Stauanlagen und Erdbeben : die Aufgabe der Überwachungsorgane des Bundes

Autor(en): **Biedermann, Rudolf**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria**

Band (Jahr): **78 (1986)**

Heft 10

PDF erstellt am: **24.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-940877

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Stauanlagen und Erdbeben

Die Aufgabe der Überwachungsorgane des Bundes

Rudolf Biedermann

1. Rechtsgrundlage

Gemäss Artikel 3bis des Bundesgesetzes über die Wasserbaupolizei hat der Bundesrat dafür zu sorgen, dass bei bestehenden und künftigen Einrichtungen zur Stauhaltung die notwendigen Massnahmen getroffen werden, um die Gefahren und Schäden tunlichst zu vermeiden, die infolge des Bestandes der Einrichtung, ihres ungenügenden Unterhalts oder durch Kriegshandlungen entstehen könnten. Es begründet dies nicht nur die Oberaufsicht des Bundes bezüglich der Sicherheit der Talsperren; es wird damit auch das Ziel unmissverständlich festgelegt.

Im gleichen Artikel (Absatz 3) wird ferner verlangt, dass die erforderlichen Vorschriften erlassen werden, was 1957 mit der Inkraftsetzung der sogenannten Talsperrenverordnung geschah. Neben Verfahrensfragen sowie technischen und organisatorischen Belangen regelt sie in Artikel 1 die Unterstellung. Danach unterstehen den Vorschriften der Verordnung und damit der Oberaufsicht des Bundes zwingend alle Talsperren, die mindestens 10 m Stauhöhe aufweisen oder bei wenigstens 5 m Stauhöhe einen Stauraum von mehr als 50000 m³ abschliessen. Es können aber auch kleinere Talsperren sowie Wehre unterstellt werden, falls sie für die Unterlieger eine erhebliche Gefahr bilden oder dies im Interesse der öffentlichen Sicherheit geboten ist.

2. Der Oberaufsicht unterstellte Anlagen

Am 1. Januar 1986 waren der Oberaufsicht des Bundes 189 Talsperren unterstellt. Davon sind 44 weniger als 15 m hoch und gehören somit nicht zu den sogenannten grossen Talsperren (Bild 1). 25 Anlagen sind höher als 100 m und 4 sogar höher als 200 m. Die höchste Talsperre der Schweiz ist mit 285 m die Staumauer Grande Dixence, die – 1961 fertiggestellt – auch heute noch die weltweit höchste Gewichtsmauer ist.

Die 189 Talsperren unterteilen sich in 129 Staumauern und 60 Staudämme, worunter nur 3 bedeutendere, nämlich Göscheneralp (155 m), Mattmark (120 m) und Marmorera (91 m). Alle übrigen Staudämme sind weniger als 45 m, mehrheitlich sogar weniger als 20 m hoch. Es folgt hieraus, dass in der Schweiz die Talsperren aus Beton nicht nur anteilmässig (68 %), sondern auch bezüglich ihrer Bedeutung stark dominieren. Dies steht in völligem Gegensatz zu den weltweiten Gegebenheiten, wo die Staudämme mit 83 % Anteil weit überwiegen.

3. Sicherheitskonzept

Die vom Gesetz geforderte hohe Sicherheit der Talsperren kann bestmöglich erreicht werden, wenn sie auf drei Säulein abgestützt wird, nämlich

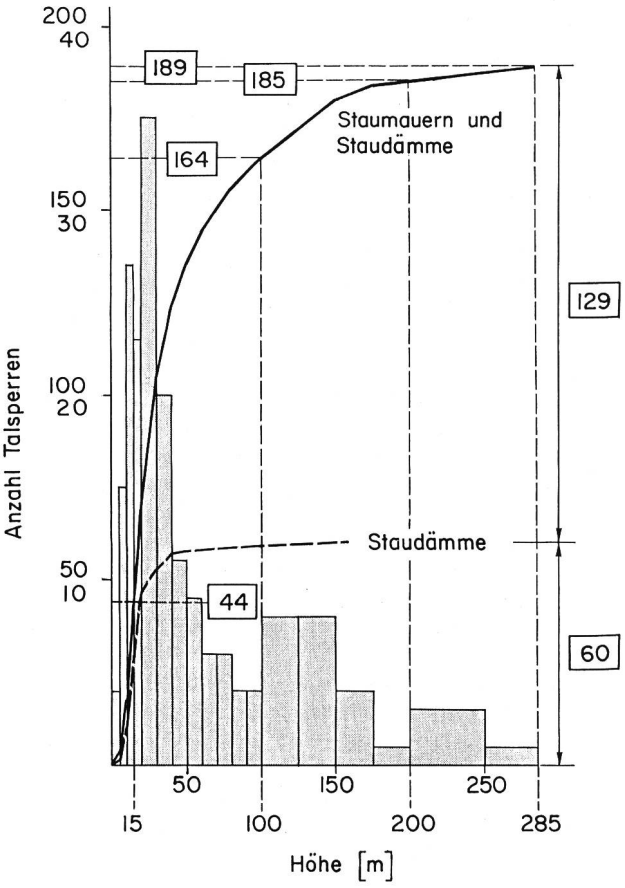
1. die konstruktive Sicherheit der Anlage
2. die Überwachung und
3. ein Alarmkonzept.

Obschon die konstruktive Sicherheit einer Talsperre primär anlässlich der Projektierung und des Baus sicherzustellen ist, muss auch später dafür gesorgt sein, dass sie erhalten bleibt oder nötigenfalls sogar verbessert wird. Dies verlangt, dass regelmässig der Bauwerkszustand kontrolliert und periodisch die Bauwerkssicherheit überprüft wird. Beides gehört zur Überwachung und muss so organisiert sein, dass ein Schaden oder ein konstruktiver Mangel frühzeitig erkannt wird, damit rechtzeitig die notwendigen Unterhalts- oder Umbauarbeiten vorgenommen werden können (Bild 2). Neben dieser Aufgabe (Zustandsüberwachung) hat die Überwachung eine zweite und ebenso wichtige zu erfüllen. Durch zweckmässige und ausreichend häufige Verhaltensüberwachung ist sicherzustellen, dass ein ausserordentliches Ereignis, das die Sicherheit einer Talsperre bedroht, frühzeitig erkannt wird, damit ebenfalls rechtzeitig die notwendigen Massnahmen zur Abwendung der aufgetretenen Gefährdung ergriffen werden können. Solche Ereignisse sind:

– eine anormale Verformung der Talsperre oder ihres Untergrunds,
– erhöhte Auftriebsdrücke bei Staumauern oder erhöhte Porenwasserspannungen bei Staudämmen,
– eine verstärkte Durchsickerung der Talsperre,
– das Auftreten von luftseitig neuen Feuchtstellen oder erhöhte Schüttungen von talseitig vorhandenen Quellen,
– eine neu festgestellte oder beschleunigte Bewegung eines Talhangs,
– eine neu erkannte oder verschärfte Instabilität einer Fels- oder Gletschermasse, die in den Stausee stürzen könnte,
– ein extremes Hochwasser (wenn bei anhaltend starkem Niederschlag der Wasserspiegel über die Krone ansteigen könnte) sowie ganz allgemein,
– ein bedeutendes Erdbeben,

weil bei starker dynamischer Beanspruchung einer Talsperre Schäden nicht unbedingt auszuschliessen sind. Es ist deshalb wichtig, dass nach jeder etwas stärkeren Bodenerschütterung am Standort einer Talsperre sofort eine ausserordentliche Zustands- und Verhaltenskontrolle vorgenommen wird. Der Schwellenwert wurde bei Magnitude 3, d. h. bewusst recht tief festgelegt (auch tiefer als seitens der Internationalen Kommission für Grosse Talsper-

Bild 1. Der Oberaufsicht des Bundes unterstellte Talsperren (Stand 1. Januar 1986).



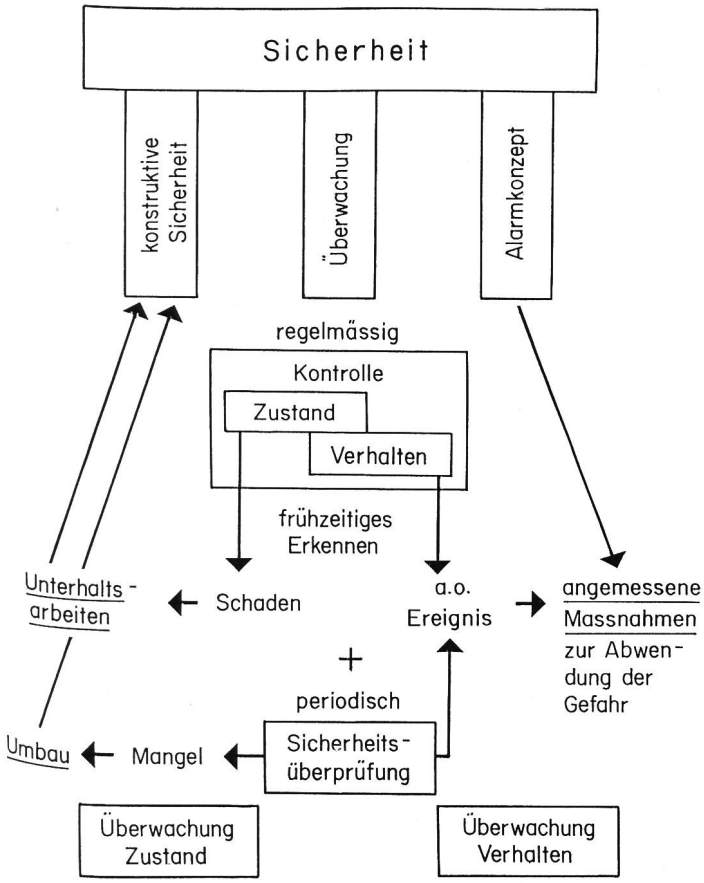


Bild 2. Sicherheitskonzept für Talsperren und Aufgaben der Überwachung.

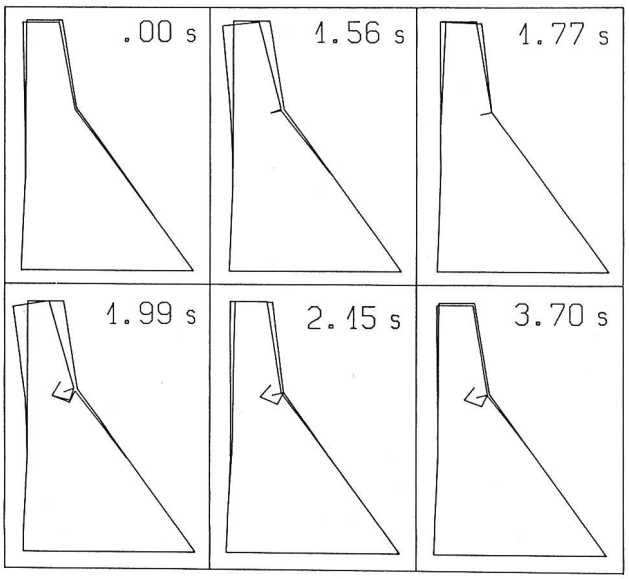
ren, die solche Kontrollen erst ab Magnitude 4 empfiehlt). Die Aufforderung zur Kontrolle erfolgt durch die Oberaufsichtsbehörde, die vom Schweizerischen Erdbebendienst umgehend benachrichtigt wird, wenn an einem Talsperrenstandort die massgebende Erdbebenstärke erreicht oder überschritten wurde.
Damit bei Vorliegen eines ausserordentlichen Ereignisses zeit- und sachgerecht gehandelt werden kann, braucht es schliesslich zweckmässige Vorbereitungen, d.h. ein Alarmkonzept. Auf dieses wird hier nicht eingetreten. Es sei lediglich vermerkt, dass dieses für alle grossen und mittleren Stauanlagen auch ein Wasseralarmsystem einschliesst.

4. Konstruktive Sicherheit

Eine hohe konstruktive Sicherheit ist für die Sicherheit einer Talsperre entscheidend. Sie ist dann gegeben, wenn das Bauwerk für alle möglichen Last- und Betriebsfälle korrekt, d.h. entsprechend dem aktuellen Fachwissen bemessen ist. Dies bedeutet insbesondere, dass ausser der ordentlichen Beanspruchung infolge Wasserdrucks, Temperatureinwirkung, Durchsickerung (des Bauwerks und des Untergrunds) und Niederschlags (nur bei Dämmen von Bedeutung) auch die ausserordentlichen Beanspruchungen mitberücksichtigt sein müssen, die im Falle
- extremer Hochwasserzuflüsse,
- bedeutender Erdbeben und
- rascher Seeabsenkung (als allfällig erforderlicher Sicherheitsmassnahme im Falle eines schwerwiegenden ausserordentlichen Ereignisses) auftreten. Gerade sie bereiten aber etwelche Schwierigkeiten, weil das einschlägige Fachwissen auch heute noch lückenhaft ist und für die Festlegung der Bemessungsparameter oft nur ungenügend gesicherte Daten vorliegen. Beides gilt ausgeprägt für den Lastfall Erdbeben.
Zur konstruktiven Sicherheit gehört schliesslich auch, dass die Ablassorgane (Hochwasserentlastung, Grundablass usw.) jederzeit betriebsbereit sind und ihre Aufgabe selbst im ungünstigsten Fall (z.B. bei Stromausfall) erfüllen können.

5. Erdbebensicherheit

Obschon die Erdbebenaktivität in der Schweiz nicht besonders hoch ist, muss mit dem Auftreten von Schadenbeben gerechnet werden, und zwar praktisch überall. Die Talsperren als Bauwerke mit grossem Schadenpotential im Bruchfall müssen demzufolge erdbebensicher sein, und zwar in hohem Mass, weil Erdbeben überraschend und nur während kurzer Zeit auftreten und somit keine Reaktionen zur Abwendung einer allfälligen Gefährdung zulassen. Auch der Wasseralarm käme für viele Betroffene zu spät.
Seit den 50er Jahren werden neue Talsperrenprojekte speziell für den Lastfall Erdbeben bemessen. Die älteren Anlagen wurden seither zum grössten Teil überprüft und nötigenfalls umgebaut, wenn die konstruktive Sicherheit nicht ausreichend war. Mangels besserer Kenntnisse musste jedoch sowohl die Bemessung wie auch die Überprüfung für den Lastfall Erdbeben mittels eines recht groben Näherungsverfahrens vorgenommen werden, bei dem die effektiv dynamische Beanspruchung der Talsperre durch eine statische Zusatzlast ersetzt wird. Obschon dieses pseudostatische Vorgehen den tatsächlichen dynamischen Verhältnissen keineswegs gerecht wird, hat es sich in der Praxis, d.h. entsprechend der weltweiten Erfahrung bewährt.



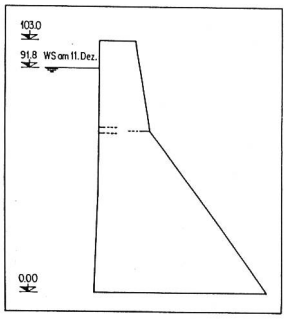


Bild 3. Rissbildung infolge Erdbebens am Beispiel der 103 m hohen Gewichtsmauer Koyna (Indien).

Oben: Simulation der Rissbildung mit vereinfachtem Rechenmodell (zweidimensional, Mauer eingespannt, See leer, künstlich generiertes Erdbeben); Verschiebungen 150fach vergrössert.

Unten: effektiver Schaden infolge des Erdbebens vom 11.12.1967 (Magnitude 6,5; bis auf 6 m unter Stauziel gefüllt); Risseverlauf im Innern der Mauer unbekannt.

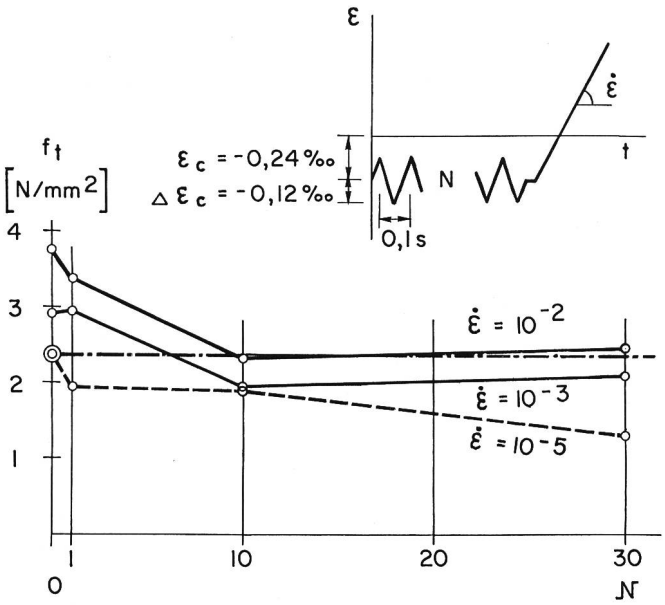


Bild 4. Zugfestigkeit von Normalbeton (Grösstkorn 32 mm) in Abhängigkeit der Druckvorgeschichte (*N* Druckzyklen von je 0,1 Sekunde Dauer) und der Dehngeschwindigkeit ($\dot{\varepsilon}$ pro Sekunde).
◎ statische Zugfestigkeit.

Von den auf allen 5 Kontinenten vorhandenen etwa 150000 Talsperren aller Grössen und Typen (worunter rund 35000 sogenannt grosse Talsperren von wenigstens 15 m Höhe) sind infolge Erdbebens – soweit bekannt – nur 27 gebrochen, und zwar ausnahmslos Staudämme. In 23 Fällen betraf es (z.T. uralte) kleine und kleinste Bewässerungsanlagen in Japan ($H < 18$ m), in 4 Fällen kleine Dämme in den USA ($H \leqslant 7{,}6$ m; darunter der Sheffield-Damm in Kalifornien). Alle Brüche betrafen dabei Dämme, die aus Sand geschüttet (26) oder auf organischem Schluff gegründet (1) waren, also Materialien aufwiesen, die kohäsionslos sind und deshalb bei dynamischer Beanspruchung zur Verflüssigung neigen.

Ausser diesen Totalbrüchen sind bei 162 weiteren (vorwiegend kleineren) Dämmen leichte bis schwere Schäden beobachtet worden. Es betraf dies wiederum überwiegend japanische Bewässerungsanlagen (145), und zwar vom gleichen Typ wie jene, die gebrochen sind (Dämme aus Sand). Die Schadenstatistik zeigt aber auch, dass eingespülte Dämme – ein Bauvorgehen, das eine Zeitlang in den USA angewendet wurde – ebenfalls recht empfindlich auf dynamische Beanspruchungen sind (5 Schadenfälle; darunter als bekannteste der Upper- und der Lower-San-Fernando Damm in Kalifornien).

Demgegenüber lehrte das San-Francisco-Erdbeben von 1906 (Magnitude 8,25), dass Dämme aus tonhaltigen Materialien, die auf tonigen Böden oder auf Fels gegründet sind, selbst örtlichen Bodenbeschleunigungen von 0,8 g ohne oder höchstens mit geringfügigen Schäden standzuhalten vermögen. Von 33 betroffenen Dämmen haben nur 6 leichte Schäden erlitten. Auch Steinschüttdämme haben sich bestens bewährt.

Man erkennt somit, dass Dämme, sofern sie nicht aus Sand erstellt (geschüttet oder eingespült) oder auf Sand (eventuell auch Schluff) fundiert sind, äusserst erdbebensicher sind und selbst die grössten aufgetretenen Erdbeben schadlos oder praktisch schadlos überstehen, was von vielen anderen Bauwerken nicht in gleichem Ausmass gesagt werden kann.

Staumauern sind infolge Erdbebens noch nie gebrochen. Es sind auch nur in 5 Fällen kleine bis mittlere Schäden entstanden, und dies trotz starker seismischer Beanspruchung. Dazu gehören als bekannteste die 103 m hohe Gewichtsmauer Koyna (Indien), die 1967 von einem Erdbeben der Magnitude 6,5 betroffen wurde und vermutlich wegen ihrer speziellen Geometrie mittlere Schäden erlitt (Bild 3 unten), und die 113 m hohe Bogenmauer Pacoima (Kalifornien/USA), die anlässlich des San-Fernando-Erdbebens von 1971 (Magnitude 6,6) geringfügigen Schaden erlitt. Beide lagen in unmittelbarer Nähe des Epizentrums.

Weil es in der Schweiz keine aus Sand erstellte oder eingespülte oder auf Sand/Schluff fundierte Dämme gibt und weil weltweit noch nie eine Staumauer infolge Erdbebens gebrochen ist oder einen bedeutenderen Schaden erlitten hat, kann ohne Einschränkung gefolgert werden, dass unsere Talsperren sehr erdbebensicher sind. Irgendwelche Befürchtungen sind auch deshalb nicht am Platz, weil im Vergleich zu Kalifornien, Japan oder anderen besonders erdbebengefährdeten Regionen das Erdbebenrisiko in der Schweiz erheblich kleiner ist (grössenordnungsmässig etwa zwei Intensitätsstufen[1]) und der Lastfall Erdbeben entweder bereits bei der Projektierung einer Talsperre oder anlässlich einer späteren Überprüfung (wenn auch nur näherungsweise, d.h. pseudostatisch) mitberücksichtigt wurde.

6. Forschung

Obschon in jüngster Zeit erhebliche Fortschritte bezüglich der Erfassung des dynamischen Verhaltens von Bauwerken erzielt wurden, ist der Wissensstand vor allem für Talsperren noch immer ungenügend. Insbesondere können die Auswirkungen noch nicht erfasst werden, die einen allfälligen Bruch verursachen, nämlich die Rissebildung im unarmierten Massenbeton von Staumauern und die Materialverflüssigung in Staudämmen. Es kann deshalb auch mit modernen Rechenprogrammen keine entscheidend bessere Beurteilung des Verhaltens einer Talsperre im Erdbebenlastfall erzielt werden. Überdies sind in der Schweiz mangels einschlägiger Messeinrichtungen die für eine korrekte Bemessung (oder Überprüfung) erforderlichen örtlichen Erdbebenparameter nicht zuverlässig bekannt.

Im Hinblick auf eine bestmögliche Erfüllung des gesetzlichen Auftrages ist der Oberaufsichtsbehörde deshalb daran gelegen, den lückenhaften Wissensstand zu verbessern, um die Erdbebensicherheit unserer Talsperren nicht nur aufgrund der Erfahrung, sondern wissenschaftlich begründet beurteilen zu können. Aus diesem Grund sind seit 1982 an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich einschlägige Forschungsarbeiten im Gange, und zwar vorläufig für Staumauern, die sowohl anteilmässig (68%) als auch bezüglich ihrer Bedeutung (Grösse der Stauhaltung) dominieren.

Weil für Betontalsperren letztlich der Rissezustand nach extremer dynamischer Beanspruchung über die Standsicherheit des Bauwerks entscheidet, kann die Erdbebensicherheit nur quantitativ beurteilt werden, wenn ein Rechenmodell zur Verfügung steht, das die Entstehung und Ausbreitung von Rissen während des Schwingungsvorgangs zuverlässig zu erfassen erlaubt. Erstes Ziel der Forschung ist es deshalb, ein solches Rechenmodell zu erarbeiten, und zwar für dreidimensionale Strukturen sowie unter Berücksichtigung der Interaktionen zwischen dem Bauwerk und dem Untergrund einerseits respektive dem Wasser anderseits. Entscheidend für die Zuverlässigkeit der Modellierung ist ferner, dass ein ausreichend korrektes Material-

[1] Das San-Francisco-Erdbeben von 1906 erreichte etwa eine Intensität von XI,8, während die grösstmögliche Intensität in der Schweiz zu etwa X,3 (entsprechend einer Magnitude 7,2) geschätzt wird, und zwar auf drei völlig verschiedene Arten.

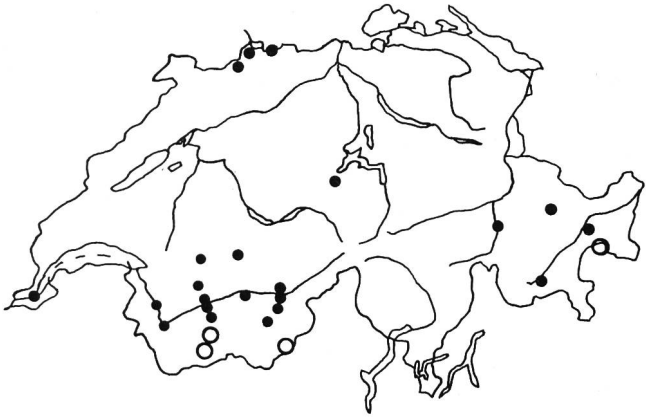


Bild 5. Projekt für ein Starkbebenmessnetz.
● Freifeld-Instrumentierung.
○ Anlage-Instrumentierung (Gewichtsmauer Grande Dixence, Bogenmauern Mauvoisin und Punt dal Gall, Staudamm Mattmark).

gesetz in die Rechnung eingeführt wird. Weil heute das Verhalten des Betons nur für den Fall einer statischen, nicht aber einer dynamischen Beanspruchung bekannt ist, muss als zweites Forschungsziel auch diese Lücke geschlossen werden. Schliesslich werden allfällig verbesserte Berechnungsgrundlagen nur dann zuverlässige Resultate liefern, wenn bezüglich der Bodenerschütterung repräsentative Daten verfügbar sind. Als drittes Ziel muss deshalb versucht werden, die heute mangelhaften Kenntnisse über die örtlich massgebenden Starkbebenparameter zu verbessern. Es kann dies nur mit der Errichtung eines Starkbebenmessnetzes erreicht werden, und es wird deshalb auch ein solches angestrebt. Wegen der geringen Erdbebenaktivität in der Schweiz werden entscheidende Verbesserungen des Wissensstandes jedoch nur längerfristig erreicht werden können. Als Übergangslösung soll deshalb versucht werden, durch wissenschaftliche Auswertung aufgetretener europäischer Beben erste Verbesserungen zu erzielen.
Alle Foschungsarbeiten kommen bisher gut voran. Insbesondere gelang es dem Institut für Baustatik und Konstruktion, ein Modellierungsverfahren zu entwickeln, das diskret die Rissentstehung und -ausbreitung in unarmiertem Massenbeton zu simulieren vermag (Bild 3)[2]. Mehr Schwierigkeiten bereitete der Einbezug der Interaktion zwischen Bauwerk und gestautem Wasser. Aber auch diese Klippe konnte schliesslich überwunden werden, indem eine annehmbar verlässliche Modellierung gefunden werden konnte. Jetzt geht es im wesentlichen noch darum, die Interaktion mit dem Boden zu modellieren sowie den Übergang vom zwei- zum dreidimensionalen System zu bewältigen. Ob und wie letzteres gelingen wird, ist noch offen.

Auch bezüglich der Ermittlung des Materialgesetzes gelang dem damit beauftragten Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion der Durchbruch. Dank einer hochentwickelten Versuchseinrichtung wurde es möglich, Probekörper zuerst einer raschen zyklischen Vorbelastung zu unterziehen (N Zyklen, wo N = 1, 10, 30) und sofort anschliessend den Zugversuch bis zur Bruchgrenze vorzunehmen. Es ergab sich dabei das eher unerwartete Resultat, dass die Zugfestigkeit im Verlauf einer dynamischen Beanspruchung erheblich abnimmt (Bild 4). Von Einfluss ist dabei nur die Druckvorgeschichte, wie Versuche mit Zugvorgeschichten gezeigt haben. Der Minimalwert wird dabei im wesentlichen bereits nach einigen wenigen Zyklen ($N < 10$) und somit sicher im Verlauf eines Erdbebens ($N > 10$) erreicht. Massgebend für die Grösse der Zugfestigkeit sind ausser der Betonqualität insbesondere die Dehngeschwindigkeit während der Zugbeanspruchung ($\dot{\varepsilon}$), die (mittlere) Stauchung während der Druckphasen (ε_c) sowie vermutlich das Grösstkorn des Betons (d_{max}), weil die Festigkeitseinbusse auf Risse zurückzuführen sein dürfte, die während der Druckphasen zwischen Korn und Matrix des Betons entstehen. Die bisher mit Normalbeton (Grösstkorn 32 mm) durchgeführten Versuche müssen deshalb auf Staumauerbeton (Grösstkorn 80 mm) ausgeweitet werden, was derzeit im Gang ist.
Die am Institut für Grundbau und Bodenmechanik bearbeitete Studie zur verbesserten Abschätzung der benötigten Erdbebenparameter (Antwortspektren oder Akzelerogramme) ist abgeschlossen und als Dissertation veröffentlicht[3]. Es wurde dabei vor allem der Alpenraum behandelt (wo die Mehrzahl unserer Stauhaltungen liegt) und insbesondere versucht, die generell bekannten Abminderungsgesetze und Korrelationen zu verbessern, die zwischen den Erdbebengrössen (Magnitude, Intensität) einerseits und den Ingenieurparametern (Antwortspektrum, Akzelerogramm) andererseits bestehen, und zwar anhand von Daten der Edbeben 1976 in Friaul (Norditalien). Andere möglicherweise geeignete Erdbeben im europäischen Raum konnten mangels ausreichender Daten nicht herangezogen werden. Trotz erzielter Fortschritte zeigt sich, dass weiterhin erhebliche Unsicherheiten bestehen bleiben (besonders bezüglich der Abschätzung von Akzelerogrammen), und dass diese nur durch den Aufbau eines Starkbebenmessnetzes (mit der Zeit) verkleinert werden können.

7. Projekt für ein Starkbebenmessnetz

Die zuverlässigsten Daten für die Beurteilung der Erdbebensicherheit der Talsperren würde man längerfristig gewinnen, wenn jede Talsperre mit einer Anzahl zweckmässig angeordneter Starkbebenmessgeräte ausgerüstet würde. Dieses Vorgehen wäre angesichts der empirisch festgestellten hohen Erdbebensicherheit unserer Talsperren jedoch unangemessen. Es soll deshalb grundsätzlich anders vorgegangen werden.
Ein sogenanntes Freifeldnetz von 22 über die Schweiz verteilten Messgeräten (Bild 5) soll die erforderliche allgemeine Auskunft über die (regionalen) Charakteristiken von Starkbeben und gleichzeitig die Grundlagen zur quantitativen Bestimmung der Abminderungsgesetzmässigkeiten einerseits und des Einflusses der Untergrundverhältnisse andererseits liefern. Durch Ausrüstung von vier ausgewählten Talsperren (= Anlageinstrumentierung) sollen ergänzend Informationen über das Verhalten solcher Bauwerke unter mittlerer und starker Erdbebenbelastung gewonnen werden. Vorgesehen ist eine Instrumentierung der Gewichtsmauer Grande Dixence (6 Geräte), der Bogenmauern Mauvoisin (6 Geräte; Figur 6) und Punt dal Gall (5 Geräte) sowie des Staudamms Mattmark (3 Geräte).

Mit den in der Schweiz bereits installierten hochempfindlichen Seismographen können Beschleunigungen der Erdbewegung bis zu 0,002 g erfasst werden. Dies reicht aus, um entsprechend der Zielsetzung dieses Messnetzes Erdbeben zu lokalisieren und deren Stärke (Magnitude) zu bestimmen. Starkbebenmessgeräte decken demgegenüber den Beschleunigungsbereich zwischen etwa 0,001 g und wenigstens 0,5 g ab und vermögen somit die Akzelero-

[2] *Skrikerud, Bachmann:* Rissbildung in Schwergewichtsmauern unter Erdbebeneinwirkung, «Schweizer Ingenieur und Architekt», Heft 37, 1985.

[3] *Armin Ziegler:* Bemessungsbeben für Stauanlagen im schweizerischen Alpenraum (auch als Mitteilung Nr. 130 des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik an der ETHZ veröffentlicht).

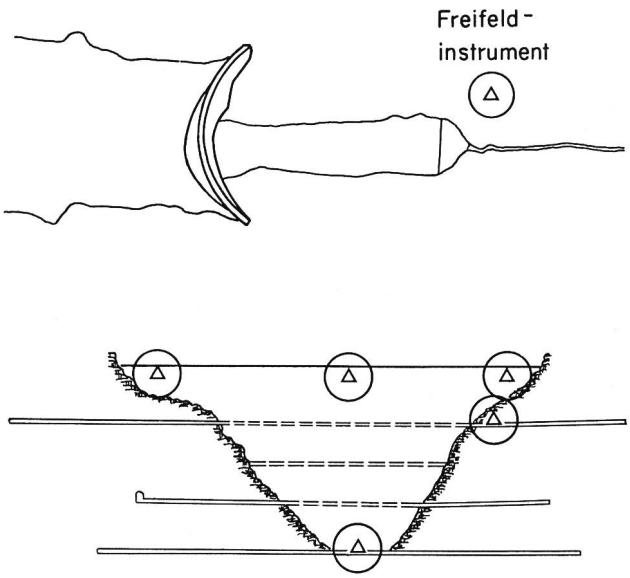


Bild 6. Geplante Anlageinstrumentierung der Bogenmauer Mauvoisin.

gramme auch stärkerer Bodenerschütterungen vollständig aufzuzeichnen. Es ist dies die notwendige Voraussetzung, um die massgebenden Erdbebenparameter erfassen zu können.

8. Weiteres Vorgehen

Falls die Forschungsarbeiten in allen Bereichen erfolgreich abgeschlossen werden können, was frühestens 1988 der Fall sein dürfte, ist vorgesehen, vorerst etwa 5 bis 8 ausgewählte Talsperren zu überprüfen und weitere nur dann in die Überprüfung einzubeziehen, wenn sich wider Erwarten zeigen sollte, dass die Erdbebensicherheit aller oder einzelner der untersuchten Anlagen nur knapp genügend oder gar ungenügend ist. Offen ist noch, ob die Berechnung mit einem gewählten Bemessungsbeben durchgeführt (z.B.: das 1000- oder 10000jährliche Erdbeben) oder die dynamische Anregung in Schritten solange gesteigert werden soll, bis das Bauwerk bricht. Letzteres dürfte aussagekräftiger und deshalb vorzuziehen sein, weil gleichzeitig die Empfindlichkeit der Talsperre bezüglich dynamischer Beanspruchungen erkannt wird und dies auch beurteilen lässt, ob das Schadenbeben überhaupt auftreten kann respektive mit welcher Wahrscheinlichkeit es zu erwarten ist und welche übrigen Schäden dabei resultieren.
Spätestens in einigen wenigen Jahren soll auch die Forschung für Dämme gefördert werden. Dabei wird man an erste Forschungsarbeiten anschliessen können, die derzeit an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Lausanne im Gange sind und erwarten lassen, dass auch der Verflüssigungseffekt numerisch erfasst werden kann.

Adresse des Verfassers: Dr. *Rudolf Biedermann,* Beauftragter für die Sicherheit der Talsperren, Bundesamt für Wasserwirtschaft, Postfach 2743, CH-3001 Bern.

Vortrag, gehalten am Symposium über Erdbeben vom 7. bis 10. April 1986 in Brig.

Geschwindigkeitsmessung unter beträchtlicher Stromlinienkrümmung und hoher Fliessgeschwindigkeit

Willi H. Hager und Nicola V. Bretz

Zusammenfassung

Anhand von Versuchsresultaten werden Abflüsse mit beträchtlicher Stromlinienkrümmung und hoher Fliessgeschwindigkeit wie sie in der hydraulischen Modelltechnik häufig auftreten untersucht. Die dafür entwickelten Prototypen von Geräten erlauben auch Aufschluss über den internen Strömungscharakter von Überfällen und Tosbecken zu geben.

Summary

Based upon experimental results, flows with considerable curvature of the streamlines and with high velocity as appear in hydraulic model studies are investigated. The used prototype instruments allow to examine the internal flow mechanisms of spillways and stilling basins.

1. Einleitung

Die Modelltechnik hat sich im Bereich der Hydraulik und der Hydromechanik zu spezialisierten Disziplinen entwickelt, denen der planende Ingenieur meist nur noch am Rande folgen kann. Von den modernen Messtechniken wie die Hitzdraht-Anemometrie oder die Laser-Doppler-Anemometrie, die hochentwickelter elektronischer Datenübermittler bedürfen, sind häufig nur die Grundprinzipien bekannt; ihr Einsatz ist jedoch den entsprechenden Laboratorien vorenthalten.
Bei reinen Wasserströmungen werden im wesentlichen Geschwindigkeits- und Druckprofile aufgenommen. Dabei wird unterschieden zwischen schwach- und hochturbulenten Abflüssen. In den ersten kann auf die Ermittlung der turbulenten Schwankungsgrössen weitgehend verzichtet werden, während bei den zweiten die zeitlichen Änderungen von Druck und Geschwindigkeit einen wesentlichen Bestandteil des Phänomens darstellen. Komplexer als reine Wasserströmungen sind Abflüsse, die aus mehreren Phasen wie Wasser und Sediment oder Wasser und Luft bestehen. In den folgenden Ausführungen werden *Wasser-Luft-Gemische* eingehender betrachtet, Sedimenttransport soll jedoch unberücksichtigt bleiben.
Die klassischen Geräte zur Ermittlung lokaler *Geschwindigkeiten* basieren hauptsächlich auf dem Prinzip des Prandtl-Rohres, also eines kombinierten Gebers, der sowohl den statischen Druck $p/(\rho g)$ wie auch den Strömungsdruck $p/(\rho g)+V^2/(2g)$ misst. Der Differenzdruck führt somit auf die Geschwindigkeitshöhe $V^2/(2g)$, die auf einem Manometer abgelesen werden kann. Dieses Verfahren setzt eine Strömung von luftfreiem Wasser voraus; gelangen Luftblasen in die Verbindungsleitungen, so wird die Messung verfälscht. Weiter sollen die Stromlinien fast parallel verlaufen, damit die Druckunterschiede zwischen den beiden Sondenöffnungen klein bleiben. Das Messen der Geschwindigkeit anhand der Prandtl-Sonde braucht viel Zeit. Im Mittel werden 10 bis 15 Minuten pro Einzelmessung aufgewendet, bis der Manometerdruck dem effektiven Druck entspricht. Zudem lassen sich Geschwindigkeiten unter $V_l \simeq 0{,}6\,m/s$ nur ungenau eruieren. Ein wesentlicher Vorteil gegenüber anderen Geräten ist jedoch die geringe Baudicke (etwa 1 mm), womit insbesondere in der Umgebung