

# Abflussschwankungen in der Aare

Peter Billeter, Matthias Mende

## Zusammenfassung

Der vorliegende Kurzbericht beschreibt die Analyse von regelungsbedingten Abflussschwankungen in der abschnittsweise gestauten Aare zwischen dem Bielersee und dem Zusammenfluss mit dem Rhein. Mit einer Optimierung der Kraftwerksregulierung und der Modifikation der Wasserhaushaltssteuerungen der einzelnen Kraftwerksstufen in den Jahren 2002 bis 2007 konnten die Abflussschwankungen in der Aare deutlich reduziert werden. Mit der Auswertung und Analyse von amtlichen Pegeln und Kraftwerksdaten kann die Reduktion der Schwankungen nachgewiesen und quantifiziert werden.

## 1. Ausgangslage und Zielsetzung

In der Vergangenheit wurden in der Aare unterstrom des Bielersees immer wieder periodische Abflussschwankungen von bis zu  $\pm 50 \text{ m}^3/\text{s}$  beobachtet, deren Ursachen auf die Regulierung der Kraftwerke zurückgeführt wurden.

In einer vom Verband Aare-Rheinwerke (VAR) nach eigenen Abklärungen in Auftrag gegebenen Studie (Meier 2001) wurden mögliche Ursachen der Schwankungen benannt und Massnahmen zur Dämpfung empfohlen. Durch Optimierungen der Kraftwerksregelung und Modifikationen der Wasserhaushaltssteuerungen soll eine deutliche Verringerung erreicht werden.

Die letzten Modifikationen wurden im Laufe des Jahres 2007 umgesetzt. Zur Überprüfung ihrer Wirksamkeit wurde von der IUB Ingenieur-Unternehmung AG eine Erfolgskontrolle der umgesetzten Massnahmen (IUB 2009) durchgeführt. Diese beinhaltet (a) die Analyse von kraftwerksverursachten Pegel- und Abflussschwankungen nach der Massnahmenumsetzung und (b) die Darstellung und Beurteilung der Änderungen gegenüber den Verhältnissen vor der Umsetzung.

## 2. Vorgehensweise

In Anlehnung an das Vorgehen von Meier (2001) wurden zunächst ausgewählte Zeitreihen von Kraftwerksabflussdaten nach Massnahmenumsetzung hinsichtlich der Grösse und Entwicklung der Schwankungsamplituden in Fliessrichtung untersucht. Zusätzlich wurden amtliche und Kraftwerksdaten statistisch ausgewertet und Betrachtungen im Frequenzraum durchgeführt. Die Untersuchungen umfassen die Berechnung und Beurteilung

1. der Standardabweichung der Wasserstands- und Abflussschwankungen
2. des Leistungsspektrums der Abflussschwankungen
3. der Übertragungsfunktionen der Abflussschwankungen zwischen zwei Messstellen

Die Analyse der Leistungsspektren und Übertragungsfunktionen erlauben es, Aussagen über die Frequenz und zugehörige Amplituden der Schwankungen sowie über die Fortpflanzung allfälliger Schwallwellen zwischen den Messstellen bzw. Kraftwerksstufen zu machen. Als Eingangsdaten dienten die amtlichen Pegelstände der Jahre 2000, 2001, 2007 und 2008 (1. Halbjahr) sowie Kraftwerksdaten der Zeiträume Januar/Februar und

Mai/Juni 2008. Die Lage der Kraftwerke und amtlichen Pegel sind *Bild 1* zu entnehmen.

## 3. Analyse der Amplituden und Standardabweichungen

Wie die Untersuchungen von Meier (2001) zeigen, treten die grössten Abflussschwankungen im Bereich des Mittelwasserabflusses ( $MQ_{\text{Brugg}} = 316 \text{ m}^3/\text{s}$ ) auf. Beim Vergleich der mittleren Amplituden ausgewählter Zeitreihen in diesem Bereich (*Bild 2*) zeigt sich eine deutliche Abschwächung der Schwankungen um bis ca. 75% von maximal  $39 \text{ m}^3/\text{s}$  vor Umsetzung der Massnahmen (rote Linie) auf ca.  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  (blaue Linien). Bei der Interpretation der Ergebnisse ist jedoch grundsätzlich zu berücksichtigen, dass es sich um recht kurze Zeitreihen handelt, die nicht zwangsläufig repräsentativ für das Gesamtbild sind.

Um periodische Abfluss- und Wasserstandsschwankungen längerer Zeitreihen zu quantifizieren ist die Standardabweichung, die ein Mass für die Schwankung der Variablen um ihren Mittelwert darstellt, eine geeignete Grösse. Um natürliche, hydrologisch bedingte Schwankungen bei der Bestimmung der Standardabweichung unberücksichtigt zu lassen,



Bild 1. Übersichtsplan der unteren Aare.

wurden langwellige Schwankungsanteile mit Perioden grösser als einen Tag herausgefiltert.

Bild 3 zeigt die Standardabweichungen der Abfluss- und Wasserstandsschwankungen an den amtlichen Pegeln jeweils im 1. Halbjahr der Jahre 2000, 2001, 2007 und 2008. Es ist gut zu erkennen, dass die Standardabweichungen mit der Umsetzung aller Massnahmen an den Pegeln Murgenthal, Brugg und Untersiggenthal am unteren Ende der Aare um bis zur Hälfte abgenommen haben, obwohl die Schwankungen am Beginn der Staukette (Pegel Brügg-Ägerten) in ähnlicher Grösse blieben. Nach der Sanierung der Kraftwerksregelungen ist nun noch mit Standardabweichungen der Wasserstandsschwankungen in der Aare von ca. 5 cm (vor der Vereinigung mit Reuss und

Limmat) bzw. 2 cm (nach der Vereinigung mit Reuss und Limmat) zu rechnen. Diese Wellenamplituden liegen unter den Amplituden der natürlichen windinduzierten Wellen auf der Wasseroberfläche.

#### 4. Analyse im Frequenzraum

##### 4.1 Methode der Signalanalyse im Frequenzraum

Die Auswertung basiert auf den Methoden der Analyse zufälliger Signale (vgl. z.B. Bendat & Piersol, 1980, 1986). Verwendet wurden die heute gängigen Instrumente der digitalen Signalanalyse mit der Verknüpfung des Zeit- und des Frequenzraums via Fourier-Transformation. Zur Trennung von deterministischen und stochastischen Signalanteilen werden eine blockweise Signalbearbeitung und

die anschliessende Mittelung eingesetzt (blockwise averaging). Berechnet wurden einerseits die Leistungs- und Kreuzleistungsspektren  $S_{xx}(f)$ ,  $S_{yy}(x)$  bzw.  $S_{xy}(f)$  an den einzelnen Messorten. Andererseits wurden die Übertragungsfunktionen  $H_{xy}(f)$  als Quotient zwischen den Spektren zweier Messorte ermittelt. Die Übertragungsfunktion gibt an, wie stark die Schwankung mit einer Frequenz  $f_i$  auf dem Übertragungsweg von der Messstelle  $x$  (Oberlieger-Kraftwerk) zur Messstelle  $y$  (Untерlieger-Kraftwerk) verstärkt oder abgeschwächt wird.

##### 4.2 Frequenzen der Abflussschwankungen – Leistungsspektren

Die Analyse des Leistungsspektrums ermöglicht eine Aussage über die Grösse der Schwankungen in einem bestimmten Frequenzbereich bzw. mit bestimmten Schwankungsperioden (die Frequenz ist als x-mal pro Tag dargestellt, 24 Stunden geteilt durch die angegebene Frequenz ergibt die Periode der Schwankung). Der Vergleich der Leistungsspektren von Ganglinien vor und nach der Modifikation der Regeleinrichtungen gestattet detaillierte Aussagen dazu, in welchem Frequenzbereich es zu massnahmenbedingten Änderungen kam und wie ausgeprägt diese sind.

Die gemittelten Leistungsspektren der Abflussganglinien der vier amtlichen Pegel wurden für die Zeit vor bzw. nach Umsetzung der Modifizierungen berechnet. Die Wirkung der verbesserten Kraftwerksregelung ist sehr gut anhand der Spektren der Messstelle Brugg zu sehen (Bild 4). Die Abflussschwankungen werden über weite Frequenzbereiche deutlich gemindert, lediglich Schwankungen mit Perioden im Bereich  $\frac{1}{2}$  bis 1 Tag (entsprechend einer Frequenz von 1–2-mal täglich) und ca. 1 h (ca. 24-mal täglich) werden nicht gedämpft.

Zu einer leichten Zunahme der Schwankungen in weiten Frequenzbereichen kommt es hingegen am Pegel Brügg-Ägerten. Wie Bild 4 und die weitere Analyse zeigen, sind bezüglich der Ausbreitung in der Staukette der Aare primär die Schwankungen mit Perioden von  $\frac{1}{2}$  bis 1 Tag relevant. Mit dem Pegel Brügg-Ägerten wird die Bielersee-Regulierung erfasst. Dieser wird heute, nach den Erfahrungen bei den Hochwasserereignissen 2005 und 2007, sensibler reguliert (sogenannte Prognoseregulierung) als in der Betrachtungsperiode vor der Umsetzung der regeltechnischen Massnahmen bei den Kraftwerken.

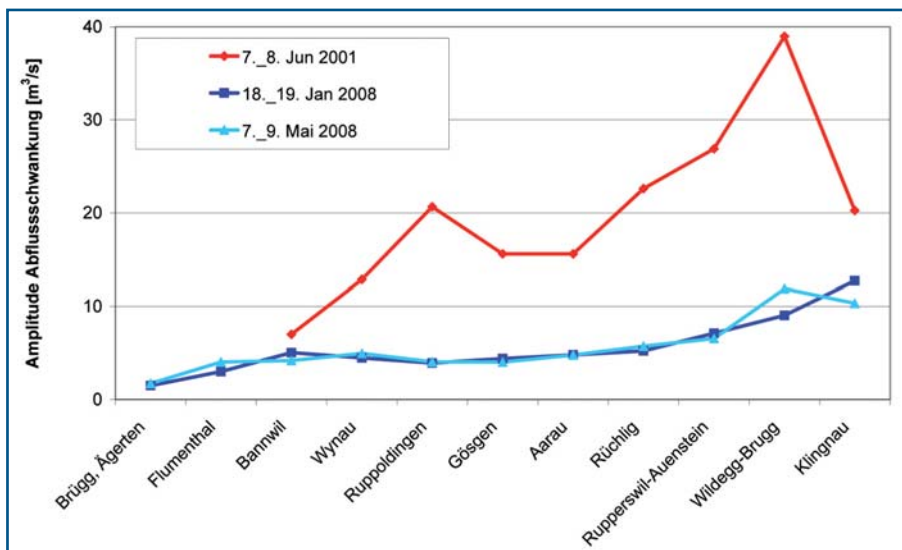


Bild 2. Mittlere Amplitude der Abflussschwankungen ausgewählter Zeitreihen bei MQ: Vergleich der Situation vor (rote Linie) und nach (blaue Linien) Umsetzung der Massnahmen.

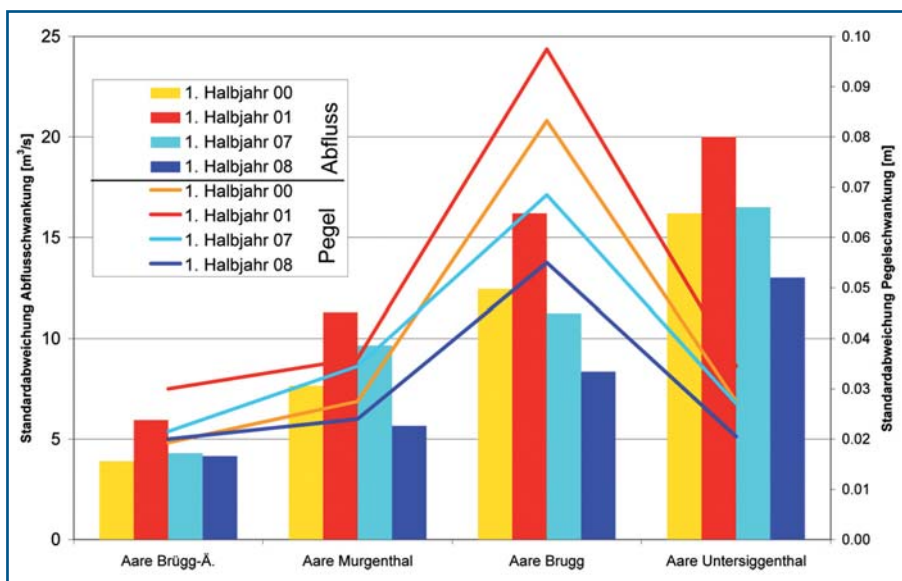


Bild 3. Standardabweichung des Abflusses (Balken) und der Wasserstandsschwankungen (Linien) an den amtlichen Pegeln, halbjährlich gemittelt.

Zur genaueren Lokalisierung von Änderungen und Abklärung von Ursachen verbleibender Schwankungen wurden auch die Leistungsspektren der Kraftwerksabflüsse nach Anpassung der Regeleinrichtungen untersucht. Im Prinzip nehmen die Abflussschwankungen entlang des Fließwegs über die Kraftwerkskette in einem breiten Bandbereich stetig leicht zu (vgl. dazu auch Bild 2). Deutlich erkennbar ist einerseits die Schwankungszunahme nach dem ungedämpften Zufluss der Emme in den Stauraum des Kraftwerks Flumenthal mit typischen Perioden von ca. drei bis 12 Stunden. Hierbei ist hervorzuheben, dass die Emme heute deutlich besser gedämpft wird als vor Umsetzung der Massnahmen, was durch den Vergleich der Übertragungsfunktion zwischen den amtlichen Pegeln Wiler (Emme) und Murgenthal (Aare) nachgewiesen werden konnte (siehe unten).

Andererseits zeigt sich eine klare Schwankungszunahme im Frequenzbereich mit Perioden von ca. zwei bis acht Stunden zwischen den unmittelbar aufeinander folgenden Kraftwerken Aarau und Rüchlig. Dies mag daran liegen, dass der sehr kurze Stauraum des Kraftwerks Rüchlig das KW Aarau einstaut und auf einen abflussabhängigen Konzessionspegel reguliert wird, was regeltechnisch sehr anspruchsvoll ist. Im Zuge der Erneuerung der beiden Kraftwerke in den nächsten Jahren wird sich auch die Regelung weiter optimieren lassen.

### 4.3 Fortpflanzung der Abflussschwankungen – Übertragungsfunktionen

Die Übertragungsfunktion beschreibt, wie sich Abflussschwankungen entlang der Fließstrecke von einem Ort zum andern übertragen. Nimmt die Funktion einen Wert grösser als 1 an, entspricht dies einer Verstärkung der Schwankung im jeweiligen Frequenzbereich. Berechnet wurden die Übertragungsfunktionen zwischen den amtlichen Pegeln und zwischen benachbarten Kraftwerken.

Die Übertragungsfunktionen entlang der Aare machen deutlich, dass sich Abflussschwankungen heute im Frequenzbereich mit Perioden von ca. einer bis acht Stunden weit weniger stark aufbauen als vor der Modifikation der Kraftwerk-Regelungen. Bild 5 zeigt beispielhaft die Übertragungsfunktionen vom Pegel Brügg-Ägerten am Beginn des Untersuchungsgebiets zum Pegel Brugg kurz oberhalb der Mündungen von Reuss und Limmat. Die massive Verstärkung der Schwan-

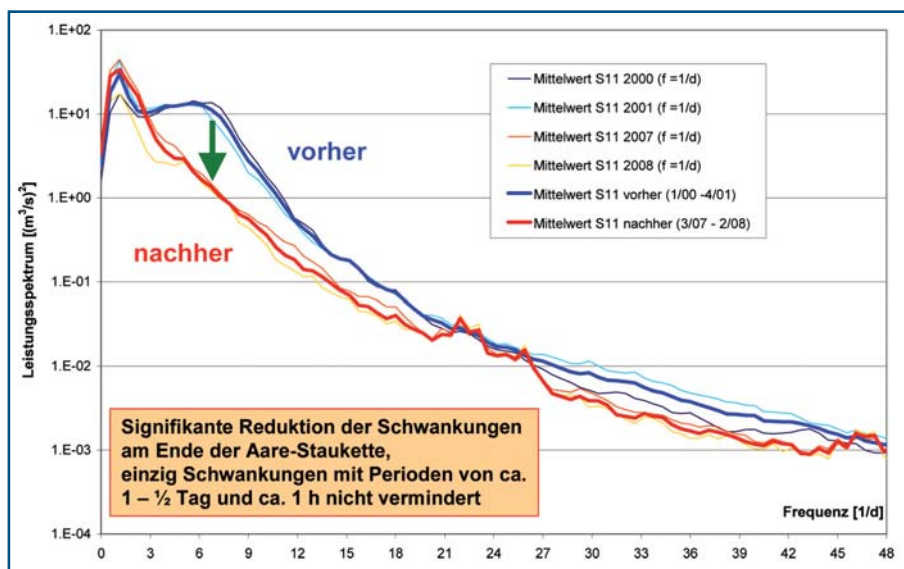


Bild 4. Leistungsspektren der Abflussschwankungen am Pegel Brugg vor und nach Massnahmen.

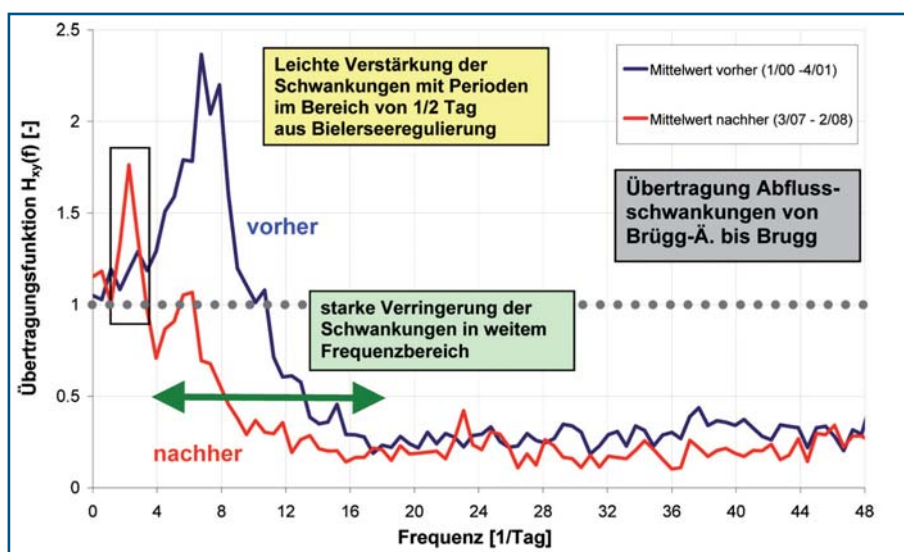


Bild 5. Übertragungsfunktionen vom Pegel Brügg-Ägerten zum Pegel Brugg vor bzw. nach Modifikation der Regelungen.

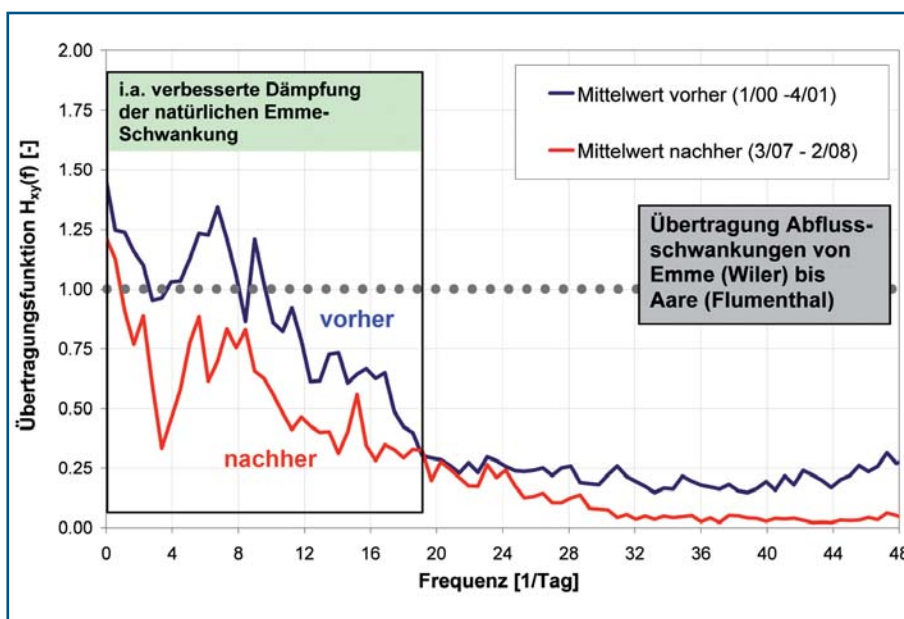


Bild 6. Übertragungsfunktionen vom Pegel Brügg-Ägerten zum Pegel Brugg vor bzw. nach Modifikation der Regelungen.

kungen mit Perioden von zwei bis acht Stunden (drei- bis 12-mal täglich) konnte deutlich reduziert werden. Eine leichte Schwankungszunahme findet heute vor allem noch bei einer Frequenz von zweimal täglich statt, die vermutlich auf die Steuerung des Bielersees zurückzuführen ist (vgl. oben).

Interessant ist auch der Vergleich der Übertragung von Abflussschwankungen der Emme in die Staukette der Aare. *Bild 6* zeigt die Übertragungsfunktion von Abflussschwankungen am Emme-Pegel Wiler zum Aare-Pegel in Murgenthal vor und nach der Modifikation der Kraftwerksregelungen. Wie die Abnahme der Übertragungsfunktion auf Werte von i.a. weit unter 1 deutlich macht, kann die Störgrösse des natürlichen, unregulierten Emme-Zuflusses in der Staukette der Aare heute deutlich besser abgefangen werden als früher.

## 5. Schlussfolgerungen

Auf Basis einer Analyse und eines Massnahmenkonzepts wurden in den letzten Jahren die Kraftwerksregelungen und Wasserhaushaltssteuerungen an der Aare modifiziert. Die Auswertung der Standardabweichungen und Amplituden von Abfluss- und Wasserstandsdaten bestätigt nun, dass periodische, regelungsbedingte Schwankungen nach der Modifikation um 50 bis 75% abgenommen haben. Die heutigen Amplituden des Abflusses liegen bis zur Mündung von Reuss und Limmat durchgängig unter  $15 \text{ m}^3/\text{s}$ , der Wasser-

stand schwankt weniger als 10 cm.

Die Auswertung von Leistungsspektren und Übertragungsfunktionen zeigt im Allgemeinen eine sehr gute Dämpfung von regelungsbedingten Schwankungen mit Perioden im Stundenbereich. Geringe Änderungen treten dagegen bei den Abfluss-Schwankungen mit Perioden von mehr als 12 Stunden und deutlich weniger als einer Stunde auf. Diese Schwankungen sind jedoch weniger eine Folge der Kraftwerksregulierung; Neben der Kraftwerksregulierung haben auch die Zuflüsse Emme und Reuss bzw. Limmat einen wesentlichen Einfluss auf die Schwankungsgrössen. Dabei werden Zuflussschwankungen der Emme nach Abschluss der Reglermodifikationen gut bis sehr gut ausgedämpft. Potenziell störend wirken sich dagegen die langwelligen Abflussschwankungen aus der heute schnelleren Bielersee-Regulierung aus (sogenannte Prognoseregulierung). Es ist zu empfehlen, bei der geplanten Optimierung der Bielerseeregulierung auch die Auswirkung auf die Unterlieger und die Staukette an der Aare zu prüfen.

In Anbetracht der bereits sehr weitgehenden Verbesserung kann in nächster Zeit auf zusätzliche Anpassungen an den Kraftwerksregulierungen verzichtet werden. Die Prüfung weitergehender regeltechnischer Optimierungen empfiehlt sich erst bei Änderung der Bielersee-Regulierung und bei der Erneuerung der Kraftwerke Aarau und Rüchlig.

Die im Jahr 2001 empfohlenen

und bis im Sommer 2007 umgesetzten Massnahmen zur Optimierung der Kraftwerksregulierung waren somit bezüglich der Abflussschwankungen in der Aare erfolgreich. Die heutigen Schwankungen mit Perioden im Stundenbereich können kaum mehr von natürlichen, kurzweiligen Abflussschwankungen oder windbedingten Wellen unterschieden werden. Das Ziel der durchgeführten Massnahmen wurde erreicht.

### Literatur

- Bendat, J. S., Piersol, A. G.* (1980): Engineering applications of correlation and spectral analysis. Wiley, New York, 302 S.
- Bendat, J. S., Piersol, A. G.* (1986): Random data – analysis and measurement procedures. 2. Auflage, Wiley, New York, 566 S.
- IUB (2009): Abflussschwankungen in der Aare – Erfolgskontrolle zu den Auswirkungen der getroffenen Massnahmen 2001–2007. Bericht im Auftrag des Verbands Aare-Rheinwerke, 30 S., Bern
- Meier, C.* (2001): Untersuchung der Abflussschwankungen in der Aare; Bericht im Auftrag des Verbands Aare-Rheinwerke, 27 S., Unterengstringen

### Anschrift der Verfasser

Dr. *Peter Billeter, Matthias Mende*  
IUB Ingenieur-Unternehmung AG  
Thunstrasse 2, CH-Bern  
Tel. 031 357 12 60, Fax 031 357 11 12  
peter.billeter@iub-bern.ch  
matthias.mende@iub-ag.ch