

Zeitschrift: IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH
Kongressbericht

Band: 7 (1964)

Artikel: Der Begriff der Sicherheit im Talsperrenbau

Autor: Gilg, B.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-7841>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 09.07.2025

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

Der Begriff der Sicherheit im Talsperrenbau

Analysis of Safety in the Construction of Big Dams

La notion de sécurité en matière de barrages

B. GILG

Dr. Ing., Elektro-Watt, Zürich

1. Einleitung

Bei der Dimensionierung von Bauwerken hat der Ingenieur unter anderem die Aufgabe, seinem Projekt gewisse Sicherheiten gegen irgendwelche unerwünschten Ereignisse — zum Beispiel gegen einen lokalen Schaden oder gegen den totalen Bruch — zu geben. Die ein solches Ereignis hervorrufenden Größen — zum Beispiel Kräfte oder Spannungen — werden mit den für das Bauwerk berechneten Maximalwerten in Beziehung gebracht und darauf die Sicherheit als Zahl ausgedrückt. Diese Zahl, welche nachstehend ganz allgemein S_{th} genannt wird, stellt eine theoretische Sicherheit dar, da sie auf Grund von verschiedenen Annahmen bestimmt wurde. Die tatsächliche Sicherheit S^* ist natürlich nicht bekannt und kann größer oder kleiner als S_{th} sein. Je genauer die Annahmen getroffen wurden, um so kleiner ist der Fehler $S^* - S_{th}$.

Damit nun kein Bruch (oder eventueller Schaden) eintritt, muß S_{th} so gewählt werden, daß auch eine möglichst große Häufung von Fehlern in den Annahmen den Wert S^* keinesfalls unter 1 sinken läßt.

Je sicherer aber die Annahmen, um so kleiner darf S_{th} angesetzt werden¹⁾.

2. Die Wahrscheinlichkeit im Talsperrenbau

Da der Bruch einer Talsperre normalerweise eine Katastrophe nach sich zieht, soll die Wahrscheinlichkeit eines Einsturzes praktisch null sein; eine gewisse Lockerung dieser Bedingung ist statthaft, wenn

- a) der Bruch nur oberhalb des jeweiligen Seespiegels erfolgen würde, oder
- b) die freiwerdenden Wassermassen ohne jeden Schaden sich verlaufen können.

Es sollte also nebst dem Sicherheitsfaktor S_{th} , welcher auf Grund der wahrscheinlichsten Annahmen berechnet wurde, noch ein weiterer Faktor bestimmt werden, der auf denkbar ungünstigen Annahmen basiert und trotzdem noch größer als 1 ist.

¹⁾ Vgl. dazu SBZ vom 3. Mai 1962: Elastisch oder plastisch, das ist hier die Frage.

3. Die Überprüfung der Annahmen

a) Die Dimensionen des Tragwerkes

Die meisten Talsperren besitzen so große Abmessungen, daß die tolerierten Abweichungen nicht ins Gewicht fallen. Eine Ausnahme bilden allerdings sehr schlanke Gewölbesperren (Malpasset, Tolla, Gage) und stark aufgelöste armierte Mauern, welche eigentlich als Stahlbetonkonstruktionen zu betrachten sind.

b) Belastung und Beanspruchung

Die wichtigste äußere Belastung ist der Wasserdruck, welcher mit großer Genauigkeit ermittelt werden kann. Auch die Eigengewichte sind vor allem bei Betonbauwerken, heute aber auch bei Dammschüttungen mit ziemlicher Sicherheit vorauszusagen und nach erfolgtem Bau nachzuprüfen. Temperaturbeanspruchung sowie die Verformung des Tales bei der Seefüllung spielen nur bei Bogenmauern eine Rolle. Sie sind im allgemeinen weniger gut erfaßbar, doch ist ihr Einfluß auf die Sicherheit S_{th} gering, so daß normale Fehler in den Annahmen nicht stark ins Gewicht fallen.

Ebenfalls fehlerhaft können die Annahmen über den Auftrieb unter den Widerlagern und die eventuelle Erdbebenbelastung sein. Diese Fehler haben nun vor allem bei Gewichtsmauern und bei Dämmen einen starken Einfluß auf die Sicherheit. Es muß also hier, wie wir noch sehen werden, mit möglichst ungünstigen Voraussetzungen gerechnet werden.

Eine letzte Belastungsgröße ist die Überflutung durch Hochwasser, welche von einer Betonsperre meistens relativ gut, von einem Damm praktisch überhaupt nicht ertragen wird. Dämme verlangen also eine Hochwasserentlastungsanlage, welche möglichst ungünstigen Annahmen Rechnung trägt.

c) Qualität der Baustoffe

Während die Qualität und Festigkeit des Betons relativ leicht vorauszubestimmen ist und auch nicht allzu großen Streuungen unterliegt, besteht bei der Qualitätsuntersuchung der Dammbaumaterialien und des Sperrenuntergrundes (Fels oder Lockergestein) oft größere Unsicherheit. Die Laboratoriumsversuche sind im allgemeinen nicht genügend aufschlußreich und müssen durch Feldversuche ergänzt werden. Dabei ist vor allem zu beobachten, daß der im Gestein auftretende innere Wasserdruck die Materialeigenschaften wesentlich beeinflussen kann.

d) Berechnungsgang

Die Berechnungsmethoden für Betonbauwerke und für Dammschüttungen sind heute sehr stark entwickelt, so daß bei richtiger Anwendung keine grö-

Berechnungen Fehler auftreten dürften. Dagegen geben die Berechnungsmethoden für die Widerlagerbeanspruchung schon wegen der Inhomogenität des natürlichen Bodens meist nur approximative Werte. Hier besteht also eine große Fehlerwahrscheinlichkeit, welche zu berücksichtigen ist.

4. Bogen- und Gewölbesperren

Die modernen Berechnungsmethoden (Balkenrost, Schalentheorie) und die Möglichkeit, deren Resultate durch Modellversuche zu überprüfen, sowie die heute übliche hohe Betonqualität haben dazu geführt, daß dieser Sperrentyp einige sehr kühne Vertreter aufweist. Betondruckfestigkeiten von rund 500 kg/cm^2 sind keine Seltenheit, so daß die zulässigen Spannungen 100 kg/cm^2 und mehr betragen. Trotzdem wäre es natürlich irreführend, dem Bauwerk nur auf Grund der Spannungen eine 4—5fache Sicherheit zuzuschreiben, da das Widerlager möglicherweise eine viel geringere Reserve besitzt. Bei der Bestimmung der Widerlagerfestigkeit ist zum Beispiel die Klüftung von ausschlaggebender Bedeutung. Je nach deren Verlauf — parallel oder senkrecht zur Tangente des einfallenden Bogens — ist die Kohäsion des Gebirges oder die Druckfestigkeit des Gesteins maßgebend.

Man ersieht daraus, daß die hohen zulässigen Betonspannungen in der Nähe der Widerlager gar nicht ausgenützt werden können, sofern der Fels nicht praktisch dieselben Eigenschaften aufweist wie der Beton, was wohl nur selten der Fall sein dürfte.

Ist der Fels geschichtet oder geklüftet, so kann sich ein innerer Wasserdruck einstellen, welcher entweder vom Stausee oder von der Talflanke her beeinflußt wird. Dieser innere Wasserdruck setzt normalerweise die Scherfestigkeit des Materials herab. Da In-situ-Messungen der Felsfestigkeit vor dem Aufstauen des Sees durchgeführt werden müssen, erfassen sie im allgemeinen dieses Phänomen nicht. Die so ermittelten Annahmen können somit stark fehlerbehaftet sein.

Selbstverständlich bewirken ausgedehnte Verfestigungsinjektionen und ein tiefreichender Injektionsschirm eine Verbesserung der Situation.

Während also S_{th} und S^* im Beton relativ nahe beieinander liegen dürften, so ist die Differenz im Felswiderlager unter Umständen ziemlich groß; ein großes S_{th} ist demnach angezeigt.

5. Gewichtsmauern und Hohlmauern

Die Spannungen sind in diesen Mauern meist geringer als in den Bogenmauern; deshalb werden auch geringere Betonfestigkeiten zugelassen. Das Verhältnis aus berechneten Spannungen und Bruchfestigkeit beträgt ebenfalls 1 : 3 bis 1 : 4, so daß die Betonfestigkeit für die Sicherheit wohl selten

maßgebend ist. Der Felsuntergrund ist dank der großen Auflagerfläche nur relativ schwach belastet, und die Spannungen nehmen in der Tiefe rasch ab. Somit wird die Druckfestigkeit des Untergrundes ebensowenig maßgebend sein.

Dagegen ist ein wichtiger Punkt das eventuelle Kippen der Mauerzunge bei maximaler Erdbebenbeanspruchung unter gleichzeitiger Annahme extremer Auftriebsverhältnisse. Die dabei entstehende schrägabwärtsgerichtete Resultierende muß vom luftseitigen Auflagerrand genügend weit entfernt sein (meist wird $\frac{1}{6}$ der Auflagerbreite vorgeschrieben), wobei gleichzeitig die unter *Ausschluß der Zugzone* berechneten Spannungen die zulässigen Felspressungen nicht überschreiten dürfen.

Eine wesentliche Gefahr ist auch hier das Abgleiten infolge Überschreitens der Scherfestigkeit, wobei das gleiche gilt, was bereits für Bogenmauern gesagt wurde. In diesem Fall besitzen die Gewichtsmauern gegenüber den gewölbten Sperren den Nachteil, daß jede Mauerzunge für sich instabil werden kann, da der Wasserdruck die Mauerblöcke nicht gegeneinander verkeilt.

Zur Herabsetzung der ungünstigen Auftriebsverhältnisse wird deshalb oft der Hohlmauertyp angewandt. Aber auch hier ist es wichtig, daß die in tieferen Felslagen herrschenden inneren Wasserdrücke laufend kontrolliert werden, und zwar sowohl unter dem Betonaufleger als auch unter den freien Räumen; denn es ist in gewissen Fällen — zum Beispiel bei horizontal geschichteten Gneisen — ohne weiteres möglich, daß sich in der Tiefe sehr schnell ein Auftrieb aufbaut, welcher an der Oberfläche nicht in Erscheinung tritt.

6. Vorgespannte Mauern

Wird eine Betonmauer zwecks Volumeneinsparung mit Vorspannkabeln im Fels verankert, so erhöhen sich natürlich die Betonspannungen und die Felspressungen gegenüber einer gleich hohen unverankerten Gewichtsmauer. Deshalb wird der Einfluß des Auftriebes herabgesetzt; die errechnete Sicherheit gegen Gleiten dürfte also weniger fehlerempfindlich sein als bei gewöhnlichen Gewichtsmauern.

Über die Sicherheit der Betonkonstruktion sowie die Kippfrage gilt das bereits in Abschnitt 5 Gesagte. Der in der Nähe der Spannköpfe auftretenden hohen Betonbeanspruchung muß bei der Bestimmung der Betonqualität Rechnung getragen werden.

Im übrigen treten hier zwei weitere Faktoren auf, deren ungenaue Erfassung die Sicherheit beeinträchtigen kann. Der eine ist das Verhalten der Vorspannkraft in Funktion der Zeit, der andere die durch die Verankerungskräfte hervorgerufenen statischen Verhältnisse im Felsuntergrund.

Die Relaxation der Vorspannkabel wurde zwar experimentell bereits ver-

schiedentlich untersucht, doch sollte bei vorgespannten Mauern, bei welchen auch das Kriechen des Betons und eventuell des Felsens maßgebend sind, in einige Kabel ein Dynamometer eingebaut werden, welcher ständig eine Überprüfung der bei der Projektierung getroffenen Annahmen erlaubt.

Die statischen Verhältnisse im Felsuntergrund können am Modell untersucht werden. Dieses sollte allerdings dem tatsächlichen geologischen Aufbau Rechnung tragen, da die Spannungsverteilung und somit eine eventuelle Überbeanspruchung von der Inhomogenität des Felsens (Schichtung, Klüftung) entscheidend beeinflusst wird. Die Spannungsoptik eignet sich wohl in den meisten Fällen gut für die Abklärung solcher Fragen.

Werden die oben erwähnten Probleme nur summarisch behandelt, so ist die Wahl eines größeren Faktors S_{th} nötig, welcher unter Umständen die vorgespannte Mauer unwirtschaftlich macht.

7. Staudämme

Die Berechnung von Staudämmen ist bekanntlich in erster Linie eine Stabilitätsuntersuchung, wobei zwischen Dammschüttung und Untergrund kein eigentlicher Unterschied gemacht wird. Ist der letztere felsig, so besitzt er lediglich andere maßgebende Materialeigenschaften. Die Berechnung gibt somit keine nähere Auskunft über die Spannungsverteilung im Damm. Sie betrachtet eine mögliche Rutschfläche, längs welcher die wasserseitige oder luftseitige Böschung abgleiten könnte, und untersucht das Verhältnis zwischen den sogenannten bremsenden, das heißt das Gleiten verhindernden, und den treibenden, das heißt das Gleiten fördernden Kräften.

Die ersten sind die längs der Gleitfläche auftretenden Scherfestigkeiten. Sie setzen sich aus einem Kohäsionsanteil und einem Reibungsanteil zusammen, welcher vom Winkel der inneren Reibung und vom senkrecht zur Gleitfläche auftretenden Druck abhängt.

Die zweiten sind die tatsächlichen Gewichte der auf der Gleitfläche lastenden Damnteile und des Wassers sowie die Erdbebenbelastung.

Sämtliche geotechnischen Eigenschaften der Bau- und Untergrundmaterialien müssen vor der Projektierung im Laboratorium, eventuell auch an Versuchsschüttungen untersucht und während des Baues an der Dammschüttung selber überprüft werden.

Da die Raumgewichte im allgemeinen ziemlich genau bestimmt werden können, rührt die Unsicherheit in der Annahme der treibenden Kräfte (welche das Gleiten fördern) hauptsächlich von der Erdbebenbeurteilung her. Hier wird eine fehlerhafte Annahme — wie wir noch sehen werden — ein starkes Abweichen der Werte S^* von S_{th} verursachen.

Während die treibenden Kräfte als tatsächliche Werte in die Stabilitätsberechnung eingeführt werden, sind die bremsenden Kräfte Grenzwerte,

Sperrentyp Type de barrage Dam type	leicht bestimm- bar Facile à déter- miner Easy to deter- mine	Fehlerempfindliche Größen Sensibilité à l'erreur Error consequence	
		mit schwachen Einflüssen Faibles con- séquences weak	mit starken Einflüssen Fortes con- séquences strong
Bogensperre Barrage voûte Arch dam	1, 2	3, 4, 5	6
Gewichtsmauer Barrage poids Gravity dam	1, 2	—	4, 5, 6
Vorgespannte Mauer Barrage précontraint Prestressed dam	1, 2	3, 4	5, 6, 7, 8
Erd- und Steindamm Digue en terre Rock- and earthfilldam	1, 9	—	5, 10

1	Wasserlast	Charge hydrostatique	Water head
	Eigengewicht	Poids propre	Dead load
2	Betonspannungen	Contraintes du béton	Stresses in the concrete
	Betonfestigkeit	Résistance du béton	Resistance of the concrete
3	Temperatur	Température	Temperature
4	Auftrieb	Sous-pression	Uplift
5	Erdbeben	Tremblement de terre	Earthquake
6	Felsfestigkeit	Résistance du rocher	Resistance of the rock
7	Felsbeanspruchung	Sollicitations du rocher	Stresses in the rock
8	Kabelrelaxation	Relaxation des câbles	Cable relaxation
9	Reibungswinkel	Angle de frottement	Friction angle
10	Porenwasserspannung	Pression interstitielle	Pore pressure
	Kohäsion	Cohésion	Cohesion

das heißt Festigkeiten. Kohäsion und Winkel der inneren Reibung sind mit den heutigen Prüfgeräten relativ leicht zu bestimmen. Fehlerempfindlich ist dagegen die Beurteilung der längs einer möglichen Gleitfläche wirkenden Drücke, welche eine Reibung erzeugen können. Es sind dies die sogenannten Korn-zu-Korn-Drücke, welche als Differenz aus dem von der Auflast erzeugten Totaldruck und dem inneren Wasserdruck berechnet werden. Der Bestimmung dieses sogenannten Porenwasserdruckes, welcher in bindigen Böden wesentlich größer als der hydrostatische Auftrieb werden kann, wird bei den Laboratoriumsversuchen oft zu wenig Aufmerksamkeit geschenkt, sei es, daß die Prüfkörper zu klein sind, sei es, daß den später im Dammkörper auftretenden Verhältnissen ungenügend Rechnung getragen wird.

Ein erstes Beispiel soll für den Fall einer homogenen Böschung die Wichtigkeit der Erdbebenfrage erläutern. Für kohäsionsloses, erdfeuchtes Material lautet die Sicherheitsformel

$$S_{th} = \operatorname{tg} \varphi \frac{\cos \alpha - \beta \sin \alpha}{\sin \alpha + \beta \cos \alpha},$$

φ = Winkel der inneren Reibung,

α = Böschungswinkel,

β = Erdbebenkoeffizient.

Für $\varphi = 40^\circ$ und $\beta = 5\%$ wird zum Beispiel eine Sicherheit von 1,3 verlangt; der Böschungswinkel darf dann 30° nicht übersteigen. Um diese Sicherheit zu erschöpfen ($S^* = 1$) braucht es entweder einen Fehler in der Bestimmung des Reibungswinkels φ von 7° , was bei sorgfältiger Prüfung kaum möglich ist, oder einen schon eher denkbaren Fehler von 3° und ein Erdbeben von 12% Beschleunigung. Dies kann bei falscher Beurteilung der Erdbebensituation eventuell eintreten.

Das zweite Beispiel bezieht sich auf die Wichtigkeit der Porenwasserspannung. Bei fehlender oder geringer Kohäsion ist die Scherfestigkeit praktisch proportional zum Korn-zu-Korn-Druck. Beträgt nun der Porenwasserdruck 40% des Überlagerungsdruckes, wurde aber fälschlicherweise nur zu 20% angenommen, so kann der Einfluß auf den Sicherheitsfaktor derselbe sein, wie bei einer Abnahme des Winkels der inneren Reibung von 35° auf 28° , was wiederum bei einer sorgfältigen Überprüfung undenkbar ist.

Zusammenfassung

Die vorstehenden Abschnitte sollen bei den verschiedenen Talsperrentypen auf die den Sicherheitsfaktor mehr oder weniger stark beeinflussenden Größen hinweisen. Zum besseren Überblick geben wir vorstehend eine dreisprachige Tabelle, welche die charakteristischen Größen, ihre Meßbarkeit und ihren Einfluß auf die Sicherheit des Bauwerkes deutlich macht.

Summary

Chapters 1 to 7 show for different types of dams the influence of the characteristics of the work and of the abutments on safety. The above schema gives a synopsis of the results.

Résumé

Les chapitres 1 à 7 indiquent pour divers types de barrage l'influence des différentes caractéristiques de l'ouvrage et des appuis sur la sécurité. Le tableau ci-dessus en donne une idée d'ensemble.

Leere Seite
Blank page
Page vide