

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 115 (2023)
Heft: 3

Artikel: Betonexpansion, eine Herausforderung in Entwicklung
Autor: Amberg, Francesco / Bremen, Roger
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1050002>

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: 22.01.2026

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

Betonexpansion, eine Herausforderung in Entwicklung

Francesco Amberg, Roger Bremen

Zusammenfassung

Die Betonexpansion chemischer Natur ist ein heute ziemlich bekanntes Phänomen bei Stau Mauern und manifestiert sich hauptsächlich durch bleibende Verschiebungen. Langfristige Messdaten von hoher Qualität ermöglichen die Erkennung von Trends und damit eine möglichst frühzeitige Identifizierung des Problems. Ein weiteres Merkmal sind Risse, die typischerweise in den Kontrollgängen auftreten und auch relevante Öffnungen erreichen können. Das Verständnis der chemischen Vorgänge sowie eine zuverlässige Vorhersage deren mittelfristiger Entwicklung bleiben auch heute noch eine Herausforderung.

Bis zum Ende der 1990er Jahre war dies ein eher selten diskutiertes Thema, das nur für einzelne Talsperren von Bedeutung war. Mittlerweile mussten bis heute bei einigen Stau Mauern in der Schweiz Massnahmen getroffen werden, und es ist zu erwarten, dass in Zukunft weitere, z. T. aufwendige Eingriffe erforderlich sein werden. Für die betroffenen Strukturen gibt es in den meisten Fällen keine endgültige Lösung, so dass normalerweise nur die Folgen und nicht die Ursachen behandelt werden können. Die Spannungsverteilung innerhalb der Stau Mauern verändert sich im Laufe der Zeit sehr bedeutend, so dass gelegentlich Bedenken hinsichtlich der Sicherheit dieser Anlagen aufkommen. Dieses Thema wird die beteiligten Akteure auch in Zukunft stark beschäftigen. Die Überwachung und Instandhaltung bestehender Stau Mauern birgt somit grosse Herausforderungen, die sicherlich auch das Interesse junger Ingenieure wecken werden.

Résumé

L'expansion du béton de nature chimique est un phénomène actuellement relativement bien connu dans les barrages et se manifeste principalement par les déplacements permanents. Une surveillance à long terme de haute qualité permet de détecter les tendances et ainsi d'identifier précocement ce problème. Une autre caractéristique est la présence de fissures, qui apparaissent généralement dans les galeries de contrôle et peuvent également atteindre des ouvertures significatives. La compréhension des phénomènes chimiques ainsi que la prévision de leur évolution à moyen terme restent encore aujourd'hui un défi complexe.

Jusqu'à la fin des années 1990, il s'agissait d'un sujet rarement discuté, relevant uniquement de quelques barrages particuliers. À ce jour, plusieurs barrages en Suisse ont déjà demandé des interventions, et il est prévisible que d'autres seront nécessaires à l'avenir. Pour les structures concernées, il n'est généralement pas possible de traiter les causes du problème et les interventions possibles se limitent à un contrôle de ces effets. La distribution des contraintes à l'intérieur du barrage est considérablement affectée par les phénomènes de gonflement, ce qui suscite occasionnellement des préoccupations quant à leur sécurité. Ce sujet continuera à fortement occuper l'ensemble des acteurs impliqués à l'avenir. Ainsi, le domaine de la surveillance et de la maintenance des barrages existants présente des défis importants qui susciteront certainement l'intérêt des jeunes ingénieurs.

Dank der Tätigkeit der Arbeitsgruppe «Alkali-Aggregat-Reaktion» des Schweizerischen Talsperrenkomitees (STK) ist der Zustand in Bezug auf die Betonexpansion an unseren Stauanlagen heute etwas klarer geworden. Gemäss dem Bericht «Betonquellen bei Stau Mauern in der Schweiz» vom 8. Mai 2017 zeigen etwa 50 Prozent der Stau Mauern der Klasse I und II Verformungstrends, die grösstenteils mit einer möglichen Betonexpansion in Einklang stehen könnten. Bei den Stau Mauern der Klasse III ist der Prozentsatz der betroffenen Talsperren etwas unklarer, zum Teil, weil nicht alle Stau Mauern von der Arbeitsgruppe eingehend untersucht wurden, aber auch, weil manchmal weniger genaue Messdaten zur Verfügung stehen.

Es gibt grundsätzlich keinen Grund anzunehmen, dass sich die kleineren Sperren anders verhalten als die grösseren und besser überwachten Anlagen.

Die anhand von Messdaten erkannten Verformungstrends können auch sehr leicht sein, mit durchschnittlichen Dehnungen generell geringer als $30 \mu\text{m}/\text{m}/\text{Jahr}$, oder sogar weniger, $10\text{--}20 \mu\text{m}/\text{m}/\text{Jahr}$, was mit einer mittleren Temperaturerhöhung von etwa 1 bis 3°C pro Jahr vergleichbar wäre (Amberg, 2018).

Typischerweise wird diese Betonexpansion durch eine chemische Reaktion zwischen den Alkalien und den Zuschlagstoffen verursacht. Diese Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR) erfordert Wasser, Alkali (aus dem Zement wird bereits ausreichend

Alkali geliefert) und reaktive Mineralien. Höhere Temperaturen beschleunigen die Reaktion, während höhere Druckspannungen die Expansion in der Belastungsrichtung hemmen.

In einigen Fällen kann die Betonexpansion auch durch eine innere Sulfatreaktion (ISA, Internal Sulphate Attack) verursacht werden, bei der eine chemische Reaktion zwischen Wasser, Sauerstoff und Sulfaten aus den Zuschlagstoffen (z. B. Pyrit) stattfindet.

Es sind dies zwei verschiedene chemische Reaktionen, welche aber ganz vergleichbare praktische Konsequenzen für den Stau Mauerbeton haben.

Vor einigen Jahrzehnten wurde die Situation noch ganz anders eingeschätzt.

Im Bulletin 79 des Internationalen Talsperrenkomitees ICOLD aus dem Jahr 1991 werden nur vereinzelte Sonderfälle von AAR betroffenen Staumauern weltweit er-

wähnt, jedoch keine einzige in der Schweiz. Im Jahr 2001 wurde der Bericht «Le béton des barrages suisses» der damals aktiven Arbeitsgruppe «Talsperrenbeton» des STK veröffentlicht, in dem die AAR nur am Rande und nur im Zusammenhang mit «bestimmten amorphen Kieselsäuren» erwähnt wird. Das tatsächliche reaktive Potenzial von Mineralien wurde eindeutig zu wenig erkannt, insbesondere im Zusammenhang mit dem nur leicht reaktiven Quarz, der in vielen Gesteinen vorkommt, wie Gneis, Schiefer, Granit und den daraus entstehenden Sedimentgesteinen, welche Quarz in verschiedenen Formen enthalten.

Die ersten bekannten Fälle von durch AAR betroffenen Staumauern in der Schweiz waren Illsee, bei welcher schon im Jahre 1997 bauliche Massnahmen vorgenommen wurden (Einbau einer Dichtungsmembrane auf dem wasserseitigen Parament), sowie Lago Bianco Süd und Nord (Baumann, 1998), welche in den Jahren 2000/2001 saniert wurden. Bei verschiedenen Talsperren wurden nichtreversible Verformungstrends beobachtet, wie Roggiasca und Isola (Lombardi, 2001), ohne jedoch die Ursachen vollumfänglich zu verstehen. Die

langsame Expansion verursacht hauptsächlich Dehnungen, welche dann Risse in den Auflagerbereichen oder bei Knickpunkten als Folge des strukturellen Verhaltens auslösen können.

Die tatsächliche Situation ist jedoch, dass die Anzahl der betroffenen Staumauern in der Schweiz relevant ist. Ein Vergleich mit den Nachbarländern im alpinen Bereich ist nicht einfach, da eine ähnliche statistische Analyse nicht immer zur Verfügung steht. Électricité de France (EDF) veröffentlichte vor einigen Jahren einen Fachartikel (Sausse, 2012), in dem ebenfalls festgehalten wird, dass 50 Prozent der Staumauern, die sich im Zentralmassiv befinden, irreversible Verformungen aufweisen. Dort kommen auch Granite und Gneise häufig vor. Allgemein wird sonst berichtet, dass nur etwa 20 Prozent der 150 Staumauern der EDF von AAR betroffen sind.

Ist bei uns eine höhere Rate an betroffenen Talsperren als in den Nachbarländern zu finden? In der Schweiz konnte in den früheren Jahren, als viele Stauanlagen gebaut wurden, das Puzzolan nicht leicht importiert werden, dies, um die in-

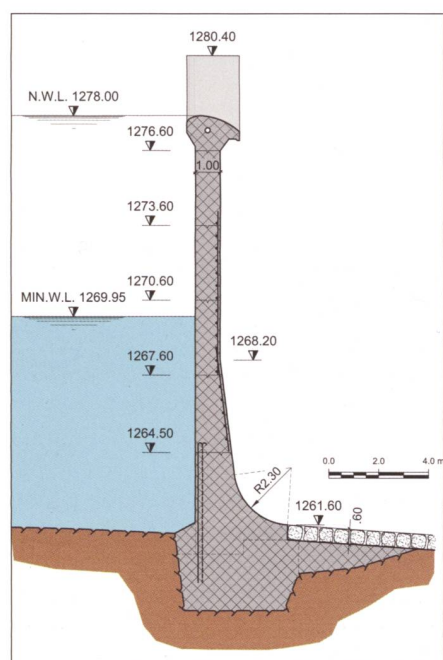


Bild 1: Regelquerschnitt der Staumauer Sera.

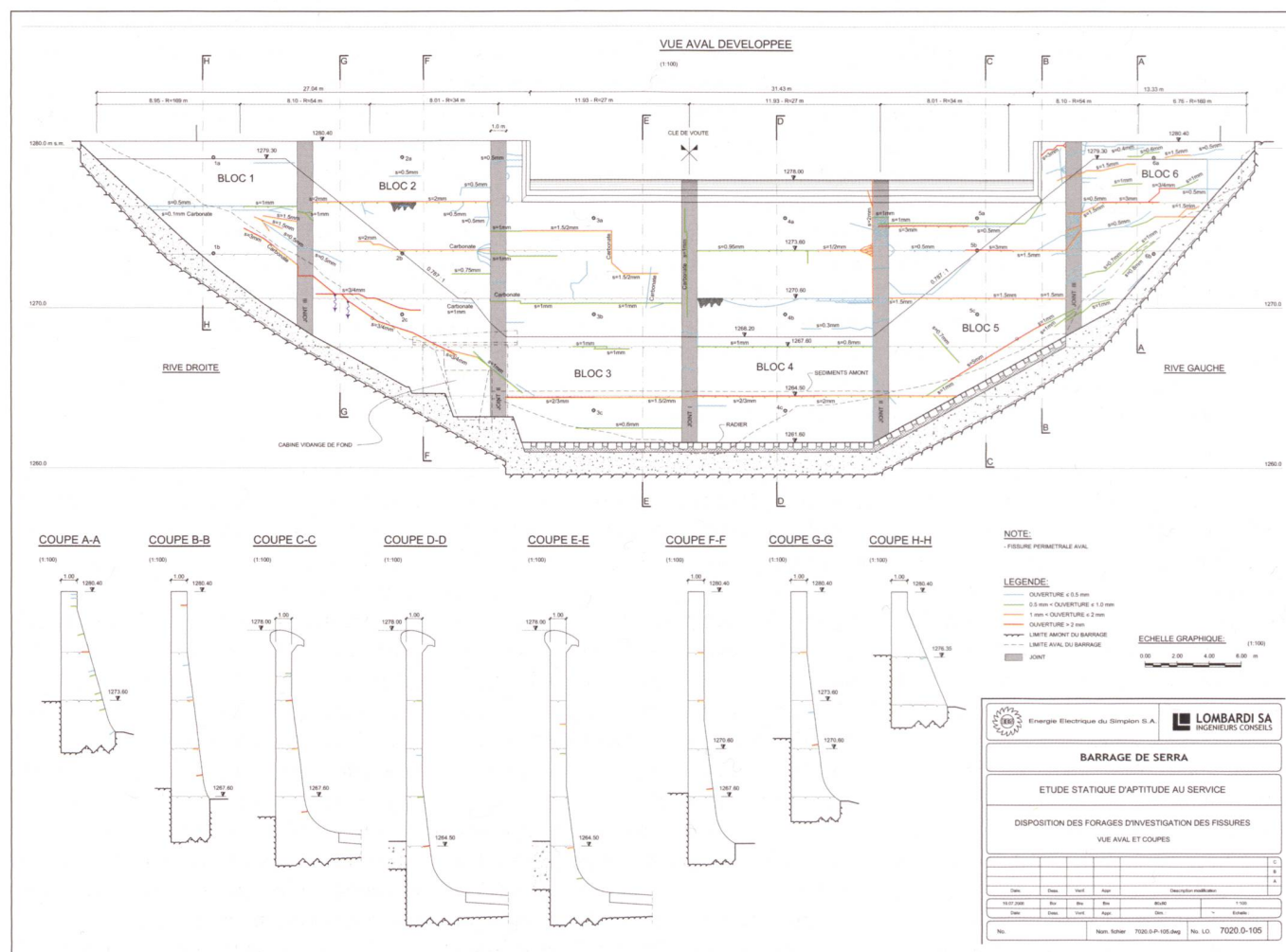


Bild 2: Staumauer Sera, aufgenommenes Rissbild auf dem luftseitigen Parament.



Bild 3: Bau der neuen Staumauer Sera gleich luftseitig der bestehenden Sperre.



Bild 4: Die neue, in den Jahren 2008-2010 gebaute Bogenmauer Sera.

ländische Produktion von Portlandzement zu schützen und zu fördern. Puzzolan, Flugasche mit niedrigem Kalkgehalt oder Hochofenschlacke in ausreichender Menge sollten die Reaktion jedoch vermindern (RILEM, 2016). Ob die hauptsächliche Verwendung von Portlandzement einen Einfluss auf die derzeitige Situation in der Schweiz hat, ist nicht klar. Dazu sollte man mehr wissen über allfällige Unterschiede zwischen der Schweiz und den Nachbarländern beim Verhalten der Staumauern, der Betonrezeptur sowie den Eigenschaften der Zuschlagstoffe.

Typischerweise befinden sich die langsamen Reaktionen tendenziell in einer initialen Phase der Entwicklung. In manchen Fällen kommt es vor, dass Verformungstrends im gemessenen Verhalten der Mauer erkannt werden können, ohne dass eine klare Aussage oder Bestätigung einer AAR durch Laboruntersuchungen bewiesen werden kann. Früher war dies keine ungewöhnliche Situation, mit der man oft konfrontiert wurde. Anscheinend ist es mit Hilfe von Dünnschliffen nicht immer einfach, das Vorhandensein einer AAR eindeutig zu erkennen, insbesondere in einer frühen Phase, in der die AAR-Produkte noch nicht unbedingt aus Gel bestehen. Tatsächlich können die AAR-Produkte auch kristallin sein. Heute weiss man auch mehr diesbezüglich und die Laboruntersuchungen wurden weiterentwickelt.

Bei langsamen Reaktionen ist eine gewissenhafte Überwachung der Staumauer eine der zuverlässigsten Methoden zur Bewertung der Entwicklung einer allfälligen Reaktion. Dennoch bestehen Gefährdungen. Das Gleichgewicht verändert sich im Laufe der Zeit. Ein reversibles Verhalten in der Vergangenheit ist keine Garantie für

gleichbleibende Bedingungen in der Zukunft. Strukturelle Risse treten bei Staumauern aufgrund von irreversiblen Verformungen schnell auf, da bleibende Verformungen bei statisch unbestimmten Systemen Zwangsspannungen erzeugen. Ein gutes Beispiel für die Risiken von AAR ist die Bogenstaumauer Sera (Leroy, 2010). Die Staumauer Sera befindet sich im Zwischbergental, einem Nebental am südlichen Hang des Simplonpasses, in der Nähe des Dorfes Gondo. Die ursprüngliche Mauer, die einen besonders hohen Schlankheitskoeffizienten nach Lombardi von 40 aufwies, wurde zwischen 1951 und 1952 erbaut. Die Mauer ist 20 m hoch, besteht jedoch aus einem vertikalen Zylinder (Bild 1) mit einer Dicke von nur 1 m und einer 75 m langen Krone. Die Mauerdicke nimmt nur im Auflagerbereich leicht zu. Die Mauer ist von einer AAR-induzierten Betonexpansion betroffen. Die Konsequenzen sind permanente Verformungen zur Wasserseite, Anhebungen der Mauerkrone, horizontale Risse sowie ein teilweise durchgehender Hauptriss, der eine Art Umfangsfuge bildet (Bild 2). Trotz der Berechnungen, welche die Stabilität der Struktur auch in stark gerissenem Zustand belegen konnten, wurde entschieden, die Mauer zu verstärken. Wie bei den meisten durch AAR gerissenen Talsperren ist die Schwierigkeit einer umfassenden Zustandsbewertung (Risstiefe) nicht zu unterschätzen. Die Bogenmauer wurde provisorisch saniert, indem beide seitlichen Widerlager mit vertikalen Vorspannankern verstärkt wurden. Die Mauer benötigte aber einen umfassenden Eingriff. Die bestehende Talsperre wurde schliesslich durch eine neue Bogenmauer talwärts der bestehenden Struktur vollständig ersetzt (Bild 3). Die

neue Sperre Sera (Bild 4) wurde in den Jahren 2008–2010 gebaut. Es ist auch erwähnenswert, dass die mechanischen Betoneigenschaften wie das Elastizitätsmodul und die Festigkeit von der Reaktion unbeeinflusst waren.

Bei der Staumauer Sera hatten die durch bleibende Verformungen hervorgerufenen strukturellen Risse aber eine Grenze erreicht, welche zuverlässige Aussagen zu den Stabilitätsbedingungen nicht mehr erlaubten.

Bei Sera war die Betonexpansion bereits recht weit fortgeschritten. In vertikaler Richtung betrug die durchschnittliche Dehnung insgesamt über 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$, was im Vergleich zu anderen Situationen in der Schweiz relativ hoch ist.

In anderen Fällen wurde die Mauer durch Vertikalschnitte entlastet, wie bei Salanfe, Isola oder Illsee.

Mit der Problematik der Betonexpansion müssen wir uns vermutlich noch lange befassen. Der Fall Illsee zeigt beispielhaft, wie begrenzt unsere Möglichkeiten sind, um diese Phänomene zu kontrollieren. Die Reaktion benötigt zwar Wasser, und ohne ausreichende Feuchtigkeit entwickelt sie sich nicht weiter. Doch Massivstrukturen wie Staumauern trocknen nur schwer aus. Die 25 m hohe Staumauer Illsee besteht aus einem zentralen bogenförmigen Teil und zwei als Gewichtsmauern ausgebildeten Flügelmauern. Die Talsperre wurde in zwei Etappen gebaut, die erste im Jahr 1927 und die zweite wurde im Jahre 1943 abgeschlossen. Das minimale Betriebsniveau liegt 25 m unterhalb des Mauerfusses. Aufgrund der jährlichen Schwankungen des Sees ist der von AAR betroffene Beton nur 3 Monate im Jahr mit dem Stausee in Kontakt. Zusätzlich wurde in



Bild 5: Dichtungsmembrane auf dem wasserseitigen Parament der Staumauer Illsee, Details des Anschlusses am Mauerfuss.

den Jahren 1995 bis 1997 das wasserseitige Parament mit einer Membrane abgedichtet (*Bild 5*), um Sinterungen durch die Mauer zu minimieren. Dennoch quillt die Mauer seit 1960 konstant mit ungefähr $10\text{ }\mu\text{m/m/Jahr}$ ohne eine nennenswerte Änderung der Expansionsrate aufgrund des Einbaus der Membrane. Die Mauer musste also in den Jahren 2011–13 von den Quellzwängungen durch die Erstellung von 7 Vertikalschnitten entspannt werden und das Tragverhalten des gekrümmten Mauerteils wurde zu einer Schwergewichtsmauer ausgebildet. Zusätzlich, zur Gewährleistung der Erdbebensicherheit, wurde der obere Mauerteil und die gerade Mauerpartie mittels vorgespannten permanen-

ten Ankern verstärkt. Zu erwähnen ist, dass bei schlankeren Talsperren (z. B. Pannecière, Frankreich) der Einbau von einer Membrane doch zu einer nicht unbedeutenden Reduktion der Expansionsraten geführt hat.

Bei einer gleichwertigen Expansionsrate ist das Schadensbild einer Talsperre grundsätzlich durch dessen Geometrie gegeben, so dass Sanierungsmassnahmen von Fall zu Fall anzupassen sind. Mittlerweile besteht bei gewissen Interventionskonzepten wie das Schneiden mit Diamantseil oder die Anwendung von wasserseitigen Abdichtungen eine gewisse Erfahrung. Zu erwähnen ist, dass eine Reduktion der Expansionsraten an massiven Bauteilen durch Anbringen von Oberflä-

chenabdichtungen nur sehr bedingt erfolgreich ist, wie gerade beschrieben wurde.

Noch wenig Erfahrung verfügt man hingegen beim Einsatz von Massnahmen, welche eine Reduktion der Höchsttemperaturen erlauben und somit die mittlere Reaktionsgeschwindigkeit beeinflussen.

Schliesslich ist die Bewertung des angemessenen Zeitpunktes von baulichen Massnahmen besonders herausfordernd. Vorzeitige Interventionen haben nicht immer die erhofften Resultate erbracht, andererseits bleibt oft bei einer zu sehr beschädigten Talsperre nur der Neubau (oder die Ausserbetriebnahme) als mögliche Option offen. Die sehr reizende Hoffnung, dass die Reaktion mit der Zeit von selber wieder abklingen wird, hat leider bis heute, nach unserem Wissen, noch an keiner Schweizer Talsperre stattgefunden. Einfach abwarten ist somit anscheinend keine Lösung.

In Zukunft sind Sanierungsmassnahmen an weiteren Staumauern notwendig. An gewissen Talsperren wird es sich um aussergewöhnlich anspruchsvolle Projekte handeln. Die Überwachung und Instandhaltung bestehender Staumauern bleibt eine Herausforderung für Bauingenieure die hoffentlich auch jüngere Ingenieure interessiert. Es ist noch ein langer Weg, bevor wir die Problematik der AAR an Talsperren vollständig verstehen und angemessene Lösungen zur langfristigen Gewährleistung der Talsperrensicherheit gefunden haben.

Quellen:

Schweizerisches Talsperrenkomitee, Arbeitsgruppe Alkali-Aggregat-Reaktion: Betonquellen bei Staumauern in der Schweiz. 8. Mai 2017.

Amberg, F., Bremen, R., Droz, P., Leroy, R., Maier, J., Otto, B.: Betonquellen bei Staumauern in der Schweiz. Wasser Energie Luft, Heft 4, 2018.

ICOLD Bulletin 79: Alkali-Aggregate Reaction in Dams – Review and Recommendations, 1991.

Comité Suisse des Barrages, Groupe de Travail Talsperrenbeton: Le béton des Barrages Suisses. 2001.

Baumann, R.; Otto, B.; Steiger, K.M.: AAR effecting the safety of old dams. Symposium on New Trends and Guidelines on Dam Safety, Barcelona, Spain, Ed. L. Berga., A.A. Balkema, 1998.

Lombardi, G., Bremen, R., Amberg, F.: Long term behaviour of three arch dams. Sixth ICOLD Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams, Salzburg (Austria), October 17-19, 2001.

Sausse, J., Fabre, J.P.: Diagnosis of Dams Affected by Swelling Reactions: Lesson Learned from 150 Monitored Concrete Dams in France. Dam Engineering Vol XXIII Issue 1, 2012.

RILEM Technical Committee 219-ACS: RILEM recommendations for the prevention of damage by alkali-aggregate reactions in new concrete structures. Springer, 2016.

Leroy, R., Micoulet, G., Tognola, F.: Rehabilitation of Serra dam (Switzerland) affected by ASR. Dam maintenance and rehabilitation; Proc. 2nd Intern. Congr., Zaragoza, 2010.

Autoren:

Francesco Amberg, Lombardi SA
Roger Bremen, Lombardi SA