

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 99 (2007)
Heft: 3

Artikel: Abschätzung der Schwebstofffrachten mittels zweier Methoden
Autor: Grasso, D.A. / Jakob, A. / Spreafico, M.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-940145>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 12.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Abschätzung der Schwebstofffrachten mittels zweier Methoden

(Beispiel Hochwasser August 2005)

■ D. A. Grasso, A. Jakob, M. Spreafico

Zusammenfassung

Während den Unwetterereignissen im August 2005 wurden bei den Messstationen Aare-Brienzwiler und Lüttschine-Gsteig Abflusswerte gemessen, die über den Werten für hundertjährige (bei Rhein-Diepoldsau im Bereich eines 20–50-jährlichen) Hochwassers lagen. Damit verbunden traten grosse Schwebstoffkonzentrationen (SSC) auf. Ein grosser Teil des Wassers überflutete das Gelände neben den Wasserläufen und lagerte riesige Feinstoffvolumen ab. Das Ziel dieser Studie ist die Ermittlung der Schwebstoffmenge, die von diesen Fliessgewässern während dem Hochwasser im August 2005 transportiert wurde. Zu diesem Zweck wurden die Trübung, der Tagesabfluss und die Stichproben der Schwebstoffkonzentration verwendet. Die Bestimmung der kontinuierlichen Schwebstoffkonzentration erfolgte mit zwei unterschiedlichen Methoden. Die erste beruht auf der kontinuierlich gemessenen Trübung und Stichprobenmessungen der Schwebstoffkonzentration. Die zweite beruht auf der ARC: Adaptive Rating Curve Methode. Die ARC ist eine modifizierte Version der Standardmethode der Abflusskurve, welche von Campell und Bauder (1940) vorgeschlagen wurde.

1. Einleitung Schwebstoffmessnetz

Die Abteilung Hydrologie hat bereits Anfang der 1960er Jahre mit der Messung der Schwebstoffkonzentration begonnen. Das Messnetz wurde im Rahmen der Untersuchung des Erosionsprozesses und des Schwebstofftransports geschaffen. Im Verlauf der Jahre wurde das Messnetz weiterentwickelt und für andere Zielsetzungen (z.B. Beobachtung der Auswirkungen des Klimawandels) angepasst. Zurzeit umfasst das Schwebstoffmessnetz 12 Stationen. davon sind 5 mit einer Trübungssonde ausgerüstet: Rhein-Diepoldsau, Aare-Bri-

enzwiler, Lüttschine-Gsteig, Rhone-Porte du Scex und Aare-Hagneck (Bild 1).

1.1 Schwebstoffmessungen

An den Stationen werden zweimal pro Woche Wasserproben entnommen und im Labor der Abteilung Hydrologie die Schwebstoffkonzentration bestimmt. Die Konzentration dient auch der Ermittlung der jährlichen Schwebstofffracht.

Die Messvertikale und die Tiefe der Entnahme werden aufgrund von Konzentrationsmessungen über die Flussbreite festgesetzt. Diese Messungen dienen der Auswahl des Messpunktes, der für die Er-

mittlung der mittleren Schwebstofffracht des Flusses am repräsentativsten ist.

Da die Stichprobennahme nicht täglich erfolgt, können wichtige Ereignisse verpasst werden, was zu gravierenden Unsicherheiten bei der Berechnung der jährlichen Schwebstofffracht führt. Um die Schwebstoffdaten besser interpretieren zu können, hat die Abteilung Hydrologie beschlossen, die Messstellen mit Trübungsmesssonden auszurüsten (Bild 2).

1.2 Stationen im vom August-Hochwasser 2005 betroffenen Gebiet

Neun Schwebstoffmessstationen liegen in den von den Unwettern vom August 2005 betroffenen Gebieten (Bild 1). Da für die vorliegende Analyse die Trübungsmessung unerlässlich ist, wurden dazu nur diejenigen Schwebstoffmessstationen ausgewählt, welche von den Unwettern betroffen und mit einer Trübungssonde ausgerüstet waren. Diese Messstationen sind: Rhein-Diepoldsau, Aare-Brienzwiler und Lüttschine-Gsteig.

2. Ermittlung der Schwebstoffkonzentration anhand von Trübungsmessungen

2.1 Die Trübungsmessung

Die Trübung des Wassers entspricht der Verringerung der Transparenz des Wassers aufgrund von Schwebstoffen. Diese

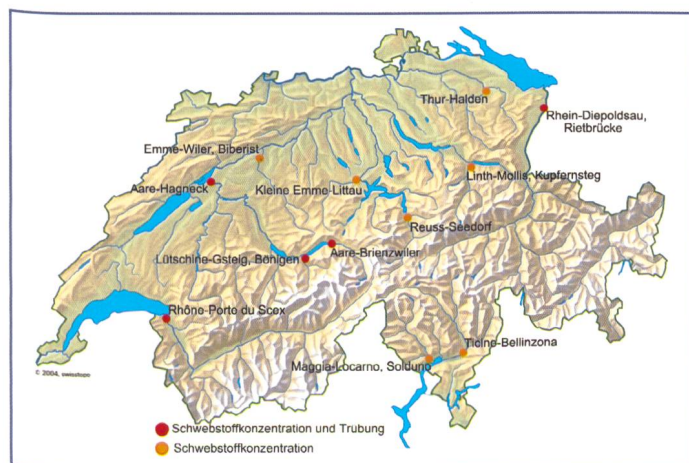


Bild 1. Eidgenössisches Messnetz zur Schwebstoffbeobachtung.

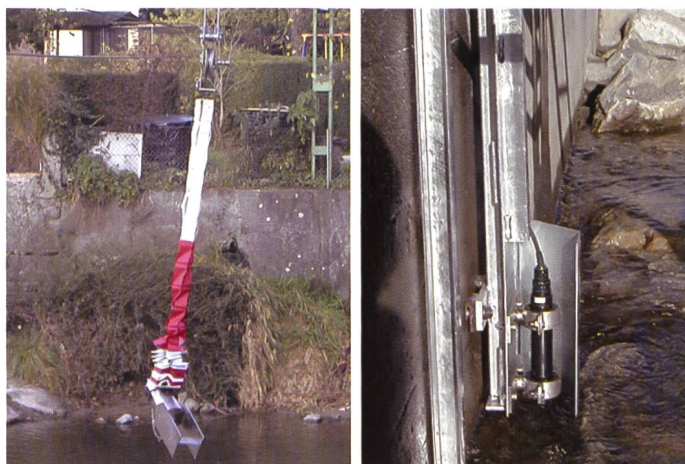


Bild 2. Schwebstoffbeobachtung, links: Beprobung mittels Seiflügelanlage; rechts: Trübungssonde.



Bild 3. Ereignis im August 2005. Links: Lütschine bei Lüt-schental; rechts: Die Lütschine (Flussbett im Vordergrund) bei Gsteig, oberhalb der Messstation.

bestehen im Allgemeinen aus einem Gemisch von anorganischen (Ton, Schlamm, feiner Sand), aber auch organischen (Plankton, Algen, Bakterien, Pollen usw.) und kolloidalen (Teilchen kleiner als $1 \mu\text{m}$) Substanzen.

Die Trübung ist eine unspezifische Messung der Schwebstoffkonzentration. Es kann keine konstante direkte Korrelation zwischen der Trübung und der Konzentration hergestellt werden, weil die optischen Eigenschaften einer Suspension unter anderem durch die Partikelkonzentration, -grösse und -form, sowie den Brechungskoeffizient, aber auch die durch Wellenlänge des einfallenden Lichtstrahles beeinflusst werden.

Wenn ein Lichtstrahl durch die Schwebstofflösung geschickt wird, treten zwei Phänomene auf:

- Die Partikel absorbieren das Licht, wodurch das ausfallende Licht schwächer wird als das einfallende.
- Die Partikel zerstreuen das Licht durch Reflexion und Brechung.

Die Grösse der Partikel beeinflusst die Wirksamkeit dieser Phänomene. Die grösseren Partikel absorbieren das Licht, während extrem feine Partikel es zerstreuen.

Weil die zwei Phänomene gleichzeitig auftreten, kann die Trübung einerseits via Lichtabsorbierung durch die Partikel gemessen werden. Hier wird die Intensität des Lichtstrahls, der in der verlängerten Richtung des einfallenden Strahls austritt, gemessen (turbidimetrische Methode). Andererseits wird die Trübung an der Lichtstreuung, das heisst mit der Intensität des Lichtstrahls im Winkel α zur Richtung

des einfallenden Strahls (nephelometrische Methode) (Bild 4), gemessen.

Die Abteilung Hydrologie nimmt ihre Messungen mit der nephelometrischen Methode vor und weist die gewonnenen Daten in TEF (Trübungseinheit Formazin) aus. Das zerstreute Licht wird unter einem Winkel von 90° zur einfallenden Lichtrichtung mit Hilfe einer Trübungssonde gemessen.

2.2 Beziehung zwischen Schwebstoffkonzentration und Trübung

Die Grösse und Form der Schwebstoffpartikel beeinflusst die Trübung. Wenn die Partikelgrösse bei gleichbleibender Konzentration abnimmt, kann eine Zunahme der Trübung beobachtet werden. Dies hängt damit zusammen, dass eine kleinere Partikelgrösse zu einer Vergrößerung der Reflexionsoberfläche je Masseneinheit führt. Die Trübungswerte verschiedener Schwebstoffarten (Ton, Schlamm, feiner Sand) können bei unterschiedlicher Konzentration gleich gross sein [Gippel, 1989]. Im Allgemeinen ist das Verhältnis zwischen Trübung und Konzentration linear, wenn die physikalischen Eigenschaften der Schwebstoffe (Grösse und Form) konstant sind [Gippel 1995].

Die Grösse der transportierten Schwebstoffe in den natürlichen Gewässern schwankt zeitlich und bleibt nur ausnahmsweise konstant [Fleming and Poodle, 1970]. Die Grösse ist je nach Jahreszeit [Bogen, 1992], von Hochwasser zu Hochwasser, aber auch während ein und demselben Hochwasserereignis [Bogen, 1992; Peart and Walling, 1992] Variati-

onen unterworfen. Im Allgemeinen nimmt die Grösse der Partikel mit ihrer Konzentration zu [Frostick et al., 1983; Long and Qian, 1986; Reid and Frostick, 1987], doch ist auch das Gegenteil möglich [Cilby and Hembree, 1955].

Trotz dieser Phänomene hält Gippel (1995) fest, dass das Verhältnis zwischen Trübung und Schwebstoffkonzentration mit zwei empirischen Funktionen approximativ beschrieben werden kann. Wenn sowohl die Schwebstoffkonzentration als auch Partikelgrösse schwanken, lautet die allgemeine Formel:

$$Tr = a \cdot (C_s)^c + b \quad (1)$$

Dabei gilt:

Tr = Trübung [TEF]

a, b und c = Kennzahl [ohne Dimension]

Cs = Schwebstoffkonzentration [kg/m^3]

b = 0 für nephelometrische Instrumente
c < 1 wenn die Partikelgrösse zusammen mit der Schwebstoffkonzentration schwankt

c > 1 wenn die Partikelgrösse entgegen der Schwebstoffkonzentration schwankt
Eine Änderung der Schwebstoffzusammensetzung wirkt sich auf den Exponenten c aus.

Schwankt hingegen die Schwebstoffkonzentration bei konstanter Partikelgrösse, lautet die allgemeine Formel:

$$Tr = t_s \cdot C_s + b \quad (2)$$

Dabei gilt:

Tr = Trübung [TEF]

t_s = spezifische Trübung [$(\text{TEF}) \cdot \text{m}^3/\text{kg}$]

Cs = Schwebstoffkonzentration [kg/m^3]

b = Kennzahl [ohne Dimension]

b = 0 für nephelometrische Instrumente
Schwankt die Schwebstoffkonzentration bei konstant bleibender Partikelgrösse und wird die Trübungsmessung mit nephelometrischen Instrumenten vorgenommen (b = 0), so kann die Gleichung 1 vereinfacht werden zu:

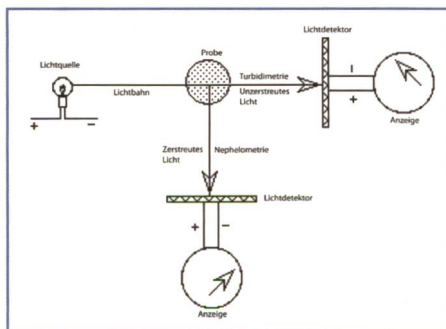


Bild 4. Schema der turbidimetrischen und nephelometrischen Methode.

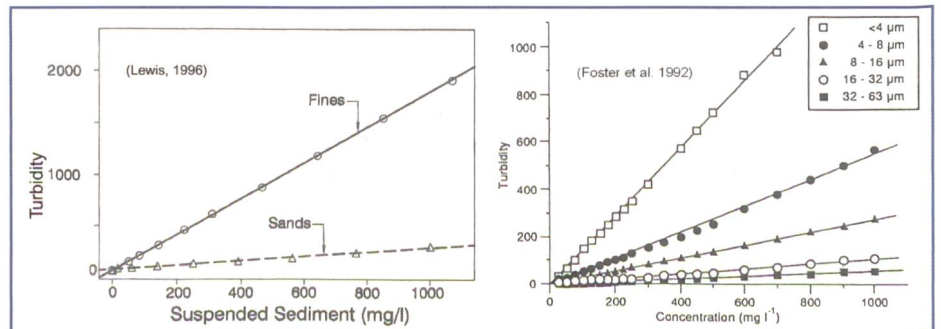


Bild 5. Die Trübung hängt von der Konzentration und Partikelgrösse ab.

$$Tr = t_s \cdot C_s \quad (3)$$

Auf dem Koordinatensystem Tr/SSC stellt die Formel (3) eine Gerade dar, die durch den Ursprung geht. Ihre Steigung ist durch die spezifische Trübung t_s gegeben, die von der Grösse der Schwebstoffpartikel abhängt (Bild 5).

2.3 Methode zur Ermittlung der Schwebstofffracht mittels Trübungsmessung

Die Schwebstofffracht wird als Produkt der mittleren Schwebstoffkonzentration und der Wasserabflussmenge ermittelt. Die Tagesabflussmenge kann relativ einfach bestimmt werden, während die Ermittlung der mittleren Tageskonzentration der Schwebstoffe komplex ist.

Die Konzentration schwankt zeitlich, sowie horizontal und vertikal im Querprofil des Fließgewässers. Darum müssten ständig Stichproben über das gesamte Profil entnommen werden, um

die mittlere Konzentration zuverlässig zu ermitteln. Dies ist praktisch nicht durchführbar. Um die Kosten für die Stichprobenentnahme und die Laboranalysen tief zu halten, wird eine einzige Probe dort entnommen, wo die Konzentration der Probe möglichst der mittleren Konzentration im Beobachtungsquerschnitt entspricht. Die Einschätzung der Tagesfracht ergibt sich dann aus dem Produkt der Abflussmenge und der Konzentration dieser Probe, die als repräsentativ für die mittlere Tageskonzentration erachtet wird.

Die routinemässige Beprobung stellt ca. 104 Stichproben pro Jahr zur Verfügung. Dies ist ausreichend, um die Schwebstofffracht für grosse Zeitintervalle (ein bis mehrere Jahre) zu berechnen. Die Berechnung beruht auf der statistischen Methode der Abflussdauerkurve [Grasso et Jakob 2003], die in der Abteilung Hydrologie seit 2000 zur Anwendung kommt. Für kurze Zeitabschnitte, wie das Hochwasser im August 2005 (wenige Tage), ist diese

statistische Methode leider ungeeignet. Zur Ermittlung der Schwebstofffracht, die von den Fließgewässern während eines Hochwasserereignisses transportiert wird, müssen Konzentration und Wassermenge kontinuierlich ermittelt werden.

Da die Stichprobenentnahme der Abteilung Hydrologie zwar regelmässig aber nicht kontinuierlich erfolgt, bestehen Datenlücken von mehreren Tagen zwischen den Probenentnahmen. Um die Lücken in der Reihe der Schwebstoffkonzentrationen zu schliessen, werden die fehlenden Tage durch Trübungsmessungen (Bild 6) ergänzt.

Bleibt die Partikelgrösse über einen kurzen Zeitraum (1 Tag) konstant, während die Konzentration variiert, so bleibt die spezifische Trübung $t_{s(j)}$ konstant, und die Gleichung (3) ist anwendbar.

Die spezifische Trübung $t_{s(j)}$ (4) kann anhand der Konzentration $C_{s(j)}$ und der täglichen Trübung $T_{r(j)}$ mit der Funktion (4) errechnet werden.

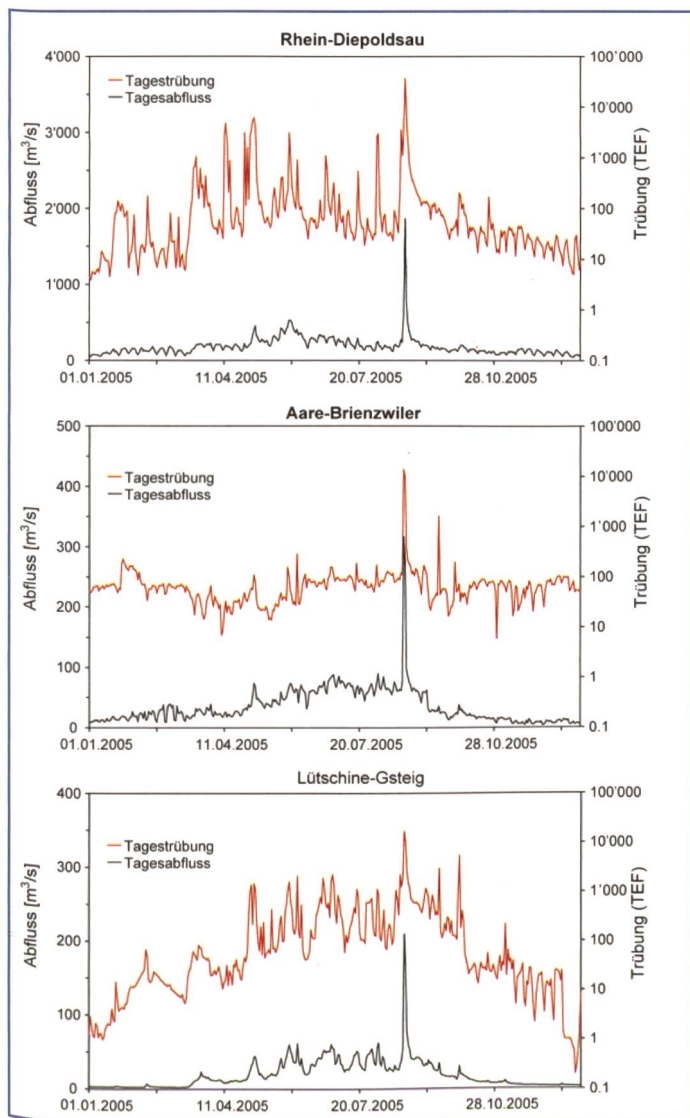


Bild 6. Abfluss- und Trübungsdatenreihe von drei Messstationen. Im Allgemeinen schwankt die Trübung simultan mit der Abflussmenge.

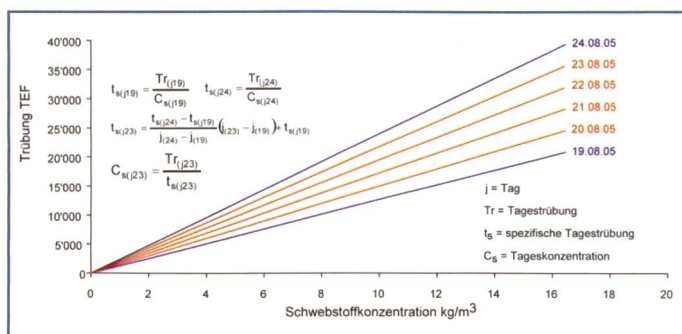


Bild 7. Lineare Interpolation der spezifischen Trübung. Abschätzung der Tageskonzentration vom 23. August 2006.

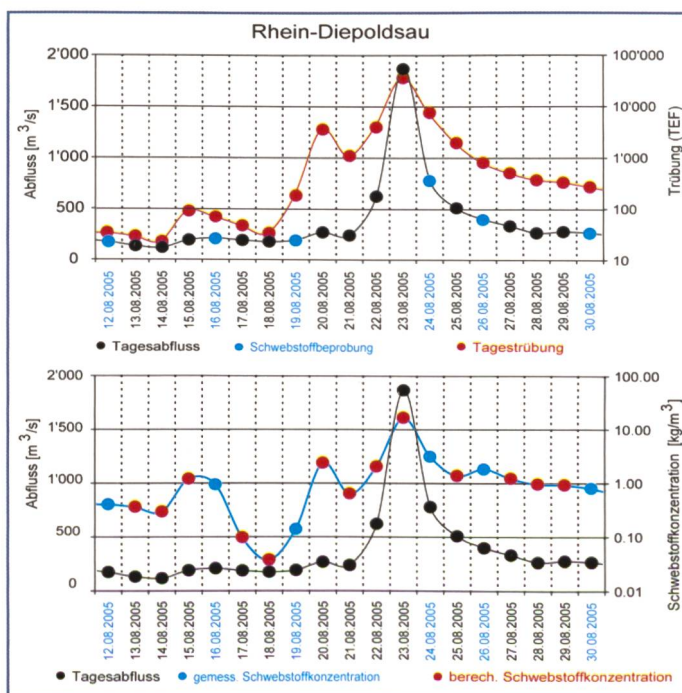


Bild 8. Die Lücken in der Reihe der Schwebstoffkonzentrationen werden mittels Konzentrationsberechnung aus den Trübungsmessungen ergänzt.

$$t_{s(i)} = \frac{Tr_{(i)}}{C_{s(i)}} \quad (4)$$

Dabei gilt:

$t_{s(i)}$, $Tr_{(i)}$, $C_{s(i)}$: spezifische Tagestrübung, Tagestrübung, Tageskonzentration (i = Index des Tages).

Um die Lücken der täglichen Konzentrationswerte zu ergänzen, wird die Hypothese aufgestellt, dass die spezifische Tagestrübung t_s linear mit der Zeit variiert.

Für den Tag ohne Stichprobenentnahme berechnet sich die spezifische Trübung $t_{s(g)}$ durch die lineare Interpolation von $t_{s(i)}$ bis $t_{s(j)}$, d.h. den zwei aufeinander folgenden Stichproben. Die Konzentration $C_{s(g)}$ des Tages g ist durch das Verhältnis von $Tr_{(g)}$ (gemessen) und $t_{s(g)}$ (interpoliert) gegeben (Bild 7):

$$C_{s(g)} = \frac{Tr_{(g)}}{t_{s(g)}} \quad (5)$$

Dieser Ansatz ermöglicht die Rekonstruktion der Wertereihe der Tageskonzentration für das Jahr 2005 und damit die Ermittlung der täglichen Schwebstofffracht (Bild 8).

2.4 Schwebstofffracht während des Hochwassers im August 2005

Unter normalen Umständen stellt die Stichprobenentnahme eine Tätigkeit dar, die für die Mitarbeitenden am Gewässer mit keinerlei Risiko verbunden ist. Doch sahen sich diese während dem Hochwasser im August 2005 mit höchsten Abflussmengen konfrontiert, deren Maxima die Werte eines hundertjährigen Hochwassers zum Teil überstiegen. Der extreme Wasserstand der Gewässer verunmöglichte die gefahrlose Stichprobenentnahme während dem Hochwasserereignis. Dies führte zu grösseren Stichprobenlücken als dies zwischen zwei Entnahmen pro Woche üblich ist. Der

Unterbruch dauerte bei der Station Aare-Brienzwiler 10 Tage (20.–29.08.2005), bei der Station Lutschine-Gsteig 7 Tage (19.–25.08.2005) und bei der Station Rhein-Diepoldsau 4 Tage (19.–23.08.2005).

Die fehlenden Werte wurden mit Hilfe der oben beschriebenen Methode (Abb. 9) rekonstruiert. Die im Zusammenhang mit dem Hochwasser im August 2005 geschätzten Tageskonzentrationswerte, und die seit Messbeginn maximal gemessenen Konzentrationen sind in der (Tabelle 1) ausgewiesen. Bei bekannten täglichen Konzentrations- und Abflusswerten kann die Schwebstofffracht der untersuchten Gewässer während dem Hochwasserereignis im August 2005 ermittelt werden.

Messstation	Tageskonzentration (anhand von Trübungsmessungen ermittelt)			Maximale gemessene Konzentrationswerte seit Beginn der Stichprobenentnahmen
	22.08.05	23.08.05	24.08.05	
Rhein-Diepoldsau Messbeginn 1966	2,0 kg/m ³	16,7 kg/m ³	3,2 kg/m ³	9,3 kg/m ³ 03.08.1974
Aare-Brienzwiler Messbeginn 1964	12,5 kg/m ³	9,8 kg/m ³	0,4 kg/m ³	11,7 kg/m ³ 22.03.1991
Lutschine-Gsteig Messbeginn 1964	13,6 kg/m ³	9,2 kg/m ³	2,6 kg/m ³	5,3 kg/m ³ 26.07.2001

Tabelle 1. Ermittelte Schwebstoffkonzentrationen verglichen mit den gemessenen Maximalwerten seit Messbeginn.

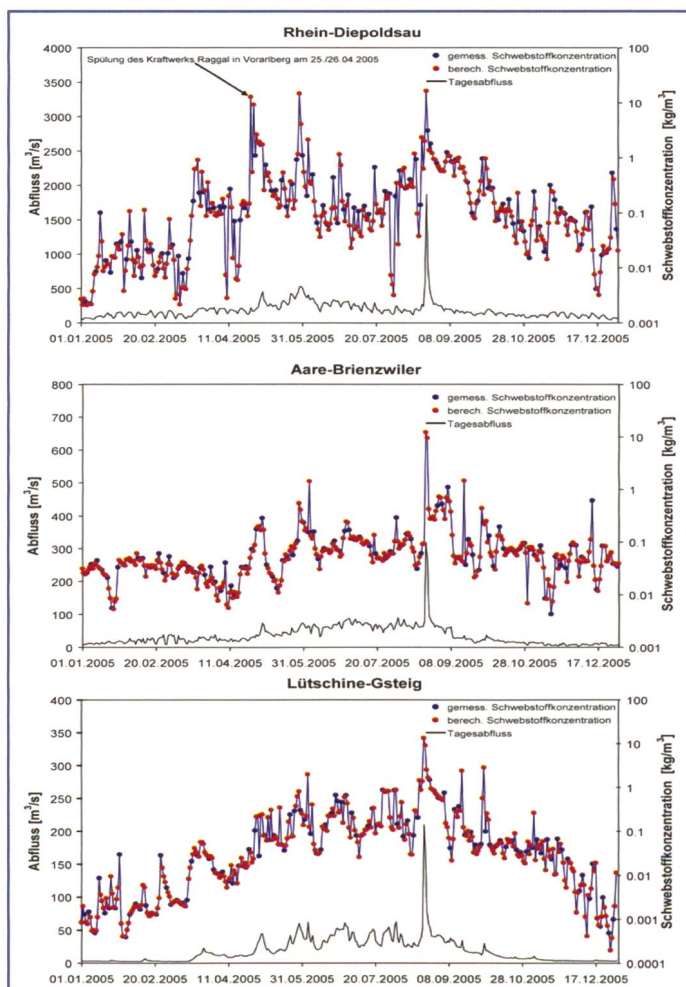


Bild 9. Die Wertelücken der Schwebstofftageskonzentration zwischen den zwei Stichprobenentnahmen pro Woche wurden mit der Trübungsmethode ergänzt.

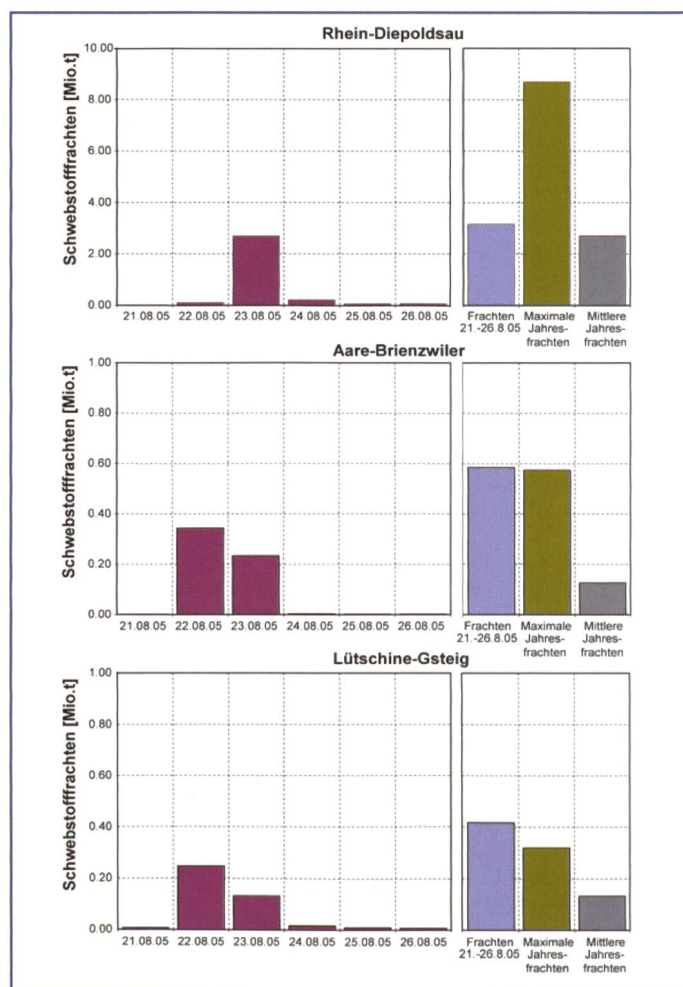


Bild 10. Vergleich der abgeschätzten Schwebstofffrachten mit den maximalen und mittleren Werten der Jahresfrachten seit Messbeginn.

In Bild 10 sind die ermittelten Werte, sowie die Maximal- und Mittelwerte der Jahresfracht seit Messbeginn dargestellt. Die Jahresfracht wurde mit der statistischen Methode der Abflussdauerkurve auf der Basis von jährlich ca. 104 Stichproben ermittelt (Grasso et Jakob, 2003).

2.5 Die Schwebstoffvolumen

Wird die Schwebstofffracht abgelagert, kann das Schwebstoffvolumen wie folgt abgeschätzt werden: bei der Berechnung des Schwebstoffvolumens muss die Porenziffer der Ablagerungen bestimmt werden. Die abgelagerten Stoffe bestehen im Normalfall aus Schlammsand mit einer mittleren Porenziffer (6) von ca. 0,6 und ein spezifisches Gewicht des Stoffes (7) von ca. 2,7 t/m³. Damit kann das Gesamtvolumen V_t der beförderten Schwebstoffe mit der Funktion (8) berechnet werden.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (6)$$

$$\gamma_s = \frac{p_s}{V_s} \quad (7)$$

$$V_t = \frac{p_s}{\gamma_s} \cdot (e + 1) \quad (8)$$

Dabei gilt:

e = Porenziffer	[ohne Dimension]
γ_s = spez. Gewicht des Stoffes	[kg/m ³]
V_v = Porenvolumen	[m ³]
V_s = Stoffvolumen	[m ³]
p_s = Stoffmasse	[kg]
V_t = Gesamtvolumen	[m ³]

Messstation	Schwebstoffvolumen 21-26/08/2005 [Mio.m ³]
Rhein-Diepoldsau	2
Aare-Brienzwiler	0.35
Lütschine-Gsteig	0.25

Tabelle 2. Zusammenstellung der ermittelten Schwebstoffvolumen an den Messstationen während dem Hochwasser 2005 (Grössenordnung).

2.6 Einordnung

Für die drei Messstationen sind die abgeschätzten maximalen Konzentrationen des Ereignisses vom August 2005 in den gleichen Grössenordnungen (Tabelle 1). Die abgeschätzte maximale Konzentration der Station Aare-Brienzwiler ist vergleichbar mit der je gemessenen maximalen Konzentration dieser Station. Die abgeschätzten maximalen Konzentrationen der Stationen Lütschine-Gsteig und Rhein-Diepoldsau entsprechen je etwa der doppelten je gemessenen maximalen Konzentration dieser Stationen.

Für schweizerische Verhältnisse sind solche Konzentrationen ziemlich gross. Es sind jedoch nicht die maximalen jemals beobachteten Konzentrationen. An den Stationen Landquart-Felsenbach und Arve-Genève, Bout du Monde, wurden schon Konzentrationen grösser als 30 kg/m³ gemessen.

Die während des Ereignisses vom August 2005 transportierten Schwebstofffrachten der Station Rhein-Diepoldsau sind in der Grössenordnung der mittleren Jahresfracht beziehungsweise ungefähr eines Drittels der maximalen Jahresfracht seit Messbeginn (Bild 10). Die abgeschätzten 2 Millionen Kubikmeter (Tabelle 2) entsprechen zwei Dritteln des mittleren jährlichen Feststoffeintrags im Bodensee (Lambert 1989).

Die abgeschätzten Schwebstofffrachten der Stationen Aare-Brienzwiler und Lütschine-Gsteig sind in der Grössenordnung der maximalen Jahresfrachten (beobachtet seit Messbeginn), und ungefähr 3 (Lütschine-Gsteig) bis 4,5 (Aare-Brienzwiler) Mal grösser als die mittleren Jahresfrachten (Bild 10).

2.7 Fehlerquellen und Unsicherheiten: Konzentration = f (Tagesstrübung)

Wie unter 2.1 beschrieben wurde, ergeben sich durch die unterschiedlichen Einflussgrössen Unsicherheiten bei der Ermittlung der Schwebstoffkonzentration aus den Trübungswerten.

Wie oben ausgeführt, wird die Konzentration als Funktion der Trübung mittels der Hypothese bestimmt, dass die spezifische Tagestrübung bei kurzen Intervallen (einige Tage) mit der Zeit linear schwankt. Obwohl die beobachteten Variationen von der spezifische Tagestrübung nicht linear sind, ist die lineare Interpolation eine relativ gute Darstellung dieses Parameters.

Eine andere Unsicherheit ergibt sich daraus, dass der Ort der Trübungsmessung und derjenige der Stichprobenentnahme nicht übereinstimmen. In einigen Fällen befindet sich die Trübungsmesssonde mehrere Meter von der Stichprobenentnahmestelle entfernt.

3. Einschätzung der Konzentration anhand der Abflussmenge

3.1 Beziehung zwischen Schwebstoffkonzentration und Abflussmenge

Campbell und Bauder (1940) haben festgehalten, dass sich die C/Q-Wertepaare

in einem logarithmischen Koordinatensystem annähernd auf einer Geraden befinden. Sie schlugen vor, diese Gerade als «Eichkurve» der Schwebstoffe eines Fließgewässers «rating curve» zu verwenden und sie für die Zeiten ohne Messungen zur Ermittlung der Schwebstoffkonzentration aufgrund des Abflusses einzusetzen.

Obwohl diese Eichkurve $\log(C)/\log(Q)$ empirisch erfasst wurde und physikalisch nicht begründet ist, findet sie in der Praxis breite Anwendung.

Die Eichkurve wird regressiv mit der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt. Angenommen, der Restfehler der Regression sei unabhängig und normalverteilt, so kann die Eichkurve in eine lineare Gleichung umgewandelt werden:

$$\ln(C_{(t)}) = a \ln(Q_{(t)}) + c \quad (9)$$

a und c sind die Koeffizienten der mit der Methode der kleinsten Quadrate bestimmten Regressionsgeraden.

Wenn gilt, dass $c = \ln(b)$, so lautet die Formel (9) neu:

$$\ln(C_{(t)}) = \ln(Q_{(t)})^a + \ln(b) \quad (10)$$

Die kontinuierliche Konzentrations-Zeit-Kurve kann somit anhand der Gleichung (11) konstruiert werden:

$$C(t) = b Q_{(t)}^a \quad (11)$$

Beim Regressionsmodell, das zur Konzentrationsermittlung verwendet wird, werden die realen Werte Konzentration und Abfluss logarithmisch umgewandelt, während das Endergebnis in linearen Werten wiedergegeben wird.

Die Koeffizienten a und b der Regressionsfunktion (10) werden berechnet, indem die Summe der quadratischen Abweichungen im logarithmischen Raum minimiert wird. Diese Operation entspricht nicht der Minimierung der Summe der quadratischen Abweichungen der realen Werte. Die Verwendung der logarithmischen Werte schafft eine Verzerrung, die die Konzentrationen unterbewertet.

Dies beruht auf der Tatsache, dass die Bestimmung der Koeffizienten a und b für die Regressionsgerade auf dem geometrischen Mittel beruht, das kleiner als das arithmetische Mittel ist. Die Verwendung der Logarithmen erzeugt also eine negative Verzerrung, die mit wachsender Streuung der Punktwolke um die Regressionsgerade herum zunimmt.

Verschiedene Autoren (Lane, 1975; De Long, 1982; Thomas, 1985; Jansson,

1985; Fergusson, 1986; Koch and Smillie, 1986; Cohn et al., 1989) haben nachgewiesen, dass dieser Fehler mehr als 50% betragen kann. Einige Autoren haben vorgeschlagen, diese Abweichung mit Korrekturfaktoren auszugleichen, doch hat sich dies als unzuverlässig herausgestellt (Glysson, 1987; Walling and Webb, 1988).

Eine andere Schwäche der Eichkurvenmethode ist durch die unzureichende Genauigkeit der Extremwerte gegeben, die überdies nur durch eine geringe Zahl von Punkten dargestellt werden. Wird die Eichkurve über die Abflussschichprobenwerte hinaus extrapoliert, können grosse Fehler (bis hin zu unplausiblen Konzentrationswerten) auftreten.

Aufgrund der Schwierigkeiten bei dieser Methode hat die Abteilung Hydrologie im Jahr 2000 entschieden, zur Berechnung der jährlichen Schwebstofffracht die Methode der Eichkurve zugunsten der Methode der «Abflussdauerkurve» aufzugeben.

In Finger et al. (2005) wird zur Reduktion der Verzerrungen aufgrund der logarithmischen Umwandlung der Konzentrations- und Abflusswerte eine modifizierte Eichkurven-Methode vorgestellt: die ARC «adaptive rating-curve technique» [Formel (12)]. Dieses Modell setzt die Regressionskurve $\log(C)/\log(Q)$ aus drei eigenständigen Regressionsgeraden zusammen, und zwar je eine für geringen Abfluss, für mittleren Abfluss und für Hochwasserabfluss (Bild 11).

Im Unterschied zur Standardmethode [Formel (11)], wird die Konzentration $CT(Q_{(t)})$ [Formel (12)] durch den Wert $\Delta CR_{(t)}$ korrigiert:

$$CR(Q_{(t)}) = b Q_{(t)}^a + \Delta CR_{(t)} \quad (12)$$

$\Delta CR_{(t)}$ ist die Differenz zwischen der interpolierten und der gemessenen Konzentration. $\Delta CR_{(t)}$ wird linear zwischen die Stichproben interpoliert. Die so erzeugte Kurve [Formel 12] nähert sich den beobachteten Konzentrationen an.

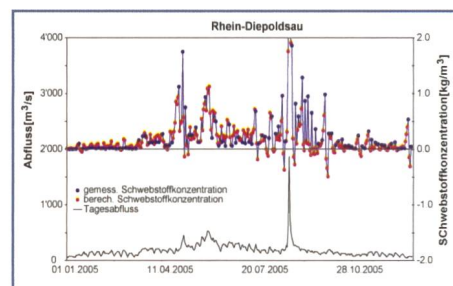


Bild 12. Die ARC-Methode ergibt z.T. negative Konzentrationswerte. Beispiel Messstation Rhein-Diepoldsau.

Diese Methode wurde auf die C/Q-Daten der Messstationen Aare-Brienzwiler, Lüttschne-Gsteig und Rhein-Diepoldsau (Bild 12) angewendet.

Die Formel (12) ergibt dann negative Konzentrationswerte ($CR(Q_{(t)}) < 0$) wenn $\Delta CR_{(t)} < 0$ und $|\Delta CR_{(t)}| > a Q_{(t)}^b$ (Bild 12).

Zur Umgehung dieses Problems wurde die Gültigkeit der Gleichung (12) mit einer Bedingung eingeschränkt:

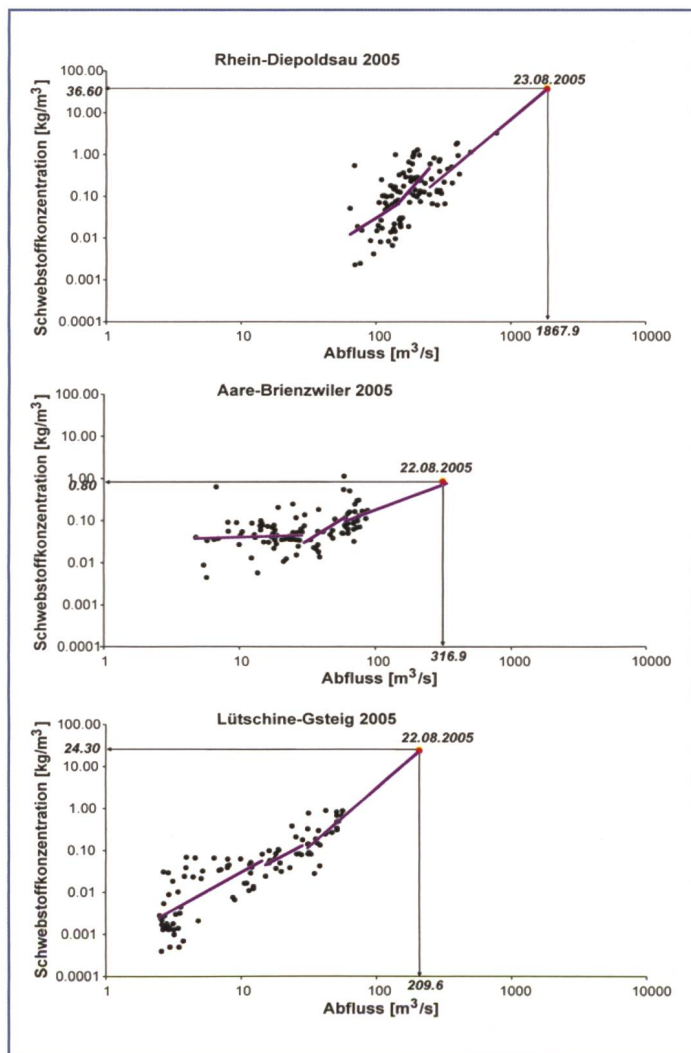


Bild 11. Die C/Q-Eichkurven der drei Messstationen wurden anhand der ARC-Methode (Finger et al., 2005) modelliert. Die Determinationskoeffizienten der Regressionsgeraden sind im Allgemeinen äusserst gering.

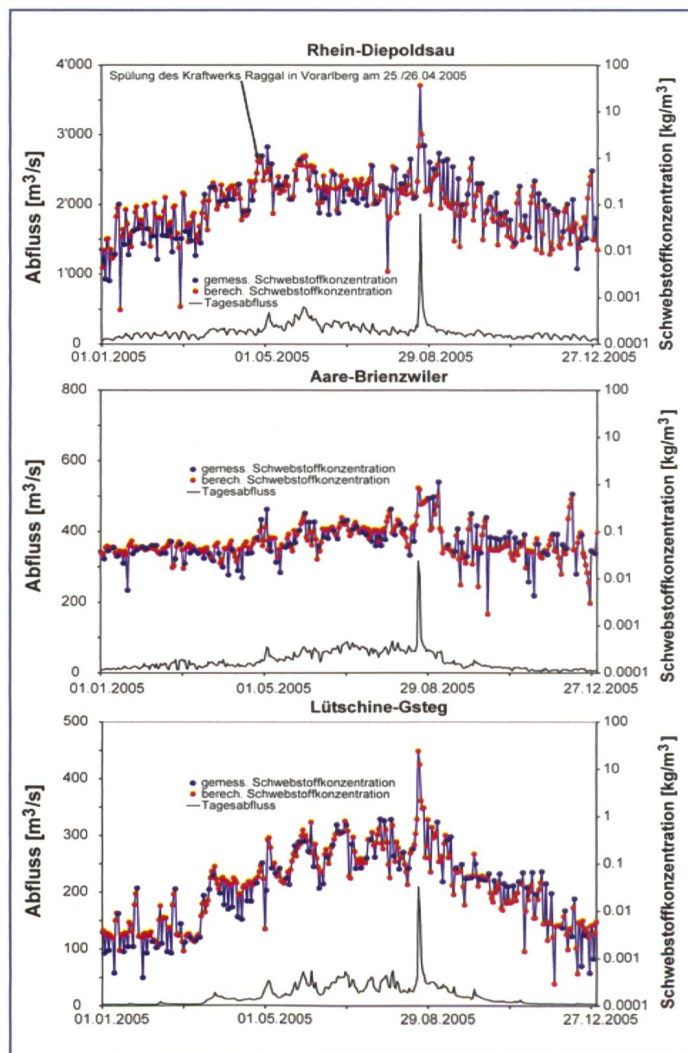


Bild 13. Die Datenlücken der Tageskonzentrationen des Schwebstoffs (bei zwei Stichprobenentnahmen pro Woche) wurden mittels ARC-Methode aufgefüllt und gemäss Formel 13 ergänzt.

$$\begin{cases} CR(Q_{(t)}) = a Q_{(t)}^b + \Delta CR_{(t)} & \text{wenn } \Delta CR_{(t)} > 0 \text{ oder } \Delta CR_{(t)} < 0 \text{ und } |\Delta CR_{(t)}| < a Q_{(t)}^b \\ CR(Q_{(t)}) = a Q_{(t)}^b & \text{wenn } \Delta CR_{(t)} < 0 \text{ und } |\Delta CR_{(t)}| > a Q_{(t)}^b \end{cases} \quad (13)$$

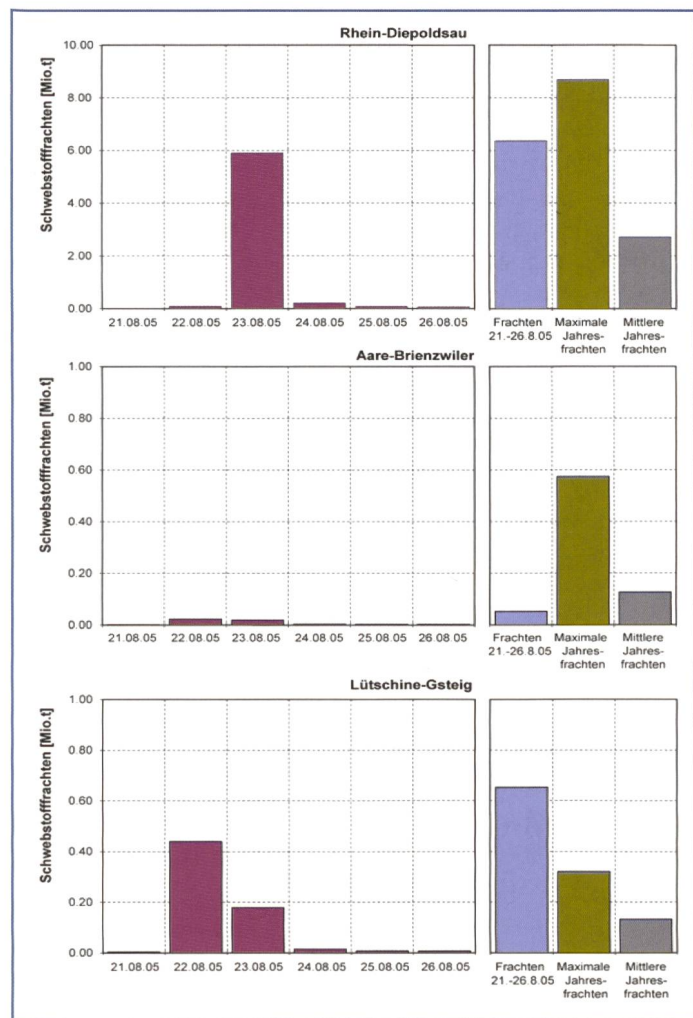


Bild 14. Die Ermittlung der Schwebstofffracht während dem Hochwasser im August 2005 beruht auf Konzentrationswerten, die mittels ARC-Methode abgeschätzt wurden.

Die anhand von Gleichung (13) ermittelten Konzentrationswerte wurden eingesetzt (Bild 13), um die Schwebstofffracht des Hochwasserereignisses im August 2005 zu berechnen (Bild 14).

3.2 Fehlerquellen und Unsicherheiten: $C = f(Q)$

Die Unsicherheiten dieser Methode beruhen hauptsächlich auf dem Verhältnis $\log(C)/\log(Q)$, da dieses rein empirischer Art ist und jeglicher physikalischer Begründung entbehrt. Ausserdem weisen die $\log(C)/\log(Q)$ -Regressionen der Schweizer Messstationen kleine Determinationskoeffizienten R^2 aus, was mit den Fliessgewässern und deren Einzugsgebieten zusammenhängt. Nebst anderem werden diese auch durch menschliches Einwirken beeinflusst.

Wenn R^2 gross ist ($R^2 > 0,6$) bedeutet dies, dass die Konzentrationsvariation

zentration nicht nur von der Abflussmenge ab, womit die ermittelten Werte nicht repräsentativ sind.

Tabelle 3 weist die berechneten Determinationskoeffizienten aus. Es ist auffällig, dass die Werte äusserst klein sind (Minimalwerte: 0,0031 für die Station Aare-Brienzwiler).

Nur unter aussergewöhnlichen Umständen (z.B. bei täglichen Stichprobenentnahmen während dem Hochwasserrückgang) konnten für den Determinationskoeffizienten R^2 grössere Werte festgestellt werden.

Eine Fehlerquelle liegt zudem in der Ungenauigkeit bei den Extremwerten. Die Extrapolation auf Werte, die über den Stichprobenwerten liegen, kann deshalb zufälligerweise entweder zu brauchbaren oder zu unbrauchbaren Konzentrationsabschätzungen führen.

Ein anderer Nachteil dieser Me-

Messstation	Determinationskoeffizient R^2 der Regressionsgerade		
	niedriger Abfluss	mittlerer Abfluss	hoher Abfluss
Aare-Brienzwiler	0.0031	0.1768	0.0381
Lüttschne-Gsteig	0.4204	0.2778	0.3849
Rhine-Diepoldsau	0.1105	0.1719	0.3843

Tabelle 3. Die Determinationskoeffizienten der Regressionsgeraden sind im Allgemeinen äusserst klein.

Messstation	Max. Konzentration [kg/m ³]		Schwebstofffracht 21.-26. August 2005 [Mio.t]	
	Trübungs-Methode	ARC-Methode	Trübungs-Methode	ARC-Methode
Aare-Brienzwiler 22.08.2005	12.5	0.8	0.6	0.05
Lüttschne-Gsteig 22.08.2005	13.6	24.3	0.4	0.7
Rhine-Diepoldsau 23.08.2005	16.7	36.6	3	6

Tabelle 4. Vergleich der Werte, die anhand der ARC- und der Trübungsmethode ermittelt wurden.

zum grossen Teil von der Abflussmenge abhängig ist. Dann kann das $\log(C)/\log(Q)$ -Verhältnis verwendet werden, um die Lücken in den Konzentrationsdaten zu füllen. Anders gesagt: Die Abflussmengen dienen der Ermittlung der schwankenden Konzentrationsmengen für die Zeiträume, die zwischen den zwei wöchentlichen Stichprobenentnahmen liegen. Wenn andererseits der Determinationskoeffizient klein ist, hängt die Kon-

thode ist, dass die anthropogene Beeinflussung in den Konzentrationsvariationen nicht berücksichtigt wird (z.B. Rhein-Diepoldsau: Spülung des Kraftwerks Raggal in Vorarlberg am 25./26.04.2005, Bild 13).

4. Analyse der Ergebnisse

Tabelle 4 gibt einen Überblick über die Studienergebnisse. Die beiden Methoden zur Ermittlung der Konzentrationswerte ergeben vor allem für die Messstationen Aare-Brienzwiler und Rhein-Diepoldsau, aber auch für Lüttschne-Gsteig äusserst unterschiedliche Resultate.

Die maximale Konzentration (ca. 0,8 kg/m³), die mit der ARC-Methode bei der Station Aare-Brienzwiler für den 22. August 2005 ermittelt wurde, ist verglichen mit dem beobachteten Tagesabfluss (ca. 300 m³/s) unseres Erachtens zu klein. Dagegen erscheint der Wert von 12,5 kg/m³, der anhand der Trübungsmethode ermittelt wurde, realistischer.

Für die Stationen Lüttschne-Gsteig und Rhein-Diepoldsau wurde bei der Konzentration ein grosser Unterschied zwischen den zwei Methoden festgestellt. Die Konzentrationswerte der ARC-Methode sind etwa doppelt so gross wie die der Trübungsmethode. Das $\log(C)/\log(Q)$ -Verhältnis schafft Unsicherheiten bei der Ermittlung der maximalen Konzentrationswerte, weil sie für extreme Abflusswerte ungeeignet ist.

5. Schlussfolgerung

Die Auswirkungen des Unwetters im August 2005 haben an den Stationen Rhein-Diepoldsau, Aare-Brienzwiler und Lüttschne-Gsteig zu ausserordentlichen Abflusswerten geführt. Die Höchstwerte lagen bei Brienzwiler und Gsteig weit über demjenigen eines hundertjährigen, bei Diepoldsau im Bereich eines 20–50-jährlichen Hochwassers.

Die geschätzten maximalen

Schwebstoffkonzentrationen betrugen zwischen 12,5 kg/m³ und 16,7 kg/m³. Im Verhältnis mit den grössten je gemessenen Konzentrationen dieser drei Messstationen ist dies sehr hoch.

Während bei der Station Rhein-Dieboldsau die transportierten Schwebstofffrachten in der Grössenordnung der mittleren Jahresfrachten sind, bewegen sich die Schwebstofffrachten der Stationen Aare-Brienzwiler und Lüttschene-Gsteig im Bereich 3 bis 4,5 Mal grösser als die mittleren Jahresfrachten.

Die Überflutung der Vorländer hat zu riesigen Feinstoffablagerungen geführt (ca. 7 m³ bis 10 m³ pro 1000 m³ Wasser), deren Räumung äusserst kostspielig war.

Die Ermittlung der Schwebstofffrachten ist eine äusserst schwierige, aufwändige und je nach Genauigkeitsanforderungen kostspielige Angelegenheit, da die Schwebstoffkonzentration in Raum und Zeit variiert. Die Berechnungsmethode spielt dabei eine zentrale Rolle. In der Studie werden zwei verschiedene Methoden angewandt, die zu äusserst unterschiedlichen Ergebnissen geführt haben. Wir sind der Meinung, dass die Werte, die anhand der Trübungsmethode ermittelt wurden, der Wirklichkeit eher näher kom-

men als die Ergebnisse des log(C)/log(Q)-Verhältnisses. Die Trübungsmessungen stellen eine wichtige zusätzliche Informationsquelle dar, die gemeinsam mit den zwei wöchentlichen Stichprobenentnahmen eine sinnvolle Rekonstruktion der zeitlichen Konzentrationsschwankungen ermöglicht.

Das Messnetz zur Schwebstoffbeobachtung umfasst heute 12 Messstationen, von denen nur fünf mit einer Trübungsmesssonde ausgerüstet sind. Die Abteilung Hydrologie des BAFU plant im Rahmen ihrer finanziellen und personellen Mittel alle 12 Stationen mit solchen Sonden auszustatten.

Literatur

- Bogen, J., 1992: Monitoring grain size of suspended sediments in rivers, in *Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basins*, edited by J. Bogen, D.E. Walling, and T.J. Day, IAHS Publ. 210, pp. 183–190.
- Cohn, T. A., DeLong, L. L., Gilroy, E. J., Hirsch, R. M. and Wells, D. K., 1989: Estimating constituent loads, *Water Resources Research*, 25, 937–942.
- DeLong, L., 1982: *Water Quality of Streams and Springs*, Green River Basin, Wyoming, U. S. Geological Survey Open File Report 82–4008.

Gippel, C.J., 1989: The use of turbidimeters in suspended sediment research, *Hydrobiologia*, 176/177, 465–480.

Gippel, C. J., 1995: Potential of turbidity monitoring for measuring the transport of suspended solids in streams, *Hydrol. Processes*, 9, 83–97.

Glysson, G. Douglas, 1987: *Sediment transport curves: U.S. Geological Survey Open-File Report 87–218*.

Grasso, D.A. et A., Jakob, 2003: Charge de sédiments en suspension – Comparaison entre deux méthodes de calcul, *GWA*, 298–305.

Jansson, M., 1985: A comparison of detransformed logarithmic regressions and power function regressions, *Geografiska Annaler*, 67 A, 61–70.

Koch, R. W. and Smillie, G. M., 1986: Bias in hydrologic prediction using logtransformed regression models, *Water Resources Bulletin*, 22, 717–723.

Lambert, A., 1989: Das Rheindelta im See – Vermessung Photogrammetrie Kulturtechnik 87/1, 29–32.

Lane, W. L., 1975: Extraction of Information on Inorganic Water Quality, Colorado State University, Fort Collins 73.

Long, Y., and N. Qian, 1986: Erosion and transportation of sediment in the Yellow River basin, *Int. J. Sediment. Res.*, 1, 2–38.

Peart, M. R., and D. E. Walling, 1992: Particle size characteristics of fluvial suspended sediment, in *Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basins*, edited by J. Bogen, D.E. Walling, and T.J. Day, IAHS Publ. 210, pp. 397–407.

Reid, I., and L. E. Frostick, 1987: Flow dynamics and suspended sediment dynamics in arid zone flash floods, *Hydrolog. Process.*, 1, 239–253.

Thomas, R. B., 1985: Estimating total suspended sediment yield with probability sampling, *Water Resources Research*, 21, 1381.

Walling, D. E. and Webb, B. W., 1988: The reliability of rating curve estimates of suspended sediment yield: Some further comments, *Symposium on Sediment Budgets*, Porto Alegre, Brazil: IAHS, pp. 337–350.

Ferguson, R. I., 1986:

River loads underestimated by rating curves, *Water Resources Research*, 22, 74.

Finger, D., Schmid, M., and Alfred Wüest, 2005: Downstream effects of hydropower operation on riverine particle transport and their lake intrusions, *Applied Aquatic Ecology*, Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology, EAWAG, Switzerland.

Fleming, G., and T. Poodle, 1970: Particle size of river sediments, *J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng.*, 95, 431–439.

Frostick, L.E., I. Reid, and J. T. Laymann, 1983: Changing size distribution of suspended sediment in aridzone flash floods, *Spec. Publ. Int. Assoc. Sedimentol.*, 6, 97–106.

Anschrift der Verfasser

D. A. Grasso, A. Jakob und M. Spreafico
Bundesamt für Umwelt, Abteilung Hydrologie
CH-3003 Bern

Müller & Panther Executive Search Consulting

Bereit für eine neue Herausforderung?

Das trifft sich gut, denn wir sind Spezialisten für die Vermittlung von Ingenieuren.

Unsere Mandanten suchen (m/w):

Bauingenieure
Elektroingenieure
Maschineningenieure

im Bereich Wasserkraft. Haben Sie mehrjährige Erfahrung im Bereich Wasserkraft und Energieversorgung, so warten wir auf Sie!

Interessiert?

Wir freuen uns, wenn wir Ihrer Karriere Schub verleihen dürfen. Bitte melden Sie sich direkt bei unserem Herrn Simon Müller, Managing Director.

Müller & Panther GmbH
Badenerstrasse 9
CH-5201 Brugg

Tel +41(0) 56 241 00 91
Fax +41(0) 56 250 03 81

www.muellerundpanther.ch
s.mueller@muellerundpanther.ch