

Zeitschrift: Bulletin du ciment
Herausgeber: Service de Recherches et Conseils Techniques de l'Industrie Suisse du Ciment (TFB AG)
Band: 69 (2001)
Heft: 10

Artikel: Dégâts du béton dus aux sulfates origine et prévention
Autor: Hermann, Kurt
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-146564>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 01.04.2025

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

Dégâts du béton dus aux sulfates: origine et prévention

L'agression des bétons par des sulfates résulte d'une synergie complexe de processus chimiques et physiques; elle ne peut pas être caractérisée par un seul mécanisme [1].

La résistance aux sulfates des bétons est un thème ancien. Il a toutefois beaucoup gagné en importance avec la construction des tunnels dans le cadre d'AlpTransit.

Ce qui figure dans les normes

Lors de discussions concernant la résistance aux sulfates des bétons, on se référait autrefois en Suisse, faute de propres normes, à la norme allemande DIN 4030 [2]. Mais avec l'introduction dès le 1^{er} janvier 2003 de la norme EN 206-1 déjà approuvée, on disposera également en Suisse de règles valables.

Dans la norme EN 206-1 [3], les conditions environnementales sont exprimées sous forme de classes d'exposition. Selon leur teneur en sulfates, les sols naturels et les eaux souterraines entrent dans les classes d'exposition XA1, XA2 ou XA3. Les classes d'exposition comprennent certaines valeurs limites recommandées. Une sélection de ces valeurs figure dans le *tableau 1*.

On sait par expérience que les bétons témoignent d'une résistance aux sulfates suffisante lorsqu'ils répondent aux exigences suivantes:

- béton compact (rapport e/c < 0,50) pour XA1
- béton compact (rapport e/c < 0,50) ainsi que ciment à haute résistance aux sulfates pour XA2
- béton avec rapport e/c de < 0,40 ainsi que ciment à haute résistance aux sulfates pour XA3; une protection extérieure du béton est en outre parfois nécessaire.

Selon la préface nationale pour la norme SN EN 197-1 (2000) qui entrera en vigueur le 1^{er} janvier 2002, les ciments suivants sont considérés comme résistants aux sulfates:

- CEM I avec maximum 3 % de la masse de C₃A (aluminat tricalcique, 3 CaO · Al₂O₃).
- CEM II B et CEM III C.

Sources de sulfate

Les sulfates peuvent se trouver dans les eaux souterraines sous forme de sulfate de sodium, de potassium, de

magnésium ou de calcium. Le lisier et les eaux usées industrielles sont d'autres sources de sulfates.

Les eaux interstitielles contiennent des quantités de sulfate très diverses, selon les zones d'orogénèse traversées. On a ainsi trouvé dans deux zones de la partie nord du tunnel de la Vereina (zone d'écaillés d'Arosa, nappe de Schaffläger) des eaux avec parfois des concentrations de sulfate élevées (> 1550 mg/l, env. 800 mg/l), alors que dans la partie sud, on a mesuré des teneurs en sulfate inférieures à 50 mg/l [4].

Origine des dégâts dus aux sulfates

L'origine des dégâts dus aux sulfates prête à controverse depuis de nombreuses années. Il y a les faits, et également de nombreuses spéculations. On peut en principe faire la distinction entre

- agressions externes par des sulfates pénétrant depuis les sols naturels et les eaux souterraines et

	XA1	XA2	XA3
Environnement	Environnement faiblement agressif chimiquement	Environnement modérément agressif chimiquement	Environnement fortement agressif chimiquement
SO ₄ ²⁻ dans eaux souterraines	≥ 200 et < 600 mg/l	≥ 600 et < 3000 mg/l	≥ 3000 et < 6000 mg/l
SO ₄ ²⁻ dans sol naturel	≥ 2000 mg/kg et < 3000 mg/kg	≥ 3000 mg/kg et < 12 000 mg/kg	≥ 12 000 mg/kg et < 24 000 mg/kg

Tab. 1 Valeurs limites recommandées pour les classes d'exposition en cas d'agression par les sulfates provenant du sol naturel ou des eaux souterraines selon la future EN-206-1:2000 (simplifié) [3].

- agressions internes par la formation d'ettringite différée (delayed ettringite formation).

Dans ce qui suit, il sera traité surtout des agressions externes par les sulfates. Les dégâts en résultant peuvent être dus à la formation de matières expansives (ettringite, gypse, voir encadré à droite) ou à la dissolution du gel CSH, le principal composant de la pâte de ciment durcie. Les dégâts dus aux sulfates n'ont toutefois que rarement une seule cause. Le plus souvent, divers mécanismes de transport et réactions chimiques se développent en parallèle et s'influencent mutuellement. En dehors des sulfates, d'autres composés peuvent influencer le processus des différentes réactions. Ce qui est établi est que l'ettringite occupe un espace beaucoup plus grand que les produits de départ. Si le volume des pores n'est pas suffisant pour l'expansion de l'ettringite, il se forme dans le mortier ou le béton une pression qui peut altérer la structure. Il faut toutefois retenir que l'ettringite dans une fissure peut aussi bien être la cause de la fissuration que s'être formée après la fissure.

Le rôle du C₃A

Moins un ciment contient de C₃A, plus il est en règle générale résistant aux sulfates. Pour régler leur com-

portement à la prise, on ajoute aux ciments du gypse (3) à raison de quelques pour cent de la masse. Lors de la fabrication du béton frais, le C₃A contenu dans le ciment réagit avec ce gypse ainsi qu'avec l'hydroxyde de calcium immédiatement après l'adjonction d'eau. Il se forme alors de l'ettringite, qui n'est cependant pas nuisible pour le béton durci, car

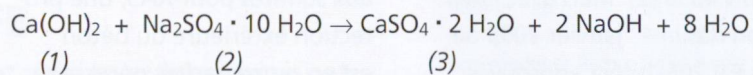
d'une part, la pâte de ciment n'a pas encore entièrement durci, et d'autre part, lorsque tout le gypse a réagi, l'ettringite est transformée en d'autres composés moins expansifs [5]. Le C₃A fixe également les ions de chlorure; c'est pourquoi une faible teneur en C₃A équivaut à une plus faible résistance à la pénétration de chlorures [6].

Un peu de chimie [6]

Les réactions chimiques qui se produisent lors de l'agression des bétons par les sulfates sont très complexes, car plusieurs combinaisons, soit cations et anions, peuvent y participer. Selon la source des sulfates et leur concentration, ainsi que selon la valeur pH, les produits primaires de ces réactions sont soit le gypse (3), soit l'ettringite (5).

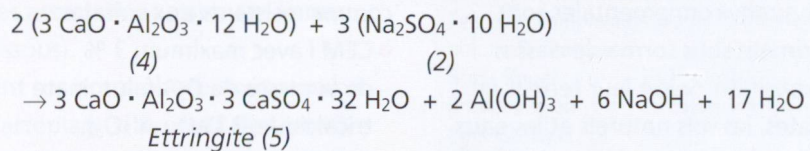
Les équations ci-après ne servent qu'à illustrer diverses réactions qui peuvent se produire lors d'une agression par les sulfates.

- En cas d'agression de sulfate de sodium (2) sur l'hydroxyde de calcium (1), il se forme du gypse (3):



Dans l'eau courante, le Ca(OH)₂ peut être entièrement lessivé. Avec de l'eau stagnante, un équilibre s'établit.

- Agression de sulfate de sodium (2) ou de sulfate de calcium sur des aluminates de calcium hydratés (4) avec formation d'ettringite (5):



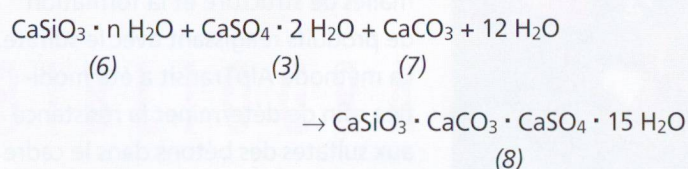
La formation d'ettringite est liée à une forte augmentation de volume. Le gypse (3) peut également avoir une action expansive.

Formation de thaumasite

Depuis environ 1980, des dégâts dus aux sulfates par suite de la formation de thaumasite (8) sont également signalés [7]. Les conditions de la formation de thaumasite (8) sont:

- source de sulfate externe
- température de < 15 °C (plage de température la plus favorable: 0–5 °C)
- ions de carbonate (CO_3^{2-}) ou dioxyde de carbone (CO_2)
- beaucoup d'humidité.

La réaction entre silicates hydratés (6) et gypse (3) en tant que source de sulfate peut être formulée comme suit [8]:



La thaumasite se présente normalement sous forme de poudre incolore pâteuse sans propriétés liantes. Elle peut se former à partir de l'ettringite ainsi qu'à partir de toutes les phases importantes du ciment. Sa principale action nocive est la destruction de la pâte de ciment durcie, c'est-à-dire des composants liants de cette pâte de ciment [7].

Des dégâts dus à la thaumasite sont signalés en Grande-Bretagne surtout [7]. Mais on en a également observés en Suisse, par exemple dans le tunnel de base du Hauenstein [8].

Ajouts et agents de mouture [10]

L'adjonction de fumée de silice a généralement un effet positif sur la résistance aux sulfates des bétons. D'une part, il est ainsi possible de réduire la quantité de ciment (et donc la quantité de composés qui peuvent réagir avec les ions de sulfates), et d'autre part, s'il est correctement mis en œuvre, le béton devient plus com-

act que sans fumée de silice.

Les ciments de haut fourneau admis en Allemagne avec plus de 65 % de laitier (CEM III B ou C) témoignent d'une résistance aux sulfates élevée. L'adjonction de cendres volantes de houille à différents ciments a également un effet positif sur la résistance aux sulfates.

Ces ajouts ont parfois besoin de plu-

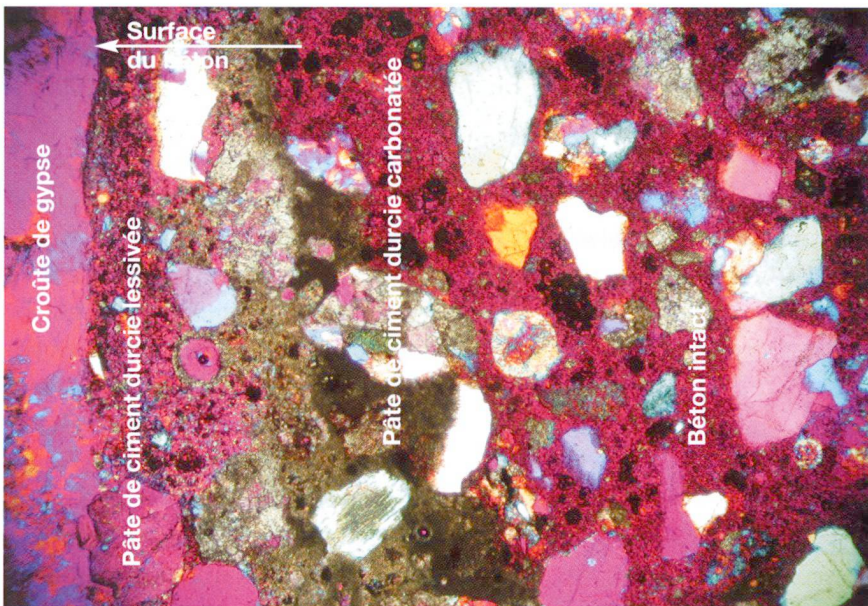
sieurs jours ou semaines pour devenir efficaces (compaction de la structure).

Formation d'ettringite différée

Lors de formation différée, l'ettringite apparaît dans des cavités et fissures et dans les zones de contact entre granulats et pâte de ciment durcie, sans qu'il y ait d'agression externe par les sulfates. Ce phénomène est observé surtout – mais pas exclusivement – dans les éléments en béton traités thermiquement, lesquels deviennent fréquemment humides [5]. Il est particulièrement critique que la température soit trop élevée (> 80 °C) lors du traitement thermique.

Corrosion due à l'acide sulfurique biogène

Cet article serait incomplet si la corrosion due à l'acide sulfurique biogène n'y était pas mentionnée. Ce genre de dégâts est observé par exemple dans les conduites d'eaux usées et les constructions couvrant les bassins de décantation secondaire des stations d'épuration. De façon simplifiée, ce phénomène peut être expliqué comme suit: En l'absence d'oxygène, des bactéries appelées thiobacilles transforment en acide sulfurique (H_2SO_4) l'hydrogène sulfuré résultant de la putréfaction [6].



Action des sulfates sur la pâte de ciment durcie d'une paroi de canalisation (lame mince, lumière polarisée plus lame de gypse, largeur de la coupe 2,4 mm).

Photo: Christine Merz, TFB

La réaction de l'acide sulfurique avec la pâte de ciment durcie entraîne diverses autres réactions. Du gypse se forme par exemple à la surface du béton, et la pâte de ciment durcie s'en trouve altérée. La formation d'ettringite à l'intérieur du béton est également possible, car des ions de sulfate se forment à partir des molécules de l'acide sulfurique.

Calcul de la résistance aux sulfates

Pour déterminer la résistance aux sulfates des bétons selon la méthode d'AlpTransit, également utilisée par

le TFB, huit carottes ($\varnothing = 50$ mm, $l = 150$ mm) sont nécessaires. Quatre carottes sont conservées dans une solution aqueuse de sulfate de sodium à 10 %, et les quatre autres dans de l'eau. Les mesures de référence (longueur, module d'élasticité dynamique) s'effectuent sept jours après la confection des éprouvettes. Les mesures sont répétées pendant deux ans à intervalles définis.

Les échantillons d'un béton résistant aux sulfates conservés dans la solution de sulfate de sodium doivent, en plus de répondre à d'autres exigences, remplir les conditions suivant

tes par comparaison aux échantillons conservés dans l'eau [12]:

- allongement de maximum 0,5% supérieur
- module d'élasticité dynamique au maximum 50 % plus bas.

Les échantillons sont en outre évalués visuellement (apparition de fissures, éclatements, déformations ou désagréments), et des lames minces sont examinées pour détecter les anomalies de structure et la formation de produits réagissant avec le sulfate. La méthode AlpTransit a été modifiée afin de déterminer la résistance aux sulfates des bétons dans le cadre de l'assurance de la qualité pendant les travaux. Avec ce procédé accéléré, l'essai ne dure plus que 28 jours [12]. Bien que ces essais soient en eux-mêmes très utiles, leur valeur n'est pas incontestée. Le principal argument avancé est que leur fiabilité ne peut pas être évaluée clairement, car souvent, les dégâts des ouvrages dus aux sulfates ne deviennent apparents qu'après plusieurs années.

Protection contre les dégâts dus aux sulfates

Il est possible d'empêcher les dégâts du béton dus aux sulfates, si l'on fait usage des connaissances à disposition. En font partie [1, 10]:

- formulation correcte, par exemple – bas rapport e/c

- ciment approprié
- év. ajouts appropriés
- bétons axés sur la stabilité de longue durée et non sur la résistance à la compression

ainsi que

- mise en œuvre correcte du béton frais, c'est-à-dire entre autres
 - bon malaxage (béton homogène)
 - bon compactage, afin d'obtenir une matrice dense

- bon traitement de cure, afin d'obtenir une structure compacte de la couche supérieure du béton

ainsi que

- réduction à un minimum de la possibilité de pénétration d'eaux souterraines et d'autres vecteurs de ions agressifs dans le corps de l'ouvrage, par exemple au moyen d'étanchéités ou d'enduits

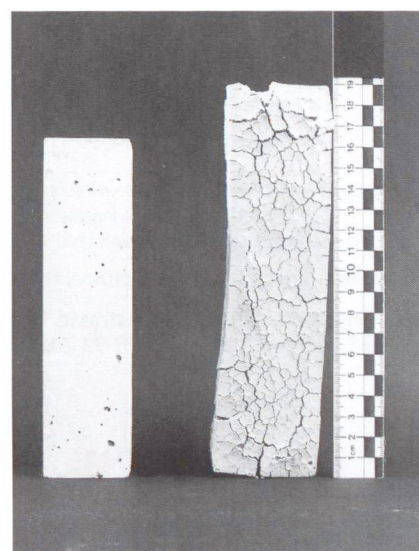
ainsi que

- entretien régulier de l'ouvrage et remise en état faite assez tôt.

Kurt Hermann, TFB

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Skalny, J., et Pierce, J. S., «Sulfate attack issues: an overview», in Marchand, J. and Skalny, J.P. (Ed.), «Materials science of concrete: sulfate attack mechanism», The American Ceramic Society, Westerville, Ohio, 371 pages (1999).
- [2] DIN 4030, partie 1: «Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase; Grundlagen und Grenzwerte» (édition 1991).
- [3] EN-206-1: «Béton – partie 1: Spécification, performances, production et conformité (projet définitif approuvé de janvier 2000).
- [4] Wetzig, V., «Tunnelwasser und Chemie», Schweizer Ingenieur und Architekt **114** [29], 630–631 (1996).
- [5] Stark, J., et Bollmann, K., «Späte Ettringitbildung im Beton», Zement – Kalk – Gips **53** [4], 232–240 et **53** [5], 298–308 (2000).
- [6] Neville, A. M., «Properties of concrete», fourth and final edition, Longman, Essex (1999).
- [7] Bensted, J., «Mechanism of thaumasite sulphate attack in cements, mortars and concretes», Zement – Kalk – Gips International **53** [12], 704–709 (2000).
- [8] Le Roux, A., et Orsetti, S., «Les réactions sulfatiques: conditions de formation, structure et expansions des minéraux secondaires sulfatés», Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées **225**, 41–50 (2000).
- [9] Schmid, L. R., «Tunnelbauten im Angriff aggressiver Bergwässer», Schweizer Ingenieur und Architekt **113** [44], 1012–1018 (1995).
- [10] Jacobs, F., «Sulfatwiderstand von Zement und Beton», document interne du TFB, Wildegg (1998).
- [11] Jentzsch, K., et Wigger, H., «Biologisch induzierte Betonkorrosion in ARA», Schweizer Ingenieur und Architekt **113** [10], 256–258 (1995).
- [12] Catalogue des prestations du TFB pour 2002 (en préparation).



Résistance aux sulfates de prismes de mortier en ciment Portland à haute résistance aux sulfates (à gauche) ou en ciment Portland (à droite): après une conservation de longue durée dans une solution à haute teneur en sulfate, des dégâts ne se produisent que sur le prisme en ciment Portland.

Photo: archives du TFB

Mots-clés

Aluminate tricalcique, C_3A , corrosion due à l'acide sulfurique, dégâts dus aux sulfates, EN-206, ettringite, gypse, thaumasite.