

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Bachmann, Andrea-Kristin; Speerli, Jürg; Clausen, Walter
Hydraulische sowie 1D und 3D numerische Modellierung
einer Flutwelle in einer Schlucht

Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:
Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische
Hydromechanik

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/107086>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Bachmann, Andrea-Kristin; Speerli, Jürg; Clausen, Walter (2020): Hydraulische sowie 1D und 3D numerische Modellierung einer Flutwelle in einer Schlucht. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Interdisziplinärer Wasserbau im digitalen Wandel. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 63. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 423-432.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Hydraulische sowie 1D und 3D numerische Modellierung einer Flutwelle in einer Schlucht

Andrea-Kristin Bachmann
Jürg Speerli
Walter Clausen

Der infolge eines Staumauerbruchs resultierende maximale Flutwellenabfluss wird mit einer hydraulischen Modelluntersuchung sowie mit numerischer 1D und 3D Modellierungen ermittelt. Direkt unterhalb der Staumauer liegt eine enge Schlucht, wodurch der maximale Flutwellenabfluss stark gedämpft wird. Die Beschaffung der notwendigen Grundlagendaten mit modernen digitalen Werkzeugen und Methoden und das daraus generierte digitale Oberflächenmodell werden erläutert. Das digitale Oberflächenmodell ist die Grundlage für die Durchführung der verschiedenen Modellierungsansätze. Die Ergebnisse des Flutwellenabflusses am unteren Ende der Schlucht liegen in einer ähnlichen Größenordnung. Die verwendeten Modellierungsansätze werden diskutiert und eine Schlussfolgerung und Empfehlung abgegeben.

Stichworte: Hydraulische Modellierung, Numerische Modellierung, Digitales Oberflächenmodell, Staumauerbruch, Flutwelle

1 Einleitung und Situation

Die Massa ist ein Wildbach im Kanton Wallis, Schweiz und entwässert ein stark vergletschertes Einzugsgebiet mit dem Grossen Aletschgletschers als Hauptgletscher und mündet oberhalb von Brig in die Rhone. Der Grosse Aletschgletscher ist der flächenmässig grösste und längste Gletscher der Alpen. Neben Schmelzwasser transportiert die Massa auch sehr viele Sedimente. An der Massa befindet sich die Wasserkraftanlage Electra Massa bestehend aus dem Gebidem Stausee, einem Triebwassersystem sowie einer Kavernenzentrale mit Unterwasserkanal zur Rhone (Abb. 1). Infolge des hohen Sedimentanfalls wird der Gebidem Stausee jährlich entleert und

eine Freispiegelspülung durchgeführt. In den letzten 20 Jahren wurden so jährlich zwischen 300'000 und 400'000 m³ Sedimente gespült, wovon ca. 30'000 m³ gröberes Geschiebe in einem Sedimentbecken am Ende der Massaschlucht zwischengespeichert und später ausgebeutet werden (Abb. 2). Der Rest gelangt über den rund 700 m langen Massakanal in die Rhone. Das Sedimentbecken wird durch eine schlanke Staumauer geschaffen (Abb. 3) und ist Bestandteil eines Kieswerks. Die Staumauer wurde in den Jahren 1950/1960 erstellt.

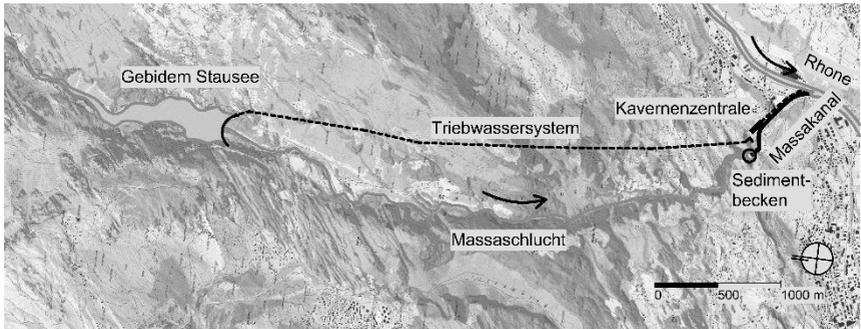


Abbildung 1: Situation mit der Wasserkraftanlage Electra Massa, der Massaschlucht, des Sedimentbeckens, des Massakanals und der Rhone.



Abbildung 2: Situation mit dem Sedimentbecken **t**, der Staumauer **u** (weiss markiert), der unteren Massaschlucht **v**, des Kieswerks **w** und des Massakanals **x**.

Die Beaufsichtigung von Talsperren obliegt in der Schweiz dem Bundesamt für Energie (BFE). Falls die Höhe und das Volumen des aufgestauten Wassers es zulassen und keine besondere Gefährdung vorliegt, kann eine Talsperre aus der Bundesaufsicht entlassen und der kantonalen Aufsicht unterstellt werden (BWG 2002, BFE 2015). Um festzustellen, ob eine besondere Gefahr vorliegt, ist eine Flutwellenberechnung als Folge eines spontanen Staumauerbruchs durchzuführen. Als Randbedingung ist von einem plötzlichen und vollständigen Bruch der Staumauer auszugehen; d.h. die Staumauer „verschwindet“ augenblicklich und die aufgestauten Wassermassen ergiesen sich als Flutwelle in den Unterlauf.

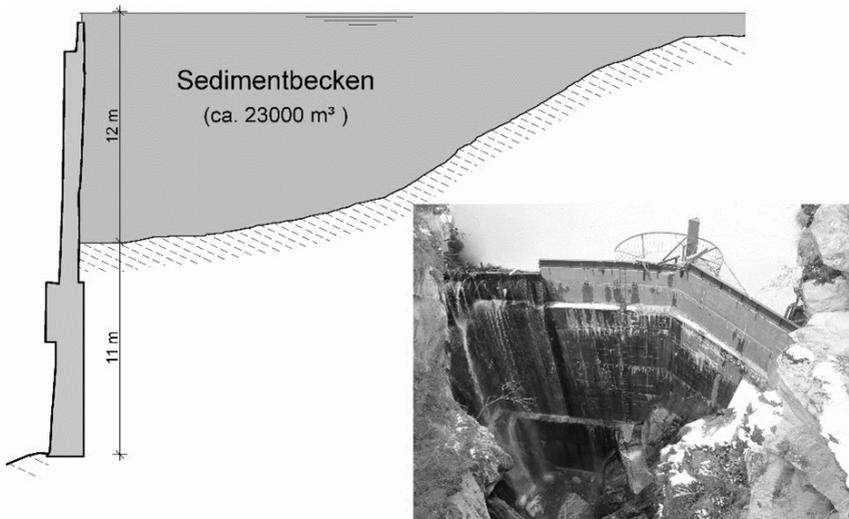


Abbildung 3: Geometrie der Staumauer und luftseitige Ansicht.

Die kantonale Baukommission verlangte im Jahr 2015 die Überprüfung dieser Staumauer. Neben der Überprüfung der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit musste auch für das Szenario eines Staumauerbruchs das besondere Gefährdungspotenzial ermittelt werden. Das massgebende Gefahrenszenario ergibt sich bei einem vollständigen Bruch der Staumauer, beispielsweise bei einem Erdbeben, wenn das Sedimentbecken mit Wasser gefüllt ist. Unterhalb der Staumauer befindet sich die enge, 55 m lange untere Massaschlucht (Abb. 2), welche im Falle eines Staumauerbruchs von der Flutwelle durchflossen wird. Anschliessend folgt der Massakanal, der das Wasser in die Rhone ableitet.

2 Methoden zur Flutwellenberechnung

Der maximale Flutwellenabfluss in der unteren Massaschlucht und zu Beginn des Massakanals wurden mit einer hydraulischen Modelluntersuchung (studentische Semesterarbeit) sowie mit numerischer 1D (Beratungsmandat) und 3D Modellierung (HSR Forschungsprojekt) ermittelt. Zum Vergleich dient der Breschenabfluss, welcher mit dem vereinfachten Verfahren zur Berechnung einer Flutwelle mit primär eindimensionaler Ausbreitung, Verfahren CTGREF (BFE 2014) abgeschätzt wurde.

Die numerische 1D Modellierung erfolgte mit der Software HEC-RAS Version 4.0. Im Rahmen der studentischen Arbeit wurden in einem Modell im Massstab 1:50 die hydraulischen Modellversuche abgewickelt. Die numerische 3D Modellierung wurde mit der Software ANSYS CFX durch das HSR Institut für Energietechnik durchgeführt.

3 Digitale Grundlagendaten

Die für die Modellierungen notwendigen Grundlagendaten mussten zuerst im Feld erhoben werden. Hierzu wurden in der unteren Massaschlucht Positionskugeln verteilt und befestigt. Ein Faro Focus3D X 30 Laserscanner wurde an zehn verschiedenen Positionen entlang der Schlucht aufgestellt. An jeder der zehn Positionen wurde vom Laserscanner eine Aufnahme der umliegenden Strukturen erstellt. Mithilfe der Positionskugeln konnten die Aufnahmen ausgerichtet und übereinandergelegt werden. Für eine optimale Überlappung und Positionierung der verschiedenen Scans zueinander mussten mindestens zwei gleiche Positionskugeln pro Scan vom Laserscanner erkannt werden. In Abbildung 5 sind die weissen Positionskugeln und der Faro-Scanner zu sehen. Die Auswertung der Aufnahmen erfolgte im Programm FaroScene. So konnte aus den Aufnahmen des Laserscanners eine Punktwolke und ein Gitter erstellt werden. Zusätzlich wurden mit einer Drohne Fotos des umliegenden Geländes aufgenommen und mittels Photogrammetrie eine Punktwolke des Geländes generiert. Durch Triangulation der beiden Punktwolken wurde ein digitales Geländemodell (DOM) des Untersuchungsperimeters erstellt. Für die numerische 1D Modellierung wurden aus dem digitalen Geländemodell 28 Querprofile erzeugt. Da HEC-RAS nicht mit überhängenden Strukturen in Querprofilen rechnen kann, wurden aus den effektiven Querprofilen flächengleiche Rechteckprofile ohne Überhänge erstellt (Abb. 4), welche dann in HEC-RAS eingelesen werden konnten.

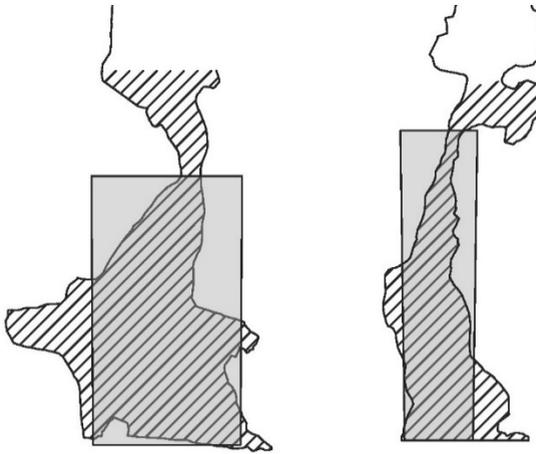


Abbildung 4: Typische Querprofile der unteren Massaschlucht. Die schraffierten Bereiche sind flächengleich zu den grauen Rechtecken. Links ist das Querprofil 20 und rechts das Querprofil 11.

Um eine numerische 3D Simulation mit ANSYS CFX durchführen zu können, wird ein Volumenmodell benötigt. Daher wurde aus dem digitalen Oberflächenmodell ein Volumenmodell erzeugt.

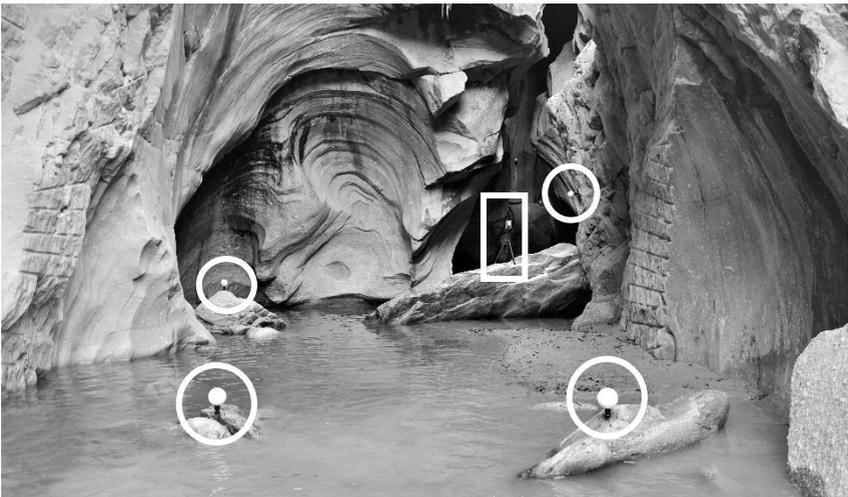


Abbildung 5: Massaschlucht mit Faro Focus^{3D} X 30 Laserscanner (weisses Rechteck) und weissen Positionskugeln (weisse Kreise).

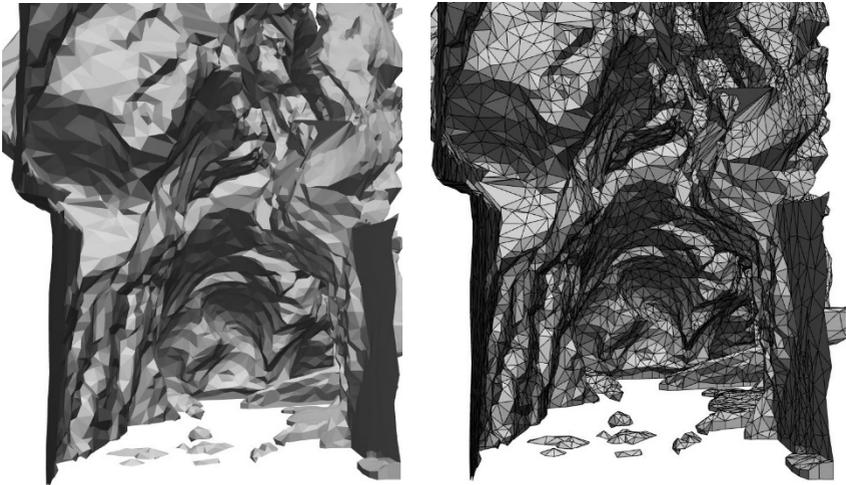


Abbildung 6: Ansicht der Massaschlucht aus Abbildung 5 als digitales Oberflächenmodell (links) und als Gitter für die numerische 3D Berechnung (rechts).

4 Ergebnisse

Aufgrund der Feldaufnahmen konnten entlang der 55 m langen unteren Massaschlucht drei markante Engstellen detektiert werden (im Bereich der Querprofile 5, 11 und 20 in Abbildung 7). Diese Engstellen führen zu einem Aufstau oberhalb der Engstellen und somit zu einer Dämpfung des Abflusses. Je nach Untersuchungsmethode resultiert ein maximaler Ausfluss bei der Staumauer (Breschenabfluss) bei einem plötzlichen und vollständigen Staumauerbruch von 545 bis 780 m³/s. Zu Beginn des Massakanals liegt der Abfluss zwischen 250 und 340 m³/s.

4.1 Verfahren CTGREF

Mit dem vereinfachten Verfahren «CTGREF» zur Berechnung einer Flutwelle mit primär eindimensionaler Ausbreitung (BFE 2014) beträgt der Breschenabfluss bei einem spontanen Bruch der Staumauer rund 780 m³/s. Bei diesem Verfahren wird der Einfluss der unteren Massaschlucht nicht berücksichtigt, wodurch der Abfluss zu Beginn des Massakanals immer noch bei 780 m³/s liegt.

4.2 Numerische 1D Modellierung

Als Berechnungsannahme wurde bei der numerischen 1D Modellierung der stationäre Abfluss gesucht, bei welchem sich der Übergang von Freispiegel zu Druckabfluss in den massgebenden Querprofilen in der Schluchtstrecke einstellt. Dabei wird davon ausgegangen, dass bei einer starken Verengung im oberen Teil des Querprofils (Abb. 4) annähernd ein Druckabfluss erfolgt, bei welchem bei einer Zunahme der Druckhöhe der Abfluss nur noch wenig zunimmt. Dies ist bei einem Abfluss von 200 bis 250 m³/s der Fall.

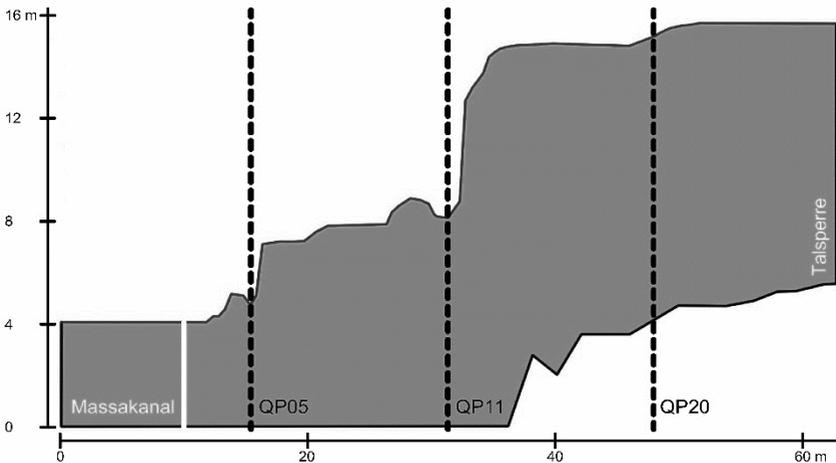


Abbildung 7: Wasserspiegelverlauf in der unteren Massaschlucht bei einem Abfluss von 200 m³/s. Engstellen im Bereich der Querprofile QP05, QP11 und QP20 führen zu lokalem Aufstau.

4.3 Hydraulische Modellversuche

Das Sedimentbecken, eine vereinfachte Stauwand in Form einer Rechteckplatte, die untere Massaschlucht und der obere Teil des Massakanals wurden in einem hydraulischen Modell im Massstab 1:50 in Froude'scher Ähnlichkeit nachgebildet. Die Schlucht wurde basierend auf dem 3D-Modell mit Dreiecksvermaschung mit 3D-Druckern erstellt. Wegen der maximal möglichen Druckgrösse wurde die Schlucht in insgesamt 104 Einzelteile eingeteilt, einzeln gedruckt und anschliessend zusammengebaut. In einem additiven Druckverfahren wurde so die gesamte Schlucht detailgetreu nachgebildet. Ein vereinfachtes Rechteckbecken bildet das Sedimentbecken und eine PVC-Rinne den Massakanal nach. Ein möglichst rasches, manuelles Ziehen der Rechteckplatte simuliert den spontanen Bruch der Stauwand. Der Verlauf der Wasserspiegellagen (Abflusstiefen) im Sedimentbe-

cken und im Massakanal wurde im Modell mit Echoloten kontinuierlich erfasst. Mit Messflügeln wurde die Fließgeschwindigkeit im Sedimentbecken und im Massakanal gemessen. Mit den Abflusstiefen und den Fließgeschwindigkeiten konnte der Abfluss zeitabhängig berechnet werden. Videoaufnahmen dokumentieren die Versuche.

4.4 Numerische 3D Modellierung

Die Simulation der Flutwelle wurde als instationäre (transiente) Strömung durchgeführt. Ziel dieser Simulationen war die zeitabhängige Ermittlung des Abflusses am Standort der Staumauer und im Massakanal sowie die Visualisierung der Abflussverhältnisse im ganzen Untersuchungsperimeter.

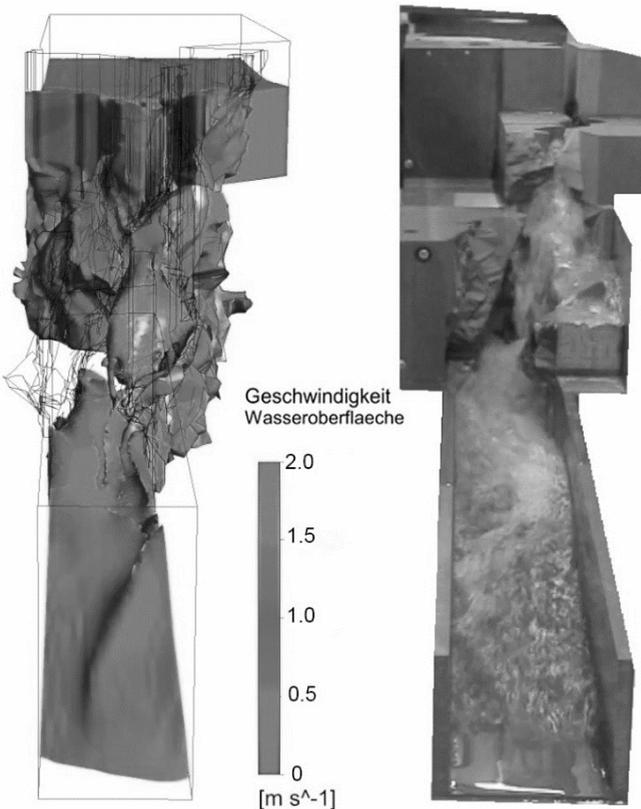


Abbildung 8: Blick gegen die Fließrichtung. Abflussverhältnisse beim Ausgang der unteren Massaschlucht und am Anfang des Massakanals.

Abbildung 8 zeigt beispielsweise die Fließgeschwindigkeit [m/s] an der Wasseroberfläche als Modellwert. Der Umrechnungsfaktor für die Fließgeschwindigkeit von Modell- auf Prototypwerte beträgt 7.1. Die maximale Fließgeschwindigkeit im Massakanal liegt somit bei rund 14 m/s.

4.5 Vergleich der verschiedenen Methoden

Tabelle 1 zeigt die ermittelten Abflusswerte für die verwendeten Methoden. Beim zeitlichen Aufwand ist die Beschaffung der Grundlagendaten nicht berücksichtigt.

Tabelle 1: Ermittelte Abflüsse mit Q_{vor} als maximaler Breschenabfluss und Q_{nach} als Abfluss im Massakanals.

Methode	Randbedingung	Q_{vor} [m ³ /s]	Q_{nach} [m ³ /s]	Zeitlicher Aufwand
CTGREF	Handrechnung	780	780	2 Stunden
Num. 1D	stationär	-	250	2 Arbeitstage
Num. 3D	instationär	660	275	2-3 Wochen
Hydraulische Modelluntersuchung	stationär und instationär	545	340	1'200 Stunden Drucken 5 Arbeitstage Zusammenbau und Versuche

Der Vergleich der Videofilme aus der hydraulischen Modelluntersuchung mit den 3D Visualisierungen zeigen eine frappante Übereinstimmung bei den Abflussverhältnissen. Beispielsweise schlägt die Flutwelle im Bereich des QP20 auf die Engstelle und wird in das Sedimentbecken reflektiert und schaukelt dann hin und her bis das Becken entleert ist. Die Entleerungszeit beträgt sowohl im hydraulischen Modellversuch wie in der numerischen 3D Modellierung ca. 10 s (Modellwert). Die Stosswelle, welche sich quer durch den Massakanal bildet, ist im hydraulischen Modell wie auch in der numerischen 3D Modellierung gut zu erkennen (Abb. 8).

5 Schlussfolgerung und Empfehlung

Alle drei Methoden zeigen eine deutliche Dämpfung des maximalen Flutwellenabflusses durch die untere Massaschlucht. Am zuverlässigsten werden die ermittelten Abflüsse mit ANSYS CFX beurteilt. Obwohl das Ergebnis aus der numerischen 1D Modellierung relativ nah am Ergebnis der numerischen 3D Modellierung ist, wird von der Anwendung der numerischen 1D

Modellierung bei solch komplexen Geometrien mit überhängenden Strukturen abgeraten, da starke Vereinfachungen in den Querprofilen und in den Berechnungen getroffen werden mussten. Die Bestimmung der zeitabhängigen Abflusswerte aus dem hydraulischen Modell werden als eher ungenau eingestuft. Der Messflügel weist eine gewisse Trägheit auf und stört bei den hohen Geschwindigkeiten im Massakanal die Strömung stark. Die Handrechnung zeigt den grössten Abfluss und eine Berücksichtigung der Massaschlucht ist nicht möglich.

Aufgrund der durchgeführten Modellierungen konnte gezeigt werden, dass der maximale Flutwellenabfluss unterstrom der unteren Massaschlucht schadlos im Massakanal abgeführt werden kann. Eine besondere Gefährdung im Sinne der Richtlinie für die Sicherheit der Stauanlagen ist damit nicht gegeben. Aufgrund dieser Untersuchung wurde zum ersten Mal in der Schweiz eine Talsperre von der Aufsicht des Bundes enthoben und der Aufsicht des Kantons Wallis unterstellt.

6 Literatur

- BFE (2014): Vereinfachtes Verfahren («CTGREF») zur Berechnung einer Flutwelle mit primär eindimensionaler Ausbreitung, Bern 2014.
BFE (2015): Richtlinie über die Sicherheit der Stauanlagen, Teil A: Allgemeines, Bern 2015
BWG (2002): Sicherheit der Stauanlagen, Richtlinien des BWG (Bundesamt für Wasser und Geologie), Biel, 2002

Autoren:

Andrea-Kristin Bachmann
Prof. Dr. Jürg Speerli

Walter Clausen

Institut für Bau und Umwelt
HSR Hochschule für Technik
Oberseestrasse 10
8640 Rapperswil
Schweiz

VWI Ingenieure AG

Kiesweg 2
3904 Naters
Schweiz

Tel.: +41 55 222 49 92
E-Mail: abachman@hsr.ch
jspeerli@hsr.ch

Tel.: +41 27 922 09 84
E-Mail: walter.clausen@vwi.ch