

## RISIKOABSCHÄTZUNG FÜR EINEN HYPOTHETISCHEN TALSPERRENBRUCH

### RISK ESTIMATION FOR THE HYPOTHETICAL BREACH OF DAMS

Reinhard Pohl, Antje Bornschein<sup>1</sup>

#### ZUSAMMENFASSUNG

Natürlichen und künstlichen Sperren, die Seen oder Speicher begrenzen, ist das wenn auch sehr kleine Risiko eines Versagens immanent. Um auf den Fall eines Unglücks vorbereitet zu sein, sind die Eigentümer und Betreiber von gefährlichen Anlagen, wozu auch Talsperren gehören, in der Pflicht, den zuständigen Behörden Informationen über mögliche Folgen eines Versagens bereitzustellen. Im Folgenden soll näher auf Erfahrungen bei der Erarbeitung derartiger Informationen für den unwahrscheinlichen aber möglichen Fall eines Talsperrebruchs eingegangen werden.

**Keywords:** Talsperrenversagen, Risiko, Überflutung, Schwallwellen

#### ABSTRACT

Natural and artificial barrages impounding lakes or reservoirs possess a residual risk of potential failure however this might be very low. To be prepared in the case of any incident the owners and operators of hazardous plants (including dams) are in charge of forwarding information about the possible consequences of any thinkable failure to the authorities. Experiences referring to the elaboration of the required information for the improbable but possible case of dam failure are presented in the following.

**Keywords:** dam, failure, risk, mitigation, surge

#### EINFÜHRUNG

Die Öffentlichkeit und insbesondere die Bevölkerung, die unterhalb einer Talsperre ansässig ist, hat vielfach einen eher kritischen Blick auf diese Ingenieurbauwerke und das von ihnen ausgehende Gefahrenpotenzial. Statistisch gesehen ist die Wahrscheinlichkeit, bei einem Talsperrenbruch zu Schaden zu kommen, sehr viel geringer, als z. B. die Wahrscheinlichkeit in einen Verkehrsunfall verwickelt zu werden. Jedoch ist es ein verständliche Forderung, auch über den unwahrscheinlichen Fall des Talsperrenversagens und seine Folgen ausreichend informiert zu werden und mögliche Risiken auf ein gesellschaftlich vertretbares Maß zu reduzieren. Gleichzeitig ermöglichen Untersuchungen über mögliche Unfallschäden eine Früherkennung, das Ergreifen erforderlicher Gegenmaßnahmen und eine zielgerichtete Hilfe

---

<sup>1</sup> apl. Prof. habil. Dr.-Ing. R. Pohl und Dr.-Ing. A. Bornschein, Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik, 01062 Dresden, Deutschland (Tel.: +48-351-463; Fax: +48-351-463-; email: reinhard.pohl@tu-dresden.de)

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

Seit dem 11. September 2001 ist ein schon fast vergessener Aspekt wieder ins Blickfeld der Öffentlichkeit getreten: terroristische Anschläge und kriegerische Handlungen, die die absichtliche Zerstörung von Bauwerken und technischen Einrichtungen mit großem Schadenspotenzial zum Ziel haben. Die Drohung, eine bestehende Talsperre zu sprengen, war z. B. aus den von unübersichtlichen bürgerkriegsähnlichen Kämpfen geplagten Ländern Afrikas zu hören.

Flutwellen, die durch den Bruch von Talsperren ausgelöst werden, sind seit langer Zeit Gegenstand von wissenschaftlichen Untersuchungen. Diese Forschungen erfuhren nach Schadensfällen (z.B. dem Bruch der Stauwehr Malpasset, Frankreich) stets einen gewissen zeitweiligen Aufschwung. Dennoch gibt es bis heute noch nicht vollständig erforschte Probleme wie z.B. den zeitlichen Verlauf des Bruchverhaltens von Dämmen und Mauern sowie die Ausbreitung des Schwallkopfes auf trockener Sohle.

In Deutschland wurde lange Zeit die Frage möglicher Risiken von Stauanlagen im Kreis von Fachleuten nur ungerne und zurückhaltend erörtert. Die vorherrschende Meinung, dass Talsperren „nach menschlichem Ermessen sicher“ sind, ist natürlich richtig, wenn man das hinter der Formulierung „menschliches Ermessen“ 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 2004 erschienenen Stauanlagennorm DIN 19700 ein erster Schritt zu einer risikobasierten Betrachtung und Bemessung von Stauanlagen gegangen.

## **GESETZLICHE GRUNDLAGEN IN DEUTSCHLAND**

In Deutschland liegt die Verantwortlichkeit für den Brand- und Katastrophenschutz in den Händen der Bundesländer und der Gemeinden. Die in der letzten Dekade überarbeiteten Brand- und Katastrophenschutzgesetzen der deutschen Bundesländer enthalten nun alle Regelungen zur Auskunftspflicht der Besitzer bzw. Betreiber von gefährlichen Anlagen. Sie sind darin verpflichtet, den Betroffenen sowie den Katastrophenschutzbehörden Informationen bezüglich der Risiken zu erteilen, die von ihren Anlagen ausgehen könnten. Die allgemeine Rechtsauffassung scheint sich dahingehend zu entwickeln, dass unter dem Begriff „gefährliche Anlage“ nicht nur kerntechnische oder Chemieanlagen sondern auch Talsperren, große Deiche und Staustufen zu verstehen sind.

Es entspricht bereits jetzt der geübten Praxis, dass Betreiber von Stauanlagen sowohl auf Anforderung der Behörden als auch auf eigene Initiative hin für ihre Anlagen Risikountersuchungen durchführen lassen. Dazu gehören die Erarbeitung hypothetische Bruchszenerarien, die Abschätzung der Breschenentwicklung und des Ausflusses in Abhängigkeit von der Zeit und die Berechnung der Wellenausbreitung unterhalb der Talsperre. In Tabelle 1 sind die entsprechenden gesetzlichen Grundlagen für die Auskunftspflicht der Eigentümer und Betreiber in den deutschen Bundesländern zusammengestellt.

**Tab. 1:** Gesetzliche Grundlagen für die Auskunftspflicht von Eigentümern und Betreibern risikoreicher Anlagen in Deutschland.

**Tab. 1:** Liability on information of dam owners in the law of the federal states in Germany.

Bundesland	Gesetz	Paragraf
Niedersachsen	Niedersächsisches Katastrophenschutzgesetz (NKatSG) vom 14. 2. 2002 (Nds. GVBl. S. 73) geändert durch Artikel 6 vom 16.9.2004 (Nds. GVBl. S. 362, 365)	§ 7 (2)
Berlin	Berliner Gesetz über die Gefahrenabwehr bei Katastrophen (Katastrophenschutzgesetz - KatSG) vom 11.2.1999 (GVBl. S. 78)	§ 6 (1)
Sachsen-Anhalt	Katastrophenschutzgesetz des Landes Sachsen-Anhalt (KatSG-LSA) vom 5.2.2002	Abschn. 2, § 5 (2)
Sachsen	Gesetz zur Neuordnung des Brandschutzes, Rettungsdienstes und Katastrophenschutzes im Freistaat Sachsen vom 24.6.2004 (SächsGVBl. S. 245) Sächsisches Gesetz über den Brandschutz, Rettungsdienst und Katastrophenschutz (SächsBRKG)	§ 57 (1)
Nordrhein-Westfalen	Gesetz über den Feuerschutz und die Hilfeleistung (FSHG) NRW vom 10.2.1998	§ 24 (1), (2)
Thüringen	Thüringer Brand- und Katastrophenschutzgesetz ThBKG vom 25.3.1999 (GVBl. 1999 S. 227; 2000 S. 419; 24.10.2001 S. 274)	§ 6a, § 33
Schleswig-Holstein	Gesetz über den Katastrophenschutz in Schleswig-Holstein (Landes-katastrophenschutzgesetz - LKatSG - i.d.F.d.B. vom 10. 12. 2000	§ 28 (1)
Hessen	Hessisches Gesetz über den Brandschutz, die Allgemeine Hilfe und den Katastrophenschutz (HBKG) vom 17.12.1998 GVBl. I S. 530	§ 47
Baden-Württemberg	Gesetz über den Katastrophenschutz LKatSG – Landeskatastrophenschutzgesetz - Baden-Württemberg – vom 22.11.1999 (GBl. 1999 S. 625; 11.3.2004 S. 112; 7.3.2006 S. 6006)	§2 (1) 1
Bayern	BayKSG - Bayerisches Katastrophenschutzgesetz vom 24.7.1996 (GVBl. 1996 S. 282; 1999 S.130; 24.4.2001 S. 140)	Art.3(1)1. Art.8(2)
Rheinland-Pfalz	Landesgesetz über den Brandschutz, die Allgemeine Hilfe und den Katastrophenschutz LBKG - Brand- und Katastrophenschutzgesetz - Rheinland-Pfalz – vom 2.11.1981 (GVBl. 1981 S. 247; 2000 S.578; 2001 S. 29; 5.4.2005 S. 10405) Gl.-Nr.: 213-50	§32 (3)
Saarland	Gesetz Nr. 1095 über den Katastrophenschutz im Saarland (Landes-katastrophenschutzgesetz - LKatSG - Saarland) vom 31.1.1979, geändert durch Artikel 4 Abs. 43 des Gesetzes vom 7.11.2001 (Amtsbl. S.2168), zuletzt geändert durch Art. 1 Abs. 36 des Gesetzes vom 15.11.2006 (Amtsbl. S. 481).	§5a 2
Brandenburg	Gesetz über den Brandschutz, die Hilfeleistung und den Katastrophenschutz des Landes Brandenburg BbgBKG - Brandenburgisches Brand- und Katastrophenschutzgesetz vom 24.5.2004 (GVBl. Nr. 9 vom 24.5.2004 S. 197)	§§ 37-40

Die Risikountersuchungen zielen auf die Erstellung sogenannter Gefahrenkarten ab, die in leicht verständlicher und übersichtlicher Form die Folgen eines Talsperrenbruches darstellen. Für den Notfall sind Gefahrenkarten eine wichtige Arbeitsgrundlage der Katastrophenschutzbehörden, da sie über das Schadensgebiet, möglich Rettungswege und zeitliche Entwicklungen, wie z. B. das Trockenfallen des Überflutungsgebietes, Auskunft geben. Zur Gestaltung der Gefahrenkarten existieren jedoch in Deutschland keine verbindlichen Regeln. Hier legen die Betreiber oft selbst den Umfang und die Form der Darstellung fest.

## ERSTELLUNG EINES BRUCHSZENARIOS

Wird eine bestehende Stauanlage untersucht, so besteht der erste Schritt in der Risikobetrachtung im Finden hypothetischer Bruchszenarios. Der zeitliche Ablauf eines Sperrenbruchs hängt im Wesentlichen von der Art des Absperrbauwerkes ab. Der große Bereich möglicher Bruchszenarios für reale Stauanlagen wird auf der einen Seite begrenzt von dem plötzlichen und vollständigen Bruch einer Bogenstaumauer und auf der anderen Seite von dem allmählichen mehrere Stunden andauernden Erosionsprozess bei Erddämmen. Eine gute Kenntnis historischer Unglücksfälle bei Talsperren kann helfen, realistische Szenarios auszuwählen.

Die Breschenbildung selbst kann durch unterschiedliche Ursachen ausgelöst werden, wobei die verschiedenen Ursachen jedoch zu ähnlichen Breschenformen führen können. In Tabelle 2 ist eine Zusammenstellung für Staumauern zu finden. Der Bruch eines Staudammes kann durch innere Erosion (piping) oder durch das Überströmen des Dammes (overtopping) ausgelöst werden. Seltener als Ursache zu finden sind eine Beschädigung der Böschungen oder des Dammkörpers wie sie z.B. bei einem Erdbeben oder durch Setzungsfließbrutschungen verursacht werden.

**Tab. 2:** Mögliche Bruchursachen bei Staumauern und resultierend Bruchformen.

**Tab. 2:** Possible causes of dam failures and corresponding shapes of breaches.

	<b>Bruchursache</b>	<b>Mögliches Bruchformen</b>
1	Keine ausreichende Gleitsicherheit	1 gesamte Mauer „weggeschoben“ 2 einzelne Mauerfelder „weggeschoben“ (z.B. TS Austin) 3 einzelne Mauerteile, z.B. „Pfropfen“ in der Talmitte (wie bei Talsperre Puentes)
2	Keine ausreichende Kippsicherheit	1 gesamte Mauer umgekippt 2 einzelne Mauerfelder umgekippt (z.B. Talsperre San Francis)
3	Keine ausreichende Festigkeit der Widerlager bei Bogenstaumauern	1 Mauer öffnet sich wie eine Tür (z.B. Talsperre Malpasset) 2 Mauer insgesamt herausgedrückt
4	Sprengung bei kriegerischen Handlungen oder terroristischen Anschlägen (z.B. Eder, Möhne, Dnjeprostroj, Hwachon)	1 halbkreisförmige oder trapezförmige Bresche abhängig von der Sprengwirkung (z.B. Edertalsperre, Möhnetalsperre) 2 Schadensbilder wie bei 1 bis 3 möglich

Aus den Szenarios für die Bruchursachen können dann mögliche Breschengrößen und die Breschenbildungsdauer abgeleitet werden. Beide Größen beeinflussen maßgeblich die resultierende Ausflussganglinie. Die Bestimmung basiert auf historischen oder experimentell gefunden empirischen Zusammenhängen. Zum Teil werden auch physikalisch basierten Verfahren angewendet. In Tabelle 3 sind Erfahrungswerte zu Breschengrößen und Bruchdauer für die verschiedene Typen von Absperrbauwerken zusammengestellt. Um der den Werten innewohnenden Unsicherheit Rechnung zu tragen, werden Sensitivitätsanalyse hinsichtlich verschiedener Breschenparameter (Breite, Tiefe, Entwicklungsdauer) empfohlen.

Für Erddämme wurden in neuerer Zeit die Möglichkeiten, mit numerische Verfahren auf der Grundlage von Stofftransportgleichungen die Breschenbildung zu berechnen, enorm erweitert. Jedoch sind hier immer noch insbesondere beim maximalen Ausfluss aus einer Bresche Abweichungen zwischen den errechneten und den in der Natur bzw. im Experiment ermittelten Werten zwischen 30 und 50 % zu finden (IMPACT 2005).

Steinschüttdämme scheinen ein von Erddämmen deutlichen zu unterscheidendes Bruchverhalten zu haben. Zwar halten sie einer Über- bzw. Durchströmung deutlich länger stand. Der eigentliche Bruch geht dann jedoch viel schneller von sich, so dass größere maximale Abflüsse auftreten.

Problematisch ist die Abschätzung, wenn unbekannt ist, welchen Einfluss Einbauten im Dammkörper, z.B. ein undurchlässiger Kern, bzw. eine Oberflächendichtung auf der Wasserseite auf den Bruchvorgang haben. Es gibt experimentelle Untersuchungen zu Erddämmen, nach denen ein Damm mit einem Dichtungskern schneller erodiert als ein homogener Damm. Erklären lässt sich dieses Phänomen dadurch, dass der erosionsstabilere Kern eine Art Überfallkante bildet, hinter der eine erhöhte Turbulenz auftritt und damit eine verstärkte Erosion stattfindet. Welche Auswirkungen Außenhautdichtungen auf den Bruchvorgang haben, ist noch nicht untersucht worden.

**Tab. 3:** Erfahrungswerte für Breschenparameter und Bruchdauer verschiedener Absperrbauwerke.

**Tab. 3:** Breach parameters and breach formation time for different types of dams.

	<b>Erddamm</b>	<b>Gewichtsstauwehr</b>	<b>Bogenstauwehr</b>
Breschenbreite	0,5 bis 4 mal Dammhöhe	Vielfaches der Blockgröße, meist 2 bis 3 zentrale Blöcke	gesamte Breite
Seitenneigung der Bresche	im Bereich von vertikal bis 45°	vertikal	Neigung der Talseitenwände
Versagenszeit	0,5 bis 4 h	0,1 bis 0,5 h	nahezu plötzlich
Stauspiegel beim Versagen	0,3 bis 1,5 m über Dammkrone	3 bis 15 m über Mauerkrone	3 bis 15 m über Mauerkrone

Der Bruch einer Stauwehr wird als plötzliches Versagen beschrieben. Seit dem 19. Jahrhundert immer wieder Anlass zu theoretischen Betrachtungen und experimentellen Untersuchungen. Die Bresche unterliegt nach dem Bruch keinen weiteren zeitlichen Veränderungen mehr. Die minimale Zeit für einen hypothetischen Bruch einer gemauerten Sperre kann abgeschätzt werden, wenn der freie Fall eines Körpers betrachtet wird und ist damit abhängig von der Höhe der Stauwehr.

Für ein aus einem Damm und einem anschließenden Massivbauwerk (mit Hochwasserentlastungsanlage) bestehendes Absperrbauwerk wurden die in Tabelle 4 aufgeführten Lastfälle und Bruchszenarien entwickelt. In diesem Fall war insbesondere die Erdbbensicherheit nicht im ausreichenden Maße gegeben. Eine schnelle Absenkung des Stauspiegels wird trotz Absenkbeschränkung betrachtet, da sie aufgrund einer Fehlbedienung eintreten könnte.

Den einzelnen Bruchszenarien wurden Auftretenswahrscheinlichkeiten zugeordnet, die sich als Produkt aus der Wahrscheinlichkeit des Eintretens der Belastung und der Wahrscheinlichkeit, dass unter der Belastung tatsächlich zum Bruch kommt, ergaben. Die Auftretenswahrscheinlichkeit wurden in der weiteren Betrachtung dazu verwendet, die resultierenden Abflussganglinien zu systematisieren (vgl. Abbildung 1).

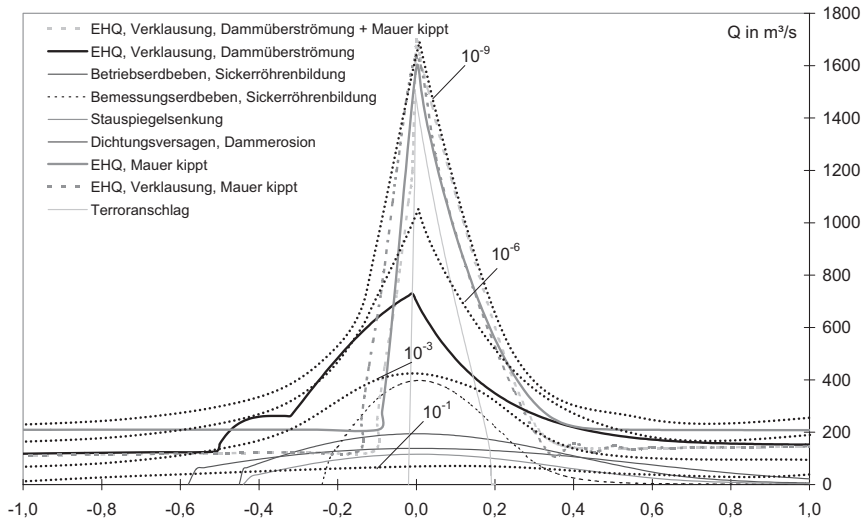
**Tab. 4:** Mögliche Bruchszszenarien für ein kombiniertes Absperrbauwerk (Damm und Mauer).  
**Tab. 4:** Possible dam breach scenarios (earth dam and masonry dam combined).

<b>Lastfall</b>	<b>Bauwerksteil</b>	<b>Geführte Nachweise</b>	<b>Versagensmechanismus</b>	<b>Gesamtwahrscheinlichkeit</b>
Betriebs- erdbeben $T_n = 100$	wasserseitige Dammböschung oben wasserseitige Dammböschung (unten und insgesamt) wasserseitige Flügelmauer luftseitige Dammböschung (oben und unten) gesamte luftseitige Dammböschung luftseitige Flügelmauer	Oberflächiges Abrutschen Böschungsbruch Kippen, Gleiten in der Sohlfuge Oberflächiges Abrutschen Böschungsbruch Kippen, Gleiten in der Sohlfuge	Kräfteumlagerung in den Stützkörpern durch Abrutschen der Böschungen; dynamische Belastung führen zunächst zu Undichtigkeiten der Dichtung, später Sickerrohrenbildung mit weiterer Erosion, Kippen der Dichtwand, Breschenbildung. Erosionsbeginn im Anschlussbereich der Dichtwand an das Massivbauwerk vermutet; trapezförmige Bresche im Anschluss an die HWE	$10^{-3}$
Bemessungs- erdbeben $T_n = 5000$	wasserseitige Dammböschung oben wasserseitige Dammböschung, (unten und insgesamt) wasserseitige Flügelmauer luftseitige Dammböschung (oben und unten) gesamte luftseitige Dammböschung luftseitige Flügelmauer wasserseitige Dammböschung	Oberflächiges Abrutschen Abrutschen Kippen, Gleiten in der Sohlfuge Oberflächiges Abrutschen Böschungsbruch Kippen, Gleiten in der Sohlfuge Spreizsicherheit	Wie oben, aber wegen geringerer berechneter Sicherheitsbeiwerte Bresche doppelt so groß (Schätzung) und Breschenbildung doppelt so schnell (Schätzung)	$10^{-4}$
schnelle Stauspiegel-senkung	wasserseitige Flügelmauer	Kippen, Gleiten in der Sohlfuge	Umkippen der Flügelmauern mit Beschädigung des Dichtungsanschlusses, Sickerrohrenbildung, weiter wie bei Betriebserdbeben	$10^{-4}$
Wasserdruck	luftseitiger Dammkörper	Böschungsbruch	Versagen der Dichtung (Beginn im Anschlussbereich) bedarf wahrscheinlich eines Initials	$10^{-4}$
Extremhochwasser	Damm	Überströmung	Dammbruch nach rückschreitender Erosion	$5 \cdot 10^{-5}$
Extremhochwasser mit Verklau-sung der HWE	Massivbauwerk (HWE)	Kippen	klaffende Sohlfuge am Massivbauwerk, plötzlicher Bruch, große Bresche	$5 \cdot 10^{-6}$
terroristischer Anschlag	Massivbauwerk (HWE)	Sprengung, Kippen, Gleiten	plötzlicher Bruch, große Bresche	$10^{-6}$

## ERMITTLUNG EINER AUSFLUSSGANGLINIE

Für die Ermittlung der Ausflussganglinie ist zu Beginn festzulegen, welcher Anfangswasserstand im Reservoir in dem betrachteten Fall wahrscheinlich ist. Dieser ist eine maßgebliche Größe für die Bestimmung des maximalen Ausflusses. Für das in Tabelle 4 beschriebene Beispiel wurden davon ausgegangen, das in den meisten Fällen ein Vollstau der Talsperre zu berücksichtigen ist. Nur bei einem eintretenden Extremhochwasser mit Überströmung des Absperrbauwerkes ergibt sich der Anfangswasserstand als bordvoll zusätzlich der Überströmungshöhe.

Der maximale Ausfluss bei einem plötzlichen Bruch einer Staumauer kann unter Zugrundelegung der Lösung von Ritter 1897 bestimmt werden. Deren Herleitung liegt ein unendlich langen Kanal rechteckigen Querschnitts, Reibungsfreiheit und eine horizontale Sohle zugrunde. Da dieser Wert jedoch in verschiedene Untersuchungen experimentell weitgehend bestätigt werden konnte (vgl. eine Zusammenstellung in Bornschein 2006), kann er auch auf reale Bruchszenerarien mit einem plötzlichen Bruch und einer näherungsweise rechteckförmigen Bresche als maximal möglicher Ausfluss übertragen werden.



**Abb 1:** Ausflussganglinien für die Bruchszenerarien in Tabelle 4 und vereinfachte Ganglinien (.....), die x-Achse bildet die Zeit in Stunden.

**Fig 1:** Dam break outflow hydrographs referring to table 4 and simplified hydrographs (.....), x-axis shows time in hours.

Für Staudämme ist das plötzliche und vollständige Versagen des Sperrbauwerkes ein eher untypischer Fall. Vielmehr ist der Bruch eines Staudammes als Prozess aufzufassen, bei dem die Bresche durch das auslaufende Wasser vergrößert wird. Durch den nach der Bildung der Initialbresche beginnenden Entleerungsvorgang des Stauroumes kommt es in Abhängigkeit vom Ausfluss und der Schleppkraft des Wassers zu einer rückschreitenden Erosion des

Dammes. Somit hängt der Vorgang der Breschenbildung entscheidend von der Erosionsstabilität des Dammmaterials und den Eigenschaften der Strömung ab.

Sind die endgültige Breschengröße und die Breschenbildungsdauer abgeschätzt, kann die Ausflussganglinie auch auf der Grundlage des Abflusses über ein breitre Kroniges Wehr berechnet werden. Die Wehrbreite entspricht dann der unteren Breschenbreite. Hierzu werden weitere Parameter wie Einschnürungsbeiwerte, das Öffnungsgesetz für die Bresche (z. B. die stark vereinfachende Annahme einer gleichmäßigen Vertiefung und Verbreiterung der Bresche) u. a. benötigt.

In Abbildung 1 sind die für die Beispielsperre in Tabelle 4 berechneten Abflussganglinien dargestellt. Dabei wurden die Ganglinien entlang der x-Achse so verschoben, dass der Abflussscheitel immer bei  $t = 0$  liegt. Für die weitere Flutwellenberechnung wurden die Ganglinien entsprechend den Eintrittswahrscheinlichkeiten zusammengefasst und vereinfacht. In der Abbildung sind diese vereinfachten Ganglinien gepunktet dargestellt. Zugeordnet ist die Wahrscheinlichkeit, mit der dieser Abfluss vom größten Ereignis pro Jahr erreicht oder überschritten wird.

## **WELLENAUSBREITUNG**

Im Gegensatz zu Hochwasserwellen, die aufgrund von Starkniederschlägen oder Schneeschmelzen entstehen, 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, Industrie u. a., da nur ein geringer zeitlicher Spielraum für Warnung und Evakuierung bleibt. Von historischen Talsperrenkatastrophen sind Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Flutwellen zwischen 5 und 65 km/h überliefert.

Die bei Talsperrenbruchwellen verwendeten ein- oder zweidimensionalen numerischen Berechnungsmodelle basieren auf den de-Saint-Venant-Gleichungen. Für deren Herleitung wurde vereinfachend angenommen, dass die Oberflächenkrümmung vernachlässigt werden kann. Gerade an der Wellenfront scheint diese Annahme die realen Verhältnisse nicht widerzuspiegeln. Jedoch haben Vergleiche von Messergebnissen und Berechnungen ergeben, dass die de-Saint-Venant-Gleichungen zwar nicht die Form der Wellenfront abbilden können, die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Front jedoch korrekt berechnet werden kann (Bornschein 2006).

Die Untersuchungen der CADAM 2000 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 den Verlusten, die beim Abfluss durch stark mäandrierende Täler entstehen und die zu einer Abbremsung der Wellenfront führen. Diese werden in eindimensionalen Programmen nicht berücksichtigt. Deshalb erscheint die Wahl eines kleineren Strickler-Beiwertes für mäandrierende Täler gerechtfertigt. Somit wird eine über den Ausbreitungsweg gemittelte Berücksichtigung der Abbremsung der Flutwelle durch Abflussprozesse in Talkurven erreicht.

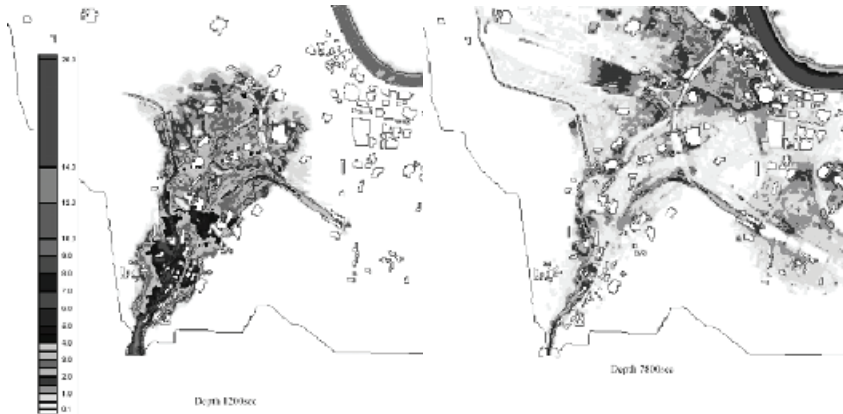
Die Auswahl geeigneter Strickler-Beiwerte für das zu betrachtende Tal hat maßgeblichen Einfluss auf die berechnete Größe der überfluteten Gebiete. So wird bei einem niedrigen



Strickler-Beiwert (hohe Rauheit der Talsohle) die Welle stärker abgebremst und dabei abgeflacht. Dadurch verringert sich der Scheiteldurchfluss deutlich. Gleichzeitig ist bei einem niedrigeren Strickler-Beiwert auch der zu einem Durchfluss zugehörige Wasserstand höher. Der Einfluss dieser gegenteiligen Effekte auf das berechnete Überflutungsgebiet sollte mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse hinsichtlich des Rauheitsbeiwertes abgegrenzt werden.

Für die Ermittlung der einzugebenden Talquerschnitte sind oft Landkarten mit einem Maßstab von 1:25 000 ausreichend (Molinaro 1991). Da diese Aussage auf Untersuchungen basiert, die schon fast 20 Jahre alt sind und die heutige Rechentechnik eine deutlich detailliertere Abbildung der Talgeometrie ermöglicht, sollten hier auch höher aufgelöste Karten zum Einsatz kommen. Für die genauere Untersuchung von Siedlungsgebieten, die im Allgemeinen mit zweidimensionalen numerischen Modellen erfolgt, ist auf jeden Fall ein Geländemodell mit hoher Auflösung zu verwenden, auch wenn die Beschreibung jedes einzelnen Hauses bzw. der Straßen noch immer nicht möglich ist.

Gesetzliche Vorschriften zur Dammbrechwellenberechnung sind in einigen Ländern sehr ausführlich festgeschrieben. In Frankreich z. B. werden die Werte für die Flutwellenausbreitung mit Sicherheitsfaktoren beaufschlagt. Die maximale Flutwellenhöhe wird um 15 % erhöht und die Ankunftszeit um 15 % reduziert. Diese Korrekturen leiten sich von Sensitivitätsanalysen und praktischen Erwägungen ab. In den anderen Ländern, in denen Flutwellenuntersuchungen gesetzlich vorgeschrieben sind, werden solche Korrekturen nicht angewendet. (Molinaro 1991)



**Abb 2:** Ausbreitung einer Talsperrenbruchwelle in einem städtischen Gebiet (links 1,5 Stunden und rechts 3,3 Stunden nach dem Bruch der Sperre).

**Fig 2:** Surge wave propagation in an urban area (on the left side 1.5 hours and on the right side 3.3 hours after the dam break)

In Abbildung 2 ist die mit einem zweidimensionalen numerisch-hydraulischen Programm berechnete Ausbreitung einer Talsperrenbruchwelle in einem Stadtgebiet zu sehen. Das verwendete Geländemodell beschreibt den Verlauf der Geländeoberfläche ohne Gebäude. Bei derartig hohen potentiellen Durchflüssen kann diese generalisierende Betrachtung vorgenommen werden, da auch höhere Geländebereiche sowie kleinere Häuser überflutet werden könnten. Die Bebauung, die für die Strömung einen erhöhten Widerstand darstellt,

wird über einen sehr niedrigen Rauheitsbeiwert nach Strickler (im vorliegenden Fall  $15 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ) einbezogen und somit gemittelt über das gesamte Überflutungsgebiet berücksichtigt. Nur größere Gebäude sind im Geländemodell berücksichtigt (weiße Flächen).

Für die Berechnung wurde weiterhin eine feste Sohle unterstellt, was ebenfalls eine Näherungslösung darstellt. Vielmehr ist zu erwarten, dass das Wasser bereits Feststoffe (Geschiebe, Bauschutt, Gebäudeteile, Holz, Straßen- und Schienenfahrzeuge, Container u.s.w.) 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, so dass die Anwendung von probabilistischen Geländemodellen erwogen werden könnte.

Eine starke 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 Eisenbahngleise und geringere Fließgeschwindigkeiten innerhalb dichter Bebauung. Dadurch kann die Welle einige Punkte im Stadtgebiet auch eher erreichen als berechnet. Detailliertere Aussagen dazu könnten erst nach eingehenderen und bedeutend aufwändigeren zwei- und dreidimensionalen Untersuchungen gemacht werden.

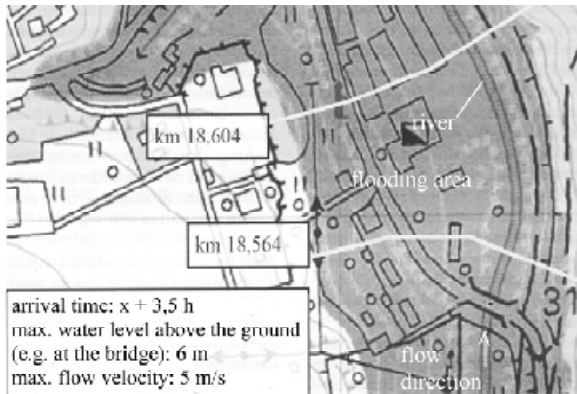
Für erste Abschätzungen könnte man zugrunde legen, dass ähnlich wie in porösen Medien das Verhältnis von Filter- zu Abstandsgeschwindigkeit von einem Verbauungsgrad des Fließquerschnittes abgeleitet werden kann. Man könnte überschläglich davon ausgehen, dass die mit dem freien Querschnitt bei  $k_{\text{St}} = 15 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  berechnete Geschwindigkeit für den Abfluss zwischen einer zu 50 %, dauerhaft der Flutwelle widerstehenden Verbauung verdoppelt werden müsste.

## **GEFAHRENKARTEN UND FAZIT**

Die Ergebnisse der Flutwellenberechnung werden für die Erstellung von Gefahrenkarten benötigt. Diese bilden die Arbeitsgrundlage für die Katastrophenschutzbehörden bei der Planung von Maßnahmen im Unglücksfall.

Neben der Darstellung des potentiellen Überflutungsgebietes können auch die maximal erreichten Wassertiefen dargestellt werden. Ergänzt werden sollte die Karte durch Angaben zum dargestellten Bruchzenario, zur Ankunftszeit der Welle, Ganglinien des Abflusses und des Wasserstandes und weiteren Angaben, die im Katastrophenfall wichtig sind. Wurden die Berechnungen mit zweidimensionalen Programmen durchgeführt ist auch die Darstellung der Fließgeschwindigkeit als Vektordarstellung möglich. Neben der Darstellung als GIS-Projekt sollten die Karten immer auch als Papierausdruck vorhanden sein. So können die Daten zum einem über den elektronischen Weg via Internet zur Verfügung gestellt, sind aber auf der anderen Seite auch bei einem Netzausfall erhältlich. In der Abbildung 3 ist ein Detail einer Gefahrenkarte dargestellt.

Für die Ausweisung von Intensitäten in Sondergefahrenkarten wird bei dynamischen Belastungen das Produkt aus örtlicher Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit verwendet. Werden Risikokarten erstellt, kommt die Auftretenswahrscheinlichkeit hinzu. So wird zwar bei einem Talsperrenbruch eine hohe Intensität erreicht, durch die geringe Auftretenswahrscheinlichkeit ergibt sich insgesamt jedoch ein nur geringes Risiko.



**Abb 3:** Detail einer Sondergefahrenkarte.  
**Fig 3:** Details of an hazard map.

Für die Untersuchung eines Bruchzenarios mit anschließender Berechnung der Wellenausbreitung sind Annahmen hinsichtlich zahlreiche unscharfe Eingangsgrößen zu treffen. Somit stellt eine Gefahrenkarte immer nur ein bestimmtes Szenario dar, dem auch eine bestimmt Eintretenswahrscheinlichkeit zugeordnet werden kann.

Eine weitere Möglichkeit für zukünftige Flutwellenuntersuchungen könnte die Anwendung statistischer Methoden sein. Als Ergebnis könnten dann in den Ereigniskarten Überschreitungslinien für bestimmte Wasserstände dargestellt werden.

## LITERATUR

- Bollrich, G. u.a. (1989): „Technische Hydromechanik“ Band 2. Verlag für Bauwesen, Berlin
- Bornschein, A. (2006):“Die Ausbreitung von Schwallwellen auf trockener Sohle unter besonderer Berücksichtigung der Wellenfront“, Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen, Heft 33, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik, TU Dresden
- CADAM (2000):“Concerted Action on Dambreak Modelling”, European CADAM project, CD-ROM
- IMPACT (2005):“Investigation of extreme flood processes and uncertainty”, final technical report, [www.impact-project.net](http://www.impact-project.net)
- Molinaro, P. (1991):“Dam-Break Wave Analysis – A State of the Art“, in: Computer Methods in Water Resources II, Vol. 2 Computational Hydraulics and Hydrology, Springer Verlag, S. 77-87
- Pohl, R. (1998): „Talsperrenkatastrophen in fünf Jahrtausenden. - Nur Zufälle?“ - Vortragsmanuskript mit weiteren Literaturhinweisen, Bildungsakademie für die Wasserwirtschaft, Essen
- Pohl, R. (2004): „Historische Hochwasser aus dem Erzgebirge“ Dresdner Wasserbauliche Mitteilung, Heft 28, TU Dresden, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik, ISSN 0949-5061, ISBN 3-86005-428-7