

Abflussmessungen in Mittellandbächen : mit Messflügel oder Salzverdünnungsverfahren?

Autor(en): **Bänziger, Robert**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria**

Band (Jahr): **86 (1994)**

Heft 10

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-940809>

Nutzungsbedingungen

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

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

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

Haftungsausschluss

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

Abflussmessungen in Mittellandbächen – mit Messflügel oder Salzverdünnungsverfahren?

Robert Bänziger

1. Einleitung

Abflussmessungen in offenen Rinnen werden schon lange durchgeführt. Eines der ältesten und wohl auch verbreitetsten Verfahren ist dabei die Messung mittels Messflügel, wie es etwa in [1] beschrieben wird. Sie wird seit etwa zweihundert Jahren angewendet. Für kleine Bäche stehen heute spezielle «Kleinflügel» zur Verfügung, die ohne feste Einrichtungen (Seilanlagen usw.) eingesetzt werden können. Neue magnetisch-induktive Geräte liefern im Prinzip die gleichen Messgrößen wie ein Messflügel, nämlich Wassergeschwindigkeiten in einem begrenzten Bereich eines Messquerschnittes («Punktgeschwindigkeiten»).

Ein prinzipiell anderes Verfahren, die Abflussmessung mittels Verdünnung eines Tracers, ist zwar ebenfalls schon lange bekannt. Erst durch die Entwicklung der Elektronik und Gerätetechnik (Leitfähigkeitsmesssonden, Datenlogger und Rechnerleistung) und den dadurch möglich gewordenen Einsatz des weitgehend ungiftigen Kochsalzes als Tracersubstanz (mit Auswertung im Feld) ist dieses Verfahren zur Alternative für die Flügelmessung geworden, auch an Orten, wo letztere problemlos möglich ist. Die von uns angewendete Integrationsmethode kann schnell und einfach ausgeführt werden und macht Wasserprobenentnahmen mit Laborauswertungen überflüssig. Resultate sind in der kürzesten Zeit noch am Messort erhältlich [2]. Verfahren mit konstanter Beschickung und/oder Messungen mit anderen Tracersubstanzen sind heute ebenfalls gut dokumentiert und werden regelmässig angewendet [3].

Weitere Messverfahren (Messüberfälle, Tauchstab, Ultraschall, Dopplerverfahren, Laserinterferometer usw.) werden hier nicht behandelt. Für einzelne Abflussmessungen in Mittellandbächen sind sie für die meisten Fragestellungen in aller Regel nicht das am besten geeignete Mittel.

Wer die Wahl hat, hat die Qual! Soll zur Messung des Abflusses in einem bestimmten Bach eher eine Flügelmessung durchgeführt oder das Salzverdünnungsverfahren angewandt werden?

Im folgenden werden die Resultate einer Messkampagne vorgestellt und einige Überlegungen formuliert, die die Antwort auf diese Frage erleichtern sollen.

2. Das Ziel der Abflussmessung

Jede Abflussmessung dient dazu, eine spezifische Fragestellung zu bearbeiten. Aufgabe einer Abflussmessung kann es zum Beispiel sein:

- Stützwerte für P/Q -Beziehungen («Eichkurven») an Schreibpegelstellen zu liefern. Solche Pegelaufzeichnungen werden später in hydrologische Jahrbücher weiterverarbeitet und dienen den verschiedensten Fragestellungen aus Wasserwirtschaft, Wasserbau, Ökologie usw.
- Einzelwerte erheben; als Beispiel kann hier die Kontrolle einer Restwassermenge oder die Festlegung eines Pegelstandes, oberhalb dem für landwirtschaftliche Bewässerung noch Wasser entnommen werden darf, genannt werden.

- Stützwerte für Übertragungsrechnungen oder andere Einzelmessungen als Projektgrundlagen oder für Umweltverträglichkeitsprüfungen.
- Messungen für wissenschaftliche Zwecke mit spezifischen Anforderungen.

Der Verwendungszweck der Messung hat auf die Wahl des Verfahrens einen Einfluss (siehe dazu Kapitel 5).

3. Die Vergleichsmessungen

Das Amt für Gewässerschutz und Wasserbau des Kantons Zürich unterhält im Kanton ein dichtes Netz von Pegelstellen, an denen regelmässig Messungen zur Eichung und Kontrolle der P/Q -Beziehungen durchgeführt werden. Diese erfolgten bisher ausschliesslich mit Messflügel. Aufgrund verschiedener Überlegungen wird an gewissen Stellen ein Wechsel zur Salzverdünnungsmethode erwogen. Um einen Eindruck über die Genauigkeit und Handhabbarkeit dieses Verfahrens zu erhalten, konnte der Verfasser in den Jahren 1992–1994 Vergleichsmessungen durchführen. Dabei wurde jeweils eine Abflussmessung mit Messflügel und gleichzeitig zwei Salzverdünnungsmessungen durchgeführt. Somit können die Resultate der Salzverdünnungsmessungen unter sich sowie die Salzverdünnungsmessungen mit den Flügelmessungen verglichen werden. Die Resultate sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die Differenzen von Salzverdünnungsmessungen und Flügelmessungen betragen im Mittel beinahe 10%, sind also gross und streuen auch stark. Im Durchschnitt wurden mit dem Salzverdünnungsverfahren leicht höhere Abflüsse gemessen. Bei einzelnen Stationen scheinen die Unterschiede systematisch zu sein und können auch umgekehrte Vorzeichen annehmen.



Bild 1. Feldequipe während einer Vergleichsmessung. Im Hintergrund wird die Abflussmessung mittels Kleinflügel durchgeführt. Im Vordergrund werden der Datenlogger und die Leitfähigkeitssonde für die Salzverdünnungsmessung vorbereitet.

Station	Pegelstand [cm]	Abfluss Flügelmes- sung [l/s]	Salz: Nur aufgeführt wo Pegel während Messung kon- stant		Salz: Mittel [l/s]	Salz: Diff der Mes- sungen Absolut. (%)	Salz mi- nus Flügel	Abs. Salz minus Flügel
			Messung 1	Messung 2				
S13 1994	13.2	203	287.1	286.4	287	0.2%	41.4%	41.4%
S17 1992	38.0	2030			2118		4.3%	4.3%
S17 1993	24.5	795	875.8	885.5	881	1.1%	10.8%	10.8%
S17 1994	19.9	448	542.2	556.3	549	2.6%	22.5%	22.5%
S21 1992	24.3	991			941		-5.0%	5.0%
S21 1993	12.1	317	279.5	286.5	283	2.5%	-10.7%	10.7%
S21 1994	15.9	468	451.7	467.5	460	3.4%	-1.7%	1.7%
S22 1994	46.0	746	692.1	770.0	731	10.7%	-2.0%	2.0%
S23 1994	26.3	599			510		-14.9%	14.9%
S45 1992	27.5	566	578.1	579.2	578	0.2%	2.1%	2.1%
S45 1993	18.6	137	145.9	150.4	148	3.0%	8.0%	8.0%
S45 1994	17.2	109			118		8.3%	8.3%
S46 1994	25.1	216			235		8.8%	8.8%
S48 1993	20.0	669	643.3	664.4	654	3.2%	-2.2%	2.2%
S48 1994	18.4	558	611.9	612.7	612	0.1%	9.7%	9.7%
S63 1993	7.0	35	37.4	38.9	38	3.9%	8.6%	8.6%
S63 1994	12.1	88	90.5	90.7	91	0.2%	3.4%	3.4%
S75 1992	43.5	1146	1170.1	1196.7	1183	2.2%	3.2%	3.2%
S75 1993	32.8	398	424.7	421.1	423	0.9%	6.3%	6.3%
S75 1994	31.7	326	390.1	386.0	388	1.1%	19.0%	19.0%
S75 1994	31.2	345	374.7	372.6	374	0.6%	8.4%	8.4%
S79 1993	22.8	159	204.0	201.0	173	1.7%	8.8%	8.8%
		Mittelwerte				2.2%	6.2%	9.6%

Tabelle 1. Resultate der Vergleichsmessungen. Die Salzverdünnungsmessungen ergeben im Mittel 6,2% höhere Abflüsse als die Flügelmessungen. Der Mittelwert der absoluten Differenzen beträgt beinahe 10%. Die Differenzen zweier Salzverdünnungsmessungen bei gleichbleibendem Abfluss (Pegel) betragen im Mittel 2,2%. Welche der Messungen nun die «richtigere» ist, kann jedoch anhand dieser Daten nicht beurteilt werden.

4. Messgenauigkeiten

Betrachtet man die Messresultate in Tabelle 1, so stellt sich die Frage nach den erreichbaren Genauigkeiten.

Zufällige Fehler

Dort, wo sich der Abfluss selbst zwischen der ersten und der zweiten Salzverdünnungsmessung nicht verändert hat, was anhand des Pegelstandes überprüft werden konnte, muss die Differenz der zwei Messwerte 0 sein. Es stehen 17 solche Doppelmessungen zur Verfügung.

Anhand der effektiv gemessenen Differenzen kann die Standardabweichung (= mittlerer Fehler) einer Einzelmessung berechnet werden. Sie beträgt $\pm 2.3\%$. (Die Standardabweichung am Mittel der beiden Messungen beträgt 1,6%).

Gemäss Angaben aus der Literatur [1, 4] weist die Flügelmessung mittlere Fehler von ca. $\pm 3\%$ (Standardabweichung) auf. Einfache eigene Abschätzungen (Mehrfachgeschwindigkeitsmessungen an Einzelpunkten mit Extrapolation auf den gesamten Querschnitt) ergeben eher günstigere Werte (Standardabweichung des Abflusses $\pm 2\%$). Genauigkeitsmäßig liegen die beiden Verfahren somit in der gleichen Grössenordnung.

Systematische Fehler

Die absoluten Differenzen von Salz- und Flügelmessungen liegen mit 9,6% im Mittel klar höher, als aufgrund obiger Werte zu erwarten ist.

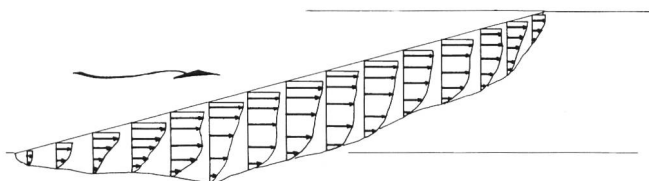


Bild 2. Graphische Darstellung der Auswertung einer Flügelmessung. Die Geschwindigkeitsverteilung über den Querschnitt ist anschaulich sichtbar. Unplausible Einzelwerte werden leicht entdeckt.

Die Resultate von Salzverdünnungsmessung und Flügelmessung zeigen allerdings keine statistisch signifikanten Unterschiede. Auffällig ist hingegen, dass bei Stationen mit Mehrfachmessungen mit einer Ausnahme die Messdifferenzen pro Station vorzeichengleich sind. Im Durchschnitt liefert die Salzverdünnungsmethode höhere Abflusswerte. Es stellt sich die Frage, ob pro Station individuell verschiedene systematische Fehler nicht korrigiert werden konnten. Solche stationstypischen Fehler können beispielsweise sein:

- Flügelmessung: Für den Operateur nicht erkennbare Schräganströmung des Flügels infolge Stosswellen oder anderen Einflüssen im Messquerschnitt; falsche Einschätzung der Sohlrauigkeit, Fehler in der Flügelaussparung, starke und ungenügend erfasste Gradienten in der Geschwindigkeitsverteilung über den Querschnitt (sprich: zuwenig Messpunkte), ungenügende Erfassung der Wasserspiegellage (Wellen) usw.
- Salzverdünnungsmessung: Infiltration von Bachwasser in den Untergrund auf der Durchmischungsstrecke, ungenügende Durchmischung, Rückhalt von Tracersubstanz in Kolken usw.

Bei den Salzverdünnungsmessungen wurde versucht, solche Fehler durch Veränderung von Einspeise- und Messstellen, Durchmischungsstrecken sowie Beschickungsmengen bestmöglich zu minimieren. Bei den Messflügelmessungen sind solche parallele Versuche mit veränderten Randbedingungen nicht durchgeführt worden.

Die Messdifferenzen geben einen Hinweis auf die zu stellenden Ansprüche an die Messgenauigkeit von Abflüssen in kleinen Mittellandbächen. Diese müssen klar kleiner angesetzt werden als etwa an gut ausgebauten Messstationen grosser Flüsse.

5. Kriterien für die Wahl des Messverfahrens.

Neben der erreichbaren Genauigkeit wird die Wahl des anzuwendenden Verfahrens von einer Reihe anderer Kriterien bestimmt. Folgende Eigenschaften des Messverfahrens können entscheidend sein:

Messflügel:

- Eine korrekt ausgeführte Messung dauert in jedem Fall länger als eine Stunde. Rasch wechselnde Abflüsse (z. B. Hochwasserspitzen) können nicht oder nur mit starken Abstrichen an der Genauigkeit erfasst werden.
- Eine Messflügelmessung ergibt als Resultat ein Geschwindigkeitsprofil (Geschwindigkeitsverteilung, mittlere Abflussgeschwindigkeit) im Messquerschnitt. Dies kann ein erwünschtes Nebenprodukt, vielleicht sogar das Ziel der Messung sein.
- Die Flügelmessung ist ein robustes und anschauliches Verfahren. Grobe Messfehler an Einzelmessungen können auch von wenig geübtem Personal noch auf Platz erkannt und korrigiert werden oder kommen bei der Auswertung zum Vorschein.
- Zur Verhinderung systematischer Fehler müssen die Flügel regelmässig geeicht werden. Obschon die eidg. Landeshydrologie diese Eichungen präzise und rasch durchführt, ist mit diesen Eichungen ein administrativer und finanzieller Aufwand verbunden. Ausserdem steht das Messgerät regelmässig während einer gewissen Zeit nicht zur Verfügung.
- Bei naturbelassenen Bachquerschnitten, insbesondere

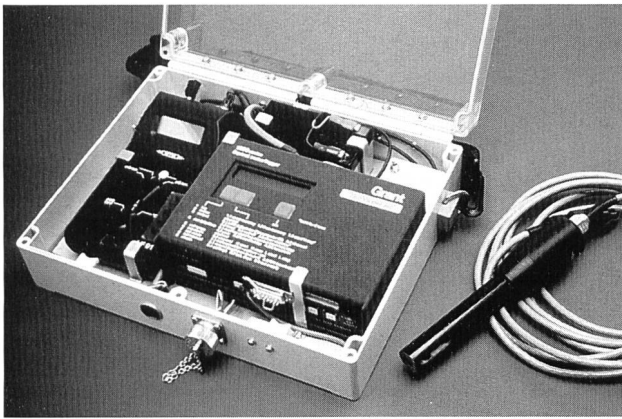


Bild 3. Datenlogger und Leitfähigkeitsmesssonde. Der Logger speichert während des Durchgangs der Salzwolke sekundlich die gemessenen Leitfähigkeiten. Diese Daten werden über eine Schnittstelle einem Laptop-Computer überspielt (Bild WSL).

bei sehr kleinen Abflusshöhen, ist das Verfahren wenig geeignet.

- Starker Algenbewuchs erschwert oder verunmöglicht die Messung (vorgängige Reinigung des Querschnittes nötig).
- Treibgut (z. B. Algen bei Hochwasser) behindert die Messung und kann zur Beschädigung der Messausrüstung führen.
- Der Mess- und Auswerteaufwand ist grösser als beim Salzverdünnungsverfahren.

Salzverdünnungsmessung

- Die Dauer des Durchgangs der Salzwolke durch den Messquerschnitt (= Messdauer) beträgt rund 10 Minuten. Schnell wechselnde Abflüsse (z. B. Hochwasserspitzen) können besser erfasst werden.
- Zusammen mit dem Abfluss kann auch die mittlere Geschwindigkeit auf der Durchmischungsstrecke errechnet werden (und daraus zum Beispiel ein mittlerer k-Wert für den gemessenen Abfluss). Dies allein kann unter Umständen schon das Ziel der Messung sein.
- In sehr rauen Gerinnen mit sehr turbulentem Abfluss, bei stark unregelmässigen Querprofilen, bei Geschiebetrieb oder starkem Algenbewuchs und auch bei sehr niedrigen Abflusshöhen ist die Methode besser als die Flügelmessung.
- Die Methode ist weniger robust als die Flügelmessung und braucht Erfahrung. Insbesondere ist die Qualität der

MESSPROTOKOLL 6. 5. 94 13h 41		WSL BIRNENSDORF, HYDROLOGIE	
GEWÄSSER	: S75 NGEFBACH	START	: 6. 5. 94 12h 29min 10sec
MESSSTELLE	: IM BACH	STOPP	: 6. 5. 94 12h 41min 13sec
SQUIRREL KANAL	: 5	DAUER	: 723 sec 0h 12min 3sec
MESSUNG	: BUERD KUNDERT	ANZAHL MESSUNGEN	: 723
DATENFILE	: S1542526.122		
ABSTICH	: 31.20 cm	ANFANGSLEITFAEHIGKEIT	: 667.6 µS/cm
WASSERTEMPERATUR	: 10.5 °C	ENDELEITFAEHIGKEIT	: 667.6 µS/cm
DISTANZ	: 130 m	GRUNDELEITFAEHIGKEIT	: 667.6 µS/cm
TRACER (SALZ)	: 2.50000 kg	MAXIMALE LEITFAEHIGK.	: 726.3 µS/cm
BESCHICKUNG	: 6.6 g/(l/sec)	SCHWERPUNKT	: 279.9 sec
EICHKOEFFIZIENT	: 0.564223	ABFLUSS	: 375.94 l/sec

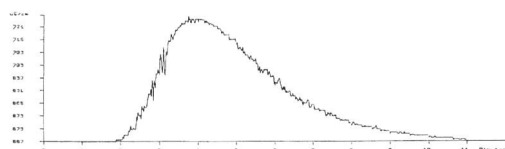


Bild 4. Auswertungsblatt des Kleincomputers. Die Graphik zeigt die Leitfähigkeit des vorbeifliessenden Bachwassers in Funktion der Zeit. Sie hilft bei der Qualitätsbeurteilung der Messung. Das Messresultat steht wenige Minuten nach der eigentlichen Messung zur Verfügung.

Durchmischung (und somit des Messresultates) nicht einfach abschätzbar. Vorgängige Färbversuche (z. B. mit Fluorescein) können zu optimistische Durchmischungen vortäuschen. Gleichzeitige oder sich folgende Mehrfachmessungen mit Variation der Beschickungs- und Messstelle verbessern die Zuverlässigkeit, machen das Verfahren jedoch aufwendiger.

- Grobe Fehler (z. B. falsche Salzdosierung infolge von Fehlern bei der Gewichtsbestimmung) können ebenfalls nur durch Mehrfachmessungen oder andere Kontrollen erkannt werden.
- Infiltration oder Exfiltration auf der Durchmischungsstrecke führt zu schwer interpretierbaren Messergebnissen. (Die wenig turbulenten Bäche des Mittellandes verlangen lange Durchmischungsstrecken, bei denen solche Phänomene auftreten können.)
- Unregelmässige Grundleitfähigkeit, z. B. infolge Einleitung von Schmutzstoffen in das Gewässer, verunmöglicht den Einsatz der Methode.
- Auch die Leitfähigkeitssonde muss geeicht werden, um systematische Fehler zu verhindern. Dies ist jedoch problemlos durch eigenes Personal möglich – das Gerät steht jederzeit zur Verfügung.
- Die Salzbeschickungsmenge (bei langen Durchmischungsstrecken 6 bis 10 g pro l/s Abfluss) macht das Verfahren bei grossen Abflüssen unpraktikabel. Ein Bach mit einem Abfluss von 10 m³/s müsste bereits mit einer Salzmenge von 60 bis 100 kg beschickt werden!
- Salzverdünnungsmessungen verursachen im Vergleich zur Flügelmessung einen kleineren Aufwand.

6. Fazit

Die Frage, welches Verfahren für die Abflussmessung in Mittellandbächen eingesetzt werden soll, muss von Fall zu Fall individuell entschieden werden. Die Methodenwahl erfolgt aufgrund des Ziels der Messung (Verwendungszweck der Resultate) sowie der an der Messstelle herrschenden Umstände.

Die beiden Methoden sind sich, soweit dies die Genauigkeit betrifft, ebenbürtig. Die grossen Differenzen der Vergleichsmessungen relativieren die Ansprüche, die an die Genauigkeit von Abflussmessungen zumindest in kleinen Mittellandbächen gestellt werden dürfen, und zeigen auf, dass der Vermeidung systematischer Fehler grösste Aufmerksamkeit geschenkt werden muss.

Dank

Der Abteilung Wasser- und Energiewirtschaft des Amtes für Gewässerschutz und Wasserbau des Kantons Zürich, speziell ihrem Leiter Herrn *Willy Vetterli* sowie den Herren *Hans-Rudolf Lang* und *Peter Nosari*, möchte ich herzlich danken für ihr Entgegenkommen und Interesse, durch das diese Untersuchung ermöglicht wurde. Den Herren *Hans Burch* und *Bruno Fritschi* von der Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Sektion Hydrologie, sei für ihre Mitwirkung an dieser Arbeit ebenfalls herzlich gedankt.

Literatur

- [1] Landeshydrologie, Bundesamt für Umweltschutz, Bern 1982: Mitteilung Nr. 4, Handbuch für die Abflussmengenmessung.
- [2] *Luder, B., Fritschi, B., Burch, H.*, 1988: Abflussmessung nach dem Salzverdünnungsverfahren (Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen, Interner Hydrologie-Bericht, 44 S.).
- [3] Landeshydrologie, Bundesamt für Umweltschutz, Bern 1994: Mitteilung Nr. 20, Handbuch für die Abflussmengenbestimmung mittels Verdünnungsverfahren mit Fluoreszenztracer.
- [4] *Morgenschweis, G.*, 1990: Zur Ungenauigkeit von Durchflussmessungen mit hydrometrischen Flügeln. DGM 34. 1990, H. 1/2.

Adresse des Verfassers: *Robert Bänziger*, dipl. Kulturingenieur ETH, Büro U. Kundert, Hydrologie, Hydrometrie, Dorfstrasse 17, CH-8155 Niederhasli.