

# Wie sicher sind unsere 100 Jahre alten Staumauern?

Dr.-Ing. Volker Bettzieche

Abteilung Talsperrenüberwachung und Geotechnik, Ruhrverband, Essen

Kurzfassung des Vortrags im Rahmen der Donnerstag-Vortragsreihe  
an der Bauhaus-Universität Weimar am 08.11.2001

## Inhalt

- 1 Talsperrenbau in Deutschland**
- 2 Talsperrensicherheit nach DIN 19700**
- 3 Nachweis von Sicherheit - Berechnungsverfahren für Staumauern**
  - 3.1 Nachweis der Standsicherheit nach Intze
  - 3.2 Kragträgerverfahren
  - 3.3 Nachweis mit Hilfe der Finite Elemente Methode
  - 3.4 Realitätsnahe Rissiteration
  - 3.5 Wiederherstellung der Sicherheit - Sanierung von Staumauern
  - 3.6 Weiterentwicklung des Sicherheitsbegriffs / Risiko
- 4 Zerstörung von Talsperren durch den Menschen**
- 5 Zusammenfassung**

# 1 Talsperrenbau in Deutschland

Seit mehr als 500 Jahren werden in Deutschland Stauanlagen gebaut. So z. B. im Erzgebirge und im Harz, mit dem Ziel, eine Wasserhaltung für den Bergbau sicherzustellen. Seit etwa 1900 sprechen wir von modernen Talsperren, von denen heute nach dem World-Register of Dams der ICOLD 311 Talsperren in Deutschland im Betrieb sind. Zwischen 1900 und 1916 wurden in jedem Jahr etwa zwei bis vier Staumauern in Deutschland fertiggestellt. Diese Staumauern wurden als Gewichtsstaumauern mit Hilfe von Bruchsteinmauerwerk errichtet. Auch zwischen den beiden Weltkriegen wurden Talsperren in gleicher Anzahl errichtet, wobei immer häufiger Dammkonstruktionen gewählt wurden. Der Boom des Talsperrenbaus in Deutschland fand in den 60er und 70er Jahren statt. So wurden z. B. 1974 13 Talsperren in Betrieb genommen.

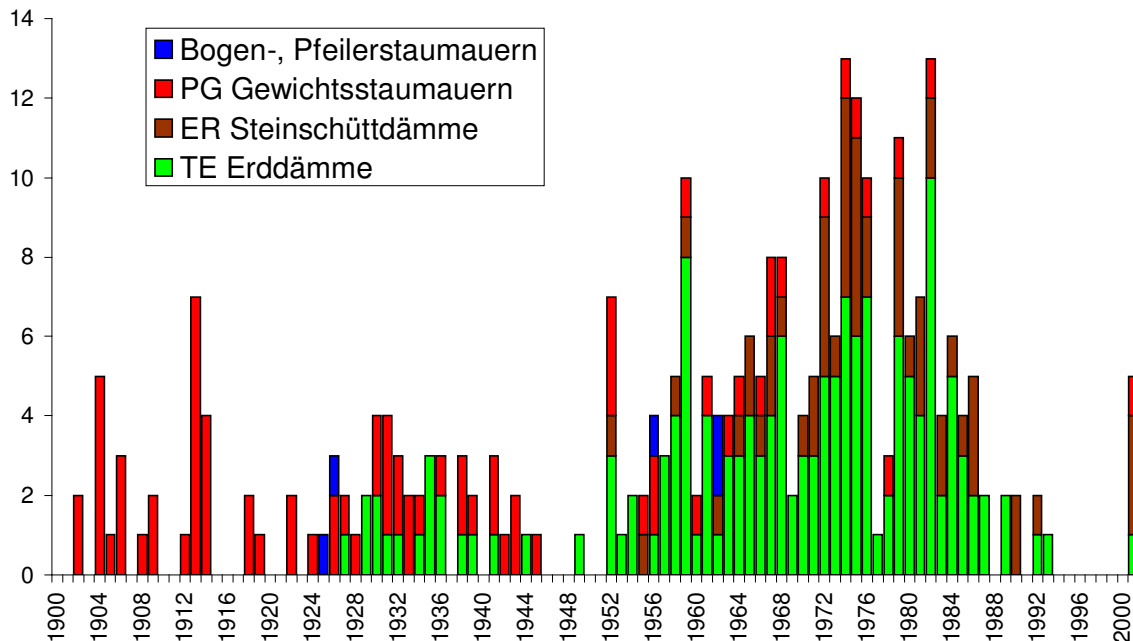


Abbildung 1: Bau von Talsperren in Deutschland

Der Bau von Bruchsteinmauern in Deutschland ist eng mit dem Namen „Otto Intze“ verknüpft. Prof. Otto Intze lebte von 1843 bis 1904 und war zuletzt als Professor an der Universität Aachen tätig. Nahezu alle in Deutschland gebauten Bruchsteinmauern beruhen auf dem von ihm entwickelten Bauprinzip. Diese Talsperren befinden sich insbesondere in Nordrhein-Westfalen, in Thüringen und in Sachsen. Auf die Merkmale dieser so genannten "Intze-Mauern" wird später noch eingegangen.

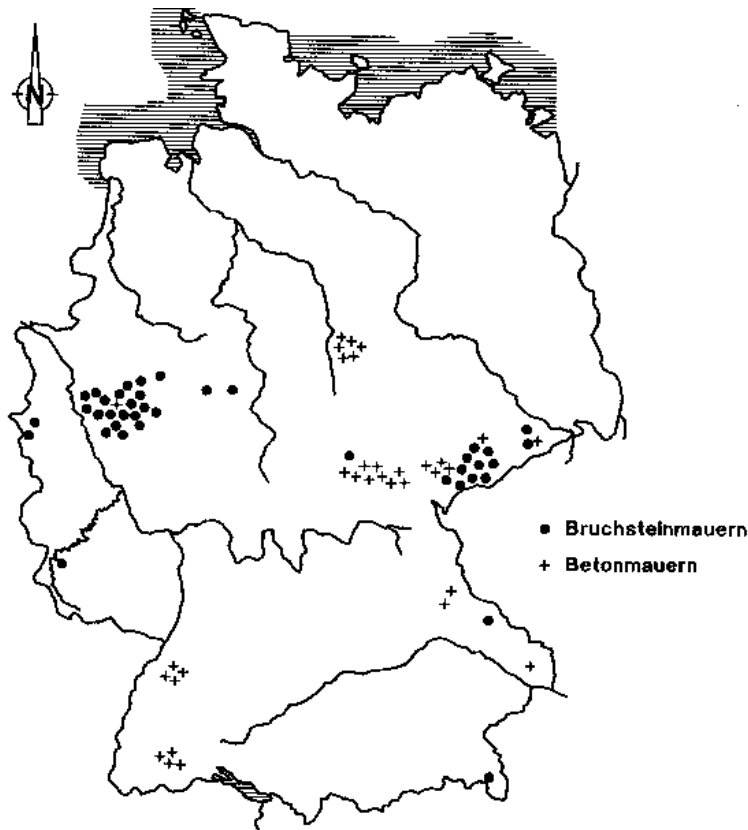


Abbildung 2: Gewichtsstaumauern in Deutschland

Der Bau und Betrieb von Talsperren ist seit jeher mit Unglücksfällen verbunden. Einer der ersten dokumentierten Talsperrenbrüche neuzeitlicher Staumauern ereignete sich 1802 in Spanien. Hier brach am 30. April die Puentes-Staumauer. Die Bruchsteinmauer mit einer Höhe von 50 Metern und einer Länge von 282 Metern war von 1785 bis 1791 errichtet worden. Sie stand in einem schmalen Tal, in dessen Talsohle das Flussbett mit mehreren Metern Flussschotter aufgefüllt war. Um diesen Flussschotter nicht ausheben zu müssen, gründete man die Staumauer im Taltiefsten auf einem Pfahlrost, den man in den Flussschotter einbrachte. Hierauf errichtete man die im Querschnitt dreiecksförmige Staumauer. Schon beim Ersteinstau der Talsperre bemerkte man Sickerwassermengen, die unter der Staumauer im Bereich der Gründung hindurchsickerten. Leider wurde diese Sickerwasserentwicklung nicht ausreichend beachtet und so kam es im Laufe des Betriebs zu einer Unterläufigkeit (Piping), die letztendlich zum Bruch der Talsperre führte. Innerhalb einer Stunde liefen 52 Mio. m<sup>3</sup> Wasser ab. 680 Menschen verloren ihr Leben bei diesem Talsperrenbruch.

Auch in den letzten Jahrzehnten traten immer wieder Talsperrenbrüche in Europa auf. So ereigneten sich seit 1900 in Europa etwa 25 Schadensfälle.

## 2 Talsperrensicherheit nach DIN 19700

Die Beurteilung der Sicherheit einer Talsperre richtet sich in Deutschland nach der DIN 19700-11, die im August 2001 im Gelbdruck neu überarbeitet erschienen ist. Neben der Hydrologie, der Bewirtschaftung und dem Betrieb einer Talsperre behandelt die DIN den Nachweis zur Sicherheit von Staumauern und Staudämmen. Grundlage dieses Nachweises sind die Zusammenfassung maßgeblicher Einwirkungen zu Lastfällen sowie die Berücksichtigung der Untergrundverhältnisse in s.g. Tragwerkszuständen. Lastfälle und Tragwerkszustände werden zu Bemessungsfällen zusammengefasst, für die die Sicherheit nachgewiesen werden muss. Hierbei fordert die DIN, dass Absperrbauwerke von Stauanlagen so zu bemessen, auszuführen und zu überwachen sind, dass ihre Zuverlässigkeit während ihrer Herstellung und ihrer Nutzungsdauer stets gewährleistet ist.

Zu diesem Zweck sind für alle Absperrbauwerke ihre

- Tragsicherheit
- Gebrauchstauglichkeit und
- Dauerhaftigkeit

nachzuweisen.

Diese Anforderungen an die Zuverlässigkeit werden nach DIN im allgemeinen dann erfüllt, wenn

- zuverlässige Tragsysteme gewählt werden,
- geeignete Baustoffe gewählt werden,
- ein zutreffendes Bemessungsverfahren gewählt wird,
- das Absperrbauwerk und die Einzelbauteile bautechnisch und verhaltensgerecht durchgebildet werden,
- das Tragwerk überwacht wird.

Bei den Einwirkungen unterscheidet die DIN zwischen Einwirkungen der Gruppe 1 (ständige oder häufig wiederkehrende Einwirkungen), Einwirkungen der Gruppe 2 (seltene oder zeitlich begrenzte Einwirkungen) sowie Einwirkungen der Gruppe 3 (außergewöhnliche Einwirkungen). Für die Tragwerkszustände unterscheidet die DIN zwischen Tragwerkszustand A (wahrscheinlicher Zustand), Tragwerkszustand B (wenig wahrscheinlicher Zustand) sowie Tragwerkszustand C (unwahrscheinlicher Zustand).

Lastfall	Bemessungsfälle für Tragwerkszustand		
	A	B	C
1	BF I	BF II	BF III
2	BF II	BF III	-
3	BF III	-	-

Tabelle 1: Bemessungsfälle nach DIN 19700-11

Die Kombination von Lastfällen mit Tragwerkszuständen führt zu einer Matrix von Bemessungsfällen, die ihrerseits entsprechend ihrer Wahrscheinlichkeit in drei Gruppen eingeordnet werden. Entsprechend werden die einzuhaltenden Sicherheitsbeiwerte abgemindert. So beträgt z. B. die geforderte Gleitsicherheit in der Sohlfuge einer Staumauer 1,5 im Bemessungsfall I, 1,3 im Bemessungsfall II und 1,2 im Bemessungsfall III.

### **3 Nachweis von Sicherheit - Berechnungsverfahren für Staumauern**

#### **3.1 Nachweis der Standsicherheit nach Intze**

Professor Intze formulierte für den Nachweis der Sicherheit seiner Staumauern die folgenden Prinzipien:

- Das Eigengewicht wird rechnerisch um etwa 5 % reduziert,
- Stauspiegel in Höhe der Krone,
- Erdruhedruckannahme für "Intze-Keil",
- dichtender Verputz an der Wasserseite, Verblendmauerwerk statisch nicht berücksichtigt,
- Drainsystem in der Staumauer,
- resultierende Kräfte innerhalb des inneren Drittels des Mauerprofils,
- Grundriss in Gewölbeform, aber statisch nicht berücksichtigt,
- Hochwasserentlastung für größten Abfluss.

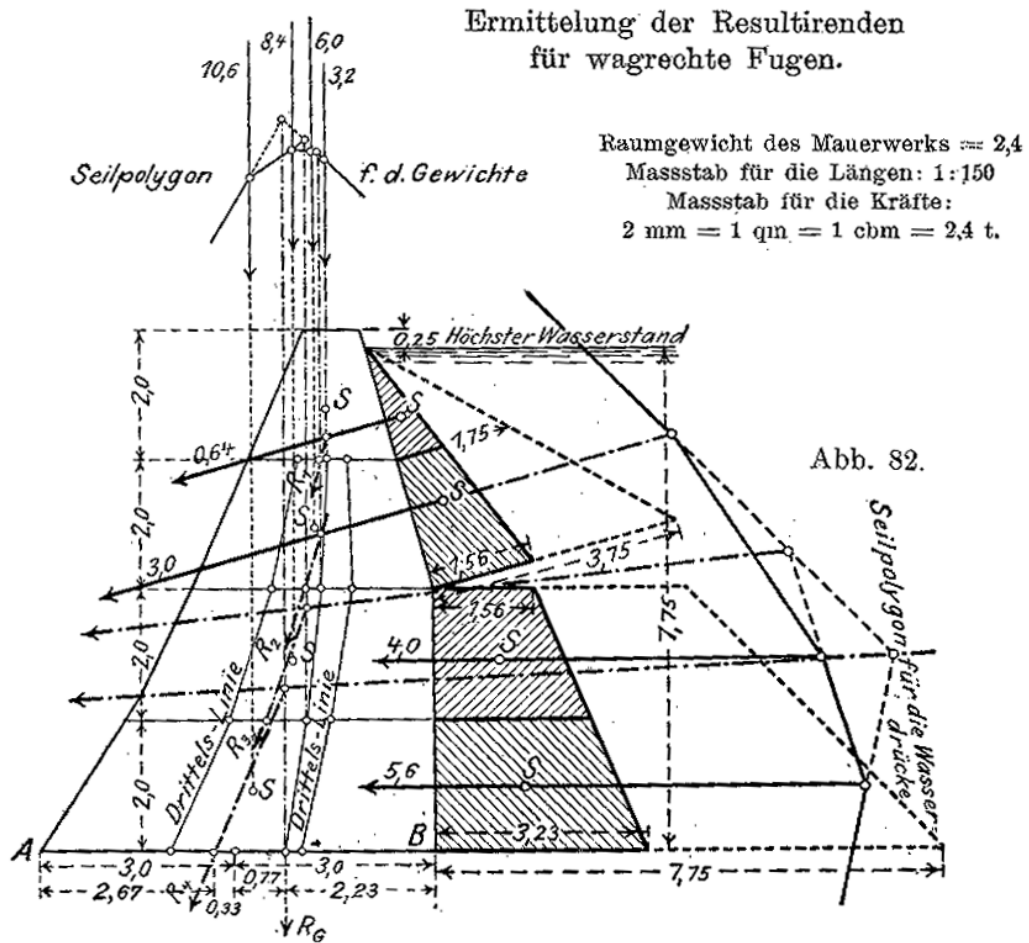


Abbildung 3: Nachweis der Standsicherheit mit dem Seileckverfahren

Den Nachweis der Standsicherheit führte Prof. Intze auf der Grundlage des Seileckverfahrens, bei dem die Gewichtskraft und die angreifende Wasserlast zu einer Resultierenden zusammengefasst werden. Der Verlauf dieser Resultierenden durch den Staumauerkörper wird grafisch verfolgt. Die Resultierende muss hierbei innerhalb des inneren Drittels der Sohlfuge verbleiben, damit die Standsicherheit nachgewiesen ist.

### 3.2 Kragträgerverfahren

Das noch heute zum Nachweis der Standsicherheit von Staumauern verwendete Kragträgerverfahren beruht im Wesentlichen auf den mechanischen Grundlagen des Nachweises von Prof. Intze. Um so verwunderlicher ist es aus heutiger Sicht, dass noch in den 70er Jahren die Standsicherheit von Talsperren mit Hilfe des Kragträgerverfahrens nachgewiesen wurde. In Nordrhein-Westfalen wurden zu jener Zeit an vielen Talsperren Sicherheitsdefizite vermutet. Eine Nachrechnung der Sicherheit der Talsperren mit Hilfe des

Kragträgerverfahrens konnte diese Defizite nicht widerlegen, so dass eine Großzahl der Talsperren nur noch abgesenkt betrieben werden durften. Es ist aus heutiger Sicht unverständlich, warum nicht auf höherwertige mathematische Verfahren zurückgegriffen wurde, da entsprechende Fachveröffentlichungen, z. B. von Zienkiewicz zur Methode der Finiten Elemente, bereits vorlagen und entsprechende Nachrechnungen von Staumauern mit dieser Methode bekannt waren.

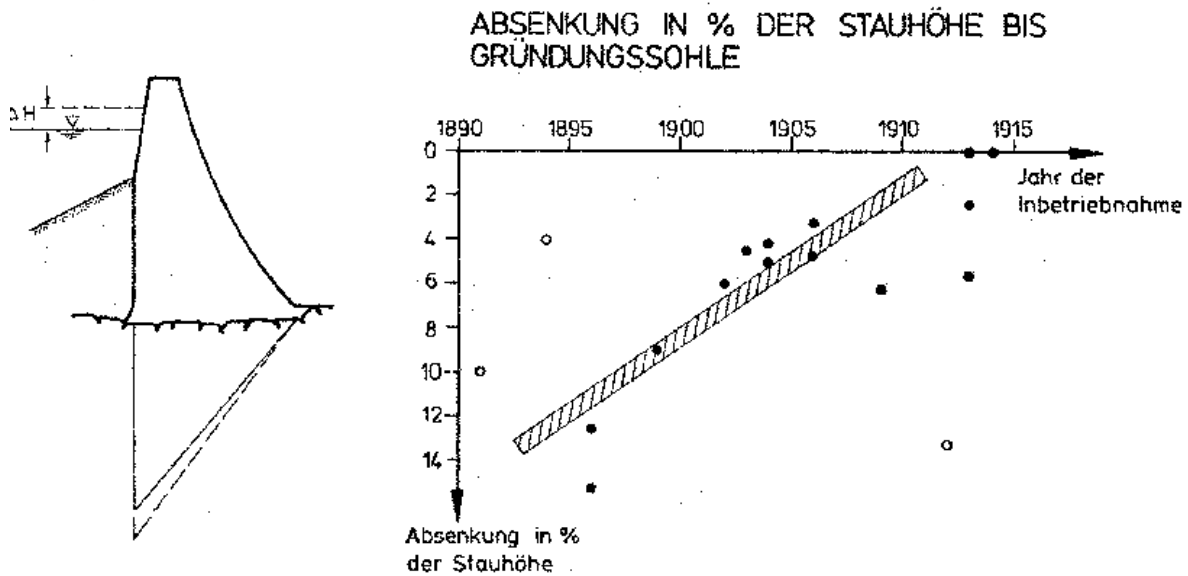


Abbildung 4: Absenkung von Talsperren in Nordrhein-Westfalen

### 3.3 Nachweis mit Hilfe der Finite Elemente Methode

Der Nachweis der Standsicherheit von Staumauern mit Hilfe der Finite Elemente Methode (FEM) entspricht heute dem Stand der Technik. Hierbei wird ein maßgeblicher Querschnitt der Staumauer mit Hilfe von Drei- und Viereckselementen diskretisiert. Auf dieses Modell werden die Wasserlasten sowie Temperaturdifferenzen angesetzt. Die Finite Elemente Berechnung liefert die Wasserdruckverteilung im Inneren einer durchsickerten Staumauer, wobei die Wirkung von Betriebseinrichtungen, wie Drainagesystem und Kontrollstollen, realitätsnah abgebildet werden kann. Mit Hilfe dieser inneren Kräfte berechnet das Finite Elemente Programm die Spannungen und Verschiebungen der Staumauer. Hierbei können mit Hilfe der Methode der verschmierten Rissimulation auch Versagenszustände der Staumauer simuliert werden. Die zur Zeit zur Verfügung stehende Software ermöglicht jedoch nur die Simulation einer ausgedehnten Bruchzone, die, auf der sicheren Seite liegend, den Eindruck entstehen lässt, dass in der Staumauer große Schädigungszonen entstehen.

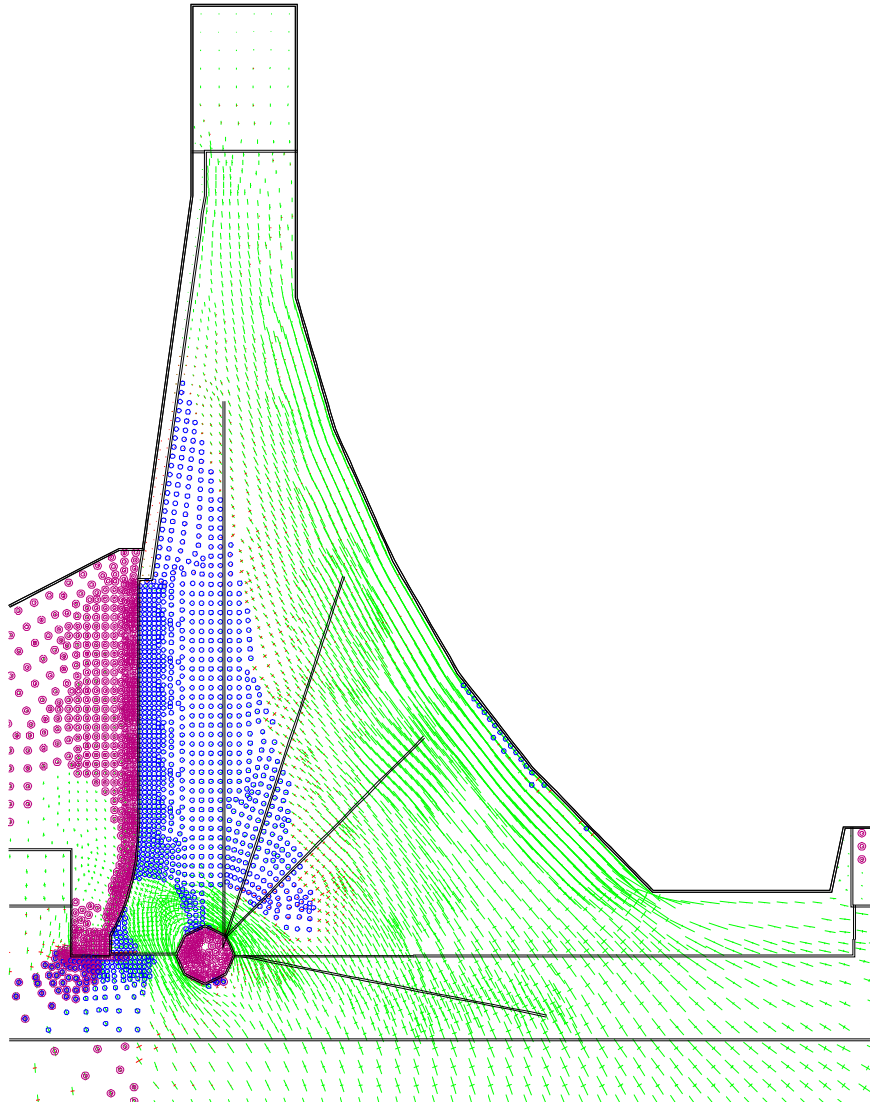


Abbildung 5: FEM-Berechnung der Risszone in einer Staumauer bei extremer Belastung

### 3.4 Realitätsnahe Rissiteration

Aufgrund der Lastabtragung der Staumauer in den Untergrund entstehen unterhalb des wasserseitigen Fußes der Staumauer Risse im Felsuntergrund. Diese vertikal gerichteten Risse entlasten die Zugbeanspruchung des Felses. Bei den Finite Elemente Programmen, die z. Zt. angewendet werden, wird die Wirkung dieser Risse auf der sicheren Seite liegend als ausgedehnte Bruchzone dargestellt. Moderne Methoden der Rissberechnung, wie sie im Bereich der Mechanik angewendet werden, erlauben eine detaillierte Nachrechnung der Entwicklung eines Risses innerhalb der Felsstruktur. Hier wird im Rahmen einer Rissiteration die Entwicklung eines Risses errechnet und die hiermit veränderte Situation des Strömungsbildes simuliert.



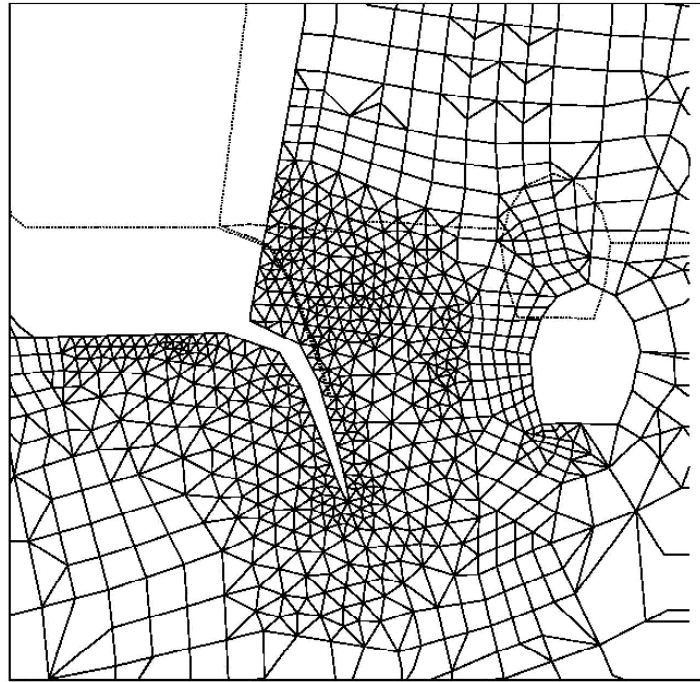


Abbildung 6: Rissiteration beim Standsicherheitsnachweis der Listerstaumauer

Beispielrechnungen der Mauer der Listertalsperre zeigen, dass am wasserseitigen Mauerfuß ein Riss im Felsuntergrund entsteht und wenige Meter in vertikaler Richtung verläuft, bis die Zugspannungen abgebaut sind. Der Riss kommt letztendlich zum Stillstand, ohne die Standsicherheit der Staumauer zu beeinträchtigen.

### **3.5 Wiederherstellung der Sicherheit - Sanierung von Staumauern**

Bei der Sanierung von Bruchsteinmauern stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung. Die wichtigsten Verfahren sind:

- Anlegen der wasserseitigen Dichtwand
- Dichtungsschleier
- Spannanker
- Kombinationen, wie z.B. Dichtungsschleier / Spannanker

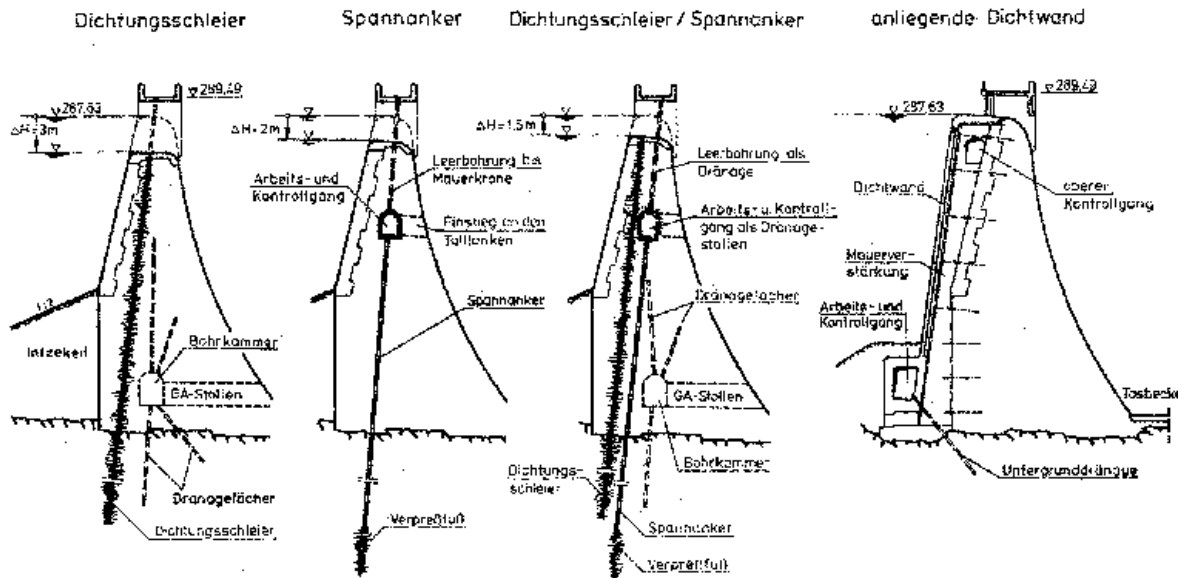


Abbildung 7: Varianten zur Sanierung von Bruchsteinmauern

Der Einsatz von Vorsatzschalen zur Abdichtung der Staumauern an der Wasserseite wurde an vielen nordrhein-westfälischen Talsperren angewendet. Eine solche Dichtwand besteht beispielsweise aus einer 35 cm starken Stahlbetonvorsatzwand, hinter der eine 15 cm breite Kontrollschicht aus Lochziegeln die Drainage des restlichen Sickerwassers ermöglicht. Am Mauerfuß vorgesehen ist ein Kontrollgang, von dem aus der Untergrund abgedichtet werden kann. Die Sanierung einer Staumauer mit einer Vorsatzschale ist möglich, wenn die Talsperre für den Bauzeitraum entleert werden kann.

Eine weitere Möglichkeit der Sanierung der Staumauern besteht im Einsatz von Spannankern, die von der Krone eingebracht durch den Mauerkörper reichen und die Mauer gegenüber dem Untergrund "verdübeln". So wurde z. B. die Staumauer der Edertalsperre mit 104 Ankern saniert. Die Tragkraft der Anker beträgt jeweils 4.500 kN.

Von wesentlicher Bedeutung bei der Sanierung von Talsperren sind Kontrollgänge, die einerseits als Drainagesystem wirken können, aber auch zur Injektion und Abdichtung des Mauerkörpers oder des Untergrundes dienen oder zur Aufnahme von Messeinrichtungen im Inneren der Staumauer benutzt werden.

Zur Herstellung der Kontrollgänge stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung. Zu nennen sind der maschinelle Vortrieb mit Hilfe einer Tunnelbohrmaschine, der händische Vortrieb,

der Vortrieb mit Hilfe von Kernbohrmaschinen oder das Sprengen der Kontrollstollen. Die Verfahren unterscheiden sich in den erreichbaren Leistungen, die von 0,2 m<sup>3</sup> pro Mannschicht beim Kernbohren bis zu 1,0 m<sup>3</sup> pro Mannschicht mit Hilfe einer Tunnelbohrmaschine reichen. Entsprechend groß sind die Spannweiten der entstehenden Kosten. Als preiswertestes Verfahren stellt sich der Vortrieb mit Hilfe einer Tunnelbohrmaschine zu 1.000,-- €/ m<sup>3</sup> dar. Der Sprengvortrieb schlägt mit 1.200,-- €/m<sup>3</sup> zu Buche. Ein Vortrieb mit Hilfe von Kernbohrungen kostet rd. 2.200,-- €/m<sup>3</sup>.

### **3.6 Weiterentwicklung des Sicherheitsbegriffs / Risiko**

Die DIN 19700 berücksichtigt in ihrer neuen Fassung Wahrscheinlichkeiten in verschiedenen Ausprägungen. So wird beim Ansatz des Bemessungshochwassers nach verschiedenen Jährlichkeiten unterschieden. Gleiches gilt für den Nachweis der Erdbebensicherheit. Auch bei den Kombinationen der Einwirkungen wird nach Wahrscheinlichkeiten (ständig, selten, außergewöhnlich) unterschieden. Weitere Wahrscheinlichkeiten finden sich bei der Wahl der Tragwerkszustände, der nachzuweisenden Sicherheitswerte und den z. T. zugelassenen Schadensszenarien bei Hochwasser und Erdbeben. Letztendlich führt die Norm über die Betrachtung von Wahrscheinlichkeiten und Wirtschaftlichkeit zum Begriff des Risikos.

Unter Risiko wird ein Maß für die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses unter Berücksichtigung der dazugehörigen Konsequenzen verstanden. Vielfach wird vereinfacht das Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit mal Schadenshöhe als Risiko definiert.

Die Betrachtung von Risikosituationen erfolgt mit Hilfe von Ereignisabläufen. Von einem auslösenden Ereignis ausgehend, werden Kombinationen von Ereignissen, Gegenreaktionen und Maßnahmen betrachtet, die je nach Erfolg und Misserfolg der einzelnen Maßnahmen einen unterschiedlichen Verlauf nehmen. Aus der Betrachtung aller möglichen Ereignisabläufe ergibt sich die Zuverlässigkeitsanalyse, mit deren Hilfe ein Gesamtrisiko bestimmt werden kann.

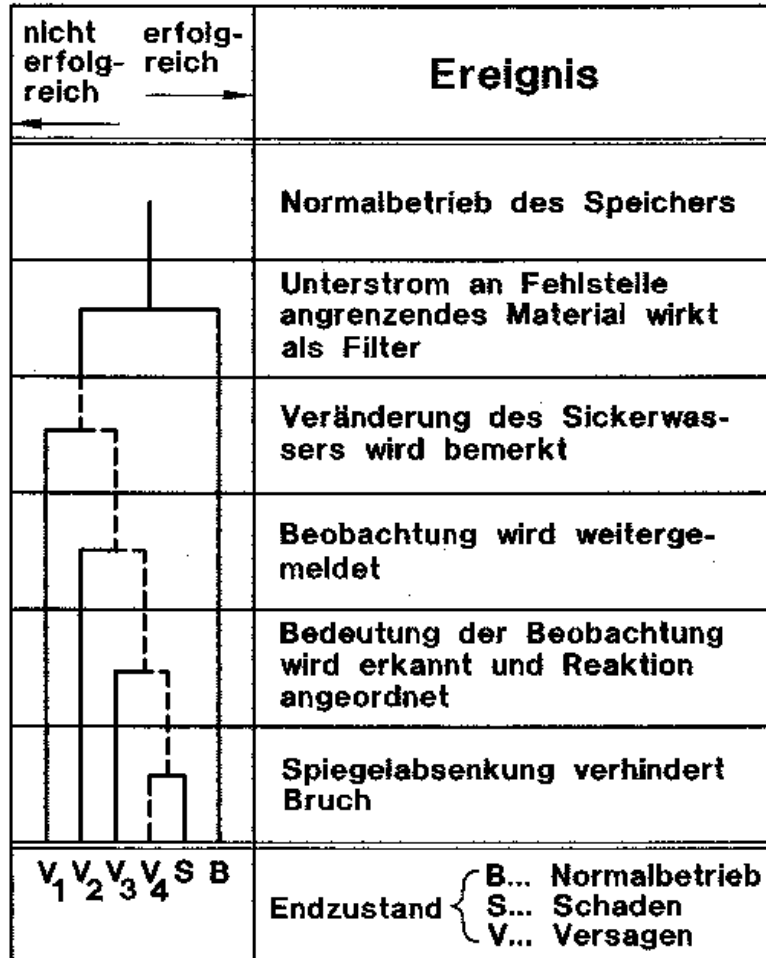


Abbildung 8: Ereignissbaum eines Schadensszenarios an einem Staudamm

In Deutschland war man bisher bemüht, die Talsperrenbauwerke so sicher wie möglich zu bauen, so dass ein Schaden, der auch Menschenleben in Gefahr bringen könnte, mit „an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit“ ausgeschlossen werden kann. Dem gegenüber existieren in anderen Ländern Risikobetrachtungen, die die jährliche Versagenswahrscheinlichkeit der Talsperren mit den zu erwartenden Verlusten von Menschenleben kombinieren. Auf der Basis dieser Kombination sind verschiedene Risikostufen definiert. In Großbritannien dient das s.g. ALARP-Prinzip (as low as reasonable practicable) als Entscheidungshilfe bei der Anpassung von vorhandenen Staubauwerken. Ähnliche Entwicklungen gibt es in Australien, Kanada und den Niederlanden sowie in den USA. Risikoanalysen dienen als Entscheidungshilfen bei der Beantwortung der Frage, wie eine verfügbare Summe Geldes am sinnvollsten für zusätzliche Sicherheitsbelange ausgegeben werden kann.

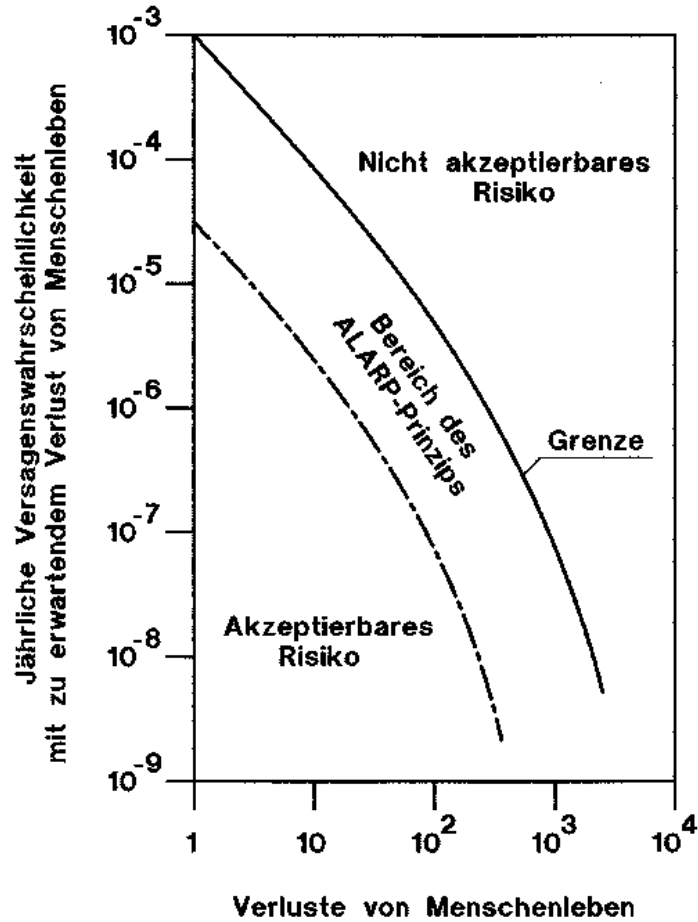


Abbildung 9: ALARP-Prinzip

#### 4 Zerstörung von Talsperren durch den Menschen

Seit dem 11. September 2001 wird die Gefährdung von technischen Großanlagen durch terroristische Angriffe in der Welt neu eingeschätzt. Eine Focus-Umfrage vom Oktober 2001 zeigt, dass in der Öffentlichkeit ein Anschlag auf Talsperren und Stauseen nur von 21 % der Bevölkerung als wahrscheinlich befürchtet wird. Ein vergleichsweise höhere Angst besteht gegenüber einer Verseuchung von Trinkwasser (45 %) oder Angriffen auf Chemiefabriken (46 %). Tatsächlich sind in der Neuzeit vier Fälle bekannt, bei denen Talsperren in Folge von kriegerischen Ereignissen zerstört wurden. Dies sind der Bruch der Möhnestaumauer und der Ederstaumauer im 2. Weltkrieg sowie die Zerstörung einer ukrainischen Staumauer im 2. Weltkrieg und die versuchte Zerstörung des Peruka-Staudamms in Kroatien durch serbische Soldaten in 1992.

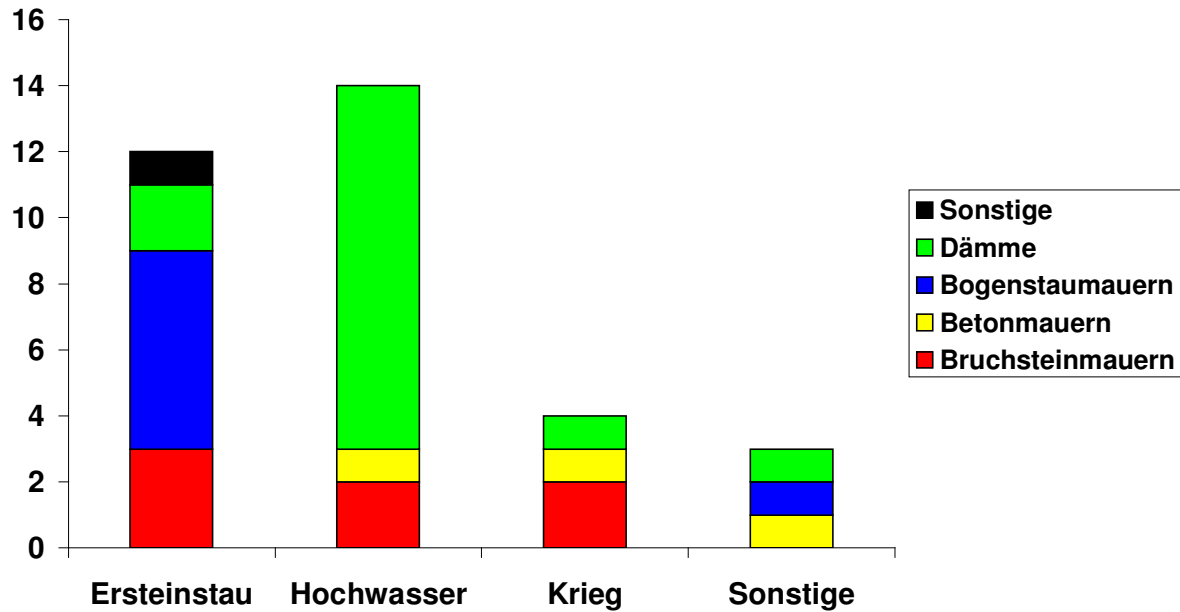


Abbildung 10: Talsperrenschäden in Europa

Letztendlich gilt für die Sicherheit der Stauanlagen die vom Ministerpräsidenten von Nordrhein-Westfalen, Wolfgang Clement, gemachte Äußerung "Die Menschen können darauf vertrauen, dass die Sicherheitskräfte in Nordrhein-Westfalen alles tun, was möglich ist, um der neuen Dimension der Bedrohung durch islamische Extremisten oder Terroristen entgegenzuwirken. Wir können das Risiko durch Terroristen nicht komplett ausschließen. Wir haben jetzt die Weichen gestellt, um das Risiko deutlich zu verringern:"

Der Ruhrverband hat an seinen Talsperren verschiedene Maßnahmen ergriffen, um sie gegen potenzielle Angriffe zu schützen. Dazu gehören:

- betriebliche Maßnahmen,
- bauliche Maßnahmen sowie
- organisatorische Maßnahmen.

Weiterhin steht er in ständigem Kontakt zum Innenministerium, zu anderen Talsperrenbetreibern und den entsprechenden Fachorganisationen.

## **5 Zusammenfassung**

Die Nachrechnungen der 100 Jahre alten Staumauern zeigten in den 70er Jahren konstruktions- und altersbedingte Defizite der Standsicherheit. Mit Hilfe von neuen Berechnungsverfahren kann gezeigt werden, dass diese Defizite überinterpretiert wurden. Mit Hilfe von Sanierungen wurden die Staumauern Nordrhein-Westfalens in den letzten Jahren dem Stand der Technik angepasst. Eine wirtschaftliche Variante ist der Einbau von Kontrollstollen im Inneren der Staumauer.

Die Anforderungen an die Sicherheit von Staumauern werden durch die DIN 19700 festgelegt. Hierin wird der Risikobegriff eingeführt. Seit dem 11. September 2001 ist uns bewusst, dass auch das Risiko eines Attentats berücksichtigt werden muss.