Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 110 (2018)
Heft: 3

Artikel: Probabilistische Dammbruchanalyse
Autor: Peter, Samuel J. / Vetsch, David F. / Siviglia, Annunziato
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-941586

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 23.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Probabilistische Dammbruchanalyse

Samuel J. Peter, David F. Vetsch, Annunziato Siviglia, Robert Boes

Zusammenfassung

Das besondere Gefährdungspotenzial gilt in der Schweiz als Unterstellungskriterium für Stauanlagen. Die Beurteilung dieses Gefährdungspotenzials erfolgt mittels sogenannter Dammbruchanalyse, bestehend aus der Modellierung des Stauanlagenbruchs, der Berechnung der Flutwellenausbreitung und der Quantifizierung der entsprechenden Gefährdung. Dabei wird die Gefährdung als «Schadensauswirkung von Flutwellen» verstanden. Im Falle von Erdschüttdämmen kommt dem Bruchszenario grosse Bedeutung zu, weil Kenntnisse über «realistische» oder «Worst-Case»-Szenarien grösstenteils fehlen. In diesem Artikel wird eine Vorgehensweise vorgestellt, um Unsicherheiten in der Dammbruchmodellierung gerecht zu werden. Dabei wird der Prozess des Dammbruchs als physikalisch basiertes und deterministisches Modell abgebildet. Das probabilistisch kalibrierte Dammbruchmodell bildet drei verschiedene Bruchregimes ab, welche sich in der Charakteristik des Bruchprozesses unterscheiden. Durch Variation der Inputparameter generiert das Dammbruchmodell einen probabilistischen Hydrographen. Diese stochastische Information kann dank effizienter Flutwellenberechnung mit hoher Genauigkeit ins Gefährdungsgebiet übertragen werden. Schlussendlich wird das Gefährdungspotenzial in Form von probabilistischen Überflutungskarten analysiert. Anhand eines Beispiels wird die Anwendung der vorgestellten Vorgehensweise aufgezeigt und diskutiert.

1. Einleitung

Das im Stauanlagengesetz (*StaG*, 2013) und der revidierten Stauanlagenverordnung (*StaV*, 2013) festgelegte Ziel der staatlichen Aufsicht von Stauanlagen ist es, die Bevölkerung vor den Konsequenzen eines unkontrollierten Austretens von grösseren Wassermassen aus einer Stauhaltung zu schützen (sogenannte Stauanlagensicherheit). In der Schweiz werden Stauanlagen unterschiedlichen Aufsichtsbehörden zur Überwachung unterstellt. Als Unterstellungskriterien werden die Grösse (Stauhöhe über einer Gelände-Referenzkote und Stauvolumen) und das besondere Gefährdungspotenzial herangezogen (*BFE*, 2015). Unter dem besonderen Gefährdungspotenzial wird die Schadensauswirkung von Flutwellen verstanden (*BFE*, 2014) und kann mit dem Risiko eines Stauanlagenbruchs gleichgesetzt werden, definiert über das Produkt der Eintretenswahrscheinlichkeit eines spezifischen Bruchszenarios und des resultierenden Schadens an Mensch und Infrastruktur.

Die Quantifizierung des Gefährdungspotenzials erfolgt mittels sogenannter Dammbruchanalyse (siehe *Bild 1*): Das Modell zur Berechnung des Stauanlagenbruchs resp. das Dammbruchmodell liefert einen Ausflusshydrographen, welcher als Randbedingung für die Berechnung der Flutwellenausbreitung dient. Die Überflutungsgrössen wie Fliesstiefe und Fliessgeschwindigkeiten werden wiederum als Input für die Risikobeurteilung resp. die Quantifizierung des besonderen Gefährdungspotenzials benötigt. Die Auswahl an verfügbaren numerischen Modellen für jede der drei Teilaufgaben ist gross. Die Unterschiede liegen vor allem im Detaillierungsgrad und der räumlich-zeitlichen Auflösung der physikalischen Vorgänge. Oft sind jedoch praktische Gründe für die Wahl eines spezifischen Modells verantwortlich, so wie die Rechenzeit oder das Wissen/Unwissen über entsprechende Modellparameter. Bei der Analyse von Erdschüttdämmen kommen oft vereinfachte physikalische oder statistische Dammbruchmodelle zum Einsatz, welche lediglich den Spitzenabfluss des Hydrographen oder die finale Grösse der Dammbresche berechnen (*ASCE/EWRI*, 2011; *Vetsch* und *Boes*, 2016). Folglich ist auch kein hoher Detaillierungsgrad bei den rechenintensiven Überflutungsmodellen angemessen.

Kenntnisse über «realistische» oder «Worst-Case»-Dammbruchszenarien fehlen grösstenteils (*Vonwiller et al.*, 2015). Die diesbezügliche Unwissenheit beruht auf den hochgradig nichtlinearen und teils schnell ablaufenden Erosionsprozessen von überströmten Schüttdämmen, auf lückenhafter und widersprüchlicher Dokumentation von historischen Dammbruchereignissen und auf der Schwierigkeit von repräsentativen Laborversuchen. Obwohl der Dammbruchprozess in den letzten Jahrzehnten durch verschiedene Forschungsarbeiten untersucht wurde (*Wallner*, 2014; *Frank*, 2016; *Boes et al.*, 2017; *Rüdisser*, 2017; *Rüdisser* und *Teschernutter*, 2018), ist das Verständnis nach wie vor beschränkt und nicht allgemein übertragbar (*Morris et al.*, 2008). Die grossen Unsicherheiten in der Dammbruchmodellierung führen zu einer geringen Aussagekraft und Zuverlässigkeit des berechneten Gefährdungspotenzials. Um diesen Unsicherheiten Rechnung zu tra-

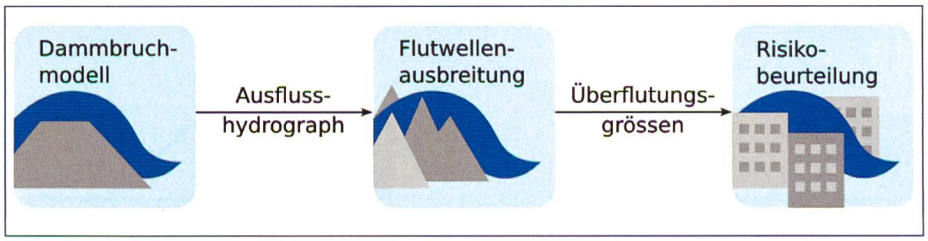


Bild 1. Dammbruchanalyse, aufgeteilt in die drei Teilmodelle: (1) Dammbruchmodell, (2) Berechnung der Flutwellenausbreitung und (3) Quantifizierung des Überflutungsrisikos resp. des sog. Gefährdungspotenzials (adaptiert nach Peter [2017]).

gen, wird hier die Anwendung von probabilistischen Methoden vorgeschlagen.

2. Monte Carlo Simulation

Die konkrete Vorgehensweise bei einer Monte Carlo (MC) Simulation ist in *Bild 2* ersichtlich. Die Inputparameter des deterministischen Dammbruchmodells (DBM) werden als Zufallsvariablen modelliert, beschrieben durch Wahrscheinlichkeitsfunktionen, welche das Wissen des Modellierers repräsentieren. Daraus werden *N* zufällige Parametersätze gezogen, mit welchen das Dammbruchmodell *N* Abflusshydrographen berechnet, welche dann die Simulation von *N* Überflutungen ermöglichen. Schlussendlich kann an ausgewählten Punkten im Überflutungsgebiet wieder eine Wahrscheinlichkeitsfunktion (mit *N* Stichproben) für Fliesstiefe und/oder Fliessgeschwindigkeiten beschrieben werden, welche zur robusten Quantifizierung des Gefährdungspotenzials verwendet werden kann. Die Information der anfänglichen Unsicherheiten des Dammbruchmodells wird somit mittels MC-Simulation durch das System propagiert und resultiert in probabilistischen Überflutungskarten. Unsicherheiten in Inputparametern für die Flutwellenausbreitung, wie etwa Topographie, Auflösung des Berechnungsgitters oder Reibungswerte, werden hier als vernachlässigbar betrachtet. Alternativ könnten jene Parameter auf konzeptionell gleiche Weise wie die Dammbruchparameter als Wahrscheinlichkeitsfunktion beschrieben werden.

Nachfolgend werden die einzelnen Teile der MC-Simulation näher beschrieben und diskutiert. Zusätzlich wird anhand eines Beispiels die konkrete Anwendung illustriert.

3. Deterministisches Dammbruchmodell BASEbreach

Das eine Herzstück der MC-Simulation ist das neu entwickelte, deterministische und auf physikalischen Prozessen basierte Dammbruchmodell, im folgenden *BASEbreach* genannt. *BASEbreach* wurde ausschliesslich für homogene Erdschüttdämme entwickelt, was die Modellanwendung klar begrenzt. Die Anfangsphase des Dammbruchs, d.h. jegliche Prozesse, welche von der Bruchursache abhängig sind, wird bei der Modellierung nicht berücksichtigt. Diese Abgrenzung ist einerseits durch das Fehlen der Eintretenswahrscheinlichkeiten der einzelnen Bruchursachen und das Unwissen der Zusammenhänge zwischen Bruchursache und dem weiteren Verlauf der Dammerosion motiviert. Andererseits führen verschiedene Bruchursachen (Überströmen, innere Erosion, Böschungskollaps usw.) zu ähnlichen makroskopischen Erosionsprozessen im Falle einer progressiven Erosion (siehe *Bild 3*) (*Singh*, 1996; *ASCE/EWRI*, 2011; *Volz*, 2013).

Die hier betrachteten Erosionsprozesse werden unter dem Begriff der progressiven Oberflächenerosion zusammengefasst und beinhalten

- die Eintiefung der initialen Bresche
- die Verbreiterung der Bresche
- und eine allmähliche Entleerung des Reservoirs.

Mathematisch können die Erosionsprozesse in einfacher Form als Massenerhaltung des aus dem Reservoir fliessenden Wassers und des erodierten Dammmaterials abgebildet werden:

$$\frac{dH_r}{dt} = -Q_b\left(\frac{dV_r}{dH_r}\right)^{-1}, \qquad \frac{dW_b}{dt} = Q_s\left(\frac{dV_b}{dW_b}\right)^{-1} \tag{1}$$

Durch Integration dieser Differentialgleichungen kann der Hydrograph $Q_b(t)$ berechnet werden. Alle Variablen und Parameter in *BASEbreach* stellen physikalische Grössen mit entsprechenden Einheiten dar (siehe *Bild 4* und *Peter* [2017] für Details).

Die Grundidee von *BASEbreach* beruht auf verschiedenen Annahmen und Vereinfachungen. Die Breschen- und Hydraulikgrössen beziehen sich auf den Kontrollquerschnitt, in welchem kritischer Fliesszustand auftritt (*L-L* in *Bild 4*). Der Breschenausfluss wird durch die Wehrformel berechnet. Die Retentionskurve des Reservoirs wird durch eine Potenzfunktion $V_R \sim H_r^{\alpha}$ angenähert, charakterisiert durch deren Exponenten α. Die Breschenform ist ebenfalls über eine Potenzfunktion $S(w) \sim |w|^{1/(k-1)}$ definiert, wobei w eine Laufvariable im Breschenquerschnitt ist (siehe *Bild 4c*). Die Breschenform kann dadurch zwischen einer Dreiecksform ($k=2$) und einer Rechteckform ($k \rightarrow 1$) variieren. Der Winkel an der Oberkante der Breschenböschung β wird während des ganzen Bruchs als konstant angenommen und repräsentiert den Ruhewinkel des Dammmaterials.

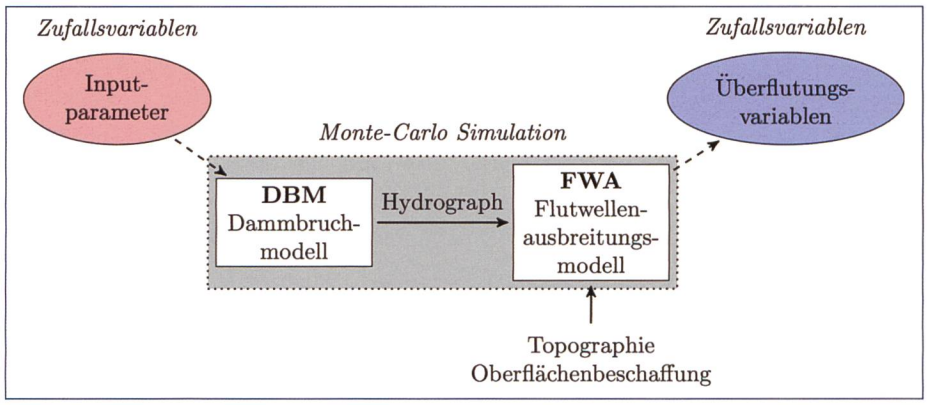


Bild 2. Vorgehensweise bei der Monte Carlo Simulation zur Berechnung der probabilistischen Überflutungsvariablen (adaptiert nach Peter [2017]).

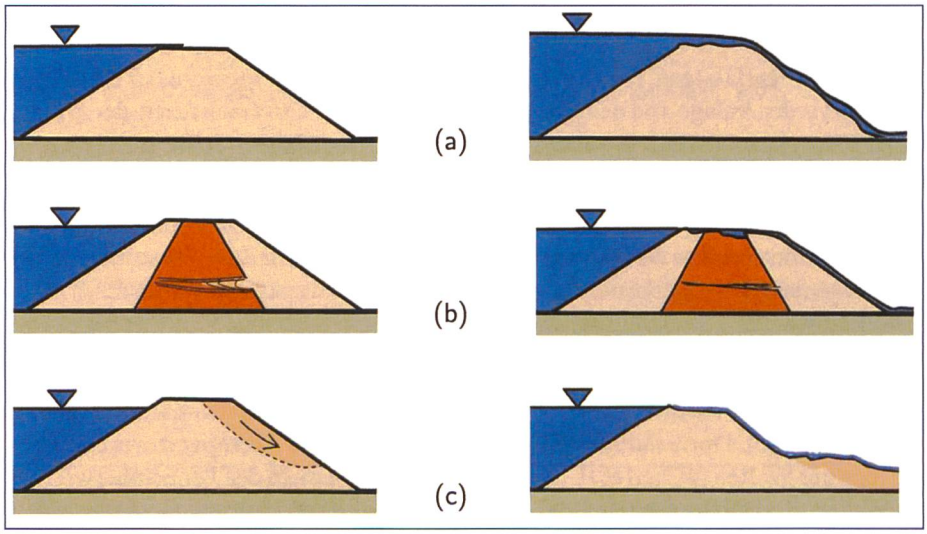


Bild 3. Verschiedene Bruchursachen wie (a) Überströmen, (b) innere Erosion, oder (c) luftseitige Böschungsinstabilität führen zu einer initialen Bresche, welche durch das Auslaufen des aufgestauten Wassers vergrössert wird (Aufleger und López, 2016).

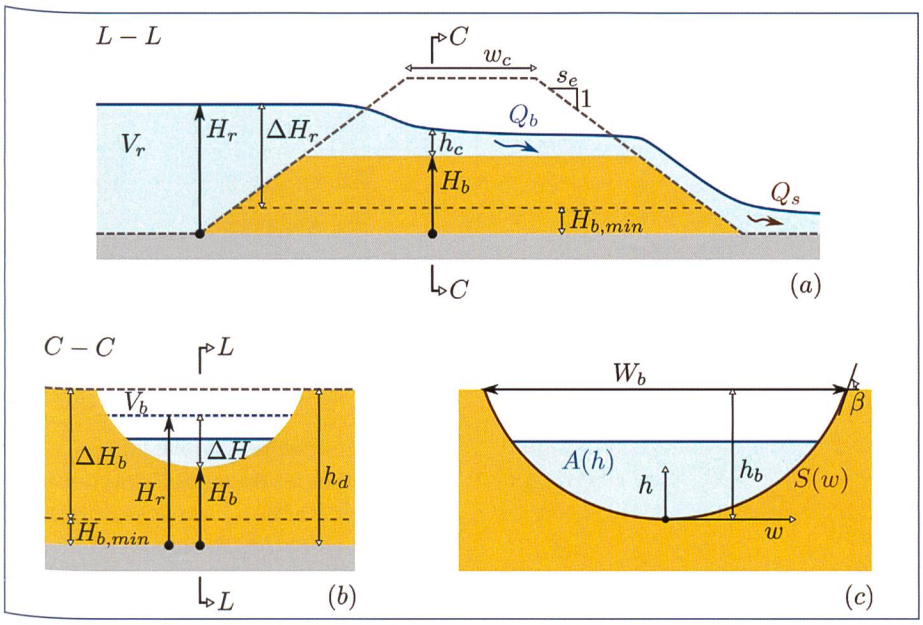


Bild 4. Parametrisierung des deterministischen Dammbruchmodells BASEbreach, dargestellt in (a) Dammquerschnitt, (b) Dammansicht und (c) Kontrollquerschnitt der Bresche (Peter, 2017): Die verschiedenen Modellparameter und -variablen können in Dammgeometrie (Dammhöhe h_d, Kronenbreite w_c, Böschungsneigung s_e, Höhe des nichterodierbaren Untergrunds [z. B. Felsoberkante] über Dammfundation $H_{b,min}$), Reservoircharakteristiken (Volumen V_r, Wasserspiegel H_r, Oberfläche-Volumen-Relation), Breschengeometrie (Breschenvolumen V_b, Breschenunterkante über Dammfundation H_b [Breschen-UK], Breschenbreite W_b, Breschenböschungswinkel β) und hydraulische Grössen (Energiehöhe ΔH, kritische Abflusstiefe h_c, Abfluss von Wasser Q_b und Dammmaterial Q_s) unterteilt werden.

Die Erosionsmenge wird durch empirische Sedimenttransportformeln $q_s = \gamma \cdot v^{\nu} \cdot r_h^{\eta}$ quantifiziert, charakterisiert durch die Exponenten ν und η (z. B. *Meyer-Peter Müller*, kombiniert mit Strickler-Reibungsgesetz: $\nu = 3$ und $\eta = -0.5$). Der Vorfaktor γ dient zur Beschleunigung oder Verlangsamung des Erosionsprozesses.

4. Probabilistische Kalibrierung

Alle Eingangsgrössen in *BASEbreach* sind physikalische Grössen, wobei nicht alle Parameter einfach zu bestimmen sind. Geometrische Grössen von Damm und Reservoir sind anhand von Dokumenten und Feldmessungen definiert, entweder als fixe Grösse (ohne Unsicherheiten) oder als Wahrscheinlichkeitsfunktion (mit Berücksichtigung der Unsicherheiten). Der Sedimenttransport innerhalb der Bresche wird durch nichtgeometrische Parameter quantifiziert und die entsprechenden Werte sind weder im Labor noch im Feld zu messen. Demzufolge bedarf es einer Kalibrierung dieser Werte, im Speziellen des Vorfaktors γ. Die probabilistische Kalibrierung von *BASEbreach* wurde anhand von Bayesschen Verfahren durchgeführt (*Peter et al.*, 2018). Die dazu herangezogenen Daten stammen ausschliesslich von dokumentierten Dammbrüchen in natura, bei welchen Informationen über die Abflussspitze und die finale Breschengrösse vorhanden sind (*Wahl*, 1998). Es wurde davon ausgegangen, dass die verbauten Dammmaterialien und die geometrischen Grössen so gewählt wurden, dass eigentlich kein Dammbruch entstehen sollte. Davon kann bei Dammbruchversuchen im Labor oder im Feld nicht ausgegangen werden, und die Erosionsprozesse und deren Geschwindigkeiten könnten merklich von den nichtantizipierten Brüchen abweichen. Demzufolge wurden für die Kalibrierung keine Versuchsdaten berücksichtigt.

Die probabilistische Kalibrierung hat für die Sedimenttransportrate $q_s = \gamma \cdot v^{4.4} \cdot r_h^{-0.77}$ ergeben, wobei $\gamma = LN(-8.8, 0.75)$ durch eine Lognormalverteilung beschrieben ist; v und r_h sind die Fliessgeschwindigkeit bzw. der hydraulische Radius im betrachteten Fliessquerschnitt. Eine globale Sensitivitätsanalyse mit Berücksichtigung aller Unsicherheiten hat ergeben, dass im Falle eines progressiven Dammbruchs die Unsicherheit in der Skalierungsgrösse γ bestimmend ist. Andere Grössen, welche typischerweise ebenfalls mit Unsicherheiten behaftet sind (z. B. initiale Breschengrösse, Retentionskurve, Böschungswinkel), zeigen eine deutlich kleinere Auswirkung auf den Spitzenabfluss oder die finale Breschengrösse. Zusammen mit den Systemgrössen Dammhöhe h_d und Stauvolumen V_r kann die Skalierungsgrösse γ verwendet werden, um dem Gesamtsystem ein sogenanntes «Erosionpotenzial» $E_p = f(V_r, h_d, \gamma)$ zuzuordnen: je höher das Erosionspotenzial, desto schneller die Dammerosion und tendenziell höher der Spitzenabfluss

	$h_d < 10$ [m]	$h_d \geq 10$ [m]
Vollständiger Bruch · hohes Erosionspotential · Reservoir vollständig entleert · schnelle Tiefenerosion · selbstbeschleunigender Prozess	$V_r \geq 1581 \cdot h_d^{2.5}$	$V_r \geq 500 \cdot h_d^{3}$
Unvollständiger Bruch · tiefes Erosionspotential · Restwasser im Reservoir wahrscheinlich · Erosion nicht bis Dammfundation	$V_r \leq 158 \cdot h_d^{2.5}$	$V_r \leq 50 \cdot h_d^{3}$
Übergangsbereich · mittleres Erosionspotential · langsame Tiefenerosion · kritisches Volumen (abhängig von Dammschüttmaterial)	$158 \cdot h_d^{2.5} < V_r < 1581 \cdot h_d^{2.5}$	$50 \cdot h_d^{3} < V_r < 500 \cdot h_d^{3}$

Tabelle 1. Beschreibung der drei Regimes, welche sich in der Charakteristik des Bruchprozesses, der Prozessgeschwindigkeit und der Eigenschaften des resultierenden Hydrographen unterscheiden.

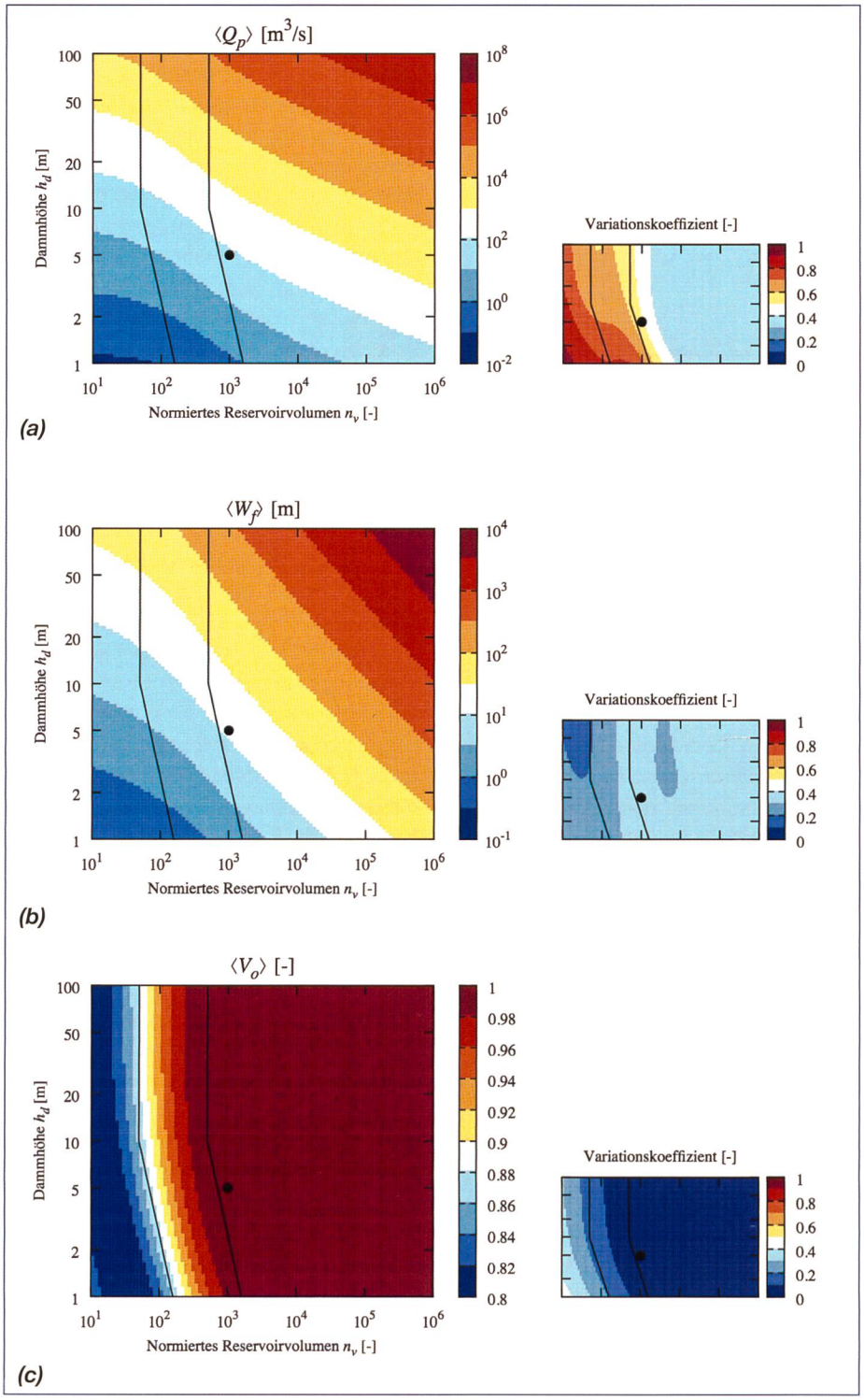


Bild 6. Resultate der probabilistischen Kalibrierung des Dammbruchmodells: (a) Spitzenabfluss Q_p, (b) finale Breschenbreite W_f, (c) relativ zum gespeicherten Volumen aus dem Reservoir austretendes Wasservolumen V_0. Die grossen Grafiken stellen den Erwartungswert (...) und die kleinen Grafiken den Variationskoeffizienten sqrt(10^Var - 1) (mit Var als Varianz im logarithmischen Raum) dar. Die schwarzen Linien definieren die verschiedenen Regimes der Bruchcharakteristiken (vergleiche Bild 5 und Tabelle 1). Der eingezeichnete Punkt steht für das Beispiel von h_d=5 m und V_r=125000 m³.

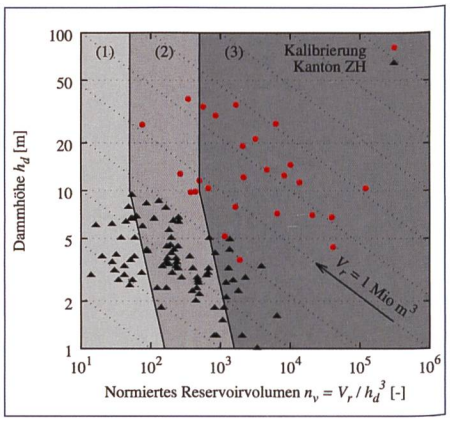


Bild 5. Untersuchte Dämme und entsprechendes Regime, charakterisiert durch Dammhöhe h_d und Reservoirvolumen V_r, wobei das Reservoirvolumen mit h_d^3 normiert ist. Die gepunkteten Linien sind Isolinien der Systemgrössen h_d (horizontal) und V_r (diagonal) (z. B. konstantes Reservoirvolumen von 10 Mio m³ bei zunehmender Dammhöhe, siehe Pfeil). Die drei Regimes (1) unvollständiger Bruch, (2) Übergangsbereich und (3) vollständiger Bruch sind durch verschiedene Graustufen gekennzeichnet (siehe Tabelle 1). Um einen Bezug zu Schweizer Verhältnissen zu schaffen, sind neben den Kalibrierungsdaten auch die im Kanton Zürich untersuchten kleinen Staudämme (Vonwiller et al., 2015) eingetragen.

Q_p. Die folgenden Beziehungen scheinen intuitiv und wurden im numerischen 2-D-Modell bestätigt (*Vonwiller et al.*, 2015):

- je grösser das Stauvolumen V_r, desto grösser ist die potenzielle Energie, welche genutzt werden kann, um die Erosion voranzutreiben und
- je grösser die Skalierungsgrösse γ, desto schneller ist der Erosionsprozess.

Die Tatsache, dass Reservoirs mit hohen Dämmen oftmals ein grosses Stauvolumen haben und dadurch ein hohes Erosionpotenzial aufweisen, wird durch die Definition des Erosionspotenzials in Abhängigkeit des Stauvolumens abgedeckt. Die alleinige Berücksichtigung der Dammhöhe h_d ist zwiespältig. Einerseits bedeutet ein hoher (und damit voluminöser) Damm einen erhöhten Erosionswiderstand, andererseits ist die Lageenergie des Reservoirs ebenfalls erhöht. Bei kleinen Stauvolumen besteht die Möglichkeit, dass ein unvollständiger progressiver Bruch stattfindet, d. h., die Dammerosion kommt zum Stillstand, bevor das Reservoir vollständig entleert ist. Im Gegensatz dazu sind beim vollständigen Bruch die Erosionsprozesse selbstbeschleunigend und das gesamte Stauvolumen fliesst durch die entstandene Bresche aus. Zwischen diesen beiden Regimes befindet sich ein Übergangsbereich. Darin ist die Unsicherheit der Skalierungsgrösse γ entscheidend, ob sich ein vollständiger oder unvollständiger Bruch ausbildet. Demzufolge ist es in diesem Bereich schwierig vorauszusagen, welcher Bruchprozess sich in Wirklichkeit entwickeln würde, und es wird die Existenz eines kritischen Systemzustands vermutet. Die Abgrenzung zwischen diesen drei Regimes, welche in *Tabelle 1* und in *Bild 5* ersichtlich sind, wurde anhand des kalibrierten Modells *BASE-breach* quantifiziert (siehe *Bild 6*). Alle zur

Kalibrierung herangezogenen Daten fallen in den Bereich des vollständigen Bruchs (einzelne in den Übergangsbereich). Dies wird als erfolgreiche Validierung der Regimegrenzen betrachtet, da mögliche Daten von unvollständigen Brüchen nicht im Katalog von historischen Dammbrüchen enthalten sind.

In *Bild 6* sind verschiedene Outputgrössen von *BASEbreach* in Abhängigkeit von Dammhöhe h_d und normiertem Reservoirvolumen $n_v = V_r/h_d^3$ dargestellt. Jeder Punkt in diesen Abbildungen kann einem Damm-Reservoir-System zugeordnet werden. Die Variabilität der Ausgangsgrössen (quantifiziert durch den Variationskoeffizienten) stammt von den verschiedenen Unsicherheiten in den Eingangsgrössen, im Speziellen im Vorfaktor γ des Sedimenttransports. Zum Beispiel kann in *Bild 6a* für $h_d = 5$ m und $V_r = 125\,000$ m³ ein mittlerer Spitzenabfluss von ungefähr Q_p = 80 m³/s mit einem Variationskoeffizient von 0.5 (Standardabweichung von 0.3 und einem 95 %-Intervall zwischen Q_p = 20 m³/s und Q_p = 326 m³/s) herausgelesen werden.

Anhand von *Bild 6b* kann eine finale Breschenbreite von $W_f = 12$ m erwartet werden, was ungefähr der doppelten Dammhöhe entspricht. Dabei wird sich das Reservoir vollständig entleeren. Da sich das System schon sehr nahe beim Übergangsbereich befindet, haben die Unsicherheiten der Eingangsgrössen eine grosse Auswirkung auf die Belastbarkeit des Spitzenabflusses. Im Bereich des vollständigen Bruchs liegen die Variationskoeffizienten zwischen 0.3 und 0.4 (Standardabweichungen von 0.2 und 0.25), was mit Angaben zu Ungenauigkeiten von rein statistischen Modellen vergleichbar ist (*ASCE/EWRI*, 2011). *Bild 6* diente als Grundlage zur Bestimmung der Regimegrenzen.

Der Vergleich mit der Standardbresche in *Bild 7* zeigt, dass für die Regimes des unvollständigen Bruchs und des Übergangsbereichs die Standardbresche den Spitzenabfluss klar überschätzt. Jedoch ist eine Unterschätzung im Regime des vollständigen Bruchs auszumachen. Dies ist insbesondere hervorzuheben, da sich in diesem Bereich die historischen Dammbrüche häufen und demzufolge auch zukünftige Dammbrüche zu erwarten sind. Vor diesem Hintergrund ist die alleinige Anwendung der Standardbresche zur Risikobeurteilung eines Dammbruchs ungenügend.

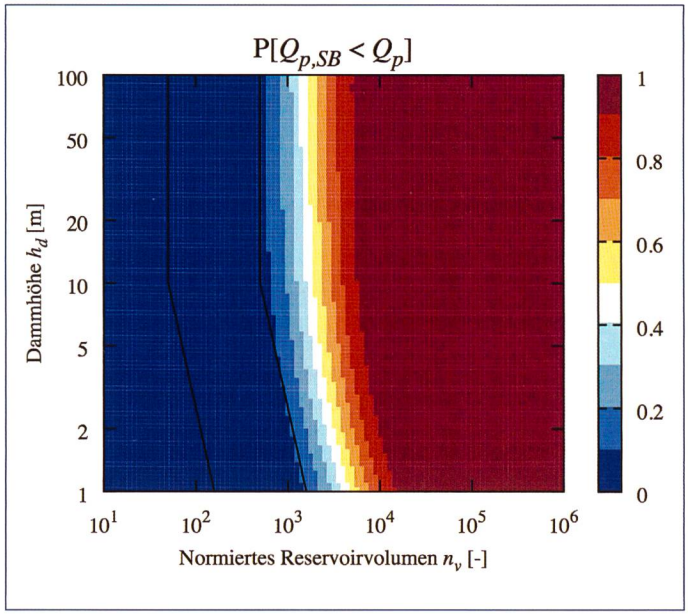


Bild 7. Vergleich zwischen dem probabilistisch kalibrierten Dammbruchmodell und der Methode der Standardbresche: Die Wahrscheinlichkeit, dass der mit der Methode der Standardbresche berechnete Spitzenabfluss ($Q_{p,SB} = 2.58 h_d^{5/2}$) erreicht und überschritten wird im Vergleich zu Q_p, berechnet mit BASEbreach.

Parameter	Wert	Bemerkungen
Dammeigenschaften:		keine Unsicherheiten angenommen
· Dammhöhe h_d	61 m	aus Dokumentation
· Kronenbreite w_c	24 m	aus Dokumentation
· Böschungsneigung s_e	3	aus Dokumentation
Reservoireigenschaften:		
· Talform α	$\mathcal{U}(2.5, 3.2)$	geschätzt von Retentionskurve
· initialer Level $H_{r,0}$	61 m	maximal, aus Dokumentation
· initiales Volumen $V_{r,0}$	38 276 344 m³	maximal, aus Dokumentation
Brescheneigenschaften:		
· Böschungswinkel β	$\mathcal{U}(50°, 85°)$	physikalisch sinvoller Bereich
· initialer Level $H_{b,0}$	50 m	Annahme (nicht sensitiv)
· Felsoberkante $H_{b,min}$	0 m	minimal, aus Dokumentation
Sedimenttransport:		aus Kalibrierung
· Exponent für v	4.4	
· Exponent für r_h	−0.77	
· Skalierungsgrösse γ	$\mathcal{LN}(-8.8, 0.75)$	

Tabelle 2. Parameter zur Modellierung des exemplarischen Dammbruchs des ICOLD-Benchmarks: U steht für eine Gleichverteilung, definiert durch unteren und oberen Randwert, LN steht für eine Lognormalverteilung, definiert über Mittelwert und Standardabweichung der zugehörigen Normalverteilung.

5. Effiziente Überflutungssimulationen

Um die Unsicherheiten des Dammbruchmodells, ausgedrückt als Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Eingangsgrössen von *BASEbreach*, in die Berechnung des Gefährdungspotenzials mit einzubeziehen, sind mehrere 1000 Ausflusshydrographen als Randbedingung in der Flutwellenberechnung zu berücksichtigen (MC-Simulation, siehe *Bild 2*). Dazu sind genaue, robuste und vor allem effiziente Simulationen notwendig. Die Simulationssoftware *BASEMENT* löst die Flachwassergleichungen auf unstrukturierten Gittern zuverlässig und genau. Die verlangte Recheneffizienz wurde durch Vektorisierung des numerischen Kerns von *BASEMENT* erlangt. Die neue Version von *BASEMENT* kann sowohl auf herkömmlichen Multi-Core Prozessoren, als auch auf Grafikkarten mit GPU (Graphics Processing Unit) verwendet werden. Mit der GPU-Version von *BASEMENT* ist nicht nur eine je nach Modellgrösse ca. 100-mal schnellere Berechnung der Flutwelle möglich, sondern auch die dafür benötigte Hardware ist deutlich kostengünstiger.

6. Anwendungsbeispiel Hydrocity

Zur Veranschaulichung der Vorgehensweise bei der MC-Simulation für die Dammbruchanalyse (siehe *Bild 2*) wird der numerische Benchmark, formuliert am ICOLD-Workshop in Graz 2013 (*Zenz*

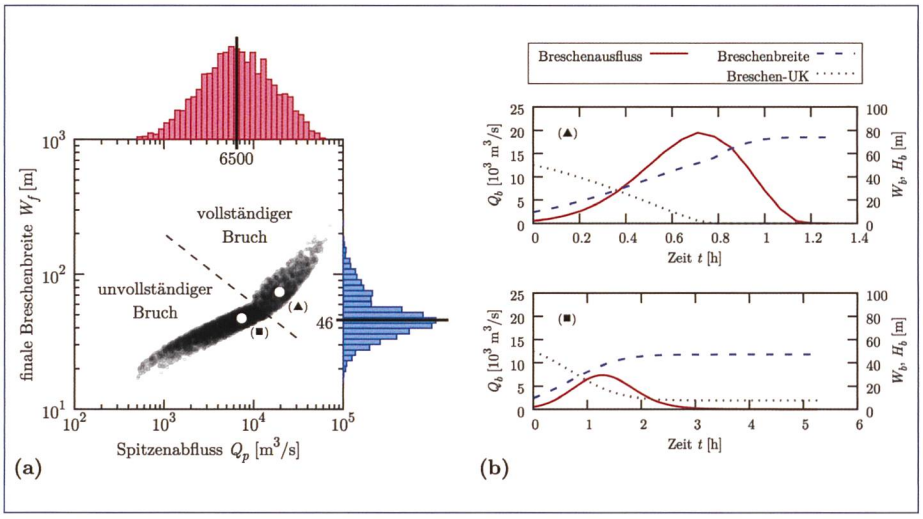


Bild 8. Resultat des probabilistischen Dammbruchmodells (adaptiert nach Peter [2017]): (a) 5000 mögliche Hydrographen im Q_p–W_f Raum, inklusive der Randverteilungen. Es sind sowohl vollständige Brüche als auch unvollständige Brüche zu erwarten; (b) zwei exemplarische Dammbrüche und deren Zeitreihen für ausgewählte Grössen, jeweils für einen vollständigen (oben) und unvollständigen (unten) Bruch.

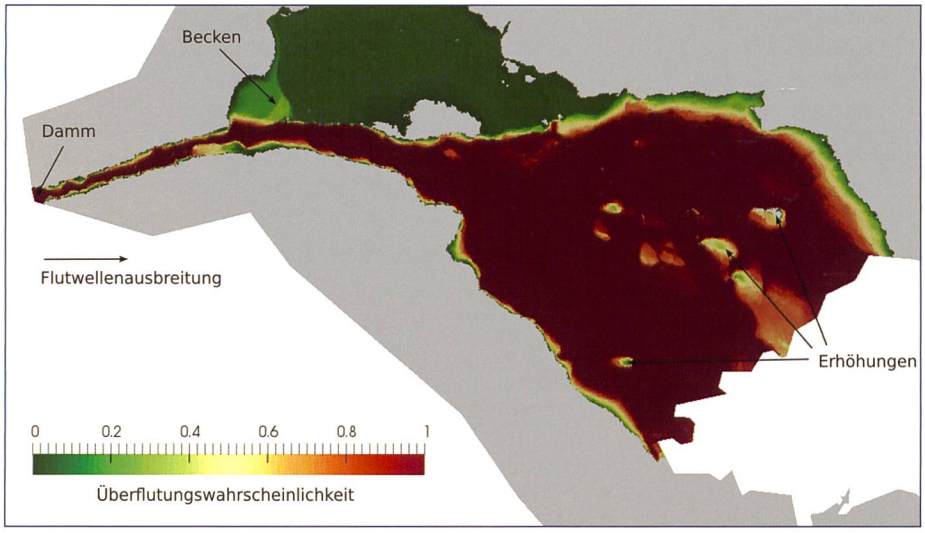


Bild 9. Probabilistische Überflutungskarte (adaptiert nach Peter, 2017).

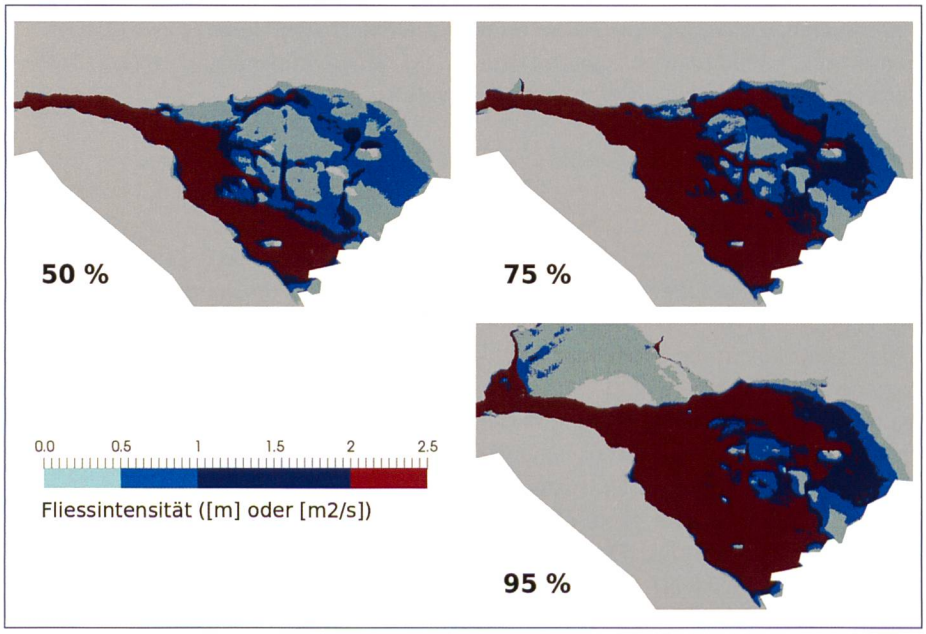


Bild 10. Schwellenwerte nach BFE-Richtlinien (BFE, 2014) zur Einschätzung des Gefährdungspotenzials für drei verschiedene Unterschreitungswahrscheinlichkeiten (0.5, 0.75, und 0.95).

& *Goldgruber*, 2013), herangezogen. Die Datengrundlage ist dabei ausgezeichnet: Nebst hochauflösendem Terrainmodell sind auch jegliche Angaben zu Dammgeometrie und Schüttmaterialien vorhanden. Trotz der unüblich guten Datengrundlage unterscheiden sich die berechneten Überflutungsflächen der verschiedenen Teilnehmer des Benchmarks deutlich. Die Resultate aller Teilnehmer zusammen zeigen ein gutes Bild der involvierten Unsicherheiten in der Dammbruchmodellierung, einem einzelnen Teilnehmer bleibt dieses Bild jedoch verwahrt. Die hier vorgestellte Vorgehensweise soll auch einem einzelnen Modellierer das Gesamtbild vermitteln.

Die für das Beispiel gewählten Eingangsgrössen des Dammbruchmodells *BASEbreach* sind in *Tabelle 2* ersichtlich. Aus den Wahrscheinlichkeitsverteilungen wurden $N = 5000$ Samples gezogen, welche die Parametersets für die MC-Simulation definieren. Die resultierenden Dammbruchhydrographen sind in *Bild 8* dargestellt. Das untersuchte Damm-Reservoir-System liegt mit $50 < V_r / h_d^3 \approx 170 < 500$ im Regime des Übergangbereichs, und es resultieren neben vollständigen auch unvollständige Brüche. Der mittlere Spitzenabfluss liegt bei ungefähr 6500 m³/s, und die erwartete finale Breschengrösse von ca. 46 m ist deutlich kleiner als die Dammhöhe von 61 m. Die anschliessende Flutwellenberechnung dieser $N = 5000$ Hydrographen wurde mit der GPU-Version von *BASEMENT* auf einer Nvidia-Tesla-P100-Grafikkarte gerechnet. Die räumliche Diskretisierung der Überflutungsfläche erfolgte über ein unstrukturiertes Dreiecksgitter mit 200 000 Zellen. Zur Berechnung eines 12 Stunden andauernden Hydrographen wurden durchschnittlich 36 Sekunden Rechenzeit benötigt, was 1200-mal schneller als der Echtzeit entspricht. Innerhalb 24 Stunden konnten somit 2400 mögliche Ausflusshydrographen prozessiert werden.

Die resultierenden probabilistischen Überflutungsgrössen sind in den *Bildern 9* und *10* dargestellt. Die probabilistische Überflutungskarte in *Bild 9* zeigt die Wahrscheinlichkeit, mit welcher an einem bestimmten Ort eine Überflutung stattfindet. Ein Grossteil des unten liegenden Gebiets wird mit hoher Wahrscheinlichkeit überflutet. Nur am Rand des Gebiets und auf einigen Erhöhungen bleibt eine Überflutung eventuell aus. Ebenfalls wird eine Fläche unterhalb eines Beckens nur mit geringer Wahrscheinlichkeit überflutet. In *Bild 10* sind die Schwellenwerte

der Fliessintensität $I = max(h, vh)$ zur Bestimmung des besonderen Gefährdungspotenzials dargestellt (*BFE*, 2014). Auch diese Schwellenwerte sind nun durch Wahrscheinlichkeitsfunktionen beschrieben. So können für ausgewählte Perzentile (z. B. 50, 75 und 95) die betroffenen Gebiete ausfindig gemacht werden. Die Unterschiede zwischen den Karten für verschiedene Perzentile zeigen einerseits, dass der Wahl eines bestimmten Perzentils zur Evaluierung des Gefährdungspotenzials grosse Bedeutung zukommt. Andererseits können die daraus resultierenden Entscheidungen quantitativ begründet werden; trotz oder gerade wegen den vorherrschenden Unsicherheiten.

7. Schlussfolgerungen

Bei der Modellierung von Erddammbrüchen spielen Unsicherheiten verschiedenen Ursprungs eine grosse Rolle. Wie aussagekräftig das gewählte Modell, wie zutreffend die entsprechende Parametrisierung und wie genau die zur Verfügung stehenden Daten sind, ist bei einer Dammbruchanalyse schwierig abzuschätzen. Häufig wird angenommen, dass es sich bei einem betrachteten Szenario um den «Worst Case» handelt, wobei die Genauigkeit der verwendeten Modelle im Sinne einer «Black Box» nicht hinterfragt wird. Wie einst der englische Staatsmann und Philosoph Sir *Francis Bacon* (1561–1626) meinte: «*If a man will begin with certainties, he shall end in doubts; but if he will be content to begin with doubts he shall end in certainties.*», motivierte diese Tatsache zur Entwicklung einer probabilistischen Vorgehensweise. Dabei werden die Unsicherheiten in der Dammbruchmodellierung mittels Monte Carlo Simulationen durch die deterministischen und physikalisch basierten Dammbruch- und Flutwellenmodelle propagiert. Die resultierenden probabilistischen Überflutungskarten vermitteln ein ganzheitliches Bild. Dies erfordert jedoch ein Umdenken bei der Interpretation der Resultate. Anstatt konkreter Werte aufgrund eines Ereignisses, wie etwa der Überflutungsintensität bei gegebenem Abfluss, wird die Wahrscheinlichkeit, dass ein gewisses Ereignis eintritt, berechnet. Dies ermöglicht die zuverlässige Berechnung des Risikos im Falle eines Dammbruchs durch Multiplikation der Wahrscheinlichkeit mit dem Schaden, welcher beim Eintreten des Ereignisses entsteht. Zur praktischen Umsetzung des probabilistischen Gefährdungspotenzials kann auch ein oberer Grenzwert definiert werden, z. B. eine Unterschreitungswahrscheinlichkeit von 95 %. Mit den heute verfügbaren Computertechnologien steht dieser aussagekräftigen Vorgehensweise nichts mehr im Weg.

Literaturverzeichnis

Aufleger, M., López, D. (2016). Die Dammkrone als Indikator für die Talsperrensicherheit in Extremsituationen. WasserWirtschaft 106(6), 136–139.

ASCE/EWRI Task Committee on Dam/Levee Breaching (2011). Earthen Embankment Breaching. Journal of Hydraulic Engineering, 137(12), 1549–1564.

BFE Bundesamt für Energie (2014). Richtlinie über die Sicherheit der Stauanlagen, Teil B: Besonderes Gefährdungspotenzial als Unterstellungskriterium.

BFE, Bundesamt für Energie (2015). Richtlinie über die Sicherheit der Stauanlagen, Teil A: Allgemeines.

Boes, R., Frank, P. J., Hager, W. H. (2017). Spatial breach development of homogeneous noncohesive levees and embankment dams due to overtopping. Proc. 85th ICOLD Annual Meeting, Prag, Paper 344.

Frank, P. J. (2016). Hydraulics of Spatial Dike Breaches. Dissertation ETH Zürich und VAW-Mitteilung 236 (R. Boes, ed.), doi: 10.3929/ethz-a-010803310.

Morris, M. W., Hanson, G., Hassan, M. (2008). Improving the accuracy of breach modelling: why are we not progressing faster? Journal of Flood Risk Management, 1(3), 150–161. doi: 10.1111/j.1753-318X.2008.00017.x.

Peter, S. J. (2017). Dam Break Analysis under Uncertainty. Dissertation ETH Zürich und VAW-Mitteilung 241 (R. Boes, ed.), doi: 10.3929/ethz-b-000209879.

Peter, S. J., Nagel, J. B., Marelli, S., Boes, R. M., Sudret, B., Vetsch, D. F., Siviglia, A. (2018). Development of probabilistic dam breach model using Bayesian inference. Water Resources Research. doi: 10.1029/2017WR021176.

Rüdisser, B. (2017). Einfluss der Kornverteilung des Schüttmaterials und einer Oberflächendichtung auf die Breschenentwicklung und die Abflusskurve beim Versagen eines Schüttdammes durch Überströmen. Dissertation, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Technische Universität Wien.

Rüdisser, B., Tschernutter, P. (2018). Failure of embankment dams due to overtopping – experimental study and hydrograph prediction. Proc. ICOLD Symposium Hydro Engineering, Wien, Paper T5-24.

Singh, V. P. (1996), Dam breach modeling technology. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Niederlande.

Stauanlagengesetz (StAG). Bundesgesetz über die Stauanlagen, Schweizerische Eidgenossenschaft, Stand am 1. Januar 2013.

Stauanlagenverordnung (StAV). Schweizerische Eidgenossenschaft, revidierte Version, Stand am 1. Januar 2013.

Volz, C. (2013). Numerical Simulation of Embankment Breaching due to Overtopping. Dissertation ETH Zürich und VAW-Mitteilung 222 (R. Boes, ed.), doi: 10.3929/ethz-a-009967594.

Vonwiller, L., Vetsch, D. F., Peter, S. J., Boes, R. M. (2015). Methode zur Beurteilung des maximalen Breschenabflusses bei progressivem Bruch homogener Erdschüttdämme an kleinen Stauhaltungen. «Wasser Energie Luft», 107(1), 37–43.

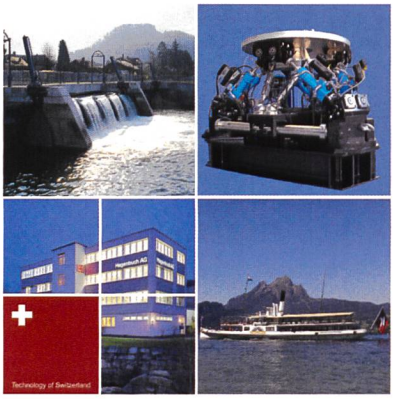
Wahl, T. L. (1998). Prediction of embankment dam breach parameters. A literature review and needs assessment. Dam Safety Research Report DSO-98-004, Water Resources Research Laboratory, Denver.

Wallner, S. (2014). Einfluss von Speichergeometrie und Speichergrösse auf die Flutwelle beim Dammerosionsbruch beim Überströmen. Dissertation, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Technische Universität Wien.

Vetsch, D. F., Boes, R. M. (2016). Vereinfachte Modellierung des progressiven Bruchs bei kleinen Erdschüttdämmen. WasserWirtschaft 106(6): 140–143.

Zenz, G., Goldgruber, M. (2013). 12th international benchmark workshop on numerical analysis of dams. ATCOLD, Austrian National Committee on Large Dams. Graz, Österreich.

Anschrift der Verfasser
Dr. *Samuel Peter*, peter@vaw.baug.ethz.ch,
Dr. *David Vetsch*
Prof. Dr. *Robert Boes*
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) ETH Zürich
Hönggerbergring 26, CH-8093 Zürich
http://www.vaw.ethz.ch



Hydraulische Lösungen - alles aus einer Hand

Planen - entwickeln - produzieren

Als innovatives Schweizer Traditionsunternehmen sind wir spezialisiert auf hydraulische Steuerungs- und Antriebstechnik. Ob grosse, komplexe Herausforderungen oder Einzelkomponenten: Jeder Auftrag ist für uns der Wichtigste.
Bei Fragen, Anliegen oder Projekten freut es uns, für Sie da zu sein.

Hagenbuch Hydraulic Systems AG, Rischring 1, CH-6030 Ebikon, Tel. +41 (0)41 444 12 00, Fax +41 (0)41 444 12 01
info@hagenbuch.ch, www.hagenbuch.ch

HAGENBUCH
Hydraulic Systems

Wasserkraft für höchste Ansprüche

Bewährte Technologie für die Automatisierung von Wasserkraftwerken

Höchste Qualität, führendes Know-how und langjährige Erfahrung – Automatisierung und Prozessleittechnik von Rittmeyer sorgen für den zuverlässigen und sicheren Betrieb von Wasserkraftwerken jeder Grösse.

Rittmeyer AG
CH-6341 Baar
www.rittmeyer.com

rittmeyer
BRUGG