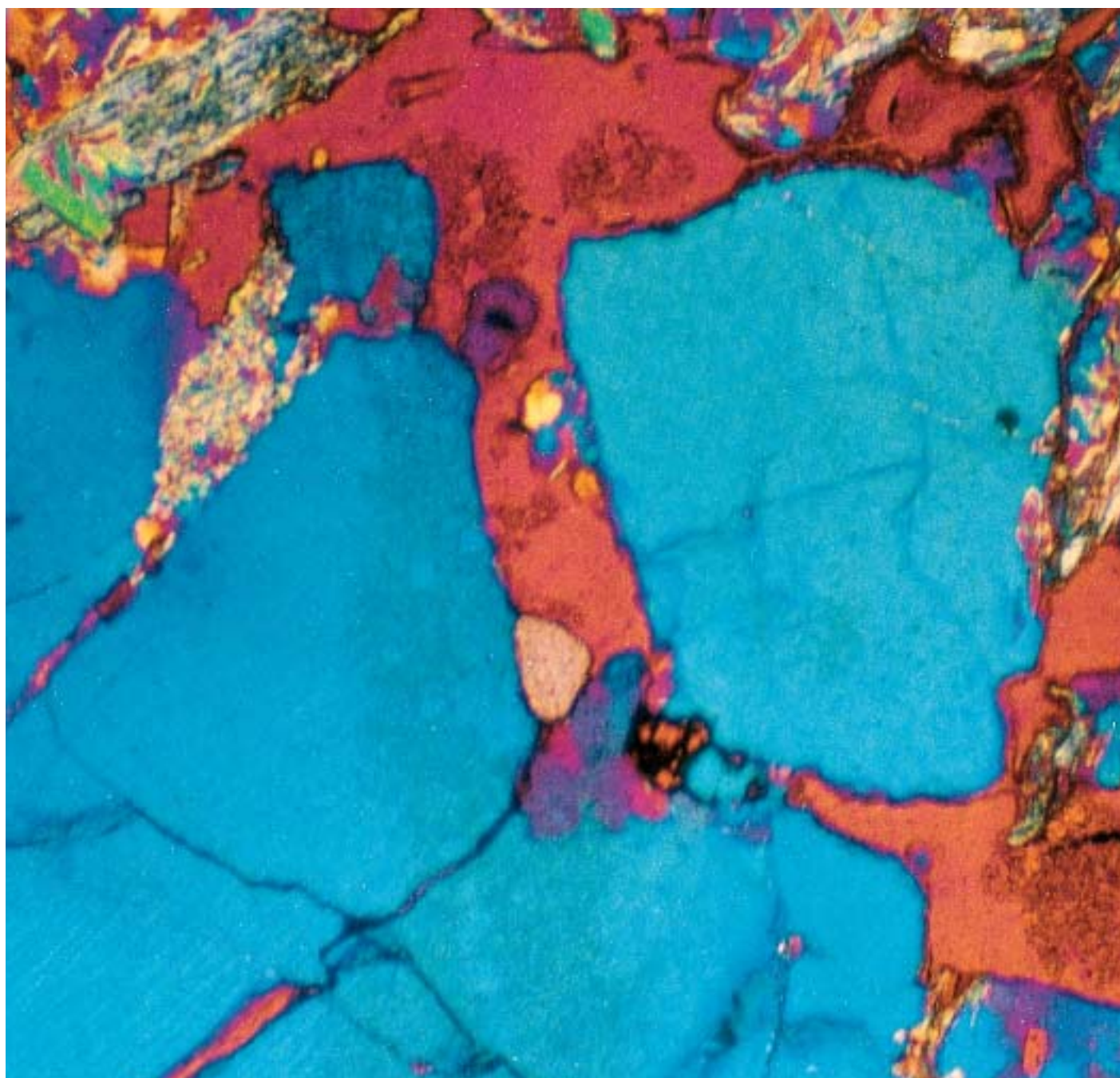


Réactions alcali-granulats (1^{ère} partie)

Granulats corrodés et fissurés par suite de réactions alcali-granulats (examen microscopique d'une lame mince sous lumière polarisée).



Réactions alcali-granulats (1^{ère} partie)

Lors des réactions alcali-granulats (RAG), la solution interstitielle d'un béton réagit avec les granulats, ce qui peut entraîner des gonflements et des fissures. Des mesures appropriées permettent d'éviter ces phénomènes.

Lors des réactions alcali-granulats (RAG), la solution interstitielle d'un béton réagit avec les granulats, ce qui peut entraîner des gonflements et des fissures. Des mesures appropriées permettent d'éviter ces phénomènes.

La première description de dégâts dus aux réactions alcali-granulats (RAG) a paru en 1940 aux USA. Depuis lors, des observations similaires ont été faites dans différentes régions, par exemple en Islande, au Danemark, en Angleterre, en France et en Allemagne. Ces dégâts ont été dans une large mesure épargnés à d'autres pays, dont la Suisse. Dans le présent article sur les RAG, l'accent est mis principalement sur les aspects généraux. Il sera traité dans un prochain numéro du «Bulletin du ciment» des possibilités d'éviter ces réactions.

Généralités

On distingue trois types de réactions alcali-granulats (RAG):

- les réactions alcali-silice
- les réactions alcali-silicate
- les réactions alcali-carbonate.

Les réactions alcali-silice et les réactions alcali-silicate sont assez semblables; elles diffèrent principalement par leurs vitesses: les réactions alcali-silice sont plus rapides. Les trois types de réactions ont en commun la réaction de la solution interstitielle d'un

béton avec certains granulats, laquelle engendre des gonflements qui peuvent entraîner des fissures. Dans ce qui suit, on entend par réactions alcali-granulats (RAG) aussi bien les réactions alcali-silice que les réactions alcali-silicate; il ne sera traité que ponctuellement des réactions alcali-carbonate, rarement observées. Les mécanismes de réaction possibles sont décrits dans l'encadré «Théorie concernant les RAG».

Facteurs d'influence pour les réactions alcali-granulats

De nombreux facteurs exercent de manière très diverse une influence sur les RAG. C'est pourquoi on ne connaît pas de solutions universellement applicables pour les éviter. Les conditions environnantes sont déterminantes pour que des RAG se produisent.

Sont en outre importantes:

- la teneur en granulats réactifs ainsi que le type et la taille de ces granulats
- la teneur en alcalins du béton et la composition de la solution interstitielle
- les propriétés du béton.

Conditions environnantes

Il faut surtout tenir compte de trois facteurs:

- Un *taux d'humidité* élevé du béton est une condition pour que des

RAG se produisent. Il permet la réaction et facilite le transport des alcalins vers les phases réactives. Les gonflements sont dus principalement à l'absorption d'eau dans les gels de silice.

- Une hausse de la température accélère considérablement la réaction. Lors d'essais en laboratoire, une hausse de la température de 10 à 40 °C a rendu les RAG au moins 20 fois plus rapides.
- Les charges alcalines externes dues aux eaux souterraines, aux eaux sulfatées et aux solutions issues des

A propos de cet article

Le présent article est basé sur l'essentiel sur les exposés ci-après, présentés lors du séminaire du TFB «AAR – eine Gefahr für die Dauerhaftigkeit unserer Betonbauten?» du 5 avril 2000 à Wildegg.

[1] «Alkaliaggregatreaktionen (AAR): materialtechnologischer Verlauf», exposé de Christine Merz, TFB Wildegg

[2] «Schäden infolge Alkaliaggregatreaktion», exposé de Cédric Thalmann, BIG, Wabern bei Bern.

[3] «Bestimmung der Alkaliaggregatgefährdung: vorhandene Methoden und ihre Aussagekraft, Stand der Forschung», exposé de Jean-Gabriel Hammerschlag, TFB Nyon

[4] «Alkaliaggregatreaktionen (AAR): Konsequenzen und Gegenmassnahmen in der Baupraxis, Gefahrenpotenzial für die Schweiz», exposé de Ernst Honegger, TFB Wildegg.

Des compléments provenant de la littérature spécialisée figurent dans la liste en page 6.

Théories concernant les RAG

Réactions alcali-silice et alcali-silicate

Bien qu'il existe de nombreuses publications sur le mécanisme de ces deux réactions, plusieurs points sont encore obscurs. Les phéno-

mènes décrits ici ne sont pas non plus complètement élucidés.

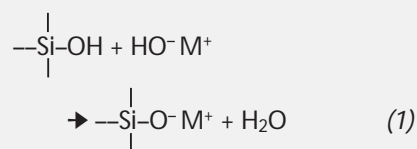
Les réactions alcali-silice se produisent en général dans un délai de l'ordre de quelques années, et les réactions alcali-silicate, le plus souvent seulement

quelques décennies après la fabrication du béton. Le mécanisme des deux réactions est à peu près semblable.

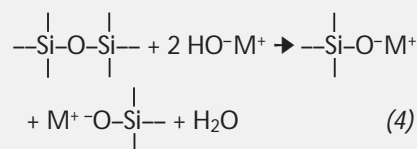
Leur vitesse différente s'explique par le fait que les roches et minéraux peuvent présenter des modifications de l'acide silicique diversement réactives.

On entend par acide silicique le SiO₂, dont le nom

correct est dioxyde de silicium. Bien cristallisé, le SiO₂ est dans une large mesure stable vis-à-vis des solutions d'hydroxyde. Les points d'attaque sont les groupes silanol à la surface de l'acide silicique, qui réagissent avec les hydroxydes alcalins de la solution interstitielle alcaline:



L'attaque sur les ponts siloxane (Si-O-Si) situés plus profondément a lieu ensuite:



De façon simplifiée, l'évolution de la réaction peut être détaillée comme suit [1, 5]:

- Concentration des alcalins dans la solution interstitielle lors de la progression de l'hydratation.
- Les ions OH⁻, Na⁺ und K⁺ migrent de l'eau interstitielle vers l'acide silicique réactif des granulats.
- Réaction des hydroxydes alcalins avec l'acide silicique réactif.







	Granulats avec acide silicique sensible aux alcalins
	Réaction superficielle avec les ions alcalins et calcium du ciment pour former du silicate de calcium hydraté alcalin non gonflant (membrane semi-perméable)
	Diffusion des ions alcalins et de l'eau à l'intérieur des granulats et réaction avec l'acide silicique sensible aux alcalins pour former du gel de silice alcalin
	Augmentation de la pression intérieure due à la poursuite de la réaction et à l'absorption d'eau
	Fissuration lorsque la résistance à la traction des granulats est dépassée; faible formation de gel
	Désagrégation des granulats depuis l'intérieur; forte formation de gel

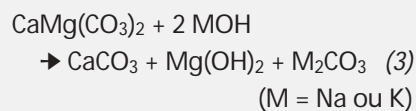
Fig. 1 Représentation schématique d'un mécanisme possible entraînant des dégâts lors de réactions alcali-silice, selon [5] (modifié).

- Formation d'un gel de silice alcalin susceptible de gonfler.
- Dans quelques cas, transformation du gel en silicate de calcium hydraté alcalin non gonflant, qui, sous forme de membrane ou couche semi-perméable sur la surface, laisse passer de préférence les ions Na^+ et K^+ ainsi que l'eau.
- Du gel de silice alcalin susceptible de gonfler se forme à l'intérieur des granulats.
- La poursuite de la réaction et l'absorption d'eau augmentent la pression intérieure.
- Fissuration et écoulement du gel lorsque la pression intérieure est supérieure à la résistance à la traction des granulats et de la pâte de ciment durcie.

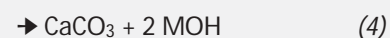
Les différents stades décrits ici sont également représentés schématiquement à la *figure 1*.

Réactions alcali-carbonate

Des réactions alcali-carbonate sont observées principalement avec des granulats composés de dolomite argileuse ainsi que de calcaires à grains fins avec inclusions de minéraux argileux. De façon simplifiée, les réactions chimiques peuvent être formulées comme suit:



(dolomite + hydroxyde alcalin
 → calcite + brucite + carbonate alcalin)
 $\text{M}_2\text{CO}_3 + \text{Ca}(\text{OH})_2$



Lors de la *réaction (3)*, il s'agit d'une dédolomitisation, liée à une diminution de volume. Des gonflements se produisent parce que lors de la transformation de la dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) en brucite ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), la porosité augmente. De l'humidité peut ainsi arriver jusqu'aux inclusions d'argile, lesquelles gonflent.

Les carbonates alcalins (M_2CO_3) libérés réagissent avec l'hydroxyde de calcium du ciment ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), ce qui libère des hydroxydes alcalins $\text{M}(\text{OH})$ [*équation 4*].

sels de déverglaçage, peuvent favoriser les RAG.

Granulats réactifs

Les principaux minéraux et roches réactifs figurent dans le *tableau 1*. Les granulats contenant de l'acide silicique amorphe ou semi-cristallin réagissent plus rapidement que les silicates cristallins. Les grains fissurés poreux ainsi que les grains concassés sont plus réactifs que les grains compacts non fissurés ou arrondis naturellement. Lorsqu'on augmente la teneur du béton en certains granulats réactifs, l'expansion due aux RAG n'augmente pas constamment, mais

elle passe par un maximum: effet de pessimum. Concrètement, cela signifie que la sensibilité aux RAG d'un béton peut augmenter lorsqu'on y ajoute des granulats inertes (exemple pour l'effet de pessimum de l'opale et du verre Duran: *figure 2*).

Teneur en alcalins et composition de la solution interstitielle

Les composants suivants contribuent à la teneur en alcalins:

● Ciment

Le ciment est normalement le principal fournisseur d'alcalins. Les alcalins, avec les sulfates, exercent une influence sur le raidissement et le

durcissement du ciment. C'est pourquoi on ne peut pas en réduire la quantité de façon inconsidérée. La teneur en alcalins totale d'un ciment dépend des matières premières et des conditions de fabrication. Les clinkers suisses contiennent en moyenne environ 0,7–0,9 % (de la masse) de Na_2O équivalent. (% Na_2O équivalent

$$= \% \text{Na}_2\text{O} + \% \text{K}_2\text{O} \times 0,658).$$

La teneur en alcalins de la solution interstitielle exerce une influence sur la teneur en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et sur la solubilité de l'acide silicique.

● Granulats

Certains verres volcaniques, feld

Familles de roches	Roches dans lesquelles des phases minérales réactives peuvent se produire	Phases minérales réactives	Type de réaction
Roches cristallines	Granites, granodiorites, diorites, etc.	● Quartz microfibreux, poreux	alcali-silicate
Roches volcaniques	Rhyolites, dacites, andésites, basaltes, obsidiennes, tufs	● Formes de quartz instables à hautes températures: tridymite, cristobalite ● Acide silicique cryptocristallin: calcédoine ● Acide silicique hydratisé, amorphe: opale	alcali-silice alcali-silice alcali-silice
Roches métamorphiques	Gneiss, schistes, mylonites, quartzites, cornéennes	● Quartz fissurés, déformés ● Feldspaths altérés, poreux, déformés ● Micas en fins cristaux ● Quartz crypto- et microcristallins	alcali-silicate alcali-silicate alcali-silicate alcali-silice
Roches sédimentaires	Grès, grauwackes, siltites, silex, calcaires siliceux	● Feldspaths altérés, poreux, déformés ● Argiles en fin cristaux, micas ● Quartz crypto- et microcristallins ● Acide silicique cryptocristallin: calcédoine ● Acide silicique hydratisé, amorphe: opale	alcali-silicate alcali-silicate alcali-silice alcali-silice alcali-silice

Tab. 1 Les principaux minéraux et roches réactifs.

spaths et éventuellement micas peuvent fournir des alcalins; les graves non lavées, extraites de la mer, peuvent aussi en contenir.

- Ajouts
Les laitiers et les cendres volantes contiennent moins d'alcalins actifs que les ciments.
- Adjuvants
La participation active d'alcalins contenus dans certains adjuvants et leur influence sur la composition de l'eau interstitielle n'ont encore été que peu étudiées.
- Eau de gâchage
généralement sans apports significatifs en Suisse
- De l'extérieur
Solutions issues des sels de déver

glaçage, eaux souterraines et eau de mer.

Concernant la teneur admissible en alcalins, on ne dispose pas de valeurs limites uniformément valables pour la prévention de RAG. A l'étranger, 2–5 kg de Na₂O équivalent par m³ de béton sont usuels, en fonction des granulats et de la composition des ciments.

Ajouts

La fumée de silice réduit la teneur en alcalins des solutions interstitielles. Elle abaisse en outre la valeur du pH, ce qui, en cas de dosage trop élevé, peut entraîner un plus grand risque de corrosion pour l'armature. La fumée de silice se compose de

SiO₂ amorphe, qui peut donner lieu à des RAG.

Mais comme à de faibles dosages, ces très fines particules réagissent en règle générale déjà avant le durcissement du béton, il n'y a en l'occurrence pas de danger, à condition toutefois qu'il ne se soit pas formé d'agglomérats [6].

Les cendres volantes et les laitiers sont certes alcalins, mais en comparaison des ciments Portland, ils fixent proportionnellement davantage d'alcalins dans les produits d'hydratation.

Propriétés du béton

Souvent, les changements de formulation ont des effets aussi bien positifs que négatifs sur le comportement aux RAG des bétons. Une structure dense du béton ralentit par exemple la diffusion des alcalins vers les granulats réactifs; l'apport d'humidité de l'extérieur diminue. Mais une structure dense peut également conduire à de fortes concentrations locales d'alcalins dans la solu-

BIBLIOGRAPHIE

- [1]–[4]: voir encadré « A propos de cet article » en page 3.
 [5] Sprung, S., und Sylla, H.-M., «Ablauf der Alkali/Kieselsäure-Reaktion im Beton bei unterschiedlichen Zuschlaggesteinen», Zement-Kalk-Gips 51 [6], 334–345 (1998).

- [6] Diamond, S., «Alkali silica reactions – some paradoxes», Cement & Concrete Composites 19 [5/6], 391–401 (1997).

tion interstitielle, lesquelles peuvent déclencher les RAG. Plus le béton est dense, moins il y a d'espace interstitiel à disposition pour absorber le gel de silice. Il peut en résulter de plus grands dégâts dus aux RAG. Le module d'élasticité plus élevé du béton plus dense peut en revanche avoir des conséquences favorables sur la grandeur et la répartition des fissures.

Les RAG en Suisse

Excepté dans les milieux scientifiques, les RAG n'ont pendant longtemps pas prêté à discussion en Suisse. Cela principalement parce qu'autrefois, on utilisait assez rarement des bétons

avec des dosages en ciment très élevés, et peu de granulats concassés. Cependant, pour les ouvrages importants où les éléments en béton sont exposés à des conditions environnementales défavorables, il convient de prendre les mesures nécessaires pour empêcher les réactions chimiques indésirables. En 1966 déjà, pour la construction du barrage de Hongrin, on a par exemple remplacé 30 % du ciment Portland par des pouzzolanes naturelles (diminution de la teneur en alcalins actifs).

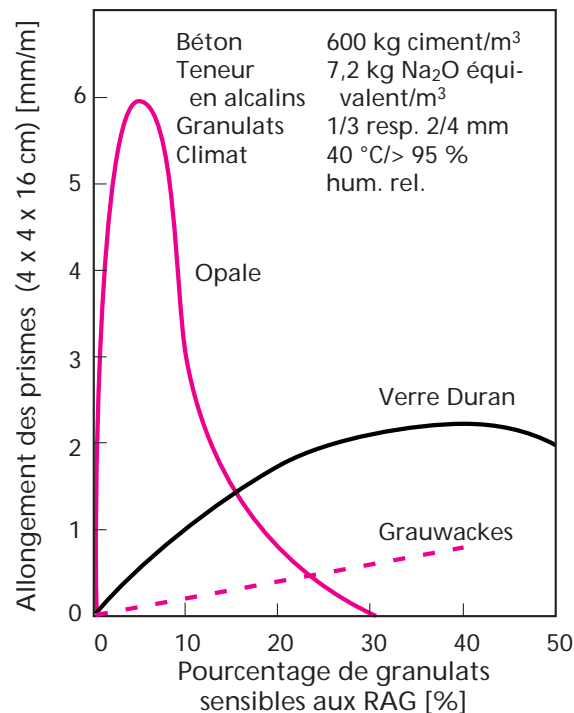


Fig. 2 Influence de la quantité de granulats sur l'allongement des prismes de béton avec différents granulats (opale et verre Duran: à effet de pessimum) selon [5].

Des dosages en ciment de plus en plus élevé (p. ex. pour le béton projeté), ainsi que l'utilisation de plus en plus fréquente de matériaux d'excavation provenant du percement de tunnels, ont fait que depuis quelques années, les dangers des RAG ont dû être pris plus au sérieux en Suisse, particulièrement pour les ouvrages importants soumis à des conditions de service sortant de l'ordinaire, tels que les tunnels des transversales alpines. Il n'y a toutefois pas lieu de s'alarmer, car en Suisse, les dégâts dus aux RAG sont rares et se développent le plus souvent lentement. Ils n'ont été observés que régionalement et de façon limitée, et des mesures préventives appropriées permettront de les maintenir dans des limites tolérables. Cela n'est cependant possible qu'au moyen d'analyses et de mesures spécifiques.

Jean-Gabriel Hammerschlag
TFB Nyon
et Christine Merz, TFB Wildegg



Dégâts dus aux RAG dans un mur de soutènement non armé.

Photo: Fritz Hunkeler, TFB