

Abschätzung von Extremhochwassern bei Talsperren nach der Methode CRUEX++

Fränz Zeimetz, Javier Garcia Hernández, Frédéric Jordan, Jean-Michel Fallot, Anton Schleiss

Zusammenfassung

Das Forschungsprogramm CRUEX, welches vor rund 25 Jahren initiiert wurde und die Erarbeitung der erforderlichen theoretischen Grundlagen sowie einer allgemein gültigen Methode für die Abschätzung extremer Hochwasser in Hinsicht auf Talsperrensicherheit zum Ziel hatte, konnte mit dem Projekt CRUEX++ (2012–2017) zu Ende geführt werden. In diesem Beitrag werden die Resultate des abschliessenden Projekts CRUEX++ und die sich daraus ergebende neue Methode zur Abschätzung extremer Hochwasser mit Hilfe von PMP-PMF-Simulationen und statistischen Ansätzen für den Sicherheitsnachweis von Talsperren vorgestellt. Die Ermittlung der massgebenden Extremniederschläge im Einzugsgebiet der Talsperre wird dabei mit den speziell für die Schweiz entwickelten PMP-Karten vorgenommen. Die Vorgehensweise gemäss der neuen Methode CRUEX++ wird mit einem Anwendungsbeispiel illustriert, und die Resultate werden mit denen konventioneller statistischer Methoden verglichen. Dadurch können die Vorteile der neuen Methode CRUEX++ hervorgehoben werden.

Résumé

Le programme de recherche CRUEX, qui a été initié il y a environ 25 ans, visait le développement de connaissances théoriques de base et d'une méthodologie valide pour l'estimation de crues extrêmes afin de vérifier la sécurité des barrages. Le projet CRUEX a pu être conclu grâce au projet CRUEX++ (2012–2017). Dans cette contribution sont présentés les résultats du projet CRUEX++ ainsi que la nouvelle méthodologie d'estimation de crues extrêmes qui en découle. Cette dernière base la vérification à la sécurité des ouvrages d'accumulation sur le concept PMP-PMF ainsi que sur une approche statistique. La détermination des précipitations extrêmes décisives est entreprise en considérant les cartes PMP spécialement développées pour la Suisse. Le procédé de la méthodologie CRUEX++ est illustré à l'aide d'un exemple d'application. Les résultats sont alors comparés avec ceux des estimations issues de méthodes statistiques conventionnelles. De cette manière, les avantages de la nouvelle méthodologie CRUEX++ peuvent être mis en évidence.

Summary

The research program CRUEX, initiated roughly 25 years ago and aiming at the development of theoretical fundamental knowledge and of a methodology for the estimation of extreme floods to verify dam safety, could be concluded through the project CRUEX++ (2012–2017). In this contribution, the results of the project CRUEX++ and the resulting new methodology for extreme flood estimations using the PMP-PMF method and statistical approaches are presented. The estimation of the decisive extreme precipitations is based on the PMP maps specially developed for Switzerland. The workflow of the new methodology CRUEX++ is illustrated through an application example and the results are compared to those resulting from conventional statistical estimations. In this manner, the advantages of the new methodology CRUEX++ can be highlighted.

1. Einleitung

Die Sicherheit der Talsperren muss gemäss der geltenden Richtlinien des Bundesamtes für Energie (BFE, 2017) selbst im Falle einer extremen Situation unter Annahme des sogenannten Sicherheitshochwassers gewährleistet sein. Das Sicherheitshochwasser (respektive dessen natürlicher Anteil) soll eine Wiederkehrperiode von deutlich mehr als 1000 Jahren aufweisen. Je nach Stauanlagenklasse ist das Sicherheitshochwasser nicht nur ausgehend vom Bemessungshochwasser (zu $1.5 \cdot Q_{1000}$ bei bestehenden Anlagen), sondern auch als PMF (probable maximum flood) zu bestimmen.

Die verlässliche Abschätzung von Extremhochwasser ist eine grosse Herausforderung für die Praxis. Zum einen sind solche Hochwasser nie beobachtet worden; ihr Ausmass entzieht sich somit jeder Erfahrung. Zum anderen stossen die allgemein bekannten statistischen Verfahren an ihre Grenzen, wie zum Beispiel das Extrapolieren jährlich gemessener Maximalhochwasser mit den allgemein verwendeten Extremwertverteilungen. Bekanntlich sollten statistische Verteilungen nämlich nicht für Extrapolationen auf Wiederkehrperioden verwendet werden, welche die zugrunde liegende gemessene Zeitreihe um das Dreifache überschreiten (DWA, 2012; BWG, 2003). In den besten

Fällen verfügt man über eine Messdauer von 100 Jahren, in den meisten Fällen sind es jedoch weniger als 50 Jahre. Theoretisch kann man also mit Verlässlichkeit nicht über eine Wiederkehrperiode von 300 Jahren hinaus extrapolieren.

Das maximal mögliche Hochwasser, PMF (probable maximum flood), muss laut der Weltmeteorologischen Gesellschaft (WMO, 2009) vom maximal möglichen Niederschlag, PMP (probable maximum precipitation) abgeleitet werden. Dies kann nur mit Hilfe von Regen-Abfluss-Modellen geschehen. Diese haben den grossen Vorteil, dass gleichzeitig auch die Ganglinie des abgeschätzten Hochwassers ermittelt wird, was mit statistischen Verfahren nicht möglich ist. Somit kann auch der Rückhalteeffekt im Einzugsgebiet sowie des Staubeckens selbst simuliert werden.

Um die PMP-PMF-Methode für schweizerische Verhältnisse anzupassen

und praxistauglich zu machen, wurde vor rund 25 Jahren das Forschungsprogramm CRUEX ins Leben gerufen. Die weltweit verwendete PMP-PMF-Methode muss nämlich unter Berücksichtigung lokaler Bedingungen angewendet werden (Beauchamp et al., 2013; Brigode et al., 2015; Casas et al., 2011; Felder et al., 2017; Haddad et al., 2016; Jothityangkoon et al., 2013; Lagos-Zúñiga et al., 2014; Nathan et al., 2001; Salas et al., 2014; Swain et al., 2006; Zeimetz, 2017; Zeimetz et al., 2015; Zhirkevich et al., 2010). Im Rahmen des

Forschungsprogrammes CRUEX waren mehrere wissenschaftliche Entwicklungen nötig, um die PMP-PMF-Methode an die Gegebenheiten im schweizerischen Alpenraum anzupassen. Verschiedene hydrologische Simulationsmodelle wurden entworfen und im Laufe der Zeit überarbeitet und verbessert. Die maximal möglichen Niederschläge (PMP), welche für diese Methode ausschlaggebend sind, wurden für die ganze Schweiz mit aufwendigen Simulationen ermittelt und auf PMP-Karten dargestellt, die in einem Raster von 2×2 km

die Extremwerte angeben (Audouard et al., 2006; Hertig et al., 2005; Hertig et al., 2009). Die Praxis zeigte allerdings, dass eine simple Integration dieser Extremwerte über ein bestimmtes Einzugsgebiet ab einer bestimmten Grösse zu einer starken Überschätzung des Sicherheitshochwassers führen kann. Der Grund dafür lag im Fehlen von Anwendungsgrenzen sowie einer klaren Methodik, die beschreibt, wie diese Karten in Abhängigkeit der Einzugsgebietsgrösse respektive der räumlichen Niederschlagsverteilung anzuwenden sind. Unter anderem aus diesem Grunde wurde im Jahre 2012 das Forschungsprojekt CRUEX++ initiiert, welches diese Lücken füllen sollte und, basierend auf früheren Entwicklungen sowie wo nötig mit ergänzenden Studien, schlussendlich eine für den Schweizer Alpenraum allgemein anwendbare Methode für die Abschätzung von Extremhochwasser bei Talsperren erarbeiten sollte. Im Folgenden werden die für die Anwendung wesentlichen Forschungsergebnisse des Projekts CRUEX++ kurz vorgestellt. Anschliessend wird die Methode CRUEX++ mit einem Anwendungsbeispiel illustriert und erläutert.

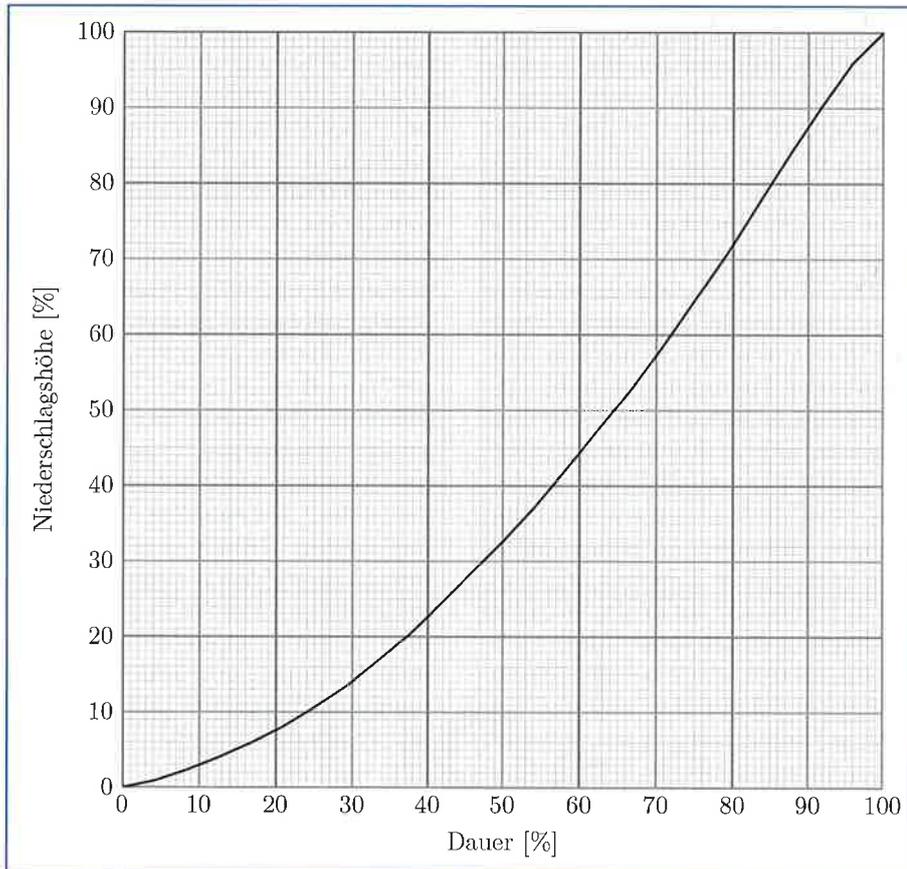


Bild 1. Regensummenkurve für die zeitliche Verteilung von PMP-Ereignissen.

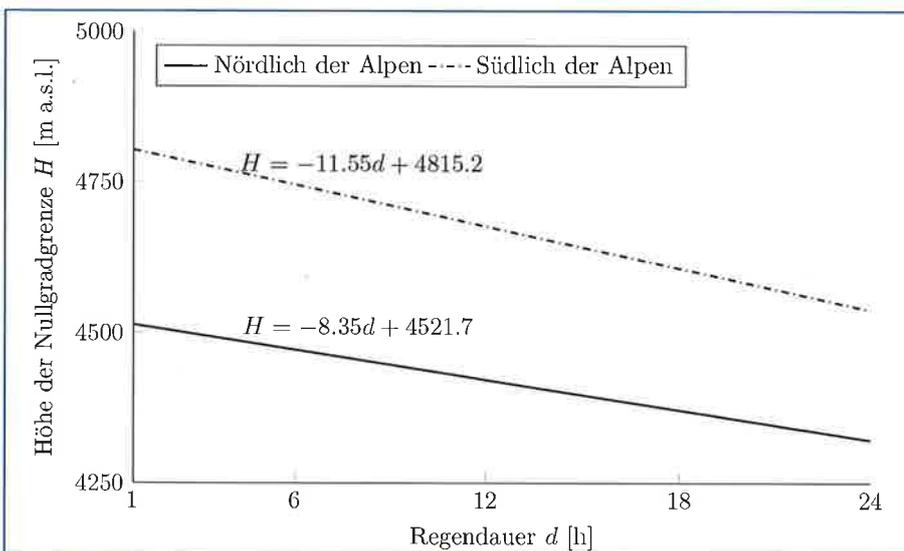


Bild 2. Lineare Interpolation der maximal gemessenen Höhe der Nullgradgrenze abhängig von der Regendauer.

2. Resultate des Projekts CRUEX++

2.1 Forschungsfragen

Das Ziel des Projekts CRUEX++ war, wie erwähnt, eine robuste Methode zur Abschätzung von Extremhochwassern, basierend auf der PMP-PMF-Methode, zu entwickeln und zu validieren (Zeimetz, 2017). Hierzu mussten folgende wissenschaftliche und praxisrelevante Fragen behandelt werden:

1. Wie müssen die PMP-Niederschlagsvolumen, die für ein gewisses Einzugsgebiet aus den PMP-Karten entnommen werden, zeitlich verteilt werden?
2. Welche Temperaturverteilung muss für eine PMP-PMF-Simulation angenommen werden?
3. Wie können plausible Anfangsbedingungen für eine PMP-PMF-Simulation bestimmt werden?
4. Wie gross darf ein Einzugsgebiet sein, damit angenommen werden kann, dass sich das PMP Ereignis über das ganze Gebiet erstreckt?

Darüber hinaus beinhaltet die Methode CRUEX++ einen statistischen Ansatz, welcher es erlaubt, das abgeschätzte, grösstmögliche Hochwasser mit nach oben begrenzten Verteilungen bezüglich seiner Wiederkehrperiode einzuordnen. Damit kann die Plausibilität

und Gültigkeit der Extrapolation auf sehr grosse Wiederkehrperioden verbessert werden. Im Folgenden wird auf jeden der genannten Ansätze eingegangen.

2.2 Zeitliche Regenverteilungen

Laut WMO (2009) kann eine sogenannte Regensummenkurve (engl.: rainfall mass curve) zur zeitlichen Verteilung der PMP-Niederschlagsvolumen verwendet werden. Im Rahmen von CRUEX wurden aus Tausenden gemessenen Regenereignissen die für die Schweiz gültigen Regensummenkurven abgeleitet und analysiert Zeimetz (2017). Es konnte aufgezeigt werden, dass eine geografische, regendauerbedingte und saisonale Unterscheidung der Regensummenkurven nicht zu bedeutenden Unterschieden in der Hochwasserabschätzung führt. Somit wird in der Methodik CRUEX++ eine allgemein anwendbare dimensionslose Regensummenkurve für die Schweiz angenommen. Letztere ist in Bild 1 dargestellt.

2.3 Temperaturverteilung in der Atmosphäre für PMP-PMF-Simulationen

In der Methode CRUEX++ wird die massgebende Temperaturverteilung durch die Höhe der Nullgradgrenze charakterisiert. Mit aufwendigen Analysen konnte nachgewiesen werden, dass die höchste gemessene Nullgradgrenze linear mit der Regendauer abnimmt (Zeimetz et al., 2017). Dabei wurde zwischen zwei homogenen Regionen unterschieden, nämlich dem Norden und dem Süden der Alpenkette. Die lineare Abhängigkeit ist für beide Regionen für den Sommer (Juni–August) in Bild 2 gezeigt, welcher für die Methode massgebend ist, da die PMP-Karten laut Audouard et al. (2006) Regenvolumen darstellen, die nur unter warmen Bedingungen generiert werden können.

2.4 Ermittlung der Anfangsbedingungen für die PMP-PMF-Simulationen

Die angenommenen Anfangsbedingungen für ereignisbasierte hydrologische Simulationen haben einen grossen Einfluss auf das Resultat (Chen et al., 2016; Hingray et al., 2009). Typische zu initialisierende Grössen sind Bodenfeuchte, Schneeschmelze, Schneefeuchte usw. Die Zustandsvariablen, die initialisiert werden müssen, hängen vom verwendeten hydrologischen Modell ab. Letztere werden also bei Abschätzungen extremer Hochwasser mit Sorgfalt gewählt werden. Die Methode CRUEX++ strebt realistische Werte für An-

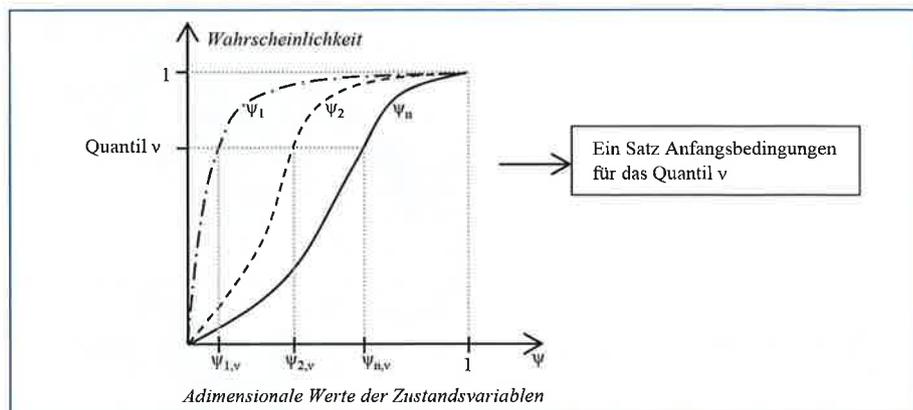


Bild 3. Deterministisches Vorgehen bei der Bestimmung einer Kombination von Anfangsbedingungen für die Simulation, beruhend auf den empirischen Wahrscheinlichkeitsfunktionen.

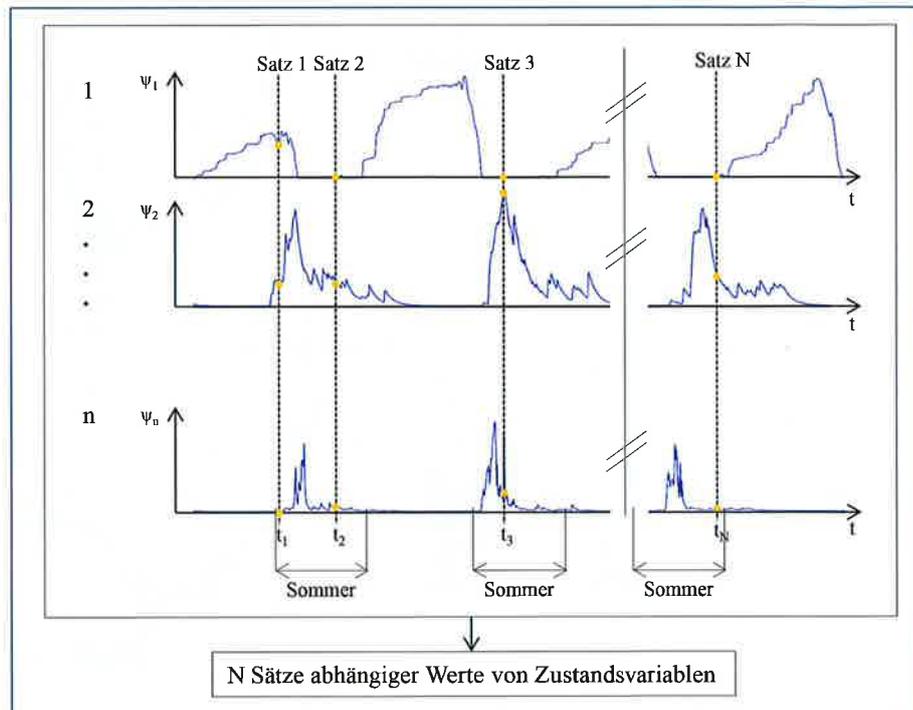


Bild 4. Stochastisches Vorgehen bei der Bestimmung von N Kombinationen von Anfangsbedingungen, beruhend auf stochastisch generierten Momenten innerhalb der Zeitreihen von simulierten Werten der Zustandsvariablen.

fangsbedingungen an. Aus diesem Grund wird eine ausführliche Analyse über einen langen Zeitraum simulierter Werte der Zustandsvariablen des hydrologischen Modells empfohlen. Ein schnell umsetzbarer deterministischer Ansatz sowie ein generell einsetzbarer, aber etwas zeitaufwendigerer stochastischer Ansatz wurden für die Anwendung der Methode CRUEX++ erarbeitet, welche nachfolgend detailliert vorgestellt werden (Zeimetz, 2017). Generell ist es wichtig, dass die Anfangsbedingungen mit der Jahreszeit des PMP-Ereignisses übereinstimmen.

2.4.1 Deterministischer Ansatz

Die Analyse der Zustandsvariablen basiert auf flächengewichteten Mittelwerten, welche im Sommer simuliert wurden. Die Ver-

teilungsfunktion jeder Variable wird empirisch bestimmt und dient zur Abschätzung der Anfangsbedingungen für gewisse Übertretungswahrscheinlichkeiten (Quantile), die der Anwender selbst bestimmen kann. Für jede Variable wird das gleiche Quantil angenommen (Bild 3). Diese Methode ist aber nur anwendbar, falls keine Wechselwirkungen zwischen den Variablen bestehen und der Einfluss einer einzigen Variable überwiegt.

2.4.2 Stochastischer Ansatz

Die Anfangsbedingungen werden mit einem stochastischen Generator von verschiedenen Momenten in der zu berücksichtigenden Jahreszeit innerhalb der Simulationsperiode über die zur Verfügung stehenden meteorologischen Zeitreihen

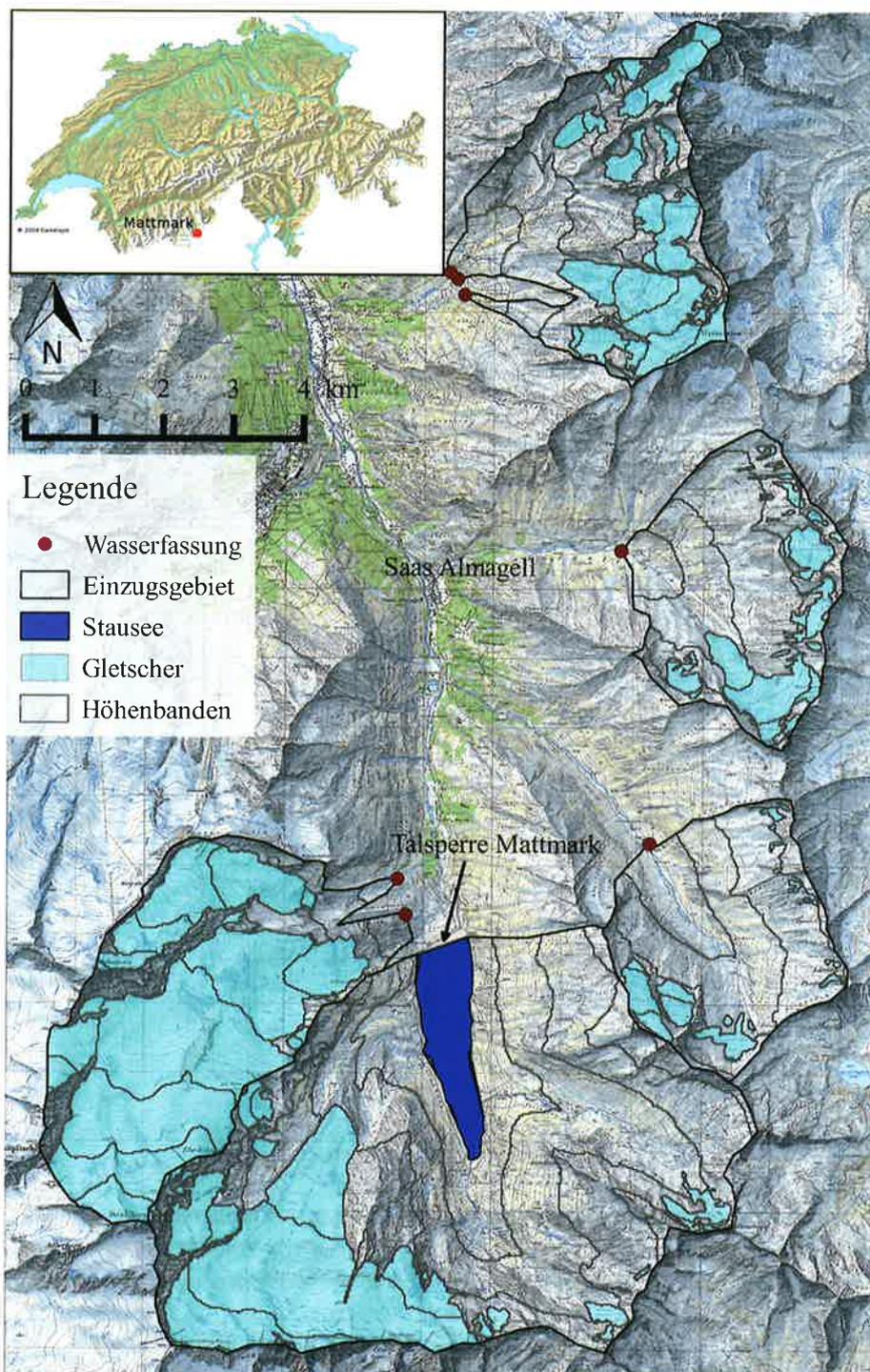


Bild 5. Einzugsgebiet der Talsperre Mattmark mit Angaben über die Beileitungen von benachbarten Einzugsgebieten, Gletscherbereiche und Höhenbänder.

(Bild 4) ermittelt. Für jedes Zeitfenster werden die simulierten Werte der Zustandsvariablen in einem sogenannten Szenarium abgelegt. Die Anzahl der generierten Zeitfenster sollte gross genug sein, um die möglichen Kombinationen gut zu widerspiegeln. Wechselwirkungen zwischen den Variablen werden mit diesem stochastischen Ansatz berücksichtigt. Der Einfluss, welchen mehrere Variablen auf das Resultat haben können, wird durch die Berücksichtigung der Abhängigkeit der einzelnen Variablen bei der Generierung der Szenarien realistisch wiedergegeben.

Das BFE als Aufsichtsbehörde über die Stauanlagen sieht in seiner Richtlinie (BFE, 2017) jedoch vor, dass nur Zeitfenster betrachtet werden, welche kurz vor seltenen bis extremen Ereignissen liegen.

2.4.3 Einfluss der Anfangsbedingungen

Die Anfangsbedingungen haben einen starken Einfluss, indem mehrere relativ stark verschiedene Hochwasserwerte für dasselbe Regenergebnis simuliert werden können. Je nach Anfangsbedingungen können also verschiedene Resultate erhalten werden. Wenn man nun also davon

ausgeht, dass die PMP dem physikalisch grösstmöglichen Regenvolumen entspricht, dann generiert man das grösstmögliche Hochwasser, indem man die PMP mit den kritischsten Anfangsbedingungen verbindet. Dieser Spezialfall eines PMF wird im Folgenden als PoMF (possible maximum flood) bezeichnet.

2.5 Bestimmen der maximalen Fläche des Einzugsgebiets

Unter Berücksichtigung der Schweizer PMP-Karten wurden für 13 Einzugsgebiete, entsprechend den oben erklärten Annahmen und Ansätzen, PMF-Abschätzungen vorgenommen. Die simulierten Extremabflüsse wurden dann in Abhängigkeit des Einzugsgebiets dargestellt und mit bekannten Flächen-Abfluss-Verhältnissen verglichen (Zeimetz, 2017). Letztere wurden durch Herschy (2001), Marchi et al. (2010) und Francou et al. (1967) von maximalen gemessenen Hochwasserabflüssen abgeleitet. Dabei zeigt sich, dass in einer Log-log-Darstellung einen linearen Zusammenhang zwischen Einzugsfläche und Extremabfluss ergibt, welcher bis zu einer maximalen Fläche von 230 km² auch mit den PMF-Simulationen reproduziert werden konnte. Diese Reproduktion des linearen Verhältnisses validiert somit die Plausibilität der Resultate der Methodik CRUEX++. Für Einzugsgebiete, die grösser als 230 km² sind, wurde eine Abweichung der simulierten Abflüsse von den zu erwarteten beobachteten Verhältnissen festgestellt. Es kann also davon ausgegangen werden, dass sich für Einzugsgebiete, die grösser als 230 km² sind der PMF-Abfluss durch Verwendung der PMP-Karten überschätzt wird. Der Grund dafür ist einerseits die Annahme, dass sich das PMP-Ereignis über das gesamte Einzugsgebiet erstreckt und andererseits die Gegebenheit, dass die PMP Karten nicht tatsächliche meteorologische Ereignisse darstellen, sondern dem lokal maximal möglichen Regenvolumen entsprechen. Logischerweise können diese lokalen Maximalwerte nicht einfach über das Einzugsgebiet integriert werden, da lokale PMP-Ereignisse sich nicht über sehr grosse Einzugsgebiete flächenhaft ausdehnen können.

2.6 Nach oben begrenzte statistische Verteilungen zur Eingrenzung der Extremabflüsse

Nach oben begrenzte statistische Verteilungen werden als wertvolles Hilfsmittel in der Literatur empfohlen, um die systematische Zeitreihe maximaler Jahreshochwasser, die üblicherweise zur Extrapolation

herangezogen werden, mit einem a priori bestimmten PoMF zu erweitern. Auf diese Weise werden zusätzliche Informationen, vor allem über die Wiederkehrperiode extremer Hochwasser, in die Extrapolation mit einbezogen.

Dies bringt zwei grosse Vorteile mit sich. Zum einen verbessert die Erweiterung die Zuverlässigkeit und Plausibilität der statistisch bestimmten Extremhochwasser, zum anderen wird ein Widerspruch zwischen der simulationsbasierten PMF-Abschätzung und der statistischen Abschätzung extremer Hochwasser vermieden. Die in der Praxis traditionell verwendete Allgemeine Extremwertverteilung (GEV) mit drei Parametern hat den Nachteil, dass durch den grossen Einfluss von beobachteten Ausreissern die Hochwasserabflüsse für grosse Wiederkehrperioden überschätzt werden. Diese können sogar höher als die PoMF ausfallen, was offensichtlich ein Widerspruch ist. Umgekehrt kann die Abwesenheit gemessener seltener Hochwasser zu einer Unterschätzung der extremen Hochwasser führen. Die traditionellen Extrapolationsansätze sind also für extreme Hochwasser in den meisten Fällen nicht zuverlässig, wie schon im Kapitel 1 erwähnt wurde. Durch Verwenden von nach oben begrenzten Verteilungen, unter Berücksichtigung des simulierten PoMF, können statistisch beobachtete Hochwasserereignisse verlässlich auf grosse Wiederkehrperioden extrapoliert werden, und dies mehr als die in Kapitel 1 erwähnte Faustregel der dreimaligen Zeitreihendauer besagt. Diese Faustregel gilt nicht mehr da, die asymptotisch angenäherte Obergrenze der Verteilung durch das simulierte PoMF bekannt ist.

In der Methode CRUEX++ werden zwei von Botero et al. (2010) analysierte Verteilungen angewendet. Es handelt sich dabei um die Extremwertverteilung mit 4 Parametern EV4 (Kanda, 1981), welche von der Allgemeinen Extremwertverteilung abgeleitet wurde, sowie um die Log-Normal-Verteilung mit 4 Parametern, LN4, (Slade Jr, 1936) welche aus der Log-Normal-Verteilung entstand. Diese Verteilungen nähern sich einer definierten Obergrenze asymptotisch an. Das simulierte PoMF kann also als Obergrenze angenommen werden, was auch von Merz et al. (2008a, 2008b) empfohlen wurde. Sobald das PoMF bekannt ist und eine Zeitreihe jährlicher beobachteter Maximalabflüsse vorliegt, kann eine nach oben begrenzte statistische Verteilung entsprechend angepasst werden.

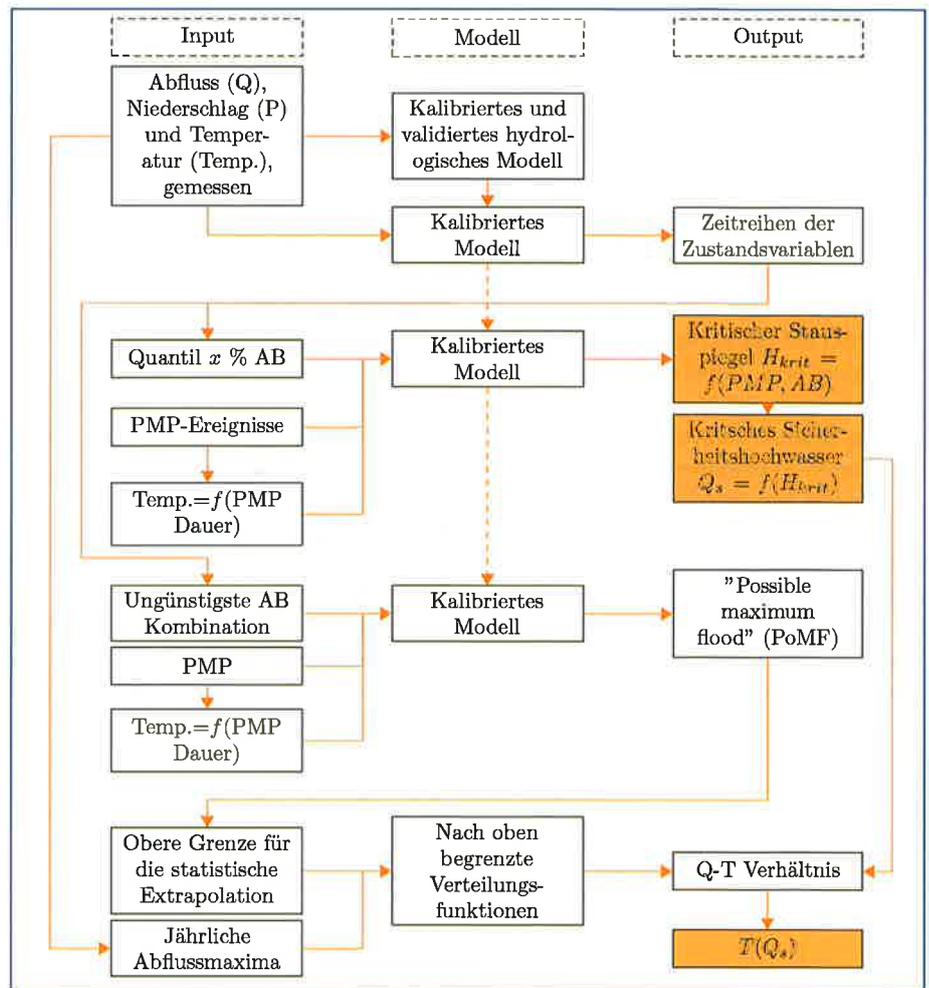


Bild 6. Flussdiagramm der CRUEX++-Methode für die deterministische Bestimmung der Anfangsbedingungen (AB).

Die Bestimmung des Sicherheitshochwassers, welches unter dem Wert des PoMF liegt, erfolgt durch PMP-PMF-Simulationen, jedoch mit einer bei seltenen bis extremen Ereignissen vorherrschenden Kombination von Anfangsbedingungen. Die Wiederkehrperiode des so bestimmten Sicherheitshochwassers wird dann mithilfe der angepassten, nach oben begrenzten Verteilung abgeschätzt. Dieses Vorgehen erlaubt es zu überprüfen, dass die Wiederkehrperiode des so ermittelten Sicherheitshochwassers, wie von der Richtlinie (BFE, 2017) gefordert, deutlich grösser als 1000 Jahre ist. Es ist aber zu beachten, dass die abgeschätzte Wiederkehrperiode nicht derjenigen des Niederschlagsereignisses entspricht, sondern demjenigen des gesuchten Spitzenabflusses. Die tatsächliche Wiederkehrperiode des PMF-Ereignisses mag also höher sein.

3. Simulationsprogramm RS MINERVE mit Plug-in CRUEX++

Durch die unausweichliche Komplexität der Methode CRUEX++ erschien es bei deren Erarbeitung von grosser Bedeutung,

ein für die Praxis taugliches und einfach zu handhabendes Informatikhilfsmittel frei zugänglich zu machen. Da hydrologische Simulationen notwendig sind, wurde dieses Hilfsmittel als sogenanntes Plug-in für das bereits seit Langem in der Praxis bewährte Programm RS MINERVE entwickelt. Dieses ist auch frei verfügbar und enthält die gängigen, von der internationalen Forschungsgemeinschaft erprobten hydrologischen Modelle, die auch für alpine Regionen geeignet sind und erprobt wurden. Da das Programm RS MINERVE in der Schweiz entwickelt wurde und stetig weiterausgebaut wird, ist die direkte Unterstützung der Benutzer durch standortspezifische Praxiserfahrung gewährleistet (Billeter et al., 2014; Garcia Hernández et al., 2013; Garcia Hernández et al., 2011; Garcia Hernández et al., 2016; Jordan et al., 2012; Schaeffli et al., 2005; Schaeffli et al., 2009; Zeimet, 2017). RS MINERVE eignet sich hervorragend für Simulationen von extremen Hochwassern in komplexen Einzugsgebieten unter effizienter Berücksichtigung der Funktionsweise der vorhandenen Wasserinfrastrukturanlagen wie Stauseen mit Zuleitungen und Talsperren

mit Grundablässen und Triebwasserfassungen und Triebwasserleitungen sowie Kraftwerkszentralen mit Pump- und Turbinenbetrieb inklusive Ausgleichsbecken. Die Kapazität der Hochwasserentlastungen unter Berücksichtigung des Retentionseffekts des Stausees kann also ohne Umwege direkt mit RS MINERVE analysiert und beurteilt werden.

Das Plug-in CRUEX++ ermöglicht es, direkt auf die Schweizer PMP-Karten (Audouard et al., 2006; Hertig et al., 2005; Hertig & Fallot, 2009) zuzugreifen und die für die Analyse relevanten Bereich aus den Karten zu entnehmen und anschließend in das Simulationsprogramm RS MINERVE zu importieren sowie die Regenvolumen zeitlich gemäss der Summenkurve (Bild 1) über das Einzugsgebiet zu verteilen. Nach dem Hinzufügen der vom Benutzer definierte Höhe der Nullgradgrenze kann ein vollständiges PMP-Ereignis im

Einzugsgebiet generiert und simuliert werden. Das Plug-in ermöglicht ausserdem, hydrologische und hydraulische Szenarien zu simulieren, deren vom Benutzer definierten Resultate übersichtlich darzustellen (Ganglinien, Wasserspiegel, Schneeschmelze usw.). Die gängigen statistischer Verteilungen sowie auch die nach oben begrenzten Verteilungen können einfach angepasst werden.

Das Plug-in CRUEX++ sowie das Simulationsprogramm RS MINERVE können frei über die Webseite <https://cruex.crealp.ch> zusammen mit den Schweizer PMP-Karten heruntergeladen werden.

4. Anwendungsbeispiel

4.1 Beschreibung der Fallstudie

Als Fallbeispiel dient die Talsperre Mattmark im Kanton Wallis (Bild 5). Das natürliche Einzugsgebiet erstreckt sich über

rund 36 km², und etwa 28 % der Fläche sind mit Gletscher bedeckt. Das Einzugsgebiet befindet sich im Hochgebirge zwischen 2197.5 m ü. M. (Vollstauspiegel) und 3920 m ü. M. Wegen der kleinen Fläche dieses Einzugsgebiets und den somit kurzen Fliessstrecken kann der Rückhalteeffekt in den Fliessgewässern vernachlässigt werden. Das natürliche Einzugsgebiet wird durch eine Überleitung mit sieben Wasserfassungen ergänzt, welche dem Stausee maximal 16 m³/s zuführen können.

4.2 Vorgehensweise

Das Programm RS MINERVE und das Plug-in CRUEX++ werden für die Anwendung herangezogen. Da die Anwendung darauf abzielt, das Verständnis der Methode CRUEX++ zu verbessern und nicht weitgehende Analysen der Resultate zu behandeln, wird auf den stochastischen Ansatz zur Bestimmung der Anfangsbedingungen verzichtet und nur der deterministische Ansatz verwendet. Das Flussdiagramm in Bild 6 illustriert die Methode CRUEX++ (Zeimetz (2017)). Folgende Details sollen hervorgehoben werden:

- Das PoMF entspricht dem grösstmöglichen Zufluss in das Staubecken. Für die Abschätzung des PoMF wird das Quantil 99 % für die Berechnung der Anfangswerte der Zustandsvariablen angenommen.
- Das Sicherheitshochwasser entspricht dem PMF-Ereignis unter der Annahme von Anfangsbedingungen, wie sie bei seltenen bis extremen Ereignissen vorherrschen. Zu Beginn des extremen Hochwassers wird angenommen, dass der Stausee sich auf dem maximalen Betriebsspiegel befindet (H=2197.5 m ü. M.). Als Anfangsbedingungen für die Berechnung des Sicherheitshochwassers wird für dieses Anwendungsbeispiel das 50%-Quantil für die Werte der Zustandsvariablen angenommen.
- Da die extrapolierte Zeitreihe stündliche Werte enthält, werden die PMF-Ereignisse mit einem stündlichen Zeitschritt dargestellt, jedoch aus numerischen Gründen mit einem Zeitschritt von 10 Minuten berechnet.

4.3 Daten

Für die Simulationen sind meteorologische Daten wie Niederschlag und Temperatur notwendig. Für die vorliegende Anwendung wurden 14 meteorologische Stationen von MeteoSchweiz verwendet (Acker sand Stalden, Brig, Evolène, Graechen, Grimentz, Montana, Mottec, Saas Alma-

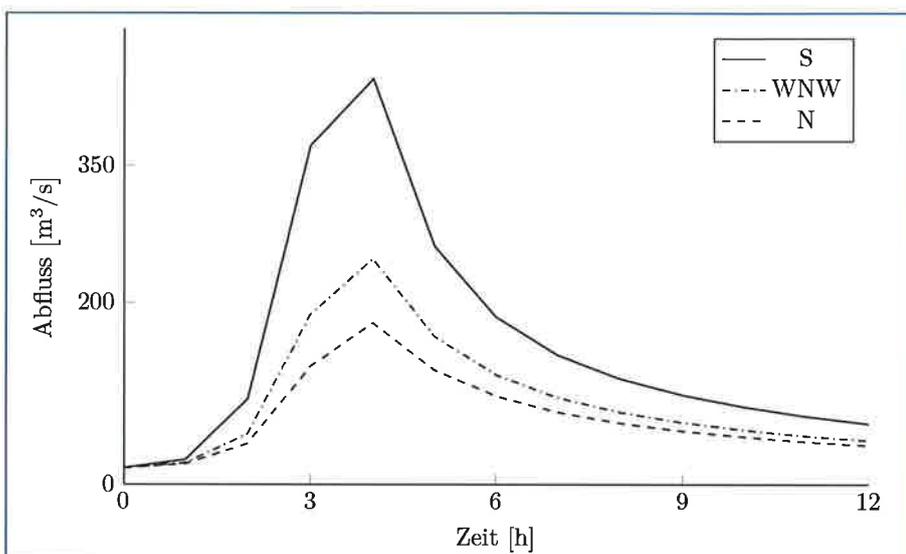


Bild 7. Bestimmung des kritischen Windsektors für die PMP-PMF-Simulationen, beruhend auf einem dreistündigen PMP-Ereignis.

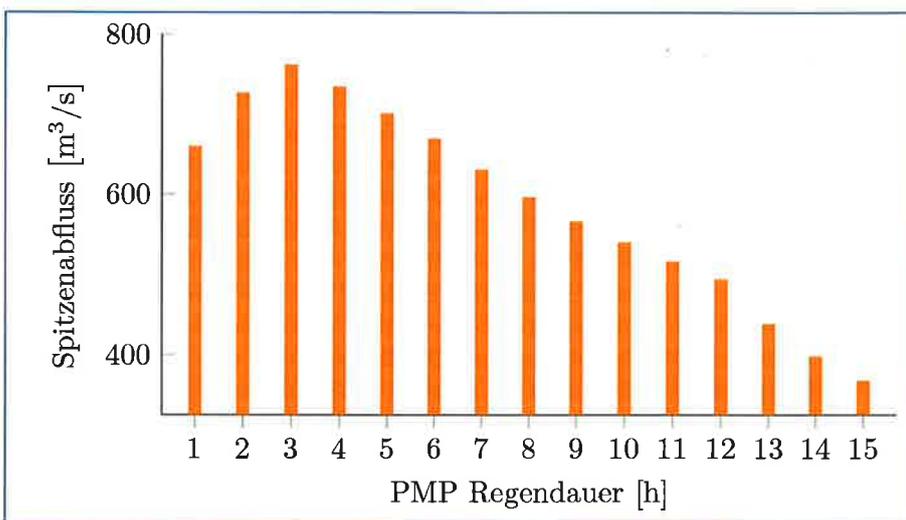


Bild 8. Stündliche Maximalwerte des Abflusses für verschiedene PMP-Ereignisse zur Bestimmung des grösstmöglichen Abflusses (PoMF), basierend auf möglichen Anfangsbedingungen mit einer Übertretenswahrscheinlichkeit (Quantil) von 99%.

gell, Saas Balen, Saas Fee, Simplon Dorf, Ulrichen, Visp, Zermatt).

Für die PMP-PMF-Simulationen wurden die Schweizer PMP-Karten (Audouard et al., 2006; Hertig et al., 2005; Hertig & Fallot, 2009) herangezogen. Alle drei Windsektoren (S, N, WNW) wurden berücksichtigt. Für die Temperatur wurden die Resultate der Analyse der Nullgradgrenze (siehe Abschnitt 2.3) beachtet. Die Höhe der Nullgradgrenze wurde auf 4800 m ü. M. festgelegt; somit trägt das gesamte Einzugsgebiet zur Abflussgenerierung bei. Schneefall ist während des PMP-Ereignisses also ausgeschlossen.

4.4 Aufbau des Simulationsmodells GSM-SOCONT

Das in RS MINERVE integrierte hydrologische Modell GSM-SOCONT (Garcia Hernández et al., 2016; Jordan et al., 2012; Schaeffli et al., 2005; Schaeffli & Zehe, 2009) wurde für die Simulationen benutzt. Es handelt sich dabei um ein konzeptionelles Modell, bestehend aus einem Gletscheranteil (GSM) und einem Bodenanteil (SOCONT). Beide verfügen über das gleiche Schneemodell. Der Übergang von Regen zu Schnee wird linear zwischen 0°C und 2°C simuliert. Diese Hypothesen stimmen mit beobachteten Ereignissen überein (Rohrer et al., 1994). Die Modellierung des Einzugsgebiets erfolgte mit Höhenbänder, von 300 m. Die Schneeschmelze wird mittels Grad-Tag-Ansatz «degree-day approach» von Hock (2003) berechnet. Für jedes Gletscherband wird der Abfluss der Schneeschmelze durch zwei hintereinander gekoppelte Reservoirs simuliert. Das Wasser, welches vom Schneemodell geliefert wird (Schneeschmelze, Regen auf Schneedecke oder nur Regen), wird zum Teil durch Oberflächenabfluss abgeführt, das restliche Wasser wird an das Bodenmodul zur Infiltrationssimulation weitergegeben, wo ein einziges Reservoir für die Abflusssimulation zuständig ist.

4.5 Resultate

4.5.1 Kritischer Windsektor

Die Testsimulationen mit einem PMP-Ereignis von drei Stunden zeigen, dass die Windrichtung vom Süden zu den grössten Abflüssen und Volumen führt (Bild 7). Im Folgenden wurde somit nur der Windsektor Süden für die Simulationen berücksichtigt.

4.5.2 Abschätzung der PoMF

Bild 8 zeigt die stündlichen Spitzenabflüsse für PMP-Ereignisse mit unterschiedlicher Dauer, unter Annahme von Anfangsbedin-

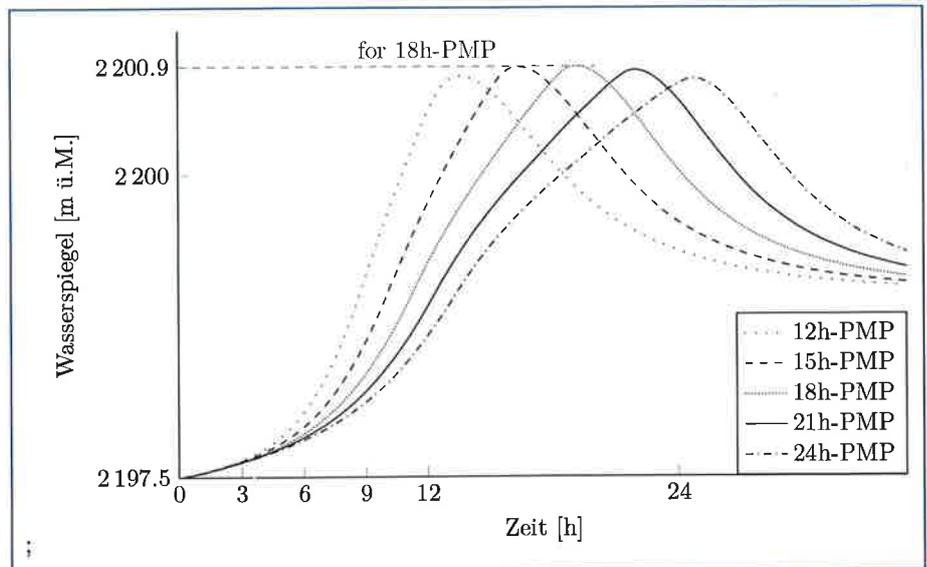


Bild 9. Stauspiegel für verschiedene PMP-Ereignisse, basierend auf möglichen Anfangsbedingungen mit einem Quantil von 50% zur Bestimmung des kritischen PMP-Ereignisses (maximaler Stauspiegel).

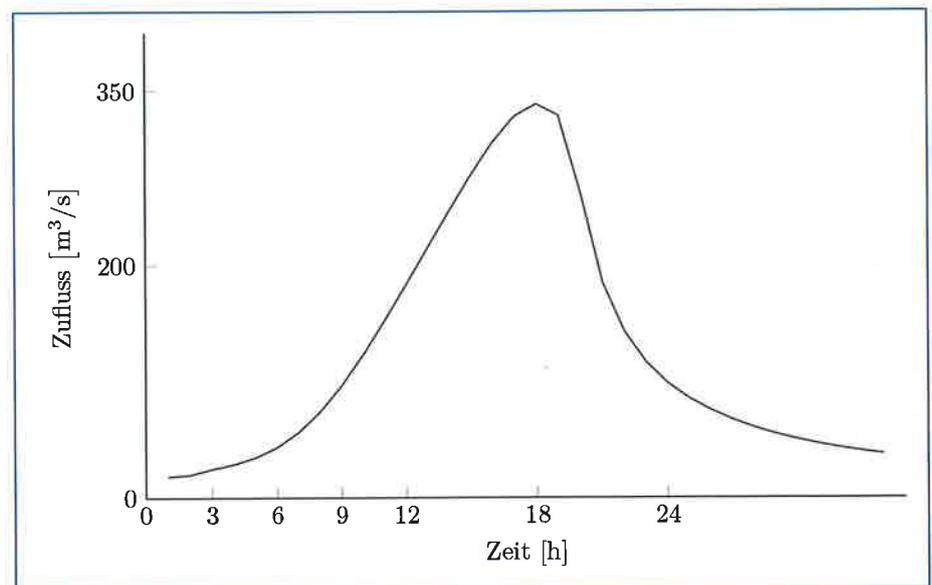


Bild 10. Vom kritischen PMP-Ereignis abgeleitete Abflussganglinie für Anfangsbedingungen mit einem Quantil von 50%.

gungen, die dem 99%-Quantil entsprechen. Es ist ersichtlich, dass eine Regendauer von drei Stunden zum grössten Abfluss führt, wo das Einzugsgebiet in den Stausee mündet. Für das PoMF konnte somit ein maximaler Abfluss von 760 m³/s ermittelt werden.

4.5.3 Abschätzung einer PMF mit medianen Anfangsbedingungen

Ein PMP-Ereignis von 18 Stunden führt laut Bild 9 zum maximalen Wasserspiegel im Stausee unter den zuvor angenommenen medianen Anfangsbedingungen (50%-Quantil). Dieses PMP-Ereignis generiert unter diesen Bedingungen gemäss Simulation einen Zufluss von maximal 350 m³/s in den Stausee. Die entsprechende Ganglinie ist in Bild 10 dargestellt.

4.5.4 Anpassung der nach oben begrenzten EV4-Verteilung und der Allgemeinen Extremwertverteilung (GEV)

Die Anpassung der nach oben begrenzten EV4-Verteilung an die beobachteten stündlichen Jahresmaxima (Abfluss) mit Einbeziehung der PoMF als Obergrenze (Bild 11) zeigt, dass dem Spitzenabfluss des Sicherheitshochwassers laut EV4 eine Wiederkehrperiode von rund 2000 Jahren zugeordnet werden kann. Laut GEV hat der simulierte PMF-Abfluss eine Wiederkehrperiode von weniger als 1000 Jahren. Da für die Anpassung der EV4-Verteilung die Information der PoMF mit einfließt, was für die GEV-Anpassung nicht der Fall ist, kann man davon ausgehen, dass die Extrapolation mit der EV4-Verteilung ver-

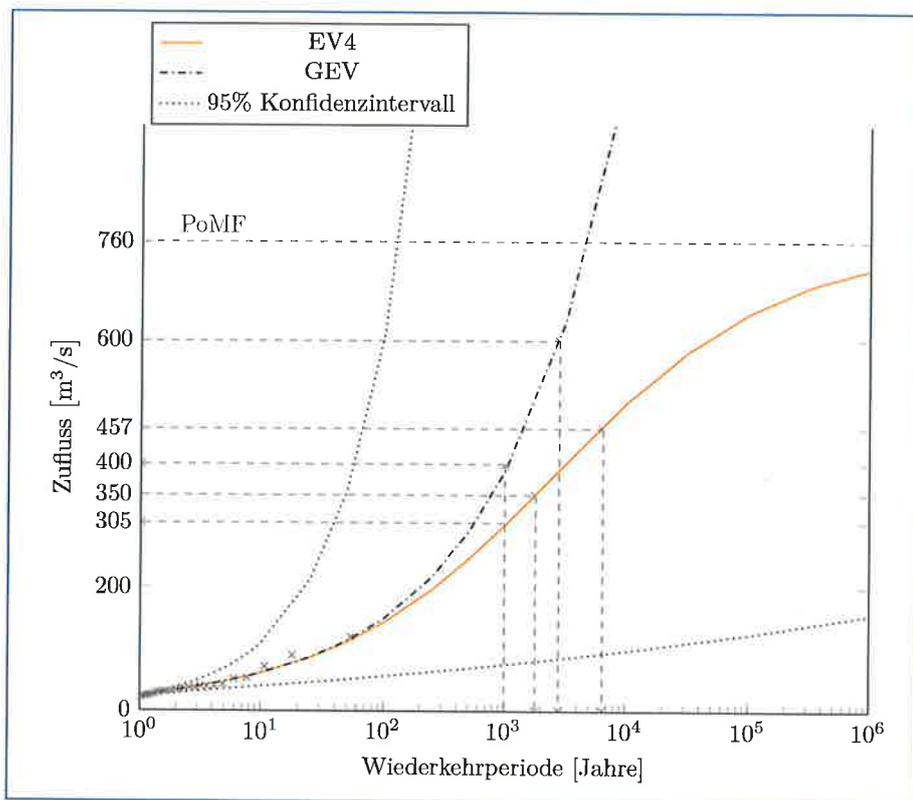


Bild 11. Anpassung einer EV4-Verteilung (mit Einbeziehung der PoMF) und GEV-Verteilung für die Jahresmaxima zur Abschätzung von Wiederkehrperioden und Abflüssen.

trauenswürdig ist. Im Folgenden werden beide Abschätzungen diskutiert um die Unterschiede der zwei Ansätze hervorzuheben und um aufzuzeigen wie sehr die Abschätzung des Sicherheitshochwassers durch die GEV von den Resultaten der kompletteren CRUEX++-Methode abweichen kann.

Laut Richtlinie (BFE, 2017) soll die Wiederkehrperiode des Sicherheitshochwassers deutlich grösser sein als 1000 Jahre. Im betrachteten Beispiel ist das Sicherheitshochwasser sowohl ausgehend vom Bemessungshochwasser ($1.5 \cdot Q_{1000}$) als auch als PMF zu bestimmen. Die zu geringe Wiederkehrperiode des simulierten PMF-Abflusses zeigt, dass die in diesem Beispiel getroffenen Annahmen der Anfangsbedingungen für die PMP-PMF-Simulation (50 %-Quantil) nicht ausreichend konservativ waren. Die PMP-PMF-Simulation sollte deshalb mit ungünstigeren Annahmen hinsichtlich der Anfangsbedingungen erneut durchgeführt werden. Hier sollte daran erinnert werden, dass die Wiederkehrperiode des PMF-Ereignisses allerdings höher ausfallen kann als diejenige des Spitzenabflusses, da das extrem seltene Wasservolumen des PMP-Ereignisses bei der Ermittlung der Wiederkehrperiode nicht berücksichtigt wurde.

Wenn die Abschätzung des Sicherheitshochwassers, basierend auf dem Bemessungshochwasser (d.h. zu $1.5 \cdot Q_{1000}$)

vorgenommen wird, kann Folgendes festgestellt werden: Laut GEV beträgt das tausendjährige Hochwasser $Q_{1000} = 400 \text{ m}^3/\text{s}$. Das Sicherheitshochwasser hätte also einen Abfluss von $1.5 \cdot Q_{1000} = 600 \text{ m}^3/\text{s}$, was einer Wiederkehrperiode von rund 3000 Jahren entspräche. Laut EV4 hätte das Sicherheitshochwasser einen Abfluss von $1.5 \cdot Q_{1000} = 457 \text{ m}^3/\text{s}$ und eine Wiederkehrperiode von ungefähr 6500 Jahren.

Es wird aber auch ersichtlich, dass ein 10 000-jähriges Hochwasser mittels GEV in diesem Falle nicht ohne Widerspruch mit der PoMF-Abschätzung ermittelt werden kann, da das 10 000-jährige Hochwasser (GEV) höher als ein PoMF liegen würde. Dies kann vorkommen, wenn die Datenreihe kurz ist und der Schiefeffizient der Stichprobe gross ist. Mathematisch gesehen, ist die GEV allerdings durch das Fisher-Tippet-Gnedenko-Theorem oder «Extremal Type Theorem» (Coles, 2001) vollkommen zulässig. Die Analyse des Konfidenzintervalls der GEV kann in diesem Fall zu interessanten Erkenntnissen führen. Es gilt zu überprüfen, ob die EV4-Verteilung einen Widerspruch zu der GEV-Abschätzung aufweist. Gemäss dem 95 %-Konfidenzintervall der GEV ist die EV4-Verteilung aber in keiner Hinsicht im Widerspruch zur GEV. Allerdings ermöglicht die EV4-Verteilung die Abschätzung von wesentlich plausibleren Werten, ohne Widerspruch zur PoMF-Abschätzung.

Die GEV ordnet dem PoMF-Abfluss von $760 \text{ m}^3/\text{s}$ eine Wiederkehrperiode von nur 4000 Jahren zu, was dieser Extrapolation nicht viel Vertrauen zugestehen, da dessen Wiederkehrperiode allein durch den PMP-PMF-Ansatz logischerweise viel seltener ausfallen muss. In der Tat dürfte in diesem Falle die Extrapolation mit einer GEV laut DWA (2012) und BWG (2003) nicht über eine Wiederkehrperiode von 90 Jahren (dreimal die Länge der Zeitreihe) hinausgehen. Die gesteigerte Plausibilität der EV4-Extrapolation rührt daher, dass durch die PoMF-Simulation eine wichtige Information am Ende der Verteilung hinzugefügt werden konnte. Die EV4-Verteilung ermöglicht also eine Frequenzanalyse welche weder im Widerspruch zur mathematisch zulässigen GEV-Verteilung noch zum PMP-PMF-Ansatz steht.

5. Schlussfolgerung

In diesem Beitrag konnte die Methode CRUEX++ kurz erklärt und erläutert werden. Durch die Verwendung eines hydrologischen Modells können alle hydrologischen Prozesse, die in einem Einzugsgebiet stattfinden, auch für die Abschätzung extremer Hochwasser mit einbezogen werden. Dies ermöglicht es realistische Prozesse für die PMP-PMF-Simulation zu berücksichtigen. Durch die Simulation ergibt sich eine komplette Ganglinie des abgeschätzten Hochwassers.

Da das Modell das Einbeziehen von hydraulischen Bauwerken ermöglicht, kann, basierend auf der ermittelten Ganglinie, der Stauspiegel im Rückhaltebecken berechnet werden. Der kritischste Stauspiegel, abhängig von der Dauer der simulierten PMP-Ereignisse und von den Anfangsbedingungen der Simulation, definiert das kritische PMP-Ereignis und somit auch das kritische Hochwasserereignis, welches als Sicherheitshochwasser angenommen wird.

Für realistische und zuverlässige PMP-PMF-Simulationen wurden während des CRUEX++-Projekts allgemeingültige Rahmenbedingungen erarbeitet. So konnte die zeitliche Verteilung der PMP-Ereignisse auf eine Regensummenkurve reduziert werden, welche nachweislich in der gesamten Schweiz anwendbar ist.

Die Temperaturbedingungen, welche für eine PMP-PMF-Simulation angenommen werden müssen, konnten durch eine detaillierte Analyse der maximal gemessenen Höhe der Nullgradgrenze vor einem Regenereignis ermittelt werden. So konnte ein annähernd lineares Verhältnis zwischen der Höhe der Nullgradgrenze

und der Dauer des Regenereignisses abgeleitet werden. Die Grössenordnung der anzunehmenden Höhe der Nullgradgrenze (4500 m ü.M.) lässt darauf schliessen, dass Schneefall während eines PMP-Ereignisses durchaus ausgeschlossen werden kann.

Die CRUEX++-Methode empfiehlt, dass zur Bestimmung der Anfangsbedingungen für die PMP-PMF-Simulationen zuerst langjährige kontinuierliche Simulationen durchgeführt werden sollten. Die auf diese Weise generierten Zeitreihen der Zustandsvariablen werden anschliessend statistischen Analysen unterzogen, um seltene, jedoch realistische und mit dem Modell verträgliche Anfangsbedingungen abzuleiten.

Gemäss den Ergebnissen des CRUEX++-Projekts kann sich ein PMP-Ereignis, welches von den Schweizer PMP-Karten abgeleitet wurde, maximal auf einer Fläche von 250 km² ausdehnen. Für Einzugsgebiete kleiner als diese maximale Fläche können die Hüllkurven der Schweizer PMP-Karten ohne Verringerungskoeffizient zur Ermittlung von PMP-Ereignissen herangezogen werden, die dann mittels hydrologischer Simulation in PMF-Ereignisse umgewandelt werden können.

Um das ermittelte Hochwasser als Sicherheitshochwasser annehmen zu können, muss aufgezeigt werden, dass das Hochwasser in der Tat eine sehr hohe Wiederkehrperiode hat. Dazu dienen in der Methode CRUEX++ nach oben begrenzte statistische Verteilungen. Als Obergrenze wird der grösstmögliche Hochwasserabfluss angenommen, der von einer PMP abgeleitet werden kann, das sogenannte PoMF.

Schlussendlich kann durch Anpassung jährlicher Abflussmaxima unter Berücksichtigung des PoMF die Wiederkehrperiode des Spitzenabflusses des Sicherheitshochwassers abgeschätzt werden. Die Plausibilität der extrapolierten Werte kann im Vergleich zu herkömmlicher Extremwertstatistik signifikant gesteigert werden, indem die Methodik CRUEX++ die PoMF über die nach oben begrenzten Verteilungen die Extrapolation beobachteter jährlicher Maxima mit einbezieht. Die mittels Statistik abgeschätzten Wiederkehrperioden entsprechen allerdings nur der Wiederkehrperiode des Abflusses und nicht des Ereignisses als Ganzes. Die Simulation ermöglicht es, das Hochwasservolumen und dessen zeitliche Verteilung zu berücksichtigen. Dadurch kann der Anstieg des Stauspiegels berechnet werden

und somit die Kapazität der Hochwasserentlastung überprüft werden.

Die Methodik CRUEX++ ermöglicht eine Abschätzung des Sicherheitshochwassers nach der Richtlinie über die Stauanlagensicherheit (BFE, 2017). Die Methodik CRUEX++ verknüpft hierzu die PMP-PMF-Methode mit statistischen Analysen.

Danksagung

Das Forschungsprogramm CRUEX sowie die Erarbeitung der Methode CRUEX++ wurde im Auftrag des Bundesamtes für Energie, BFE (Sektion Aufsicht Talsperren), durchgeführt und durch Dr. Markus Schwager und Dr. Georges Darbre begleitet. Prof. Dr. Bettina Schaefli und Guillaume Artigue haben bei der Erarbeitung der Methode wertvolle Hinweise gegeben.

Literatur

Audouard, Hertig & Fallot (2006). Modélisation des précipitations extrêmes en Suisse. Actes du 19e colloque de l'Association Internationale de Climatologie, 83–88.

Beauchamp, Leconte, Trudel & Brissette (2013). Estimation of the summer-fall PMP and PMF of a northern watershed under a changed climate. *Water Resources Research*, 49(6), 3852–3862. doi: 10.1002/wrcr.20336.

BFE (2017). Richtlinie über die Sicherheit der Stauanlagen. Teil C2: Hochwassersicherheit und Staustauseabsenkung. In S. A. T. Bundesamt für Energie BFE (Ed.), (pp. 32). Bern.

Billeter, Mende & Jenzer (2014). Flood characteristics and flood protection concepts in the Reuss catchment basin. *Apley and Solomon's Concise System of Orthopaedics and Trauma*, 69.

Botero & Francés (2010). Estimation of high return period flood quantiles using additional non-systematic information with upper bounded statistical models. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14(12), 2617–2628. doi: 10.5194/hess-14-2617-2010.

Brigode, Mićović, Bernardara, Paquet, Gailhard, Garavaglia, Garçon & Ribstein (2015). Probabilistic and deterministic extreme flood estimation methods: Estimation comparison on two British Columbia catchments (Canada). *Houille Blanche*, 2015(3), 72–78. doi: 10.1051/lhb/20150036.

Casas, Rodríguez, Prohom, Gázquez & Redaño (2011). Estimation of the probable maximum precipitation in Barcelona (Spain). *International Journal of Climatology*, 31(9), 1322–1327. doi: 10.1002/joc.2149.

Chen, Kavvas, Ishida, Trinh, Ohara, Anderson & Chen (2016). Role of Snowmelt in Determining whether the Maximum Precipitation Always Results in the Maximum Flood. *Journal of Hydrologic Engineering*, 21(10), 04016032–04016031. doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001366.

Coles (2001). *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*: Springer-Verlag London.

DWA (2012). Merkblatt DWA-M 552. Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten: DWA, Dt. Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser u. Abfall.

Felder, Zischg & Weingartner (2017). The effect of coupling hydrologic and hydrodynamic models on probable maximum flood estimation. *Journal of Hydrology*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.052>.

Francou & Rodier (1967). Essai de classification des crues maximales observées dans le monde. *Cah. O.R.S.T.M. sér. Hydrol.*, 4(3).

Garcia Hernández, Boillat, Feller & Schleiss (2013). Présent et futur des prévisions hydrologiques pour la gestion des crues. Le cas du Rhône alpin: SVSN.

Garcia Hernández, Brauchli, Boillat & Schleiss (2011). La gestion des crues du Rhône en amont du Léman: de la prévision à la décision. *La Houille Blanche*(2), 69–75.

Garcia Hernández, Paredes Arquiola, Foehn & Roquier (2016). RS Minerve – Technical manual v1.7. RS MINERVE Group. CREALP, Switzerland.

Haddad & Rahman (2016). Estimation of Large to Extreme Floods Using a Regionalization Model. Cham: Springer International Publishing.

Herschy (2001). The world's maximum observed floods. *The Extremes of the extremes: Extraordinary Floods*, 271.

Hertig, Audouard & Plancherel (2005). Cartes des précipitations extrêmes pour la Suisse (PMP 2005). Rapport EFLUM-EPFL.

Hertig & Fallot (2009). Validation et utilisation des cartes de PMP pour l'obtention de la PMF. *Projet CRUEX: Directives Crues de l'OFEN*. unpublished report.

Hingray, Picouet & Musy (2009). *Hydrologie 2 - Une science pour l'ingénieur*. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes.

Jordan, Brauchli, Garcia Hernandez, Bieri & Boillat (2012). RS 2012, Rainfall-Runoff Modelling. User guide. Lausanne: e-dric.ch.

Jothityangkoon, Hirunteeyakul, Boonrawd & Sivapalan (2013). Assessing the impact of climate and land use changes on extreme floods in a large tropical catchment. *Journal of Hydrology*, 490, 88–105. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.03.036>.

Kanda (1981). *A New Extreme Value Distribution with Lower and Upper Limits for Earthquake Motions and Wind Speeds*. Theoretical and Applied Mechanics, Tokyo University Press, 31, 351–360.

Lagos-Zúñiga & Vargas M, (2014). PMP and PMF estimations in sparsely-gauged Andean basins and climate change projections. *Hydrological Sciences Journal*, 59(11), 2027–2042. doi: 10.1080/02626667.2013.877588.



Marchi, Borga, Preciso & Gaume (2010). Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management. *Journal of Hydrology*, 394(1–2), 118–133. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.017>.

Merz & Blöschl (2008a). Flood frequency hydrology: 1. Temporal, spatial, and causal expansion of information. *Water Resources Research*, 44(W08432), 1–17. doi: 10.1029/2007WR006744.

Merz & Blöschl (2008b). Flood frequency hydrology: 2. Combining data evidence. *Water Resources Research*, 44(W08433), 1–16. doi: 10.1029/2007WR006745.

Nathan, Hill & Griffith (2001). Risk Implications of the PMF and the PMP Design Flood. NZSOLD / ANCOLD Conference on Dams.

BWG (2003). Evaluation des crues dans les bassins versants de Suisse. Guide pratique (F. O. f. W. a. Geology Ed.). Bern: Federal Office for Water and Geology.

Rohrer, Braun & Lang (1994). Long-Term Records of Snow Cover Water Equivalent in the Swiss Alps. 1. Analysis, 25(1-2), 53–64.

Salas, Gavilán, R. Salas, Y. Julien & Abdullah (2014). Uncertainty of the PMP and PMF (S. Elsamian Ed. Vol. Modeling Climate Change and Variability): Taylor & Francis Group, LLC.

Schaefli, Hingray, Niggli & Musy (2005). A conceptual glacio-hydrological model for high

mountainous catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 9(1/2), 95–109. doi: 10.5194/hess-9-95-2005.

Schaefli & Zehe (2009). Hydrological model performance and parameter estimation in the wavelet-domain. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(10), 1921–1936. doi: 10.5194/hess-13-1921-2009.

Slade Jr., (1936). An Asymmetric Probability Function. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 101(1), 35–104.

Swain, England, Bullard, Raff & Reclamation (2006). Guidelines for Evaluating Hydrologic Hazards: U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation.

WMO (2009). Manual on Estimation of Probable Maximum Precipitation (PMP) (Vol. WMO-No.1045). Geneva: World Meteorological Organization.

Zeimet (2017). Development of a methodology for extreme flood estimations in alpine catchments for the verification of dam safety, Communication 68 du Laboratoire de constructions hydrauliques (A. Schleiss Ed.). Lausanne: EPFL-ENAC-LCH.

Zeimet, García-Hernández & Schleiss (2015). Extreme flood estimations on a small alpine catchment in Switzerland, the case study of Limmerboden. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 370, 147.

Zeimet, Schaefli, Artigue, Hernández &

Schleiss (2017). Relevance of the correlation between precipitation and the 0°C isothermal altitude for extreme flood estimation. *Journal of Hydrology*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.05.022>.

Zhirkevich & Asarin (2010). Probable maximum flood (PMF): basic information and problems with the procedure used for its calculation in Russia. *Power Technology and Engineering*, 44(3), 195–201. doi: 10.1007/s10749-010-0164-6.

Anschrift der Verfasser

Fränz Zeimet, Stucky Ltd, Rue du Lac 33, CH-1020 Renens; fzeimet@stucky.ch (vormals Doktorand am LCH-EPFL)

Javier Garcia Hernández, Centre de recherche sur l'environnement alpin CREALP, Rue de l'industrie 45, CH-1951 Sion; javier-garcia@crealp.vs.ch

Frédéric Jordan, Hydrique Ingénieurs, Chemin du Rionzi 54, CH-1052 Le Mont-sur-Lausanne.

Jean-Michel Fallot, Université de Lausanne, Faculté des géosciences et de l'environnement, Géopolis 3218, CH-1015 Lausanne.

Prof. Dr. Anton Schleiss, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), Laboratoire de constructions hydrauliques (LCH), Station 18, CH-1015 Lausanne; anton.schleiss@epfl.ch



**Kanton Zürich
Baudirektion
AWEL Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft**

Sektionsleiter/-in Wasserbau 100%

Gegen 3'600 km Bäche und Flüsse sowie zahlreiche Seen prägen den Lebensraum im Kanton Zürich. Die Sektion Beratung und Bewilligung mit ihren sechs Mitarbeitenden unterstützt die Gemeinden, Planer und Private bei deren Vorhaben die Gewässer hochwassersicher und naturnah zu gestalten. Für die konsequente Umsetzung von Hochwasser- und Gewässerschutzvorgaben als auch bei der kreativen Suche nach umsetzbaren Lösungen sind Sie gefragt, eine Führungskraft mit Erfahrung, für die Leitung der Sektion.

Dabei profitieren Sie von Ihrer Führungstätigkeit in einer Bauverwaltung oder Ihrer mehrjährigen Erfahrung in der Leitung von Wasserbau-Projekten und Ihrem Abschluss als **Bau- bzw. Umweltingenieur/-in ETH / FH** oder einer fachverwandten Studienrichtung. Die Koordination der verschiedenen Aufgaben der Sektion und die Zusammenarbeit mit den Gemeindebehörden verlangt Übersicht, klares Vorgehen und geschickte Kommunikation. Sie sind in der Lage, Ihr Team auch unter hoher Belastung zu motivieren und gleichzeitig mit ihm die Aufgabenteilung zwischen Kanton, Gemeinden und beauftragten Wasserbauplanern zu hinterfragen und gegebenenfalls neu zu organisieren.

Wollen Sie Spuren hinterlassen? Wenn Sie sich mit uns bei der Baudirektion engagieren, prägen Sie das Gesicht des Kantons Zürich mit. Dabei können wir Ihnen ein spannendes Umfeld anbieten – und das 2 Minuten vom Hauptbahnhof entfernt.

Christian Marti ist angehender Abteilungsleiter und vielleicht Ihr künftiger Chef. Er ist für Ihre konkreten Fragen da: 043 259 43 42. Wir freuen uns auf Ihre Online-Bewerbung unter www.zh.ch/jobs. Ihr neues Umfeld: www.awel.zh.ch.