Zeitschrift: Bulletin du ciment

Herausgeber: Service de Recherches et Conseils Techniques de l'Industrie Suisse du Ciment (TFB AG)

Band: 68 (2000)

Heft: 2

Artikel: Méthodes d'essai non destructives pour ouvrages en béton, 1re partie

Autor: Hermann, Kurt

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-146518

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: 14.07.2025

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

Méthodes d'essai non destructives pour ouvrages en béton, 1re partie

Les mesures de déformations avec des senseurs à fibres de verre et les mesures Impact-Echo sont des exemples de méthodes d'essai non destructives utilisées avec succès dans la construction.

Les méthodes non destructives nouvelles ne sont utilisées qu'avec réticence dans la construction, bien qu'elles permettent de résoudre de nombreux problèmes relatifs à l'assurance de qualité, aux analyses de l'état et à la surveillance. Cette réticence s'explique d'une part par la technologie complexe de ces méthodes, et d'autre part par la méconnaissance des systèmes existants. La description dans le «Bulletin du ciment» de méthodes d'essai non destructives sélectionnées a pour but de faire connaître les possibilités et limites d'utilisation de ces méthodes.

Senseurs à fibres optiques

Les fibres optiques ont été conçues initialement pour la télécommunication. Elles se composent de fibres en verre ou en matériau composite fibreux, qui guident la lumière, et qui, en raison de leur stabilité, peuvent être utilisées pour des capteurs de mesure [1, 5].
Les fibres optiques permettent de transporter des ondes lumineuses – et donc également des informations – sur de grandes distances avec de très faibles pertes: dans un câble de 10 km de longueur, la perte de lumière n'est que de 50 %. Dans les senseurs à fibres optiques, les fibres peuvent servir soit de systèmes de transmission seulement, soit de système de mesure et transmission.

Les senseurs à fibres optiques permettent la mesure de nombreux paramètres. Contraintes, allongements, déformations, forces, accélérations, rotations et concentrations d'agents chimiques en sont des exemples. Leurs domaines d'utilisation sont d'une diversité en rapport. Passant par la surveillance de processus in-

Type de senseur	principe de mesure/propriétés	Paramètres mesurés	Stade/senseurs installés jusqu'à présent
Sofo	Interférométrie en basse cohérence (voir texte).	Déformation	Commercialisé/> 1000
Microcourbure	Une section de fibre optique est entourée de fibres de verre ou de fils métalliques. Lorsque la fibre optique est tendue, l'intensité de la lumière traversante diminue. Convient bien pour des mesures dynamiques. / La résolution est de 30 µm (court terme) ou de 100 µm (fonctionnement continu).	Déformation	Commercialisé/ca. 500 Exemple: surveillance d'un barrage (USA)
Réseau de Bragg	Des réseaux de Bragg sont insérés au cœur des fibres. Lorsqu'une lumière blanche est envoyée dans les fibres, la lumière de la longueur d'onde correspondant à la distance des plans de réflexion est réfléchie; le reste de la lumière passe à travers. Etant donné que la période du réseau dépend de la température et de l'allongement des fibres, ces paramètres peuvent être mesurés par l'analyse de la lumière réfléchie. Il est possible d'intégrer jusqu'à 16 réseaux (points de mesure) dans une seule fibre./La résolution se situe dans un ordre de grandeur de 1 $\mu\varepsilon$ et 0,1 °C.	Déformation Température	Tests in situ/env. 200 Exemple: surveillance des câbles de suspension CFK du «Storchenbrücke» à Winterthour
Fabry-Pérot	Une fente étroite résulte du partage d'une fibre optique. Une partie de la fibre est fixée et l'autre est mobile. La lumière envoyée à travers la fibre est réfléchie dans la fente aux points de transition fibre/air et air/fibre. Il résulte de la superposition des réflexions un modèle d'interférence à changement d'intensité périodique. Un déplacement de la fibre mobile provoque un changement du modèle d'interférence./Longueur du senseur: 10–25 mm; diamètre 0,5 mm; plage de mesure: $-2\ \% < \varepsilon < +2{,}5\ \%$	Déformation	Tests in situ/env. 100 Exemple: surveillance de câbles de précontrainte dans un pont de Berlin
Brillouin	L'interaction entre ondes optiques (lumière) et ondes sonores dépend de l'allongement et de la température des fibres. Grandes distances de mesure (jusqu'à 50 km) en de nombreux points possibles: – résolution spatiale 1 m sur 10 km ou 10 m sur 100 km – résolution en allongement: 20 µ/m; résolution en température +1 °C	Déformation Température	Tests in situ/env. 5 Exemple: mesure de température dans la couche bétonnée du barrage de Luzzone

Tab. 1 Utilisation de senseurs à fibres optiques en Europe (état 1999) [1].

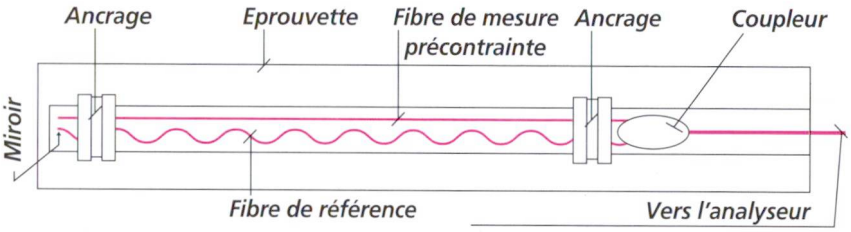

Fig. 1 Structure d'un senseur Sofo (voir texte) selon [1].

Dessins: TFB

dustriels, ils vont des applications en médecine à la surveillance en aéronautique et en astronautique. Et leurs applications dans la surveillance d'ouvrages prend de plus en plus d'importance [1].

Les senseurs à fibres optiques ont pour avantages d'être peu sensibles à la corrosion, insensibles aux champs magnétiques (lignes à haute tension, voies ferroviaires, orages), et de petite taille, ainsi que de pouvoir être utilisés dans des systèmes de surveillance.
Diverses sortes de senseurs à fibres optiques sont utilisés pour la mesure des déformations en Europe. Une sélection de ces appareils figure dans le *tableau 1.* Il est traité ci-après plus en détail du système de mesure Sofo mis au point en Suisse.

Le système de mesure Sofo [1]

Sofo est l'acronyme de *Surveillance d'ouvrages par fibres optiques.* Ce système est basé sur l'interférométrie en basse cohérence. Le senseur comprend deux fibres *(figure 1):*

- La fibre de mesure est précontrainte et fixée à deux points. Elle permet de mesurer les déformations (allongements jusqu'à +1%, raccourcissements jusqu'à –0,5 %).

La fibre de référence est placée librement parallèlement à la fibre de mesure. Elle sert à la compensation de température.

La lumière, envoyée dans les deux fibres par un coupleur, est réfléchie par un miroir placé à l'extrémité des fibres, renvoyée dans le coupleur et dirigée vers l'analyseur [6].
Les distances de mesure usuelles se situent entre 20 cm et 10 m; des senseurs spéciaux peuvent avoir jusqu'à 50 m de longueur. La résolution de 0,2 % ne dépend pas de la distance de mesure. Un calibrage est superflu. La précision est supérieure à 0,2 % de la déformation.

Les senseurs Sofo peuvent être scellés dans le béton ou fixés sur la face extérieure de l'élément d'ouvrage. Ils ont été utilisés dans de nombreux projets de construction, en Suisse principalement [1, 6]. Un exemple d'application simple est la surveillance de structures hybrides, testée à l'ISS de l'EPFL à Lausanne *(figure 2).* Des éprouvettes avec senseurs Sofo, entre autres, ont été confectionnées à cet effet, dont la composition correspondait à un béton d'environ 40 ans. Une nouvelle couche de béton a été mise en place sur la surface rendue rugueuse par jet d'eau à haute pression, dans laquelle des senseurs Sofo ont également été incorporés. Les déformations qui se sont produites pendant les premiers jours sont représentées à la *figure 2.* Elles peuvent être interprétées comme suit:

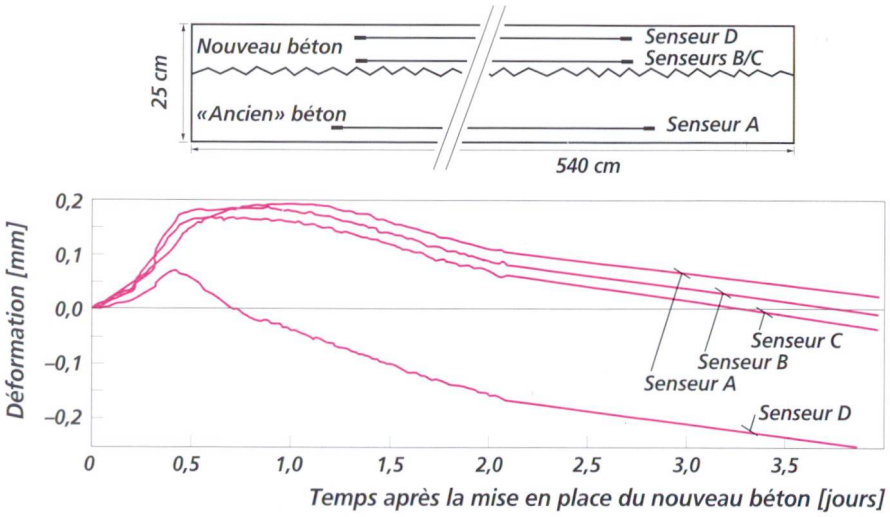

Fig. 2 Preuve des interactions entre «ancien» et nouveau béton au moyen de senseurs Sofo (selon[1]).

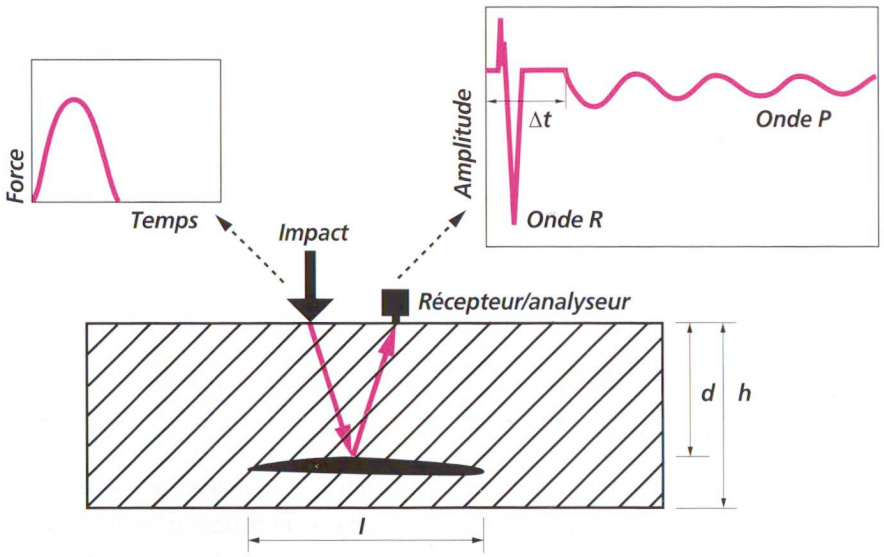

Fig. 4 Représentation schématique de la réflexion d'ondes P à un vide dans le béton. Le récepteur à proximité de l'impact détecte l'onde R ainsi que les ondes P réfléchies [2, 7].

aussi bien le senseur A dans l'ancien béton que les senseurs B et C situés à proximité affichent une courbe de déformation très semblable, ce qui permet de déduire que la liaison est bonne.

Le retrait commence après un allongement initial dû à l'effet thermique. Les conditions sont très différentes près du senseur E proche de la surface: le retrait commence ici déjà après une brève expansion thermique, car la couche de béton extérieure refroidit plus vite que la couche intérieure, et sa déformation n'est pas entravée par l'«ancien» béton.

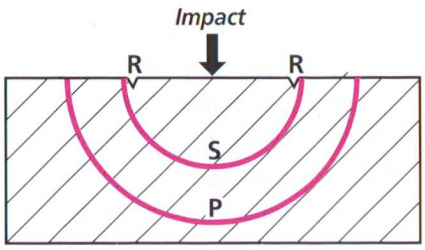

Fig. 3 Représentation schématique des ondes générées par un impact sur un élément d'ouvrage [2, 5].

Impact-Echo

Avec la méthode Impact-Echo la plus simple, une bille d'acier fixée à une barre frappe la surface du béton. Des ondes sont ainsi générées, qui, dans le cas idéal, sont réfléchies aux points de transition des phases, et de ce fait également à la face inférieure de l'élément d'ouvrage. Les ondes ayant suffisamment d'énergie font plusieurs fois le parcours entre face supérieure et surface réfléchissante. Elles peuvent être enregistrées à côté du point d'impact au moyen d'appareils de mesure appropriés.

La méthode Impact-Echo a déjà trouvé de nombreuses applications. Les matériaux s'y prêtant sont le béton (non armé, avec armature passive, ou précontraint), la maçonnerie et la roche. Ci-après quelques utilisations possibles:

- détection et localisation de cavités et nids de gravier
- détermination de l'épaisseur de couches et d'éléments d'ouvrage
- détection et localisation de délaminations (p. ex. aux interfaces)
- détection de défauts d'injection de gaines de câbles de précontrainte
- détermination de la profondeur des fissures.

Des études ont été menées en Suisse pour mieux évaluer la fiabilité et les limites de ce procédé [2].

Théorie

Une bille frappant la surface d'un élément d'ouvrage génère lors de l'impact trois sortes d'ondes (voir *figure 3):*

- les ondes R aussi appelées ondes de Rayleigh, qui se propagent en surface selon une trajectoire circulaire
- Les ondes S (ondes de cisaillement) à front sphérique
- les ondes P (ondes de compression) à front sphérique.

Pour l'Impact-Echo, ce sont surtout les ondes P réfléchies, dominantes à proximité du point d'impact, qui sont intéressantes. Elles sont enregistrées au moyen d'un accéléromètre *(figure 4).* Pour l'évaluation, les spectres d'amplitude sont transformés en spectre de fréquences par double intégration.

La durée du choc et l'amplitude de l'onde P en résultant sont deux paramètres importants de l'impact. Ils sont fonction de la grandeur de la bille: plus la bille est petite, plus le temps de contact est court lors de

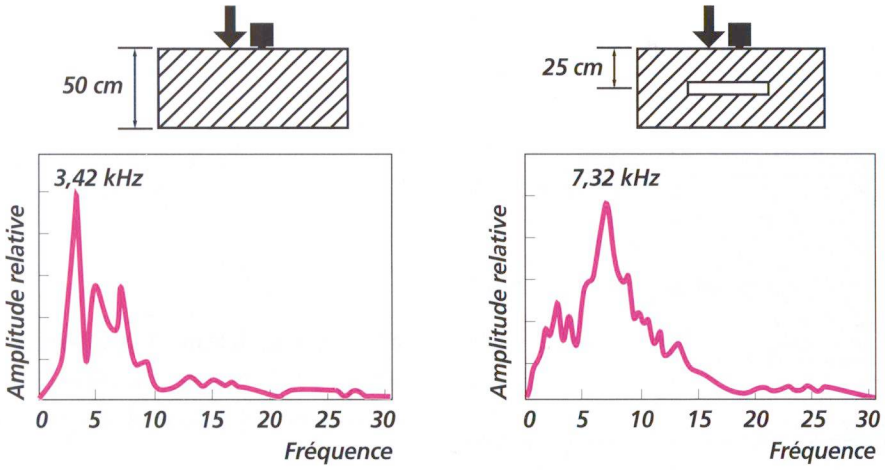

Fig. 5 Spectres de fréquences pour une dalle en béton de 0,50 m d'épaisseur (à gauche) ainsi que pour une dalle de même épaisseur présentant un vide à 0,25 m de profondeur (selon[8]).

l'impact et plus la fréquence de l'onde générée est grande.
Des billes d'un diamètre entre 5 et 25 mm se sont avérées bonnes. Les caractéristiques des ondes de compression (ondes P) générées avec ces billes sont les suivantes:

- fréquences entre 60 et 9 kHz
- longueurs d'ondes l d'à peu près 70 à 450 mm
- vitesses dans le béton d'env. 4000 m/s.

Lors du passage d'ondes de ce genre, les bétons et autres matériaux se comportent comme des systèmes élastiques homogènes.

La mesure Impact-Echo la plus simple est celle de l'épaisseur h d'une dalle en béton ne présentant pas de défauts. L'onde P générée par l'impact est réfléchie à la face inférieure de l'élément d'ouvrage et arrive à l'accéléromètre avec un retard Δt déterminé. Sa vitesse est v_p. Dans des conditions idéalisées, les relations sont les suivantes:

- temps de retour théorique Δt de l'onde de compression:

$$\Delta t = 2\,h/v_P \qquad (1)$$

- fréquence de retour

$$f_P = 1/\Delta t \rightarrow \Delta t = 1/f_P \qquad (2)$$

- épaisseur de l'élément d'ouvrage:

$$h = \Delta t \cdot v_P/2 = v_p/2f_P \qquad (3)$$

Il ressort de *l'équation (3)* que l'épaisseur h d'un élément d'ouvrage peut être calculée à partir de Δt lorsque la vitesse de propagation v_p de l'onde P est connue. Cela est illustré à la *figure 5:* une dalle en béton de 0,50 m d'épaisseur avait lors de la mesure Impact-Echo une fréquence de retour f_p de 3,42 kHz. Il résulte de *l'équation (3):*

$$v_P = d \cdot 2f_P = 0{,}50 \cdot 2 \cdot 3420 \text{ m/s} = 3420 \text{ m/s} \qquad (4)$$

Un vide a été incorporé à un autre endroit du même élément d'ouvrage. On y a mesuré une fréquence de retour f_p de 7,32 kHz. En utilisant la vitesse de propagation v_p de 3420 m/s calculée au moyen de *l'équation (4),* il en résulte pour la profondeur du vide d:

$$d = v_P/2f_P = 3420/2 \cdot 7320 \text{ m} = 0{,}23 \text{ m} \qquad (5)$$

Cela concorde bien avec la valeur correcte de 0,25 m.

BIBLIOGRAPHIE

[1] **Inaudi, D.,** «Deformationsmessungen mit Glasfasersensoren», exposé présenté lors du séminaire du TFB n° 994 360 «Praxistaugliche Prüfmethoden für zerstörungsfreie Qualitätsnachweise an Betonbauten» du 8 décembre 1999 à Wildegg.

[2] **Brühwiler, E.,** «Impact-Echo: Bedeutung und Möglichkeiten», exposé présenté lors du séminaire du TFB n° 994 360 «Praxistaugliche Prüfmethoden für zerstörungsfreie Qualitätsnachweise an Betonbauten» du 8 décembre 1999 à Wildegg.

[5] «ZfP-Baukompendium», édité par le Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin (BAM), nouvelle édition 1999, www.bam.de/a_vii/vii_3/kompendium/welcome.html

[6] **Kronenberg, P.,** et **Casanova, N.,** «Sofo: Bauwerksüberwachung mit Glasfasersensoren», Schweizer Ingenieur und Architekt **115** [47], 968–973 (1997).

[7] **Sansalone, M., Lin, J.-M.,** et **Streett, W. B.,** «A procedure for determining P-wave speed in concrete for use in impact-echo-testing using a P-wave speed measurement technique», ACI Materials Journal **94** [6], 531–539 (1997).

[8] http://ciks.cbt.nist.gov/~carino/ieprin.html

	Précision des mesures	Facilité d'interprétation	Fiabilité d'interprétation	Evaluation de l'adéquation
Mesures d'épaisseur	très bon	très bon	très bon	très bon
Qualité d'interfaces	bon	bon	moyen	bon
Nids de gravier	moyen	mauvais	moyen	moyen
Injection de gaines (précontrainte)	bon	moyen	mauvais	mauvais
Profondeur des fissures	bon	bon	très bon	bon

Tab. 2 Domaines d'utilisation de la méthode Impact-Echo [2].

Il faut souligner qu'il s'agit en l'occurrence d'un procédé simplifié. En réalité, la géométrie de l'élément d'ouvrage doit également être prise en considération, ce qui se fait par l'introduction d'un facteur β dans l'équation (3):

- épaisseur de l'élément d'ouvrage:

$$h = \beta \cdot \Delta t \cdot v_P/2 = \beta \cdot v_p/2f_P \qquad (6)$$

Les valeurs de β dépendent du quotient h/b (épaisseur/plus petite étendue en longueur). Deux exemples: pour des éléments rectangulaires dont la longueur est au moins 5 fois plus grande que l'épaisseur, β est de 0,96; pour des éléments cylindriques, $\beta = 0{,}92$.

Limites de la méthode de mesure [2]

L'analyse des données fournies par des mesures Impact-Echo est en général très difficile; elle s'effectue à l'aide d'ordinateurs et de programmes d'évaluation appropriés. Les utilisateurs doivent être en outre hautement expérimentés.

L'exposé sur la méthode Impact-Echo [2] portait principalement sur un examen critique des possibilités d'utilisation. Les points les plus importants figurent dans le *tableau 2,* et sont encore complétés ci-après. Pour que les cavités et délaminations d'une longueur minimale l puissent être décelées dans une profondeur d (voir *figure 4),* l doit être d'au moins 25 % de la longueur d'onde l et se situer dans une profondeur entre 50 % de la longueur d'onde l et 300 % de la longueur l minimale.

La détection de nids de gravier est possible lorsque les conditions suivantes sont remplies:

- La surface doit être de bonne qualité.
- L'épaisseur de l'élément d'ouvrage doit être connue.

Avec des largeurs de fissures jusqu'à environ 0,1 mm, la profondeur des fissures arrivant jusqu'à la surface de l'élément peut être facilement enregistrée.

Les essais en laboratoire avec des gaines de câbles de précontrainte entièrement injectées ou non injectées ont donné de bons résultats.

Lors de l'essai sur roche (passage en éléments préfabriqués au-dessus d'une autoroute), les résultats des sondages ont été peu satisfaisants: les prévisions faites sur la base des mesures Impact-Echo ne se sont confirmées que dans une bonne moitié des cas; des fissures dans la zone examinée peuvent rendre la mesure impossible.

Une bonne accessibilité et une géométrie relativement simple des éléments d'ouvrage sont des conditions importantes pour la réussite des mesures Impact-Echo. Ces mesures doivent toujours être bien préparées, et le dépouillement des résultats est coûteux.

Kurt Hermann, TFB

A propos de cet article

Le présent article est basé en grande partie sur des exposés présentés lors du séminaire du TFB n° 994 360 «Praxistaugliche Prüfmethoden für zerstörungsfreie Qualitätsnachweise an Betonbauten» du 8 décembre 1999 à Wildegg. Les orateurs étaient:

[1] Daniele Inaudi, Smartec SA, Grancia

[2] Professeur Eugen Brühwiler, EPFL, Lausanne

[3] Herbert Wiggenhauser, BAM, Bundesamt für Materialforschung, Berlin

[4] Johannes Hugenschmidt, Empa, Dübendorf

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