9})$$

Q_{korr} - korrigierte Entnahmemenge pro Stufe j [$m^3 \cdot s^{-1}$]

$$Q_{korr} = V_{korr} / \Delta t \quad (\text{A 1/10})$$

Aus den o.g. Größen kann für jede Stufe jeder Wert U analog zu Gleichung (A 1/2) berechnet werden.

$$U = \frac{V_{Br} + V_{Ki}}{V} \quad (\text{A 1/11})$$

Bei der Berechnung der Stufenfunktion $Q_j = Q_j(t)$ für den Anstiegsverlauf wurde in Tabelle A 1/2 die gesamte Absenkungsphase in der Stufe $j = 0$ zusammengefaßt. Dies ist möglich, wenn bis zum Einsetzen des Anstieges der Einfluß des Kapazitätseffektes abgeklungen ist (siehe Bild A 1/5).

Stufe j	Δs (m)	Q (m ³ /s)	Δt (s)	V (m ³)	V _{Br} (m ³)	V _{Ki} (m ³)	V _{korr} (m ³)	Q _{korr} (m ³ /s)	t (s)	s (m)
1	2,8	5,0 · 10 ⁻³	120	0,6	0,352	0,132	0,116	9,67 · 10 ⁻⁴	120	2,8
2	2,6	"	120	0,6	0,327	0,123	0,150	1,25 · 10 ⁻³	240	5,4
3	2,2	"	120	0,6	0,276	0,104	0,220	1,83 · 10 ⁻³	360	7,6
4	3,8	"	240	1,2	0,478	0,179	0,543	2,26 · 10 ⁻³	600	11,4
5	3,6	"	300	1,5	0,452	0,169	0,879	2,93 · 10 ⁻³	900	15,0
6	5,4	"	600	3,0	0,679	0,254	2,067	3,45 · 10 ⁻³	1500	20,4
7	5,0	"	900	4,5	0,628	0,236	3,636	4,04 · 10 ⁻³	2400	25,4
8	5,6	"	1800	9,0	0,704	0,264	8,032	4,46 · 10 ⁻³	4200	31,0

Tabelle A 1/1: Berechnung der Stufenfunktion $Q_j = Q_j(t)$ für den Absenkungs-
bereich des Brunnenwasserspiegels

Stufe j	Δs (m)	Q (m ³ /s)	Δt (s)	V (m ³)	V _{Br} (m ³)	V _{Ki} (m ³)	V _{korr} (m ³)	Q _{korr} (m ³ /s)	t' (s)	t (s)	s (m)
0	55,0	5,0 · 10 ⁻³	6,0 · 10 ⁵	3000,0	6,91	2,59	2990,5	4,98 · 10 ⁻³	0	600 000	55,0
1	2,2	0,0	90	0,0	0,276	0,104	0,380	4,22 · 10 ⁻³	90	600 090	52,8
2	2,0	0,0	90	0,0	0,251	0,094	0,345	3,83 · 10 ⁻³	180	600 180	50,8
3	2,2	0,0	120	0,0	0,276	0,104	0,380	3,17 · 10 ⁻³	300	600 300	48,6
4	3,3	0,0	180	0,0	0,415	0,156	0,571	3,17 · 10 ⁻³	480	600 480	45,3
5	5,4	0,0	420	0,0	0,679	0,254	0,933	2,22 · 10 ⁻³	900	600 900	39,9
6	7,4	0,0	900	0,0	0,930	0,349	1,279	1,42 · 10 ⁻³	1800	601 800	32,5
7	5,5	0,0	1200	0,0	0,691	0,259	0,950	0,79 · 10 ⁻³	3000	603 000	27,0
8	6,0	0,0	3000	0,0	0,754	0,283	1,037	0,34 · 10 ⁻³	6000	606 000	21,0

Tabelle A 1/2: Berechnung der Stufenfunktion $Q_j = Q_j(t)$ für den Anstieg des Brunnenwasserstandes

Setzt der Anstieg dagegen bereits in der Phase I des Absenkungsbereiches ein, so muß bei Auswertung des Anstieges die Stufenfunktion $Q_j = Q_j(t)$ auch den zeitlichen Verlauf des Absenkungsbereiches detaillier berücksichtigen.

4. Berechnung der Hilfsvariablen x

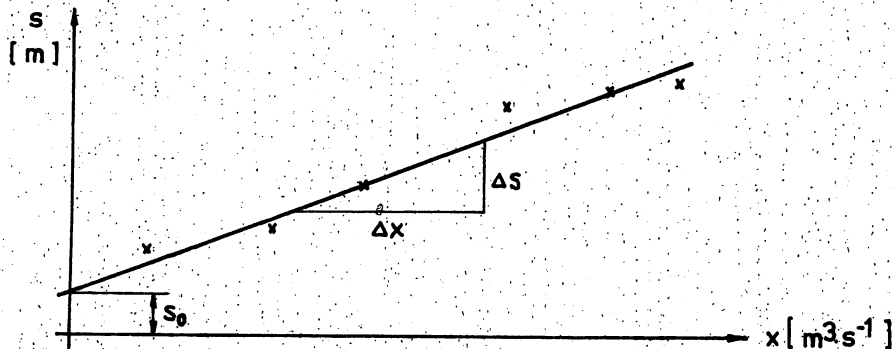
Die Hilfsvariable x errechnet sich für jede Stufe j zu

$$x = \sum_{j=1}^n (Q_j - Q_{j-1}) \cdot \lg(t - t_{j-1}) \quad (5/11)$$

Die Berechnung der Hilfsvariablen x für den Absenkungsverlauf ist aus Tabelle A 1/3 und für die Auswertung des Anstieges aus Tabelle A 1/4 ersichtlich.

5. Auswertung der Funktion $s = f(x)$

Die für das Ende jeder Stufe j berechneten x -Werte werden als Funktion $s = f(x)$ auf Millimeterpapier aufgetragen. Durch die aufgetragenen Punkte wird nach Augenmaß eine Ausgleichsgerade konstruiert.



Aus der Ausgleichsgeraden kann der Richtungskoeffizient

$$\alpha_x = \frac{\Delta s}{\Delta x} \quad (5/12)$$

bestimmt werden.

Die Transmissibilität errechnet sich zu

$$T = \frac{0,183}{\alpha_x} \quad (5/13)$$

Tabelle A 1/3: Hilfsvariable X für Auswertung des Absenkungsverlaufes am Brunnen

$$x = \sum_{j=1}^n (Q_j - Q_{j-1}) \cdot \lg(t - t_{j-1})$$

Stufe 1	$x = Q_1 \cdot \lg t$ $= 9,67 \cdot 10^{-4} \cdot \lg 120$	= 0,00201
Stufe 2	$x = Q_1 \cdot \lg t + (Q_2 - Q_1) \cdot \lg(t - t_1)$ $= 9,67 \cdot 10^{-4} \cdot \lg 240 + 2,83 \cdot 10^{-4} \cdot \lg 120$	= 0,00289
Stufe 3	$x = Q_1 \cdot \lg t + (Q_2 - Q_1) \cdot \lg(t - t_1) + (Q_3 - Q_2) \cdot \lg(t - t_2)$ $= 9,67 \cdot 10^{-4} \cdot \lg 360 + 2,83 \cdot 10^{-4} \cdot \lg 240 + 5,8 \cdot 10^{-4} \cdot \lg 120$	= 0,00435
Stufe 4	$x = Q_1 \cdot \lg t + (Q_2 - Q_1) \cdot \lg(t - t_1) + (Q_3 - Q_2) \cdot \lg(t - t_2) + (Q_4 - Q_3) \cdot \lg(t - t_3)$ $= 9,67 \cdot 10^{-4} \cdot \lg 600 + 2,83 \cdot 10^{-4} \cdot \lg 480 + 5,8 \cdot 10^{-4} \cdot \lg 360 + 4,3 \cdot 10^{-4} \cdot \lg 240$	= 0,00595
Stufe 5	$x = Q_1 \cdot \lg t + (Q_2 - Q_1) \cdot \lg(t - t_1) + (Q_3 - Q_2) \cdot \lg(t - t_2) + \dots$ $= 9,67 \cdot 10^{-4} \cdot \lg 900 + 2,83 \cdot 10^{-4} \cdot \lg 780 + 5,8 \cdot 10^{-4} \cdot \lg 660 + \dots$	= 0,00815
Stufe 6	$x = Q_1 \cdot \lg t + (Q_2 - Q_1) \cdot \lg(t - t_1) + (Q_3 - Q_2) \cdot \lg(t - t_2) + \dots$ $= 9,67 \cdot 10^{-4} \cdot \lg 1500 + 2,83 \cdot 10^{-4} \cdot \lg 1380 + 5,8 \cdot 10^{-4} \cdot \lg 1260 + \dots$	= 0,01050
Stufe 7	$x = Q_1 \cdot \lg t + (Q_2 - Q_1) \cdot \lg(t - t_1) + (Q_3 - Q_2) \cdot \lg(t - t_2) + \dots + (Q_7 - Q_6) \cdot \lg(t - t_6)$ $= 9,67 \cdot 10^{-4} \cdot \lg 2400 + 2,83 \cdot 10^{-4} \cdot \lg 2280 + 5,8 \cdot 10^{-4} \cdot \lg 2160 + \dots + 5,9 \cdot 10^{-4} \cdot \lg 900$	= 0,01315
Stufe 8	$x = Q_1 \cdot \lg t + (Q_2 - Q_1) \cdot \lg(t - t_1) + (Q_3 - Q_2) \cdot \lg(t - t_2) + \dots + (Q_8 - Q_7) \cdot \lg(t - t_7)$ $= 9,67 \cdot 10^{-4} \cdot \lg 4200 + 2,83 \cdot 10^{-4} \cdot \lg 4080 + 5,8 \cdot 10^{-4} \cdot \lg 3960 + \dots + 4,2 \cdot 10^{-4} \cdot \lg 1800$	= 0,01576

Tabelle A 1/4: Hilfsvariable x für Auswertung des Anstiegs des Brunnenwasserstandes

$$x = \sum_{j=1}^n (Q_j - Q_{j-1}) \cdot \lg(t-t_{j-1})$$

Stufe 0	$x = Q_0 \lg t$ $= 4,98 \cdot 10^{-3} \cdot \lg 6 \cdot 10^5$	$= 2,88 \cdot 10^{-2}$
Stufe 1	$x = Q_0 \cdot \lg t + (Q_1 - Q_0) \cdot \lg(t-t_0)$ $= 4,98 \cdot 10^{-3} \cdot \lg 600090 - 7,6 \cdot 10^{-4} \lg 90$	$= 2,72 \cdot 10^{-2}$
Stufe 2	$x = Q_0 \cdot \lg t + (Q_1 - Q_0) \cdot \lg(t-t_0) + (Q_2 - Q_1) \cdot \lg(t-t_1)$ $= 4,98 \cdot 10^{-3} \cdot \lg 600180 - 7,6 \cdot 10^{-4} \cdot \lg 180 - 3,9 \cdot 10^{-4} \cdot \lg 90$	$= 2,63 \cdot 10^{-2}$
Stufe 3	$x = Q_0 \cdot \lg t + (Q_1 - Q_0) \cdot \lg(t-t_0) + (Q_2 - Q_1) \cdot \lg(t-t_1) + (Q_3 - Q_2) \cdot \lg(t-t_2)$ $= 4,98 \cdot 10^{-3} \cdot \lg 600300 - 7,6 \cdot 10^{-4} \cdot \lg 300 - 3,9 \cdot 10^{-4} \cdot \lg 210 - 6,6 \cdot 10^{-4} \cdot \lg 120$	$= 2,46 \cdot 10^{-2}$
Stufe 4	$x = Q_0 \cdot \lg t + (Q_1 - Q_0) \cdot \lg(t-t_0) + (Q_2 - Q_1) \cdot \lg(t-t_1) + \dots + (Q_4 - Q_3) \cdot \lg(t-t_3)$ $= 4,98 \cdot 10^{-3} \cdot \lg 600480 - 7,6 \cdot 10^{-4} \cdot \lg 480 - 3,9 \cdot 10^{-4} \cdot \lg 390 - \dots + 0 \cdot \lg 180$	$= 2,41 \cdot 10^{-2}$
Stufe 5	$x = Q_0 \cdot \lg t + (Q_1 - Q_0) \cdot \lg(t-t_0) + (Q_2 - Q_1) \cdot \lg(t-t_1) + \dots + (Q_5 - Q_4) \cdot \lg(t-t_4)$ $= 4,98 \cdot 10^{-3} \cdot \lg 600900 - 7,6 \cdot 10^{-4} \cdot \lg 900 - 3,9 \cdot 10^{-4} \cdot \lg 810 - \dots - 9,5 \cdot 10^{-4} \cdot \lg 420$	$= 2,10 \cdot 10^{-2}$
Stufe 6	$x = Q_0 \cdot \lg t + (Q_1 - Q_0) \cdot \lg(t-t_0) + (Q_2 - Q_1) \cdot \lg(t-t_1) + \dots + (Q_6 - Q_5) \cdot \lg(t-t_5)$ $= 4,98 \cdot 10^{-3} \cdot \lg 601800 - 7,6 \cdot 10^{-4} \cdot \lg 1800 - 3,9 \cdot 10^{-4} \cdot \lg 1710 - \dots - 8,0 \cdot 10^{-4} \cdot \lg 900$	$= 1,83 \cdot 10^{-2}$
Stufe 7	$x = Q_0 \cdot \lg t + (Q_1 - Q_0) \cdot \lg(t-t_0) + (Q_2 - Q_1) \cdot \lg(t-t_1) + \dots + (Q_7 - Q_6) \cdot \lg(t-t_6)$ $= 4,98 \cdot 10^{-3} \cdot \lg 603000 - 7,6 \cdot 10^{-4} \cdot \lg 3000 - 3,9 \cdot 10^{-4} \cdot \lg 2910 - \dots - 6,3 \cdot 10^{-4} \cdot \lg 1200$	$= 1,47 \cdot 10^{-2}$
Stufe 8	$x = Q_0 \cdot \lg t + (Q_1 - Q_0) \cdot \lg(t-t_0) + (Q_2 - Q_1) \cdot \lg(t-t_1) + \dots + (Q_8 - Q_7) \cdot \lg(t-t_7)$ $= 4,98 \cdot 10^{-3} \cdot \lg 606000 - 7,6 \cdot 10^{-4} \cdot \lg 6000 - 3,9 \cdot 10^{-4} \cdot \lg 5910 - \dots - 4,45 \cdot 10^{-4} \cdot \lg 3000$	$= 1,16 \cdot 10^{-2}$

Bei Auswertung von GWBR kann die geohydraulische Zeitkonstante a nach Gleichung

$$\lg a = \lg \frac{2,25}{r^2} - \frac{s_0}{\alpha_x \cdot Q_m} \quad (5/14)$$

bestimmt werden. s_0 ist aus der grafischen Darstellung abzulesen, indem die Ausgleichsgerade bis zur s -Achse verlängert wird.

Die Auswertung der Funktion $s = f(x)$ für das gewählte Beispiel ist in Bild A 1/7 und A 2/8 dargestellt.

6. Überprüfung des Zeitkriteriums $t \geq 3,8 \cdot a \cdot r^2$

Der ermittelte T-Wert beträgt rd. $9,0 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

Der S-Wert kann mit 0,0015 eingeschätzt werden.

Für den Brunnen ergibt sich als Zeitkriterium

$$t \geq 3,8 \cdot \frac{0,0015}{9,0 \cdot 10^{-5}} \cdot 0,3^2 = 5,7 \text{ s}$$

Dieses Zeitkriterium ist für jede Stufe j erfüllt.

Für das 10,0 m vom Brunnen entfernte GWBR ergibt sich

$$t \geq 3,8 \cdot \frac{0,0015}{9,0 \cdot 10^{-5}} \cdot 10,0^2 = 6.333,3 \text{ s} = 105,5 \text{ min}$$

Damit ist eine Auswertung der Phase I des GWBR nach dem Verfahren der Ausgleichsgeraden nicht möglich.

Es können lediglich durch Auswertung der Phase II gemäß Punkt 2.1 geohydraulische Parameter aus dem Spiegelverlauf am GWBR ermittelt werden.

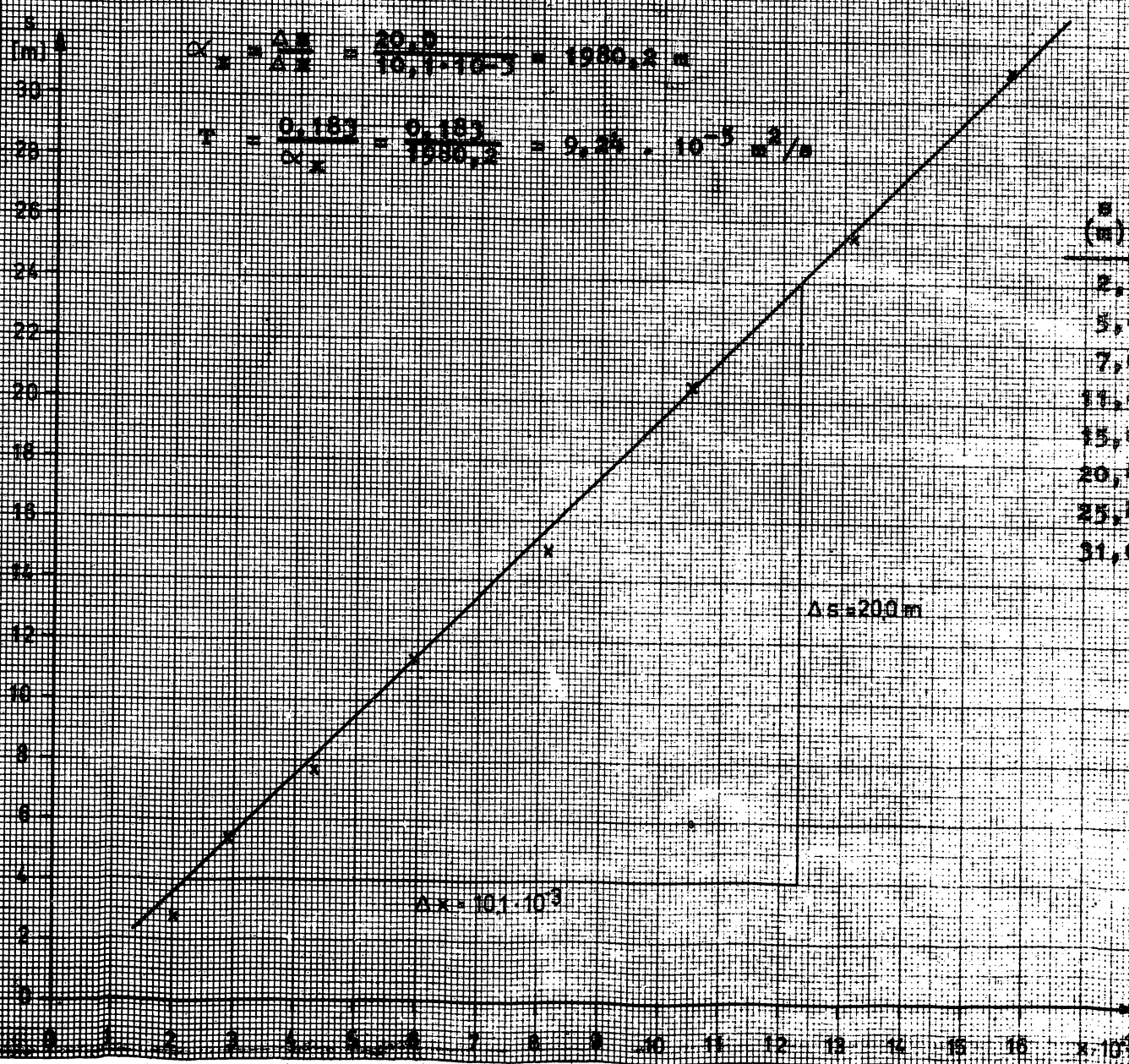


Bild A 1/7: Funktion $s = f(x)$ - Absenkungsphase

s
[m]

$$\alpha_x = \frac{\Delta s}{\Delta x} = \frac{20,6}{10,0 \cdot 10^{-3}} = 2060,0 \text{ m}$$

$$\beta = \frac{0,183}{\alpha_x} = \frac{0,183}{2060,0} = 8,89 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$$

$\Delta x = 10,0 \cdot 10^{-3}$

$\Delta s = 20,6 \text{ m}$

s (m)	x
55,0	$28,8 \cdot 10^{-3}$
52,8	$27,2 \cdot 10^{-3}$
50,8	$26,3 \cdot 10^{-3}$
48,6	$24,6 \cdot 10^{-3}$
45,3	$24,1 \cdot 10^{-3}$
39,9	$21,0 \cdot 10^{-3}$
32,5	$18,3 \cdot 10^{-3}$
27,0	$14,7 \cdot 10^{-3}$
21,0	$11,6 \cdot 10^{-3}$

BILD A 1/3: Funktion s = f(x) Messergebnisse

A 1.4. Auswertung mit Hilfe typischer Kurven

In der TGL 23 864/09, Punkt 2, ist ein Auswerteverfahren für Pumpversuche unter Beachtung des Kapazitätseffektes mit Hilfe typischer Kurven angegeben. Um dieses Verfahren anwenden zu können, müssen die Voraussetzungen lt. A.1.2. erfüllt sein. Zusätzlich müssen zwei weitere Bedingungen eingehalten werden, und zwar

- der Förderstrom ist konstant
- der Speicherkoeffizient ist bekannt
bzw. muß mit großer Genauigkeit eingeschätzt werden.

Vorteile des Verfahrens:

- geringer Rechenaufwand
- die Annahme der entwässerbaren Porosität der Kiese schüttung spielt eine untergeordnete Rolle
- das Verfahren kann bei unbekanntem Brunnenausbau-
daten benutzt werden

Nachteile des Verfahrens:

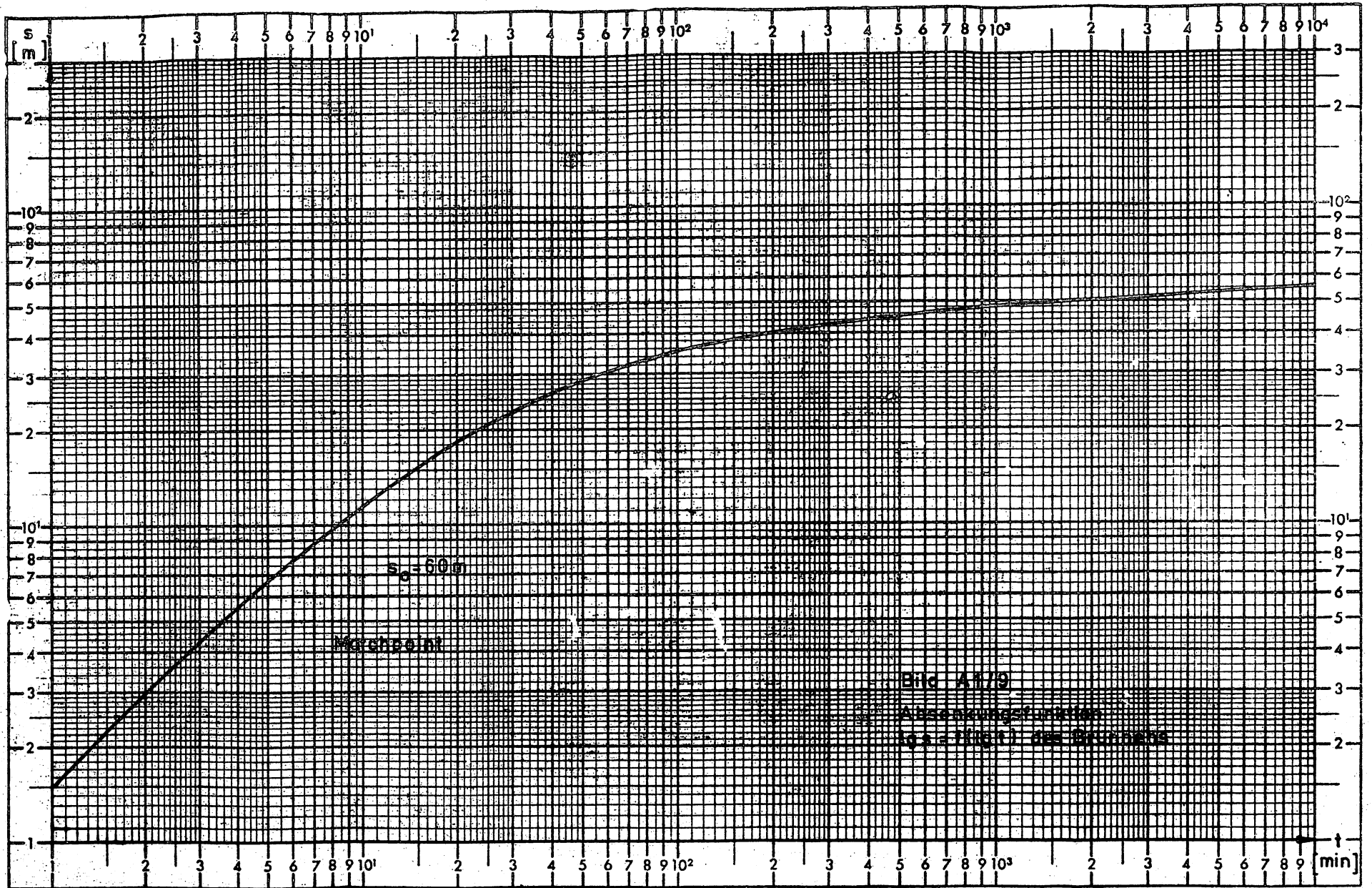
- ungenaue S-Werte führen zu Abweichungen in
der T-Wert-Bestimmung
- nichtanwendbar bei Förderstromänderungen

Zum Vergleich der Ergebnisse wird hier ebenfalls das im Abschnitt A 1.3. angegebene Beispiel ausgewertet.

Berechnungsbeispiel:

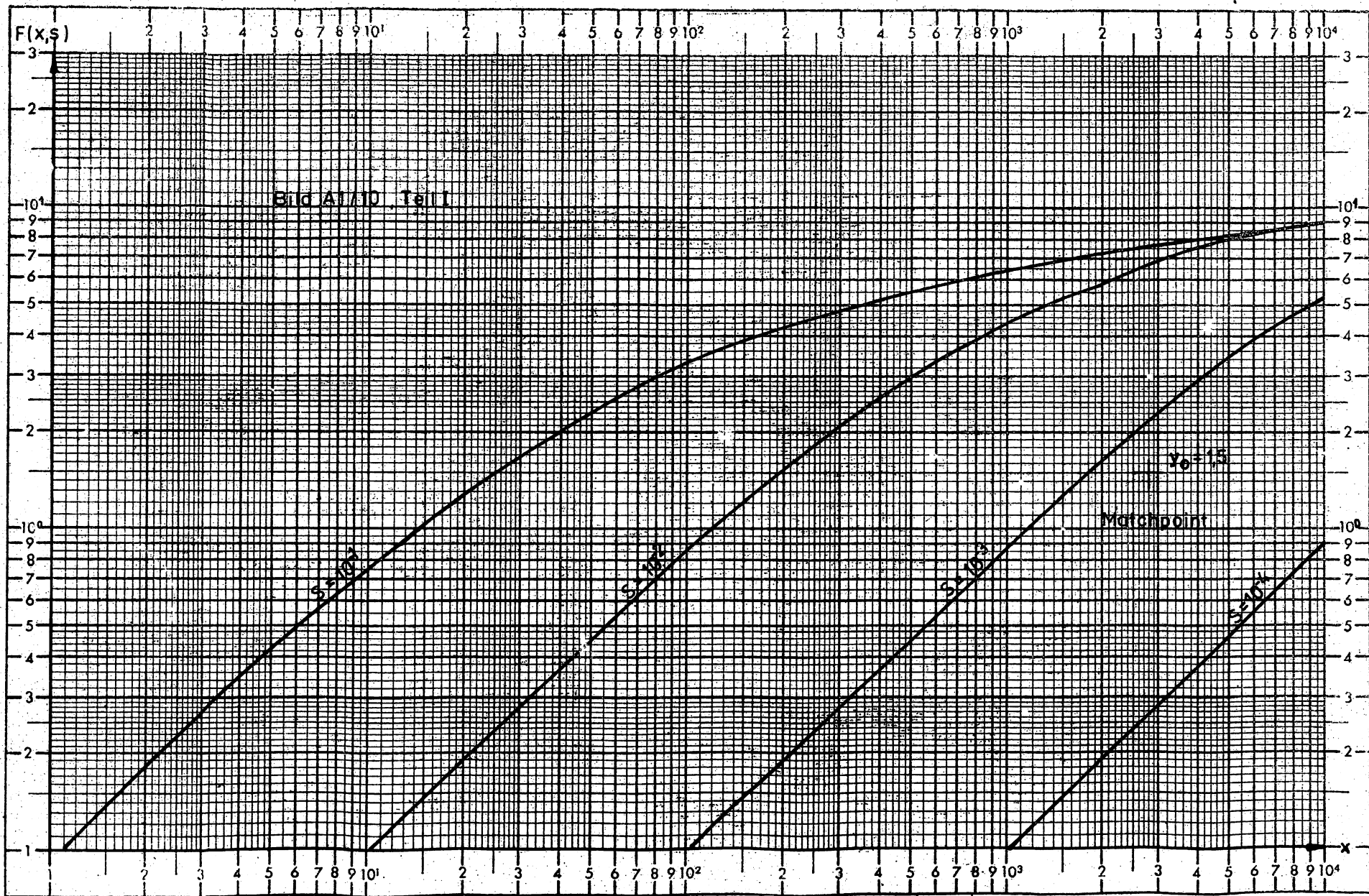
Die Meßwerte für den Absenkungsverlauf des Brunnens (Bild A 1/5) werden im doppeltlogarithmischen Maßstab aufgetragen (Bild A 1/9).

Aus der Tabelle auf Seite 22 der TGL 23 864/09 werden die Werte für die graphische Darstellung der Funktion $F(x, S)$ über x entnommen ($x = \frac{1}{u}$). Man erhält eine Schar typischer Kurven mit S als Parameter (siehe Bild A 1/10 Teil I und II).



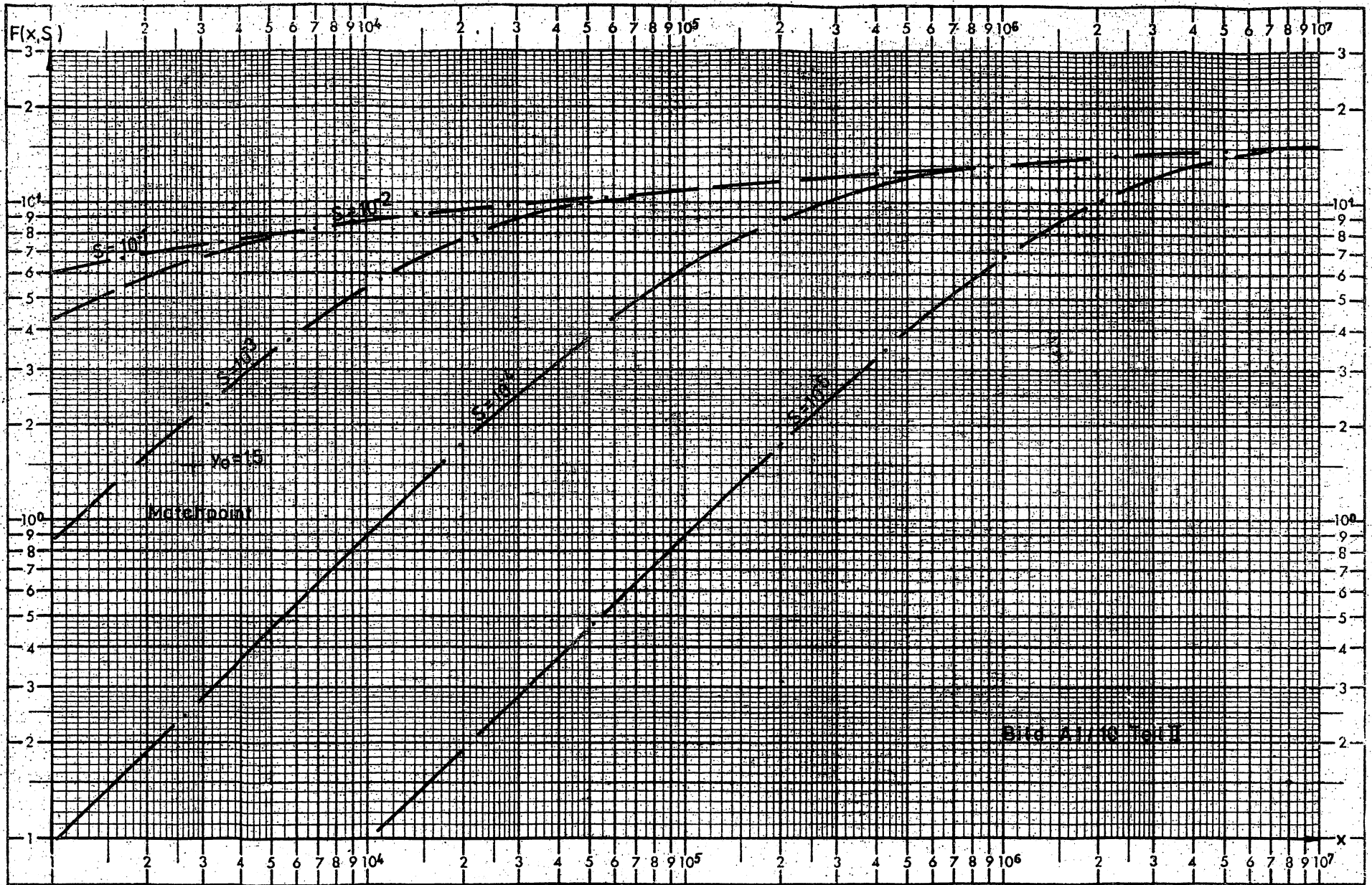
A1-24

Beide Achsen logar. geteilt von 1 bis 10^4 u. 1 bis $3 \cdot 10^2$ Einheit 62,5 mm



Beide Achsen logar. geteilt von 1 bis 10^4 u. 1 bis $3 \cdot 10^2$ Einheit 62,5 mm

A1-25



Beide Achsen logar. geteilt von 1 bis 10^4 u. 1 bis $3 \cdot 10^2$ Einheit 62,5 mm

A1-26

Entsprechend dem in der TGL 23 864/09 Punkt 2.1.2. angegebenen Auswerteschema werden die y_0 - und s_0 -Werte für den jeweiligen Speicherkoeffizienten bestimmt. Aus diesen Werten wird T errechnet.

Für den geschätzten S-Wert von

$$S = 0,0015$$

ergibt sich:

$$T = \frac{Q}{4T_p} \cdot \frac{y_0}{s_0} = \frac{5,0 \cdot 10^{-3}}{4T_p} \cdot \frac{1,5}{6,0} = 9,95 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \quad (9/29)$$

Der Wert liegt in der gleichen Größenordnung wie die nach dem STRAIGHT-LINE-VERFAHREN ermittelten Werte (Absenkung $T = 9,24 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, Anstieg $T = 8,88 \text{ m}^2/\text{s}$).

A 1.5. EDV-Auswertung

Das Auswerteverfahren mittels der Ausgleichgeraden ist in seiner Handhabung recht aufwendig.

Eine Ausweitung dieses Verfahrens auf weitere Berechnungsfälle, wie z.B.

- Berücksichtigung von Randbedingungen
 - Auswertung Gruppenpumpversuch
 - Auswertung von PV, bei denen die Anstiegsphase bereits einsetzt bevor der Einfluß des Kapazitätseffektes der Absenkungsphase abgeklungen ist
- usw.

führt zu einer beträchtlichen Erhöhung des Arbeitsaufwandes und wäre deshalb nicht praktikabel.

In anderen Fällen, wie z.B. Auswertung der durch Brunnenkapazität beeinflussten Spiegelverläufe von GWBR oder bei zusätzlicher Speisung aus benachbarten Schichten ist das Verfahren der Ausgleichgeraden nicht anwendbar.

Für alle diese Fälle kann das Parameteridentifikationsprogramm PVA 1 in Verbindung mit dem Hilfsprogramm KAP 1 eingesetzt werden (siehe A 5.3). Das Hilfsprogramm KAP 1 berechnet dabei zur Berücksichtigung des Kapazitätseffektes für den gesamten PV-Ablauf eine Stufenfunktion $Q_{Sp} = f(t)$. Diese Stufenfunktion wird bei der Auswertung des PV mittels PVA 1 mit den Brunnenentnahmen $Q = f(t)$ superponiert.

A 1.6. Berechnung von durch den Kapazitätseffekt beeinflussten GW-Spiegelverläufen

Bei der Projektierung von Pumpversuchen macht es sich bei einigen speziellen Fällen erforderlich, anhand geschätzter geohydraulischer Parameter, bei Berücksichtigung des Kapazitätseffektes, den Absenkungs- bzw. Anstiegsverlauf vorab zu berechnen.

Für derartige Berechnungen steht das für den KRS 4200 in SYPS-4200 erstellte Programm KAPS und das in FOR 4200 erstellte Programm KAPA zur Verfügung.

Das Programm KAPS basiert auf örtlicher und zeitlicher Superposition. Der zeitliche Ablauf wird in Intervalle geteilt. Bei der Berechnung wird für das aktuelle Intervall der Absenkungs- bzw. Anstiegswert bei Berücksichtigung des Kapazitätseffektes innerhalb des Intervalls bestimmt. Der Einfluß des Kapazitätseffektes zurückliegender Intervalle wird dabei als zeitabhängige Einspeisung bzw. Entnahme berücksichtigt. KAPS ermöglicht die Berechnung der durch die Brunnenkapazität beeinflussten Absenkungs- und Anstiegsphase am Brunnen und an den von Brunnen beeinflussten GWBR. Es können die Berechnungsfälle unendlich ausgedehnter GWL, einseitig durch $\gamma_2 = 0$ berandeter GWL und einseitig durch $\Delta q = 0$ berandeter GWL berücksichtigt werden.

Das Programm KAPA ermöglicht neben der Berücksichtigung der Eigenkapazität des Brunnen auch die Erfassung der Kapazität des GWBR.

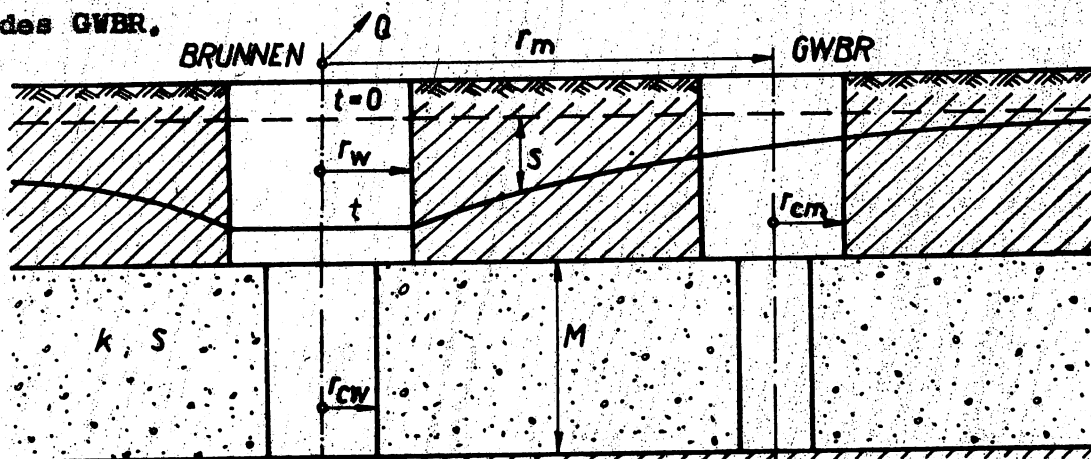


Bild 52: Prinzipische Skizze für eine Pumpversuchsgruppe mit einem GWBR, welches eine zu beachtende Eigenkapazität besitzt

Die Berechnung dieses Falles erfolgt nach der Gleichung

$$s = \frac{Q}{4 \pi T} \cdot F_W \cdot W(u) \quad ; \quad u = \frac{r^2 \cdot S}{4 T t} \quad (\text{A 1/12})$$

Die Größe F_W , die das Verhältnis der Wassermenge aus dem Grundwasserleiter zur konstanten Fördermenge angibt, läßt sich nach folgender Beziehung ermitteln:

$$F_W = 1 - \frac{1}{\alpha} \left\{ \frac{[\exp(-x_w) + W(x_w)]}{[(x_w \exp(x_w))^{-1} - (1 - \frac{1}{\alpha}) W(x_w) - \frac{1}{\beta_m} W(x_m)]} - \frac{W(x_w) [\exp(-x_w) (\frac{1}{x_w}) + \frac{1}{\alpha}] + \frac{1}{\beta_m} \exp(x_m)}{[(x_w \exp(x_w))^{-1} - (1 - \frac{1}{\alpha}) W(x_w) + \frac{1}{\beta_m} W(x_m)]^2} \right\} \quad (\text{A 1/13})$$

mit

$$\alpha = (r_w / r_{ow})^2 \cdot S \quad x_m = \alpha r_m^2$$

$$\beta_m = (r_w / r_{om})^2 \cdot S (1/S) \quad x_w = \alpha r_w^2$$

- r_{ow} - Bohrradius des VBr in m
- r_w - wirksamer Radius des VBr in m
- r_m - Entfernung VBr - GWBR in m
- r_{om} - wirksamer Radius des GWBR in m
- S - Speicherkoeffizient des GWL
- $W(x)$ - Brunnenfunktion von THEIS

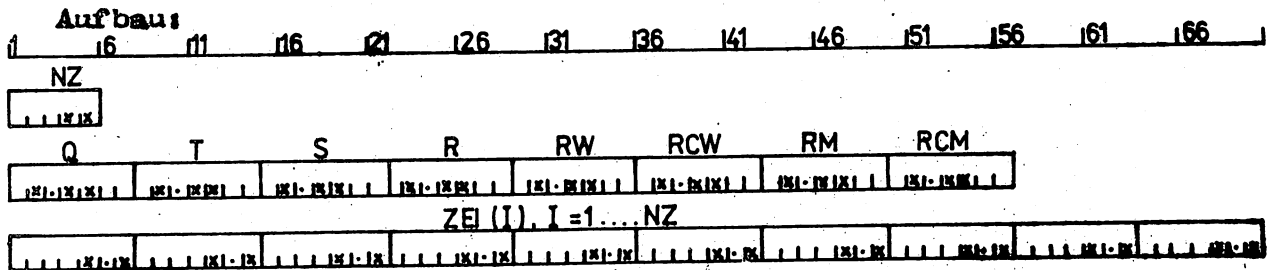
Die Lösung nach den Gleichungen (A 1/12) und (A 1/13) geht für den Fall, daß das GWBR keine Eigenkapazität besitzt, in die Lösung des Grundfalles über. Die Größe F_W hat zu Versuchsbeginn einen kleinen Wert, da zu diesem Zeitpunkt der Wasseranteil aus dem Gebirge klein ist. Mit zunehmender Versuchsdauer strebt dieser Wert asymptotisch gegen 1.

Die Abweichungen der Lösung (A 1/12) vom reinen THEIS-Verhalten sind umso größer, je kleiner der S-Wert ist, d.h. besonders bei gespanntem Grundwasser und Kluftströmung.

EDV-technische Auswertung

Wie aus Gleichung (A 1/13) zu erkennen ist, hängt diese von 5 Variablen ab, so daß eine Pumpversuchsauswertung auf der Grundlage von typischen Kurven unzweckmäßig wäre. Aus diesem Grunde wurden die Gleichungen (A 1/12) und (A 1/13) EDV-technisch im Programm KAPA aufbereitet und stehen zur Auswertung zur Verfügung. Dabei ist das Programm mit mehreren S- und T-Wert-Kombinationen zu nutzen und aus einem Vergleich der berechneten und gemessenen Absenkungen der repräsentative Parametersatz zu ermitteln.

Die Eingabestruktur für das Programm KAPA hat folgenden



Eingabevorschrift für das EDV-Programm KAPA

Hierfür gelten:

- NZ = Anzahl der Berechnungszeiten
- Q = Förderstrom in m^3/s
- T = Transmissibilität der GWL in m^2/s
- S = Speicherkoeffizient d. GWL
- R = Radius des Brunnens bzw. GWBR in m
- RW = wirksamer Radius d. VBr in m
- RCW = Bohrradius des VBr in m
- RM = Entfernung VBr - GWBR in m
- RCM = wirksamer Radius d. GWBR in m
- ZEI (I) I = 1... NZ = Berechnungszeiten

Als Ergebnisse werden in tabellarischer Form ZBI (I), W (5), F_V , $F_V \cdot W (5)$ und s ausgegeben.

KAPA SEITE 1

```

00000      PROGRAM KAPA
           DIMENSION ZEI(50)
00146      READ(LL0,1) NZ
00160      1  FORMAT(I5)
00163      READ(LL0,2) Q, T, S, R, RW, RCW, RM, RCM
00231      2  FORMAT(8F7.4)
00235      READ(LL0,3) (ZEI(I), I=1, NZ)
00265      3  FORMAT(10F7.1)
           C
00271      WRITE(SD0,4) Q, T, S, R, RW, RCW, RM, RCM
00337      4  FORMAT(6X,40HBERECHNUNG VON BRUNNEN UND GWBR MIT,
00366      *      17H EIGENKAPAZITAET/6X,13HEINGANGSDATEN//6X,
00415      *      2HQ=,E9.2,5H T=,E9.2,5H S=,F6.4,8H R=,F6.2/6X,
00442      *      3HRW=,F6.2,9H RCW=,F6.2,7H RM=,F6.2,9H RCM=,
00471      *      F6.2//6X,21HBERECHNUNGSERGEBNISSE//7X,3HZEI,8X,1HW,8X,3HFAK,
00526      *      8X,4HFAK1,8X,2HAB)
           C
00536      ALFA=(RW/RCW)**2*S
00535      BETM=(RW/RCM)**2*S/(1.-S)
00616      DO 20 I=1,NZ
00620      XM=S*RM**2/(4.*T*ZEI(I))
00665      XW=S*RW**2/(4.*T*ZEI(I))
           C
00732      A1=EXP(-XW)
00750      A2=THEI(XW)
00756      A3=1./(XW*EXP(XW))
01000      A4=(1.-1./ALFA)*A2
01025      A5=1./BETM*THEI(XM)
01047      A6=(1./XW)+(1./ALFA)
01074      A7=1./BETM*EXP(-XM)
01126      FAK=1.-((1./ALFA)*(((A1+A2)/(A3-A4+A5)))
01172      *      -((A2*(A1*A6+A7))/(A3-A4+A5)**2)))
01271      ARG=R**2*S/(4.*T*ZEI(I))
01336      W=THEI(ARG)
01344      FAK1=FAK*W
01355      AB=Q/(12.5664*T)*FAK1
           C
01402      WRITE(SD0,5) ZEI(I), W, FAK, FAK1, AB
01440      5  FORMAT(4X,F8.2,4X,F5.2,5X,F5.3,6X,F5.2,7X,F5.2)
01454      20 CONTINUE
           STOP
           END

```

Bild A1/11: Listing des Rechenprogrammes KAPA

Das Unterprogramm THEI ist aus Punkt 5 (Bild 5/3) zu entnehmen.