

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie
und Kommunikation
Bundesamt für Strassen

Vergleichende Untersuchungen zum Chloridwiderstand von Betonen

**Etudes comparatives de la résistance aux chlorures
des bétons**

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

**Forschungsauftrag Nr. AGB 1998/097 auf Antrag der
Arbeitsgruppe Brückenforschung**

November 2002

Vorwort

Viele Stahlbetonbauten weisen heute Schäden infolge Bewehrungskorrosion auf und müssen mit grossem finanziellen und technischen Aufwand instand gesetzt werden. Dies hat weltweit vielfältige Forschungsaktivitäten ausgelöst. Einerseits werden dauerhaftere und wirtschaftlichere Instandsetzungsverfahren gesucht. Andererseits geht es um die Frage der wirtschaftlichsten Massnahmen bei Neubauten.

Seit einigen Jahren werden zunehmend nicht nur die Kosten für die Erstinvestition, sondern sämtliche Kosten eines Bauwerkes (inkl. Benutzerkosten) über die gesamte Nutzungsdauer betrachtet und bewertet (Lebensdauer-Kosten, life-cycle costs, LCC). Diese Art der Kosten-Nutzen-Analyse kann die Bewertung der Kosten von einzelnen Massnahmen im Rahmen des Neubaus wie auch der Instandsetzung deutlich beeinflussen. Deshalb werden zunehmend dauerhaftere Materialien und Verfahren bzw. Massnahmen gefordert, um Bauten zu erstellen, die praktisch keinen oder nur einen sehr geringen Unterhalt benötigen („Null-Unterhalt“, „Zero-Maintenance“). In der Schweiz hat sich eine Arbeitsgruppe des Bundesamtes für Strassen (ASTRA) intensiv mit diesen Fragen beschäftigt und im Bericht „Substanzerhaltung der Nationalstrassenwerke“ den Handlungsbedarf aufgezeigt. Bei der „Null-Unterhalt-Methode“ können erhöhte Erstinvestitionskosten in Kauf genommen werden.

Eine der Hauptursachen für Schäden bei Verkehrsbauten ist die chloridinduzierte Bewehrungskorrosion. Beim Eintrag der Chloride in den Beton spielen die Art der Exposition der Bauteile oder Bauwerke und der Widerstand des Betons gegen den Chlorideintrag, der so genannte **Chloridwiderstand**, eine entscheidende Rolle.

Die Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauten kann mit verschiedenen Massnahmen erhöht werden. Zu den wirtschaftlichsten Massnahmen zählen die Erhöhung der Betonüberdeckung der Bewehrung und der Einsatz von dichteren Betonen. Dank Betonzusatzmitteln und Betonzusatzstoffen können heute wesentlich dichtere Betone hergestellt werden als früher.

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde der Chloridwiderstand von Betonen mit und ohne Zusatzstoffe (Flugasche, Silikastaub, Hüttensand) und von Betonen aus älteren schweizerischen Bauwerken untersucht. Dabei wurden unterschiedliche Methoden zur Charakterisierung des Chloridwiderstandes von Betonen eingesetzt und deren Aussagekraft verglichen.

Aus den Ergebnissen des Forschungsprojektes konnten praktische Empfehlungen für die Zusammensetzung von Betonen mit erhöhtem Chloridwiderstand und deren Prüfung abgeleitet werden.

Die Arbeiten wurden von der Begleitkommission A (Mitglieder: M. Donzel, Dr. M. Käser, Prof. Dr. F.H. Wittmann), der Arbeitsgruppe Brückenforschung des Bundesamtes für Strassen (ASTRA) unter der Leitung von Paul Wüst begleitet.

Wildegg, im November 2002

Die Autoren

Inhaltsverzeichnis

Definitionen und Abkürzungen

Zusammenfassung	1
Résumé	5
Summary	9
1. Einleitung	13
2. Grundlagen	15
2.1 Transportmechanismen für Wasser und Chloride	15
2.2 Widerstand gegenüber chloridinduzierter Korrosion	18
2.2.1 Betonqualität: „Dichter“ Beton	19
2.2.2 Chloridbindevermögen von Zementen	22
2.2.3 Kritischer Chloridgehalt	23
2.3 Chlorideintrag in den Beton	25
2.3.1 Modelle für den zeitlichen Verlauf des Chlorideintrages	27
2.3.2 Modelle für die Dauerhaftigkeit	29
3. Verfahren zur Bestimmung des Chloridwiderstandes	31
3.1 Einleitung	31
3.2 Diffusionstests	32
3.3 Migrationstests	34
3.3.1 Allgemeines	34
3.3.2 AASTHO T277-83 / ASTM C 1202-91	37
3.3.3 Verfahren nach ibac (Tang und Nilsson)	39
3.3.4 Leitfähigkeitstest (Steicher und Alexander)	41
3.4 Aufsaugversuche	42
4. Einflussfaktoren auf den Chloridwiderstand (Literaturrecherche)	43
4.1 Zementart und -gehalt sowie Betonzusatzstoffe und -mittel	43
4.2 Wasser/Zement-Wert (w/z-Wert) bzw. Wasser/Bindemittel-Wert (w/B-Wert)	48
4.3 Druckfestigkeit	51
4.4 Alter des Betons	56
4.5 Temperatur	59
4.6 Nachbehandlung	66
4.7 Betonfeuchtigkeit	67
4.8 Oberflächenkonzentration	67
4.9 Art und Konzentration des Salzes	68
4.10 Karbonatisierung	68
4.11 Korrelation zwischen verschiedenen Kenngrößen des Chloridwiderstandes	69
4.12 Kommentar zu einigen Verfahren	79
4.13 Kriterien zur Klassierung von Beton	83
4.14 Beurteilung der verschiedenen Verfahren zur Bestimmung des Chloridwiderstandes	85

5.	Untersuchungsprogramm	87
5.1	Allgemeines Vorgehen	87
5.2	Untersuchte Laborbetone	88
	5.2.1 Im Rahmen des Forschungsprojektes hergestellte Laborbetone	88
	5.2.2 Betone aus Drittprojekten	90
5.3	Bauwerksbetone	93
5.4	Prüfprogramm	96
6.	Untersuchungsergebnisse	98
6.1	Laborbetone	98
	6.1.1 Betoneigenschaften und ihre Entwicklung mit dem Betonalter	98
	6.1.2 Vergleich des Einflusses von Betonzusatzstoffen	103
	6.1.3 Einfluss des w/z-Wertes	105
	6.1.4 Zusammenfassung der Resultate	107
	6.1.5 Korrelationen zwischen den einzelnen Betoneigenschaften	109
6.2	Bauwerksbetone	115
6.3	Aufsaugversuche	118
	6.3.1 Aufsaugversuche und Wasserleitfähigkeit im Vergleich	118
	6.3.2 Chloridprofile	121
	6.3.3 Auswertung	123
	6.3.4 Vergleich zu den Chloridprofilen aus den Bauwerken	127
	6.3.5 Folgerungen aus den Aufsaugversuchen	128
7.	Diskussion der Ergebnisse	130
7.1	Vergleich der Einflussfaktoren mit Literaturergebnissen	130
	7.1.1 Zementart und Betonzusatzstoffe	130
	7.1.2 w/z- und w/B-Wert	134
	7.1.3 Druckfestigkeit	138
	7.1.4 Alter der Proben	142
	7.1.5 Vergleich zu den Resultaten von Lunk	142
	7.1.6 Zusammenfassung	143
7.2	Vergleich und Beurteilung der Messverfahren zur Bestimmung des Chloridwiderstandes	145
7.3	Korrelation zwischen den verschiedenen Verfahren zur Bestimmung des Chloridwiderstandes mit materialtechnologischen Kenngrößen	154
7.4	Vergleich der Bauwerksbetone mit Laborbetonen, Übertragbarkeit der Resultate	156
7.5	Anforderungen an Beton für Bauteile mit hohem Chloridwiderstand	160
8.	Weiterer Forschungsbedarf	166
9.	Empfehlungen für die Praxis	167
	Literaturverzeichnis	169

Anhänge

Anhang 1: Zusammenstellung der Resultate

Anhang 2: Lineare Korrelationskoeffizienten der verschiedenen Korrelationen

Definitionen und Abkürzungen

Definitionen

Chloridwiderstand	Widerstand des Betons gegen von Aussen eindringende Chloride
Kenngrossen für den Chloridwiderstand	Materialkenngrossen (Werte aus Prüfungen) zur Charakterisierung des Chloridwiderstandes
Diffusion	Bewegung von Gasen oder Ionen infolge eines Druck- oder Konzentrationesgradienten
Kapillares Saugen	Aufnahme und Transport von Wasser (Flüssigkeiten) infolge Adsorption und/oder Kapillarkondensation
Migration	Bewegung von Ionen infolge einer elektrischen Gleichspannung

Abkürzungen

B	Gesamter Bindemittelgehalt, d.h. Summe von Zement und Betonzusatzstoffen
MS	Silikastaub
FA	Flugasche
HS	Hüttensand
PC	Portlandzement
k	k-Wert zur Berechnung von w/z_{eq} $k = 0.4$ für Flugasche, $k = 1.0$ für Silikastaub und Hüttensand
M.%/Z	Gehaltsangabe in Massenprozent bezogen auf den Zementgehalt
M.%/B	Gehaltsangabe in Massenprozent bezogen auf den Beton
w/z	Wasser-Zement-Wert
w/z_{eq}	Äquivalenter Wasser-Zement-Wert; $z_{eq} = \text{Zement} + k \text{ B}$; $k = k\text{-Wert (Konstante)}$
w/B	Wasser-Bindemittel-Wert

Zusammenfassung

Mit dem Forschungsprojekt wurden drei Ziele verfolgt:

- Vergleich der möglichen Prüfungen zur Charakterisierung des Widerstandes von Beton gegen von aussen eindringende Chloridionen, des so genannten **Chloridwiderstandes**.
- Validierung der Ergebnisse an Laborbetonen mit Betonproben aus älteren chloridbelasteten Betonbauten.
- Erarbeiten von Empfehlungen für die Prüfung und die zugehörigen Kriterien zur Beurteilung des Chloridwiderstandes von Betonen als Grundlage für eine SIA-Norm.

Im Rahmen des Projektes wurden sehr umfangreiche Untersuchungen zum Chloridwiderstand von Betonen mit und ohne Betonzusatzstoffe durchgeführt. Diese haben eine Reihe wichtiger Erkenntnisse gebracht und teilweise bekannte Zusammenhänge aus der Literatur bestätigt. Es wurden folgende Betonsorten untersucht:

- Normalbetone (Betone mit Portlandzement, ohne Betonzusatzstoffe)
- Betone mit Flugasche
- Betone mit Silikastaub
- Betone mit Hüttensand

Neben diesen Laborbetonen wurden ergänzend Betone aus Drittprojekten und Betone aus verschiedenen Bauwerken geprüft. Zur möglichen Charakterisierung des Chloridwiderstandes von Betonen wurden die folgenden Prüfverfahren eingesetzt (in Klammer: Kenngrösse des Verfahrens):

- ASTM-Test gemäss AASTHO T259-80 (elektrische Ladungsmenge)
- ibac- oder CTH-Test (Chloridmigrationskoeffizient oder kurz Migrationskoeffizient)
- Streicher-Test (elektrische Leitfähigkeit)
- Gaspermeabilität (Permeabilitätskonstante)
- Wasserleitfähigkeitsprüfung gemäss Norm SIA 162/1, Prüfung Nr. 5 mit Modifikation VPL (Wasserleitfähigkeit)
- Wasseraufsaugversuch (Chloridgehalt oder Chloridanreicherung)

In den folgenden Abschnitten sind die wichtigsten Ergebnisse der Untersuchung zusammengefasst.

Materialtechnologische Einflüsse

- Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Betonzusammensetzung, vorab der Wasser-Zement-Wert (w/z) bzw. Wasser-Bindemittel-Wert (w/B) sowie die Art und der Gehalt der Betonzusatzstoffe den Chloridwiderstand wesentlich bestimmen.
- Dem Einfluss des Bindemittelgehaltes, des Grösstkorns und der Zusatzmittel wurde nicht systematisch nachgegangen. Er ist eher als gering einzuschätzen, wie der Vergleich der wenigen Daten von Laborbetonen und von Betonen von Drittprojekten ergab. Die Datenmenge ist aber zu gering, um hierzu eine gesicherte Aussage zu machen.
- Zwischen dem Chloridwiderstand und anderen materialtechnologischen Parametern (z.B. w/z- oder w/B-Wert, Porosität, Druckfestigkeit) konnte keine für alle Betonarten gültige Beziehung gefunden werden. Die Materialparameter geben lediglich einen groben Hinweis.

- Der Chloridwiderstand verbessert sich in der Regel mit dem Alter. Die untersuchten Bauwerksbetone weisen entsprechend ihrem Alter einen mittleren bis hohen Widerstand auf. Rechnet man die aktuellen Werte aber auf die 28-Tage-Werte zurück, schneiden sie deutlich schlechter ab als die untersuchten Laborbetone.

Bestimmung des Chloridwiderstandes

Als routinemässige Laborprüfung für die Eignungsprüfung und für die Qualitätssicherung von Betonen wie auch für die Untersuchung von Bauwerksproben können der ibac-Test, die Bestimmung der Wasserleitfähigkeit und in vermindertem Masse auch der Streicher-Test grundsätzlich empfohlen werden (Kriterien: **Tabelle 7.4**). Die verschiedenen Prüfungen sind in **Kap. 3 und 5.4** beschrieben. Nach dem Abwägen der Vor- und Nachteile empfiehlt die Forschungsstelle, in Zukunft den ibac-Test zur Bestimmung des Chloridwiderstandes zu verwenden und dieses Verfahren in einer SIA-Norm zu regeln. Folgende Überlegungen waren dabei von Bedeutung:

- Das ibac-Verfahren ergibt gut reproduzierbare Resultate, wie der Vergleich der Ergebnisse dieser Arbeit mit jenen aus der Literatur gezeigt hat. Auch die Resultate von Bauwerksbetonen können gut eingeordnet werden. Zudem liefert sie als einzige der untersuchten Prüfverfahren eine für die Simulation und für die Prognose der Zustandsentwicklung wie auch für Lebensdauerberechnungen brauchbare Kenngrösse. Es besteht zudem eine gewisse Chance, dass dieses Verfahren in einer EN-Norm genormt wird.
- Der grosse Vorteil der Bestimmung der Wasserleitfähigkeit ist, dass diese Prüfung als SIA-Norm (Norm SIA 162/1, Prüfung Nr. 5) bekannt ist und wichtige Details geregelt sind. Unklar ist allerdings, wie weit der Einfluss von Betonzusatzstoffen auf den Chloridwiderstand richtig erfasst wird. Es ergaben sich auch Fragen zur Versuchsanordnung (z.B. Mantelfläche abdichten oder nicht?). Die Prüfung hat als europäische Norm kaum eine Chance. Als Kenngrösse für den Chloridwiderstand erscheint die Wasserleitfähigkeit deshalb nur bedingt bzw. nicht geeignet. Weitere Untersuchungen wären hier erforderlich.
- Der Streicher-Test liefert zwar keinen Diffusionskoeffizienten, hat aber den Vorteil, dass er auch bei chloridhaltigen Betonproben eingesetzt werden kann. Bei Betonen mit hohem Chloridwiderstand scheint er auf Grund der vorhandenen Daten eher etwas empfindlicher zu sein als der ibac-Test, ist aber bei der Durchführung heikler. Für die Beurteilung von bestehenden, chloridbelasteten Bauteilen könnte diese Methode nützlich sein. Die Methode hat aber kaum eine Chance als genormtes Verfahren in Europa.
- Mit dem ibac-Test konnte im Vergleich zum Streicher-Test (und ASTM-Schnelltest) eine weit bessere Übereinstimmung mit publizierten Daten festgestellt werden. Beim ASTM-Test sind die beobachteten systematischen Abweichungen vermutlich auf verfahrenstechnische Unterschiede zurückzuführen. Weitere Untersuchungen wären hier erforderlich.
- Die Gaspermeabilität und der Wasseraufsaugversuch können auf Grund der Ergebnisse nicht zur Charakterisierung des Chloridwiderstandes empfohlen werden (**Tabellen 7.3 und 7.4**).

Prüftermin

Der Zeitpunkt der Prüfung sollte grundsätzlich auf 28 Tagen festgelegt werden. Für wichtige oder grosse Bauwerke, bei denen sehr hohe Anforderungen an die Dauerhaftigkeit, insbesondere an den Chloridwiderstand, gestellt und Betone mit Mischzementen (Portlandzement mit Hüttensand, Flugasche, Silikastaub) oder Betonzusatzstoffen verwendet werden, sollten im Rahmen der Vorversuche auch zu einem späteren Zeitpunkt Prüfungen (z.B. nach 90 Tagen) durchgeführt werden.

Die Verbesserung des Chloridwiderstandes von Betonen mit dem Alter ist grundsätzlich positiv und ergibt eine gewisse Reserve für die Unsicherheiten bei der Ausführung. Diese Reserve sollte deshalb nicht durch einen sehr späten Prüftermin aufgebraucht werden.

Betone mit hohem Chloridwiderstand

Der Vergleich der Resultate von den Laborbetonen mit den Ergebnissen der Untersuchungen an Bauwerken zeigt, dass die Anforderungen an den Chloridwiderstand von Betonen für neue Bauwerke eher hoch angesetzt werden müssen, um eine ausreichende Dauerhaftigkeit zu erzielen (**Tabelle Z.1**).

Expositionsklasse gemäss SN EN 206-1:2000		Überdeckung	
		40 bis 50mm	70 bis 80mm
Art der Beanspruchung:		Zulässige Einzelwerte für den Migrationskoeffizienten, m ² /s	
XD 1	chloridhaltiger Sprühnebel	$\leq 20 \cdot 10^{-12}$	keine Anforderung (≤ 40 bis $60 \cdot 10^{-12}$)
XD 2	dauernder Kontakt mit chloridhaltigem Wasser	keine Angaben wegen mangelnder Erfahrung (Empfehlung: wie XD 3)	
XD 3	chloridhaltiges Spritzwasser oder Kontaktwasser (wechselnd)	$\leq 10 \cdot 10^{-12}$	≤ 20 bis $30 \cdot 10^{-12}$

Tabelle Z.1: Empfehlung für zulässige Einzelwerte für den mittels ibac-Test ermittelten 28-Tage-Migrationskoeffizienten von Beton für die Expositionsklasse XD (Korrosion ausgelöst durch Chloride).

Damit die in der **Tabelle Z.1** angegebenen zulässigen Einzelwerte in der Praxis erreicht werden, müssen die prüftechnische und die Materialstreuung berücksichtigt werden. Der anzustrebende Mittelwert muss deshalb um etwa 1/3 reduziert werden.

Ein hoher bis sehr hoher Chloridwiderstand kann erreicht werden durch:

- Reduktion des w/z-Wertes (≤ 0.4)
- bei w/B-Werten zwischen etwa 0.4 und 0.5 durch Zugabe von
 - Silikastaub, auch in geringer Dosierung von 7M.% bezogen auf den Zementgehalt
 - eher hohen Gehalten an Flugasche (über etwa 30M.%) oder Hüttensand (etwa 60M.%)
 - oder entsprechende Mischzemente

Der in der Literatur oft beschriebene günstige Einfluss von Flugasche und Hüttensand konnte in dieser Arbeit nur teilweise bestätigt werden. Die Wirkung dieser beiden Betonzusatzstoffe hängt nicht nur von der Dosierung ab, sondern von verschiedenen anderen Faktoren, wie z.B. von deren Reaktivität, von der Art der Zugabe (Zumahlen oder Zumischen im Zementwerk, oder Zugabe zum Beton), vom w/B-Wert, evtl. von der Zementart und -festigkeitsklasse sowie von allfälligen Wechselwirkungen zwischen Zement, Betonzusatzmitten und Betonzusatzstoffen (Korngrößenverteilung). Entsprechende Vorversuche sind deshalb zwingend.

Trotz der bisher durchgeführten umfangreichen Untersuchungen sind in verschiedenen Themenbereichen nach wie vor Wissenslücken vorhanden. Weitere Forschungsarbeiten sind notwendig, um sowohl für Neubauten wie auch für Instandsetzungen von Stahlbetonbauten ausreichende Kenntnisse und Erfahrungen zu haben und, um dem Ziel des „Null-Unterhaltes“ näher zu kommen. Im **Kapitel 8** werden dazu einige Hinweise gegeben.

Das abschliessende **Kapitel 9** enthält einige Empfehlungen für die Praxis.

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	$\leq 20 \cdot 10^{-12}$	pas d'exigences (≤ 40 bis $60 \cdot 10^{-12}$)
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)	$\leq 10 \cdot 10^{-12}$	≤ 20 bis $30 \cdot 10^{-12}$

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 **chapître 8**.

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

Summary

This research project had the following three goals:

- Comparison of the possible tests to characterise the resistance of concrete against chloride ions penetrating from the outside, the so called **chloride resistance**.
- Validation of the results of the laboratory concrete mixes with samples taken from older existing concrete structures exposed to chloride attack.
- Elaboration of recommendations for the testing and for the corresponding criteria for the assessment of the chloride resistance of concrete as a base for a SIA testing standard.

Within this project very extensive investigations have been carried out on the chloride resistance of a variety of concrete mixes with and without mineral admixtures. These led a wealth of knowledge and relations, partly known from the literature, could be confirmed. The following concrete mixes have been investigated:

- Common types of concrete (concrete with Portland cement, without mineral admixtures).
- Concrete mixes with fly ash
- Concrete mixes with silica fume
- Concrete mixes with ground granulated blast furnace slag.

Besides these laboratory mixes additionally concrete from other projects and specimens from existing concrete structures have been tested. The following tests have been used to characterise the chloride resistance of concrete (in parenthesis: of the test):

- ASTM-test according to AASTHO T259-80 (amount of electrical charge passed)
- ibac- or CTH-test (chloride migration coefficient)
- Streicher-test (electrical conductivity)
- gas permeability (permeability constant)
- water conductivity test according to the SIA testing standard SIA 162/1, test No. 5 with the modification of VPL (water conductivity)
- water suction test (chloride content or chloride enrichment)

In the following paragraphs the most important results of this study are summarised.

Influence of material parameters

- The investigation has shown that the composition of the concrete, especially the water to cement ration (w/c) and the water to binder ratio (w/B), respectively, as well as the type and content of the mineral admixture mainly determine the chloride resistance.
- The influence of the binder content, the maximum grain size of the aggregate and the chemical admixtures (superplasticizer) has not been systematically studied. It is rather small as it could be concluded from the comparison of the few data of the laboratory concrete mixes and from the concrete mixes of other projects. But, the number of results is too small and does not allow a sound finding.

- Between the chloride resistance and the other material parameters (e.g. w/c or w/B-ratio, porosity, compressive strength) no general relation which is valid for all types of concrete could be found. The materials parameters may give some guidance.
- Generally, the chloride resistance increases with the age of the concrete. According to their age the samples from existing concrete structures showed a moderate to high chloride resistance. But, the 28-days-values of the chloride resistance, calculated back from the actual values, are significant lower than those of the laboratory concrete mixes.

Determination of the chloride resistance

The ibac-test, the water conductivity test and, to a somewhat lower extent, the Streicher-test can be recommended as routine laboratory tests for the initial testing and the quality assurance of concrete as well as for the investigation of the concrete of existing structures (criteria: **Table 7.4**). The different tests are described in the **chapter 3 und 5.4**. After the evaluation of the various advantages and disadvantages the research group recommends to use the ibac-test to determine the chloride resistance in the future and to elaborate an SIA testing standard for this method. The following considerations have been of importance for this conclusion:

- The ibac-test reveals well reproducible results as the comparison of the results of this study with those of the literature showed. The results of concrete from existing structures go well together with those results. Additionally, this is the only one of the methods studied which provides a characteristic value for the simulation and the forecast of the development of the state conditions of structures as well as for the life cycle assessment. There is, further, a good chance that this test will be standardised as an EN standard.
- The main advantage of the water conductivity test is that this method is well known as SIA standard (SIA 162/1, test no. 5) and the important elements of the test procedure are regulated. It is unclear, however, how far the influence of the mineral admixtures is correctly determined and questions to the test procedure remained open (covering the side surfaces of the specimens or not?). This test has practically no chance to be published as an EN standard. Therefore, the water conductivity is limited or not suitable as a characteristic value of the chloride resistance of concrete. Further investigations would have to be carried out.
- The Streicher-test provides indeed no diffusion coefficient, but this test has the advantage that it can be used for chloride contaminated concrete. For concrete mixes with a very high chloride resistance this test seems to be more sensitive than the ibac-test, but its execution is more difficult. This method may be useful for the assessment of existing concrete structures exposed to chloride attack. But, it has practically no chance as an European test standard.
- Compared to the Streicher-test (and ASTM-test) the results of the ibac-test corresponded much better with the literature data. The systematic deviations of the results of the ASTM-test are probably caused by differences of the test procedures. Further work would be necessary.
- On the basis of the results of this study the gas permeability and the water suction can not be recommended to characterise the chloride resistance of concrete (**Table 7.3 and 7.4**).

Testing age

The time of testing should basically be fixed to 28 days. For important or large structures with very high requirements on the durability, especially on the chloride resistance, and for which concrete with blended cements (e.g. Portland cement with slag or fly ash) or with mineral admixtures are used, tests at a higher age (e.g. 90 days) should be carried out during the evaluation phase.

The improvement of the chloride resistance of concrete with the age is positive and provides a certain safety factor for the uncertainties of the execution. This safety factor should, therefore, not be consumed by a higher testing age.

Concrete with a high chloride resistance

The comparison of the results of laboratory concrete mixes with those of the investigations of existing concrete structures showed that the requirements on the chloride resistance has to be fixed on a rather high level in order to achieve a sufficient durability (**Table Z.1**).

Exposure class according to SN EN 206-1:2000		Concrete cover	
		40 to 50mm	70 to 80mm
Description of the environment:		Admissible single values of the migration coefficient, m ² /s	
XD 1	Contact with airborne chlorides	$\leq 20 \cdot 10^{-12}$	no requirement (≤ 40 bis $60 \cdot 10^{-12}$)
XD 2	Permanent contact with chloride containing water	No provisions because of the lack of experience (recommandation: as XD 3)	
XD 3	Contact with spray water with chlo- rides	$\leq 10 \cdot 10^{-12}$	≤ 20 bis $30 \cdot 10^{-12}$

Table Z.1: Recommendations for admissible single values of the 28-days-migration coefficient of concrete for the exposure class XD (chloride induced corrosion).

In order to reach the admissible single values given in **table Z.1** under practical conditions the scatter of the testing and material has to be considered. The target average value has, therefore, to be reduced by approximately 1/3.

A high to a very high chloride resistance may be achieved by:

- reduction of the w/c-ratio (≤ 0.40).
- for w/B-ratios between app. 0.4 and 0.5 by the addition of
 - silica fume, already at a low content of 7M.% related to the cement content
 - rather high contents of fly ash (over app. 30M.%) or slag (app. 60M.%)
 - or corresponding blended cement types

The positive influence of fly ash and slag often found in the literature could only partly be confirmed in this study. The effect of these two mineral admixtures depends not only on the content but also on various other factors as e.g. on the reactivity, on the source and type of addition (addition to the clinker milling process or admix to the cement in the cement kilns or addition to concrete mix), on the w/B-ratio, eventually on the cement type and cement strength class as well as on the possible interactions between cement, chemical and mineral admixtures (e.g. grain size distribution). In any case appropriate qualification tests have to be carried out in advance.

Although very extensive investigations have been executed so far there is still a lack of knowledge in some areas. Further research work is needed in order to have sufficient knowledge and experience for new construction as well as for the rehabilitation of concrete structures and to reach the goal of zero-maintenance. In **chapter 8** some topics for further research are listed.

Some practical recommendations are given in **chapter 9**.