

Risiken, die von Stauanlagen ausgehen

Reinhard Pohl, Antje Bornschein

Eigentümer und Betreiber von Anlagen mit einem großen Gefahrenpotenzial sind gehalten, den zuständigen Behörden Auskunft über mögliche Folgen eines Störfalles zu erteilen. Für den unwahrscheinlichen Fall des Bruches eines Absperrbauwerkes können diesbezügliche Informationen erarbeitet werden.

1. Einführung

Talsperren sind Ingenieurbauwerke, deren Gefahrenpotenzial von der Öffentlichkeit, besonders aber von den Unterliegern, häufig kritisch hinterfragt wird.

Statistisch ist zwar nachgewiesen, dass die Wahrscheinlichkeit, als Unterlieger einer Talsperre zu Schaden zu kommen, viel geringer ist, als z. B. die Unfallgefahr in Verkehrsmitteln. Dennoch ist es gerechtfertigt und notwendig, mögliche Risiken abzuschätzen und diese auf ein gesellschaftlich vertretbares Maß zu reduzieren. Gleichzeitig ermöglichen Untersuchungen über mögliche Folgeschäden eine Früherkennung, das Ergreifen erforderlicher Gegenmaßnahmen und eine zielgerichtete Hilfe im Schadensfall.

Vor diesem Hintergrund ist auch die Untersuchung der Ausbreitung von Flutwellen durch einen hypothetischen Talsperrenbruch zu sehen.

Seit dem 11. September 2001 tritt ein schon fast vergessener Aspekt wieder ins Blickfeld: die absichtliche Zerstörung von technischen Einrichtungen mit großem Schadenspotenzial durch terroristische Anschläge und kriegerische Handlungen.

Lange Zeit wurde in Deutschland die Frage möglicher Risiken durch Stauanlagen auch im Kreis von Fachleuten nur zurückhaltend diskutiert. Es galt die verbreitete Meinung, dass die Talsperren „nach menschlichem Ermessen sicher“ sind, was natürlich richtig ist, wenn man das hinter dieser Formulierung verborgene Restrisiko erkennt. Falsch wäre es, eine 100-prozentige Sicherheit zu erwarten. Mit

den beiden Hochwasserbemessungsfällen und dem Hinweis auf das Restrisiko im Zusammenhang mit dem Sicherheitsfreibord wurde mit der Stauanlagennorm DIN 19700 (2004) ein erster Schritt zu einer risikobasierten Betrachtung und Bemessung von Stauanlagen gegangen.

2. Risiko und Öffentlichkeit

Verschiedentlich wird die Versagenswahrscheinlichkeit selbst als Risiko bezeichnet [1]. Aber in der Regel wird das Risiko als Produkt aus der Versagenswahrscheinlichkeit P und den Versagenskonsequenzen (vielfach dem monetären Schaden) C berechnet. Dies bringt jedoch ein mathematisches Problem mit sich, weil bei sehr seltenen (unwahrscheinlichen) Ereignissen mit hohen Schäden eine sehr kleine mit einer sehr großen Zahl multipliziert werden muss (Null-mal-Unendlich-Problem). In diesem sehr unwahrscheinlichen Bereich des Restrisikos bewegen sich auch die Bruchuntersuchungen an Talsperren.

Seit ungefähr einer Dekade sind die für den Katastrophenschutz erforderlichen Maßnahmen in den Brand- und Katastrophenschutzgesetzen der deutschen Bundesländer verankert. Die Betreiber von gefährlichen Anlagen sind darin verpflichtet, gegenüber den zuständigen Katastrophenschutzbehörden Auskünfte bezüglich der Risiken zu erteilen, die von ihren Anlagen ausgehen könnten. Die allgemeine Rechtsauffassung scheint sich dahingehend zu entwickeln, dass hierunter nicht nur kerntechnische oder Che-

mieanlagen, sondern auch Talsperren, große Deiche und Staustufen zu verstehen sind. So entspricht es bereits der geübten Praxis, dass Betreiber von Stauanlagen für ihre Anlagen hypothetische Bruchszenarien, die Brechenentwicklung und die Ausbreitung des freigegebenen Stauinhaltes untersuchen lassen.

In vielen Ländern der Welt sind Bruch- und Überflutungsanalysen für Talsperren vorgeschrieben oder durch Richtlinien angeraten. Diese resultieren teilweise aus Erfahrungen mit derartigen Schadensfällen, wie z. B. in Spanien, wo seit dem 18. Jh. die Talsperre Puentes mehrfach brach [2]. In fast allen genannten Ländern gibt es auch Notfallpläne und in einigen Ländern Alarm- bzw. Frühwarnsysteme [3].

3. Hypothetischer Bruch

Flutwellen, die durch den Bruch von Talsperren ausgelöst werden, sind seit langem dokumentiert (z. B. [4, 5]) und sind Gegenstand von wissenschaftlichen Untersuchungen. So wurden bereits 1937 im Hubert-Engels-Labor der TU Dresden Dammbbruchuntersuchungen durchgeführt. Solche Forschungen erfuhren nach Schadensfällen (z. B. dem Bruch der Staumauer Malpasset, Frankreich) stets einen gewissen zeitweiligen Aufschwung. Dennoch gibt es bis heute noch nicht vollständig erforschte Probleme wie z. B. den zeitlichen Verlauf des bei Dämmen und Mauern unterschiedlichen Bruchverhaltens. Als Ausgangsszenarien werden in verschiedenen Ländern der Normalfall (Stauziel, Mittelwasserzufluss) und der Hochwasserfall (Höchststau oder Überströmung) angesetzt.

Der Bruch eines Staudammes kann durch Sickeröhrenbildung und innere Erosion (piping) oder durch das Überströmen des Dammes (overtopping), seltener durch andere *Einwirkungen* wie Setzungsfließen ausgelöst werden.

Nach dieser Initialwirkung setzt dann in der Regel ein rückschreitender Erosionsprozess ein. Die dadurch entstehende Bresche hat während des Ausflussvorganges oft eine nahezu rechteckige Form, die durch weitere Materialumlagerungen nach Ende des Ausflusses meist in eine trapezförmige Bresche bis zur Talsohle übergeht [6]. Die Berechnungsgrundlagen, bodenmechanische Modelle und numerische Verfahren zur Beschreibung dieser Vorgänge sind noch Gegenstand der Forschung. So ergaben Nachrechnungen für den 1982 gebrochenen spanischen Staudamm Tons unter Nutzung bodenmechanischer Modelle Abweichungen beim Ausflussscheitel von 50 %. Selbst bei Feld- und Laboruntersuchungen betrug dieser Fehler noch 30 % [6].

Für Steinschüttdämme existieren wenige experimentelle Untersuchungen, z. B. [6]. Charakteristisch sind hier eine plötzlich einsetzende starke Erosion und Böschungsbruch im mittleren Bereich auf der Luftseite, wonach der Kronenbereich nachrutscht. Die wenigen Untersuchungen zum Einfluss von Einbauten und Dammkernen deuten auf eine schnellere Erosion hinter dem Hindernis hin, weil sich dort eine Zone höherer Turbulenz bilden kann.

Vielfach üblich ist trotz der sehr begrenzten Datengrundlage die Bestimmung des maximalen Durchflusses durch die statistische Auswertung bisheriger Talsperrenbrüche, z. B. [7].

Der Bruch einer Staumauer wird meist als nahezu plötzliches Versagen innerhalb von wenigen Minuten betrachtet, wonach die Bresche keiner weiteren zeitlichen Veränderung mehr unterliegt. Typische Versagensursachen sind eine unzureichende Gleit- oder Kippsicherheit. Im ersten Fall werden die gesamte Mauer, einzelne Mauerteile oder einzelne Mauerteile (z. B. Pfropfen bei der Talsperre Puentes, Spanien) weggeschoben. Im zweiten Fall können einzelne Felder (TS St. Francis, USA) oder die gesamte Mauer umkippen. Wenn bei Bogen- oder Gewölbestaumauern die Widerlager versagen, kann sich die Mauer wie eine Tür öffnen (TS Malpasset, Frankreich) oder sie wird insgesamt herausgedrückt. Bei vorsätzlichen Zerstörungshandlungen können sich die genannten Bruchbilder

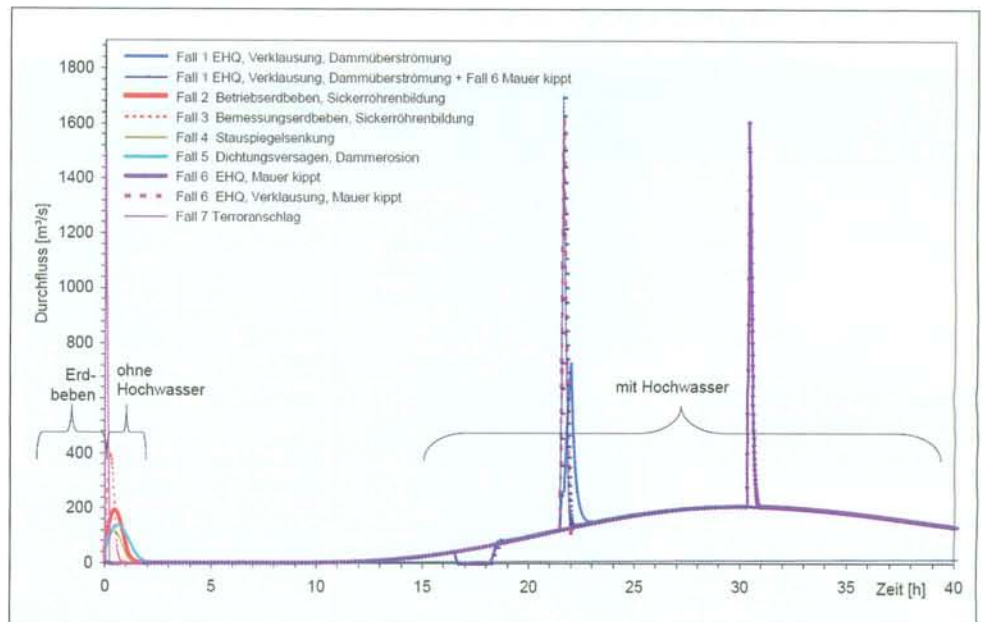


Bild 1: Durchflussganglinien in Folge des Bruches des Absperrbauwerkes (zentriert auf $t=0$, entlang der Zeitachse verschoben)

oder halbkreis- bzw. trapezförmige Breschen ergeben (TS Eder und Möhne, Deutschland; TS Dnjeprostraj, Ukraine). In Tabelle 1 sind die wichtigsten Parameter für Talsperrenbrüche zusammengefasst.

4. Ausfluss aus einer Stauhaltung

Beim Ausfluss nach einem Talsperrenbruch handelt es sich stets um ein Wasser-Feststoff-Gemisch. Insbesondere

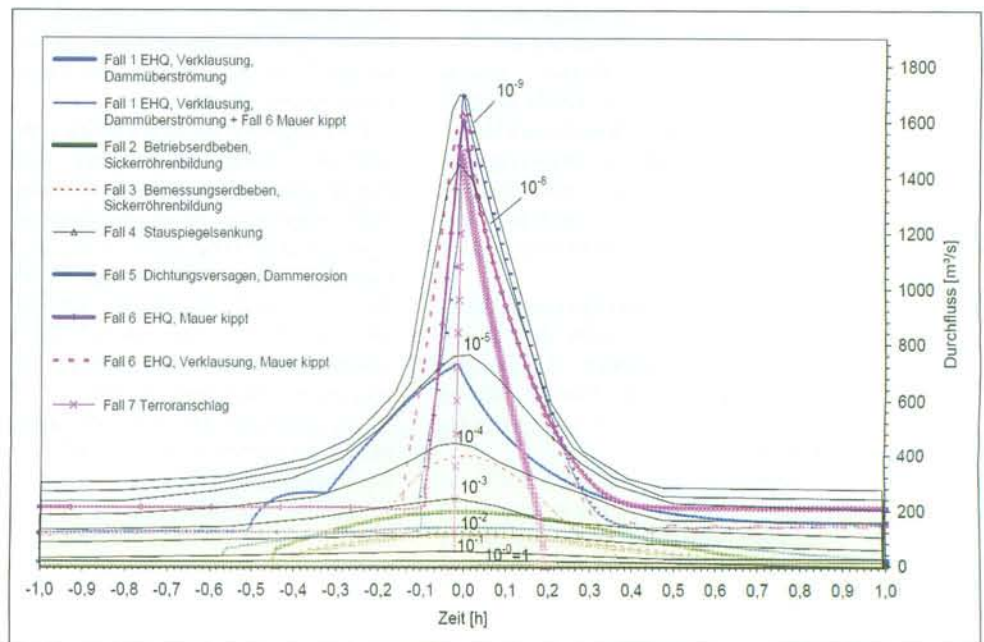


Bild 2: Geschätzte Wahrscheinlichkeiten, mit denen die eingezeichneten vereinfachten Ganglinien vom größten Ereignis pro Jahr erreicht oder überschritten werden können

Tabelle 1: Erfahrungswerte für wichtige Parameter bei Talsperrenbrüchen (beispielhaft)

	Erddamm	Steinschüttdamm	Bruchstein-Gewichtsstau-mauer	Beton-Gewichtsstau-mauer	Bogenstau-mauer
Breschenbreite	0,5 bis 4 mal Dammhöhe	0,5 bis 4 mal Dammhöhe	Teilabschnitte	ein oder mehrere Blöcke	Talbreite
Breschenhöhe	oft bis zur Talsohle	oft bis zur Talsohle	bis Talsohle, ggf. Teilhöhe bei Sprengung	bis zur Talsohle	bis zur Talsohle
Breschenform	Trapez	Trapez	Trapez, Halbkreis	Rechteck, Trapez	Talquerschnitt
Neigung der Breschenränder	vertikal bis 45° oft ≈ 2:1	45° und steiler	vertikal	vertikal	Talränder
Versagenszeit	0,5 bis 4 h	zwischen Erddamm u. Mauer	wenige Minuten	Sekunden bis Minuten	wenige Sekunden
Stauspiegel beim Versagen	0,3 bis 1,5 m über Dammkrone	0,3 bis 1,5 m über Dammkrone	gefülltes Becken	gefülltes Becken	gefülltes Becken

wenn es sich um den Bruch eines Dammes während eines Hochwassers handelt, kann das transportierte Feststoffvolumen die Größenordnung des Volumens des Wassers erreichen [8]. In jüngerer Zeit wurden international zunehmend wissenschaftliche Untersuchungen zu diesem Aspekt durchgeführt, da zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch keine ausreichend geeigneten numerische Verfahren zur Abbildung dieses komplexen Prozesses existieren [6]. Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich auf die Ausflussganglinie des Wassers, welche durch die Stauhöhe, die Größe der Bresche und deren zeitliche Entwicklung, durch den fallenden Wasserspiegel und den sich ggf. ändernden Zufluss beeinflusst wird und durch eine Retentionsberechnung bestimmt werden kann.

Der Ausfluss an der Sperrstelle beim allmählichen Bruch oder dem Bruch infolge terroristischer Handlungen kann in der Regel als Überfall über ein breitkroniges Wehr [9] abgeschätzt werden.

Beim plötzlichen Bruch einer Stau-mauer kann die Lösung von Ritter [10] angewendet werden, die in zahlreichen Experimenten prinzipiell bestätigt wurde. Der Durchfluss an der Sperrstelle wird solange als konstant betrachtet, bis die negative Welle, die sich in Abhängigkeit von der Beckenform mit abnehmender Geschwindigkeit im

Stauraum ausbreitet [11], die Stauwurzel erreicht hat (Trockenfallzeit).

Die Bruchwellen für eine aus Damm und Massivbauwerk (mit Hochwasserentlastungsanlage) kombinierte Beispieldalsperre können nach ihrer Genese und ihrer Größe unterschieden werden. Die Wellen ohne Hochwassermitwirkung kommen durch verschiedene Ursachen (Erdbeben, Stauspiegelsenkung, Durchsickerung) zu Stande und treten direkt nach dem Ereignisbeginn schnell ein (ca. 1 h Gesamtdauer). Sie werden in ihrer Dauer und ihrem Scheitel durch das Stauvolumen des Reservoirs begrenzt (Bild 1).

Die Ganglinien der Bruchwellen während eines Hochwasserereignisses werden gewissermaßen auf die Hochwasserwelle „aufgesattelt“. Wegen des gleichzeitigen Hochwasserzuflusses ist das ausfließende Volumen deutlich größer als der Beckeninhalt. Der Bruch tritt ein, wenn sich der Durchfluss dem Abflussscheitel nähert oder ein verklausungserzeugender Abfluss erreicht wird.

Um innerhalb der durch die möglichen Bruchszenarien entstandenen Ausflussganglinien eine Orientierungshilfe zur Auswahl zu geben, wurden Wahrscheinlichkeiten für verschiedene Bruchszenarien abgeschätzt oder ergaben sich aus den Lastannahmen bei der Erdbeben- oder Hochwasseruntersuchung. In Bild 2 sind die geschätzten Wahrscheinlichkeiten grafisch dargestellt, mit denen

die eingezeichneten vereinfachten (geglätteten) Ganglinien vom größten Ereignis pro Jahr erreicht oder überschritten werden können. Mit den Ganglinien besonders großer Scheitel und Füllen ist seltener zu rechnen. Im unteren Bereich gehen die Talsperrenbruchganglinien in die Hochwasser-ganglinien mit Überschreitungswahrscheinlichkeiten von $2 \cdot 10^{-3}$ bis 10^{-4} über, sodass hier eine zusätzliche Gefährdung gegenüber den Hochwasserbemessungsabflüssen nicht zu erwarten ist.

5. Flutwellenausbreitung

Im Gegensatz zu Hochwasserwellen nach Starkniederschlägen oder Schneeschmelze, z. B. [12], breiten sich Talsperrenbruchwellen oft bedeutend schneller aus und haben höhere maximale Fluthöhen. Dies sind zwei Besonderheiten, die auch die numerische Simulation dieser Phänomene erschweren. Besonders stark gefährdet sind nach Talsperrenbrüchen die in unmittelbarer Nähe unterhalb des Absperrbauwerkes gelegenen Siedlungen, Industriegebiete u. a., da nur sehr wenig Zeit für Warnung und Evakuierung bleibt. Für die Beurteilung des Schadenspotenzials unterhalb der Sperrstelle sind die Wassertiefe, die Fließgeschwindigkeit, die Höhe des Schwallkopfes und die Konzentration und Beschaffenheit des mitgeführten Geschiebes und Treibgutes von Interesse.

Ziele der Untersuchung von Talsperrenbruchwellen sind die Erstellung von Überflutungskarten für die Evakuierungspläne, die Einschätzung möglicher Schäden für Versicherungszwecke und die Abschätzung der Überflutungsgefahr von wichtigen Bauwerken, z. B. Kernkraftwerken.

Grundlage für die analytische Beschreibung des Ausflusses aus einer Stauhaltung und der anschließenden Wellenausbreitung sowie deren numerische Berechnung sind die Saint-Venant-Gleichungen [13], welche die unabhängigen Variablen x und t (Ort und Zeit) und die abhängigen Variablen Q und h (querschnittsgemittelter Abfluss und Wasserstand) miteinander verknüpfen und die unter bestimmten vereinfachten Randbedingungen abgeleitet wurden.

Aus der Literatur sind Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Talsperrenbruchwellen zwischen 5 bis 65 km/h bekannt.

Praktische Berechnung

Die Untersuchungen in [14] haben bei Vergleichsrechnungen zur Flutwellenausbreitung nach dem Bruch der Bogenstaumauer Malpasset gezeigt, dass bei Verwendung des gleichen Strickler-Beiwertes eindimensionale Programme schnellere Flutwellen berechnen als zweidimensionale Programme. Die Ursache liegt in der unterschiedlichen Modellierung der Verluste, die durch den Impulsaustausch mit den Vorländern und beim Abfluss durch stark mäandrierende Täler entstehen und die zu einer Abbremsung der Wellenfront führen. Deshalb erscheint bei eindimensionalen Berechnungen die Wahl eines abgeminderten Strickler-Beiwertes gerechtfertigt [15]. MOLINARO [16] gibt für enge Schluchten und Siedlungen eine mittlere Rauheit von $15 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ an, die durch Sensitivitätsanalysen (z. B. mit $k_{st} = 10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ bis $20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$) verifiziert werden sollte, weil die Rauheit einer der Parameter mit der größten Unsicherheit in Bezug auf den berechneten Wasserstand ist. Weitere Unsicherheiten resultieren aus der gewählten Ausflussganglinie und der räumlichen Diskretisierung bzw. Auflösung im digitalen Geländemodell.

Für die Ermittlung der einzugebenden Talquerschnitte sind oft Landkarten mit einem Maßstab von 1 : 25.000 ausreichend [16]. Karten mit geringerer Verkleinerung werden z. B. für die genaue Untersuchung von Siedlungsgebieten verwendet [17]. Darüber hinaus können auch digitale Geländedaten für die Beschreibung des Tales verwendet werden.

Für die numerische Simulation von stark instationären Strömungen stehen verschiedene ein- und zweidimensionale Programme zur Verfügung. Hierzu gehören: EDF (Frankreich), ENEL (Italien), DAMBRK (USA), MIKE 11 DHI (Dänemark), Hydro-As-2D (Deutschland).

Um die Flutwellenausbreitung in einem eindimensionalen Modell nachzubilden zu können, werden Fließquerschnitte benötigt, die rechtwinklig zur erwarteten Fließrichtung verlaufen. Deshalb sind für das Beispiel eines sich

erweiternden Tales mit einer flächigen Flutwellenausbreitung die verwendeten Querschnitte entlang des Hauptausbreitungsweges mit im Grundriss viertel- und weiter flussab halbkreisförmiger Linienführung entsprechend der Ausbreitung der Flutwelle aufzunehmen.

Die Querschnitte beschreiben den Verlauf der Geländeoberfläche ohne Gebäude. Bei sehr hohen potenziellen Durchflüssen kann diese generalisierende Betrachtung vorgenommen werden, da auch höhere Geländebecken überflutet werden könnten. Die Bebauung, die für die Strömung einen erhöhten Widerstand darstellt, wird durch eine sehr hohe Rauheit gemittelt über das gesamte Überflutungsgebiet berücksichtigt. Großräumige, dauerhafte Abflusshindernisse, z. B. große quer stehende Gebäude, deren Zerstörung nicht erwartet wird, müssen in zu modellierenden Strömungsgebiet ausgespart werden.

Für die Berechnung kann nur näherungsweise eine feste Sohle unterstellt werden, denn es ist zu erwarten, dass das Wasser bereits Feststoffe (Geschiebe, Bauschutt, Gebäudeteile, Holz, Straßen- und Schienenfahrzeuge, Container usw.) mitführt, diese eventuell ablagert und an anderer Stelle wieder aufnimmt. Durch Zerstörung von Gebäuden, Dämmen und Verkehrswegen kann es zu unvorhersehbaren Änderungen der Fließquerschnitte kommen, sodass die Anwendung von probabilistischen Geländemodellen oder Flutwellenmodellen mit beweglicher Sohle erwogen werden könnte. Auf Grund der Unsicherheit der Eingangswerte wird jedoch oft darauf verzichtet.

Eine große Rauheit führt zu einem Abbremsen einer Flutwelle und damit einer geringeren Fließgeschwindigkeit und gleichzeitig zu einem erhöhten Wasserstand. In einem komplexen Straßensystem einer Stadt ergeben sich dagegen erhöhte Fließgeschwindigkeiten in den bevorzugten Strömungspfaden wie Straßen und Eisenbahngleisen und geringere Fließgeschwindigkeiten innerhalb dichter Bebauung.

Detaillierte Aussagen dazu könnten erst nach eingehenden und bedeutend aufwändigeren zwei- und dreidimensionalen Untersuchungen gemacht werden. Für erste Abschätzungen kann zu

Grunde gelegt werden, dass ähnlich wie in porösen Medien das Verhältnis von Filter- zu Abstandsgeschwindigkeit von einem Verbaugungsgrad des Fließquerschnittes abgeleitet werden kann. Überschlägig kann davon ausgegangen werden, dass die mit dem freien Querschnitt berechnete Geschwindigkeit für den Abfluss zwischen einer zu 50 % dauerhaft der Flutwelle widerstehenden Verbauung verdoppelt werden müsste.

6. Darstellung der Ergebnisse

Die Darstellung der Ergebnisse ist auf unterschiedliche Weise möglich. Bei eindimensionalen Ausbreitungsrechnungen kommt zunächst der hydraulische Längsschnitt (**Bild 3**) in Frage, bei dem Wasserstand, Wassertiefe, Durchfluss und mittlere Fließgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Ort dargestellt werden. Für einen bestimmten Ort ist auch die Darstellung der zeitabhängigen Ganglinien der o. g. Größen von Bedeutung, um die Möglichkeiten für die Vorwarnung und Notfallpläne zu prüfen. Eine Verschneidung der Wasserstände mit der Geländeoberfläche ermöglicht die Darstellung in Form einer Ereigniskarte oder Sondergefahrenkarte (**Bild 4**). Wenn an jedem Fließquerschnitt nur die mittlere Geschwindigkeit vorliegt, kann die Geschwindigkeitsverteilung an Hand bekannter Isotachenbilder unter Berücksichtigung des Kontinuitätsgesetzes abgeschätzt werden.

Bei Verwendung zweidimensionaler Modelle ist eine Darstellung der benetzten (überströmten) Flächen und der Anschlaglinie direkt aus dem Ergebnisdatensatz ableitbar (**Bild 5**). Außerdem ist eine differenzierte Darstellung der Fließgeschwindigkeiten farblich oder mit Vektordarstellungen möglich. An wichtigen Orten oder Fließquerschnitten werden in den Karten häufig noch die Ankunftszeit der Welle nach dem auslösenden Ereignis, die Maximalwassertiefe und die maximale Fließgeschwindigkeit schriftlich angegeben. Wenn in Sondergefahrenkarten Gefährdungszonen angegeben werden, geschieht dies meist unter Berücksichtigung der Intensität (z. B. Wassertiefe \times Fließgeschwindigkeit; Übermuring) und der Eintrittswahr-

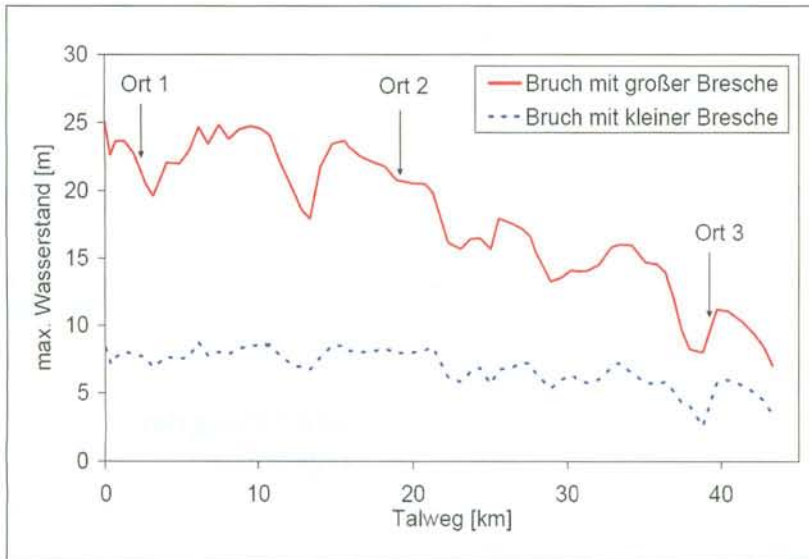


Bild 3: Hydraulischer Längsschnitt: Maximale Fluthöhe über der Flusssohle in Abhängigkeit von der Lauflänge

scheinlichkeit. Es ist verständlich, dass ein häufig erwartetes Hochwasserereignis hoher Intensität eine große Gefährdung bzw. ein hohes Risiko darstellt, wohingegen ein Stauanlagenbruch wegen seiner sehr kleinen Eintrittswahrscheinlichkeit trotz der sehr hohen Intensität im Allgemeinen ein geringeres Risiko darstellt.

Die so erzeugten Karten sollten in konventioneller Papierform ausgedruckt werden (damit sie auch bei Netzausfällen verfügbar sind) und in

elektronisch abrufbarer Form aufbereitet werden (GIS, im Internet ggf. mit geschütztem Zugang).

7. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Auch wenn Brüche von Stauanlagen statistisch äußerst unwahrscheinlich sind, sollten ihre möglichen Auswirkungen bekannt sein, um entsprechende Vorkehrungen wie die Einrich-

tung von Frühwarnsystemen oder die Erstellung von Notfallplänen treffen zu können. In der in- und ausländischen Gesetzgebung sowie in Regelwerken gibt es diesbezügliche Angaben, wenngleich sie in den einzelnen Gültigkeitsbereichen stark variieren. Im Rahmen der Restrisikobetrachtungen bei Stauanlagen gliedern sich die Untersuchungen zum einen in die Abschätzung der zeitlichen Entwicklung der Bresche im Absperrbauwerk und der damit verbundenen Abflussganglinie und zum anderen in die Beschreibung der Ausbreitung der Flutwelle talabwärts und deren Auswirkungen. Das Ergebnis sind in der Regel Sondergefahrenkarten, die elektronisch gespeichert und in Papierform zumindest den Betreibern und den Katastrophenschutzbehörden vorliegen sollten.

Da in den Berechnungsannahmen zahlreiche unscharfe Größen enthalten sind, stellt eine Gefahrenkarte ein bestimmtes Versagenszenario dar. Durch die Erstellung mehrerer Karten können verschiedene Rand- und Anfangsbedingungen erfasst werden. Eine weitere Möglichkeit für zukünftige Flutwellenberechnungen könnte die Anwendung statistischer Methoden sein, die zur Darstellung von Überschreitungslinien für die Wasserstände in den Ereigniskarten führt.

Literatur

- [1] YEN, B. C.: Reliability of Hydraulic Structures Possessing Random Loading and Resistance. In: DUCKSTEIN, L.; PLATEL, E. J. (Hrsg.): Engineering Reliability and Risk in Water Resources. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht 1987, S. 95 – 113
- [2] SCHNITZER, N.: Alte Talsperren in Spanien. In: Wasser- und Energiewirtschaft, 1973, S. 176 – 187
- [3] GARBE, F.: Talsperrenregelwerke im internationalen Vergleich. – Diplomarbeit TU Dresden, Institut für Wasserbau und THM 2006
- [4] POHL, R.: Talsperrenkatastrophen in fünf Jahrtausenden. – Nur Zufälle? – Vortragsmanuskript mit weiteren Literaturhinweisen, Bildungsakademie für die Wasserwirtschaft, Essen, April 1998
- [5] SCHNITZER, N. J.: Dam Failures Due to Overtopping. In: Proc. Int. Workshop on Dam Safety Evaluation, Grindewald (Schweiz), 1993, Vol. 1, S. 13 – 19

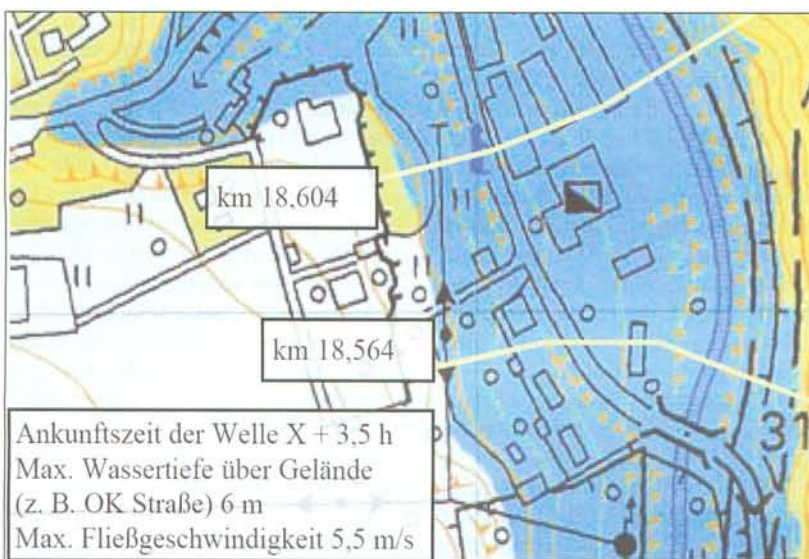


Bild 4: Sondergefahrenkarte

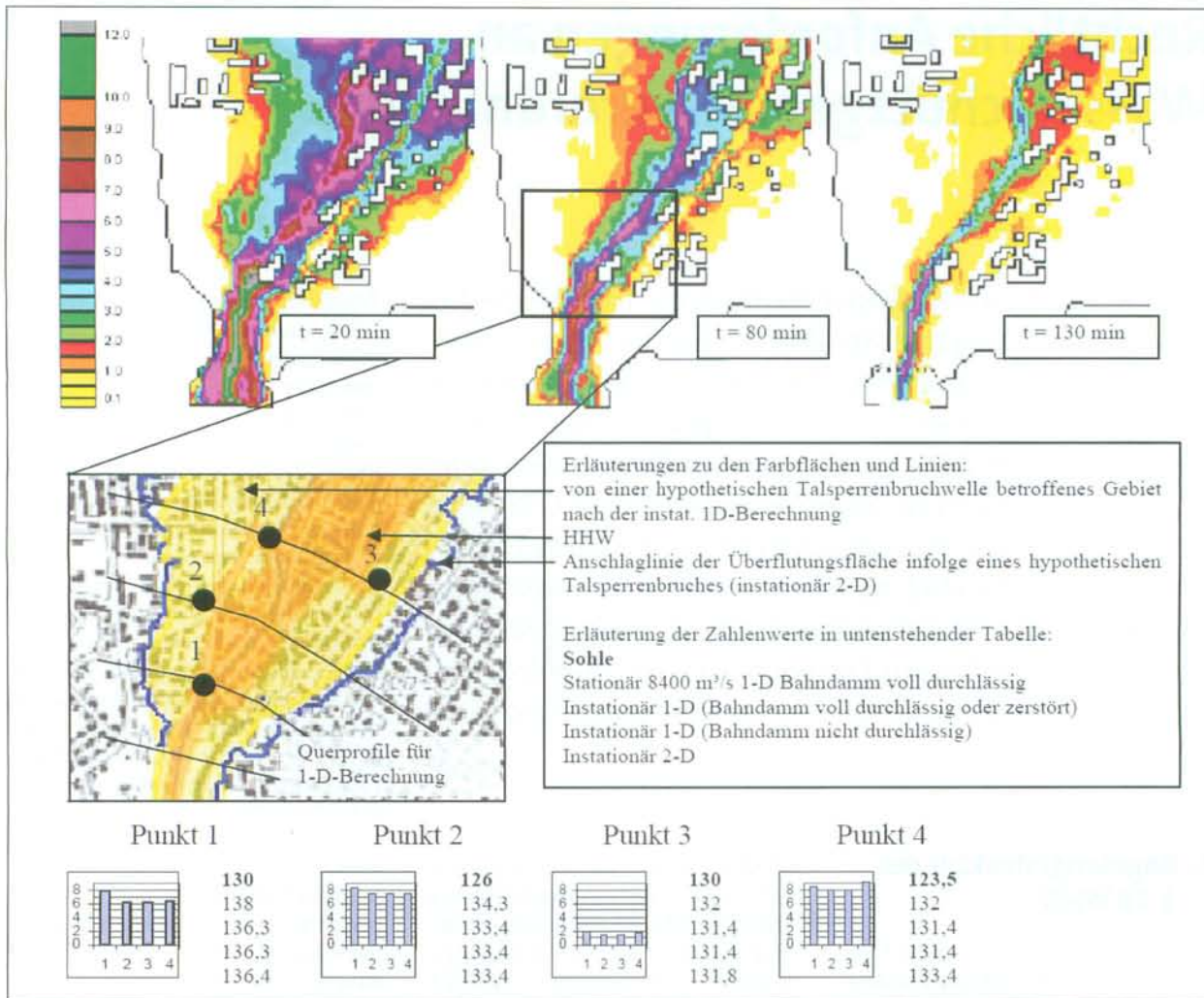


Bild 5: Vergleich unterschiedlicher Berechnungsergebnisse in Bezug auf Höchstwasserstände während eines Ereignisses

[6] IMPACT 2005 – Final Technical Report: Investigation of extreme flood processes and uncertainty, www.impact-project.net

[7] MACDONALD, TH. C.; LANDGRIDGE-MONOPOLIS, J.: Breaching Characteristics of Dam Failures. In: Journal of Hydraulic Engineering, 1984, Vol. 110(5), S. 567 – 586

[8] ZECH Y.; SOARES-FRAZÃO, S.; BOUSMAR, D.: Rivers and floods: A concern for people, a problem for engineers, a challenge for research. In: Proceedings of the River Flow Conference, Lisbon 2006, Volume 1, S. 13 – 27

[9] BOLLRICH, G. U. A.: Technische Hydromechanik. Band 2. Verlag für Bauwesen, Berlin 1989

[10] RITTER, A.: Die Fortpflanzung von Wasserwellen. In Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure, 1897 Band 36, Nr. 33, S. 947 – 954

[11] LAUBER, G.: Experimente zur Talsperrenbruchstelle im glatten geneigten Rechteckkanal. Dissertation Nr. 12115 an der ETH Zürich, Schweiz 1997

[12] POHL, R.: Kennen wir die Hochwasserdurchflüsse unserer Flüsse? – In: Wasser und Abfall (2002) Heft 11, S. 14 – 18

[13] DE SAINT-VENANT, J. C.: Théorie du mouvement non permanente des eaux avec application aux crues des rivières et à l'introduction des marées dans leur lit. In: Comptes rendues, Académie des Sciences, Paris 1871, Nr. 73, S. 148 – 154

[14] CADAM 2000 – Concerted Action on Dambreak Modelling, European CADAM project, CD-ROM

[15] BORNSCHEIN, A.: Die Ausbreitung von Schwallwellen auf trockener Sohle unter besonderer Berücksichtigung der Wellenfront. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen, Heft 33, 2006, ISBN 3-86005-523-2

[16] MOLINARO, P.: Dam-Break Wave Analysis – A State of the Art. In: Computer Methods in Water Resources II, Vol. 2, Computational Hydraulics and Hydrology, Springer-Verlag, 1991, S. 77 – 87

[17] Handbuch zum Programm BOSS DAMBRK. Boss International Incl. Madison, Wisconsin, USA.

Autoren
 apl. Prof. Dr.-Ing. habil.
 Reinhard Pohl,
 E-Mail: reinhard.pohl@tu-dresden.de

Dr.-Ing. Antje Bornschein
 Institut für Wasserbau und
 Technische Hydromechanik der
 Technischen Universität Dresden,
 01062 Dresden