

3.3. Vorbereitung eines Gütepumpversuches

3.3.1. Geohydraulischer Pumpversuch

Vor der Durchführung eines Gütepumpversuches ist an der gleichen Versuchsgruppe ein geohydraulischer Pumpversuch durchzuführen, um damit die geohydraulischen Parameter zu ermitteln. Im Zusammenhang mit den Siebanalysen aus allen Bohrungen lassen sich damit folgende Größen ermitteln, die auch für die Auswertung und Interpretation des Gütepumpversuches notwendig sind.

- . Durchlässigkeitsverhältnisse k, T
- . Speicherkoeffizient S
- . durchströmte Porosität n_0
- . Homogenität des GWL
- . schichtenförmiger Aufbau
- . Mächtigkeit der wassererfüllten Schichten M

3.3.2. Vorausberechnung des Gütepumpversuches

Die Vorausberechnung eines Gütepumpversuches mit geschätzten Parametern ist in der Projektierungsphase unbedingt notwendig. Auf diese Weise können die wesentlichsten Versuchsgrößen festgelegt werden:

- . die benötigte Wassermenge einschließlich deren Bereitstellung und Heranführung
- . Menge des Migranten bzw. Tracers
- . die vertretbare Entfernung der GWER vom Brunnen
- . die ungefähre Versuchsdauer
- . der Meßbeginn an den GWER und
- . die Entscheidung über impulsförmige oder kontinuierliche Tracereingabe

Zur Vereinfachung der Vorausberechnung von Gütepumpversuchen wurde auf der Grundlage der Brunnenlösung von THEIS das im Bild (3/1) dargestellte Diagramm entwickelt. Es gestattet die Vorhersage der Absenkung bzw. Aufhöhung im Brunnen bei charakteristischen Speicherkeffizienten. ($S = 1 \cdot 10^{-4} \hat{=}$ gespannt; $S = 0,20 \hat{=}$ ungespannt), für Profildurchlässigkeiten von $T = 1 \cdot 10^{-4}$ bis $T = 5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$, für 3 verschiedene Brunnenradien ($r_0 = 0,1 \text{ m}; 0,2 \text{ m}; 0,3 \text{ m}$) sowie einer Testzeit von $t = 10$ Tage, welche bei Gütepumpversuchen im allgemeinen nicht überschritten wird.

Der Wert von s ergibt sich dann aus der Multiplikation des Diagrammwertes F mit der Wassermenge Q .

Beispiel zur Nutzung des Bildes (3/1)

$$\left. \begin{array}{l} k = 2 \cdot 10^{-4} \text{ m/s} \\ M = 10 \cdot \text{ m} \end{array} \right\} T = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

gespannte Strömungsverhältnisse $S = 1 \cdot 10^{-4}$

Brunnenradius $r_0 = 0,15 \text{ m}$

GW-Spiegel liegt 10 m unter Gelände

Aus dem Diagramm ergibt sich $F = 850 \text{ s/m}^2$, woraus sich bei einer Infiltration von $Q = 0,010 \text{ m}^3/\text{s}$ eine Aufhöhung des Wasserspiegels von

$$/s/ = 850 \cdot 0,010 = 8,5 \text{ m}$$

ergibt.

Da der Grundwasserspiegel 10 m unter Gelände liegt, ist die gewählte Infiltrationsmenge möglich.

Im nächsten Rechengang können die Konzentrationskurven an unterschiedlichen Entfernungen r ($r = 5 \text{ m}; 10 \text{ m}; 15 \text{ m}$) vom Brunnen bei impulsförmiger ($I = 1 \text{ h}; 5 \text{ h}$) und kontinuierlicher Migranteneingabe berechnet werden, wobei Gl. (3/2) die Grundlage bildet. Für die in den Bildern (3/2 - 3/4)

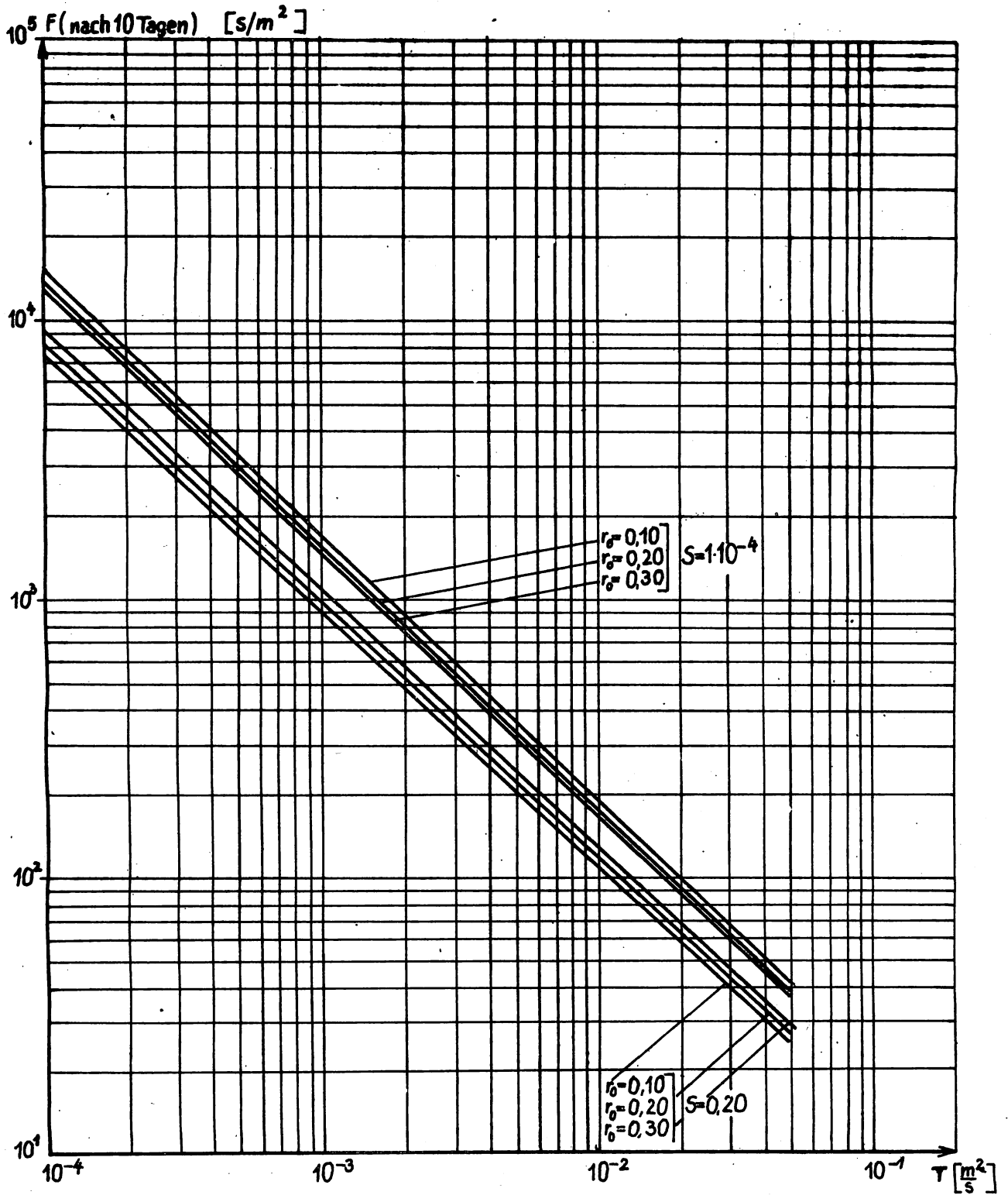
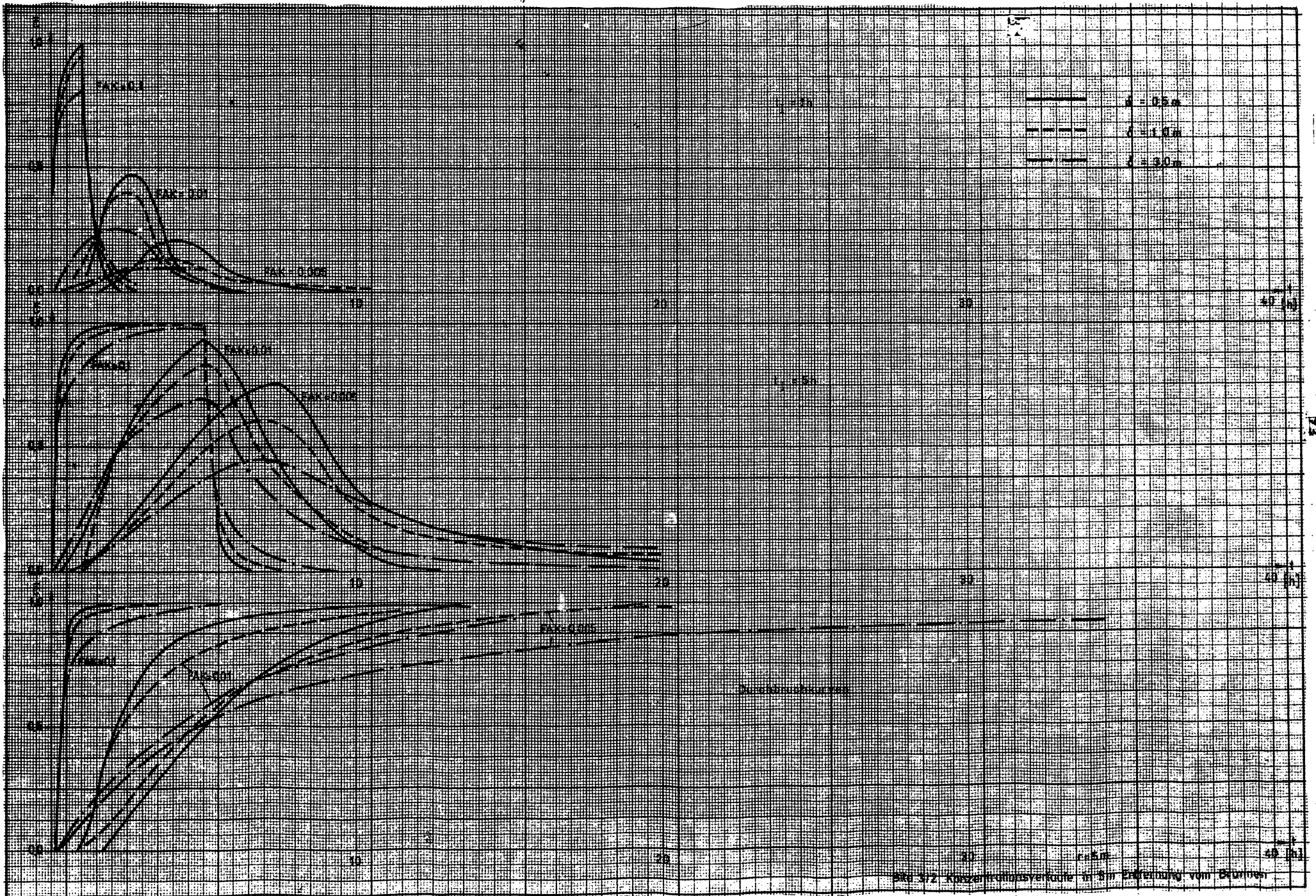
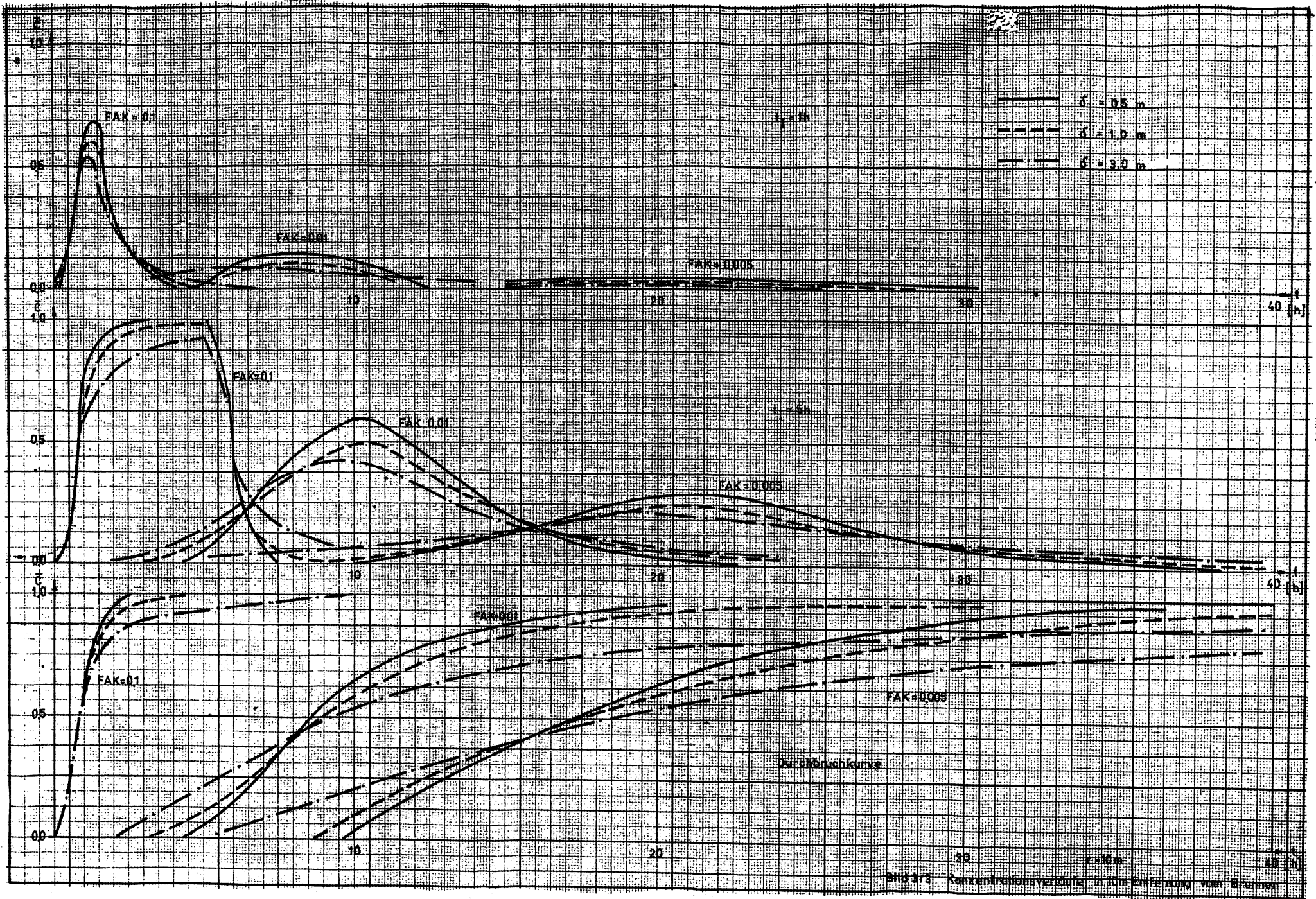
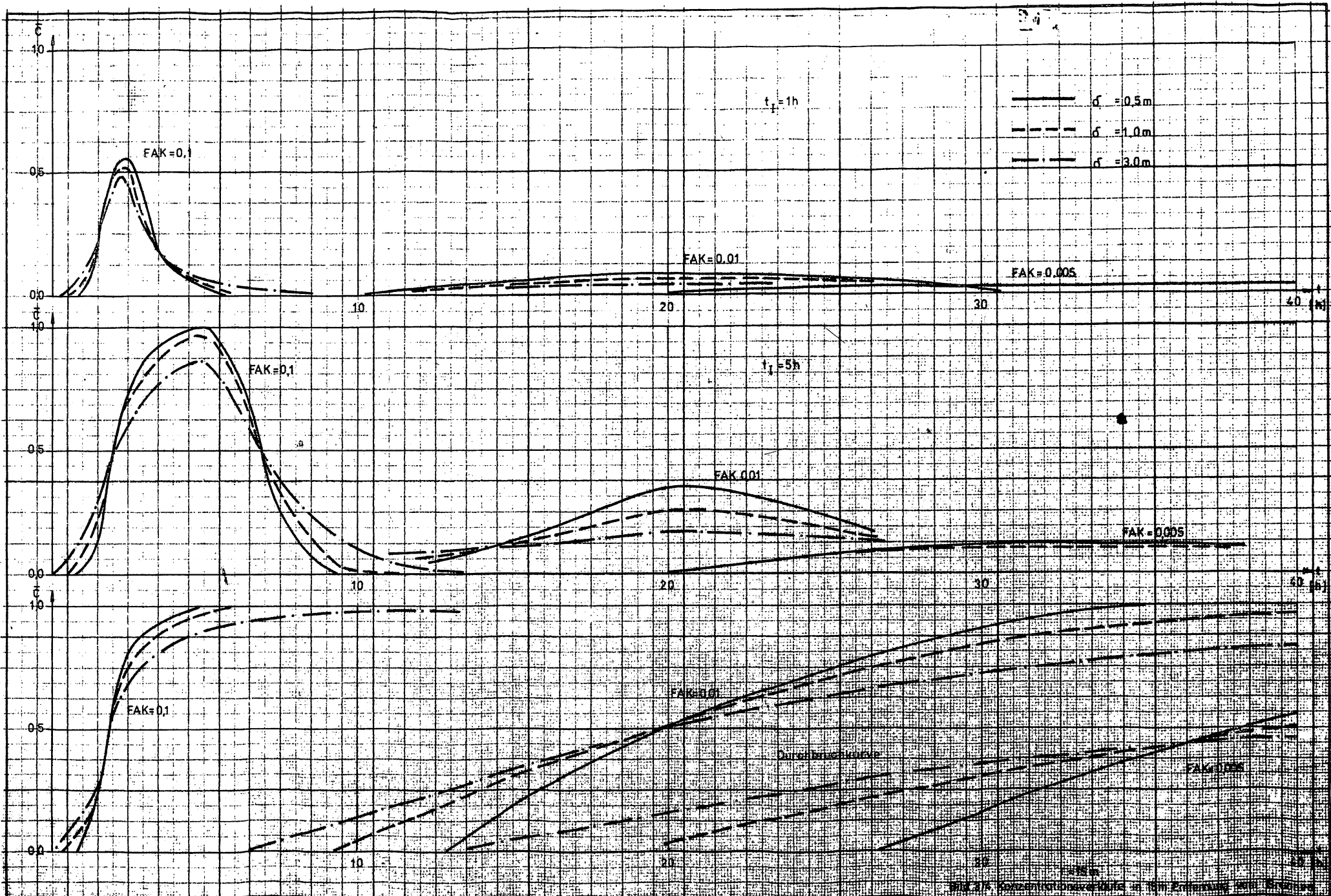


Bild 3/1 : Diagramm zur Bestimmung der möglichen Förder - bzw. Infiltrationsmengen







dargestellten Diagramme wurden für die Dispersivität δ Werte von $\delta = 0,5$ m; $1,0$ m; $3,0$ m benutzt.

Als weitere Variable wurde der Quotient $FAK = Q/(M \cdot n_p)$ gebildet, dessen Größe zwischen $0,1$ und $0,005$ variiert.

Beispiel zur Nutzung der Bilder (3/2 - 3/4)

mögliche Wassermenge $Q = 0,010 \text{ m}^3/\text{s}$ (aus Bild 3/1)
 Mächtigkeit $M = 10 \text{ m}$
 durchströmte Porosität $n_0 = 0,1$

Damit ergibt sich $FAK = \frac{0,010}{10 \cdot 0,1} = 0,01$.

Die Dispersivität soll 1 m betragen. Mit diesen Werten erhält man für ein GWBR in einer Entfernung von $r = 10$ m die im Bild (3/3) dargestellten Kurven. Dabei zeigt sich, daß die Durchbruchkurve nach etwa 10 Stunden den Wert $\bar{C} = 0,93$ erreicht, bei einem Eingabeimpuls von $t_I = 5$ Std. der Maximalwert bei etwa $\bar{C} = 0,5$ liegt und bei einem Eingabeimpuls von $t_I = 1$ Std. nur ein Wert von $\bar{C} = 0,1$ erreicht wird. Als benötigte Tracermengen ergeben sich bei der Wahl

Durchbruchkurve: $G = t \cdot Q \cdot C_{\max}$
 $= 19 \cdot 3600 \cdot 0,01 \cdot 4,0$

($\bar{C} > 0,9$ ist ausreichend)
 $G = 2740 \text{ kg (NaCl)}$

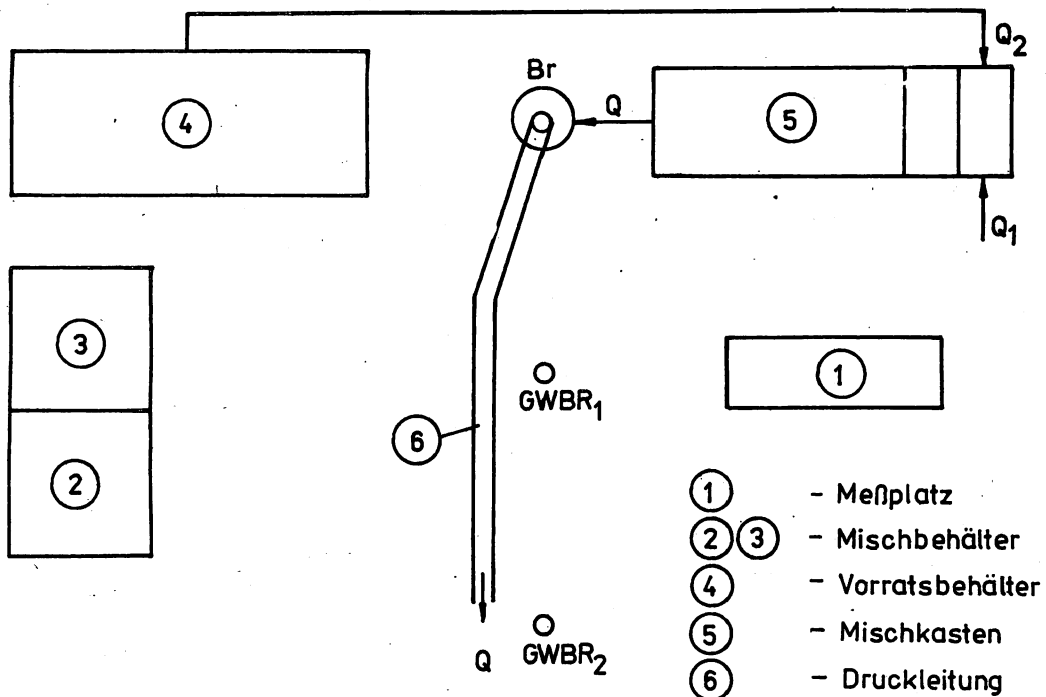
$t_I = 5$ Std. $G = 5 \cdot 3600 \cdot 0,01 \cdot 4,0 = \underline{720 \text{ kg (NaCl)}}$

$t_I = 1$ Std. $G = 1 \cdot 3600 \cdot 0,01 \cdot 4,0 = \underline{144 \text{ kg (NaCl)}}$

3.4. Durchführung eines Gütepumpversuches

3.4.1. Herstellung und Einleitung des Infiltrationswassers

Bei den bisher durchgeführten Gütepumpversuchen hat sich der im folgenden Bild gezeigte prinzipielle Versuchsaufbau bewährt.



In einem etwa 2 m^3 fassenden Vorratsbehälter (4) befand sich der hochkonzentrierte Migrant, der im Bedarfsfall ständig durch neue, in den etwa $0,7 \text{ m}^3$ fassenden Mischbehältern (2) und (3) hergestellte Lösung, aufgefüllt wurde.

Mit Hilfe einer Dosierpumpe gelangte die konzentrierte Lösung Q_2 in den Mischkasten (5), wo sie mit dem Klarwasserstrom Q_1 vermischt wurde. Über einen Trichter und ein spezielles Einlaufrohr, das im Bereich des Brunnenfilters perforiert

war, erfolgte schließlich die Eingabe des Migranten in den Brunnen. Beim Rückpumpvorgang wurde das Wasser über eine Druckleitung ⑤ abgeleitet.

3.4.2. Messtechnik

In die bei Gütepumpversuchen zum Einsatz kommende Messtechnik müssen hohe Anforderungen an Zuverlässigkeit und Genauigkeit gestellt werden, da es sehr zeit- und materialaufwendig ist, die Versuche zu wiederholen.

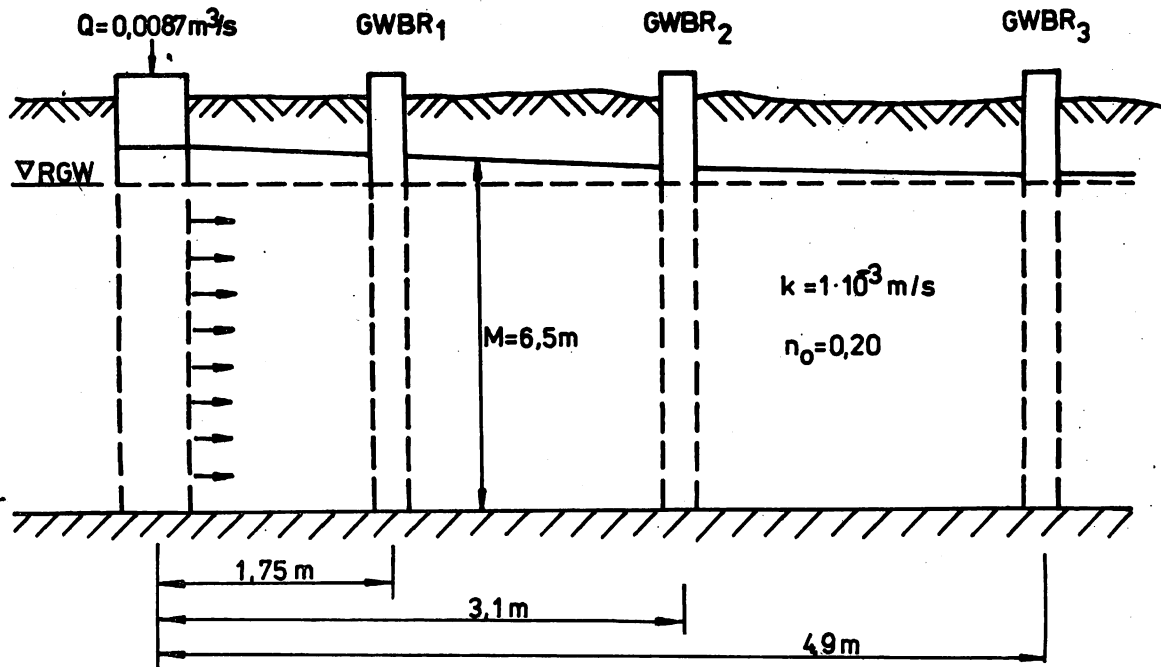
Nachfolgende Punkte sind besonders zu beachten:

- Die infiltrierte bzw. geförderte Wassermenge ist während des gesamten Versuches zu messen,
- In der Infiltrationsphase ist die Migrantenkonzentration direkt vor der Eingabe in den Brunnen zu überwachen.
- Erfolgen die Konzentrationsmessungen außerhalb der GWBL an einem Messplatz, dann muß gewährleistet sein, daß mit Hilfe einer Hand- oder elektrischen Pumpe repräsentative Proben entnommen werden.
- Erfolgt eine Messung durch Sonden in den GWBL, dann müssen diese im Bereich der Filter angeordnet werden.

3.5. Auswertung eines Gütepumpversuches

3.5.1. Brunnen mit GWBR, kontinuierliche Migranteneingabe

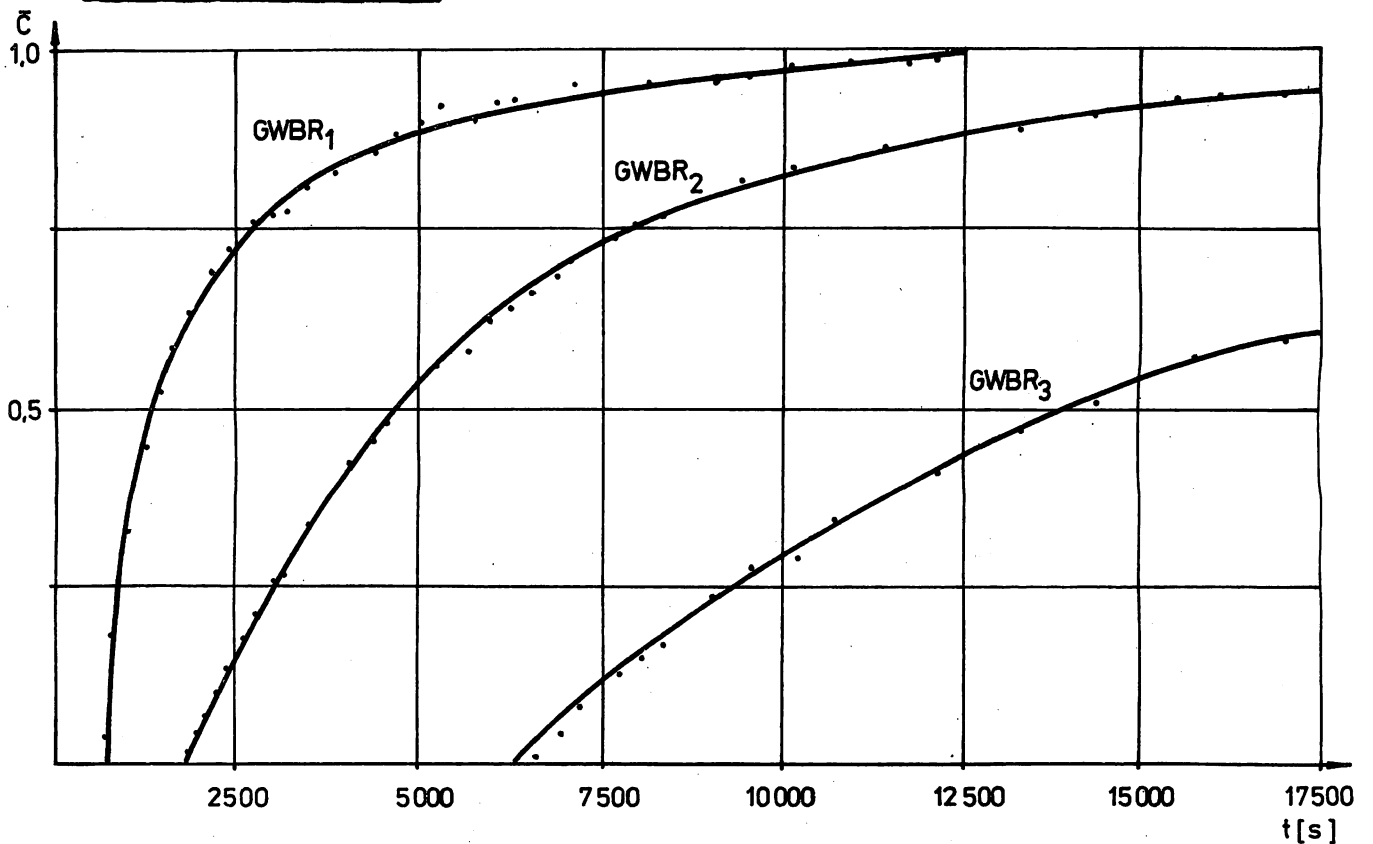
Versuchsschema



Migrant: NaCl

Eingabe: kontinuierlich

Versuchsergebnisse



Auswertung der Versuchsergebnisseräumliche Auswertung - Variante 1

1. Eintragen der Meßwerte $\bar{C} = f(r^2)$ für ausgewählte Meßzeiten (t_M) in Wahrscheinlichkeitspapier Nr. 500 entsprechend Bild (3/5) und Ausgleich der Punkte durch eine Gerade.
2. Ablesen der Größen $r_{0,16}^2$, $r_{0,50}^2$, $r_{0,84}^2$ für die ausgewählten Kurven
(r_x^2 bedeutet den r^2 -Wert bei $x \cdot \bar{C}$)

t_M	$r_{0,16}^2$	$r_{0,50}^2$	$r_{0,84}^2$
5 000 s	16,4	10,3	4,2
7 500 s	22,2	14,6	6,6
10 000 s	27,4	18,9	10,0

3. Berechnung der effektiven Porosität n_f nach Gleichung (3/4)

$$n_f = \frac{Q \cdot t_M}{\pi \cdot M} \cdot \frac{1}{r_{0,50}^2} \quad (3/4)$$

t_M	n_f
5 000 s	0,21 m
7 500 s	0,22 m
10 000 s	0,22 m

4. Berechnung der Dispersivität δ nach Gleichung (3/5)

$$\delta = \frac{(r_{0,16}^2 - r_{0,84}^2)^2 \cdot 3}{64 \cdot r_F^3} ; r_F = \frac{Q \cdot t}{\pi \cdot M \cdot n_f} \quad (3/5)$$

t_M	δ
5 000 s	0,22 m
7 500 s	0,21 m
10 000 s	0,17 m

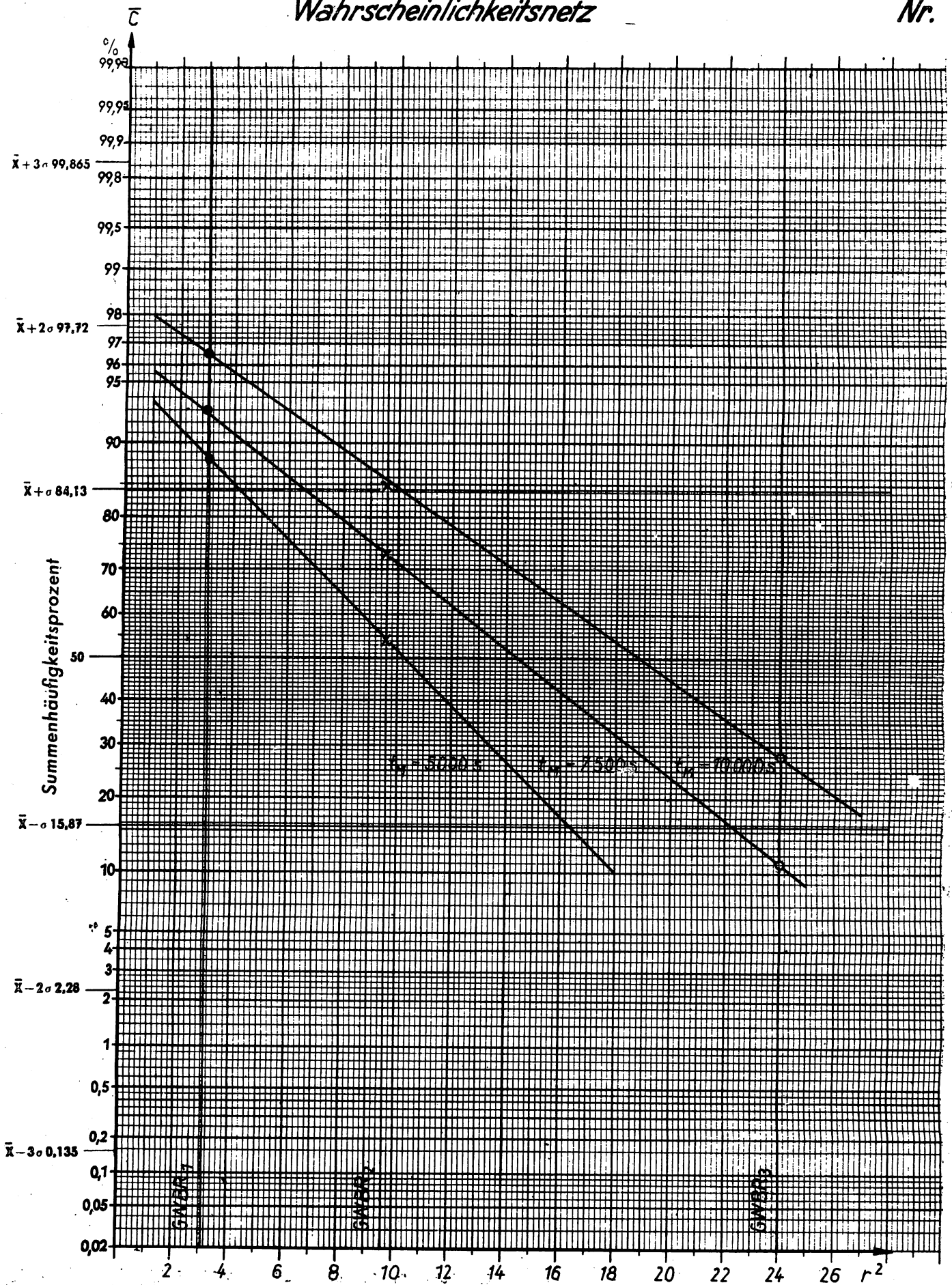


Bild 375: Räumliche Auswertung, Variante 1

räumliche Auswertung - Variante 2

1. Ermittlung der Größe τ für jede Meßkurve entsprechend Gleichung (3/6) (t_x bedeutet den t-Wert bei $x \cdot \bar{c}$)

$$\tau = \frac{t_{0,50} - t_{0,16}}{t_{0,50}} \quad (3/6)$$

GWBR	$t_{0,16}$	$t_{0,50}$	τ
1	600 s	1 500 s	0,60
2	2 200 s	4 800 s	0,54
3	7 600 s	14 500 s	0,47

2. Eintragen der Werte $\tau = f(r)$ im doppeltlogarithmisches Papier, entsprechend Bild (3/6) und Ausgleich der Punkte durch eine Gerade.
3. Verlängern der Gerade bis $r = 1$ und ablesen von $\tau_{(1)}$

$$\tau_{(1)} = 0,77$$

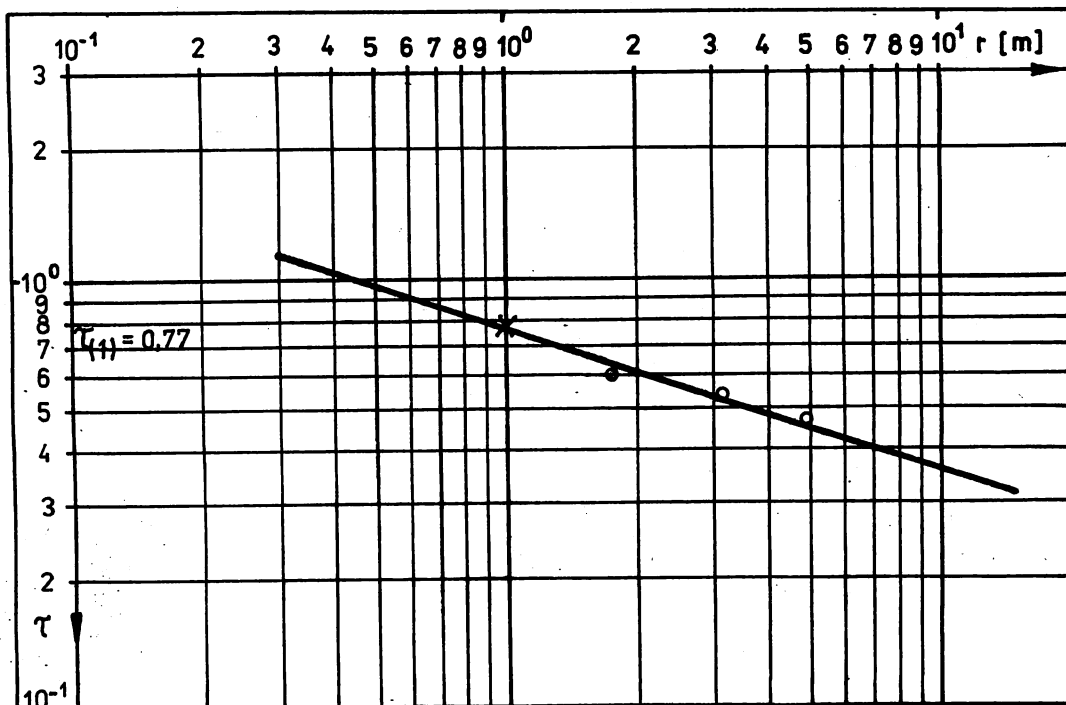


Bild 3/6: Räumliche Auswertung, Variante 2

4. Ermittlung von σ nach Gleichung (3/7)

$$\sigma = \frac{3}{8} \cdot T_{(1)}^2 \quad (3/7)$$

$$\sigma = 0,22$$

zeitliche Auswertung - Variante 1

1. Eintragen der Meßwerte $\bar{C} = f(1gt)$ für alle GWBR in Wahrscheinlichkeitspapier Nr. 485 entsprechend Bild (3/7) und Ausgleich der Punkte durch eine Gerade.
2. Ablesen der Größen $t_{0,16}$; $t_{0,50}$ und $t_{0,84}$ für die Kurven

GWBR	$t_{0,16}$	$t_{0,50}$	$t_{0,84}$
1	600 s	1 500 s	3 900 s
2	2 200 s	4 800 s	10 000 s
3	7 600 s	14 500 s	27 000 s

3. Ermittlung der effektiven Porosität n_F Gleichung (3/8)

$$n_F = \frac{Q \cdot t_{0,50}}{\pi \cdot M \cdot r^2} \quad (3/8)$$

GWBR	n_F
1	0,21
2	0,21
3	0,25

4. Ermittlung der Dispersivität σ nach Gleichung (3/9)

$$\sigma = \left(\frac{Q \cdot t_{0,84}}{2 \cdot \pi \cdot M \cdot n_F} - \frac{Q \cdot t_{0,16}}{2 \cdot \pi \cdot M \cdot n_F} \right)^2 \cdot \frac{3}{16 \cdot r^2} \quad (3/9)$$

GWBR	σ
1	0,39
2	0,39
3	0,43

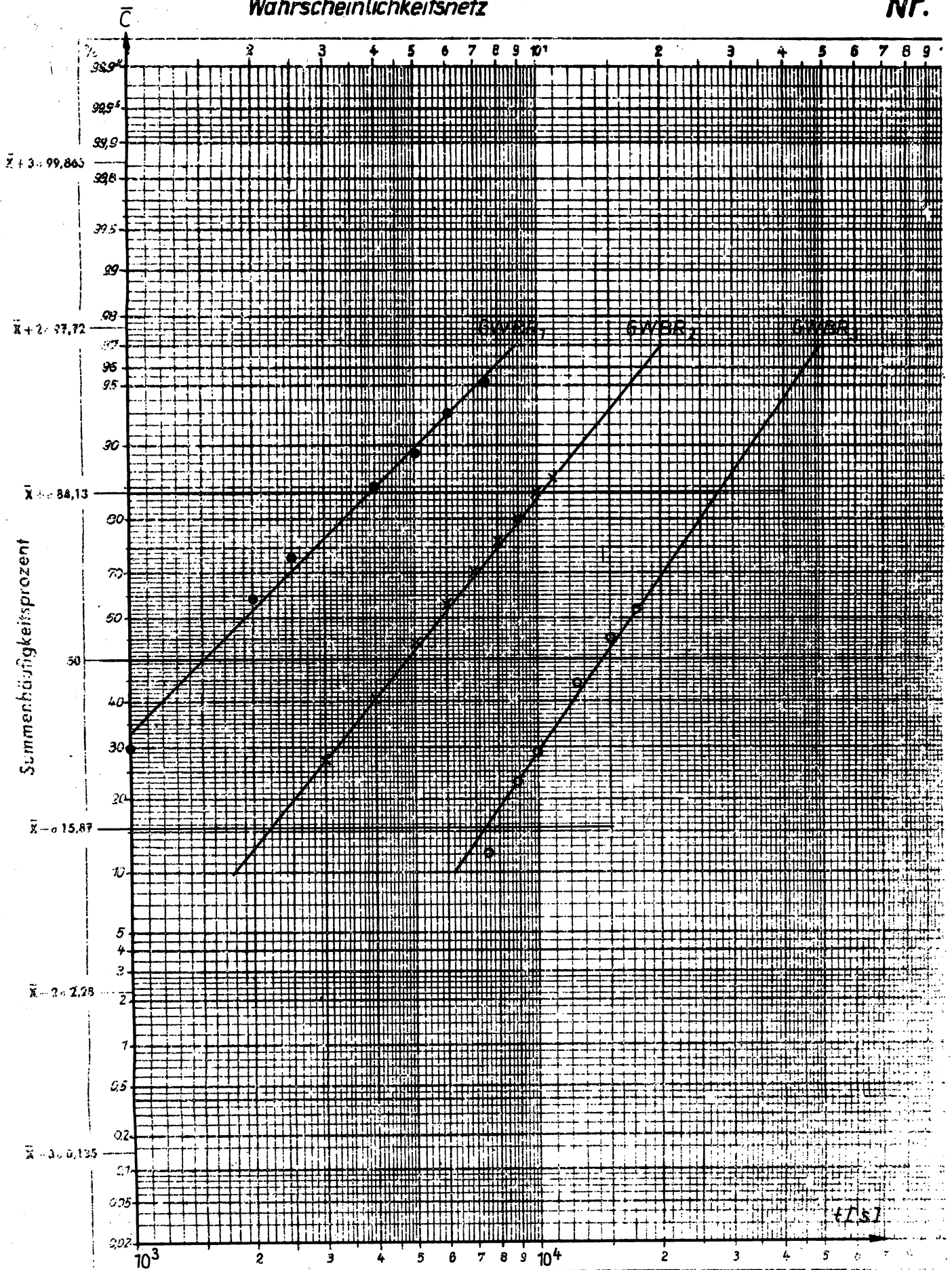


Bild 3/7 : Zeitliche Auswertung , Variante 2

zeitliche Auswertung - Variante 2

1. Ermittlung der Umkehrfunktion von erfc , $\inf \operatorname{erfc} (2 \cdot \bar{c}) t^{3/4}$, unter Benutzung der Kurve im Bild (3/8) entsprechend dem Schema im Bild (3/9)
2. Auftragen der Werte $\inf \operatorname{erfc} (2 \bar{c}) \cdot t^{3/4} = f(t)$ für alle GWBR entsprechend Bild (3/10)

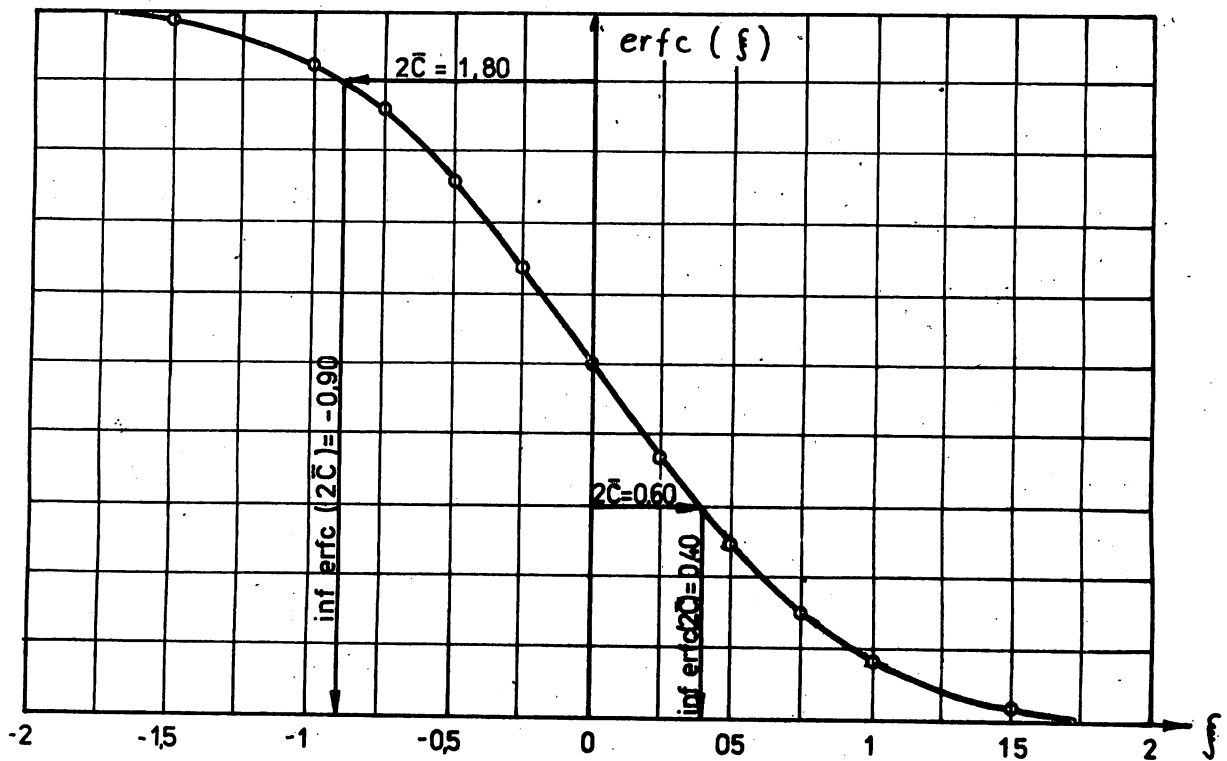


Bild 3/8: Funktion $f = \inf \operatorname{erfc} (2 \bar{c})$

t (s)	\bar{c}	2 · \bar{c}	inf erfo (2 \bar{c})	inf erfo (2 \bar{c}) t ^{3/4}
1 000	0,32	0,64	-0,30	53
2 000	0,62	1,24	- 0,20	- 60
3 000	0,77	1,54	- 0,52	-211
4 000	0,85	1,70	- 0,72	-362
5 000	0,90	1,80	- 0,90	-535
7 500	0,95	1,90	- 1,17	-943
GWR ₁				
3 000	0,27	0,54	0,45	182
4 000	0,40	0,80	0,15	75
5 000	0,52	1,04	- 0,02	- 12
7 000	0,70	1,40	- 0,37	-283
9 000	0,80	1,60	- 0,60	-554
12 000	0,89	1,78	- 0,82	-969
GWR ₂				
7 500	0,16	0,32	0,70	564
9 000	0,24	0,48	0,50	462
11 000	0,34	0,68	0,32	344
13 000	0,44	0,68	0,10	122
15 000	0,52	1,04	- 0,05	- 68
17 000	0,60	1,20	- 0,18	-268
GWR ₃				

Bild 3/9: Schema zur Berechnung von inf erfo (2 \bar{c}) t^{3/4}

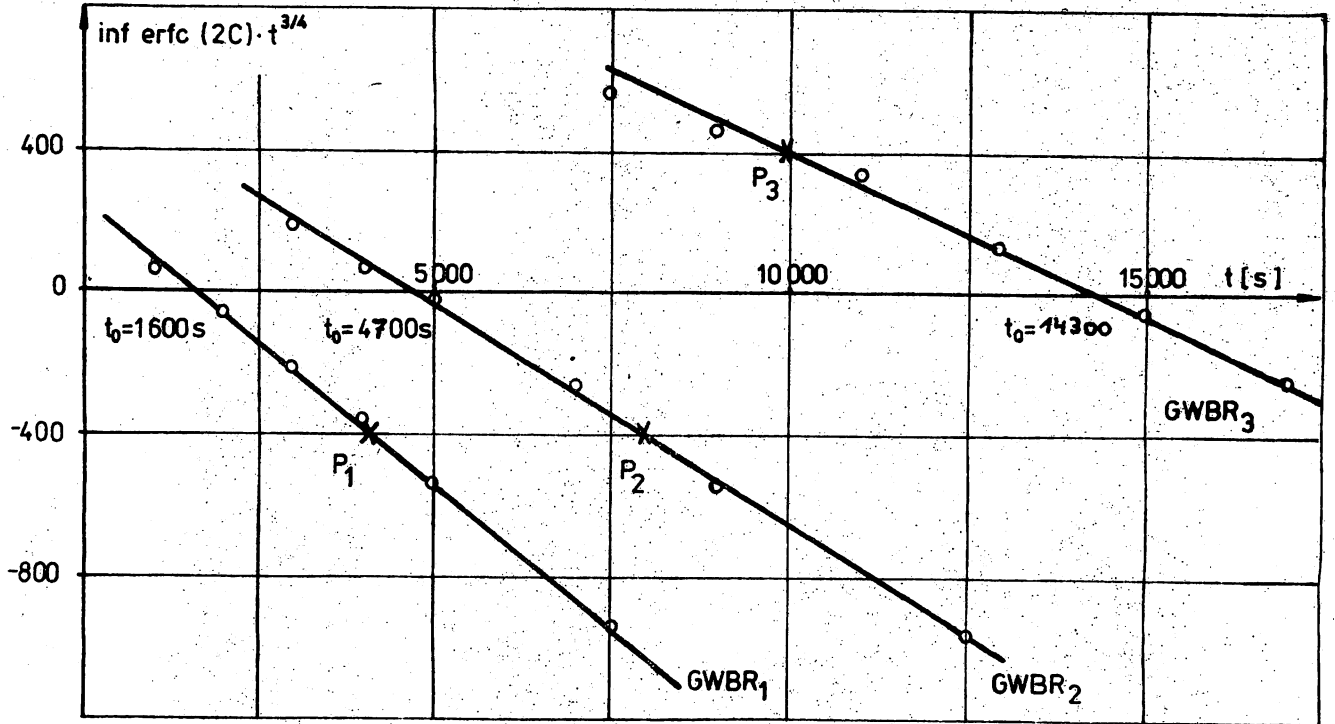


Bild 3/10: zeitliche Auswertung - Variante 2

3. Ermittlung der Durchstoßpunkte t_0 [s] der Geraden durch die t -Achse bei $\inf \operatorname{erfc}(2\bar{C}) \cdot t^{3/4} = 0$ und Berechnung der effektiven Porosität n_f nach Gleichung (3/10)

$$n_f = \frac{Q \cdot t_0}{\pi \cdot M \cdot r^2} \quad (3/10)$$

GWBR	t_0	n_f
1	1 600	0,22
2	4 700	0,21
3	14 300	0,25

4. Auswahl von 3 beliebigen Punkten (P_1, P_2, P_3) und Berechnung der Dispersivität δ nach Gleichung (3/11).

$$\delta = \frac{\left[\frac{r^2}{2} - \frac{Q \cdot t_p}{2M \cdot \pi \cdot n_f} \right]^2}{(\inf \operatorname{erfc}(2\bar{C}) t^{3/4})_p} \cdot \frac{3}{4 \cdot (\pi \cdot M \cdot n_f)^{3/2}} \quad (3/11)$$

GWER	t_p (s)	$(\inf \text{erfo } (2\bar{c}) \cdot t^{3/4})_p$	σ
1	4 000	- 400	0,30
2	7 900	- 400	0,53
3	9 900	400	0,85

3.5.2. Brunnen mit GWER, impulsförmige Migranteneingabe

Zur Auswertung kann die analytische Lösung (3/12) benutzt werden, da sie superponierbar ist.

(3/12)

Variante 1:

Hilfsmittel: programmierbarer Taschenrechner
Bürocomputer
Kleinrechner

Verfahren: Anpassen der Rechenwerte an die Meßwerte durch "trial and error"

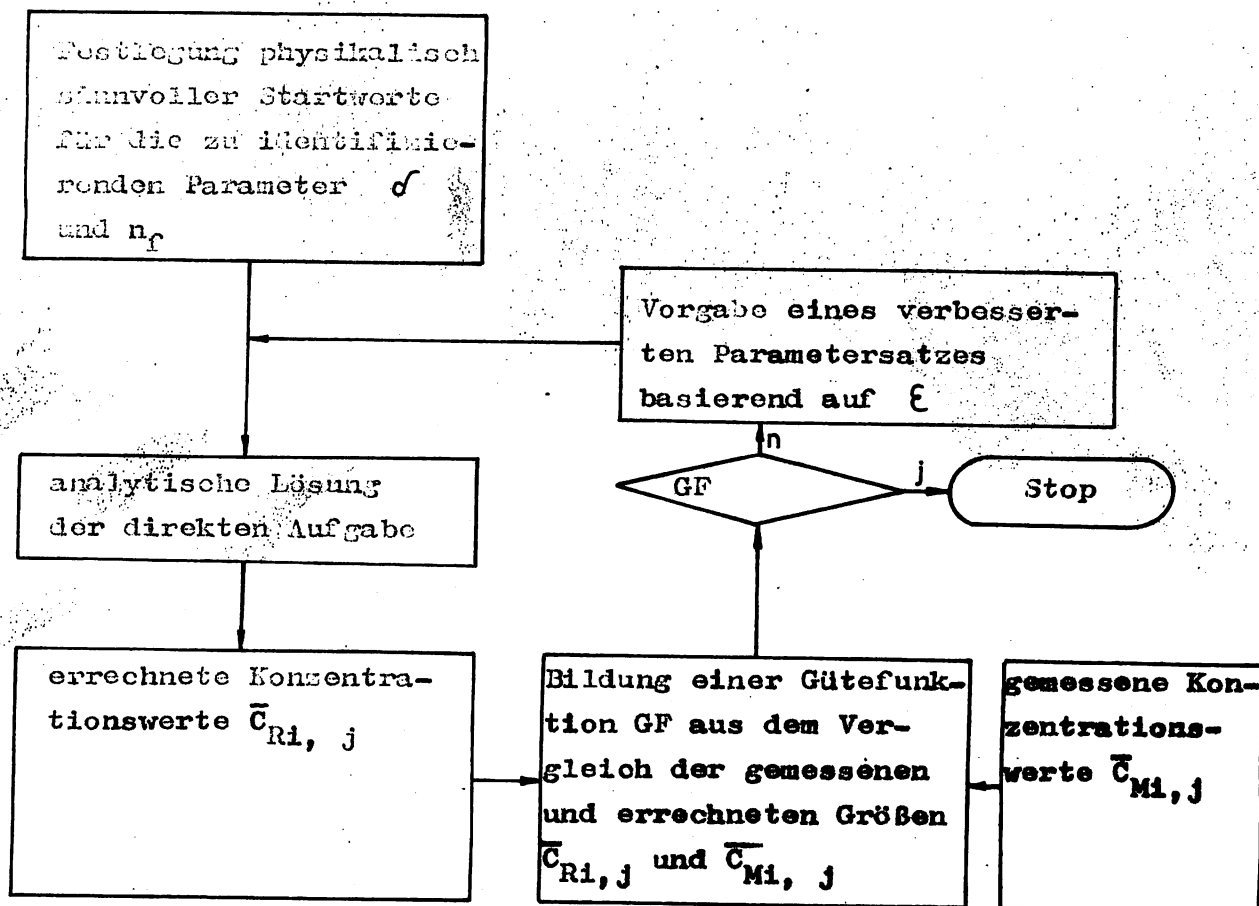
Hinweis:

- Veränderungen von n_f führen zu Verschiebungen auf der Zeitachse
- Veränderungen von σ führen zu Stauchungen oder Streckungen der Kurve
- Man erhält für jedes GWER einen Parameterersatz (σ , n_f)
- Zur Lösung der Gleichung (3/12) existiert das FORTRAN Rechenprogramm ROGA.

Variante 2:

Hilfsmittel: Bürocomputer
Kleinrechner

Verfahren: digitale Ermittlung der Parameter durch Minimierung einer Gütefunktion entsprechend dem nachfolgenden Schema.



Als freie Parameter lassen sich dabei die Dispersion σ und die effektive Porosität n_f suchen. Die Gütefunktion GF wird als Summe der Quadrate der Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten normierten Konzentrationswerten \bar{c}_R und \bar{c}_M , zu verschiedenen Zeiten j und an verschiedenen Stellen i berechnet.

$$GF = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (\Delta \bar{c}_{i,j})^2 \quad \text{Min}$$

Hinweise:

Die wesentlichsten Vorteile der digitalen Parameterermittlung liegen in folgenden Punkten:

- Möglichkeit der Ausnutzung des Superpositionsprinzips, so daß eine beliebige Eingabe des Migrant in den Brunnen erfolgen kann. Es ist damit nicht notwendig, daß in GWBR Durchbruchkurven entstehen.
- Objektivierung der Auswertung
- Gleichzeitige Erfassung aller GWBR, so daß eine raumzeitliche Auswertung aller existierenden Meßwerte erfolgt und damit nur ein repräsentativer Parametereinsatz entsteht.

Für die Parameterermittlung nach dem angegebenen Verfahren existiert das FORTRAN-Rechenprogramm PSUMI 1.

3.5.3. Brunnen ohne GWBR, impulsförmige Migranteneingabe

Zur Auswertung kann die numerische Lösung (3/3) benutzt werden, da es sich beim Wechsel von Infiltration auf Förderung um einen geohydraulisch instationären Prozeß handelt.

Hilfsmittel: Kleinrechner

Großrechner

Verfahren: Anpassen der Rechenwerte an die Meßwerte durch "trial and error"

Hinweise:

- Man erhält für jeden Versuch einen Parametersatz (σ , n_r)
- Zur Lösung der Gleichung (3/3) existiert das FORTRAN-Rechenprogramm RGGNU 1.

3.6. Einschätzung der Ergebnisse

Die dargestellten Ergebnisse haben gezeigt, daß mit den aufgeführten Methoden die Migrationsparameter δ und n_f ermittelbar sind. Dabei hat sich ergeben, daß die effektive Porosität n_f stabil zwischen

$$n_f = 0,21 - 0,25$$

liegt.

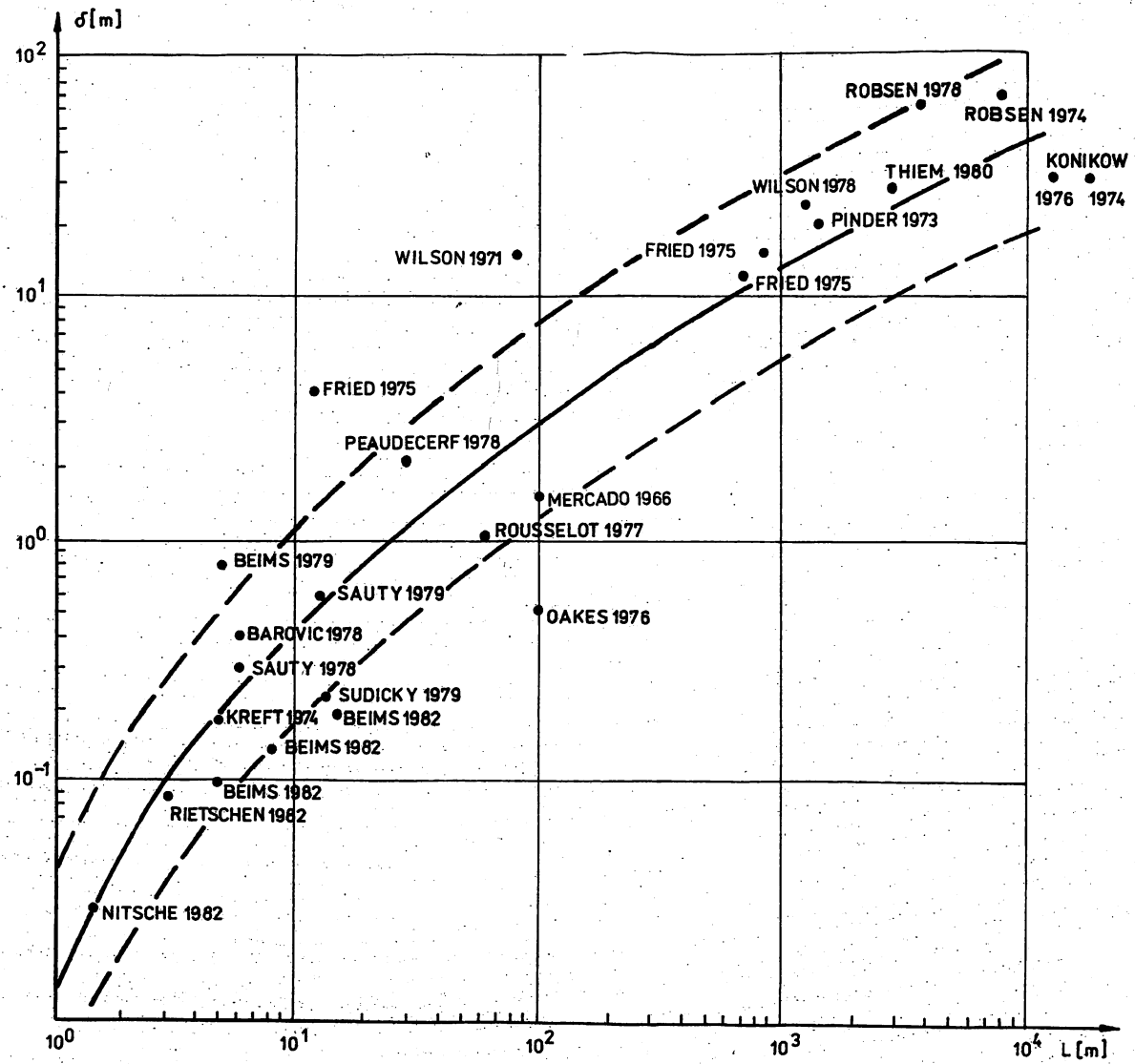
Die Schwankungsbreite von δ ist mit

$$\delta = 0,17 - 0,13$$

wesentlich größer, wobei die zeitliche Auswertung bei beiden Verfahren höhere Werte ergibt, als die räumliche Auswertung. Dieser Widerspruch deutet darauf hin, daß es sich bei dem betrachteten Gütepunktversuch nicht um eine exakt rotations-symmetrische Strömung gehandelt hat.

Um die Maßstabsabhängigkeit von δ größenordnungsmäßig zu erfassen, wurden im Bild (3/11) einige aus der internationalen Literatur bekannte Versuchsergebnisse für δ als Funktion der Fließlänge L aufgetragen und durch eine Kurve ausgeglichen. Desweiteren sind auch die beiden 1-Sigma-Grenzen mit eingetragen, so daß der δ -Wert für sehr heterogene Grundwasserleiter nahe der oberen Grenzkurve, und für gleichförmige Grundwasserleiter nahe der unteren Grenzkurve liegen wird.

Bild 3/11: Abhängigkeit der Dispersivität σ von der Fließlänge L



4. Hinweise zur PV-Planung, -durchführung und -auswertung

Wichtige Hinweise zur Pumpversuchsvorbereitung und -durchführung sind in der TGL 23 864, Blatt 2 enthalten. An dieser Stelle sollen einige weitere Probleme aufgezeigt werden, die bei der praktischen Durchführung von Pumpversuchen auftreten können und die Auswertung mitunter unnötig erschweren.

Teilweise können sie sogar zu beträchtlichen Fehlern bei der Pumpversuchsauswertung führen.

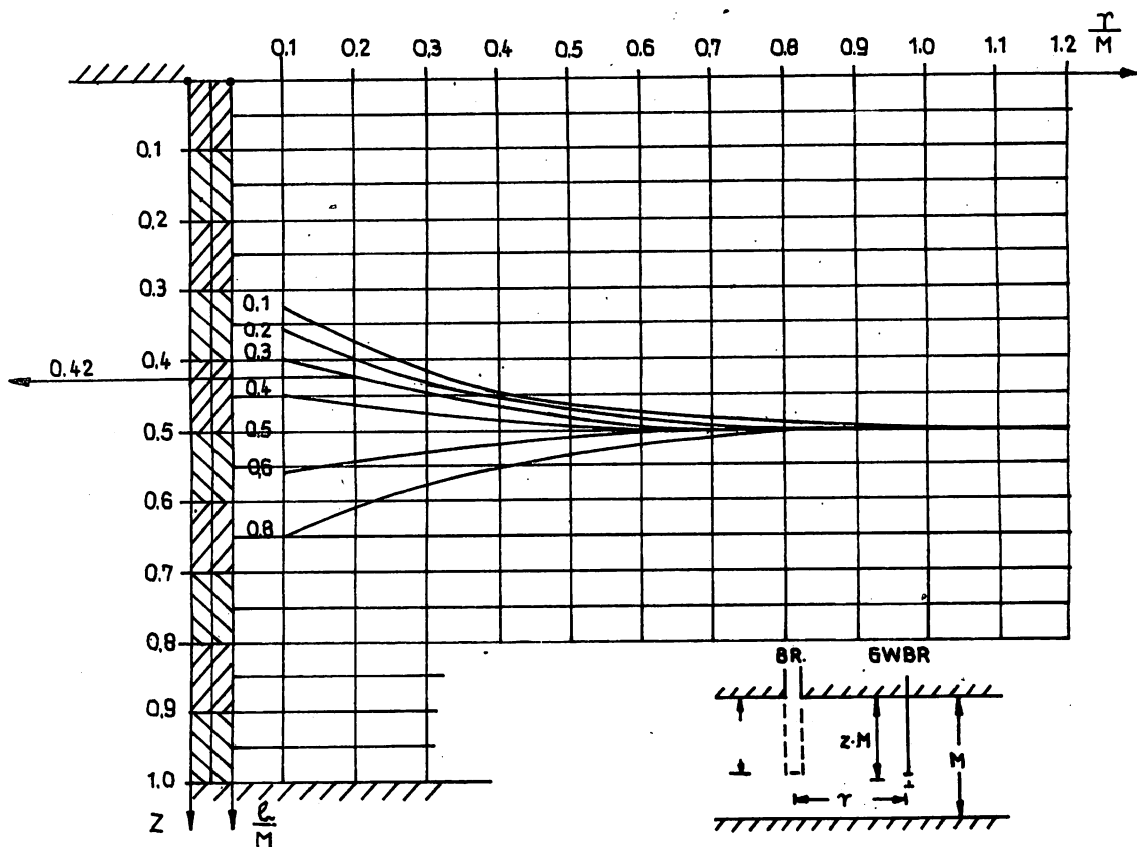
4.1. Allgemeines

- **Die Pumpversuchsplanung ist immer unter der Beachtung der späteren Auswertung vorzunehmen (zeitliche oder räumliche Auswertung, Nutzung der EDV);**
- **Vor der Projektierung eines Pumpversuches sind die notwendigen geologischen und hydrologischen Gegebenheiten, z.B. der gesteinskundliche Charakter sowie die Mächtigkeit und horizontale Ausdehnung des Grundwasserleiters und deren Grenzsichten zu ermitteln.**
- **Das durch den PV erzeugte Grundwasserspiegelgefälle im Auswertungsbereich soll mindestens 30 bis 50 mal größer sein als das natürliche Gefälle.**
- **Die Wahl der Fördermenge der Brunnen soll gewährleisten, daß in dem am weitesten entfernt liegenden GWER gut meßbare Absenkungen erreicht werden (> 30 cm),**

4.2. Pumpversuchsplanung

- Es ist empfehlenswert, eine Vorausberechnung des PV mit geschätzten geohydrologischen Parametern durchzuführen. Dadurch erhält man Informationen über die zu erwartenden Absenkungen, notwendige Fördermengen, GWBR-Anordnungen und erforderlichen Pumpzeiten. Zweckmäßigerweise lassen sich dafür die Rechenprogramme WAP 1, ABS 1 oder KAPA einsetzen. Ein geeignetes Hilfsmittel sind auch die von NILLERT entwickelten Graphiken.
- Vor der Pumpversuchsprojektierung sollte eine Ortsbegehung durchgeführt werden, die unter anderem zum Ziel hat, die genauen Bohransatzpunkte festzulegen, die Wasserableitungsmöglichkeiten zu ermitteln und die Kartenunterlagen auf nichteingetragene mögliche geohydraulische Randbedingungen zu überprüfen.
- Bei allen Pumpversuchen sollten GWBR angeordnet werden, da die alleinige Brunnenauswertung häufig zu fehlerhaften Parametern führt.
 - die Filter der GWBR sind kurz zu halten (0,5 m oder 1,0 m), damit eine punktförmige Potentialermittlung gewährleistet ist.
 - die Tiefenlage der GWBR-Filter hat auf die Bestimmung der Parameter bei einem vollkommenen Brunnen keinen Einfluß.
 - bei ungespannten Verhältnissen ergeben sich die besten S-Werte, wenn der Filter in einer Höhe von 0,7 - 0,8 h_n über der Sohle des GWL angeordnet ist.
 - die GWBR sollten im mittleren Absenkungsbereich des Brunnens angeordnet werden
 - 0,5 M < r < 10 M bei gespannten Verhältnissen
 - 0,5 H < r < 5 H bei ungespannten Verhältnissen
- die meisten GWL sind mehr oder weniger geschichtet. Der Schichteinfluß auf das Absenkungsverhalten ist umso geringer, je weiter die GWBR vom Brunnen entfernt sind.

- Die Brunnen sollten nach Möglichkeit vollkommen ausgebaut werden, da unvollkommene Brunnen immer Unsicherheiten in die Auswertung bringen.
- Wenn ein unvollkommener Versuchsbrunnen vorgesehen ist, dann sollte bei ungespannten Strömungsverhältnissen der Filter nicht unmittelbar an der freien Oberfläche beginnen.
- Ein Brunnen muß als unvollkommen betrachtet werden, wenn die Filterlänge kleiner als $0,8 \cdot M$ (bzw. H) ist.
- Die Unvollkommenheit hat nur auf die Auswertung im Bereich $r < M$ (bzw. H) Einfluß.
- Das nachfolgende Bild zeigt für einen häufig vorkommenden Fall, bei unvollkommenem Brunnenausbau, an welcher Stelle des Grundwasserleiters die Filter der GWR sitzen müssen, damit der Faktor δ , der die Unvollkommenheit erfaßt, zu Null wird. Die Auswertung kann dann wie bei einem vollkommenen Brunnen erfolgen.



Beispiel: $l = 6,0 \text{ m}$; $M = 25,0 \text{ m}$; $r = 5,0 \text{ m}$

$$\frac{l}{M} = 0,32 ; \quad \frac{r}{M} = 0,2 \longrightarrow z = 0,42$$

Filteranordnung bei $0,42 \cdot M \hat{=} 0,42 \cdot 25 = 10,5 \text{ m}$

Die Pfeile deuten die Werte des Beispiels an.

- Sind grobe Idealisierungen der Randbedingungen notwendig, dann sind der Brunnen und die GWBR möglichst weit weg von der Randbedingung zu setzen.
- Charakteristisch für Pumpversuche bei Vorhandensein von Randbedingungen sind Knickpunkte, im zeitlichen Absenkungsverlauf. Aus den Zeitpunkten, zu denen diese Knickpunkte auftreten, kann auf die Lage der Randbedingung geschlossen werden:

Das Straight - Line - Verfahren gilt ab

$$t_G = 3,8 \cdot a \cdot r^2$$

Für punktförmige Randbedingungen gilt:

$$\lambda = 0,375 \sqrt{t_k/a}$$

Für geradlinige Randbedingungen gilt:

$$\lambda = 0,75 \sqrt{t_k/a}$$

Für kreisförmige Randbedingungen gilt:

$$\lambda = 1,5 \sqrt{t_k/a}$$

λ - reale Entfernung Brunnen Randbedingung (m)

a - geohydraulische Zeitkonstante (s/m²)

t_k - Zeitpunkt des Knickes (sec)

(Bei Vorhandensein von Kolmation wird λ durch $\lambda^* = \lambda + \Delta l_2$ ersetzt)

Unter der Bedingung $t_k = 20 t_G$ erhält man somit:

- punktförmigen Randbedingungen

$$r = \sqrt{\lambda^2 / 10,8}$$

- geradlinigen Randbedingungen

$$r = \sqrt{\lambda^2 / 43}$$

- kreisförmigen Randbedingungen

$$r = \sqrt{\lambda^2 / 171}$$

Dieser berechnete Wert "r" ist die Entfernung, in der das GWBR maximal vom Brunnen entfernt liegen darf, damit etwa über eine Dekade im halblogarithmischen Papier ein geradliniger Absenkungsverlauf entsteht. Die Funktionen $r = f(\lambda)$ sind in (A2/Bild 2) graphisch dargestellt.

4.3. Pumpversuchsdurchführung/ -auswertung

- Das geförderte Wasser ist so abzuleiten, daß kein hydraulischer Kurzschluß entsteht.
- Für Pumpversuche sind immer konkrete Versuchsabläufe vorzugeben. Alle Abweichungen davon sind meßtechnisch genau zu erfassen, so daß auch für diese Verhältnisse eine exakte Auswertung möglich ist.
- Nach Abschaltung der Pumpe fließt häufig Wasser aus den Bohrleitungen zurück in den Brunnen, so daß die ersten Wiederanstiegsmessungen z.T. stark verfälscht sein können.
- Bei allen Pumpversuchen sollte sowohl die Absenkungs- als auch die Wiederanstiegsmessung durchgeführt werden.
- Pumpversuche sollten so umfassend wie möglich ausgewertet werden, wobei auftretende Widersprüche zu erklären sind.
- Eine Ausbildung von Geraden über eine Dekade des halb-logarithmischen Papiers ist für die Ermittlung der Parameter ausreichend.
- Die Zahl der Punkte, die durch eine Gerade approximiert werden, sollte 6 bis 8 nicht unterschreiten.
- Zur Bestimmung des Wertes t_0 darf die Gerade nicht weit über die Punkteschar hinaus extrapoliert werden.
- Wiederaustiegsauswertungen bringen oft bessere Ergebnisse als Absenkungsauswertungen. Sie sind unbeeinflusst von Förderschwankungen und Ungenauigkeiten bei der Wassermengemessung außerdem haben Inhomogenitäten des Grundwasserleiters nur geringen Einfluß.
- Für den Brunnen sollte wenn möglich, keine Absenkungsauswertung durchgeführt werden. Die Gründe dafür sind:
 - Förderschwankungen haben einen großen Einfluß auf die Absenkung im Brunnen.
 - In nicht ordnungsgemäß ausgebauten Brunnen treten Skineffekte auf, somit ist der effektive Brunnenradius

unbekannt und kein S-Wert ermittelbar.

- Armaturen und Brunneneinbauten gestatten oft keine ordnungsgemäße Messung
- Auf Grund des fehlenden S-Wertes können keine Zeitschranken ausgerechnet und Knickpunkte interpretiert werden

- Die Auswertung des Wiederanstieges bringt im Regelfall auch für den Brunnen gültige T-Werte.

- Die Meßtermine sollten so gelegt werden, daß sie auf dem halblogarithmischen Papier etwa äquidistante Meßpunkte ergeben. Es hat sich folgende Einteilung der Meßtermine gut bewährt:

$$[1; 1,5; 2; 3; 4; 5; 7] \cdot 10^x \text{ Minuten } (x = 0, 1, 2, 3, \dots)$$

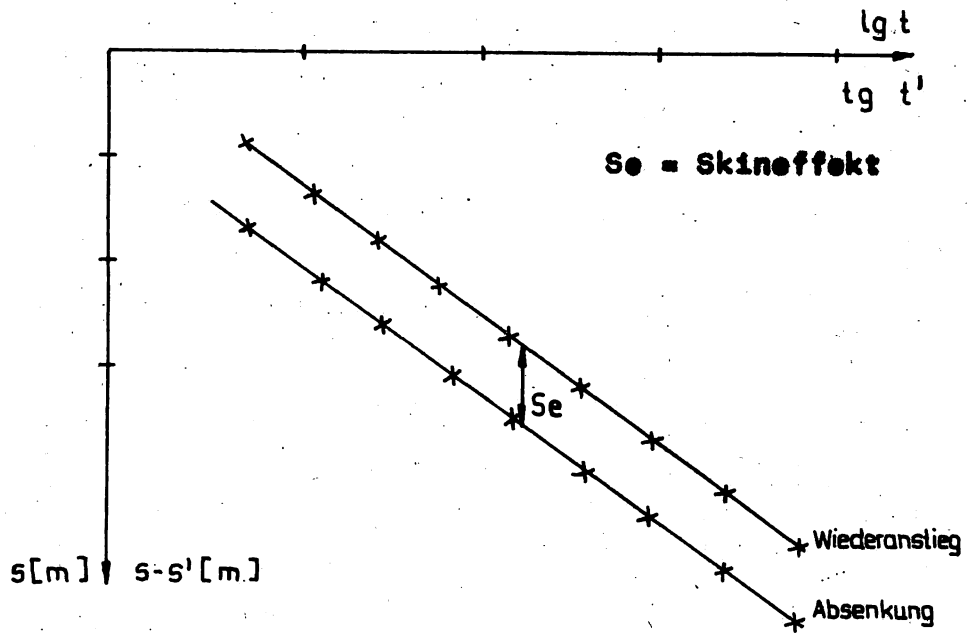
(Bei Brunnen mit Kapazitätseffekt sollte sofort mit der Messung begonnen werden)

- Je geringer die Brunnenförderleistung ist, desto unzuverlässiger sind die ermittelten Parameter.

- Es ist zweckmäßig, die Pumpversuchsergebnisse in der Form $s = f(1gt/r^2)$ aufzutragen, was einer gemischten räumlich-zeitlichen Auswertung entspricht. Dabei müssen alle Meßwerte auf einer Kurve liegen, wobei größere Abweichungen darauf hinweisen, daß der zugrunde gelegte Strömungsfall (z.B. unendlich ausgedehnt oder einseitig begrenzt) nicht den realen Verhältnissen entspricht.

- Aus einer gemeinsamen Auftragung der Absenkung und des Wiederanstieges in einem Brunnen läßt sich der summarische Skineffekt ermitteln.

Dabei werden die Funktionen $s = f(1gt)$ und $s - s' = f(1gt')$ benutzt.



wobei die Differenz zwischen beiden Kurven der Wert Se in (m) ist. Der Wert ist Ausdruck für die Qualität des Brunnenausbaus.

5. Zusammenstellung wichtiger Funktionen

5.1. Brunnenfunktion $W(\delta)$

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

$$W(\delta) = \int_x^{\infty} \frac{1}{y} \cdot e^{-y} dy \quad (5/1)$$

Sie läßt sich durch die Reihe (5/2) oder die Tscheybischew-Approximation (5/3) näherungsweise darstellen.

$$W(\delta) \sim -\ln(1,781 \cdot \delta) + \delta - \frac{\delta^2}{2 \cdot 2!} + \frac{\delta^3}{3 \cdot 3!} - \frac{\delta^4}{4 \cdot 4!} + \dots \quad (5/2)$$

$$W(\delta) \sim -\ln(1,781 \cdot \delta) + \tilde{h} \quad 5/3$$

mit

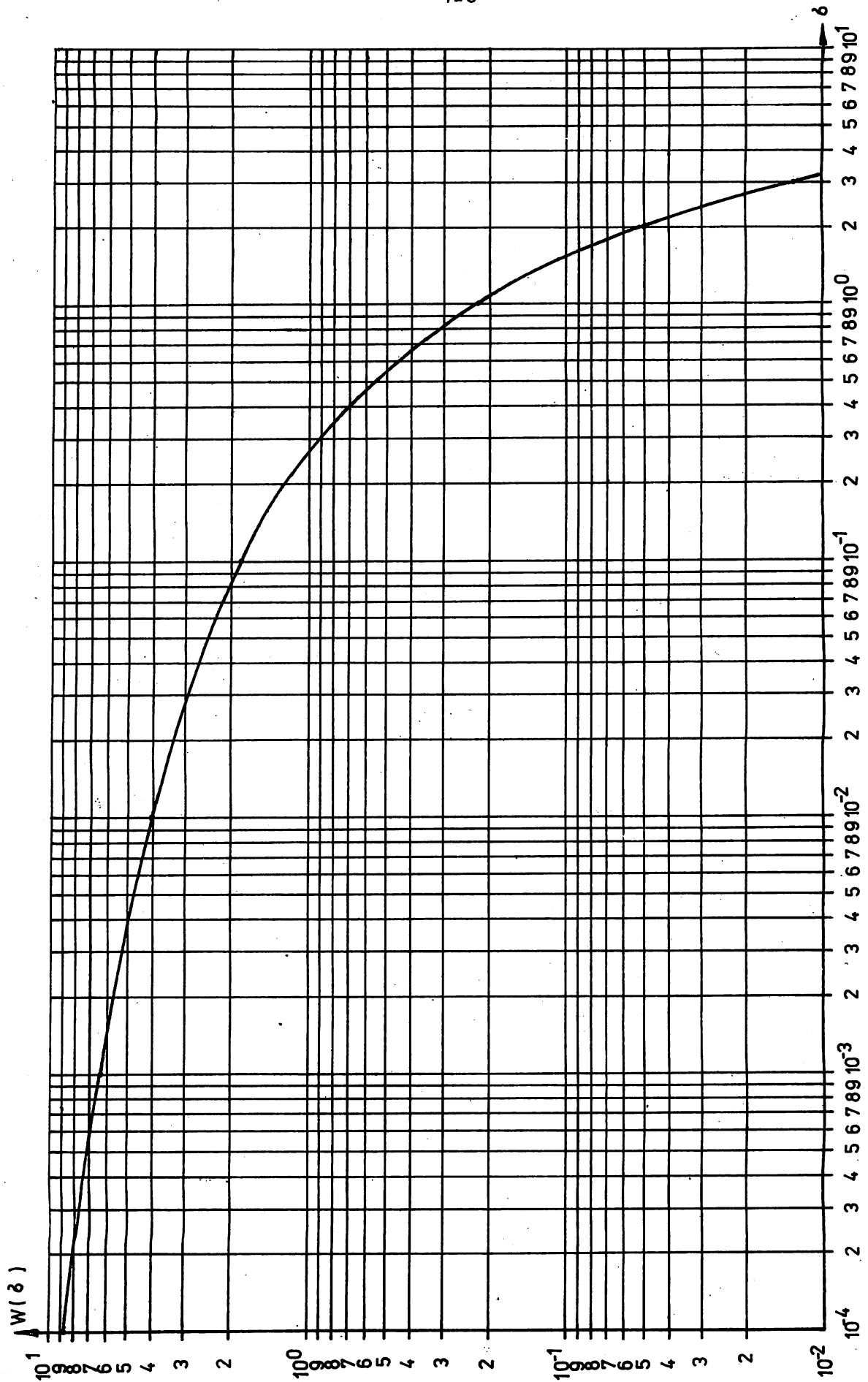
$$\tilde{h} = (((((((((-0,00486912 \cdot x) + 0,0118656) \cdot x - 0,01464704) \cdot x + 0,02936128) \cdot x - 0,0650896) \cdot x + 0,11399056) \cdot x - 0,18348504) \cdot x + 0,29140176) \cdot x - 0,4798086) \cdot x + 0,99328136) \cdot x + 2,18780215$$

$$x = 0,2 \cdot \delta - 1$$

Im Bild (5/1) ist die Wertetabelle von $W(\delta)$, im Bild (5/2) die graphische Darstellung von $W(\delta)$ und in Bild (5/3) die FORTRAN Unterprogramme für beide Näherungslösungen angegeben.

δ	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0
$\cdot 10^0$	$2,19 \cdot 10^{-1}$	$4,9 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$3,8 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$
$\cdot 10^{-1}$	1,82	1,22	0,91	0,70	0,56	0,45	0,37	0,31	0,26
$\cdot 10^{-2}$	4,04	3,35	2,96	2,68	2,47	2,30	2,15	2,03	1,92
$\cdot 10^{-3}$	6,33	5,64	5,23	4,95	4,73	4,54	4,39	4,26	4,14
$\cdot 10^{-4}$	8,63	7,94	7,53	7,25	7,02	6,84	6,69	6,55	6,44
$\cdot 10^{-5}$	10,94	10,24	9,84	9,55	9,33	9,14	8,69	8,86	8,74
$\cdot 10^{-6}$	13,24	12,55	12,14	11,85	11,63	11,45	11,29	11,16	11,04
$\cdot 10^{-7}$	15,54	14,85	14,44	14,15	13,93	13,75	13,60	13,46	13,34
$\cdot 10^{-8}$	17,84	17,15	16,74	16,46	16,23	16,05	15,90	15,76	15,65
$\cdot 10^{-9}$	20,15	19,45	19,05	18,76	18,54	18,35	18,20	18,07	17,95
$\cdot 10^{-10}$	22,45	21,76	21,35	21,06	20,84	20,66	20,50	20,37	20,25
$\cdot 10^{-11}$	24,75	24,06	23,65	23,36	23,14	22,96	22,81	22,67	22,55
$\cdot 10^{-12}$	27,05	26,36	25,96	25,67	25,44	25,26	25,11	24,97	24,86
$\cdot 10^{-13}$	29,36	28,66	28,26	27,97	27,75	27,56	27,41	27,28	27,16
$\cdot 10^{-14}$	31,66	30,97	30,56	30,27	30,05	29,87	29,71	29,58	29,46
$\cdot 10^{-15}$	33,96	33,27	32,86	32,58	32,35	32,17	32,02	31,88	31,76

Bild 5/1: Wertetabelle von $W(\delta)$

Bild(5/2): Graphische Darstellung von $W(\delta)$

THEI SEITE 1

```

1  00000      FUNCTION THEIS(X)
2  00010      THEIS=0.
3  00016      IF(X.GT.10) RETURN
4  00033      THEIS=-.5772157-ALOG(X)
5  00062      C=1
6  00070      A=X
7  00076      1  B=A/C
8  00107      THEIS=THEIS+B
9  00120      IF(ABS(B).LT.1.E-5) RETURN
10 00137      C=C+1
11 00150      A=-X*A/C
12 00166      GOTO 1
13 00210      END

```

PROGRAMM UEBERSETZT
FOR 4200/1P

THEI SEITE 1

```

1  00000      FUNCTION THEI(SIG)
2  00010      X=0.2*SIG-1
3  00040      W=0.
4  00046      IF(SIG.GT.10.)GOTO 10
5  00061      W=(((W-0.00486912*X)+0.0118656)*X-0.01464704)*X
6  00117      W=(((W+0.02936128)*X-0.0650896)*X+0.1139056)*X
7  00147      W=(((W-0.18348504)*X+0.29140176)*X-0.4798086)*X
8  00177      W=(W+0.99328136)*X+2.18780215-ALOG(SIG)-0.5772157
9  00240      10 THEI=W
10 00246      RETURN
11 00321      END

```

PROGRAMM UEBERSETZT
FOR 4200/1P

Bild 5/3: Unterprogramme THEI