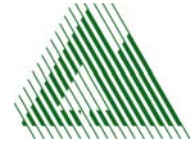




**Universität für Bodenkultur  
Institut für Alpine Naturgefahren  
und forstliches Ingenieurwesen**

Peter Jordan Str. 82  
A-1190 WIEN

Tel.: #43-1-47654-4350  
Fax: #43-1-47654-4390



## **IAN REPORT 78**

# **Vergleich von Messsystemen zur Quantifizierung von Abflussvorgängen in einem Wildbachgerinne**

**Begleitende Untersuchungen zum Naturversuch**

**„Schwemmholznetze“**

**(TU-München)**



**von**

**HÜBL, J. & PICHLER, A.**

**Wien, Jänner 2002**

# **Zur berührungslosen Erfassung der Fließtiefe und Fließgeschwindigkeit in einem Wildbachgerinne zum Zeitpunkt des Durchganges einer Hochwasserwelle**

Begleitende hydraulische Untersuchungen zum Naturversuch  
„Schwemmholznetze“ der TU – München

Johannes HÜBL & Andreas PICHLER

## **1 Problemanalyse und Zielsetzung**

Fließgewässer im Gebirge weisen eine hohe Variabilität in hydraulischer und morphologischer Hinsicht auf. Dabei können die Strömungszustände von hochgradig ungleichförmigem Abfluss über einzelne große Rauheitselemente (Abstürze, Step-Pool-Systeme, etc.) bei Niedrigwasser bis zu fast gleichförmigem Abfluss im Hochwasserfall reichen.

Die Quantifizierung der Abflussvorgänge in einem Wildbach zum Zeitpunkt eines Hochwassers stößt zudem auf einige Schwierigkeiten. Eine direkte Erfassung des Abflusses (z.B. über Tracer-Methoden, Messwehr, etc.) ist meist aus methodischen aber auch monetären Gründen nicht möglich. So muss auf die indirekte Erfassung über die kontinuierliche Messung des Wasserstandes und der Fließgeschwindigkeit zurückgegriffen werden. Die Produktpalette der angebotenen Erfassungssysteme am Markt ist relativ breit, wobei die Entscheidung, welches Produkt als geeignet zur Quantifizierung der Abflussvorgänge in einem Wildbach erscheint, sowohl von der Eigenheit des Produkts als auch vom Einsatzbereich abhängt. In Frage kommen sowohl Kombinationen von Messgeräten, die im Messquerschnitt positioniert sein müssen (z.B. Hydrometrischer Flügel und Drucksonde), als auch Messsysteme, die berührungslos messen (z.B. Radarsensor in Kombination mit Ultraschall-Niveaumessung). Erfahrungswerte mit möglichen Systemkombinationen – vor allem im Hinblick auf den Hochwasserfall in einem Wildbachgerinne – sind selten, werden jedoch bei Fragestellungen hinsichtlich der Abklärung eines geeigneten Messsystems im Einsatz bei Monitoring- oder Frühwarnsystemen dringend benötigt. Zudem können die quantifizierten Abflusskomponenten zur Kalibrierung von Simulationsmodellen (Strömungsmodelle, Wasserspiegellinien, etc.) herangezogen werden, bzw. stellen Angaben über die Fließgeschwindigkeit von Hochwasserwellen in Wildbachgerinnen eine wichtige Grundlage für die Dimensionierung von Schutzwasserbauten dar.

Aus diesem Grund wurde die Gelegenheit genutzt, im Rahmen des gegenständlichen Naturversuchs „Schwemmholznetz“, Messsysteme zur berührungslosen Erfassung der Fließtiefe als auch Fließgeschwindigkeit in einem Wildbachgerinnequerschnitt zum Zeitpunkt des Durchganges der Hochwasserwelle einzusetzen. Hauptaugenmerk wird dabei auf die Wiedergabequalität von genau definierten Modellabflüssen gelegt.

## 2 Arbeitsmethoden

### 2.1 Geometriedaten

#### 2.1.1 Profilauswahl

Die Auswahl des Messquerschnitt-Standortes erfolgte nach Begehung der Teststrecke und Abwägung der Auswirkungen von Randbedingungen (Abstand zum Schwemmholznetz, unterschiedliche Rauigkeiten im Gerinnequerschnitt, Längsgefälle, Schwierigkeiten im Hinblick auf die Errichtung eines Messsteges, etc.). Eine geeignete Stelle wurde etwa 100 m unterhalb vom Standort des Schwemmholznetzes gefunden (siehe Abbildung 1), wobei eine Adaptierung des Gerinnequerschnitts durch eine auf der orografisch rechten Seite zu errichtende Grobsteinschlichtung notwendig war.

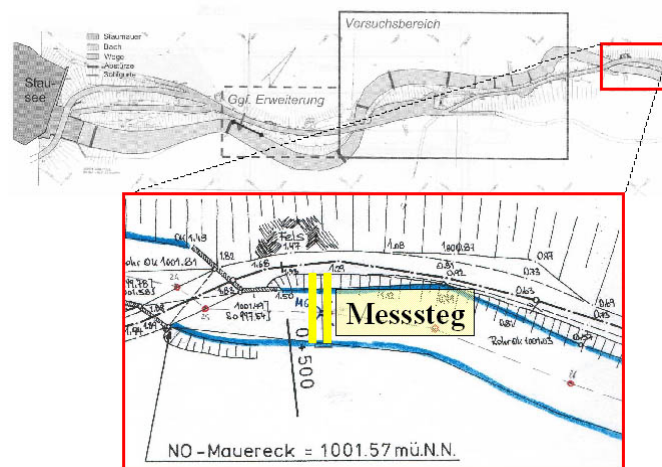


Abbildung 1: Lage des Messquerschnittes. Quelle: RIMBÖCK, HUBAUER; verändert

#### 2.1.2 Profilaufnahme

##### Querprofil

Der Messquerschnitt wurde mittels Ablotung in definierten Abständen (1 m) von einer Vergleichsebene (VE) am Messsteg aus höhenmäßig erfasst. Die Ablotung wurde nach der 2. Flutung wiederholt. Zudem wurde von jedem Messquerschnitt ausgehend von

der Sohle bis zur Höhe des Messsteges im Abstand von 0.05 m die Fläche sowie der hydraulische Radius ( $r_{hy}$ ) ermittelt. Um den in der Abflusshöhenmessung bestimmten Werten die entsprechende Durchflussfläche gegenüberstellen zu können, wurde aus den zum jeweiligen Messquerschnitt gehörenden Wertepaaren Abflusshöhe und Fläche ein Ausgleichspolynom 5. Grades erstellt, dessen Funktionsverlauf (Fläche) gut mit den ermittelten Flächen übereinstimmt. Die Bachsohle wurde für alle 4 Versuche einheitlich bei -4.90 m (gemessen von der Vergleichsebene) angenommen.

### Längsprofil

Die Gerinneneigung im Bereich des Messquerschnittes wurde mit einem SUUNTO Neigungsmesser aufgenommen. Sie betrug im Messquerschnitt 1 %.

Die Gerinnelänge zwischen markanten Messpunkten (Schwemmholznetz, Messquerschnitt, Brückenquerschnitt vor Kraftwerk 3; siehe Tabelle 1) wurde aus den einzelnen Lageplänen zur Rohrleitung der Kraftwerksgesellschaft entnommen (Quelle: HUBAUER 1987).

| Station                | Distanz [m] vom Speicher Lobentalsee |
|------------------------|--------------------------------------|
| Schwemmholznetz        | 452                                  |
| Messquerschnitt        | 560                                  |
| Brücke vor Kraftwerk 3 | 1707                                 |

Tabelle 1: Überblick über Distanzen zwischen ausgewählten Stationen

## **2.2 Kurzbeschreibung der eingesetzten Messgeräte**

### **2.2.1 Messung der Fließgeschwindigkeit mit „KALESTO“**

Der Radarsensor KALESTO von der Fa. OTT HYDROMETRIE kann sowohl zur berührungslosen Pegelmessung (nach dem Frequency Modulated Continuous Waves [FMCW] Prinzip) wie auch zur Messung der Geschwindigkeit von Oberflächengewässern herangezogen werden. Zur Messung der Oberflächen-Geschwindigkeit muss dieser in Abweichung von der Lotrechten montiert werden; im gegenständlichen Fall wurde dieser am Messsteg unter einem Winkel von 45° - bachabwärts gerichtet – montiert (vgl. Abbildung 2). Der Abstrahlwinkel beträgt +/- 5°, der max. Messfehler wird mit +/- 1 cm angegeben. Die Messdaten können über eine serielle Schnittstelle (RS 485) an einen externen Datensammler übertragen werden; von dort ist Verbindung mit PC möglich. Die Spannungsversorgung läuft über Netzteil mit 15 V DC.



Abbildung 2: Seitenansicht des Radarsensors „KALESTO“, montiert am Messsteg.

### **2.2.2 Messung der Abflusstiefe mit Ultraschall (US)**

Die Ultraschall-Niveaumessung erfolgte mit dem UPM-10 mit externer Temperaturkompensation der Fa. Sommer Messsystem Technik. Der Messbereich wird von 0.5 bis 10 m angegeben, bei einer Genauigkeit von  $<+/- 0.1\%$  vom Messbereich. Die Ultraschallkeule hat eine Auslenkung von  $12^\circ$ . Die Energieversorgung von 5 V DC erfolgt direkt vom Datenlogger.

### **2.3 Zeitkorrektur**

Aufgrund des Einsatzes verschiedener Messinstrumente und Datenerfassungssysteme mit integrierter Systemzeit war es notwendig, einen Uhrenabgleich durchzuführen, der auf die Zeitangabe der Funkuhr der TU – München (MESZ) bezogen war.

### **2.4 Videodokumentation**

Zu Vergleichs- und Demonstrationszwecken wurden die Vorgänge am Messquerschnitt während der Versuchsdurchführung auf Video (Hi 8) aufgezeichnet. Die Videokamera war auf der Brücke vor dem Messquerschnitt – Blickrichtung bachabwärts – stationiert. Zum Zwecke der Analyse bzw. um Anhaltspunkte in Bezug auf die Fließhöhe während der Flutungsversuche zu erhalten, wurden auf die orografisch linke Böschungsseite rote Markierungen in der Höhe von -3.65 m bzw. -3.00 m – ausgehend von der Vergleichsebene - angebracht.

### **2.5 Positionierung der Messinstrumente**

Die Positionierung der eingesetzten Messinstrumente ist Abbildung 3 zu entnehmen. Aufgrund des Einflusses einer stehenden Wasserwelle kurz vor dem Ort der Messung der Abflusstiefe durch den US-Pegel (siehe Kapitel 3.1.1), musste dieser nach dem ersten Flutungsversuch versetzt werden.

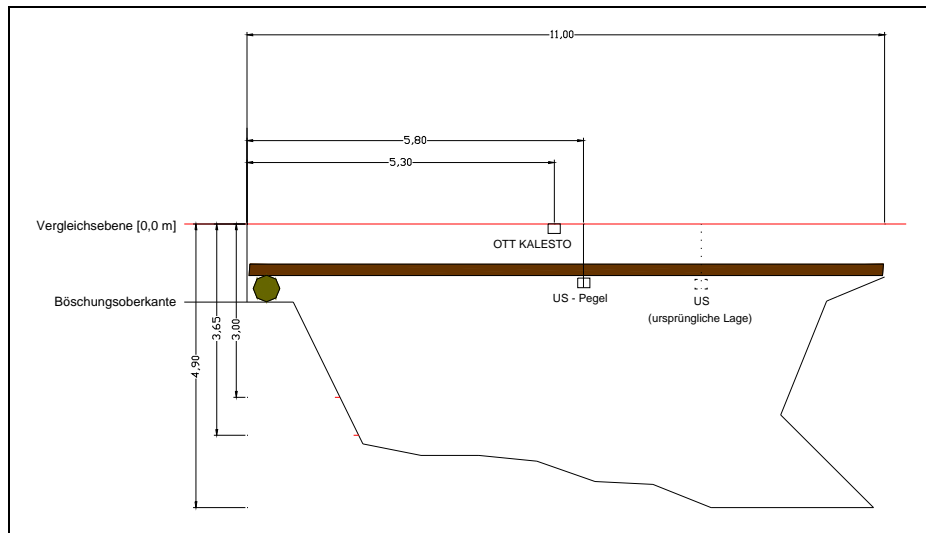


Abbildung 3: Skizze zur Lage und Positionierung der angeordneten Messsysteme. Höhenangaben ausgehend von der Vergleichsebene (VE).

### 3 Darstellung der Messwerte

#### 3.1.1 Flutungsversuch

Der 1. Flutungsversuch wurde am 18. Juli 2001 mit der Öffnung des Grundablasses am Speicher LOBENTAL um 13:15:00 (Normalzeit) gestartet. Die Daten zur Steuerung des Grundablasses und zum Flutungsdesign sind Tabelle 2 zu entnehmen.

| 1. Versuch        | Normalzeit | Abfluss [m³/s] |
|-------------------|------------|----------------|
| Beginn Öffnen     | 13:15:00   | 20             |
| Ende Öffnen       | 13:19:00   |                |
| Beginn Schliessen | 13:35:00   |                |
| Ende Schliessen   | 13:39:00   |                |

Tabelle 2: Daten zur Steuerung des Grundablasses und der dazugehörigen Abflussmenge (Quelle: RIMBÖCK)

#### 3.1.1 Abflusstiefe

Die Ultraschall-Niveaumessung zeigt zu Beginn des Flutungsversuchs eine Tiefe von  $-4.65$  m (ausgehend von VE) an. Um 10:20:51 Uhr erreicht die Wellenfront des Messquerschnitt, d.h. 352 s nach dem Öffnen des Grundablasses am Speicher Lobental. Die starken Schwankungen des US-Pegels, die sich ab 10:31:00 am Profilverlauf der Wasserspiegelhöhe zeigen (vgl. Abbildung 4), sind auf den Einfluss einer stehenden Wasserwelle kurz vor dem Ort der Messung rückzuführen. Aus diesem Grund wurde der US-Pegel nach dem ersten Versuch auch an eine andere Stelle im Messquerschnitt montiert. Im Vergleich mit der Videoanalyse lässt sich ein

mittlerer Höchstwasserstand von  $-3.30$  m (Ausgehend von VE) aus der Datengrundlage ableiten.

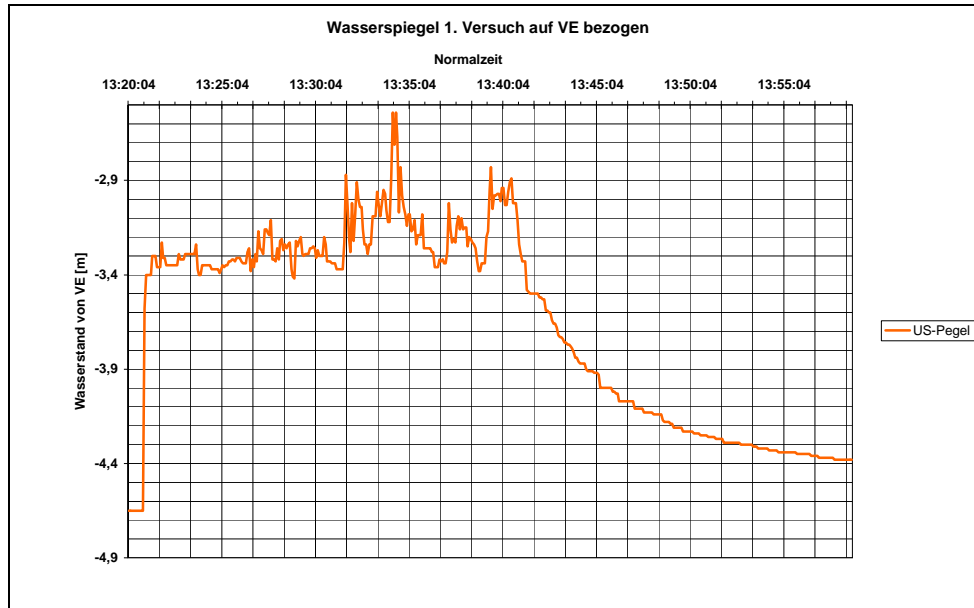


Abbildung 4: Verlauf der Abflusstiefe am Messquerschnitt während des 1. Versuches

### 3.1.2 Fließgeschwindigkeit

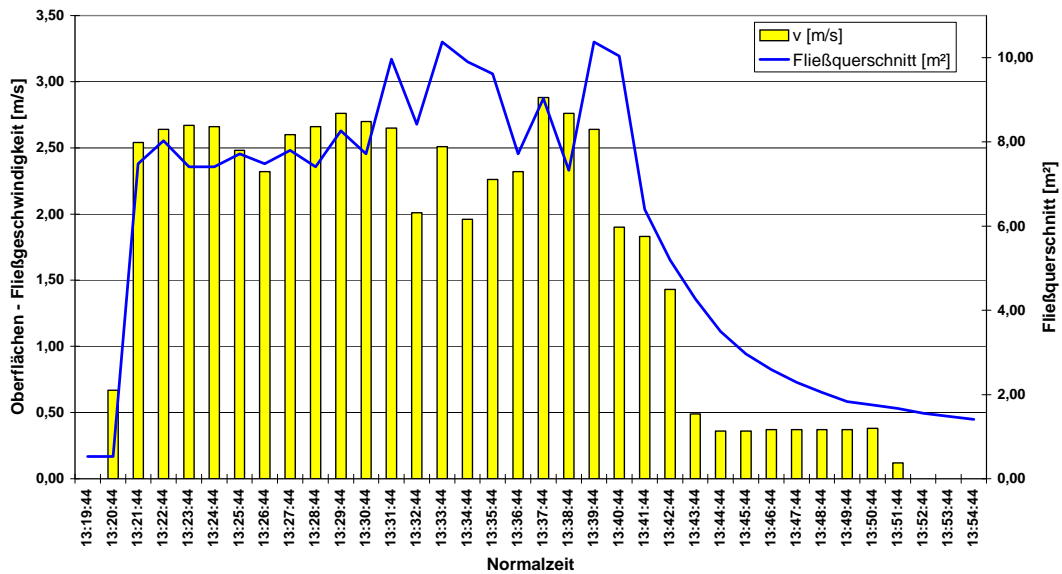


Abbildung 5: Ergebnisse der Messung der Oberflächen-Fließgeschwindigkeit durch den Radarsensor KALESTO während des 1. Flutungsversuches

Die Oberflächen-Fließgeschwindigkeit zum ersten Flutungsversuch pendelt sich bei  $\sim 2.6$  m/s ein, wobei immer wieder kurze Einbrüche im Geschwindigkeitsprofil erkennbar sind. Im Großen und Ganzen wird das Flutungs-Design gut wiedergegeben. Entsprechend der Angaben zum Zeitpunkt des Eintreffens der Wellenfront am

Messquerschnitt und der Entfernung zum Speicher Lobental kann eine durchschnittliche Geschwindigkeit der Wellenfront von  $560 \text{ m} / 352 \text{ s} \sim 1,6 \text{ m/s}$  angegeben werden.

### 3.2.2. Flutungsversuch

Der 2. Flutungsversuch wurde am 19. Juli 2001 mit der Öffnung des Grundablasses am Speicher LOBENTAL um 10:15:00 (Normalzeit) gestartet. Die Daten zur Steuerung des Grundablasses und zum Flutungsdesign sind Tabelle 3 zu entnehmen.

| 2. Versuch        | Normalzeit | Abfluss [m <sup>3</sup> /s] |
|-------------------|------------|-----------------------------|
| Beginn Öffnen     | 10:15:00   | 5                           |
| Beginn Öffnen     | 10:25:00   | 10                          |
| Beginn Öffnen     | 10:30:00   | 15                          |
| Beginn Öffnen     | 10:35:00   | 20                          |
| Beginn Schliessen | 10:40:00   |                             |
| Ende Schliessen   | 10:44:00   |                             |

Tabelle 3: Daten zur Steuerung des Grundablasses und der dazugehörenden Abflussmenge (Quelle: RIMBÖCK)

#### 3.2.1 Abflusstiefe

Der Beginn der Messung erfolgt auf der Sohlhöhe von  $-4.18 \text{ m}$  (ausgehend von VE); der Unterschied zur Ausgangshöhe zum ersten Flutungsversuch ergibt sich aus der Umpositionierung des US-Pegels. Nach dem Ende des Flutungsversuches wird eine neue Sohlhöhe von  $-4.13 \text{ m}$  gemessen, die auf einen unter dem US-Pegel zu liegenden kommenden Stein rückzuführen ist. Die Flutwelle erreicht um 10:21:43 den Messquerschnitt, d.h. 403 s nach dem Öffnen des Grundablasses am Speicher Lobental. Im Kurvenverlauf zum US-Pegel ist der treppenförmige Aufbau – entsprechend der Erhöhung der Abflussmenge laut Versuchsdesign – gut ausgebildet. Verflachungen im Kurvenverlauf bei  $-3.75 \text{ m}$ ,  $-3.55 \text{ m}$ ,  $-3.40 \text{ m}$  und  $-3.25 \text{ m}$  sind erkennbar. Die Pegelschwankungen werden mit Zunahme der Abflussmenge stärker sichtbar.



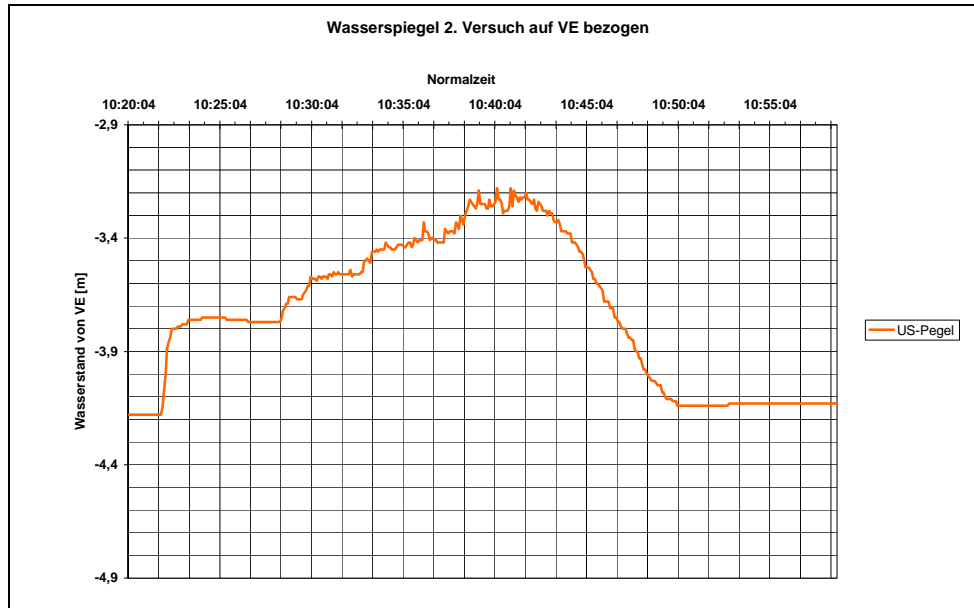


Abbildung 6: Verlauf der Abflusstiefe am Messquerschnitt während des 2. Versuches.

### 3.2.2 Fließgeschwindigkeit

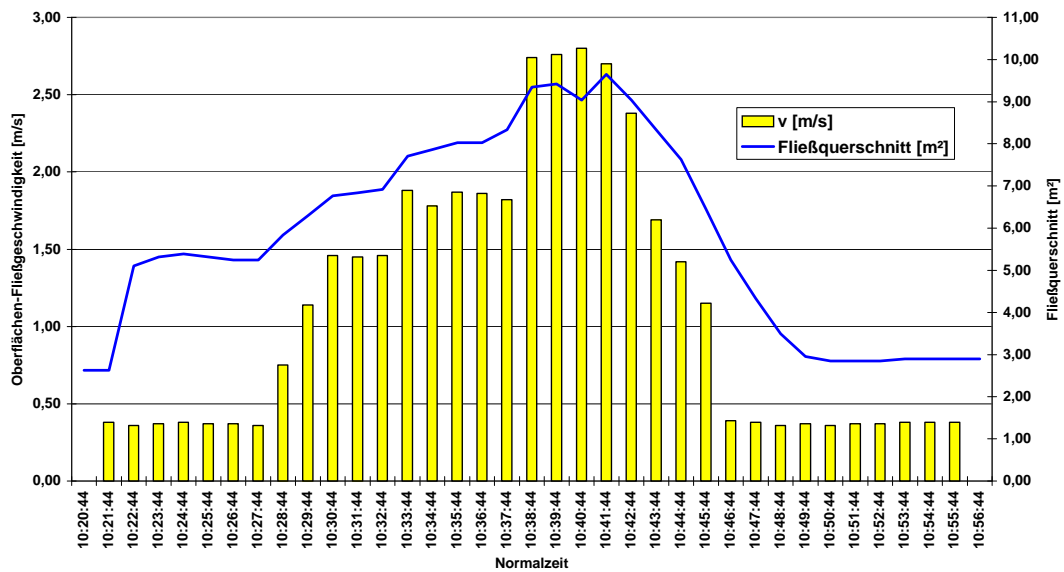


Abbildung 7: Ergebnisse der Messung der Oberflächen-Fließgeschwindigkeit durch den Radarsensor KALESTO während des 2. Flutungsversuches

Entsprechend dem Flutungs-Design können die Fließgeschwindigkeiten bei  $5 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $\sim 0.4 \text{ m/s}$ ),  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $\sim 1.5 \text{ m/s}$ ),  $15 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $\sim 1.9 \text{ m/s}$ ) und  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $2.8 \text{ m/s}$ ) deutlich abgegrenzt werden. Anzumerken ist hier, dass die  $5 \text{ m}^3$  Welle den Bereich der Radarmessung nur geringfügig überdeckt hat (Fließhöhe  $\sim 0.10 \text{ m}$ ), die gemessenen Fließgeschwindigkeiten im Vergleich zum Schwerpunkt des Wellenkörpers zu gering ausfallen. Die Geschwindigkeit der Wellenfront bis zum Messquerschnitt errechnet sich aus  $560 \text{ m} / 403 \text{ s} \sim 1,4 \text{ m/s}$ .

### 3.3.3. Flutungsversuch

Der 3. Flutungsversuch wurde am 19. Juli 2001 mit der Öffnung des Grundablasses am Speicher LOBENTAL um 14:00:00 (Normalzeit) gestartet. Die Daten zur Steuerung des Grundablasses und zum Flutungsdesign sind Tabelle 4 zu entnehmen.

| 3. Versuch        | Normalzeit | Abfluss [m³/s] |
|-------------------|------------|----------------|
| Beginn Öffnen     | 14:00:00   | 20             |
| Ende Öffnen       | 14:04:00   |                |
| Beginn Schliessen | 14:16:00   |                |
| Ende Schliessen   | 14:20:00   |                |

Tabelle 4: Daten zur Steuerung des Grundablasses und der dazugehörenden Abflussmenge (Quelle: RIMBÖCK)

#### 3.3.1 Abflusstiefe

Ausgangsniveau zum US-Pegel ist wieder  $-4.18\text{ m}$  (ausgehend von VE). Die Wellenfront erreicht um 14:05:35 den Messquerschnitt, d.h. 335 s nach dem Öffnen des Grundablasses am Speicher Lobental. Entsprechend dem Versuchsdesign mit einer Abflussspende von  $20\text{ m}^3/\text{s}$  ist ein eingipfelig Verlauf in der Abflusstiefenmessung zu erwarten, der sich in den Messungen vor Ort bestätigt (vgl. Abbildung 8). Nach dem Ende des Flutungsversuches wird eine neue Sohlhöhe von  $-4.14\text{ m}$  gemessen, was wiederum auf abgelagertes Geschiebe unterhalb des US-Pegels rückzuführen ist.

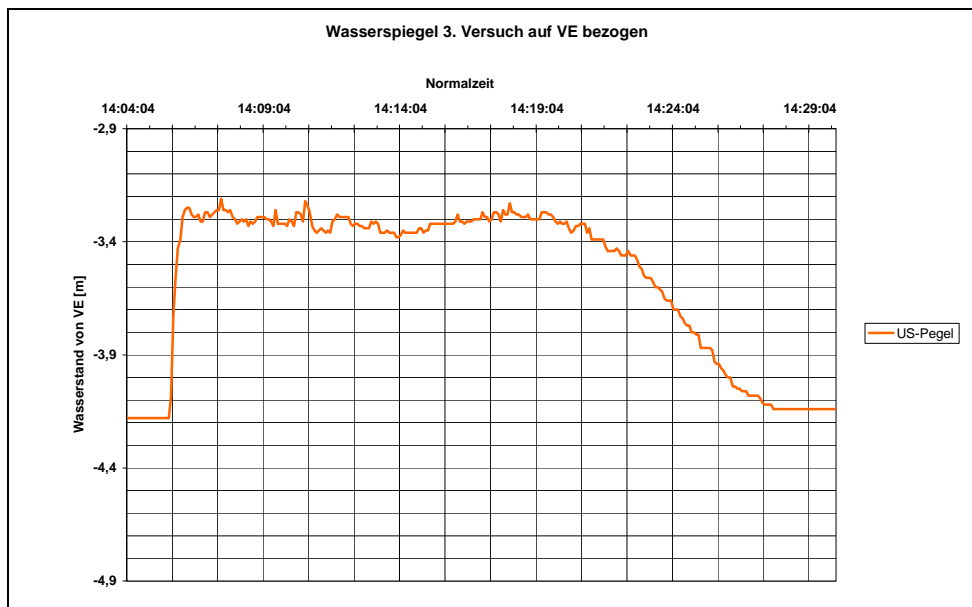


Abbildung 8: Verlauf der Abflusstiefe am Messquerschnitt während des 3. Versuches

### 3.3.2 Fließgeschwindigkeit

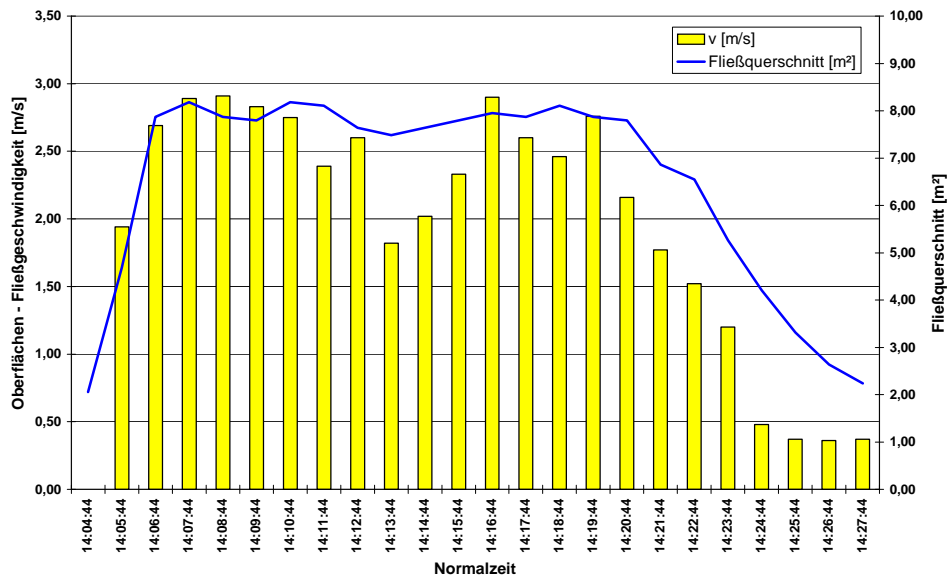


Abbildung 9: Ergebnisse der Messung der Oberflächen-Fließgeschwindigkeit durch den Radarsensor KALESTO während des 3. Flutungsversuches

In Vergleich zum 1. Flutungsversuch zeigt sich auch beim 3. Flutungsversuch – bei gleichem Flutungsdesign (20 m³/s) – eine Absoluthöhe der Fließgeschwindigkeit bei ~ 2.8 m/s, die jedoch ebenso im Flutungsverlauf unregelmäßig wird. Die Geschwindigkeit der Wellenfront bis zum Messquerschnitt errechnet sich aus  $560 \text{ m} / 335 \text{ s} \sim 1,7 \text{ m/s}$ .

### 3.4.4. Flutungsversuch

Der 4. Flutungsversuch wurde am 20. Juli 2001 mit der Öffnung des Grundablasses am Speicher LOBENTAL um 09:50:00 (Normalzeit) gestartet. Die Daten zur Steuerung des Grundablasses und zum Flutungsdesign sind Tabelle 5 zu entnehmen.

| 4. Versuch        | Normalzeit | Abfluss [m³/s] |
|-------------------|------------|----------------|
| Beginn Öffnen     | 09:50:00   | 10             |
| Beginn Öffnen     | 09:55:00   | 15             |
| Beginn Öffnen     | 10:00:00   | 20             |
| Beginn Schliessen | 10:10:00   |                |
| Ende Schliessen   | 10:14:00   |                |

Tabelle 5: Daten zur Steuerung des Grundablasses und der dazugehörenden Abflussmenge (Quelle: RIMBÖCK)

### 3.4.1 Abflusstiefe

Das Ausgangsniveau zum US-Pegel liegt im letzten Flutungsversuch bei -4.18 m (ausgehend von VE). Die Wellenfront erreicht um 09:56:34 den Messquerschnitt, d.h.

394 s nach dem Öffnen des Grundablasses am Speicher Lobental. Die 3-Gipfeligkeit des Kurvenverlaufs der Abflusstiefe beim US-Pegel – entsprechend dem Versuchsdesign – ist nicht mehr so eindeutig wie im 2. Versuch (siehe Kap. 3.2.1), es sind jedoch Verflachungen bei  $-3.60$  m,  $-3.35$  m und  $-3.20$  m feststellbar. Besonders beim Durchgang der  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  - Welle sind starke Pegelschwankungen beobachtbar.

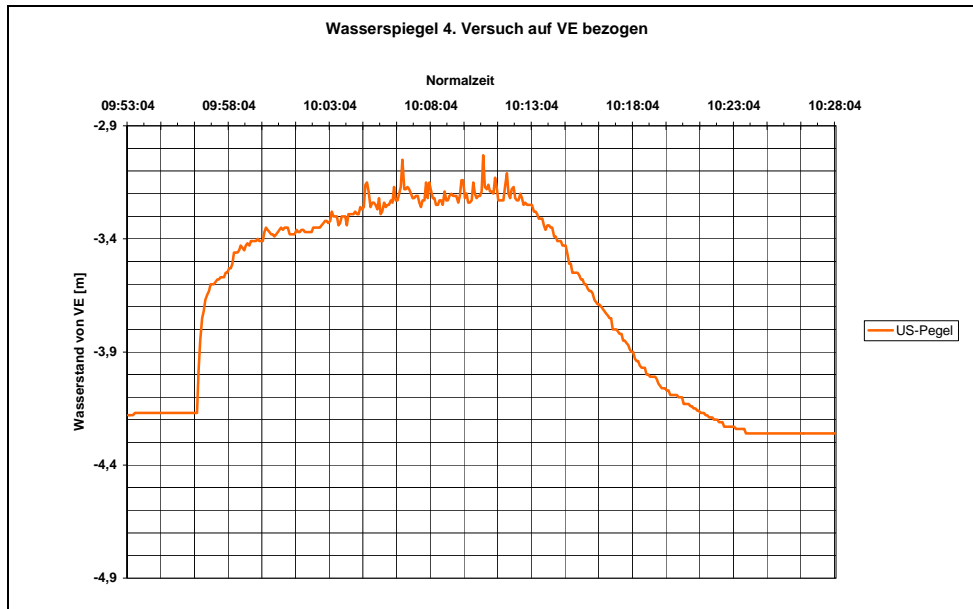


Abbildung 10: Verlauf der Abflusstiefe am Messquerschnitt während des 4. Versuches

### 3.4.2 Fließgeschwindigkeit

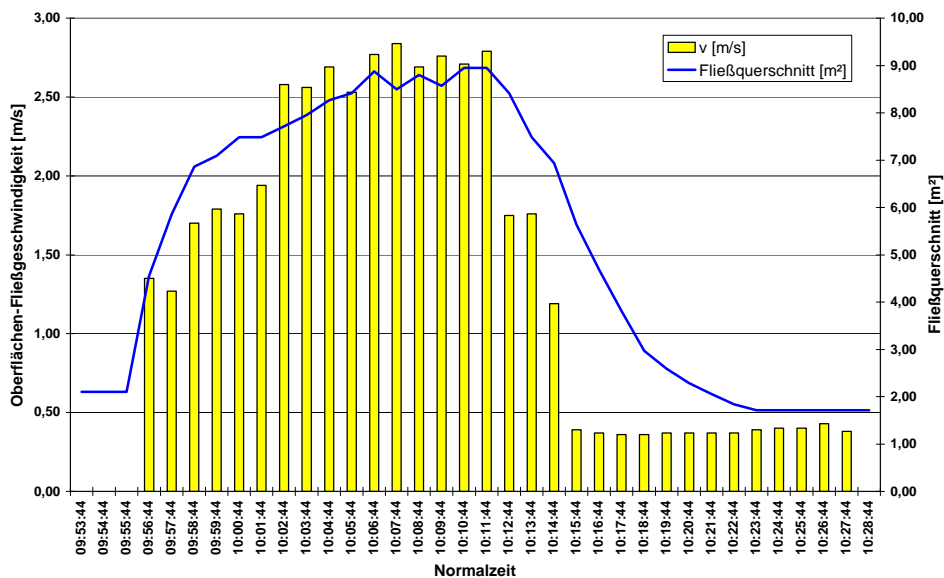


Abbildung 11: Ergebnisse der Messung der Oberflächen-Fließgeschwindigkeit durch den Radarsensor KALESTO während des 4. Flutungsversuches

Der „treppenförmige“ Aufbau des Geschwindigkeitsprofils über die Zeit gibt das Flutungs-Design gut wieder. Bei einem Modellabfluss von  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  kann somit eine Geschwindigkeit von  $\sim 1.3 \text{ m/s}$ , bei  $15 \text{ m}^3/\text{s}$  eine Geschwindigkeit von  $\sim 1.8 \text{ m/s}$  und bei  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  eine Geschwindigkeit von  $2.7 \text{ m/s}$  zugeordnet werden. Die Geschwindigkeit der Wellenfront bis zum Messquerschnitt errechnet sich aus  $560 \text{ m} / 394 \text{ s} \sim 1,4 \text{ m/s}$ .

### 3.4.3 Wellenverlauf zwischen Messquerschnitt und Brücke vor Kraftwerk 3

Um der Fragestellung nachzugehen, ob das Flutungsdesign in weiter entfernten Gerinneabschnitten ähnlich aussehen würde, wurde für den 4. Versuch unter einem Brückenquerschnitt kurz vor dem Kraftwerk 3 (Lobental b) ein US-Pegel installiert. Eine zusätzlich installierte Drucksonde vor dem Kraftwerk 2 schwamm zum Zeitpunkt des Wellendurchganges auf, weshalb die aufgezeichneten Daten nicht berücksichtigt werden konnten.

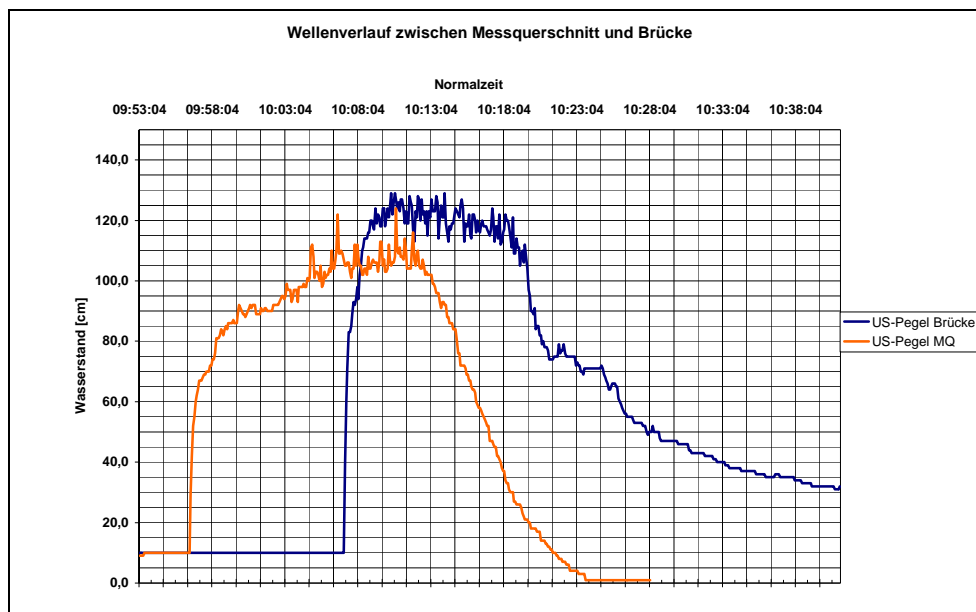


Abbildung 12: Verlauf der Ganglinie zum 4. Versuch an den beiden Messquerschnitten

Wie die Abbildung 12 zeigt, benötigte die Flutwelle für eine Gerinnestrecke von  $1147 \text{ m}$  (aus den Lageplänen entnommen) eine Zeit von  $635 \text{ s}$ , was einer Fließgeschwindigkeit von  $\sim 1.8 \text{ m/s}$  entspricht. Weiter fällt auf, dass die scharfe Abgrenzung der Modellabflüsse – entsprechend dem Flutungs-Design – beim Brücken-Querschnitt nicht mehr nachvollziehbar ist; die Flutwelle zeigt dort einen sowohl in der Abflusstiefe als auch im zeitlichen Wellenablauf kompakten Verlauf. Dies lässt den Schluss zu, dass der erste „Teil“ der Flutwelle (entspricht in etwa dem Modellabfluss von  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  bzw.  $15 \text{ m}^3/\text{s}$ ) von der Hauptwelle ( $20 \text{ m}^3/\text{s}$ ) entlang der Gerinnestrecke eingeholt wird, und sich am Messort (Brücke-Querschnitt) die Wellen

bereits überlagert haben; eine Erhöhung des Abflussvolumens infolge der Wellenüberlagerung ist denkbar.

## 4 Diskussion der Ergebnisse und Schlussfolgerungen für die Praxis

### 4.1 Ableitung von Kennzahlen

Aus den Wertepaaren Abflussquerschnitt (ermittelt aus der Fließtiefe) und Fließgeschwindigkeit wird – indirekt – das dazugehörige Abflussvolumen bestimmt. Anzumerken ist hier, dass sowohl die Abflusstiefe als auch die Fließgeschwindigkeit nur in einem Punkt gemessen wurde; zusätzlich gilt die Angabe für die Fließgeschwindigkeit für die Wasserspiegeloberfläche. Das daraus resultierende Abflussvolumen kann somit nur als eine Annäherung verstanden werden, da bei stark turbulenten Strömungsverhältnissen – wie sie in Wildbächen auftreten – sowohl die Wasserspiegellage im Messquerschnitt starken Schwankungen unterworfen ist (Wellenbildung, Veränderung der Sohlage, etc.) als auch die mittlere Fließgeschwindigkeit durch die Einzelmessung an der Wasseroberfläche überschätzt wird. Interessant erscheint daher die Fragestellung, innerhalb welcher Schwankungsbreite das getestete Messsystem die Modell-Abflussvolumen wiedergeben kann.

In der Tabelle 6 erfolgt eine Gegenüberstellung der aus den Messungen abgeleiteten Abflussvolumen zu den Modellabflüssen; gleichzeitig erfolgt die Angabe des dazugehörigen Rauigkeitsbeiwertes nach STRICKLER. Die Abflussvolumen wurden jeweils aus den Mittelwerten der Wertepaare Abflussquerschnitt und Fließgeschwindigkeit ermittelt. Die Annahme des STRICKLER – Beiwertes bezieht sich ausschließlich auf den Messquerschnitt, das zugrundeliegende Energieliniengefälle wurde dem Sohlgefälle und die mittlere Fließgeschwindigkeit der gemessenen Oberflächengeschwindigkeit gleichgesetzt.

|                    | 2. Versuch |              |                     |                                       | 4. Versuch |              |                     |                                       |
|--------------------|------------|--------------|---------------------|---------------------------------------|------------|--------------|---------------------|---------------------------------------|
| Modellabfluss [m³] | v [m/s]    | h von VE [m] | Q <sub>A</sub> [m³] | k <sub>ST</sub> [m <sup>1/3</sup> /s] | v [m/s]    | h von VE [m] | Q <sub>A</sub> [m³] | k <sub>ST</sub> [m <sup>1/3</sup> /s] |
| 5                  | 0,4        | -3,8         | 2,0                 | 5,8                                   |            |              |                     |                                       |
| 10                 | 1,5        | -3,6         | 10,0                | 20,0                                  | 1,3        | -3,6         | 7,7                 | 19,8                                  |
| 15                 | 1,9        | -3,4         | 15,0                | 23,6                                  | 1,8        | -3,4         | 12,7                | 24,7                                  |
| 20                 | 2,8        | -3,2         | 26,0                | 32,3                                  | 2,7        | -3,2         | 23,7                | 33,0                                  |
|                    | 1. Versuch |              |                     |                                       | 3. Versuch |              |                     |                                       |
| Modellabfluss [m³] | v [m/s]    | h von VE [m] | Q <sub>A</sub> [m³] | k <sub>ST</sub> [m <sup>1/3</sup> /s] | v [m/s]    | h von VE [m] | Q <sub>A</sub> [m³] | k <sub>ST</sub> [m <sup>1/3</sup> /s] |
| 20                 | 2,6        | -3,3         | 20,3                | 31,8                                  | 2,8        | -3,3         | 22,5                | 35,3                                  |

Tabelle 6: Gegenüberstellung der aus den Messergebnissen abgeleiteten Kennzahlen (Abflussvolumen, Rauigkeitsbeiwert nach STRICKLER) zu den Modellabflüssen der einzelnen Flutungsversuche

Die resultierenden Abflussvolumen zu den einzelnen Flutungsversuchen ergeben unter Rücksichtnahme der vorgegebenen Randbedingungen eine relativ gute Übereinstimmung mit den Modellabflüssen laut dem dazugehörigen Flutungs-Design. Die Problematik der Fließgeschwindigkeitsmessung bei einem Modellabfluss von  $5 \text{ m}^3/\text{s}$  wurde oben schon angesprochen – das Ergebnis ist dementsprechend zu werten. Die höheren Abweichungen der resultierenden Abflussvolumen bei den Modellabflüssen von  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  sind auf die starken Pegelschwankungen und die damit verbundene Schwierigkeit, einen entsprechenden Pegel-Mittelwert abzuleiten, rückzuführen.

Interessant erscheinen die aus den Messwerten abgeleiteten Angaben zur Querschnittsrauhigkeit: wird die Angabe zum Modellabfluss von  $5 \text{ m}^3$  (2. Flutungsversuch) aus den bekannten Schwierigkeiten außer Betracht gezogen, so ergibt sich dennoch eine Schwankungsbreite rückgerechneter Rauigkeitsbeiwerte nach STRICKLER von  $20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  bis  $35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ . Diskussionswürdig sind diese Ergebnisse deshalb, da bei einer Dimensionierung im Schutzwasserbau meist nur von einer (zusammengesetzten) Querschnittsrauhigkeit ausgegangen wird. Dabei wird aber nicht der Frage nachgegangen, ob diese Rauigkeit allen Bemessungsabflüssen äquivalent ist. Eine Über- bzw. Unterschätzung der resultierenden Abflussvolumen ist daher denkbar.

#### **4.2 Schlussfolgerungen für den praktischen Einsatz der vorgestellten Messsysteme**

Die vorgestellte Kombination zur indirekten Abflussbestimmung in Wildbächen durch die berührungslose Messung der Fließgeschwindigkeit – in diesem Fall durch den Radarsensor „KALESTO“ – und der Fließtiefe durch die Ultraschall-Niveaumessung brachte eine relativ gute Übereinstimmung der Messergebnisse mit den Modellabflüssen. Die Qualität der Ergebnisse hängt vielfach davon ab, an welcher Stelle im Messquerschnitt die Messsysteme positioniert werden. So ergeben sich bei der Ultraschall-Niveaumessung Messfehler darin, dass Wassertropfen (z.B. infolge von Fließwechsellvorgängen) das Messsignal zu früh reflektieren und damit einen höheren Wasserspiegel vortäuschen. Eine Beobachtung des projizierten Messquerschnittes bei unterschiedlichen Abflüssen und eine Dokumentation der dazugehörigen Abflussmorphologie ist unbedingte Voraussetzung für die Auswahl eines geeigneten Standortes zur Bestimmung der Abflusstiefe durch den Ultraschall-Pegel. Im gleichen Maße ist zur Bestimmung der Fließgeschwindigkeit zumindest eine einheitliche Querschnittsgeometrie Voraussetzung für einigermaßen repräsentative Ergebnisse.

Abschließend kann festgehalten werden, dass die vorgestellten Messsystem-Komponenten eine sinnvolle Möglichkeit zur Bestimmung von Abflüssen in Wildbachgerinnen darstellen. Die Vorteile der berührungslosen Messung im Vergleich zu herkömmlichen Methoden der indirekten Abflussbestimmung (z.B. Hydrometrischer Flügel und Drucksonde) liegen zum einen darin, dass kostengünstig (die anfänglich höheren Investitionskosten für die Messsysteme werden durch Einsparungen an Personal- und Materialressourcen im zeitlichen Verlauf wieder wettgemacht), einfach und vor allem Unabhängig vom Abflussvolumen gemessen werden kann (die herkömmliche Messung im Hochwasserfall in Wildbächen ist mühsam und mit einigen Risiken verbunden); zum anderen können Messgeräte, die mit dem Bestimmungsmedium in Kontakt sein müssen, durch den Geschiebe- und Wildholztransport in ihrer Messung stark beeinträchtigt bzw. beschädigt werden. Die Folge sind Fehler in den Messungen und vor allem zum Zeitpunkt von Hochwasserereignissen ein erhöhter Betreuungsaufwand. Durch die Möglichkeit die vorgestellten Messkomponenten außerhalb des Fließquerschnittes anzuordnen, wird eine kontinuierliche Messung mit entsprechender Qualität möglich. Dies ist speziell bei der Frühwarnung (vor Hochwasser, Muren, etc.) Grundvoraussetzung für die Funktionsfähigkeit des Systems.