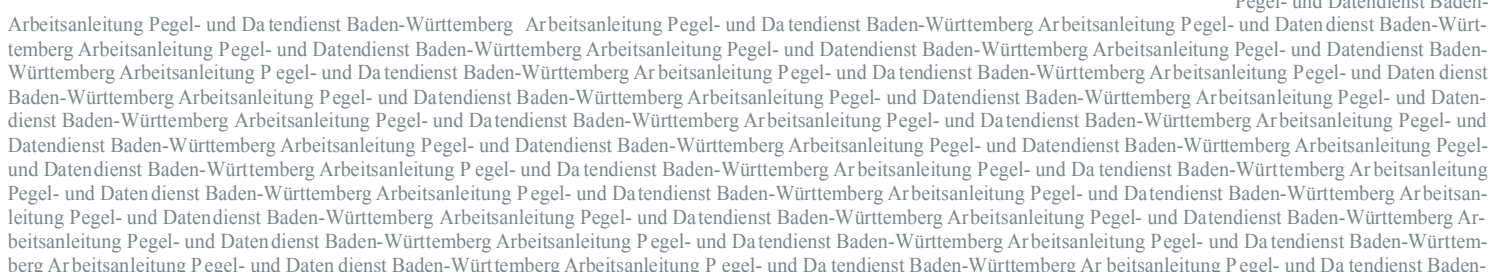


[illegible]

Pegel- und Datendienst Baden-Württemberg
Pegel- und Datendienst Baden-Württemberg
Pegel- und Datendienst Baden-Württemberg
Arbeitsanleitung Pegel- und Datendienst
Arbeitsanleitung Pegel- und Datendienst
Arbeitsanleitung Pegel- und Datendienst
Arbeitsanleitung Pegel- und Datendienst



Stand: Februar 2002

Gedruckt: 25.04.2002

Herausgeber:

Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg
76157 Karlsruhe, Postfach 21 07 52

Bearbeitung:

Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU)
Abteilung 4, Wasser und Altlasten,
und
Karin Grust, Glasgow

Rückfragen

Rückfragen zum Inhalt der Arbeitsanleitung richten Sie bitte an
Herrn Juraschek (Tel.: 0721 / 983 – 1207; E-Mail: Manfred.Juraschek@lfuka.lfu.bwl.de)

Nachdruck oder Vervielfältigung auf DV-Datenträger – auch auszugsweise .- nur mit Zustimmung
des Herausgebers unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.

Inhalt

1	Einführung	1
2	Grundlagen	2
2.1	Messprinzip der Verdünnungsmessung	2
2.2	Durchmischungsvorgänge im Gewässer	3
2.3	Tracer.....	4
2.3.1	Eigenschaften von Tracern	4
2.3.2	Verwendung von NaCl als Tracer zur Durchflussmessung	5
3	Tracereingabe.....	10
3.1	Kontinuierliche Eingabe.....	10
3.2	Momentaneingabe	11
3.2.1	Verfahren	11
3.2.2	Auswertung.....	12
3.2.3	Anwendung in Baden-Württemberg	13
4	Salzverdünnungsmessung mit Momentaneingabe	14
4.1	Wahl der Eingabestelle und der Messstelle	14
4.1.1	Grundsätzliche Kriterien	14
4.1.2	Zuflüsse und Ausleitungen.....	15
4.2	Salz-Eingabemenge	16
4.3	Herstellung der Tracerlösung	16
4.4	Kalibrierung der Leitfähigkeitssonde	17
4.5	Positionierung der Messsonden	19
4.6	Durchführung der Messung	20
4.7	Auswertung der Messung der elektrischen Leitfähigkeit	21
4.8	Ermittlung des Durchflusswertes	24
4.8.1	Mittelung der Messergebnisse der einzelnen Sonden.....	24
4.8.2	Messfehler.....	24
4.8.3	Bewertung des Ergebnisses der Durchflussmessung	25

5	Durchführung von Durchflussmessungen.....	26
5.1	Arbeitsschritte	26
5.2	Vorbereitungen für die Messung.....	26
5.2.1	Messausrüstung	26
5.2.2	Herstellen der Kalibrierlösung	27
5.2.3	Lagern des Salzes	27
5.2.4	Kalibrieren der Leitfähigkeitsmessgeräte.....	27
5.2.5	Abschätzen der Salzmenge.....	30
5.2.6	Herstellen der Tracerlösung	30
5.2.7	Festlegen der Durchmischungsstrecke	31
5.2.8	Positionieren der Sonden im Messquerschnitt	32
5.3	Messen.....	33
5.3.1	Beginn der Messung	33
5.3.2	Beendigung der Messung.....	34
5.4	Erfassen der Daten.....	34
5.5	Auswerten der Messung	35
6	Literatur	37
7	Register	39

Anhang I: Beispiele aus der Praxis	41
1. Messprogramm.....	42
2. Kraichbach / Ubstadt (Messung Nr. 4)	43
3. Weiherbach / Menzingen (Messung 13)	47
4. Brotenaubach / Brotenau (Messung 18)	51

Anhang II: Beispiel einer Durchflussmessausrüstung ..	55
--	-----------

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1:	Messprinzip der Verdünnungsmessung zur Durchflussbestimmung	2
Abbildung 2:	Dispersion in einem Fließgewässer:	3
Abbildung 3:	Funktionaler Zusammenhang zwischen elektrischer Leitfähigkeit und Salzkonzentration bis 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Labortest; Grust, 2000).....	7
Abbildung 4:	Karte der elektrischen Leitfähigkeiten in den Fließgewässern Baden-Württembergs [$\mu\text{S}/\text{cm}$] (LfU, 2000).....	9
Abbildung 5:	Schematische Darstellung des Messprinzips der Salzverdünnungsmethode bei kontinuierlicher Einspeisung des Tracers.....	10
Abbildung 6:	Darstellung einer typischen Messkurve der kontinuierlichen Einspeisung.....	11
Abbildung 7:	Schematische Darstellung des Messprinzips der Salzverdünnungsmethode bei momentaner Einspeisung des Tracers.	12
Abbildung 8:	Darstellung einer typischen Tracerdurchgangskurve der momentanen Einspeisung.....	12
Abbildung 9:	Schematisierter Versuchsaufbau mit Konzentrationsverlauf an der Messstelle	14
Abbildung 10:	Kalibrierung einer Sonde, Eichpunkte und Ausgleichsgerade	18
Abbildung 11:	Richtige Positionierung der Messsonden im Messquerschnitt	20
Abbildung 12:	Ganglinien der Leitfähigkeit.....	23
Abbildung 13:	Geräte und Materialien zur Kalibrierung von Messsonden	28
Abbildung 14:	Bedienung der Präzisionspipette	29
Abbildung 15:	Eingabe von 250 ml Bachwasser in das Kalibriergefäß	29
Abbildung 16:	Messung der Hintergrundleitfähigkeit im Kalibriergefäß.....	29
Abbildung 17:	Eingabe von 500 μl Kalibrierlösung ins Kalibriergefäß	30
Abbildung 18:	Eingabe der zu injizierenden Salzmenge in ein Eingabegefäß.....	31
Abbildung 19:	Anrühren der Salzlösung	31
Abbildung 20:	Leitfähigkeitssonden an Stangen im Gewässer befestigt	33
Abbildung 21:	Leitfähigkeitssonden von einer Brücke hängend.....	33
Abbildung 22:	Leitfähigkeitssonden an einem Ast über dem Gewässer befestigt.....	33
Abbildung 23:	Eingeben der Salzlösung.....	34
Abbildung 24:	Erfassungsprotokoll.....	36

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1:	Eigenschaften von Salztracern	4
Tabelle 2:	Temperaturkoeffizienten natürlicher Wässer bei Leitfähigkeiten zwischen 50 und 1000 (nach WTW-Leitfähigkeitsfibel)	6
Tabelle 3:	Verteilung der Sonden im Querschnitt, Wichtung der Messergebnisse.....	24
Tabelle 4:	Arbeitsschritte bei der Vorbereitung und Durchführung von Salzverdünnungsmessungen.....	26
Tabelle 5:	Abschätzung der Salzmenge und des benötigten Wasservolumens zur Lösung des Salzes (NaCl).	30
Tabelle 6:	Länge der Durchmischungsstrecke in Abhängigkeit von der Gewässerbreite und der Turbulenz	32

1 Einführung

Durchflüsse werden üblicherweise durch Messungen der Fließgeschwindigkeit mit hydrometrischen Flügeln ermittelt (Arbeitsanleitung „Durchflussermittlung mit Messflügeln“). Dieses Verfahren erfordert eindeutig definierte Durchflussquerschnitte, eine gleichgerichtete Strömung in Hauptfließrichtung ohne Querströmungen und größere Turbulenzen sowie eine ausreichende Wassertiefe. In Fällen, in denen diese Voraussetzungen nicht gegeben und keine Möglichkeit zur Gefäßmessungen besteht, erlaubt die Salzverdünnungsmethode die Ermittlung von Durchflüssen mit ausreichender Zuverlässigkeit ohne bauliche Eingriffe in das Gewässer.

Insbesondere bei Messungen der Abflüsse aus Quellen und kleinen Gewässern im Hochgebirge hat sich dieses Verfahren seit langem bewährt. Spencer et al., 1956 (zitiert in Käß, 1992) erwähnen, dass die erste Durchflussmessung mit der Verdünnungsmethode bereits 1893 durch Schlösing mit Ammoniumsulfat durchgeführt wurde und seither mit großem Erfolg bei kleineren Gerinnen und Fließgewässern mit Wildbachcharakter angewendet wird (Karbaum, 1965; Behrens, 1971; Benischke & Harum, 1984 und 1990; Luder & Fritschi, 1990; Rieg & Leibundgut, 1992; Sperafico & Gees, 1994; Gees et al., 1995). Eine detaillierte Darstellung der Möglichkeiten, Tracerverfahren in der Hydrologie einzusetzen, wird in Käß (1992) gegeben.

Markierstoffe (Tracer) wurden in Baden-Württemberg bisher vor allem in der Hydrogeologie eingesetzt, um unterirdische Wege des Wassers nachzuweisen und dessen Fließgeschwindigkeiten sowie Aufenthaltszeiten zu ermitteln. Auch bei Untersuchungen zur Stoffausbreitung in oberirdischen Gewässern fanden Tracer Anwendung. Weniger üblich war hingegen, die Verwendung von Tracern zur Durchflussermittlung in oberirdischen Gewässern. Das hierbei angewandte Verfahren der Verdünnungsmessung wird im Folgenden erläutert.

Das in dieser Anleitung beschriebene Verdünnungsverfahren unter Verwendung von Kochsalz soll in Baden-Württemberg zur Messung von Abflüssen bis 1 m³/s eingesetzt werden. Das Verfahren eignet sich besonders zur Messung kleiner, turbulenter Gewässer bei Niedrigwasser und kann somit speziell dort eingesetzt werden, wo Durchflussmessungen mit dem Messflügel problematisch sind. Wegen seiner guten Eignung soll als Tracer Kochsalz verwendet werden. Die folgende Anleitung behandelt daher nur die Anwendung dieses Stoffes.

In den Kapiteln 2 bis 4 dieser Anleitung werden das Messprinzip der Salzverdünnungsmessung erläutert und die notwendigen Voraussetzungen für die Anwendung dieses Verfahrens beschrieben. Es wird aufgezeigt, wo sich dieses Messverfahren besonders gut einsetzen lässt. Zur Planung und Vorbereitung von Durchflussmessungen wird auf die Arbeitsanleitung „Durchflussermittlung mit Messflügeln“ verwiesen.

Kapitel 5 beschreibt die Durchführung von Salzverdünnungsmessungen und gibt dem Anwender praktische Hinweise und Tipps.

Im Anhang I sind die Ergebnisse von Durchflussmessungen zusammengestellt. Anhang II beschreibt die Handhabung des hierbei verwendeten Gerätes. Neben diesem werden auf dem Markt noch weitere Geräte angeboten. Außerdem besteht die Möglichkeit, handelsübliche Leitfähigkeitsmessgeräte und Datensammler bzw. Laptops für die Messung und Datenauswertung zu verwenden. Mit dieser Beschreibung soll besondere keine Empfehlung für dieses Gerät verbunden sein.

2 Grundlagen

2.1 Messprinzip der Verdünnungsmessung

Das Messprinzip ist in der Abbildung 1 beschrieben.

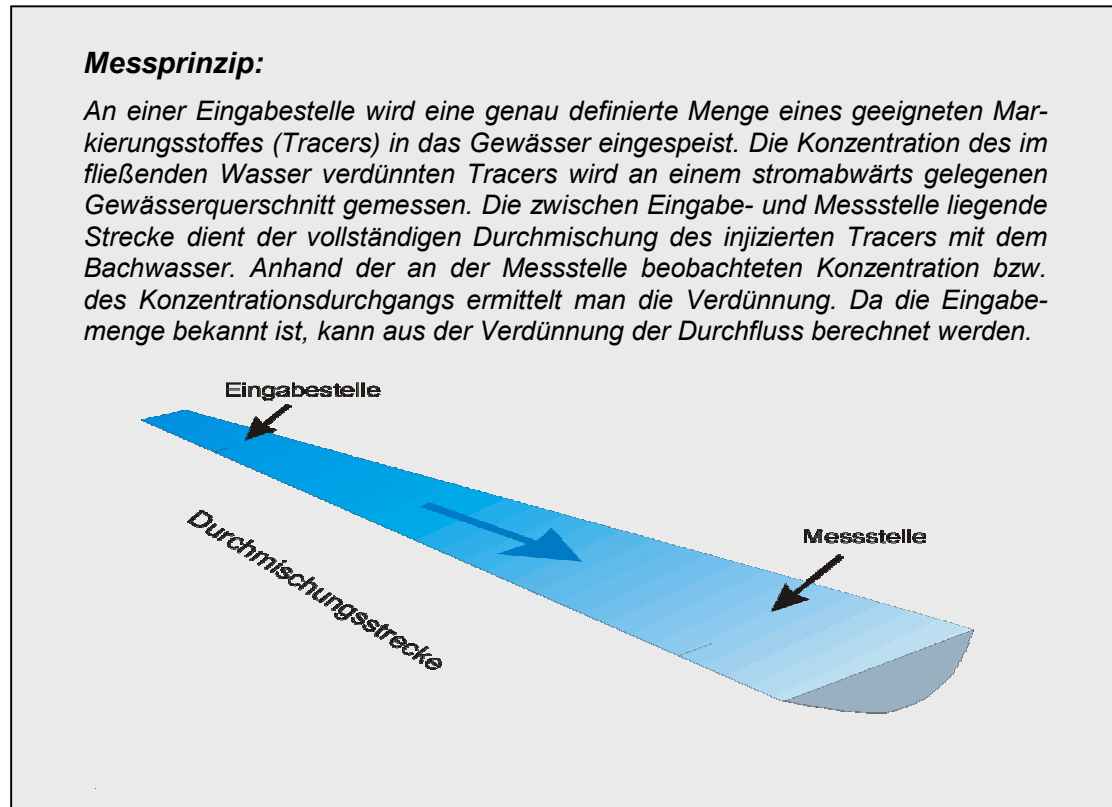


Abbildung 1: Messprinzip der Verdünnungsmessung zur Durchflussbestimmung

Folgende Voraussetzungen müssen erfüllt sein:

- **Massenkonstanz des Markierungsstoffes:**
Die injizierte Stoffmenge darf sich auf der Passage von der Eingabe- zur Messstelle nicht verändern. Zerfällt der Stoff, muss dessen Zerfallsrate bekannt sein.
- **Stationärer Durchfluss:**
Die Größe des Durchflusses sollte sich während der Messung nicht wesentlich ändern. Ermittelt wird der mittlere Durchfluss während der Messung.
- **Vollständige Vermischung des eingegebenen Markierungsstoffes (Tracers) mit dem fließenden Wasser:**
Die mittlere Konzentration des Tracers im Messquerschnitt kann nur dann mit der notwendigen Zuverlässigkeit und Genauigkeit ermittelt werden, wenn der Tracer mit dem fließenden Wasser gut vermischt ist.

2.2 Durchmischungsvorgänge im Gewässer

Wenn ein im Wasser löslicher Stoff in ein Fließgewässer eingegeben wird, breitet sich dieser darin in Form einer Wolke aus. An der Stoffausbreitung sind verschiedene Faktoren beteiligt:

- Der Transport in der fließenden Welle wird als Advektion bezeichnet.
- Die unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten im Gewässer und die Turbulenz des fließenden Wassers bewirken eine Durchmischung (Dispersion) in Fließrichtung (longitudinale Dispersion) und orthogonal hierzu (laterale Dispersion)
- Die molekulare Diffusion (Brown'sche Molekularbewegung) ist bei Fließgewässern gegenüber der oben genannten mechanischen Durchmischung von untergeordneter Bedeutung (Taylor 1953).

Die Dispersion eines gelösten Stoffes nach Einspeisung in ein Fließgewässer ist ein dreidimensionaler Prozess (Abbildung 2). Sobald eine homogene Verteilung der Stoffkonzentration im Fließquerschnitt erreicht ist, findet nur noch transversal-longitudinale Dispersion statt.

Die Größe der Turbulenz des fließenden Wassers ist abhängig von der Rauheit der Gewässersohle, der Gewässer geometrie, dem Gefälle und der Fließgeschwindigkeit. Je turbulenter die Strömung ist, desto heftiger ist die Durchmischung.

Laminares und turbulentes Fließen

Bei laminarer Strömung bewegt sich jedes Wasserteilchen entlang eines speziellen Weges mit einer einheitlichen Geschwindigkeit. Zwischen benachbarten Stromlinien, Schichten oder fließenden Elementen findet kein Austausch (Diffusion) statt, d.h. es ist keine Turbulenz vorhanden" (Baumgartner & Liebscher, 1990). Laminare Fließen ist typisch für die Wasserbewegung in Porengrundwasserleitern.

Die Turbulenz verursacht kleine Geschwindigkeits-Fluktuationen, die zufällig und in alle Richtungen verteilt sind (Baumgartner & Liebscher, 1990). In oberirdischen Fließgewässern herrscht i.a. turbulente Strömung.

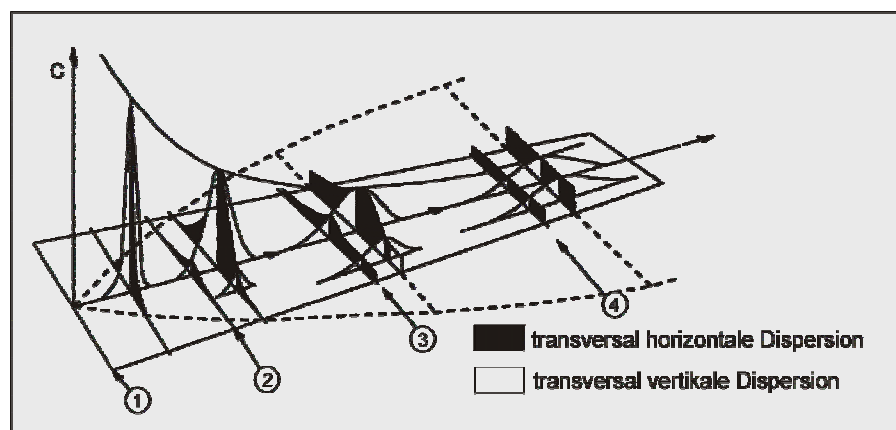


Abbildung 2: Dispersion in einem Fließgewässer:

- 1) Eingabepunkt und Beginn der Dispersion.
- 2) Tracer erreicht das Ufer.
- 3) Transversal-laterale Dispersion wird durch das Ufer begrenzt.
- 4) Transversal-laterale und transversal-longitudinale Dispersion sind beendet (Hubbard et al., 1984, modifiziert). Es herrscht völlige Durchmischung.

Durchmischungsvorgänge können durch Ruhewasserzonen (Retentionsräume, Seitenarme, Überflutungsflächen) erheblich behindert werden. Vom Wasser mitgeführte Stoffe können dort längere Zeit verweilen und dann mit erheblicher Verspätung, möglicherweise in Form einer zweiten Wolke, im Hauptgewässer wieder erscheinen (Kapitel 4.1.1).

2.3 Tracer

2.3.1 Eigenschaften von Tracern

Tracer dienen der Markierung von Wasser zur Ermittlung von Fließwegen und -dauern sowie zur Durchflussmessung. Als Tracer kommen Stoffe in Frage, die den folgenden Anforderungen an einen idealen Tracer nahe kommen.

Eigenschaften eines idealen Tracers (nach Käß, 1992)

- Abwesenheit in natürlichen Gewässern
- Gute quantitative analytische Erfassbarkeit mit niedrigen Nachweisgrenzen
- Unbedenklichkeit für Mensch, Tier und Pflanze
- Gute Wasserlöslichkeit
- Widerstandsfähigkeit gegen chemischen, biologischen oder physikalischen Angriff
- Frei von Sorptions- und Ionenauscheigenschaften
- Wirtschaftlichkeit in der Anschaffung und Verbrauch

Als Tracer für die Durchflussermittlung finden vorwiegend Salze (Tabelle 1) und fluoreszierende Farbstoffe Anwendung. Bei den Fluoreszenzfarbstoffen haben sich in den letzten Jahren pH-unabhängige und lichtstabile Tracer wie Rhodamin WT, Amidorhodamin G und Sulforhodamin B bewährt (Käß, 1992). Daneben kommen auch Uranin oder Eosin zur Anwendung.

Tabelle 1: Eigenschaften von Salztracern

Natriumchlorid (Kochsalz)	Messsonden Leitfähigkeit In-Situ	350 g/l	(+) Einfache Handhabung (+) Einfache Messung (+) Geringe Kosten (-) Teilweise hohe Grundlast der Gewässer (-) Beschränkung auf Abflüsse $\leq 1 \text{ m}^3/\text{s}$
Kaliumchlorid (Kalisalz)	Wasserproben Flammenphotometrie Labor	350 g/l	(+) Einfache Handhabung (+) Geringe Grundlast der Gewässer (+) Geringe Kosten (-) Beschränkung auf Abflüsse $\leq 1 \text{ m}^3/\text{s}$ (-) Hohe Sorptivität (-) Temperaturabhängige Löslichkeit

Der Vorzug von Salz gegenüber Fluoreszenzfarbstoffen liegt in den geringeren Kosten, der leichteren Handhabbarkeit sowie der ökologischen Unbedenklichkeit (Kapitel 2.3.2.3). Insbesondere die Möglichkeit, die Salzkonzentration mit geringem Aufwand und ausreichend genau direkt im Gewässer bestimmen zu können (Kap. 2.3.2.2), spricht für die Verwendung von Salz.

Nachteilig gegenüber Fluoreszenztracern ist die größere Menge, die im Wasser gelöst werden muss. Den großen Unterschied bei den Eingabemengen von Salz- und Fluoreszenztra-

cern zeigt der Vergleich zweier typischer Vertreter dieser Gruppen. Nach Fischer, 1982 (zitiert in Käß, 1992) sind zur Messung eines Durchflusses von $Q=1\text{m}^3/\text{s}$ folgende Tracermengen erforderlich:

- Salztracer Natriumchlorid: 10 kg
- Fluoreszenztracer Amidorhodamin: 0,01 kg

2.3.2 Verwendung von NaCl als Tracer zur Durchflussmessung

2.3.2.1 Eigenschaften von NaCl

Synonym zur chemischen Bezeichnung „Natriumchlorid“ oder „NaCl“ werden vielfach die Begriffe „Speisesalz“, „Kochsalz“, „Steinsalz“ oder einfach nur „Salz“ verwendet. Einige Eigenschaften von Natriumchlorid entsprechen nicht den Anforderungen an einen idealen Tracer: Natürliche Gewässer enthalten NaCl (Kapitel 2.3.2.4), es findet ein Ionenaustausch mit carbonatischem Grundgesteinen statt. Diese beiden Eigenschaften stören allerdings in den meisten Fällen Durchflussmessungen nach dem Salzverdünnungsverfahren nicht.

Nachteilig ist auch die große Salzmenge, die vor der Eingabe im Wasser gelöst werden muss. Die zur Messung eines Durchflusses von $Q=1\text{m}^3/\text{s}$ im Mittel notwendige Menge von 10 kg Salz (Kapitel 4.2) ergibt bei einem Lösungsverhältnis von 1:4 eine Salzwassermenge von 50 kg. Die Schwierigkeit, große Massen zu handhaben und schlagartig in das Gewässer einzugeben, begrenzen die Anwendung in der Praxis auf Durchflüsse bis $Q = 1 \text{ m}^3/\text{s}$. Wenn die Eigenschaften des Gewässers es zulassen, mit geringeren Salzkonzentrationen zu arbeiten (Kapitel 4.2), oder die Eingabe größerer Mengen an Salzlösung keine Probleme bereitet, sind auch höhere Durchflüsse mit diesem Tracer zu messen.

Insgesamt überwiegen jedoch die positiven Eigenschaften von Natriumchlorid:

- Natriumchlorid ist sehr gut in Wasser löslich.
- Es ist preisgünstig überall zu erwerben und problemlos zu lagern und zu handhaben.
- Es ist chemisch, biologisch und physikalisch ausreichend inert.
- In den verwendeten Konzentrationen ist es unbedenklich für Mensch, Tier und Pflanzen (Kapitel 2.3.2.3).
- Es kann über die elektrische Leitfähigkeit direkt im Gewässer mit geringem Aufwand und hinreichender Genauigkeit gemessen werden (Kapitel 2.3.2.2).

2.3.2.2 Messung der elektrischen Leitfähigkeit zur Bestimmung der NaCl-Konzentration im Wasser

Die dissoziierten Ionen (z. B. von Salzen oder anderen Mineralien) im Wasser erhöhen dessen elektrische Leitfähigkeit. Diese Leitfähigkeit kann gemessen und hieraus der Salzgehalt ermittelt werden.

Bei der Leitfähigkeitsmessung wird der elektrische Widerstand $R [\Omega]$ des Wassers zwischen zwei Elektroden bestimmt. Der Kehrwert hiervon ist der elektrische Leitwert $G = 1/R$. Er hat die Einheit Siemens [S]. Da die Größe des Widerstandes von der Leiterlänge l (cm) und dem Leiterquerschnitt F (cm) abhängt, werden die Leitereigenschaften durch den spezifischen Widerstand $\rho = R F / l [\Omega \text{ cm}]$ oder durch die Leitfähigkeit

$$Lf = \frac{1}{R} \cdot \frac{l}{F} \left[\frac{1}{\Omega} \cdot \frac{cm}{cm^2} \right] \text{ bzw. } [\Omega^{-1} \cdot cm^{-1}] \text{ bzw. } \left[\frac{S}{cm} \right]$$

beschrieben. Dabei sind:

F	=	Fläche der Elektroden [cm ²]
l	=	Elektrodenabstand [cm]
Lf	=	elektrische Leitfähigkeit [S/cm]
R	=	Widerstand [Ω]

Der Widerstand eines Leiters und damit auch die Leitfähigkeit des Wassers sind temperaturabhängig. Angaben zur Leitfähigkeit sind üblicherweise auf eine Temperatur des Leiters von $\delta = 25^\circ\text{C}$ bezogen. Tabelle 2 zeigt, dass der Einfluss der Temperatur auf die Leitfähigkeit mit steigender Temperatur zunimmt; unter 10°C liegt der Temperaturkoeffizient $\alpha = Lf_\delta / Lf_{25}$ ($100\% / Lf_{25}$) unter 2 %/K, oberhalb 10°C darüber. Die Messgeräte besitzen üblicherweise eine Temperaturkompensation. Zur Überprüfung wird das Wasser bei verschiedenen Temperaturen gemessen, die Messergebnisse dürfen nicht von einander abweichen. Da die Wassertemperatur bei der Kalibrierung und im Gewässer unterschiedlich sein kann, dürfen nur Messgeräte mit Temperaturkompensation verwendet werden.

Auch die Kabel und elektronischen Bauteile ändern ihre Leitfähigkeit mit der Temperatur. Zudem kann es zu trendhaften Veränderungen mit der Zeit kommen. Daher ist stets die gesamte Messkette zu kalibrieren (Kapitel 4.4). Ablagerungen auf den Elektroden können den Widerstand bei den Elektroden verändern. Werden derartige Veränderungen bei der Kalibrierung festgestellt, sind die Elektroden mit verdünnter Salzsäure zu reinigen und anschließend mehrmals in destilliertem Wasser zu reinigen und erneut zu kalibrieren.

Tabelle 2: Temperaturkoeffizienten natürlicher Wässer bei Leitfähigkeiten zwischen 50 und 1000 (nach WTW-Leitfähigkeitsfibel)

Temperatur δ [°C]	Referenztemperatur 25°C	
	Lf_δ / Lf_{25} [-]	$\alpha = Lf_\delta / Lf_{25}$ ($100\% / Lf_{25}$) [%/K]
0	0,521	1,91
5	0,619	1,96
10	0,700	2,00
15	0,796	2,04
20	0,896	2,09
25	1,000	2,10
30	1,11	2,14
35	1,22	2,17

Der funktionale Zusammenhang zwischen der elektrischen Leitfähigkeit und der Salzkonzentration wird durch eine Eichbeziehung ermittelt. Bis $2000 \mu\text{S/cm}$ besteht zwischen elektrischer Leitfähigkeit und Salzkonzentration eine annähernd lineare Beziehung ($R^2 = 0,99$; $n = 140$) (Abbildung 3), noch besser ist die Linearität unterhalb $1000 \mu\text{S/cm}$. Innerhalb des engen Bereiches, in dem sich die Messwerte bei einer Messung bewegen, kann bei der Auswertung mit hoher Genauigkeit von einem linearen Zusammenhang ausgegangen werden.

Anhand der Eichbeziehung werden aus den Leitfähigkeitswerten die entsprechenden Werte der Salzkonzentration ermittelt. Damit ist es möglich, bereits an der Messstelle die Messung auszuwerten und den Durchfluss zu bestimmen.

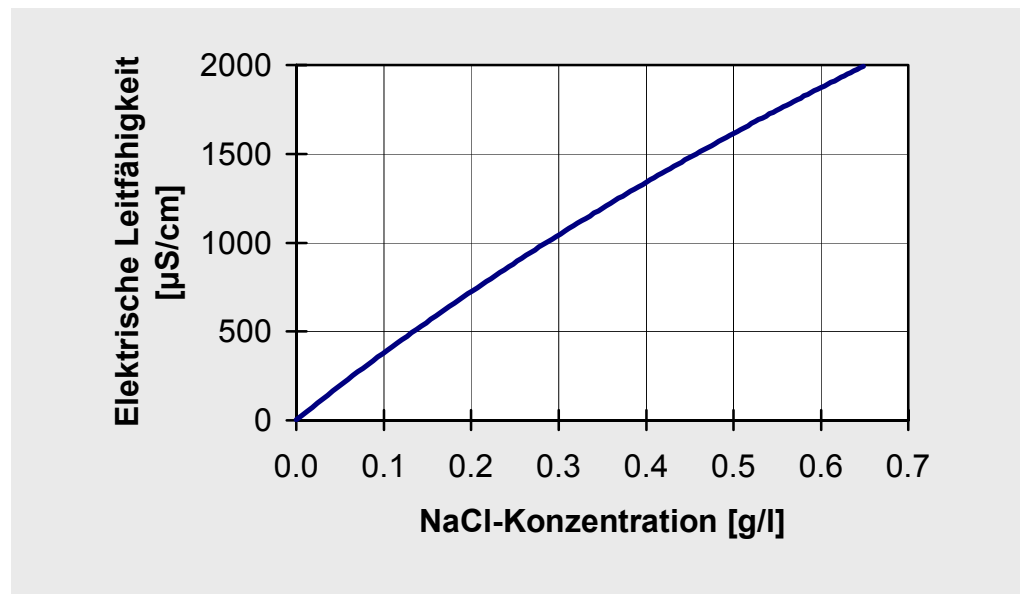


Abbildung 3: Funktionaler Zusammenhang zwischen elektrischer Leitfähigkeit und Salzkonzentration bis 2000 µS/cm (Labortest; Grust, 2000)

2.3.2.3 Ökologische und wasserrechtliche Beurteilung

Die Eingabe von Kochsalz in der für Durchflussmessungen notwendigen Menge (Kapitel 4.2) ist aus ökologischer Sicht unkritisch. Dessen ungeachtet handelt es sich um den wasserrechtlichen Tatbestand des Einbringens/Einleitens von Stoffen in ein oberirdisches Gewässer (§ 3 Abs. 1 Nr. 4 WHG). Da diese Benutzung nur vorübergehend und sehr kurzzeitig ist, kann ein vereinfachtes Verfahren nach § 108 Abs. 4 Nr. 4 WG durchgeführt werden.

Da der Zeitpunkt der Messung nicht genau vorher bestimmt werden kann, sind die potenziellen Mess- bzw. Eingabestellen sowie die Messanordnung und –durchführung (vorliegende Arbeitsanleitung) bereits im Vorfeld den berührten Dienststellen (Fischereisachverständiger beim Regierungspräsidium, Wasserbehörde und Gewässerunterhaltungspflichtiger) mitzuteilen und mit diesen abzustimmen. So kann erreicht werden, dass die Durchführung der Messung bei gegebener Abflusssituation umgehend möglich ist. Auf Wunsch eines Beteiligten wird diesem der genaue Messzeitpunkt dann kurzfristig mitgeteilt.

2.3.2.4 Eignung der Fließgewässer Baden-Württembergs

In den Fließgewässern sind in unterschiedlicher Menge Alkalien, Erdalkalien, Carbonate, Hydrogencarbonate, Sulfate, Chloride, Nitrate gelöst. Ursache hierfür sind die geologischen Gegebenheiten und anthropogene Einflüsse. In Abhängigkeit von Temperatur und pH-Wert beeinflussen diese gelösten Stoffe die elektrische Leitfähigkeit des Wassers. In natürlichen Gewässern werden elektrische Leitfähigkeiten von $L_f < 20 \mu\text{S/cm}$ (z. B. Gletscherabflüsse) und $> 1000 \mu\text{S/cm}$ (z. B. Abflüsse in Gebieten mit Lössablagerungen) gemessen.

Auch die Gewässer Baden-Württembergs weisen derartige Unterschiede in der elektrischen Leitfähigkeit auf (Abbildung 4). Relativ geringe Grundleitfähigkeiten ($L_f \leq 250 \mu\text{S/cm}$) finden

sich in Gebieten, in denen Tiefengesteine (z. B. Granit), kristalline Schiefer (z. B. Gneis) und Buntsandstein anstehen (Schwarzwald, Odenwald). Derartig geringe elektrische Leitfähigkeiten bieten ideale Voraussetzungen für die Anwendung des Salzverdünnungsverfahrens.

Eine mittlere Grundlast von 250 – 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$ weisen die Gewässer der Schwäbischen Alb (Kalksteine, Mergel) auf. Ähnliche Leitfähigkeiten herrschen in den Gewässern des südlichen Donaueinzugsgebiets sowie in den Bodenseezuflüssen vor. In dieser oberschwäbischen Moränen- und Schotterlandschaft sind Ablagerungen der letzten Eiszeit für die Mineralisierung der Gewässer verantwortlich (Liedtke & Marcinek, 1995).

Die höchsten elektrischen Leitfähigkeiten in Baden-Württemberg weisen die Gewässer im Kraichgau (Lössablagerungen) sowie die Gewässer im Kocher-, Jagst- und Taubereinzugsgebiet (Muschelkalk- und Keuperlandschaften) auf. Hier sind Durchflussmessungen mit dem Salzverdünnungsverfahren zwar ebenfalls möglich, jedoch erfordern sie höhere Salzeingabemengen (Kapitel 4.2).

Die Salzverdünnungsmethode zur Durchflussermittlung wurde bisher vor allem in Gebirgsbächen eingesetzt. Diese zeichnen sich aufgrund ihres starken Gefälles und großer Sohlrauigkeit durch sehr hohe Turbulenz aus, so dass sich der eingegebene Tracer schnell über den Gewässerquerschnitt verteilt. Ideale Voraussetzungen bieten auch unter diesem Aspekt die Gewässer im Schwarzwald und im Odenwald. Aber auch die Gewässer in den anderen Mittelgebirgen und Hügellandschaften Baden-Württembergs sind ausreichend turbulent.

Einige Gewässer, z.B. in der Oberrheinebene, weisen hingegen ein sehr geringeres Gefälle und einen kanalartigen Gewässerverlauf auf. Ihre geringe Turbulenz führt erst nach sehr langer Fließstrecke zu einer hinlänglichen Durchmischung. Gleichzeitig kommt es auf dem langen Fließweg zu einer starken Verteilung des Tracers längs des Gewässers, wodurch sich die Tracerwelle stark abflacht. Eine Anwendung des Verfahrens ist dann nur noch bei erhöhter Tracereingabe möglich (Kapitel 4.2).

Bei der Verwendung von Salz müssen folgende Voraussetzungen zusätzlich zu den in Kapitel 2.1 genannten erfüllt sein:

- **Konstanz der Grundleitfähigkeit:**
Keine , bzw. höchstens geringfügige (Kapitel 4.6 und 4.7) Änderung der elektrischen Leitfähigkeit im Gewässer (Hintergrundleitfähigkeit) während der Messung (z. B. Einleitungen aus Kläranlagen, Streusalz- oder Gülleabschwemmungen, Starkregen).
- **Eignung der Leitfähigkeits-Messsonde:**
Erforderlich sind schnell reagierende, langzeitstabile Messsonden mit geringer Messunsicherheit (Kapitel 2.3.2.2).

Das Salzverdünnungsverfahren ist in Baden-Württemberg somit besonders gut geeignet zur Durchflussermittlung bei Niedrig- und Mittelwasser in kleineren, schnell fließenden, anthropogen nicht verunreinigten Gewässern des Schwarzwaldes, des Odenwaldes, der Schwäbischen Alb und, bei ausreichend turbulenter Strömung, auch Oberschwabens. Problematisch ist der Einsatz des Verfahrens

- bei Durchflüssen $Q > 1 \text{ m}^3/\text{s}$,
- bei fehlenden Voraussetzungen für eine Durchmischung,
- bei hoher Grundbelastungen des Gewässers, d.h. bei $L_f > 1\,000 \text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$ und
- unterhalb von Einleitungen mit wechselnder elektrischer Leitfähigkeit.

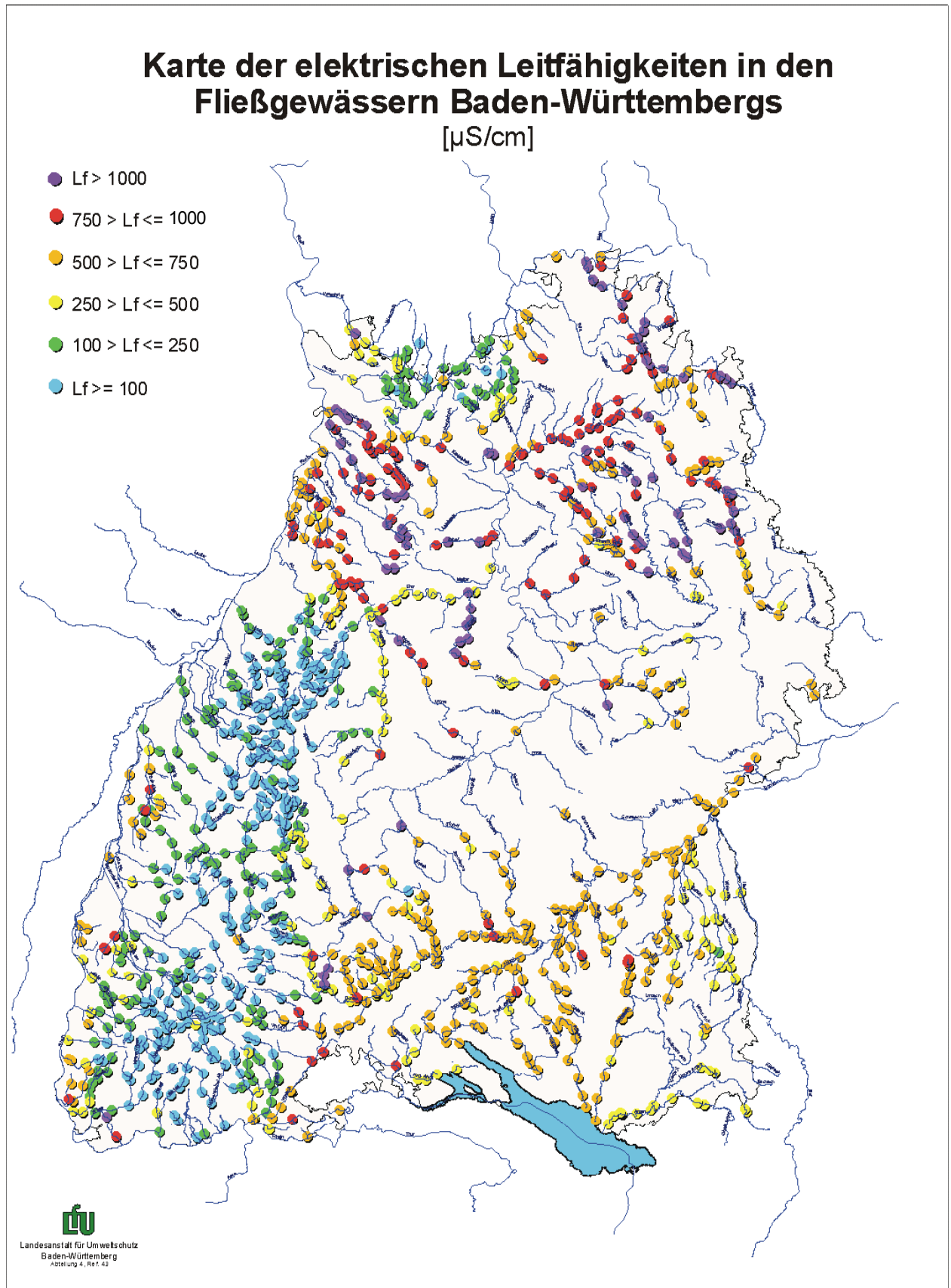


Abbildung 4: Karte der elektrischen Leitfähigkeiten in den Fließgewässern Baden-Württembergs [$\mu\text{S}/\text{cm}$] (LfU, 2000).

3 Tracereingabe

3.1 Kontinuierliche Eingabe.

Die Eingabe des Tracers erfolgt bei der kontinuierlichen Eingabe gleichbleibend über eine hinreichend lange Zeitspanne (Abbildung 5). An der Messstelle misst man zu Beginn die natürliche Leitfähigkeit des Gewässers (Hintergrundleitfähigkeit). Als Folge der Salzeingabe steigt die Leitfähigkeit an, bis sich nach einiger Zeit ein gleichbleibend erhöhter Wert (Plateauwert) einstellt (Abbildung 6). Aus der Verhältnis zwischen Salzeinleitung und Konzentrationserhöhung (Plateauwert abzüglich Hintergrundwert) kann der Durchfluss errechnet werden.

Um die Einleitung exakt konstant zu halten, werden zur Tracereingabe eine Mariott'sche Flasche oder eine Dosierpumpe eingesetzt. Bei Verwendung einer Mariott'schen Flasche ist vor jeder Eingabe eine Justierung des Systems erforderlich. Der Durchfluss durch die Blende, mit der die Einspeisung der Konzentrationslösung aus der Mariott'schen Flasche dosiert wird, ist abhängig von der kinematischen Zähigkeit. Diese wiederum hängt von der Konzentration und der Temperatur der Markiermittellösung ab. Hochkonzentrierte Salzlösungen, ungünstige Außentemperaturen oder Verunreinigungen von Tracer oder Lösungswasser können sich auf die Größe des Durchflusses auswirken. Die Justierung der Mariott'schen Flasche muss daher sehr sorgfältig erfolgen und ist entsprechend zeitraubend.

Die konstante Tracereingabe muss so lange anhalten, bis an der Messstelle die Tracerkonzentration einen eindeutigen Plateauwert erreicht. Vom Schweizer Bundesamt für Umweltschutz, Landeshydrologie (1982) wird als Richtwert für die Dauer der Einspeisung etwa eine Stunde angegeben. Die Tracerkonzentration an der Messstelle wird so lange registriert, bis sich dort ein gleichbleibender Wert eingestellt hat.

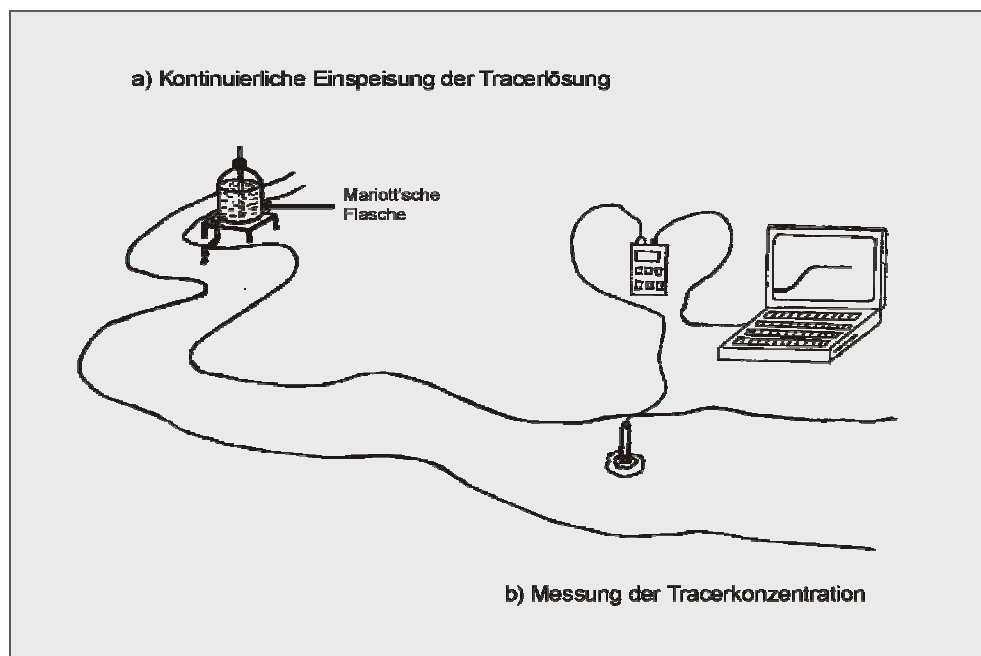


Abbildung 5: Schematische Darstellung des Messprinzips der Salzverdünnungsmethode bei kontinuierlicher Einspeisung des Tracers.

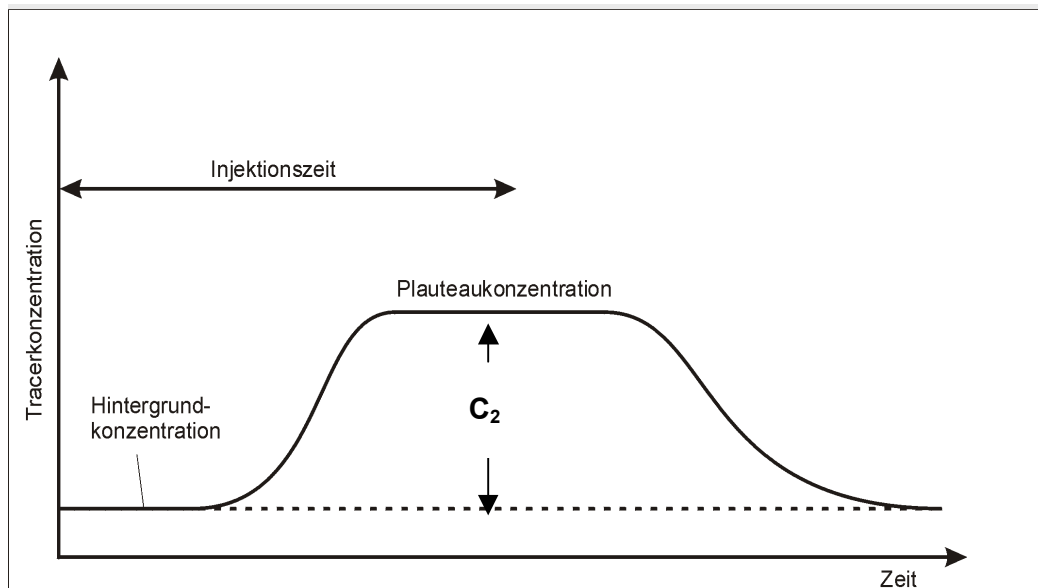


Abbildung 6: Darstellung einer typischen Messkurve der kontinuierlichen Einspeisung.

Der Durchflusses wird nach folgender Formel ermittelt:

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

Q = Durchfluss [l/s]

q = Zuflussrate der Eingabelösung [l/s]

C_1 = Konzentration der Eingabelösung [mg/l]

C_2 = Konzentrationserhöhung (Plateaukonzentration abzüglich Hintergrundkonzentration, Abbildung 6) [mg/l]

3.2 Momentaneingabe

3.2.1 Verfahren

Im Unterschied zur kontinuierlichen Eingabe wird bei der Momentaneingabe die gesamte Menge des Tracers, der zuvor in Wasser gelöst wurde, auf einmal in den Stromstrich des Gewässers, i.a. in Gewässermitte, eingegeben. An der am Ende der Durchmischungsstrecke gelegenen Messstelle wird der Konzentrationsverlauf des gesamten Tracerdurchgangs registriert. Abbildung 7 zeigt den Versuchsaufbau.

Die typische Tracerdurchgangskurve (Abbildung 8) weist einen asymmetrischen Verlauf auf, mit einem steilen Konzentrationsanstieg, einem flacheren Abfallen und einem abschließenden sehr langsamen Rückgang, bei dem sich die Tracerkonzentration exponentiell dem Hintergrundwert der Konzentration annähert (Tailing). Die Asymmetrie ist besonders ausgeprägt, wenn sich innerhalb der Durchmischungsstrecke Retentionsräume befinden und die Fließgeschwindigkeiten in den Gewässerquerschnitten sehr unterschiedlich sind (Kapitel 4.1.1).

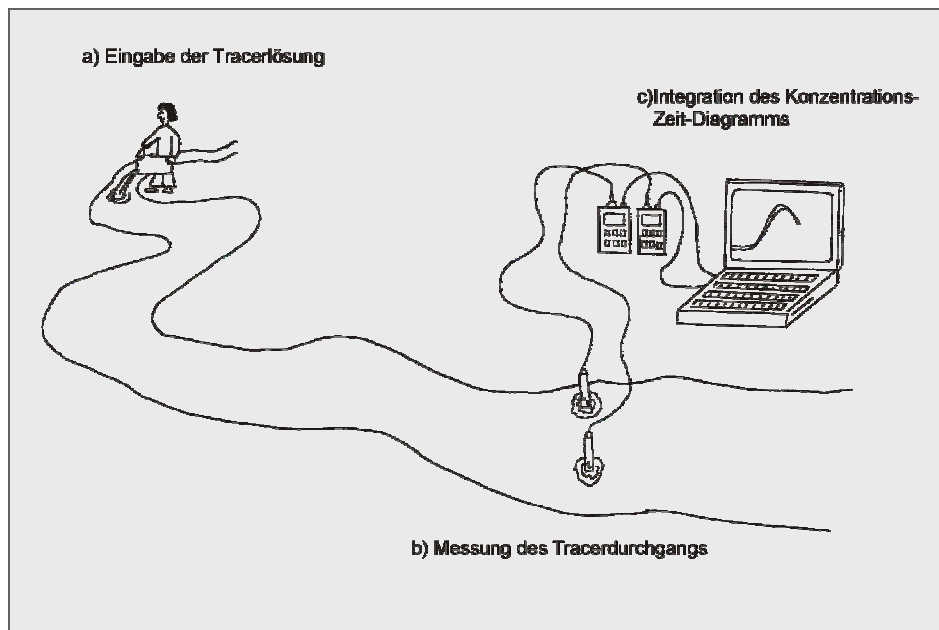


Abbildung 7: Schematische Darstellung des Messprinzips der Salzverdünnungsmethode bei momentaner Einspeisung des Tracers.

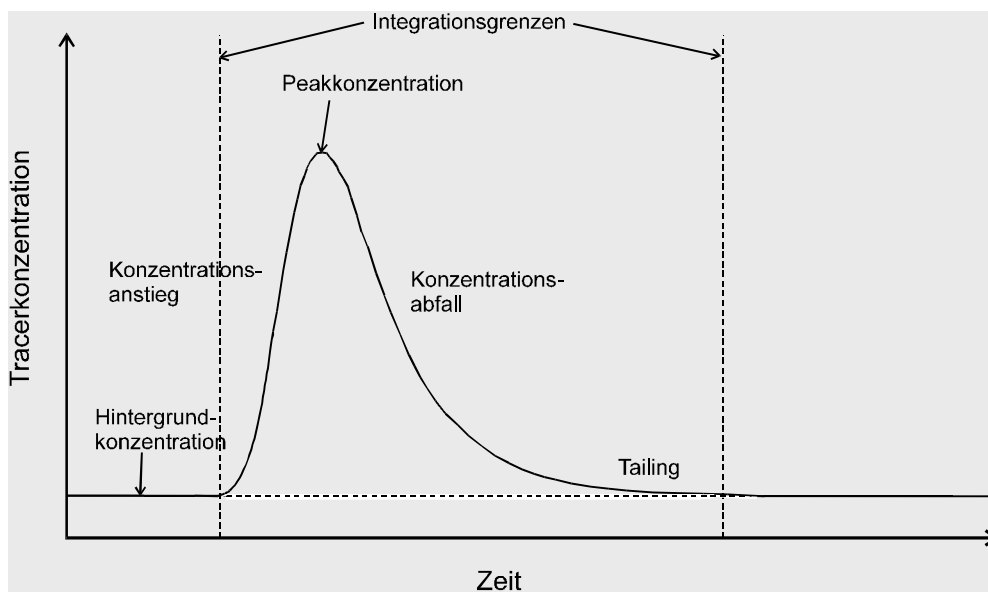


Abbildung 8: Darstellung einer typischen Tracerdurchgangskurve der momentanen Einspeisung

3.2.2 Auswertung

Der mittlere Durchfluss während des Zeitraums von Beginn bis zum Ende des Tracerdurchganges wird aus dem Verhältnis zwischen eingegebener Tracermenge und dem Integral der Konzentrationskurve über dem Wert der Hintergrundkonzentration ermittelt. Deshalb wird als Synonym für diese Methode auch der Begriff "Integrationsverfahren" verwendet. Das Integral kann auf zweierlei Weise bestimmt werden, nach der hydraulischen und nach der numerischen Integrationsmethode.

Bei der hydraulischen Integration wird von Beginn bis Ende des Tracerdurchgangs bei konstanter Entnahme (Dosierpumpe) Bachwasser in ein Gefäß gepumpt. Die Tracerkonzentration, bzw. die elektrische Leitfähigkeit des entnommenen Wassers wird gemessen und hiervon der entsprechende Wert der Hintergrundkonzentration abgezogen. Um sicherzustellen, dass die Entnahme unmittelbar vor dem ersten Auftreten des Tracers beginnt und erst endet, wenn sich wieder der Hintergrundwert eingestellt hat, ist es erforderlich, den Tracerdurchgang durch Messungen zu beobachten. Somit benötigt man den gleichen Messaufwand wie bei der numerischen Integrationsmethode.

Die numerische Auswertung der Messung mit Momentaneingabe erfolgt durch Integration der Tracerdurchgangskurve nach folgender Formel:

$$Q = \frac{M}{\int_{t_0}^{t_E} (c_i - c_0) \cdot dt}$$

Q = mittlerer Durchfluss während des Messzeitraums [l/s]

M = eingegebene Tracermenge [mg]

c_i = Tracerkonzentration der Einzelmessung [mg/l]

c_0 = Hintergrundkonzentration des Wassers [mg/l]

t_0 = Anfangszeitpunkt der Messung

t_E = Endzeitpunkt der Messung

dt = Messintervall [sec]

3.2.3 Anwendung in Baden-Württemberg

Vorteile des Verfahrens der kontinuierlichen Eingabe:

- Veränderungen der Größe des Durchflusses oder der Hintergrundbelastung des Gewässers sind zu erkennen.
- Keine fehlerhaften Resultate infolge "Tailing". Messung kann abgebrochen werden, wenn sich ein stabiles Konzentrationsplateau eingestellt hat.
- Einfache Auswertung, weil der Durchfluss sich direkt aus dem Verhältnis zwischen Traceingabe und Konzentrationserhöhung ergibt.

Vorteile des Verfahrens der Momentaneingabe:

- Einsatz ist überall möglich (Keine Probleme bei der Positionierung der Mariott'schen Flasche oder der Dosierpumpe mit Vorratsbehälter).
- Weniger zeitaufwändige Vorbereitungen (Justierung der Mariott'schen Flasche entfallen).
- Insgesamt geringerer Zeitbedarf für Eingabe und Messung.

Insbesondere der wesentlich geringere Aufwand ist entscheidend dafür, dass in Baden-Württemberg grundsätzlich das Verfahren der Momentaneingabe Anwendung finden soll. Die Auswertung soll nach der numerischen Integrationsmethode erfolgen, für die entsprechende Rechenprogramme verfügbar sind. Im Folgenden wird nur noch dieses Verfahren behandelt.

4 Salzverdünnungsmessung mit Momentaneingabe

4.1 Wahl der Eingabestelle und der Messstelle

4.1.1 Grundsätzliche Kriterien

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 9 dargestellt und in Kapitel 3.2 beschrieben.

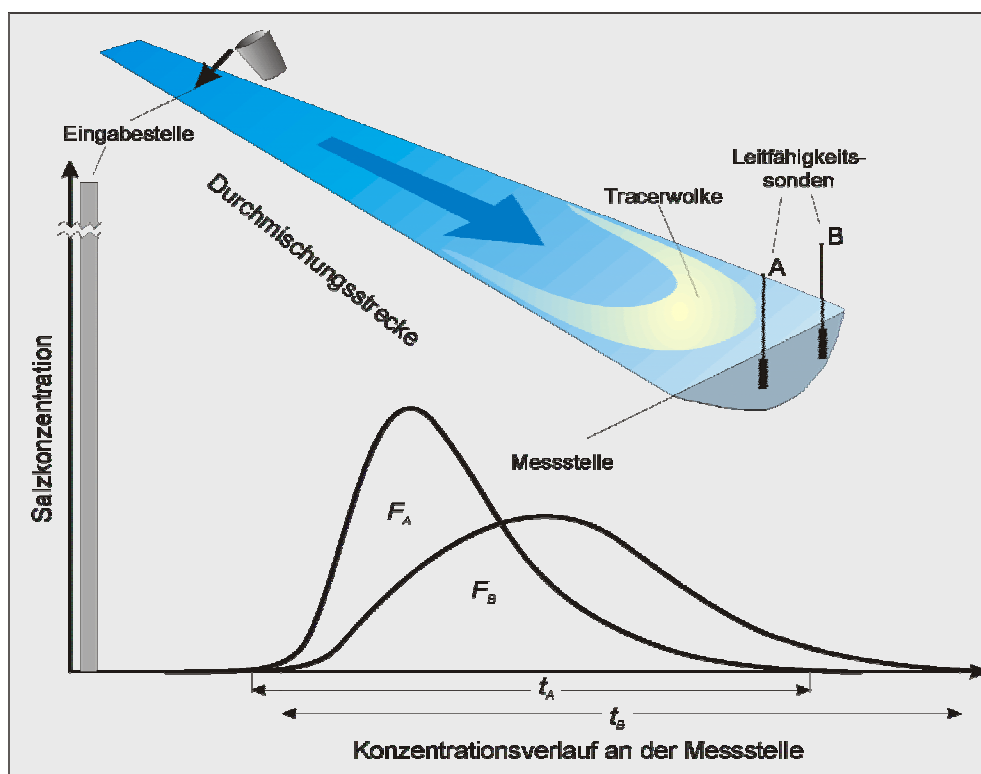


Abbildung 9: Schematisierter Versuchsaufbau mit Konzentrationsverlauf an der Messstelle

Die Auswahl eines geeigneten Gewässerabschnittes ist für die Qualität der Messergebnisse von ausschlaggebender Bedeutung. Vor der Messung muss daher das Gewässer eingehend auf geeignete Durchmischungstrecken untersucht werden. Außerdem sind Eingabe- und Messstellen zu erkunden.

Kriterien für die Festlegung der Durchmischungstrecke sind:

- Günstig sind mäandrierende Gewässerstrecken mit stark wechselnden Querschnittsgrößen und -formen. In geraden Gewässerstrecken mit gleichbleibendem Querschnitt bilden sich dagegen langgezogene Tracerfahnen und auch nach längeren Fließstrecken bleiben die Tracerkonzentrationen im Querschnitt unterschiedlich. Im Uferbereich ist der Tracerdurchgang verzögert, vermindert und abgeflacht (Abbildung 9).
- Grobes Gerölle, in die Strömung hängende Äste, Brückenpfeiler und sonstige punktuelle Abflusshindernisse sowie kleinräumig unterschiedliche Fließgeschwindigkeiten fördern die Durchmischung.

- Wasserkraftanlagen, insbesondere wenn der gesamte Durchfluss durch eine einzige Turbine fließt, bewirken eine hervorragende Durchmischung.
- Retentionsräume, z.B. größere Stillwasserzonen oder Ausuferungsflächen, können Teile des Tracers zurückgehalten. Sie verzögern den Tracerdurchgang an der Messstelle und verursachen ein Abflachen der Kurve mit langem Tailing. Fließt mit Tracer vermischtes Wasser nach längerem Aufenthalt in einem Retentionsraum in das Gewässer zurück, kann dies zu einer mehrgipfeligen Tracerdurchgangskurve führen. Gewässerstrecken mit Retentionsräumen sind daher als Durchmischungsstrecke nicht geeignet.
- Sofern das Gewässer auf der Durchmischungsstrecke Zuflüsse besitzt, muss sichergestellt sein, dass diese sich bis zur Messstelle völlig mit dem Hauptgewässer, in das die Tracereingabe erfolgte, vermischt haben (Kapitel 4.1.2).
- Wasserentnahmen an einer Stelle, wo sich der Tracer noch nicht über den gesamten Querschnitt vermischt hat, verfälschen das Messergebnis (Kapitel 4.1.2).

Die Länge der Durchmischungsstrecke hängt von der Stärke der Turbulenz ab (Kapitel 2.2). Die Faustregel „Durchmischungsstrecke = 50 · Gerinnebreite“ sollte daher nicht ungeprüft Anwendung finden. Bei stark turbulenten Gewässern sind kürzere Durchmischungsstrecken möglich, bei langsam fließenden Gewässern sind längere notwendig. Besteht Unsicherheit über die erforderliche Länge, ist es besser, die Durchmischungsstrecke zu lang als zu kurz zu wählen. Sehr lange Durchmischungsstrecken flachen jedoch die Konzentrationskurve ab. Anfang und Ende der Konzentrationswelle sind dann nur noch unsicher zu erkennen. Entsprechend unsicher ist dann auch die Bestimmung des Integralwertes der Konzentrationsganglinie. In solchen Fällen kann es erforderlich sein, die Tracereingabe zu erhöhen (Kapitel 4.2).

Die Eingabestelle muss die Möglichkeit bieten, den Tracer schnell in den Stromstrich, i.a. die Gewässermitte, einzugeben. Geeignet sind hierfür Brücken oder Stege.

An der Messstelle muss es möglich sein, die Messsonden sicher an den für die Messung maßgebenden Stellen zu positionieren (Kapitel 4.5). Dient die Durchflussmessung dem Aufstellen einer Pegel-Abflusskurve, sollte die Messstelle möglichst beim Pegel liegen, um während der Messung die Pegelwasserstände beobachten zu können. Eingabe- und Messstelle sind im Messprotokoll genau zu beschreiben und erforderlichenfalls zu kartieren.

4.1.2 Zuflüsse und Ausleitungen

Ein Zufluss innerhalb der Durchmischungsstrecke (Einmündende Gewässer, Einleitungen, Grundwasseraustritte) hat keinen störenden Einfluss, wenn dadurch die gleichmäßige Verteilung des Tracers im Messquerschnitt nicht beeinträchtigt wird. Dies bedeutet, dass die Gewässerstrecke zwischen Zufluss und Messstelle für die notwendige Durchmischung ausreichend lang sein muss. Ist eine homogene Durchmischung schon vor dem Zufluss erreicht, kann mit einer Tracereingabe der Gewässerdurchfluss sowohl vor wie nach dem Zufluss gemessen werden. Zu beachten ist, dass die Tracereingabemenge in diesem Fall auf den maximalen Durchfluss abgestimmt sein muss.

Befinden sich auf der Durchmischungsstrecke Ausleitungen oder Entnahmen, so muss zwischen zwei Fällen unterschieden werden:

- Erreichung der homogenen Durchmischung schon vor der Ausleitung
- Erreichung der homogenen Durchmischung erst nach der Ausleitung.

Im ersten Fall ermittelt man die Summe der Durchflüsse der Ausleitung und des Gewässers an der Messstelle. Im zweiten Fall ergeben sich Messfehler. Um festzustellen, welcher der beiden Fälle gegeben ist, muss man im Querschnitt oberhalb der Ausleitungsstelle die Leitfähigkeiten messen. Es ist somit nicht notwendig, zusätzlich noch unterhalb der Ausleitung zu messen.

4.2 Salz-Eingabemenge

Mit der injizierten Salzlösung wird eine Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit vor der Salzeingabe (Hintergrundleitfähigkeit) um 100 bis 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ bzw. um mindestens 20 bis 30 % angestrebt. Zusätzlich muss gewährleistet sein, dass Anfang und Ende der Tracerdurchgangskurve eindeutig bestimmt werden können. Bei flachen Tracerdurchgangskurven mit einem sehr langen Tailing kann die Festlegung des Endpunktes des Tracerdurchgangs Probleme bereiten, insbesondere wenn der Hintergrundwert schwankt. Durch eine Erhöhung der Salzeingabe kann dieses Problem gemildert werden (Kapitel 4.1.1).

Die für die Durchflussmessung benötigte Salzmenge ist in erster Linie abhängig von der Größe des Durchflusses. Zur Messung eines Durchflusses von $Q = 1 \text{ m}^3/\text{s}$ wird i.a. eine Salzmenge von 10 kg benötigt (Fischer, 1982, zitiert in Käß 1992). Bei Gebirgsbächen mit einem sehr geringen Hintergrundwert der Leitfähigkeit, guter Durchmischung infolge hoher Fließgeschwindigkeiten und deshalb kurzer Durchmischungsstrecke kommt man vielfach mit 5 kg Salz pro $1 \text{ m}^3/\text{s}$ Durchfluss aus. Höhere Salzmenge sind dagegen notwendig, wenn lange Fließzeiten und Retentionsräume auf der Durchmischungsstrecke längere Durchmischungsstrecken, notwendig machen (Kapitel 4.1.1).

Die absolute Messunsicherheit sowie die absolute Größe der Messwertschwankungen sind bei hohen natürlichen Leitfähigkeitswerten größer als bei niedrigen Werten. Daher sind auch bei Gewässern mit einer hohen Hintergrundleitfähigkeit (750 - 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) größere Salzeingaben notwendig, damit sich der durch die Salzeingabe hervorgerufene Gang der Leitfähigkeitswerte eindeutig von der Hintergrundleitfähigkeit abhebt. In solchen Fällen kann es notwendig sein, eine um 20 – 50% größere Salzmenge einzugeben.

Lässt sich die Salzeingabemenge schlecht abschätzen, wird geraten, eher eine zu hohe als eine zu niedrige Salzmenge zu verwenden. Werden Messungen wiederholt, sind bei der Festlegung der Salzmenge die Erfahrungen aus früheren Messungen zu berücksichtigen.

4.3 Herstellung der Tracerlösung

Als Tracer geeignet ist jedes herkömmliche Haushaltssalz. Es wird jedoch empfohlen, jodfreies Salz zu verwenden, da der Jodzusatz die Trübung der Lösung erhöht und damit die Kontrolle, ob sich das Salz vollständig gelöst hat, erschwert.

Die für die Durchflussmessung erforderliche Genauigkeit der Salzmenge von $\pm 2 \%$ ist bei der Verwendung der 500 g Verpackungen in der Regel gewährleistet. Eine Kontrollwägung von 40 Packungen hat gezeigt, dass die Einwaage zwischen 500,05 g und 500,12 g Salz lag (Thamm, 1993). Ähnliche Resultate ergaben Kontrollen von Kochsalzpäckchen der Österreichischen Salinen AG (Benischke & Hartum, 1984). Trotzdem empfiehlt es sich, durch Stichproben die Masse der zur Verwendung vorgesehenen Salzpackungen zu überprüfen. Dabei muss jedoch sichergestellt sein, dass das Salz nicht durch Aufnahme von Feuchtigkeit sein Gewicht vergrößert hat (Kapitel 4.4). Wird kein handelsübliches Haushaltssalz verwendet, muss eine sorgfältige Einwaage des trockenen Salzes im Labor vorgenommen werden (vorzugsweise 0,5 bis 5,0 kg portioniert).

Die Tracerlösung wird vor der Versuchsdurchführung in einem ausreichend großen Gefäß mit Bachwasser angerührt. Dabei muss sich das Salz vollständig auflösen. Die Löslichkeit von Salz in einem Liter destilliertem Wasser beträgt maximal 358 g (Schröter et al., 1988). Der Wert ist geringfügig temperaturabhängig. Wegen der Vorbelastung des Bachwassers durch dessen Salzgehalt vor der Einleitungsstelle wird ein Mischungsverhältnis von 1 kg NaCl Salz auf 4 Litern Bachwasser empfohlen.

Feinkörniges Haushaltssalz löst sich bis zur Salzsättigung des Wassers bei gleichmäßigem Rühren in etwa 10 Minuten. Dieser Wert gilt bei einer Wassertemperatur von 14 °C, im warmen Wasser ist der Lösungsvorgang wesentlich schneller, in kaltem Wasser langsamer. Um ein schnelleres Lösen des Salzes zu erreichen, kann die Wassermenge, in der das Salz gelöst wird, erhöht werden.

4.4 Kalibrierung der Leitfähigkeitssonde

Wie die Bezugskurve zwischen Leitfähigkeit und Salzgehalt in Abbildung 3 zeigt, ist der Zusammenhang zwischen Salzgehalt und Leitfähigkeit insbesondere oberhalb 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ nicht exakt linear. Bei hohem Salzgehalt nimmt die elektrische Leitfähigkeit mit dem Salzgehalt etwas langsamer zu als bei niedrigen Werten. Betrachtet man jedoch nur einen kurzen Ausschnitt der Kurve, kann bei der Auswertung mit ausreichender Genauigkeit ein linearer Zusammenhang angenommen werden (Bezugsgerade). Um die Beziehung zwischen Salzgehalt und Leitfähigkeit im fraglichen Konzentrationsbereich zu ermitteln, ist es notwendig, vor einer Messung die Leitfähigkeitssonde im maßgebenden Messbereich zu kalibrieren. Um bei dieser Kalibrierung auch Fehler in der Messkette zu erkennen, muss die Kalibrierung mit dem Messaufbau erfolgen, mit dem die spätere Messung durchgeführt wird. Eine Kalibrierung an der Messstelle sollte mit dem Wasser des Gewässers durchgeführt werden, das gemessen werden soll.

Auf eine Kalibrierung vor jeder einzelnen Messung kann verzichtet werden, wenn im gleichen oder in einem Gewässer mit ähnlichem Chemismus gemessen wird. Zeigt sich bei der Messung, dass die Leitfähigkeitswerte nicht in dem durch eine Kalibrierung überprüften Bereich liegen oder bestehen Bedenken bezüglich der Zuverlässigkeit der Messgeräte, sollte im Anschluss an die Messung die Kalibrierung nachgeholt werden.

Die Kalibrierung muss mit größter Sorgfalt erfolgen. Fehler die bei einer Kalibrierung gemacht werden, verfälschen systematisch alle Messergebnisse, die mit den falsch kalibrierten Geräten durchgeführt werden. Es ist daher besser auf eine neuerliche Kalibrierung zu verzichten, wenn diese nicht mit der notwendigen Sorgfalt erledigt werden kann, und statt dessen auf das Ergebnis einer älteren jedoch zuverlässigen Kalibrierung zurückzugreifen. Eine sorgfältige Kalibrierung im Labor ist einer weniger sorgfältigen im Gelände vorzuziehen. Bei einer Kalibrierung im Labor ist jedoch darauf zu achten, dass, der Salzgehalt des Messguts dem des zu untersuchenden Gewässers gleicht und die Temperatur des Wassers und die Umgebungstemperatur etwa den Gegebenheiten am Gewässer entsprechen; dies gilt auch für temperaturkompensierte Sonden (Kapitel 2.3.2.2).

Im ersten Schritt wird die Kalibrierlösung hergestellt. Hierzu wird im Labor mit dem Salz, das später zur Verdünnungsmessung verwendet wird (gleiche Marke und Abfüllung), und mit destilliertem Wasser eine NaCl-Lösung mit einer Konzentration von 10 g/l hergestellt. Da Salz bei feuchter Lagerung Wasser aufnimmt und dadurch sein Gewicht vergrößern kann, ist es wichtig, das Salz trocken zu lagern. Feuchteunterschiede zwischen dem Salz der Kalibrierlösung und dem bei der Messung verwendeten Salz führen zu signifikanten und systematischen Fehlern bei der Durchflussmessung (Benischke & Hartum, 1990). Das Abwiegen des

Salzes muss mit einer Präzisionswaage erfolgen, die Unsicherheit muss dabei unter 1 % liegen, d.h. die 10 g Salz, die für die Herstellung von einem Liter Kalibrierlösung benötigt werden, müssen mit einer Unsicherheit von weniger als 0,1 g abgewogen werden. Mit entsprechender Genauigkeit muss die Wassermenge bestimmt werden. Der hierfür verwendete Messkolben muss eine Volumenbestimmung mit einer Messunsicherheit von weniger als 10 cm³ erlauben. Die 10 g Salz müssen vollständig in den Messkolben eingegeben und unter Rühren im Wasser gelöst werden. Die Kalibrierlösung kann für sämtliche Versuche verwendet werden, bei denen Salz aus dem gleichen Salzvorrat (gleiche Marke und Abfüllung) eingesetzt wird.

Auch die Kalibrierung der Leitfähigkeitssonde muss mit höchster Sorgfalt erfolgen. Die Mengen der Kalibrierlösung sind exakt zu bestimmen und alle verwendeten Gefäße und Gerätschaften von eventuellen Rückständen und Verschmutzungen sorgfältig zu reinigen, da diese sich auf die Leitfähigkeit auswirken können.

Ziel der Kalibrierung ist es, die Gleichung der Bezugsgeraden zwischen Salzkonzentration und Leitfähigkeit in dem Messbereich zwischen der Hintergrundkonzentration und dem Maximalwert der Tracerdurchgangskurve zu bestimmen. Diese Bezugsgerade erhält die Form:

$$C_1 \text{ [mg/l]} = \alpha \cdot Lf \text{ [\mu S/cm]} + C_0,$$

wobei α der gesuchte Eichkoeffizient ist. C_0 ist die Salzkonzentration vor der Salzeingabe.

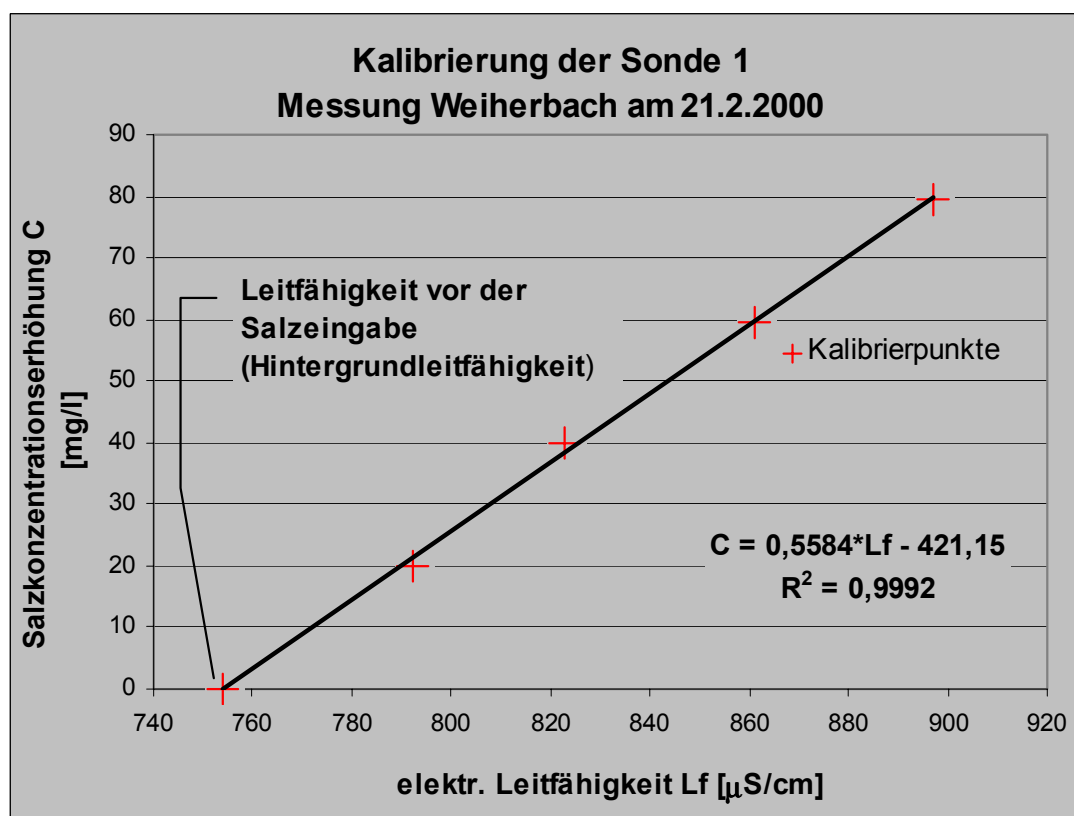


Abbildung 10: Kalibrierung einer Sonde, Eichpunkte und Ausgleichsgerade

(Die Daten wurden Anhang I, Tabelle I-3 entnommen. Der Eichkoeffizient beträgt in diesem Beispiel $\alpha = 0,5584$.)

Zur Kalibrierung werden in mehreren Schritten jeweils eine genau abgemessene Menge der Kalibrierlösung der zuvor exakt bestimmten Wassermenge von i.a. 250 ml zugegeben. Nach

jeder Zugabe wird die Probe gut gemischt und deren Leitfähigkeit gemessen. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis eine Konzentration erreicht ist, die etwa so groß ist wie der zu erwartende Maximalwert der bei der Durchflussmessung auftretenden Konzentrationsganglinie.

Die zu erwartende maximale Erhöhung der Leitfähigkeit lässt sich nach folgender Beziehung abschätzen:

$$\text{Leitfähigkeitserhöhung } [\mu\text{S/cm}] = \beta \cdot M [\text{kg}] / Q [\text{m}^3/\text{s}].$$

Q = geschätzter Durchfluss

M = eingegebene Salzmenge

β = 10 bei turbulenten Gewässern und entsprechend kurzen Durchmischungsstrecken

β = 20 und größer bei langsam fließenden Gewässern und entsprechend langen Durchmischungsstrecken

Für die einzelnen bei der Kalibrierung ermittelten Wertepaare zwischen Leitfähigkeit und Salzzugabe bestimmt man die Ausgleichsgerade (Abbildung 10). Die Steigung dieser Ausgleichsgeraden ist der gesuchte Eichkoeffizient.

Das Ergebnis der Kalibrierung ist in einem Gerätebuch oder einer Datei zu notieren. Auf diese Weise ist zurückzuverfolgen, ob und ggf. in welcher Weise sich der Eichkoeffizient verändert hat. Weicht bei einer Kalibrierung der Eichkoeffizient im untersuchten Messbereich von dem vorangegangenen Kalibrierungen deutlich ab, ist die Kalibrierung mit einer neuen Kalibrierlösung zu wiederholen. Bestätigt sich dabei die Veränderung gegenüber früheren Kalibrierungen, sind die Sonden zu reinigen (Kapitel 2.3.2.2) bzw. ist das Gerät auf Defekte zu untersuchen.

4.5 Positionierung der Messsonden

Die Messsonden sind so im Gewässer zu positionieren, dass

- aus den Messwerten die mittlere Tracerkonzentration mit größtmöglicher Genauigkeit ermittelt und
- eine eventuelle mangelhafte Durchmischung erkannt werden kann.

Um festzustellen, ob die Tracerkonzentrationen innerhalb des Messprofils unterschiedlich sind, müssen mindestens zwei Sonden eingebaut werden (Abbildung 11). Bei breiten Gewässern, bei denen eine mangelhafte Durchmischung zu befürchten ist, sind weitere Sonden vorzusehen.

Die Sonden sollten so über die Breite des Messquerschnitts verteilt werden, dass sowohl die Hauptströmung im Stromstrich als auch die langsam fließende Strömung im Uferbereich erfasst werden können. In allen Fällen gültige Regeln können hierzu nicht aufgestellt werden. Bei einer symmetrischen Verteilung der Strömung wird ein Sondereinbau nach Tabelle 3 vorgeschlagen.

Die Messsonden dürfen nicht auf der Sohle aufliegen, weil sich dort eine Grenzschicht ausbildet, die an der Hauptströmung nur unvollkommen teilnimmt. Im Rahmen einer tracerhydrologischen Untersuchung zur Hydrologie des Karstes im Gebiet Churfürsten/ Alvier, Schweiz (Rieg, 1994) wurden von Thamm (1993) u.a. die Durchflüsse verschiedener Gewässer mittels Verdünnungsmethode bestimmt. Es zeigte sich, dass bei großen Fließgeschwindigkeiten über der Gewässersohle häufig ein strömungsarmer Bereich vorhanden ist, die Prandtl'sche Grenzschicht (Brehm, 1990), über die das Wasser gleitet, ohne sich vollständig zu vermischen. Dieses Phänomen wurde sowohl bei gemauerten wie bei natürlichen Sohlen beobachtet. Um sicherzustellen, dass die Sonde außerhalb dieser

tet. Um sicherzustellen, dass die Sonde außerhalb dieser Grenzschicht liegt und die Tracerkonzentration der fließenden Welle erfasst, sollte der Abstand der Sonde von der Sohle etwa das 0,2-fache der Wassertiefe betragen (Thamm 1993).

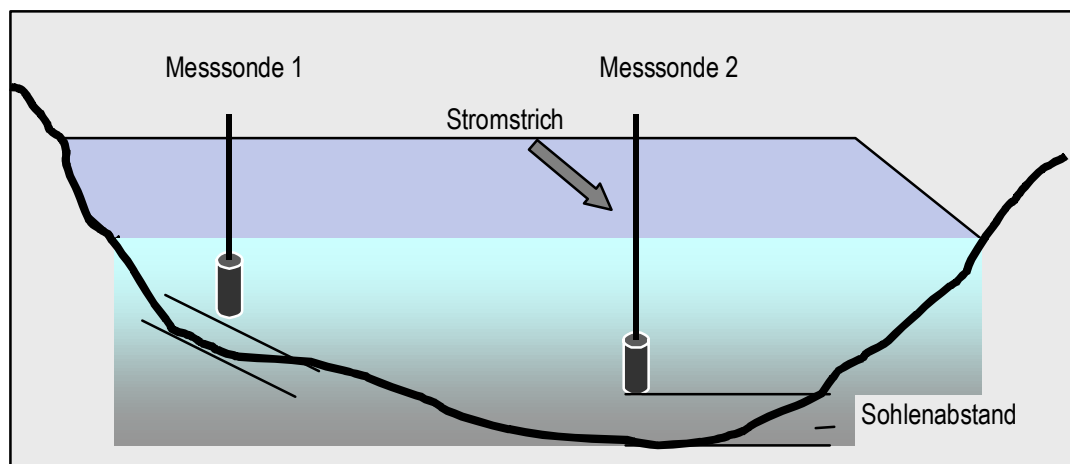


Abbildung 11: Richtige Positionierung der Messsonden im Messquerschnitt

Bei ungünstiger Positionierung der Messsonden ist ihre vollständige Umspülung nicht immer gegeben. Bei hohen Fließgeschwindigkeiten kann der Strömungsfaden im Hinterwasser der Messsonden abreißen. Die Luftblasen, die sich dann dort bilden, stören die Messung. Derartige Störungen sind daran zu erkennen, dass bereits vor Eintreffen der Tracerwolke die Messwerte stark streuen. Bei korrekter Lage der Sonden müssen diese den gleich bleibenden Wert der Hintergrundleitfähigkeit anzeigen.

Nur eine stabile, unveränderte Lage der Sonden im Fließquerschnitt gewährleistet ein exaktes Erfassen der Salzkonzentrationen an einer definierten Stelle. Bei sehr turbulent fließender Strömung müssen die Sonden z. B. an einer Stange befestigt werden und dürfen nicht frei (z.B. von einer Brücke oder einem Steg) ins Wasser hängen. Wenn mit Treibgut gerechnet werden muss, ist es ratsam, die Messsonden entsprechend zu schützen.

4.6 Durchführung der Messung

Nach Auswahl der Querschnitte für die Eingabe und die Messung sowie einer eventuellen Kalibrierung beginnt die Messung mit dem Aufbau der Messgeräte und der Positionierung der Sonden. Sobald diese die Hintergrundleitfähigkeit ordnungsgemäß erfassen, wird der Tracer an der vorgesehenen Stelle in das Gewässer eingegeben (Kapitel 3.2.1). Die Eingabe soll innerhalb möglichst kurzer Zeit erfolgen. Damit man nicht zu schwere Gefäße mit Salzlösung handhaben muss, kann der Tracer auch in mehreren kleineren Gefäßen vorbereitet werden, die dann schnell hintereinander ins Gewässer geleert werden.

Der Durchgang der Tracerwolke wird am Leitfähigkeitsmessgerät verfolgt. Das Messintervall sollte möglichst nicht über zwei Sekunden liegen. Es ist zweckmäßig diese Messwerte ohne vorherige Mittelung zu registrieren, um Schwankungen der Messwerte, die ein Indiz für mangelhafte Durchmischung sind, erkennen zu können.

Die Messung kann abgebrochen werden, wenn an allen Messsonden wieder die Hintergrundleitfähigkeit erreicht ist. Bei einem sehr langen Trailing in der Form einer Exponentialfunktion

ist es vertretbar, die Messung früher abubrechen und das Restintegral aus der Exponentialfunktion der Auslaufkurve zu bestimmen (Kapitel 4.7).

Wenn sich die Hintergrundleitfähigkeit während der Messung erhöht hat, bleibt der Leitfähigkeitswert nach Durchgang der Tracerwolke annähernd konstant, steigt möglicherweise sogar wieder an und geht nicht mehr auf den Ausgangswert zurück. Die Messung kann dann abgebrochen werden, wenn kein weiterer Rückgang der Leitfähigkeitswerte mehr zu beobachten ist (Kapitel 4.7).

Wenn während der Messung die Hintergrundleitfähigkeit abnimmt, unterschreitet die Leitfähigkeitskurve den Leitfähigkeitswert vor der Salzeingabe. In diesem Fall darf die Messung erst beendet werden, wenn davon auszugehen ist, dass der noch vorhandene Rückgang der Leitfähigkeit nicht mehr auf Trailing sondern auf die Veränderung der Hintergrundleitfähigkeit zurückzuführen ist (Kapitel 4.7).

Bei größeren Veränderungen der Hintergrundleitfähigkeit während der Messung sollte das Messergebnis verworfen werden.

4.7 Auswertung der Messung der elektrischen Leitfähigkeit

Die Auswertung der momentanen Einspeisung erfolgt für jede einzelne Messsonde durch Integration ihrer Tracerdurchgangskurve. Wenn bis zum Ende des Tracerdurchganges gemessen wird ($t_E = t_1$), gilt:

$$I_l = \int_{t_0}^{t_1} (Lf - Lf_0) \cdot dt = \text{Integral für die Kurve bis zum Ende des Tracerdurchganges}$$

Damit erhält man die Größe des Durchflusses aus dem Mischungsverhältnis zwischen Salz und Wasser nach der Gleichung:

$$Q_i = \frac{M}{\alpha \cdot \int_{t_0}^{t_1} (Lf - Lf_0) \cdot dt}$$

Q_i = Durchflusswert aufgrund der Messergebnisse der Sonde i [l/s]

M = eingegebene Salzmenge [mg]

t_0 = Zeit zu Beginn des Tracerdurchganges

t_1 = Zeit am Ende des Tracerdurchganges

α = Eichkoeffizient, Steigung der Eichgeraden (Abbildung 10)

Lf = Leitfähigkeit des Wassers nach der Salzeingabe [$\mu\text{S}/\text{cm}$]

Lf_0 = Hintergrundleitfähigkeit des Wassers vor Eintreffen des Tracers an der Messstelle [$\mu\text{S}/\text{cm}$]

dt = Messintervall [s]

Wird die Messung zum Zeitpunkt $t_E < t_1$ abgebrochen (Abbildung 12), gilt:

$$I_E = \int_{t_0}^{t_E} (Lf - Lf_0) \cdot dt$$

I_E = Integral für die Kurve bis zum Ende der Messung

t_E = Zeit bei Beendigung der Messung

Lf_E = Leitfähigkeit bei Beendigung der Messung [$\mu\text{S}/\text{cm}$]

Wurde die Messung zum Zeitpunkt $t_E < t_1$ bei einer Leitfähigkeit Lf_E abgebrochen, d.h. bevor die Leitfähigkeitsganglinie den Hintergrundwert Lf_0 wieder erreicht hat, muss das Integral für den durch Messungen nicht belegten Teil der Tracerdurchgangskurve F berechnet werden. Die Exponentialfunktion der Trailingkurve nach Abbrechen der Messung hat die Form:

$$(Lf - Lf_0) = (Lf_E - Lf_0) \cdot e^{-a \cdot t}$$

Den Faktor a erhält man, indem man die Exponentialfunktion der Auslaufkurve im durch Messungen belegten Bereich ermittelt. Das gesuchte Integral F für den durch Messungen nicht belegten der Auslaufganglinie hat dann die Größe:

$$F = (Lf_E - Lf_0) \cdot \frac{1}{a}$$

Die Gleichung zur Ermittlung des Durchflusses lautet schließlich:

$$Q_i = \frac{M}{\alpha \cdot \left[\int_{t_0}^{t_E} (Lf - Lf_0) \cdot dt + F \right]}$$

Wenn sich die Hintergrundleitfähigkeit während der Messung ändert, muss dies bei der Ermittlung des Integralwertes I_1 berücksichtigt werden. Unter der Annahme, dass die Leitfähigkeit linear mit der Zeit zu- oder abgenommen hat, erhält man für das Integral einen Korrekturwert

$$K = 0,5 \cdot (Lf_0 - Lf_E) \cdot (t_E - t_0).$$

Die Gleichung zur Ermittlung des Durchflusses erhält somit die Form:

$$Q_i = \frac{M}{\alpha \cdot \left[\int_{t_0}^{t_E} (Lf - Lf_0) \cdot dt + K + F \right]}$$

Der Korrekturwert K ist bei einem Rückgang der Hintergrundleitfähigkeit positiv (Abbildung 12, Mitte). Bei einer Zunahme ist K negativ (Abbildung 12, unten) und der Wert F wird zu Null, wenn die Messung zu dem Zeitpunkt abgebrochen wurde, bei dem die Leitfähigkeit ihr Minimum erreichte.

Die Genauigkeit der Kurvenintegration ist abhängig vom Messturnus und von der Zuverlässigkeit, mit welcher Beginn und Ende des Tracerdurchganges bestimmt wurden. Korrekturen der beschriebenen Art sind nur zulässig, wenn die Korrekturwerte F oder K unter 5 % des Integralwertes I_1 bleiben; andernfalls ist die Messung zu verwerfen.

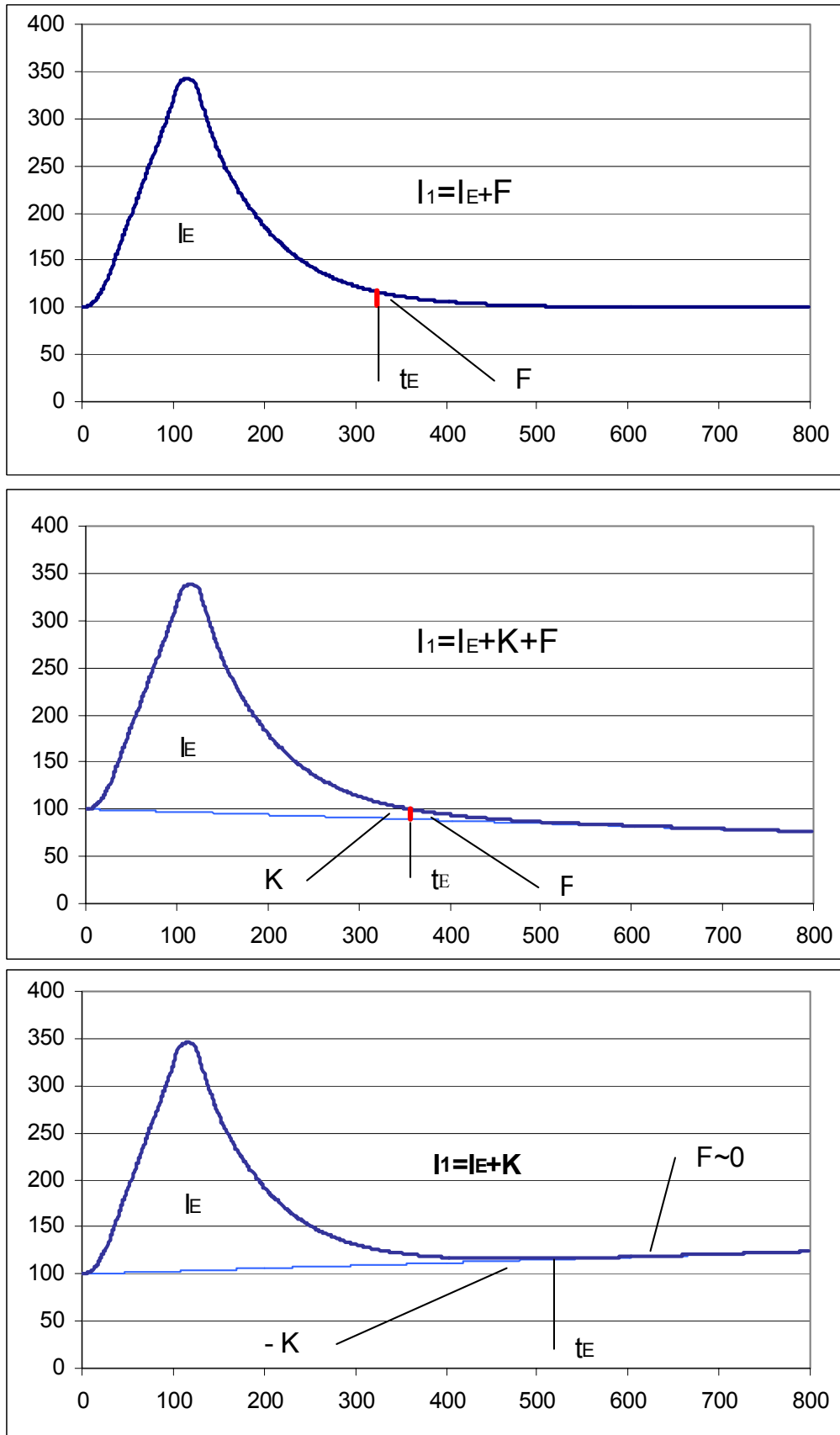


Abbildung 12: Ganglinien der Leitfähigkeit

4.8 Ermittlung des Durchflusswertes

4.8.1 Mittelung der Messergebnisse der einzelnen Sonden

Die Messungen der einzelnen Sonden beschreiben jeweils einen Stromstreifen. Die Durchflüsse in diesen Stromstreifen sind in aller Regel unterschiedlich groß. Bei der Mittelung müssen daher die Messergebnisse im Verhältnis der Durchflüsse in den einzelnen Stromstreifen gewichtet werden. In der Praxis lassen sich die Wichtungswerte nur sehr grob abschätzen. Bei einem Messquerschnitt, bei dem die Hauptströmung in Gewässermitte liegt, können die in Tabelle 3 angegebenen Werte als Anhalt dienen.

Anzahl der Sonden	Abstand vom Ufer (b=Gewässerbreite)				Wichtung der Messergebnisse			
	Sonde 1	Sonde 2	Sonde 3	Sonde 4	Sonde 1	Sonde 2	Sonde 3	Sonde 4
2	0,15·b	0,6·b			1/8	7/8		
3	0,15·b	0,5·b	0,85·b		1/8	6/8	1/8	
4	0,15·b	0,33·b	0,67·b	0,85·b	1/10	4/10	4/10	1/10

Tabelle 3: Verteilung der Sonden im Querschnitt, Wichtung der Messergebnisse

4.8.2 Messfehler

In der Literatur wird die Messgenauigkeit der Salzverdünnungsmethode mit Momentaneingabe mit einem Fehler von weniger als 10 % angegeben (Okunishi, 1992). Die Differenz zwischen Salzverdünnungsmethode und Flügelmessung unter Laborbedingungen wurde mit 2,4 % beziffert (Benischke & Harum, 1984). Größere Abweichungen (~ 20 %) traten in Naturgerinnen auf, in denen eine Messung mit Messflügeln wegen nicht ausreichend paralleler Strömung und Turbulenzen unsicher ist (Benischke & Harum, 1984).

Bei Salzverdünnungsmessungen sind folgende Fehlerquellen zu beachten:

- **Fehlende Voraussetzungen für die Anwendung des Verfahrens**

Die in Kapitel 2.1 und 2.3.2.4 genannten Voraussetzungen sind nicht erfüllt.

- **Zu große oder zu kleine Salzeingabemenge, zu früh abgebrochene Messung, Veränderung der Hintergrundleitfähigkeit**

Ist die Salzmenge zu gering, steigt die Leitfähigkeit nur wenig über ihren Hintergrundwert an. Der Integralwert ist dann nur mit großer relativer Unsicherheit zu bestimmen (Kapitel 4.7). Bereits kleine Mängel bei der Messung, wie z.B. zu frühes Abbrechen der Messung, Veränderungen der Hintergrundleitfähigkeit, können zu relativ großen Unsicherheiten führen.

Ein systematischer Fehler ergibt sich, wenn die Menge der eingegebenen Salzlösung gegenüber der Größe des Durchflusses nicht vernachlässigbar klein ist und bei der Ermittlung des Durchflusses unberücksichtigt bleibt.

- **Irrtum über die Menge des eingegebenen Salzes**

Fehlerhafte Annahmen zur Menge des eingegebenen Salzes schlagen sich mit gleicher relativer Größe im Ergebnis nieder. Bleibt nicht gelöstes Salz im Eingabegefäß zurück, hat dies die gleiche Wirkung wie eine in der Berechnung zu hoch angenommene Salzmenge.

Beim Abwiegen von nassem Salz wird die aufgenommene Feuchtigkeit mit erfasst. Das tatsächliche Salzgewicht ist somit geringer, als der Wert, der sich beim Abwiegen ergibt.

- **Fehlende Repräsentanz der Messungen bezüglich des Mittelwertes im Messquerschnitt**

Da die Salzkonzentration in Messquerschnitt kaum völlig homogen ist, wird versucht, mögliche Unterschiede durch Messung an mehreren Stellen des Querschnitts zu erkennen und durch Mittelung der Messergebnisse einen repräsentativen Mittelwert zu bestimmen. Dies gelingt nur, wenn die Messsonden so über den Messquerschnitt verteilt sind, dass die unterschiedlichen Konzentrationen erfasst werden können und die Messergebnisse nicht zu sehr von einander abweichen (Kapitel 4.5, 4.8.1).

- **Fehlerhafte Messungen**

Fehlerhafte Messungen können durch falschen Einbau der Messsonden, fehlerhafte Kalibrierung oder technische Mängeln der Mess- und Registriergeräte verursacht sein (Kapitel 4.3, 4.4).

4.8.3 Bewertung des Ergebnisses der Durchflussmessung

Wenn die Auswertung der Durchflussmessung bereits an der Messstelle erfolgen kann, sollte dort auch eine erste Bewertung der Ergebnisse stattfinden. Dadurch wird es möglich, erforderlichenfalls eine Messung zu wiederholen.

Ein wichtiges Kriterium für die Zuverlässigkeit einer Messung ist der Verlauf der Ganglinien der Leitfähigkeitsmessung an den verschiedenen Stellen im Messquerschnitt. Ein deutlich unterschiedlicher Verlauf der Ganglinien und insbesondere unterschiedliche Integralwerte sind ein Hinweis auf eine mangelhafte Quervermischung (laterale Dispersion, Kapitel 2.2). Betragen die Unterschiede mehr als 10 % sollte das Ergebnis stets als unsicher verworfen werden. Abweichungen zwischen 5 und 10 % können toleriert werden, wenn bei der Mittelung eine zuverlässige Wichtung möglich ist (Kapitel 4.8.1). Hat sich während der Messung die Hintergrundleitfähigkeit verändert, ist die Messung zu verwerfen, wenn das in Kapitel 4.7 beschriebene Korrekturverfahren nicht durchgeführt wird oder das dort genannte Kriterium überschritten ist.

Starke kurzzeitige Schwankungen der Leitfähigkeitswerte können auf eine mangelhafte Längsdurchmischung (longitudinale Dispersion, Kapitel 2.2), auf Gerätefehler oder einen ungünstigen Einbau der Sonde (Luftblasen, Kapitel 4.5) zurückzuführen sein. Wenn die Durchgangskurve mehrere Spitzen aufweist, wurde der Tracer vermutlich in einem wenig durchströmten Gewässerteil zurückgehalten (Kapitel 2.2 und 4.1.1).

Eine fehlerhafte Kalibrierung lässt sich aus den Messergebnissen nicht erkennen, solange der ermittelte Durchflusswert plausibel erscheint. Weichen bei der Kalibrierung die Eichkoeffizienten von denen früherer Kalibrierungen deutlich ab, und kann diese Abweichung nicht mit einem Kalibrierfehler erklärt werden (Kapitel 4.4), ist zu untersuchen, ob der neue Eichkoeffizient auch bereits bei früheren Messungen gültig war.

Stimmen die ermittelten Durchflusswerte augenscheinlich nicht mit der Beobachtung überein, ist zu prüfen, ob die eingegebene Salzmenge korrekt in der Berechnung berücksichtigt wurde oder ob die Geräte defekt sind.

5 Durchführung von Durchflussmessungen

5.1 Arbeitsschritte

Der praktische Teil dieser Arbeitsanleitung beschreibt in knapper Form die einzelnen Arbeitsschritte, ohne diese näher zu begründen. Informationen darüber, warum in dieser Weise verfahren werden soll, welche Randbedingungen eingehalten werden müssen und welche Überlegungen in Sonderfällen anzustellen sind, finden sich im theoretischen Teil dieser Arbeitsanleitung. Es wird empfohlen, vor der Durchführung von Messungen sich dort über die Grundlagen des Verfahrens und die Grenzen seiner Anwendung zu informieren.

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die einzelnen Arbeitsschritte mit Verweis auf die Kapitel, in denen die theoretischen Grundlagen beschrieben sind.

Tabelle 4: Arbeitsschritte bei der Vorbereitung und Durchführung von Salzverdünnungsmessungen

	Arbeitsschritte	Praktisches Vorgehen	Grundlagen
1	Herstellung der Kalibrierlösung	Kapitel 5.2.2, Seite 27	Kapitel 4.4 Seite 17
2	Lagern des Salzes	Kapitel 5.2.3, Seite 27	Kapitel 4.4 Seite 17
3	Kalibrieren der Leitfähigkeitsmessgeräte	Kapitel 5.2.4, Seite 27	Kapitel 4.4 Seite 17
4	Abschätzen der Salzmenge	Kapitel 5.2.5, Seite 30	Kapitel 4.2 Seite 16
5	Herstellen der Tracerlösung	Kapitel 5.2.6, Seite 30	Kapitel 4.3 Seite 17
6	Festlegung von Durchmischungsstrecke	Kapitel 5.2.7, Seite 31	Kapitel 4.1 Seite 14
7	Positionieren der Sonden im Messquerschnitt	Kapitel 5.2.8, Seite 32	Kapitel 4.5 Seite 19
8	Messen	Kapitel 5.3, Seite 33	Kapitel 4.6 Seite 20
9	Erfassen der Daten	Kapitel 5.4, Seite 34	- -
10	Auswerten der Messung	Kapitel 5.5 Seite 35	Kapitel 4.7 Seite 21 Kapitel 4.8 Seite 24

5.2 Vorbereitungen für die Messung

5.2.1 Messausrüstung

Folgende Geräte und Materialien sind für die Durchflussmessung erforderlich:

- Durchflussmessgerät
- Leitfähigkeitssonden mit etwa 10 m langen Kabeln
- Material zur Befestigung der Messsonden im Messquerschnitt (z. B. Gestänge eines Stangenflügels, Sondengewichte)
- Salz in ausreichender Menge, handelsübliche 500-g-Packungen oder im Labor, erforderlichenfalls nach Trocknung in Mengen von 0,5 bis 5kg gewogen und abgepackt
- Gefäße zum Anrühren der Salzlösung (Tonne 50 l; Eimer 10 l und 20 l)
- Stab zum Anrühren der Salzlösung

5.2.2 Herstellen der Kalibrierlösung

Die Kalibrierlösung wird mit größtmöglicher Sorgfalt im Labor hergestellt. Die Messunsicherheiten bei der Mengenbestimmung müssen unter 1 % liegen.

Folgende Geräte und Materialien werden benötigt:

- Präzisionswaage
- 10 g Salz
- 1-Liter-Messkolben
- destilliertes Wasser

Mit der Präzisionswaage werden 10 g des Salzes eingewogen und in einem 1-Liter-Messkolben mit 1 l destilliertem Wasser gelöst. Die Kalibrierlösung kann für sämtliche Versuche verwendet werden, bei denen Salz aus dem gleichen Salzvorrat (gleiche Marke und Abfüllung) eingesetzt wird.

Eine fehlerhafte Kalibrierlösung verfälscht alle Messungen, bei denen Leitfähigkeitssonden verwendet wurden, die man mit dieser Lösung kalibriert hat.

5.2.3 Lagern des Salzes

Das Salz, mit dem die Kalibrierlösung hergestellt wurde und das später bei der Messung verwendet werden soll, ist trocken zu lagern, damit es keine Feuchtigkeit aufnehmen und dadurch sein Gewicht verändern kann. Salz, das trotzdem möglicherweise feucht geworden ist, muss vor einem Abwiegen getrocknet werden. Ist das Salz bereits in handelsüblichen Mengen abgewogen, spielt eine Aufnahme von Feuchtigkeit bei der späteren Verwendung keine Rolle.

5.2.4 Kalibrieren der Leitfähigkeitsmessgeräte

Das Kalibrieren der Leitfähigkeitsmessgeräte kann im Labor mit destilliertem Wasser erfolgen oder am Gewässer mit dessen Wasser. Zu kalibrieren ist der Messbereich, innerhalb dessen die Messwerte erwartet werden. Kalibriert wird die gesamte Messkette von der Messsonde bis zum Datenerfassungsgerät. Zu kalibrieren ist mit dem Salz (gleiche Marke und Abfüllung), das später zur Messung verwendet wird.

Folgende Geräte und Materialien werden benötigt:

- Kalibrierlösung 10 g/l
- Präzisionspipette (mit Pipettenspitze)
- Messkolben 250 ml
- Messkanne 500 ml

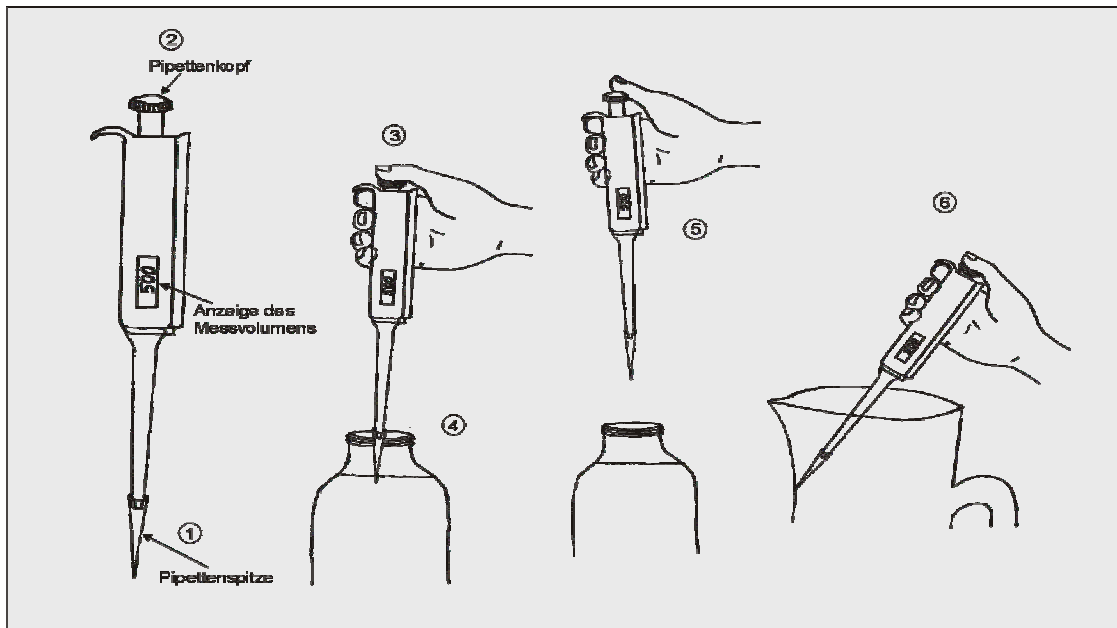


Abbildung 13: Geräte und Materialien zur Kalibrierung von Messsonden

Fehlerhaft kalibrierte Messgeräte erzeugen falsche Messergebnisse.

Das genaue Abmessen der Lösungsmengen erfolgt mit einer Präzisionspipette. Ihre Handhabung erfordert eine ruhige Hand und Erfahrung. Es empfiehlt sich, den Gebrauch der Pipette vor der Messung zu üben, um mit den Druckpunkten vertraut zu werden und um sicher zu stellen, keine Luft anzusaugen. Abbildung 14 erläutert die Vorgehensweise. Die Pipettenspitze kann wiederverwendet werden, wenn sie zuvor mit destilliertem Wasser gut ausgespült und getrocknet wurde.

Zur Bestimmung des Eichkoeffizienten werden genau 250 ml Wasser in dem zur Verfügung stehenden Messkolben abgemessen und in den 500 ml Messbecher gegeben (Abbildung 15). Dabei ist darauf zu achten, dass der Messkolben vollständig geleert wird. Beide Gefäße müssen vorher gründlich ausgespült und getrocknet werden, um störende Einflüsse (z. B. durch Salzablagerungen) von vorherigen Versuchen auszuschließen. Nun werden die Leitfähigkeitssonden, zur Ermittlung der Hintergrundleitfähigkeit in den Messbecher gehalten (Abbildung 16). Um Luftblasen an der Sondenoberfläche zu entfernen, werden die Sonden im Wasser leicht bewegt. Wenn die Messgeräte gleichbleibende Messwerte anzeigen, werden diese abgespeichert. Als nächstes werden 500 µl Eichlösung mit der Präzisionspipette in das Eichgefäß gegeben, die Salzlösung mit Hilfe der Messsonden im Messgefäß gut durchmischt (Abbildung 17) und wiederum die Leitfähigkeit in der eben beschriebene Weise ermittelt. Insgesamt wird dieser Vorgang so lange (i.a. 4 - 6 mal) wiederholt, bis im Eichgefäß der zu erwartende Maximalwert der Leitfähigkeit des Tracerdurchgangs erreicht ist. Anschließend wird der Eichkoeffizient mit den ermittelten Daten durch lineare Regression bestimmt. Die Daten werden im Erfassungsprotokoll (Abbildung 24) vermerkt.

**Abbildung 14: Bedienung der Präzisionspipette****Erläuterungen zu Abbildung 14**

1. Die Pipettenspitze wird auf die Präzisionspipette gesteckt.
2. Einstellung des gewünschten Messvolumens durch Drehen des Pipettenkopfs (500 µl)
3. Mit dem Daumen wird der Pipettenkopf bis zum ersten Druckpunkt langsam eingedrückt. In dieser Haltung wird die Pipettenspitze etwa 5 mm tief in die Kalibrierlösung getaucht, um zu gewährleisten, dass keine Luft eingesaugt wird. Die Pipette sollte nicht tiefer eingetaucht werden, da sonst das Messvolumen beeinträchtigt werden kann.
4. Die Pipette wird ruhig in der Lösung gehalten während man den Pipettenkopf langsam in die Ausgangsposition zurückgleiten lässt. Dabei füllt sich die Pipettenspitze bis zum eingestellten Messvolumen mit der Kalibrierlösung. Der Pipettenkopf darf nicht zurückschnappen, da dadurch das Messvolumen verfälscht wird.
5. Nun wird die Pipette mit Lösung zum Eichgefäß geführt, wobei der Pipettenkopf nicht gedrückt werden darf.
6. Mit Kontakt der Pipettenspitze zur Wand des Eichgefäßes wird das Messvolumen durch Druck des Pipettenkopfes bis zum zweiten Druckpunkt vollständig ausgepresst.

**Abbildung 15: Eingabe von 250 ml Bachwasser in das Kalibriergefäß****Abbildung 16: Messung der Hintergrundleitfähigkeit im Kalibriergefäß**



Abbildung 17: Eingabe von 500 µl Kalibrierlösung ins Kalibriergefäß

5.2.5 Abschätzen der Salzmenge

Zur Abschätzung der notwendigen Salzmenge ist als erstes die Größe des Durchflusses zu schätzen. Danach kann die Salzmenge entsprechend den Angaben in Tabelle 5 festgelegt werden. Bei sehr kurzen Durchmischungsstrecken und niedriger Hintergrundbelastung können die Salzmenen etwas geringer sein, bei langen Strecken und hoher Hintergrundbelastung empfiehlt es sich bis zu 50 % höhere Salzmenen einzusetzen.

Tabelle 5: Abschätzung der Salzmenge und des benötigten Wasservolumens zur Lösung des Salzes (NaCl).

geschätzter Durchfluss [l/s]	Salzbedarf [kg]	Lösungswasser [l]
< 50	0,5	2
100	1	4
200	2	8
500	5	20
800	8	32
1000	10	40

5.2.6 Herstellen der Tracerlösung

In einem Eimer oder einer Tonne wird die erforderliche Salzmenge im Verhältnis 1:4 mit Bachwasser vermischt (Abbildung 18) und so lange mit einem Stab gerührt, bis es sich vollständig im Wasser gelöst hat (Abbildung 19). Es muss darauf geachtet werden, dass die einzelnen Verpackungen vollständig entleert werden. Bei jodhaltigen Salzsorren entsteht eine trübe NaCl-Lösung, was keinerlei Auswirkungen auf die Qualität der Messung hat. Nachteilig ist nur, dass schlecht zu erkennen ist, ob sich das Salz vollständig gelöst hat; Rückstände am Gefäßboden müssen in diesem Fall mit dem Rührstab ertastet werden. In Zweifelsfällen ist weiter zu rühren.



Abbildung 18: Eingabe der zu injizierenden Salzmenge in ein Eingabefäß



Abbildung 19: Anrühren der Salzlösung

5.2.7 Festlegen der Durchmischungsstrecke

Die Wahl der Durchmischungsstrecke ist für den Erfolg der Messung von großer Bedeutung. Gewässerstrecken, die sich als geeignet erwiesen haben, sowie die Eingabe und Messquerschnitte sollten kartiert und bei späteren Messungen wieder verwendet werden. Für die Auswahl der Eingabestelle und Messstelle sowie der Durchmischungsstrecke sind die nachfolgend genannten Kriterien maßgebend.

Eingabestelle

Die Eingabe im Stromstrich soll problemlos möglich sein. Günstig sind Brücken oder Stege.

Messstelle

Der Einbau der Messsonden muss problemlos möglich sein. Die Fließgeschwindigkeit darf nicht so groß sein, dass die Sonde mitgerissen wird, oder die Strömung unterhalb der Sonde Wirbel bildet. Soll die Messung der Festlegung oder Überprüfung einer Pegelabflusskurve dienen, sollte die Messstelle möglichst nahe dem Pegel liegen.

Durchmischungsstrecke:

Die Durchmischungsstrecke hat die Aufgabe, für eine vollständige Vermischung des Salzes über den gesamten Fließquerschnitt zu sorgen. Sie soll daher:

- sich durch eine möglichst turbulente Strömung auszeichnen,
- keine Stillwasserzonen, Überflutungsgebiete oder sonstige Retentionsbereiche, in denen der Tracer oder Teile davon zurückgehalten werden können, aufweisen,
- keine Zuflüsse oder Ausleitungen besitzen, welche die Messung verfälschen könnten.

Die Länge der Durchmischungsstrecke ist abhängig von der Turbulenz der Strömung und der Gerinnebreite. Eine hohe Sohlenrauheit und Fließgeschwindigkeit sowie ein Gewässerverlauf mit vielen Krümmungen und wechselnden Querschnittsformen und -größen fördern die Durchmischung. Die Tabelle 6 kann daher nur einen Anhalt bei der Abschätzung der Länge der Durchmischungsstrecke liefern.

Tabelle 6: Länge der Durchmischungsstrecke in Abhängigkeit von der Gewässerbreite und der Turbulenz

Gewässerbreite	Länge der Durchmischungsstrecke	
	Wenig turbulent	Stark turbulent
1 m	75 m	50 m
2 m	150 m	100 m
5 m	350 m	250 m
10 m	600 m	400 m

Eine vollständige Durchmischung des Tracers im gesamten Messquerschnitt ist Voraussetzung für eine zuverlässige Messung. Es ist besser, eine zu lange als eine zu kurze Strecke zu wählen. Mit zunehmender Fließstrecke wird die Tracerdurchgangskurve jedoch immer flacher und damit deren Auswertung unsicherer.

5.2.8 Positionieren der Sonden im Messquerschnitt

Die Messsonden sind so im Gewässer zu positionieren, dass der mittlere Salzgehalt des Wassers, das die Messstelle durchfließt, mit größtmöglicher Genauigkeit ermittelt wird und außerdem geprüft werden kann, ob die Voraussetzung hierfür, eine homogene Vermischung des Tracers mit dem Wasser im Querschnitt, gegeben ist. Außerdem muss sichergestellt sein, dass die einzelnen Messsonden die Leitfähigkeit des sie umgebenden Wassers korrekt messen. Aus diesen Forderungen ergeben sich folgende Bedingungen für die Positionierung der Messsonden:

- Es muss sowohl die Strömung im Stromstrich als auch die Strömung im Uferbereich erfasst werden. Bei etwa symmetrischer Strömungsverteilung im Querschnitt können die Sonden entsprechend Tabelle 3 im Querschnitt verteilt werden.
- Die Sonden sollten von der Gewässersohle einen Abstand von etwa dem 0,2-fachen der Wassertiefe an dieser Stelle haben. Sie müssen vollständig vom Wasser umflossen werden.
- Die Sonden sind so einzubauen, dass sich hinter ihnen keine Wirbel bilden und sie sich nicht zu sehr in der Strömung bewegen. Bei starker Strömung sind die Sonden an einer Stange zu befestigen, bei geringer Strömung ist es ausreichend sie ins Gewässer zu hängen. Beispiele für die Positionierung der Messsonden zeigen die Abbildung 20 bis Abbildung 22.



Abbildung 20: Leitfähigkeitssonden an Stangen im Gewässer befestigt



Abbildung 21: Leitfähigkeitssonden von einer Brücke hängend



Abbildung 22: Leitfähigkeitssonden an einem Ast über dem Gewässer befestigt

5.3 Messen

5.3.1 Beginn der Messung

Als erstes werden an der Messstelle die Messgeräte in Betrieb genommen und die Datenerfassungs- und Auswerteprogramme gestartet. Die Geräte messen die Leitfähigkeit des Wassers vor der Salzeingabe (Hintergrundleitfähigkeit) und werden dabei auf ihre Funktionsfähigkeit überprüft.

Danach wird an der Eingabestelle die Salzlösung in den Stromstrich des Gewässers geschüttet (Abbildung 23). Um sicherzustellen, dass das Salz vollständig eingegeben wurde, empfiehlt es sich, sofort nach der Eingabe das Gefäß noch mit Bachwasser auszuspülen.

Danach begibt man sich sofort wieder zur Messstelle und beobachtet die Ganglinie der Leitfähigkeit.



Abbildung 23: Eingeben der Salzlösung

5.3.2 Beendigung der Messung

Die Messung wird beendet, wenn die Leitfähigkeit des Gewässers wieder ihren Hintergrundwert erreicht hat. Bei extrem langem Tailing, kann die Messung schon vorher abgebrochen werden. Sofern in diesem Fall das Integral für den nicht mehr gemessenen Teil der Auslaufkurve nicht rechnerisch ermittelt wird, ergibt sich ein zu großer Durchflusswert.

Wenn während der Messung der Hintergrundwert angestiegen ist, geht die Ganglinie nicht mehr auf den Hintergrundwert vor der Messung zurück. Die Messung wird abgebrochen, wenn kein weiterer Rückgang mehr zu beobachten ist.

Wenn während der Messung der Hintergrundwert zurückgegangen ist, nähert sich die Ganglinie nicht asymptotisch dem Ursprungswert der Hintergrundleitfähigkeit, sondern schneidet diese. Die Messung wird in diesem Fall abgebrochen.

Ist der Anstieg oder Rückgang des Hintergrundwertes sehr klein im Verhältnis zur Welle der Leitfähigkeitsganglinie, kann diese Störung bei der Auswertung berücksichtigt werden. Ist die Veränderung des Hintergrundwertes im Vergleich zur Welle der Leitfähigkeitsganglinie erheblich, sollte das Ergebnis verworfen werden.

5.4 Erfassen der Daten

Die Messdaten werden in einem Protokoll erfasst. Das Erfassungsprotokoll in Abbildung 24 orientiert sich inhaltlich an den Anforderungen, die sich bei der Arbeit mit dem im Anhang II beschriebenen Gerät ergeben und in seiner Form an dem Protokoll für Durchflussmessungen mit hydrometrischen Messflügeln des Pegel- und Datendienstes von Baden-Württemberg.

Das Erfassungsprotokoll enthält neben den allgemeinen Angaben zur Messstelle, dem Messtrupp, Datum und Uhrzeit, zusätzlich einen Abschnitt für die Kalibrierung der Messsonden.

Dort werden in tabellarischer Form der Messwerte der einzelnen Kalibrierschritte erfasst und die dabei gefunden Koeffizienten eingetragen. Des weiteren sind im Abschnitt „Eingabe“ der Ort der Eingabe zu beschreiben, die Länge der Durchmischungsstrecke zu vermerken und die eingegebene Salzmenge und das Lösungsvolumen anzugeben. Darüber hinaus bietet das Erfassungsprotokoll Raum für Bemerkungen und Beschreibungen zu den Umständen der Messung und zu möglichen Einflüssen und Fehlerquellen oder für ergänzende Hinweise, z. B. zur Lage der Messstelle oder zu Eigenschaften der Durchmischungsstrecke. Diese Informationen können bei der Plausibilisierung der Messung hilfreich sein.

Sofern erstmalig an dieser Stelle gemessen wird, sind Eingabe- und Messstelle in einer beigefügten Karte einzutragen und möglichst mit einem Foto zu dokumentieren. Wurden die örtlichen Gegebenheiten bereits bei früheren Messungen dokumentiert, genügt ein entsprechender Verweis. Die Salzmenge ist stets exakt anzugeben, für die Angabe des Lösungsvolumens ist eine derart hohe Genauigkeit nicht erforderlich solange die Menge des eingegebenen Wassers gegenüber dem Durchfluss gering ist.

5.5 Auswerten der Messung

Zusammen mit den Messgeräten werden i.a. auch Auswertprogramme geliefert. Das im Anhang II beschriebene Gerät berechnet das Integral des Tracerdurchganges automatisch aus den Messwerten und gibt das Endergebnis Q_i aus. Im Übrigen besteht die Möglichkeit, die Tracerganglinien nach dem in Kapitel 4.7 beschriebenen Verfahren mit einem Tabellenkalkulationsprogramm auszuwerten.

Im zweiten Schritt wird dann anhand der so ermittelten Werte Q_i der gesuchte Gesamtdurchflusswert Q bestimmt. Dieser ist stets auf seine Plausibilität zu überprüfen und hinsichtlich seiner Zuverlässigkeit zu bewerten. Dabei sind die Umstände der Messung und mögliche Fehlerquellen zu berücksichtigen.

Merke: Fehlerhafte Messungen schaden mehr als fehlende Messungen!

Erfassungsprotokoll - Durchflussmessung (Salzverdünnungsmethode)

Dienststelle Bereich Nr. Datum der Messung

Kurzform Tag Monat Jahr

Uhrzeit bei Messbeginn Uhrzeit bei Messende Itd. Nummer

Std Min Std Min

Messtrupp:

Messstelle **Messstellen-Nr. (geräteintern)** **Messstellen-Nr. (Pegelnetz)**

Messort:

Gewässer:

☐ Messsteg ☐ SKA-Profil ☐ NW-Profil ☐ Pegellatte ☐ andere Stelle

Weitere Beschreibungen: (z.B. 5,2 m unterhalb Pegellatte)

Kalibrierung

Kalibriervolumen: Zugabevolumen: Zugabekonzentration

Grundleitfähigkeit Wassertemp.

Eichpunkte

Nr.	Volumen [ml]	Konzentration [mg/l]	Sonde 1	Sonde 2
1	250,00	0,0		
2	250,50	20,0		
3	251,00	39,8		
4	251,50	59,6		
5	252,00	79,4		
6	252,50	99,0		

Messsonde 1
Eichkoeffizient
Korrelationskoeff.

Messsonde 2
Eichkoeffizient
Korrelationskoeff.

Eingabe

Eingabeort:
(genaue Beschreibung des Eingabeortes)

Länge der Durchmischungsstrecke m

Salzmenge (exakte Angabe): kg Lösungsvolumen (ca. Angabe) l

Beschaffenheit des Messquerschnitts

entkrautet bis m oberhalb

Verkrautung ☐ krautfrei ☐ leicht verkrautet ☐ stark verkrautet m unterhalb

Eigenschaften und Besonderheiten der Ufer und der Sohle (z. B. Anlandung linkes Ufer)

Ort, Datum, Unterschrift:

Weitere Bemerkungen und Hinweise, Skizzen (Eingabestelle, Messstelle, Durchmischungsstrecke) auf der Rückseite

Stand: 07/2001

Abbildung 24: Erfassungsprotokoll

6 Literatur

- Baumgartner, A. & Liebscher, H.J. (1990): Lehrbuch der Hydrologie 1- Allgemeine Hydrologie. – Gebrüder Bornträger Berlin, Stuttgart, 673 S.
- Benischke, R. & Harum, T. (1990): Determination of discharge rates in turbulent streams by salt tracer dilution applying a microcomputer system. Comparison with current meter measurements. - Hydrology of mountainous Regions, IHAS Publ. No. 193, 215-221.
- Benischke, R. & Harum, T. (1984): Computergesteuerte Abflußmessungen in offenen Gerinnen nach der Tracerverdünnungsmethode (Integrationsverfahren). – Steir. Beitr. z. Hydrogeologie, Graz, 36, 127-137.
- Brehm, J. (1990): Fließgewässerkunde. Einführung in die Limnologie der Quellen, Bäche, Flüsse. Heidelberg, Wiesbaden.
- Bundesamt für Umweltschutz, Landeshydrologie (1982): Handbuch für die Abflußmengenmessung. - Mitteilung Nr. 4, Bern.
- DVWK = Deutscher Verband für Wasser und Kulturbau e.V. (1994): Schriften, Heft 107: Grundwassermessgeräte, Bonn
- Gees, A.; Gertsch, J.; Schenk, J.; Weingartner, R. (1995): Abflußmessung nach dem Verdünnungsverfahren. In: Wasser, Energie, Luft. - 9 (87).
- Hölting, B. (1992): Hydrogeologie. Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. Enke Verlag, Stuttgart.
- Karbaum, H. (1965): Anwendungsmöglichkeiten und Probleme des Salzverdünnungsverfahrens zur Abflußermittlung. - Abhandlungen des meteorologischen Dienstes der DDR Nr. 75 (Bd. X), Mitteilung Nr. 6 aus dem Forschungsinstitut für Hydrometeorologie, Berlin.
- Käß, W. (1992): Lehrbuch der Hydrogeologie 9, Geohydrologische Markierungstechnik. - Gebrüder Bornträger Berlin, Stuttgart, 519 S.
- LfU = Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (2000): Karte der elektrischen Leitfähigkeiten in den Fließgewässern Baden-Württembergs.
- LfU = Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (2001): Arbeitsanleitung Pegel- und Datendienst Baden-Württemberg, Durchflussermittlung mit Messflügeln.
- Luder, B. & Fritsch, B. (1990): Abflußmessung in offenen Gerinnen. In: Wasser, Energie, Luft. - 3/4 (82)
- Okunishi, K.; Saito, T.; Yoshida, T. (1992): Accuracy of stream gauging by dilution methods. - Journal of Glaciology, 137, 231-243.
- Rieg, A. & Leibundgut, Ch. (1992): Gauging of high variable discharge using tracer dilution method. Tracer Hydrology, Hötzel & Werner (eds), Balkema, Rotterdam, p. 287-289.
- Schröter, W.; Lautenschläger, K.-H.; Bibrack, H. (1988): Taschenbuch der Chemie. - Verlag Harri Deutsch, Thun & Frankfurt.
- Sommer Mess-Systeme (1999): Abflußmessung nach der Tracerverdünnungsmethode, MRS-4 TRACE
- Sommer Mess-Systeme (1999): Abflußmessung nach der Tracerverdünnungsmethode, PC-TRACE, Bedienungshandbuch
- Spencer, e.A. & J.S. Tudhope (1956): A literature survey of salt-dilution method of flow measurement. - J. Inst. Water Engr., 12(2): 127 -138
- Spreafico, M. & Gees, A. (1994): Handbuch für die Abflußmengenbestimmung mittels Verdünnungsverfahren mit Fluoreszenztracer, Landeshydrologie und -geologie Bern.

- Taylor, G. (1953): Dispersion of soluble matter in solvent flowing slowly through a tube. - Proc. Roy. Soc. London, Ser. A, 186-203.
- Thamm, H.P. (1993): Beitrag zum oberirdischen Abfluß ausgewählter Fließgewässer im Churfirsten/ Alvier Gebiet. - Diplomarbeit am Institut für Physische Geographie, Lehrstuhl für Hydrologie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. (unveröffentlicht).
- WTW = Wissenschaftlich-Technische Werkstätten GmbH (1988): Leitfähigkeits-Fibel, Weilheim Obb.

7 Register

B		M	
Brown'sche Molekularbewegung	9	Mariott'sche Flasche	16
D		Markierstoffe	7
Diffusion	9	Massenkonstanz	8
Dispersion	9	Messausrüstung	33
Durchfluss		Messsonden	
Stationarität	8	Positionierung	25, 39
Durchmischung	8, 9	Messstelle 3, 5, 8, 13, 16, 17, 20, 21, 22,	
Durchmischungsstrecke 3, 6, 17, 20, 21,		23, 28, 32, 38, 39, 40, 41, 42	
22, 33, 38, 39, 42		Kriterien für die Wahl der	38
Kriterien für die Festlegung der	38	Momentaneingabe	17
Länge der	21, 39	N	
Retentionsräume	21	Natriumchlorid	11
Zuflüsse und Ausleitungen	22	P	
E		Prandtl'sche Grenzschicht	26
Eichkoeffizient 24, 25, 28, 32, 35		Präzisionspipette	
Eingabestelle 8, 20, 21, 38, 41		Bedienung der	35, 36
Kriterien für die Wahl der	38	R	
elektrischer Widerstand	11	Retentionsräume	21, 22
H		S	
Hintergrundleitfähigkeit 5, 14, 16, 22, 26,		Salz	11
27, 28, 31, 32, 35, 36, 40, 41		Salzmenge 3, 5, 6, 11, 22, 23, 25, 27, 31,	
I		32, 33, 37, 38, 42	
Ionenaustausch	11	Siemens	11
K		Speisesalz	11
Kalibrierlösung 3, 5, 24, 25, 33, 34, 36, 37		Steinsalz	11
Kochsalz	11	T	
kontinuierliche Tracereingabe	16	Tracer	10
L		Tracerdurchgang	19, 20, 21
Laminares Fließen	9	Tracerdurchgangskurve 5, 17, 18, 19, 21,	
Leitfähigkeitssonden		22, 24, 27, 28, 39	
Kalibrierung	23	Tracerlösung	
		Herstellung der	37
		Turbulentes Fließen	9

Anhang I

Beispiele aus der Praxis

1. Messprogramm

Zum Test des Messverfahrens wurden 18 Durchflussmessungen mit der Salzverdünnungsmethode in 5 unterschiedlichen Gewässern Baden-Württembergs durchgeführt (Tabelle I-1). Aufgabe der Messungen war:

- Untersuchen der Anwendungsmöglichkeit im Pegelmessnetz von Baden-Württemberg,
- Erarbeiten praxisnaher Vorgehensweisen und Anhaltswerten, z. B. für die Abschätzung der Salzeingabemenge, der Länge der Durchmischungsstrecke, der Positionierung der Leitfähigkeitssonden.
- Test der Methode mit dem MRS-4 TRACE Messgerät (Anhang II),

Die Versuche fanden an Pegeln mit Durchflussermittlung statt, deren Durchflüsse $2 \text{ m}^3/\text{s}$ nicht überschritten. Drei dieser Messungen werden im Folgenden exemplarisch vorgestellt. Bei allen Messungen wurden zwei elektrische Leitfähigkeitssonden verwendet, die in unterschiedlichen Strömungsbereichen des Gewässerquerschnitts positioniert waren.

Tabelle I-1: Durchflussmessungen

Nr.	Messort	Gewässer	Datum	Zeit	Salz [kg]	Messstrecke [m]	Grund-LF [$\mu\text{S}/\text{cm}$] ¹	Q S1 [l/s] ²	Q S2 [l/s] ³	Q mittel [l/s] ⁴	rel. Fehler [%] ⁵	Q Pegel [l/s] ⁶
1	Ubstadt	Kraichbach	15.02.	13:18	4,0	100	967	1649,8	2599,3	2124,55	-44,7	1450
2	Ubstadt	Kraichbach	15.02.	13:59	5,0	180	970,5	1515,1	1904,9	1710	-22,8	1450
3	Ubstadt	Kraichbach	15.02.	14:36	5,0	110	975,5	1271,5	1017	1144,25	22,2	1450
4 *	Ubstadt	Kraichbach	15.02.	15:06	5,0	150	962,5	1537,8	1455,6	1496,7	5,5	1380
5	Leonberg	Glems	16.02.	12:36	3,0	170	887	395,9	409,9	402,9	-3,5	400
6	Leonberg	Glems	16.02.	12:54	3,5	270	884,5	399,5	406,2	402,85	-1,7	400
7	Leonberg	Glems	16.02.	13:11	3,0	150	884	390,4	420,7	405,55	-7,5	400
8	Leonberg	Glems	16.02.	13:31	4,5	270	881	408	405,5	406,75	0,6	430
9	Talheim	Schozach	16.02.	15:45	4,5	100	655,5	973,1	1034,7	1003,9	-6,1	1250
10	Talheim	Schozach	16.02.	16:01	5,0	250	652,5	1068,4	1153,9	1111,15	-7,7	1250
11	Menzingen	Weiherbach	21.02.	13:24	2,5	100	733,5	23,7	23,5	23,6	0,8	--
12	Menzingen	Weiherbach	21.02.	14:44	1,5	100	756	23,5	23,4	23,45	0,4	--
13 *	Menzingen	Weiherbach	21.02.	15:10	1,0	50	756	23,5	23,4	23,45	0,4	--
14	Brotenau	Brotenaubach	24.02.	13:08	5,0	200	31	388,5	385	386,75	0,9	430
15	Brotenau	Brotenaubach	24.02.	13:47	6,0	200	31	389,4	390,7	390,05	-0,3	430
16	Brotenau	Brotenaubach	24.02.	14:23	6,0	100	32	388,7	386,3	387,5	0,6	430
17	Brotenau	Brotenaubach	24.02.	14:53	8,0	250	31	392,1	391,1	391,6	0,3	430
18 *	Brotenau	Brotenaubach	28.02.	13:55	7,0	200	31	582,7	578,8	580,75	0,7	580

¹) Grund-LF [$\mu\text{S}/\text{cm}$] = Grundleitfähigkeit [$\mu\text{S}/\text{cm}$]

²) Q S1 [l/s] = ermittelter Durchfluss durch Sonde 1 [l/s]

³) Q S2 [l/s] = ermittelter Durchfluss durch Sonde 2 [l/s]

⁴) Q mittel [l/s] = gemittelter Durchfluss der Sonden 1 und 2 [l/s]

⁵) rel. Fehler [%] = prozentuale Abweichung des gemessenen Durchflusses vom gemittelten Durchfluss [%]

⁶) Q Pegel [l/s] = ermittelter Durchfluss durch die W-Q-Beziehung [l/s]

*) Versuche, die im Folgenden vorgestellt und diskutiert werden

2. Kraichbach / Ubstadt (Messung Nr. 4)

Im Einzugsgebiet des Kraichbaches stehen Muschelkalk und Keuper an, die teilweise von Lösslehmschichten überdeckt sind. Entsprechend hoch ist dort die geologisch bedingte Hintergrundleitfähigkeit. Die Messungen ergaben Werte um $960 \mu\text{S}/\text{cm}$ (Tabelle I-2). Im Bereich der Messstrecke ist der Kraichbach kanalartig ausgebaut und wenig turbulent. Zum Zeitpunkt der Untersuchung wies er eine relativ hohe Wasserführung auf. Die Voraussetzungen für die Anwendung des Salzverdünnungsverfahrens waren somit ungünstig.

Der Messquerschnitt lag nur 150 m unterhalb der Eingabestelle. Eingegeben wurden 5 kg Salz. Die Leitfähigkeitssonden waren an einer Brücke aufgehängt und hingen, beschwert mit Sondengewichten, im fließenden Wasser. Da sie nicht fixiert waren, konnten sie sich in der Strömung bewegen.

Die Ganglinie der Leitfähigkeit weist bei beiden Sonden (Abbildung I-1) während des Durchgangs der Salzwolke große Schwankungen auf. Die Ursache hierfür dürfte in der unzureichenden Verteilung des Salzes im Gewässer zu suchen sein. Auch die mangelnde Fixierung der Sonden kann zu den Schwankungen der Messwerte beigetragen haben. Die aufgrund der hohen Grundlast angestrebte Erhöhung der Grundleitfähigkeit um $> 150 \mu\text{S}/\text{cm}$ wurde nicht erreicht (Anstieg der elektrischen Leitfähigkeit in der Spitze um $\sim 70 \mu\text{S}/\text{cm}$). Die eingespeiste Salzmenge von 5 kg war demzufolge nicht ausreichend. Der berechnete Durchfluss dieser Messung beträgt im Mittel 1497 l/s (Sonde 1: 1538 l/s, Sonde 2: 1456 l/s). Zum Vergleich: die Abflusskurve des Pegels weist einen Durchfluss von 1380 l/s aus. Die relative Abweichung der beiden Messsonden beträgt 5,6 %. Vom Durchflusswert entsprechend der Abflusskurve weicht der Mittelwert um 7,8 % ab. Da keine Informationen über die Lage der beiden Sonden im Querschnitt und damit über die Repräsentanz der beiden Messpunkte vorliegen, wird die Messung als nicht ausreichend zuverlässig verworfen.

Tabelle I-2: Messprotokoll Kraichbach

Messprotokoll : A B F L U S S M E S S U N G - Salzverdünnungsverfahren

Datei Name: C:\SALZ\MESSUNG\0001\10065.MES

letzte Bearbeitung: 15.02.2000 um 18:23:22

Station	: 0001	Gewässer	: Kraichbach			
Messort	: Ubstadt	Eingabeort	: 150 m oberh.			
Messtrupp	: 0001	Messgerät-Nr	: 00			
Datum	: 15.02.2000					
Bemerkungen	: eingelesen von MRS					
Pegelstand	Anfang : 61.0 cm	Mittel	: 61.0 cm			
	Ende : 61.0 cm					
Abfluss Sonde 1	: 1537.8 l/s	rel. Fehl 1/2	: 5.6 %			
Sonde 2	: 1455.6 l/s	Mittel	: 1496.7 l/s			
Schlüsselkurve	: ----- l/s	rel. Fehl SK/1	: ----- %			
		rel. Fehl SK/2	: ----- %			
Eingabeuhrzeit	: 15:06:47	Indikatormenge	5.00 kg			
		Lösungsstrecke	150.0 m			
Eichkoeff. Sonde 1	0.57011	Eichkoeff. Sonde 2	0.56525			
Eichkorrel. Sonde 1	0.99996	Eichkorrel. Sonde 2	0.99997			
Eichtemp. Sonde 1	8.5 °C	Eichtemp. Sonde 2	7.9 °C			
Tabelle der Eichpunkte						
Zugabevolumen	: 0.5 ml	Zugabekonzentration	: 10,0 g/l			
Nr.	Volumen [ml]	Konzen. [mg/l]	Sonde 1 Leitf. [µS/cm]	Sonde 2 Leitf. [µS/cm]	Sonde 1 Fehler %	Sonde 2 Fehler %
1	250.0	0.0	963.0	968.0	0	0
2	250.5	20.0	998.0	1003.0	0	1
3	251.0	39.8	1032.0	1038.0	1	1
4	251.5	59.6	1068.0	1074.0	0	0
5	252.0	79.4	1102.0	1108.0	0	0
Tabelle der wichtigsten Punkte						
Sonde 1	Uhrzeit	Zeit [s]	Leitf. [µS/cm]	Temp.[°C]	Geschw.[m/s] *)	
Messbeginn	15:06:47	0	963.0	8.1		
Durchgangsbeginn	15:10:01	194	960.0	8.2	0.773	
Konzentrationsmaximum	15:10:49	242	1028.0	8.2	0.620	
Durchgangsende	15:14:00	433	960.0	8.2		
Messende	15:14:26	459	959.0	8.3		
Sonde 2	Uhrzeit	Zeit [s]	Leitf. [µS/cm]	Temp.[°C]	Geschw.[m/s] *)	
Messbeginn	15:06:47	0	966.0	7.5		
Durchgangsbeginn	15:10:03	196	965.0	7.6	0.765	
Konzentrationsmaximum	15:10:50	243	1034.0	7.6	0.617	
Durchgangsende	15:14:25	458	965.0	7.7		
Messende	15:14:26	459	965.0	7.7		

*) Geschwindigkeit = Lösungsstrecke/ Zeit seit Messbeginn

Anzahl der Messpunkte	: 459	
Messintervall	: 1 s	
	Sonde 1	Sonde 2
Maximum Temperatur	8.3 °C	7.7 °C
Minimum Temperatur	8.1 °C	7.5 °C
Grundleitfähigkeit	960.0 µS/cm	965.0 µS/cm

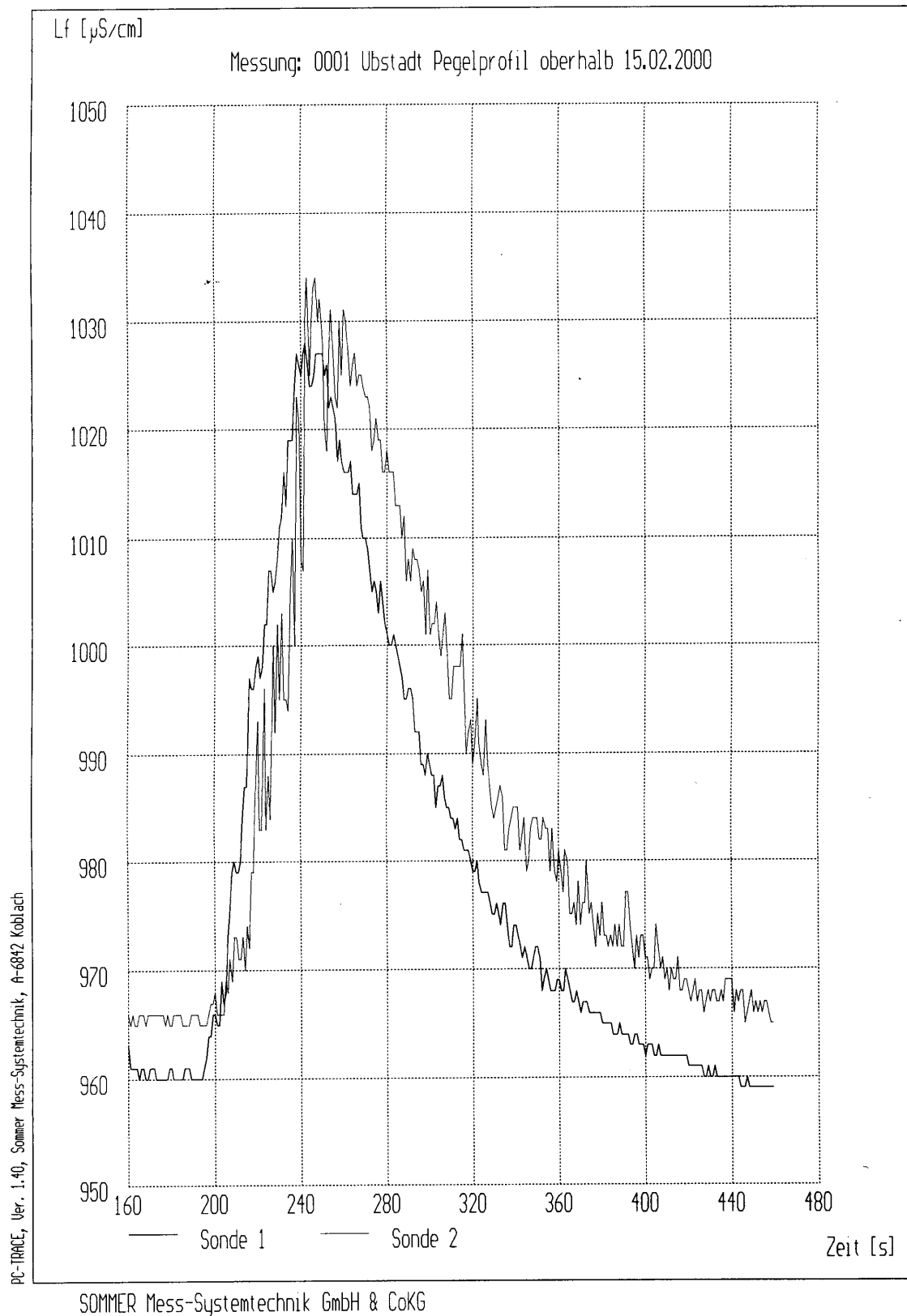


Abbildung I-1: Tracerdurchgangskurve Kraichbach

3. Weiherbach / Menzingen (Messung 13)

Der Weiherbach ist ein kleines Fließgewässer in einem intensiv landwirtschaftlich genutzten Gebiet des Kraichgaues. Langsames Fließen und eine relativ hohe Grundleitfähigkeit (zum Zeitpunkt der Durchflussmessung $760 \mu\text{S}/\text{cm}$) sind für das Gewässer charakteristisch. Die Durchmischungstrecke betrug 50 m, 1 kg gelöstes Salz wurden eingespeist. Die Messsonden hingen mit Sondengewichten an einem über den Fließquerschnitt gelegten Ast. Eine Befestigung der Sonden im Wasser war aufgrund der geringen Strömung nicht erforderlich. Messprotokoll und Tracerdurchgangskurve sind in Tabelle I-3 und Abbildung I-2 dargestellt.

Die Durchgangskurve dieser Durchflussmessung zeigt einen typischen Verlauf mit steilem Anstieg und etwas flacherem Abfall. Der Tracerdurchgang dauerte wegen der geringen Fließgeschwindigkeit mit 12 Minuten relativ lang. Die elektrische Leitfähigkeit stieg in der Spitze um $700 \mu\text{S}/\text{cm}$ an, was auf die Verwendung einer sehr großen Salzmenge zurückzuführen ist. Der ermittelte Durchfluss aus den Kurven beider Leitfähigkeitssonden betrug $\sim 23,5 \text{ l/s}$ mit einem relativen Fehler $< 1\%$. Dank der großen Salzmenge wurde trotz der erheblichen Grundleitfähigkeit eine hohe Messgenauigkeit erzielt. Das Ergebnis der Messung wird durch die ungewöhnlich große Menge der Salzlösung noch nicht spürbar beeinflusst.

Tabelle I-3: Messprotokoll Weiherbach

Messprotokoll : A B F L U S S M E S S U N G – Salzverdünnungsverfahren

Datei Name: C:\SALZ\MESSUNG\0004\10103.MES

letzte Bearbeitung: 22.02.2000 um 12:27:52

Station	: 0004	Gewässer	: Weiherbach			
Messort	: Menzingen	Eingabeort	: 50 m oberh.			
Messtrupp	: 0001	Messgerät-Nr	: 00			
Datum	: 21.02.2000					
Bemerkungen	: eingelesen von MRS					
Pegelstand	Anfang : 9.0 cm	Mittel	: 9.0 cm			
	Ende : 9.0 cm					
Abfluss Sonde 1	: 23.5 l/s	rel. Fehl 1/2	: 0.6 %			
Sonde 2	: 23.4 l/s	Mittel	: 23.5 l/s			
Schlüsselkurve	: ----- l/s	rel. Fehl SK/1	: ----- %			
		rel. Fehl SK/2	: ----- %			
Eingabeuhrzeit	: 15:10:26	Indikatormenge	1.00 kg			
		Lösungsstrecke	50.0 m			
Eichkoeff. Sonde 1	0.55842	Eichkoeff. Sonde 2	0.55860			
Eichkorrel. Sonde 1	0.99956	Eichkorrel. Sonde 2	0.99970			
Eichtemp. Sonde 1	9.4 °C	Eichtemp. Sonde 2	9.4 °C			
Tabelle der Eichpunkte						
Zugabevolumen	: 0.5 ml	Zugabekonzentration	: 10,0 g/l			
Nr.	Volumen [ml]	Konzen. [mg/l]	Sonde 1 Leitf. [µS/cm]	Sonde 2 Leitf. [µS/cm]	Sonde 1 Fehler %	Sonde 2 Fehler %
1	250.0	0.0	754.0	761.0	0	0
2	250.5	20.0	792.0	795.0	-6	5
3	251.0	39.8	823.0	829.0	3	5
4	251.5	59.6	861.0	866.0	1	2
5	252.0	79.4	897.0	903.0	0	0
Tabelle der wichtigsten Punkte						
Sonde 1	Uhrzeit	Zeit [s]	Leitf. [µS/cm]	Temp.[°C]	Geschw.[m/s] *)	
Messbeginn	15:10:26	0	754.0	9.3		
Durchgangsbeginn	15:13:29	183	754.0	9.2	0.273	
Konzentrationsmaximum	15:15:04	178	1460.0	9.2	0.180	
Durchgangsende	15:25:28	902	755.0	9.2		
Messende	15:25:28	902	755.0	9.2		
Sonde 2	Uhrzeit	Zeit [s]	Leitf. [µS/cm]	Temp.[°C]	Geschw.[m/s] *)	
Messbeginn	15:10:26	0	758.0	9.3		
Durchgangsbeginn	15:13:33	187	758.0	9.3	0.267	
Konzentrationsmaximum	15:14:58	172	1473.0	9.2	0.184	
Durchgangsende	15:25:28	902	758.0	9.2		
Messende	15:25:28	902	758.0	9.2		

*) Geschwindigkeit = Lösungsstrecke/ Zeit seit Messbeginn

Anzahl der Messpunkte	: 902	
Messintervall	: 1 s	
	Sonde 1	Sonde 2
Maximum Temperatur	9.3 °C	9.3 °C
Minimum Temperatur	9.1 °C	9.2 °C
Grundleitfähigkeit	754.0 µS/cm	758.0 µS/cm

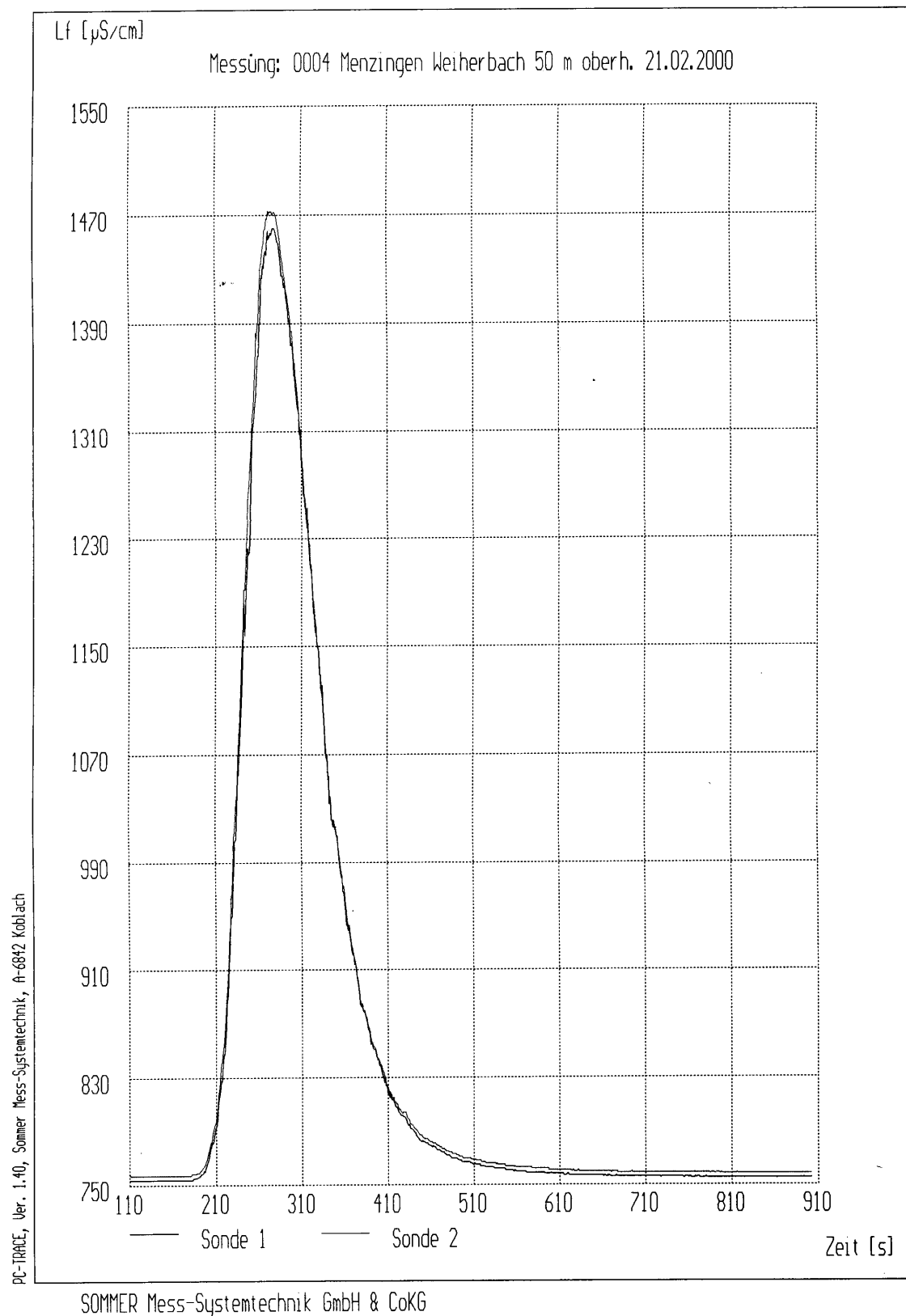


Abbildung I-2: Tracerdurchgangskurve Weiherbach

4. Brotenaubach / Brotenau (Messung 18)

Der Brotenaubach ist ein Schwarzwaldgewässer mit einer geringen Hintergrundleitfähigkeit. Zum Zeitpunkt der Messung lagen umgestürzte Bäume im Bach, die Aufstau und Retention bewirkten, jedoch auch die Turbulenz des Fließens erhöhten (Abbildung I-3). Die Durchmischungsstrecke war 200 m lang. Es wurden 7 kg Salz eingegeben. Die Messsonden waren im Querschnitt stabil an Stangen befestigt (Messprotokoll und Tracerdurchgangskurve in Tabelle I-4 und Abbildung I-4).



Abbildung I-3: Umgestürzte Bäume im Brotenaubach

Die von den beiden Sonden erzeugten Tracerdurchgangskurven zeigen einen gleichmäßigen Anstieg und Abfall der elektrischen Leitfähigkeit. In der Spitze betrug der Anstieg der Leitfähigkeit $\sim 120 \mu\text{S}/\text{cm}$. Bei Sonde 1 wurde ein Durchfluss von 583 l/s berechnet, für Sonde 2 von 578 l/s (Mittel 580 l/s). Der relative Unterschied der Messwerte beträgt weniger als 1 %. Die Durchmischung des Tracers war somit sehr gut und das Messergebnis entsprechend zuverlässig.

Tabelle I-4: Messprotokoll Brotenaubach

Messprotokoll : A B F L U S S M E S S U N G – Salzverdünnungsverfahren

Datei Name: C:\SALZ\MESSUNG\0005\10114.MES

letzte Bearbeitung: 28.02.2000 um 17:55:46

Station	: 0005	Gewässer	: Brotenaubach			
Messort	: Brotenaubach	Eingabeort	: 200 m oberh.			
Messtrupp	: 0001	Messgerät-Nr	: 00			
Datum	: 28.02.2000					
Bemerkungen	: eingelesen von MRS					
Pegelstand	Anfang : 17.0 cm	Mittel	: 17.0 cm			
	Ende : 17.0 cm					
Abfluss Sonde 1	: 582.7 l/s	rel. Fehl 1/2	: 0.8 %			
Sonde 2	: 578.2 l/s	Mittel	: 580.4 l/s			
Schlüsselkurve	: ----- l/s	rel. Fehl SK/1	: ----- %			
		rel. Fehl SK/2	: ----- %			
Eingabeuhrzeit	: 13:55:22	Indikatormenge	7.00 kg			
		Lösungsstrecke	200.0 m			
Eichkoeff. Sonde 1	0.50322	Eichkoeff. Sonde 2	0.49574			
Eichkorrel. Sonde 1	0.99991	Eichkorrel. Sonde 2	0.99996			
Eichtemp. Sonde 1	6.7 °C	Eichtemp. Sonde 2	6.8 °C			
Tabelle der Eichpunkte						
Zugabevolumen	: 0.5 ml	Zugabekonzentration	: 10,0 g/l			
Nr.	Volumen [ml]	Konzen. [mg/l]	Sonde 1 Leitf. [µS/cm]	Sonde 2 Leitf. [µS/cm]	Sonde 1 Fehler %	Sonde 2 Fehler %
1	250.0	0.0	33.0	29.0	0	0
2	250.5	20.0	72.0	69.0	2	1
3	251.0	39.8	113.0	110.0	-1	-1
4	251.5	59.6	151.0	149.0	0	0
Tabelle der wichtigsten Punkte						
Sonde 1	Uhrzeit	Zeit [s]	Leitf. [µS/cm]	Temp.[°C]	Geschw.[m/s] *)	
Messbeginn	13:55:22	0	31.0	5.5		
Durchgangsbeginn	14:13:19	1077	37.0	5.6	0.186	
Konzentrationsmaximum	14:15:16	1194	149.0	5.6	0.168	
Durchgangsende	14:29:54	2072	31.0	5.6		
Messende	14:29:54	2072	31.0	5.6		
Sonde 2	Uhrzeit	Zeit [s]	Leitf. [µS/cm]	Temp.[°C]	Geschw.[m/s] *)	
Messbeginn	13:55:22	0	27.0	5.6		
Durchgangsbeginn	14:13:14	1072	33.0	5.6	0.187	
Konzentrationsmaximum	14:15:18	1196	147.0	5.6	0.167	
Durchgangsende	14:29:54	2072	28.0	5.6		
Messende	14:29:54	2072	28.0	5.6		

*) Geschwindigkeit = Lösungsstrecke/ Zeit seit Messbeginn

Anzahl der Messpunkte	: 2072	
Messintervall	: 1 s	
	Sonde 1	Sonde 2
Maximum Temperatur	5.7 °C	5.7 °C
Minimum Temperatur	5.4 °C	5.6 °C
Grundleitfähigkeit	31.0 µS/cm	27.0 µS/cm

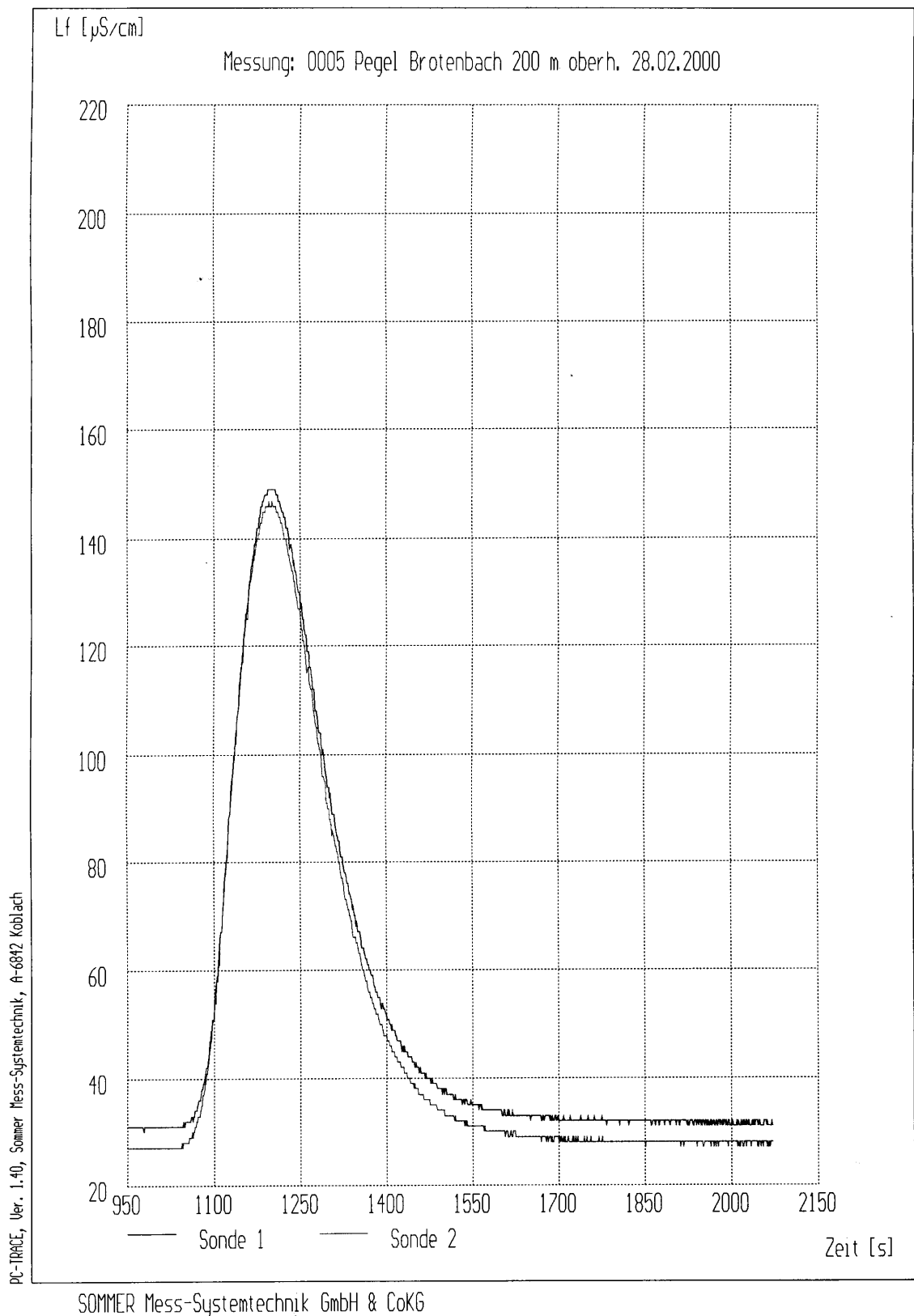


Abbildung I-4: Tracerdurchgangskurve Brotenaubach

Anhang II

Beispiel einer Durchflussmessausrüstung

Von verschiedenen Herstellern werden Ausrüstungen für Salzverdünnungsmessungen angeboten. Diese enthalten i.a. alle notwendigen Gerätschaften einschließlich eines Rechners zur Erfassung und Auswertung der Messergebnisse. Als Beispiel einer solchen Ausrüstung wird im Folgenden der Durchflussmesskoffer der Firma Sommer Mess-Systemtechnik, Koblach (Österreich) beschrieben.

Der Messkoffer besteht aus folgenden Komponenten:

- 1 microprozessorgesteuertes Durchflussmessgerät (MRS-4 TRACE) (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**)
- Leitfähigkeitssonden mit 10 m langen Kabeln und Sondengewichten
- Eichzubehör (Präzisionspipette, Messzylinder 250 ml, Messkolben 250 ml, Messkanne 500 ml, Flasche für die Kalibrierlösung)
- 1 Ladegerät für die Akkus
- 1 Auslekabel zum PC
- 1 Beschreibung

Technische Informationen:

- Betriebsdauer: 1 Arbeitstag (bei Start mit vollen Akkus)
- maximale (gesamte) Messzeit: 200 Minuten
- Informationen zur Standardeinstellung und Änderung von Geräteparametern (siehe MRS-4 TRACE Handbuch, Seite 9)

Weitere technische Daten des Gerätes MRS-4 TRACE und der Leitfähigkeitssonden können in der Gerätebeschreibung entnommen werden.

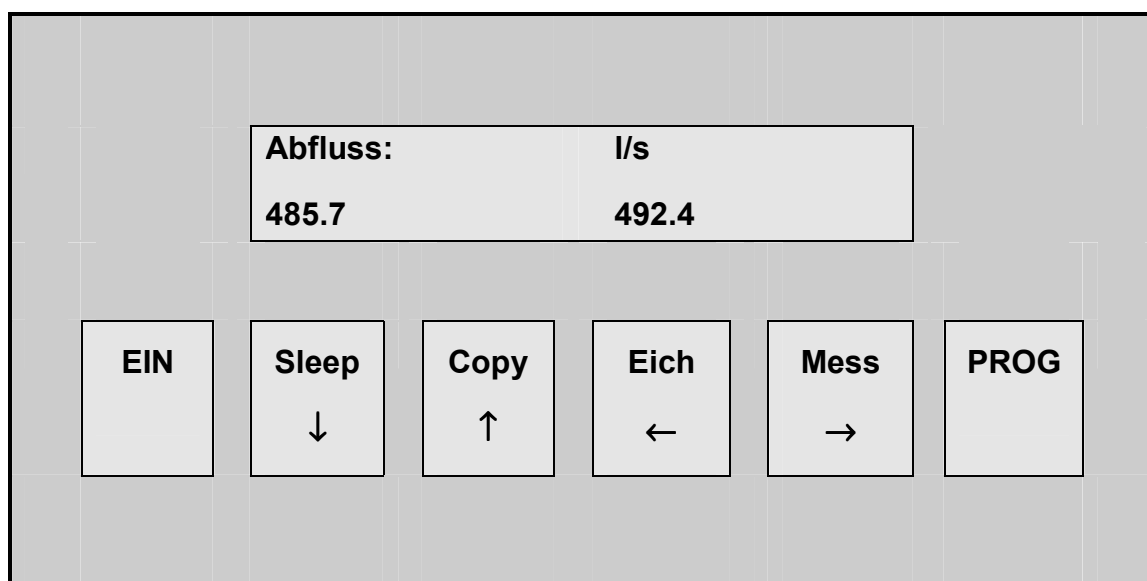
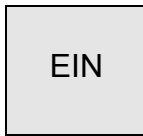


Abbildung II-1: Ansicht des Durchflussmessgerätes MRS-4 TRACE

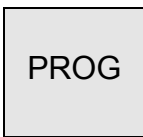
Bedienungsschritte des MRS-4 TRACE

1. Einschalten des Geräts



Drücken der EIN-Taste (mindestens 1 Sekunde lang).

2. Eingabe von Messparametern



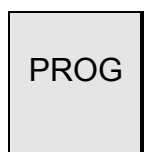
Das Drücken der PROG-Taste ermöglicht folgende Eingaben (Reihenfolge wie angegeben). Zwischen jeder Eingabe wird die PROG-Taste gedrückt.

STATION: _ _ _ _	Messstellen-Nr. (geräteintern)
NUM: _ _ _ _	beliebige numerische Angabe (z. B. Messtrupp)
EICHF 1: _ . _ _ _	bekannten Eichkoeffizienten eingeben oder ignorieren
EICHF 2: _ . _ _ _	bekannten Eichkoeffizienten eingeben oder ignorieren
AUSGVOL: _ 250	Ausgangsvolumen für Kalibrierung (hier: 250 ml)
ZUGVOL: _ _ 0.5	Zugabevolumen der Kalibrierlösung (hier 0.5 mg)
ZUGKONZ: _ 10.0	Konzentration der Kalibrierlösung (hier 10 g/l)
MENGE: _ _ _ . _	vorgesehene Salzmenge zur Einspeisung [kg]
STRECKE: _ _ _ _	Durchmischungsstrecke [m]
PEGEL: _ _ _ _	Pegelstand [cm] (unbekannt = 0)
SONDE2: 1	Einsatz von 2 Sonden = 1 (bei Einsatz von nur einer Sonde 0 eingeben)
XXX.X l/s	Abflussanzeige (vor der Messung ignorieren)

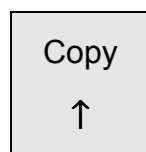
Die Eingaben können vorwärts und rückwärts angesehen und erforderlichenfalls verändert werden.



vorwärts



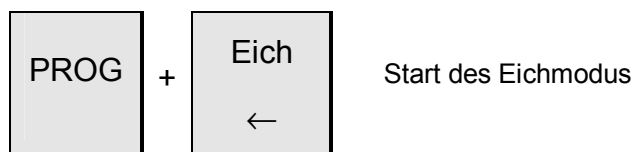
+



rückwärts

3. Kalibrierung

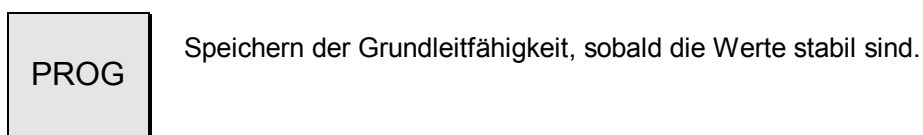
Die Leitfähigkeitssonden werden in das Eichgefäß gehalten, das genau 250 ml Wasser enthält.



Das Anzeigefenster zeigt:

GRUNDL:	250 ml
XXXX	XXXX

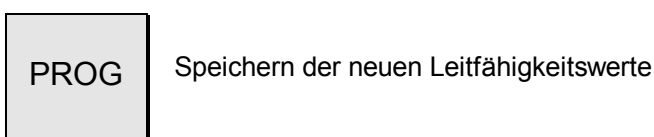
Die angezeigten 250 ml entsprechen dem eingegebenen Ausgangsvolumen für die Kalibrierung. In der zweiten Zeile werden die gemessenen Grundleitfähigkeiten der beiden Messsonden angezeigt (links Sonde 1, rechts Sonde 2).



Das Anzeigefenster zeigt:

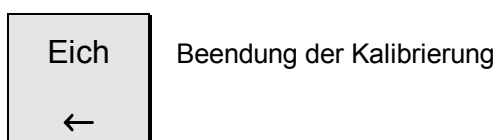
VOL1:	250.5 ml
XXXX	XXXX

Zugabe von 0.5 ml (500 µl) Eichlösung mit einer Präzisionspipette. Die angezeigten 250.5 ml entsprechen dem Ausgangsvolumen + Zugabevolumen mit der Messpipette.



Der Vorgang der Zugabe von 500 µl Kalibrierlösung und Messung der elektrischen Leitfähigkeit wird mehrmals wiederholt (mindestens 3 mal, maximal 9 mal).

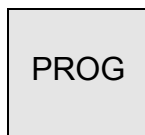
Wird versucht, einen Messwert ohne vorherige Zugabe von Eichlösung zu speichern, so erscheint die Meldung "Zugabe fehlt". Diese Meldung wird mit der PROG-Taste bestätigt, anschließend die 500 µl Eichlösung zugegeben und mit der Kalibrierung fortgefahren.



Das Anzeigefenster zeigt das Ergebnis der Kalibrierung:

EF: X.XXX	X.XXX
EK: X.XXX	X.XXX

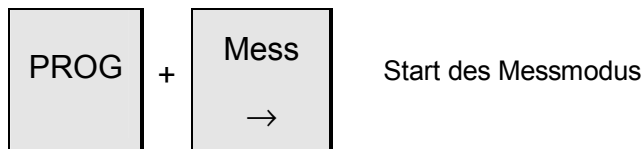
In der ersten Zeile sind die Eichfaktoren (Eichkoeffizienten) [g/l/μS] für die beiden Messsonden angegeben und in der zweiten Zeile die Eichkorrelationen [-]. Durch den Korrelationskoeffizienten wird die Genauigkeit der Eichung angezeigt. Die Eichung ist um so besser, je näher dieser bei 1.000 liegt. Er sollte mindestens 0.998 betragen. Falls eine Wiederholung der Eichung erforderlich ist, kann sie mit der Tastenkombination "PROG" + "Eich" ab Messung der Grundleitfähigkeit wiederholt werden. Um die Eichung mit einer anderen Grundleitfähigkeit zu wiederholen, muss das Gerät mit "PROG" + "Sleep" ausgeschaltet und erneut gestartet werden.



Messung der aktuellen elektrischen Leitfähigkeit. Das Gerät befindet sich im Anzeigemodus (siehe Bedienungsschritt 5).

4. Messung

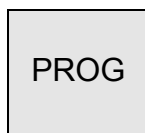
Nachdem die Messsonden im Gewässer installiert wurden, kann die Messung gestartet werden.



Das Anzeigefenster zeigt:

Meß XXX min:	<PROG>
XXXX	XXXX

In der oberen Zeile wird die maximale Messdauer [min] angegeben, die noch gespeichert werden kann. Die untere Zeile zeigt die aktuellen Leitfähigkeiten an (links Sonde 1, rechts Sonde 2). Liegen keine gültigen Eichkoeffizienten vor, erscheint die Meldung "Eichung fehlt!" und fordert zur Kalibrierung der Messsonden auf (siehe Bedienungsschritt 3).

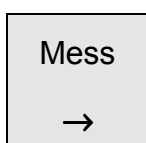


Start der Messung

Das Anzeigefenster zeigt:

XXXX	XXXX
XXXX	XXXX

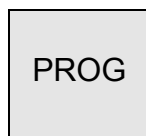
In der ersten Zeile wird die Differenz der aktuellen Leitfähigkeit zur Grundleitfähigkeit angezeigt, in der zweiten die aktuell gemessene (links Sonde 1, rechts Sonde 2). Sobald die Grundleitfähigkeit wieder erreicht ist, kann die Messung beendet werden.



Beendigung der Messung

Das Messgerät berechnet den gemessenen Durchfluss [l/s], der im Anzeigefenster erscheint (links Sonde 1, rechts Sonde 2):

Abfluß	l/s
XXX.X	XXX.X

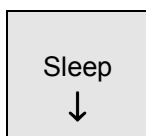


Die Anzeige wird beendet, worauf die aktuelle elektrische Leitfähigkeit im Anzeigefenster erscheint. Das Gerät befindet sich im Anzeigemodus (siehe Bedienungsschritt 5).

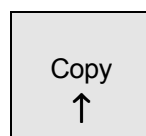
Eine Messung kann durch die Tastenkombination "PROG" + "Mess" ohne neue Eichung wiederholt werden. Bei einer neuen Messung an einer anderen Messstelle, muss das Gerät neu gestartet, neue Eingaben eingegeben und eine neue Kalibrierung durchgeführt werden.

5. Anzeigemodus

Nach Beendigung der Ergebnisanzeige einer Eichung oder Messung durch die PROG-Taste, befindet sich das Messgerät im Anzeigemodus.



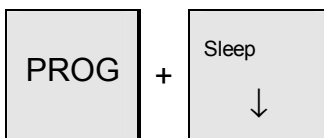
Mit den beiden Tasten (durch "rauf- und runterscrollen") können verschiedene Anzeigen bewirkt werden (siehe unten).



Mögliche Anzeigen:

Abfluss	l/s	Die zuletzt ermittelten Durchflussmengen [l/s] (links Sonde 1, rechts Sonde 2)
XXX.X	XXX.X	
EF: X.XXX	X.XXX	Eichfunktionen und Eichkoeffizienten [-] (links Sonde 1, rechts Sonde 2)
EK: X.XXX	X.XXX	
Leitf.	uS	aktuelle elektrische Leitfähigkeiten [$\mu\text{S}/\text{cm}$] (links Sonde 1, rechts Sonde 2)
XXXX	XXXX	
Leitf. 2	uS	Leitfähigkeit der Sonde 2 [$\mu\text{S}/\text{cm}$]
XXXX	XXXX	
Temp. 1	Temp 2	aktuelle Temperaturen [$^{\circ}\text{C}$] (links Sonde 1, rechts Sonde 2)
XXXX	XXXX	
Batterie	uS	Akkuspannung [V]
XXXX	XXXX	

6. Abschalten des Geräts



7. Datenübertragung und Auswertung mit PC-TRACE

Die vom Messgerät MRS-4 TRACE aufgezeichneten Daten sind mit Hilfe des Programms PC-TRACE auf einen PC übertragbar. Messprotokoll, Eichreihe sowie Tracerdurchgangskurve können ausgedruckt werden (Anhang I). Das Messprotokoll enthält alle wesentlichen Informationen zur Durchflussmessung und ist wie folgt gegliedert:

- Protokollkopf: Dateiname mit Pfadangabe und Datum der letzten Bearbeitung
- Allgemeine Angaben: Station, Messort, Messtrupp, Datum, Gewässer, Eingabeort, Messgerät-Nr., Bemerkungen, Pegelstand
- Ermittelte Durchflusswerte für Sonde 1 und 2 sowie das arithmetische Mittel der beiden Werte und deren relative Fehler. Falls Eingaben zur Schlüsselkurve (W-Q-Beziehung) erfolgten, wird der aus dem Wasserstand ermittelte Durchfluss angegeben und der relative Fehler zu den Messungen mit Sonde 1 und 2.
- Angaben zur Versuchsdurchführung: Eingabeuhrzeit, Indikatormenge, Länge der Lösungstrecke

- Angaben zur Eichung beider Sonden: Eichkoeffizient, Eichkorrelation, Eichtemperatur
- Tabelle der Eichpunkte mit Angabe des Zugabevolumens und Zugabekonzentrats
- Tabelle der wichtigsten Punkte: Angaben zur Versuchszeit, Leitfähigkeit und Temperatur bei Messbeginn, Durchgangsbeginn, Konzentrationsmaximum, Durchgangsende und Messende. Außerdem wird die Fließgeschwindigkeit zum Durchgangsbeginn und Konzentrationsmaximum angegeben. Dies setzt jedoch voraus, dass die Messung zeitgleich mit der Einspeisung gestartet wurde und die genaue Länge der Durchmischungsstrecke bekannt ist.
- Angabe der aufgezeichneten Messpunkte und des Messintervalls sowie Minimum- und Maximumtemperatur und Grundleitfähigkeit der beiden Sonden.

Das Programm enthält ein Datenarchiv, in dem alle Messungen sowie Kalibrierungen nach Messstellen sortiert und chronologisch gespeichert werden. Außerdem ermöglicht es durch Anschluss eines Laptops an das Gerät MRS-4 TRACE die Überwachung von laufenden Messungen am Gewässer vor Ort.

Die Struktur des Programms ist im Folgenden dargestellt, nähere Erläuterungen zur Anwendung sowie technische Hinweise finden sich im PC-TRACE Benutzerhandbuch. Die folgenden Tabellen beschreiben die Anwendungsschritte in den einzelnen Ebenen des Programms. Eine Übersicht über die Programmebenen gibt Tabelle II-1. Die Befehle im Programm sind fett gedruckt, Verweise auf entsprechende Textstellen im Benutzerhandbuch sind in Klammern angegeben. Die Programmbefehle "Programm beenden" und "Esc" sind in der Tabelle nicht extra aufgeführt.

Tabelle II-1: Struktur des Programms PC-TRACE in den ersten drei Ebenen

Ebene 1	Ebene 2	Ebene 3
PC TRACE -Abfluss-messung	Messung (Handbuch S. 8) → Eingaben (Handbuch S. 8-10)	Eichen (PC-gesteuerte Eichung), (Handbuch S. 11-12)
		Auswahl (Messstellenwahl aus dem Archiv), (Handbuch S. 8-9)
		Messen (PC-gesteuerte Messung), (Handbuch S. 13-14)
	Archiv, (Handbuch S. 16)	Fest (feste Messstellen), (Handbuch S. 16)
		Frei (freie Messungen), (Handbuch S. 17)
		Von MRS (MRS-Messungen), Handbuch S. 22)
		Zeitbereich (Messungen aus einem bestimmten Zeitbereich), (Handbuch S. 17)
		Archiv-Auswertung (Handbuch S. 18)
	Einstellungen (Grundeinstellungen des Messprogramms (Handbuch S. 5-6)	Messstellen (Verzeichnis fester Messstellen), (Handbuch S. 7)
	Mess Einlesen (Einlesen der Daten vom MRS-4 TRACE)	
PRN TRACE - Druckerauswahl	Gerät, Port, X-Punkte, Y-Punkte	
FM - File-Manager	Quelle, Ziel, Anzeigen, Kopieren, Verschieben, Löschen	

Einzelne Programmpunkte sind weiter unterteilt. Die Optionen unter dem Befehl "Messung" sind in Tabelle II-2, die unter "Archiv" in Tabelle II-3 und die unter "Einstellungen" in Tabelle II-4 dargestellt.

Das Programm PC-TRACE archiviert Messungen in drei verschiedenen Bereichen (feste oder freie Messstellen und Messungen vom MRS-4 TRACE). Aus dem Archiv können außerdem Messungen für definierte Zeitbereiche aufgerufen werden. Der Bereich, in dem zuletzt gearbeitet wurde, erscheint automatisch in Ebene 3 auf dem Bildschirm. Von dort kann beliebig in anderen Bereiche gewechselt werden. Durch die Auswahl einer einzelnen Messung wird der Archiv-Auswertungs-Modus erreicht. Innerhalb dieses Programmmodus kann die Eichung einer archivierten Messung geändert und einige Eingaben zur Messung (Ausgangsvolumen, Zugvolumen, Zugkonzentration) können korrigiert werden. Nicht direkt veränderbar sind jedoch die Eichkoeffizienten. Außerdem kann die Messkurve betrachtet und geändert werden (z. B. Ausreißer korrigieren, Integrationsgrenzen oder Grundleitfähigkeit ändern).

Tabelle II-2: Struktur der PC-gesteuerten Messung und Auswertung mit PC-TRACE.

Ebene 2	Ebene 3	Ebene 4	Ebene 5	Ebene 6	Ebene 7
Messung (Handbuch S. 8) → Eingaben (Handbuch S. 8-10)	Messen (PC-gesteuerte Messung), (Handbuch S. 13-14)	Messung starten (Darstellung der Messung am Bildschirm)	Messung beenden	Auswerten , (Handbuch S. 15)	Messen / Laden (Messung wiederholen bzw. laden, siehe Archiv-Auswertung)
					Eingaben
					Eichen (Eichtabelle und -Grafik)
					Messkurve
					Drucken
					Speichern (Speicherung im Archiv)
			Skalieren (Skalierung der Y-Achse)		
		Skalieren (Skalierung der Y-Achse)			

Tabelle II-3: Struktur des Programmmenüs "Archiv" im Programm PC-TRACE

Ebene 2	Ebene 3	Ebene 4	Ebene 5	Ebene 6
Archiv , (Handbuch S. 16)	Fest (feste Messstellen) (Handbuch S. 16) *	Wahl einer Messstelle und Messung (Cursor und Return)	Frei (freie Messungen laden)	
			von MRS (MRS-Messungen laden)	
			Messung Löschen	
			Eichungen	Eichung Löschen
				Datei (Speicherung der Eichung im ASCII-Format)
		Frei (freie Messungen laden)		
		von MRS (MRS-Messungen laden)		
		Zeitbereich		
	Frei (freie Messungen), (Handbuch S. 17) *	Fest (feste Messungen laden)		
		von MRS (MRS-Messungen laden)		
		Messung löschen		
		Eichungen	Eichung Löschen	
			Datei (Speicherung der Eichung im ASCII-Format)	
	von MRS (MRS-Messungen), Handbuch S. 22) *	Fest (feste Messungen laden)		
		Frei (freie Messungen laden)		
		Messung löschen		
		MRS-Löschen		
	Zeitbereich (Messungen)	Frei (freie Messungen laden)		

	aus einem Zeitbereich), (Handbuch S. 17) *			
--	---	--	--	--

Fortsetzung von Tabelle II-3: Struktur des Programmenüs "Archiv" im Programm PC-TRACE

Ebene 2	Ebene 3	Ebene 4	Ebene 5	Ebene 6
		von MRS (MRS-Messungen laden)		
		Messung löschen		
		Drucken (ausgewählte Messungen drucken)		
	Archiv-Auswertung (Handbuch S. 18-21)	Laden (andere Messung laden)		
		Eingaben (Eingaben anzeigen/ ändern), (Handbuch S. 18)		
		Eichen (Handbuch S. 18)	Laden (andere Messung laden)	
			Eingaben (Eingaben anzeigen/ ändern), (Handbuch S. 18)	
			Grafik (Eichgrafik zeigen)	
			Auswertung (Auswertung zeigen)	
			Eich Vorgaben (Eichvorgaben ändern)	
		Messkurve (zeigen/ ändern), (Handbuch S. 18-19)		
		Drucken (Alles, Protokoll, Grafik oder Bildschirmausgabe), (Handbuch S. 20-21)		
		Speichern (Handbuch S. 21)		

Tabelle II-4: Struktur des Programmenüs "Einstellungen" für die Messung mit PC-TRACE

Ebene 2	Ebene 3	Ebene 4	Ebene 5
Einstellungen (Grundeinstellungen des Messprogramms), (Handbuch S. 5-6)	Messstellen (Verzeichnis fester Messstellen), (Handbuch S. 7)	speichern (Messstelle speichern)	
		Auswahl (Messstelle aus dem Archiv auswählen)	
		Messst. löschen	
		Clear (neue Eingabemaske mit leeren Feldern)	
		Schlüsselkurve (W-Q-Beziehung), (Handbuch S. 7)	Speichern
			Löschen
			Clear Eingabe (neue Eingabemaske mit leeren Feldern)

8. Geräteanforderungen

Die Arbeit mit dem Gerät MRS-4 TRACE diene auch dazu, Erfahrungen zu sammeln und zu untersuchen, welche Anforderungen an derartige Geräte zu stellen sind. Der Praxistest hat ergeben, dass über die Eigenschaften des Gerätes hinaus noch Folgendes notwendig ist:

1. Die Daten der Durchgangskurve sollen nur als Graphik, sondern auch als ASCII-Tabelle zugänglich sein.
2. Hintergrundleitfähigkeit und Integrationsgrenzen dürfen nicht nur in der Grafik am Bildschirm angezeigt werden, sondern müssen auch digital ausgegeben werden, da diese Werte entscheidenden Einfluss auf die Berechnung des Durchflusses haben können.
3. In der Benutzeranleitung muss offen gelegt sein, nach welchen Kriterien die Integrationsgrenzen bestimmt werden.
4. Das Format (Hochformat) für den Ausdruck der Tracerdurchgangskurve ist oft ungünstig, weil dadurch Schwankungen im Kurvenverlauf werden optisch verfälscht werden können. Es muss möglich sein, auch Querformat zu wählen.
5. Die Eichkoeffizienten müssen nach der Messung eingegeben bzw. verändert werden können.
6. Das Messprotokoll muss auch am Bildschirm angezeigt werden.
7. Die Steckerverbindungen müssen wasserdicht und die Beschriftung der Sonden wasserfest sein.
8. Die Datenübertragung zum PC muss problemlos möglich sein. (Das getestete Gerät schaltete sich bei dem Programmbefehl "Messung einlesen" selbständig aus und verursachte im PC eine Fehlermeldung. Das Problem konnte umgangen werden, wenn das Gerät sofort nach dem Ausschalten, vor Erscheinen der Fehlermeldung manuell wieder eingeschaltet wurde.)