

# Hydrologische Interpretation von Temperaturbeobachtungen in Grundwasserströmen

Autor(en): **Trieb, E.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Zeitschrift für Vermessung, Kulturtechnik und Photogrammetrie = Revue technique suisse des mensurations, du génie rural et de la photogrammétrie**

Band (Jahr): **60 (1962)**

Heft 7

PDF erstellt am: **11.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-217691>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Auf Grund der vorangegangenen Ausführungen kann man zusammenfassend folgende Schlußfolgerungen ziehen:

1. Die Genauigkeit der Messungen bei Polygonzügen, die einen Knotenpunkt definieren, soll verschieden von der Genauigkeit normaler Polygonzüge sein.
2. Nur unter speziellen Bedingungen – bei einem genau bestimmten Verhältnis zwischen Zahl und Länge der Polygonzüge, die einen Knotenpunkt definieren – kann die Genauigkeit gleich sein.

#### *Literatur:*

- [1] «Vermessungswesen in der Praxis», Bd. I, 2., verbesserte Ausgabe, Berlin 1955.  
[2] *Chr. Tschapanov*, «Über die Formeln zur Berechnung der mittleren Querverschiebung in beiderseitig angeschlossenen Polygonzügen». Zeitschrift für Vermessungswesen, Heft 12, 1959.

## **Hydrologische Interpretation von Temperaturbeobachtungen in Grundwasserströmen\***

*Von Dipl.-Ing. E. Trüeb, Winterthur*

### *1. Die zunehmende Bedeutung der Grundwassergewinnung in der Schweiz*

Nachdem in der Schweiz die Quellwasserreserven weitgehendst ausgenützt sind, hat sich die Deckung des steil ansteigenden Wasserbedarfes zwangsläufig in vermehrtem Maße auf die ausgiebigen Grundwasserschätze zu stützen. Im Gegensatz zur Wassergewinnung aus Seen, die ebenfalls an Bedeutung gewinnt, sind die Grundwasservorkommen der fluvioglazialen Schotterebenen des schweizerischen Mittellandes in der Regel von einer derart hervorragenden Güte, daß sie – abgesehen von wenigen Ausnahmen – ohne Aufbereitung dem Verbrauch zugeführt werden können. Die zunehmende Verlagerung vom Quellwasser zum Grund- und in abgeschwächtem Maße auch zum Seewasser dürfte mit genügender Deutlichkeit aus der Tabelle 1 hervorgehen.

Nun zeigt sich aber immer mehr, daß es sich bei den ausgedehnten und ergiebigen Grundwasservorkommen der fluvioglazialen Schotterebenen des schweizerischen Mittellandes selten ausschließlich um echtes Grundwasser handelt, das heißt um solches, das allein durch Niederschlagsversickerung gespeist wird. In der Regel ist im unbeeinflussten Zustand bereits ein beträchtlicher Infiltrationseinfluß festzustellen. Dies wird offensichtlich, wenn man bedenkt, daß bei einer mittleren Jahres-

---

\* Mitteilung Nr. 3 der Technischen Kommission der Sektion Zürich-Schaffhausen des SVVK.

*Tabelle 1:*

*Verteilung der Wassergewinnung der schweizerischen Wasserwerke auf die verschiedenen Wassertypen gemäß der Statistik des SVGW*

	1948	1954	1959
Quellwasser	41 %	31,4 %	30,3 %
Grundwasser	36 %	41,7 %	43,7 %
Seewasser	21 %	25,6 %	25,8 %
Flußwasser	2 %	1,3 %	0,2 %

niederschlagshöhe von rund 1000 mm und einem Versickerungsanteil von 10–20 % nur eine mittlere Neubildung an echtem Grundwasser von 3,2 bis 6,4 l/km<sup>2</sup> · sec resultiert, was zur Gewinnung größerer Grundwassermengen niemals ausreichen würde. Mittlere Grundwasserentnahmen von 250–500 l/sec sind bei den schweizerischen Wasserwerken durchaus keine Seltenheit mehr.

Durch die Bewirtschaftung der Grundwasservorkommen wird der Infiltrationsanteil von Flußwasser im wasserführenden Schotter meist merklich erhöht. Voraussetzung dazu ist allerdings, daß die Schwebstoffführung des Flusses nicht zu hoch liegt, da sonst eine irreversible Kolmatierung der Flußsohle eintritt; es sei denn, daß bei Hochwasser ein kräftiger Geschiebetrieb auftritt, der imstande ist, die dichtende Filterhaut periodisch wieder abzuschwemmen, so daß die Flußsohle wieder durchlässig wird [1]. Andererseits darf auch die Belastung des Flußwassers mit organischen Suspensionen nicht zu hoch sein, da es sonst in der Filterhaut zur Sauerstoffzehrung kommen kann. Sauerstoffarmes oder gar sauerstofffreies Grundwasser neigt zur Eisen- und Manganlösung mit den bekannten nachteiligen Folgen bei der Verwendung des Wassers.

Auch wenn in der Schweiz in der Regel noch ohne eigentliche Uferfiltration ausgekommen werden kann, ist es doch von ausschlaggebender Bedeutung, daß weitgehende Klarheit über den Anteil der Flußwasserinfiltration besteht. Dies ist unerlässlich, um allfällige Gefährdungen der Grundwassergüte in hygienischer Hinsicht zu erkennen, das heißt um einen hinreichenden Abstand der Fassung von den Speisungsbereichen einzuhalten; dann vor allem aber auch, um einen zuverlässigen Überblick über das Maß der Grundwasserneubildung zu erhalten und damit die auf weite Sicht zulässige Entnahme mit genügender Genauigkeit abschätzen zu können.

Wie Beobachtungen und Untersuchungen während der letzten Jahre ergeben haben, stellt die kontinuierliche Erfassung des Temperaturverlaufes im Grundwasser ein Hilfsmittel dar, um Infiltrationseinflüsse rasch und zuverlässig zu erkennen. Darüber hinaus erlaubt die

Methode auch Rückschlüsse auf die Fließgeschwindigkeit des Grundwassers sowie auf die Durchlässigkeit und Porosität des Grundwasserträgers. In der Regel werden dazu Widerstandsthermometer verwendet, welche in verschiedener Tiefe in Bohrlöcher eingebaut werden. Nach dem Einbau werden die Bohrrohre wieder herausgezogen und der Ringraum zwischen den Temperatursonden und der Bohrlochwandung mit Material gleicher Durchlässigkeit aufgefüllt, so daß im Bereich der Sonden wieder die ursprünglichen Strömungsverhältnisse vorliegen.

## 2. Theoretische Grundlagen für die Auswertung von Temperaturbeobachtungen in Grundwasserströmen

Für einen einseitig unendlich ausgedehnten Körper ergibt sich bei einer Schwankung der Oberflächentemperatur entsprechend einer Cosinusfunktion nach Gröber [2] bei Wärmeübertragung durch Wärmeleitung folgende Gleichung des Temperaturfeldes:

$$\vartheta = \vartheta_{0M} e^{-x \sqrt{\frac{\pi}{a t_0}}} \cos \left( x \sqrt{\frac{\pi}{a t_0}} - \frac{2 \pi t}{t_0} \right) \quad (1)$$

Darin bedeuten:

$\vartheta_{0M}$  = Amplitude der Temperaturfunktion der Oberfläche

$x$  = Eindringtiefe in den Körper in m

$a = \frac{\lambda}{c \gamma}$  in  $\text{m}^2/\text{h}$ , Temperaturleitzahl

$t_0$  = Dauer einer Periode  $\lambda$  = Wärmeleitzahl

$c$  bzw.  $\gamma$  = spezifische Wärme beziehungsweise spezifisches Gewicht des Körpers

Für die Umhüllende des Temperaturverlaufes im Körper ergibt sich daraus

$$\vartheta_M = \vartheta_{0M} e^{-x \sqrt{\frac{\pi}{a t_0}}} \quad (2)$$

Damit läßt sich für den Fall der Unterströmung eines Grundwasserstromes unter einem völlig dichten Fluß nach Abbildung 1 bei geringer Strömungsgeschwindigkeit die Temperaturbeeinflussung im Grundwasserträger abschätzen. Streng genommen gelten diese Beziehungen allerdings nur für ruhendes Grundwasser.

Aus der Abbildung 1 erkennt man ohne weiteres, daß die Temperaturvariationen mit zunehmender Tiefe sehr rasch abklingen.

Wesentlich anders liegen nun die Verhältnisse, wenn Flußwasser nach Abbildung 2 in den Grundwasserträger infiltriert.

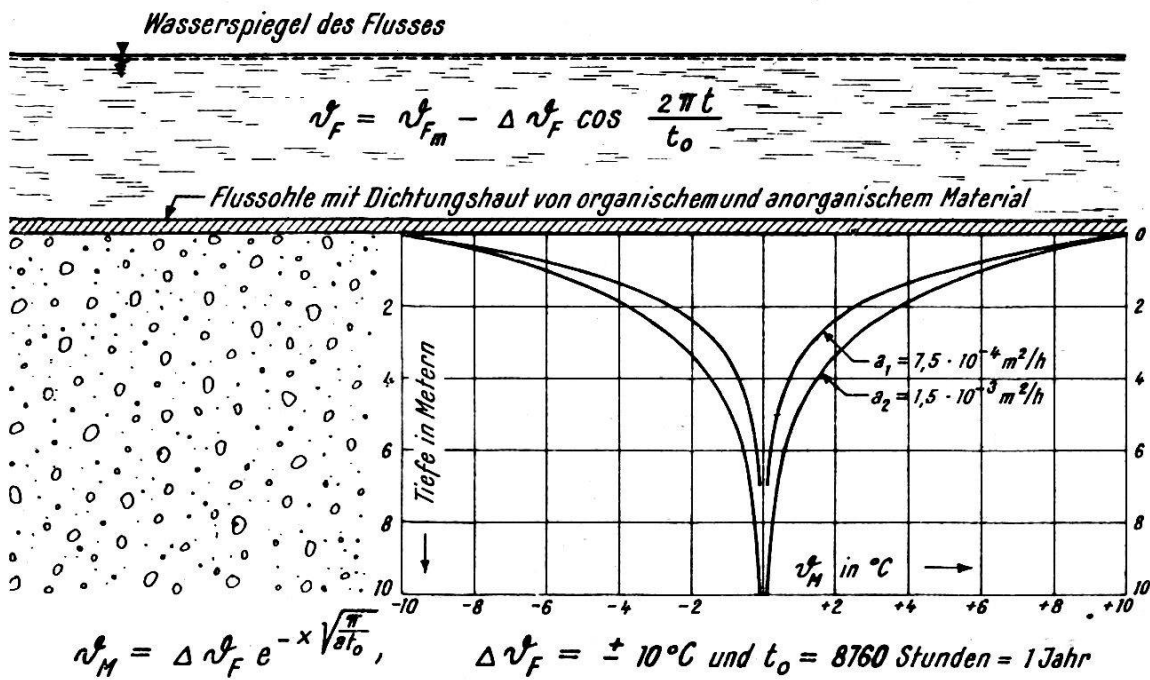


Abb. 1. Variation der Grundwassertemperatur bei ruhendem Grundwasser infolge der Variation der Flußwassertemperatur bei Wärmeübertragung durch Wärmeleitung

Dabei bedeuten:

$\vartheta_F$  = Flußwassertemperatur  $\vartheta_F = f(t)$

$\vartheta_{F_m}$  = Mittlere Flußwassertemperatur

$\Delta \vartheta_F$  = Amplitude der Temperaturganglinie des Flußwassers

$\vartheta_M$  = Maximale Variation der Temperatur im Bodenkörper

Allerdings läßt sich für das Temperaturfeld nicht mehr so leicht eine allgemeingültige Gleichung finden. Eingehende Untersuchungen und Überlegungen, welche Mustert [3] im Auftrag der Wasserversorgung Winterthur durchführte, haben schließlich zu der folgenden Näherungslösung geführt:

$$\vartheta(x, t) = \vartheta_{F_m} - \Delta \vartheta_{F_m} e^{-\frac{mx}{K}} \cos \frac{2\pi}{t_0} \left( t - \frac{x}{K} \right) \quad (4)$$

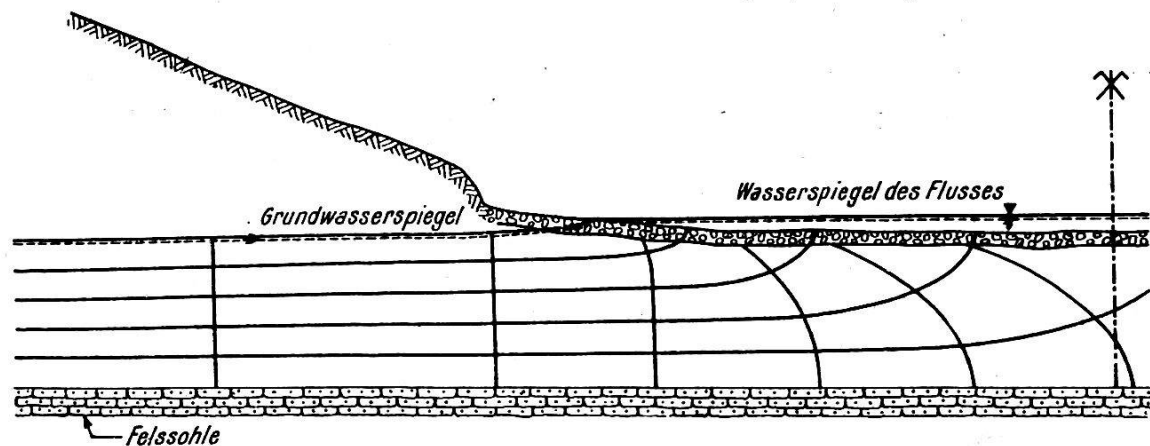


Abb. 2. Speisung des Grundwassers durch Flußwasserinfiltration

Dazu sind die folgenden Abkürzungen zu beachten:

$$K = \frac{\gamma_W c_W v_F}{n\gamma_W c_W + (1-n)\gamma_S c_S} \quad (4a)$$

$$m = \frac{p}{Hv_F\gamma_W c_W} \quad p = \text{Versuchskonstante} \quad (4b)$$

Dabei bedeuten:

$\vartheta(x, t)$  = Grundwassertemperatur in Funktion des Abstandes  $x$  von der Infiltrationsstelle und der Zeit  $t$

$\vartheta_F$  = Flußwassertemperatur  $\vartheta_F = \vartheta_{Fm} - \Delta\vartheta_F \cos \frac{2\pi t}{t_0}$

$\vartheta_{Fm}$  = mittlere Flußwassertemperatur

$\Delta\vartheta_{Fm}$  = Amplitude der Temperaturganglinie des Flußwassers

$t_0$  = Schwingungsdauer der Flußwassertemperatur  $T = 1$  Jahr

$t$  = Zeit

$v_F$  = mittlere Filtergeschwindigkeit des Grundwassers

$n$  = Porosität des Schotters

$\gamma_W$  bzw.  $\gamma_S$  = Spezifisches Gewicht des Wassers beziehungsweise des Schotters

$c_W$  bzw.  $c_S$  = Spezifische Wärme des Wassers beziehungsweise des Schotters

$H$  = Mächtigkeit des grundwasserführenden Schotters

$p$  = eine durch Versuche zu bestimmende Konstante

Sobald die Versuchskonstante  $p$  aus dem Beobachtungsmaterial ermittelt ist, lassen sich mit Hilfe der Gleichungen (4), (4a) und (4b) die mittlere Filtergeschwindigkeit  $v_F$  und die Porosität  $n$  ermitteln. Voraussetzung dazu ist allerdings, daß in der Fließrichtung des Grundwassers mehrere Profile zur Messung des Temperaturverlaufes angelegt werden.

### 3. Anwendungsbeispiele

Im Zusammenhang mit einem Flußstau und den damit verbundenen Veränderungen der Strömungsverhältnisse im angrenzenden Grundwassergebiet führt die Wasserversorgung Winterthur in den zwei Beobachtungsprofilen gemäß Abbildung 3 seit 1953 mit Hilfe in den Grundwasserträger eingebauter Widerstandsthermometer kontinuierliche Temperaturmessungen durch.

Die entsprechenden Beobachtungswerte sind in der Abbildung 4 oben dargestellt. In der gleichen Abbildung sind in der unteren Bildhälfte die nach der Methode der kleinsten Quadrate ausgeglichenen mittleren Temperaturganglinien aufgetragen. Da im Bereich der Flußsohle recht unübersichtliche Strömungsverhältnisse vorliegen, ist für

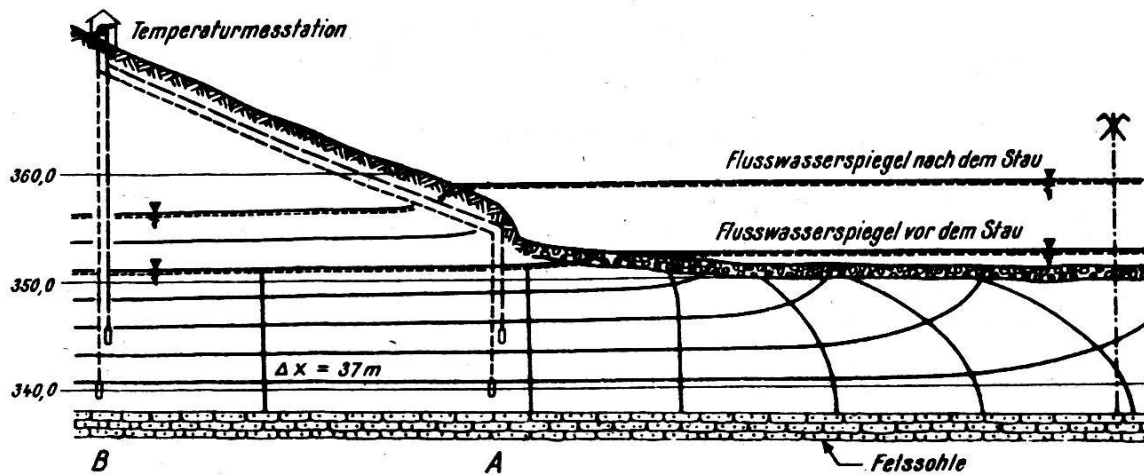


Abb. 3. Anordnung der Temperaturfühler im Grundwasserträger und Übersicht über die hydrologischen Verhältnisse vor und nach dem Stau

diese Zone eine Korrelation zwischen der Temperaturganglinie des Flußwassers und des Grundwassers recht unsicher. Dagegen läßt sich die mittlere Filtergeschwindigkeit des Grundwassers aus den ausgeglichenen Beobachtungswerten der Meßstellen A und B herleiten.

Wird mit  $\delta$  die Phasenverschiebung in Tagen gegenüber der Flußwassertemperatur bezeichnet, so ergibt sich aus Gleichung (4)

$$\delta = \frac{x}{K} \quad (5)$$

Werden in Gleichung (4a) die nachfolgenden Zahlenwerte eingesetzt:

$$n = 0,20$$

$$\gamma_S = 2650 \text{ kg/m}^3$$

$$\gamma_W = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$c_S = 0,21 \text{ k cal/kg } ^\circ\text{C}$$

$$c_W = 1,00 \text{ k cal/kg } ^\circ\text{C}$$

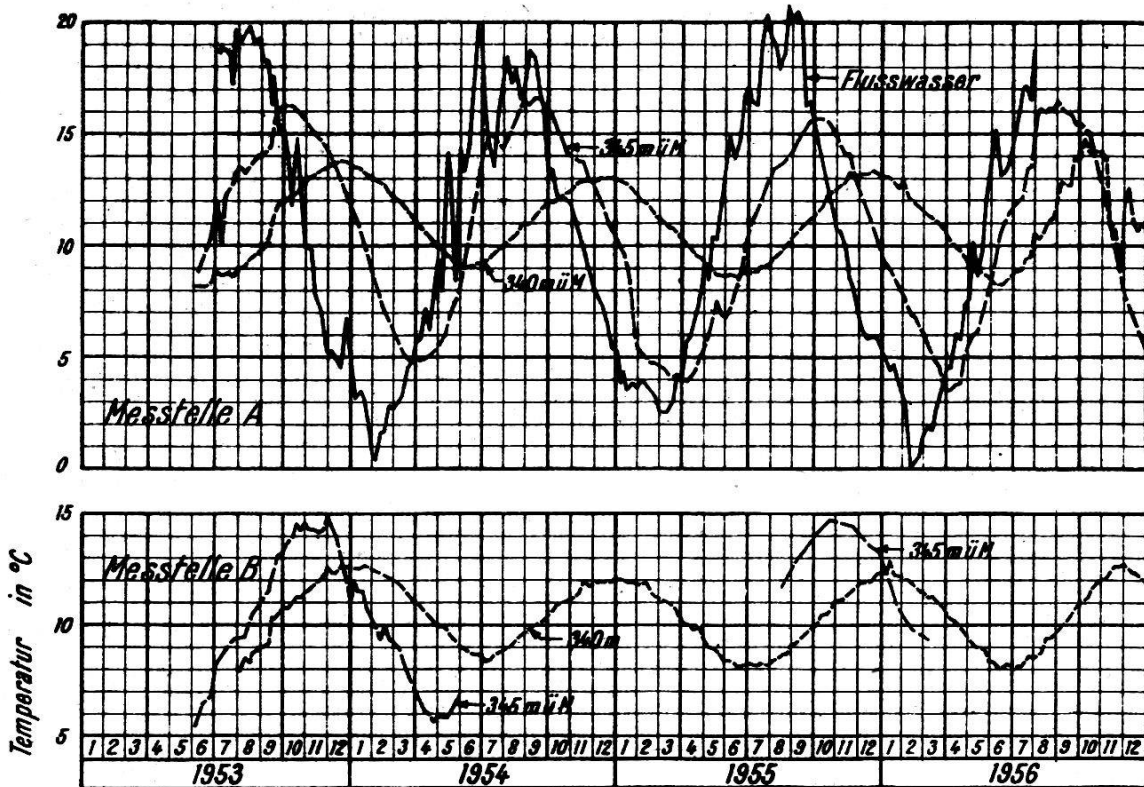
so ergibt sich  $K \sim 1,5 v_F$  oder in Verbindung mit Gleichung (5)

$$\delta = \frac{x}{1,5 v_F} \quad v_F = \frac{x}{1,5 \delta} \quad (6)$$

Tabelle 2:  
Ermittlung der mittleren Filtergeschwindigkeit für  $\Delta x = 37 \text{ m}$

Kurve	$\delta$	Kurve	$\delta$	$\Delta\delta$	$v_F$	$v_{Fm}$
	Tage		Tage			
A/345	45	B/345	86	41	0,60	0,71
A/340	115	B/340	145	30	0,82	

### Beobachtete Temperaturen



### Ausgeglichene Temperaturen

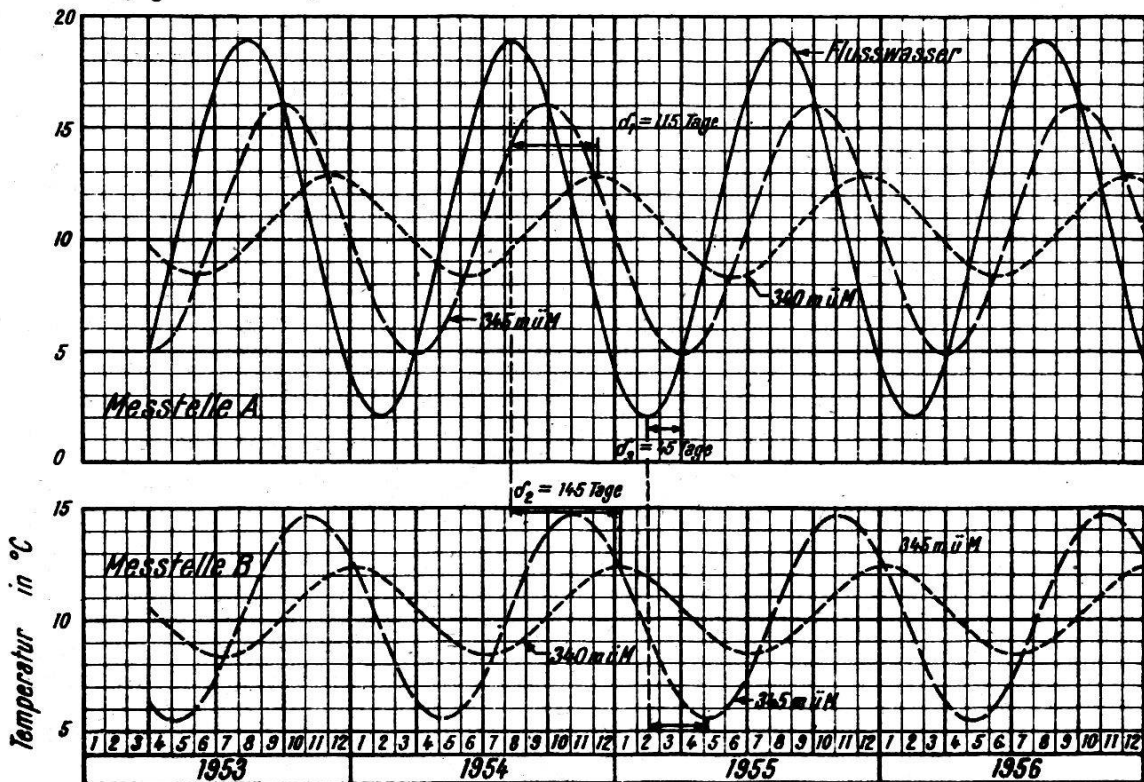


Abb. 4. Kontinuierliche Messung der Flußwasser- und Grundwassertemperaturen



Es zeigt sich also, daß die Fortpflanzung der Temperaturmaxima nicht – wie bei oberflächlicher Betrachtung angenommen werden könnte – mit  $v_F$  vor sich geht, sondern nach Gleichung (4a)

$$K = \frac{\gamma_W c_W v_F}{n \gamma_W c_W + (1-n) \gamma_S c_S} = \alpha v_F \text{ bzw. } \alpha = \frac{\gamma_W c_W}{n \gamma_W c_W + (1-n) \gamma_S c_S}$$

mit  $K = \alpha v_F$  erfolgt. Dabei ist die Konstante  $\alpha$  nur von der Porosität des Schotters und dessen wärmetechnischen Eigenschaften abhängig. Das Temperaturmaximum eilt also der ideellen Stromwelle mit der maximalen Ausgangstemperatur, deren Fortpflanzungsgeschwindigkeit auf Grund der mittleren Filtergeschwindigkeit berechnet wird, voraus. Beachtet man jedoch, daß für den Wärmetransport die wahre Strömungsgeschwindigkeit  $v_\omega \sim \frac{v_F}{n}$  maßgebend ist, so wird der dargestellte

Sachverhalt sofort verständlich. Denn es zeigt sich dann, daß die Fortpflanzung der Temperaturmaxima im Grundwasserträger der mit der wahren Geschwindigkeit  $v_\omega$  fortschreitenden Stromwelle mit der maximalen Ausgangstemperatur beträchtlich nachhinkt.

Von besonderem Interesse ist, daß der mit Hilfe von Temperaturbeobachtungen hergeleitete Mittelwert  $v_{Fm} = 0,71$  m/Tag recht gut mit dem mittels eines ausgedehnten Salzungsversuches ermittelten Wert  $v_{Fm} = 0,83$  m/Tag übereinstimmt. Die beschriebene Methode auf Grund kontinuierlicher Temperaturmessungen dürfte somit mit hinreichender Genauigkeit zur Herleitung von Aussagen über die Filtergeschwindigkeit geeignet sein. Interessant ist auch die Feststellung, daß die Temperaturganglinien der Meereshöhen 345 m ü. M. und 340 m ü. M. in Flußnähe bereits unterschiedliche Phasenverschiebungen und Dämpfungen aufweisen. Die Ursache für diese Erscheinung liegt einerseits in den ungleichen Fließstrecken nach Abbildung 3 begründet; andererseits kommt aber auch die verstärkte Dämpfung durch den vermehrten Temperaturausgleich mit der Felsunterlage der Sonden des Horizontes 340 m ü. M. zum Ausdruck.

Als zweites Beispiel sei auf die Anwendung des Verfahrens bei der Interpretation der Strömungsverhältnisse bei Großpumpversuchen hingewiesen. Bei der Erkundung von ergiebigen Grundwasservorkommen werden in der Schweiz in letzter Zeit langandauernde Pumpversuche mit Entnahmemengen von 100–250 l/sec durchgeführt. Dabei werden in der Regel vertikale Versuchsbrunnen bis an die Grenze der Leistungsfähigkeit, das heißt bis zur Erreichung der kritischen Tiefe, beansprucht. Die Dauer solcher Versuche liegt etwa zwischen 80 und 180 Tagen. Dadurch kommen allfällige Infiltrationseinflüsse deutlich zum Ausdruck. Voraussetzung für die Anwendung der Methode der kontinuierlichen Temperaturmessungen ist allerdings ein deutlicher Unterschied zwischen der Temperatur des Flußwassers und derjenigen des Grundwassers. Werden in Brunnennähe Temperatursonden in den Grundwasserträger eingebaut und deren Resultate mit der Temperatur des aus dem Brunnen geför-

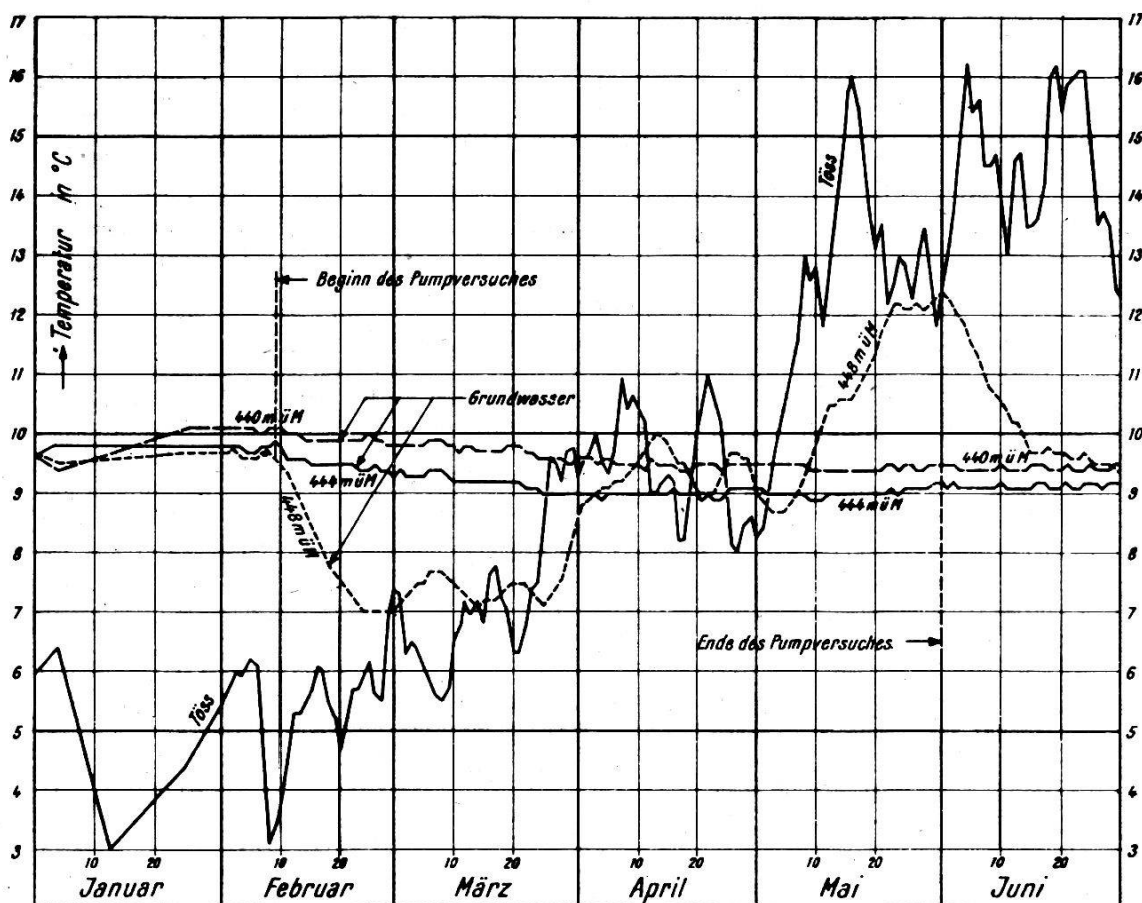


Abb. 5. Variation der Grundwassertemperatur in einer Bohrung, welche unmittelbar am Flußufer gelegen ist, während eines Pumpversuches. Nur der oberste Temperaturfühler (448 m ü. M.) zeigt eine Beeinflussung durch die verstärkte Infiltration von Flußwasser

derten Wassers verglichen, so läßt sich leicht feststellen, welche Schichten an der Wassernachlieferung vorwiegend beteiligt sind, das heißt, welche Schichten die beste Durchlässigkeit aufweisen und in welche Schichten somit die Infiltration von Flußwasser hauptsächlich erfolgt.

In Abbildung 5 sind die Temperaturganglinien des Flußwassers und des Grundwassers der Horizonte 448 m ü. M., 444 m ü. M. und 440 m ü. M., deren Sonden im Uferbereich gelegen sind, dargestellt. Daraus geht hervor, daß die Temperaturganglinie des Horizontes 448 m ü. M. also der obersten Schicht im unbeeinflussten Zustand der mittleren Grundwassertemperatur entspricht, mit Beginn des Pumpversuches in einem 310 m entfernten Versuchsbrunnen sich aber sprunghaft der Temperaturganglinie des Flußwassers angleicht, um mit Beendigung des Versuches wieder auf die mittlere Temperatur des Grundwassers zurückzufallen. Damit kann gezeigt werden, daß an dieser Stelle die Infiltration von Flußwasser sich auf den obersten Horizont beschränkt.

#### 4. Zusammenfassung

Wenn auch die hydrologische Interpretation von kontinuierlichen Temperaturmessungen beim heterogenen Aufbau der Grundwasser-

träger in der Schweiz mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden ist, können doch mit Hilfe von Näherungsgleichungen für den Verlauf des Temperaturfeldes Aussagen über die Strömungsverhältnisse des Grundwassers gemacht werden. Bei genügend langen Meßreihen und einer Mehrzahl von Beobachtungsprofilen sind auch Aussagen über die Porosität des Schotters und seine wärmetechnischen Eigenschaften möglich.

Bei der Interpretation von Pumpversuchsergebnissen eignen sich kontinuierliche Temperaturmessungen für die Abklärung von Infiltrationseinflüssen vorzüglich.

Das beschriebene Verfahren ist oft billiger als die Durchführung von ausgedehnten Salzungsversuchen, setzt aber Beobachtungsreihen von mehreren Jahren voraus.

### *Literaturverzeichnis*

- [1] *H. Kustermann*, «Der Einfluß der Organismen in Kiesschotterböden der Flüsse auf die Wasserversickerung», Dissertation der Universität München, 1957.
- [2] *Gröber, Erk, Grigull*, «Grundgesetze der Wärmeübertragung», Springer-Verlag, Berlin 1955.
- [3] *R. Mustert*, «Rechnungen zur Temperaturverteilung eines Grundwasserstromes, der aus Flußwasser mit jahreszeitlichem Temperaturgang gespeist wird», unveröffentlichte Autographie der Wasserversorgung Winterthur, 1956.

## **Die Konferenz der schweizerischen Kulturingenieure**

**14. bis 16. September 1961 im Kanton Basel-Stadt**

*Von A. Scherrer, Kulturingenieur, St. Gallen*

Im Sitzungssaal des Kunstmuseums von Basel versammelten sich am Nachmittag des 14. September die Vertreter der Amtsstellen für das Meliorationswesen. Konferenzpräsident Braschler, St. Gallen, eröffnete die Tagung mit einem besonderen Dank an die Regierung des Kantons Basel-Stadt, dabei auch an die Leistungen dieses Standes während des Kriegsmehranbauprogramms erinnernd. Eine Tagung in der mehr als zweitausendjährigen Stadt an der Dreiländerecke ist für die Kulturingenieure eine Ehre.

Spezieller Gruß galt den Herren Vermessungsdirektor Häberlin, Sektionschef Ingenieur Bleuer von der Eidgenössischen Landestopographie, Ingenieur Regamey, als Vertreter der Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne, sowie den neuamtierenden Professoren Dr. Grubinger und Ingenieur Tanner von der Eidgenössischen Technischen Hochschule.

Entschuldigungen waren eingegangen von den Herren Direktor Clavadetscher, Eidgenössisches Volkswirtschaftsdepartement, und von Direktor Dr. Ruckli vom Eidgenössischen Amt für Straßen- und Flußbau.