Béton résistant au gel et aux sels de déverglaçage

Autor(en): **Hermann, Kurt / Badawy, Maher**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin du ciment**

Band (Jahr): **65 (1997)**

Heft 2

PDF erstellt am: **07.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-146424

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

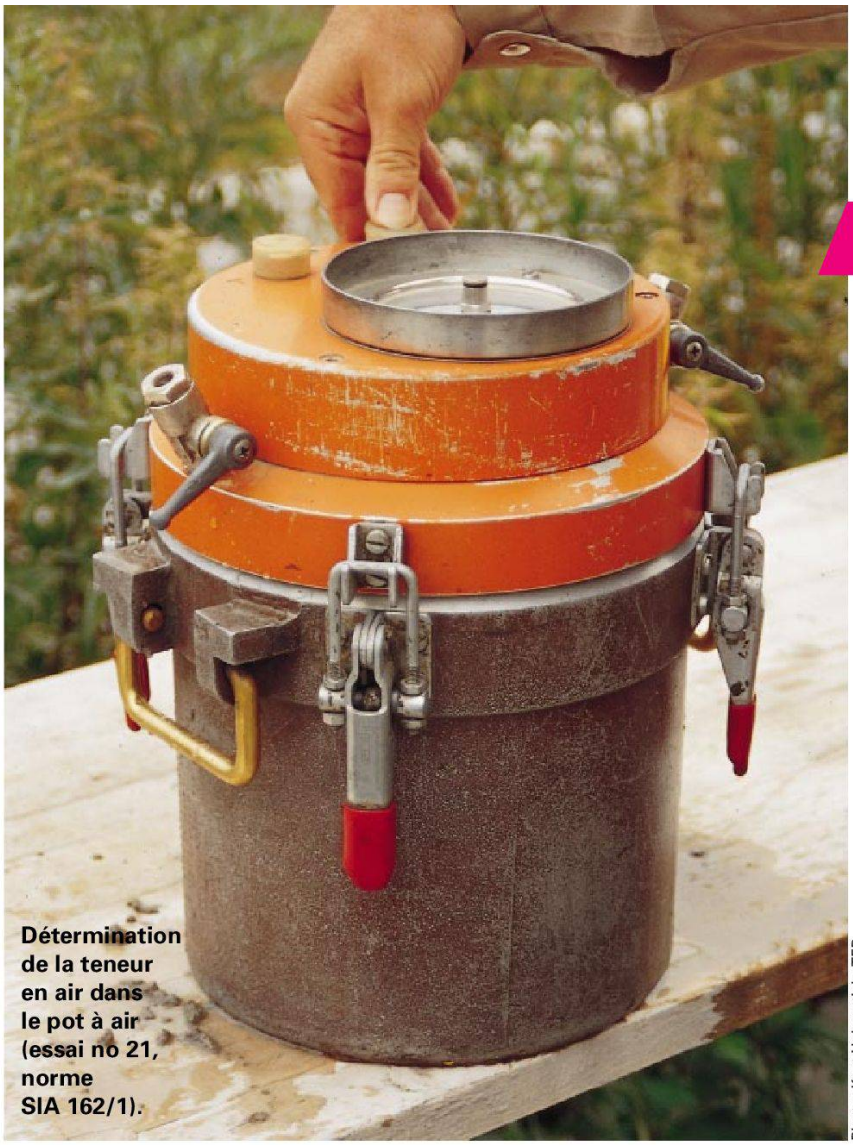
Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Béton résistant au gel et aux sels de déverglaçage

Les bétons résistant au gel et aux sels de déverglaçage doivent être aussi denses que possible et contenir des pores d'air obtenus artificiellement.



Détermination de la teneur en air dans le pot à air (essai no 21, norme SIA 162/1).

Photo: Kurt Haberstich, TFB

L'effet d'éclatement provoqué par l'eau en train de geler est la cause principale des dégâts du béton dus au gel. Ce phénomène se produit lorsque le béton, dans la zone de la surface, peut de façon répétée se gorger d'eau et geler. Les sels de déverglaçage amplifient l'effet d'éclatement.

Le béton est poreux

Le béton n'est endommagé par le gel et les sels de déverglaçage que parce qu'il contient de l'eau. Cette eau est soit de l'eau de gâchage, qui n'est pas fixée chimiquement, soit l'eau qui pénètre ultérieurement par le système poreux. Les différents types de pores se trouvant dans le béton ont été décrits dans le précédent numéro du «Bulletin du ciment», consacré au béton étanche [1].

En ce qui concerne la résistance GDS du béton, il faut tenir compte surtout des pores capillaires, des pores de compactage et des pores d'air obtenus artificiellement.

Les pores capillaires

Le béton dont le rapport e/c est supérieur à 0,40 contient des pores capillaires même après hydratation complète, ces pores étant tantôt isolés, tantôt communicants. Leur diamètre est compris entre 10^{-5} et 10^{-3} mm. Dans les pores capillaires communicants, le transport de gaz et d'eau peut être relativement rapide.

Les pores d'air obtenus artificiellement

Il arrive de l'air dans le béton frais déjà lors du malaxage et de la mise en place, et cet air se présente sous forme de bulles enrobées d'un mince film d'eau. Ces bulles, qui se déplacent dans le béton frais, changent constamment de forme et de volume; elles peuvent fusionner ou se rompre, par exemple pendant le vibrage. Après le compactage, elles restent en place et il se forme des pores d'air.

Les entraîneurs d'air (LP) stabilisent les pores d'air et les retiennent dans le béton frais. En décalant l'échelonnement des bulles d'air, les LP conduisent à la formation de l'édifice sphérique plus petit souhaité, dont les diamètres vont d'environ 10^{-2} à 1 mm. Les pores d'air obtenus artificiellement ont donc des diamètres supérieurs à ceux des capillaires. Ils interrompent le système capillaire, dont ils diminuent le pouvoir d'absorption grâce à leurs élargissements sphériques. Le béton voit ainsi augmenter non seulement sa résistance GDS, mais également sa résistance aux substances nuisibles, telles que sulfates ou chlorures, qui sont diluées dans l'eau.

On trouve plus de détails sur l'obtention artificielle de pores d'air et sur leur action dans un numéro du «Bulletin du ciment» paru précédemment [2].

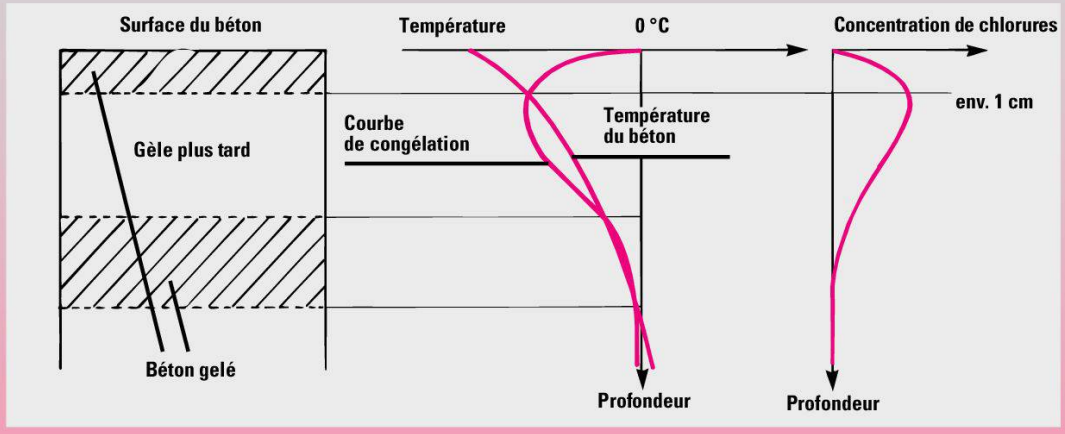


Fig. 1 L'eau gelant par couches dans un béton soumis à l'action des sels de déverglaçage peut provoquer des éclatements [4] (voir texte).

Dessin: TFB / S. Einfalt, ZSD

Les mécanismes conduisant à des dégâts

Le béton présente une structure complexe. C'est pourquoi les phénomènes conduisant à des dégâts dus au gel et aux sels de déverglaçage ne peuvent pas être saisis en entier, et donnent parfois lieu à des controverses. On part généralement d'un modèle selon lequel de gros granulats «flottent» dans une matrice de mortier fin.

Dans un environnement humide, les pores capillaires absorbent de l'eau. Si cette eau, dite interstitielle, gèle, son volume augmente d'environ 9 %. Elle soumet ainsi la pâte de ciment à des contraintes, résultant d'une part de l'expansion de la glace se formant, et d'autre part du déplacement rapide de l'eau non gelée, chassée par les cristaux de glace qui se développent. Les sels se séparant de l'eau interstitielle à l'état cristallin provoquent une pression supplémentaire. Ce phénomène se répète lors de chaque cycle de gel-dégel. Le béton est alors soumis à des efforts de traction, c'est-à-dire qu'il est sollicité là où il est le plus faible. Les conséquences sont connues: des dégâts dus au gel et, le cas échéant, aux sels de déverglaçage apparaissent (éclatements et fissures).

Ce mécanisme ne permet pas d'établir pourquoi les dégâts dus au gel et aux sels de déverglaçage se manifestent généralement d'abord par des éclatements au-dessus des plus gros granulats. Une explication possible – très simplifiée – se présente comme suit [3]: Les granulats sont enrobés d'une couche séparatrice d'environ 25 µm (0,025 mm) d'épaisseur, d'une porosité nettement plus élevée que le reste de la pâte de ciment durcie, et d'une composition différente. Cette zone de contact poreuse constitue un réservoir d'eau communicant, dont le volume augmente parallèlement à la grosseur des granulats concernés. La pression hydraulique qui se produit lorsque cette eau gèle rapidement est proportionnelle au carré du diamètre des granulats. Elle est donc d'autant plus grande que sont grands les granulats. C'est pourquoi les éclatements commencent au-dessus des plus gros granulats [3]. En présence de sels de déverglaçage, les bétons restent plus

Essais de résistance aux sels de déverglaçage selon la méthode du TFB: dans la plaque polie de l'éprouvette ne résistant pas aux sels de déverglaçage, on discerne après le test des fissures qui apparaissent principalement autour des granulats.

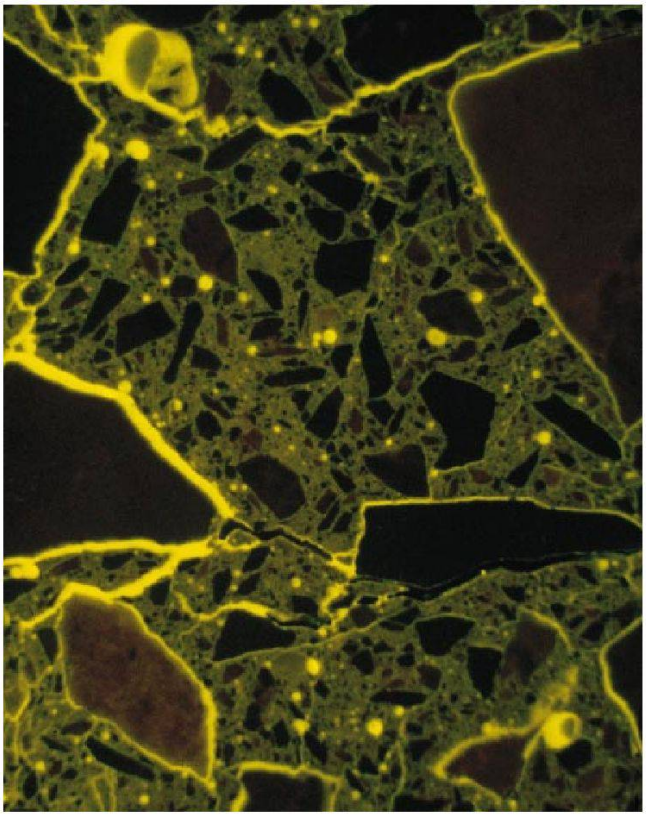


Photo: TFB, Nyon

Photo: archives TFB

Dégâts dus aux sels de déverglaçage (éclatements) sur un parapet de pont.

longtemps mouillés, ce qui augmente leur teneur en eau (c'est-à-dire que les pores capillaires sont remplis de plus d'eau) et les soumet à une pression de congélation plus forte. Les sels de déverglaçage exercent en outre une influence sur le point de congélation de l'eau: plus leur concentration est élevée, plus le point de congélation est bas. Après des salages répétés, c'est en général à environ 1 cm au-dessous de la surface que la concentration de chlorures est la plus élevée dans le béton. (Les ions de chlorure proches de la surface sont éliminés par la neige fondante, la pluie, etc.) Il en résulte la courbe de congélation de l'eau dans le béton esquissée à la *figure 1*. La superposition de cette courbe avec celle de la température dans le béton démontre pourquoi l'eau ne gèle au début que près de la surface et dans les couches plus profondes. Si le refroidissement se poursuit, la couche intermédiaire gèle alors également. La pression de congélation qui en résulte ne peut pas s'affaiblir dans les couches voisines déjà gelées, et cela peut conduire à l'éclatement de la couche superficielle (et à des fissures à l'intérieur du béton) [4]. Le choc thermique – également très controversé – provoqué par le salage du béton existe certainement, mais il est souvent surestimé. Ses effets sont en pratique moins graves que ce que l'on pourrait supposer en se fondant sur des essais effectués en laboratoire [4].

Les attaques du gel et des sels de déverglaçage sur les bétons peuvent également entraîner des transformations chimiques dans la pâte de ciment durcie. Mais ces transformations sont le plus souvent négligeables comparées aux effets physiques [5].

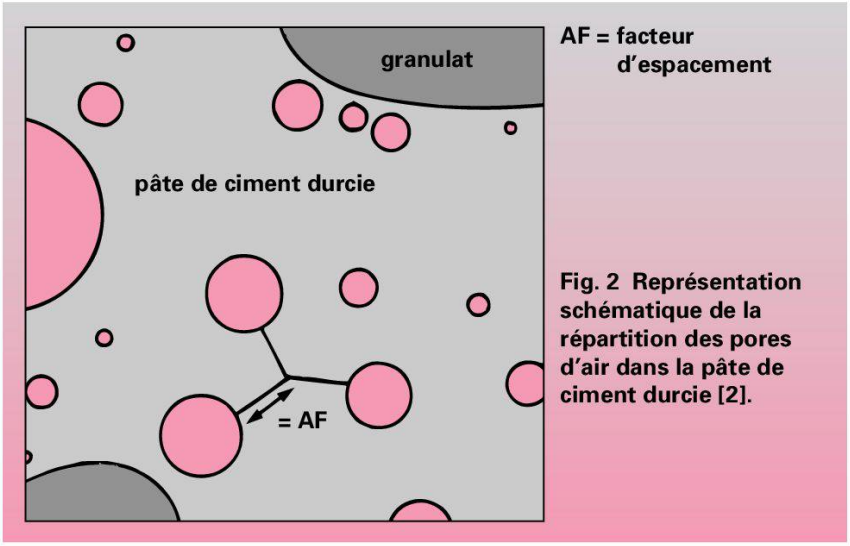


Fig. 2 Représentation schématique de la répartition des pores d'air dans la pâte de ciment durcie [2].

De combien d'air un béton a-t-il besoin?

L'action des pores d'air obtenus artificiellement consiste à créer des espaces d'expansion pour l'eau déplacée et la glace formée. Sont considérés comme agissant en ce sens les pores d'air d'un diamètre ≤ 0,30 mm [6]. Les avis divergent en ce qui concerne la quantité d'air que doit contenir un béton résistant au gel et aux sels de déverglaçage. Mais l'on s'accorde pour penser que seules des mesures permettant la fabrication d'un béton avec un bas rapport e/c et aussi dense que possible, ainsi que l'obtention artificielle de pores d'air, garantissent une protection sûre contre les dégâts dus au gel et aux sels de déverglaçage.

La teneur en pores d'air (dits «pores de compactage») d'un béton traditionnel est de quelque 1 à 2 % en volume. Des expériences faites en Suisse démontrent que des bétons

Désignation	Brève description de l'essai	Eprouvettes	Age du béton au début de l'essai 1)	Durée de l'essai	Bibl.
Normes SIA 162/1, essai no 6: Caractéristiques des pores	Analyse microscopique de lames minces pour déterminer le facteur d'espacement AF dans le béton avec pores d'air obtenus artificiellement	5 lames minces ≥ 800 mm² chacune provenant de 5 carottes	(28 jours)	28 jours	[8]
Norme SIA 162/1, essai no 7: Porosité	Détermination gravimétrique des pores accessibles à l'eau et de la porosité totale	≥ 5 éprouvettes, p. ex. 5 carottes (d = 50 mm / h = 50 mm)	(28 jours)	17 jours	[8]
Norme SIA 162/1, essai no 8: Comportement lors de cycles de gel	Détermination de la baisse du module d'élasticité statique de 50% après des cycles de gel entre +20 et –25 °C	≥ 4 carottes (d ≤ 100 mm / h ≥ 2d)	(28 jours)	40–45 jours	[8]
Méthode du TFB	Observation des fissures de la section de coupe après 10 cycles de gel entre +20 et –25 °C dans un bain d'éthylène-glycol	selon besoin, généralement carottes (d = 50 mm / h = ca. 100 mm)	≥ 21 jours	10 jours	[11]
BE I selon D-R	Analyse des pores et de la structure sur lames minces	2 carottes (d = 50 mm / h = 150–200 mm)	1–2 jours	3–4 jours	[12]
BE II selon D-R	Mesure de la déformation linéaire et de la baisse du module d'élasticité après les cycles de gel	6 prismes (30 × 30 × 60 mm) provenant de carottes ou confectionnés séparément	≥ 28 jours	10–20 jours	[12]
Cube-Test	Détermination gravimétrique de la perte de matière du béton après 56 cycles de gel dans l'eau	p. ex. 4 cubes (longueur de côté 100 mm) ou 4 carottes (d ≥ 80 mm)	28 jours	56 jours	[13]
Slab-Test (Swedish Standard SS 13 72 44)	Détermination gravimétrique de la perte de matière du béton après 56 cycles de gel (+20 °C / –20 °C)	1 prisme (150 × 150 × 50 mm) provenant de 4 cubes (longueur de côté 150 mm)	31 jours	56 jours	[13]
CF-Test	Détermination gravimétrique de la perte de matière du béton après 56 cycles de gel (+20 °C / –20 °C)	> 5 échantillons, par exemple 5 morceaux de cubes (150 × 150 × 70 mm)	35 jours	14 jours	[14]

Tab. 1 Essais de résistance au gel de bétons durcis.

1) Les indications de temps entre parenthèses ne sont pas normalisées

contenant 3 à 5,5 % d'air en volume résistent au gel et aux sels de déverglaçage si leur mise en place, leur compactage et leur traitement de cure sont faits soigneusement [4].
Dans la norme VSS SN 640 461 a «Revêtements en béton» [7], il est prescrit que, sur le lieu de mise en place, le béton frais doit contenir 4 à 6 % d'air. Un rapport e/c bas (< 0,45) est en outre exigé, ce qui implique qu'en dehors d'un LP, il faut également utiliser un plastifiant (BV) ou un superfluidifiant (HBV).
La norme SIA 162 ne donne pas d'indications concrètes en ce qui concerne le volume d'air qu'il faut chercher à obtenir. Dans l'essai no 6 de la norme SIA 162/1, le critère mentionné pour la résistance au gel du béton durci avec LP est le facteur d'espacement AF. Selon la définition donnée, ce facteur correspond à la plus grande distance d'un point dans la pâte de ciment durcie au prochain pore. Le calcul s'effectue dans des conditions idéalisées (tous les pores sphériques – voir *figure 2)*. Les bétons avec AF ≤ 0,20 mm témoignent d'une résistance au gel élevée, et les bétons avec AF ≥ 0,25 mm d'une faible résistance au gel.
Dans la prénorme SIA V 162.051 [9], on distingue entre parties en environnement humide avec gel (classe d'exposition 2b) et parties en environnement humide avec gel et produits dégivrants (classe d'exposition 3). Pour le béton frais avec granulats d'une dimension maximale de 32 mm, il est prescrit au moins 4 % de teneur en air pour les deux classes, avec un rapport e/c maximal de 0,55 (classe d'exposition 2b) ou de 0,50 (classe d'exposition 3). Cette

Bibliographie

Le présent article est basé en grande partie sur des documents utilisés au TFB pour des cours sur le béton étanche et sur le béton résistant au gel et aux sels de déverglaçage. Les autres sources sont:

[1] *Badawy, M.*, et *Hermann, K.*, «Le béton étanche», Bulletin du ciment **65** [1], 3–7 (1997).
[2] *Hermann, K.*, «Les adjuvants: LP», Bulletin du ciment **62** [11], 3–7 (1994).
[3] *Zimbelmann, R.*, «Frost-Tausalz-Widerstand von Beton im Lichte neuerer Erkenntnisse», Beton- und Stahlbetonbau **84** [5], 116–120 (1989).
[4] *Rösli, A.*, et collaborateurs, «Frost- und Frosttausalzbeständigkeit von Beton», rapport final concernant le projet de recherche 9/78 de l'Institut pour les matériaux de construction, la chimie des matériaux et la corrosion, de l'EPFZ (mars 1983).
[5] *Stark, J.*, et *Ludwig, H.-M.*, «Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton – ein physikalisches Phänomen?», Wissenschaftliche Zeitschrift Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar **40** [5/6/7], 95–104 (1994).
[6] *Kern, E.*, «Anwendung von Betonzusatzmitteln – Arten, Eigenschaften und Einsatzgebiete», Beton **37** [9], 359–362 (1987).
[7] SN 640 461 a: «Revêtements en béton» (édition 1994).
[8] Norme SIA 162/1: «Ouvrages en béton – Essais des matériaux» (édition 1989).
[9] Prénorme SIA V 162.051: «Béton: Performances, production, mise en œuvre et critères de conformité» (édition 1994).
[10] Norme SIA 162: «Ouvrages en béton» (édition 1989, révision partielle 1993).
[11] *Meyer, B.*, «Mesure de la résistance du béton au gel avec ou sans sels de déverglaçage», Bulletin du ciment **54** [10], 1–7 (1986).
[12] *Dobrolubov, G.*, und *Romer, B.*, «Richtlinien zur Bestimmung und Prüfung der Frost-Tausalzbeständigkeit von Zementbeton», Route et trafic **63** [10], 405–411 und [11], 432–436 (1977).
[13] «Draft recommendations for test methods for the freeze-thaw resistance of concrete – Slab test und cube test», Materials and Structures **28** [180], 366–371 (1995).
[14] «Draft recommendations for test methods for the freeze-thaw resistance of concrete – Tests with water (CF) or with sodium chloride (CDF)», Materials and Structures **28** [177],175–182 (1995).

Désignation	Brève description de l'essai	Eprouvettes	Age du béton au début de l'essai[1)]	Durée de l'essai	Bibl.
Normes SIA 162/1, essai no 9: Résistance au gel et aux sels de déverglaçage	Détermination gravimétrique de la perte de matière du béton lors des cycles de gel (+20 °C / –12 °C) avec action simultanée d'une solution à 3 % de gros sel	≥ 4 carottes (d ≥ 100 mm) ou ≥ 3 surfaces d'éprouvettes (longueur de côté ≥ 100 mm ou d ≥ 150 mm)	(28 jours)	28 jours	[8]
Méthode du TFB	Observation des fissures de la section de coupe après 10 cycles de gel entre +20 et –25 °C dans une solution de chlorure de calcium	selon besoin, généralement carottes (d = 50 mm / h = env. 100 mm)	≥ 21 jours	10 jours	[11]
BE I selon D-R	Analyse des pores et de la structure sur lames minces	2 carottes (d = 50 mm / h = 150–200 mm)	1–2 jours	3–4 jours	[12]
BE II selon D-R	Mesure de la déformation linéaire et de la baisse du module d'élasticité après les cycles de gel dans une solution à 3 % de gros sel	6 prismes (30 × 30 × 60 mm) provenant de carottes ou confectionnés séparément	≥ 28 jours	10–20 jours	[12]
Cube-Test	Détermination gravimétrique de la perte de matière du béton après 56 cycles de gel dans une solution à 3 % de gros sel	p. ex. 4 cubes (longueur de côté 100 mm) ou 4 carottes (d ≥ 80 mm)	28 jours	56 jours	[13]
Slab-Test (Swedish Standard SS 13 72 44)	Détermination gravimétrique de la perte de matière du béton après 56 cycles de gel (+20 °C / –20 °C, solution à 3 % de gros sel)	1 prisme (150 × 150 × 50 mm) provenant de 4 cubes (longueur de côté 150 mm)	31 jours	56 jours	[13]
CDF-Test	Détermination gravimétrique de la perte de matière du béton après 56 cycles de gel (+20 °C / –20 °C, solution à 3 % de gros sel)	> 5 échantillons, par exemple 5 morceaux de cubes (150 × 150 × 70 mm)	35 jours	14 jours	[14]

Tab. 2 Essais de résistance aux sels de déverglaçage de bétons durcis.

1) Les indications de temps entre parenthèses ne sont pas normalisées

prénorme peut être utilisée en Suisse depuis 1994 à titre d'essai, mais seulement conjointement avec certains chapitres de l'Eurocode 2 et de l'Eurocode 4, et non avec la norme SIA 162. Une teneur en air trop élevée a des effets négatifs sur la résistance du béton: Selon la norme SIA 162/1, 1 % en volume d'air entraîné artificiellement diminue la résistance à la compression de 1 à 2 N/mm^2 par comparaison au béton traditionnel [8], et cette diminution peut même être supérieure avec des teneurs en air élevées [4].

Construction d'ouvrages en béton résistant au gel et aux sels de déverglaçage

Selon la norme SIA 162 [10], les bétons résistant au gel et aux sels de déverglaçage sont des bétons aux performances particulières. Les dispositions permettant d'augmenter la résistance GDS citées dans la norme SIA 162, sous chiffre 3 37 2, sont entre autres les suivantes:

- l'utilisation de granulats non gélifs
- le recours à une composition convenable et constante du béton
- cas échéant, l'utilisation d'adjuvants appropriés
- une mise en œuvre et une cure soignées du béton
- l'obtention d'un durcissement suffisant avant le premier gel et spécialement avant le premier usage de sels de déverglaçage
- le choix d'un enrobage suffisant des armatures et des incorporés métalliques
- l'éventuel recouvrement des armatures au moyen d'une couche protectrice
- la limitation de l'ouverture des fissures par des mesures relevant du calcul et de l'exécution
- le choix adéquat des étapes de construction

En raison des expériences faites, le point «cas échéant, l'utilisation d'adjuvants appropriés» devra être remplacé par «adjonction de LP, généralement combiné avec BV ou HBV». L'action des LP dépend de nombreux paramètres, par exemple de la composition granulométrique des granulats, de la teneur en ciment et en fines, ainsi que de la température et de la consistance du béton frais [2]. C'est pourquoi les contrôles du béton frais sont toujours indispensables, et il est particulièrement important de déterminer régulièrement la teneur en air au moyen du pot à air (essai no 21, norme SIA 162/1) [8]. Étant donné que les bétons résistant au gel et aux sels de déverglaçage sont des bétons aux performances particulières, ce contrôle régulier est de toute façon nécessaire. Il ne faut pas oublier non plus les essais préliminaires systématiques.

Détermination de la résistance GDS

Plusieurs tests, normalisés ou non, ont été mis au point pour déterminer la résistance GDS du béton durci. Une sélection de ces tests figure dans les *tableaux 1* et *2*. Certains sont très longs et très coûteux, et les résultats ne correspondent pas toujours aux expériences faites sur le terrain.

Les contrôles du béton frais qui ont fait leurs preuves sont ceux décrits dans les essais nos 18, 19 et 21 de la norme SIA 162/1 pour la détermination de la masse volumique, de la teneur en eau et du rapport eau sur ciment, ainsi que de la teneur en air [8]. Avec les données ainsi obtenues, on peut faire un pronostic sur la résistance au gel du béton durci à un âge déterminé déjà avant la mise en place du béton.

Dans les nouvelles normes européennes, on adoptera probablement le test suédois (Slab-Test) relativement sévère, lequel a pour principal inconvénient d'exiger beaucoup de temps (voir *tableaux 1* et *2*).

Maher Badawy et
Kurt Hermann, TFB