

Abflussmengenbestimmung mit dem Verdünnungsverfahren

Manfred Spreafico

Abstract

Determination of discharge by dilution methods

The conventional current meter method is not suitable to measure discharge in an appropriate way in many steep and turbulent torrents and rivers. Dilution methods can very often help in such situations. The dilution methods used by the Swiss National Hydrological and Geological Survey are briefly described and some conclusions pointed out. The experiences gained in Nepal show that these operational methods can be fully integrated into the operational hydrological surveys in developing countries.

Keywords: discharge measurement, dilution methods, application of tracer techniques

1 Einleitung

Die akkurate Abflussbestimmung in steilen, turbulenten Flüssen und Bächen ist schwierig. Komplexe Abflussverhältnisse und grobblockige, schwer zu vermessende Gerinne sowie vielfach schlechte Zugänglichkeit erschweren die Abflussmessung. Sedimenttransport und Schwimmstoffe bilden zusätzlich weitere Erschwernisse.

Die hydraulische Berechnung des Abflusses ist infolge der oftmals nur ungenau erfassbaren Gerinnedaten äusserst schwierig oder unmöglich. Von den heute zur Verfügung stehenden Messmethoden, -geräten und -einrichtungen wie Messüberfälle, Venturis, hydrometrischer Flügel, Jensstab, Ultraschallmessung und Verdünnungsverfahren ist vielfach nur letzteres mit Erfolg anzuwenden. Der Einbau von Messüberfällen und -kanälen oder von hydraulischen Konstruktionen zur Verbesserung der Strömungsverhältnisse ist teuer und schwer realisierbar. Der Einsatz von hydrometrischen Flügeln setzt die Bestimmbarkeit des Querprofils an der Messstelle und Brücken, Messstege oder Seilflügelanlagen voraus, da die Gewässer vielfach nicht mehr durchwatet werden können. Hohe Fliessgeschwindigkeiten und häufig starker Feststofftransport sind weitere Faktoren, welche den Einsatz der Flügelmessung einschränken. Deshalb sind auch dem Einsatz des Jensstabes schnell Grenzen gesetzt. Messmethoden basierend auf der Ultraschalltechnik sind nach wie vor teuer und ebenfalls schwer einzusetzen in gebirgigen Fliessgewässern. Für die Abflussmessung in solchen Fliessgewässern bietet sich die Verdünnungsmethode an, bei welcher der durchflossene Flussquerschnitt nicht bekannt sein muss und bei der keine beweglichen Teile ins Gewässer gebracht werden müssen.

2 Die Abflussmengenbestimmung mit dem Verdünnungsverfahren

Das Verfahren beruht auf der Bestimmung der Verdünnung einer bestimmten Menge eines Markierstoffes, den man ins Fliessgewässer einspeist. Bei der Messung wird wie folgt vorgegangen:

- Eine genau definierte Menge eines geeigneten Markierstoffes (Tracer) wird am Anfang einer Messstrecke mit turbulenter Strömung mit einem genau festgelegten Eingabeprozedere in das Gewässer eingespiessen.
- Am unteren Ende der Messstrecke wird die Konzentration des eingespiessenen Tracers gemessen und daraus die Verdünnung bestimmt. Mit Hilfe dieses Verdünnungswertes kann dann die Abflussmenge berechnet werden.

Beim Verdünnungsverfahren können zwei Methoden unterschieden werden:

a) *Methode der Momentaneinspeisung* (Integrationsmethode, Totale Rückgewinnungsmethode, slug injection)

Bei der Methode mit Momentaneinspeisung wird dem zu messenden Fließgewässer ein bestimmtes Volumen einer konzentrierten Markierlösung momentan beigegeben. Nach einer Fließstrecke, die lang genug ist, eine homogene Durchmischung zu gewährleisten, werden während dem ganzen Durchgang der Tracerwolke Messungen durchgeführt. Dabei muss die exakte Tracermenge bekannt sein, sodann muss die gesamte Masse des eingegebenen Tracers am Messquerschnitt vorbeifliessen und erfasst werden können. Bei der Methode der Momentaneinspeisung wird keine spezielle Einspeiseapparatur benötigt; der Tracer kann in einem Behälter gelöst und damit eingegeben werden. Die Lage des Messpunktes im Messquerschnitt spielt keine Rolle, da angenommen wird, dass bei vollständiger Durchmischung an jedem Punkt die gleiche Menge des Tracers vorbeifliesst.

Der Abfluss wird dabei wie folgt berechnet:

$$Q = \int_{t_A}^{t_E} \frac{M}{C(t) \cdot dt} \quad [1]$$

Q	: Abflussmenge	(l/s)
M	: Eingegebene Tracermenge	(g)
C(t)	: Gemessene Tracermenge	(g/l)
t _A	: Beginn des Tracerdurchganges im Messpunkt	
t _E	: Ende des Tracerdurchganges im Messpunkt	
t	: Zeit	(s)

b) *Methode mit zeitlich konstanter Einspeisemenge*

Bei der Methode mit zeitlich konstanter Einspeisung des Tracers wird während einer bestimmten Zeit eine genau dosierte Menge der Initiallösung der Konzentration C₁ eingespritzt. Die Einspeisezeit muss solange bemessen sein, dass während einer gewissen Zeit durch den ganzen Probenahmequerschnitt eine gleichmässig verdünnte Konzentration C₂ fliesst. Nach Erreichung dieser sogenannten Plateaukonzentration bleibt dieselbe erhalten solange der Abfluss und die Einspeisemenge konstant bleiben. Im Gegensatz zur Methode mit Momentaneinspeisung braucht bei dieser Methode nicht die ganze Tracerdurchgangskurve gemessen zu werden, sondern nur die Plateaukonzentration. Die Abflussmenge ist wie folgt zu bestimmen:

$$Q = q \cdot \frac{C_1}{C_2} \quad [2]$$

Q	: Abflussmenge	(l/s)
q	: Konstante Tracereinspeisemenge	(l/s)
C ₁	: Konzentration der Einspeiselösung	(g/l)
C ₂	: Tracerkonzentration im Entnahmequerschnitt	(g/l)

Für das Verdünnungsverfahren eignen sich insbesondere Salze und fluoreszierende Tracer.

An einen geeigneten Tracer für die Abflussmengenbestimmung werden folgende Anforderungen gestellt:

- Der Tracer sollte leicht und vollständig in Bachwasser löslich sein.
- Der Tracer sollte eine gute chemische Stabilität aufweisen.
- Es sollte weder eine Adsorption noch eine Desorption des Tracers an Sedimenten, Schwebstoffen, Wasserpflanzen oder organischen Inhaltsstoffen des Wassers stattfinden.
- Der Tracer soll in der verwendeten Konzentration weder die Wasserflora und -fauna noch den Menschen gefährden.
- Der Tracer soll lichtbeständig sein.
- Der Tracer soll möglichst pH-unabhängig sein.
- Die Eigenschaften des Tracers sollten temperaturunabhängig sein.
- Der Tracer sollte noch bei grosser Verdünnung nachweisbar sein.
- Der Tracer sollte billig sein.
- Der Tracer sollte im zu untersuchenden Gewässer überhaupt nicht, oder nur in sehr geringen Konzentrationen vorkommen.
- Die Auswertung der Proben sollte mit einfachen Mitteln durchgeführt werden können.

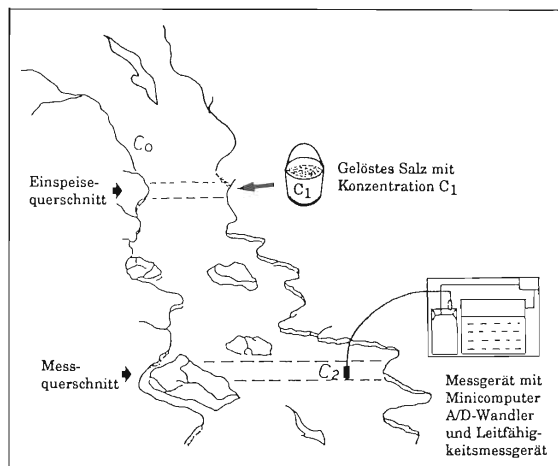
3 Die Methoden der Landeshydrologie und -geologie (LHG)

Die LHG benutzt sowohl die Methode der Momentaneinspeisung als auch die Methode mit konstanter Einspeisung.

3.1 Methode mit Momentaneinspeisung

Die LHG verwendet für diese Methode Kochsalz als Tracer (LHG 1994a). Eine bestimmte Menge Salz wird in einem Eimer gelöst und dem Gewässer möglichst schnell (Dirac'scher Stoss) vollständig beigegeben. Mit Hilfe eines Leitfähigkeitsmessgerätes wird am Ende der Durchmischungsstrecke der Verlauf der Salzkonzentration gemessen. Mittels eines Rechners erfolgt die Bestimmung der Abflussmenge direkt im Felde (Abb. 1, 2). Der hohe Salzbedarf von 2–5 kg pro m^3/s Abfluss, beschränkt die Anwendung der Methode auf Bäche mit Abflüssen bis zu etwa $5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Abb. 1. Schema der Anwendung der Methode mit Momentaneinspeisung bei Verwendung von Salz als Tracer



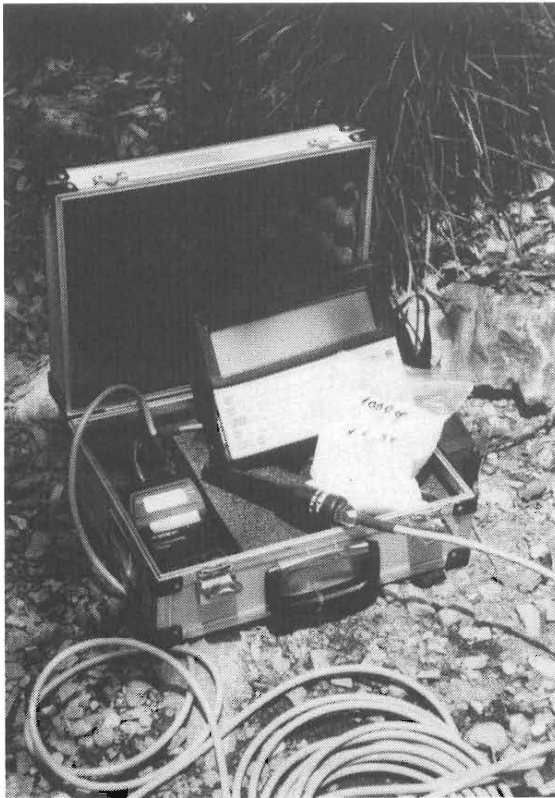


Abb. 2. Messausrüstung der LHG für die Methode der Momentaneinspeisung.

3.2 Methode mit konstanter Einspeisung

Die LHG benutzt diese Methode unter Verwendung von fluoreszierenden Tracern (LHG 1994b). Bei der konstanten Einspeisung wird während einer bestimmten Zeit eine genau dosierte Menge q einer Tracerinitiallösung der Konzentration C_1 mit Hilfe einer Mariott'schen Flasche oder eines Überlaufgefäßes dem Gewässer beigegeben (Abb. 3, 4). Die Einspeisezeit wird so festgelegt, dass sich am flussabwärts gelegenen Entnahmequerschnitt eine gleichbleibende

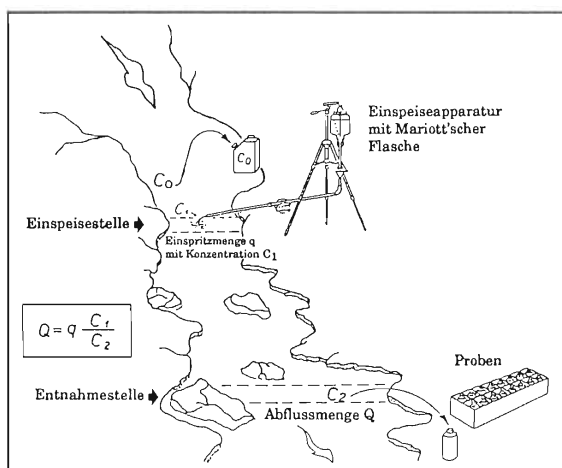


Abb. 3. Schema der Anwendung der Methode mit konstanter Einspritzung mit der Mariott'schen Flasche der LHG.

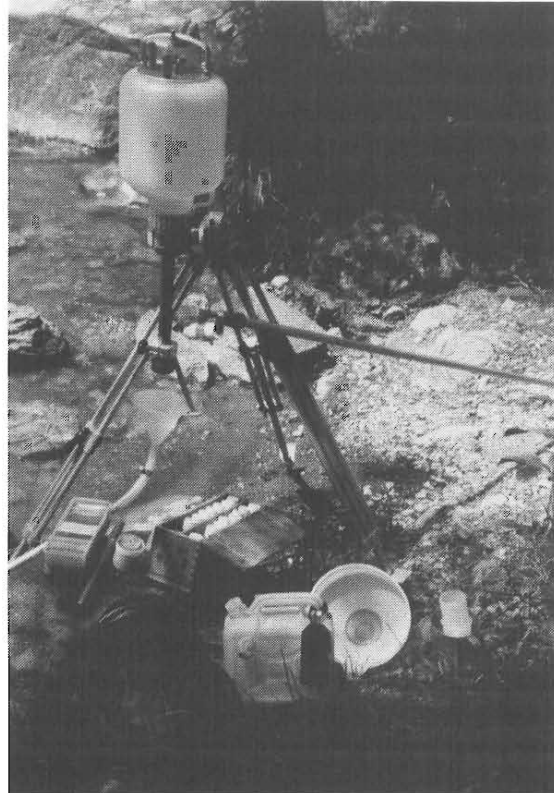


Abb. 4. Einspeiseausrüstung der LHG mit Mariott'scher Flasche.

verdünnte Konzentration C_2 (Plateaukonzentration) einstellt. Im Entnahmequerschnitt werden links- und rechtsufrig mit Probenahmeflaschen insgesamt 14 Wasserproben entnommen. Die Analyse der Proben und die Berechnung der Abflussmenge erfolgt dann im Labor der LHG (Abb. 5). Die LHG führt seit 60 Jahren Verdünnungsmessungen durch. Im Laufe der Zeit konnte das Gewicht der Apparaturen vermindert und die Menge der notwendigen Markierstoffe derart reduziert werden, dass heute Abflüsse bis etwa $100 \text{ m}^3/\text{s}$ mit handlichen Apparaturen gemessen werden können.

Als Tracer wurde zuerst Kochsalz, dann Natriumbichromat verwendet. Heute werden die Messungen vorwiegend mit Sulforhodamin G und Fluoreszein Natrium durchgeführt. Prinzipiell können aber auch andere fluoreszierende Tracer zum Einsatz gelangen.

Laborprotokoll für die Auswertung von Verdünnungsmessungen (LHG)

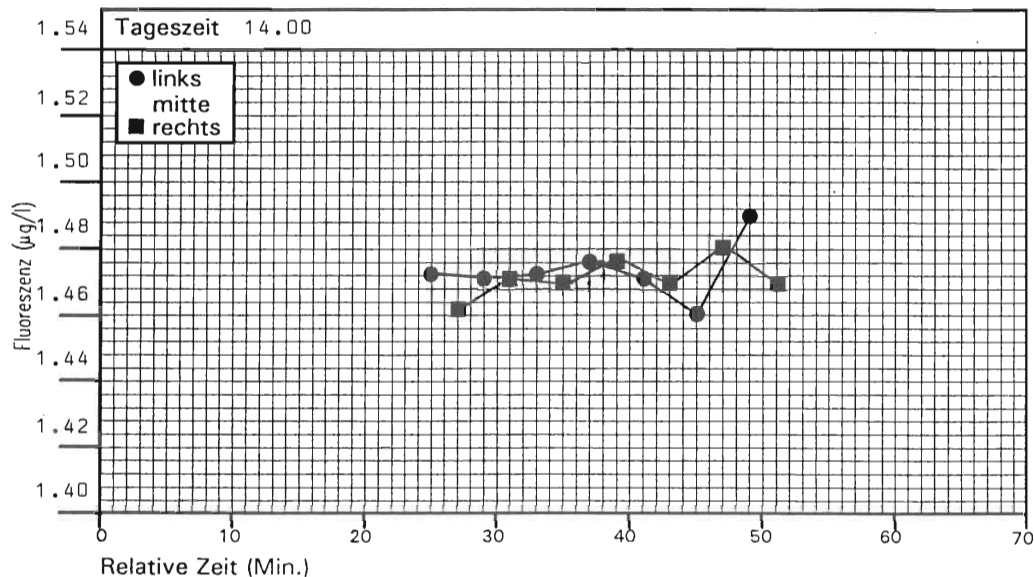
Wassermessung Nr. 73467 Gewässer: Allenbach
Datum: 8.6.1994 LHG-Station: Adelnboden

Spektrofluorometer-Analyse

Tracer: Uranin 10 % Tracermenge: 20 [g] $Q_{\text{(gesch)}}$ 4.00 [m³/s]
Bachwasserkanister Nr. 67042 Probenkistchen Nr. 71
Mariott'sche Flasche Nr. 4 Blende: 1.5 [mm]
Einspritzstelle 120 [m] fluss- abwärts- aufwärts des Pegels
Entnahmestelle 140 [m] fluss- abwärts- aufwärts des Pegels

Probenanalyse					Analyse der Initiallösung
Flaschennummer	links	Fluoreszenz der Proben mitte	rechts	Wiederh.	Fluoreszenz der Eichlösung...2. [µg/l] 1. Probe [mm] 2. Probe [mm] 3. Probe [mm] Durchschn. AUTO CONC.(....)
1	1.4726				
2			1.4672		
3	1.4699				
4			1.4759		
5	1.4770				
6			1.4705		
7	1.4851				Verdünnung der Initiallösung(A+B) 1. Verdünnungsfaktor ..400.... 2. Verdünnungsfaktor ..400.... 3. Verdünnungsfaktor
8			1.4802		$V_F = \dots\dots\dots = 160'000\dots$
9	1.4753				
10			1.4737		
11	1.4645				Fluoreszenz der verdünnten Initiallösung 1. Messung A=10.703 B=10.591 [µg/l] 2. Messung A=10.719 B=10.600 [µg/l] 3. Messung A=10.727 B=10.500 [µg/l] Durchschnitt $C_1 = \dots\dots\dots$
12			1.4813		
13	1.4911				
14			1.4764		
Summe	10.34		10.33		Kontrolle der eingespiessenen Tracermenge=..... [g]
Mittel C_2	1.48				

Fluoreszenz der Proben



Temperatur der Lösung: $T_{\text{(Mittel)}}$ 12 [°C] Einspritzrate q : 3.4791 [ml/s]
Abfluss $Q = \frac{0.00348 \cdot 160'000 \cdot 10.66}{1.48 \cdot 1000} = 4.02$ [m³/s] Pegel 1297.995 [m, m ü.M.]

Bemerkungen:

Feldbeamter: H. Hognier Auswertung: Name: M. Diem Datum: 9.6.94 Visum: *[Signature]*
Landeshydrologie und -geologie, 3003 Bern

Abb. 5. Auswertungsprotokoll der LHG-Verdünnungsmessung

4 Erfahrungen mit der LHG-Methode in Entwicklungsländern

Im Auftrag der Deutschen Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit transferierte die LHG ihre Methode nach Nepal. Die Feld- und Laboreinrichtungen wurden dupliziert und geringfügig an die speziellen Bedingungen in Nepal angepasst. Zusammen mit den nepalesischen Fachbeamten wurde in Kathmandu das Tracerlabor eingerichtet. Mit Hilfe von theoretischen und praktischen Ausbildungskursen in Nepal und der Schweiz wurden die nepalesischen Hydrologen in die Anwendung des Verdünnungsverfahrens eingeführt (SPREAFICO und GRABS 1993).

Das Feldtraining umfasste die folgenden Themen:

- Auswahl von geeigneten Flussabschnitten für das Verdünnungsverfahren
- Verfahren für die Abflussschätzung
- Bestimmung der Länge der Mischstrecke
- Ausführung von Färbversuchen
- Kontrollverfahren für die Überprüfung der Eignung einer Flussstrecke für das Verdünnungsverfahren
- Vorbereitung der Feldausrüstung
- Bestimmung der notwendigen Tracermenge
- Bestimmung der Einspeisedauer
- Durchführung der Messung
- Messung bei speziellen Gegebenheiten, wie beispielsweise beim Vorhandensein von seitlichen Zuflüssen
- Vergleich der Resultate des Verdünnungsverfahrens mit denjenigen anderer Messmethoden.

Die Laborausbildung bestand aus:

- Einführung in die Tracerhydrologie und Fluoreszenz
- Einführung in die Spektrofluorometrie
- Ausbildung in der standby- und in der synchro-scan Methode
- Vorbereitung der Proben
- Analyse der Proben
- Ausfüllen des Laborprotokolles und Berechnung der Abflussmenge
- Interpretation der Resultate und Fehlerabschätzung
- Eichung der Geräte.

Für die Ausbildung wurde ein Anwendungsmanual in englischer Sprache erstellt.

Die Erfahrungen der letzten Jahre zeigen, dass die operationelle Methode der LHG fast problemlos in einem Entwicklungsland implementiert werden kann und die Fachkräfte des Landes nach der Ausbildung in der Lage sind gute Abflussmessungen auszuführen. Die LHG-Methode ermöglicht jetzt dem Hydrology Department in Nepal die Bestimmung des Abflusses an wichtigen Messstationen, an denen sie die Abflüsse bis heute nicht messen konnten.

5 Schlussfolgerungen

Da beim Verdünnungsverfahren die Abflussmenge über die Verdünnung eines Markierstoffes und nicht wie bei den meisten anderen Verfahren über die Messung der Fließgeschwindigkeit und den durchflossenen Querschnitt bestimmt wird, ist es für den Einsatz in Bächen und Flüssen mit steilem, rauhem, grobblockigem Gewässerbett und auf kürzester Distanz abrupt ändernder Gerinnegeometrie und Strömungsbild geeignet.

Das Verdünnungsverfahren leistet oft auch für die Erfassung ausgesuchter Teilbereiche des Abflusses an einer Messstation, beispielsweise bei der Bestimmung von Extremabflüssen, für die andere Messmethoden nicht erfolgreich eingesetzt werden können, wertvolle Hilfe.

Grundvoraussetzung für die Anwendung des Verdünnungsverfahrens ist die gute longitudinale, laterale und vertikale Dispersion des eingegebenen Markierstoffes. Die vollständige Durchmischung des Tracers mit dem Bachwasser soll auf relativ kurzer Strecke erfolgen, weil sonst die Fließzeiten sehr lang, die erforderlichen Anfangskonzentrationen zu gross und die Einspeisezeiten zu lang werden, und damit verbunden der Tracerbedarf zu gross wird. Deshalb eignet sich das Verdünnungsverfahren nicht für grosse Flüsse, da die Mischstrecken zu lang werden. Innerhalb der Mischstrecke ist eventuellen Seitenzuflüssen oder Ableitungen spezielle Aufmerksamkeit zu schenken; ihr Einfluss auf die Messung muss detailliert abgeklärt werden. Stillwasserzonen und Überflutungsgebiete sind möglichst zu meiden. Bei geeigneter Tracerwahl können auch Gewässer mit erheblicher Feststoffführung gemessen werden. Holz- und Schwimmstoff behindern die Messung nicht.

Die wichtigsten Voraussetzungen für eine erfolgreiche Anwendung des Verdünnungsverfahrens sind:

- Gute Kenntnisse über die zu messende Fließstrecke.
- Geeignete Wahl der Länge der Mischstrecke in Abhängigkeit der Abflussmenge.
- Vollständige Durchmischung des Tracers mit dem Bachwasser muss sichergestellt sein.
- Die Mischzeiten und -längen dürfen nicht zu lang sein.
- Die am Einspeisequerschnitt eingegebene Tracermenge soll vollständig auch am Entnahmequerschnitt vorbeifliessen. Allfällige Tracerverluste müssen vernachlässigbar klein sein.
- Aneignung von Erfahrungen mit beiden Messmethoden (Momentaneinspeisung, konstante Einspeisung), damit die für einen bestimmten Flussabschnitt besser geeignete Messmethode gewählt werden kann.
- Erfahrung bei der Auswahl der am besten geeigneten Tracerart in Abhängigkeit von der Zielsetzung, des Gewässertyps und den Abflussbedingungen.
- Absolut sorgfältiges Arbeiten im Felde wie im Labor (keine Kontaminierung mit Tracern).

6 Literatur

- LHG (Landeshydrologie und -geologie) (Hrsg.) 1994a: Manual für die Abflussmessung nach dem Salzverdünnungsverfahren. Technischer Bericht Nr. 1994/1: 23 S.
- LHG (Landeshydrologie und -geologie) (Hrsg.) 1994b: Handbuch für die Abflussbestimmung mittels Verdünnungsverfahren mit Fluoreszenztracern. Mitt. Landeshydrol. -Geol. 20: 91 S.
- SPREAFICO, M.; GRABS, W., 1993: Determination of Discharges with Fluorescence Tracers in the Nepal Himalayas. IAHS Publ. 218: 17–27.

Adresse des Autors:
Dr. Manfred Spreafico
Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft
Landeshydrologie und -geologie
CH-3003 Bern