

Betrieb des Bundes-Messnetzes für den Transport suspendierter Sedimente in Fliessgewässern

D. Alessandro Grasso, Carlo Scapozza, Florian R. Storck

Zusammenfassung

In der Schweiz begann die Überwachung des Sedimenttransports in Flüssen Ende des 19. Jahrhunderts mit den Korrekturen der grossen Flüsse (Kander, Linth, Aare, Rhein). Bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts wurde die Schätzung des Volumens der von Flüssen transportierten Sedimente durch regelmässige mehrjährige bathymetrische Untersuchungen von Seen durchgeführt. In den 1960er-Jahren begann der Bund mit dem Aufbau eines Überwachungsnetzes für den Transport von Feststoffen in Flüssen von nationalem Interesse. Dieser Artikel erläutert das vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) angewendete Verfahren zur Schätzung der Schwebstofffrachten.

Résumé

En Suisse, la surveillance du transport des sédiments dans les rivières a commencé à la fin du XIX^e siècle avec les corrections des grands fleuves (Kander, Linth, Aare, Rhin). Jusqu'au milieu du XX^e siècle, l'estimation du volume des sédiments transportés par les rivières était réalisée au moyen de relevés bathymétriques réguliers pluriannuels des lacs. Dans les années 1960, la Confédération a commencé à mettre en place un réseau de surveillance du transport des solides des rivières d'intérêt national. Cet article explique la procédure utilisée par l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) pour estimer les charges de sédiments en suspension sur la base d'un échantillonnage, de mesures en continu du débit et de la turbidité, et de calculs.

1. Einleitung

Seit den 1960er-Jahren werden Schwebstoffe in Fliessgewässern schweizweit gemessen. Die Schwebstoffmessung als Teilaspekt des Umweltmonitorings mit Fokus auf hydrologischen Aspekten ist von wesentlicher Bedeutung für die Optimierung der Bewirtschaftung (z.B. Schifffahrt) und des Schutzes der Seen und Fliessgewässer sowie der künstlichen Speicher in der Schweiz (z.B. Sohlenkolmatierung, Verschlammung). Mithilfe des Schwebstoffmonitorings lassen sich Herkunft und Entstehungsursachen von Schwebstoffen sowohl anthropogenen (z.B. durch Ausbeutung von Material aus Flüssen oder das Spülen von Staubecken) als auch natürlichen Ursprungs nachvollziehen. Das Monitoring dient ferner zur Quantifizierung der Auswirkungen von Schwebstoffen auf das jeweilige Gebiet (Abtrag und Verlust von Boden in Einzugsgebieten, Kolmatierung von Flusssohlen) und auf bauliche Anlagen (Wehre, Staubecken, Wasserfassungen

usw.). Nicht zuletzt leisten die Messungen einen unverzichtbaren Beitrag zur Dokumentation der Klimawandelfolgen im Zusammenhang mit Erosions-, Transport- und Ablagerungsprozessen (Modellierung für das Einzugsgebiet). Neben wirtschaftlich/technischen Fragen ist das Schwebstoffmonitoring auch für ökologische und toxikologische Fragestellungen von Bedeutung. Schwebstoffe können die Biozönose sowohl direkt als auch durch assoziierte Schadstoffe beeinträchtigen und auch die menschliche Nutzung von Gewässern einschränken (Freizeitgebrauch, Brauch- und Trinkwassergewinnung). Die Kenntnis der Schwebstofffrachten ist die Basis für eine Bilanzierung von partikelgebundenen Schadstofffrachten und damit wichtig für das Verständnis der Verlagerungs- und Transportprozesse solcher Schadstoffe. Informationen zu rechtlichen Grundlagen, Zielen des Monitorings und dem historischen und aktuellen Schwebstoffmessnetz des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) finden sich in Grasso et al.,

(2021) in dieser Ausgabe von WEL (Seite 17–22). Im Folgenden wird die Methodik für die Ermittlung kontinuierlicher Schwebstofffrachten beschrieben, basierend auf Stichproben, kontinuierlichen Abfluss- und Trübungsmessungen und -berechnungen.

2. Schwebstoffproben

2.1 Manuelle Probenahme

Für die manuelle Probenahme stehen zwei Typen von Schwebstoffsammlern zur Verfügung.

- Schwebstoffsammler am Seil: Modelle SGL 1961 und SGLN 1970 (Bild 1a)
- Schwebstoffsammler an der Stange: Modelle SGS M266 D/10 und US-DH 48 (Bild 1b)



Bild 1a: Probenahme Schwebstoffsammler am Seil. Foto: A. Grasso.



Bild 1b: Schwebstoffsammler an der Stange. Foto: A. Grasso.

2.2 Automatisierte Probenahme

Wenn der Abfluss innerhalb kurzer Zeiträume starke Schwankungen aufweist, reichen zwei Stichproben pro Woche zur Quantifizierung des Feststofftransports nicht aus, namentlich bei kleinen Wasserläufen und Bächen. In diesen Fällen ist für das Schwebstoffmonitoring eine zeitlich engmaschigere Beprobung erforderlich. Hier erweist sich der Einsatz einer automatischen Probenahmeverrichtung als äusserst effizient (Bild 1c).



Bild 1c: Automatischer Probennehmer.
Foto: A. Grasso.

3. Repräsentativität der Stichproben

3.1 Konzentrationsprofile über den Gewässerquerschnitt

Der im jeweiligen Gewässerquerschnitt repräsentativste Entnahmepunkt für Schwebstoffproben wird anhand von Querschnittsbeprobungen ermittelt.

Das Konzentrationsprofil über den Gewässerquerschnitt zeigt die Verteilung der Schwebstoffkonzentrationen über die erfasste Querschnittsfläche (Bild 2a). Es ermöglicht die Bestimmung der idealen Messvertikale und -tiefe, bei denen die wöchentliche Probenahme einen für die Schwebstoffkonzentration repräsentativen Wert liefert (Bild 2b).

Da sich die Morphologie des Einzugsgebiets und insbesondere das Profil des Gewässerbetts laufend ändern, muss regelmässig – mindestens einmal jährlich – anhand eines Schwebstoff-Konzentrationsprofils über den Gewässerquerschnitt die Repräsentativität des Probenahmepunkts überprüft werden.

3.2 Bestimmung der Schwebstoffkonzentration

Die Proben werden zur Analyse an das Labor des Eidgenössischen Instituts für Metrologie (METAS) gesandt. Die Analyse erfolgt per Filtrationsmethode. Dazu wird die Probe gewogen und filtriert (Filter mit Porengrösse 0,65 µm). Der Rückstand wird getrocknet und gewogen. Die Konzentration errechnet sich aus dem Verhältnis zwischen dem Gewicht des Rückstands und dem Gewicht der Probe und wird in der Einheit mg/kg angegeben.

4. Trübungssonde

Der Schwebstofftransport kann indirekt durch Messen der Gewässertrübung erfasst werden. Jede Station ist mit mindestens einer Trübungssonde ausgestattet.

Die Trübungsmessung kann optisch oder akustisch erfolgen. Im ersten Fall wird die schwebstoffbedingte Abnahme der Intensität des von der optischen Sonde emittierten Lichtstrahls gemessen. Im zweiten Fall werden die von den suspendierten

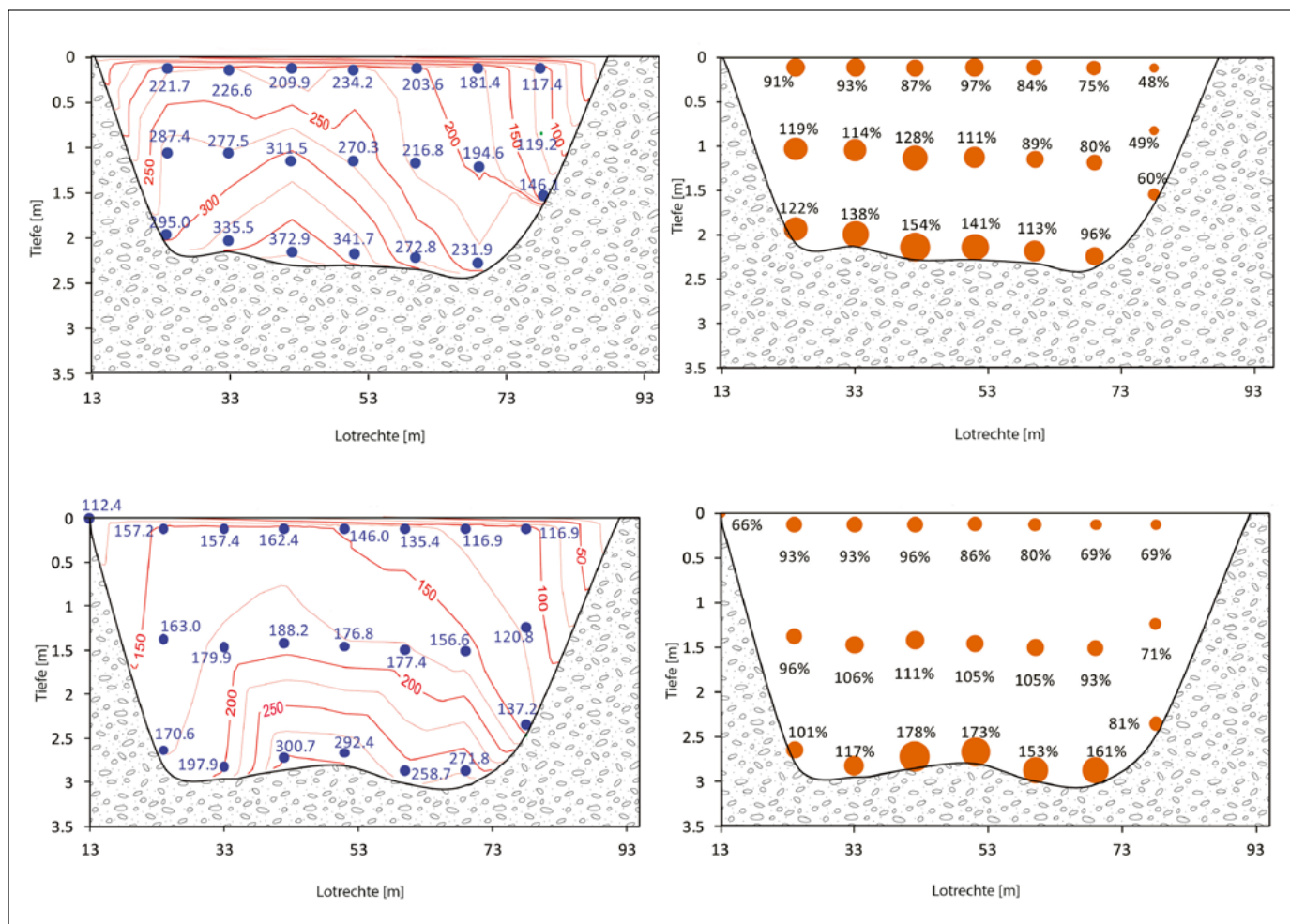


Bild 2: Schwebstoff-Konzentrationsprofil über den Gewässerquerschnitt an der Messstation Rhein-Diepoldsau vom 28. Juli 2010 (oben) und vom 26. Juni 2012 (unten).

a) Links: Diagramm der Isokonzentrationskurven in mg/l.

b) Rechts: Repräsentativität der Probenkonzentration im Verhältnis zur Konzentration im Querschnittsmittel.

Partikeln reflektierten Schallwellen einer akustischen Sonde gemessen.

4.1 Optische Trübung

Die optische Trübungssonde misst die Abnahme der Wassertransparenz aufgrund der vorhandenen Schwebstoffe, welche anorganischer (Ton, Schluff, Sand), organischer (Humus, Plankton, Algen) oder kolloidaler Art sein können. Diese feinen Partikel werden bei der Erosion von Böden freigesetzt und werden durch Wasser oder Wind transportiert (oder im Gewässer mobilisiert). Der Prozess ist abhängig von der Topografie, der Bodenstruktur und den Niederschlagsverhältnissen und weist daher hinsichtlich seiner Intensität starke räumliche und saisonale Schwankungen auf. Neben natürlichen Faktoren werden Erosionsprozesse und Feinpartikeleinträge in Gewässer durch bestimmte Aktivitäten des Menschen (Land- und Forstwirtschaft, Sedimententnahme, bauliche Anlagen in Fließgewässern, Staubeckenspülungen usw.) verstärkt. Einen Beitrag zur Trübung können auch biologische Prozesse oder die Koagulation gelöster Wasserinhaltsstoffe liefern.

Trübungswerte stellen eine unspezifische Messgrösse für die Schwebstoffkonzentration dar. Die Korrelation zwischen Trübung und Schwebstoffkonzentration ist aufgrund der optischen Eigenschaften von Schwebstoffen, z.B. ihres Brechungscoeffizienten, nicht immer linear.

Die Trübung kann auf zweierlei Weise gemessen werden (Bild 3). Zum einen kann

die Intensität eines durch eine Probe hindurchtretenden Lichtstrahls gemessen werden (turbidimetrische Methode); bei der zweiten Methode wird die Streuung eines Lichtstrahls um den Winkel α , bezogen auf den einfallenden Strahl, gemessen. Beträgt der Winkel α 90° oder darunter, wird nephelometrisch gemessen, der gemessene Wert wird in der Einheit NTU (Nephelometric Turbidity Unit) angegeben. Ist der Winkel α grösser als 90° , erfolgt eine sogenannte Rückstreuungsmessung; der Wert wird in der Masseinheit BSTU (BackScatter Turbidity Unit) ausgedrückt.

4.2 Akustische Trübung

Um die Qualität und die Zuverlässigkeit von Messungen hydrologischer Parameter zu verbessern, erforscht und testet die Abteilung Hydrologie des BAFU neue Instrumente und Messmethoden. Im Jahr 2016 veranlasste sie zum Schwebstoffmonitoring an der hydrometrischen Station Aare-Brienzwiler die Installation einer neuen Trübungssonde auf Basis der ADCP-Technologie (Ultraschall-Doppler-Profil-Strömungsmessung). Die Sonde wurde zur besseren Zugänglichkeit auf einem Schlitten montiert (Bild 4).

Die akustische Trübungsmessung basiert auf der Eigenschaft suspendierter Partikel, die von einer Schallquelle emittierten Schallwellen zu streuen. Die akustische Trübung errechnet sich aus dem Verhältnis zwischen der von den Partikeln pro Entfernungseinheit (Entfernung zur Ultraschallsonde) gestreuten Energie und der

von der Sonde abgegebenen Energie. Sie wird in der Masseinheit m^{-1} angegeben.

Im Gegensatz zu optischen Verfahren weisen akustische Trübungsmessmethoden keine Einschränkungen bei höheren Schwebstoffkonzentrationen auf und sind weniger empfindlich gegen biologische Verschmutzung. Die Messung der akustischen Trübung ist nichtintrusiv und unabhängig von der Partikelfarbe.

Sonden zur akustischen Trübungsmessung liefern Zeitreihen mit besserer zeitlicher und räumlicher Auflösung. Darüber hinaus werden derzeit neue Verfahren zur Verarbeitung akustischer Multifrequenzdaten entwickelt, um auch die Grösse der Partikel schätzen zu können.

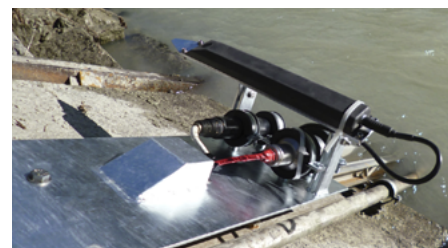


Bild 4: Hydrologische Station Aare-Brienzwiler; Messanlage mit zwei optischen Sonden und einer akustischen Sonde. Foto: D. Lussi, METAS.

4.3 Prüfung und Korrektur von Trübungsdaten

Artefaktbedingte Fehler in der Trübungsganglinie werden mittels visueller Analyse der Datenreihe erkannt und korrigiert. Ebenso müssen Lücken in der Trübungsgang-

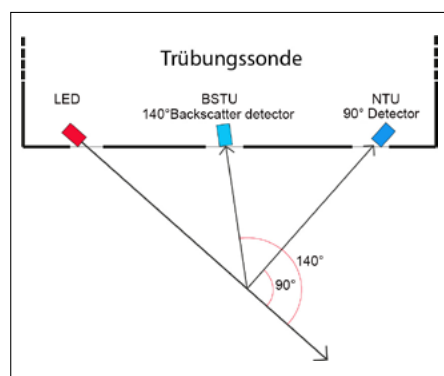


Bild 3: Funktionsprinzip der optischen Trübungssonde (oben) und installierte Sonde (unten). Foto: A. Grasso.

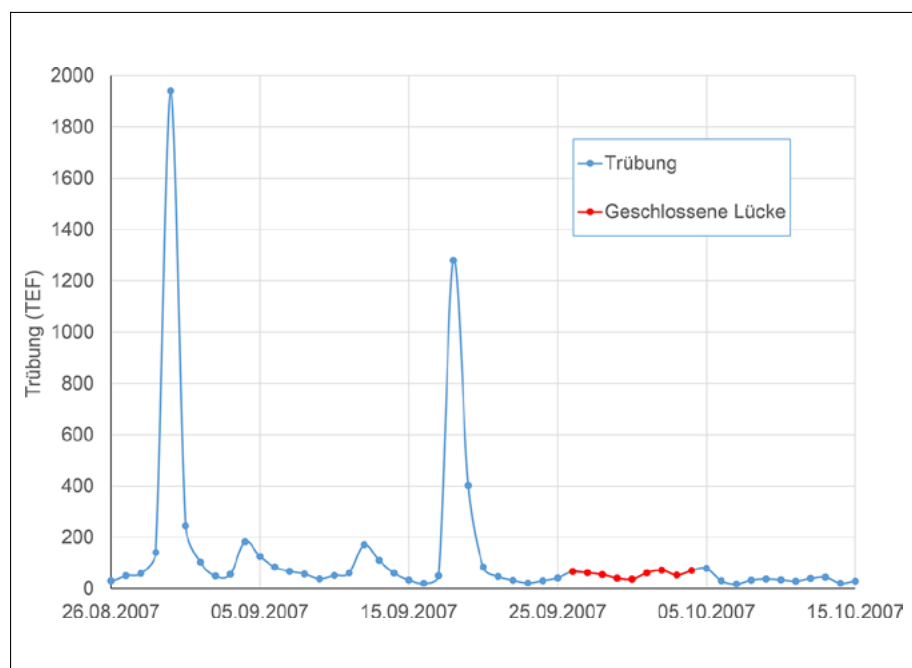


Bild 5: Lücken in der Trübungsganglinie werden auf Basis der Schwebstoffkonzentration in den zweimal wöchentlich entnommenen Proben und der Abflussdaten geschlossen.

linie geschlossen werden. Können fehlende Werte nicht durch Messwerte einer anderen Trübungssonde ergänzt werden, so sind sie auf Basis der zweimal wöchentlich gemessenen Schwebstoffkonzentrationen und der Abflussdaten (Bild 5) nach folgender Formel zu ermitteln:

$$Tr^* = \alpha \cdot c \cdot Q^\beta$$

Dabei entspricht Tr^* der zu ergänzenden Lücke in den Trübungsdaten.

c und β sind die Koeffizienten der Regressionsgeraden zwischen den Variablen Schwebstoffkonzentration (SSC – suspended solid concentration) und Abfluss:

$$\log(ssc) = \beta \cdot \log Q + c$$

α (spezifische Trübung) ist das Verhältnis zwischen der während der Probenahme gemessenen Trübung und der Konzentration in der Probe. Es wird angenommen, dass die spezifische Trübung zwischen zwei Probenahmen linear variiert:

$$\alpha = \frac{Tr}{SSC}$$

Lücken in der Trübungsganglinie müssen direkt in der Datenbank ergänzt werden können.

5. Schätzung der Schwebstofffracht

Die Schwebstofffracht von Flüssen wird aus den Messwerten von Abfluss und Schwebstoffkonzentration geschätzt.

5.1 Methode der Regressionsgeraden

Bis 1999 wurde die jährliche Feststofffracht anhand des Verhältnisses $\log(C)/\log(Q)$ geschätzt, der sogenannten Methode der Regressionsgeraden. Bei dieser Methode ergibt sich jedoch eine Verzerrung, da die aus den mittleren Tagesabflusswerten errechneten Konzentrationen und damit auch die jährliche Feststofffracht unterschätzt werden (Grasso und Jakob, 2003).

Die Schwebstofffracht wird anhand der Regressionsgeraden zwischen den logarithmierten Werten der punktuellen Konzentration und des entsprechenden mittleren Tagesabflusses geschätzt (zwei Proben pro Woche: ca. 104 Stichprobenpaare).

Die jährliche Feststofffracht entspricht der über alle Tage des Jahres summierten Produkte zwischen dem mittleren Tagesabfluss und der auf Basis der entsprechenden Abflusswerte anhand der Methode der Regressionsgeraden ermittelten Konzentration.

Das durch die Regressionsgerade definierte Verhältnis C/Q ist rein empirisch,

da kein physikalischer Zusammenhang zwischen der punktuellen Schwebstoffkonzentration im Gewässer und dessen mittlerem Tagesabfluss besteht. Zudem ist der Korrelationskoeffizient zwischen $\log(C)$ und $\log(Q)$ oft sehr niedrig.

Für den niedrigen Korrelationskoeffizienten zwischen den logarithmierten Werten von Konzentration und Abfluss sind mehrere Faktoren verantwortlich. Die wichtigsten sind nachfolgend aufgeführt:

- Bei gleichem Abfluss unterscheiden sich die bei ansteigendem Wasserstand gemessenen von den bei sinkendem Wasserstand gemessenen Konzentrationen.
- Bei gleichem Abfluss schwankt die Feststoffführung eines Fließgewässers in Abhängigkeit von der Jahreszeit.
- Die Korngrösse der Schwebstoffe ist zeitlichen Schwankungen unterworfen.
- Menschliche Aktivitäten können zu erheblichen Schwankungen der Feststofffracht führen.

Ferner ist zu berücksichtigen, dass das Verhältnis $\log(C)/\log(Q)$ auf punktuellen Konzentrationswerten und mittleren Tagesabflusswerten basiert.

Ein weiteres Problem ist mathematischer Art. Die Berechnung der Konstanten a und b der Regressionsgeraden $y = ax + b$ basiert auf dem logarithmischen Mittel der Konzentration und des Abflusses. Das logarithmische Mittel führt, bezogen auf das arithmetische Mittel, zu einer Unterschätzung. Folglich führt auch die Berechnung von Konzentrationen auf Grundlage von logarithmischen Werten zu einer Unterschätzung. Um diesen systematischen Fehler

zu reduzieren, wurde von der ehemaligen Landeshydrologie eine Berechnungsmethode entwickelt. Diese basiert auf zwei für den gesamten Satz von $\log(C)/\log(Q)$ -Wertepaaren adjustierten Regressionsgeraden (Bild 6). Doch selbst diese Methode führt häufig zu einer Unterschätzung der tatsächlichen Feststofffracht.

5.2 Methode der Abflussdauerkurve

Bereits im Jahr 2000 wurde die Methode der Regressionsgeraden durch die Methode der Abflussdauerkurve ersetzt. Diese ermöglicht eine bessere Schätzung der jährlichen Feststofffracht (Grasso und Jakob, 2003).

Die erstmals 1951 von C. R. Miller vorgeschlagene Methode der Abflussdauerkurve wurde an das Schweizer Netzwerk angepasst (Grasso und Jakob, 2003).

Diese Methode liefert eine bessere Schätzung der Feststofffracht im Vergleich zur Standardmethode der Regressionsgeraden.

Konzentrations- und Abflusswerte werden nach Abflussklassen unterteilt und die jährliche Feststofffracht als Summe der Beiträge der einzelnen Klassen berechnet. Im Vergleich zur Methode der Regressionsgeraden mit einer Geraden für alle Abfluss- und Konzentrationswerte (die Methode der Landeshydrologie verwendet zwei Regressionsgeraden), liefert die Methode der Abflussdauerkurve eine den Abflussklassen entsprechende Zahl an «Regressionswerten» (Mittelwert für jede Klasse). Darüber hinaus werden bei dieser Methode die nicht logarithmierten Werte verwendet. Auf diese Weise sind systematische Unterschätzungsfehler ausgeschlossen (Grasso und Jakob, 2003).

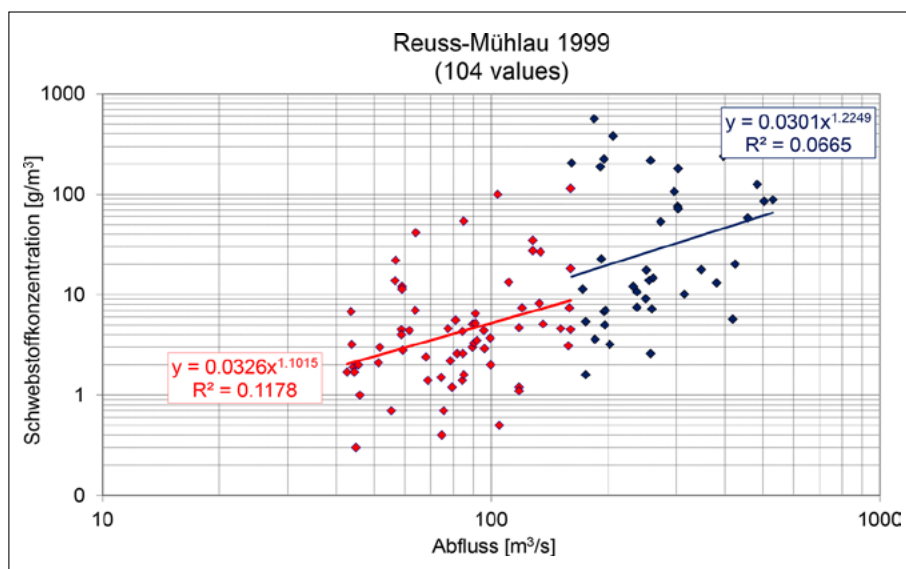
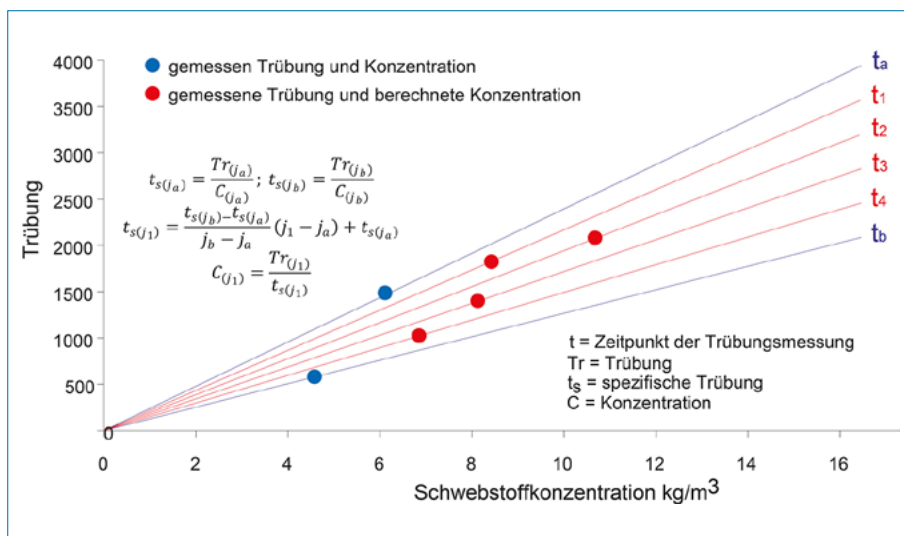


Bild 6: Methode zur Schätzung der jährlichen Schwebstofffrachten mit zwei Regressionskurven (Lütschine Gsteig, 1999).



$$t_s = \frac{Tr(sonde)}{Conc(échantillon)}$$

Ohne die Korrektur und nur anhand der Stichproben (Bild 8a) würden Trübungsereignisse übersehen und damit unterschätzt oder überschätzt. Die Schwebstoff-Jahresfracht lässt sich durch Integration des Produkts aus Abfluss und Konzentration ermitteln. Diese Methode ermöglicht eine bessere Schätzung der Schwebstofffracht, da die Trübungsmessung die zeitliche Auflösung der Datenreihe für die Schwebstoffkonzentration (Messintervall 10 Minuten) erhöht.

6. Fazit

Die Schweiz verfügt über mehr als 50 Jahre Erfahrung auf dem Gebiet der Überwachung suspendierter Feststoffe. Fachstellen von Bund und Kantonen, Hochschulen, Forschungsinstitute und private Büros verwenden seit eh und je die Daten des Bundesamtes für Umwelt. Die Ergebnisse des Schwebstoffmonitorings sind die Basis für wirtschaftlich-technische Abwägungen, aber auch unverzichtbare Grundlage für weiterführende ökologische und ökotoxikologische und humantoxikologische Fragestellungen.

5.3 Verfahren zur Schätzung der Schwebstoffkonzentration anhand von Trübungsmessungen

Seit 2013 erfolgt die Schätzung der jährlichen Schwebstofffracht nach der Methode von Grasso et al. (2007). Die Schwebstoffkonzentration wird berechnet anhand der Trübungs- und der Schwebstoffmessungen bei zwei Probenahmen pro Woche (Bild 7).

Nach Berechnung der spezifischen Trübung t_s für jede Schwebstoffprobe wird t_s linear zwischen zwei aufeinanderfolgenden Proben interpoliert. Durch Korrektur jedes Trübungsmesswertes mit dem Wert der entsprechenden spezifischen Trübung kann eine kontinuierliche Ganglinie der Schwebstoffkonzentration ermittelt werden (Bild 8).

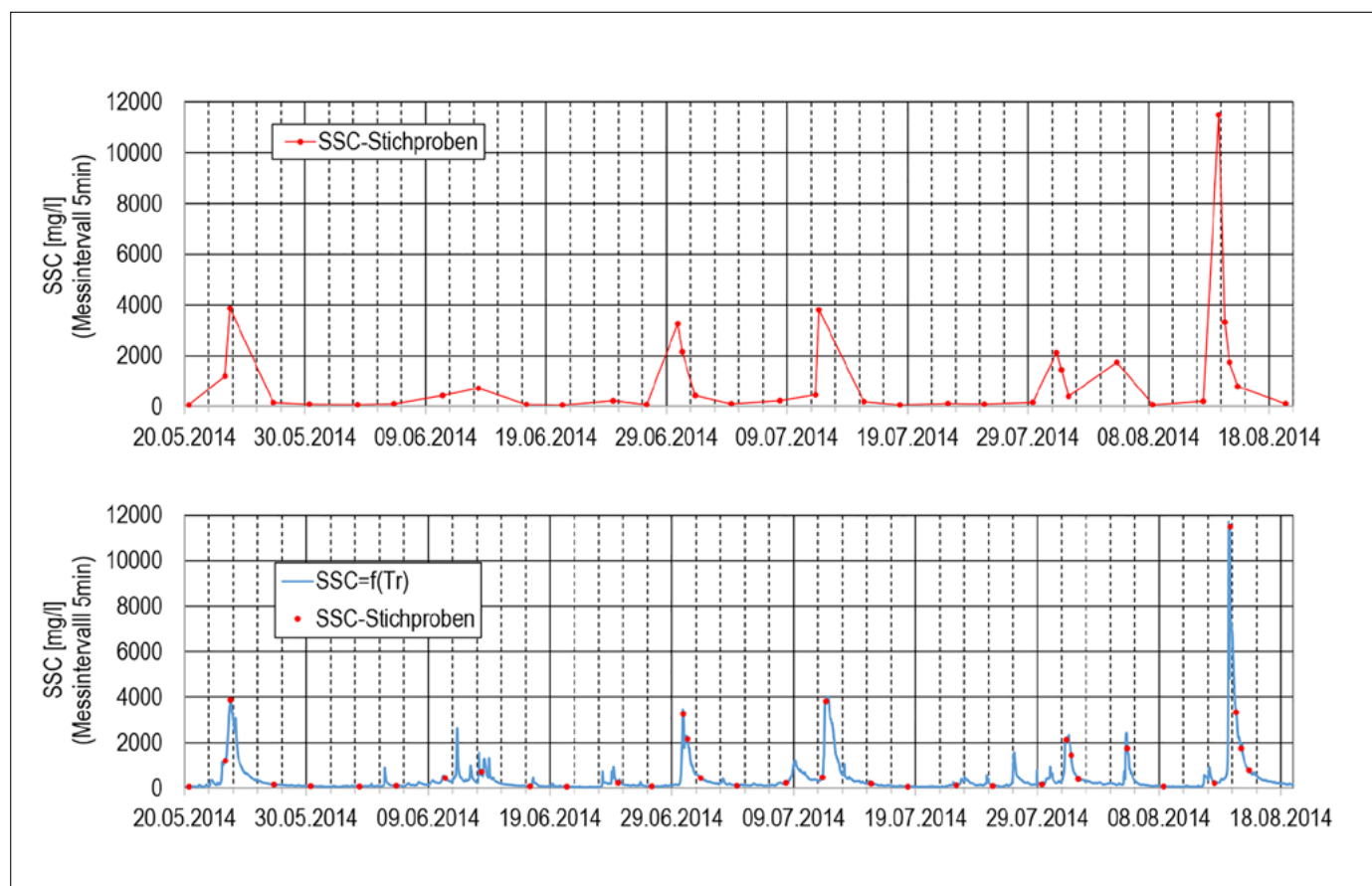


Bild 8: a) Vergleich der Ganglinien der Schwebstoffkonzentration von gemessenen Stichproben (oben) und b) der kontinuierlichen Ganglinie, die anhand der Trübungsmesswerte ermittelt wurde (unten).

Die Schätzung der Schwebstofffrachten ist ein komplexer Prozess, der mehrere Teilschritte umfasst:

- Probeentnahme von Schwebstoffen
- Messung der Konzentration suspendierter Feststoffe
- Messung der Trübung mit optischen und/oder akustischen Verfahren
- Abflussmessung
- Datenkontrolle, Auswertung und Korrektur
- Verfahren zur Berechnung der Schwebstofffrachten

In jedem Teilschritt können Fehlerquellen bei der Schätzung der Schwebstofffrachten entstehen. Um eine realitätsnahe Schätzung der Schwebstofffrachten zu erhalten, sind daher die Genauigkeit und die Überprüfung der Ergebnisse der verschiedenen Teilschritte von zentraler Bedeutung.

Quellen:

Grasso D.A., Jakob A. (2003): Charge de sédiments en suspension. Gas, Wasser und Abwasser (gwa) 2003/12, pp 898-905.

Grasso D.A., Jakob A., Spreafico M. (2007): Abschätzung der Schwebstofffrachten mittels zweier Methoden. «Wasser Energie Luft» – 99/3, pp 273–280.

Grasso D.A., Bérod D., Hefti D., Jakob A. (2011): Monitoring de la turbidité des cours d'eau Suisse «Wasser Energie Luft» – 103/1, pp 48–52.

Grasso D.A., Bérod D., Hodel H., (2012): Messung und Analyse der Verteilung von Schwebstoffkonzentrationen im Querprofil von Fließgewässern. «Wasser Energie Luft» – 104/1, pp 61–65.

Grasso D.A., Bérod D., Hodel H., Jakob A., Lalk P.,

Spreafico M. (2014): Repräsentativität von Stichproben bezüglich Schwebstoffkonzentration, Erfahrungen der Abteilung Hydrologie bei der Probenahme «Wasser Energie Luft» – 106/3, pp 224-230.

Grasso D.A., Scapozza C., Storck F.R. (2021): Messnetz des Bundes für den Transport suspendierter Sedimente in Fließgewässern – Geschichte und zukünftige Entwicklung. «Wasser Energie Luft» – 113/1, pp 17–22.

Miller, C.R. (1951): Analysis of flow duration sediment rating curve method of computing sediment yields. US Bureau of Reclamation Report.

Autoren:

Dr. D. Alessandro Grasso, Abteilung Hydrologie, Sektion Hydrologische Grundlagen Gewässerzustand, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Umwelt BAFU, alessandro.grasso@bafu.admin.ch

Dr. Carlo Scapozza, Abteilung Hydrologie, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Umwelt BAFU, carlo.scapozza@bafu.admin.ch

Dr. Florian R. Storck, Abteilung Hydrologie, Sektion Hydrologische Grundlagen Gewässerzustand, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Umwelt BAFU, florian.storck@bafu.admin.ch



Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Association suisse pour l'aménagement des eaux
Associazione svizzera di economia delle acque

Die Wasserwirtschaft befasst sich mit sämtlichen Belangen von Nutzung und Schutz des Wassers sowie Schutz von Menschen und Gütern vor dem Wasser.

Der Schweizerische Wasserwirtschaftsverband pflegt im Speziellen die Bereiche Wasserkraft, Hochwasserschutz und Wasserbau.

Werden Sie Mitglied: www.swv.ch

