

## EINSCHRÄNKUNGEN BEI ABFLUSS- UND GESCHWINDIGKEITSMESSUNGEN SOWIE UNSICHERHEITEN BEI VERFAHREN ZUR ABSCHÄTZUNG VON HOCHWASSERSPITZEN IN WILDBÄCHEN

### MODELLVERSUCHE, KALIBRIERVERFAHREN UND RESULTATVERGLEICH AM BEISPIEL DER ABFLUSSMESSSTATION SCHÄCHEN-BÜRGLEN

## RESTRICTIONS ON DISCHARGE AND VELOCITY MEASUREMENTS AND UNCERTAINTIES OF METHODS FOR THE ESTIMATION OF PEAK DISCHARGES IN TORRENTS

### EXPERIMENTAL STUDIES, CALIBRATION METHODS AND RESULT COMPARISON FOR THE DISCHARGE GAUGING STATION SCHÄCHEN-BÜRGLEN

Hodel Hanspeter<sup>1</sup>, Petrascheck Armin<sup>2</sup>

#### ZUSAMMENFASSUNG

Dank der redundanten Messung der Pegelstände konnte in Bürglen die Ganglinie des extremen Hochwasserereignisses vom August 2005 aufgezeichnet werden.

Die grosse Spannweite der extrapolierten Scheitelabflüsse dieses Hochwasserereignisses zwischen 90 und 165 m<sup>3</sup>/s gibt einen Eindruck über das Ausmass der Unsicherheiten bei der Abschätzung extremer Hochwasserspitzen in Wildbächen. Zur Verbesserung der Scheitelabflussbestimmung dieses Hochwassers führte die VAW einen hydraulischen Modellversuch durch. Mit der Durchführung einer SIMK<sup>®</sup>-Kalibrierung soll die Bestimmung der Scheitelabflüsse bei zukünftigen Hochwasserereignissen verbessert werden.

**Keywords:** Hydrometrie, Wildbach, Abflussmessung, Scheitelabfluss, Wildbach.

#### ABSTRACT

Because of the double equipment for the water level measurements in Bürglen, the hydrograph of the extreme flood event in August 2005 could get measured.

The wide range of the extrapolated peak discharges of the flood event in August 2005 (90 – 165 m<sup>3</sup>/s) illustrates the uncertainties related to the estimation of extreme peak discharges in torrents. To improve the estimation of the peak discharge, the VAW built a physical hydraulic model. With the realization of a SIMK–calibration, the estimation of the peak discharges for future flood events could get more accurate.

**Keywords:** Hydrometry, torrent, discharge measurement, peak discharge.

---

<sup>1</sup> Sektionschef-Stv., Bundesamt für Umwelt BAFU, Abteilung Hydrologie, CH-3003 Bern, Schweiz (Tel.: +41-31-3247633; fax: +41-31-3247681; E-Mail: hanspeter.hodel@bafu.admin.ch),

<sup>2</sup> Hydrologischer Berater, Goldwandstrasse 6, CH-5408 Ennetbaden, Schweiz (Tel.: +41-56-2222603; fax: +41-56-2222670; E-Mail: apetrascheck@bluewin.ch),

## EINFÜHRUNG

Das im August 2005 in grossen Teilen der Schweiz aufgetretene Extremhochwasser hat im Kanton Uri zu grossen Überschwemmungen und Schäden (Bezzola & Hegg, 2007 sowie Scherrer, 2006) geführt. Im Rahmen der Analyse solcher Extremereignisse sind Angaben zu den aufgetretenen Spitzenabflüssen von zentraler Bedeutung. Diese sind jedoch bei Wildbächen schwierig zu bestimmen. Die Probleme beginnen bei der Registrierung der Wasserstände, da Messgeräte ausfallen oder sogar Stationen zerstört werden können. Sie werden bei der Messung der Abflüsse noch grösser, da einerseits die Hochwasserereignisse meist von kurzer Dauer sind und es deshalb für die Messequipe schwierig ist, rechtzeitig bei der Messstation zu sein und andererseits die Ausführung grosse Gefahren für die Messcrew und das verwendete Material in sich birgt. Aus diesen Gründen stehen bei Abflussmessstationen kleiner Einzugsgebiete in der Regel keine Abflussmessungen im Scheitelbereich von Hochwasserereignissen zur Verfügung. Die Bestimmung erfolgt in der Regel durch eine Extrapolation der Schlüsselkurven, deren Güte jedoch mangels Messdaten kaum überprüfbar ist.

Am Beispiel der hydrometrischen Messstation Schächen-Bürglen, Galgenwäldli können Einschränkungen und mögliche Verbesserungen bei Pegelstands- und Geschwindigkeitsmessungen sowie bei der Ermittlung der Spitzenabflüsse aufgezeigt werden.

### ABMESSSTATION SCHÄCHEN – BÜRGLEN

Bereits 1912 wurde am Schächen der erste Pegel installiert. 1985 wurden die Installationen zur Wasserstands- und Abflussmessung verlegt (beim Galgenwäldli, 42 m bachaufwärts der Schächenbrücke, Abb. 1 u. 2) und eine Pneumatiksonde installiert.



Abb. 1, 2: Abflussmessstation Schächen-Bürglen. Bild links: Blick gegen die Fliessrichtung mit Vorschwelle und Messgerinneeinbau (Pfeil: Profil Pneumatiksonde); Bild rechts: Blick in Fliessrichtung mit Messgerinneeinbau und zur Schächenbrücke, an der die Radarsonde montiert ist (Profil Radarsonde).

Fig. 1, 2: Discharge gauging station Schächen-Bürglen. Photo on the left side: view against the flow direction, the upstream sill and the adapted channel bed (arrow: location of the bubble gauge); photo on the right side: view in the flow direction. At the bridge the radar sensor was mounted (profile: radar gauge).

Im Bereich der Abflussmessstation wurde die Sohle mit widerstandsfähigen Stahlplatten abgedeckt und eine Vorschwelle aus Holz eingebaut. Um auch während Niedrigwasserperioden

eine möglichst exakte Bestimmung der Abflüsse zu garantieren, wurde ein rechteckiges Niedrigwasserprofil eingebaut. Oberhalb der Messstelle weist der Schächen eine natürliche Sohle auf. Unterhalb des Einbaus ist die Sohle gepflästert (Schächenschale), ein Überfall bildet den Übergang.

Die Böschungen sind gepflästert und weisen hohe Neigungen auf. Das linke Ufer ist im oberen Teil bewaldet, während am rechten Ufer eine senkrechte Betonmauer die Böschung nach oben abschliesst.



**Abb. 3, 4:** Abflussmessstation Schächen-Bürglen mit dem Pneumatikmessprofil und der Vorschwelle bei Niedrigwasserabfluss (Bild links) und bei einem kleineren Hochwasser (Bild rechts).

**Fig. 3, 4:** Discharge gauging station Schächen-Bürglen with the bubble gauge cross section and the first sill during low water (photo on the left side) and during a lower flood event (photo on the right side).

Bei grösseren Hochwasserereignissen tritt im Profil der Pneumatiksonde ein Fliesswechsel auf; die Folge ist eine inhomogene Aufzeichnung der Wasserstände (Abb. 5). Demgegenüber weist der Schächen unterhalb des Überfalls günstigere hydraulische Bedingungen auf. Da sich in dieser Schussrinne mit glatt gepflästeter Sohle ausschliesslich schiessende Abflüsse einstellen, tritt beim Anstieg der Hochwasserganglinien kein Fliesswechsel auf. Um in Zukunft für die Aufzeichnung der Wasserstandsganglinien hydraulisch bedingte Inhomogenitäten zu verhindern, wurde 2004 unterhalb des Überfalls (Montage an der Hauptstrassenbrücke) zusätzlich eine Radarsonde installiert. Diese Sonde garantiert für den Hochwasserfall Wasserstands-aufzeichnungen ohne Fliesswechsel. Verglichen mit dem Messprofil der Pneumatiksonde weist das Radarprofil jedoch deutlich höhere Fließgeschwindigkeiten und kleinere Wassertiefen auf.

In Abbildung 5 ist die im Profil der Pneumatiksonde aufgezeichnete Ganglinie eines kleineren Hochwasserereignisses dargestellt. In der Aufzeichnung ist der Fließwechsel, der bei einem Wasserstand von zirka 486.4 m.ü.M. auftritt, gut ersichtlich. In Abbildung 6 ist die im Profil der Radarsonde aufgezeichnete Ganglinie des Jahrhunderthochwassers vom August 2005 dargestellt. Die Schwankungen im Scheitelbereich stammen gemäss den Untersuchungen von G. R. Bezzola von den Entleerungen des bachaufwärts gelegenen Geschiebesammlers „Stiglisbrücke“ (Bezzola, 2008). Der Vergleich der beiden Abbildungen zeigt, dass sich das Profil mit der Radarsonde besser für die Aufzeichnung von Hochwasserganglinien eignet.

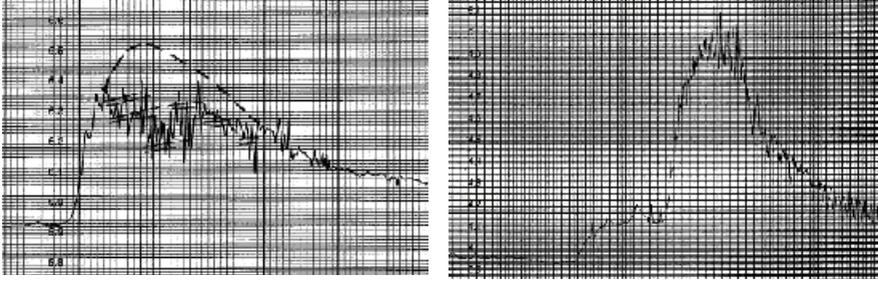


Abb. 5, 6: Wasserstandsganglinien: Bild links: Messprofil Pneumatiksonde, Fließwechsel im Anstieg der Hochwasserganglinie, gestrichelte Linie: vermutete Wasserstände ohne Fließwechsel, Bild rechts: Messprofil Radar, kein Fließwechsel.

Fig. 5, 6: Stage hydrograph: Left figure: bubble gauge cross section, hydraulic jump in the rise of the flood hydrograph, dotted line: estimated levels without hydraulic jump, right figure: radar gauge cross section, no hydraulic jump.

## PROBLEME BEI DER MESSUNG UND REGISTRIERUNG DER WASSERSTÄNDE

Wurden Pegelstationen an zu tief gelegenen Standorten oder zu nahe am Fliessgewässer errichtet, wurden bei den grossen Hochwassern der Jahre 1987, 1993, 1999 und 2000 einige Abfluss- und Wasserstandsstationen zerstört oder massiv beschädigt. Weitere Probleme ergaben sich durch den Ausfall der Geräte und Registriereinrichtungen sowie das Überschreiten der Messbereiche. Dadurch fehlen oft die Informationen, wenn sie am dringendsten gebraucht werden. Beim BAFU läuft zurzeit ein Projekt zur Erhöhung der Redundanz der Messstationen. Ziel ist es, dass bei allen wichtigen Abfluss- und Pegelstandsstationen redundante Installationen bei der Messung, Registrierung und Übermittlung der Messwerte existieren.

Die Messstation in Bürglen war glücklicherweise bereits vor dem Hochwasser im August 2005 mit einer redundanten Wasserstandsmessung ausgerüstet. Die Gerätewahl fiel auf einen Radar, der ausserhalb des Wasserkörpers montiert wird (keine Zerstörungsgefahr durch Treibholz, kein Verstopfen wie bei Pneumatiksonden) und mit einem vertretbaren Aufwand an der bestehenden Brücke montiert werden konnte.

Infolge der hohen Geschiebe- und Feststofffrachten (Bezzola, 2008) wurde die Düse der Pneumatiksonde während des Hochwassers vom 25. August 2005 verstopft. Dies führte bei der Pneumatiksonde zu einem totalen Ausfall der Wasserstandsmessung; die Hochwasserganglinie konnte jedoch dank dem Radar erfasst und registriert werden.

## PROBLEME BEI DER MESSUNG DER HOCHWASSERABFLÜSSE IN WILDBÄCHEN

Die Durchführung von Abflussmessungen bei Hochwasserabflüssen in Wildbächen ist wegen der auftretenden hohen Geschwindigkeiten und der mitgeführten Feststoffe (Holz, Geschiebe, Schwebstoffe) schwierig.

Werden mit den Seilkrananlagen Abflussmessungen während Hochwasserereignissen durchgeführt, bewirken hohe Fliessgeschwindigkeiten und grosse Wassertiefen eine enorme Auslenkung des Seils, an dem das Gewicht und der Flügel montiert sind (Abb. 8, grosser Abtriftwinkel). Da die Länge des abgerollten Seils für die Bestimmung der Wassertiefen in den Vertikalen verwendet wird, bewirken grosse Abtriftwinkel ungenaue Messungen der Wassertiefe.



**Abb. 7, 8:** Abflussmessungen mit Seilkrananlagen bei Hochwasser: Linkes Bild: Flügel nicht eingetaucht, rechtes Bild: Flügel eingetaucht: grosse Auslenkung des Seils (siehe rot-weisser Sichtbalg), Folge: ungenaue Wassertiefenmessung.

**Fig. 7, 8:** Discharge measurements with cableways at floods: photo on the left side: current meter in the air, photo on the right side: current meter in the water, big drift of the sounding line (look the red-white marker), consequence: inaccurate sounding.

Werden bei Hochwasserereignissen die Flügelmessungen mittels Stangen ausgeführt, besteht die Gefahr, dass die Stangen verbogen werden. Bild 9 zeigt den Messsteg für die Flügelmessungen über den Grosstalbach in Isenthal. Bei solchen Extremereignissen Abflussmessungen durchzuführen birgt grosse Gefahren in sich. Nur wenige Minuten nach dieser Aufnahme wurde der gesamte Messsteg weggerissen.



**Abb. 9:** Hochwasserführenden Wildbach (Grosstalbach in Isenthal), kurz bevor die Wasserfluten den Messsteg zerstören (Bild: Walter Aschwanden, Isenthal).

**Fig. 9:** Torrent with flood flow (Grosstalbach in Isenthal), just before the flood discharges destroyed the measuring gangway (photo: Walter Aschwanden, Isenthal).

Einzig mittels Tracermessungen mit Fluoreszenzfarbstoffen (Hodel & Stoller, 2000) könnten solche Extremabflüsse gemessen werden, doch bilden die Eingabe des Tracers, die Entnahme der Wasserproben sowie die Befestigung der Sonden Gefahren für die Messequipe. Aus diesen Gründen stehen bei Abflussmessstationen kleiner alpiner Einzugsgebiete in der Regel keine Abflussmessungen im Scheitelbereich von Hochwasserereignissen zur Verfügung.

## PROJEKTE ZUR VERBESSERUNG DER ABSCHÄTZUNG DER HOCHWASSERSCHEITELWERTE

Die Extrapolation der Fliessgeschwindigkeiten zur Schätzung von Scheitelwerten birgt Unsicherheiten in sich (Hodel & Lehmann, 2004). Deshalb wurde in Bürglen seit dem Sommer 2006 zusätzlich ein Oberflächengeschwindigkeitsradar (Messbereich: bis 4 m/s, Messunsicherheit:  $\pm 20\%$ , Angaben des Herstellers) montiert. Dadurch kann einerseits die Qualität der Hochwasserabschätzung mit dem Strickler-Verfahren (Spreafico et al, 2001) verbessert und andererseits das SIMK<sup>®</sup>-Simulationsverfahren angewendet werden.

Da in der Schussrinne des Schächens jedoch Fliessgeschwindigkeiten von bis zu 8 m/s auftreten können, vermag der installierte Oberflächengeschwindigkeitsradar die maximalen Oberflächengeschwindigkeiten nicht exakt zu erfassen. Es ist vorgesehen, dass in diesem Jahr ein Horizontal-Radargerät eines anderen Herstellers installiert wird, das hoffentlich höhere Fliessgeschwindigkeiten zu erfassen vermag.

Zur Verbesserung der Datengrundlage wurde einerseits die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich mit dem Bau eines hydraulischen Modells beauftragt, so dass das Hochwasserereignis vom August 2005 im Labor simuliert werden konnte. Andererseits wurde eine Hochwasserkalibrierung mit dem SIMK<sup>®</sup>-Verfahren durch das Ingenieurbüro ISAR CONSULT GmbH, Geretsried, Deutschland, durchgeführt.

## HYDRAULISCHER MODELLVERSUCH DER VAW

Das physikalische Modell der Messstation Schächen-Bürglen wurde in einer Flussbaurinne als idealisiertes Halbmodell im Massstab 1:15 erstellt. Zur Kalibrierung standen die Abflussmessungen des BAFU ( $Q_{\max} = 24.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ) und 5 Querprofile zur Verfügung. Die Krümmung des Bachlaufes konnte nicht berücksichtigt werden. Die Sohl- und Wandrauigkeiten der Schale werden entsprechend der hydraulischen Modellgesetze skaliert. Stromauf der Messstelle wird die in der Natur vorhandene bewegliche Sohle nachgebildet. Die Wasserspiegellagen wurden durch Ultraschallsonden erfasst. Um Ungenauigkeiten infolge unruhiger Wasseroberflächen zu minimieren, wurden auch videometrische Aufnahmen durchgeführt. Die Strömungszustände im Bereich der beiden Messprofile wurden zuerst unter Klarwasserbedingungen hydraulisch analysiert, anschliessend mit Sedimenttransport (bis  $Q = 120 \text{ m}^3/\text{s}$ ), wobei zur Modellierung des Sedimenttransportes die Sieblinie des Naturmaterials berücksichtigt wurde. Die Modellversuche bei Klarwasser zeigen, dass sich bei Abflüssen bis zu  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  ein Wechselsprung nach dem Absturz über die Vorschwelle ausbildet. Bei höheren Abflüssen wird der Wassersprung ausgeblasen und es tritt ein ondulierender Wechselsprung (stehende Welle) auf, der die Pegelstandsmessung beeinflusst (siehe auch Abb. 5, rechtes Bild) und bachabwärts in der Wildbachschale Stosswellen verursacht.

Werden die Versuche mit Geschiebetrieb ausgeführt, lagert sich unter dem Wellenberg der sich einstellenden stehenden Welle Geschiebe ab. Dies verfälscht die Abflussbestimmung im Profil der Pneumatiksonde massiv. In Abbildung 10 ist der Vergleich der Abflusstiefen der Pegelschlüsselkurve (obere Kurve) mit den Werten aus den Modellversuchen mit Geschiebetrieb dargestellt.

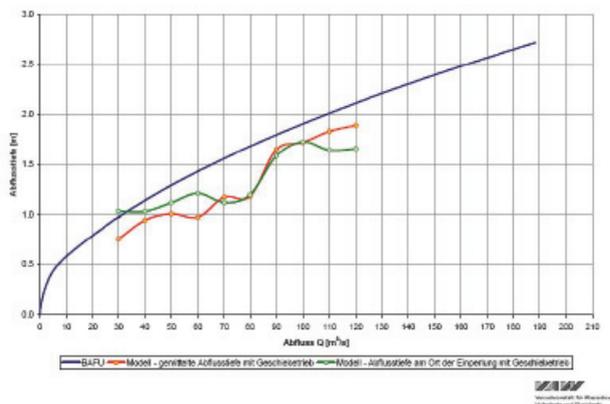


Abb. 10: Profil Pneumatiksonde: Vergleich der Pegelschlüsselkurve (obere Kurve) mit denjenigen aus dem hydraulischen Modellversuch mit Geschiebetrieb (VAW, 2007).

Fig. 10: Profile bubble gauge: comparison of the rating curve (upper curve) with the results from the hydraulic model with bed load transport (VAW, 2007).

Demgegenüber kann die Pegelstandsmessung im Profil des Radars als die verlässlichere Messinstallation für die Registrierung der Hochwasserabflüsse betrachtet werden, denn die Modellversuche der VAW ergaben für das Profil mit der Radarmessung keine Ablagerungen. Einzig bei Abflüssen zwischen 80 und 100 m<sup>3</sup>/s resultieren grössere Differenzen zur gültigen Pegelschlüsselkurve infolge der Stosswellen (Abb. 11).

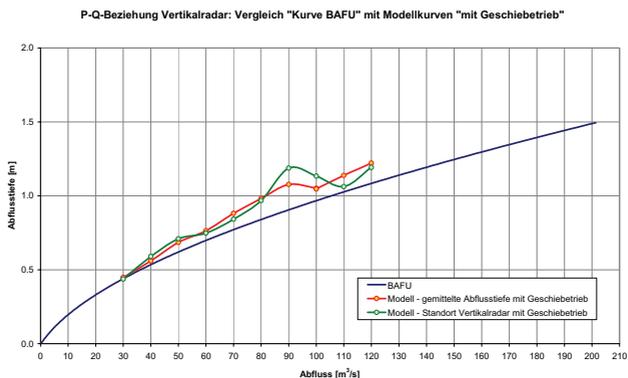


Abb. 11: Profil Radarsonde: Vergleich der Pegelschlüsselkurve (untere Kurve) mit denjenigen aus dem hydraulischen Modellversuch mit Geschiebetrieb (VAW, 2007).

Fig. 11: Profile radar gauge: comparison of the rating curve (lower curve) with the results from the hydraulic model with bed load transport (VAW, 2007).



Doch noch bleibt bei dieser Hochwasserberechnung ein grosses Fragezeichen, denn gibt es ein Messgerät, das hohe Fliessgeschwindigkeiten bei starker Schwebstoff- und Geschiebeführung exakt zu erfassen vermag?

## RESULTATSVERGLEICH – SCHÄTZUNG DER ABFLUSSSPITZE DES SCHÄCHEN-HOCHWASSERS AUGUST 05

Die grosse Spannweite der verschiedenen Ergebnisse gibt einen Eindruck über das Ausmass der Unsicherheiten bei der Abschätzung von extremen Hochwasserspitzen in Wildbächen.

Art der Berechnung / Abschätzung	Hochwasserspitze [m <sup>3</sup> /s]
HQ-Spitze aus „Extrapolation der P/Q-Kurve mittels Extrapolation der Fliessgeschwindigkeiten“ (Profil Radar)	<b>124</b> (109 – 139, ± 12%)
HQ-Spitze mittels Extrapolation mit dem Strickler-Verfahren (Verwendung k-Wert, Profil Radar)	<b>165</b> (145 – 185, ± 12%)
HQ-Spitze aus hydraulischem Modellversuch	<b>120 - 130</b> (115 – 135, ± 8%)
HQ-Spitze aus SIMK <sup>®</sup> -Kalibrierverfahren	<b>90</b> (83 – 97, ± 8%)

**Tab. 1:** Vergleich der mit verschiedenen Methoden extrapolierten Scheitelabflüsse des Schächens mit den aus den hydraulischen Modellversuchen ermittelten Werten (rechte Kolonne, in Klammern: geschätzte Vertrauensintervalle).

**Tab. 1:** Comparison of peak discharges of the Schächens determined by different extrapolation methods and with the physical hydraulic model (right column, in brackets: estimated confidence bands).

### FAZIT

Um die Datenbasis für extreme Hochwasserabflüsse zu verbessern sind zwei Aspekte wichtig:

- Zusatzinstallationen redundanter Mess-, Speicher- und Übermittlungsinstallationen um auswertbare Messdaten unter den extremen Beanspruchungen des Hochwassers zu erhalten.
- Auswahl geeigneter Messprofile ohne hydraulische Instabilitäten. Dies kann zur Notwendigkeit getrennter Messprofile für Niedrig- und Hochwasser führen.

### LITERATUR

Bezzola, G. R., Hegg, C. (ed., 2007): Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Umwelt-Wissen Nr. 0707, 215 S.

Bezzola, G.-R. (2008): Unerwartete Prozesse in einem Geschiebesammler – Der Geschiebesammler „Stiglisbrücke“ am Schächens während des Hochwassers von August 2005, Internationales Symposium Interpreavent 2008, Dornbirn, Tagungspublikation.

Hodel, H.-P., Stoller, F. (2000): Messkampagne mit den Lichtleiter-Fluorometern LLF-1 und LLF-M – Feldmessungen, Erfahrungen, Ausblick und offene Fragen, Technischer Bericht des Bundesamtes für Wasser und Geologie BWG, Bern, 49 S.

- Hodel, H.-P., Lehmann, Chr. (2000): Mittlere Fließgeschwindigkeiten in Wildbächen und Gebirgsflüssen – welche Maximalwerte sind realistisch?, Internationales Symposium Interpraevent 2000, Villach, Tagungspublikation, Band 3, S. 155 – 165.
- Kölling, C. (1994): Finite-Element-Simulation der Geschwindigkeitsverteilung in Kanälen und teilgefüllten Rohrleitungen. Lehrstuhl für Hydraulik und Gewässerkunde der TU München, Heft 60.
- Kölling, C. (2007): SIMK<sup>®</sup>-Hochwasserkalibrierung der Radar-Durchflussmessstelle Bürglen / Schächen. Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt, Schlussbericht, Geretsried, 37 S.
- Kölling, C. (2004): SIMK<sup>®</sup>-Kalibrierung von Durchflussmessstellen in Flüssen und Kanälen, Internationales Seminar „Neue Entwicklungen in der Durchflussmessung in natürlichen und künstlichen gerinnen, Hydraulik-Lehrstuhl der TU München in Zusammenarbeit mit dem Ruhrverband Essen und der ATV – DVWK, München, 31 S.
- Scherrer, S. (2006): Hochwasserschutz Uner Talboden, Hydrologische Grundlagen. Bericht Scherrer AG: 05/66, Auftraggeber: Amt für Tiefbau des Kantons Uri.
- Spreafico, M., Hodel, H.-P., Kaspar, H. (2001): Rauheiten in ausgesuchten schweizerischen Fließgewässern, Berichte des BWG, Serie Wasser, Nr. 1, Bern, 102 S.
- VAW, (2007): Physikalischer Modellversuch Pegel Bürglen, Technischer Bericht, in Ausarbeitung.