

Zeitschrift: Bulletin du ciment
Herausgeber: Service de Recherches et Conseils Techniques de l'Industrie Suisse du Ciment (TFB AG)
Band: 60-61 (1992-1993)
Heft: 4

Artikel: Dégâts du béton dus à l'agression des ions de sulfate
Autor: Hermann, Kurt
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-146299>

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: 22.01.2025

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

BULLETIN DU CIMENT

AVRIL 1992

60e ANNEE

NUMERO 4

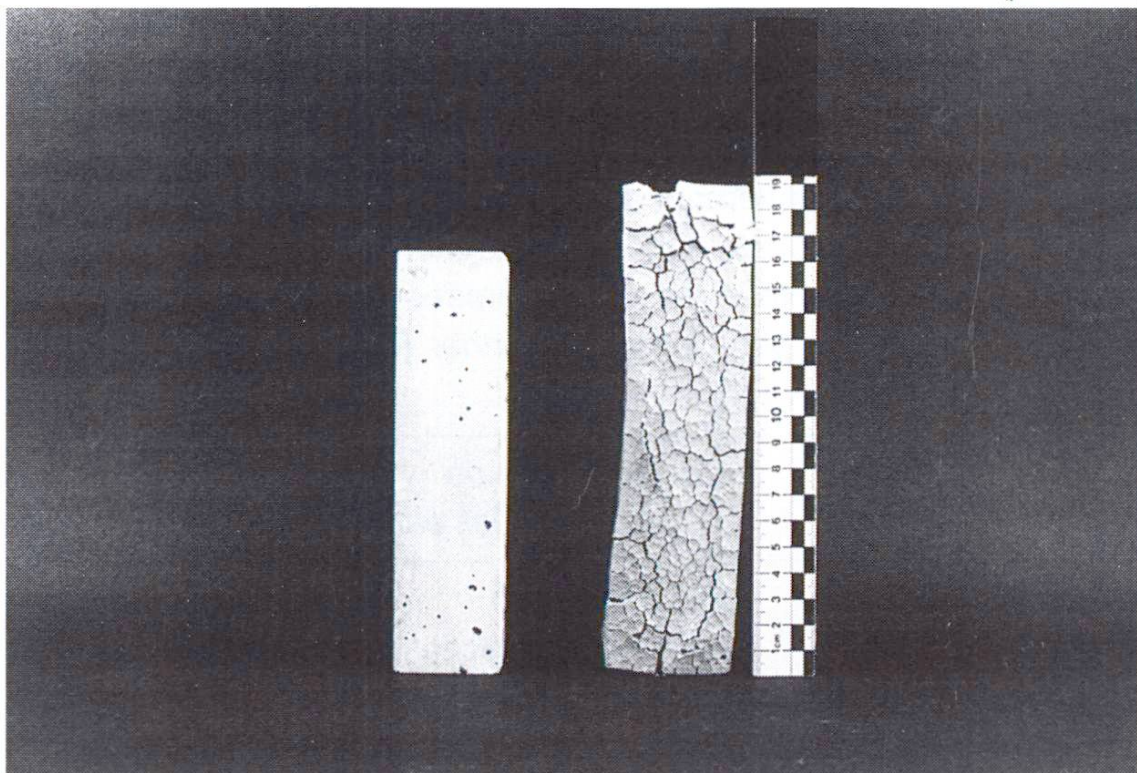
Dégâts du béton dus à l'agression des ions de sulfate

Béton attaqué par les sulfates: causes, effets, mesures défensives. Ciments Portland à haute résistance aux sulfates.

Le ciment Portland à haute résistance aux sulfates (CPHS) a été le sujet d'articles publiés dans le «Bulletin du ciment» en 1958 [1] et 1978 [2] déjà. Depuis lors, il a été traité dans plusieurs publications du mécanisme selon lequel les sulfates attaquent le ciment Portland (CP). Mais les nombreuses études nouvellement faites sur les

Prismes de mortier en CPHS (à gauche) et CP (à droite) après entreposage prolongé dans une solution à haute teneur en sulfates: seul le prisme en CP présente un gonflement dû aux sulfates.

(photo: TFB)



2 mesures pour empêcher la dégradation des ouvrages en milieu comportant des sulfates, ainsi que le lancement d'un nouveau ciment Portland à haute résistance et à résistance accrue aux sulfates (CPHS-HR), justifient que ce thème soit repris et traité dans un contexte un peu plus vaste. Les efflorescences constatées récemment dans le tube ouest du tunnel du Bözberg – dues à l'eau de montagne dont la forte teneur en chlorures et sulfates engendre des composés expansifs – lui donnent d'ailleurs plus d'actualité encore [3].

Dégâts par gonflement dû aux sulfates

Dans la nature, on trouve les sulfates sous forme solide (gypse, anhydrite, ettringite), ou dissous dans les précipitations, dans les eaux de surface et les eaux souterraines, ainsi que dans le sol. Leurs concentrations diffèrent fortement. On a mesuré par exemple dans l'eau de la mer du Nord quelque 2800 mg/l de sulfates, et les eaux minérales peuvent en contenir parfois plus de 1500 mg/l. En Suisse, il faut surtout s'attendre à des dégâts causés par les eaux qui traversent des couches très gypseuses, s'enrichissant ainsi de ions de sulfate. Lors des sondages effectués pour le tunnel du Mont Terri de la N 16 par exemple, on a rencontré une concentration de sulfates supérieure à 1200 mg/l [4].

Des dégâts du béton dus à l'agression de ions de sulfate dissous dans l'eau ont été observés voici plus de 100 ans déjà, en particulier par *Michaelis* [5]. Selon la force de l'agression, ils se manifestent sous forme de

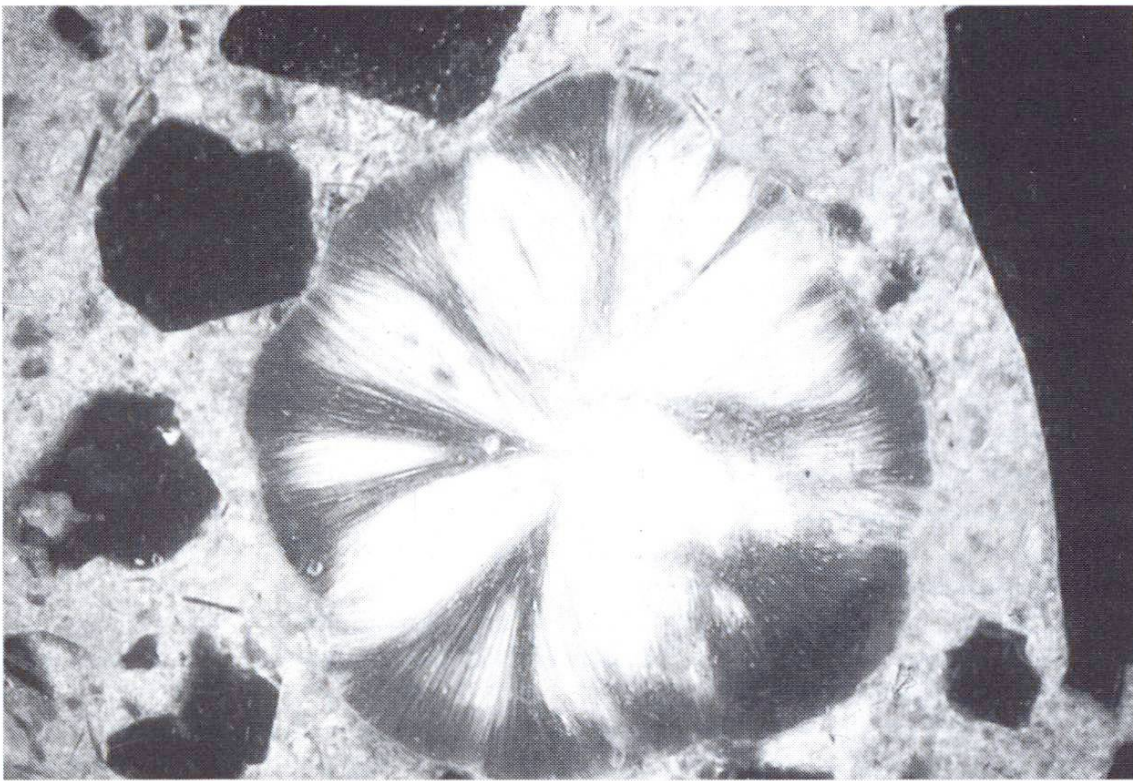
- déformations (expansions ou autres),
- fissures,
- éclatements.

L'ampleur d'une agression par les sulfates dépend beaucoup de leur concentration (*tableau 1*).

Les causes de ce gonflement dû aux sulfates sont encore loin d'être complètement élucidées. On pourrait citer plusieurs publications dans lesquelles des théories controversées ont été exposées. Les indications données par *Cohen* et *Mather* [6] – qui ont également

Degré d'agressivité	Concentration de sulfates dans les eaux	Concentration de sulfates dans le sol
faiblement agressif	200 à 600 mg/l	2000 à 5000 mg/kg
fortement agressif	600 à 3000 mg/l	plus de 5000 mg/kg
très fortement agressif	plus de 3000 mg/l	–

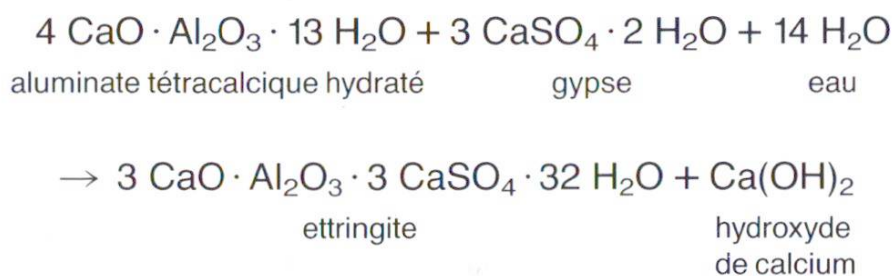
Tab. 1. Force de l'agression par les sulfates en fonction de leur concentration, selon DIN 4030.



Pores remplis d'ettringite dans de la pâte de ciment durcie carbonatée (prise de vue sous lumière fluorescente, coupe 0,72 × 1,08 mm).
(photo: TFB, Vernier)

traité d'un point de vue critique les possibilités existantes pour définir la résistance aux sulfates du béton – peuvent servir de source d'information.

On peut tenir pour certain que la formation d'ettringite, provenant des aluminates hydratés engendrés par l'hydratation de l'aluminate tricalcique (C_3A , $3 CaO \cdot Al_2O_3$), est souvent la principale responsable de l'effet destructeur. L'agression par le gypse dissous dans l'eau peut être formulée de la manière simplifiée suivante:



La formation d'ettringite, un minéral qui compte parmi les plus aquifères, est liée à une augmentation de huit fois le volume initial. Les cristaux en aiguilles croissent dans les pores. Dès qu'ils manquent de place pour croître librement, une pression se produit, qui entraîne l'expansion et, finalement, l'éclatement de la structure du béton. Il faut en outre considérer que, dans le béton, les ions de sulfate peuvent réagir à l'hydroxyde de calcium, ce qui conduit à la formation de sulfate de calcium bihydraté, c'est-à-dire de gypse. Cette réaction également est parfois liée à une telle augmentation de volume que la pâte de ciment durcie éclate [7].

- 4 Depuis quelques années, on observe des dégâts dus à la formation de thaumasite. Il s'agit d'un composé dont on a par exemple clairement démontré la présence – en combinaison avec de l'ettringite – dans la masse plastique pâteuse d'un échantillon de béton projeté provenant du tunnel de Dettenberg [8]. Sa formule est:



La thaumasite, à laquelle on impute également une action nocive sur le béton, est, comme l'ettringite, un minéral de faible densité. Le mécanisme de sa formation est encore obscur.

Ciment Portland à haute résistance aux sulfates

Il est certain que la formation d'ettringite, et donc le gonflement dû aux sulfates, peuvent être jugulés, ou en tout cas fortement ralentis par un ciment d'une teneur en C_3A aussi faible que possible. Le ciment Portland à haute résistance aux sulfates (CPHS) est produit en Suisse depuis 1958. Les noms de marque sous lesquels il est commercialisé sont Sulfacem (Portlandcementwerk AG Olten, Olten) et Sulfix (SCB Société des Ciments et Bétons, Eclépens). Le CPHS est de teinte un peu plus foncée que le ciment Portland (CP), mais le comportement des deux sortes est pareil. Le CPHS peut être mélangé au CP, mais il perd alors sa propriété particulière, c'est-à-dire sa haute résistance aux sulfates.

Dans la norme SIA 215, il est stipulé que le CPHS peut contenir au maximum 3 % de C_3A ; la teneur en C_3A du CP et du ciment Portland

Destruction du béton due à la formation de thaumasite, dans les galeries du Rothorn du gazoduc Hollande–Italie. (photo: TFB)



5 à haute résistance (CPHR) est de 7 à 12 %. Cela mis à part, les caractéristiques de qualité prescrites sont les mêmes pour le CP et le CPHS.

Dans des conditions défavorables, des concentrations de sulfates de 200 mg/l déjà exercent une action destructrice sur le béton. L'utilisation de CPHS est conseillée lorsqu'il faut s'attendre à des concentrations de ions de sulfate de 400 mg/l ou plus. (La détermination de la teneur en sulfates est effectuée par le TFB, les laboratoires cantonaux ou d'autres laboratoires d'analyse.)

Lorsque l'on construit des ouvrages en milieu comportant des sulfates, il ne suffit pas de remplacer le CP par du CPHS. Toutes les mesures améliorant les propriétés du béton sont utiles.

- Un dosage élevé en ciment, par exemple 300–350 kg/m³, permet d'obtenir une structure d'une grande compacité.
- Le béton au CPHS devant être étanche, le facteur e/c doit être de $\leq 0,50$.
- Des adjuvants tels que fluidifiant et entraîneur d'air sont également utiles. Ils permettent une bonne ouvrabilité et diminuent la perméabilité.
- Le béton mis en place dans le coffrage doit être compacté le mieux possible.
- Un traitement de cure soigné est également indispensable.

Il faut en outre considérer que le dégagement de chaleur du béton au CPHS est au cours des premiers jours plus faible que celui du béton au CP (prise plus lente). Le délai pour le décoffrage doit donc être prévu plus long qu'avec le CP, particulièrement en cas de basses températures.

Avec le béton projeté, il ne suffit pas d'utiliser du CPHS pour obtenir un béton résistant aux sulfates. La plupart des accélérateurs de prise utilisés sont des aluminates qui, par réaction au ciment, peuvent donner naissance à des aluminates de calcium hydratés, dont on veut justement empêcher la formation grâce à la faible teneur en C₃A du ciment. Selon *Lukas* [9], le produit de la teneur en Al₂O₃ de l'accélérateur de prise et de son dosage doit être de $< 0,6\%$ si le ciment contient $< 1\%$ de C₃A. Il faut également retenir qu'en augmentant autant que possible la densité du ciment – par l'adjonction de microsilice par exemple –, on augmente la résistance aux sulfates du béton.

Sulfacem Spécial et Sulfix-HR, des ciments Portland à haute résistance et à résistance accrue aux sulfates (CPHS-HR), sont sur le marché depuis 1990. Ils se distinguent des CPHS par une plus grande finesse de mouture (valeurs selon Blaine $> 4000\text{ cm}^2/\text{g}$). Les caractéristiques de qualité applicables sont celles figurant dans la norme SIA 215 pour les CPHR.

6 Aussi bien pour le tunnel du Bözberg de la N 3 [10] que pour celui du Mont Russelin de la N 16 [11], on a décidé d'utiliser – au moins partiellement – du CPHS-HR pour la fabrication des tubbings. Ces derniers exigent en effet un béton atteignant relativement rapidement une résistance initiale élevée, ce que ne permet pas le CPHS. Selon *Brugger* [10], on pouvait atteindre pour les tubbings en béton armé durcis à la vapeur, composés de béton B 45/35 (CPHS-HR ou CPHR 325 kg/m³), des résistances à la compression sur carottes de 52 ou 56 N/mm² (valeurs moyennes).

Autres ciments résistant aux sulfates

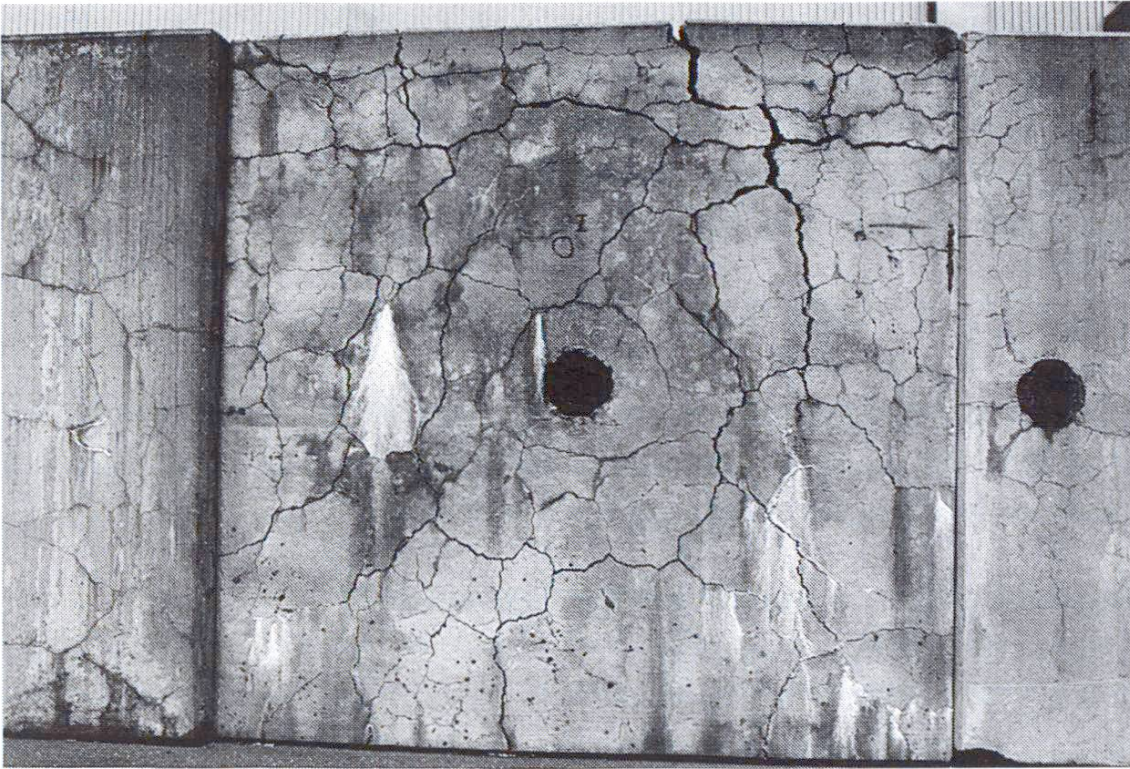
En remplaçant partiellement le CP par des liants riches en silicate, tels que ciments de laitier, cendres volantes ou microsilice, on obtient également un béton à résistance accrue aux sulfates. La chose est prouvée, par exemple par des essais faits dans les eaux souterraines d'une région à schistes alunacés (jusqu'à 5 g/l de SO₃, pH 2,8): après 30 ans d'exposition permanente à l'action des sulfates, les échantillons de béton au CPHS et ceux de béton au ciment amélioré avec 15 % de microsilice présentaient les mêmes caractéristiques [12].

En Allemagne, les ciments de haut fourneau comprenant 70 % en poids de laitier granulé riche en alumine sont considérés comme des ciments à haute résistance aux sulfates. Il résulte d'essais effectués simultanément dans six laboratoires qu'un ciment comprenant 65 % en poids de laitier granulé (18,7 % d'alumine) et 35 % en poids de CP (11,0 % de C₃A) témoigne déjà d'une résistance accrue aux sulfates [13].

Gonflement dû aux sulfates après traitement thermique

Ces derniers temps, on a constaté à plusieurs reprises des gonflements dus aux sulfates, sans qu'il y ait apport extérieur de ions de sulfate. Ces cas ont tous en commun que les éléments atteints ont été soumis à un traitement thermique intensif immédiatement après la fabrication, et ont été beaucoup en contact avec de l'eau après leur mise en place. *Sylla* [14] et *Neck* [15] ont étudié ce phénomène en détail, et en ont donné des explications possibles:

Les ciments Portland contiennent déjà des ions de sulfate, car pour contrôler la réaction de prise, on ajoute du gypse, du gypse partiellement déshydraté (semi-hydrate, CaSO₄ · 0,5 H₂O) ou de l'anhydrite (CaSO₄). (Selon la norme SIA 215, la teneur maximale en SO₃ est de 3,5 % pour les CP et CPHS, et de 4,0 % pour le CPHR.) Après adjonction d'eau, une partie du C₃A réagit aux transporteurs de sulfates en formant de l'ettringite ou du «monosulfate» (3 CaO · Al₂O₃ · CaSO₄ · 12 H₂O), voire les deux. Dans cette phase, le



Après quelques mois d'entreposage en plein air, ce bloc de ciment présentait de sérieux dégâts, imputables à l'infiltration d'eau qui, dans le béton ayant été soumis à un traitement thermique inadéquat, a provoqué un gonflement dû aux sulfates. (photo: PSI)

béton est encore plastique. La formation d'ettringite n'est pas nuisible. Elle contribue au contraire à la résistance mécanique.

On suppose qu'en cas de traitement thermique intensif, la fixation des sulfates dans la pâte de ciment durcie est entravée. L'ettringite existante se transforme probablement en monosulfate. La dessiccation du béton favorise en outre la formation de petites fissures et fentes, ce qui permet une infiltration plus facile de l'eau. Il en résulte des anomalies de structure, qui amoindrissent la résistance mécanique. Des recherches ont révélé que les phases secondaires constituées de cristaux d'ettringite ou de thaumasite, ou encore de solutions solides des deux minéraux, phases qui sont responsables du gonflement dû aux sulfates, se produisent surtout dans les zones de contact entre pâte de ciment durcie et surface des granulats.

Le traitement thermique d'éléments en béton afin d'accélérer la prise est tout à fait possible. Neck [15] conseille cependant de ne l'entreprendre qu'après un temps d'exposition de 3 heures (température maximale 30 °C), et de ne pas dépasser 65 °C. La fixation des sulfates se fait alors à peu près normalement, et on ne constate pas d'anomalies de structure dans le béton durci.

Kurt Hermann

8 Bibliographie

- [1] «Ciments portland résistant aux eaux séléniteuses», Bulletin du ciment **26** [11] (1958).
- [2] *Koelliker, E.*, «Ciment portland à haute résistance aux sulfates (CPHS)», Bulletin du ciment **46** [5] (1978).
- [3] «N3-Tunnel erhält zusätzliche Abdichtungen», Schweizer Baublatt **102** [103/104], 61 (1991).
- [4] *de Montmollin, M.*, «Construction du tunnel du Mont Terri à travers les marnes du Jura», actes du Symposium européen de la construction de tunnels du 5 février 1992, à Olten, pages 28–36.
- [5] *Michaelis, W.*, «Der Cement-Bacillus», Thonindustrie-Zeitung **16**, 105–106 (1892).
- [6] *Cohen, M. D.*, et *Mather, B.*, «Sulfate Attack on Concrete – Research Needs», ACI Materials Journal **88** [1], 62–69 (1991).
- [7] *Kollo, H.*, «Sulfatwiderstand – Ein Aspekt der Dauerhaftigkeit von Beton», Beton-Informationen **30** [1], 8–11 (1991).
- [8] *Schwander, H. W.* et *Stern, W. B.*, «Zur experimentellen Erzeugung von Umwandlungsprodukten an Oberflächen von Zementstein», Zement-Kalk-Gips **41** [1], 48–53 (1988).
- [9] *Lukas, W.*, «Spritzbeton: Fehler, Mängel und Schäden; betontechnische Ursachen», actes du Spritzbeton-Kolloquium du 27 septembre 1991, à Wildeg, pages 19–35.
- [10] *Brugger, M.*, «Beton-Nachbehandlung», Schweizer Ingenieur und Architekt **109** [44], 1037–1039 (1991).
- [11] *Luterbacher, W.*, «Développement et fabrication de tubbings en béton sur le chantier du Mont Russelin (N 16)», actes du Symposium européen de la construction de tunnels du 5 février 1992, à Olten, pages 36–43.
- [12] *Scherer, L.*, «L'emploi de la microsilice dans les ouvrages en béton et la construction de galeries», Chantiers **22** [5], 49–53 (1991).
- [13] «Hochofenzement mit hohem Sulfatwiderstand», Beton **30** [12], 459–462 (1980).
- [14] *Sylla, H.-M.*, «Reaktionen im Zementstein durch Wärmebehandlung», Beton **38** [11], 449–454 (1988).
- [15] *Neck, U.*, «Auswirkungen der Wärmebehandlung auf Festigkeit und Dauerhaftigkeit von Beton», Beton **38** [12], 488–494 (1988).

Traduction française: Liliane Béguin