

Etudes comparatives de la résistance aux chlorures des bétons

Résumé

Le projet de recherche s'est concentré sur trois objectifs:

- Comparaison des essais possibles pour la caractérisation de la résistance du béton à la pénétration des ions chlorure, que l'on appelle **la résistance aux chlorures**.
- Validation des résultats des bétons de laboratoire à l'aide d'échantillons provenant d'ouvrages en béton anciens à teneurs en chlorures élevées.
- Elaboration des recommandations pour la mesure de la résistance aux chlorures et des critères d'évaluation y associés en tant que base pour une norme SIA.

Des investigations très étendues concernant la résistance aux chlorures des bétons avec et sans ajouts ont été réalisées dans le cadre du projet. Elles ont conduit à une série d'observations importantes et confirmé en partie les résultats déjà connus de la littérature. Les sortes de béton suivantes ont été examinées :

- bétons normaux (béton à ciment Portland, sans ajouts)
- bétons à cendres volantes
- bétons à fumée de silice
- bétons au laitier

En complément des bétons de laboratoire, des bétons provenant d'autres mandats externes et de divers ouvrages ont été examinés. L'adéquation des essais suivants (entre parenthèses: caractéristiques mesurées) pour déterminer la résistance aux chlorures des bétons a été examinée :

- test ASTM selon AASTHO T259-80 (quantité de charges électrique)
- test ibac ou CTH (coefficient de migration des chlorures ou brièvement coefficient de migration)
- test de Streicher (conductivité électrique)
- perméabilité aux gaz (constante de perméabilité)
- pénétration d'eau selon norme SIA 162/1, essai no 5 modifié VPL (pénétration d'eau)
- absorption d'eau (teneur et enrichissement en chlorures)

Les résultats principaux du projet de recherche ont été résumés dans les paragraphes suivants.

Influences du matériau

- Les essais ont montré que la composition du béton, en particulier le facteur eau-ciment (e/c), resp. eau-liant (e/L) ainsi que le type et le dosage des ajouts ont une influence prépondérante.
- Les facteurs tels que la teneur en liant, la granulométrie maximale des agrégats et les adjuvants n'ont pas été étudiés de manière systématique. Les quelques résultats des bétons de laboratoire et d'autres mandats externes semblent indiquer que leur influence serait plutôt moindre. Mais il n'y a pas assez de données pour tirer des conclusions fondées.
- Il n'existe pas de relation entre la résistance aux chlorures et les autres paramètres du matériau (p.ex. facteur e/c ou e/L, la porosité, la résistance à la compression) valable pour toutes les sortes de béton. Les paramètres du matériau fournissent uniquement des indications approximatives.
- La résistance aux chlorures s'améliore en règle générale avec l'âge du béton. Les bétons d'ouvrage examinés possèdent une résistance aux chlorures moyenne à élevée, correspondant à leur âge. L'extrapolation des valeurs actuelles aux valeurs à l'âge de 28 jours montre que ces bétons sont nettement moins performants que les bétons de laboratoire testés.

Mesure de la résistance aux chlorures

Le test ibac, la mesure de la pénétration d'eau et, dans une moindre mesure, le test de Streicher peuvent être recommandés en tant qu'essais de laboratoire de routine pour des essais préliminaires, le contrôle de qualité ainsi que l'examen des bétons d'ouvrage (critères : **tableau 7.4**). Les différents essais sont décrits dans les chapitres 3 et 5.4. Les auteurs recommandent, en tenant compte des avantages et des désavantages, d'utiliser dorénavant le test ibac pour la mesure de la résistance aux chlorures et de définir cet essai dans une norme SIA. Les considérations suivantes y ont joué un rôle important:

- La comparaison des résultats de ce travail avec ceux publiés dans la littérature démontre la bonne reproductibilité des résultats du test ibac. De plus, les résultats des bétons d'ouvrage s'y insèrent bien. C'est d'ailleurs le seul de tous les essais étudiés qui fournit un paramètre utilisable pour les modèles de simulation et de pronostic de l'évolution de l'état et des calculs de durée de vie. Enfin il y a une certaine chance que cet essai soit normé dans le cadre d'une norme EN.
- La mesure de la pénétration d'eau a le grand avantage d'être un essai normé (norme SIA 162/1, essai no 5) dont les détails importants sont réglés. Néanmoins il reste incertain dans quelle mesure elle reflète correctement l'influence des ajouts de béton sur la résistance aux chlorures. De plus, des questions concernant la mise en oeuvre de l'essai sont ouvertes (étanchéifier les surfaces latérales des éprouvettes ou non ?). Cet essai n'a pratiquement aucune chance en tant qu'essai normé au niveau européen. Certaines réserves sont donc à émettre concernant la pénétration d'eau en tant que paramètre de mesure pour la résistance aux chlorures. Des investigations supplémentaires seraient alors nécessaires.
- Le test de Streicher ne fournit pas non plus de coefficient de diffusion, mais possède l'avantage qu'il peut être employé sur des éprouvettes déjà contaminées par des chlorures. Les résultats obtenus semblent indiquer qu'il serait plus sélectif que le test ibac pour des bétons à haute résistance aux chlorures, mais sa mise en oeuvre est plus délicate. Cette méthode pourra être utile pour l'évaluation des ouvrages contaminés par des chlorures. Mais elle n'a pratiquement aucune chance en tant qu'essai normé au niveau européen.
- La concordance des résultats du test ibac avec les données publiées est nettement meilleure que celle du test de Streicher (et du test rapide ASTM). Les différences observées des résultats du test ASTM proviennent probablement des différences de procédés analytiques. Des recherches supplémentaires seraient nécessaires pour les expliquer.

- La perméabilité aux gaz et l'essai d'absorption d'eau ne peuvent pas être recommandés sur la base des résultats obtenus pour la caractérisation de la résistance aux chlorures (**tableaux 7.3 et 7.4**).

Age du béton au moment de l'essai

L'âge du béton pour la mesure devrait être fixé en principe à 28 jours. Pour des ouvrages de grande envergure ou importants avec de très hautes exigences de durabilité, en particulier en matière de résistance aux chlorures, et pour lesquels des bétons avec des ciments Portland composés (ciment Portland avec cendres volantes, laitier ou fumée de silice) ou avec des ajouts sont employés, il convient d'effectuer dans le cadre des essais préliminaires des mesures à un âge plus avancé (p.ex. après 90 jours).

L'amélioration de la résistance aux chlorures avec l'âge du béton est en principe positive et procure une certaine réserve pour les incertitudes lors de la mise en oeuvre du béton. Il ne faudrait donc pas entamer cette réserve en effectuant les mesures sur un béton plus âgé.

Bétons à haute résistance aux chlorures

La comparaison des résultats des mesures effectuées sur des bétons de laboratoire avec ceux des mesures effectuées sur des ouvrages montre que les exigences de résistance aux chlorures des bétons de nouveaux ouvrages doivent être fixées à un niveau assez élevé pour obtenir une durabilité suffisante (**tableau Z.1**).

Classe d'exposition selon SN EN 206-1:2000		Enrobage	
		40 bis 50mm	70 bis 80mm
Type de sollicitation		Valeurs isolées admises du coefficient de migration, m ² /s	
XD 1	Brouillard salin	≤20 10 ⁻¹²	pas d'exigences (≤40 bis 60 10 ⁻¹²)
XD 2	Contact permanent avec de l'eau contenant des chlorures	Pas d'indications par manque d'expérience (recommandation: comme XD 3)	
XD 3	Projections ou contact avec de l'eau contenant des chlorures (en alternance)	≤10 10 ⁻¹²	≤20 bis 30 10 ⁻¹²

Table Z.1: Recommandation pour des valeurs isolées admises du coefficient de migration mesuré au moyen du test ibac à l'âge de 28 jours pour les classes d'exposition XD (corrosion provoquée par les chlorures).

Afin d'obtenir en pratique les valeurs isolées admises du **tableau Z.1**, il faut tenir compte de la dispersion analytique et de l'inhomogénéité du matériau. De ce fait la valeur moyenne ciblée doit être réduite d'un tiers.

Une résistance aux chlorures élevée à très élevée peut être obtenue par :

- la réduction du facteur e/c (≤ 0.4)
- pour les facteurs e/L entre 0.4 et 0.5 par l'ajout
 - de fumée de silice, même à faible dosage de 7%-masse de la teneur en ciment

- de cendres volantes à plutôt haut dosage (supérieur à environ 30%-masse) ou de laitier (env. 60%-masse)
- ou des ciments Portland composés correspondants

L'influence favorable des cendres volantes et du laitier souvent décrite dans la littérature ne s'est confirmée que partiellement. L'effet de ces deux ajouts de béton ne dépend pas seulement du dosage, mais de divers autres facteurs comme p.ex. leur réactivité, le mode d'addition (ajout à la mouture ou au mélange à l'usine de ciment, ajout au béton), le facteur e/L, évtl. la sorte de ciment et sa classe de résistance ainsi que d'éventuelles interactions entre ciment, additifs et ajouts (granulométries). Les essais préliminaires sont donc impératifs.

Des lacunes subsistent dans différents domaines malgré les investigations étendues réalisées jusqu'à présent. Des travaux de recherches supplémentaires sont nécessaires tant pour les nouvelles constructions que pour la remise en état des ouvrages en béton armé, afin de disposer d'expériences suffisantes si l'on veut atteindre le but d'une „maintenance zéro“. A ce propos certaines indications figurent dans le **chapitre 8**.

Les conclusions du **chapitre 9** contiennent quelques recommandations pour la pratique.

Dr. F. Hunkeler, Dr. Ch. Merz und H. Ungricht, TFB, Wildegg

Rapport VSS Nr. 568, November 2002

Le rapport complet peut être commandé au VSS, Seefeldstrasse 9, 8008 Zürich.