

BEITRÄGE ZUR GEOLOGIE DER SCHWEIZ - HYDROLOGIE	Bd. 28 II	S. 447 - 458	Bern, 1982
---	-----------	--------------	------------

ABFLUSSMESSUNGEN MIT TRACERN NACH DEM VERDÜNNUNGSVERFAHREN

Max Fischer, Ittigen

Landeshydrologie Bern/CH

Abstract: The dilution method for discharge measurement is essentially used in mountain rivers, where the turbulence of the stream does not allow measuring with current meters. This paper includes indications on appropriate tracers and of the equipment required for the measurements.

Furthermore, the questions of the mixing length, the duration of injection and the timing of sampling are also dealt with.

Another chapter describes the measuring procedure in the field and gives some tips for practical application.

1. Allgemeines

Die Verdünnungsmethode wird auch chemische Messmethode genannt, weil oft chemische Produkte verwendet werden. Seit der ersten Veröffentlichung von Schloesing im Jahre 1863 über die Methode wurden grosse Fortschritte erzielt. Die Landeshydrologie führt seit ca. 60 Jahren Verdünnungsmessungen durch. Im Laufe der Zeit konnte das Gewicht der Apparaturen vermindert und die Menge der Markierstoffe reduziert werden, sodass heute bequem Abflussmengen bis zu 100 m³/s gemessen werden können.

Die Abflussmengen in Flüssen und Kanälen mit eindeutig definiertem Querschnittsprofil und relativ ruhiger Strömung werden meistens mit dem hydrometrischen Flügel gemessen. In Bergbächen hingegen, wo sehr turbulente Strömungen vorherrschen und sich kein regelmässiges Profil finden lässt, wird der Abfluss durch die Verdünnungsmessung bestimmt.

2. Prinzip der Messung

Man lässt eine konzentrierte Lösung eines Markierstoffes in das zu messende Gewässer einfliessen. Nach einer gewissen Fliessstrecke, nach der eine vollkommene Durchmischung gewährleistet ist, werden Wasserproben entnommen. Durch den Vergleich zwischen der Konzentration der zugeführten Lösung und derjenigen der entnommenen Wasserproben kann im Labor das Verdünnungsverhältniss bestimmt werden. Dieses Verhältniss ist, wenn gewisse Voraussetzungen erfüllt sind, eine lineare Funktion der Abflussmenge.

$$Q = K \cdot \frac{C_1}{C_2}$$

Q = Abflussmenge

C_1 = Konzentration des zugegebenen Tracers (Initiallösung)

C_2 = Konzentration der verdünnten Wasserproben

K = Koeffizient, welcher von der Messmethode und vom verwendeten Material abhängt.

3. Messmethoden

Unabhängig vom Tracer werden prinzipiell zwei Messmethoden angewendet:

Die Integrationsmethode,

Methode mit konstanter Einspritzung.

Unser Amt wendet ausschliesslich die Methode mit konstanter Einspritzung an. Sie hat gegenüber der Integrationsmethode den Vorteil, dass sie zuverlässiger ist, da die Durchmischungsverhältnisse bei der Auswertung besser überblickt werden können.

3.1 Integrationsmethode

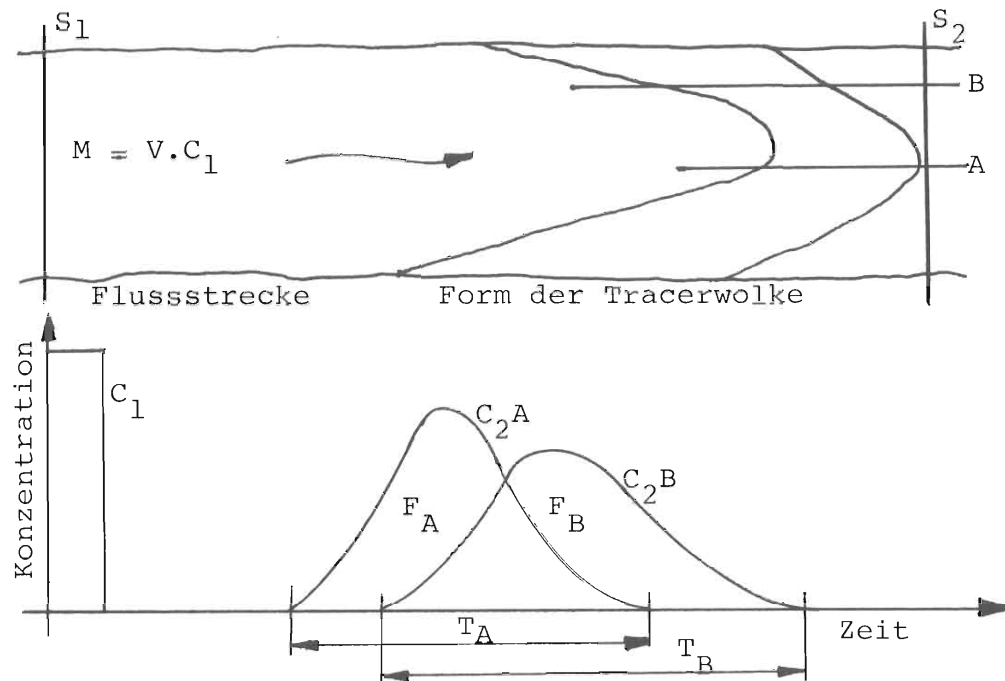
Bei der Integrationsmethode wird dem zu messenden Fliessgewässer ein bestimmtes Volumen einer konzentrierten Markierlösung beigegeben. Nach einer Fliessstrecke, die lang genug ist, um eine gute Mischung zu gewährleisten, werden während dem ganzen Durchgang der Tracerwolke Proben entnommen.

Damit diese Methode angewendet werden darf, sind folgende Vorbedingungen nötig:

- Der Abfluss muss konstant sein.
- Die ganze beigegebene Tracermasse muss bei der Probennahmestelle vorbeifliessen.
- Bei der Entnahmestelle muss der Tracer gut vermischt sein, d.h. an jedem Punkt des Probennahmequerschnittes muss die gleiche Tracermasse vorbeifliessen.

Bei der Integrationsmethode wird keine spezielle Einspritzapparatur benötigt. Das genau bestimmte Volumen von bekannter Konzentration wird auf einmal in das Fliessgewässer geschüttet. Für die Probennahme wird meistens eine Pumpe verwendet. Durch einen Schlauch, welcher am vorderen Ende mit einem Siebkorb versehen ist, wird von einem Punkt des Entnahmequerschnittes während dem Durchgang der Tracerwolke kontinuierlich Probenwasser geschöpft.

Die Fig. 1 soll zeigen, dass die Proben an jedem Punkt des Entnahmequerschnittes entnommen werden können, da die Flächen F_A und F_B gleich sind.



Figur 1 Konzentration der Tracerwolke in Funktion der Zeit

Es gilt folgende Relation:

$$Q = \frac{V \cdot C_1}{T \cdot C_2}$$

Q = Abflussmenge

V = Eingespritztes Volumen

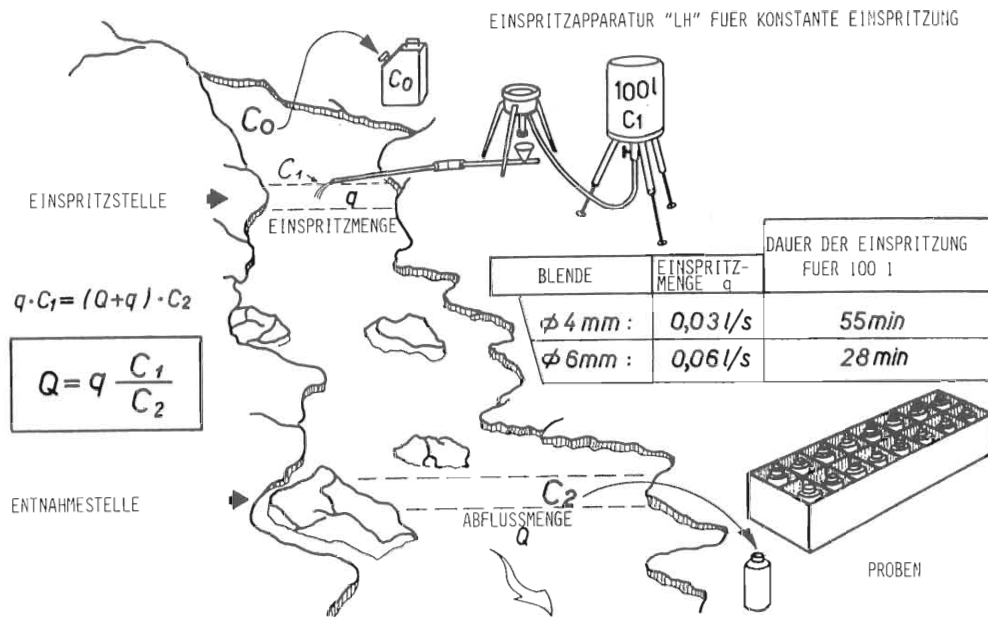
C_1 = Konzentration der Einspritzlösung

C_2 = Konzentration der Proben

T = Zeit während der die Proben entnommen wurden

3.2 Methode mit konstanter Einspritzung

Bei der Methode mit konstanter Einspritzung wird während einer bestimmten Zeit eine genau dosierte Menge der Initiallösung von der Konzentration C_1 eingespritzt. Die Einspritzzeit muss so lange bemessen sein, dass während einer gewissen Zeit eine durch den ganzen Probennahmequerschnitt gleichmässig verdünnte Konzentration C_2 fließt. (Figur 2)



Figur 2 Methode mit konstanter Einspritzung

Wenn man voraussetzt, dass:

- Der Durchfluss Q während der Messung konstant bleibt.
- Der Durchfluss der Tracermenge pro Zeiteinheit im Probenquerschnitt gleich der Einspritzmenge ist, also kein Tracer verloren geht.
- Im Probennahmequerschnitt gute Durchmischung vorhanden ist.

So gilt folgende Formel:

$$Q = q \cdot \frac{C_1}{C_2}$$

Q = Abflussmenge

q = Einspritzmenge

C_1 = Konzentration der Einspritzlösung

C_2 = Tracerkonzentration im Probennahmequerschnitt

4. Tracer

Bis 1960 hat unser Amt Natriumchlorid (Kochsalz) verwendet. Danach wurde das Natriumbichromat aus zwei Gründen eingeführt. Erstens wird beim Natriumbichromat ca. 10 mal weniger Salz benötigt, was besonders wegen dem Transport in Berggegenden von Vorteil ist, und zweitens weil die Analyse im Labor einfacher ist. Das 6-wertige Chrom ist giftig. Obwohl wir in den letzten Jahren die Endkonzentrationen herabsetzen konnten, sodass sie sich an der Grenze der gesetzlich zulässigen Einleitungsbedingungen bewegen, haben wir vor kurzem auf Amidorhodamin umgestellt. Dabei hat sich die benötigte Tracermenge gegenüber dem Natriumbichromat nochmals um den Faktor 100 verringert.

Es ist vorteilhaft, die Tracer schon im Labor als kleine Portionen in wasserdichten Säckchen abzufüllen, da sonst bei starkem Wind oder Regen die Gefahr besteht, dass auch die Operateure koloriert werden. Um eine Angabe über die nötige Tracermenge zu machen, kann gesagt werden, dass mit unserer Einspritzapparat pro m^3/s zu messenden Abflussmenge folgende Tracermengen benötigt werden:

Natriumchlorid	10 kg
Natriumbichromat	1 kg
Amidorhodamin	10 g

Ein Tracer sollte hauptsächlich folgende Eigenschaften haben:

- Gute Löslichkeit im Wasser,
- Eine gute chemische Stabilität in verschmutztem Wasser,
- Kein Vorkommen im natürlichen Wasser,
- Tiefer Preis,
- Ungiftig für Mensch und Tier bei den vorkommenden Konzentrationen,
- Einfache Analyse.

Die genaue Bezeichnung des Tracers, den wir verwenden heisst: "Amido-Rhodamin G extra DP AI 305 von Hoechst". Der Nachteil

dieses Tracers liegt in seiner geringen Löslichkeit. Sie beträgt im kalten Wasser ca. 3 g / l. Wird der Einspritzlösung mehr Amidorhodamin beigegeben, so bleibt ein Teil in Suspension und löst sich erst im Bach vollständig. In einem solchen Fall ist es unumgänglich, dass im Vorratsbehälter während dem Einspritzvorgang dauernd gerührt wird, damit sich das Amidorhodamin nicht absetzt. Ansonst besteht die Gefahr, dass dem Bach eine zeitlich nicht konstante Konzentration zugeführt wird.

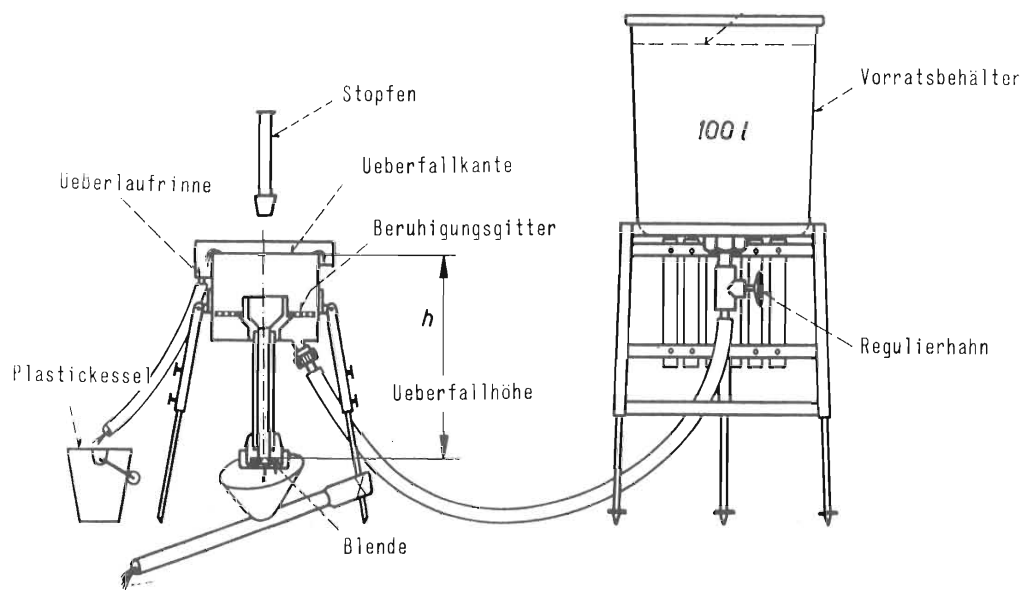
Es wird eine Endlösung von 3 $\mu\text{g/l}$ angestrebt. Die Nachweisgrenze ist um den Faktor 100 geringer.

5. Die Einspritzapparaturen

5.1 Einspritzapparat mit Ueberlaufgefäß

Mit der Einspritzapparat (Fig. 3) wird eine zeitlich konstante Tracermenge dem zu messenden Gewässer zugeführt. Sie besteht zur Hauptsache aus dem Vorratsbehälter für die Initiallösung und dem Ueberlaufgefäß. Um das Gewicht niedrig zu halten wurde die Apparatur aus Kunststoff angefertigt, nur das Traggestell, das Dreibein des Ueberlaufgefäßes und die Blende sind aus Metall.

Bei dieser Einspritzapparat spielt die Eichung der Blende eine wichtige Rolle.



Figur 3 Einspritzapparat

Blendeneichung

Der Durchfluss durch die Blende ist von der kinematischen Viskosität abhängig. Diese wird von der Konzentration und von der Temperatur beeinflusst. Im Gegensatz zur Natriumchloridlösung, bei der die Konzentration eine grosse Rolle spielt, fällt beim Natriumbichromat und beim Amidorhodamin praktische nur die Temperatur ins Gewicht. Wir verwenden zwei Blendengrössen 4 und 6 mm Ø. Um nicht alle Blenden eichen zu müssen, wird der Durchlass nach folgender Formel berechnet:

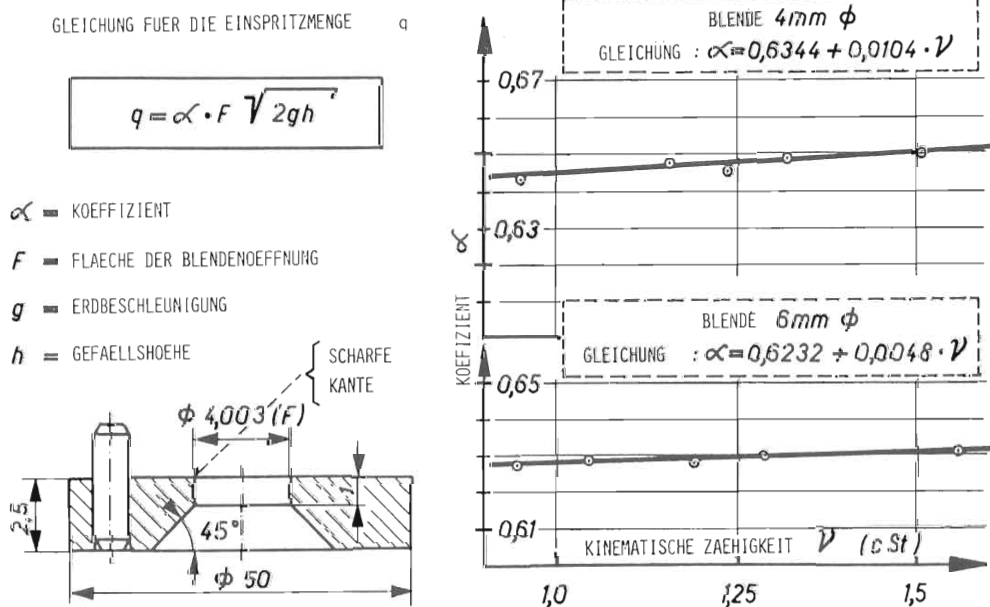
$$q = \alpha \cdot F \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

F = Die Fläche der Blendenöffnung. Der Durchmesser wird durch das Bundesamt für Messwesen auf 1/1'000 mm genau gemessen.

h = Fallhöhe von der Ueberfallkante bis zur Blende.

α = Ein experimentell bestimmter Faktor, mit welchem die Kontraktion korrigiert wird und welcher von der kinematischen Zähigkeit abhängt.

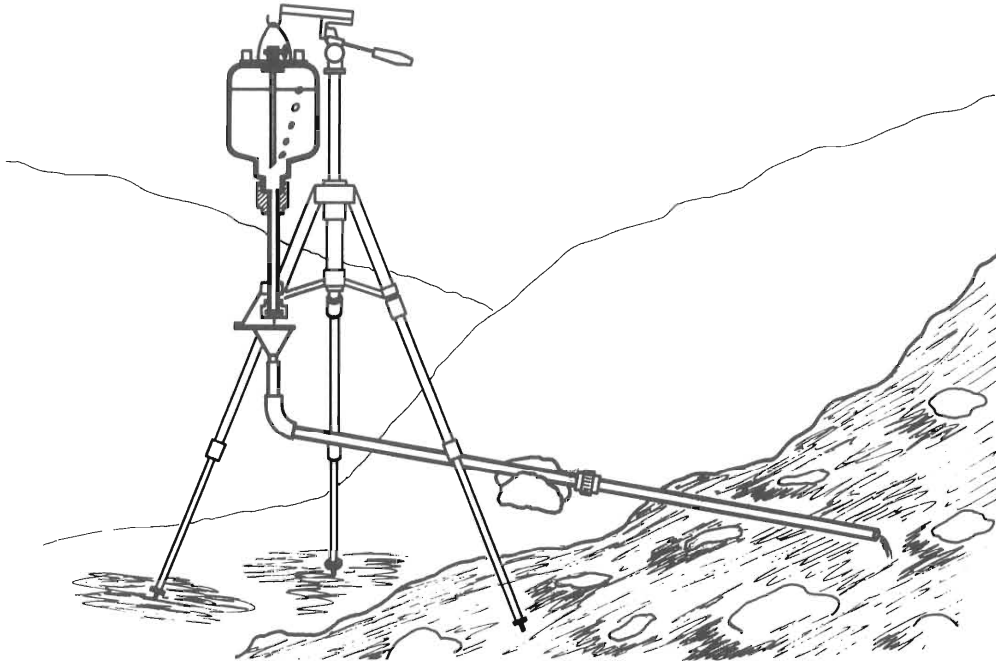
g = Erdbeschleunigung.



Figur 4 Angaben über die Blendeneichung

5.2 Die Mariott'sche Flasche

Im dicht verschlossenen Gefäß entsteht beim Oeffnen des Ausflusses ein Unterdruck, der solange zunimmt bis durch das Luftzuführungsrohr Luft einperlt. Ab diesem Moment bleibt der Ausfluss konstant, bis der Spiegel das untere Ende des Luftzuführungsrohres erreicht. Die Apparatur ist einfach und eignet sich vor allem für die Bestimmung kleiner Abflussmengen.



Figur 5 Mariott'sche Flasche

6. Die Messung

6.1 Allgemeines

In unserem Amte dienen die Verdünnungsmessungen in den meisten Fällen für die Kontrolle der P-Q-Beziehung. Die Vermischungsverhältnisse, die günstigen Einspritz- und Entnahmestellen sind meistens bekannt, sodass dessen Wahl kaum Probleme stellt.

6.2 Die Wahl einer neuen Messstelle

Bei der Wahl einer neuen Messstelle hingegen muss vorerst die Mischstrecke gewählt werden. Man nimmt an, dass eine Mischung dann gut ist, wenn die Konzentrationen der einzelnen Proben, bei konstantem Pegel, nicht mehr als 1 % variieren.

6.3 Berechnung der Mischstrecke

Für die Berechnung der Mischstrecken gibt es verschiedene Formeln, die aber nicht immer zuverlässig sind.

1. Formel von Hull

$$L = a \cdot Q^{1/3}$$

L = Minimale Flusslänge für eine gute Durchmischung

Q = Abflussmenge

a = Koeffizient 50 wenn die Einspritzung in der Mitte,
200 wenn sie am Ufer erfolgt

2. Formel von Rimar

$$L = 0.13 \cdot k \cdot \frac{b^2}{d}$$

L = Mischstrecke

b = Flussbreite

d = Flusstiefe

k = Koeffizient = $\frac{C}{(0.7 \cdot C + 6)}$ wobei $15 < C < 50$

g = Erdbeschleunigung

3. Formel von Pérez

$$L = 9.5 \cdot n \cdot d$$

n = $0.32 \cdot K \cdot R^{1/6}$

K = Koeffizient nach Strickler

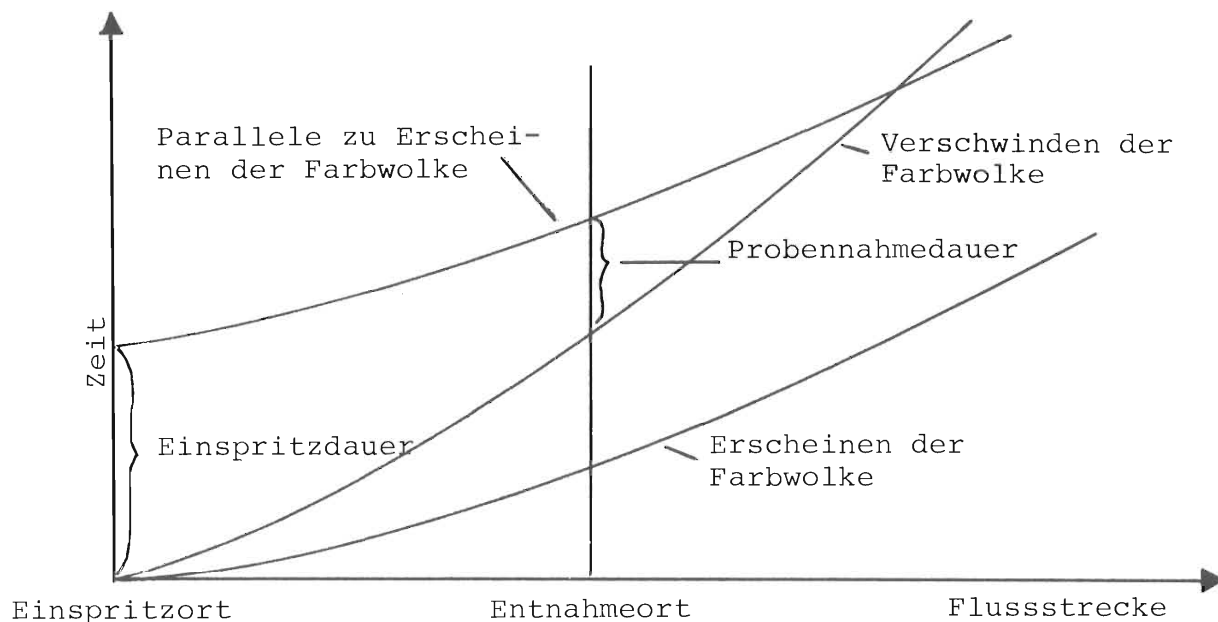
R = hydraulischer Radius

d = Tiefe

6.4 Färbversuch

Da der Tracer bei der Messung im Probenquerschnitt meistens von Auge nicht erkennbar ist, kann an unbekannten Messstellen vorgängig ein Färbversuch für die Abklärung der Vermischungsverhältnisse durchgeführt werden. Dabei wird in den meisten Fällen Fluorescein, aber auch Fuchsin oder Methylenblau verwendet. Der Färbversuch dient für die Bestimmung der Fliessgeschwindigkeit und der Zeit, in welcher die Proben entnommen werden sollen.

Stellt man den zeitlichen Verlauf des Erscheinens und des Verschwindens der Farbwolke bei der Entnahmestelle in Funktion der Flussstrecke dar, so kann aus dem Diagramm (Fig 6) die zulässige Entnahmezeit abgelesen werden.



Figur 6 Diagramm für die Bestimmung der Probennahmedauer

In der Praxis wird von erfahrenen Leuten sehr selten ein Färbversuch durchgeführt. Es ist weniger aufwendig, anstatt des Färbversuches, eine viel längere Zeit einzuspritzen und mehr Proben zu entnehmen als unbedingt nötig.

6.5 Messprobleme

Zuflüsse

Ein Zufluss innerhalb der Messstrecke stört dann nicht, wenn bei der Probennahmestelle die Durchmischung gut ist. Dabei wird die Gesamtabflussmenge gemessen. Ist die Durchmischung schon vor dem Zufluss homogen, so können mit einer Einspritzung beide Abflüsse gemessen werden.

Verluste

Hat der zu messende Fluss innerhalb der Messstrecke Verluste, so müssen zwei Fälle unterschieden werden:

1. Wenn die Vermischung schon vor dem Verlust homogen ist, beeinflusst der Verlust das Resultat nicht. Man misst somit die Abflussmenge vor dem Verlust.
2. Stellt sich der Verlust ein bevor eine homogene Vermischung gewährleistet ist, so kann die Messung nicht bewertet werden.

Diese Umstände zeigen, dass die Anwendung der Verdünnungsmethode bei durchlässigen Karstböden Probleme aufwerfen kann und dass eine eingehende Prüfung der Messstrecke nötig ist.

Literaturnachweis

ISO.555-1 - Mesure de débit des liquides dans les chenaux. Méthode de dilution pour la mesure des débits en régime permanent. Première Partie: Méthode d'injection à débit constant.

ISO.555-2 - Mesure de débit des liquides dans les chenaux. Méthode de dilution pour la mesure des débits en régime permanent. Deuxième Partie: Méthode par intégration (injection instantanée).

ANDRE H. (1946) - Hydrométrie pratique des cours d'eau. Tome 1: Jaugeages par la méthode de dilution.