Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 107 (2015)

Heft: 1

Artikel: Methoden zur Beurteilung des maximalen Breschenabflusses bei progressivem Bruch homogener Erschüttdämme an kleinen Stauhaltungen

Autor: Vonwiller, Lukas / Versch, David / Peter, Samuel

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-941835

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: 07.01.2026

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

Methode zur Beurteilung des maximalen Breschenabflusses bei progressivem Bruch homogener Erdschüttdämme an kleinen Stauhaltungen

Lukas Vonwiller, David Vetsch, Samuel Peter, Robert M. Boes

Zusammenfassung

Die Gefahrenbeurteilung von Stauanlagen ist eine wichtige Aufgabe im Risikomanagement. In der Schweiz sieht die Richtlinie über die Sicherheit der Stauanlagen einen plötzlichen und partiellen Bruch mit einer standardisierten Breschenform (Standardbresche) bei Schüttdämmen vor. Zur Berechnung des maximalen Breschenabflusses wird dabei ausschliesslich die Stauhöhe berücksichtigt, und andere Einflussgössen wie z.B. das Stauvolumen werden vernachlässigt. Im Vergleich mit einem progressiven Versagensvorgang wird der maximale Breschenabfluss bei kleinen Stauhaltungen je nach Situation über- oder unterschätzt. Eine Überschätzung erfolgt tendenziell für grosse Stauhöhen und kleine Stauvolumina, während grosse Stauvolumina und kleine Stauhöhen zu einer Unterschätzung führen. Die Gefahrenbeurteilung anhand der Standardbresche liegt somit nicht immer auf der sicheren Seite. Obwohl die Abschätzung des maximalen Breschenabflusses immer mit grossen Unsicherheiten verbunden ist, gilt es, ein möglichst realitätsnahes Modell zu entwickeln. In diesem Beitrag wird ein Verfahren vorgestellt, um den maximalen Breschenabfluss für homogene Schüttdämme physikalisch basiert abzuschätzen. Dabei werden verschiedene Einflussgrössen und ein progressiver Versagensvorgang berücksichtigt.

1. Einleitung

1.1 Hintergrund und rechtliche Grundlagen

Die Gefahrenbeurteilung von Stauanlagen ist eine wichtige Aufgabe im Risikomanagement. Im Falle des Versagens eines Sperrenbauwerks und einer daraus resultierenden Flutwelle können Menschen und Infrastruktur zu Schaden kommen. Die Gefahrenbeurteilung wird in drei Schritte eingeteilt (vgl. *Tabelle 1*).

Die vorliegende Arbeit befasst sich ausschliesslich mit dem ersten Schritt der Gefahrenbeurteilung und stellt ein neues Verfahren vor. Der daraus resultierende maximale Breschenabfluss kann für Schritt 2 als zentrale Eingangsgrösse für die Abschätzung der Flutwellenausbreitung, z.B. nach *BFE,* 2014b, c, verwendet werden.

Die gesetzlichen Grundlagen betreffend die Sicherheit der Stauanlagen in der Schweiz sind im Bundesgesetz über die Stauanlagen (*StAG*, 2013), in der Stauanlagenverordnung (*StAV*, 2012) und in der Richtlinie über die Sicherheit der Stauanlagen, Teil B (*BFE,* 2014a) gegeben. Der Geltungsbereich des StAG wird in erster Linie anhand eines Grössenkriteriums für die Stauhöhe und das Stauvolumen (Art 2, Abs. 1, StAG) definiert (durchgezogene Linie in *Bild 1*). Aufgrund dieser Einteilung ergibt sich die Vorgehensweise für die Abschätzung des besonderen Gefährdungspotenzials. Dafür spielt die Unterscheidung in ständige Belegung und temporäre Belegung des potenziell gefährdeten Gebiets eine Rolle. Mit diesen Vorgaben kann in einem zweiten Schritt das besondere Gefährdungspotenzial (Art 2, Abs. 2, StAG) abgeschätzt werden. Als Aufsichtsbehörde des Bundes kann das Bundesamt für Energie (BFE) aufgrund des Vorliegens eines besonderen Gefährdungspotenzials eine Stauanlage dem StAG unterstellen oder umgekehrt vom Geltungsbereich des StAG ausnehmen, wenn nachgewiesen werden kann, dass kein besonderes Gefährdungspotenzial vorliegt. Für sehr kleine Stauanlagen (gestrichelte Linie in *Bild 1*) kann die Abschätzung des besonderen Gefährdungspotenzials rein qualitativ und vor Ort durchgeführt werden. Die Stauanlagenrichtlinie sieht vor, dass eine progressive Breschenbildung angenommen werden kann, sofern dies mit «wissenschaftlich fundierten Methoden» begründbar ist (*BFE,* 2014a).

Schritt	Stauanlagenrichtlinie (BFE 2014a)	Vorgehen
1	Anzunehmendes Bruchszenario bei plötzlichem (momentanen) Bruch oder bei progressiver Breschenbildung *Kapitel 3. Flutwellenabschätzung, Anfangsbedingungen*	Bestimmung des Breschenabflusses (maximaler Breschenabfluss bzw. Abflussganglinie)
2	Vorgehensweise zur Abschätzung der Flutwelle infolge Stauanlagenbruch *Kapitel 3. Flutwellenabschätzung, Abschätzungsverfahren*	Berechnung der Flutwellenausbreitung, d.h. Ausbreitung und Dämpfung des maximalen Breschenabflusses bzw. der Abflussganglinie
3	Gefährdungskriterien für Menschenleben oder grössere Sachschäden infolge Stauanlagenbruch *Kapitel 4. Beurteilungskriterien*	Beurteilung der Gefährdung von Mensch und Infrastruktur

Tabelle 1. Schritte in der Gefahrenbeurteilung von Stauanlagen gemäss Stauanlagenrichtlinie (BFE 2014a) und das entsprechende praxisrelevante Vorgehen.

1.2 Motivation und allgemeine Prozessbeschreibung von Dammbrüchen

Im 19. Jahrhundert wurden im Mittelland sowie im voralpinen Raum viele kleine Stauhaltungen errichtet, welche im Zuge der Industrialisierung für die Stromerzeugung in Kleinwasserkraftwerken genutzt wurden (z.B. Mühlen, Sägereien usw.). Allein im Kanton Zürich gibt es mehr als hundert solcher Anlagen, die in den allermeisten Fällen als homogene Dämme mit lokal anstehendem Moränenmaterial geschüttet wurden. Heute wird nur noch ein Bruchteil der Anlagen industriell genutzt; vielmehr dienen sie als Naherholungsgebiet und sind derart in die Landschaft eingebunden, dass die meisten Speicher unter Naturschutz stehen. Dennoch geht

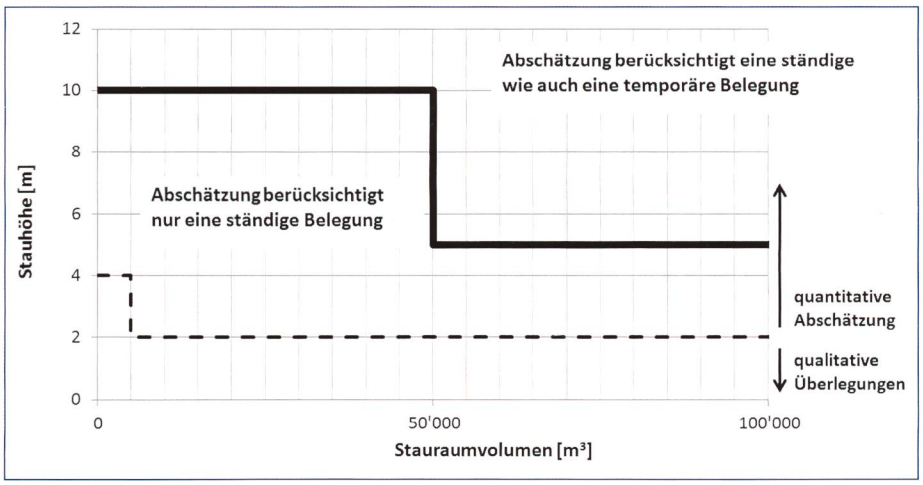

Bild 1. Übersicht der Vorgehensweise zur Abschätzung des besonderen Gefährdungspotenzials (aus BFE, 2014a).

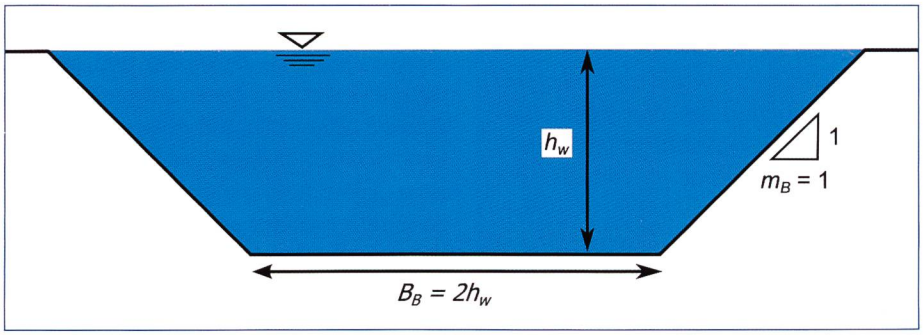

Bild 2. Trapezförmige Standardbresche mit Basisbreite B_B entsprechend der doppelten Stauhöhe h_w und seitlichen Böschungen von 1:1 (VAW, 2011).

von solchen Anlagen eine Gefährdung aus, da im Versagensfall des Dammes und der daraus resultierenden Flutwelle Menschen und Infrastruktur zu Schaden kommen können. Die Gefahrenbeurteilung solcher Anlagen basiert in der Schweiz auf der Abschätzung des maximalen Breschenabflusses, wobei bisher ein teilweiser und plötzlicher Bruch des Staudammes angenommen wird. Die Stauanlagenrichtlinie sieht für Stauanlagen eine vereinfachte Breschengeometrie (Standardbresche) vor nach *BFE,* (2014a). Die Standardbresche ist definiert mit einer Basisbreite B_B, die der doppelten Stauhöhe entspricht, und weist seitliche Böschungen von 1:1 auf (*BFE,* 2014a, vgl. *Bild 2*). Der maximale Breschenabfluss $Q_{B,max}$ ist ausschliesslich von der Stauhöhe h_w abhängig (vgl. *Gleichung 1*).

$$Q_{B,max} = 2.58 h_w^{5/2} \qquad (1)$$

Im Vergleich mit einem progressiven Versagensvorgang wird mit diesem Ansatz der maximale Breschenabfluss bei kleinen Stauhaltungen je nach Situation über- oder unterschätzt. Im Falle eines grossen Stauvolumens, welches in *Gleichung 1* nicht berücksichtigt wird, sind im Falle einer progressiven Breschenbildung aufgrund des lang andauernden Wasseraustritts durchaus grössere Basisbreiten denkbar. Für den Fall, dass sich der Wasserspiegel immer noch auf einem hohen Niveau befindet, ergibt sich ein grösserer maximaler Breschenabfluss als mit der Standardbresche. Hingegen kann im Falle von kleinen Stauvolumina und relativ grossen Stauhöhen der maximale Breschenabfluss mit dem Ansatz der Standardbresche überschätzt werden (*VAW,* 2011). Dadurch können selbst Anlagen mit relativ kleinen Stauvolumina in den Gültigkeitsbereich des Stauanlagengesetzes (*StAG*, 2013) fallen. Für eine solche Beurteilung sind jedoch im Anschluss an die Bestimmung des maximalen Breschenabflusses die Abschätzung der Flutwellenausbreitung und die Beurteilung der Gefährdung von Mensch und Infrastruktur erforderlich (siehe *Abschnitt 1.1*).

Die relevanten Versagensmechanismen von Schüttdämmen sind externe Erosion infolge Überströmens (overtopping) und innere Erosion infolge Durchsickerns (piping) (z.B. *Singh,* 1996, *ASCE/EWRI Task Committee,* 2011). Beim Versagen des Dammes durch Überströmen bildet sich aufgrund eines lokalen Schwachpunkts am Dammkörper eine Initialbresche aus. Durch das ausfliessende Wasser wird Material erodiert, und die Initialbresche tieft sich in der Folge bis auf die Fundation weiter ein. Anschliessend kommt es zu einer seitlichen Erosion der Bresche, wobei die seitlichen Böschungen stückweise kollabieren und in den Breschenkanal einstürzen können. Das Ausmass der lateralen Erosion und somit die Basisbreite im Endzustand hängen stark vom Stauvolumen ab. Im Endzustand resultiert in den meisten Fällen eine trapezförmige Breschenform (*Singh,* 1996). Im Falle eines Versagens durch innere Erosion bildet sich zuerst aufgrund einer lokalen Schwachstelle eine konzentrierte Sickerströmung aus. Kommt es dabei zu einer Auswaschung des Feinmaterials, kann sich eine Stromröhre ausbilden, deren Durchmesser kontinuierlich zunimmt. Die Abflüsse sind im Vergleich zum maximalen Breschenabfluss deutlich kleiner, und der Volumenverlust an Stauraum ist vernachlässigbar klein (*De Lorenzo & Macchione,* 2014). Ab einer gewissen Grösse der Stromröhre wird der Dammbereich instabil, und die Stromröhre stürzt in sich zusammen. Durch die plötzliche Setzung der Dammkrone bildet sich eine Initialbresche aus, und es kommt zu einer Überströmung des Dammkörpers. Der weitere Prozess ist mit dem Prozess der externen Erosion infolge Überströmung identisch, wobei jedoch die Stauhöhe zu Beginn der Überströmung nicht zwingend der maximalen Stauhöhe entsprechen muss.

1.3 Vorgehensweise

Die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich hat im Auftrag des Amtes für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) für den Kanton Zürich eine wissenschaftlich fundierte Methode erarbeitet, um den maximalen Breschenabfluss bei progressivem Bruch homogener Erdschüttdämme an kleinen Stauhaltungen abzuschätzen (Schritt 1 der Gefahrenbeurteilung nach Tab. 1, *VAW*, 2011).

In einem ersten Schritt wird die Sensitivität der verschiedenen Einflussgrössen mit dem numerischen 2D-Modell der Software *BASEMENT* (2014) aufgezeigt. Dieses wurde vorab an experimentellen Daten von Laborversuchen kalibriert und validiert (*Volz et al.*, 2010, *Volz,* 2013). Anhand der Sensitivitätsanalyse mit dem 2D-Modell werden die massgebenden Einflussgrössen identifiziert (z.B. das Stauvolumen). In einem zweiten Schritt wird mithilfe der Resultate der Sensitivitätsanalyse das vereinfachte und vom Rechenaufwand reduzierte Parametermodell

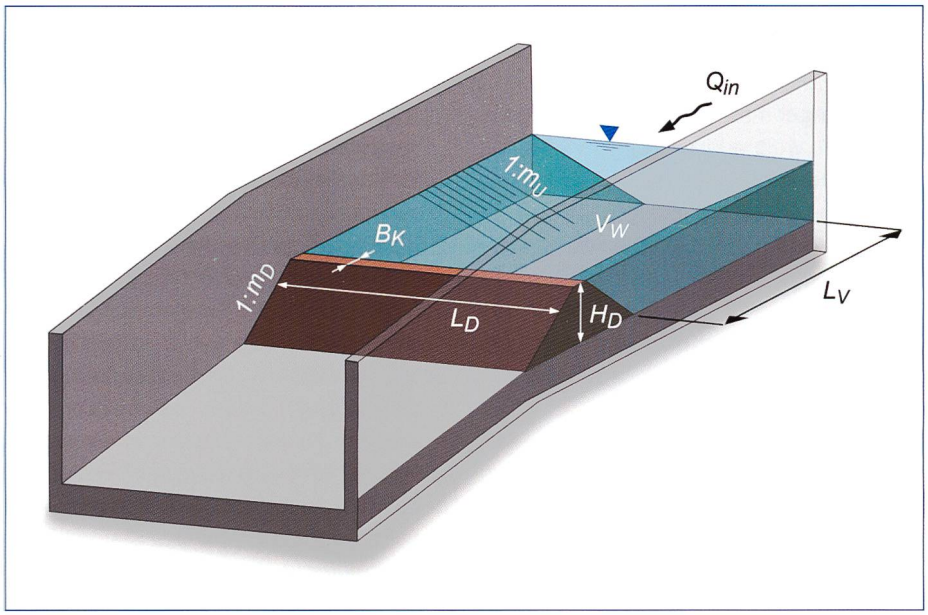

Bild 3. Definition der relevanten geometrischen Einflussgrössen.

BASEbreach kalibriert. Die Validierung erfolgt anhand von Prototypversuchen aus Norwegen (*IMPACT*, 2004).

Zum Schluss wird auf die Anwendungsgrenzen und die Erweiterungsmöglichkeiten des bestehenden Modells *BASEbreach* eingegangen. Zudem werden der aktuelle Forschungsbedarf und alternative Ansätze erwähnt.

2. Sensitivitätsanalyse mit 2D-Modell *BASEMENT*

Um die Sensitivität der für den Breschenbildungsprozess relevanten Parameter zu bestimmen, werden systematische Untersuchungen mit dem numerischen 2D-Modell *BASEMENT* (Index *BM*) durchgeführt (*VAW*, 2011). Folgende neun Parameter werden variiert (jeweils mit Angaben der Bandbreiten): Dammhöhe H_D (2 bis 8 m), Stauvolumen V_w (2000 bis 150 000 m^3), Dammkronenbreite B_K (1 bis 10 m), Dammböschungsneigung m_D (1.5 bis 4), Zufluss Q_{in} (0 bis 9 m^3/s), mittlerer Korndurchmesser d_m (1 bis 20 mm), Breschenböschungswinkel β_u (60 bis 80°), Grundrissform der Stauhaltung $L_D : L_V$ (1:5 bis 5:1), Neigung der Uferböschungen der Stauhaltung m_U (0 (senkrecht) bis 2, vgl. *Bild 3* und *Bild 5*). Der mit dem numerischen 2D-Modell *BASEMENT* berechnete maximale Breschenabfluss $Q_{B,max,BM}$ wird mit demjenigen einer Standardbresche (Index *SB*, $Q_{B,max,SB}$ gem. *Gleichung 1*) verglichen.

2.1 Einfluss des Stauvolumens

Der signifikante Einfluss des Stauvolumens V_w auf den maximalen Breschenabfluss $Q_{B,max}$ ist deutlich in *Bild 4* auszumachen. Für V_w = 150 000 m^3 resultiert ein rund 1.8 mal grösseres $Q_{B,max}$ als mit der Standardbresche, während $Q_{B,max}$ für kleine Stauvolumina mit der Standardbresche um mehr als einen Faktor 8 überschätzt wird. Mit der Standardbresche kann der Einfluss des Stauvolumens nicht ausreichend berücksichtigt werden. Dadurch wird bei kleinen Stauvolumina der Abfluss $Q_{B,max}$ tendenziell überschätzt. Hingegen wird der maximale Breschenabfluss bei grösseren Stauvolumina unterschätzt, und somit auch das Gefährdungspotenzial unterbewertet.

Wallner (2014) konnte anhand von experimentellen Laborversuchen ebenfalls einen grossen Einfluss des Stauvolumens auf den maximalen Breschenabfluss beobachten. Bei einer Verdopplung des Stauvolumens resultierten um 50 bis 76% erhöhte maximale Breschenabflüsse.

2.2 Einfluss der Dammgeometrie

Die Dammgeometrie (Dammhöhe H_D, Dammkronenbreite B_K, Dammböschungsneigung m_D, vgl. *Bild 3*) bestimmt das Dammvolumen. Je grösser das Dammvolumen, desto mehr Material muss während des Erosionsprozesses abgetragen werden. Ein grösseres Dammvolumen hat in der Regel einen kleineren maximalen Breschenabfluss zur Folge. Der Einfluss der Dammhöhe H_D auf $Q_{B,max}$ ist bei einem progressiven Bruch mit dem numerischen Modell deutlich kleiner als bei Annahme einer Standardbresche *(Bild 4)*. Bei einer Verdoppelung der Dammhöhe ist das Dammvolumen, welches bei der Breschenbildung im numerischen Modell erodiert werden muss, rund 3.5-mal grösser. Während der Ausbildung der Bresche sinkt die Stauhöhe h_w, was den maximalen Breschenabfluss $Q_{B,max}$ limitiert. Die Standardbresche geht von einem plötzlichen Bruch aus und berücksichtigt solche Einflüsse nicht.

2.2 Einfluss des Zuflusses

Die Simulation von Lastfällen mit und ohne

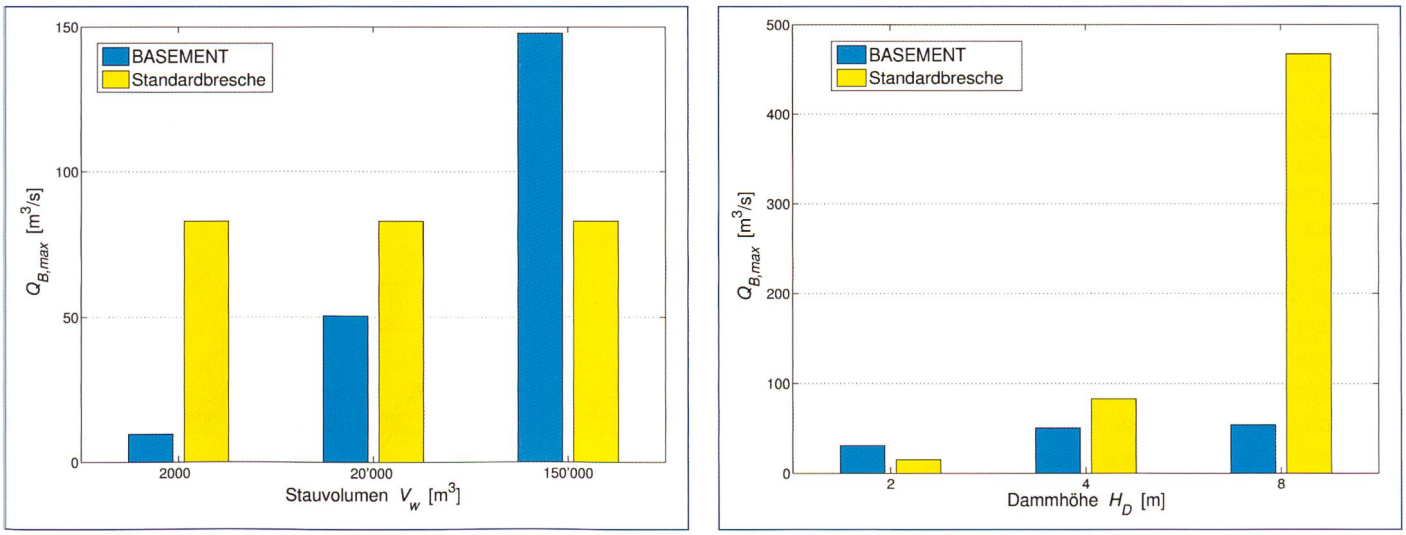

Bild 4. Einfluss des Stauvolumens V_w (links) und der Dammhöhe H_D (rechts) auf den maximalen Breschenabfluss $Q_{B,max}$ in der numerischen Untersuchung mit BASEMENT im Vergleich zum Ansatz mit Standardbresche.

Zufluss Q_{in} zeigt, dass der maximale Breschenabfluss $Q_{B,max}$ um rund die Hälfte des Zuflusses zunimmt. Die Retentionswirkung dämpft somit bei den hier betrachteten kleinen Stauanlagen nicht den ganzen Zufluss. Der Zufluss Q_{in} in einen Speicher beeinflusst das vorhandene Volumen. Während eines Dammbruchereignisses kann sich das Absenken des Wasserspiegels dadurch deutlich verlangsamen. Der maximale Breschenabfluss wird in einem solchen Fall grösser ausfallen im Vergleich zum Fall ohne Zufluss.

2.4 Einfluss der Speicherform

Die Variation der Uferböschungen der Stauhaltung von $m_U = 0$ (senkrecht) auf eine Neigung von $m_U = 2$ (vgl. *Bild 3*) bewirkt einen leichten Anstieg von $Q_{B,max}$ für die mittleren und grossen betrachteten Stauvolumina. Für kleine Stauvolumina beträgt der prozentuale Anstieg von $Q_{B,max}$ rund 30%. Für die weiteren numerischen Untersuchungen wurden die Uferböschungen im Reservoir mit $m_U = 2$ angesetzt. *Wallner* (2014) beobachtete in seinen Laborversuchen einen grossen Einfluss der Speicherform auf den maximalen Breschenabfluss mit Unterschieden von 40 bis 60%.

Das Verhältnis der Länge des Dammkörpers (an der Krone) zur Länge der Stauhaltung $L_D : L_V$ (vgl. *Bild 3*) wirkt sich nur schwach auf den maximalen Breschenabfluss $Q_{B,max}$ aus. Für den langen Damm mit kurzer Reservoirlänge ($L_D : L_V = 5:1$) resultiert ein um nur rund 0.5 m^3/s (ca. 1%) grösseres $Q_{B,max}$ als für $L_D : L_V = 1:5$. In der numerischen Untersuchung der kleinen Anlagen des Kantons Zürich wurde deshalb nicht weiter auf die Grundrissform eingegangen und $L_D : L_V = 1:1.5$ verwendet.

2.5 Zusammenfassung Sensitivitätsanalyse

In Tabelle 2 sind die variierten Parameter und deren Sensitivität als Verhältnis der berechneten maximalen Breschenabflüsse dargestellt. Dabei wird deutlich, dass unter Annahme einer Standardbresche ausschliesslich die Dammhöhe eine Rolle spielt, was aufgrund der Formulierung (vgl. *Gleichung 1*) verständlich ist. Hingegen sind beim numerischen Modell drei Parametergruppen zu erkennen. Für die untersuchten Szenarien hat das Stauvolumen den grössten Einfluss (Gruppe 1, rot in *Tabelle 2*). Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich bei grossen Stauvolumina der Wasserspiegel nur langsam absenkt und sich je nach Dammgeometrie eine Bresche ausbildet, die deutlich grösser als die Standardbreche ist. In der Terminologie der Standardbresche bedeutet dies $B_B >> 2\ h_w$. Den zweitgrössten Einfluss hat die Dammgeometrie (Gruppe 2, orange in *Tabelle 2*), welche durch die Dammhöhe, die Dammkronenbreite und die Dammböschungsneigung bestimmt wird. Die weiteren Parameter haben nur einen vergleichsweise geringen Einfluss (Gruppe 3).

3. Parametermodell *BASEbreach*

3.1 Modellgrundlagen

Als Grundlage für das in *BASEbreach* (Index *BB*) implementierte Parametermodell wird der Ansatz nach *Macchione* (2008) und *Macchione* & *Rino* (2008) verwendet. Dieser geht davon aus, dass sich in einer ersten Phase die Bresche bis zum Erreichen des natürlichen Untergrunds dreiecksförmig ausbreitet. In einer zweiten Phase schreitet die seitliche Ausbreitung trapezförmig fort *(Bild 5)*. Dabei wird das Dreieck unter dem natürlichen Untergrund nicht mehr berücksichtigt, da von nichterodierbarer Fundation ausgegangen wird. Der dynamische Vorgang wird durch Differenzialgleichungen für den Wasserpegel z_w und die Breschenkote z_b (Details siehe *Macchione,* 2008) beschrieben. Um die Berechnung zu vereinfachen, wurde dieser Ansatz in der Software *BASEbreach* umgesetzt und um die Möglichkeit zur Berücksichtigung des Zuflusses in das Reservoir erweitert. Die Speicherinhaltslinie (Beziehung von Stauvolumen zu Stauhöhe) wird nach *Gleichung 2* berücksichtigt. Entsprechend wird das Stauvolumen V_w ausgedrückt als

$$V_w = b_0 z_w^{\alpha_0} \qquad (2)$$

Parameter	Num. 2D-Modell $max(Q_{B,max,BM,}) / min(Q_{B,max,BM})$	Standardbresche $max(Q_{B,max,SB}) / min(Q_{B,max,SB})$
Stauvolumen V_w	15.2	1.0
Dammhöhe H_D	1.8	31.1
Dammkronenbreite B_K	1.6	1.0
Dammböschungsneigung m_D	1.55	1.0
Uferböschungen im Reservoir m_U	1.05-1.3	1.0
Korndurchmesser d_m	1.08	1.0
Zufluss Q_{in}	1.05	1.0
Breschenböschungswinkel β_u	1.03	1.0
Grundrissform der Stauhaltung L_D:L_V	1.02	1.0

Tabelle 2. Sensitivität der Parameter im Vergleich zwischen dem numerischen 2D-Modell und bei Annahme einer Standardbresche. Grosser Einfluss: Gruppe 1 (rot), mittlerer Einfluss: Gruppe 2 (orange), geringer Einfluss: Gruppe 3 (weiss).

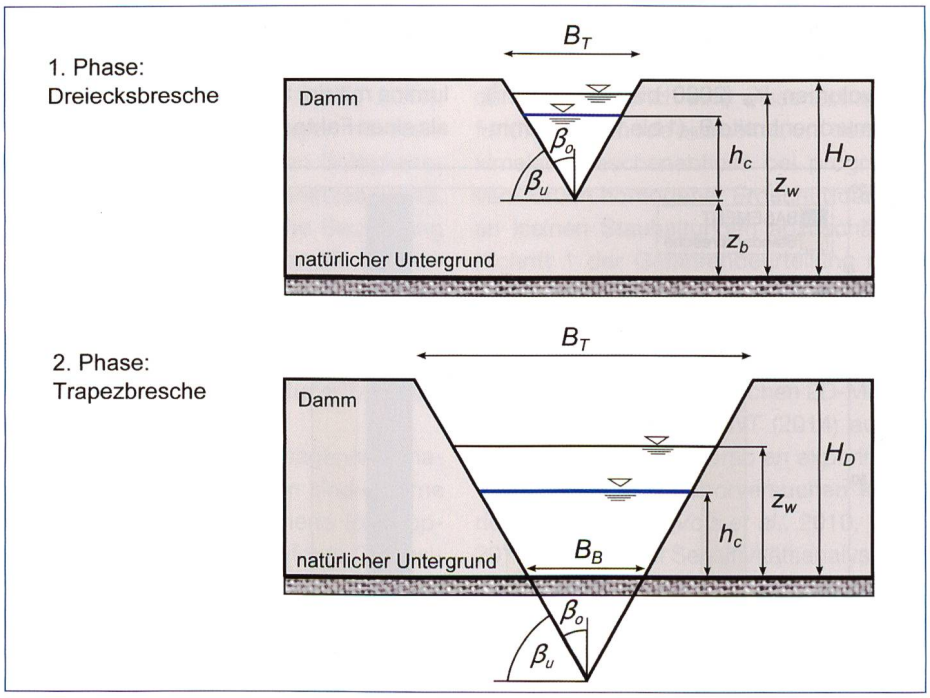

Bild 5. Breschenentwicklung im Parametermodel BASEbreach, adaptiert nach Macchione (2008).

wobei z_w die aktuelle Stauhöhe über dem Taltiefsten, V_w das dazugehörige Stauvolumensowie α_0 und b_0 Parameter darstellen. Die Form des Speicherbeckens wird mit dem Exponenten α_0 charakterisiert ($1 \leq \alpha_0 \leq 4$; *Kühne,* 1978). Für quaderförmige Speicherbecken gilt $\alpha_0 = 1$, für V-förmige Speicherbecken liegt der Exponent α_0 im oberen Wertebereich. Speicherbecken mit grösseren Exponenten α_0 weisen im unteren Bereich des Speicherbeckens näher beieinanderliegende Höhenkurven auf. Die entsprechenden Werte für b_0 sind immer im Zusammenhang mit dem Exponenten α_0 zu betrachten und können je nach Speicherbecken stark variieren ($1 \leq b_0 \leq 106$; *Kühne,* 1978). Bei Speicherbecken mit gleichem Exponent α_0 und unterschiedlichen Werten für b_0 kann auf die Seeoberflächenausdehnung geschlossen werden. Speicherbecken mit grösseren b_0-Werten weisen bei gleicher Stauhöhe z_w eine grössere Seeoberfläche auf.

Die Neigung der Breschenböschung wird über den Breschenböschungswinkel $\beta_o = 90° - \beta_u$ vorgegeben. In der Bresche wird von der kritischen Abflusstiefe h_c ausgegangen. Haupteingabegrössen sind das Stauvolumen V_w, die Dammhöhe H_D, die Dammkronenbreite B_K, die Dammböschungsneigung m_D und der Zufluss Q_{in}. Mit dem Kalibrierungsparameter v_e als Mass für die Erosionsgeschwindigkeit wird das Parametermodell anhand der numerischen Resultate der BASEMENT-Berechnungen kalibriert. Dabei wird der Parameter v_e so gewählt, dass sich die gleichen maximalen Breschenabflüsse $Q_{B,max}$ einstellen wie sie mit dem numerischen 2D-Modell erhalten wurden. Die Talform wird hierbei entsprechend *Gleichung 2* berücksichtigt und so gewählt, dass die Speicherinhaltslinie der Topographie im numerischen 2D-Modell entspricht (wasserseitige Dammböschung $m_D = 2$ und Uferböschungen im Reservoir $m_U = 2$ in *Bild 3*). Daraus ergeben sich Werte für α_0 zwischen 1 und 2.

Die Validierung von Dammbruchmodellen ist generell schwierig, da oft die Datengrundlage dazu lückenhaft oder ungenügend ist. Prototypversuche aus Norwegen (*IMPACT,* 2004) sind aufgrund der Dammhöhen, Stauvolumina, Dammkronenbreiten und Dammböschungsneigungen vergleichbar mit den kleinen Stauhaltungen im Kanton Zürich. Ein grosser Nachteil für diesen Vergleich ist jedoch, dass in den Prototypversuchen grosse und stark instationäre Zuflüsse zugegeben wurden. Damit sollte ein schnelles Absinken des Wasserspiegels verhindert werden. Die Versuche sind aufgrund der grossen Zuflüsse nur bedingt geeignet für eine Validierung des Parametermodells. Die grossen Zuflüsse können beim Parametermodell zu einer physikalisch, nicht plausiblen Speicherung von Wasser und einem miteinhergehenden Anstieg des Wasserspiegels über die Dammkote kommen, ohne dass eine Entlastung über den Damm stattfindet. Trotz den erwähnten Vorbehalten zeigte eine Validierung anhand der Prototypversuche aus Norwegen (*IMPACT,* 2004), dass mit dem Parametermodell *BASEbreach* die Prototyp-Verhältnisse besser abgebildet werden als mit der Annahme einer Standardbresche (*VAW,* 2011).

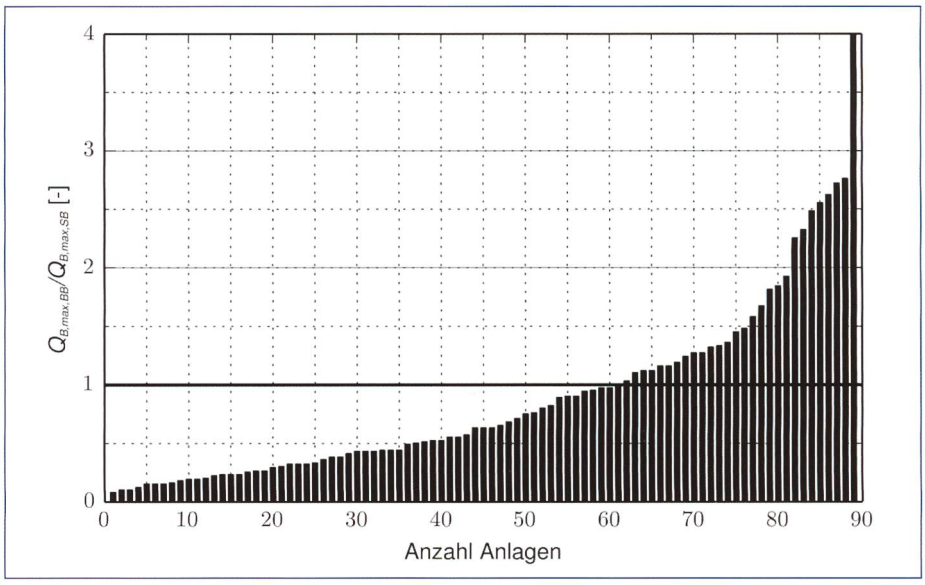

Bild 6. Veränderungsfaktor ($Q_{B,max,BB}$ / $Q_{B,max,SB}$) des maximalen Breschenabflusses nach BASEbreach ($Q_{B,max,BB}$) im Vergleich zum maximalen Breschenabfluss nach der Standardbresche ($Q_{B,max,SB}$).

3.2 Resultate und Anwendungsbereich

Das Parametermodell *BASEbreach* wurde für die Beurteilung des Breschenabflusses bei progressivem Bruch von homogenen Schüttdämmen erstellt und für die Verhältnisse im Kanton Zürich kalibriert. Dabei wurden die Werte für den Kalibrierungsparameter *ve* anhand des Vergleichs mit den numerischen 2D-Modellberechnungen ermittelt. Mit dem kalibrierten Parametermodell wurden 89 relevante Stauanlagen im Kanton Zürich untersucht (vgl. *Bild 6*). Einerseits fällt auf, dass bei rund 40% der Stauanlagen der maximale Breschenabfluss im Vergleich zur Standardbresche deutlich geringer ausfällt (Veränderungsfaktor $Q_{B,max,BB}/Q_{B,max,SB} < 0.5$) und im Extremfall nur ein Zehntel beträgt. Anderseits zeigt sich für rund 10% der Stauanlagen ein im Vergleich zur Standardbresche deutlich erhöhter maximaler Breschenabfluss (Veränderungsfaktor $Q_{B,max,BB}/Q_{B,max,SB} > 2.0$), der im Extremfall bis zum Vierfachen beträgt. Bei rund 50% der Stauanlagen ergeben beide Ansätze Resultate in der gleichen Grössenordnung (Veränderungsfaktor $0.5 \leq Q_{B,max,BB}/Q_{B,max,SB} \leq 2.0$).

Charakteristisch für die resultierende Endbresche ist das Verhältnis der Breschenbreite an der Basis B_B zur Dammhöhe H_D (B_B/H_D, vgl. *Bild 5*). *Wahl* (1998) gibt dafür einen zu erwartenden Wertebereich von 2 bis 5 an, zeigt aber einen Streubereich von 1 bis 18 auf. In den verwendeten Validierungsfällen der Parametermodelle von *Macchione* (2008) und *Wu* (2013) liegt das Verhältnis B_B/H_D in einem Bereich von 0.2 bis 19.2. Bei den numerischen Simulationen mit *BASEMENT* bzw. *BASEbreach* liegt das Verhältnis zwischen 1 und 15 bzw. 0.5 und 16. Die grösseren Werte resultieren in den Fällen mit grossen Stauvolumina und kleinen Dammhöhen. In diesen Fällen wird der natürliche Untergrund durch die vertikale Erosion schnell erreicht. Die weitere Erosion findet in lateraler Richtung statt. Für die modellierten homogenen Dämme ist dieses Verhalten grundsätzlich plausibel. Solange der Wasserspiegel im See hoch ist, schreitet die laterale Erosion voran. Ein anderes Abbruchkriterium für die laterale Aufweitung existiert derzeit nicht.

Der Anwendungsbereich des für die kleinen Dämme im Kanton Zürich erstellten und kalibrierten Parametermodells *BASEbreach* ist in *Tabelle 3* zusammengefasst. Ausserhalb dieser Anwendungsgrenzen meldet die Software *BASEbreach* eine Warnung. Für solche Fälle empfehlen sich weitere Untersuchungen, wie z.B. mit

Parameter	Anwendungsbereich
Stauvolumen V_w	500 - 200'000 m^3
Dammhöhe H_D	1 - 10 m
Dammkronenbreite B_K	0.5 - 12 m
Dammböschungsneigung 1: m_D*	1:1.2 - 1:4
Hochwasserzufluss Q_{in}	0 - 25 m^3/s
Talform (α_0-Wert)	1 - 2

* Bei unterschiedlichen Neigungen der Wasser- und Luftseite ist der Mittelwert zu wählen.

Tabelle 3. Anwendungsgrenzen des Parametermodells BASEbreach für 89 untersuchte homogene Schüttdämme im Kanton Zürich.

einem numerischen 2D-Modell. Zudem sind Sensitivitätsanalysen und Vergleiche mit anderen Ansätzen zur Abschätzung des maximalen Breschenabflusses sinnvoll, um die Plausibilität der Resultate beurteilen zu können. Die Software *BASEbreach* ist unter www.basement.ethz.ch/services/Tools frei erhältlich.

4. Schlussfolgerungen

Die hier vorgestellte Vorgehensweise zur Berechnung des maximalen Breschenabflusses bei homogenen Schüttdämmen ist eine Alternative zum Ansatz mit Standardbresche. Dabei ist das vorrangige Ziel, den Dammbruchprozess progressiv und dadurch realitätsgetreuer abzubilden. Dazu wurden mit einem numerischen 2D-Modell die Sensitivität der verschiedenen Parameter ermittelt sowie die maximalen Breschenabflüsse für unterschiedliche Dammgeometrien und Speichervolumen berechnet. Die Untersuchungen zeigen, dass der massgebende Parameter für den maximalen Breschenabfluss bei einem progressiven Versagensvorgang das Stauvolumen ist und nicht wie bis anhin, bei der Standardbresche, die Dammhöhe. Diejenigen Parameter, welche die Dammgeometrie beschreiben, sind ebenfalls bedeutsam, wenngleich in geringerem Masse (vgl. *Tabelle 1*).

Beim Parametermodell *BASEbreach* wird der Breschenabfluss vereinfacht berechnet, wobei die Speicherinhaltslinie und die Erosionsrate die wichtigsten Grössen sind. Letztere ist die massgebende Kalibrierungsgrösse, die anhand der Berechnungen mit dem numerischen 2D-Modell für die Verhältnisse bei kleinen Dämmen im Kanton Zürich bestimmt wurde. Das kalibrierte Modell konnte erfolgreich mit Prototypversuchen validiert werden. Unter Einhaltung des vorgesehenen Anwendungsbereichs können plausible Abschätzungen für den maximalen Breschenabfluss gemacht werden. Für eine allgemeinere Anwendung sind jedoch weitere Abklärungen notwendig. Insbesondere die Erweiterung des Anwendungsbereichs für den Hochwasserzufluss und die Talform bedarf einer weiteren, vertieften Untersuchung (siehe Abschnitt 5).

Die Unsicherheiten bei der Dammbruchmodellierung und damit bei der Prognose des maximalen Breschenabflusses sind im Allgemeinen gross und unterschiedlicher Natur. Der Ursprung der bestehenden Unsicherheiten liegt einerseits in dem nach wie vor lückenhaften Verständnis der bei einem Dammbruch stattfindenden Vorgänge. Grosse Unsicherheiten bestehen zum Beispiel bei der Erosionsrate, insbesondere im Falle kohäsiver Dammmaterialien. Anderseits gibt es Modellunsicherheiten aufgrund von Annahmen und Vereinfachungen bezüglich der Modellgleichungen. Hinzu kommen Unsicherheiten bei den Eingangsgrössen aufgrund von teilweise fehlenden Informationen. Im Falle von kleinen Stauhaltungen sind dies z.B. der Dammaufbau oder die Speicherinhaltslinie.

5. Weiterentwicklung von *BASEbreach*

Im Hinblick auf eine allgemeine Anwendung des Parametermodells ist die Möglichkeit zur Variation aller relevanten Parameter ein wichtiger Aspekt. Dabei geht es vor allem um die Speicherinhaltslinie (angenähert durch *Gleichung 2* mit den Parametern α_0 und b_0) in Abhängigkeit der Talform und den Kalibrierungsparameter v_e, die aufgrund der Kalibrierung für den Kanton Zürich in der derzeitigen Version der Software *BASEbreach* vorgegeben werden.

5.1 Tal-/Speicherform

Der Einfluss der Tal- bzw. Speicherform wurde auf kleine Stauanlagen im Kanton Zürich abgestimmt, d.h. $a_0 \leq 2$ nach *Gleichung 2*. Im Hinblick auf eine Erweiterung des Anwendungsbereichs des Parametermodells und unter Berücksichtigung der neuesten Erkenntnisse von *Wallner* (2014) sind auch Talformen mit Werten $a_0 > 2$, wie etwa für V-Täler, näher zu untersuchen.

5.2 Erosionsrate

Die Erosionsrate spielt sowohl für numerische Modelle als auch für Parametermodelle eine wichtige Rolle. In den meisten Fällen ist dies eine wichtige Kalibrierungsgrösse. Beim verwendeten Parametermodell nach *Macchione,* (2008) ist die Erosionsrate eine Funktion des Parameters v_e (Einheit: [m/s]). Für eine allgemeine Anwendung des Parametermodells erscheint eine vertiefte Untersuchung der Sensitivität des Parameters *ve* sinnvoll. Dabei sollen Abhängigkeiten von anderen Einflussgrössen genauer untersucht werden, z.B. von der kritischen Breschenabflusstiefe oder der Dammgeometrie. Zudem soll die seitliche Breschenentwicklung bei Erreichen der Widerlager abgebrochen werden.

5.3 Hochwasserzufluss

In der aktuellen Version des Parametermodells *BASEbreach* resultiert infolge eines Hochwasserzuflusses eine Zunahme des Stauvolumens und der Staukote. Bei grossen Zuflüssen zusammen mit einem bereits vollen Stauraum kann es vorkommen, dass die Staukote über der Dammkote zu liegen kommt. Bei einer deutlichen Überschreitung der Dammkote resultiert ein unrealistisches Modellverhalten. Aus diesem Grund können in der aktuellen Version des Parametermodells *BASEbreach* keine beliebig grossen Zuflüsse berücksichtigt werden. Eine sinnvolle Modellerweiterung besteht darin, Annahmen darüber zu treffen, was mit dem überschüssigen Wasser passiert. Soll es z.B. über eine Hochwasserentlastung abfliessen oder dem Breschenabfluss teilweise oder ganz dazugeschlagen werden? Für eine Erweiterung des Anwendungsbereichs ist der Einfluss von Hochwasserzuflüssen noch genauer zu untersuchen.

5.4 Versagensmechanismus

Das Versagen durch innere Erosion unterscheidet sich vom Versagen durch Überströmung vor allem in der Anfangsphase. Nach dem Kollabieren der Stromröhre und der Ausbildung einer lokal abgesenkten Dammkrone, die daraufhin überströmt wird, sind die beiden Prozesse nahezu identisch. Das Versagen durch innere Erosion kann durch Annahme einer grösseren Initialbresche berücksichtigt werden. Im Falle des Parametermodells nach *Macchione* (2008) schlagen *De Lorenzo* & *Macchione* (2014) als Initialbresche eine maximal grosse Dreiecksbresche bis auf den Untergrund vor, d.h. $B_B = z_b = 0$ nach *Bild 5*. Im Fall eines Versagens durch innere Erosion kann das Reservoir auch nur teilgefüllt sein. Um den Vergleich mit ande-

ren Modellen zu ermöglichen, sollen auch andere Ansätze berücksichtigt werden, wie z.B. derjenige von *Wu,* (2013). Letzterer berücksichtigt die innere Erosion mit einem vereinfachten Ansatz für die Rohrströmung, für die Erosion in der Stromröhre, für den Kollaps der Stromröhre und für den Übergang zum Prozess des Versagens infolge Überströmung.

5.5 Dammmaterial

Hinsichtlich des Versagensvorgangs sind ebenfalls der Dammaufbau und die Eigenschaften des Schüttmaterials von Bedeutung. Der Erosionsprozess kann sich für kohäsionslose Schüttdämme, kohäsive Schüttdämme und Dämme mit Dichtung stark unterscheiden (*ASCE/EWRI Task Committee,* 2011). Bei nichtkohäsiven Schüttdämmen kommt es eher zu einer progressiven Oberflächenerosion von der Dammkrone in Richtung Dammfuss. Dagegen kann sich im Falle von kohäsivem Material auf der luftseitigen Dammböschung ein annähernd vertikaler Knickpunkt bilden, welcher kontinuierlich vom Dammfuss nach oben wandert (headcut erosion). In einer weiterführenden Untersuchung sollten diese Aspekte berücksichtigt werden.

5.6 Unsicherheiten

Das vorgestellte Vorgehen basiert auf deterministischen Modellansätzen. Sowohl die Modell- als auch die Parameterunsicherheiten wurden identifiziert, jedoch nicht quantifiziert. Die Bestimmung der Resultatgüte, d.h. die Beurteilung der in den Resultaten enthaltenen Unsicherheit, ist demnach nicht möglich. Eine wichtige Ergänzung der deterministischen Ansätze ist daher der Einsatz von probabilistischen Dammbruchmodellen. Darin werden alle Unsicherheiten quantifiziert und die resultierenden Breschendurchflüsse werden mit Auftretenswahrscheinlichkeiten charakterisiert. Aktuell werden an der VAW im Rahmen einer Forschungsarbeit die verschiedenen Unsicherheiten bei der Gefahrenbeurteilung infolge von Dammbrüchen mit einem probabilistischen Ansatz untersucht (*Peter et al.*, 2014). Daraus sollen probabilistische Überflutungskarten resultieren, mit welchem das besondere Schadenspotenzial bei Dammbrüchen abgeschätzt werden kann.

Danksagung

Das Projekt wurde im Auftrag des Amtes für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) des Kantons Zürich durchgeführt. Die verwendete Software *BASEMENT* wird durch das Bundesamt für Umwelt (BAFU) finanziell unterstützt und ist frei erhältlich unter www.basement.ethz.ch.

Literaturverzeichnis

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

BASEMENT – Basic Simulation Environment for Computation of Environmental Flow and Natural Hazard Simulation (2014). Version 2.4 © VAW, ETH Zürich, Vetsch D., Rousselot P., Volz C, Vonwiller L., Peter S., Ehrbar D., Gerber M., Faeh R., Farshi D., Mueller R., Veprek R., 2006-2014.

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

BFE, Bundesamt für Energie (2014b). Vereinfachtes Verfahren zur Berechnung einer Flutwelle mit primär eindimensionaler Ausbreitung (Verfahren «CTGREF»), BFE-Hilfsmittel, online erhältlich unter: www.bfe.admin.ch/themen/00490/00491/00494/06180/index.html?lang=de.

BFE, Bundesamt für Energie (2014c). Diagramme zur Bestimmung der flächigen Ausbreitung von Breschenabflüssen (Verfahren «Beffa»), BFE-Hilfsmittel, online erhältlich unter: www.bfe.admin.ch/themen/00490/00491/00494/06180/index.html?lang=de.

BWG, Bundesamt für Wasser und Geologie (2002). Sicherheit der Stauanlagen – Basisdokument zu den Unterstellungskriterien, Version 1.1, Anhang II: Vereinfachtes Verfahren zur Berechnung einer Dammbruchflutwelle (Verfahren «CTGREF»), Biel.

De Lorenzo, G., Macchione F. (2014). Formulas for the Peak Discharge from Breached Earthfill Dams. Journal of Hydraulic Engineering, 140(1) 56–67.

IMPACT (2004). Breach formation (WP 2). Technical Report, online erhältlich unter: www.impact-project.net/wp2_technical.htm.

Kühne, A. (1978). Charakteristische Kenngrössen Schweizerischer Speicherseen. Geographica Helvetica, 33(4), 191–199.

Macchione, F. (2008). Model for predicting floods due to earthen dam breaching. I: Formulation and evaluation. Journal of Hydraulic Engineering, 134(12), 1688–1696.

Macchione, F., Rino, A. (2008). Model for predicting floods due to earthen dam breaching. II: Comparison with other methods and predictive use. Journal of Hydraulic Engineering, 134(12), 1697–1707.

Peter, S.J., Siviglia, A., Boes, R.M. (2014). Unsicherheiten bei der Modellierung von Erddammbrüchen und deren Auswirkung auf die Flutwellenberechnung. Tagungsband Internationales Symposium «Wasser- und Flussbau im Alpenraum», VAW-Mitteilung 228 (R. Boes, ed.), ETH Zürich: 715–724.

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, Stand am 17. Oktober 2012.

VAW (2011). Breschenbildung an Dämmen kleiner Stauanlagen im Kanton Zürich – Numerische Simulation zur Beurteilung des Breschenabflusses bei progressiven Dammbrüchen. VAW-Bericht Nr. 4289, ETH Zürich.

Volz, C., Rousselot, P., Vetsch, D., Mueller, R., Faeh, R., Boes, R. (2010). Numerical Modeling of dam breaching processes due to overtopping flow. Proc. 8th ICOLD European Club Symposium, Innsbruck.

Volz, C. (2013). Numerical Simulation of Embankment Breaching Due to Overtopping. VAW-Mitteilung Nr. 222 (R. Boes, ed.), VAW, ETH Zürich.

Wu, W. (2013). Simplified Physically Based Model of Earthen Embankment Breaching. Journal of Hydraulic Engineering, 139(8), 837–851.

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, Technische Universität Wien.

Anschrift der Verfasser

Lukas Vonwiller, Dr. *David Vetsch*, *Samuel Peter*, Prof. Dr. *Robert Boes*, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.
vonwiller@vaw.baug.ethz.ch
www.vaw.ethz.ch