Zeitschrift: Bulletin Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik
Band: 102 (2011)
Heft: 10

Artikel: Vieillissement des barrages en Suisse
Autor: Giorla, Alain / Chappex, Théodore
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-856852

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

Vieillissement des barrages en Suisse

La lutte contre la réaction alcali-granulats (RAG) continue

La Suisse compte plus de deux cents grands barrages qui contribuent à 55 % de la production électrique du pays. La plupart de ces ouvrages en béton ont été construits entre les années 1950 et 1970. Aujourd'hui, ils montrent des signes de vieillissement. Certains subissent un phénomène de déformation et de gonflement interne : la réaction alcali-granulats (RAG). La RAG est une réaction particulièrement lente : les premiers signes peuvent apparaître vingt voire quarante ans après la construction.

Alain Giorla et Théodore Chappex

Les déformations du béton dues à la RAG s'accompagnent généralement d'une lente fissuration qui réduit la durée de vie des structures. Environ 30 % des barrages suisses sont suspectés de subir cette réaction. Il est donc indispensable de pouvoir prédire l'évolution sur le long terme des structures affectées, mais aussi de faire en sorte d'éviter ces déformations sur les ouvrages futurs. Plusieurs recherches sont en cours pour comprendre ce phénomène complexe.

Un gel absorbant

La RAG a pour origine une réaction chimique entre les différents constituants du béton. Certaines zones des granulats qui composent les bétons sont formées de silice mal cristallisée et sont ainsi attaquées sous l'effet du potentiel hydrogène (ou pH) fortement basique de l'eau contenue dans les pores du béton. Les ions alcalins (sodium, potassium) présents dans cette eau se combinent avec la silice dissoute pour former un gel. Ce dernier peut absorber l'eau environnante, ce qui le fait gonfler.

L'expansion du gel à l'intérieur des granulats se traduit par un gonflement du béton à l'échelle de la structure. Dans le même temps, les granulats se fissurent sous la forte pression exercée par le gel. Alors que la réaction chimique avance, la formation de gel augmente et la fissuration initialement contenue dans les granulats se transmet petit à petit à la pâte de ciment.

De nombreuses recherches sont en cours pour comprendre les mécanismes de la réaction. Le Laboratoire des Matériaux de Construction (LMC) de l'EPFL étudie la réaction tant d'un point de vue de sa chimie que de ses effets mécaniques.

OFEN, 2009

Le vieux barrage de Serra à Zwischbergen (VS) était affecté par la RAG.

Diagnostic et entretien

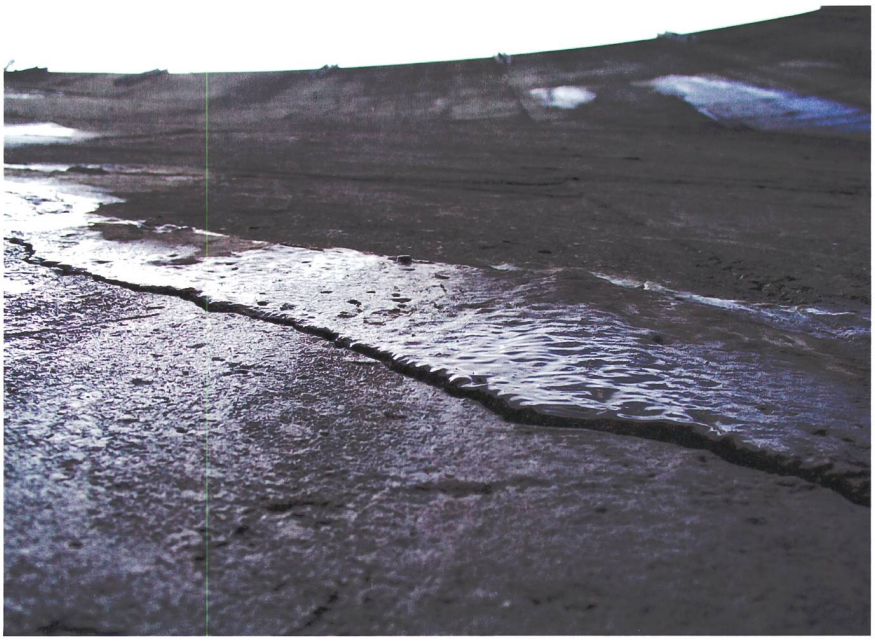
Le diagnostic d'une structure affectée par la RAG comporte différentes étapes. Les premières observations sont faites à même la structure. La présence de granulats réactifs est souvent décelée par l'apparition d'un réseau de fissures sur la surface du béton. Lors de dégradations avancées, il est possible d'observer des largeurs de fissures avoisinant le centimètre.

En observant l'évolution de la largeur et de la densité d'une fissure, il est possible d'estimer l'avancement de la réaction. Dans le cas de structures ayant un rôle statique important, comme les tunnels, ponts et barrages, l'évolution de leurs mouvements est minutieusement contrôlée d'année en année et permet de déceler une activité aux alcalins avant même l'apparition de fissures en surface.

Lorsqu'une structure présente un comportement de type RAG, il est possible d'effectuer une analyse plus pointue en laboratoire. La première étape consiste à analyser la pétrographie des granulats utilisés dans une structure. La présence de phases siliceuses et amorphes est un bon indicateur d'une potentielle réactivité aux alcalins. Il est ensuite possible d'effectuer un test d'expansion sur mortier ou béton en conditions accélérées. Il existe différents types de tests normalisés permettant de simuler un essai de RAG en quelques mois. En effet, il est illusoire de devoir attendre quarante ans les résultats d'une analyse de laboratoire.

Scier le barrage verticalement

Les principaux paramètres qui influencent la cinétique de la réaction sont la température et la teneur en alcalins du système. Les échantillons de mortier ou de béton sont immergés dans des solutions de soude ou de potasse à 40 ou 60 °C, ce qui accélère la réaction chimique.



OFEN, 2009

Détail d'une portion du mur du barrage de Serra attaquée par la RAG.

À ce jour, la RAG présente dans une structure ne peut pas être arrêtée. Le gel continue à se former dans le granulat jusqu'à l'épuisement de la phase réactive, la silice amorphe. Par le passé, quelques tentatives d'étanchéification de structures ont été effectuées, notamment sur des barrages.

Cette approche est cependant vaine. Il y a en effet assez d'eau dans un béton de barrage pour alimenter la formation de gel expansif. De plus, il est extrêmement difficile d'étanchéifier une grande structure et de garantir aucun apport d'eau.

Il est par contre possible de réduire le déplacement d'un barrage induit par la déformation du béton. La méthode consiste à scier le barrage verticalement à l'aide d'un fil diamanté, à intervalles de quelques mètres sur toute la longueur du barrage.

Les fentes du sciage permettent au béton de gonfler sans appliquer de contrainte supplémentaire à la structure. La réaction peut ainsi continuer à évoluer jusqu'à ce que les parois se touchent à nouveau. Cette méthode radicale permet à une exploitation hydroélectrique de gagner quelques années avant la reconstruction du barrage.

Agir au niveau du ciment

La réalisation d'ouvrages d'art comme les tunnels ou barrages nécessite l'utilisation de granulats issus des environs du chantier, même si leur réactivité aux alcalins a été décelée. Il n'est en effet pas possible, pour des raisons de logistique et de coût, d'acheminer des granulats non réactifs d'une carrière extérieure. L'unique façon d'annuler ou de réduire la réaction dans un béton est d'agir au niveau de la microstructure et de la chimie du ciment.

L'ajout d'additions minérales permet de modifier la pâte de ciment à cette échelle. Les additions minérales sont des matériaux dont la composition est proche de celle du ciment classique, constitué de chaux, de silice et d'alumine.

La concentration en silice et en alumine y est cependant supérieure. Ces matériaux sont principalement issus de déchets industriels. La cendre volante est par exemple un déchet de la calcination du charbon. La fumée de silice et le laitier sont eux des déchets de l'industrie sidérurgique.

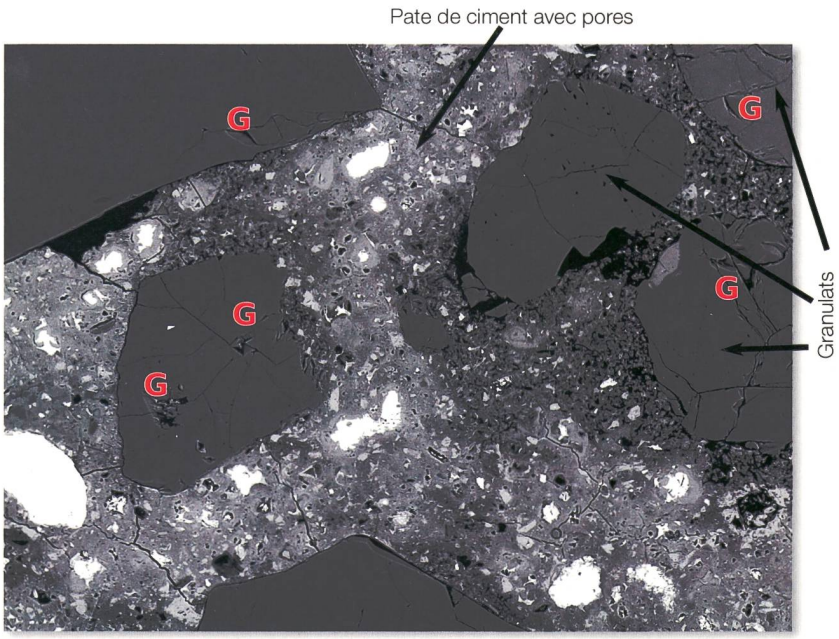
L'étude des mécanismes contrôlant la RAG est de première importance pour la construction d'ouvrages d'art. Il est cependant primordial de réduire au maximum la quantité d'addition minérale dans une structure.

La production de ces déchets est limitée et leur prix s'avère supérieur à celui du ciment. Or, le seul moyen de substituer le minimum de ciment par une addition minérale est de connaître exactement l'action de celle-ci sur la RAG.

Effet des additions minérales

L'ajout d'addition minérale, riche en silice, a un effet sur la composition même des produits d'hydratation du ciment. Les silicates de calcium hydratés (C-S-H), phase principale créée lors de l'hydratation du ciment, se trouvent modifiés et enrichis en silicium. Le silicium incorporé dans la structure du C-S-H a la capacité de fixer des alcalins du ciment.

En augmentant la teneur en silice du C-S-H, la quantité d'alcalins fixée s'en trouve directement augmentée. Ceci a pour conséquence de réduire la quantité d'alcalins libres dans l'eau des pores du



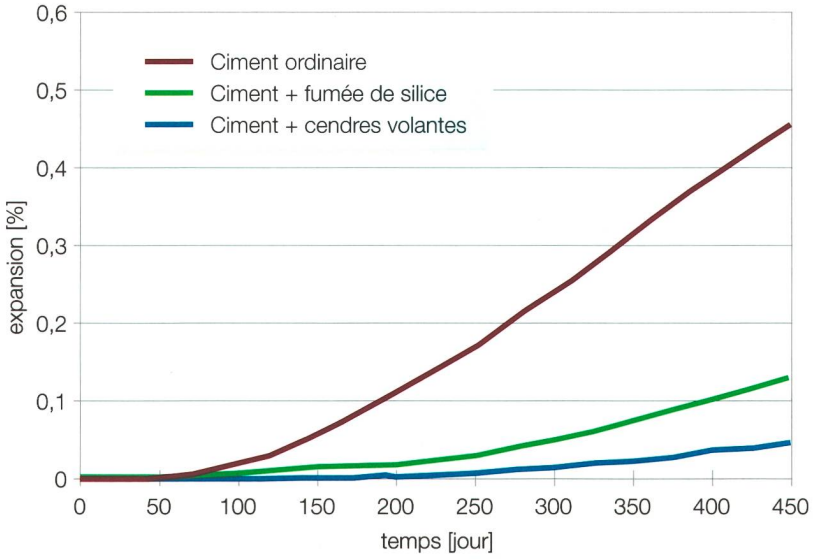
LMC, 2006

Vue en coupe (au microscope électronique à balayage) d'un béton affecté par la RAG. Les zones de gel sont marquées en rouge.

ciment, susceptibles de réagir avec les granulats réactifs.

Un second mécanisme, la densification de la matrice, joue un rôle essentiel. La réactivité de ces additions minérales tend à augmenter la quantité de ce C-S-H au sein du matériau. Ceci a pour effet de densifier la microstructure du matériau et de réduire la porosité. La diffusion d'eau et des alcalins qu'elle transporte est alors réduite. La RAG s'en trouve freinée.

La présence d'aluminium amené par les additions minérales semble également réduire la RAG. Les mécanismes à l'origine de ce comportement ne sont pas encore compris et sont en cours d'investigation.



LMC, 2011

Potentiel d'expansion des diverses sortes de ciment : des différences qui parlent d'elles-mêmes.

Recherche sur des échantillons

Un point clé de la RAG est l'état de contrainte du matériau. Le béton des barrages est soumis à des contraintes naturelles (le poids propre de la structure, la pression de l'eau), en plus de la contrainte interne imposée par la RAG.

Les fissures sont initiées là où la contrainte est maximale. Elles se propagent ensuite dans les directions des contraintes principales, ou en réseau si aucune direction n'est privilégiée. Or, les échantillons de laboratoire ne sont soumis qu'à la RAG et sont en général libres de toute autre contrainte. L'étude de la RAG en laboratoire doit donc simuler, d'une manière ou d'une autre, les contraintes que subissent les bétons des barrages.

Des recherches préliminaires ont été menées sur des échantillons de béton placés sous une presse, ce qui permet d'ajouter une contrainte verticale. Ces études ont montré que l'expansion est réduite verticalement, mais est transférée dans les directions latérales. Par ailleurs, la fissuration augmente avec la contrainte imposée. Le lien entre la contrainte, l'expansion et la fissuration est non linéaire et se voit dominé par la microstructure complexe du béton.

Simuler les fissures en 3D

Les simulations numériques par éléments finis permettent de modéliser explicitement la microstructure du béton, en prenant en compte aussi bien la localisation des poches de gel que la propagation des fissures. Le défi de ces méthodes provient de la grande différence de taille entre les poches de gel et les granulats.

Les récentes avancées en calcul numérique par éléments finis permettent de les prendre en compte dans le modèle, et d'obtenir des profils de fissuration en adéquation avec les profils observés expérimentalement. Ce modèle en deux dimensions est en cours d'exportation vers un modèle 3D pour mieux simuler la propagation spatiale des fissures et donc interpréter les résultats des expériences sous contraintes.

Les résultats des expériences et des simulations peuvent être intégrés aux codes de calcul de structures. Ces logiciels permettront d'estimer la réduction de la durée de vie des barrages affectés ou la conception de nouveaux ouvrages tenant compte de la RAG.

Les recherches du LMC sur la RAG sont supportées par l'Office fédéral de l'énergie (OFEN), Swisselectric Research et Sika.

Lien

- http://lmc.epfl.ch

Information sur les auteurs

Alain Giorla est ingénieur diplômé de l'Ecole Centrale de Nantes (F). Depuis 2009 il fait une thèse de doctorat à l'EPFL sur les effets des contraintes sur la réaction alcali-granulat, tant du point de vue expérimental que numérique.

EPFL, LMC, 1015 Lausanne
alain.giorla@epfl.ch

Théodore Chappex est ingénieur diplômé en science et génie des matériaux de l'EPFL. Depuis 2008 il est en thèse de doctorat à l'EPFL sur l'étude des mécanismes contrôlant la réaction alcali-granulat lors d'ajouts d'additions minérales.

EPFL, LMC, 1015 Lausanne
theodore.chappex@epfl.ch

Zusammenfassung

Alterung der Staudämme in der Schweiz

Der Kampf gegen die Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR)

Heute zeigen die meisten in den 50er- bis 70er-Jahren erbauten Schweizer Staudämme Alterserscheinungen. Manche erleiden Verformungen und innere Blasen: Die Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR).

Verformungen des Betons aufgrund der AKR gehen mit einer langsamen Rissbildung einher, welche die Lebensdauer der Bauten reduziert. Bei ungefähr 30 % der Schweizer Staudämme wird vermutet, dass sie dieser Reaktion ausgesetzt sind. Es ist daher zwingend notwendig, die langfristige Entwicklung der betroffenen Bauten vorhersagen zu können und darauf hinzuarbeiten, diese Verformungen bei künftigen Bauwerken zu verhindern. Es laufen mehrere Forschungsprojekte zum Verständnis dieses komplexen Phänomens. Numerische Simulationen für jedes in die Staumauer verbaute Element erlauben, die Betonmikrostruktur zu modellieren. Dabei werden die Lage von Frostblasen und die Verbreitung von Rissen berücksichtigt. Die jüngsten Fortschritte bei diesen Berechnungen fliessen in das Modell ein und ermöglichen Rissprofile, welche mit den experimentell beobachteten Profilen übereinstimmen. Dieses zweidimensionale Modell wird zurzeit in ein 3-D-Modell umgewandelt. Dadurch kann die räumliche Ausbreitung der Risse besser simuliert werden, und entsprechend können die Resultate der Versuche, welche unter bestimmten Bedingungen stattfinden, besser interpretiert werden. Gn

electrosuisse VSE AES