

8 Versagen wasserbaulicher Einrichtungen

Michael Müller, Tobias Karrer, Peter Billeter

Das Versagen wasserbaulicher Einrichtungen wurde im Rahmen der sogenannten Bauwerksanalyse untersucht. Dabei wurden die relevanten wasserbaulichen Einrichtungen entlang der Aare, die einen potenziellen Einfluss auf das Gesamtsystem oder die Beurteilungssperimeter haben können, auf mögliche Versagensprozesse inklusiv deren Ursache und Wirkung sowie Versagenswahrscheinlichkeiten untersucht. Im Folgenden wird der Begriff «wasserbauliche Einrichtung» grundsätzlich durch «Bauwerk» ersetzt, einem Element, das die Abflusscharakteristik der Aare allenfalls unter Einfluss weiterer Ereignisse massgeblich verändern kann. Entsprechend umfasste die Bauwerksanalyse drei Hauptaufgaben:

- Beurteilung von wasserbaulichen Einrichtungen auf deren lokalen oder überregionalen Einfluss sowie von möglichen Versagensmechanismen
- Bestimmung von Versagenswahrscheinlichkeiten relevanter Bauwerke
- Analyse des hydraulischen Verhaltens relevanter Bauwerke im Normal- und im Versagensfall

In einem ersten Schritt wurden vier Bauwerkstypen definiert, die eine Klassifizierung der Bauwerke gemäss ihrem Verhalten im Hochwasserfall und den Auswirkungen bei einem allfälligen Versagen erlauben (Kap. 8.1). Diesen Bauwerkstypen wurden sogenannte **generische Flussdiagramme** resp. Funktionsschemen zugeordnet, die erlauben, die möglichen Prozesse an einem Bauwerk systematisch zu beurteilen und realistische Prozessabfolgen darzustellen (Kap. 8.2). Anschliessend erfolgte ein Inventar sämtlicher Bauwerke im EXAR-Einzugsgebiet und eine erste Beurteilung des hydraulischen Verhaltens einzelner Bauwerke im Hochwasserfall. Die erarbeiteten PQ-Beziehungen dienen als Input ins hydraulische 2D-Modell (Kap. 8.3).

Basierend auf den Erkenntnissen aus den Begehungen und den Resultaten der numerischen Simulationen wurden anschliessend bei der Schlüsselstellenanalyse diejenigen Bauwerke gutachterlich ausgewählt, die einen potenziellen Einfluss auf das (Sub-) Systemverhalten haben können. Zwecks Ausscheidung von Schlüsselstellen sowie auch für die Gefährdungsbeurteilung an den Beurteilungssperimetern wurden deshalb PQ-Beziehungen von Bauwerken mit Versagen als Input ins hydraulische 2D-Modell weitergegeben (Kap. 8.3).

Schliesslich wurden diejenigen Bauwerke, deren (Teil-)Versagen oder Beeinträchtigung entweder für das Gesamtsystemverhalten oder für die Gefährdung an den Beurteilungssperimetern relevant sind, detaillierter studiert. Der Detaillierungsgrad und die Berechnungsmodelle der strukturellen Analysen wurden dabei projekt-, resp. stufengerecht je nach vorhandenen Daten und in Absprache mit dem Expertenbeirat gewählt. Die Bearbeitungstiefe entspricht dabei nicht derer eines Sicherheitsnachweises von Talsperren oder Stauanlagen, resp. einer Talsperren-Versagensanalyse. Mittels gängiger Ansätze aus der **strukturellen Zuverlässigkeitsanalyse** wurden die Versagenswahrscheinlichkeiten bestimmt, die als Input für AP1 zur Ereignisbaumanalyse und Erstellung der Gefährdungskurve verwendet wurden (Kap. 9). In die Gefährdungskurve flossen zudem die Unsicherheiten ein, die im Rahmen der Bauwerksanalysen quantitativ beschrieben wurden (Kap. 8.4).

Weitere Ausführungen zur Methodik sind im Detailbericht D einsehbar. Die vollständigen Ergebnisse zu allen untersuchten Bauwerken sind in den Resultatmappen dokumentiert, die relevanten Ergebnisse für Schlüsselstellen bzw. Beurteilungssperimeter sind hier in den entsprechenden Resultatkapiteln (Kap. 10 ff.) summarisch erläutert.

8.1 Bauwerkstypen

Zu den relevanten wasserbaulichen Einrichtungen gehören zum einen Querbauwerke, d.h. Staumauern und Stauwehre, je nach Funktion mit dazugehörigen hydroelektrischen Anlagen, und Längsbauwerke wie Hochwasserschutzdämme (HWS-Dämme) oder Ufer-

sicherungen. Des Weiteren können Brücken bei auftretendem Schwemmholtz und entsprechender Verklauungsgefahr lokalen Einfluss haben, was insbesondere bei der Betrachtung einzelner Subsysteme resp. Beurteilungssperimetern zum Tragen kommt. Eine ähnliche Bedeutung kommt potenziellen Hangrutschungen zu, die den Fliessquerschnitt der Aare massgeblich einengen oder blockieren können. Die spezifische Methodik bezüglich Rutschungen ist in Kapitel 6.2 dargelegt.

Gemäss der Terminologie der Studie werden sämtliche Bauwerke als sogenannte Analysestandorte bezeichnet. Eine Klassifizierung der Bauwerke, resp. Analysestandorte wurde wie folgt vorgenommen:

- Stauanlage (Stauwehr/Staumauer, allenfalls mit zugehörigem Wasserkraftwerk)
- Brücke
- Seitendamm
- Rutschung

Die Standorte mit einer potenziellen Bildung eines neuen Fliessweges (d. h. Reaktivierung eines bestehenden Fliessweges oder Erosion eines neuen Laufs resp. Laufverlagerung) werden dabei nicht als eigener Bauwerkstyp betrachtet, sondern werden entweder durch die Versagensprozesse an Seitendämmen oder direkt durch die Resultate aus den numerischen Simulationen (morphologische Szenarien) ausgewiesen.

8.2 Bauwerksanalyse und Funktionsschemen

Die Bauwerksanalyse hat zum Ziel, die potenziell relevanten Bauwerke mit einem Einfluss auf das Gesamtsystem und – je nach Standort der Beurteilungssperimeter – auf ein spezifisches Subsystem zu identifizieren. Eine erste Triage zwischen relevanten und irrelevanten resp. vernachlässigbaren Bauwerken erfolgte basierend auf einem Inventar der Bauwerke im untersuchten Flussabschnitt und beruhte auf zwei Ansätzen:

- Je nach Standort erlaubte eine gutachterliche Beurteilung mit Berücksichtigung der topographischen, geologischen und strukturellen Randbedingungen ein Bauwerk als (Sub)System-irrelevant einzustufen.
- Führten die Randbedingungen nicht eindeutig zu einem Ausschluss, konnte mittels Wasserspiegellagen aus den Nullläufen (Zustand ohne Versagen) bei der Schlüsselstellenanalyse bestimmt werden, ob ein Bauwerk überhaupt durch die Wasserspiegellage beeinflusst wird. Diese Methode bezieht sich nur auf hydrologisch bedingte Abflüsse und Versagen. Ein Bruch durch Erdbeben kann nicht vorgängig ausgeschlossen werden, ohne dass eine strukturelle Analyse des Bauwerks vorliegt.

Um sämtliche Bauwerke entlang der Aare systematisch auf mögliche Prozesse zu beurteilen und realistische Prozessabfolgen darzustellen, wurden sogenannte generische Flussdiagramme für jeden Bauwerkstyp entwickelt (siehe Abbildungen im Detailbericht D). Diese enthalten alle möglichen Ereignisse, Einwirkungen und Prozesse, die beim spezifischen Typ Analysestandort in Betracht gezogen werden müssen. Die generischen Flussdiagramme bildeten die Grundlage für das Funktionsschema, das eine schematische Übersicht aller relevanten Prozesse für einen oder mehrere spezifische Analysestandorte sowie deren Interaktionen (Prozesskette) darstellt.

8.2.1 Relevante Ereignisse

Als auslösende Ereignisse wurden Naturgefahrenprozesse betrachtet. Auf Basis der von AP2 erarbeiteten Grundlagen wurden die Bauwerke entlang der Aare auf ihre Funktionsweise und/oder ihr Versagen bei hydrologischen Ereignissen untersucht. Zusätzlich zu extremen Hochwasserereignissen wurde der Einfluss einer Erdbebeneinwirkung auf die grossen Staumauern untersucht, da letztere bei einem Bruch einen relevanten Einfluss auf die Abflussbedingungen in der Aare haben können. Die grossen Stauanlagen (Sperrklasse I) müssen dabei mindestens einem Erdbeben mit einer Häufigkeit von $1E-4$ /Jahr standhalten (BFE 2016; BKW Energie AG 2018a, b). Entsprechend kann davon ausgegangen werden, dass ein Versagen dieser Stauanlagen mit Häufigkeiten seltener

als $1E-4$ /Jahr stattfindet. Eine Überlagerung von Hochwassern und Erdbeben wurde aufgrund der Seltenheit und der grundsätzlichen Unabhängigkeit nicht berücksichtigt, da davon ausgegangen werden kann, dass die kombinierte Ereigniswahrscheinlichkeit ausserhalb der in EXAR adressierten Wahrscheinlichkeitsbereiche ($< 1E-7$ /Jahr) zu liegen kommt. Berücksichtigte Erdbeben wurden folglich mit einem hydrologischen Szenario mit Spitzenabfluss von HQ_1 kombiniert.

Erdbeben an Fliessgewässern können nur in Kombination mit grossen zurückgehaltenen Wassermengen ein Ereignis innerhalb des zu beurteilenden Wahrscheinlichkeitsbereichs verursachen. Da ein Erdbebenschaden an einem Hochwasserdamm ohne Hochwasser irrelevant bleibt, wurden keine Erdbebenanalysen an Seitendämmen durchgeführt.

8.2.2 Einwirkungen

Als Einwirkungen werden Vorgänge bezeichnet, die zusätzlich zu einer rein hydrologischen Situation, also einem erhöhten Abfluss in der Aare, einen Versagensprozess an einem Analysestandort auslösen können. Dazu gehören insbesondere die Verklausung durch Schwemmholz, der technisch oder durch Betriebs-/Entscheidungsfehler bedingte Ausfall von Regulier- und Entlastungsorganen, aber auch Erosions- und Auflandungsphänomene sowie – im Falle der grossen Staumauern – erdbebenbedingte Bewegungen.

8.2.3 Prozesse

Als Prozesse werden sämtliche möglichen Versagen eines Bauwerks betitelt, die unter der erhöhten Belastung während eines Hochwassers und/oder eines Erdbebens sowie mit/ohne Berücksichtigung zusätzlicher Einwirkungen auftreten können. Dabei sind die meisten Versagen das Resultat einer Aneinanderreihung von Phänomenen, so dass nicht nur spezifische Versagensprozesse, sondern verschiedene mögliche Prozessketten aufgeführt werden.

Die Auswirkungen der Prozesse wurden entweder in den hydraulischen 2D-Simulationen mit BASEMENT im Subsystem untersucht oder gutachterlich beurteilt. Dafür wurden die hydraulischen Randbedingungen in Form von PQ-Beziehungen für Stauanlagen, Brücken und Seitendämme der korrekt funktionierenden und der (teilweise) beschädigten Einrichtungen an den Analysestandorten als Grundlage für die numerische Modellierung definiert. Das hydraulische Verhalten der jeweiligen Bauwerke wird in den nachfolgenden Kapiteln 8.3.2 bis 8.3.5 kurz beschrieben.

8.3 Versagen und Versagenswahrscheinlichkeiten

Damit der Gefährdung durch Hochwasser mit oder ohne Bauwerksversagen eine Häufigkeit zugeordnet werden konnte, mussten für die jeweiligen Ereignisse, Einwirkungen und Prozesse Wahrscheinlichkeiten bestimmt werden, die je nach Prozesskette (Versagensszenario) miteinander verknüpft sind. Die Ereigniswahrscheinlichkeit ist sowohl für die Hydrologie wie auch für die Erdbeben gegeben durch die Jährlichkeiten der Abflüsse, resp. der Erdbebenbeschleunigungen. Im Rahmen der Bauwerksanalyse wurden Wahrscheinlichkeiten für die Einwirkungen Verklausung sowie für verschiedene strukturelle Versagensprozesse bestimmt. Dabei wurde das Versagen in Hinblick auf eine potenzielle Auswirkung auf die Wasserspiegellage betrachtet.

In Abhängigkeit der zufließenden Ganglinie, der zusätzlichen Einwirkungen und der ausgelösten Prozesse mit allfälligem Versagen wird die Ganglinie Q_{out} flussabwärts eines Bauwerks verändert. Die Spitze und die Form dieser Ganglinie im Unterwasser werden zudem vom Zeitpunkt des Versagens beeinflusst sowie vom vorhandenen Stauvolumen zum Zeitpunkt des Versagens. Die nach dem Versagen veränderte PQ-Beziehung des Bauwerks bestimmt die Gestalt der Ganglinie mit.

Daher galt es nach der Analyse möglicher Versagensprozesse in einem zweiten Schritt, die entsprechenden PQ-Beziehungen und/oder Geometrien zu bestimmen, die eine Veränderung des Systems abbilden resp. bewirken.

8.3.1 Generelle Herangehensweise

Für die relevanten Stauanlagen und Seitendämme wurde eine strukturelle Zuverlässigkeitsanalyse durchgeführt. Diese zielt darauf ab, die Versagenswahrscheinlichkeit eines Systems aufgrund von Unsicherheiten in der Bemessung, der Herstellung oder den Umwelteinflüssen zu quantifizieren. Im Unterschied zum deterministischen Ansatz mit fixen Berechnungsparametern werden die Bemessungsvariablen in der Zuverlässigkeitsanalyse durch ihren Mittelwert, eine Standardabweichung und eine Verteilungsfunktion eingeführt.

Grundsätzlich müssen an einem Bauwerk gewisse kritische Bedingungen herrschen, damit es überhaupt zu einem Versagensprozess kommen kann. Einerseits spielt die Wasserspiegellage eine wesentliche Rolle, andererseits kann auch eine lang andauernde Belastung insbesondere bei Seitendämmen eine Gefahr darstellen. Die Versagenswahrscheinlichkeiten wurden in Funktion der Wasserspiegellage ermittelt und in **Verletzbarkeitskurven** dargestellt. Der Belastungsdauer wurde gutachterlich Rechnung getragen. Weitere Ausführungen zur Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit sind in Detailbericht D einsehbar.

Bei Brücken wurden weder statische Berechnungen noch eine Zuverlässigkeitsanalyse durchgeführt, da im Projekt keine detaillierten Brückenpläne oder Statikberichte zur Verfügung standen. Eine strukturelle Analyse hätte demnach auf (zu) zahlreichen Annahmen hinsichtlich Tragstruktur, Baumaterialien, Widerlagereigenschaften und Einbindetiefen basiert.

8.3.2 Stauanlagen

Stauanlagen bestehen häufig aus einem Stauwehr resp. einer Talsperre und einem zugehörigen Kraftwerk. Im Normalfall wird dabei durch den Betrieb von Regulierorganen am Absperrbauwerk ein bestimmtes Stauziel gehalten, so dass das Kraftwerk bei konstantem Oberwasserstand produzieren kann. Im Hochwasserfall werden die Regulier- resp. Hochwasserentlastungsorgane am Stauwehr oder der Staumauer sukzessive gemäss bestimmten anlageeigenen Reglementen geöffnet, bis bei Vollöffnung der Organe die maximale Kapazität der Stauanlage erreicht ist. Ab diesem Moment erhöht sich bei steigendem Abfluss aus dem Oberwasser die Wasserspiegellage vor dem Stauwehr resp. der Staumauer. Nachfolgend wird für das Absperrbauwerk der Begriff «Wehr» verwendet, die Ausführungen gelten jedoch sinngemäss auch für Talsperren.

Als Einwirkung auf ein Wehr wurde einerseits eine Verklausung der Wehrfelder durch Schwemmholz, andererseits ein technischer oder aufgrund von Betriebs-/Entscheidungsfehlern bedingter Ausfall von Entlastungsorganen ($n-x$, Anzahl geöffnete Wehrfelder) bezeichnet. Für die Szenarien mit Betriebs-/Entscheidungsfehlern oder technischen Fehlern wurden die Fälle i) alle Wehrfelder geschlossen ($n-n$) und ii) einige, aber nicht alle Wehrfelder geschlossen (z. B. $n-3$) berücksichtigt. Eine fundierte Abschätzung realistischer Wahrscheinlichkeiten für solche Ausfälle ist schwierig. Bei den kritischen Bauwerken deuten Hinweise der Betreiber hinsichtlich der Redundanz und Vielfalt der Mittel zum Öffnen der Wehrfelder darauf hin, dass ein technisches Versagen unwahrscheinlich ist. Hier wurde angenommen, dass der menschliche und organisatorische Beitrag vergleichsweise gross ist. Bei diesem Beitrag geht es nicht um eine fehlerhafte Bedienung, sondern um eine unangemessene Hochwasserschutzstrategie oder Entscheidung. Da es für die betrachteten Grössenordnungen von Hochwasserereignissen keine konkreten Erfahrungen gibt, wurden vorläufige Wahrscheinlichkeiten verwendet ($1E-3$ für den Zustand $n-n$, $1E-1$ für den teilweise geschlossenen Zustand $n-x$). An jedem Beurteilungsperimeter wurde die Sensitivität der Ergebnisse aus der Gefährdungskurve mit Bezug auf diese Werte bewertet, wobei derzeit kein Anspruch darauf erhoben wird, dass diese Werte konservativ sind.

Bei bekannter Wehrstruktur und Beschaffenheit des Untergrundes wurde für eine relevante Stauanlage der Quotient Einwirkung/Widerstand gegenüber diverser Versagensmechanismen (z. B. Kippen, Gleiten, Grundbruch, Widerlagerversagen usw.) für verschiedene Wasserstände berechnet. Die Bearbeitungstiefe entspricht dabei nicht einem Sicherheitsnachweis von Talsperren oder Stauanlagen resp. einer Talsperren-Versagensanalyse. Der Detaillierungsgrad und die Berechnungsmodelle wurden projekt- resp.

stufengerecht und je nach vorhandenen Daten gewählt und die Berechnungen mittels vereinfachter, aber gängiger und vom Expertenbeirat als ausreichend bewerteter Ansätze durchgeführt. Anschliessend konnte in Abhängigkeit des Wasserspiegels im Oberwasser die Versagenswahrscheinlichkeit (Schadenswahrscheinlichkeit) definiert werden. Entsprechend konnte jeder Wasserspiegellage (rein hydrologisch bedingt oder unter zusätzlicher Einwirkung wie zum Beispiel Verklausungen, Betriebs-/Entscheidungsfehler und technischer Fehler) eine Versagenswahrscheinlichkeit zugeordnet und schliesslich eine Zuverlässigkeits- sowie eine Schadenskurve erstellt werden.

Je nach Geometrie des Wehrs und des massgebenden strukturellen Verhaltens (Kippen, Gleiten usw.) wurde beurteilt, ob eine Struktur unter einer gewissen Belastung vollends oder nur teilweise bricht. Entsprechend ergibt sich im Unterwasser eine mehr oder weniger ausgeprägte Flutwelle, resp. im Oberwasser einen mehr oder weniger lange andauernden Aufstau.

Zusätzlich zu extremen Hochwasserereignissen wurde der Einfluss einer Erdbebeeinwirkung auf die grossen Staumauern untersucht, da letztere bei einem Bruch einen relevanten Einfluss auf die Abflussbedingungen in der Aare haben können. Die Auswirkungen von Erdbeben auf die Hochwasserwelle wurden nur für die grossen Staumauern Rossens, Schiffenen und die Stauanlage Mühleberg näher untersucht, da Erdbeben an Fliessgewässern nur in Kombination mit grossen zurückgehaltenen Wassermengen ein Ereignis mit ähnlichen Auswirkungen wie Extremhochwasser verursachen können. Die dazu erforderliche Analyse der erdbebenbedingten Versagenswahrscheinlichkeiten von Stauanlagen wurde nicht im Rahmen von EXAR durchgeführt. Hierzu wurden Daten von bestehenden Studien verwendet.

Für die Modellierung der rein hydrologischen Szenarien ohne Bauwerksversagen wurden PQ-Beziehungen für sehr hohe Abflüsse und für sämtliche Stauwehre und Staumauern entlang der Aare und ihrer Zubringer erstellt. Bei den Simulationen der Extremhochwasser wurden als Normalzustand geöffnete Wehrfelder angenommen. Die PQ-Beziehungen bilden folglich den Durchfluss durch sämtliche vorhandenen Wehrfelder bei komplett geöffneten Organen ab. Zur Kalibrierung dieser PQ-Beziehungen standen mehrheitlich bereits bestehende PQ-Beziehungen für geringere Abflussmengen, aber bekannter Nominalkapazität bei Stauziel und Bemessungsabflüssen (n und $n-1$) zur Verfügung. PQ-Beziehungen für (Teil-)Ausfälle wurden basierend auf der Wehrgeometrie neu berechnet und an das numerische Modell übergeben (Detailbericht D). Flutwellen nach Sperrenbrüchen wurden im 2D-Modell berechnet und nicht als PQ-Beziehung formuliert.

8.3.3 Brücken

Brücken kommen als relevante Bauwerke zum Tragen, wenn die Wasserspiegellage im Bereich Unterkante (UK) Brückenplatte zu liegen kommt oder die Präsenz von Brückenpfeilern zu einer erhöhten Verklausungsgefahr führt. Das «Versagen» beim Bauwerkstyp Brücken besteht darin, dass der Fliessquerschnitt aufgrund einer Verklausung bei hohem Schwemmholzaufkommen blockiert, resp. eingeengt wird und dadurch eine erhöhte Wasserspiegellage im Oberwasser der Brücke verursacht wird.

Das abgeschätzte Schwemmholzpotenzial fliesst in die Bauwerksanalyse ein und bestimmt dort zusammen mit anderen Faktoren (Anströmverhältnisse, Freibord, Dimensionen des Schwemmholzes, Brücken- und Flussbetteigenschaften) die Verklausungswahrscheinlichkeit. Die Verklausungswahrscheinlichkeit sowie der zugehörige Aufstau oberwasserseitig wurden dabei mittels gängiger Ansätze aus der Literatur abgeschätzt (Kap. 6.1). Wie in Kapitel 6.1.3 beschrieben, wurde angenommen, dass der Beginn einer Verklausung mit einer sukzessiven Verlegung der gesamten Brückenbreite einhergeht.

Eine Verklausung an einer Brücke hat einen Anstieg der Wasserspiegellage im Oberwasser der Brücke zur Folge. Solange die Brücke stehen bleibt, bewirkt der Aufstau eine Retention sowie je nach Topografie eine Überflutung des umliegenden Geländes. Die Ganglinie Q_{out} im Unterwasser der Brücke wird in der Regel leicht gedämpft. Für die numerische Modellierung der Versagensszenarien mit Brückenverklausung wurde der Aufstau an der Brücke in Form einer PQ-Beziehung abgebildet (Detailbericht D).

Sollte eine Brücke aufgrund der Belastung durch Schwemmholz und erhöhtem Wasserdruck oder aufgrund eines ausgeprägten Kolks am Pfeilerfundament strukturell ver-

sagen und zusammenbrechen, würde die Wasserspiegellage im Oberwasser sinken und damit der Einfluss, resp. die Gefährdung hinsichtlich Überflutungshöhe oberwasserseitig entschärft. Im Unterwasser käme es aufgrund des Brückenversagens und der mehr oder weniger plötzlichen Auflösung der Verklauung zu einer kleinen Flutwelle. Der Einfluss dieser Welle bei den betrachteten extremen Hochwassern wäre nur lokal feststellbar und bereits nach kurzer Fließdistanz stromabwärts kaum mehr massgebend. Deshalb wurden für Brücken keine strukturellen Analysen und Berechnungen durchgeführt. Das heisst, dass ein Brückenversagen aufgrund erhöhten Wasserdrucks und aufgrund von Kolkphänomenen nicht weiter untersucht wurde.

Nach dem Zusammenbruch einer verklauten Brücke könnten Trümmerteile im Gerinne liegen bleiben und als bühnenartige Strukturen strömungslenkend wirken. Schlimmstenfalls ergibt sich dadurch eine Umlenkung des Gerinnes mit neuen, lokalen Strömungsangriffen und entsprechenden Seitenerosionen oder gar Laufverlagerungen. Solche lokalen Phänomene nach einem Brückeneinsturz wurden jedoch im Rahmen von EXAR nicht detaillierter beurteilt.

Durch den Kollaps einer verklauten Brücke würde zudem plötzlich eine grössere Menge Schwemmholz frei. Da in der Gefahrenbeurteilung grundsätzlich das Bruttonprinzip angewandt wurde, das mögliche Schwemmholzverluste im Oberlauf eines Bauwerkes nicht berücksichtigt (Kap. 6.1.2), musste diese freiwerdende Schwemmholzmenge nicht extra berücksichtigt werden.

8.3.4 Seitendämme

Hochwasserschutzdämme und Seitendämme an Oberwasserkanälen von Kraftwerksanlagen können in Form einer Breschenbildung versagen, was entweder einen neuen Fließweg oder die Aktivierung eines Retentionsraums zur Folge hat.

Die Bandbreite der Wasserspiegellagen, die zu einem Versagen führen, bewegt sich unabhängig von der Einwirkungsdauer innerhalb einiger Dezimeter. Die Gerinne sind bei den in EXAR betrachteten sehr seltenen Hochwasserereignissen sehr gut oder sogar bordvoll gefüllt, d.h. es verbleibt wenig oder kaum mehr Freibord bis zur Dammkrone. Kommt es zu einem Überströmen eines Seitendamms, genügen gewöhnlich einige Dezimeter Wassertiefe über der Krone, um eine Breschenbildung zu initiieren. Zudem führt der Versagensprozess aufgrund der fortwährenden Ganglinie Q_{in} nur zu einer beschränkten Absenkung der Wasserspiegellage über die Bresche (keine plötzliche Entleerung eines Stauvolumens), so dass der entlastete Abfluss in den Retentionsraum nur langsam und in Funktion von Q_{in} variiert. Hingegen ist der Zeitpunkt des Versagens für die Veränderung der Ganglinie Q_{out} massgebend, da in Abhängigkeit der Ganglinie Q_{out} und der Retentionskapazität neben dem Gerinne mehr oder weniger Volumen zurückgehalten werden kann.

In Abhängigkeit der Dammbauweise wurde für eine Bandbreite von Wasserhöhen (in Funktion der Einwirkungsdauer) die Versagenswahrscheinlichkeit bestimmt. Bei nicht bekannten Dammeigenschaften (Bauweise/Geometrie, Materialkennwerte von Stützkörper, Deckschicht, Koffer und Dammfilter) wurden plausible Annahmen getroffen. Unter Berücksichtigung des Widerstands und der Einwirkung wurden das Verhalten des Dammes resp. dessen Stabilität gegenüber Gleitkreisen, Sickerlinien, hydraulischem Grundbruch und Überströmung untersucht. Ein Versagen aufgrund einer zu langen Einwirkungsdauer wurde gutachterlich abgeschätzt.

Für als kritische Analysestandorte beurteilte Seitendämme wurden PQ-Beziehungen für das Überströmen des Dammes sowie für eine bis auf das luftseitige Terrain erodierte Bresche erstellt. Die Breschenlänge wurde dabei jeweils auf die Flussbreite am betrachteten Standort festgelegt (BOILLAT 2005; ROSIER *et al.* 2008a, b).

8.3.5 Rutschhänge

Rutschungen werden dann relevant für das Abflussverhalten, wenn so viel Hangmaterial mobilisiert werden kann, dass der Abflussquerschnitt der Aare massgeblich eingeschränkt wird. Eine Rutschung dieses Ausmasses kann durch Infiltration, Hangunterschneidung durch fluviale Seitenerosion oder auch spontan ausgelöst werden und führt

je nach Rutschvolumen zu einem Aufstau mit temporärer Abflussdämpfung bzw. einer Umlenkung des Abflusses. Die spezifische Methodik bezüglich Rutschungen ist in Kapitel 6.2 dargelegt.

8.4 Unsicherheiten

Bei den angewandten Ansätzen aus der Zuverlässigkeitstheorie (Übersichten sind in SUDRET [2007] und SCHNEIDER und SCHLATTER [2007] zu finden), gilt es jeweils eine statistische Verteilung von Einwirkung und Widerstand anzunehmen oder zu nähern. Zwar liefert die Literatur Methoden und Werkzeuge zur Bestimmung der Zuverlässigkeit, resp. der Versagenswahrscheinlichkeit, allerdings ist bei der Herleitung von Verletzbarkeitskurven insbesondere bei Stauwehr-, Staumauer- und HWS-Dammversagen aufgrund einer geringen Anzahl von Erfahrungswerten stets ein gutachterlicher Ansatz erforderlich. Gemäss SCHNEIDER und SCHLATTER (2007) bleibt auch eine über die Zuverlässigkeitstheorie hergeleitete Versagenswahrscheinlichkeit in einem gewissen Grad subjektiv und vom Informationsstand des Begutachters abhängig.

Im Rahmen von EXAR wurden viele Grundlagendaten gesammelt und ausgewertet. Falls vorhanden wurden Planunterlagen, technische Berichte und Statikberichte genutzt, um die Bemessungsgrössen festzulegen. Bei unzureichender Datenlage wurde einerseits auf Erfahrungswerte aus ausgeführten Projekten zurückgegriffen und/oder den Empfehlungen vom Probabilistic Model Code des JCSS (Joint Committee on Structural Safety; FABER und VROUWENVELDER 2001) gefolgt.

Die Unsicherheit bei der Bauwerksanalyse resp. der Bestimmung von Eintretenswahrscheinlichkeiten und Ausmass von Versagensszenarien lassen sich wie folgt unterteilen:

1. Unsicherheit bei der Modellbildung des Versagensmechanismus und dessen analytische/rechnerische Abbildung
2. Unsicherheit der Parameter, namentlich deren Mittelwerte und Schwankungsgrössen sowie der Häufigkeitsverteilung

8.4.1 Modellunsicherheiten

Bei grossräumigen, komplexen und räumlichen Tragwerken muss für die praktikable Abbildung der Versagensprozesse im Allgemeinen eine Abstraktion d. h. eine vereinfachende Modellbildung vorgenommen werden. Auch die bei der probabilistischen Analyse verwendeten Grenzzustandsgleichungen (Limit State Functions, LSF) sind von diesen Modellunsicherheiten betroffen, die sich jedoch oftmals nur unzureichend quantifizieren lassen (WEISSMAN 2014). Grundsätzlich wird diese Abstraktion im ingenieurtechnischen Verständnis eher konservativ gemacht. Demzufolge ist das effektive Versagen in der Praxis weniger wahrscheinlich als das Modellversagen.

Sämtliche in der vorliegenden Studie eingesetzten Berechnungsmodelle entsprechen den gängigen Dimensionierungsansätzen oder werden bei deterministischen Nachweisen verwendet. In Absprache mit dem Expertenbeirat wurde darauf verzichtet, die LSF auch noch mit einer Unsicherheit zu behaften, eine eigentliche Rechenmodellunsicherheit wurde nicht eingesetzt.

Ein Teil der Modellunsicherheit entsteht aus Annahmen zum Aufbau des Untergrundes, der in jede Richtung einer starken räumlichen Variabilität unterliegen kann. Bei fehlenden Angaben musste ein gewisser Aufbau vorausgesetzt werden, wobei eine Unsicherheit zur Angabe der Mächtigkeit der einzelnen Schichten (bzw. eine gewisse Bandbreite) mit einer Normalverteilung abgebildet wurde.

Geometrische Unsicherheiten kommen durch Ausführungstoleranzen, Ableseungenauigkeiten, Abhängigkeiten von der Schnittführung bzw. des betrachteten Dammquerschnitts, Ungenauigkeiten in Höhenmodellen usw. zustande. Bei der Zuverlässigkeitsanalyse wurden geometrische Grössen und Raumgewichte in der Regel mit einer Normalverteilung abgebildet, wobei Soll-Grössen und aus Plänen abgeleitete geometrische Grössen als Mittelwert festgelegt wurden. Die Standardabweichung wurde für jeden Parameter spezifisch aus dem Vergleich unterschiedlicher Quellen geschätzt.

8.4.2 Parameterunsicherheiten

Bei völlig unbekanntem Aufbau der Struktur und bei Unkenntnis der verbauten Materialien fällt der Punkt Materialparameter eher in die Kategorie Modellvorstellung (Kap. 8.4.1). Bei bekannten Materialien verbleibt eine Unsicherheit bezüglich deren Zustandseigenschaften und Qualität. Bei den Dichten von Wasser und festen Baustoffen (Beton, Stahl) liegt die Standardabweichung im tiefen Prozentbereich, bei den Elastizitätsmodulen oder Steifigkeiten ist die Unschärfe etwas grösser. Grosse Unsicherheiten, die eine gutachterliche Schätzung verlangen, existieren beim Baugrund und den geotechnischen Kennwerten (Standardabweichungen von typischerweise 10–30%).

Grundsätzlich wurden Widerstandswerte und Materialkennwerte (inkl. geotechnischer Kennwerte) mit der Log-Normalverteilung abgebildet. Das gilt insbesondere für alle strikt positiven Werte. Bei grossen Standardabweichungen wurde der Wertebereich auf physikalisch zulässige Werte beschränkt (z. B. Raumgewicht von Wasser). Empirische Koeffizienten wurden mit einer Gleichverteilung über einen relativ grossen Bereich modelliert.

Die Unsicherheiten der Einwirkungen ergeben sich durch die Summe der Unsicherheiten der gewählten Hochwasserereignisse, die Annahmen von Betriebs-/Entscheidungsfehlern und technischen Fehlern, die Unsicherheiten des hydraulischen Modells, die abgeschätzten Schwemmholz- und Geschiebemenge sowie die Unsicherheiten bezüglich allfälliger falsch oder nicht berücksichtigter Versagensprozesse (z. B. Kolkbildung unter Annahmen von Geologie, Sohlenlage bis Versagen). Bei dynamischen Prozessen wie Kolkbildung und Erosion bei Um- und Überströmen von Dämmen und/oder Widerlagerbereichen sind ebenfalls Unsicherheiten hinsichtlich des Ist-Zustands vorhanden (Sohlenlage, Bausubstanz, Baugrund).

8.4.3 Umgang mit Unsicherheiten

Für die Weitergabe der berechneten Versagenswahrscheinlichkeiten und deren Implementierung in die Ereignisbaumanalyse werden nicht nur Versagenswahrscheinlichkeiten einzelner Systemkomponenten (Wehr, Damm, Staumauer), sondern auch Grenzen (engl. bounds), die die **epistemische Unsicherheit** widerspiegeln, erwartet. Die epistemische Unsicherheit entsteht, weil bei fehlenden Grundlagen keine Gewissheit besteht, ob die richtigen Verteilungen und **Hyperparameter** (z. B. Mittelwert und Standardabweichung im Falle einer Normalverteilung) gewählt wurden. Beispielsweise muss für die Beurteilung der Böschungsstabilität eine Verteilung von Kohäsion und innerem Reibungswinkel bestimmt werden. Üblich ist die Verwendung einer Log-Normalverteilung. Sind gar keine Angaben zum Dammschüttmaterial vorhanden, ist unklar, ob die Hyperparameter von Sand, Kies oder leicht kohäsivem Material eingesetzt werden sollen. Dieses Problem wird gelöst, indem die Berechnungen mit mehreren Sets an Hyperparametern durchgeführt werden. Es entsteht eine Kurvenschar bestehend aus mehreren Verletzbarkeitskurven für verschiedene Hyperparameter.

Um den Unsicherheiten in der Bauwerksanalyse Rechnung zu tragen, wurden bei der Zuverlässigkeitsanalyse der Stauanlagen und Seitendämme drei (Hyper-) Parametersätze verwendet. Somit konnte eine mögliche Bandbreite der Wahrscheinlichkeiten abgebildet werden:

- Beste Annahme (best estimate): Wahl der Parameter nach bestem Wissen
- Pessimistisch (pessimistic): Wahl schlechter, aber realistischer Kennwerte
- Optimistisch (optimistic): Wahl günstiger, aber realistischer Kennwerte

Das Resultat aus dieser Analyse sind drei Verletzbarkeitskurven. Die erwartete Versagenswahrscheinlichkeit p_f wird von der Kurve «Beste Annahme» abgelesen und fliesst zusammen mit den unteren ($p_{f,min}$, Resultat aus Berechnung mit optimistischen Werten) und oberen Grenzwerten ($p_{f,max}$, Resultat aus Berechnung mit pessimistischen Werten) in die Ereignisbaumanalyse ein. Die Eignung des pessimistischen Parametersets als oberer Grenzwert und des optimistischen Parametersets als unteren Grenzwert wurde mittels einer durchgeführten Sensitivitätsanalyse anhand der FORM-Methode bestätigt (Detailbericht D, Kap. 6.1.3) bestätigt. Details zu diesem Vorgehen und weshalb die Verwendung von unteren und oberen Grenzwerten in diesen Fällen möglich und zulässig ist, sind in Detailbericht D, Kapitel 5.1 beschrieben.