

30. 03. 1976

Optimierung der Pumpdauer bei der hydrochemischen Erkundung (Lockergestein)

Die Dauer der Pumpversuche bei der hydrochemischen Erkundung wurde bisher fast ausschließlich subjektiv "nach Gefühl" durch den Projektanten bzw. Objektgeologen festgelegt. Zur Trendermittlung bei vermuteten hydrochemischen Anomalien wurden im Norden der DDR die generell mit 50 h angesetzten PV auf 100 bis 300 h erhöht.

Im Berliner Raum und im Süden der DDR werden m. E. noch weit höhere Pumpzeiten projektiert. Eine exakte Berechnung der PV-Zeit wurde nur vereinzelt, z. B. bei Uferfiltratserkundungen, durchgeführt.

Angeregt durch die Studie zum TGL-Entwurf "Demonstrativer Pumpversuch" hat Unterzeichner Berechnungen angestellt, die darlegen, daß der Nachweis hydrochemischer Anomalien mittels PV ab einer bestimmten Entfernung vom Brunnen unökonomisch ist. Somit dürfte der Aufwand für eine längere Pumpzeit, ebenso wie lt. o. g. Studie für den demonstrativen Mengennachweis, auch für die Klärung hydrochemischer Verhältnisse gegenüber dem Nutzeffekt unvertretbar sein.

Im Ergebnis der Untersuchungen werden nachstehend Formeln entwickelt und in leicht anwendbarer Form vorgelegt, die die Festlegung der Pumpzeiten auf Grund von Fließzeitberechnungen gestatten.

Für grobe Näherungen sind Faustformeln angegeben und Grafiken beigelegt, die einerseits eine exaktere Projektierung ermöglichen und andererseits eine schnelle Entscheidungsfindung für die PV gewährleisten.

Nach den vorliegenden Ergebnissen dürfte grob geschätzt bei mittleren hydrogeologischen Verhältnissen eine Verteufung bzw. eine Neubohrung ökonomischer sein als der Nachweis einer vermuteten Qualitätsanomalie, z. B. bei einer

- Anomalie im Liegenden eines GWL, wenn der trennende Stauer > 25 m mächtig ist.
- Anomalie im gleichen GWL, wenn der Brunnen > 150 m davon entfernt ist.  
eine  
(Präzisierung auf der Grundlage des Lagerstättentypenkataloges wäre möglich)

Weiterhin läßt sich aus den Berechnungen leicht ablesen, daß die in der Vergangenheit oft mißlungenen Nachweisversuche durchaus erklärbar sind. Der Nachweis hydrochemischer Anomalien mittels PV über größere Teufen bzw. Entfernungen ist technisch und ökonomisch nicht tragbar.

Der Nutzen der bei der konsequenten Durchsetzung des NV entsteht, kann vom Unterzeichner nicht exakt angegeben werden, da der Gesamtüberblick fehlt. Es wird angenommen, daß sich bei Anwendung der Fließzeitberechnungen die für hydrochemische Zwecke projektierte PV-Zeit um insgesamt 50 % reduziert. Eine evtl. notwendige Verlängerung von bereits projektierten PV ist ebenfalls als Nutzen anzusehen, da dadurch der ursprünglich wahrscheinliche Mißerfolg verhindert wird.

Unter der pauschalen Annahme, daß im Lockergestein jährlich 4 000 PV-h durch den VEB Hydrogeologie zur Klärung hydrochemischer Verhältnisse gefahren werden, dürfte sich die Einsparung auf 2 000 PV-h/a belaufen, was einem Nutzen von ca. 150 TM/a entspricht.

Neben dem direkten Nutzen für die Senkung des Kosten-, Material- und Energieaufwandes bedingen die Fließzeitberechnungen eine Qualitätsverbesserung der Erkundungsaussagen.

Von bekannten hydrochemischen Anomalien ausgehend kann eine Fließzeitberechnung zur Entscheidungsfindung bei der Anlage von Wasserfassungen beitragen. Bei größeren Entfernungen liegt die Fließdauer oft außerhalb der Amortisationszeit der Fassung.

Berechnungsgrundlagen

1. Verwendete Bezeichnungen

B	(m)	Speisungsfaktor	
b'	(m)	Mächtigkeit des hangenden Stauers (Halbdurchl.)	
b''	(m)	Mächtigkeit des liegenden Stauers (Halbdurchl.)	
h	(m)	RWSp über Sohle	
H	(m)	RWSp über Sohle im Abstand R	
h <sub>0</sub>	(m)	RWSp über Sohle im Brunnen	
J	-	Spiegelgefälle	
k	(m/s)	Durchlässigkeitsbeiwert des GWL	
k'	(m/s)	Durchlässigkeitsbeiwert des hangenden Stauers	
k''	(m/s)	Durchlässigkeitsbeiwert des liegenden Stauers	
L, l	(m)	Länge, Abstand, Fließstrecke	
M	(m)	Mächtigkeit des GWL	
n'	-	durchströmte Porosität des GWL	} entwässerb. Porosität
h''	-	durchströmte Porosität des Stauers	
Q	(m <sup>3</sup> /s)	Förderleistung des Brunnens	
q	(m <sup>2</sup> /s)	spezifischer Volumenstrom	
R, r	(m)	Reichweite, Fließstrecke	
r <sub>0</sub>	(m)	Brunnenradius (Bohr-∅ bei Kiesfilter)	
s	(m)	Absenkung im Brunnen	
T	(m <sup>2</sup> /s)	Transmissibilität	
t	(s)	Fließzeit über L bzw. R	
v	(m/s)	Filtergeschwindigkeit	
v <sub>a</sub>	(m/s)	Abstandsgeschwindigkeit	
v <sub>p</sub>	(m/s)	Porengeschwindigkeit	
c	(m <sup>2</sup> /s)	Faktor (vgl. Gl. 22 a, b)	

2. Verwendete Formeln

$v = k \cdot J$  (Gl. 1)

$J = -\frac{\Delta h}{\Delta l} = \frac{dh}{dl}$

$v_p = \frac{v}{n}$  (Gl. 2)

$v_a = v_p$  (Gl. 3)

$v_a = 1,2 v_p$  nach BEYER (1967) (Gl. 4)

$t = \frac{\Delta l}{v_a} = \frac{dl}{v_a}$  (Gl. 5)

$T = k \cdot M$  (Gl. 6)

$T = c \cdot \frac{Q}{s}$  nach TGL 23 864, Bl. 4, c = 1,0 bis 1,2 (hier mit 1,0 verwendet) (Gl. 7)

$s = \frac{Q}{T} = \frac{Q}{k \cdot M}$  nach Gl. 7 (Gl. 8)

$s = H \cdot h_0$  (= h - h<sub>0</sub>) (Gl. 9)

$B' = \sqrt{\frac{k \cdot M \cdot b'}{k'}}$  Speisung aus dem Hangenden (Gl.10)

$B'' = \sqrt{\frac{k (h - h_0) b''}{2 k''}}$  Speisung aus dem Liegenden (Gl.11)

$B''' = \sqrt{\frac{k M b'}{k' + k''} \cdot b'/b''}$  Speisung aus dem Hangenden und Liegenden (Gl.12)



3. Fließzeit im unbeeinflussten GWL entsprechend der natürlichen Dynamik

Synthese der Gl. 1, 2, 4 und 5

$$t = \frac{L \cdot n' \cdot dl}{1,2 \cdot k \cdot dh} \quad (Gl.13)$$

$$t = \frac{n' \cdot (dl)^2}{1,2 \cdot k \cdot dh} \quad (Gl.14)$$

4. Fließzeit durch einen halbdurchlässigen hangenden Stauer

$$M \cdot s = \frac{B' [Q / (2 \pi k r_0)] K_0}{B' / r_0} \quad (Gl.15)$$

nach BUSCH & LUCKNER (1972)  
Kap. 5.2.1.

$$K_0 = \frac{1,12 B'}{r_0} \quad \text{analog Wapro 1.42, Bl.2} \quad (Gl.16)$$

für große t-Werte und  
 $r_0 = r < 0,03 B$

$r_0 = r_0^*$  bei innerer Berandung des  
Brunnens (Spülbohrung, Verockerung,  
unvollkommen ausgebaut u. ä.),

$$r_0^* = r_0 / [\exp(2\pi k \cdot R_{hydr.}, \text{zus.})]$$

vgl. BUSCH & LUCKNER (1972) S.227

$$s = \frac{Q}{2\pi Mk} \cdot \ln \frac{1,12 B'}{r_0} = \frac{Q}{2\pi T} \cdot \left( \ln \frac{1,12}{r_0} \sqrt{T \cdot b' / k'} \right) \quad (Gl.17)$$

$$t = \frac{2\pi T (b')^2 n'}{Q \cdot k' \ln \left( \frac{1,12}{r_0} \sqrt{T b' / k'} \right)} \quad (Gl.18)$$

aus Gl. 5, 6 u. 17

Beispielrechnung für mittlere Verhältnisse:

Parameter:

$n'' = 0,08$

nach Tab. 3/16 in BUSCH & LUCKNER 1972 für sandigen bis tonigen Schluff, kann dem Geschiebemergel gleichgestellt werden (Fehlermöglichkeiten max. 5 % bei t)

$k' = 5 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$

bewußt hoher Wert angenommen, dadurch extrem kurze Fließzeit

$k = 2 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$

feinsandiger Mittelsand

$M = 10 \text{ m}$

mittl. ausbauwürdige Mächtigkeit

$r_0 = 0,2 \text{ m}$

mittl. Bohr-Ø 419 mm (Unvollkommenheit u. Eintrittswiderstand wird nicht berücksichtigt)

bei  $r_0^*$  größeres t !

Berechnungsergebnis:

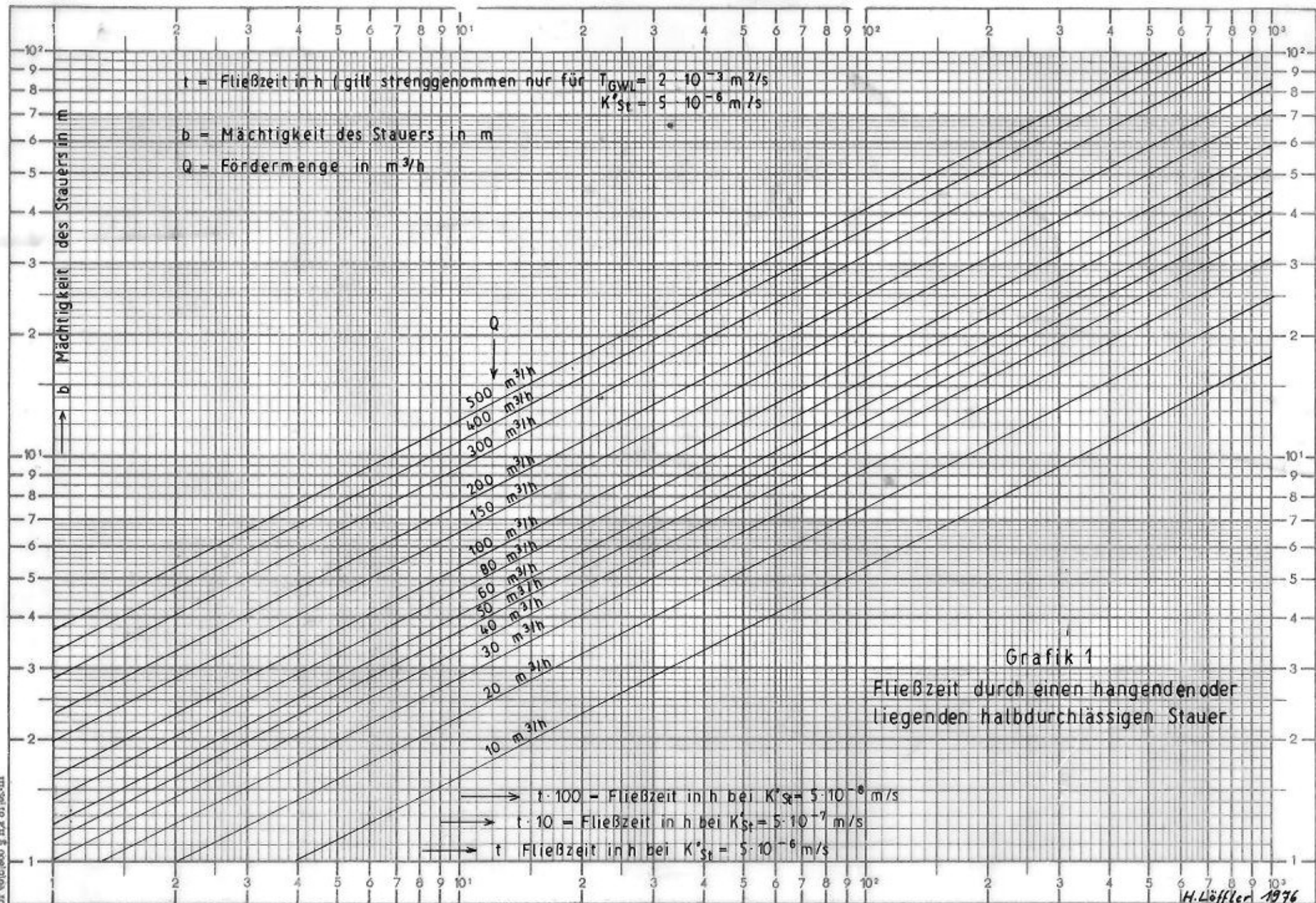
Gl. 18 wurde für verschiedene Q und b' berechnet und in Grafik 1 dargestellt.

Berechnet wurde nur die Fließzeit der zusätzlichen Speisung. Das natürliche Druckgefälle zwischen hangendem und liegendem GWL wurde nicht berücksichtigt. Bei einer evtl. Aktivierung einer Speisung zusätzlich aus dem Liegenden vergrößert sich t.

5. Fließzeit durch einen halbdurchlässigen liegenden Stauer

$$t = \frac{2\pi T (b'')^2 n''}{Q \cdot k'' \cdot 1,12 \left( \frac{1,12 \sqrt{b'' Q'}}{2 k'' M} \right)} \quad (\text{Gl. 19})$$

aus Gl. 5, 6, 8, 9, 11 und 17



III-281116 9 mZ 1116-III



Beispielrechnung für mittlere Verhältnisse:

Parameter:

$n'' = 0,08$	vgl. Bem. Pkt. 4
$k'' = 5 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$	" " " "
$k = 2 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$	" " " "
$M = 10 \text{ m}$	" " " "
$r_0 = 0,2 \text{ m}$	" " " "

Berechnungsergebnis:

Das Ergebnis ist nicht mit Gl. 18 identisch, jedoch sind die Abweichungen so gering, daß ohne weiteres die Grafik 1 angewendet werden kann.

Bei der Speisung aus dem Liegenden ist zu berücksichtigen, daß nur die Fließzeit der zusätzlichen Speisung berechnet wurde. Natürliche Druckdifferenzen wurden nicht berücksichtigt, jedoch darf der GWSp des tieferen Stockwerkes keinesfalls unter dem des oberen liegen.

6. Fließzeit horizontal in einem unendlich ausgedehnten GWL ohne Speisung

Die Berechnung der Fließzeit in einem GWL, der durch eine Förderung beeinflusst wird, ist nicht ohne weiteres möglich. Die Anwendung der Gl. 14 mit Einführung von  $s$  verbietet sich, da das Gefälle nicht linear ist, sondern durch die DUPUIT-Kurve bestimmt wird.

Bisher wurde die Fließzeit über eine abschnittsweise Berechnung des Gefälles in grober Annäherung bestimmt (vgl. Uferfiltratberechnung Wapro 1.42., Bl.4, S.18). Diese Berechnung kann aber nur für konkrete Beispiele unter großem Aufwand durchgeführt werden. Eine allgemeine Lösung über Wapro 1.42., Bl.2 (Senktrichterberechnung und danach Bestimmung des Gefälles in Teilschnitten) ist theoretisch möglich, aber ohne EDV-Einsatz nur mit unökonomischem Zeitaufwand möglich. Unterzeichner wandte sich deshalb mit diesem Problem an Herrn Dipl.-Math. TIEMER vom Institut für Wasserwirtschaft (Berlin), der am 25.3.76 in Zschortau folgende elegante Lösung fand:

Ag 307-W-DOR D 9415 150 T III-1-1 764

59 012 VLV Freiberg, Zweigbetrieb Dresden



- Annahme: horizontaler GWSp

$$h^2 = h_0^2 + \frac{Q}{\pi k} \ln (r/r_0) \quad \text{für freie Oberfläche}$$

$$\text{linearisiert: } h = h_0 + \frac{Q}{2\pi T} \ln (r/r_0)$$

$$v = \frac{Q}{2\pi rh} \quad \text{mittl. Filtergeschwindigkeit im Abstand } r$$

$$v_a = \frac{v}{n'} = \frac{1}{n'} \cdot \frac{Q}{2\pi rh}$$

$$r = r(t) \quad v_a = - \frac{dr}{dt}$$

$$- \frac{dr}{dt} = \frac{1}{n'} \cdot \frac{Q}{2\pi rh}$$

$$dt = - \frac{n'}{Q} 2\pi hr dr$$

$$\int_0^t dt = - \frac{2\pi n'}{Q} \int_R^{r_0} r h dr$$

$$t = \frac{2\pi n'}{Q} \int_{r_0}^R r h dr \quad \begin{array}{l} k \cdot h = \text{const.} \\ h \text{ bei gesp. GW} = M \end{array}$$

$$t = \frac{2\pi T n'}{Q \cdot k} \int_{r_0}^R r dr = \frac{2\pi T}{Q} \cdot \frac{n'}{k} \cdot \frac{1}{2} r^2 \Big|_{r_0}^R$$

$$t = \frac{2\pi T}{Q} \cdot \frac{n'}{2k} \cdot R^2 \quad \left( \text{da } r_0 \text{ gegenüber } R \text{ sehr klein, kann } r_0 \text{ vernachlässigt werden} \right)$$

$$\frac{Q}{2\pi T} = \frac{H - h_0}{\ln (R/r_0)}$$

$$t = \frac{n'}{k} \cdot \frac{R^2}{(H-h_0)} \cdot 1/2 \ln (R/r_0) \quad \text{Fließzeit bei der Brunnenanströmung (für gesp. u. ungesp. GW) nach TIEMER}$$

(Gl. 20)

Diese Gleichung gilt für ungespannte wie für gespannte Verhältnisse.

Unterzeichner setzte in Gl. 20 die Gl. 9, 8 und 4 ein.

$$t = \frac{n' M R^2}{2,4 Q} \ln (R/r_0) \quad (\text{Gl. 21})$$

Beispielrechnung für mittlere Verhältnisse:

Parameter:

$n' = 0,15$  nach Tab. 3/16 in BUSCH & LUCKNER 1972 für Mittelsand bis kiesigen Sand; bei feineren Sanden bis 5 %, bei gröberen bis 10 % Abweichungen bei t möglich.

$M = 10 \text{ m}$  vgl. Bem Pkt. 4

$r_0 = 0,2 \text{ m}$

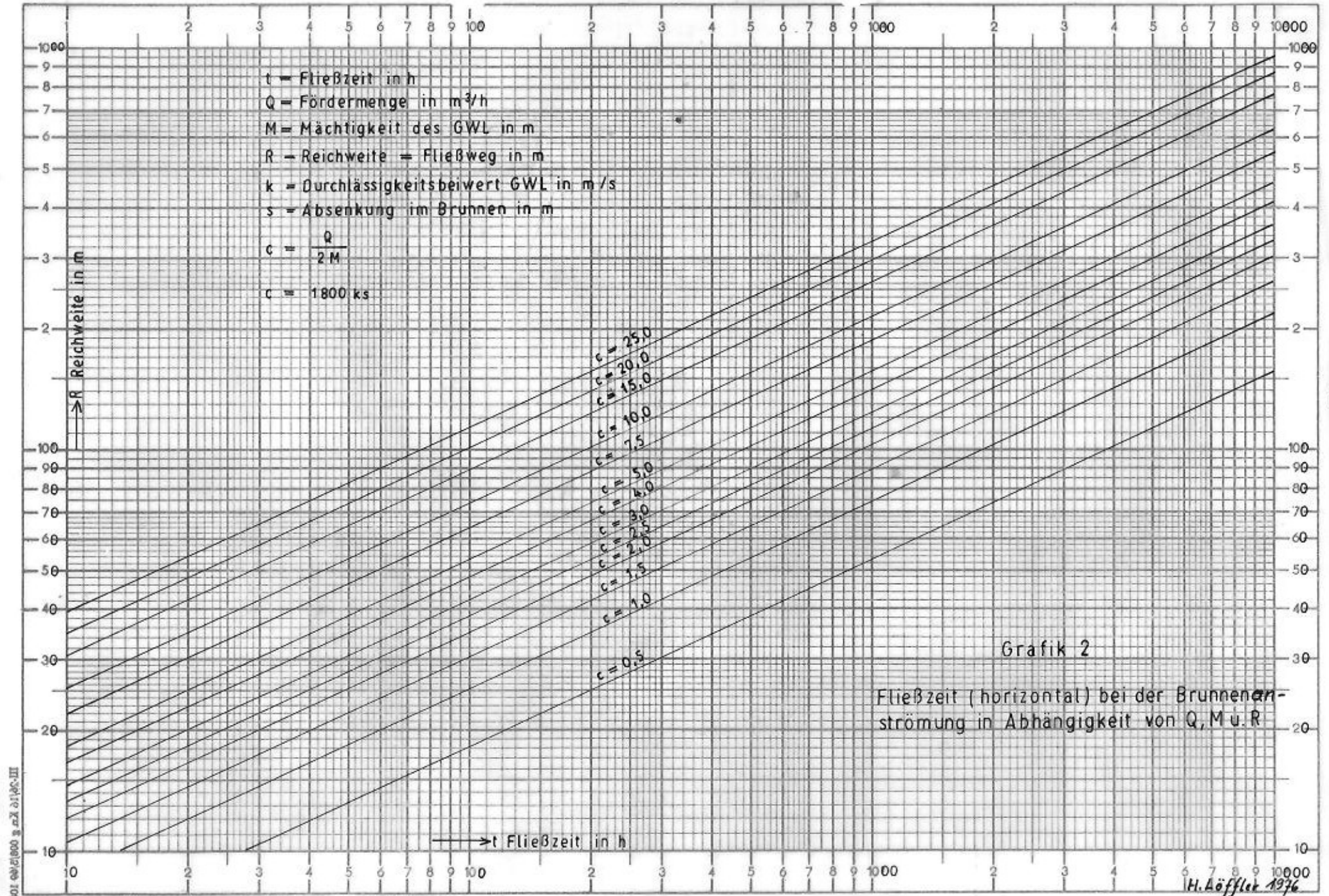
Berechnungsergebnisse:

Gl. 21 wurde für verschiedene Q und R berechnet und in Grafik 2 dargestellt (Q in Gl. 22a in  $\text{m}^3/\text{h}$  !)

$$c = \frac{Q}{2M} ; \quad c = 1.800 \cdot k \cdot s \quad (\text{Gl. 22 a, b})$$

Unter Verwendung von Gl. 22 kann aus Grafik 2 die Fließdauer für eine beliebige Menge bei einer beliebigen GWL-Mächtigkeit oder für einen beliebigen k-Wert bei einer beliebigen Absenkung im Brunnen abgelesen werden.

Bei zusätzlicher Speisung ist die Fließdauer größer.



III-30716 K 2/1000 g 22 1/2 1/30-III

1 11 )



7. Fließzeit bei der Grabenanströmung

Für eine horizontale Fassung gibt LEHR (aus FISCHER & HUMMEL 1968) folgende Ableitung der Laufzeit:

$$Q = F \cdot v_F = L \cdot y \cdot k \cdot \frac{dy}{dx}$$

$$dx = \frac{L \cdot k \cdot y \cdot dy}{Q}$$

$$v_F = p \cdot y$$

Somit wird  $Q = L \cdot y \cdot p \cdot v$

$$Q = L \cdot y \cdot p \cdot \frac{dx}{dt}; \quad Q^2 = L^2 \cdot k \cdot p \cdot y^2 \cdot \frac{dy}{dt}$$

Nach Integration von  $dt = \frac{L^2 \cdot p \cdot k \cdot y^2 \cdot dy}{3 \cdot Q^2}$

ergibt sich 
$$t = \frac{L^2 \cdot p \cdot k \cdot y^3}{3 \cdot Q^2} + C$$

Für die Randbedingung  $y = h; \quad t = 0$

wird 
$$C = - \frac{L^2 \cdot p \cdot k \cdot h^3}{3 \cdot Q^2}$$

und somit 
$$t = \frac{L^2 \cdot p \cdot k}{3 \cdot Q^2} \cdot (y^3 - h^3)$$

Setzt man  $Q = \frac{k \cdot L \cdot (H^2 - h^2)}{2 R}$  (einseitiger Zufluß zur Sickerleitung, wenn in der integrierten Durchflußgleichung  $x = R$  und  $y = H$  gesetzt wird)

und  $y = H$

so erhält man die gesamte Laufzeit  $t$  im ungespannten Grundwasser zu

$$t = \frac{4 \cdot p \cdot R^2 \cdot (H^3 - h^3)}{3 \cdot k \cdot (H^2 - h^2)^2}$$

In den o. g. Gleichungen des Pkt. 7 ist

$v_F$  = Filtergeschwindigkeit, bezogen auf den vollen Querschnitt

$v$  = wirkliche Grundwassergeschwindigkeit innerhalb der Bodenporen.

p = Porengehalt

h = abgesenkter Wasserstand am äußeren Fassungsrand

H = Grundwassermächtigkeit am Infiltrationspunkt

R = Abstand der Fassung vom Infiltrationspunkt

L = Länge der horizontalen Fassung

FISCHER & HUMMEL geben außerdem für die Laufzeit bis zu einer waagerechten Fassung im gespannten Grundwasser an:

$$t = \frac{p \cdot R^2}{k (H - h)}$$

Diese Gleichung entspricht teilweise der von TIEMER entwickelten (Gl. 20), berücksichtigt jedoch nicht die Gefälleänderung der DUPUIT-Oberfläche.

Da lediglich die kürzeste im Boden auftretende Laufzeit von Interesse ist, sind die Gleichungen nach FISCHER & HUMMEL auch auf vertikale Fassungen unbedenklich anwendbar.

Die Fließzeit von Uferfiltrat zu einem Graben, einem Horizontalfilterbrunnen, einer Brunnengalerie oder einem Einzelbrunnen ergibt sich somit aus der Gleichung (Symbole entsprechend Pkt.1)

$$t = \frac{4 \cdot n^2 \cdot L^2 \cdot (H^3 - h_0^3)}{3 \cdot k \cdot (H^2 - h_0^2)^2} \quad (\text{Gl. 23})$$

### 8. Ergebnisse und Schlußfolgerungen

Bei den vorgelegten Beispielmrechnungen, die Grundlage der Grafiken sind, wurden die für eine möglichst kurze PV-Zeit günstigsten Parameter angenommen, d. h. die ausgewiesene Zeit ist als Mindestdauer aufzufassen. Bei weiterer zusätzlicher Speisung aus nicht berücksichtigten Horizonten, bei mächtigen GWL oder guten Durchlässigkeiten verlängert sich automatisch die erforderliche Pumpzeit. Die einzige Ausnahme bilden evtl. vorhandene Barrieren, die eine Zeitverkürzung bedingen, da grundsätzlich unter Annahme eines unendlich ausgedehnten GWL gerechnet wurde.


Bei der Verwendung der Grafik 1 ist darauf zu achten, daß bei einem k-Wert des Stauers von  $< 5 \cdot 10^{-6}$  m/s die Fließzeiten sich um das 10- bis 100-fache vergrößern.

Die entwickelten Gleichungen und besonders die erstellten Grafiken lassen eindrucksvoll erkennen, daß eine Aufwandsminimierung bei PV zur hydrochemischen Erkundung nicht nur zweckmäßig sondern sogar notwendig ist.

Ein Nachweis von Qualitätsanomalien ist bereits bei geringsten Reichweiten oder kleinen Stauermächtigkeiten mit enorm hohen Pumpzeiten verbunden, die vom Aufwand keinesfalls vertretbar sind. Aus diesem Grund wird geschlußfolgert, daß im größten Teil der Erkundungsfälle eine Wasserprobennahme im Rahmen der für die hydraulische Auswertung notwendigen Pumpzeiten ausreicht. Pauschal wird eingeschätzt, daß die Dauer eines PV für die hydrochemische Trendermittlung im Lockergestein - von Sonderfällen, wie z. B. Uferfiltratanachweis, abgesehen - max. 50 h nicht überschreiten sollte.

#### 9. Literatur:

1. BEYER, W.: Zur Analyse der Grundwasserfließbewegung, -  
Wiss. Zeitschr. d. TU, Heft 4  
Dresden 1967
2. BUSCH, K.-F. & LUCKNER, L.: Geohydraulik.-  
VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1972
3. FISCHER, G. & HUMMEL, H.-G.: Wasserversorgung.-  
1. Lehrbrief, II. Ausgabe; VEB Verlag Technik, Berlin 1968
4. TGL 23 864, Bl.4: Pumpversuche;-  
geohydraulische Auswertung bei konstanter Förderleistung.-
5. Wapro 1.42., Bl.2: Bemessungsgrundlagen für Brunnen von Grundwassergewinnungsanlagen. (geohydraulische Berechnungen).-  
unveröff., VEB Projektierung Wasserwirtschaft,  
Halle 1971

  
H. L ö f f l e r

Dipl.-Geol.