



Vergleichende Untersuchungen zum Chloridwiderstand von Betonen

Etudes comparatives de la résistance aux chlorures des bétons

Dieses pdf-File wurde nachträglich erstellt (Bilder aus der Literatur eingefügt). Es kann sein, dass der Seitenumbruch nicht ganz identisch ist mit der gedruckten Fassung von 2002.

Wildegg, 28.11.2009

Dr. Fritz Hunkeler

TFB, Wildegg
Technische Forschung und Beratung für Zement und Beton
Dr. F. Hunkeler, dipl. Werkstoffing. ETH
H. Ungricht, dipl. Bauing. ETH
CH. Merz, dipl. Geol., Dr ès sc.

Forschungsauftrag AGB 1998/097 (82/98) auf Antrag der
Arbeitsgruppe Brückenforschung (AGB)

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen beauftragten Autor(en).
Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que l' (les) auteur(s) mandaté(s) par l'Office fédéral des routes.
Diffusion: Association suisse des professionnels de la route et du trafic (VSS)

Il contenuto di questo rapporto impegna solamente l' (gli) autore(i) designato(i) dall' Ufficio federale delle strade.
Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e del traffico (VSS)

The content of this report engages only the author(s) appointed by the Swiss federal roads authority.
Supply: Swiss association of road and traffic experts (VSS)

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**

Dieses pdf-File wurde nachträglich erstellt (Bilder aus der Literatur eingefügt). Es kann sein, dass der Seitenumbruch nicht ganz identisch ist mit der gedruckten Fassung von 2002.

Wildegg, 28.11.2009

Dr. Fritz Hunkeler

**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	Description of the environment:	Concrete cover	
		40 to 50mm	70 to 80mm
		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 chlorides	$\leq 10 \cdot 10^{-12}$	≤ 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**.

1. Einleitung

Eine der wichtigsten Schadenursachen an Bauwerken im Strassenwesen ist die Korrosion der Bewehrung, welche durch eindringende Chloride ausgelöst wird. Bei mangelhafter Überdeckung und/oder geringer Dichtigkeit des Deckbetons können schon nach kurzer Zeit Schäden eintreten. Da Instandsetzungsarbeiten immer kostspieliger werden und mit dem steigenden Verkehrsvolumen verkehrstechnisch immer schwieriger zu bewältigen sind, werden Bauwerke mit erhöhter Dauerhaftigkeit gefordert. So werden vom ASTRA die Möglichkeiten, wie eine Nutzungsdauer von 100 Jahren ohne grösseren Unterhalt zu erreichen ist, diskutiert und angestrebt (sogenannte Nullunterhaltsstrategien) [TFB 2001].

Die unterhaltsfreie Nutzungsdauer von Stahlbetonbauten wird massgeblich durch den Zeitpunkt der Initiierung der chloridinduzierten Korrosion und die Geschwindigkeit des Korrosionsprozesses beeinflusst. Die Dauerhaftigkeit wird damit bestimmt durch die Art und das Ausmass der Umwelteinflüsse, denen Beton ausgesetzt ist, bzw. welchen Widerstand der Beton diesen Einflüssen entgegen setzt.

Um die Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauten in Bezug auf Korrosionsschäden zu gewährleisten, können verschiedene Massnahmen getroffen werden. Neben der Erhöhung der Überdeckung, wird vor allem auch über die Betonrezeptur eine höhere Dichtigkeit des Betons angestrebt. Dank materialtechnologischer Massnahmen wie Einsatz von Betonzusatzmitteln und Betonzusatzstoffen können heute Betone hergestellt werden, die sich durch erhöhte mechanische Eigenschaften und verringerte Durchlässigkeiten (dichteres Betongefüge) und eine entsprechend höhere Dauerhaftigkeit auszeichnen.

Bei korrosionsgefährdeten Bauwerken stellt der Widerstand gegenüber eindringenden Chloriden sicher eine der wichtigsten Eigenschaften dar. Diese Eigenschaft wird im Folgenden abgekürzt „**Chloridwiderstand**“ genannt.

Weltweit werden verschiedenste Prüfverfahren zur Bestimmung des Chloridwiderstandes eingesetzt. Dabei kommen prinzipiell folgende Methoden zum Zuge:

- *Diffusionstest*: Diffusion von Chloridionen durch einen Prüfkörper hindurch zum Konzentrationsausgleich zwischen einer chloridhaltigen und einer chloridfreien Lösung. Bestimmung der Chloriddiffusionskoeffizienten aus den ermittelten Konzentrationsänderungen oder aus den Chloridprofilen.
- *Migrationstest*: Der Chlorideintrag bzw. der Konzentrationsausgleich durch die langsame Diffusion von Chloriden wird durch das Anlegen einer elektrischen Spannung beschleunigt. Anstelle der Diffusion tritt der durch die elektrische Spannung ausgelöste Ionentransport (Migration). Aus den so erzeugten Chloridprofilen oder aus dem zeitlichen Verlauf der Konzentrationsänderungen lassen sich Chloridmigrationskoeffizienten berechnen.
- *Aufsaugversuche* von Salzlösungen und Bestimmung der Chloridprofile.

Die Zweckmässigkeit dieser Messverfahren wird kontrovers diskutiert und es fehlen bis heute allgemein anerkannte Messverfahren. Dies veranlasste 1997 die RILEM, ein Arbeitsprogramm zum Thema Testverfahren und Modellentwicklung für den Chlorideintrag in den Beton zu verabschieden (TMC Testing and Modelling Chloride Penetration in Concrete; Leitung C. Andrade, Spanien).

Eine weitere Möglichkeit den Chloridwiderstand eines Betons zu beurteilen, bietet die Messung der *Wasser- oder Gaspermeabilität*. Diese Messungen erlauben eine allgemeine Aussage über die Dichtigkeit des Betons.

Die aus den verschiedenen Versuchen berechneten Kenngrössen, wie z.B. Chlorid- oder Migrationskoeffizienten aus Diffusions- oder Migrationstests, hängen meist nicht nur vom mathematischen Auswertungsmodell ab, sondern auch von den Details der Prüfanordnung. Direkte Vergleiche zwischen den einzelnen Werten und Methoden sind deshalb oft schwierig.

Es stellt sich damit die grundsätzliche Frage, ob für die Beurteilung des Chloridwiderstandes langwierige Diffusionsversuche nötig sind oder ob die raschen Migrationsversuche ebenso zweckdienlich sind und inwiefern diese Verfahren eine bessere Unterscheidung verschiedener Betonsorten erlauben als einfache in der Praxis gängige Messmethoden. Letztere Frage scheint auch in Anbetracht der Schwierigkeit berechtigt, die am Bauwerk herrschenden Verhältnisse (lokale Umgebungsbedingungen, Qualität des Deckbetons und deren Veränderungen im Laufe der Zeit) genau zu umschreiben und in Modellen zu erfassen.

Der zweckmässige Einsatz von Hochleistungsbetonen erfordert sowohl bei der Planung wie bei der Ausführung ein hohes Niveau bei den betontechnologischen Kenntnissen. Neben Kostenüberlegungen spielt auch die Verarbeitbarkeit und die Fehleranfälligkeit solcher Betone eine Rolle. Deshalb sind Untersuchungen über die Zusammenhänge zwischen der Betonrezeptur und dem Chloridwiderstand und, wie mit einfachen praxistauglichen Rezepturen der Chloridwiderstand massgeblich verbessert und geprüft werden kann, von grossem Interesse.

Das effektive Verhalten der Betone am Bauwerk im Vergleich zu den Ergebnissen in Laborversuchen ist bisher nur wenig untersucht worden, so dass eine Validierung der Messverfahren weitgehend fehlt.


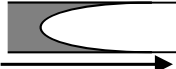
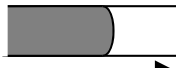
Mit dem Forschungsprojekt wurden drei Ziele verfolgt:

- An unterschiedlichen, praxistauglichen Betonsorten sollten verschiedene Methoden zur Bestimmung des Chloridwiderstandes getestet und miteinander verglichen werden. Zusätzlich wurde die Korrelation zur Gaspermeabilität und zu der in der Schweiz weit verbreiteten Prüfung der Wasserleitfähigkeit nach SIA 162/1, Prüfung Nr. 5, untersucht.
- Zur Validierung der Ergebnisse der Laborbetone sollten die Prüfverfahren auch an Betonproben aus älteren chloridbelasteten Bauwerken angewendet und die Aussagekraft der verschiedenen Verfahren bewertet werden.
- Auf der Basis der Ergebnisse sollten Empfehlungen für die Prüfung und die zugehörigen Kriterien für die Beurteilung des Chloridwiderstandes von Beton sowie die Anforderungen an Betone für dauerhafte Bauwerke unter Chlorideinwirkung formuliert werden. Dies soll als Grundlage für eine SIA-Empfehlung zu diesem Thema dienen.

2. Grundlagen

2.1 Transportmechanismen für Wasser und Chloride

Der Eintrag von Gasen wie CO_2 , Wasser oder Chloriden in und durch den Beton erfolgt durch das Porensystem der Zementsteinmatrix, entlang der Grenzfläche Zementstein/Zuschlag und durch Risse. Der Eintrag wie auch der Transport von Wasser und Schadstoffen durch ein Bauteil hindurch wird durch verschiedenartige physikalische und/oder chemische Mechanismen gesteuert (**Bild 2.1**).

Transportmechanismen im Beton		
Transportart	Treibende Kraft	Porenraum
Diffusion (Gase und Ionen)	 Konzentrationsgradient Δc Partialdruckdifferenz Δp	luftgefüllt oder wassergefüllt
Kapillares Saugen (Flüssigkeiten)	 Oberflächenspannung σ Benetzungswinkel θ	luftgefüllt
Permeation (Gase und Flüssigkeiten)	 Absolutdruckdifferenz Δp	luftgefüllt oder wassergefüllt

TransS1.cdr

Bild 2.1: Übersicht über die wichtigsten Transportmechanismen im Beton [Hunkeler 1996b].

Zur Bestimmung der Kenngrößen der verschiedenen Transportarten gibt es viele, meist nicht normierte Bestimmungsmethoden (**Kapitel 3**). Die Kenngrößen werden durch beton-technologische Parameter, wie z.B. w/z-Wert und Nachbehandlung, ähnlich beeinflusst. Deshalb wurden auch empirische Korrelationen gefunden [Hunkeler 1996b]. Theoretische Beziehungen, die eine Umrechnung erlauben, sind nur wenige vorhanden.

Kapillartransport

Durch die Wirkung der Kapillarkräfte in den Kapillarporen wird Wasser bereits bei relativen Luftfeuchtigkeiten unter 100% im Porensystem eingelagert. Dabei erfolgt die Wasseraufnahme bis zu einer relativen Luftfeuchtigkeit von ca. 40% durch Adsorption, danach zusätzlich durch Kapillarkondensation. Kapillarkräfte bewirken auch das kapillare Aufsaugen von flüssigem Wasser und gleichen unterschiedliche Betonfeuchtigkeiten aus. Mit zunehmendem Porenradius nimmt die Aufsauggeschwindigkeit zu und die maximale Steighöhe ab. Beim kapillaren Wassertransport werden auch im Wasser gelöste Gase und Ionen mittransportiert. Bei den Chloriden spricht man in diesem Zusammenhang von „Huckepack-Transport“.

Diffusion

Die treibende Kraft von Diffusionsprozessen ist bei Ionen (z.B. Chlorid) die Konzentrationsdifferenz und bei Gasen das Partialdruckgefälle im oder über ein Bauteil. Die transportierte Menge ist proportional zum Konzentrations- oder Partialdruckgefälle, zum Diffusionskoeffizienten und zur Temperatur. Mit zunehmender Betonfeuchtigkeit nimmt der Diffusionskoeffizient von Gasen,

derjenige von Chloriden dagegen nimmt zu (**Bild 2.4**). Generell nimmt er mit abnehmendem Porenraum ebenfalls ab.

Gas- und Wasserpermeabilität

Ein äusserer, auf die Bauteiloberfläche wirkender Druck bewirkt einen Gas- oder Wasserfluss (Permeation) durch das Bauteil hindurch oder in das Bauteil hinein. Der Gas- und Wasserfluss ist proportional zur Druckdifferenz und zum Permeabilitätskoeffizienten. Die Gaspermeabilität ist sehr stark von der Betonfeuchtigkeit abhängig. Sie ist in der Regel höher als die Wasserpermeabilität.

Migration

Ein äusseres (z.B. kathodischer Korrosionsschutz) oder ein inneres (bei Makroelementen) elektrisches Spannungsfeld bewirkt eine Wanderung der elektrisch geladenen Ionen im Beton. Der gesamte Ionenfluss ist von der Feldstärke und der Temperatur, und der Anteil der einzelnen Ionen am Gesamtionenfluss ist von deren Konzentration, Beweglichkeit und Ladung abhängig (Cl^- - Ionen sind rund 2.5 mal beweglicher als OH^- - Ionen).

Der Eintrag von Stoffen in den Beton oder der Transport von Stoffen durch den Beton ist in aller Regel nicht von einem einzigen Mechanismus gesteuert. Meist wirken mehrere Einflüsse und mehrere Transportmechanismen gleichzeitig neben- oder hintereinander, je nach:

- Art und Konzentration der gelösten Stoffe
- Umgebungsbedingungen (z.B. Temperatur, Feuchtigkeit, Wind, Regen)
- Porenvolumen und -struktur (Porenradius, Porenradienverteilung)
- Art, Geometrie und Anzahl von Rissen
- Wassersättigungsgrad des Betons (Verhältnis wassergefülltes zum gesamten Porenvolumen)
- Absolutdruck- bzw. Partialdruckdifferenz
- Zeit bzw. Dauer der Einwirkung
- Temperatur.

Chloride werden z.B. nur dann über reine Diffusion in den Beton eingetragen, wenn das ganze Bauteil dauernd und vollständig wassergesättigt ist. In der Praxis ist diese Situation eher selten, der Chlorideintrag erfolgt daher meistens über kapillares Saugen und Diffusion.

Wasser- und Schadstofftransport in Abhängigkeit der Betonfeuchtigkeit

Bei vielen Transportmechanismen spielt die Betonfeuchtigkeit eine wichtige Rolle. Poröse Baustoffe wie Beton und Mörtel nehmen aus der Luft Wasser auf oder geben Wasser an die Luft ab. Die Abhängigkeit des Wassergehaltes von der relativen Luftfeuchtigkeit wird durch die sogenannten Sorptionsisothermen dargestellt. Diese sind u.a. von den strukturellen Parametern des Zementsteins und von der Temperatur abhängig. Sie werden auch durch die Anwesenheit von hygroskopischen Salzen (z.B. NaCl , CaCl_2) verändert. **Bild 2.2** zeigt den Einfluss der Temperatur auf die Sorptionsisotherme eines 4 Jahre alten Betons mit einem w/z-Wert von 0.565.

Bestimmend für die Wasseraufnahme und -abgabe sind also nicht nur die strukturellen Parameter des Zementsteins (Verteilung der Porenradien und die Ausdehnung der inneren Oberfläche) sondern auch die relative Luftfeuchtigkeit (Verhältnis des Wasserdampfpartialdruckes zum Sättigungsdampfdruck) bzw. der aktuelle Wassergehalt. Dieser spielt beim Transport von Wasser, Salzen und Gasen eine wichtige Rolle.

Die **kapillare Saugfähigkeit** von Beton nimmt mit zunehmender Betonfeuchtigkeit stark ab (**Bild 2.3**). Im wassergesättigten Zustand ist der Beton nicht mehr saugfähig.

Bei der **Diffusion** von Gasen (z.B. Sauerstoff, Kohlendioxid) und Ionen (z.B. Chlorid, Hydroxid, Sulfat) wirkt sich der Wassergehalt unterschiedlich aus. Mit steigender Betonfeuchtigkeit nimmt der Diffusionskoeffizient von Gasen ab, jener von Ionen hingegen zu (**Bild 2.4**). Der Einfluss der Betonfeuchtigkeit auf den Diffusionskoeffizienten von Sauerstoff im Beton $D(O_2,C)$ kann in Anlehnung an eine für den spezifischen Widerstand hergeleitete Gleichung von Maxwell grob abgeschätzt werden [Hunkeler 1994].

Die **Gaspermeabilität** ist wie der Gasdiffusionskoeffizient ebenfalls stark von der Betonfeuchtigkeit abhängig und nimmt bei relativen Luftfechtigkeiten über etwa 70 bis 90% um zwei bis drei Zehnerpotenzen ab. Die Abnahme wird zur Hauptsache durch den Verlauf der Sorptionsisotherme in diesem Feuchtigkeitsbereich bestimmt. **Bild 2.5** zeigt die Abhängigkeit der Gaspermeabilität von der Wassersättigung für drei verschiedene Betone.

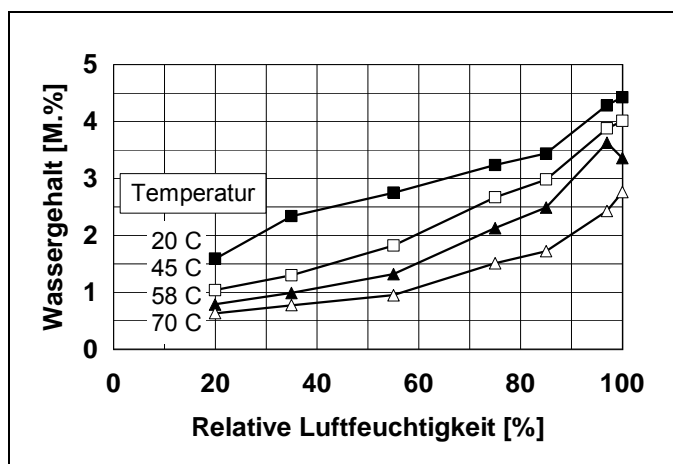


Bild 2.2: Einfluss der Temperatur auf die Sorptionsisotherme von Beton (w/z: 0.565, Alter: 4 Jahre, Trockenrohdichte: $2'220 \text{ kg/m}^3$) [Hunkeler 1994].

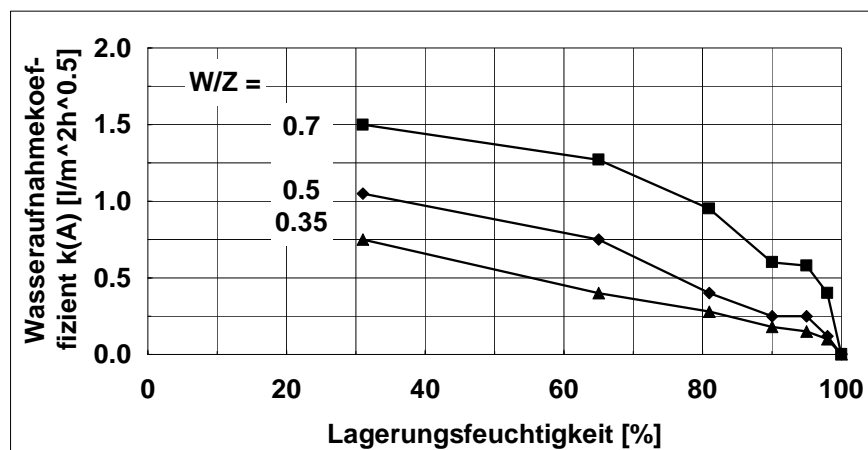


Bild 2.3: Einfluss der Lagerungsfeuchtigkeit und des w/z-Wertes auf den Wasseraufnahmekoeffizienten von Beton [Hunkeler 1996b]. Daten aus [Major 1993].

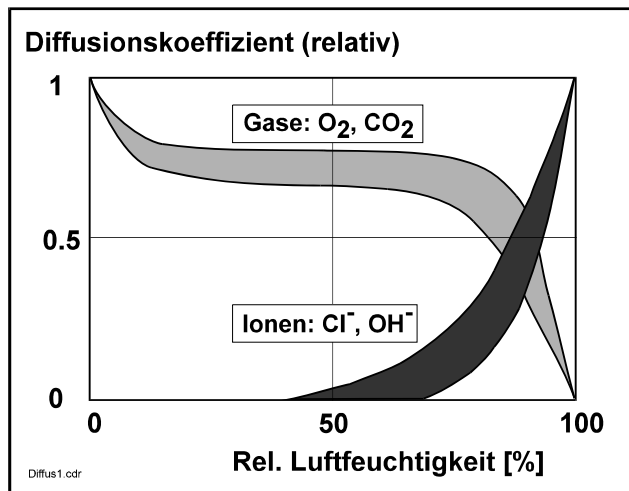


Bild 2.4: Einfluss der Betonfeuchtigkeit auf den Diffusionskoeffizienten von Gasen und Ionen (schematisch). Die Zu- bzw. Abnahme ist hauptsächlich vom Verlauf der Sorptionsisotherme abhängig [Hunkeler 1994].

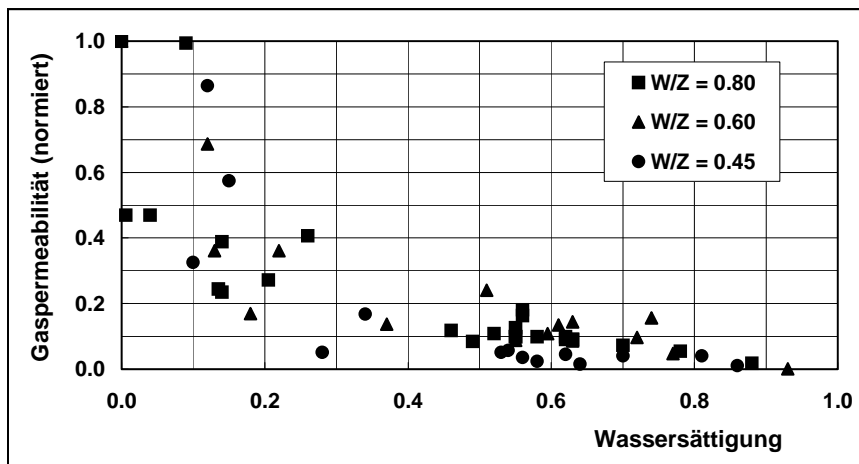


Bild 2.5: Einfluss der Wassersättigung auf die Gaspermeabilität, normiert auf den jeweiligen Mittelwert des getrockneten Betons (0% Wassersättigung) [Hunkeler 2000a]. Daten aus [Jacobs 1994].

Die Abhängigkeit der strukturellen Parameter von der Art und Menge des Zementes und der Zusatzstoffe, vom w/z-Wert, vom Hydratationsgrad sowie von der Nachbehandlung und Exposition (Lagerung) des Betons wird in **Kapitel 2.2.1** erläutert.

2.2 Widerstand gegenüber chloridinduzierter Korrosion

Der Widerstand eines Bauteils aus Stahlbeton gegen chloridinduzierte Korrosion ist umso höher:

- je höher der Widerstand des Betons gegen eindringende Chloride, d.h. je geringer das kapillare Saugen und der Chloriddiffusionskoeffizient sind.
- je grösser die Überdeckung ist.
- je höher die Chloridbindekapazität des Zementsteins ist.
- je höher der kritische Chloridgehalt für relevante Korrosion ist.
- je höher der elektrische Betonwiderstand und die elektrochemischen Widerstände sind.

Bild 2.6 zeigt den qualitativen Verlauf der Schadenentwicklung. Die Betonqualität hat einen Einfluss auf die Steilheit der Geraden der Transport- und Initiierungsphase (Chloridwiderstand, kritischer Chloridgehalt) und der Korrosionsphase (ohmscher und elektrochemische Widerstände) sowie auf den kritischen Chloridgehalt.

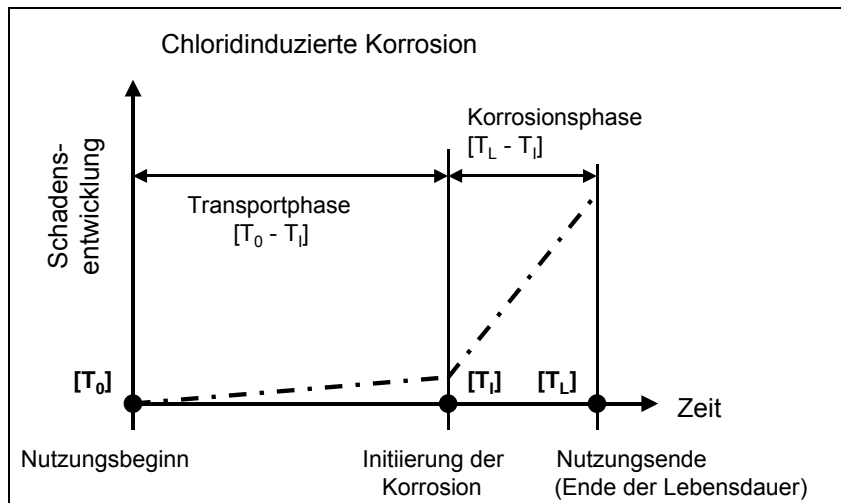


Bild 2.6: Verlauf der Schadensentwicklung (qualitativ).

Zur Sicherstellung bzw. zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit gibt es demnach verschiedene Schutzmöglichkeiten. In vielen Fällen ist eine genügende Überdeckung der Bewehrung, kombiniert mit einer vernünftigen Betonqualität die effizienteste Massnahme zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit. Dies ist i.a. beim Neubau leichter zu realisieren als bei Instandsetzungen.

2.2.1 Betonqualität: „Dichter Beton“

Die Dichtigkeit oder Permeabilität, d.h. die Durchlässigkeit des Betons (insbesondere des Deckbetons) für Wasser, Chloride und Gase ist im Zusammenhang mit der Dauerhaftigkeit das wichtigste Mass für die "Betonqualität":

hohe Betonqualität	=	hohe Dichtigkeit bzw. geringe Permeabilität
schlechte Betonqualität	=	niedrige Dichtigkeit bzw. hohe Permeabilität

Die Dichtigkeit wird bestimmt durch das Porensystem und durch Risse.

Das Porensystem im Beton

Beton ist ein heterogener Baustoff, bestehend aus Zuschlagstoffen und dem Zementstein. Für die Beständigkeit von Beton ist das Porengefüge des Betons bzw. des Zementsteins von entscheidender Bedeutung, da es, neben allfälligen Rissen, Wasser und Schadstoffen Wege öffnet, um in den Beton einzudringen.

Beim Aushärten des Betons reagieren Wasser und Zement miteinander und bilden die Hydrationsprodukte wie z.B. Kalziumsilikat- und Kalziumaluminathydrate sowie Kalziumhydroxid. Mit zunehmender Hydratation werden damit die Hohlräume zwischen den Zementkörnern ausgefüllt und die Dichtigkeit des Zementsteins steigt an. Mit der Reaktion zwischen Zement und Wasser ist eine Volumenverminderung verbunden, die ein System von grösseren und kleineren Poren zur Folge hat. Entsprechend Herkunft, Form und Grösse der Poren wird zwischen Verdichtungs-, Luft-, Kapillar- und Gelporen unterschieden.

Die verschiedenen Porenarten stehen mehr oder weniger gut miteinander in Verbindung und bilden zusammen ein kommunizierendes System, welches im Kontaktbereich zu den Zuschlagskörnern besonders durchlässig ist. Porenradienverteilung und der Volumenanteil an Gel-, Kapillar- und Verdichtungsporen sind v.a. vom Zementgehalt, dem W/Z-Wert und vom Hydratationsgrad abhängig. Junge Betone (5 bis 10 Jahre) weisen daher eine höhere Porosität auf als ältere.

Für die Wasser- und Schadstoffaufnahme sind v.a. die Kapillarporen verantwortlich. Ein „dichter“ Beton, mit einem geringen Kapillarporengehalt zeigt deshalb grundsätzlich eine höhere Dauerhaftigkeit.

Einfluss von Rissen

Der Einfluss von Rissen auf den **Chlorideintrag und die Korrosion** ist abhängig von der Rissart (Oberflächen- und Trennrisse infolge von (Früh-)schwinden, Hydratation und Setzungen sowie Trenn- und Biegerisse infolge statischer Beanspruchung), der Rissbreite und -tiefe.

Eine grosse Gefährdung geht v.a. von **wasserführenden Rissen** aus. Mit zunehmender Rissbreite findet ein verstärktes Eindringen von Wasser und Chloriden statt. In Trennrissen wird die maximale Steighöhe relativ schnell erreicht, sie ist abhängig von der Rissbreite. Am ungünstigsten ist der vertikale Schadstofftransport von oben nach unten.

Im ungerissenen Beton liegt die Chloridfront ca. 40 bis 70 % hinter der Wasserfront zurück: Retardierungseffekt [Lunk 1997]. Im Riss ist kein Retardierungseffekt feststellbar und auf Bewehrungsniveau ist praktisch derselbe Chloridgehalt wie an der Oberfläche vorhanden. In der unmittelbaren Nähe des Risses sind deshalb die Chloridkonzentrationen höher als weiter weg, d.h. seitlich von Rissen gibt es grosse Konzentrationsgradienten [Volkwein 1991].

Der Chloridgehalt im Rissbereich kann bereits nach einem Winter relativ hoch sein, wie die Erfahrungen bei der Ponte Nanin (Kanton Graubünden) gezeigt haben. Dort wurden im Beton der Brückenplatte, die während eines Winters mit einem provisorischen Belag aber ohne Abdichtung genutzt wurde, Chloridgehalte in Rissen bzw. Betonierfugen bis 0.4 M%/Zement festgestellt. Risse haben damit eine Verkürzung der Zeit bis zur Depassivierung zur Folge, wobei der Zeitraum bis zur Depassivierung mit abnehmender Rissbreite zunimmt.

Die von Rissen ausgehende **Korrosionsgefahr** ist vor allem auf die Makroelementwirkung zurückzuführen. Dabei spielen die Feuchtigkeit, die Dicke und die Dichtigkeit des Überdeckungsbetons neben dem Riss eine ausschlaggebende Rolle. Mit zunehmender Dichtigkeit des Deckbetons wird der Chlorideintrag ausserhalb des Risses reduziert, der elektrische Betonwiderstand erhöht und damit der Makroelementstrom verringert sowie gleichzeitig auch der Antransport von Sauerstoff erschwert. Eine höhere Überdeckung hat damit nicht nur einen längeren Transportweg bis zur Bewehrung für die Chloride zur Folge, sondern auch eine kleinere Korrosionsgeschwindigkeit.

Risse quer zur Bewehrung bis ca. 0.4 mm und längs zur Bewehrung bis ca. 0.3 mm führen zu keiner Beeinträchtigung der Dauerhaftigkeit, falls Dicke und Dichte der Überdeckung genügend sind. Ist der Überdeckungsbeton ungenügend, führt dies, etwas später als im Riss, zu Korrosionsschäden auch im ungerissenen Bereich. Insbesondere bei Längsrissen setzt die Korrosion früher ein und ist intensiver.

Zwischen der Korrosionsgeschwindigkeit und der Rissbreite besteht kein ausgeprägter Zusammenhang.

Massnahmen zur Erhöhung der Dichtigkeit

Grundsätzlich wirken sich alle Massnahmen, die zu einem kleineren Porenvolumen, vorab zu einem kleineren Kapillarporenvolumen führen, positiv auf die Dichtigkeit des Betons und damit auf die Dauerhaftigkeit von Stahlbeton aus. Dies gilt nur bedingt für frost- und frosttausalzbeständige Betone mit künstlich eingebrachten Luftporen. Sie können eine eher geringere Dichtigkeit aufweisen als Betone ohne Luftporen.

Die Betonqualität eines Bauteils zeigt immer eine mehr oder weniger grosse Schwankungsbreite (Kiesnester, Entmischungen, Inhomogenitäten im Beton um Bewehrung und Zuschlagskörner). Insbesondere die sehr porösen Kontaktzonen zwischen Zuschlag bzw. Bewehrung und Zementstein stellen einen bevorzugten Transportweg dar. Infolge von Veränderungen der Zusammensetzung (Bluten), unterschiedlicher Verdichtung, Schalungseinfluss, Austrocknung, Karbonatisierung usw. unterscheidet sich der Randbeton vom Kernbeton. Zusammen mit teils unterschiedlichen Hydratationsbedingungen unterscheidet sich deshalb die Randbetonqualität erheblich von jener des Kernbetons. Sie kann verbessert werden durch saugende Schalungsbahnen [Karl 1993], Vakuumbehandlung [Reinhardt 1995] und vor allem durch die **Nachbehandlung**. Wichtig ist vorab der Schutz vor dem zu schnellen Austrocknen, das Schwindrisse und Störungen in der Hydratation des Zementsteins zur Folge hat und damit die Dichtigkeit des Randbetons bestimmt.

Der Zement vermag bei der Hydratation Wasser im Umfang von etwa 40% seines Gewichtes chemisch und physikalisch zu binden. Wird mehr Wasser zugegeben, liegt dieses als freies Wasser vor und es bilden sich Poren, die austrocknen und sich mit Wasser wieder füllen können. Je höher der **Wasser/Zement-Wert** über 0.4 liegt, desto mehr überschüssiges Wasser ist vorhanden und desto grösser wird der Anteil an Kapillarporen im Zementstein, die Wasser und damit auch Schadstoffe aufsaugen und transportieren können.

Um die Kapillarporosität möglichst gering zu halten, ist also ein möglichst tiefer w/z-Wert anzustreben. Dies kann durch den Einsatz von Betonusatzmitteln (Hochleistungsverflüssiger) erreicht werden. Sie können bei korrektem Einsatz einen beachtlichen Beitrag zur Betonqualität leisten.

Unter der Voraussetzung, dass die Zuschläge nicht porös sind und die Porosität allein durch den Zementstein verursacht wird, ist für einen dichten Beton eine möglichst dichte Packung der Zuschläge mit einem möglichst grossen Grösstkorn anzustreben ("**gute**" **Sieblinie**).

Reaktive **Zusatzstoffe** wie Flugasche oder Hüttensand haben langfristig eine dichtende Wirkung auf das Betongefüge, da ihre Reaktionsprodukte den Porenraum auffüllen. Dasselbe gilt auch für Silikastaub, der wegen seiner 50 bis 100mal grösseren Feinheit als Zement zusätzlich einen Füllereffekt hat (Ergänzung der Sieblinie im Bereich der sehr kleinen Durchmesser).

Mit zunehmendem **Alter des Betons** (steigender **Hydratationsgrad**) steigt die Dichtigkeit des Zementsteins an. Ältere Betone haben somit oft einen grösseren Chloridwiderstand als Jüngere. Allerdings dringen Wasser und damit auch Chloride schneller in karbonatisierten Beton ein und gebundene Chloride können durch die Karbonatisierung wieder gelöst werden (**Kapitel 2.2.2**).

Da Risse schnelle und direkte Wege für den Eintrag von Schadstoffen bilden können, stehen neben der Wahl eines geeigneten Betons mit einem geringen wasserfüllbaren Kapillarporengehalt auch **Massnahmen zur Beschränkung der Rissbreite** im Vordergrund (Mindestbewehrung, konstruktive Massnahmen).

2.2.2 Chloridbindevermögen von Zementen

Die in den Beton eindringenden Chloride werden von allen Phasen im Zementstein teilweise physikalisch und chemisch gebunden. Der im Beton vorhandene Gesamtchloridgehalt setzt sich somit zusammen aus den

- gebundenen Chloriden und den
- freien Chloriden

Wegen der Schwierigkeit, den gebundenen Chloridgehalt einfach und rasch zu bestimmen, wird in der Praxis i.a. der Gesamtchloridgehalt gemessen und für die Beurteilung herangezogen. Die Ergebnisse verschiedener Untersuchungen zu den Einflüssen auf die Chloridbindekapazität sind zudem zum Teil widersprüchlich.

Das Bindevermögen für Chloride ist abhängig vom Chloridgehalt in der Porenlösung, d.h. auch bei einem Gesamtchloridgehalt von 0.4 M%/Zement ist ein Teil der Chloride frei und für die Korrosion verfügbar.

Da Zementstein eine gewisse Menge Chloridionen binden kann, hat er zumindest während der anfänglichen Belastung eine Art Filterwirkung (Retardierungseffekt, [Lunk 1997]). Dies und die gegenüber Wasser geringere Mobilität der Chloridionen führt relativ rasch zu mehr oder weniger steilen Chloridgradienten. Bei wiederholter Belastung erschöpft sich dann die Filterwirkung und die Chloridfront dringt weiter in die Tiefe vor.

In verschiedenen Arbeiten wurde versucht, die Bedeutung einzelner Einflüsse auf die Chloridbindekapazität zu bestimmen.

Daraus folgt u.a., dass sulfatbeständiger Zement mit einem tiefen C_3A -Gehalt und ein zunehmender Anteil an Silikastaub eine Abnahme des Anteils der gebundenen Chloride bewirken. Demgegenüber hat eine Zunahme des Hüttensandanteils eine Zunahme des Anteils der gebundenen Chloride zur Folge (**Bild 2.7**).

Andere Untersuchungen mit verschiedenen Zementen (mit und ohne Silikastaub) ergaben, dass die Menge der gebundenen Chloride praktisch unabhängig vom w/z-Wert und von der Art des Zements ist, wenn sie auf die Zementgelmasse bezogen werden [Delagrave 1997].

Das Bindevermögen ist auch abhängig vom Kation des Salzes, so werden mehr Chloride gebunden bei $CaCl_2$ und $MgCl_2$ als bei $NaCl$.

Weniger Chloride werden gebunden bei zunehmendem Sulfatgehalt.

Weiter hat die Karbonatisierung einen Einfluss auf das Gleichgewicht zwischen gebundenen und freien Chloriden. Chloride dringen rascher in karbonatisierten als in nicht karbonatisierten Beton ein, wobei die Wirkung der Karbonatisierung unabhängig von der verwendeten Zementart ist [Wierig 1995]. Dies bestätigt, dass karbonatisierter Beton Chloride kaum mehr binden kann bzw. dass mit der Karbonatisierung die Filterwirkung des Betons verloren geht.

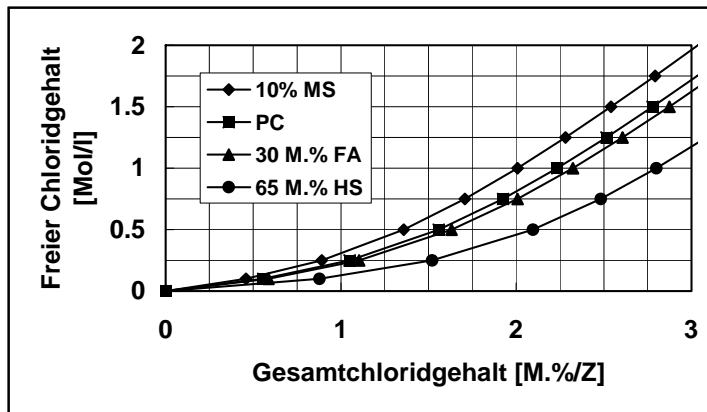


Bild 2.7: Freier Chloridgehalt in Abhängigkeit vom Gesamtchloridgehalt für verschiedene Zemente bzw. Bindemittel [Hunkeler 1998]. Daten aus [Glass 1997].

2.2.3 Kritischer Chloridgehalt

Der Chloridgehalt muss einen kritischen Wert überschreiten, um die Lochkorrosion zu initiieren. Über die Höhe dieses Grenzwertes ist man sich allerdings noch immer nicht einig geworden. Es werden Werte zwischen 0.1 und weit über 1 M.% bezogen auf den Zement genannt. Der häufig genannte Grenzwert von 0.4 M.%/Zement geht auf Arbeiten von Locher und Richartz aus dem Jahre 1969 über die Chloridbindung im Zementstein zurück (gebundene Chloride sind für die Korrosion nicht verfügbar). Dieser Wert darf nicht ohne weiteres mit dem Grenzwert für chloridinduzierte Korrosion gleichgesetzt werden, da es den generell "richtigen" Grenzwert nicht gibt. Verschiedene belastungs- und widerstandsseitige Parameter haben einen grossen Einfluss (**Bild 2.8**):

- Betonfeuchtigkeit
- pH-Wert des Porenwassers (Karbonatisierung, Zementart und -menge, w/z-Wert)
- Verhältnis Cl^-/OH^-
- Chloridbindekapazität des Zementes
- Überdeckung (O_2 -Angebot)
- Gehalt an anderen korrosionsfördernden Stoffen (z.B. SO_4^{2-}).

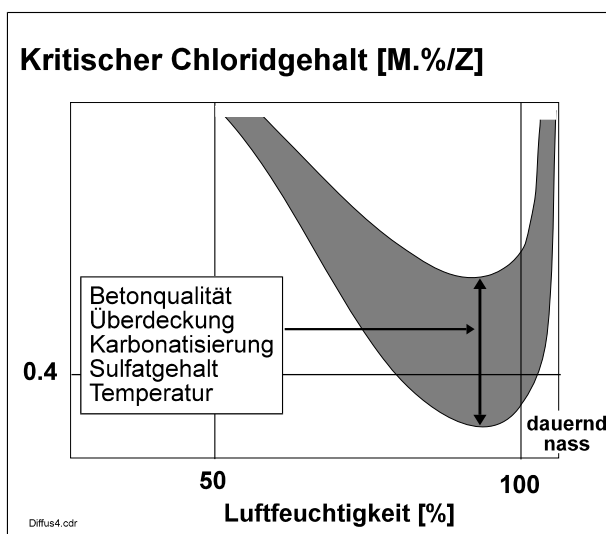


Bild 2.8: Einflüsse auf den kritischen Chloridgehalt für die chloridinduzierte Korrosion [Hunkeler 1994].

Bezüglich der Wirkung von **Flugasche** auf den kritischen Chloridgehalt wurden von Thomas Untersuchungen durchgeführt [Thomas 1996]. Der kritische Chloridgehalt nahm dabei mit zunehmendem Flugaschegehalt deutlich ab (**Tabelle 2.1**). Trotzdem war aber der Korrosionsabtrag nach 4 Jahren Auslagerung im Meerwasser mit zunehmendem Flugaschegehalt des Betons kleiner (wahrscheinlicher Grund: höherer elektrischer Betonwiderstand).

Flugaschegehalt M.%/Z	Kritischer Chloridgehalt, M.%/Z
0	0.70
15	0.65
30	0.50
50	0.20

Tabelle 2.1: Einfluss des Flugaschegehaltes auf den kritischen Chloridgehalt [Thomas 1996].

Untersuchungen mit Stahl in künstlichem Porenwasser ergaben ebenfalls, dass bei niedrigen pH-Werten, wie beispielsweise bei karbonatisiertem Beton oder bei Betonen mit hohem Zusatzstoffgehalt (Flugasche, Silikastaub), mit einem kleineren kritischen Chloridgehalt gerechnet werden muss [Breit 1997c, 1998a,b]. In anderen Arbeiten konnte der negative Einfluss der Flugasche auf den kritischen Chloridgehalt nicht bestätigt werden [Wiens 1996].

Zum Einfluss von **Hüttensand** auf den kritischen Chloridgehalt liegen einige Arbeiten vor. Obwohl die Resultate nicht ohne Widersprüche sind, kann man daraus entnehmen, dass der Hüttensand eher zu einer Erhöhung des kritischen Chloridgehaltes führt.

Über den Einfluss von **Silikastaub** auf den kritischen Chloridgehalt liegen keine systematischen Untersuchungen vor.

Bei der Diskussion über den kritischen Chloridgehalt muss nicht zuletzt auch beachtet werden, dass das Auftreten von Lochfrass ein statistisches Phänomen darstellt (**Bild 2.9**). Breit kommt aufgrund einer umfangreichen Literaturrecherche zum Schluss, dass ein Chloridgehalt von etwa 0.2 M.% die untere Grenze für den kritischen korrosionsauslösenden Gehalt darstellt [Breit 1997a, 1998a,b]. In [Zimmermann 2000] wird die Auswertung von Untersuchungen an britischen Brückenbauwerken zitiert. Es resultierte ein qualitativ ähnliches Ergebnis: bei Chloridgehalten unter 0.35 M%/Z lag die Korrosionshäufigkeit bei 20%; bei Chloridgehalten über 1.5 M%/Z bei 80%.

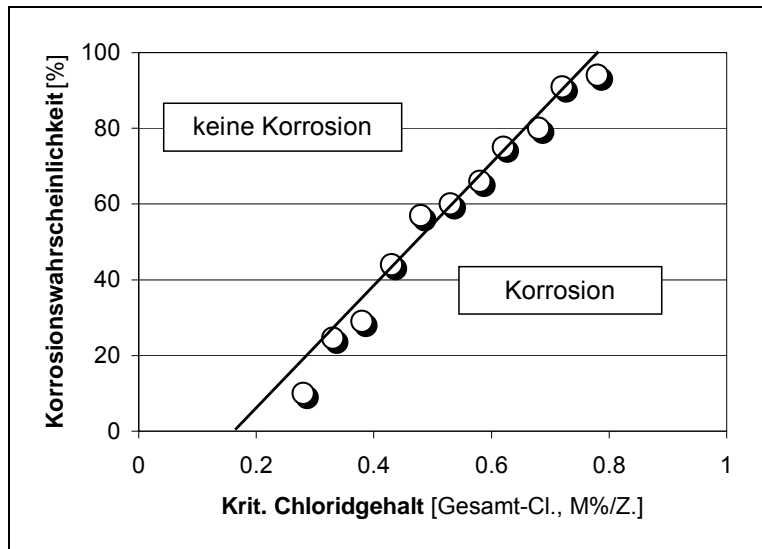


Bild 2.9: Korrosionswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit des kritischen Chloridgehaltes [Breit 1997a].

2.3 Chlorideintrag in den Beton

Abgesehen vom chloridhaltigen Anmachwasser oder von chloridhaltigen Zuschlagsstoffen gelangen Chloride zur Hauptsache durch **kapillares Saugen** und durch **Diffusion** in den Beton (**Kapitel 2.1**).

Bei wechselnder Beanspruchung, wie sie bei Bauten der Verkehrsinfrastruktur meist vorliegt, begünstigen folgende Einflüsse den schnellen Chlorideintrag und die Bildung von grossen Chloridanreicherungen [Hunkeler 1994]:

- häufige Trocken/Nass-Zyklen mit raschem Abtrocknen des Betons
- hoher Trocknungsgrad des Betons vor der Chloridbeaufschlagung.
- hohe Betonporosität (hoher w/z-Wert, schlechte Verdichtung, schlechte Nachbehandlung) und grosse Atmungszone des Deckbetons

Tabelle 2.2 gibt einen detaillierteren Überblick über die relative Bedeutung verschiedener Einflüsse.

Einfluss	Wirkung ¹⁾
w/z-Wert Porosität Hydratationsgrad Alter	+++
Zementart und -menge Gehalt an Flugasche, Hüttensand oder Silikastaub	+++
Art des Chlorideintrages (kapillares Saugen, Diffusion) Art der Exposition oder Beaufschlagung	+++
Grösstkorn	++
Nachbehandlung, Schalung	++
Karbonatisierung	++
Temperatur	++
Sandgehalt	+
Verdichtung	+
Gehalt an Luftporen	+
Frost-Tausalzeinwirkung	+

Tabelle 2.2: Übersicht über die Einflüsse auf den Chlorideintrag in den Beton [Hunkeler 1998].

¹⁾ +++ sehr stark ++ stark + vorhanden

Neben vielen betontechnologischen Parametern spielt die **Exposition** eine ausschlaggebende Rolle. Dem grossen Einfluss der Umgebungsbedingungen (Beanspruchung, Einwirkung) wird in der EN 206-1 [EN 2000] mit der Einführung von Expositionsklassen Rechnung getragen. Insgesamt werden 6 Expositionsklassen unterschieden, die zusätzlich je nach der **Aggressivität der Umgebungsbedingungen** in Unterklassen aufgeteilt sind.

Für chloridinduzierte Korrosion (Chloride aus Tausalzen, in Hallenbädern, Industrieanlagen etc., nicht Meerwasser) ist die Klasse XD massgebend. Da die Feuchtigkeitsverhältnisse für die Aggressivität entscheidend sind, werden die drei Unterklassen XD1 bis XD3 entsprechend definiert (**Tabelle 2.3**).

Expositionsklasse	Umgebungsbedingungen	Beispiel
XD1	Mässige Feuchte	<ul style="list-style-type: none"> Chloridhaltiger Sprühnebel
XD2	Nass, selten trocken	<ul style="list-style-type: none"> Schwimmbäder Chloridhaltige Industrieabwässer
XD3	Wechselnd nass und trocken	<ul style="list-style-type: none"> Brückenteile, die chloridhaltigem Spritzwasser ausgesetzt sind Fahrbahndecken, Parkdecks

Tabelle 2.3: Expositionsklassen für Korrosion, ausgelöst durch Chloride gemäss EN 206-1 [EN 2000].

2.3.1 Modelle für den zeitlichen Verlauf des Chlorideintrages

Es wurden verschiedene, auf Diffusion und kapillarem Saugen basierende Modelle und Berechnungsverfahren entwickelt, um den zeitlichen Verlauf des Chlorideintrages und die Bildung von Chloridprofilen zu prognostizieren und daraus die Anforderungen an die Betonqualität und Überdeckung abzuleiten. Bei der Modellbildung muss unterschieden werden, zwischen Bauten, bei denen der Chlorideintrag vorwiegend durch Diffusion erfolgt (mehr oder weniger ständig im Kontakt mit chloridhaltigem Wasser) und Bauten, die einer wechselnden Beanspruchung ausgesetzt sind.

Bei Bauteilen, die **immer in direktem Kontakt zu chloridhaltigem Wasser** stehen, bildet sich sehr schnell ein konstanter Chloridgehalt im Oberflächenbeton (äussersten Bereich des Randbetons), der im Gleichgewicht zum Chloridgehalt des anstehenden Wassers steht. Der Weitertransport in den Beton hinein erfolgt dann durch Diffusion.

Die Zusammenstellung verschiedener Labor- und Bauwerksdaten [Bamforth 1996] führte beispielsweise zur Feststellung, dass bei intensiver Chloridexpositionen (Bauten, die Meerwasser ausgesetzt sind) innerhalb einer kurzen Zeitspanne (ungefähr 1 Jahr) die Chloridkonzentration an der Betonoberfläche einen Wert erreicht, der in den folgenden Jahren ziemlich konstant bleibt. Bei weniger starken Beanspruchungen jedoch braucht es mehrere Jahre, bis sich ein konstanter Chloridgehalt an der Oberfläche einstellt.

Viele Autoren führten Modellrechnungen zur Prognose der Dauerhaftigkeit durch, die auf dem 2. Fick'schen Gesetz für die Diffusion basieren (z.B. [Bamforth 1996, Tang 1996b, Siemens 1998, Thomas 1999, Helland 2001]).

$$c(x,t) = c_s [1 - \operatorname{erf}((x/2) \cdot (D_{\text{eff,C}} \cdot t)^{-1/2})] \quad (\text{Gl. 2.1})$$

wobei:	$c(x,t)$ =	Chloridgehalt des Betons in der Tiefe x zum Zeitpunkt t	[M%/Z]
	erf=	Fehlerfunktion (aus mathematischen Tabellen)	[-]
	$D_{\text{eff,C}}$ =	effektiver Chloriddiffusionskoeffizient	[m ² /s]
	c_s =	Chloridkonzentration an der Oberfläche	[M%/Z]
	x=	Abstand von der Betonoberfläche	[m]
	t:	Zeit, Alter	[s]

Mit der **Gleichung 2.1** können Prognosen für Chloridprofile gerechnet werden, basierend auf im Labor bestimmten Diffusionskoeffizienten und Annahmen, betreffend die Oberflächenkonzentration. Sie ermöglicht auch die Berechnung des Diffusionskoeffizienten und der Oberflächenkonzentration auf Grund von realen, im Rahmen von Zustandsuntersuchungen bestimmten Chloridprofilen. Damit kann wiederum die weitere Entwicklung der Chloridprofile abgeschätzt werden.

Die Abhängigkeit des Diffusionskoeffizienten von der Zeit und vom Ort und die Abhängigkeit der Oberflächenkonzentration von der Exposition wird in den Berechnungen unterschiedlich berücksichtigt.

Bei **periodischer Beaufschlagung** durch Kontakt- und Spritzwasser findet im Bereich der **Atmungszone** des Betons sehr schnell eine Chloridanreicherung durch die wiederholten Trocken/Feucht-Zyklen statt. Der Chlorideintrag wird hier durch das kapillare Saugen dominiert. Direkt an der Oberfläche werden Chloride auch wieder ausgewaschen, während der Weitertransport in tiefere Lagen durch Diffusion erfolgt; dies vor allem bei eher feuchtem Beton.

Mit der Atmungszone kann derjenige Bereich des Überdeckungsbetons bezeichnet werden, der auf Veränderungen der relativen Luftfeuchtigkeit reagiert (**Bild 2.9**). Sie ist abhängig von der Betonqualität und der Exposition. Je grösser die Atmungszone ist, desto tiefer in den Beton hinein findet damit ein schneller Eintrag von Chloriden statt.

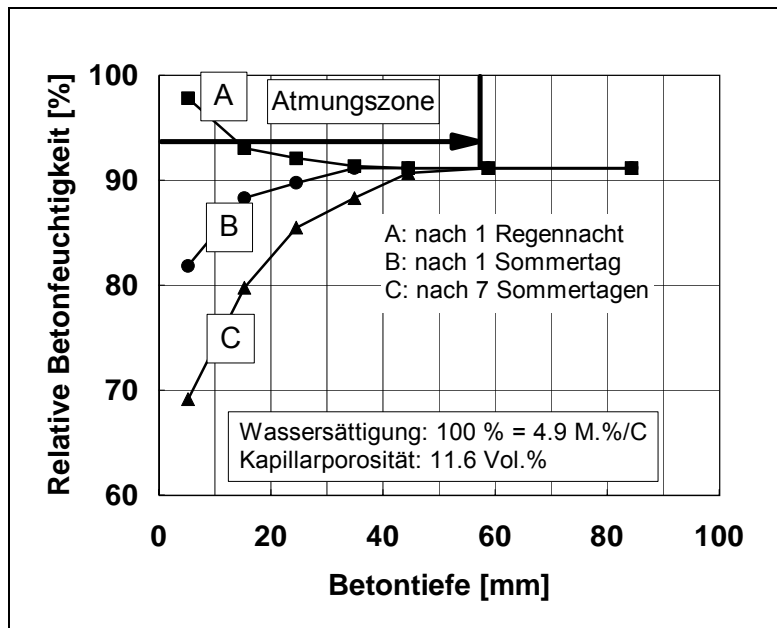


Bild 2.9: Schwankungen der Betonfeuchtigkeit in der Atmungszone (Randbeton) [Hunkeler 1994].

Basierend auf diesen Überlegungen und der **Gleichung 2.1** hat Gehlen [Gehlen 2000] ein erweitertes Modell für den Chlorideintrag entwickelt. Er berücksichtigt die Zeitabhängigkeit des Diffusionskoeffizienten und der Oberflächenkonzentration und definiert eine Ersatz-Oberflächenkonzentration um die Abweichungen vom Fick'schen Gesetz in der Atmungszone zu erfassen. So wird in seinem modifizierten 2. Fick'schen Gesetz:

statt c_s : $c_{s,\Delta x}(t)$ Ersatz-Oberflächenkonzentration in Tiefe Δx in Abhängigkeit der anstehenden Chlorideinwirkung, zum Zeitpunkt t

statt $D_{\text{eff},C}$: $k_e \cdot D_{\text{RCM},0} \cdot k_t \cdot A(t)$

wobei:

- $A(t) = (t_0/t)^a$ Alterungsterm [-]
- a Exponent zur Berücksichtigung der Zeitabhängigkeit von $D_{\text{eff},C}$
- $D_{\text{RCM},0}$ Chloridmigrationskoeffizient zum Zeitpunkt t_0
- k_e Parameter zur Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit
- k_t Übertragungsparameter für Unterschiede zwischen Migrationskoeffizienten aus Schnelltests und Diffusionskoeffizienten

Als Grundmaterialwiderstand fliesst damit der Chloridmigrationskoeffizient $D_{\text{RCM},0}$ und als Grundeinwirkung die Ersatz-Oberflächenkonzentration $c_{s,\Delta x}(t)$ in das Modell ein. Dazu kommen Übertragungsparameter für Zeit-, Temperatur- und methodische Einflüsse.

Zur Bestimmung des Chloridmigrationskoeffizienten setzt Gehlen das ibac-Verfahren oder auch eine indirekte Bestimmung über den spezifischen elektrischen Widerstand ein. Zur Berücksichtigung des Zeiteinflusses wurden Daten aus Bauwerksuntersuchungen und Auslagerungsversuchen ausgewertet. Zur laufenden Verbesserung der Prognose soll $D_{\text{eff},C}$ jedoch im Rahmen von Zustandsuntersuchungen regelmässig überprüft und das Modell angepasst werden.

Die Temperaturabhängigkeit kann mit der Arrhenius-Gleichung modelliert werden. Der Übertragungsfaktor k_e nimmt mit der Temperatur zu.

Die Ersatz-Oberflächenkonzentration $c_{s,\Delta x}(t)$ ist zeitabhängig und hängt von der äquivalenten Chloridkonzentration der anstehenden Lösung $c_{\text{Äqv}}$ ab. Deren Streuung ist gross beim Einsatz von Taumitteln (0 bis 60 g/Liter, im Mittel ca. 10 g/Liter).

Zur Bestimmung von Δx wurden in [Gehlen 2000] 127 Chloridprofile ausgewertet. Es resultierte ein Mittelwert von 9 mm. In einer anderen Untersuchung kommt Volkwein [Volkwein 1993] auf 6 bis 11 mm.

Die Zeit, bis der Maximalwert von $c_{s,\Delta x}$ in der Tiefe Δx erreicht wird, ist von der Geschwindigkeit des Chlorideintrages, dem Abstand des Bauteils und der Verkehrsdichte abhängig.

Mangels Daten wurde für die Berechnungen in [Gehlen 2000] $c_{s,\Delta x}(t)$ zeitunabhängig betrachtet und gleich der sich spontan einstellenden Chloridsättigungskonzentration $c_{s,o}$ an der Oberfläche bei einer Auslagerung in Chloridlösung mit $c_{\text{Äqv}}$ gesetzt.

Die Vorgänge in der Atmungszone können somit auch mit dem Modell von Gehlen nicht modelliert werden. Die Berücksichtigung der meist äusserst komplexen örtlichen und zeitlichen Gegebenheiten im Fall von Verkehrsinfrastrukturbauten ist mit dem Modell nicht möglich.

Ein anderer Ansatz für die Modellierung des Chlorideintrages verfolgt Lunk [Lunk 1997, 1998a]. Er entwickelt ein Modell, basierend auf dem Kapillartransport. In seinen Aufsaugversuchen stellt er einerseits eine Abweichung vom Wurzel-Zeit-Gesetz für die Wasseraufnahme und die Eindringtiefe fest und andererseits quantifiziert er den Retardierungseffekt (durch chemische Bindung und Adsorption der Chloridionen) beim Chloridtransport. Der Retardierungseffekt nimmt mit der Zeit zu und mit dem w/z-Wert ab und hängt zudem von der Art der Betonzusatzstoffe, von der Zementart, vom Grösstkorn, vom Luftporengehalt sowie vom Wassergehalt (Luftfeuchtigkeit), der Konzentration der Lösung und vom Kation ab. An der Oberfläche wird eine Aufkonzentration festgestellt (ca. Faktor 2).

Problematisch sind die Versuche bei dichten Betonen, wo die Eindringtiefe gering und der Fehler bei der Messung demnach gross ist.

Mit dem Modell wurden Wasseraufnahmen und Eindringtiefen und daraus Chloridprofile berechnet. Die Übereinstimmung mit den Versuchen war gut. Die Übertragbarkeit auf Praxisbedingungen (Exposition) ist nicht ganz einfach.

2.3.2 Modelle für die Dauerhaftigkeit

In Modellen für die Dauerhaftigkeit wird der Beanspruchung aus der Exposition ein Materialwiderstand entgegengesetzt. Haupteinflüsse sind (**Kapitel 2.2, Bild 2.6**):

- Überdeckung der Bewehrung
- Chloridwiderstand des Betons
- kritischer Chloridgehalt (abhängig vom Stahl, Beton und Exposition/Feuchtigkeit)
- Exposition (Belastung)

In den probabilistischen Modellen werden verschiedene Grenzzustandsgleichungen formuliert [Gehlen 2000]. Je nachdem werden z. B. die Zeitpunkte T_I oder T_N (**Bild 2.6**) berechnet und mit einer geforderten Nutzungsdauer verglichen oder aber die erforderlichen materialeseitigen Widerstände auf Grund der geforderten Nutzungsdauer festgelegt.

In [Roelfstra 2000] wird mit einem probabilistischen Ansatz ein Modell für die Zustandsentwicklung, basierend auf im Rahmen von Inspektionen ermittelten Zustandsdaten der Kunstbautendatenbank (KUBA-DB) entwickelt: visuelle ermittelte Zustandsklassen gemäss KUBA-DB, ergänzt mit Überdeckungsmessungen und Bestimmung der Permeabilität.

Für die Berechnungen werden zuerst Bauteile und Segmente definiert. Innerhalb eines Segmentes werden die Parameter Permeabilität, Überdeckung und Exposition konstant angenommen. Damit kann die Zustandsentwicklung innerhalb eines Segmentes als konstant betrachtet werden.

Die Permeabilität wurde vor Ort mit dem Permeability-Tester (Torrent) bestimmt und auf Grund der Messungen (k_{Torrent}) wurden für das Transportmodell die Chlorid- und Wasserdiffusionskoeffizient (tiefenabhängig) festgelegt. Um die Streuung der Werte zu berücksichtigen, wird die Standardabweichung innerhalb eines Segmentes mit 25% angenommen.

Dem Modell für den Schädigungsmechanismus liegen folgende Annahmen zu Grunde:

- Drei **Expositionsklassen** (Kontakt- und Spritzwasser, Sprühnebel)
- **Chlorideintrag**: Kapillares Saugen und Diffusion werden mit Diffusionsgleichungen modelliert (2. Fick'sches Gesetz), 3 Permeabilitätsklassen
- **Initiierung**: Wahrscheinlichkeit der Initiierung als Funktion des freien Chloridgehaltes, Normalverteilung (0.4/0.15 M%/Zement); Verhältnis freie zu gebundenen Chloriden: 0.6
- Drei Schädigungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Exposition (tief, Mittel, hoch)

Mit dem Modell für den Schädigungsmechanismus wurde für die Segmente die Zustandsentwicklung berechnet und die Ergebnisse wurden in Zustandsbedingungen gemäss der KUBA-DB ausgedrückt.

Zur Bestimmung der Zustandsentwicklung werden in den BMS (Brücken-Management-Systemen) Markov-Ketten (Schädigungsmatrizen) verwendet. Die Koeffizienten der Schädigungsmatrizen wurden so bestimmt, dass für die drei Schädigungsgeschwindigkeiten die bestmögliche Übereinstimmung zwischen den Simulationen und den Ergebnissen mit den Markov-Ketten resultierte (Methode der kleinsten Quadrate).

3. Verfahren zur Bestimmung des Chloridwiderstandes

3.1 Einleitung

Zur Bestimmung des Chloridwiderstandes von Zementstein, Mörtel und Beton gibt es eine Vielzahl von Laborverfahren. Sie lassen sich grob in folgende Gruppen unterteilen:

- 1) Diffusionstests (Analyse der Chloridprofile, Analyse des zeitlichen Verlaufes der Chloridkonzentration in Diffusionszellen auf der Vorder- oder Hinterseite der Probe). Ergebnis: Diffusionskoeffizient der Chloride im Beton.
- 2) Migrationstests (Analyse der Chloridprofile, der Chlorideindringtiefe oder des zeitlichen Verlaufes der Chloridkonzentration in der Lösung auf der Vorder- oder Hinterseite der Probe bei Migrationszellen), Ergebnis: Migrationskoeffizient der Chloride im Beton. Im Gegensatz zu Diffusions- wird bei Migrationstests der Chlorideintrag durch das Anlegen einer elektrischen Spannung beschleunigt.
- 3) Messung der Leitfähigkeit an Proben nach der Sättigung mit konzentrierter chloridhaltiger Lösung. Ergebnis: elektrische Leitfähigkeit.
- 4) Kapillare Aufsaugversuche. Ergebnis: Wasseraufnahmekoeffizient, Wassereindringkoeffizient, Chloridprofile (evtl. zusätzlich rechnerische Bestimmung des Diffusionskoeffizienten aus den Chloridprofilen).
- 5) Auslagerung der Proben in chloridhaltigem Wasser bzw. Beaufschlagung der Proben mit chloridhaltigem Wasser. Ergebnis: Chloridprofile (evtl. zusätzlich rechnerische Bestimmung des Diffusionskoeffizienten aus den Chloridprofilen).

Die Analyse von Chloridprofilen wurde früher mit dem 1. Fick'schen, heute meist mit dem 2. Fick'schen Gesetz durchgeführt. Beim Ergebnis muss unterschieden werden, ob die Chloride unter Diffusions- oder Migrationsbedingungen in den Beton eingetragen wurden.

Die meisten Verfahren können auch für Bauwerksproben angewendet werden. Bei gewissen Verfahren (z.B. ibac-Test) ist chloridfreies Probematerial erforderlich.

Der Diffusionskoeffizient kann auch aus der elektrischen Leitfähigkeit des Betons berechnet werden (s. z.B. [Tong 2001]).

Während mit Diffusions- und Migrationstests die Ionenbewegung im Porenwasser erfasst wird, zielen Aufsaugversuche darauf ab, den kapillaren „Huckepacktransport“ von Chloriden beim Aufsaugen von Salzlösungen zu bestimmen. Migrationstests wurden entwickelt, um die Versuchsdauer der Diffusionstests zu verkürzen.

Die weltweit bekanntesten Laborverfahren sind der amerikanische Ponding-Test "Resistance of Concrete to Chloride Penetration" [AASHTO T259] (Verfahren der Gruppe 5), der amerikanische Schnelltest "Rapid Chloride Permeability Test" (RCPT) [AASHTO T277, ASTM C 1202], der an der Chalmers University of Technology in Göteborg, Schweden, entwickelte (noch nicht) genormte, **CTH-Schnelltest** (hier als **ibac-Verfahren** bezeichnet) (Gruppe 2) und der nicht genormte **Streicher-Test** (Gruppe 2). Der RCPT-Schnelltest wurde für die amerikanische Federal Highway Administration entwickelt und 1983 von der American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) erstmals zur qualitativen Beurteilung des Chloridwiderstandes für normalen Portlandzementbeton vorgeschlagen. Vorgängig wurde gezeigt, dass die Ergebnisse aus dem Ponding- und dem ASTM-Schnelltest bei Normalbetonen korrelieren. Von der ASTM wurde der RCPT-Schnelltest dann 1991 als Normprüfung "Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration" eingeführt. Im Gegensatz zum AASHTO

T277 ist gemäss ASTM-Norm eine Korrelation mit dem Ponding-Test notwendig, was aber gemäss [Shi 1998] in der Praxis selten gemacht wird.

Im Weiteren sei auf die EN-Norm prEN 13396 [EN 1998], die für die Grundprüfung von Schutz- und Instandsetzungssystemen erarbeitet wurde, hingewiesen. Wegen der aufwendigen und sehr langen Prüfdauer von 6 Monaten wird hier nicht weiter darauf eingegangen.

In den folgenden Abschnitten sollen einige Verfahren kurz beschrieben werden. Insbesondere wird auf die in dieser Arbeit benutzten Prüfungen näher eingegangen.

3.2 Diffusionstests

Einfache Diffusionstests bestehen darin, die Diffusionsrate von Chloridionen durch einen Probekörper hindurch zwischen einer chloridhaltigen und einer chloridfreien Lösung zu bestimmen. Bei der am häufigsten angewendeten Versuchsanordnung für Diffusionstests wird ein Prüfkörper zwischen zwei Zellen (Behälter) eingebaut, wobei das Reservoir auf der einen Prüfkörperseite eine Salzlösung und auf der anderen eine chloridfreie alkalische Lösung (CaOH_2 , NaOH , KOH) enthält [Page 1981, MacDonald 1995]. Der Diffusionskoeffizient wird bestimmt, indem

- nach einer gewissen Versuchsdauer die Eindringtiefe der Chloridionen in den Prüfkörper analysiert wird, oder
- in regelmässigen Abständen die Veränderung des Chloridionengehaltes in den Zellen bestimmt wird.

Unterschieden wird dabei zwischen einer ersten instationären Phase, während der die Chloridionen durch den Probekörper wandern und einem stationären Zustand, wenn die Diffusionsfront die andere Seite des Probekörpers erreicht hat. Im stationären Zustand ist die in den Probekörper einwandernde Ionenmenge gleich gross wie die auf der anderen Seite austretende Ionenmenge.

In der Literatur werden oft die Begriffe scheinbarer und effektiver Diffusionswiderstand verwendet. Der effektive Diffusionskoeffizient beschreibt die konzentrationsabhängige Bewegung der Ionen in der Porenstruktur des Betons (Tortuosität des Diffusionsweges). Der scheinbare Diffusionskoeffizient hingegen berücksichtigt auch die zeitabhängigen, chemischen und physikalischen Veränderungen und Wechselwirkungen (z.B. der Chloridionen mit dem Zementstein, **Kapitel 2.2.2**).

Häufig geht man davon aus, dass bei stationären Verhältnissen der effektive Diffusionskoeffizient und bei instationären Verhältnissen der scheinbare Diffusionskoeffizient gemessen wird [Zhang und Gjorv 1994]. Es wird aber auch die Meinung vertreten, dass sowohl unter stationären wie auch instationären Bedingungen immer nur scheinbare Diffusionskoeffizienten gemessen werden [Chatterji 1994]. Es wurde deshalb vorgeschlagen, diese Unterscheidung aufzugeben und nur noch die Bedingungen anzugeben, unter welchen der Diffusionskoeffizient gemessen wurde [Andrade 2000]. **Im stationären Zustand** wird der Chloriddiffusionskoeffizient aus dem Anstieg (Abnahme) der Chloridkonzentration in der anfänglich chloridfreien (chloridhaltigen) Lösung in Funktion der Zeit nach dem ersten Fick'schen Gesetz bestimmt:

$$J = -D \frac{dc}{dx} \quad (\text{Gl. 3.1})$$

wobei:	J=	Ionenfluss	[mol m ⁻² s ⁻¹]
	D=	Diffusionskoeffizient	[m ² s ⁻¹]
	c=	Konzentration	[mol m ⁻³]
	x=	Tiefe	[m]
	dc/dx=	Konzentrationsgradient	[mol m ⁻⁴]

Bei der Anwendung des ersten Fick'schen Gesetzes wird davon ausgegangen, dass ideale Verhältnisse herrschen (unendlich verdünnte Lösung) und, dass die Umgebung homogen, isotrop und inert ist. Im Beton kann jedoch nicht davon ausgegangen werden, dass die Ionenbewegung an allen Stellen und in alle Richtungen zu jedem Zeitpunkt gleich ist. Beton besitzt eine hochkonzentrierte Porenlösung, wobei es sich bei den gelösten Ionen vor allem um Hydroxid-, Natrium-, Kalium- und in geringeren Mengen um Sulfat- und Kalziumionen handelt. Es finden deshalb ständig Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Ionen statt, welche die Diffusion eines Ions in der Porenlösung behindern und mit dem Aktivitätskoeffizienten erfasst werden. Zudem besitzt der Zementstein eine variable Chloridbindekapazität, z.B. in Abhängigkeit des Alters, der Zementart, des Karbonatisierungs- oder Hydratationsgrades und des pH-Wertes der Porenlösung (**Kapitel 2.2.2**).

Die Diffusionstests haben den grossen Nachteil, dass sie sehr lange dauern. Bei dichten Betonen wird ein stationärer Zustand erst nach mehr als einem Jahr erreicht (abhängig von der Probendicke bzw. vom Maximalkorndurchmesser). Eine Beschleunigung der Diffusionsgeschwindigkeit könnte über Druck [Lee 1996] oder eine Temperatur- oder Konzentrationserhöhung erfolgen. Würde beim Versuch z.B. die Ionenkonzentration erhöht, um die Testdauer zu verkürzen, müsste damit gerechnet werden, dass die verstärkten Wechselwirkungen zwischen den Ionen die Anwendung des ersten Fick'schen Gesetzes verunmöglichen [Andrade 1993].

Da mit dem ersten Fick'schen Gesetz die Abhängigkeit des Diffusionskoeffizienten von der Konzentration oder Zeit nicht beschrieben werden kann, wurden andere Berechnungsmodelle für den Diffusionskoeffizienten bei **instationären Verhältnissen** auf Grund des zweiten Fick'schen Gesetzes vorgeschlagen:

$$\frac{\delta c}{\delta t} = D \frac{\delta^2 c}{\delta x^2} \quad (\text{Gl. 3.2})$$

Zur Lösung dieser Differentialgleichung müssen spezielle Randbedingungen definiert werden, die auf unterschiedlichen Diffusionsmodellen basieren und in zahlreichen Publikationen behandelt wurden [Collepari 1972, Chatterji 1994, 1995, Tang 1995b, Andrade 1994d, 1995, Amiri 1999, 2000]. Eine Übersicht über die Berechnungsarten der Diffusionskoeffizienten aus Diffusions- und Migrationstests wurde 1998 von Dhir et al. publiziert [Dhir 1998]. Meistens wird die folgende Lösung für die Gleichung (3.2) angewendet:

$$\frac{C_s - C_x}{C_s - C_0} = \text{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4Dt}} \right) \quad (\text{Gl. 3.3})$$

wobei:	C ₀ =	Chloridgehalt zu Beginn des Versuches	[g/cm ³]
	C _s =	Chloridgehalt an der Probenoberfläche	[g/cm ³]
	C _x =	Chloridgehalt in der Probe auf Tiefe x	[g/cm ³]
	x=	Tiefe	[cm]
	t=	Versuchsdauer	[s]
	erf=	Fehlerfunktion (aus mathematischen Tabellen)	
	D=	Diffusionskoeffizient	[cm ² /s]

Gleichung **(3.3)** basiert auf einem konstanten Diffusionskoeffizienten. Nachdem aber in mehreren Studien gezeigt wurde, dass der Diffusionskoeffizient mit dem Alter variiert [Buenfeld 1987, Mangat 1992, 1994, Bigas 1996] (**Kapitel 4.4**), wurden andere Berechnungsmodelle vorgeschlagen, die einen variablen Diffusionskoeffizienten beschreiben, in Abhängigkeit von der zeitlich veränderlichen Konzentration der Lösung, bzw. der chemischen Bindekapazität des Zementsteins [Mejlbro 1996, Dhir 1998, Tumidajski 1995, Nilsson 1994, Francy 1998, Jensen 1999, Bhattacharjee 1998]. Auch wird in jüngster Zeit versucht den mit chemischen Reaktionen verbundenen Ionentransport im Zementstein numerisch zu umschreiben [Barbarulo 2000, Samson 2000, Tang 1999a,b].

Verschiedene Parameter der Versuchsanordnung, wie z.B. die Konzentration der Chloridlösung oder die Probenvorbereitung, sind in den verschiedenen publizierten Arbeiten unterschiedlich (z.B. [Buenfeld 1998a,b, Wee 1997]). Das Grundprinzip der Diffusionstests bleibt aber immer dasselbe.

Auch die sogenannten Immersions- oder Pondingtests dauern in der Regel mindestens mehrere Wochen. Das zurzeit einzige normierte Testverfahren ist die **AASTHO T259-80-Prüfung** (meist als Ponding-Test bezeichnet). Bei dieser Prüfung handelt es sich um einen Auslagerungsversuch, wobei die Probekörper während 90 Tagen mit einer 3% NaCl-Lösung beaufschlagt werden. Nach der Auslagerung der Proben werden die Chloridprofile bestimmt und nach vorgegebenen Kriterien bewertet (**Kapitel 4.13**).

Aus Chloridprofilen von Laborversuchen, wie z.B. aus dem amerikanischen Ponding-Test oder von Bauwerksproben, kann mit Hilfe der **Gleichung 3.3** der Diffusionskoeffizient berechnet werden.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde darauf verzichtet, Diffusionsversuche durchzuführen, da diese für die Praxis, die rasche Antworten und Ergebnisse verlangt, zuviel Zeit beanspruchen.

3.3 Migrationstests

3.3.1 Allgemeines

Um die Testdauer zur Bestimmung des Diffusionskoeffizienten zu verkürzen, wurden sogenannte Migrationstests entwickelt, in denen die Bewegung der Ionen durch Anlegen einer Gleichspannung beschleunigt wird. Durch die angelegte Spannung wird aber nicht die eigentliche Diffusion als Folge eines Konzentrationsgradienten beschleunigt. Vielmehr wird mit der elektrischen Spannung die Ionenwanderung entsprechend ihrer Beweglichkeit (abhängig von der Grösse und der elektrischen Ladung) erhöht. Der Ionentransport wird so um etwa das Hundertfache und mehr beschleunigt. Grundsätzlich sollte daher nicht von Diffusion, sondern von Migration gesprochen werden und die ermittelten Werte sollten als Migrationskoeffizienten bezeichnet werden.

Migrationstests werden in Migrationszellen durchgeführt. Die Migrationskoeffizienten werden unter Anwendung verschiedener physikalischer Modelle und mathematischer Auswertungen entweder aus Messungen im instationären oder im stationären Zustand berechnet [Ammar 1998, Andrade 1993, 1994a-d, 1995, Amiri 1998, Castellote 2000, Dhir 1990, Lu 1998, McGrath 1996, Otsuki 1999, Truc 1998, 2000a, Tang 1992, Zhang 1995, 1998, Zhao 1998]. Zur Berechnung des Migrationskoeffizienten wird meist einer der folgenden Ansätze verwendet:

Gemäss der Einstein-Gleichung **(3.4)** besteht zwischen Leitfähigkeit und Diffusion für niedrige Konzentrationen folgende lineare Beziehung:

$$\mu = ZF \frac{D}{RT} \quad (\text{Gl. 3.4})$$

wobei:	μ =	Beweglichkeit des Ions	[cm s ⁻¹ ·dyne ⁻¹]
	Z=	Ladungszahl	[für Chlorid: -1]
	F=	Faraday'sche Konstante	[Coul/eq]
	T=	Temperatur	[K]
	R=	Universelle Gaskonstante	[cal V ⁻¹ eq ⁻¹]
	D=	Diffusionskoeffizient	[cm ² /s]

Mit der Nernst-Planck-Gleichung kann der Ionenfluss in einem Elektrolyten als Summe von Diffusion, Migration und Konvektion dargestellt werden. Dabei ist die Diffusion abhängig vom Konzentrationsgradienten, die Konvektion umfasst die Bewegungen des Elektrolyten und die Migration die Ionenbewegung im elektrischen Feld. In der Regel wird davon ausgegangen, dass keine Konvektion im Beton stattfindet und dass der diffusionsbedingte Anteil der Ionenbewegung in einem elektrischen Feld vernachlässigbar ist. Unter diesen Annahmen kann mit der Nernst-Planck-Gleichung für stationäre Verhältnisse der Migrationskoeffizient vereinfacht ausgedrückt werden als [Andrade 1994d]:

$$D_{\text{eff}} = \frac{J_{\text{cl}}RTI}{Z_{\text{cl}}FC\gamma\Delta E} \quad (\text{Gl. 3.5})$$

wobei:	D_{eff} =	Migrationskoeffizient für stationäre Verhältnisse	[cm ² /s]
	Z=	Ladungszahl	[für Chlorid -1]
	F=	Faraday'sche Konstante	[Coul/eq]
	T=	Temperatur	[°K]
	R=	Universelle Gaskonstante	[cal V ⁻¹ eq ⁻¹]
	J_{cl} =	Chloridionenfluss	[mol/cm ² s]
	ΔE =	angelegte Spannung	[V]
	γ =	Aktivitätskoeffizient	[-]
	l=	Probendicke	[cm]
	C=	Chloridkonzentration	[mol/cm ³]

Tang und Nilsson haben 1992 für die Auswertung ihres Migrationsversuchs, der im **Kapitel 3.2.2** unter dem Namen ibac-Verfahren vorgestellt wird, die Nernst-Planck-Gleichung unter Miteinbezug der Diffusionskomponente in Abhängigkeit der Zeit für instationäre Verhältnisse benutzt [Tang 1992]:

$$\frac{dC}{dt} = D_{\text{app}} \left(\frac{d^2C}{dx^2} - \frac{zFE}{RT} \cdot \frac{dC}{dx} \right) \quad (\text{Gl. 3.6})$$

wobei:	D_{app} =	Migrationskoeffizient für instationäre Verhältnisse	[cm ² /s]
	C=	Chloridkonzentration an der Stelle x zum Zeitpunkt t ist	[g/cm ³]

Eine andere Berechnung des Migrationskoeffizienten kann mit Hilfe der Nernst-Einstein-Gleichung erfolgen [Andrade 1993], wobei der Diffusionskoeffizient zum elektrischen Widerstand des Elektrolyten in Bezug gebracht wird. Dieser Ansatz beruht auf der unterschiedlichen Beweglichkeit der verschiedenen Ionen der Porenlösung im elektrischen Feld. Aus der molaren Leitfähigkeit, Ladungszahl und Konzentration kann für jede gelöste Ionenart die sogenannte Überföhrungszahl (charakteristische Grösse für die Ionenbeweglichkeit) berechnet werden. Daraus ergibt sich der Anteil einer bestimmten Ionenart am gesamten Stromfluss.

$$D_{\text{eff}} = \frac{RT}{nF^2} \cdot \frac{i_{\text{cl}}}{\Delta E} \cdot \frac{1}{\gamma C_{\text{cl}} Z_{\text{cl}}} = \frac{RT}{nF^2} \cdot \Lambda_{\text{cl}} \quad (\text{Gl. 3.7})$$

wobei: $i =$ Stromdichte $[\text{A}/\text{cm}^2]$
 $t_{\text{cl}} =$ Transportnummer für Chloridionen $[-]$
 $\Lambda_{\text{cl}} =$ molare Leitfähigkeit der Chloridionen $[\Omega^{-1} \text{cm}^2 \text{eq}^{-1}]$

Eine Lösung für instationäre Verhältnisse wurde unter der Annahme ähnlicher Randbedingungen wie beim zweiten Fick'schen Gesetz von Andrade vorgeschlagen [Andrade 1994d]:

$$C_x = C_s \left(1 - \text{erf} \frac{x}{\sqrt{\frac{ZF\Delta E}{RT} D_{\text{app}} t}} \right) \quad (\text{Gl. 3.8})$$

wobei: $C_x =$ Chloridkonzentration an der Stelle x
 $C_s =$ Chloridkonzentration an der Oberfläche des Prüfkörpers

Daraus ergibt sich eine einfache Beziehung zwischen dem Migrations- und dem Diffusionskoeffizienten, nämlich:

$$D_{\text{mig}} = D_{\text{diff}} \frac{ZF\Delta E}{RT} \quad (\text{Gl. 3.9})$$

Diese Lösung ist problematisch, da die Bewegung der Chloridionen als unabhängig von den übrigen Ionen im Porenwasser betrachtet wird. Die Annahme, dass die beschleunigte Ionenbewegung nur proportional zur Mobilität der Ionen und der angelegten Spannung ist, gilt nur, wenn zwischen den verschiedenen Ionen keine Wechselwirkungen stattfinden.

Streicher und Alexander haben einen **Leitfähigkeitstest** entwickelt [Streicher 1995a], der diese Problematik umgeht. Ausgehend von der Einstein-Gleichung (**Gleichung 3.4**) nehmen sie an, dass in einem gesättigten, inerten Material sowohl die Diffusionsrate wie auch die Migrationsrate eines Ions von der Porenstruktur (Tortuosität, Porendurchmesser und -verteilung) bestimmt wird.

Die Methode beruht auf der Annahme, dass durch die Sättigung des Betons mit einer konzentrierten Chloridlösung die Hauptladungsträger die Chloridionen und Hydroxidionen sind und, dass damit das Porenwasser aller Betone dieselbe elektrische Leitfähigkeit aufweist. Wegen der Sättigung mit der Chloridlösung herrschen stationäre Verhältnisse und die Unterschiede in der gemessenen elektrischen Leitfähigkeit können auf Unterschiede in der Porenstruktur zurückgeführt werden. Das Verhältnis Q der Diffusionsrate D eines Ions in einem porösen Material zur Diffusionsrate D_0 desselben Ions in einer Lösung ist gleich wie das Verhältnis der Beweglichkeit oder der Leitfähigkeit σ eines Ions in einem porösen Material und der Leitfähigkeit σ_0 desselben Ions in einer Lösung:

$$Q = \frac{D}{D_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} \quad (\text{3.10})$$

Theoretisch ist es deshalb möglich den Migrationskoeffizienten aus der Messung der Leitfähigkeit abzuleiten. Im Gegensatz zu den vorangehenden Lösungen (**Gleichung 3.8 und 3.9**) ist es nicht notwendig, die Überföhrungszahl der einzelnen gelösten Ionen zu bestimmen, um den Chloridionenfluss zu berechnen. Trotz der nicht idealen Natur der Lösung kann der Aktivitätskoeffizient vernachlässigt werden, da die Diffusionsrate auf Messungen derselben Lösung (außerhalb und im Porenraum) mit der gleichen Zusammensetzung und dem gleichen Chloridgehalt (gleiche Überföhrungszahlen und Aktivitätskoeffizienten) beruht.

3.3.2 AASTHO T277-93 / ASTM C 1202-91

Der erste „schnelle Chloridtest“ wurde 1981 von Whiting entwickelt [Whiting 1981]. Er wird in den USA vor allem als Normprüfung AASTHO T 277-83 / ASTM C 1202-91 eingesetzt (**Bild 3.1**).

Als Prüfkörper dienen Bohrkerne mit einem Durchmesser von 50 oder 100mm und einer Höhe von 50mm. Die Bohrkerne werden während 2 Tagen bei 50 °C getrocknet. Anschliessend erfolgt eine Vakuumsättigung der Proben, d.h. mindestens 3 Stunden evakuieren (Druck: <0.1mbar) und mit Wasser fluten. Danach bleiben die Proben während mindestens 48 Stunden unter Wasser. Anschliessend werden die Mantelflächen abgedichtet und abgeklebt.

Die seitlich abgedichteten Bohrkerne werden in die Messzelle eingespannt und mit Silikon abgedichtet. Die Messzellen werden mit 0.3 N NaOH (Kathode) und mit einer 3%-igen NaCl-Lösung (Anode) gefüllt. Während 6 Stunden wird eine Spannung von 60 Volt angelegt. Der Stromfluss muss kontinuierlich oder mindestens alle 30 Minuten gemessen werden. Nach 3 Stunden werden die Lösungen ersetzt. Als Mass für den Chloridwiderstand dient die gesamte, während der Prüfzeit geflossene Ladungsmenge. Sie gilt als Mass für die Chloridpermeabilität bzw. den Chloridwiderstand.

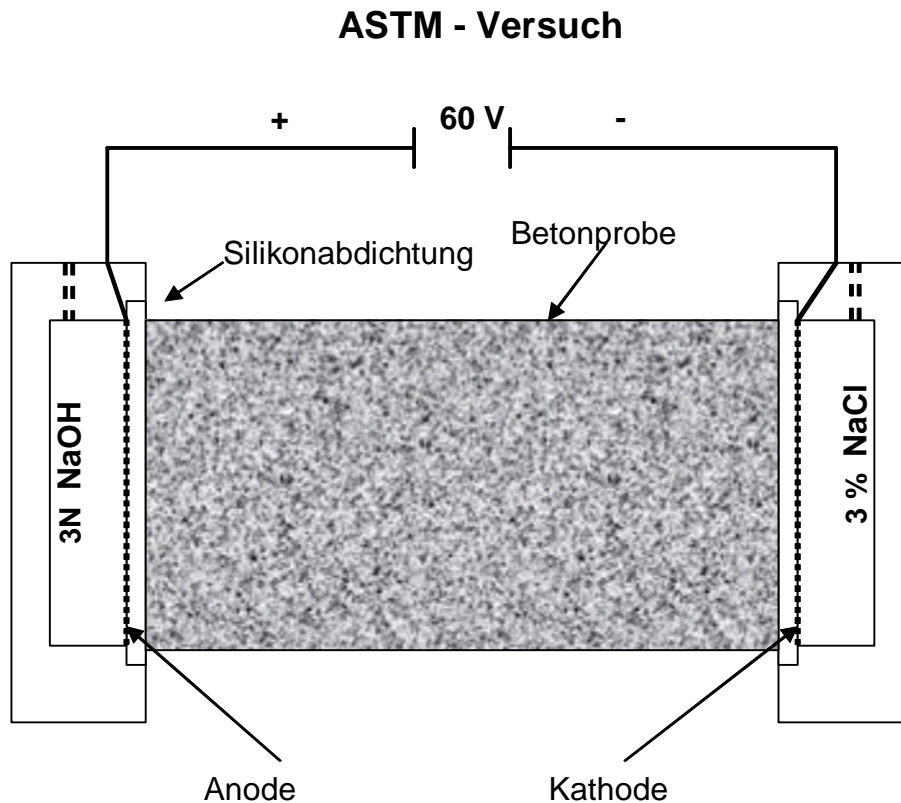


Bild 3.1: Versuchsanordnung zur Bestimmung der Ladungsmenge im ASTM-Schnelltest (schematisch).

Als einzige genormte Prüfung wird diese Methode häufig angewendet. Sie birgt aber eine Reihe Nachteile, wie Fragen zur Versuchsanordnung (die hohe angelegte Gleichspannung kann zu einer Erwärmung des Probekörpers und zu einer Beschleunigung des Ionentransports führen) sowie Interpretationsschwierigkeiten, da die gemessene Ladungsmenge nicht nur durch den Chloridionenfluss, sondern vom Fluss aller in der Porenlösung vorhandenen Ionen, d.h. von der Betonzusammensetzung, abhängig ist.

So ergeben silikastaubhaltige Betone niedrigere Werte, nicht unbedingt weil weniger Chloridionen durch die Proben fließen, sondern weil der Gehalt an Ca^{2+} -, Na^+ -, K^+ - und OH^- -Ionen im Porenwasser generell tiefer ist als bei Betonen ohne Silikastaub. Wegen der kurzen Testdauer scheint eine Chloridbindung im Zementstein nicht stattzufinden, so dass sich evtl. ein verfälschtes Bild über den Chloridwiderstand verschiedenartiger Betone ergibt. Es besteht deshalb eine gewisse Unsicherheit, ob der Test tatsächlich das Verhalten von Betonen gegenüber eindringender Chloridionen misst oder einfach eine indirekte Messung des elektrischen Widerstandes des Betons darstellt.

Aus dieser Prüfung wird kein Migrationskoeffizient abgeleitet. Es handelt sich vielmehr um einen qualitativen Test [Andrade 1995]. Die Beurteilungskriterien der Versuchsergebnisse sind in **Tabelle 3.1** angegeben [Whiting 1981].

Ladungsmenge [Coulomb]	Eindringvermögen von Chloriden in den Beton
>4'000	hoch
2'000 - 4'000	mittel
1'000 - 2'000	niedrig
100 - 1'000	nehr niedrig
<100	vernachlässigbar

Tabelle 3.1: Beurteilung des Chloridwiderstandes von Beton auf der Basis der im ASTM-Schnelltest gemessenen Ladungsmenge [Whiting 1981].

Eine modifizierte Form dieses Versuches wurde ebenfalls entwickelt. Dabei wird mit einer reduzierten Spannung von 12 V gearbeitet und die Versuchsdauer auf 30 h verlängert. Die Eindringtiefe der Chloridionen wird kolorimetrisch bestimmt und daraus ein Migrationskoeffizient berechnet [Andrade 1999a,b, 2000].

3.3.3 Verfahren nach ibac (Tang und Nilsson)

Tang und Nilsson haben **1992** [Tang 1992] ein Schnellverfahren, den sogenannten **CTH-Test**, vorgestellt, das vom Institut ibac in Aachen zum Bau einer kommerziell erhältlichen Migrationszelle übernommen wurde (**ibac-Verfahren, Bild 3.2**). Das Prüfverfahren beruht auf der Messung der Eindringtiefe von Chloridionen, die während einer gewissen Testdauer aus einer chloridhaltigen Lösung (3% NaCl in 0.2 molarer NaOH-Lösung) in den Probekörper einwandern (Probendurchmesser und -höhe: 50mm, vorgängig wassergesättigt). Zur Beschleunigung des Chlorideintrags wird während 12 Stunden bis maximal 7 Tagen (je nach Betonqualität) eine Spannung von 30 bis 40 V angelegt. Nach Beendigung des Migrationsversuches wird der Probekörper aufgespalten und die Eindringtiefe kolorimetrisch mit Hilfe einer Indikatorlösung (Fluoreszin in Ethanol) und einer AgNO_3 -Lösung bestimmt.

Der Migrationskoeffizient wird mit Hilfe der Nernst-Planck-Gleichung für instationäre Verhältnisse aus der Eindringtiefe der Chloridionen berechnet.

In ihrem kritischen Vergleich der verschiedenen Migrationstests, halten Streicher und Alexander [Streicher 1994] fest, dass dieser Versuch über eine solide theoretische Basis verfügt. Er weist zudem einige Vorteile auf:

- Die Versuchsanordnung und -dauer sind für praktische Anwendungen zweckmässig.
- Es können genügend grosse und repräsentative Probekörper geprüft werden.
- Die aufwendige analytische Bestimmung der Chloridprofile kann mit dem kolorimetrischen Nachweis der Eindringtiefe der Chloridionen vermieden werden.

Zu diesem Verfahren ist kritisch anzumerken, dass bei der Lösung der Nernst-Planck-Gleichung von Tang und Nilsson weder die Aktivitätskoeffizienten noch die Tatsache, dass die Bewegung der Chloridionen mit der Bewegung der anderen Ionen zusammenhängt (Elektroneutralität der Lösung) berücksichtigt werden. Es wird vorausgesetzt, dass die Porenlösung zu Beginn des Versuches in allen Betonen gleich ist und dass die elektrische Spannung überall im Probekörper gleich gross ist. Bei längerer Testdauer (stationäre Verhältnisse) nimmt der Migrationskoeffizient jedoch ab und dies vor allem bei hohen w/z-Werten [Tang 1995a]. Gründe dafür könnten Schwankungen im elektrischen Feld sein (z.B. hinter und vor der Chloridfront, im Bereich grösserer Zuschlagskörner, infolge Polarisierung der Elektroden usw.), die Chloridbindung im Zementstein oder die kolorimetrische Bestimmung der Chlorideindringtiefe.

Die kolometrische Bestimmung der Chlorideindringtiefe basiert auf einer minimalen Chloridkonzentration, bei welcher die Indikatorlösung umschlägt. Diese Reaktion kann aber z.B. durch den Alkaligehalt im Beton beeinflusst werden [Otsuki 1992]. Für eine korrekte Auswertung des Versuches ist es notwendig eine klare kolometrische Front zu erhalten (Probleme treten z.B. auch dort auf, wo die Front durch grössere Zuschlagskörner durchbrochen wird).

Andrade et al. haben in einem Bericht der RILEM Arbeitsgruppe (COST 521-Project No. SP1 of WG B-3: Testung and Modelling Chloride Ingress into Concrete) die kolorimetrische Bestimmung der Chlorideindringfront untersucht [Andrade 1999a]. Sie beurteilen diese Methode eher kritisch, weil die Indikatorlösung mit den freien Chloriden in der Porenlösung reagiert und es keine genauen Grenzwerte für den Chloridgehalt gibt, bei welcher diese Reaktion stattfindet. Otsuki et al. stellten fest, dass der Umschlagspunkt der Reaktion bei einem Gesamtchloridgehalt zwischen 0.36 und 0.8M.%/Z bzw. einem freien Chloridgehalt von 0.15M.%/Z liegt [Otsuki 1992]. Die von Andrade et al. untersuchten Betone wiesen den Umschlagspunkt bei einem Gesamtchloridgehalt von $1.13 \pm 1.4 \text{ M\%/Z}$ auf. Diese grosse Bandbreite dürfte darauf zurückzuführen sein, dass die Farbreaktion mit den freien Chloriden stattfindet, die angegebenen Chloridgehalte aber auch die gebundenen Chloride umfassen. Die Autoren stellen fest, dass die zur Chloridbindung verfügbare Reaktionszeit des Zementsteins umso länger ist, je langsamer die Chloride in den Beton eindringen bzw. je dichter Beton ist und je höher der Gesamtchloridgehalt beim Umschlagspunkt ist.

Die Versuchsdauer und die angelegte Spannung muss der Dichtigkeit des Betons angepasst werden. Bei hohen w/z-Werten besteht das Risiko, dass die Chloridionen den ganzen Probekörper durchquert haben und es nicht mehr möglich ist, die Eindringfront in Funktion der Zeit zu bestimmen. Bei zu kurzer Versuchsdauer liegen die Eindringtiefen im Bereich der ersten Millimeter, sodass der Messfehler beim Ausmessen der Eindringtiefe sehr gross wird.

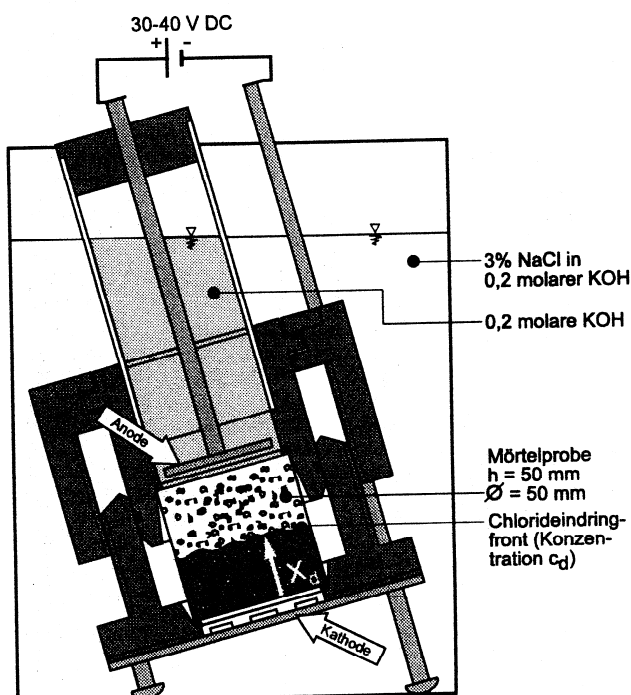


Bild 3.2: Versuchsanordnung für die Bestimmung des Migrationskoeffizienten nach dem ibac-Verfahren (schematisch).

3.3.4 Leitfähigkeitstest (Streicher und Alexander)

Dieses Prüfverfahren wurde **1995** von **Streicher und Alexander** entwickelt [Streicher 1995a] und wird in dieser Arbeit als **Streicher-Verfahren** bezeichnet. Die Testanordnung ist in **Bild 3.3** dargestellt.

Als Prüfkörper werden Bohrkernabschnitte verwendet. Diese werden während mindestens 7 Tagen bei 50 °C getrocknet und während mindestens 5h unter Vakuum und danach während 18 ± 1 h drucklos mit einer 5 molarer NaCl-Lösung gesättigt. In gesättigtem Zustand der Proben wird bei 25 ± 0.5 °C der elektrische Widerstand bzw. die elektrische Leitfähigkeit bestimmt. Es können bis zu 20 Proben pro Stunde gemessen werden.

Auf beiden Seiten des eingebauten Probekörpers (Durchmesser 50 mm, Höhe ca. 50 mm) ist eine Zelle mit 5M NaCl-Lösung angebracht. Eine Spannung von 0 bis 20 V wird zwischen einer Kohlenstoffanode und einer nichtrostenden Stahlkathode angelegt. Die Spannungsdifferenz zwischen beiden Lösungen und beidseitig der Probe wird mit Hilfe von Kupfer/Kupfersulfat-elektroden gemessen.

Diese Prüfung ist sehr schnell, aber anfällig auf Fehlmessungen bei undicht eingebauten Prüfkörpern. Bei sehr dichten Betonsorten, muss speziell darauf geachtet werden, dass die Sättigung der Probekörper vollständig ist (evtl. vorgängig unter Vakuum trocknen).

Bei diesem Verfahren wird die Trocknung der Probekörper kritisch beurteilt, weil damit die Porenstruktur verändert werden könnte.

Wenn die Proben über längere Zeit (zwei Wochen) in der Salzlösung gelagert werden, verringert sich ihre Leitfähigkeit [Streicher 1995b]. Als Gründe dafür werden die weitere Hydratation des Zements und die Bildung von Chloridverbindungen im Zementstein angenommen, die die Porenstruktur des Betons verstopfen bzw. verdichten.

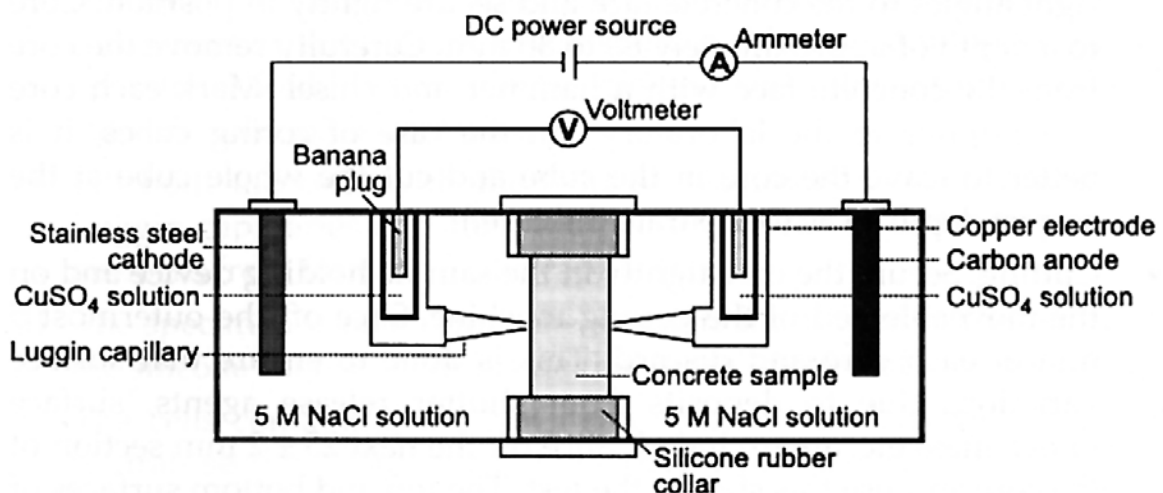


Bild 3.3: Versuchsanordnung für die Bestimmung der Leitfähigkeit nach dem Streicher-Verfahren (schematisch).

3.4 Aufsaugversuche

Chloridionen dringen in vielen Fällen zumindest oberflächlich hauptsächlich über den kapillaren „Huckepacktransport“ in den Beton ein. Die Diffusion spielt dabei eine geringe Rolle. Deshalb wurden verschiedene kapillare Aufsaugversuche entwickelt, um die Dichtigkeit von Betonen zu beurteilen und, um die Kinetik dieses Transportmechanismus zu erfassen. Einige Methoden eignen sich auch für Messungen vor Ort (z.B. Karsten-Röhrchen). Basierend auf Aufsaugversuchen hat Lunk ein numerisches Modell entwickelt, um das Eindringen von Chloriden zu beschreiben [Lunk 1997, 1998a] (**Kapitel 2.3.1**).

Nach unseren Kenntnissen ist es das bisher einzige Modell, das sich auf Aufsaugversuche abstützt. In dieser Arbeit wurde deshalb der Aufsaugversuch in Anlehnung an die Arbeiten von Lunk gestaltet. Dabei sollen aus der Steighöhe, der aufgenommenen Wassermenge und der Chloridverteilung im Bohrkern einerseits die charakteristischen Grössen als Mass für den Chloridwiderstand eines Betons ermittelt und andererseits Hinweise zum sogenannten Retardierungseffekt (chemisch und physikalischer Filtereffekt des Zementsteins, Chloridbindung etc.) gewonnen werden.

Mit diesem Verfahren wurden Laborbetone im Alter von 360 Tagen und zusätzlich Bauwerksbetone untersucht. Bei den Laborbetonen wird die geschaltete Fläche der Würfel, bei den Bauwerksbetonen die äussere Betonoberfläche als unteres Bohrkernende bezeichnet.

Pro Versuch werden 2 Bohrkern mit einer Länge von 100mm und einem Durchmesser von 50mm verwendet. Die Proben werden bei 70% relativer Luftfeuchtigkeit bis zum gewünschten Betonalter gelagert und vor Versuchsbeginn während 7 Tagen bei 50°C getrocknet. Die Mantelfläche der Bohrkern wird mit einer Transparentfolie wasserdicht abgedichtet. Der Aufsaugversuch über das untere Bohrkernende erfolgt in einer 3% NaCl-Lösung und dauert in der Regel 10 Tage. Dabei werden durch Wägen der Proben die aufgenommene Wassermenge und visuell die Steighöhe in regelmässigen Abständen gemessen (24, 72, 120, 240 Stunden). Am Ende des Aufsaugversuches werden an den Bohrkernen die Chloridprofile in 10mm-Scheiben bestimmt (Gesamtchloridgehalt mittels RFA).

Dieses Prüfverfahren ist zeit- und kostenaufwendig wegen der langen Probenvorbereitung, der Versuchsdauer selbst und der relativ hohen Kosten für die erforderlichen Chloridanalysen.

Bohrkerngrösse und Versuchsdauer wurden gemäss den Angaben von Lunk [Lunk 1997] gewählt. Bei Betonen mit unbekannter Zusammensetzung und unbekanntem Wassereindringverhalten ergeben sich Unsicherheiten beim Abschätzen des voraussichtlichen Zeitpunktes, bei dem die Steighöhe das obere Bohrkernende erreichen wird.

4. Einflussfaktoren auf den Chloridwiderstand (Literaturrecherche)

Der Chloridwiderstand wird von einer ganzen Reihe von Faktoren beeinflusst. Im Folgenden sollen einige grundlegende Ergebnisse, die mit den in diesem Forschungsprojekt eingesetzten Verfahren (**Kapitel 3 und 5**) ermittelt wurden, vorgestellt werden:

- Zementart und -gehalt sowie Betonzusatzstoffe
- Wasser-Zementwert (w/z-Wert) bzw. Wasser-Bindemittelwert (Wasser / gesamter Bindemittelgehalt, d.h. Zement und Betonzusatzstoffe, w/B-Wert)
- Druckfestigkeit
- Alter des Betons
- Temperatur
- Nachbehandlung
- Betonfeuchtigkeit
- Salzgehalt der Prüflösungen
- Karbonatisierung

4.1 Zementart und -gehalt sowie Betonzusatzstoffe und -mittel

In den letzten Jahren wurde der positive Einfluss von Hüttensand (HS), Flugasche (FA), Silikastaub (MS) und Metakaolin (MK) auf den Chloridwiderstand von Beton in einer sehr grossen Zahl von Arbeiten beschrieben. Aus den **Bildern 4.1 bis 4.4** kann man schliessen, dass mit der Zugabe von Betonzusatzstoffen bzw. mit der Verwendung von Mischzementen (Zementart CEM II und CEM III) der Chloridwiderstand schon bei mittleren w/B-Werten wesentlich verbessert werden kann. Um ähnliche gute Ergebnisse zu erzielen, sofern dies überhaupt möglich ist, muss der w/z-Wert bei Normalbetonen (= Betone mit Portlandzement) stark, d.h. um etwa 0.1 bis 0.2 Einheiten, reduziert werden.

In verschiedenen Arbeiten wird auf die unterschiedliche Reaktivität von Hüttensanden und Flugaschen hingewiesen (z.B. in [Thomas 1998, Schiessl 1997]) (siehe dazu auch **Bild 4.21**). Mit einer Aktivierung der Schlacke mittels NaOH-Zugabe kann der Diffusionskoeffizient erniedrigt werden [Roy 2000].

Ein höherer Bindemittelgehalt führt bei konstantem w/B-Wert zu tendenziell höheren Werten für den Chloriddiffusionskoeffizienten (**Bild 4.5**) [Dhir 1996, Buenfeld 1998b].

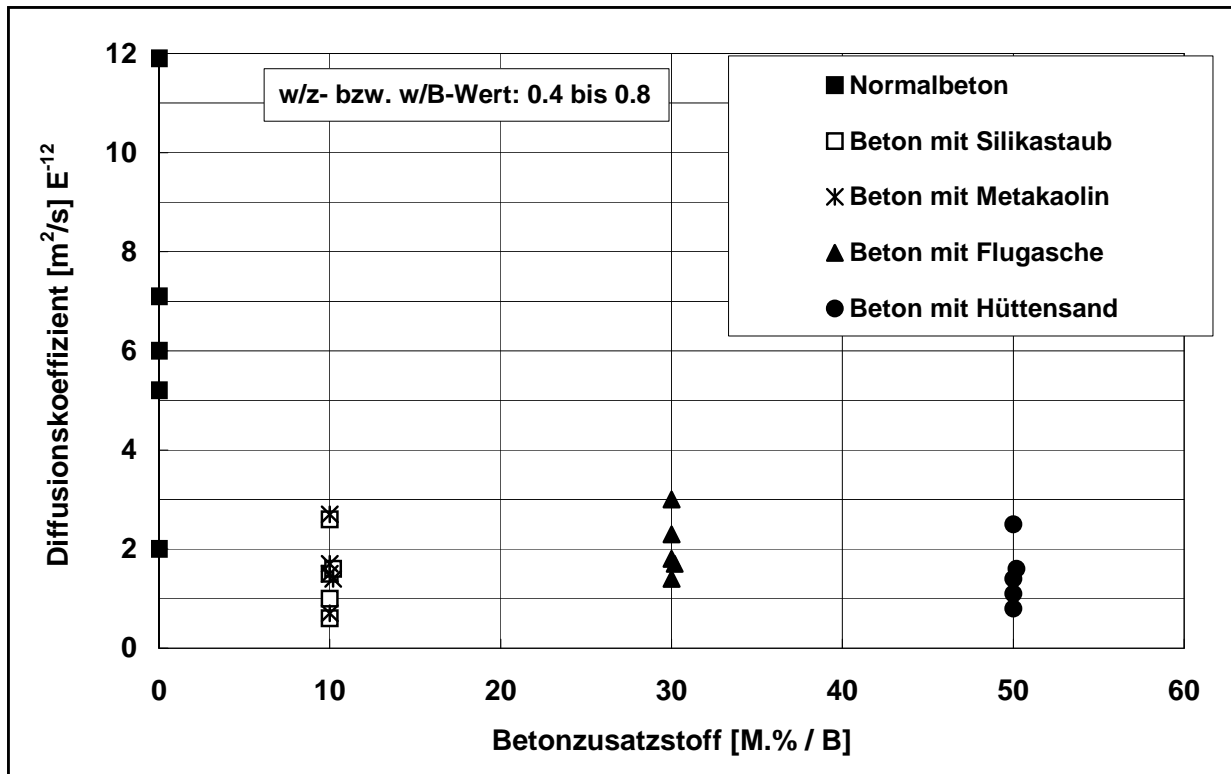


Bild 4.1: Abhängigkeit des aus Chloridprofilen berechneten Chloriddiffusionskoeffizienten vom Anteil an Betonzusatzstoffen am gesamten Bindemittelgehalt. Daten von [Mackechnie 2000].

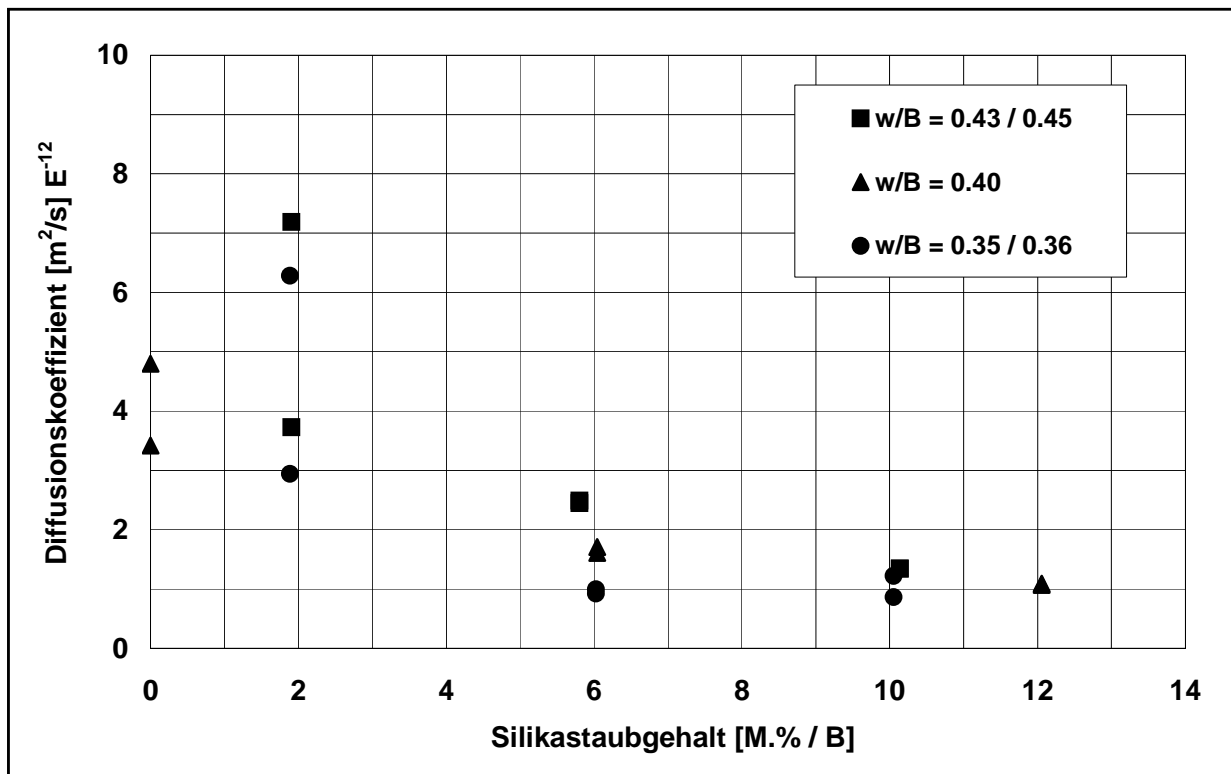


Bild 4.2: Abhängigkeit des Chloriddiffusionskoeffizienten vom Anteil an Silikastaub am gesamten Bindemittelgehalt [Detwiler 1999].

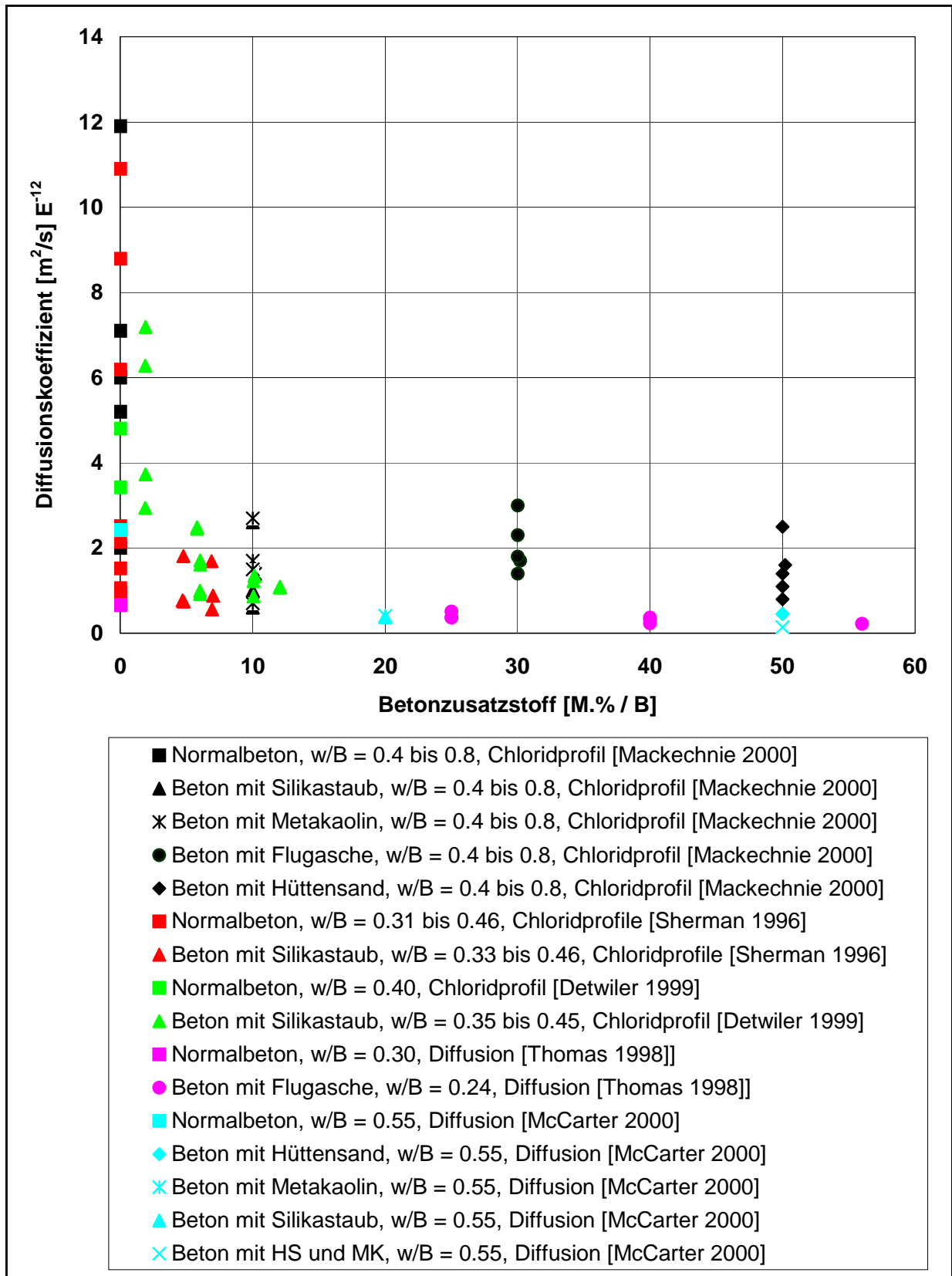


Bild 4.3: Abhängigkeit des Chloriddiffusionskoeffizienten vom Anteil an Betonzusatzstoffen am gesamten Bindemittelgehalt.

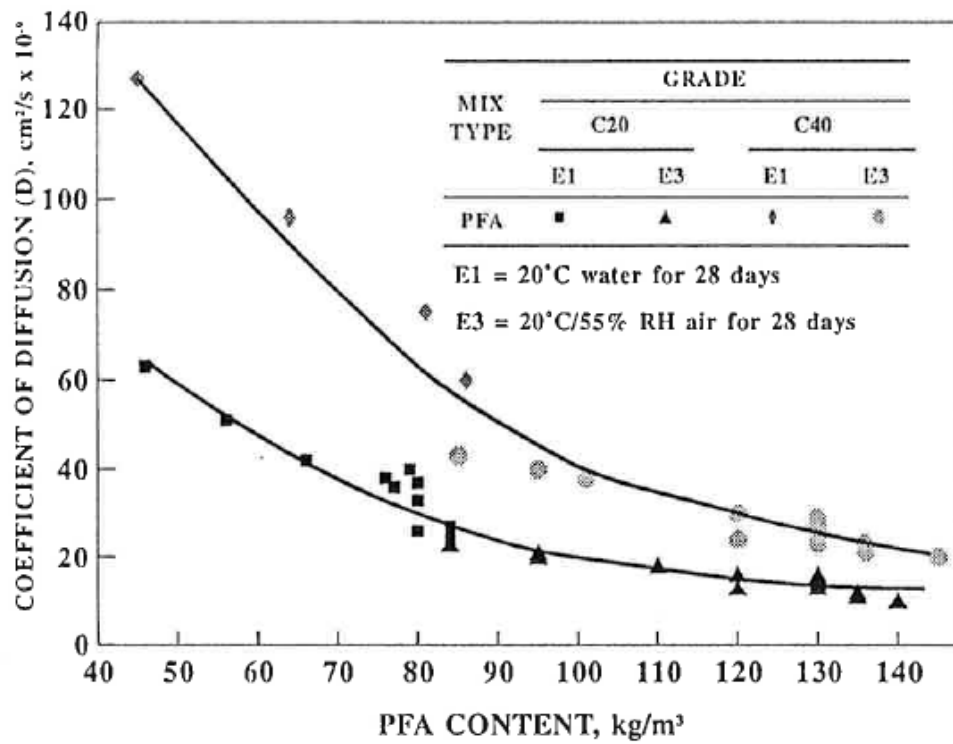


Bild 4.4: Abhängigkeit des Chloriddiffusionskoeffizienten vom Flugaschegehalt (PFA) bei zwei verschiedenen Betonen und unterschiedlichen Nachbehandlungen [Jones 1993].

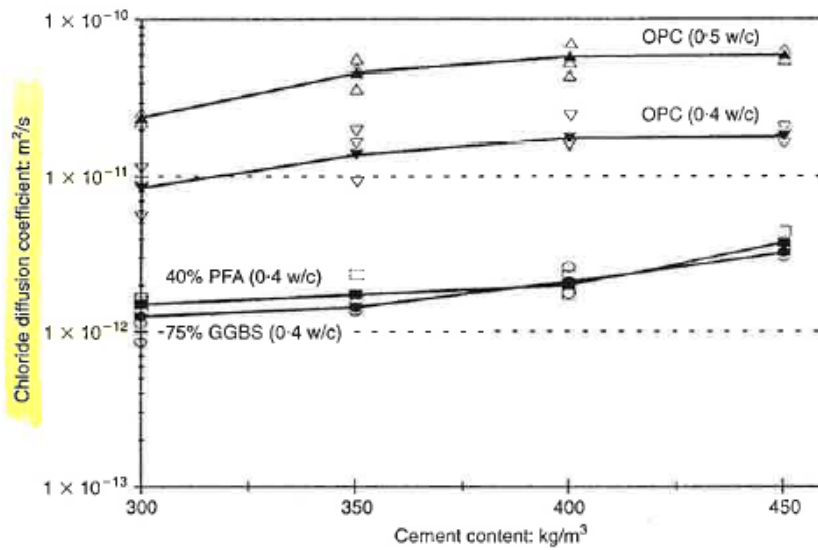


Bild 4.5: Einfluss des Bindemittelgehaltes auf den Chloriddiffusionskoeffizienten [Buenfeld 1998b].

Der Einfluss von Betonzusatzmitteln oder von Kunststoffen auf den Chloridwiderstand wurde bisher kaum systematisch untersucht. Die Wirkung von dichtenden Betonzusatzmitteln ist gemäss **Bild 4.6** vorab bei weniger dichten Betonen sehr ausgeprägt. Die wenigen Resultate von kunststoffmodifizierten Betonen lassen keine gesicherte Beurteilung zu (**Bild 4.7**).

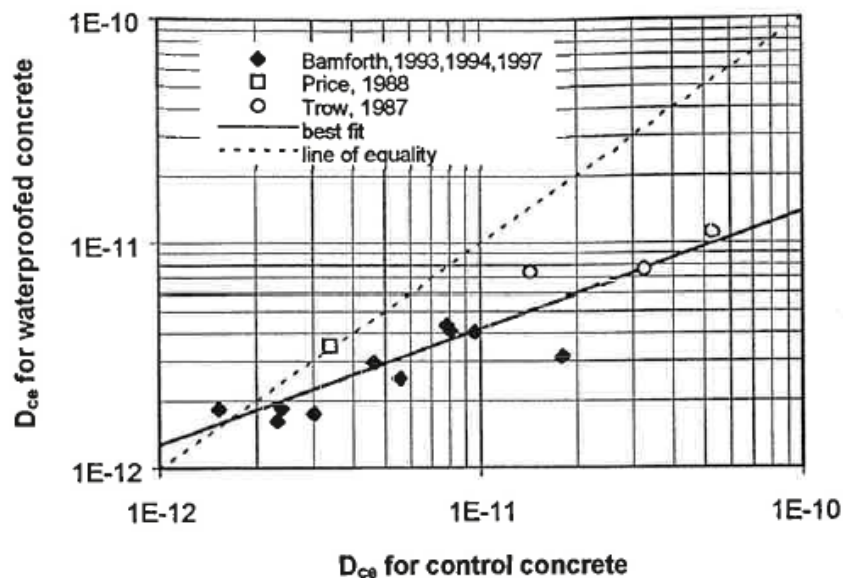


Bild 4.6: Beziehung zwischen dem Chloriddiffusionskoeffizienten von Betonen mit dichtenden Betonzusatzmitteln und Normalbetonen [Bamforth 1997].

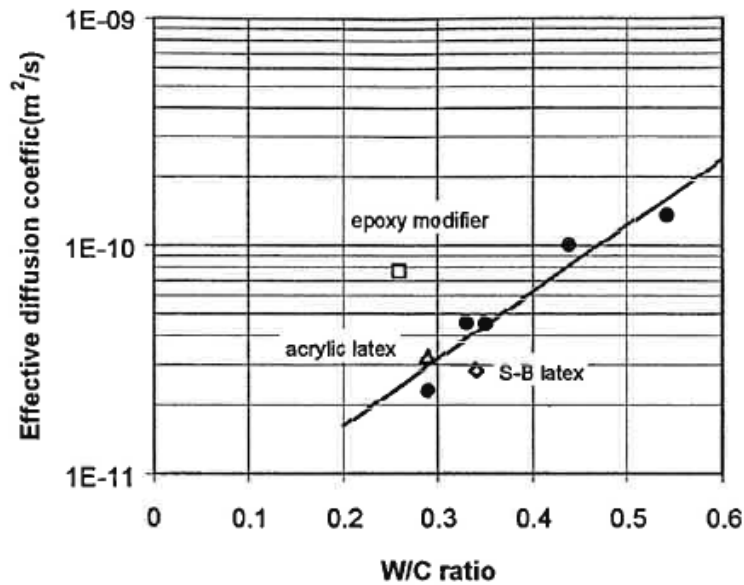


Bild 4.7: Einfluss von Kunststoffen auf den Chloriddiffusionskoeffizienten [Bamforth 1997].

4.2 Wasser/Zement-Wert (w/z-Wert) und Wasser/Bindemittel-Wert (w/B-Wert)

Der Wasser-Zementwert (w/z-Wert) und der Wasser-Bindemittelwert (w/B-Wert) sind seit jeher Grössen, die zur Beurteilung der Dichtigkeit oder Dauerhaftigkeit benutzt werden. Bei gleichartigen Betonen ist dies durchaus ein vernünftiger Weg. Will man damit aber Betone mit unterschiedlichsten Zementarten und Betonzusatzstoffen oder Zementsteinvolumina beurteilen, stösst man an Grenzen. Hinsichtlich des Chloridwiderstandes heisst dies, dass nicht ein bestimmter w/z- bzw. w/B-Wert gefordert werden sollte, sondern – einen von den Expositionsbedingungen, der Überdeckung und von der Nutzungszeit abhängiger Chloridwiderstand.

Die **Bilder 4.8 bis 4.11** veranschaulichen den Einfluss des w/z- bzw. w/B-Wertes auf verschiedene Kenngrössen für den Chloridwiderstand.

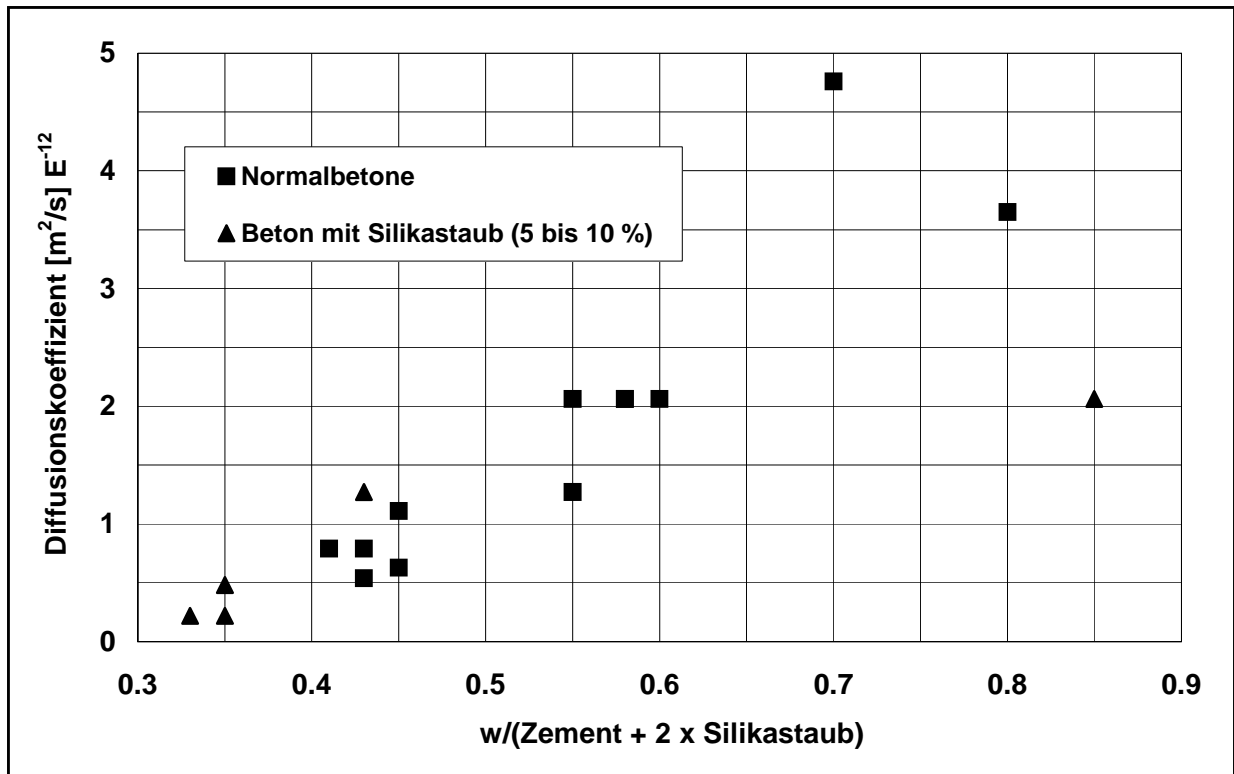


Bild 4.8: Einfluss des w/B-Wertes bzw. des Silikastaubgehaltes auf den Chloriddiffusionskoeffizienten. Daten von [Maage 1994].

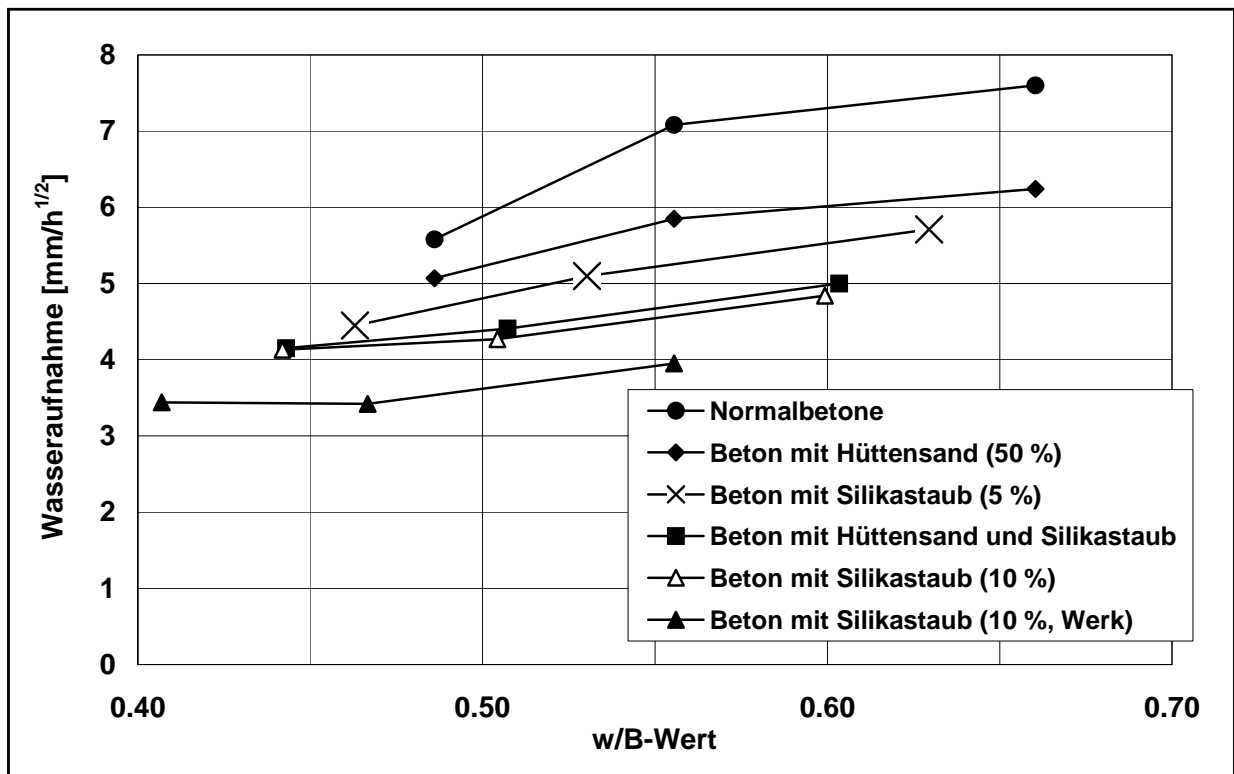


Bild 4.9: Einfluss des w/B-Wertes und von Betonzusatzstoffen auf die Wasseraufnahme. Daten von [Alexander 1999b].

Anmerkung: Beachtenswert ist die bessere Wirkung von im Zementwerk zugemischtem Silikastaub.

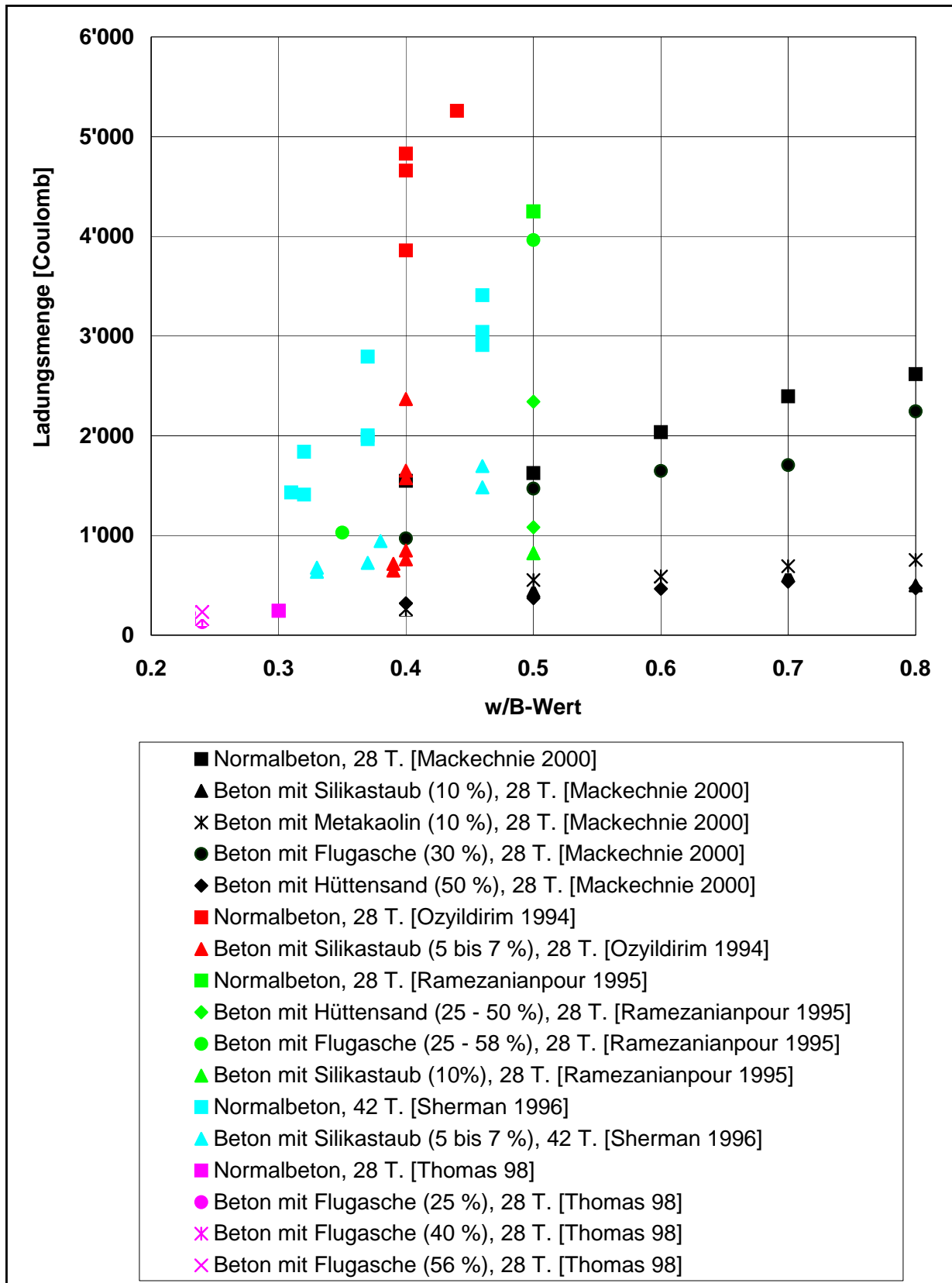


Bild 4.10: Einfluss des w/B-Wertes und von Betonzusatzstoffen auf die Ladungsmenge im ASTM-Test.

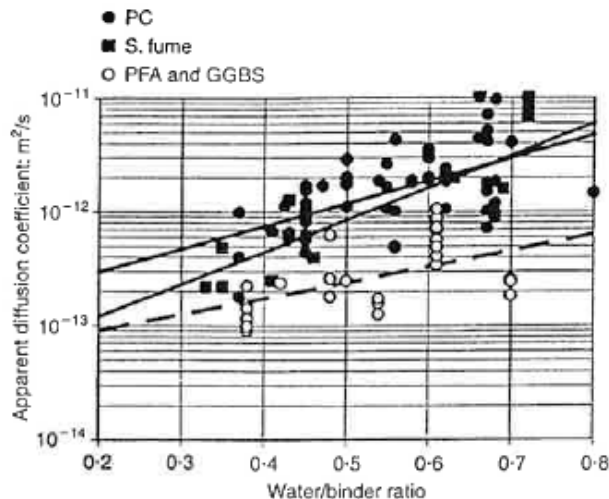


Bild 4.11: Einfluss des w/B-Wertes und von Betonzusatzstoffen auf den Chloriddiffusionskoeffizienten [Bamforth 1999].

Die Ergebnisse zeigen, dass die Zugabe von Betonzusatzstoffen eine positive Wirkung auf den Chloridwiderstand haben kann. Bei sehr tiefen w/B-Werten kann der an sich schon sehr hohe Chloridwiderstand durch die Zugabe von Betonzusatzstoffen deutlich weniger verbessert werden als bei mittleren bis hohen w/B-Werten. So fand auch Schiessl, dass der Chloridmigrationskoeffizient eines Hochleistungs-Referenzbetons (w/z-Wert = 0.30) nur wenig grösser war als der Wert des Betons mit 30 M.% Flugasche ($1.9 \cdot 10^{-12}$ zu $1.2 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) [Schiessl 2001].

Die **Bilder 4.8 bis 4.11** machen deutlich, dass der w/B-Wert wohl als Steuergrösse, für sich alleine aber nicht als Kriterium für den Chloridwiderstand dienen kann (wie auch nicht für andere Kenngrössen des Betons). Diese Aussage ist in Übereinstimmung mit den Ergebnissen vieler Arbeiten (s. z.B. [Sugiyama 2001]).

4.3 Druckfestigkeit

Viele Dauerhaftigkeitseigenschaften zeigen einen mehr oder weniger ausgeprägten Zusammenhang mit der Druckfestigkeit des Betons. Dieser Zusammenhang rührt daher, dass im Wesentlichen die Festigkeit des Zementsteins und der Kontaktzone Zementstein/Zuschlag die Druckfestigkeit des Betons prägt. Mit einem dichteren Zementsteingefüge nimmt auch dessen Festigkeit zu. Aus der Druckfestigkeit die charakteristischen Grössen für den Chloridwiderstand für verschiedene Betonsorten mit ausreichender Sicherheit abzuleiten oder gar zu berechnen, ist aber nicht möglich.

Die **Bilder 4.12 bis 4.17** machen deutlich, dass bei einer bestimmten Druckfestigkeit die Kenngrössen für die Dichtigkeit oder den Chloridwiderstand des Betons (z.B. Wasseraufnahme, Diffusionskoeffizient) abhängig von der Art und Menge des Zements und der Betonzusatzstoffe variieren. Deshalb ist die Druckfestigkeit wohl als Steuergrösse, nicht aber zur Charakterisierung des Chloridwiderstandes geeignet.

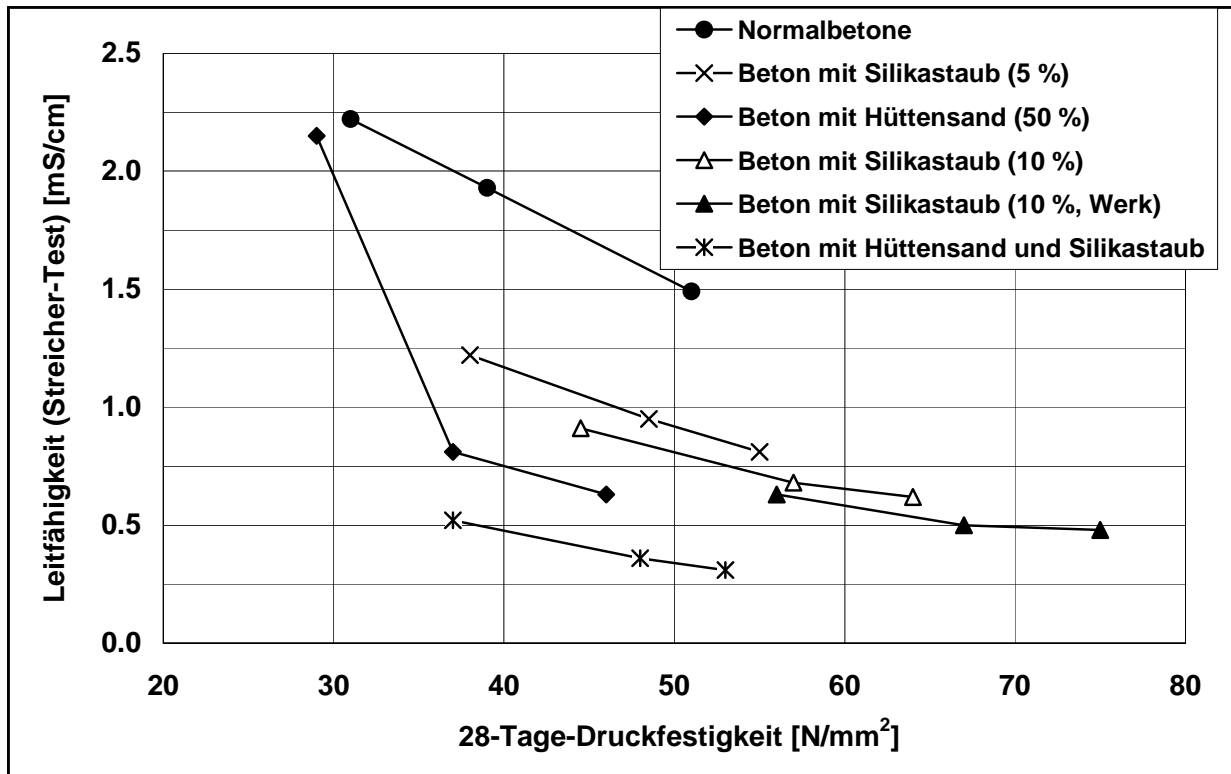


Bild 4.12: Beziehung zwischen der elektrischen Leitfähigkeit (Streicher-Test) und der Druckfestigkeit für Betone mit verschiedenen Betonzusatzstoffen. Daten von [Alexander 1999b]. Siehe auch Anmerkung zu **Bild 4.9**.

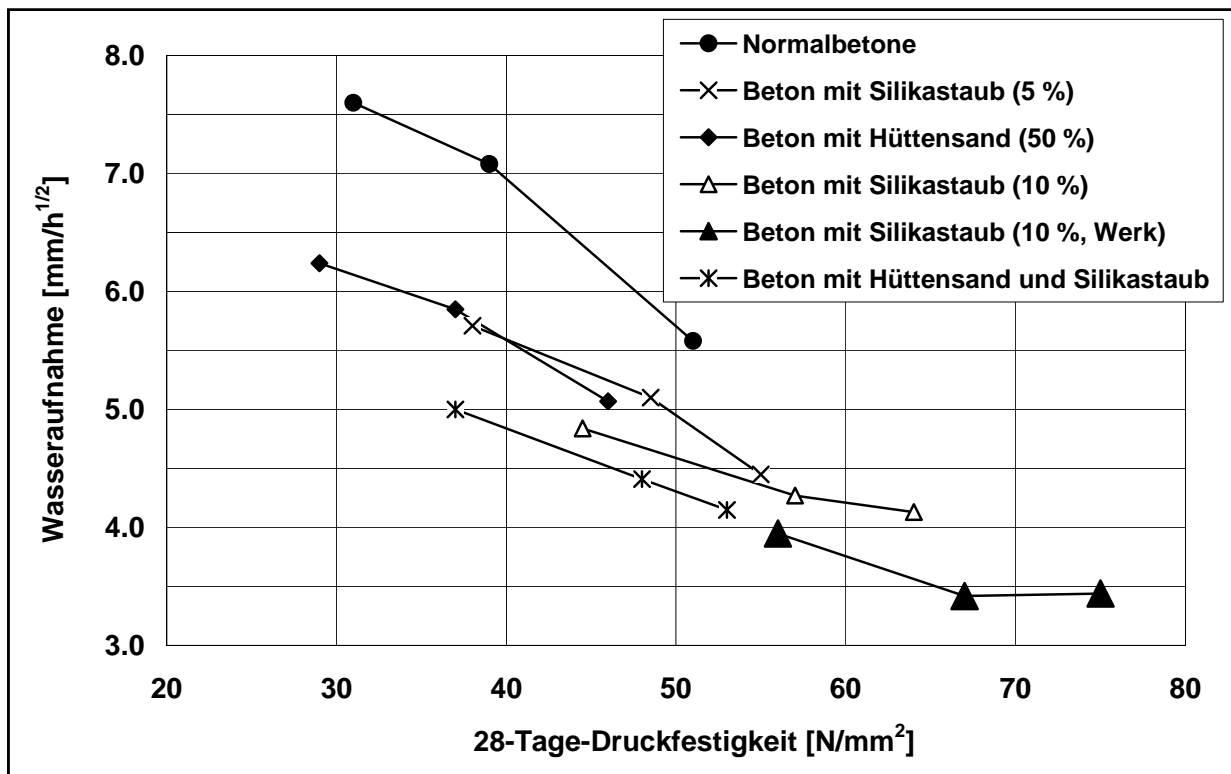


Bild 4.13: Beziehung zwischen der Wasseraufnahme und der Druckfestigkeit für Betone mit verschiedenen Betonzusatzstoffen. Daten von [Alexander 1999b]. Siehe auch Anmerkung zu **Bild 4.9**.

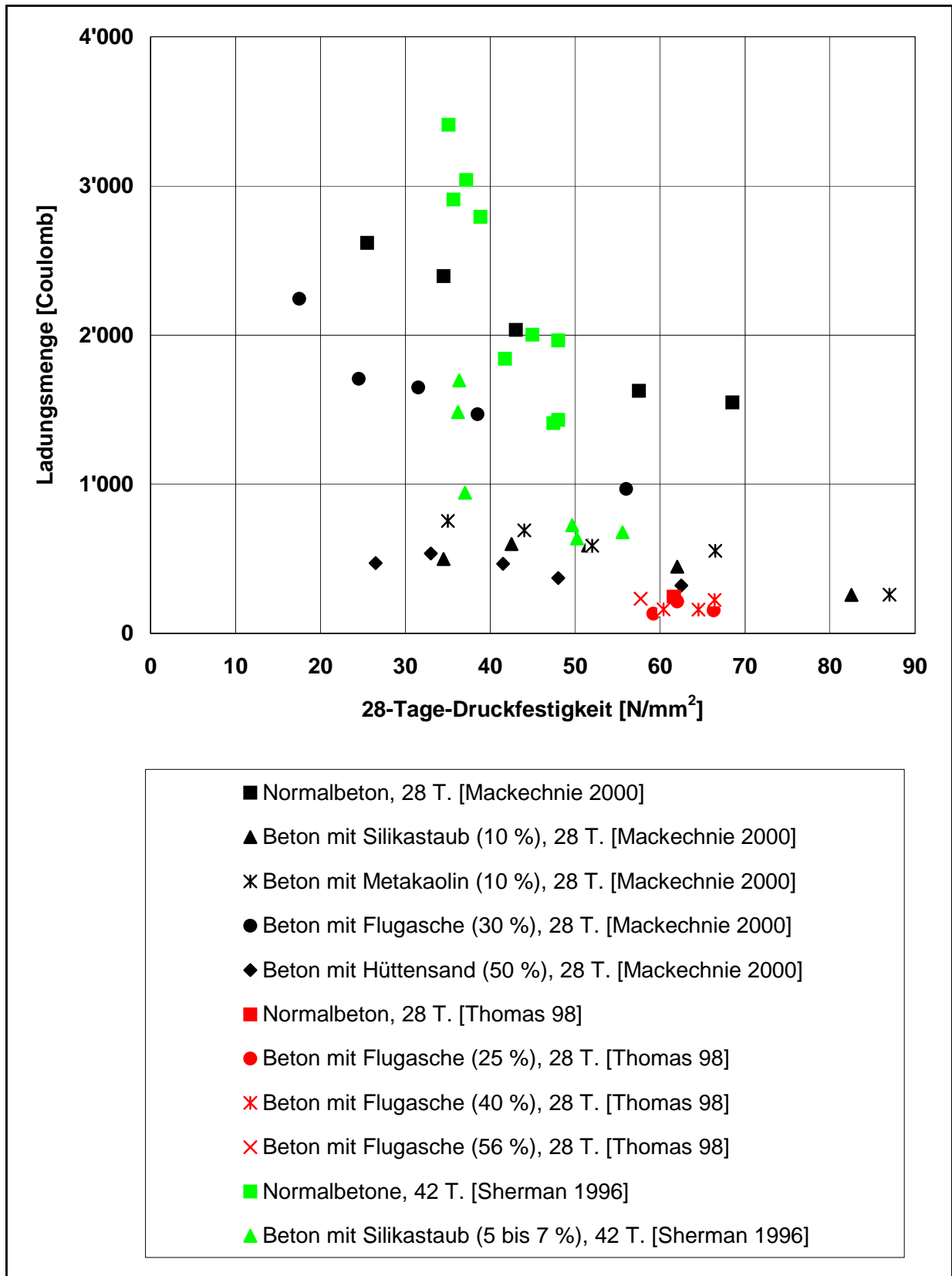


Bild 4.14: Beziehung zwischen der Ladungsmenge und der Druckfestigkeit für Betone mit verschiedenen Betonzusatzstoffen.

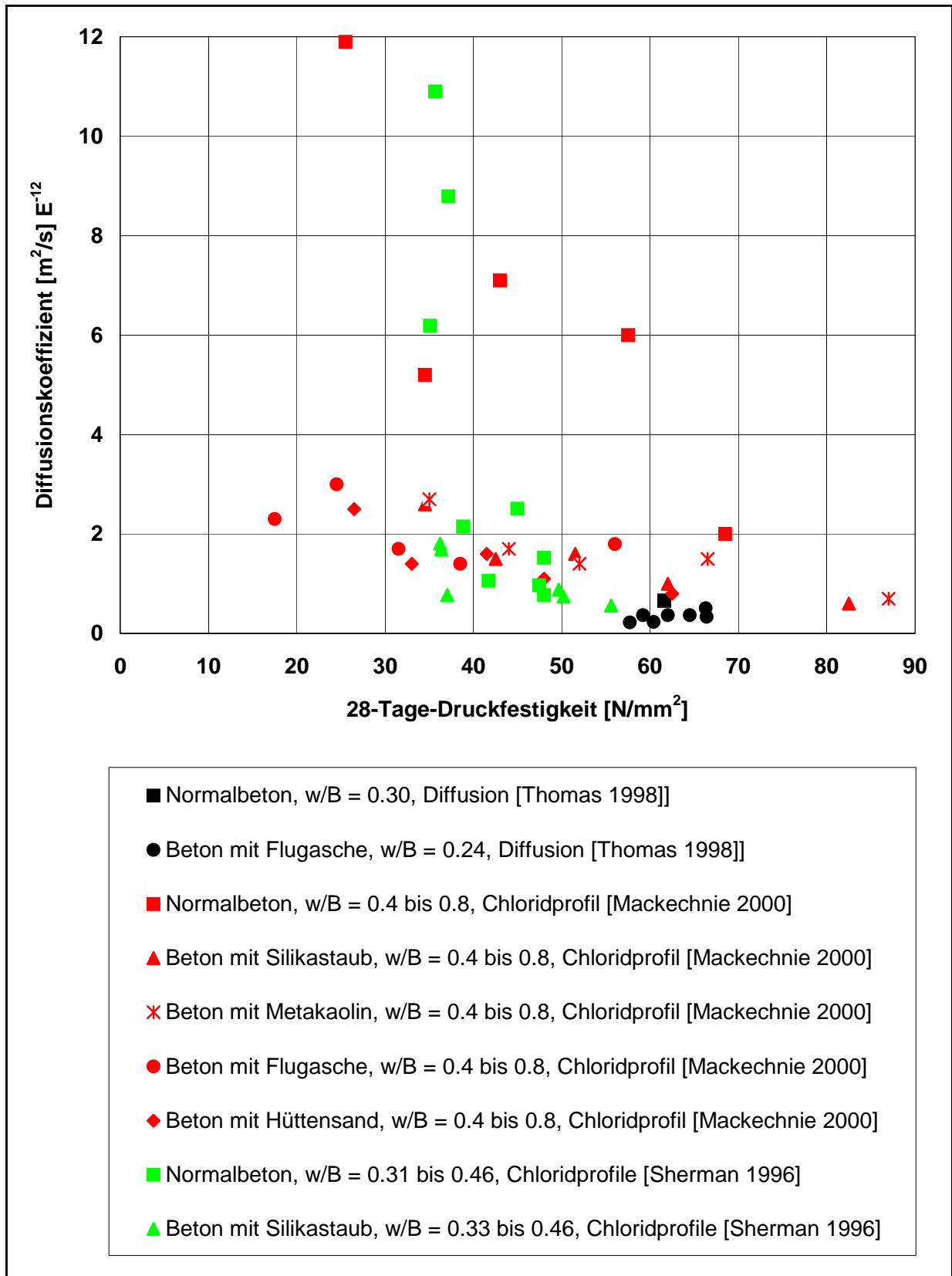


Bild 4.15: Beziehung zwischen dem Diffusionskoeffizienten und der Druckfestigkeit für Betone mit verschiedenen Betonzusatzstoffen.

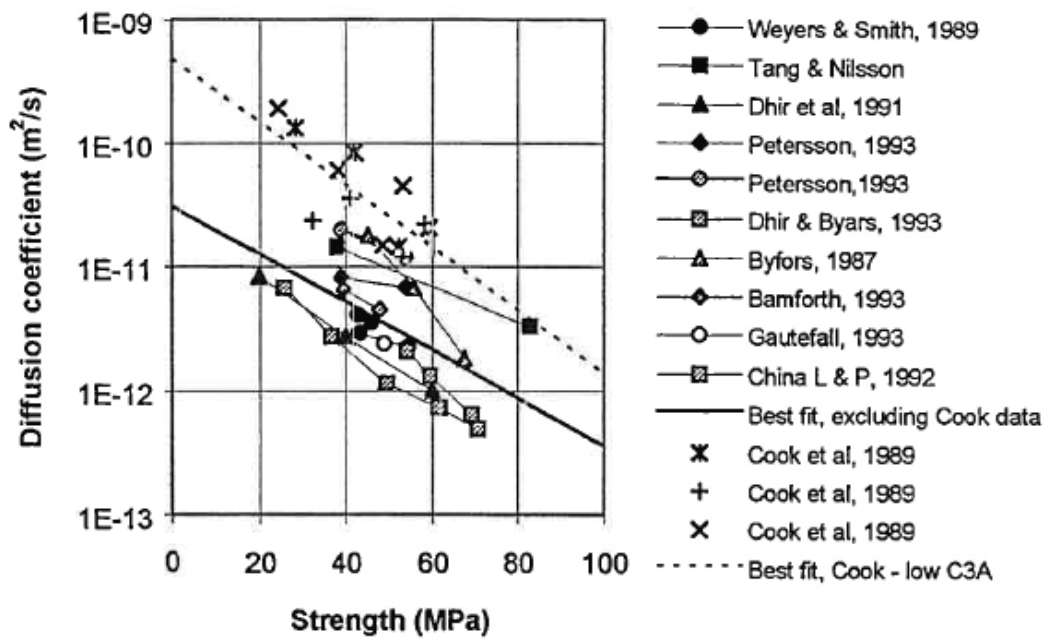


Bild 4.16: Beziehung zwischen dem Chloriddiffusionskoeffizienten und der Druckfestigkeit für Betone mit verschiedenen Betonzusatzstoffen [Bamforth 1999].

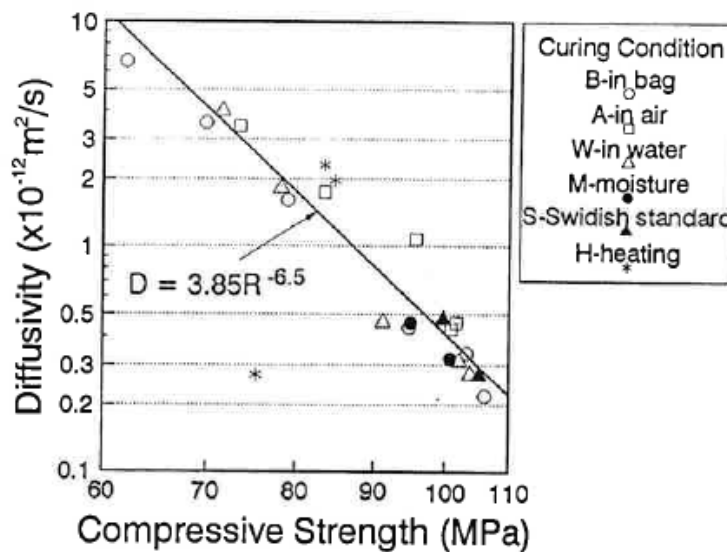


Bild 4.17: Beziehung zwischen dem Chloridmigrationskoeffizienten und der Druckfestigkeit bei hochfesten Betonen mit unterschiedlicher Nachbehandlung [Tang 1996b].

4.4 Alter des Betons

Bekanntlich nimmt die Betonfestigkeit von Betonen mit dem Alter noch weiter zu. Dies gilt auch für die meisten Kenngrößen für den Chloridwiderstand. Dies ist ein Hinweis dafür, dass die Hydratation des Zementes weiter läuft und sich das Porengefüge weiter verdichtet. Allerdings ist diese Verbesserung stark abhängig von der Zementart bzw. von der Art der Betonzusatzstoffe (**Bilder 4.18 bis 4.21**). Die Gaspermeabilität kann mit dem Alter leicht zunehmen (siehe z.B. [Schröder 1998, Schiessl 2001]). Dies wird oft mit der Mikrorissbildung im Betongefüge erklärt.

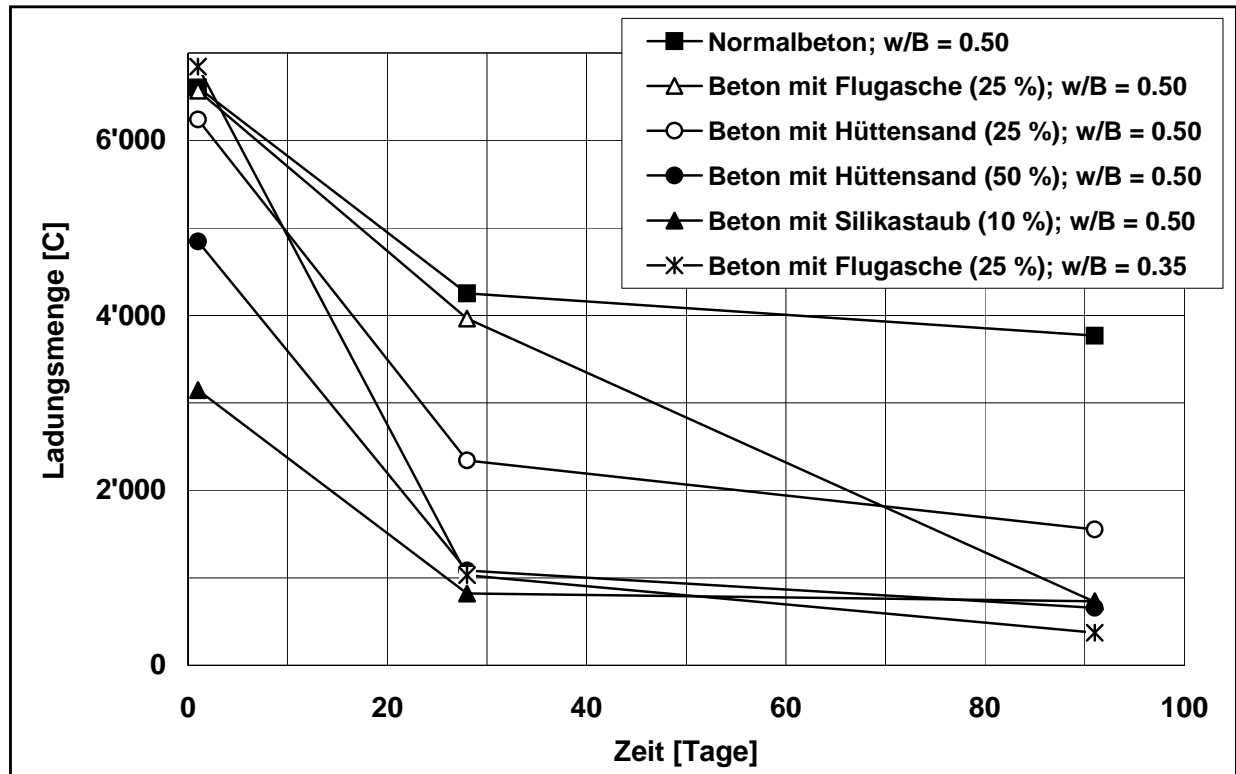


Bild 4.18: Ladungsmenge in Abhängigkeit von der Zeit für Betone mit verschiedenen Betonzusatzstoffen. Daten von [Ramezianpour 1995].

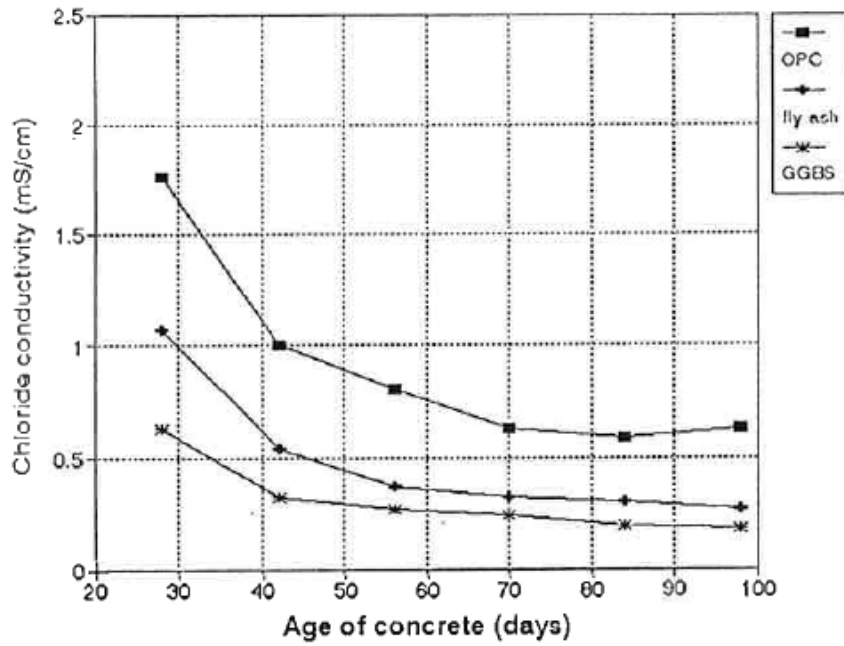


Bild 4.19: Chloridmigrationskoeffizient in Abhängigkeit von der Zeit für Betone mit verschiedenen Betonzusatzstoffen [Streicher 1995b].

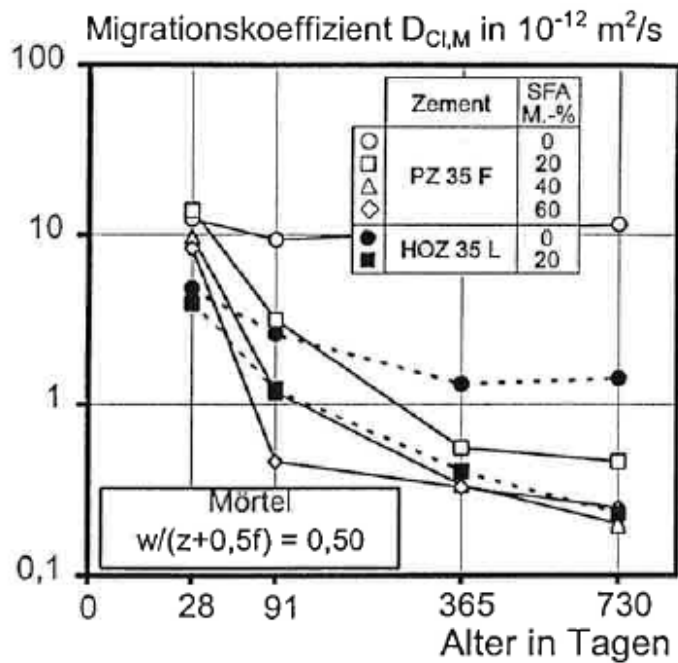


Bild 4.20: Chloridmigrationskoeffizient in Abhängigkeit von der Zeit für Betone mit verschiedenen Betonzusatzstoffen [Wiens 1996].

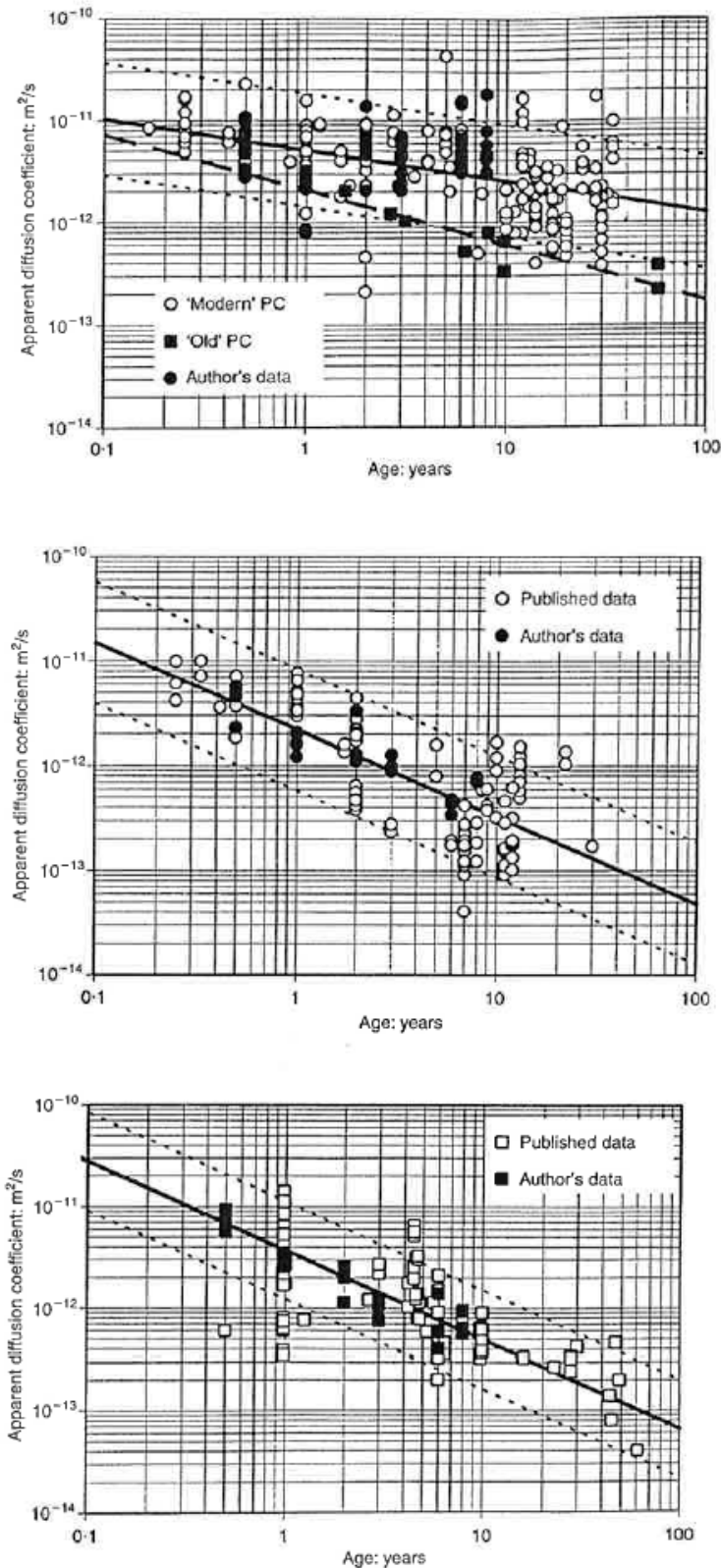


Bild 4.21: Chloriddiffusionskoeffizient in Abhängigkeit von der Zeit für Betone mit verschiedenen Betonzusatzstoffen [Bamforth 1999]. Eingetragen ist auch das 95%-Wahrscheinlichkeitsintervall.

oben: Normalbetone, Mitte: Betone mit Flugasche, unten: Beton mit Hüttensand

4.5 Temperatur

Im Gegensatz zu vielen anderen Parametern wurde der Einfluss der Temperatur nur in wenigen Arbeiten systematisch untersucht. Aus den **Bildern 4.22 bis 4.28** geht hervor, dass die viele Kenngrößen mit der Temperatur zunehmen. Dies gilt nicht für die Gaspermeabilität, die mit der Temperatur abnimmt, und die Wasserpermeabilität, die mehr oder weniger temperaturunabhängig ist [Jacobs 1994].

Die Wasseraufnahme wird im Vergleich zur Leitfähigkeit oder zum Diffusionskoeffizienten eher weniger von der Temperatur beeinflusst (**Bilder 4.25 und 4.27**). Dies gilt insbesondere bei tiefen w/z-Werten. Aus **Bild 4.26** ist zudem ersichtlich, dass die Feuchtigkeit im Porenraum die Wasseraufnahme entscheidend beeinflusst (**Kapitel 2**).

Die beschleunigende Wirkung der Temperatur auf den Chlorideintrag wird durch die Chloridprofile nach entsprechender Beaufschlagung bestätigt (**Bild 4.28**). Die Ergebnisse bestätigen im Übrigen einmal mehr, dass Betone mit einem Zement mit hoher Sulfatbeständigkeit einen geringeren Chloridwiderstand aufweisen als Betone mit einem Portlandzement (**Kapitel 2.2.2**).

Die Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit σ_{Beton} (**Bild 4.23**) kann mit der folgenden Gleichung dargestellt werden:

$$\sigma_{\text{Beton}} = A \cdot e^{-\left[\frac{E_a}{RT}\right]} \quad (\text{Gl. 4.1})$$

wobei: A: Konstante
 R: Gaskonstante 8.314 [kJ/K mol]
 T: absolute Temperatur [K]
 E_a: Aktivierungsenergie [kJ/mol]

Die Aktivierungsenergie E_a ist von der Mörtelzusammensetzung abhängig (**Tabelle 4.1**). Offensichtlich ist, dass Mörtel mit Silikastaub, Hüttensand und Hüttensand/Metakaolin die grössten Aktivierungsenergien aufweisen. Es bedeutet, dass die Leitfähigkeit dieser Mörtel erheblich empfindlicher auf Temperaturänderungen reagiert. Trotzdem ist sie auch bei 50°C immer noch deutlich tiefer als beim reinen Portlandzementmörtel (bis zu einem Faktor von etwa 10). Man kann annehmen, dass mit zunehmender Temperatur auch die Bindung der Chloride im Zementstein geschwächt wird (→ mehr freie Chloride). Da zwischen der elektrischen Leitfähigkeit, Diffusion und Migration physikalische Zusammenhänge bestehen, darf man annehmen, dass auch die Diffusions- und Migrationskoeffizienten ähnliche Abhängigkeiten von der Temperatur aufweisen wie die elektrische Leitfähigkeit.

Mörtel mit	Anteil am Bindemittelgehalt, %	Aktivierungsenergie E _a , kJ/mol
Portlandzement	100	16.9 - 21.2
Metakaolin	20	17.2 - 24.3
Hüttensand	50	21.8 - 24.6
Silikastaub	20	24.5 - 29.5
Hüttensand (HS) und Metakaolin (MK)	30 (HS) und 20 (MK)	26.2 - 30.0

Tabelle 4.1: Aktivierungsenergie E_a der elektrischen Leitfähigkeit für verschiedene Mörtel [Mc Carter 2000]

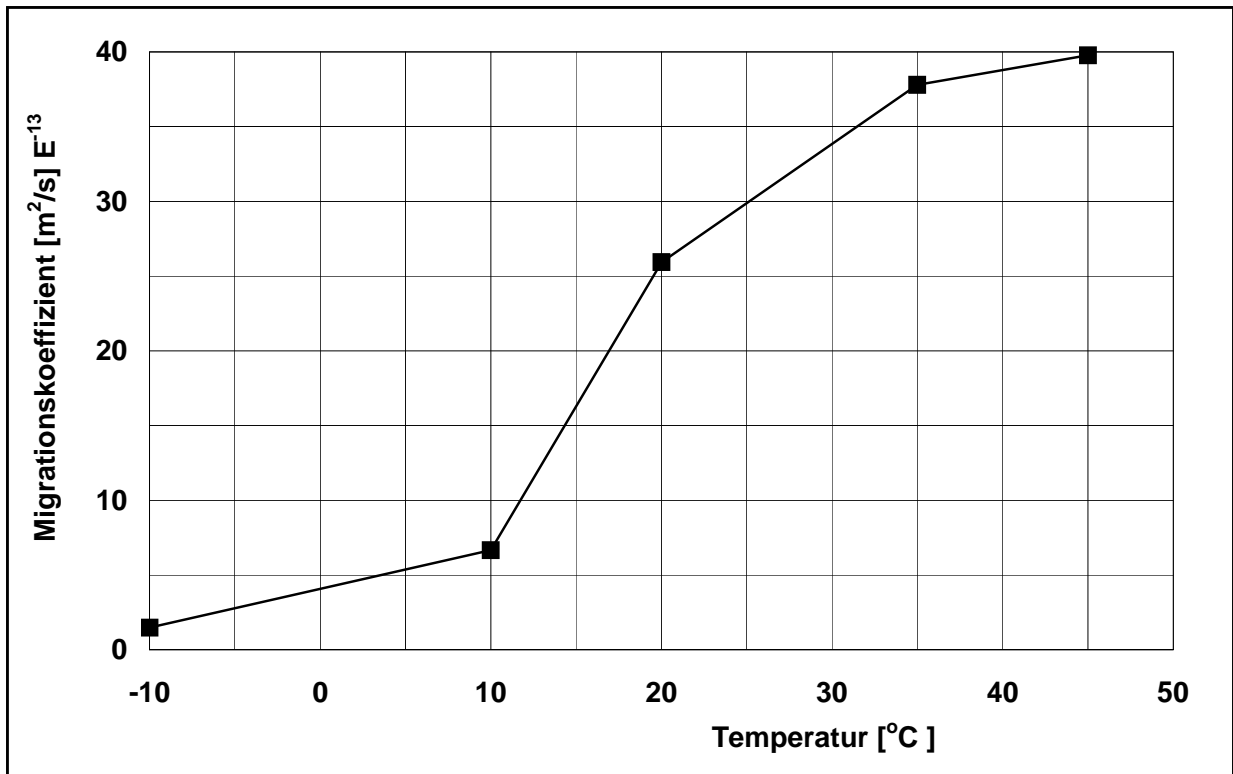
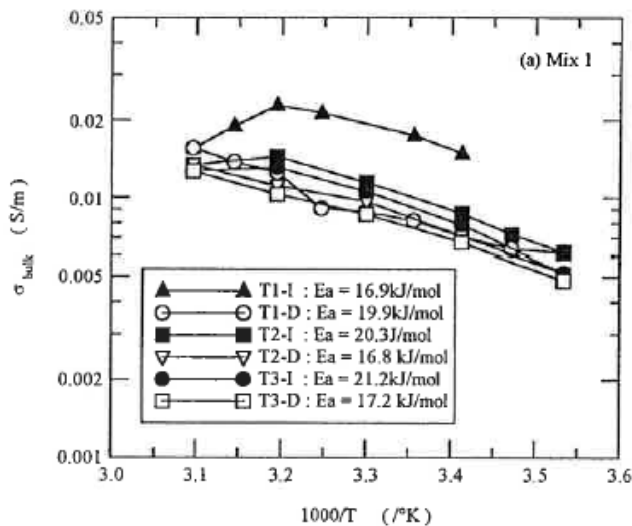


Bild 4.22: Einfluss der Temperatur auf den Chloridmigrationskoeffizienten für einen Normalbeton. Daten von [Jones 1995].

Bild 4.23: Einfluss der Temperatur auf die elektrische Leitfähigkeit für einen Portlandzement-



mörtel [McCarter 2000].

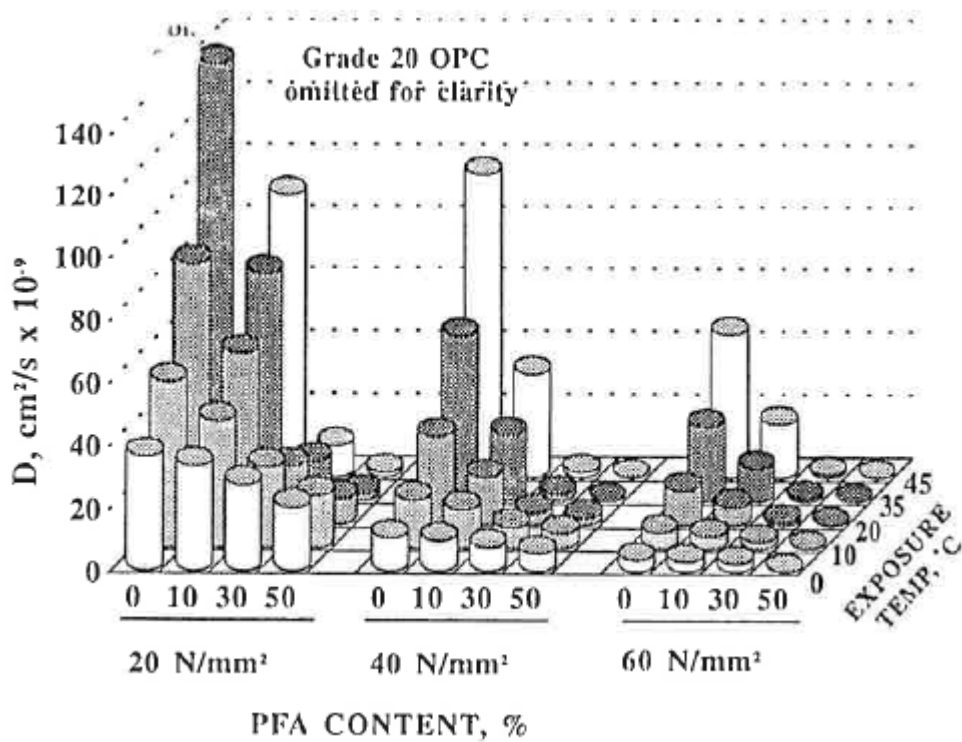


Bild 4.24: Einfluss der Temperatur auf den Diffusionskoeffizienten von drei Betonen mit unterschiedlichem Flugaschegehalt [Jones 1993].

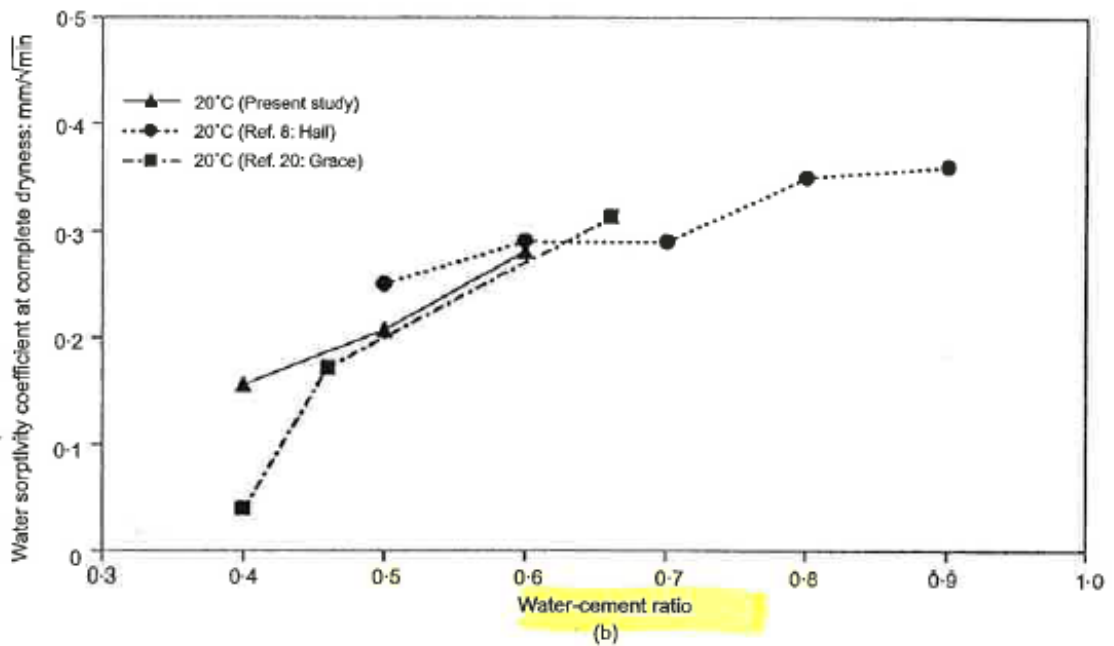
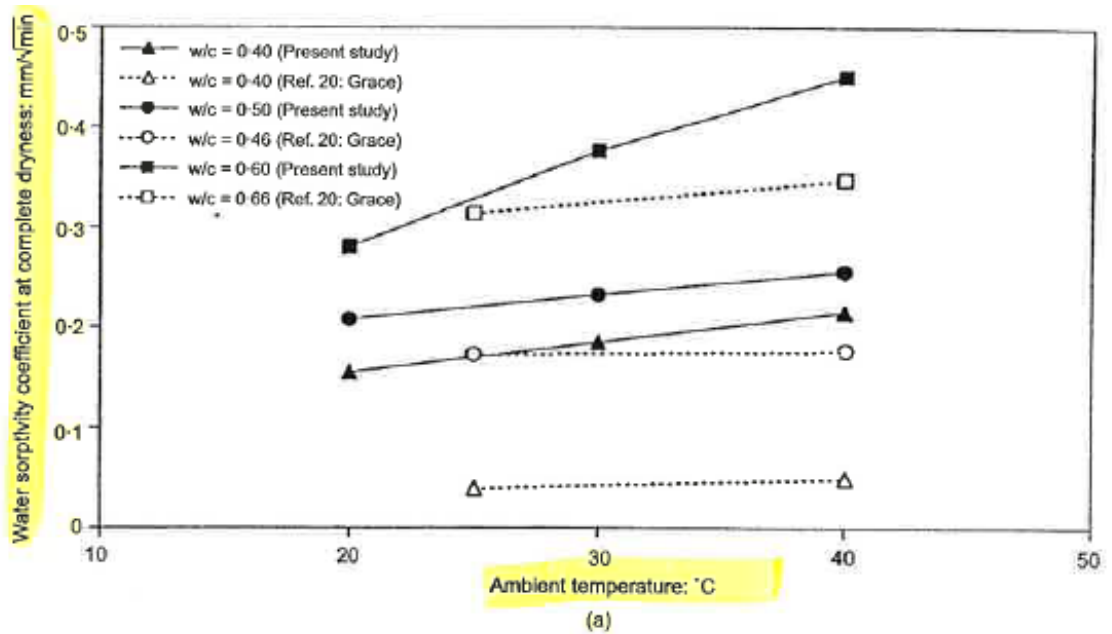


Bild 4.25: Einfluss der Temperatur (oben) und des w/z-Wertes (unten) auf die Wasseraufnahme [Wong 2001].

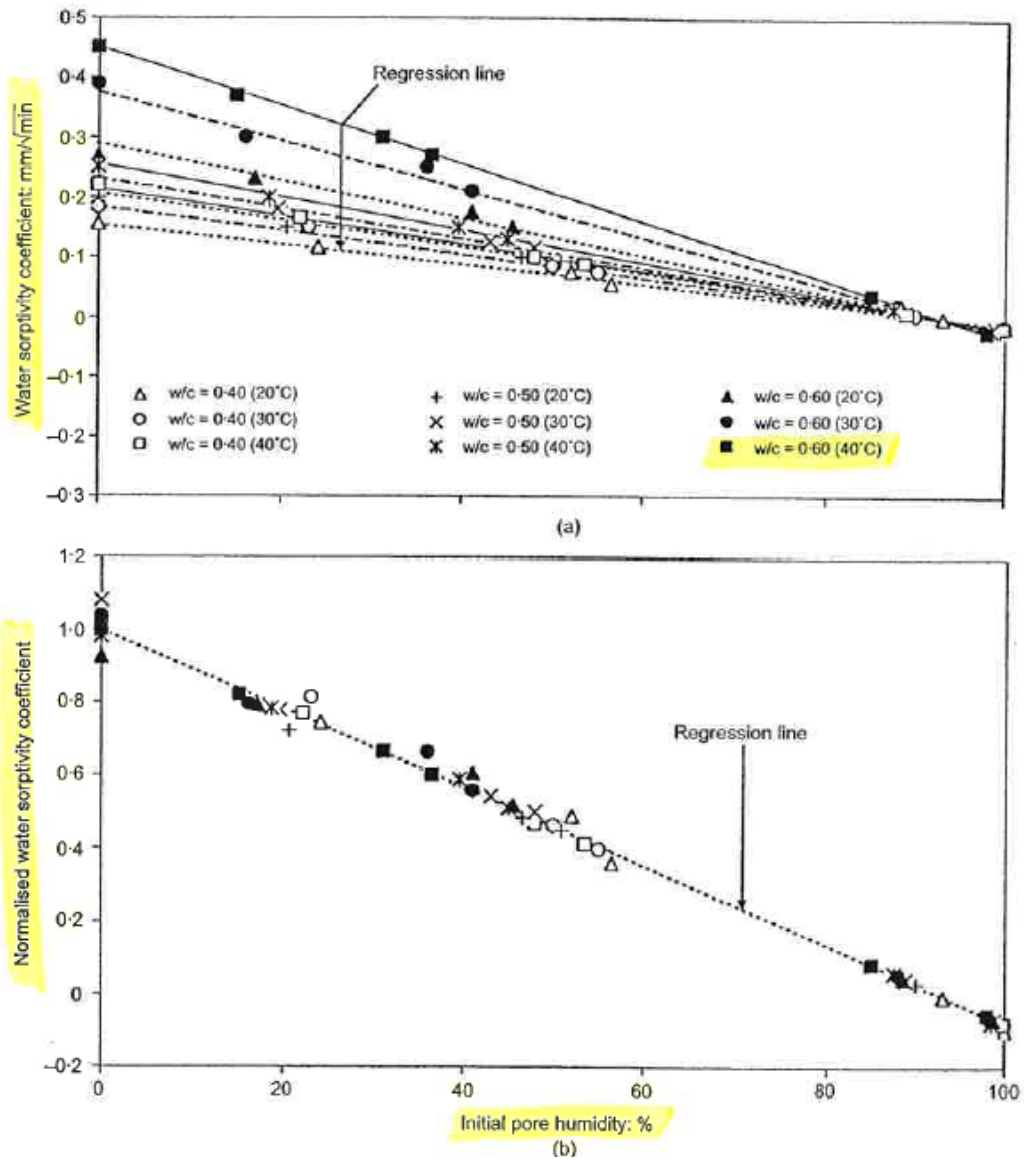


Bild 4.26: Einfluss der Temperatur (oben) und des Wassersättigungsgrades (unten, hier als "pore humidity" bezeichnet) auf die Wasseraufnahme [Wong 2001]. Im unteren Bild ist der Wasseraufnahmekoeffizient auf den Wert bei Null Prozent Porenfeuchtigkeit, d.h. bei vollständig trockenem Beton, normiert.

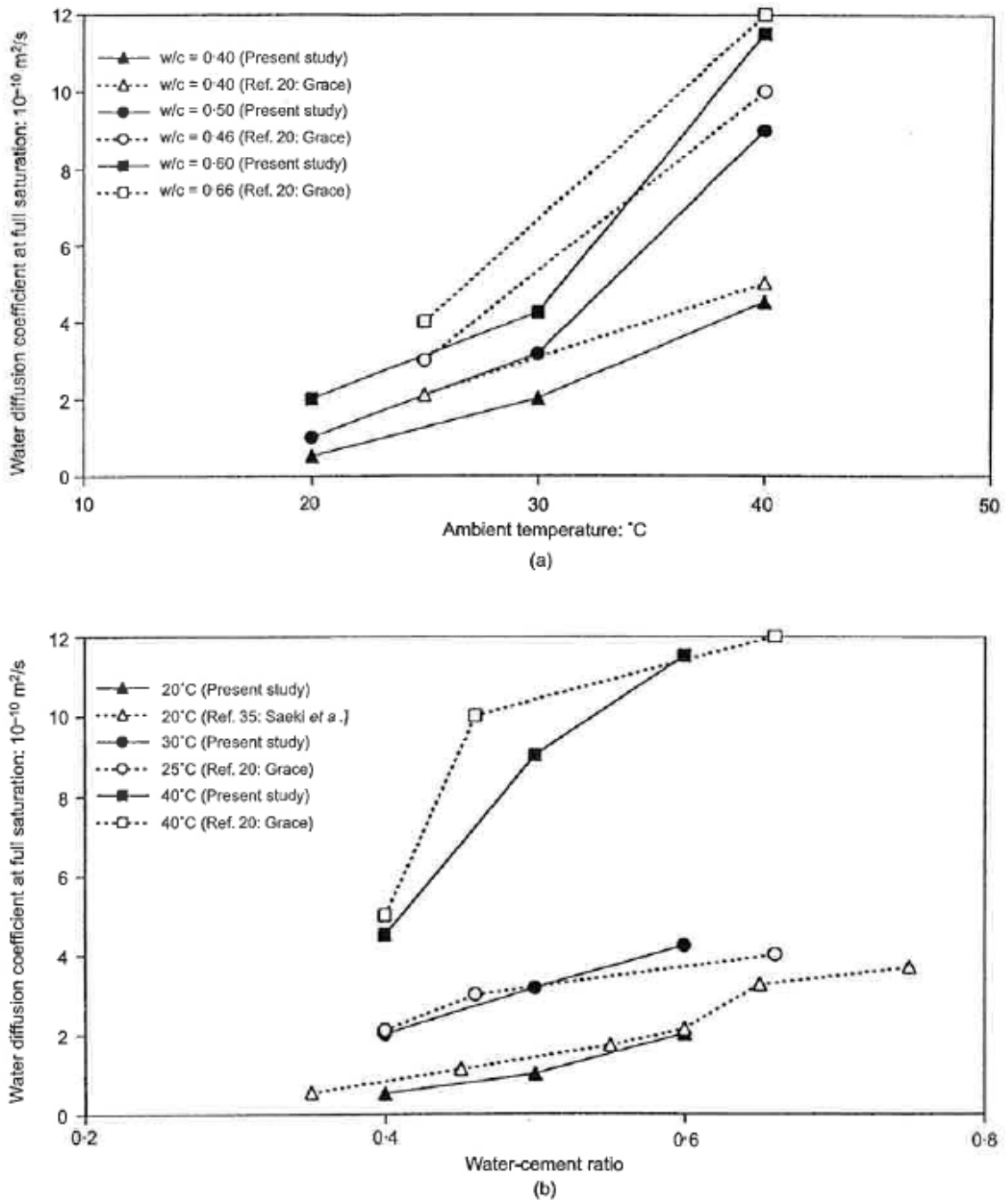


Bild 4.27: Einfluss der Temperatur (oben) und des w/B-Wertes (unten) auf die Wasserdiffusion [Wong 2001].

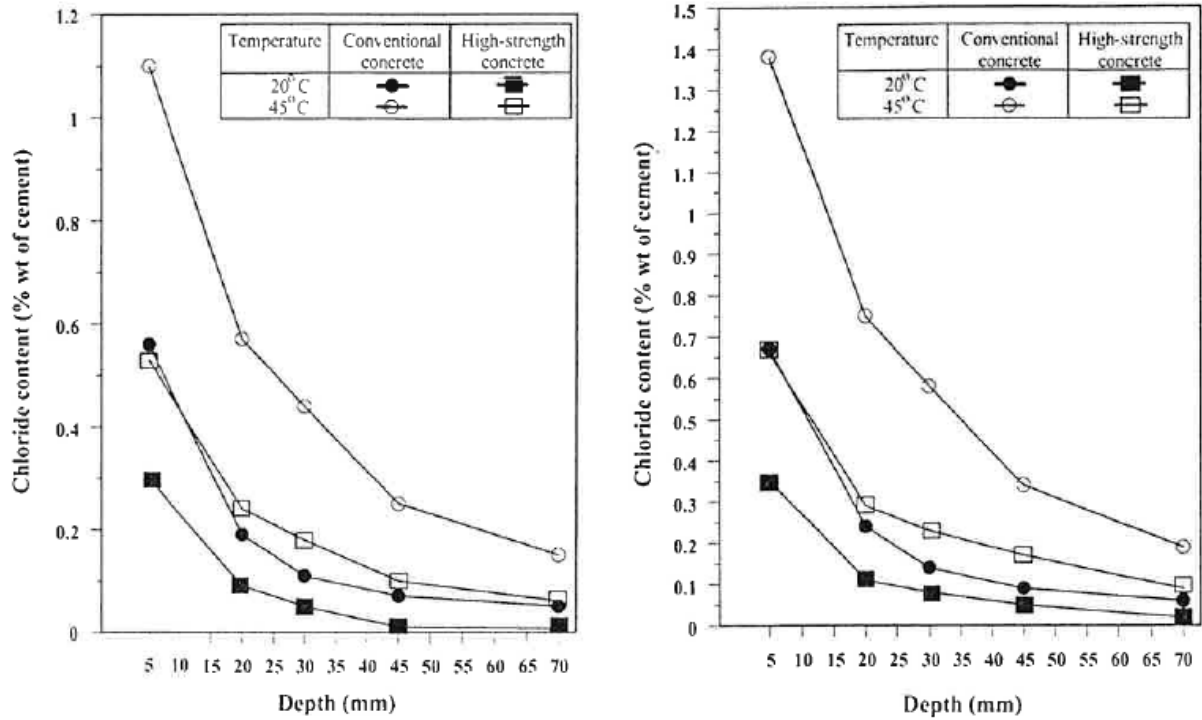


Bild 4.28: Einfluss der Temperatur auf den Chlorideintrag [Al-Khaja 1997].
 links: Beton mit Portlandzement
 rechts: Beton mit Zement mit hoher Sulfatbeständigkeit

4.6 Nachbehandlung

Die Art und Dauer der Nachbehandlung beeinflussen wie viele andere Betoneigenschaften auch den Chloridwiderstand (**Bilder 4.4, 4.17, 4.29 und 4.30**). Der Diffusionskoeffizient reagiert offenbar empfindlicher als die Ladungsmenge im ASTM-Schnelltest. Betone mit Mischzementen reagieren dabei empfindlicher als Betone mit Portlandzement [Dhir 1996, Bamforth 1997].

Andrade et al. [Andrade 1997] schlugen für die Berechnung des Chlorideintrages ein Modell vor, in dem für den Randbeton ein anderer Diffusionskoeffizient eingesetzt wird als für den Kernbeton. Mit diesem Vorgehen können reale Chloridprofile besser angenähert werden. Neben der Nachbehandlung können auch andere Ursachen für den unterschiedlichen Chloridwiderstand zwischen den Randbeton und Kernbeton auftreten, wie z.B. Auswascheffekte, erhöhter Zementgehalt, Karbonatisierung (**Kapitel 4.6.10**).

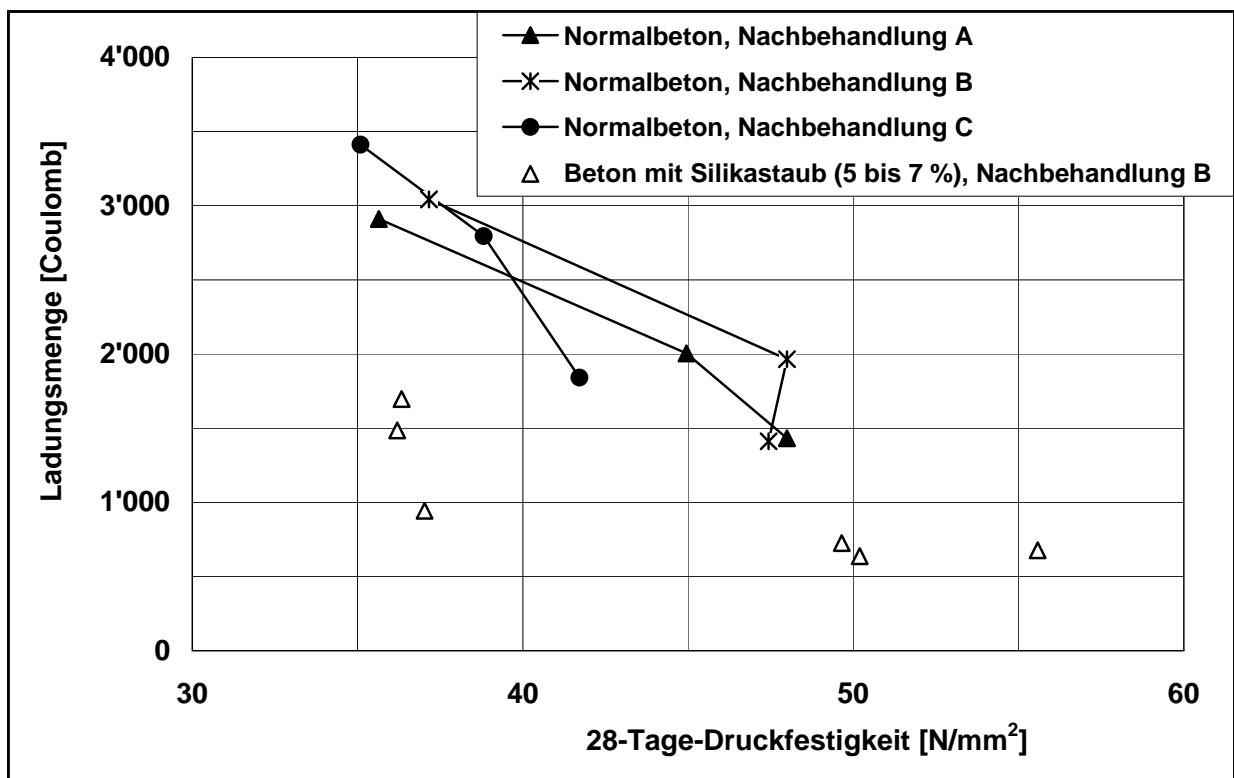


Bild 4.29: Einfluss der Art der Nachbehandlung auf den Diffusionskoeffizienten und die Druckfestigkeit. Daten von [Sherman 1996].

Nachbehandlung

- A: während 7 Tagen mit nassen Tüchern abgedeckt, danach Lagerung bei 22°C und 50% relativer Luftfeuchtigkeit bis zum Prüftermin
- B: bis zum Prüftermin in Wasser
- C: Wärmebehandlung (63°C, 7.5 Stunden), danach Lagerung bei 22°C und 50% relativer Luftfeuchtigkeit bis zum Prüftermin

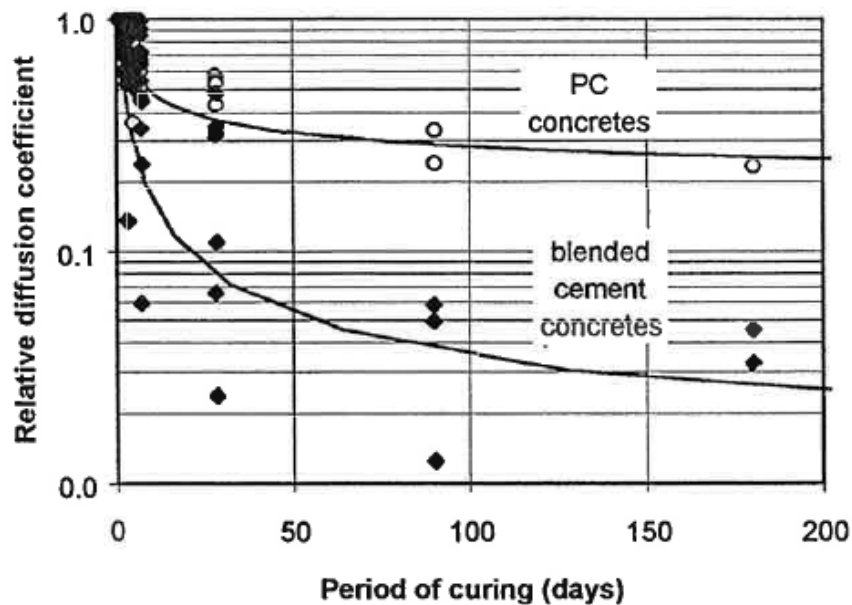


Bild 4.30: Einfluss der Nachbehandlungsdauer auf den Diffusionskoeffizienten (normiert auf die Werte nach 1 Tag) [Bamforth 1997].

4.7 Betonfeuchtigkeit

Der Einfluss der Betonfeuchtigkeit auf die Transportprozesse wurde im **Kapitel 2** angesprochen. Bei Diffusions- und Migrationstests kann die Betonfeuchtigkeit - abgesehen von der Probenvorbehandlung - nicht variiert werden. Die Betonfeuchtigkeit der Proben im Ausgangszustand ist bei der Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme (mit und ohne Chlorid), der Wasserdampf- sowie bei der Gasdiffusion und -durchlässigkeit sehr wichtig (**Bilder 2.3 und 4.26**).

4.8 Oberflächenkonzentration

Aus der Analyse von Chloridprofilen mit dem 2. Fick'schen Gesetz kann nicht nur der Chloriddiffusionskoeffizient bestimmt werden, sondern auch die Konzentration des Salzes an der Betonoberfläche. Diese Grösse wird bestimmt durch die Expositionsbedingungen (**Kapitel 4.9**).

Generell zeigt sich, dass die Oberflächenkonzentration mit abnehmendem Diffusionskoeffizienten, d.h. mit zunehmender Dichtigkeit des Betons zunimmt (**Bild 4.31**) [Bamforth 1997, Mackechnie 2000, Bigas 1996].

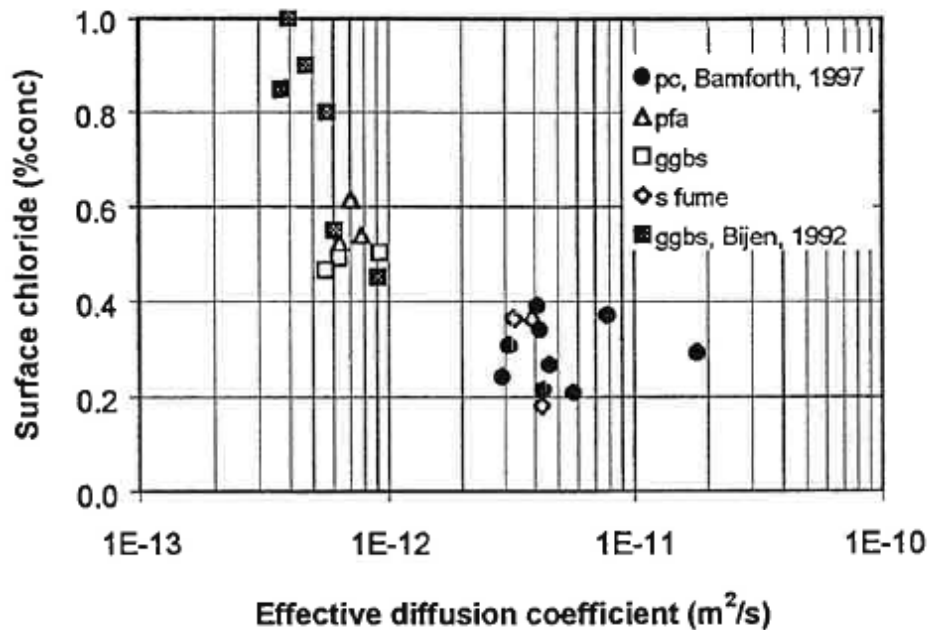


Bild 4.31: Beziehung zwischen Chlorid-Oberflächenkonzentration und Diffusionskoeffizient [Bamforth 1997].

4.9 Art und Konzentration des Salzes

Zum Einfluss der für die Prüfungen verwendeten Art und Konzentration der Salze auf den Diffusionskoeffizienten bzw. Chlorideintrag liegen verschiedene Arbeiten und Berechnungen vor [MacDonald 1995, Tang 1996b, Delagrave 1997, Dehghanian 1997, Castellote 1999, Truc 2000b, Tong 2001, Prince 2001]. Generell zeigt sich, dass die gemessenen Diffusions- und Migrationskoeffizienten von der Zusammensetzung der verwendeten Prüflösungen abhängig ist und dieser Einfluss, je nach Prüfung, gering bis erheblich sein kann. Gemäss den Untersuchungen von Truc et al. [Truc 2000b] müsste die Salzkonzentration dem jeweiligen Porenwasser angepasst werden. Dies wäre natürlich sehr aufwendig, müsste die Zusammensetzung des Porenwassers doch vorgängig bestimmt oder rechnerisch abgeschätzt werden. Gemäss ihren Simulationsrechnungen liegt der Einfluss der Porenwasserzusammensetzung aber im Bereich von etwa 10% und ist etwa ähnlich hoch wie Streuung zwischen zwei Proben. Für praktische Belange kann er daher vernachlässigt werden.

4.10 Karbonatisierung

Die Karbonatisierung des Betons verändert die Porosität und die Chloridbindekapazität des Zementsteins. Damit ändern sich auch der Chloriddiffusionskoeffizient (**Bild 4.32**) und das Wasseraufsaugverhalten.

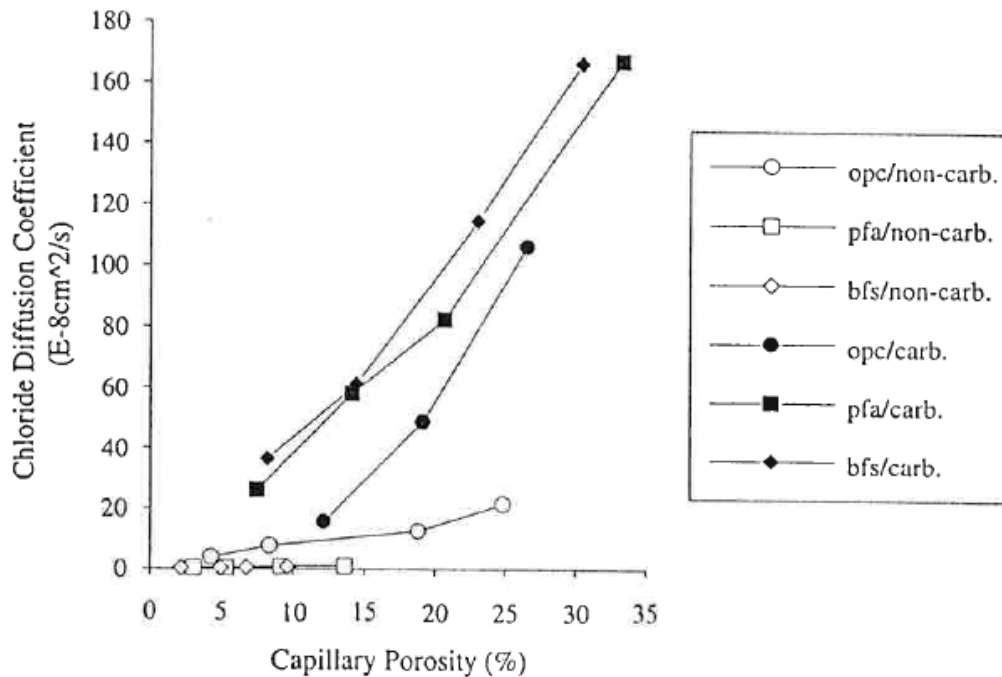


Bild 4.32: Einfluss der Karbonatisierung auf den Chloriddiffusionskoeffizienten [Ngala 1997].

4.11 Korrelation zwischen verschiedenen Kenngrößen des Chloridwiderstandes

Die Beziehungen zwischen den verschiedenen Kenngrößen für die Dauerhaftigkeit und für den Chloridwiderstand wurden in den letzten Jahren sehr intensiv untersucht. Die **Tabelle 4.2** gibt eine Übersicht über einige der untersuchten Korrelationen. Verschiedene Korrelationen sind auch in einer RILEM-Publikation [RILEM 1993] und in [Hunkeler 1996b] zusammengestellt.

Vergleichende Untersuchungen sind insbesondere zwischen Diffusions- und Migrationstests sehr zahlreich und wurden meistens mit dem Ziel unternommen, Berechnungsmodelle oder Versuchsanordnungen von Migrationstests zu validieren [Andrade 1994a,b, 1999, 2000, Baroghel-Bouny 1998, Castellote 2001a,b, Delagrave 1996, Lu 1998, McGrath 1996, 1999, Salta 1999, Streicher 1994, Tang 1999a,b, Tong 2001].

Die **Bilder 4.33 bis 4.43** illustrieren einige Korrelationen. Zwischen den meisten Kenngrößen sind mehr oder weniger klare Beziehungen vorhanden.

Bei der Gaspermeabilität sind die Resultate widersprüchlich. Neben Ergebnissen, die eher auf einen schlechten Zusammenhang hinweisen (**Bild 4.34 und 4.43**), liegen auch Arbeiten vor, die eine klare Korrelation zu anderen Kenngrößen ergeben, z.B. für die Wasseraufnahme [Alexander 1999b] oder für den Chloriddiffusionskoeffizienten [Ngala 1997]. Eine Zusammenfassung dazu ist in [Hunkeler 1996b] zu finden.

Gemäss [Raupach 2001] besteht zwischen der Wasserpermeabilität und dem ASTM-Test bzw. dem elektrischen Widerstand kein eindeutiger Zusammenhang. In [McCarter 2000] wurde hingegen zwischen der Wasserpermeabilität und der elektrischen Leitfähigkeit eine recht gute Beziehung gefunden.

In **Bild 4.37** ist bemerkenswert, dass die mittels Migrationsversuchen bestimmten Chloridmigrationskoeffizienten deutlich höher liegen als die über die Analyse von Chloridprofilen ermittelten Chloriddiffusionskoeffizienten (Faktor 3 bis 15). Dies geht auch aus anderen Untersuchungen hervor [Bamforth 1997, Baroghel-Bouny 1998]. Die Resultate verschiedener Autoren sind aber nur beschränkt vergleichbar, da die Details der Versuche und die Art der Berechnung der Diffusions- oder Migrationskoeffizienten meist nicht identisch sind.

Nach [Otsuki 1999] kann die Übereinstimmung zwischen den in einer Diffusionszelle ermittelten Chloriddiffusionskoeffizienten und jenen aus Migrationsversuchen verbessert werden, wenn Ionenkonzentration und die Elektroneutralität mit berücksichtigt werden (**Bild 4.44**).

Gesamthaft gesehen sind sich die Autoren aber einig, dass die Messverfahren erlauben, unterschiedliche Betonqualitäten zu unterscheiden und zu beurteilen. Da die Versuchsergebnisse aber stark abhängen von der Versuchsanordnung (z.B. Art und Konzentration der Salzlösung) und dem Berechnungsmodell, sind direkte Vergleiche der verschiedenen Diffusions- und Migrationskoeffizienten nicht oder nur bedingt möglich [Prince und Gagné, 2001, Andrade 2000].

Prüfung, Kenngrösse	DCI (Diffusion)	DCI Chloridprofil)	DCI (Migration)	Ladungsmenge	Wasseraufnahme	O ₂ -Permeabilität o. -diffusion	Wasserpermeabilität o. -diff.
DCI (Diffusion)							
DCI (Chloridprofil)							
DCI (Migration)	Andrade 1994a-d Bamforth 1997 Otsuki 1999 Gehlen 2000	Andrade 1996 Tang 1996a,b Bamforth 1997 Baroghel 1998 Andrade 2000 Mackechnie 2000					
Ladungsmenge	Thomas 1998	Andrade 1996 Sherman 1996 Baroghel 1998 McGrath 1999 Mackechnie 2000 Wee 2000	Sugiyama 1996				
Wasseraufnahme	Mc Carter 2000						
O ₂ -Permeabilität oder -diffusion	Ngala 1995		Sugiyama 1996		Alexander 1999b Weitere in: Hunkeler 1996b		
Wasserpermeabilität oder -diffusion	Mc Carter 2000			Raupach 2001		Jacobs 1994 RILEM 1993	
Elektr. Leitfähigkeit bzw. Widerstand	Bamforth 1997 Mc Carter 2000	Bamforth 1999 Mackechnie 2000 Wee 2000	Zhao 1998 Ampadu 1999 Tong 2001 Gehlen 2000	Wee 2000 Tong 2001 Raupach 2001	Alexander 1999b Mc Carter 2000	Alexander 1999b	Raupach 2001

Tabelle 4.2: Überblick über einige Untersuchungen zur Korrelation zwischen den verschiedenen Prüfungen und Kenngrössen (Auswahl)

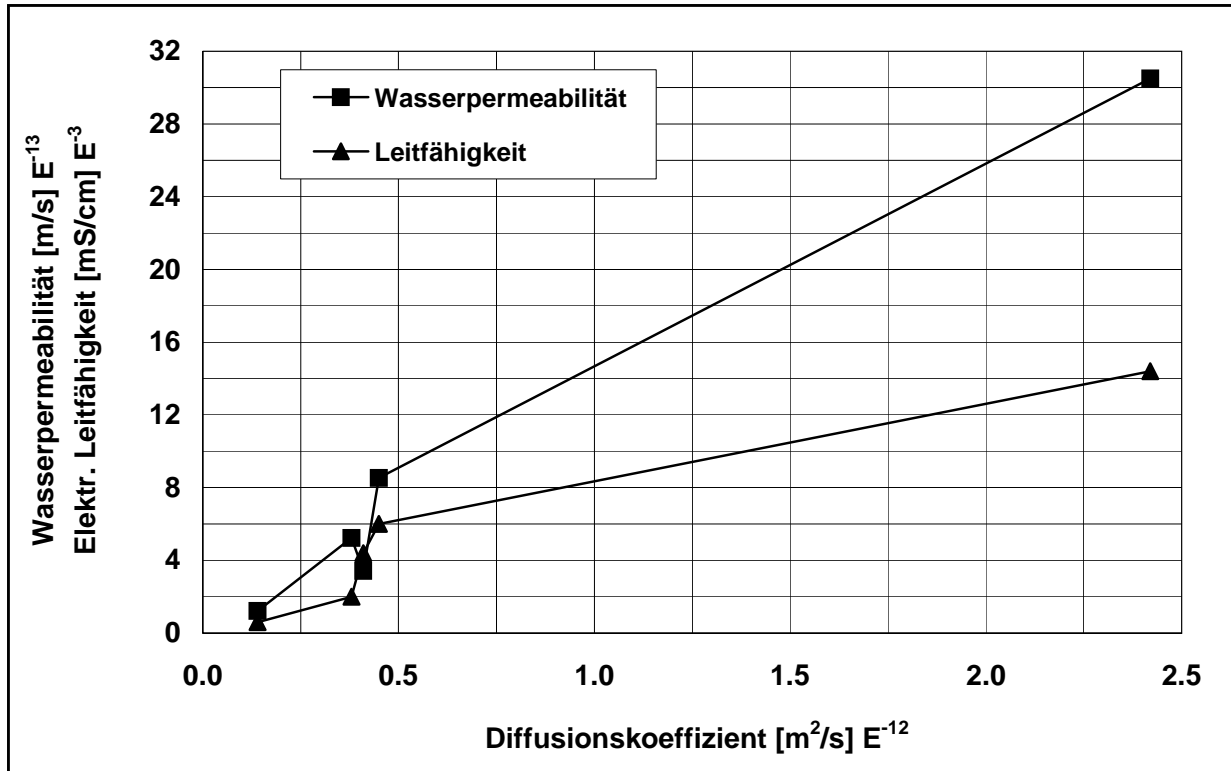


Bild 4.33: Beziehung zwischen der Wasserpermeabilität bzw. der elektrischen Leitfähigkeit und dem Diffusionskoeffizienten. Daten von [McCarter 2000].

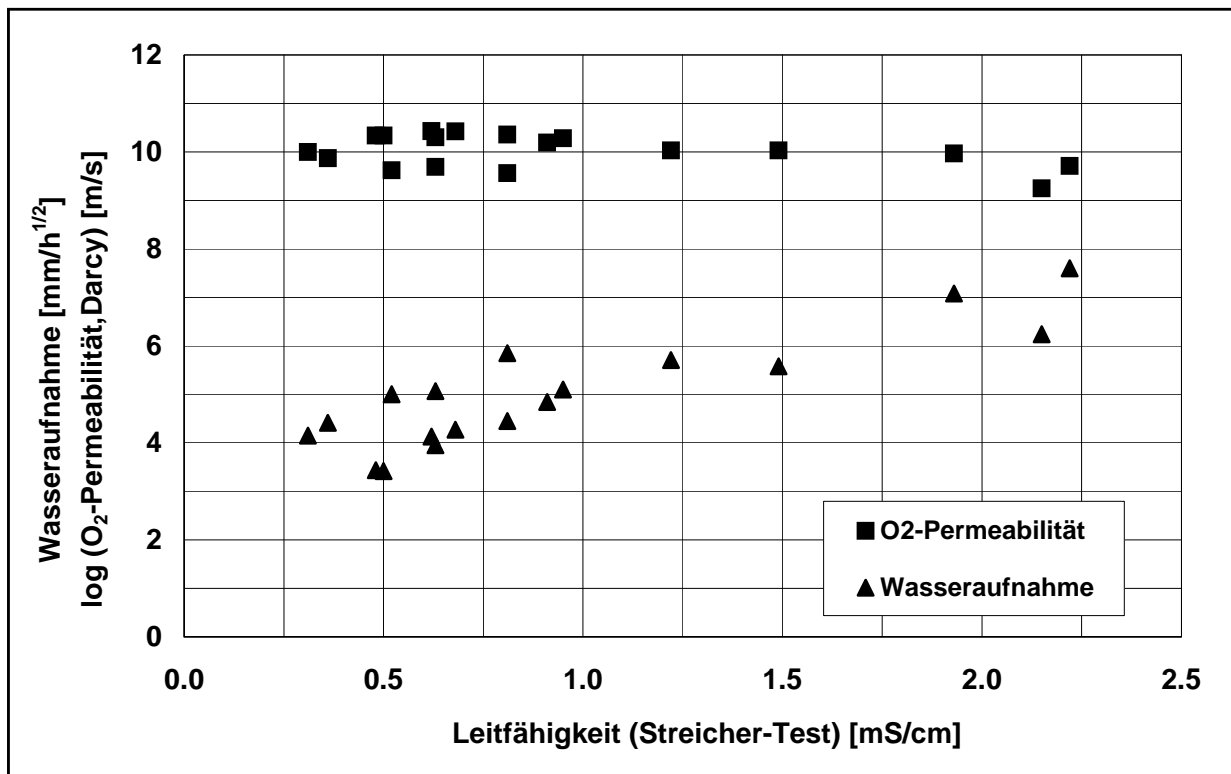


Bild 4.34: Beziehung zwischen der Wasseraufnahme bzw. der O₂-Permeabilität und der elektrischen Leitfähigkeit im Streicher-Test. Daten von [Alexander 1999b].

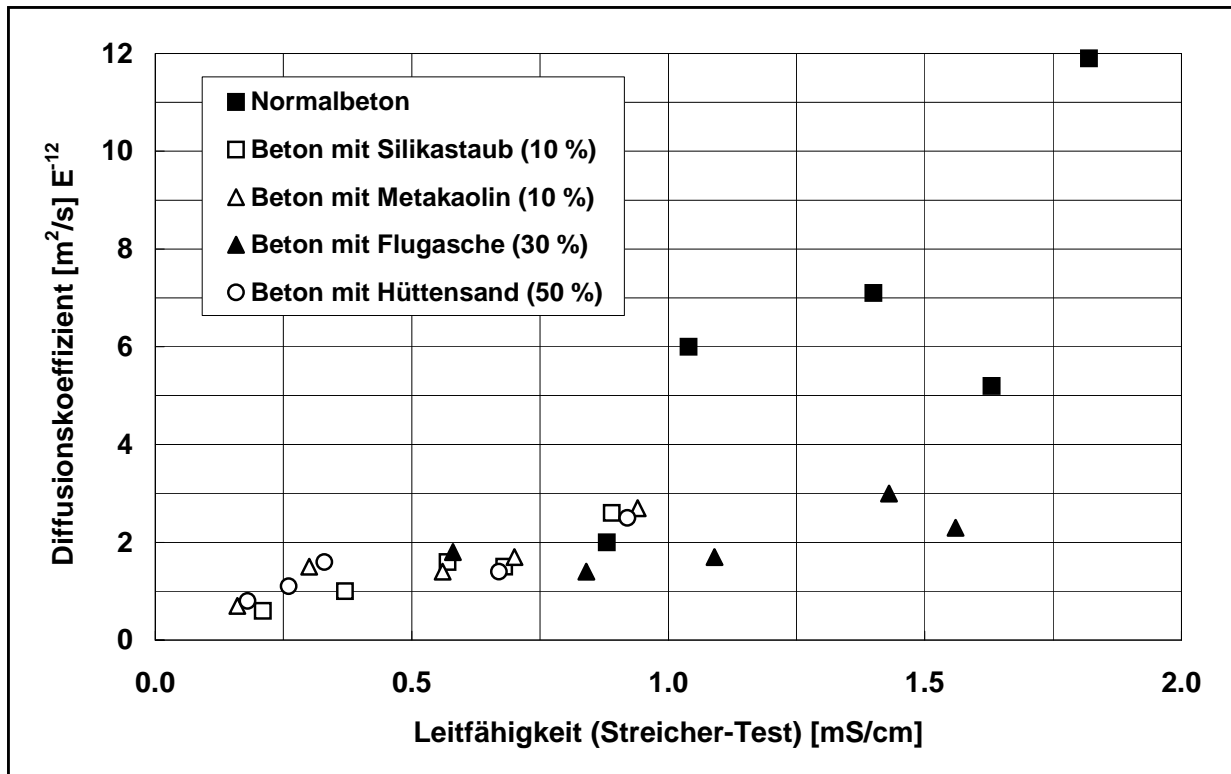


Bild 4.35: Beziehung zwischen dem aus Chloridprofilen ermittelten Diffusionskoeffizienten und der elektrischen Leitfähigkeit im Streicher-Test. Daten von [Mackechnie 2000].

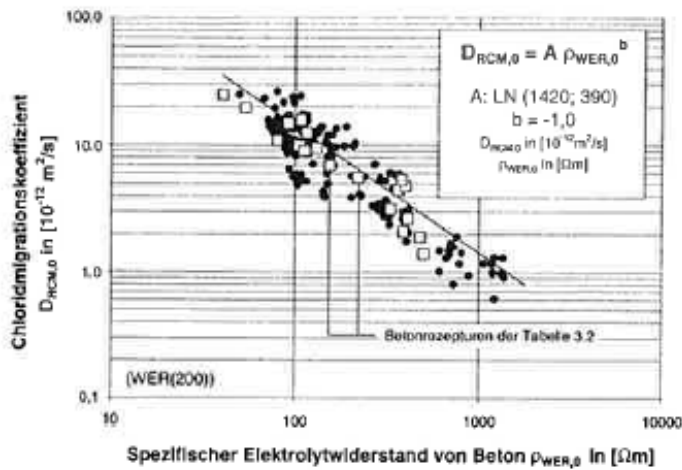


Bild 4.36: Beziehung zwischen Chloridmigrationskoeffizienten und dem elektrischen Widerstand [Gehlen 2000].

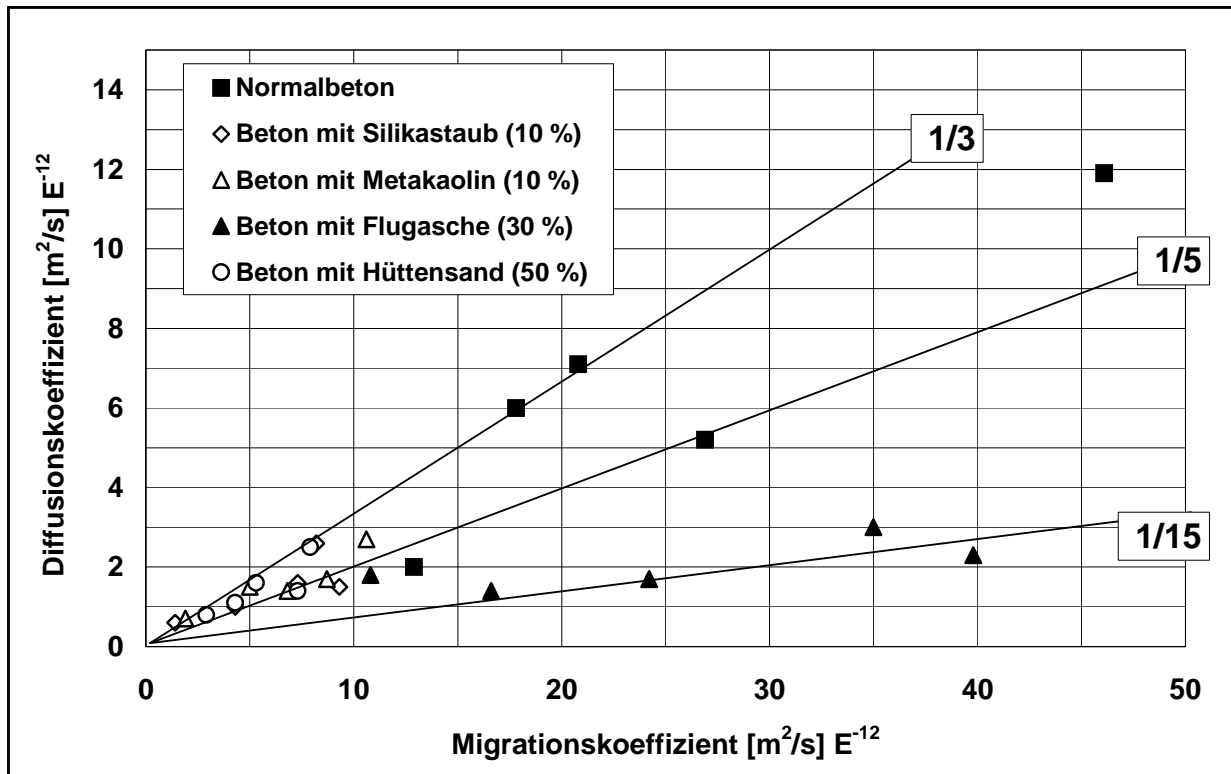


Bild 4.37: Beziehung zwischen den aus Chloridprofilen ermittelten Diffusionskoeffizienten und den Migrationskoeffizienten aus Migrationsversuchen. Daten von [Mackechnie 2000].

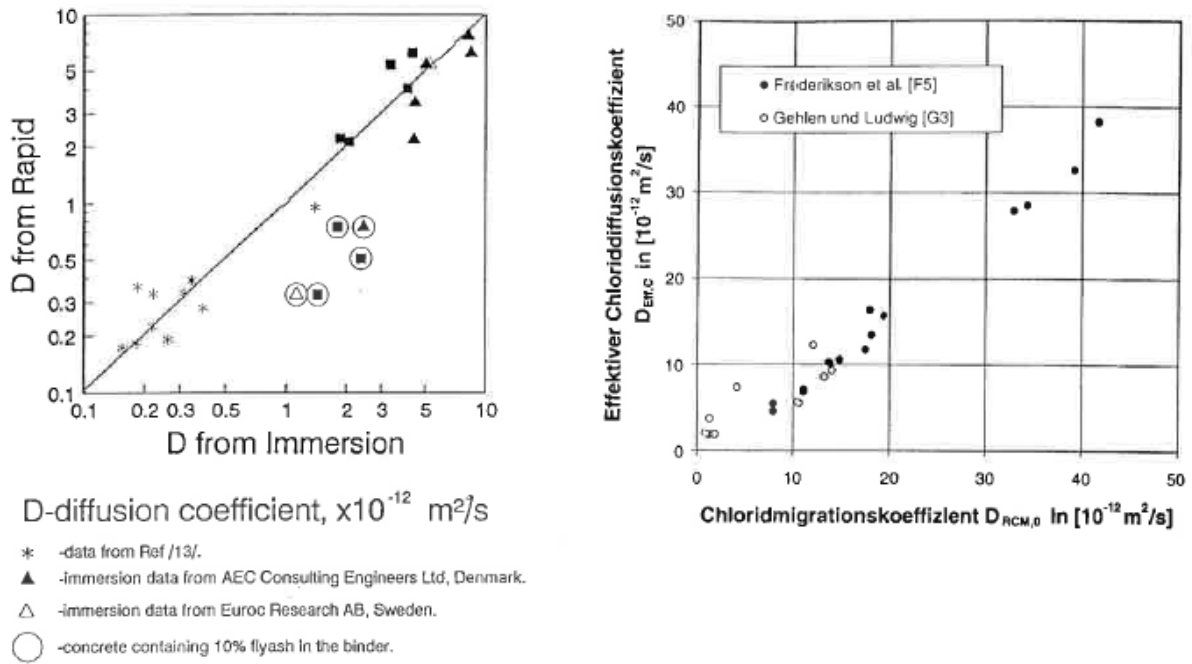


Bild 4.38: Beziehung zwischen den aus Chloridprofilen ermittelten Diffusionskoeffizienten (D from immersion bzw. effektiver Chloriddiffusionskoeffizient) und den Migrationskoeffizienten aus Migrationsversuchen (D from Rapid).

Links: [Tang 1996b]. Rechts: [Gehlen 2000].

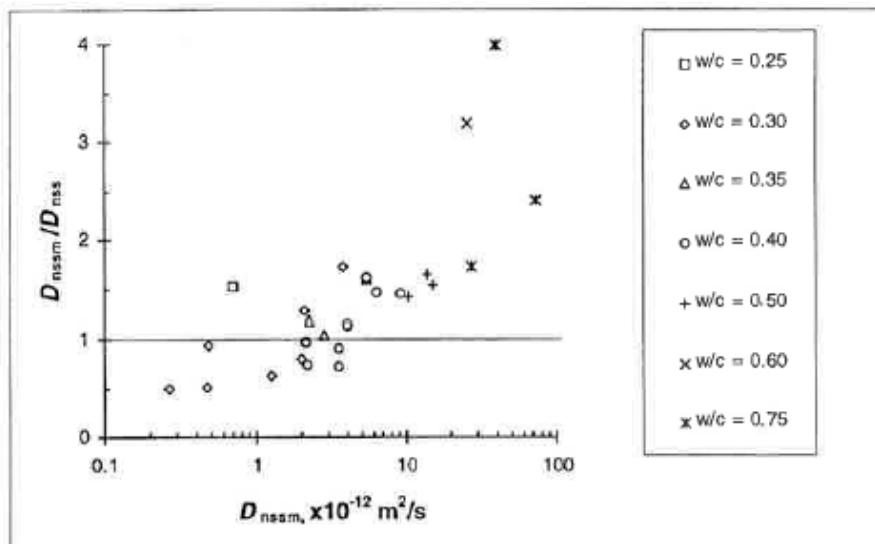


Bild 4.39: Vergleich zwischen dem aus Diffusionsversuchen ermittelten Diffusionskoeffizienten (D_{nss}) und den Migrationskoeffizienten aus Migrationsversuchen (D_{nssm}) [Tang 1996b].

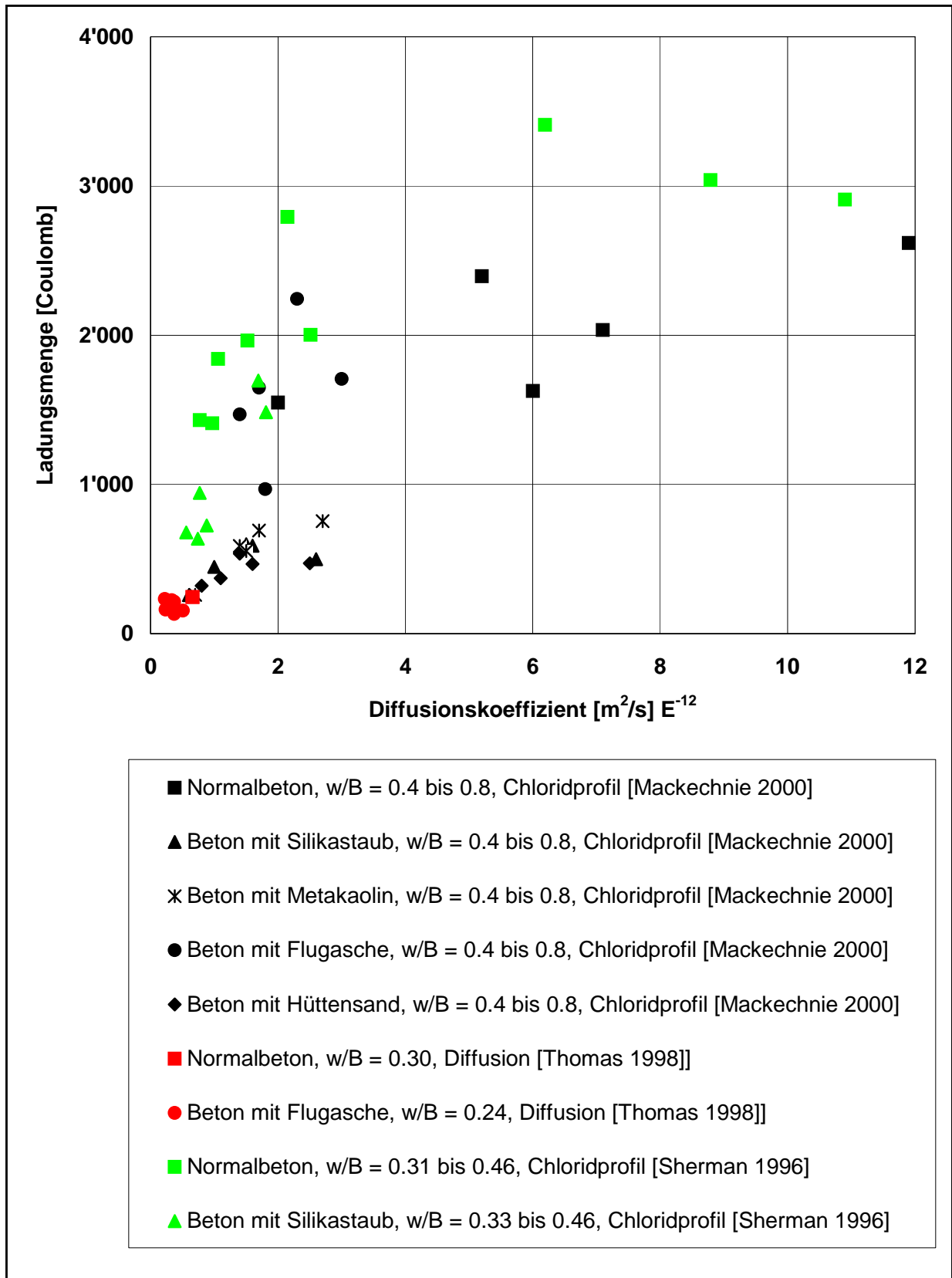


Bild 4.40: Beziehung zwischen der Ladungsmenge und dem Diffusionskoeffizienten.

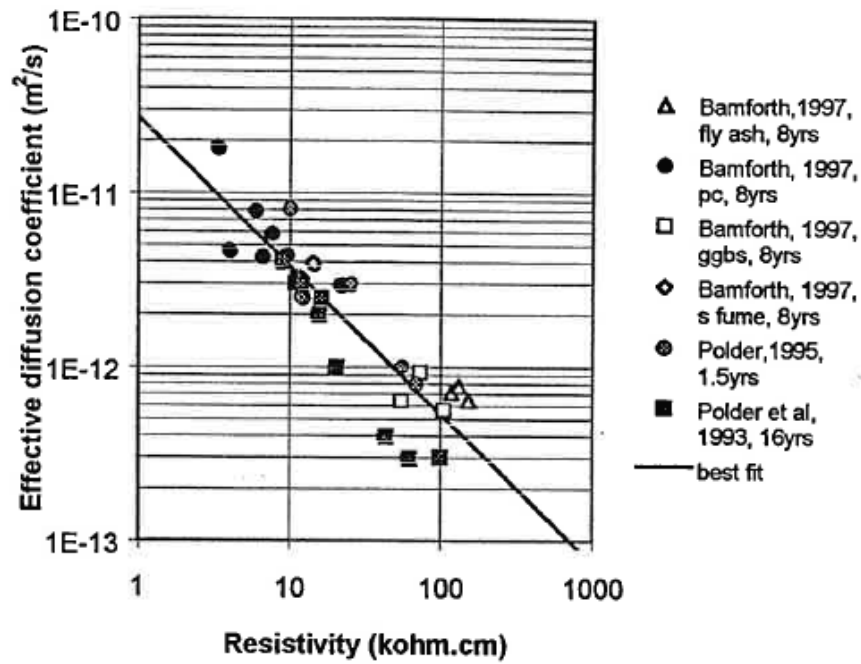


Bild 4.41: Beziehung zwischen dem aus Chloridprofilen ermittelten Diffusionskoeffizienten und dem spezifischen elektrischen Widerstand [Bamforth 1997].

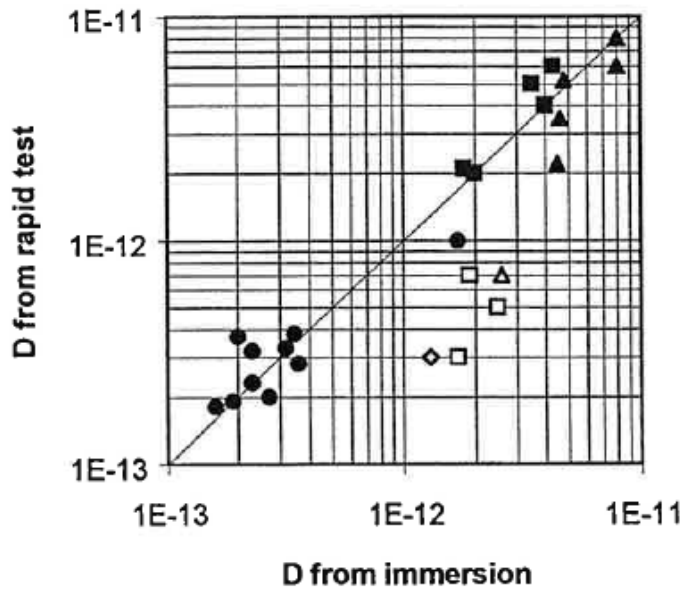


Bild 4.42: Beziehung zwischen den aus Migrationsversuchen ermittelten Migrationskoeffizienten und den Diffusionskoeffizienten aus Chloridprofilen [Bamforth 1997]. Die offenen Symbole stehen für Betone mit 10 % Flugasche im Bindemittel.

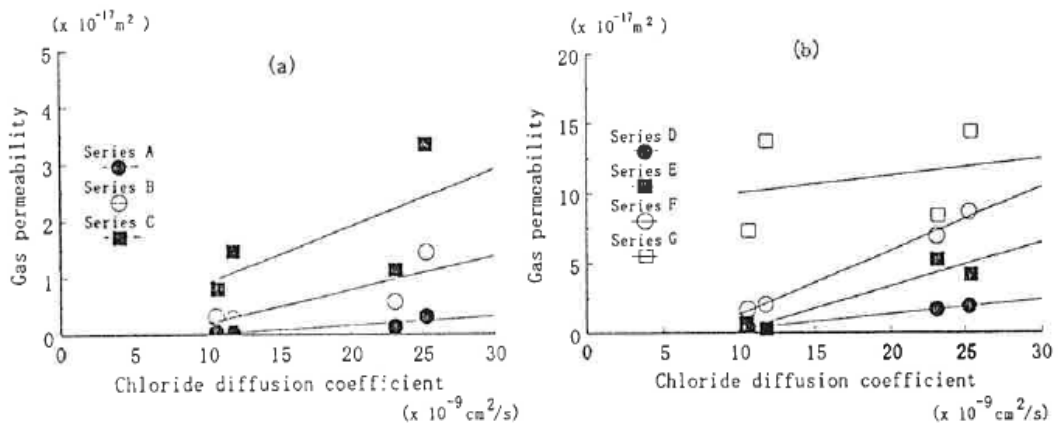


Bild 4.43: Beziehung zwischen der Gaspermeabilität und dem aus Migrationsversuchen ermittelten Migrationskoeffizienten [Sugiyama 1996].

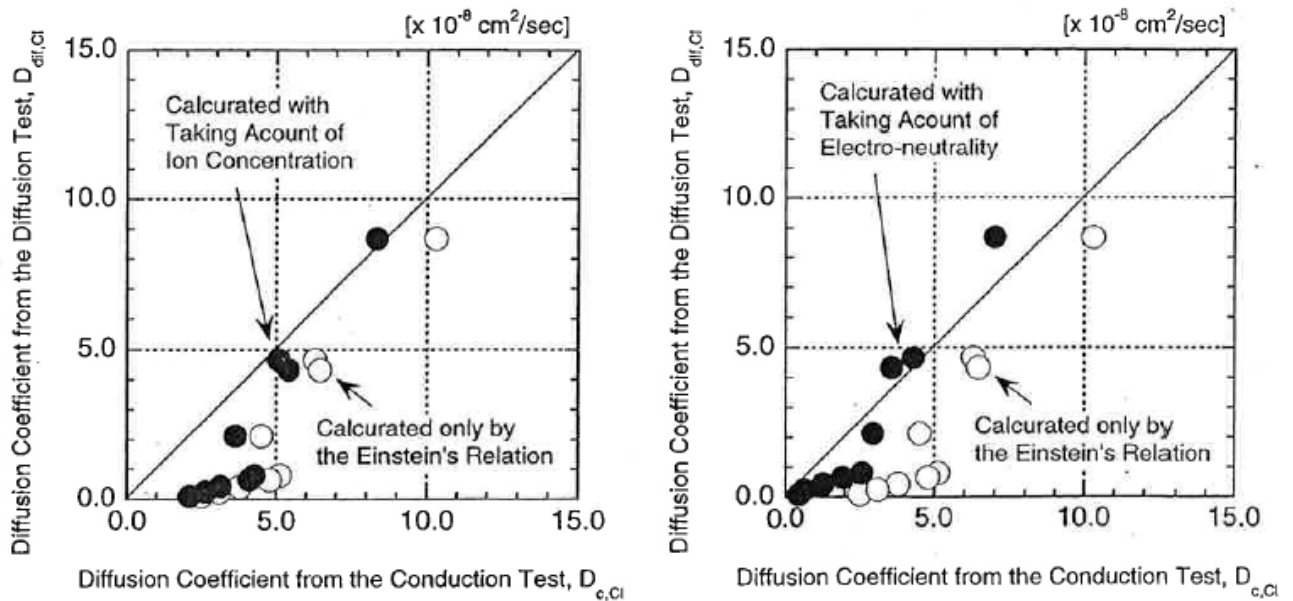


Bild 4.44: Beziehung zwischen den in einer Diffusionszelle und den aus Migrationsversuchen ermittelten Diffusionskoeffizienten unter Berücksichtigung der Ionenkonzentration (links) und der Elektroneutralität (rechts) [Otsuki 1999].

4.12 Kommentar zu einigen Verfahren

Bei der Beurteilung der Zweckmässigkeit des ASTM-Schnelltests wird immer wieder kritisch angemerkt, dass mit dieser Prüfung die Wirkung von Betonzusatzstoffen überschätzt wird, weil die Leitfähigkeit des Porenwassers von Betonen sehr unterschiedlich sein kann (**Tabellen 4.3 und 4.4**). Dies führt dann auch zu sehr unterschiedlichen elektrischen Leitfähigkeiten. In den **Bildern 4.45 und 4.46** ist ersichtlich, dass die Leitfähigkeit vom Zementgehalt, vom w/B-Wert und stark von der Art der Betonzusatzstoffe abhängig ist.

Die Auswirkung der unterschiedlichen Leitfähigkeiten auf die Richtigkeit der Ergebnisse des ASTM-Tests ist aber nach wie vor umstritten. Die gleichen Bedenken gelten grundsätzlich auch für die anderen Prüfungen, bei denen mit Hilfe einer elektrischen Spannung der Chlorideintrag beschleunigt wird, d.h. für alle Migrationstests, wie z.B. beim ibac-Verfahren und bei der Berechnung des Diffusionskoeffizienten aus Chloridprofilen, die unter elektrischer Spannung entstanden sind. Gemäss den Untersuchungen von McGrath kann die Beziehung zwischen dem ASTM-Schnelltest und dem Ponding-Test verbessert werden, wenn anstelle des integralen Chloridgehaltes die Chlorideindringtiefe verwendet und die Probenvorbereitung verbessert wird [McGrath 1999].

In verschiedenen Arbeiten hat sich auch Andrade (s. z.B. [Andrade 1994b,d, 1996, 2000]) mit den Resultaten aus Laborprüfverfahren (ASTM-Schnelltest, Ponding-Test, ibac- bzw. CTH-Test) beschäftigt und versucht, mit verschiedenen Gleichungen für die Berechnung des Migrationskoeffizienten die Übereinstimmung mit den aus Chloridprofilen berechneten Diffusionskoeffizienten zu verbessern. Zudem konnte mit verschiedenen Modifikationen beim ASTM-Schnelltest die Übereinstimmung verbessert werden. Trotzdem kann der Unterschied bei den Resultaten der verschiedenen Verfahren immer noch etwa eine Grössenordnung betragen [Andrade 2000] (**Bild 4.47**).

In mehreren Arbeiten wird darauf hingewiesen, dass sich die Chloridbindung der Zemente bei den Migrationstests nicht so auswirken kann wie bei Diffusionstests oder bei Bauwerken unter natürlichen Expositionsbedingungen. In ihrer Analyse kommen Truc et al. [Truc 2000b] zum Schluss, dass die Chloridbindung wohl eine Verzögerung des Chlorideintrages bewirkt und damit die Zeit, bis sich ein stationären Zustand einstellt, verlängert, im stationären Zustand sich aber sonst nicht auswirkt.

w/B	Leitfähigkeit von Zementstein in mS/cm (28-Tage-Werte)				
	OPC	Silikastaub	Metakaolin	Flugasche	Hüttensand
		10%	10%	30%	50%
0.28	76.4	19.1	31.5	40.5	46.3
0.40	58.0	12.7	36.5	31.2	34.2
0.28; relativ, in %	100	25	41	53	61
0.40; relativ, in %	100	22	63	54	59

Tabelle 4.3: Einfluss der Betonzusatzstoffe, des w/B-Wertes auf die Leitfähigkeit des Porenwassers. Werte von ausgepresstem Porenwasser [Mackechnie 2000].

Bindemittel	Relative Leitfähigkeit in %			
	28 Tage	90 Tage	365 Tage	730 Tage
Portlandzement	100	100	100	100
Hüttensand (50%)	97	92	89	76
Flugasche (60%)	96	71	74	73
Silikastaub (25%)	29	11	8	24
Silikastaub (25%) und Hüttensand (42.5%)	25	12	14	16

Tabelle 4.4: Einfluss der Betonzusatzstoffe und der Zeit auf die Leitfähigkeit des Porenwassers. Werte aus der Zusammensetzung des Porenwassers berechnet [Shi 1998].

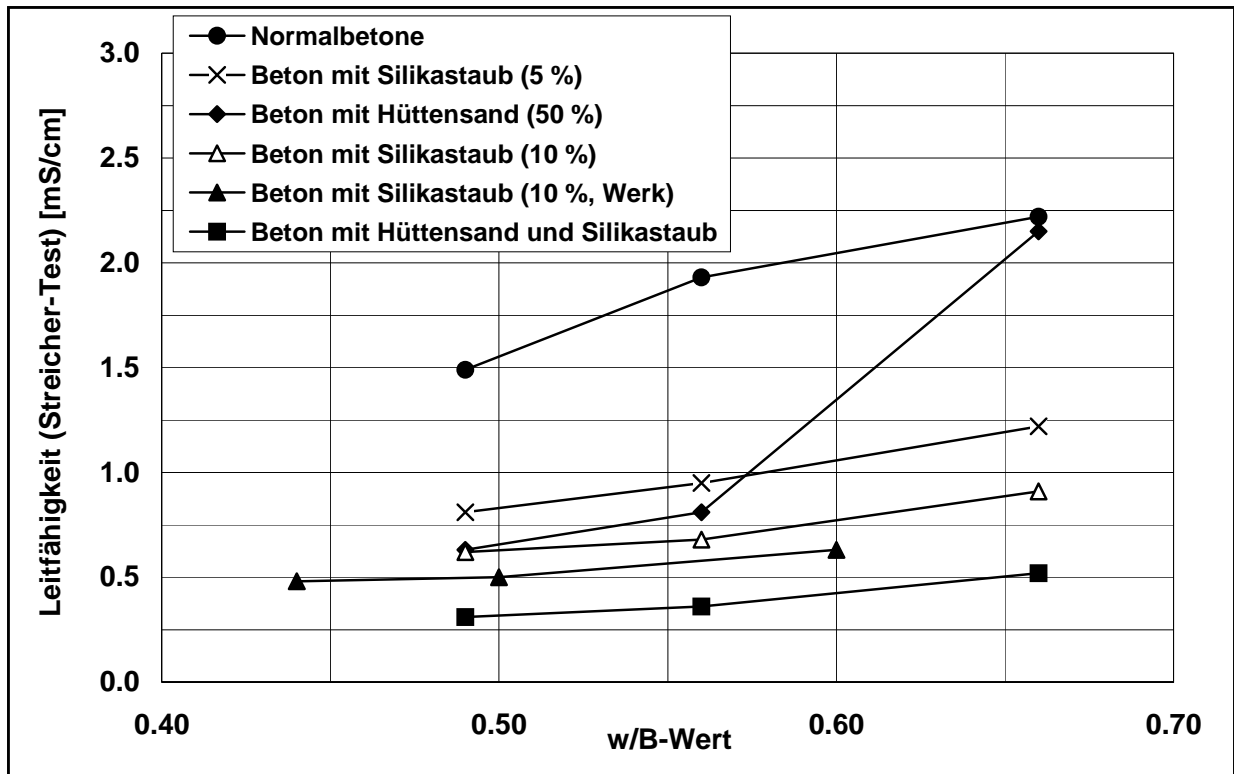


Bild 4.45: Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit (Streicher-Test) vom w/B-Wert und von der Art und Menge der Betonzusatzstoffe [Alexander 1999b]. Anmerkung: Beim Streicher-Test wird die Porenlösung mit NaCl-Lösungen angereichert, so dass grundsätzlich nur die strukturellen Unterschiede im Zementstein ermittelt werden.

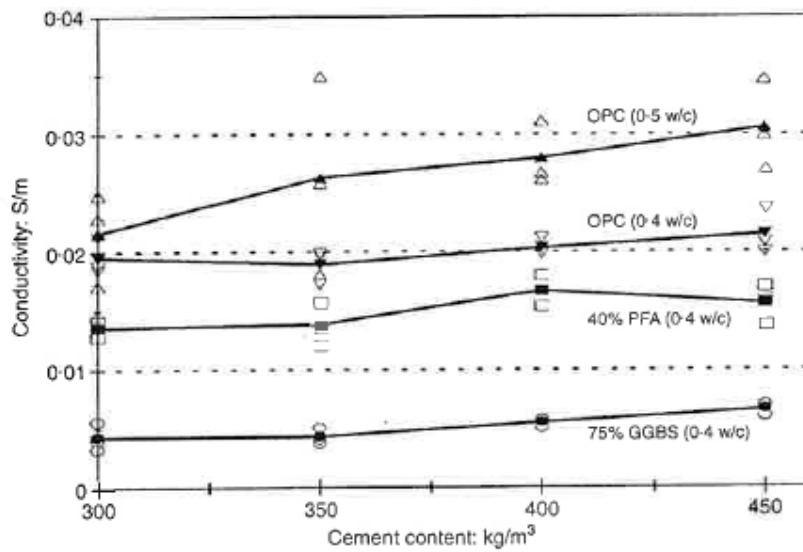


Bild 4.46: Elektrische Leitfähigkeit von Betonen in Abhängigkeit vom Zementgehalt, w/B-Wert und von der Art der Betonzusatzstoffe [Buenfeld 1998b].

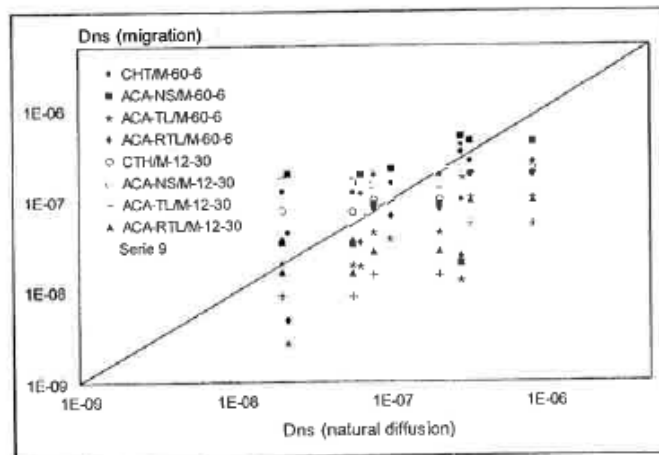


Bild 4.47: Vergleich der mit Migrationstests ermittelten Migrationskoeffizienten (D_{ns} migration) und mit Diffusionskoeffizienten aus Chloridprofilen (D_{ns} natural diffusion) [Andrade 2000]. Die Migrationskoeffizienten wurden mit verschiedenen Gleichungen berechnet.

4.13 Kriterien zur Klassierung von Beton

Aus den **Tabellen 4.5 bis 4.10** gehen verschiedene Kriterien für die Klassierung von Beton bezüglich des Chloridwiderstandes bzw. bezüglich der Dauerhaftigkeitseigenschaften hervor. Es ist darauf hinzuweisen, dass diese Kriterien nicht als absoluter Massstab gelten können, sondern vielmehr zur erwarteten Nutzungszeit, Exposition und Überdeckung der Bewehrung in Beziehung gesetzt werden müssen, wie dies z.B. in **Bild 4.48** gezeigt wird.

Chlorid-permeabilität	Ladungsmenge, Coulomb	Betonsorte	Integraler Chloridgehalt bis in 41 mm Tiefe ¹⁾
hoch	>4'000	Portlandzementbeton (w/z-Wert: >0.6)	>1.3
mittel	2'000 - 4'000	Portlandzementbeton (w/z-Wert: 0.4 - 0.5)	0.8 - 1.3
tief	1'000 - 2'000	Portlandzementbeton (w/z-Wert: <0.4)	0.55 - 0.8
sehr tief	100 - 1'000	Latex-modifizierter Beton, Beton mit Dichtungsmittel	0.35 - 0.55
vernachlässigbar	<100	kunststoffimprägnierter Beton, Polymerbeton	<0.35

1) Gemessen im Ponding-Test nach 90-Tagen in den folgenden Tiefen: 7 - 19, 19 - 32, 32 - 44 und 38 - 40 mm (Werte werden angegeben für die mittleren Tiefen von 13, 25, 38 und 44 mm)

Tabelle 4.5: Klassierung von Betonen nach ihrem Chloridwiderstand [Shi 1998].

Druckfestigkeit, N/mm ²	w/B-Wert	Elektr. Leitfähigkeit (Streicher-Test), mS/cm	Cl ⁻ -Diffusionskoeffizient, 10 ⁻⁸ cm ² /s, 10 ⁻¹² m ² /s	Dichtigkeit
		0.01	0.0532	
>60	<0.3	0.05	0.266	ausgezeichnet
		0.10	0.532	
		0.50	2.66	
		1.0	5.32	
30 ~ 60	0.3 ~ 0.6	1.5	7.98	gut
		2.0	10.6	
		2.5	13.3	
		3.0	16.0	
>30	>0.6	3.5	18.6	schlecht
		4.0	21.3	

Tabelle 4.6: Klassierung von Betonen nach ihrer Dichtigkeit [Lu 1997].

Index	ausgezeichnet	gut	schlecht	sehr schlecht
O ₂ -Permeabilität 1)	>10.0	9.5 - 10.0	9.0 - 9.5	<9.0
Wasseraufnahme, mm/h ^{1/2}	<6	6 - 10	10 - 15	>15
Elektr. Leitfähigkeit (Streicher-Test), mS/cm	<0.75	0.75 - 1.5	1.5 - 2.5	>2.5

1) Index: $-\log K_{\text{Darcy}}$, K in m/s

Tabelle 4.7: Klassierung von Betonen nach deren Dauerhaftigkeitseigenschaften [Alexander 1999b].

Chlorid-permeabilität	Ladungsmenge, Coulomb	Elektrische Leitfähigkeit		Elektrischer Widerstand	
		$\times 10^{-5} \Omega^{-1}$	mS/m 1)	Ω	Ωm 1)
hoch	>4'000	>287	>18.3	<348	<55
mittel	2'000 - 4'000	154 - 287	9.8 - 18.3	649 - 348	102 - 55
tief	1'000 - 2'000	87 - 154	5.5 - 9.8	1149 - 649	181 - 102
sehr tief	100 - 1'000	27 - 87	1.7 - 5.5	3'704 - 1'149	582 - 181
vernachlässigbar	<100	<27	<1.7	>3'704	>582

1) Umrechnung durch die Verfasser dieses Berichtes basierend auf den Angaben zur Probengeometrie.

Tabelle 4.8: Klassierung von Betonen nach ihren Dauerhaftigkeitseigenschaften [Zhao 1998].

Qualitätsklasse des Randbetons	Sauerstoffpermeabilität KO, 10^{-16} m^2 1)
1	KO >3.5
2	$1.0 \leq \text{KO} \leq 3.5$
3	$0.35 \leq \text{KO} \leq 1.0$
4	$0.10 \leq \text{KO} \leq 0.35$
5	KO ≤ 0.10

1) Zwischen der Permeabilitätsmessung des Randbetons (Torrent-Methode) und der im Labor eingesetzten CEMBUREAU-Methode konnten die Autoren eine gute Korrelation feststellen.

Tabelle 4.9: Klassierung des Randbetons mit Hilfe der Permeabilitätsprüfung nach Torrent [Torrent 1993].

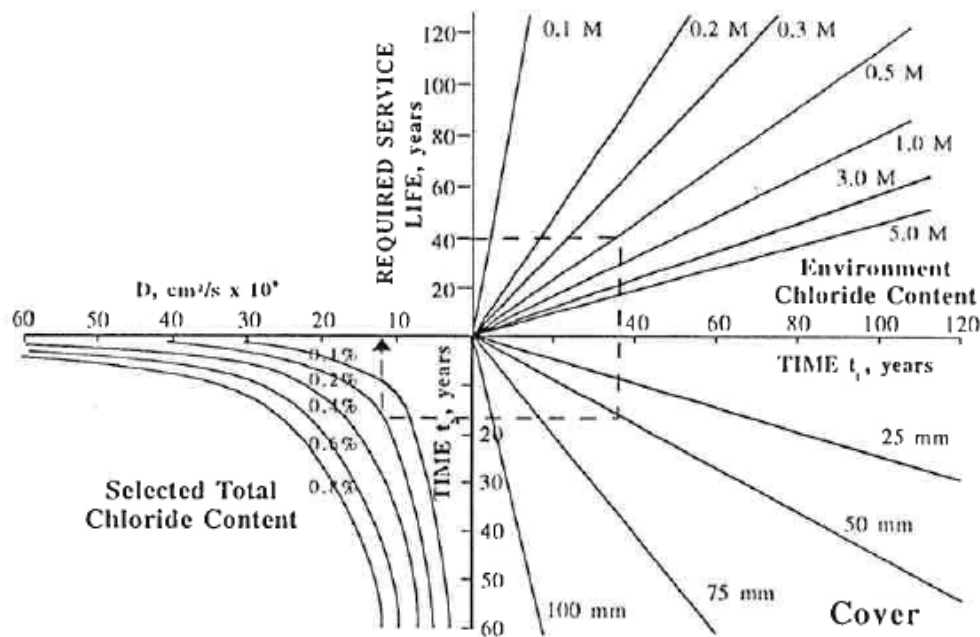


Bild 4.48: Nomogramm zur Bestimmung Diffusionskoeffizienten für bestimmte Randbedingungen bzgl. Nutzungszeit, Exposition (definiert als Chloridgehalt der Umgebung), Überdeckung und zulässigem Chloridgehalt auf Bewehrungshöhe [Jones 1993].

4.14 Beurteilung der verschiedenen Verfahren zur Bestimmung des Chloridwiderstandes

Auf Grund der in der **Tabelle 4.10** zusammengestellten Kriterien wurden für dieses Forschungsprojekt nur jene Prüfungen ausgewählt, die als routinemässige Laborprüfung im Rahmen der Qualitätssicherung in Frage kommen und/oder deren Kenngrösse für die Simulation, Prognosen oder Lebensdauerberechnung benutzt werden können. Die folgenden Kriterien wurden besonders gewichtet:

- Zeitbedarf für Probenvorbereitung und Durchführung der Prüfung
- Prüfung ergibt eine Kenngrösse für Simulationsrechnungen, Prognosen und Lebensdauerberechnungen
- besondere Probleme, Schwachstellen
- Kosten.

Einige Prüfungen sind gemäss **Tabelle 4.10** zwar nicht für den routinemässigen Gebrauch geeignet, könnten evtl. aber für Eignungs- oder Vorversuche eingesetzt werden.

Kriterien	Verfahren zur Bestimmung des Chloridwiderstandes (Chloriddiffusions- und migrationskoeffizient)						
	Diffusionsversuch	Chloridprofile	Ponding-Test	ASTM-Schnelltest	ibac- bzw. CTH-Test	Streicher-Test	Wasser-aufnahme
Zeitbedarf für Proben-vorbereitung und Prüfung	Wochen bis Monate	Wochen bis Jahre	Monate	Tage	Tage	Tage	Tage
Kenngrösse für Simulationen, Prognosen und Lebensdauerberechnungen	ja	ja	nein (ja 1)	nein	ja	nein	nein
Probleme, Schwachstellen	Zeitbedarf bzw. Zahl der Zellen	Zeitbedarf (2), mathematische Behandlung	Zeitbedarf	Probenvorbehandlung	Zeitbedarf, mathematische Behandlung	Probenvorbehandlung, seitliche Abdichtung der Proben	Probenvorbehandlung
preisbestimmende Faktoren	Zahl der Cl ⁻ -Analysen (Lösungen)	Zahl der Cl ⁻ -Analysen (Beton)	Zeit, Zahl der Cl ⁻ -Analysen (Beton)	Zeit	Zeit	Zeit	Zeit
Kosten	hoch	hoch	hoch	mittel	mittel	mittel	hoch
Einsatz für die Eignungsprüfung	(ja)	(ja)	(ja)	ja	ja	ja	ja
Als routinemässige Laborprüfung grundsätzlich geeignet	nein	nein	nein	ja	ja	ja	(ja)

1) Wenn aus den gemessenen Chloridprofile der Diffusionskoeffizient ermittelt wird.

2) Gilt nicht, wenn die Chloridprofile von Bauwerksproben analysiert werden.

Tabelle 4.10: Beurteilung der verschiedenen Verfahren zur Bestimmung des Chloridwiderstandes.

5. Untersuchungsprogramm

5.1 Allgemeines Vorgehen

Um die in der Einleitung erläuterten Fragestellungen beantworten zu können, wurden im Rahmen des Projektes sowohl Untersuchungen an im Labor hergestellten Betonen (sogenannte Laborbetone) wie auch an Betonproben von bestehenden Bauwerken (Bauwerksbetone) durchgeführt.

Elf Betonrezepturen mit unterschiedlichen w/z-Werten und verschiedenen Zusatzstoffen wurden im Labor unter gleichen Bedingungen hergestellt und gelagert. Diese Laborbetone wurden mit den verschiedenen Messverfahren im Alter von 28, 90 und 360 Tagen auf ihren Widerstand gegenüber eindringenden Chloriden geprüft. Daneben wurden auch die Druckfestigkeit, Gaspermeabilität und Wasserleitfähigkeit bestimmt. Mit den Untersuchungen sollten die folgenden Ziele erreicht werden:

- Evaluation verschiedener Prüfverfahren zur Bestimmung des Chloridwiderstandes im Hinblick auf ihre Aussagekraft (Differenzierung zwischen verschiedenen Betonsorten) und der Prüfung ihrer praktischen Zweckmässigkeit (z.B. Prüfaufwand und -dauer, Vorbehandlung der Proben).
- Evaluation verschiedener Betonsorten bezüglich ihres Chloridwiderstandes: Betone mit w/z-Werten zwischen 0.35 und 0.60 und Betone mit unterschiedlichem Gehalt an Silikastaub, Flugasche und Hüttensand.

Betonproben von 15 verschiedenen Bauwerken unterschiedlichen Alters (Bauwerksbetone) wurden mit dem folgenden Ziel untersucht:

- Validierung der Untersuchungsergebnisse der Laborbetone durch den Vergleich mit dem Verhalten von Betonen aus Bauwerken. Die Ergebnisse sollten mit realen Chloridprofilen korreliert werden.

Weiter wurden die Ergebnisse von verschiedenen anderen Betonen (SCC-Betone und Betone mit und ohne Zusatzstoffe), welche die Forschungsstelle während des Projektes im Auftrag von Dritten untersucht hatte, in den Vergleich mit einbezogen (Betone von Drittprojekten).

Die gewonnenen Erkenntnisse zum Chloridwiderstand sollten in Bezug auf die Zweckmässigkeit der Messverfahren, auf die Beurteilung verschiedener Betonsorten und auf die realen Verhältnisse am Bauwerk zusammengefasst werden und zur

- Ausarbeitung einer praktischen Empfehlung zur Herstellung und Prüfung von Betonen mit hohem Chloridwiderstand

verwendet werden.

5.2 Untersuchte Laborbetone

5.2.1 Im Rahmen des Forschungsprojektes hergestellte Laborbetone

Die Zusammensetzung der verschiedenen Laborbetone wurde gemäss folgenden Grundsätzen definiert:

- Die Untersuchungen sollten vorab an baustellentauglichen Rezepturen durchgeführt werden, d.h. keine extrem tiefen w/z-Werte oder extrem hohen Bindemittelgehalte und ein Maximal Korn von 32 mm. Dadurch war es auch möglich, die Prüfergebnisse der Laborbetone mit denjenigen der Bauwerksbetone zu vergleichen. Ein weiteres Ziel war der sinnvolle, bzw. massvolle Einsatz von Zusatzmitteln (ausschliesslich Hochleistungsbetonverflüssiger).
- Als ein Referenzbeton wurde ein Beton mit einer mittleren Zusammensetzung gewählt. Davon ausgehend wurden der w/z-Wert und die Zugabe von Betonzusatzstoffen variiert. Der Referenzbeton weist einen Zementgehalt von 300 kg CEM I 42,5 pro m³ Beton auf und wurde mit einem w/z-Wert von 0.50 hergestellt (**Tabelle 5.1**).
- Die weiteren Betonrezepturen wurden an Hand der Dichte des Zementes (**Tabelle 5.2**) und der Betonzusatzstoffe so berechnet, dass das Bindemittelvolumen jeweils konstant blieb. Für die Berechnung des äquivalenten w/z-Wertes (w/z_{eq}) wurden die k-Werte für die Zusatzstoffe gemäss **Tabelle 5.2** eingesetzt.
- Als Betonzusatzstoffe wurden Flugasche (**FA**) von der Holcim (Schweiz AG) (Hydolent), Hütensand (**HS**) von der Holcim (Schweiz AG) (VCL, Blaine-Wert um 3000) und Silikastaub (**MS**) von der MBT (Schweiz) AG (Elkem MS-Suspension 50/50) in jeweils zwei unterschiedlichen Dosierungen (geringer und hoher Zementersatz) eingesetzt.

Im Vergleich zu den Anforderungen der SN EN 206-1:2000 [EN 2000] ergab sich bei der hohen Dosierung von Silikastaub unter Beibehaltung eines konstanten Bindemittelvolumens ein zu niedriger Zementgehalt bzw. ein zu hoher Zusatzstoffgehalt. Die Silikastaubdosierung in Mischung D übersteigt zwar den in der SN EN 206-1:2000 zulässigen Grenzwert von 11% Zementersatz, wurde aber trotzdem gewählt, um den Einfluss des Silikastaubes besser erfassen zu können.

- Als Zusatzmittel wurde ein Hochleistungsbetonverflüssiger (Eucoplast 915) eingesetzt, um für alle Betonrezepturen eine vergleichbare, weich-plastische Konsistenz des Frischbetons zu erreichen, d.h. ein Ausbreitmass von ca. 400 mm. Die Mischungsangaben und die gemessenen Frischbetoneigenschaften sind aus der **Tabelle 5.3** ersichtlich.

Beton	CEM I 42,5, kg/m ³	Betonzusatzstoff				w/(z + k • BZS) = w/z _{eq} 2)	w / B 2)
		Art	kg/m ³	% / Z	% / B		
G	267					0.6	0.60
A	300					0.5	0.50
I	277	Silikastaub	19	7	6	0.5	0.50
D	255	Silikastaub	38	15 ¹⁾	13	0.5	0.50
K	269	Flugasche	40	15	13	0.5	0.46
E	244	Flugasche	73	30	23	0.5	0.43
H	249	Hüttensand	50	20	17	0.5	0.50
F	186	Hüttensand	111	60	37	0.5	0.50
B	342					0.4	0.40
C	367					0.35	0.35

- 1) Gemäss SN EN 206-1:2000 [EN 2000] nicht erlaubt (max. 11 M. % Silikastaub bezogen auf den Zementgehalt)
- 2) w = Wasser, z = Zementgehalt, BZS = Betonzusatzstoff, B = gesamter Bindemittelgehalt (Zement und Betonzusatzstoffe), k = k-Wert (**Tabelle 5.2**)

Tabelle 5.1: Zusammensetzungen der untersuchten Laborbetone. Als Referenzmischung wurde der Beton A verwendet. Die übrigen Mischungen wurden so berechnet, dass das Bindemittelvolumen konstant bleibt. Maximalkorndurchmesser: 32 mm.

Zement bzw. Betonzusatzstoff	Dichte [kg/m ³]	k-Wert
CEM I 42,5	3'100	1
Flugasche	2'350	0.4 ¹⁾
Silikastaub	2'150	1 ¹⁾
Hüttensand	2'900	1

- 1) Gemäss SN EN 206-1:2000.

Tabelle 5.2: Verwendete k-Werte und Dichten für die Berechnung der Betonrezepturen.

Die angestrebten Frischbetoneigenschaften wurden nur teilweise erreicht. Die Steuerung der Konsistenz des Frischbetons erwies sich als schwierig. So erreichte die Referenzmischung das gewünschte Ausbreitmass von 400mm, während das Ausbreitmass der übrigen Mischungen zwischen 380 und 530mm lag. Die Luftporengehalte bewegten sich zwischen 0.4 bis 2.1Vol.%. Die Mischung C (w/z = 0.35) fiel deutlich aus diesen Schwankungsbereichen mit einem Luftporengehalt von 5Vol.% und einem Ausbreitmass von 350mm. Die Festbetoneigenschaften (z.B. Druckfestigkeit nach 28 und 90 Tagen) erwiesen sich dann auch schlechter als jene der Mischung B (w/z = 0.4). Auf Grund dieser Ergebnisse wurde diese Mischung noch einmal wiederholt (Mischung CW). Die Frisch- und Festbetoneigenschaften erwiesen sich bei dieser zweiten Mischung als besser und reihten sich auch besser in die Ergebnisse der übrigen Laborbetone ein. Im Folgenden werden nur die Resultate der zweiten Mischung berücksichtigt.

Die Mischung H mit 20% Hüttensand wurde im Laufe des Projektes ebenfalls wiederholt. Die Laborergebnisse deuteten generell auf eine geringe Reaktivität des verwendeten Hüttensandes

(Herkunft Österreich). Für eine Abschätzung des Einflusses der Hüttensandqualität auf den Chloridwiderstand wurde deshalb eine weitere Mischung mit einem Hüttensand einer anderen Herkunft (Heidelberger Zement, Mischung L mit 20% Hüttensand) angesetzt. Der zweite Hüttensand ist feiner gemahlen und weist einen Blainewert um 4'000 auf.

5.2.2 Betone aus Drittprojekten

Neben den im **Kapitel 5.2.1** beschriebenen, speziell für das Forschungsprojekt hergestellten Betonen, wurden weitere Betone aus Drittprojekten in das Untersuchungsprogramm aufgenommen (**Tabelle 5.3**). Dabei wurden entweder einzelne Messwerte (z.B. Chloriddiffusionskoeffizienten nach ibac) übernommen oder im Einverständnis mit dem jeweiligen Auftraggeber mehr Probewürfel für ein ganzes Prüfprogramm hergestellt. Die beschriebenen Grundsätze für die Betonzusammensetzung, nach denen die Laborbetone für das Forschungsprojekt hergestellt wurden, kommen hier natürlich nicht zum Zuge. Es handelt sich um Betone, die auf der Baustelle eingesetzt wurden, mit Ausnahme der SCC-Betone, die im Rahmen von Vorversuchen für ein Projekt hergestellt wurden.

Mischung		A	B	C	D	E	F	G	H	I	K	C(W)	H (L)
Zementmenge	kg/m ³	300	342	367	255	244	186	267	249	277	269	367	249
Zusatzstoff					MS	FA	HS		HS	MS	FA		HS
Zusatzstoff	kg/m ³				38	73	111		50	19	40		50
Zusatzmittel (Eucoplast 915)	%		1.0	2.0	1.5	1.25	0.5		0.5	0.75	0.5	1.2	0.25
Wassergehalt	kg/m ³	150	137	128	147	137	148	160	149	148	143	128	149
w/z (w/B)		0.50	0.40	0.35	(0.50)	(0.43)	(0.50)	0.60	(0.50)	(0.50)	(0.46)	0.35	(0.50)
w/z _{eq}		0.50	0.40	0.35	0.50	0.50	0.50	0.60	0.50	0.50	0.50	0.35	0.50
Korngrößenverteilung der Zuschläge													
0 - 1 mm	kg	4.11	4.11	4.11	4.11	4.11	4.11	4.11	4.11	4.11	4.11	4.11	4.11
0-4 mm (Gebr.)	kg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0-4 mm (Rund)	kg	43.86	43.86	43.86	43.86	43.86	43.86	43.86	43.86	43.86	43.86	43.86	43.86
4-8mm	kg	16.45	16.45	16.45	16.45	16.45	16.45	16.45	16.45	16.45	16.45	16.45	16.45
8-16 mm	kg	28.78	28.78	28.78	28.78	28.78	28.78	28.78	28.78	28.78	28.78	28.78	28.78
16-32 mm	kg	43.86	43.86	43.86	43.86	43.86	43.86	43.86	43.86	43.86	43.86	43.86	43.86
Frischbetoneigenschaften													
Ausbreitmass:	mm	440.0	350.0	440.0	400.0	380.0	430.0	530.0	470.0	400.0	410.0	420.0	430.0
Luftporengehalt :	%	0.9	1.2	5.0	1.1	1.7	1.2	0.4	1.6	1.9	2.1	1.9	1.9
Rohdichte :	kg/m ³	2452	2481	2371	2420	2419	2441	2454	2409	2428	2397	2469	2438

Tabelle 5.3 Rezepturangaben pro Kubikmeter Beton sowie Frischbetoneigenschaften der Laborbetone. Mischung C(W) und H (L) sind Wiederholungen.

Beton	Zement	w/z _{eq} ¹⁾ (w/B)	Zu- schlag	Zusatz- stoffe	Zusatz- mittel	Nachbe- handlung	Lagerung
Beton ohne Zusatzstoffe							
Compogna Stützmauerkrone 2	CEM I 42.5 325kg	0.5	0/32mm		Sikament 10 plus, FroV5A	Plastikab- deckung	Lagerung bei 20°C und 70%RF
Compogna Stützmauerkrone 2	CEM I 42.5 325kg	0.48	0/32mm		Ferrogard, Sikament plus 10 FroV5A	Plastikab- deckung	Lagerung bei 20°C und 70%RF
Lehnenbrücke Nesslaboden	CEM I 42.5 325kg	0.47 - 0.48	0/32mm		Sikament 10 plus, FroV5A	Feuchtraum	Lagerung bei 20°C und 70%RF
Instandsetzung Schöneichtunnel	CEM I 42.5 350kg	0.46	0/16mm		Sikament 10 plus, FroV5A	1 Tag in Schalung	Lagerung bei 20°C und 70%RF
Instandsetzung Schöneichtunnel, SCC	CEM II/A-L 42.5 450kg	0.41-0.45	0/8mm			1 Tag in Schalung	Lagerung bei 20°C und 70%RF
Beton mit Flugasche							
SCC, M2	CEM I 42.5 350kg	0.49 (0.44)	0/16mm	FA 110kg	Sikament 180	1Tag in Schalung	Betonelement, im Freien gela- gert, BK nach ca. 3 Wochen entnommen und im Feuchtraum gelagert
SCC, M4	CEM I 42.5 350kg	0.46 (0.40)	0/16mm	FA 110kg	Sikament 180, FroV5A	1Tag in Schalung	
SCC, M11	CEM I 42.5 350kg	0.41 (0.37)	0/16mm	FA 110kg	Sikament Top 10	1Tag in Schalung	Lagerung bei 20°C und 70%RF
Instandsetzung Schöneichtunnel, SCC	CEM II/A-L 32.5 R 361kg	0.45 (0.39)	0/16mm	FA 112kg	Sika Vis- coCrete 2, Sika Aer 50, Sika- control	1 Tag in Schalung	Lagerung bei 20°C und 70%RF
Instandsetzung Schöneichtunnel, SCC	CEM II/A-L 32.5 R 361kg	0.47-0.49 (0.41-0.42)	0/16mm	FA 112kg	Sika Vis- coCrete 2, Sika Aer 50, Sika- control	1 Tag in Schalung	Lagerung bei 20°C und 70%RF

1) $w/z_{eq} = w/(z + k \cdot B)$; B = Betonzusatzstoff (FA, MS und HS); FA: k = 0.4; MS und HS: k = 1.0

Tabelle 5.4: Betone aus Drittprojekten, deren Untersuchungsergebnisse in das Forschungsprojekt integriert wurden.

Fortsetzung: nächste Seite

Fortsetzung

Beton	Zement	w/z_{eq} ¹⁾ (w/B)	Zu- schlag	Zusatz- stoffe	Zusatz- mittel	Nachbe- handlung	Lagerung
Beton mit Silikastaub							
Compogna Leitmauer Ost / West	CEM I 42.5 325kg	0.43-0.48 (0.43-0.48)	0/32mm	MS 15kg (ca. 5%)	Sikament 10 plus, FroV5A, Retarder	Plastikab- deckung	Lagerung bei 20°C und 70%RF
Compogna Leitmauer Ost/West	CEM I 42.5 350kg	0.45-0.49 (0.45-0.49)	0/16mm	MS 20kg (ca. 5%)	Sikament 10 plus, FroV5A, Retarder	Plastikab- deckung	Lagerung bei 20°C und 70%RF
Instandsetzung Schöneich- tunnel, SCC	CEM II/A-L 32.5 R 425kg	0.48 (0.48)	0/16mm	Sika Fume 25kg 1)	Sika Vis- coCrete 2, Sika Aer 50	1 Tag in Schalung	Lagerung bei 20°C und 70%RF
Instandsetzung Schöneich- tunnel, SCC	CEM II/A-L 32.5 R 370kg	0.44 (0.44)	0/16mm	Sika Fume 12.5kg, FA 70kg 2)	Sika Vis- coCrete 2, Sika Aer 50,	1 Tag in Schalung	Lagerung bei 20°C und 70%RF
Beton mit Hüttensand							
Lehnenbrücke Nollabrücke	CEM II A-S 32.5R 325kg	0.48 (0.48)	0/32mm		Sikament 10 plus, FroV5A	Feuchtraum	Lagerung bei 20°C und 70%RF
SCC, M10	CEM I 42.5 350kg	0.37 (0.37)	0/16mm	HS 110kg	Sikament 180	1Tag in Schalung	Lagerung bei 20°C und 70%RF

1) $w/z_{eq} = w/(z + k \cdot BZ)$; FA: $k = 0.4$; MS und HS: $k = 1.0$

2) Kunststoff-Faser (Forta Fibre): 1kg/m^3

Tabelle 5.4: Betone aus Drittprojekten, deren Untersuchungsergebnisse in das Forschungsprojekt integriert wurden (**Fortsetzung**).

5.3 Bauwerksbetone

Die Proben von Bauwerksbetonen wurden mittels Kernbohrungen vorwiegend aus Abbruchobjekten (ASTRA-Projekt ZEBRA, Forschungsauftrag Nr. 96/98) und im Rahmen von Zustandserfassungen entnommen. Angaben zum Alter, Bauteil, Exposition usw. der beprobten Bauwerke enthält die **Tabelle 5.5**. In der Regel war die Zusammensetzung des Betons nicht bekannt und die Betonqualität musste an Hand der Bohrkerne und den Messwerten der Druckfestigkeit, Dichte usw. abgeschätzt werden.

Die Hauptschwierigkeit bei der Probenahme bestand darin, sowohl chloridfreie wie auch chloridhaltige Betonproben aus demselben Bauteil zu entnehmen. In ein paar Fällen war dies nicht möglich (z.B. Schindellegi: nur chloridbelastete Proben oder Obkirchner-Viadukt: keine Chloridbelastung).

Es wurde so weit wie möglich angestrebt, unterschiedliche Bauteile, wie Widerlager, Stützen, Fahrbahnplatten usw. zu erfassen, um einerseits unterschiedliche Expositionen und andererseits unterschiedliche Betonqualitäten untersuchen zu können.

Die verschiedenen Expositionen wurden in folgende Klassen unterteilt:

- a) Betonoberflächen, die chloridhaltigem Spritzwasser ausgesetzt waren, d.h. mässig feuchte Umgebung.
- b) Betonflächen, die chloridhaltigem Kontaktwasser über Leckagen chloridhaltigen Wasser ausgesetzt waren, d.h. wechselnd nasse und trockene Umgebung.

Die meisten der untersuchten Bauwerksbetone wiesen mittlere bis gute Materialeigenschaften auf. Als eine Art Endglied kann der feinkörnige Beton (0/16mm) der Ankernischen der Schluchtbrücke betrachtet werden. Dessen Materialeigenschaften entsprechen eher denjenigen eines Mörtels und fallen entsprechend schlechter aus als jene der übrigen Bauwerksbetone.

Bauwerk	Bauteil	Jahrgang	Exposition / Schäden
Kirchberg	Stütze	1962	Spritzwasser
Schindellegi	Kastenplatte	1971-1972	Kontaktwasser, lokal stark chloridbelastet
Obkirchen – Viadukte, Hergiswil	Fahrbahnplatte	1960-1962	Kontaktwasser
	Kastenplatte Untersicht		Trocken, keine Schäden sichtbar
Runca Sut, Waldhaus - Staderas	Fahrbahnplatte	1968-1969	Kontaktwasser
Schluochtbrücke, Eggenberg, VS	Nischenbeton, Fahrbahnplatte	1963	Kontaktwasser
Arsenalüberführung, Kriens	Stützen	1961-62	Spritzwasser und Sprühnebel, keine Korrosionsschäden sichtbar
	Fahrbahnplatte, Oberseite		Kontaktwasser .Vereinzelte Aussinterungen auf der Untersicht, keine Korrosionsschäden sichtbar
Überführung Zuchwil	Stützen	Inbetriebnahme 1968	Spritzwasser
Hardbrücke, Neuenhof	Stützen	1968	Spritzwasser
Europabrücke	Längsträger	1962	Kontaktwasser; $w_{\beta_{28}} \geq 45\text{N/mm}^2$
Göschenen	Fahrbahnplatte Brücke über Vortunnel	1977-1978	Kontaktwasser
Galerie Harzbüchel, St. Gallen	Leitmauer (Mittelwand)	1978 – 1980 Inbetriebnahme: 1987	Spritzwasser, vereinzelte Korrosionsschäden; Beton BH PC 300kg/m^3 , $w_{\beta_{28}} \geq 300\text{kg/cm}^2$

Tabelle 5.5 Liste der untersuchten Bauwerksbetone. Die Exposition dieser Bauwerke entspricht der Expositionsklasse XD 3 (Spritz- und Kontaktwasser) der Norm SN EN 206-1:2000.

5.4 Prüfprogramm

Aus den 70 Liter-Mischungen der einzelnen Betonrezepturen wurden je vier Prismen (120 x 120 x 360mm) und neun Würfel (150 x 150mm) hergestellt. Die Frischbetonkontrollergebnisse sind in **Tabelle 5.3** zusammengefasst. Die Proben wurden abgedeckt und nach 7 Tagen ausgeschalt. Danach wurden sie bei 20°C und 70% relativer Luftfeuchtigkeit bis zum jeweiligen Prüftermin gelagert. Die Lagerungsbedingungen der Betonmischungen von Drittaufträgen sind in der **Tabelle 5.4** angegeben.

Das vollständige Prüfprogramm ist in der **Tabelle 5.6** dargestellt. Im Alter von 28, 90 und 360 Tagen wurden sowohl verschiedene Messverfahren für den Chloridwiderstand wie auch Messungen von anderen Dichtigkeitsprüfungen (Wasserleitfähigkeit nach SIA 162/1, Prüfung Nr. 5 und Gaspermeabilität gemäss der CEMBUREAU-Methode) und der Druckfestigkeit durchgeführt. Das vollständige Prüfprogramm konnte an den Proben von Drittaufträgen nur teilweise, je nach Auftragsumfang und Zeitpunkt der Ausführung durchgeführt werden. An den Bauwerksbetonen hingegen wurde jeweils das gleiche Prüfprogramm wie für die 360-Tage alten Laborbetone realisiert.

Proben	Laborbetone Forschungsprojekt			Laborbetone Drittaufträge			Bauwerks- betone
	28	90	360	28	90	360	
Probenalter (Tage)							ca. 20-40 Jahre
Druckfestigkeit	x	x	x	z.T.	z.T.	z.T.	x
Wasserleitfähigkeit nach SIA 162/1, Prüfung Nr. 5	x		x	z.T.		z.T.	x
Gaspermeabilität (Sauer- stoffdurchlässigkeit nach Methode CEMBUREAU)	x	x	x	z.T.	z.T.	z.T.	x
ibac –Verfahren	x	x	x	z.T.	z.T.	z.T.	x
ASTM C 1202-91			x			z.T.	x
Streicher-Verfahren			x			z.T.	x
Aufsaugversuch			x			z.T.	x

Tabelle 5.6: Prüfprogramm für die Labor- und Bauwerksbetone.

Druckfestigkeit:

Die Druckfestigkeit wurde bei den Laborbetonen an Würfeln und bei den Bauwerksbetonen an Bohrkernen mit Durchmesser 50 mm gemäss der Norm SIA 162/1, Prüfung Nr.1 gemessen. Es wurde jeweils der Mittelwert aus drei Messungen bestimmt.

Chloridmigrations- und Chloridaufsaugversuche:

Diese spezifischen Messverfahren des Chloridwiderstandes sind im **Kapitel 3** beschrieben. Während der Aufsaugversuch an jeweils zwei Bohrkerne durchgeführt wurde, stellen die Ergebnisse der übrigen Verfahren Mittelwerte aus je drei Einzelwerten dar.

Gaspermeabilität:

Die Gaspermeabilität wurde jeweils als Mittelwert von drei Einzelmessungen an Bohrkernen mit einer Länge von 50mm und in der Regel mit einem Durchmesser von 100mm (Ausnahmen: 150 mm) bestimmt. Das Verfahren entspricht der Methode CEMBUREAU [Jacobs 1994, 1998].

Die Proben wurden vor der Messung während 14 Tagen bei 50 °C getrocknet. Mit einem Blaszähler wurde der Gasdurchfluss bei 1.5, 2 und 3 bar Druck während 1 Stunde gemessen

Wasserleitfähigkeit:

Die Wasserleitfähigkeit wurde an je 5 Bohrkernen mit Durchmesser 50mm gemäss der Norm SIA 162/1, Prüfung Nr. 5, bestimmt. Der im Folgenden verwendete Wert entspricht jeweils der mittleren Wasserleitfähigkeit q_w bei einer Bauteildicke von 300mm. Die 28 Tage alten Proben wurden gemäss der alten, von der TFB akkreditierten Messvorschrift geprüft. Die 360 Tage alten Proben wurden hingegen gemäss dem vom VPL vereinheitlichten, aber modifiziertem Prüfverfahren gemessen und ausgewertet [Studer 2000]. Um die Vergleichbarkeit der Resultate zu gewährleisten, wurden die Ergebnisse der 28-Tage-Proben nach dem modifizierten VPL-Verfahren erneut ausgewertet.

Porenkennwerte:

Die Gesamtporosität und der Anteil an kapillar füllbaren Poren bzw. an kapillar nicht füllbaren Poren können mit der SIA Prüfung Nr. 5/7, VPL modifiziert zur Bestimmung der Wasserleitfähigkeit ermittelt werden. Damit wurden bei den 360 Tage alten Labor- und den Bauwerksbetonen jeweils zusätzlich zum vorgesehenen Prüfprogramm auch die Porenkennwerte ermittelt.

Chloridanalysen:

Der Chloridgehalt von Betonproben wurde gemäss der Empfehlung SIA 162/2 mittels der Röntgenfluoreszenz-Methode (RFA) bestimmt.

6. Untersuchungsergebnisse

6.1 Laborbetone

6.1.1 Betoneigenschaften und ihre Entwicklung mit dem Betonalter

Die verschiedenen untersuchten Betoneigenschaften und deren zeitliche Entwicklung sind in den **Bildern 6.1 bis 6.4** dargestellt. Dabei wurde unterschieden zwischen Normalbetonen (Beton ohne Betonzusatzstoffe) und Betonen mit Silikastaub, Flugasche oder Hüttensand. Die Daten aus den Drittprojekten sind ebenfalls zum Vergleich in den Diagrammen jeweils enthalten. In den **Tabellen 6.1 und 6.2** sind die 28- und 360-Tage-Werte zusammen mit den mittleren Standardabweichungen aufgeführt.

a) *Betone ohne Zusatzstoffe*

Bei den Normalbetonen zeigt sich in **Bild 6.1** erwartungsgemäss eine Zunahme der **Druckfestigkeit** mit dem Alter. Die Betone erreichen entsprechend ihrem w/z-Wert Festigkeiten zwischen 47N/mm^2 (Labormischung mit $w/z = 0.6$) und 74N/mm^2 (Labormischung mit $w/z = 0.35$).

Die **Wasserleitfähigkeit** nimmt generell mit abnehmendem w/z-Wert und zunehmendem Alter ab. Die höheren Zementsteinvolumina (325kg Zement/m^3 , d.h. ein grösseres Porenvolumen) der Betonmischungen der Drittprojekte führen, wenn man die w/z-Werte berücksichtigt zu leicht höheren Wasserleitfähigkeiten im Alter von 28 Tagen. Die Abnahme der Wasserleitfähigkeit mit dem Alter ist bei diesen Betonen hingegen ausgeprägter. Bei den Labormischungen zeigt sich, dass die Abnahme mit zunehmendem w/z-Wert geringer ausfällt und bei der Mischung mit dem höchsten w/z-Wert von 0.6 sogar zunimmt.

Die **Gaspermeabilität** folgt generell ebenfalls dem w/z-Wert. Es ergibt sich aber kein sehr klares Bild über die Abhängigkeit von der Betonqualität. Die Betone mit den niedrigsten w/z-Werten besitzen die niedrigsten Gaspermeabilitäten, die jedoch mit zunehmendem Betonalter tendenziell eher zunehmen. Die Labormischung mit dem w/z-Wert von 0.5 (Referenzmischung) folgt ebenfalls diesem Trend. Bei der Labormischung mit w/z-Wert von 0.6 und den Betonen aus den Drittprojekten mit einem w/z-Wert um 0.5 zeichnet sich zuerst eine Abnahme im Alter von 90 Tagen, dann wieder eine leichte Zunahme der Gaspermeabilität ab. Bei diesen Mischungen bleiben die 360-Tage-Werte jedoch unter den 28-Tage-Werten.

Der **Chloridmigrationskoeffizient** (ibac-Verfahren) bewegt sich zwischen 6 und $23 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Die Migrationskoeffizienten nehmen mit zunehmendem Alter ab, mit Ausnahme der Labormischung mit $w/z = 0.6$, wo, wie bei der Wasserleitfähigkeit, ebenfalls eine Zunahme beobachtet wird. Bei den meisten Proben liegen die 90-Tage-Werte höher als die 28-Tage-Werte, nehmen dann aber in der Regel wieder ab. Ausnahmen bilden die Betonmischungen aus den Drittprojekten. Bei den Laborbetonen liegen die zeitlichen Veränderungen unter $5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, d.h. bei maximal 25% des Ausgangswertes. Bei den Betonen mit w/z-Werten ≤ 0.40 liegen die Veränderungen im Bereich der Standardabweichung.

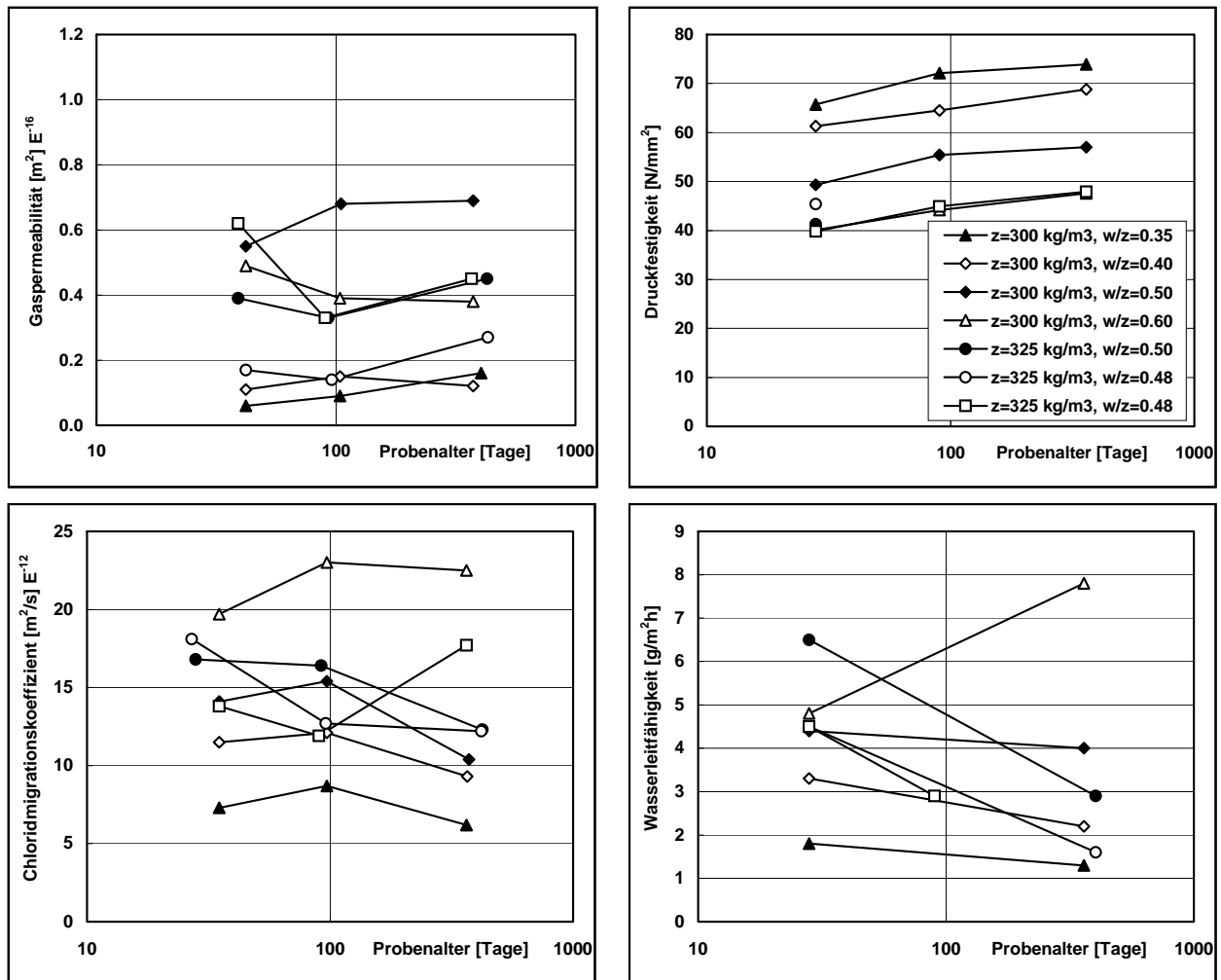


Bild 6.1: Zeitliche Entwicklung der Eigenschaften der Betone ohne Zusatzstoffe.

b) Betone mit Silikastaub

Die **Druckfestigkeit** der Betone mit Silikastaub und einem w/z_{eq}-Wert von 0.5 sind mit Werten bis maximal 69N/mm² erwartungsgemäss höher als jene der Normalbetone.

Sowohl die **Wasserleitfähigkeit** wie auch die **Gaspermeabilität** liegen im Bereich der Normalbetone mit w/z ≤0.4. Die Wasserleitfähigkeit bleibt mit zunehmendem Betonalter ziemlich konstant, während die Gaspermeabilität eher zunimmt.

Die **Chloridmigrationskoeffizienten** sind deutlich niedriger als bei den Normalbetonen und liegen insgesamt unter 5 10⁻¹² m²/s. Die zeitliche Änderung der Chloridmigrationskoeffizienten ist zwar als Absolutwert gering (max. 2.6 10⁻¹² m²/s bei der Compognabrücke), erreicht aber bezogen auf den Ausgangswert 50%.

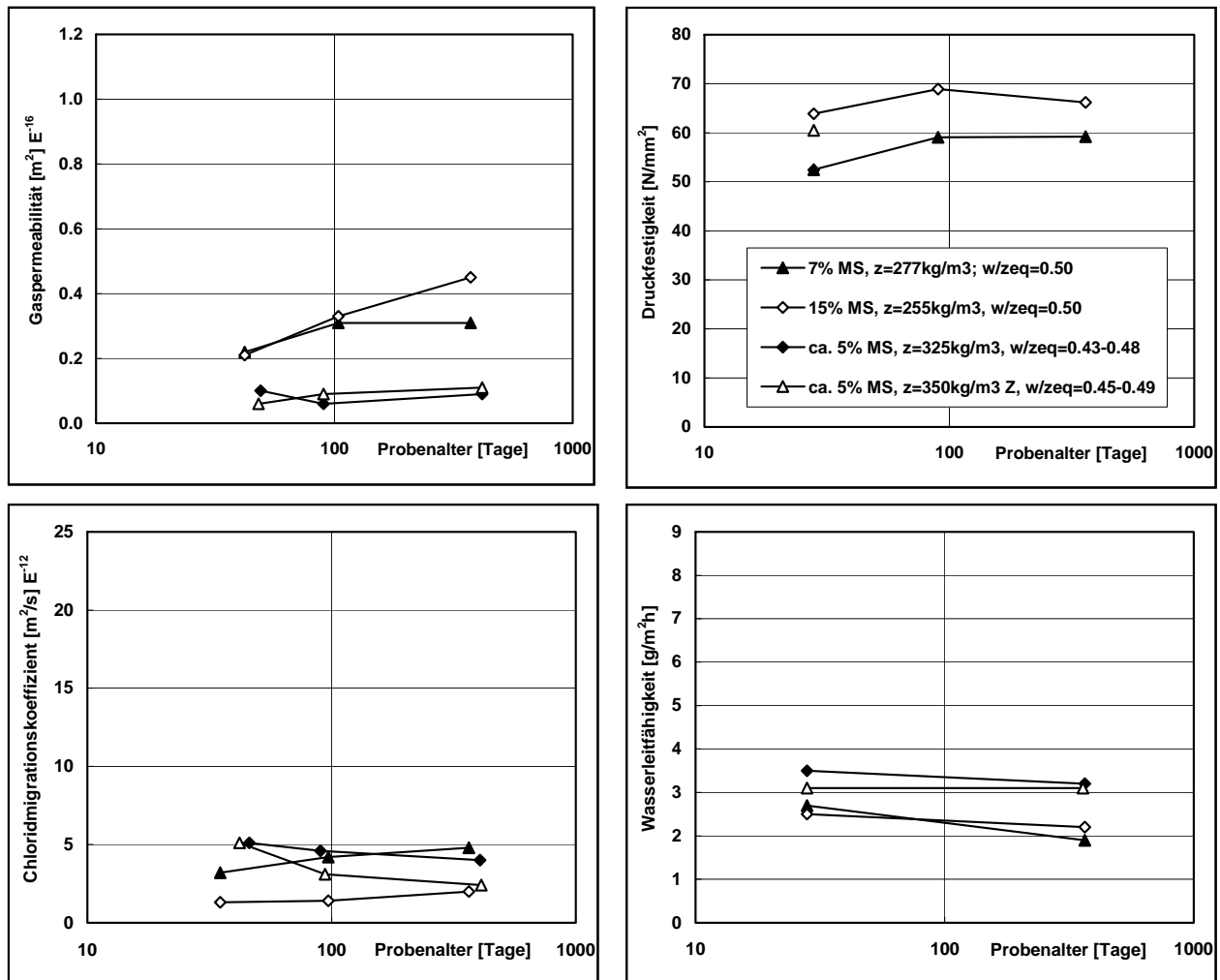


Bild 6.2: Zeitliche Entwicklung der Eigenschaften der Betone mit Silikastaub (MS).

c) Betone mit Flugasche

Die Zugabe von Flugasche macht sich bei den 28-Tage-**Druckfestigkeiten** im Vergleich zu den Normalbetonen nicht bemerkbar. Die Werte liegen im Bereich der Labormischungen mit w/z-Werten von 0.5 und 0.6, wobei die Mischung mit 30% Flugasche höhere Druckfestigkeiten erreicht als die Mischung mit 15% Zementersatz. Mit zunehmendem Alter steigen die Druckfestigkeiten stärker an als bei den Normalbetonen. Die übrigen Werte stammen von selbstverdichtenden Betonen mit einem vergleichbaren prozentualen Zementersatz von 33%. Im Alter von 28 Tagen übersteigt nur eine Mischung die Druckfestigkeiten der Labormischungen.

Die **Gaspermeabilitäten** liegen im Vergleich zu den Normalbetonen mit einem w/z-Wert von 0.5 etwas niedriger (Werte zwischen 1 und 4 $10^{-17} m^2$) und nehmen mit zunehmendem Betonalter wieder zu, wobei die Mischung mit dem höheren Flugaschegehalt bessere Werte erreicht.

Die **Wasserleitfähigkeit** liegt bei etwa 3 bis 4 g/m²h und nimmt mit zunehmendem Alter zu und erreicht im Alter von 360 Tagen die Wasserleitfähigkeit der Normalbetone mit gleichem w/z-Wert. Die 28 Tage alten SCC-Betone weisen trotz niedrigeren w/z_{eq}-Werten wegen ihrem höheren Zementsteinvolumen höhere Wasserleitfähigkeiten auf als die Labormischungen. Ein verdichtender Effekt der Flugasche wegen der puzzolanischen Reaktion scheint sich nur bei der leicht stärkeren Druckfestigkeitszunahme bemerkbar zu machen.

Die **Chloridmigrationskoeffizienten** nehmen mit dem Betonalter bei den Mischungen mit 30% Flugasche stark ab, bleiben aber bei der Mischung mit nur 15% Flugasche konstant. Die SCC-Mischung mit dem tiefsten w/z_{eq} -Wert von 0.37 liegt im Alter von 28 Tagen deutlich unter den übrigen Mischungen. Da sie aber keine so starke Abnahme des Migrationskoeffizienten verzeichnet, sind die 360-Tage-Werte wieder vergleichbar. Sie liegen im Bereich der Labormischung ohne Zusatzstoffe mit dem w/z -Wert von 0.35 und erreichen die obere Grenze der silikastaubhaltigen Betone (d.h. ein Migrationskoeffizient von ca. $5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$).

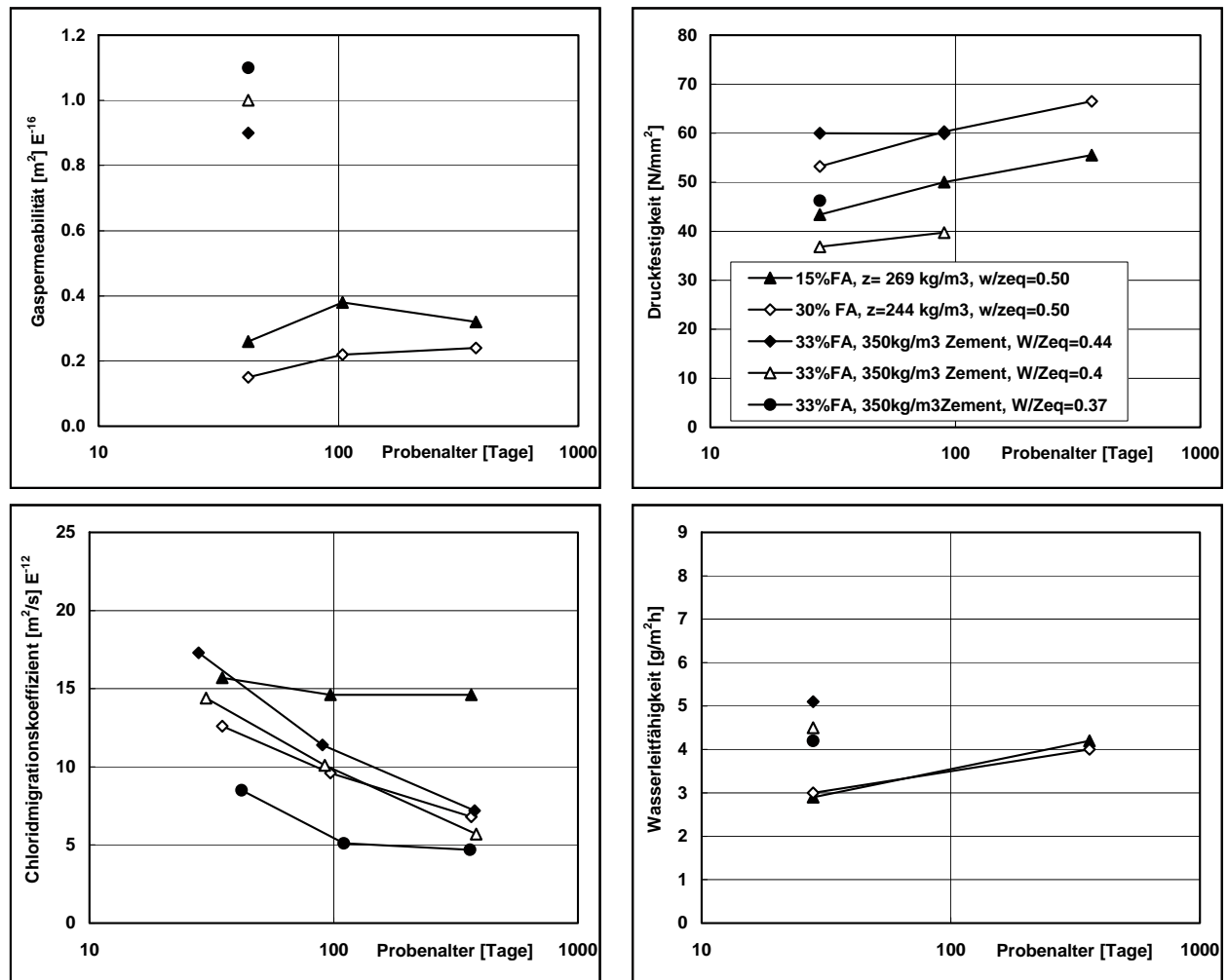


Bild 6.3: Zeitliche Entwicklung der Eigenschaften der Betone mit Flugasche (FA).

d) Betone mit Hüttensand

Wie schon erwähnt, wurde die Labormischung mit 20% Hüttensand noch einmal mit einem feiner gemahlenden Hüttensand hergestellt. Die erwartete Verbesserung der Betoneigenschaften dank der erhofften höheren Reaktivität des Hüttensandes konnte nicht festgestellt werden. Bei der **Wasserleitfähigkeit** und der **Gaspermeabilität** wurden eher schlechtere Werte im Vergleich zur ersten Mischung erreicht.

Die **Druckfestigkeiten** und ihr zeitlicher Verlauf sind für alle Betone mit Hüttensand etwa ähnlich. Es werden maximal $57 \text{ N}/\text{mm}^2$ erreicht, d.h. gleich hohe Werte wie bei der Referenzmischung.

Die **Gaspermeabilität** liegt ebenfalls im Bereich der Normalbetone. Einzig die Mischung mit dem CEM II /A-S erreicht Werte unter $3 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$.

Die **Wasserleitfähigkeit** nimmt bei allen Mischungen mit dem Alter leicht zu und ist vergleichbar mit derjenigen der Referenzmischung.

Die **Chloridmigrationskoeffizienten** sind vergleichbar mit denjenigen der Betone mit Flugasche. Sie nehmen mit zunehmendem Betonalter tendenziell ab, wobei die grösste Änderung bei der Mischung mit dem höchsten Zementersatz (60% Hüttensand) zu erkennen ist. Die niedrigsten Werte erreicht auch hier die SCC-Mischung (w/z_{eq}-Wert von 0.37) mit einem Migrationskoeffizienten von $5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

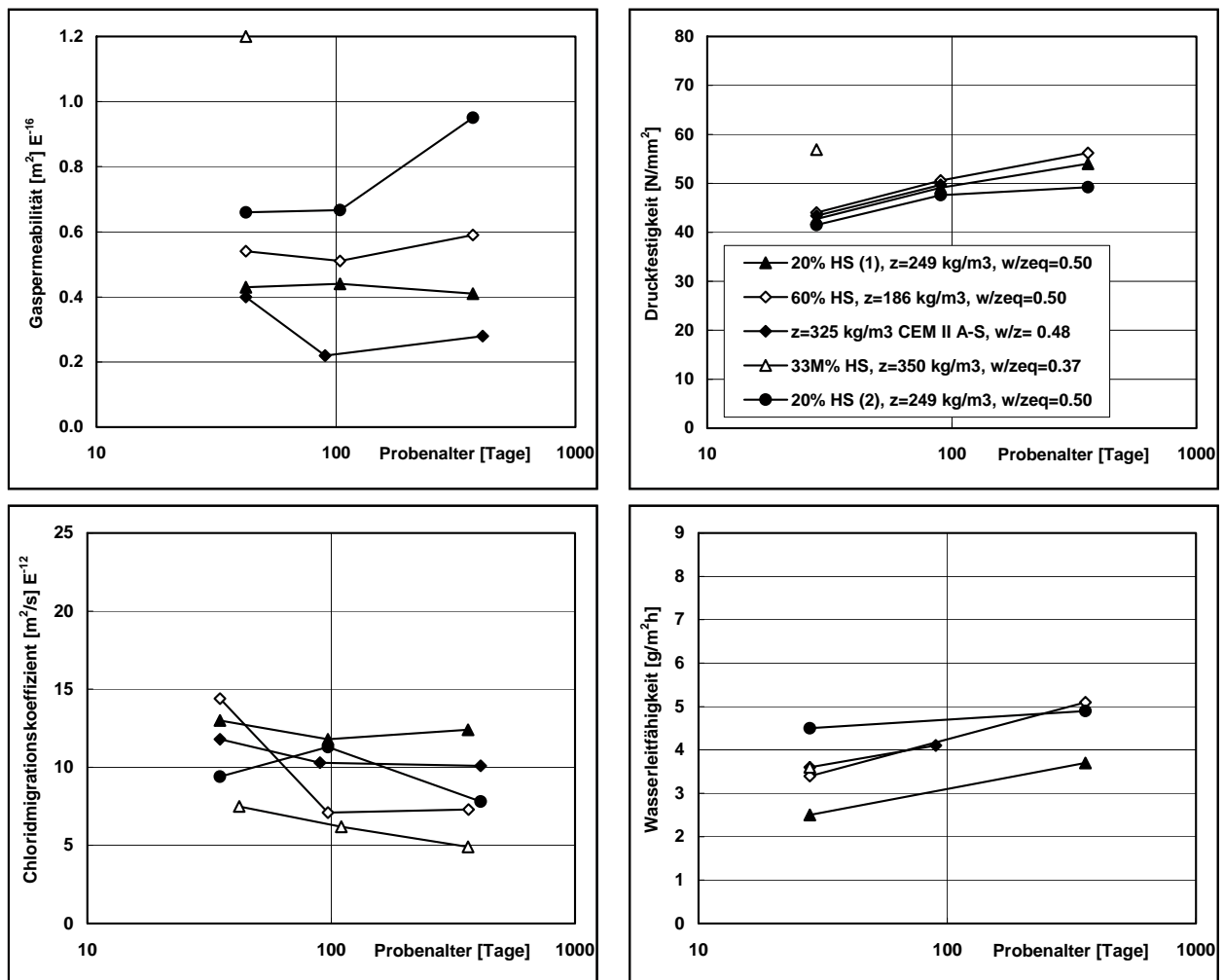


Bild 6.4: Zeitliche Entwicklung der Eigenschaften der Betone mit Hüttensand (HS).

6.1.2 Vergleich des Einflusses von Betonzusatzstoffen

Zur besseren Übersicht und zum Vergleich wurden die Messergebnisse der Labormischungen mit Zusatzstoffen und der Referenzmischung in **Bild 6.5** graphisch dargestellt und in der **Tabelle 6.1** zusammengestellt.

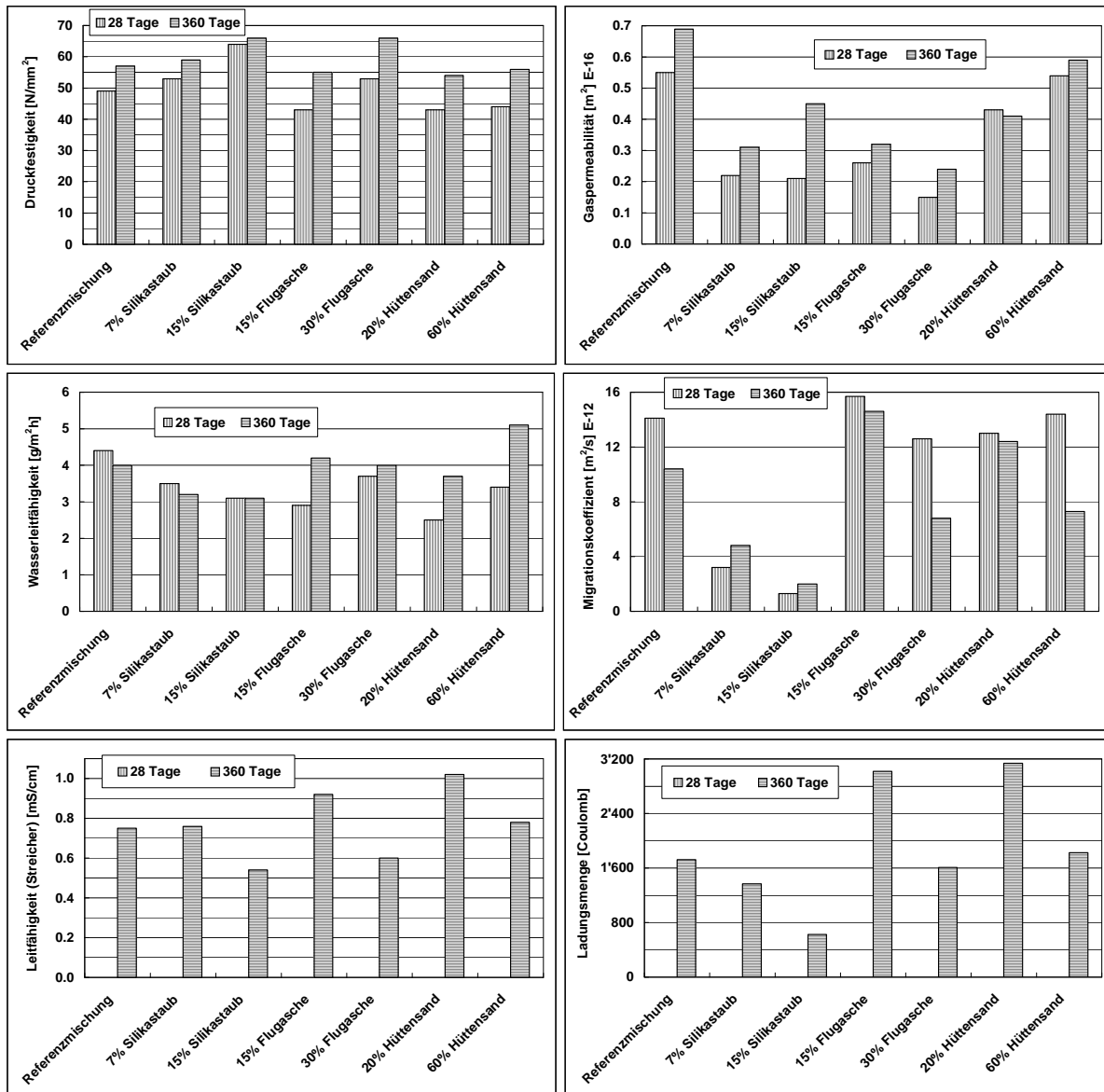


Bild 6.5: Vergleich der 28- und 360-Tage-Werte der Kenngrößen der Betone mit Betonzusatzstoffen mit der Referenzmischung (ohne Betonzusatzstoffe). Alle Betone haben einen w/z- bzw. w/z_{eq}-Wert von 0.5 und ein konstantes Zementleimvolumen.

Mischung (Art und Menge Zusatzstoff)	Druck- festigkeit, [N/mm ²]	Gaspermea- bilität, [m ²] E ⁻¹⁶	Wasserleit- fähigkeit, [g/m ² /h] ¹⁾	Migrations- koeffizient, [m ² /s] E ⁻¹²	Leitfähig- keit; [mS/cm] ²⁾	ASTM, [Coulomb] ²⁾
Referenzmi- schung w/z= 0.5	49 → 57 (1.1)	0.55 → 0.69 (0.11)	4.4 → 4.0 (0.7)	14.1 → 10.4 (1.02)	0.75 (0.13)	1724 (79)
7% Silikastaub	53 → 59 (1.2)	0.22 → 0.31 (0.05)	3.5 → 3.2 (0.4)	3.2 → 4.8 (0.69)	0.76 (0.13)	1367 (190)
15% Silikastaub	64 → 66 (1.3)	0.21 → 0.45 (0.12)	3.1 → 3.1 (0.4)	1.3 → 2.0 (0.37)	0.54 (0.06)	628 (99)
15% Flugasche	43 → 55 (1.5)	0.26 → 0.32 (0.05)	2.9 → 4.2 (0.9)	15.7 → 14.6 (2.24)	0.92 (0.10)	3017 (264)
30% Flugasche	53 → 66 (1.1)	0.15 → 0.24 (0.04)	3.7 → 4.0 (0.6)	12.6 → 6.8 (1.55)	0.60 (0.07)	1606 (242)
20% Hüttensand	43 → 54 (1.1)	0.43 → 0.41 (0.11)	2.5 → 3.7 (0.6)	13.0 → 12.4 (1.59)	1.02 (0.30)	3136 (258)
60% Hüttensand	44 → 56 (1.6)	0.54 → 0.59 (0.11)	3.4 → 5.1 (0.5)	14.4 → 7.3 (2.14)	0.78 (0.14)	1825 (172)

1) Wasserleitfähigkeit q_w bezogen auf eine Bauteildicke von 300mm.

2) Werte nach 360 Tagen.

Tabelle 6.1: Zusammenstellung der zeitlichen Veränderung der Mittelwerte der verschiedenen Kenngrößen der Labormischungen mit Zusatzstoffen und der Referenzmischung im Alter von 28 Tagen und 360 Tagen. Alle Mischungen haben einen w/z- bzw. w/z_{eq} -Wert von 0.5 und ein konstantes Zementleimvolumen. Die Referenzmischung enthält 300kg Zement pro m³ Beton.

In den Klammern sind die jeweiligen Standardabweichungen angegeben.

Grau unterlegt: Änderungen innerhalb der Standardabweichung.

Aus dem Vergleich ergeben sich folgende Tendenzen:

- Nur die Mischungen mit 15% Silikastaub und 30% Flugasche erreichen im Alter von 360 Tagen deutlich höhere **Druckfestigkeiten** als die Referenzmischung. Die übrigen Mischungen zeigen ähnliche Druckfestigkeiten wie die Referenzmischung.
- Durch die Zugabe von Betonzusatzstoffen wird die **Gaspermeabilität** niedriger, wobei die grösste Reduktion mit der Zugabe von Flugasche erreicht wurde (Reduktion um ca. 50%). Die Gaspermeabilität bleibt gleich bzw. nimmt – abgesehen von der Mischung mit 20% Hüttensand – mit dem Alter zu (mögliche Ursache: unterschiedliche Neigung zu Mikrorissbildung).
- Bei der Referenzmischung nimmt die **Wasserleitfähigkeit** nach 360 Tagen ab. Demgegenüber steigt sie bei den Mischungen mit Betonzusatzstoffen an (Ausnahmen: Mischungen mit Silikastaub), so dass im Alter von 360 Tagen ähnliche Werte für alle Mischungen vorliegen. Nur die Mischungen mit Silikastaub liegen klar unter dem Ergebnis der Referenzmischung (mögliche Ursache: Mikrorissbildung).

- Der **Chloridmigrationskoeffizient** wird durch die Zugabe von Silikastaub stark reduziert. Bei den silikastaubhaltigen Betonen nimmt der Migrationskoeffizient mit dem Alter wieder leicht zu, während er bei allen anderen Mischungen mehr oder weniger stark abnimmt. Mit dem Alter wird im Vergleich zur Referenzmischung eine deutliche Verbesserung nur von den Mischungen mit 30% Flugasche und 60% Hüttensand erreicht (Reduktion um ca. 50%). Sie liegen aber noch klar über den Migrationskoeffizienten der silikastaubhaltigen Mischungen.
- Bei den **Leitfähigkeitsmessungen** nach dem Streicherverfahren ergibt sich im Alter von 360 Tagen ein teilweise anderes Bild als beim Migrationskoeffizienten. Insbesondere unterscheiden sich die Mischungen mit 7% Silikastaub nur geringfügig von den übrigen Mischungen. Die Mischungen mit 15% Silikastaub und 30% Flugasche haben tiefere Leitfähigkeiten als die Referenzmischung, analog zu den Ergebnissen des ibac-Verfahrens nach 360 Tagen. Hingegen hat der Hüttensand auch bei 60% Zementersatz keinen Einfluss auf die Leitfähigkeit im Vergleich zur Referenzmischung.
- Der Einfluss der Betonzusatzstoffe auf die Ladungsmenge beim **ASTM-Test** ist sehr ähnlich wie beim Migrationskoeffizienten.
- Die beobachteten zeitlichen Veränderungen der Gaspermeabilität, der Wasserleitfähigkeit und des Chloridmigrationskoeffizienten liegen häufig im Bereich der Standardabweichung.

6.1.3 Einfluss des w/z-Wertes

Um den Einfluss des w/z-Wertes auf die Betoneigenschaften darzustellen, wurden die Messergebnisse der Referenzmischung mit jenen der übrigen Labormischungen ohne Betonzusatzstoffe graphisch dargestellt (**Bild 6.6**) und tabellarisch zusammengestellt (**Tabelle 6.2**):

Mischung (w/z-Wert)	Druckfestigkeit, [N/mm ²]	Gaspermeabilität, [m ²] E ⁻¹⁶	Wasserleitfähigkeit, [g/m ² /h] ¹⁾	Migrationskoeffizient, [m ² /s] E ⁻¹²	Leitfähigkeit; [mS/cm] ²⁾	ASTM, [Coulomb] ²⁾
w/z= 0.35	66 → 74 (0.9)	0.06 → 0.02 (0.01)	1.8 → 1.3 (0.2)	7.3 → 6.2 (1.38)	0.58 (0.03)	1307 (128)
w/z=0.4	61 → 69 (0.9)	0.11 → 0.09 (0.01)	3.3 → 2.2 (0.4)	11.5 → 9.3 (3.33)	0.76 (0.11)	2022 (257)
w/z=0.5 (Referenzmischung)	49 → 57 (1.1)	0.55 → 0.69 (0.11)	4.4 → 4.0 (0.7)	14.1 → 10.4 (1.02)	0.75 (0.13)	1724 (79)
w/z=0.6	40 → 48 (1.1)	0.49 → 0.38 (0.09)	4.8 → 7.8 (0.6)	19.7 → 22.5 (1.60)	1.02 (0.02)	3752 (623)

1) Wasserleitfähigkeit q_w bezogen auf eine Bauteildicke von 300mm.

2) Werte nach 360 Tagen.

Tabelle 6.2: Zusammenstellung der zeitlichen Veränderung der Mittelwerte der verschiedenen Kenngrößen der Labormischungen ohne Betonzusatzstoffe und der Referenzmischung im Alter von 28 Tagen und 360 Tagen.

In den Klammern sind die jeweiligen Standardabweichungen angegeben. Grau unterlegt: Änderungen innerhalb der Standardabweichung.

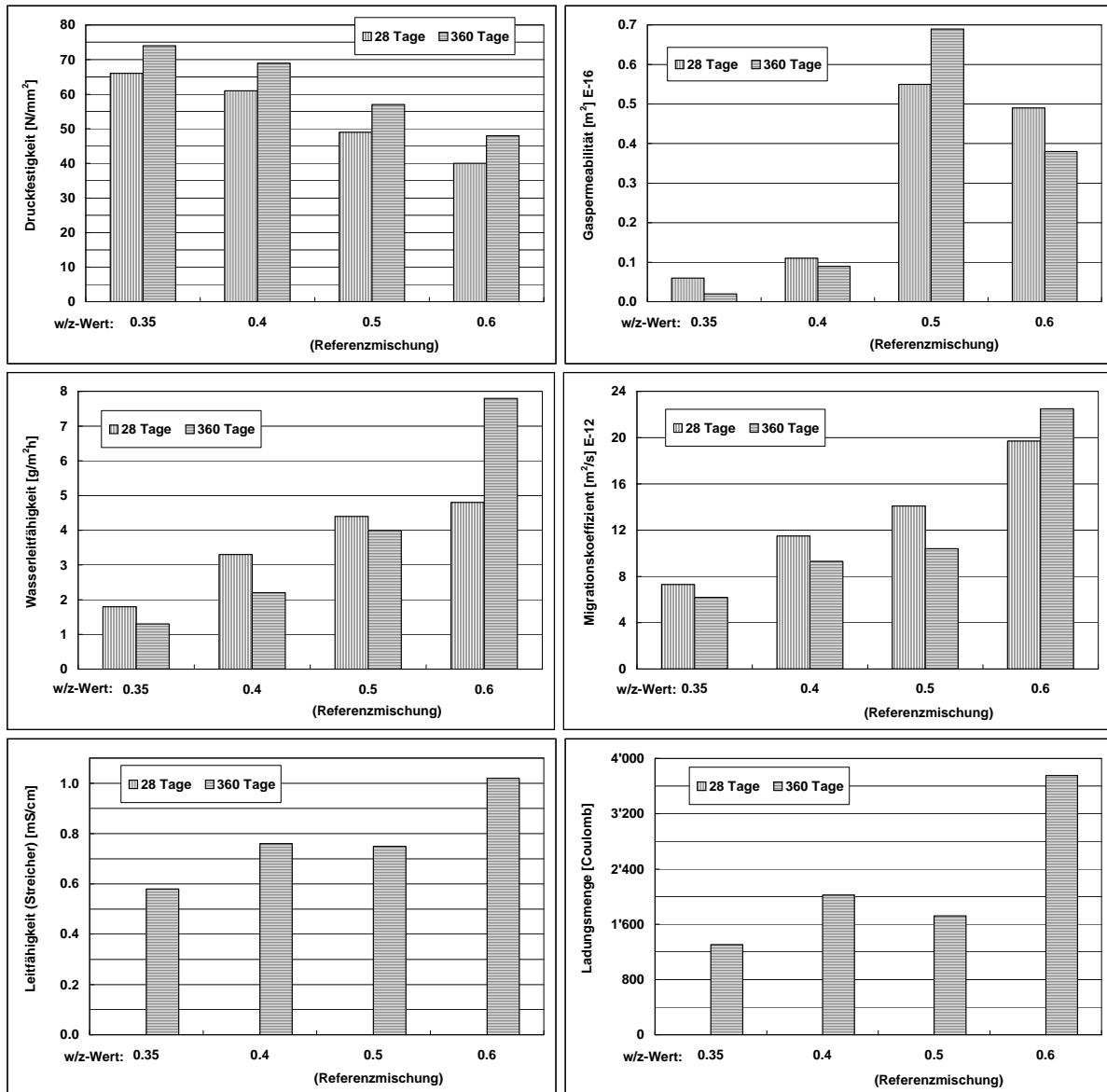


Bild 6.6: Vergleich der 28- und 360-Tage-Werte der Kenngrößen der verschiedenen Betone ohne Betonzusatzstoffe.

Das **Bild 6.6** und die **Tabelle 6.2** verdeutlichen die Abhängigkeit aller Parameter vom w/z-Wert bei konstantem Zementleinvolumen (Ausnahmen: Gaspermeabilität beim w/z-Wert 0.5 / 0.6 sowie der Ladungsmenge und der Leitfähigkeit beim w/z-Wert 0.4 / 0.5):

- Die gemessenen Parameter verbessern sich bei jedem Alter – abgesehen von den erwähnten Ausnahmen – generell mit abnehmendem w/z-Wert.
- Bei den Mischungen mit einem w/z-Wert von 0.35 und 0.4 zeichnet sich auch eine günstige altersbedingte Entwicklung der gemessenen Parameter ab. Die Referenzmischung folgt demselben Trend, mit Ausnahme der Gaspermeabilität, welche mit dem Alter zunimmt. Bei der Mischung mit w/z-Wert von 0.6 nehmen hingegen Wasserleitfähigkeit und Migrationskoeffizient mit dem Alter zu.

6.1.4 Zusammenfassung der Resultate

Das **Bild 6.7** zeigt eine Zusammenfassung der Resultate aller Labormischungen. Die Mischungen sind nach aufsteigender Druckfestigkeit im Alter von 28 Tagen geordnet. Die Druckfestigkeit wurde als Klassierungskriterium gewählt, weil sie als einziger Parameter bei praktisch allen Mischungen im Laufe der Zeit eine klare Entwicklung aufweist, d.h. mit der Zeit zunimmt. Die Klassierung ist deshalb unabhängig vom Alter. Aus dem Bild geht hervor, dass:

- **Wasserleitfähigkeit, Chloridmigrationskoeffizient** und **Ladungsmenge** mit zunehmender Druckfestigkeit tendenziell abnehmen, allerdings mit Schwankungen, die grösstenteils parallel verlaufen (Ausnahme bilden z.B. die Mischungen mit 15% Silikastaub und 60% Hütten sand im Alter von 360 Tagen).
- die **Gaspermeabilität** grössere Schwankungen aufweist, ohne klaren Bezug zur Druckfestigkeit.
- die **Leitfähigkeit** (nach Streicher) mit zunehmender Druckfestigkeit abnimmt.

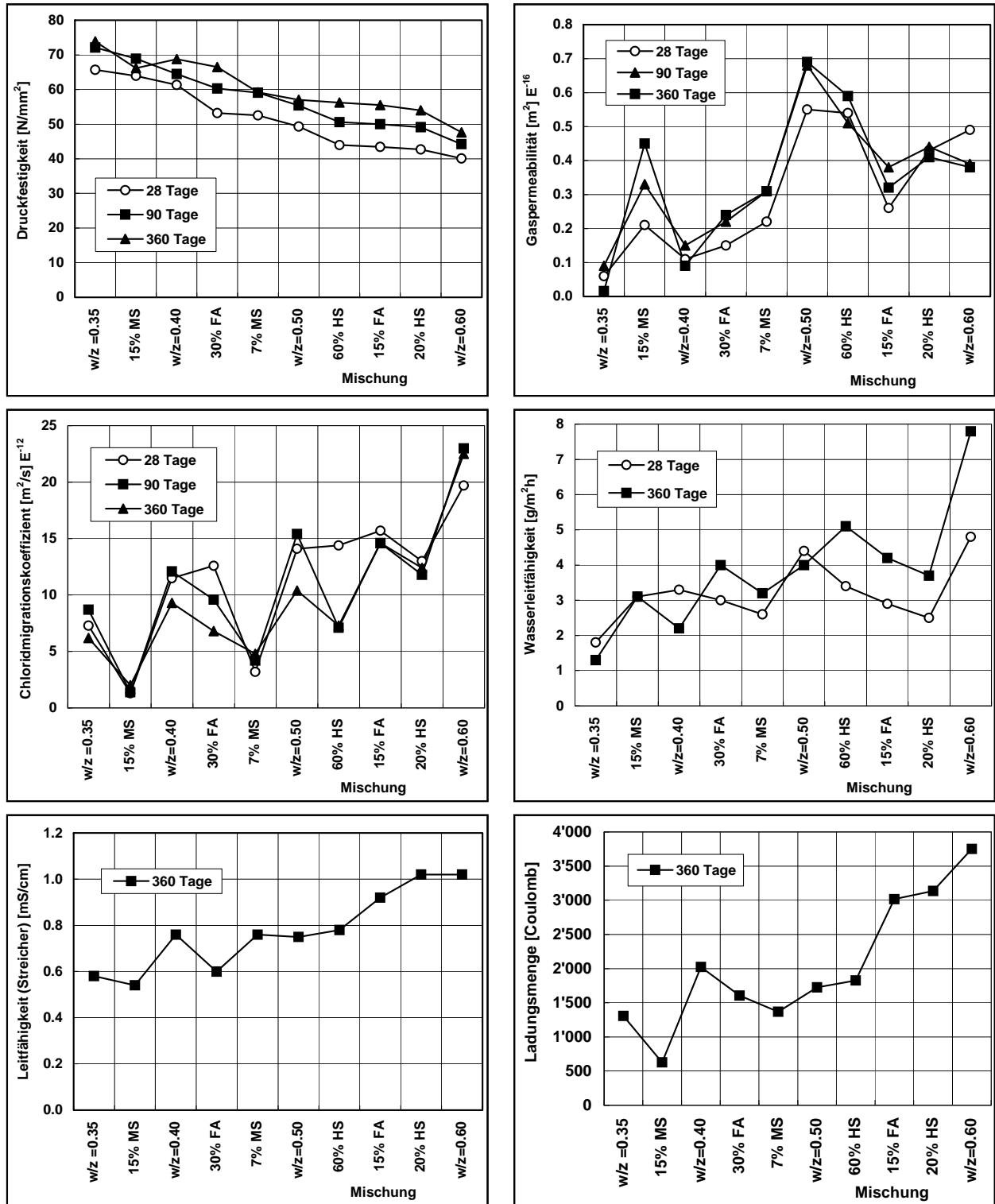


Bild 6.7: Zusammenfassung der Messergebnisse der Labormischungen. Die Mischungen sind in Funktion der Druckfestigkeit im Alter von 28 Tagen geordnet.

6.1.5 Korrelationen zwischen den einzelnen Betoneigenschaften

In den **Bildern 6.8 bis 6.12** sind einzelne Korrelationen im Alter von 28 Tagen und 360 Tagen dargestellt. In diesen Bildern wurden die Resultate von Betonen aus Drittprojekten integriert.

a) Korrelationen der 28 Tage-Werte

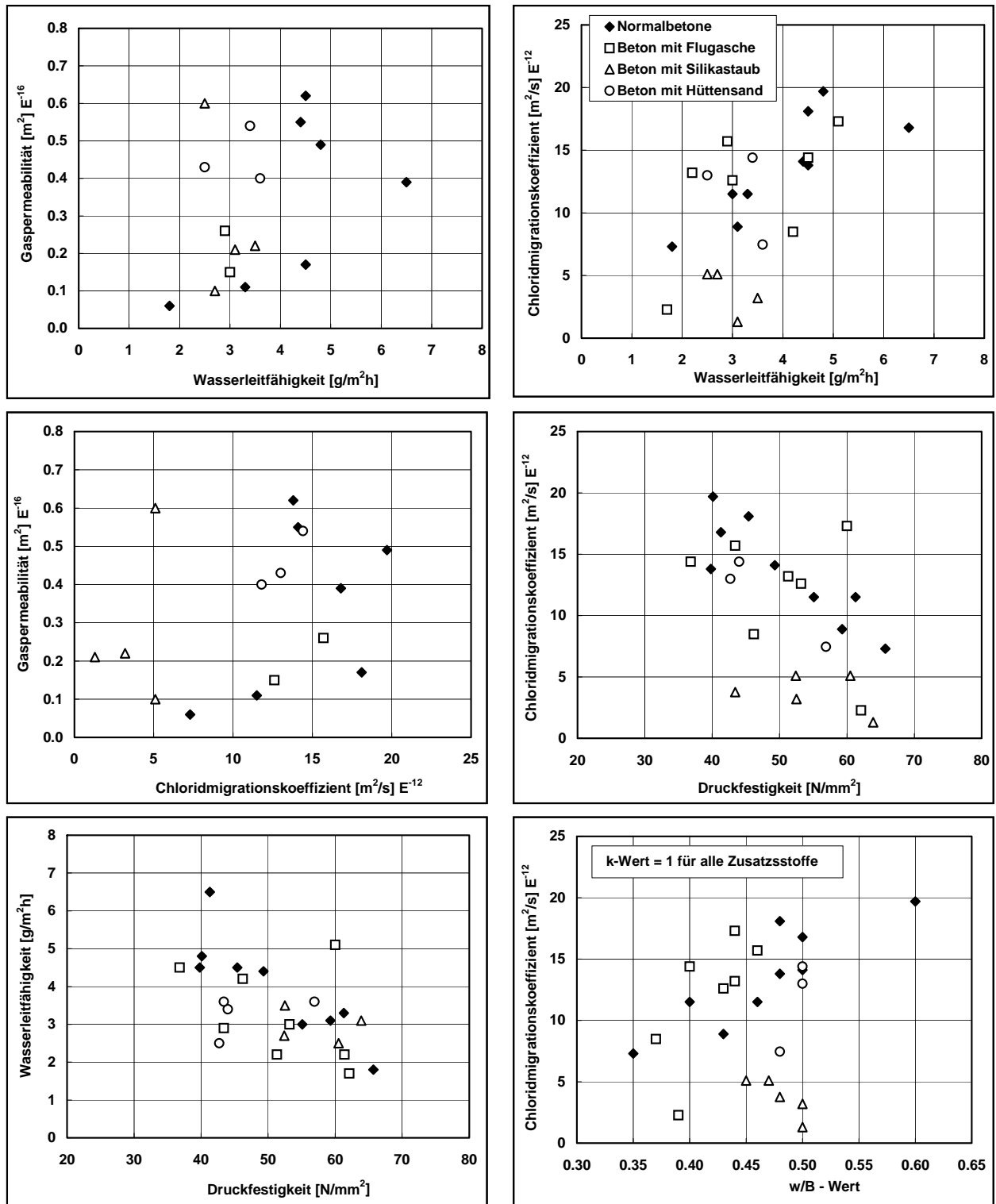


Bild 6.8: Zusammenhang zwischen den verschiedenen Kenngrößen der Labormischungen und der Betone aus Drittprojekten im Alter von 28 Tagen.

Bei gleicher Druckfestigkeit sind der Migrationskoeffizient und die Wasserleitfähigkeit bei den Mischungen mit Betonzusatzstoffen in den meisten Fällen kleiner als bei den Normalbetonen. Eine Verminderung des w/B -Wertes bzw. des w/z_{eq} -Wertes und/oder eine Erhöhung des Anteils an Betonzusatzstoffen wirken sich günstig auf den Chloridmigrationskoeffizienten und die Wasserleitfähigkeit aus.

Die Korrelation zwischen Migrationskoeffizient und Wasserleitfähigkeit ist deutlich besser als jene zwischen der Gaspermeabilität und der Wasserleitfähigkeit, wo ein Zusammenhang nur schwer erkennbar ist. Ähnliches gilt für die Korrelation zwischen Migrationskoeffizient und Gaspermeabilität. Die silikastaubhaltigen Betone heben sich durch deutlich niedrigere Chloridmigrationskoeffizienten von den übrigen Betonen ab.

b) Korrelationen der 360-Tage-Werte

Bei der Betrachtung der 360-Tage-Werte wurden neben den Daten der Labormischungen und der Drittprojekte auch die Daten der Bauwerksbetone mit einbezogen (**Bilder 6.9 bis 6.12**).

Gesamthalt zeigen sich erwartungsgemäss die gleichen Zusammenhänge zwischen den einzelnen Kenngrössen wie im Alter von 28 Tagen.

Zwischen den Ergebnissen der Druckfestigkeit, des Chloridmigrationskoeffizienten und der Wasserleitfähigkeit besteht eine mehr oder weniger ausgeprägte Beziehung.

Die Güte der Korrelation zwischen einzelnen Parametern ist unter Einbezug aller Betone schlecht bis mittelmässig (**Anhang 2**). Einzelbetrachtungen z.B. nur der Labormischungen oder unter Ausschluss von stark abweichenden Bauwerksproben oder der SCC-Betone, ergeben zwar im Einzelfall etwas bessere Korrelationen, ändern aber das Gesamtbild nicht.

Vergleicht man die 28-Tage-Werte mit den 360-Tage-Werten so ergibt sich für die **Druckfestigkeit** ein Korrelationskoeffizient von 0.93, für die **Wasserleitfähigkeit** von 0.59 und für den **Chloridmigrationskoeffizienten** von 0.74. Dies verdeutlicht die im **Kapitel 4.1.1** schon festgestellte, gegenüber der Druckfestigkeit unterschiedliche zeitliche Entwicklung des Chloridmigrationskoeffizienten und der Wasserleitfähigkeit der verschiedenen Betonsorten.

Wie schon bei den 28-Tage-Werten festgestellt wurde, ist zwischen der **Gaspermeabilität** und den anderen Kenngrössen kein enger Bezug vorhanden.

Die Messung der Wasserleitfähigkeit und des Chloridmigrationskoeffizienten im Alter von 360 Tagen erlaubt, zwischen den verschiedenen Betonsorten (mit und ohne Zusatzstoffe) ähnlich gut zu differenzieren wie im Alter von 28 Tagen.

Die **Leitfähigkeit** nach dem Streicher-Test verhält sich ähnlich wie der Chloridmigrationskoeffizient. Die Werte streuen aber, mit Ausnahme von ein paar Bauwerksbetonen, weniger und eine Gruppierung für verschiedene Betonsorten ist kaum zu erkennen. Die Betone mit Silikastaub weisen bei einem w/z_{eq} von 0.5 keine signifikant tieferen Porenkennwerte als die Normalbetone auf. Die gemessenen Leitfähigkeiten unterscheiden sich deshalb weniger von jenen der Normalbetone, wie dies beim Chloridmigrationskoeffizienten der Fall ist. Die Leitfähigkeit widerspiegelt aber innerhalb der Betone mit Silikastaub den verdichtenden Effekt bei zunehmendem Silikastaubgehalt oder Unterschiede im w/z_{eq} .

Zwischen der Leitfähigkeit nach dem Streicher-Test und des Chloridmigrationskoeffizienten besteht nur eine mässige Korrelation.

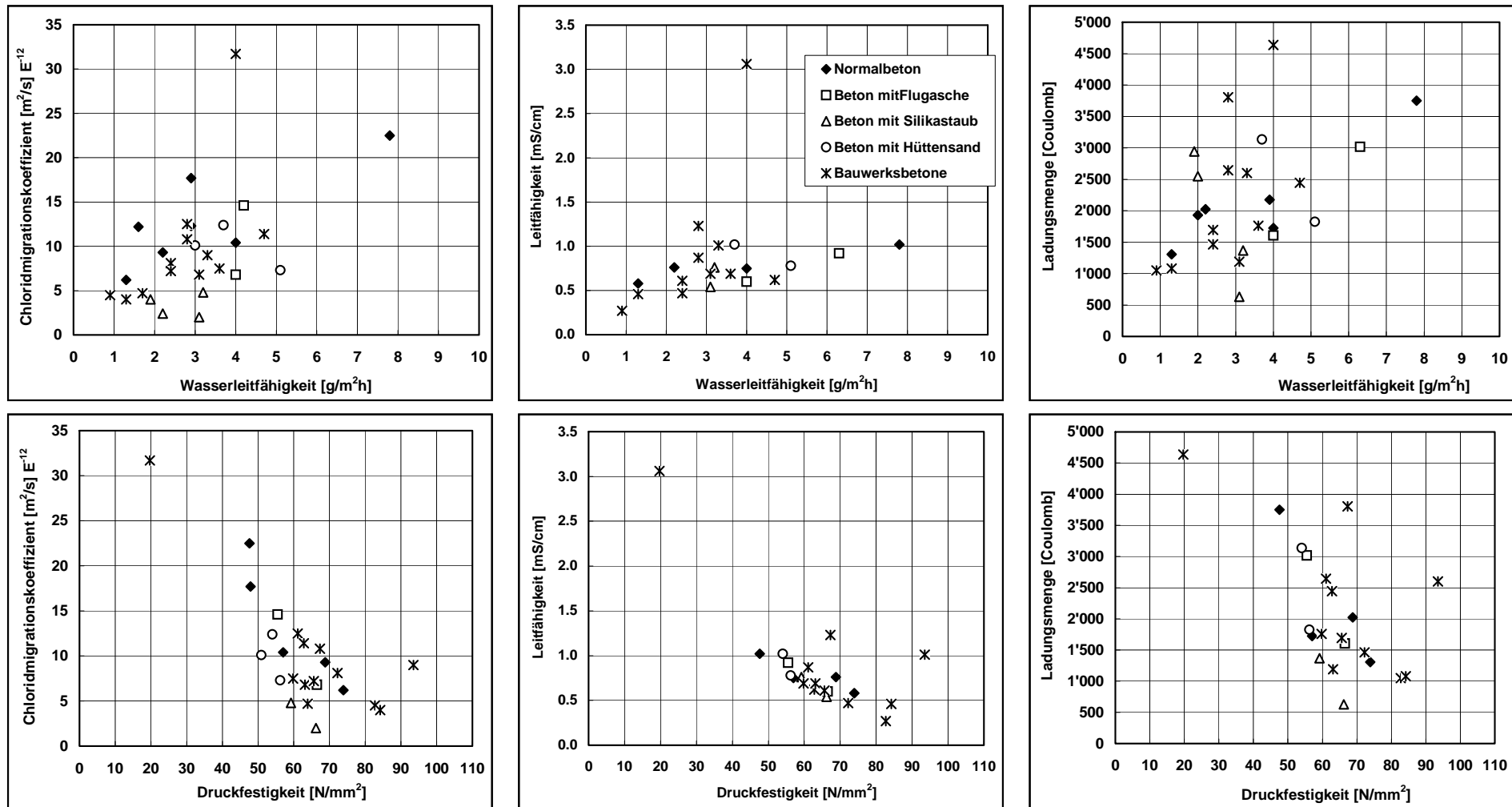


Bild 6.9: Beziehung zwischen den verschiedenen Betoneigenschaften der Labormischungen, der Mischungen aus Drittprojekten und der Bauwerksbetone im Alter von 360 Tagen und mehr.

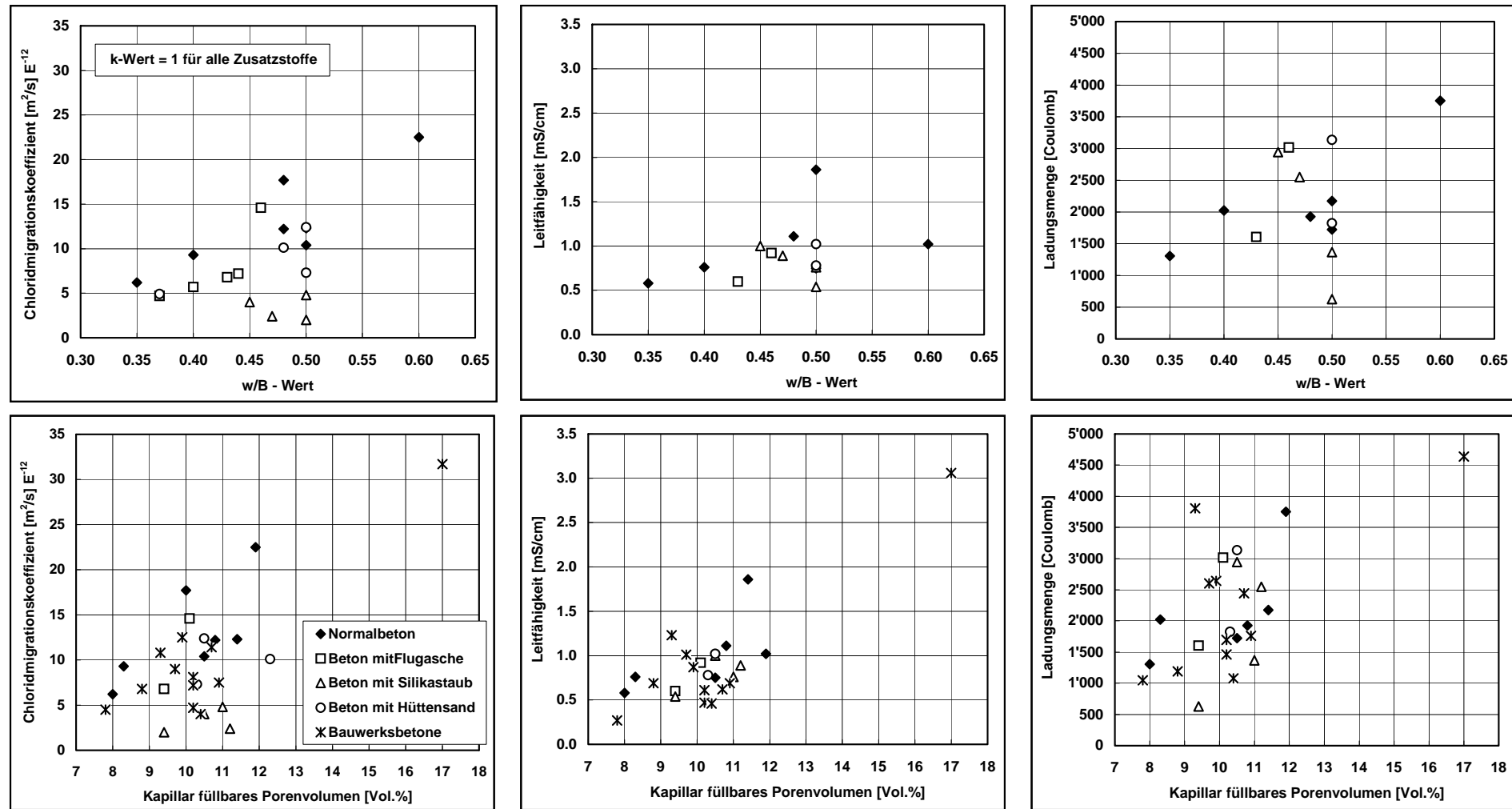


Bild 6.10: Beziehung zwischen den verschiedenen Betoneigenschaften der Labormischungen, der Mischungen aus Drittprojekten und der Bauwerksbetone im Alter von 360 Tagen und mehr.

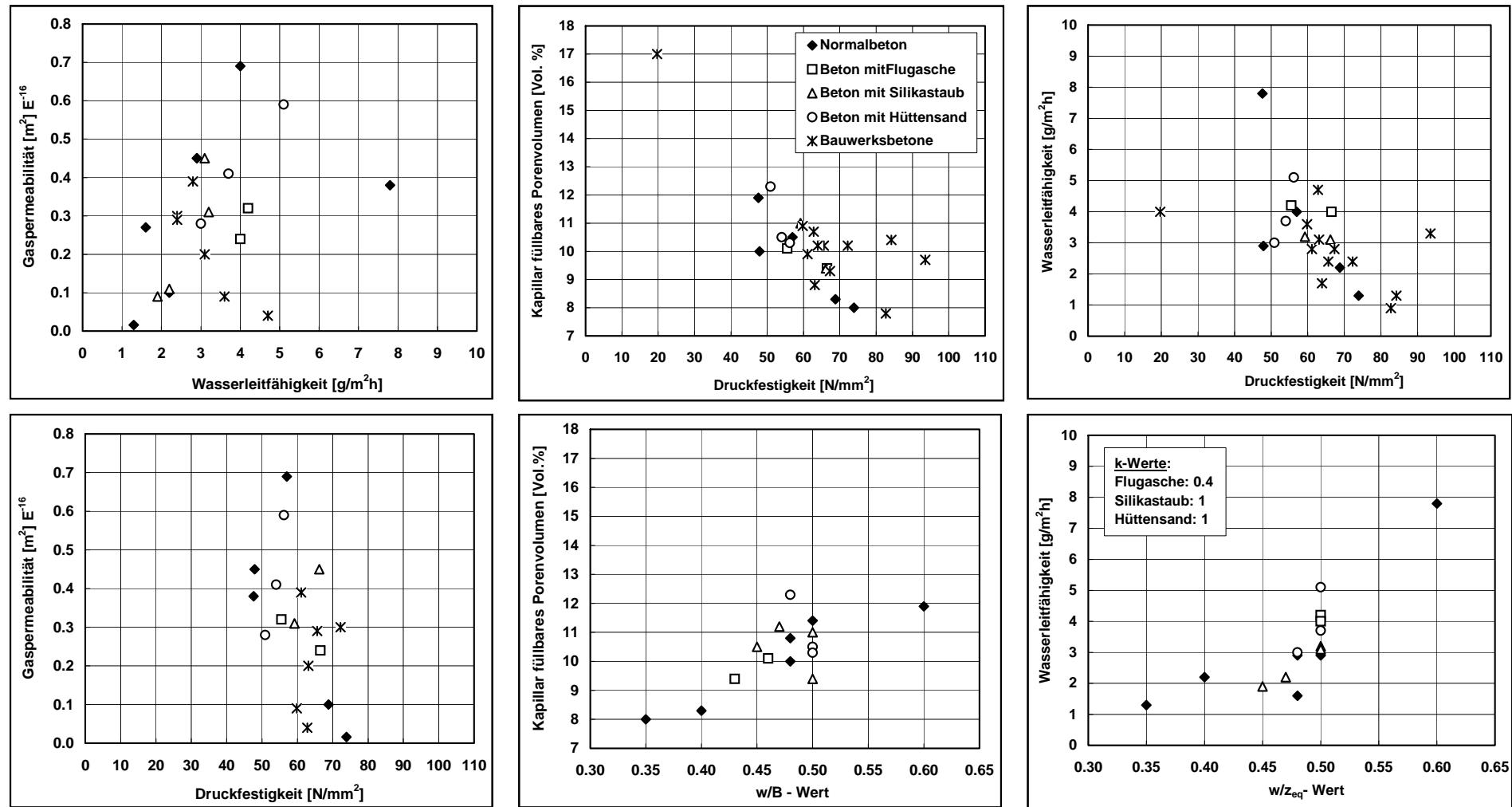


Bild 6.12: Beziehung zwischen den verschiedenen Betoneigenschaften der Labormischungen, der Mischungen aus Drittprojekten und der Bauwerksbetone im Alter von 360 Tagen und mehr.

6.2 Bauwerksbetone

Wie schon im **Kapitel 5.3** erwähnt war in den meisten Fällen nichts oder nur sehr wenig bekannt über die Zusammensetzung und Eigenschaften der Bauwerksbetone. Aufgrund des Alters (20 - 40 Jahre) ist anzunehmen, dass es sich um Betone mit durchschnittlicher Zusammensetzung handelt (w/z ca. 0.5 bis 0.6, Zementgehalt um 300kg/m³, keine Zusatzstoffe).

Die **Tabelle 6.3** enthält die gemessenen Eigenschaften der untersuchten Bauwerksbetone.

Die Bauwerksbetone weisen **Druckfestigkeiten** zwischen 60 und 95N/mm² auf. Nur der Nischenbeton der Schluochtbrücke mit einem feineren Zuschlagsgrösstkorn von 16mm und einer Kapillarporosität von 17Vol.% setzt sich mit knapp 20N/mm² Druckfestigkeit und auch bzgl. der anderen Baustoffkennwerte deutlich von den übrigen untersuchten Betonen ab. Die zugehörigen Werte werden deshalb nicht in allen Diagrammen berücksichtigt.

Die Kennwerte der Bauwerksbetone sind i.a. besser als jene der Laborbetone ohne Zusatzstoffe (Einfluss des Alters) und liegen im Bereich der Betone mit Flugasche (**Tabelle 6.4**). Sie streuen relativ stark, bedingt durch grössere Unterschiede bei der Kapillarporosität (Werte zwischen 7.8Vol.% und 10.9Vol.%).

Betonsorten	Chloridmigrationskoeffizient, [m ² /s] E ⁻¹²	Leitfähigkeit, [mS/cm]	Wasserleitfähigkeit, [g/m ² h]	Ladungsmenge, [Coulomb]
Bauwerksbetone ¹⁾	4.0 – 12.5 Mittelwert: 8.2	0.27 - 1.23 Mittelwert: 0.69	0.9 – 4.7 Mittelwert: 2.75	1'049 – 3'806 Mittelwert: 1'973
Betone ohne Zusatzstoffe	6.2 - 22.5 Mittelwert: 12.9	0.58 - 1.11 Mittelwert: 1.01	1.3 – 7.8 Mittelwert: 3.4	1'307 – 3'752 Mittelwert: 2'51
Betone mit Flugasche	4.7 – 14.6 Mittelwert: 7.8	0.60 - 0.92 Mittelwert: 0.76	4.0 – 4.2 Mittelwert: 4.1	1'606 – 3'017 Mittelwert: 2'311
Betone mit Silikastaub	2.0 - 4.8 Mittelwert: 3.3	0.54 - 1.0 Mittelwert: 0.79	1.9 – 3.2 Mittelwert: 2.6	628 – 2'943 Mittelwert: 2'311
Betone mit Hüttensand	7.3 - 12.4 Mittelwert: 9.9	0.78 - 1.02 Mittelwert: 0.9	3.0 – 5.1 Mittelwert: 3.9	1'825 – 3'136 Mittelwert: 2'480

1) Die Werte des Nischenbetons der Schluochtbrücke wurden nicht berücksichtigt.

Tabelle 6.: Streubereiche der verschiedenen Kennwerte (Mittelwerte) der Bauwerksbetone (Alter: 20 – 40 Jahre) im Vergleich zu den Laborbetonen und den Betonen von Drittprojekten (Alter: 360 Tage).

Bauwerk	Bauteil	Gaspermeabilität, [m ²] E ⁻¹⁶	Chloridmigrationskoeffizient, [m ² /s] E ⁻¹²	Wasserleitfähigkeit, [g/m ² h]	Leitfähigkeit, [mS/cm]	Ladungsmenge, [Coulomb]	Kapillarporosität, [Vol. %]	Bohrkern- druckfestigkeit, [N/mm ²]
Kirchberg	Stütze	2.23	4.50	0.9	0.27	1'049	7.8	82.7
Schindellegi	Kastenplatte	Keine Werte, da Beton chloridhaltig						
Obkirchen – Viadukte, Hergiswil	Fahrbahnplatte	4.13	10.80	2.8	1.23	3'806	9.3	67.3
	Kastenplatte Untersicht	0.39	12.50	2.8	0.87	2'643	9.9	61.1
Runca Sut, Waldhaus - Staderas	Fahrbahnplatte	0.09	7.50	3.6	0.69	1'760	10.9	59.8
Schluochtbrücke, Eggenberg, VS	Nischenbeton, Fahrbahnplatte	1.43	31.70	4	3.06	4'637	17	19.7
Arsenalüberführung, Kriens	Stützen	0.30	8.10	2.4	0.47	1'463	10.2	72.2
	Fahrbahnplatte, Oberseite		4.00	1.3	0.46	1'080	10.4	84.2
Überführung Zuchwil	Stützen	0.04	11.40	4.7	0.62	2'443	10.7	62.8
Hardbrücke, Neuenhof	Stützen	0.20	6.80	3.1	0.69	1'190	8.8	63.1
Europabrücke	Längsträger		9.00	3.3	1.01	2'601	9.7	93.5
Göschenen	Fahrbahnplatte Brücke über Vortunnel	0.29	7.20	2.4	0.61	1'695	10.2	65.6
Galerie Harzbüchel	Leitmauer	n.b.	4.70	1.7	n.b.	n.b.	10.2	63.9

Tabelle 6.4: Resultate der Messungen an Bauwerksbetonen.

6.3 Aufsaugversuche mit chloridhaltigem Wasser

6.3.1 Aufsaugversuch und Wasserleitfähigkeit im Vergleich

Die Aufsaugversuche mit einer 3% NaCl-Lösung wurden mit den Bauwerksproben und den 360 Tage alten Proben der Labormischungen durchgeführt (Beschreibung des Versuchs: siehe **Kapitel 3.3**). Dabei wurden nach 24 Stunden durch Wägen die aufgenommene Wassermenge der Proben und visuell die Steighöhe bestimmt.

Aus **Bild 6.13** geht hervor, dass beim Aufsaugversuch die Steighöhe mit zunehmendem kapillar füllbaren Porenvolumen (ohne Luft- und Verdichtungsporen) tendenziell abnimmt. Dies könnte damit zusammenhängen, dass sich mit dem kapillar füllbaren Porenvolumen die Porenradialverteilung und damit auch die Saugkraft ändern. Bei der Bestimmung der Wasserleitfähigkeit, wo die Steighöhe durch Wägen ermittelt bzw. aus den gemessenen Massen berechnet wird, ergibt sich im Vergleich zum Aufsaugversuch tendenziell eher der umgekehrte Zusammenhang (**Bild 6.14**). Aus diesem Bild ist zudem ersichtlich, dass die Steighöhe und die aufgenommene Wassermenge beim Aufsaugversuch in den meisten Fällen wesentlich grösser sind als bei der Wasserleitfähigkeitsprüfung. Als mögliche Ursachen für diese systematischen Unterschiede kommen in Frage:

- Einfluss der Chloridionen in der Aufsauglösung auf das Aufsaugverhalten (für den Aufsaugversuch wird chloridhaltiges Wasser, bei der Bestimmung der Wasserleitfähigkeit chloridfreies Wasser verwendet).
- unterschiedlicher Wassergehalt der Proben wegen der nicht ganz identischen Vortrocknung
- Länge der Proben (Wasserleitfähigkeit: 50mm, Aufsaugversuch: 100mm)
- Abdeckung der Mantelfläche der Bohrkernbeim Aufsaugversuch

Gemäss verschiedenen Untersuchungen [Tinic 1981, Flückiger 1993, Leutenegger 2002] haben die Chloridionen keinen oder nur einen geringen Einfluss auf das Aufsaugverhalten bzw. auf die aufgenommene Wassermenge. Dies wird auch durch eigene Untersuchungen bestätigt. Mit einigen Proben wurde ein Aufsaugversuch ohne Chlorid gemacht. Wie aus **Bild 6.14** ersichtlich ist, zeigen diese Proben (5, 27 und 46) kein anderes Verhalten.

Ein unterschiedlicher Wassergehalt der Proben als Ursache für die unterschiedlichen Resultate bei den beiden Versuchen fällt ausser Betracht, da sich die Trockenrohdichten bei Versuchsbeginn kaum unterschieden haben.

Zum Einfluss der Probenlänge auf das Aufsaugverhalten gibt es kaum systematische Untersuchungen. Gemäss den wenigen Versuchen von [Tinic 1981] ist bei einem Verhältnis von Höhe zu Durchmesser der Proben von 2:1 die Wasseraufnahme etwas höher als bei einem Verhältnis von 1:1.

Viel wahrscheinlicher ist, dass die Ursache für die erheblichen Unterschiede auf den Einfluss der Abdeckung der Mantelfläche beim Aufsaugversuch zurückzuführen ist. Die Mantelfläche ist bei der Wasserleitfähigkeitsprüfung frei und ermöglicht die Wasseraufnahme aus der feuchten Umgebungsluft auch über die Mantelflächen. Damit können die feinen Poren des trockenen Probekörpers sehr rasch Wasser aus der Luft aufnehmen und so die Saugfähigkeit der Randzone des Probekörpers reduzieren. Die wenigen vorhandenen Untersuchungen dazu sind widersprüchlich. Während [Kaufmann 1992] feststellte, dass die Proben erhebliche Mengen an Wasser durch die Luft aufnehmen können, wurde in anderen Untersuchungen kaum ein Einfluss gefunden [Tinic 1981, Volkwein 1991].

Es ist zu erwarten, dass dieser Einfluss vom Verhältnis Höhe zu Durchmesser (unterschiedliches Oberflächen/Volumen-Verhältnis) und vom Feuchtigkeitsgehalt bzw. vom Trocknungszu-

stand der Proben abhängig ist. Dies ist sicherlich mitverantwortlich für die widersprüchlichen Ergebnisse.

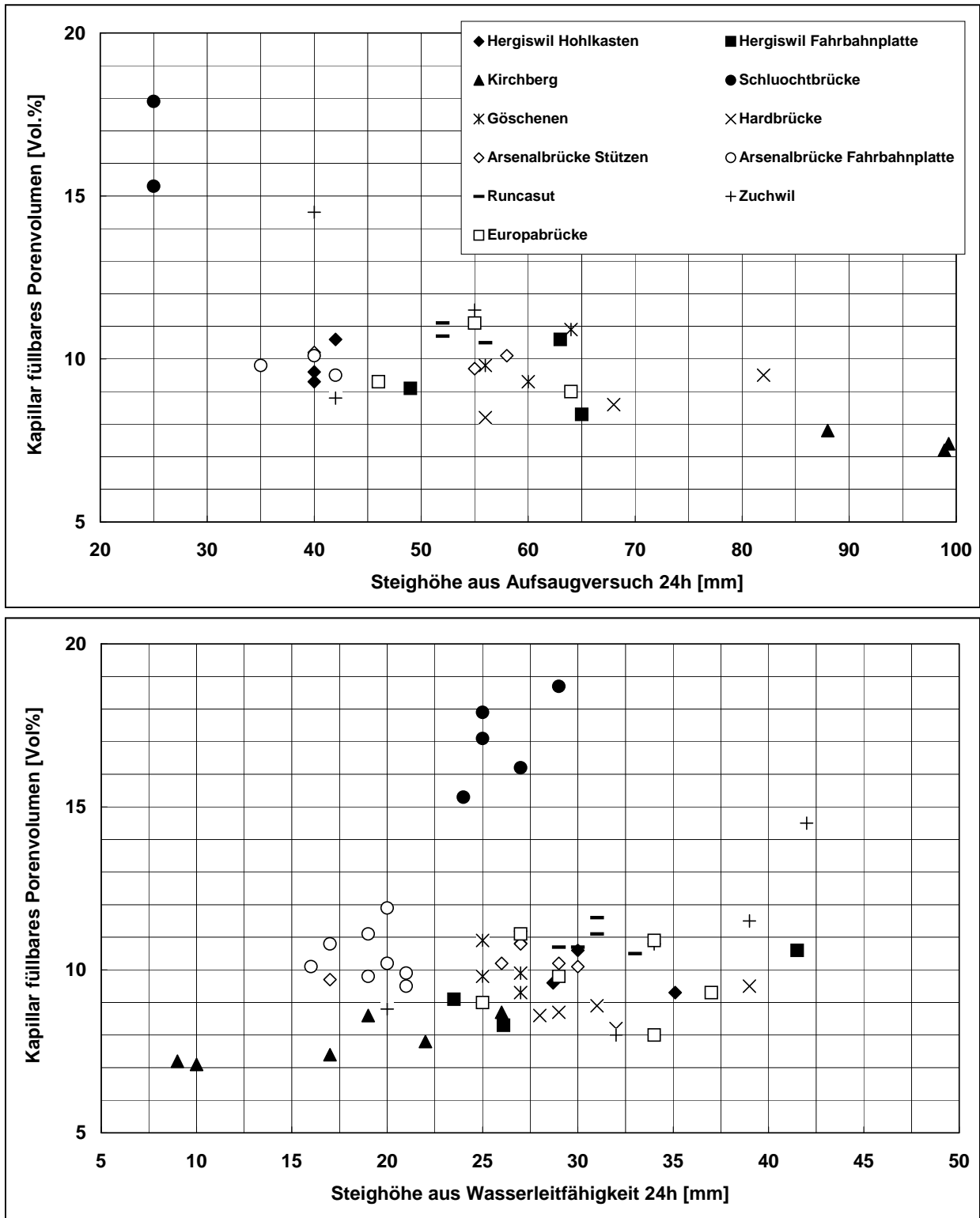


Bild 6.13: Einfluss des kapillar füllbaren Porenvolumens (Porenvolumen ohne Luft- und Verdichtungsporen) auf die Steighöhe nach 24 Stunden (Bauwerksbetone).

oben: Aufsaugversuch

unten: Wasserleitfähigkeitsprüfung

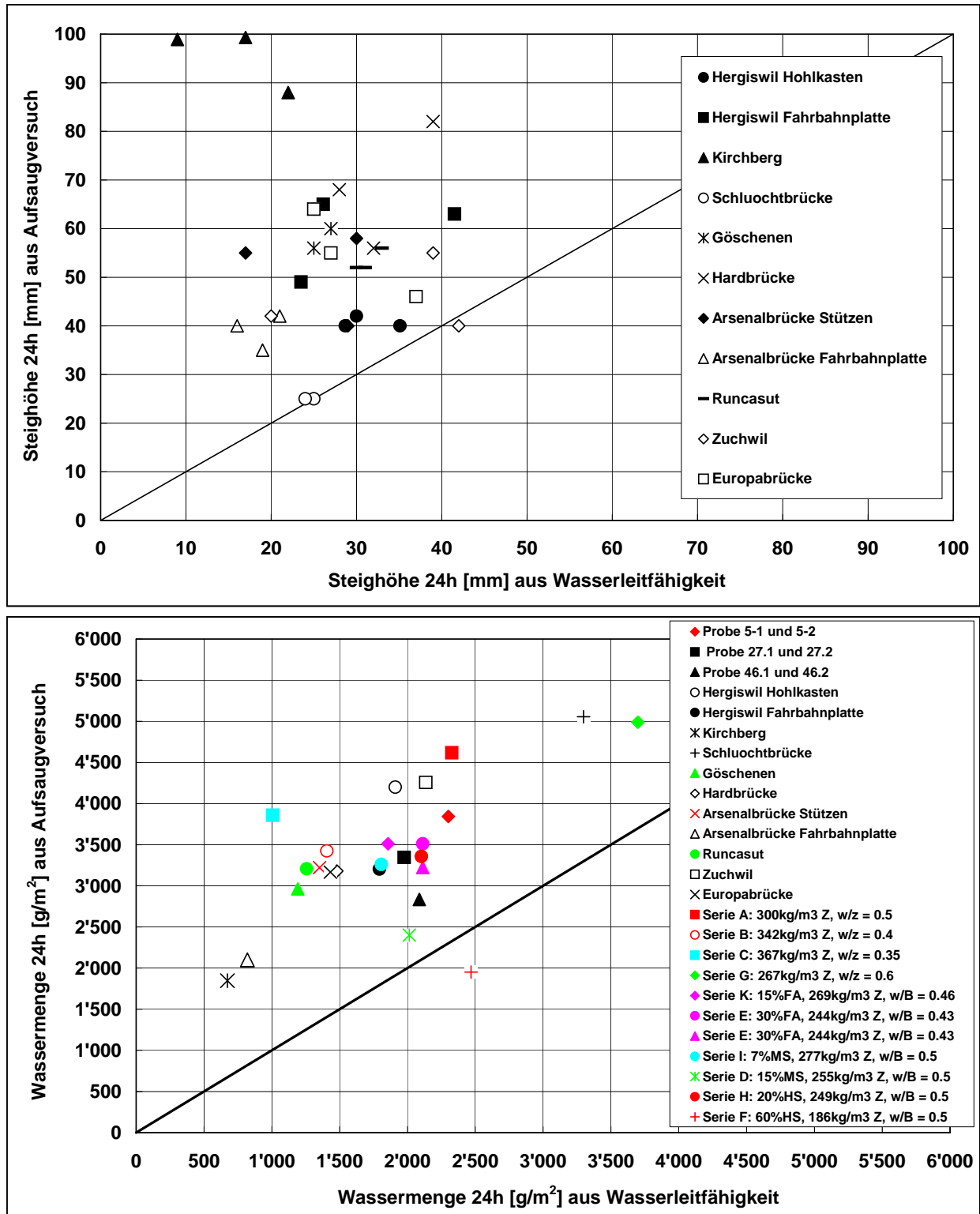


Bild 6.14: Steighöhe und aufgenommene Wassermenge nach 24 Stunden beim Aufsaugversuch und bei der Wasserleitfähigkeitsprüfung. Bei den Proben 5, 27 und 46 wurde der Aufsaugversuch mit chloridfreiem Wasser durchgeführt.

oben: Steighöhe

unten: Wassermenge

6.3.2 Chloridprofile

Bild 6.15 zeigt die Chloridprofile der Betone ohne und mit Betonzusatzstoffe. Die maximale Steighöhe von 100mm (Länge des Probekörpers) wurde nach sehr unterschiedlichen Zeiten erreicht (1 bis 7 Tage). Bei den Mischungen ohne Zusatzstoffe wurden die Chloridprofile der einzelnen Bohrkerne, bei den Mischungen mit Zusatzstoffen die mittleren Chloridprofile dargestellt. Wie die Resultate der Mischungen ohne Zusatzstoffe zeigen, sind die Streuungen relativ gering.

Die Aufsaugversuche mit der Salzlösung ergaben für alle im Labor hergestellten Betonsorten wie auch für die Bauwerksbetone ähnliche Profile mit einer deutlichen Salzanreicherung in den ersten 10mm, gefolgt von einer raschen Abnahme des Chloridgehaltes, der danach bis in große Tiefen konstant blieb.

Der Chloridgehalt zwischen 0 und 10mm nimmt bei den Mischungen ohne Zusatzstoffe mit zunehmendem w/z-Wert zu. Bei den Mischungen mit Zusatzstoffen erreichen die Mischungen mit 30% Flugasche und 15% Silikastaub die niedrigsten Chloridgehalte in den ersten 10 mm. Die Werte der Betone mit Betonzusatzstoffen entsprechen jenen der Normalbetone mit einem w/z-Wert von 0.5 und tiefer.

Die Chloridprofile können in zwei Fällen verfälscht werden:

- Um zu vermeiden, dass Wasser von der oberen Stirnfläche der Bohrkerne verdunsten kann, muss der Versuch abgebrochen werden, sobald die Wasserfront die obere Stirnseite erreicht bzw. die volle Wassersättigung der Probe erreicht ist. Wird dieser Zeitpunkt verpasst, kann dies zu einer Chloridanreicherung (Aufkonzentration) im Bereich der oberen Stirnseite führen. Trotz Vorsichtsmassnahmen gelang es nicht immer, den Versuch rechtzeitig abzubrechen. Die Zeit bis zur vollen Wassersättigung kann ohne Erfahrungswerte nicht ohne weiteres abgeschätzt werden.
- Bei sehr porösen Betonen kann die übliche Versuchszeit (maximal 240 Stunden) zu kurz sein, um eine volle Wassersättigung der Probe zu erreichen.

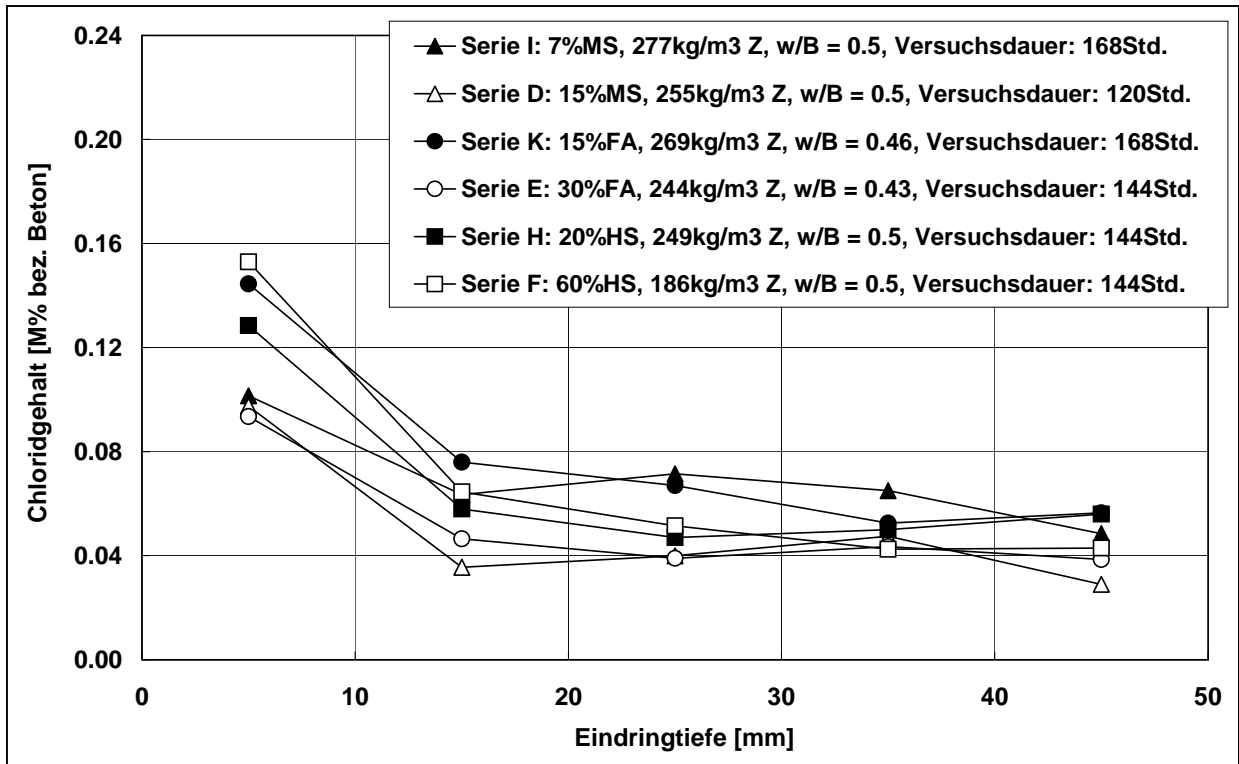
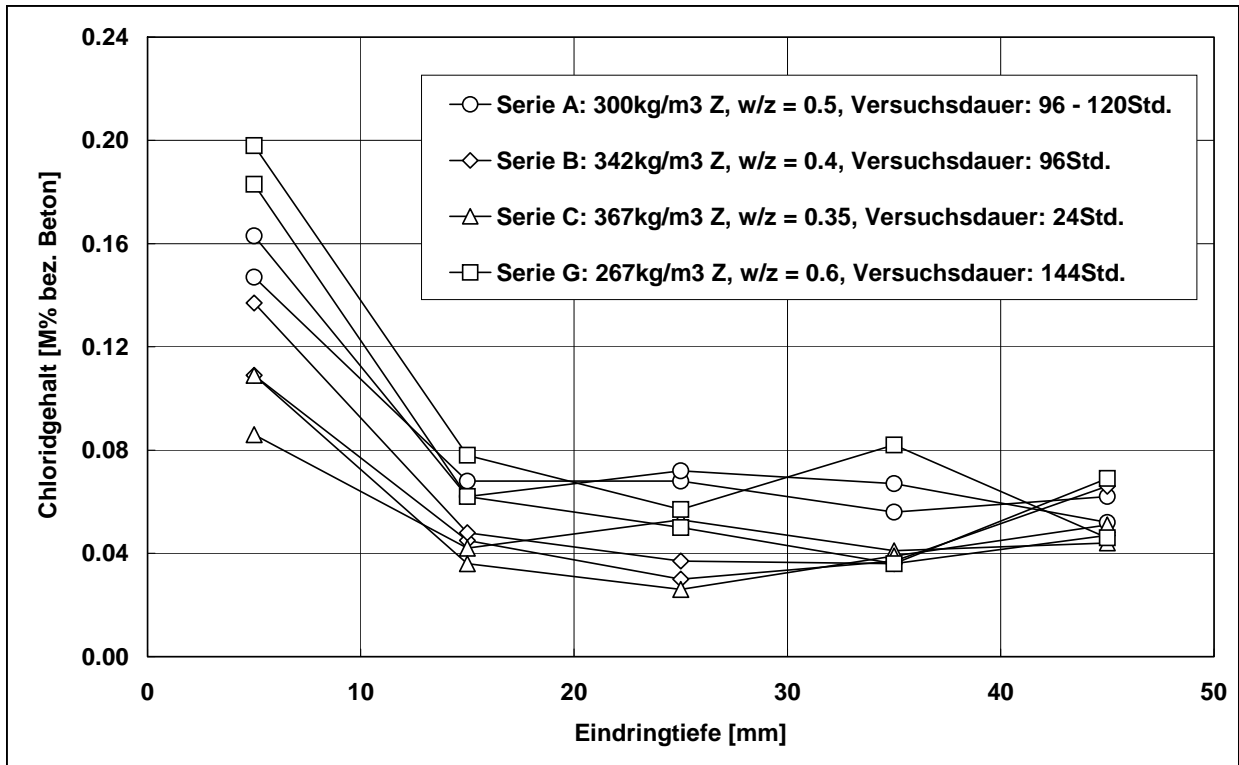


Bild 6.14: Chloridprofile beim Aufsaugversuch (Labormischungen).

oben: Mischungen ohne Zusatzstoffe unten: Mischungen mit Zusatzstoffen.

6.3.3 Auswertung

Das kapillar füllbare Porenvolumen, das mit der Wasserleitfähigkeitsprüfung bestimmt wurde, variiert je nach Betonmischung. Entsprechend variiert auch die Menge der aufgenommenen Salzlösung und somit die Menge der aufgenommenen Chloridionen. Um die Chloridprofile zu vergleichen, wurde für jede Probe aus der aufgenommenen Wassermenge und dem kapillar füllbaren Porenvolumen die so genannte SOLL-Konzentration berechnet, d.h. jene Konzentration, die sich bei gleichmässiger Porosität und Verteilung der Chloride im Prüfkörper ergeben würde.

Die Differenz zwischen IST- und berechneter SOLL-Konzentration ist in **Bild 6.15 und 6.16** dargestellt. Daraus geht hervor, dass bei allen Proben in den ersten 10mm eine Anreicherung von 0.04 bis 0.12M.% bez. Beton über der SOLL-Konzentration auftritt. In den tieferen Bereichen liegen die Chloridgehalte meist leicht unter der SOLL-Konzentration mit negativen Abweichungen von <0.02M.% bez. Beton. Die Anreicherung in den ersten Millimetern ist auf den Filtereffekt und die Chloridbindung des Betons zurückzuführen und führt zu einer Abreicherung in den tieferen Schichten.

Der Vergleich der Resultate der Laborbetone ohne Zusatzstoffe (**Bilder 6.15**) zeigt, dass die Chloridkonzentration an der Betonoberfläche mit zunehmendem Zementgehalt abnimmt. Da die Betone ein konstantes Zementleimvolumen aufweisen, ist anzunehmen, dass die Chloridkonzentration an der Oberfläche mit dem w/z-Wert verknüpft ist und um so grösser ist, je grösser der w/z-Wert bzw. das Porenvolumen ist.

Bei den Laborbetonen mit Zusatzstoffen ist kein Zusammenhang mit dem Zementgehalt vorhanden. Die höchsten Chloridkonzentrationen an der Oberfläche wurden bei den Mischungen mit Hüttensand und 15% Flugasche gefunden. Niedrigere Chloridanreicherungen stellen sich bei den Mischungen mit Silikastaub und 30% Flugasche ein. Möglicherweise ist dies auf die unterschiedlich starke Chloridbindung zurückzuführen.

Bei den Bauwerksbetonen nehmen die Chloridgehalte nach 10mm Eindringtiefe ebenfalls rasch ab und bleiben mehr oder weniger konstant, meist leicht unter der SOLL-Konzentration über die ganze Steighöhe (maximale Steighöhe = Bohrkernlänge).

Die Resultate der Bauwerksbetone der Überführung Zuchwil und der Schluochtbrücke fallen ausser Betracht. Bei diesen Proben wurden teilweise Chloridkonzentrationen unter der Sollkonzentration festgestellt, da sie wegen des grossen kapillar füllbaren Porenvolumens teilweise nicht vollständig mit Wasser gesättigt waren (zu kurze Versuchszeit).

Ein ausgeprägter Retardierungseffekt, der die Chloridionen deutlich hinter der Wasserfront zurücklassen würde, konnte an Hand der Chloridprofile nicht festgestellt werden (siehe z.B. das Profil des Betons "Kirchberg" in **Bild 6.16**). Dabei ist zu beachten, dass die Wasserfront visuell an der Mantelfläche ermittelt wurde. Diese Art der Bestimmung der Wasserfront ist weniger empfindlich als z.B. mit elektrischen oder anderen Methoden [Lunk 1997]. Der Nischenbeton der Schluochtbrücke hebt sich auch hier von den übrigen Bauwerksbetonen ab. Nach 10 Tagen Versuchsdauer erreichte er nur etwa die Hälfte der Steighöhe der anderen Betone und kaum die SOLL-Konzentration an der Betonoberfläche.

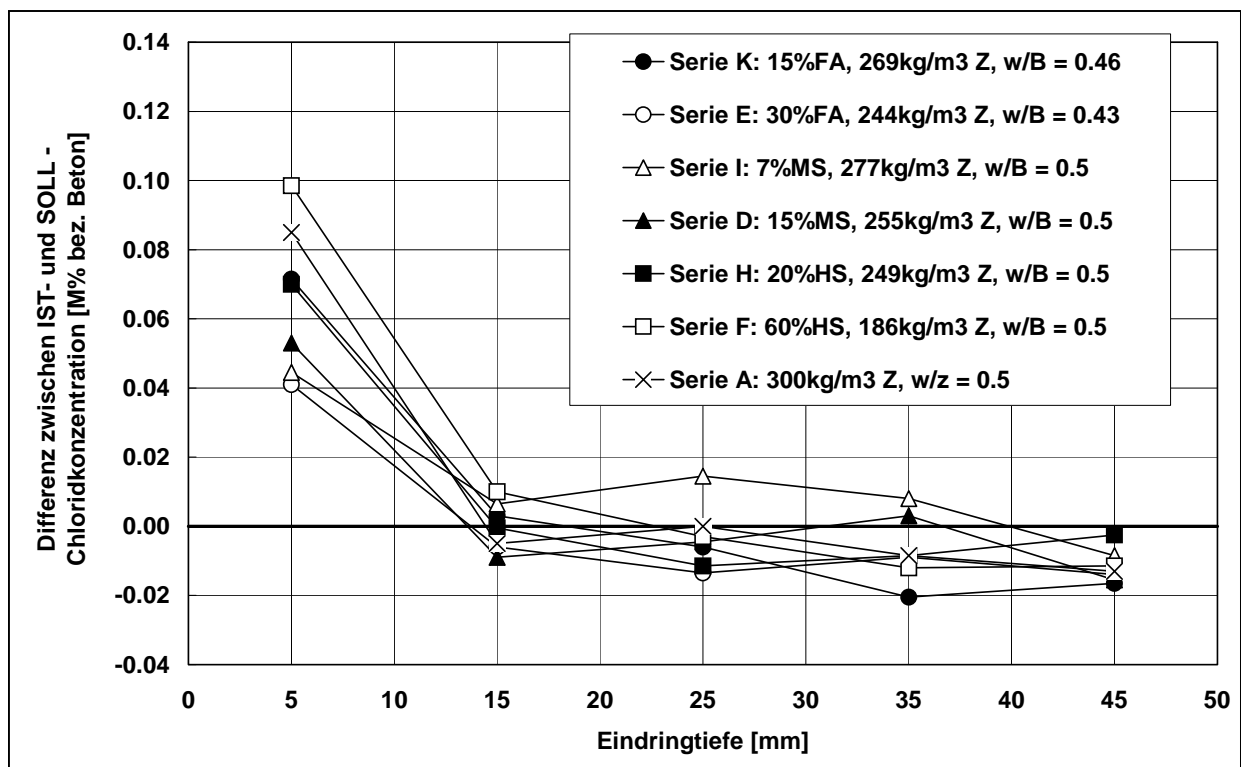
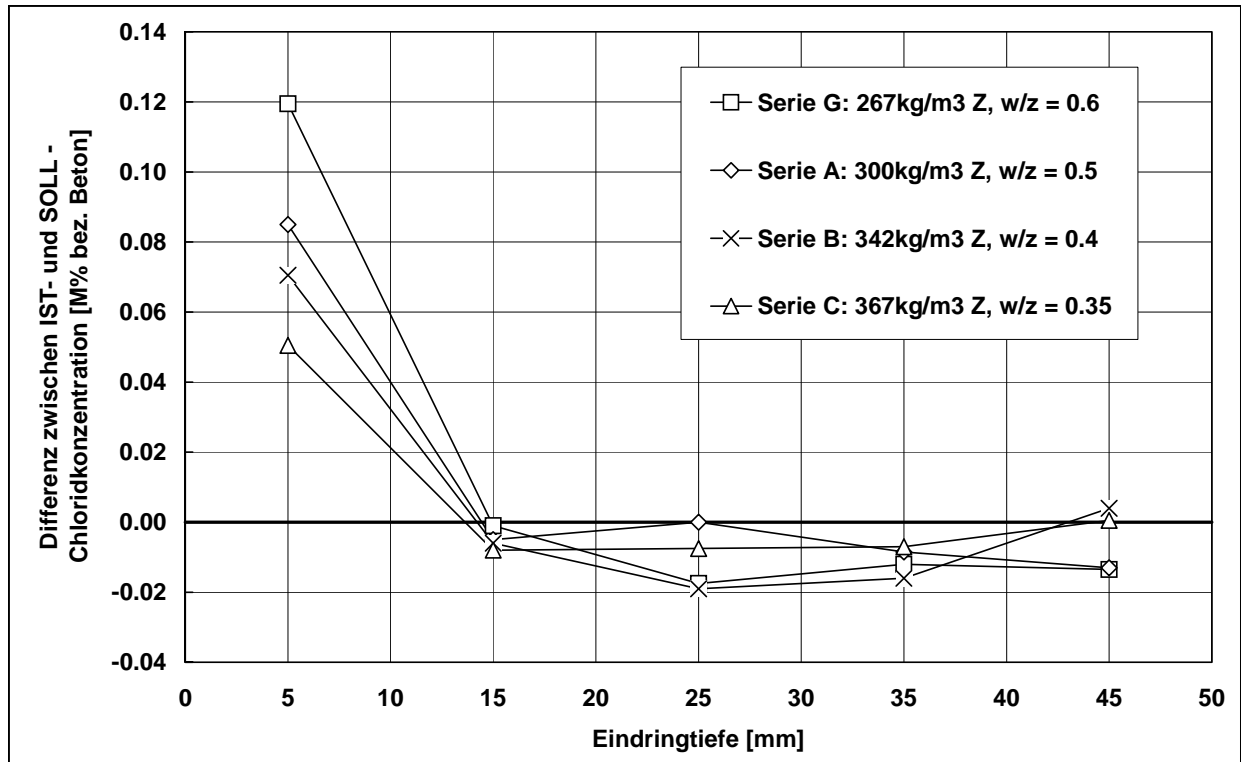


Bild 6.15: Differenz zwischen der IST- und der berechneten SOLL-Konzentration beim Aufsaugversuch für die Laborbetone. Die SOLL-Konzentration wurde aus dem kapillarfüllbaren Porenvolumen und der Menge der aufgenommenen Salzlösung berechnet.

oben: Laborbetone ohne Zusatzstoffe

unten: Laborbetone mit Zusatzstoffen

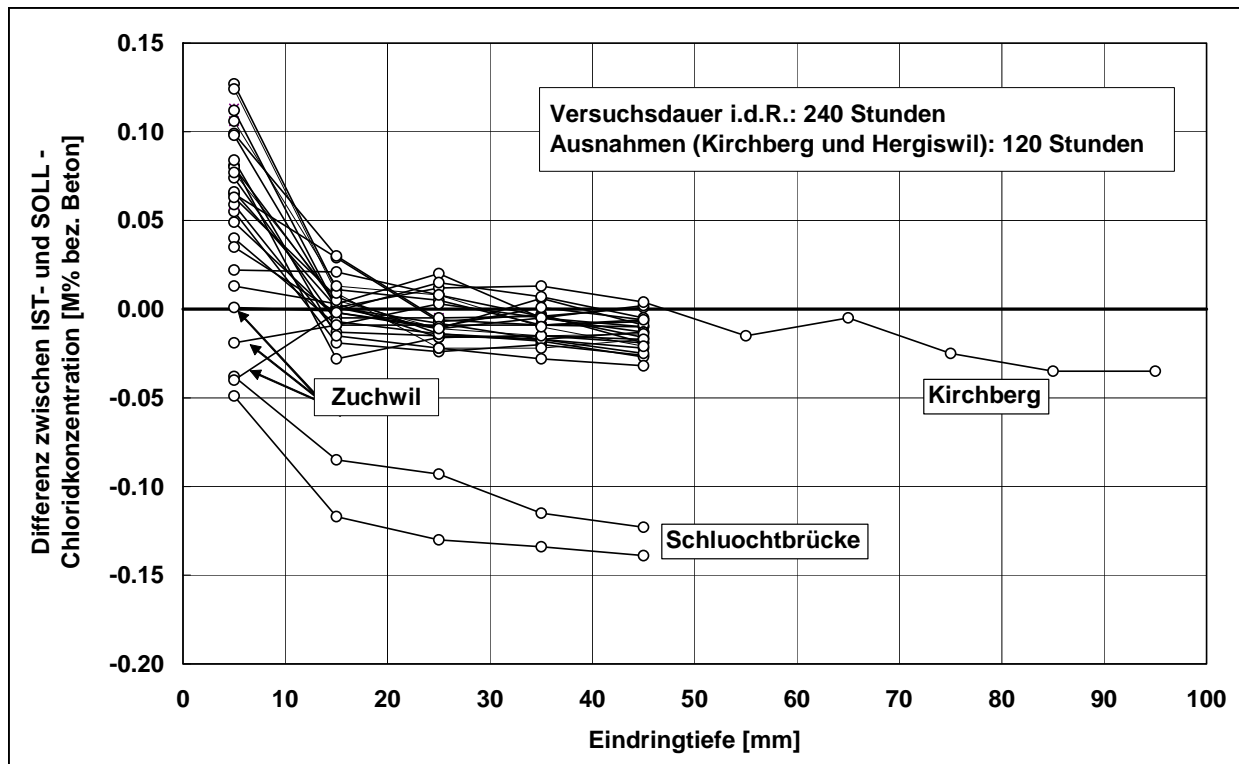


Bild 6.16: Differenz zwischen der IST- und der berechneten SOLL-Konzentration beim Aufsaugversuch für die Bauwerksbetone. Die SOLL-Konzentration wurde aus dem kapillar füllbaren Porenvolumen und der Menge der aufgenommenen Salzlösung berechnet.

Nicht auszuschliessen ist ein „Randbetoneffekt“, d.h. dass erhöhte Zementleimgehalte und entsprechend erhöhte Porenvolumen an der Betonoberfläche zu erhöhten Chloridgehalten in 0 bis 10mm führen und somit den Verlauf der Chloridprofile prägen.

Zwischen dem Chloridgehalt in 0 bis 10mm Tiefe und der Wasserleitfähigkeit besteht erwartungsgemäss sowohl bei den Bauwerks- wie bei den Laborbetonen ein gewisser Zusammenhang. Mit steigender Wasserleitfähigkeit (höhere Kapillarporosität, stärkeres kapillares Saugen) nimmt die Chloridkonzentration an der Betonoberfläche zu (**Bild 6.17**). Ähnliche Zusammenhänge wurden auch zwischen dem Chloridgehalt in 0 bis 10mm Tiefe und dem Chloridmigrationskoeffizienten, der Leitfähigkeit nach Streicher und der Ladungsmenge gefunden.

Mit steigender Wasserleitfähigkeit nimmt tendenziell die Tiefe zu, bei der die SOLL-Konzentration erreicht bzw. unterschritten wird (**Bild 6.18**). Die Resultate streuen allerdings stark. Die Werte des Nischenbetons der Schluochtbrücke und des porösen Betons der Stützen von Zuchwil dürfen aus den vorher genannten Gründen auch hier nicht berücksichtigt werden.

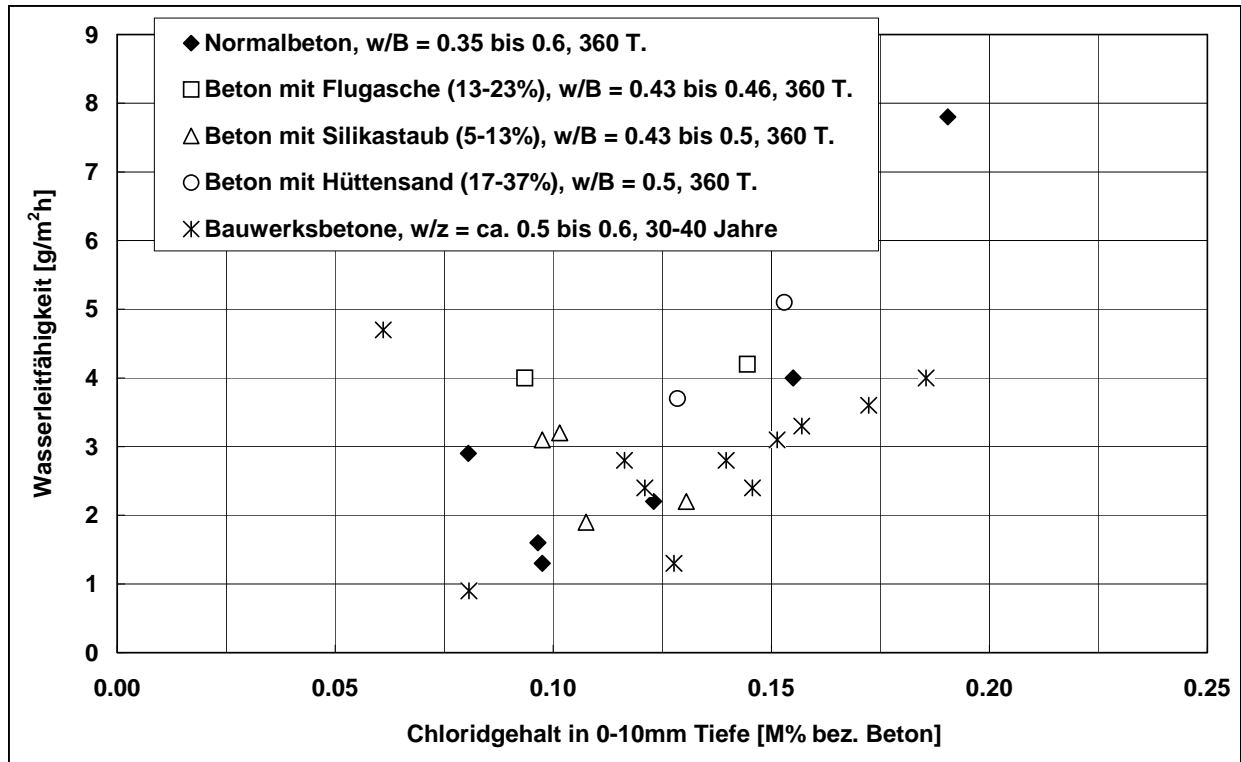


Bild 6.17: Wasserleitfähigkeit und Chloridgehalt an der Betonoberfläche nach dem Aufsaugversuch. Die Bauwerksproben haben ein mittleres Alter von 30 bis 40 Jahren und dürften einen w/z-Wert um 0.5 bis 0.6 aufweisen.

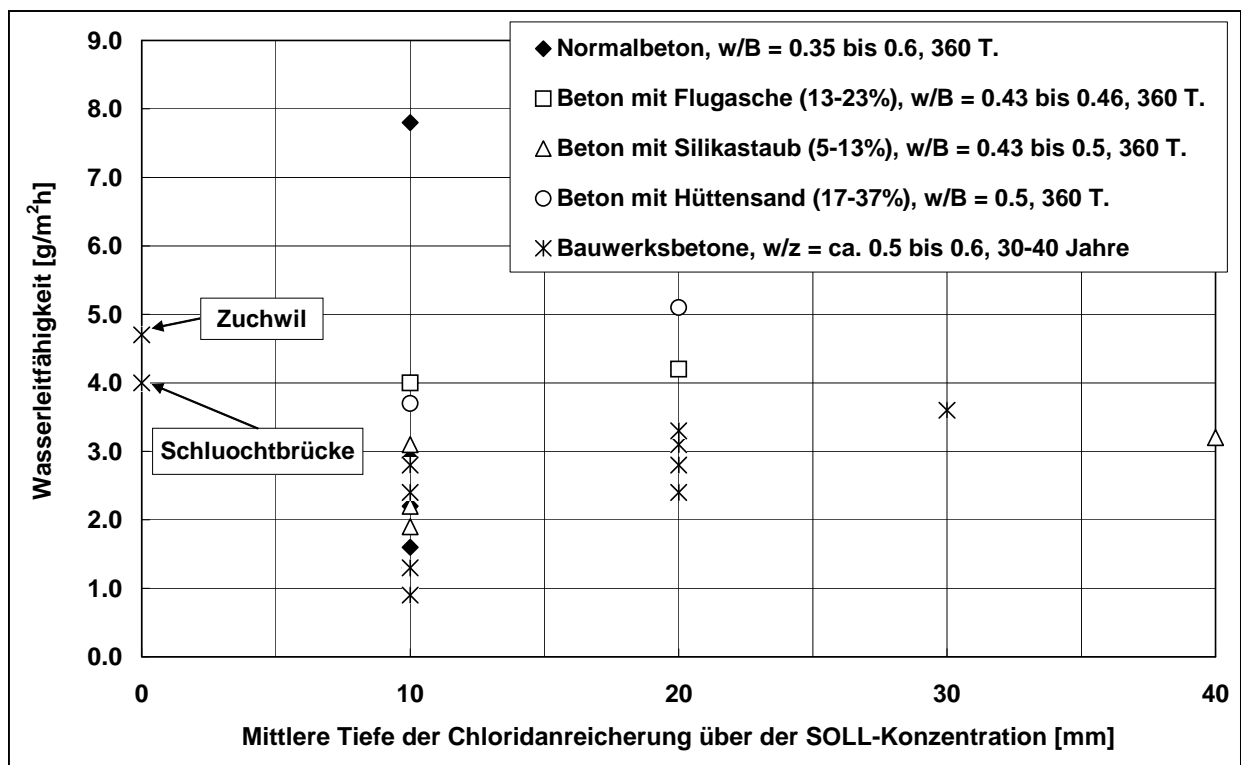


Bild 6.18: Zusammenhang zwischen der Wasserleitfähigkeit und der mittleren Eindringtiefe, bei der die SOLL-Konzentration unterschritten wurde.

6.3.4 Vergleich zu den Chloridprofilen aus den Bauwerken

Ein Vergleich der am Bauwerk gemessenen Chloridgehalte und den Werten aus den Aufsaugversuchen ist in **Bild 6.19** dargestellt. Bei diesem Vergleich ist eine gewisse Vorsicht geboten, da bei den Bauwerksbetonen keine Angaben zur Chloridbelastung, d.h. zum Chloridangebot, über die gesamte Lebensdauer vorhanden sind. So ist es wahrscheinlich, dass die drei Proben mit niedrigen Chloridgehalten am Objekt im Vergleich zu den Resultaten aus dem Aufsaugversuche einer tieferen Chloridbelastung ausgesetzt waren.

Das **Bild 6.19** weist damit lediglich auf das Potential der möglichen Chloridgehalte, die sich bei hoher Chloridbelastung einstellen können, hin.

Ein Vergleich der Eindringtiefe der Chloride am Bauwerksbeton (z.B. an Hand eines Grenzwertes für den Chloridgehalt) mit der Wasserleitfähigkeit ergab an den untersuchten Bauwerken keine schlüssigen Ergebnisse. Wegen der grossen Streuung müssten mehr Resultate von einer grösseren Zahl von Bauwerken vorliegen.

Bei den Aufsaugversuchen wurde im Übrigen festgestellt, dass das Verhältnis des heisswasserlöslichen zum Gesamtchloridgehalt wenig bis nicht von der Eindringtiefe abhängig ist (**Bild 6.20**).

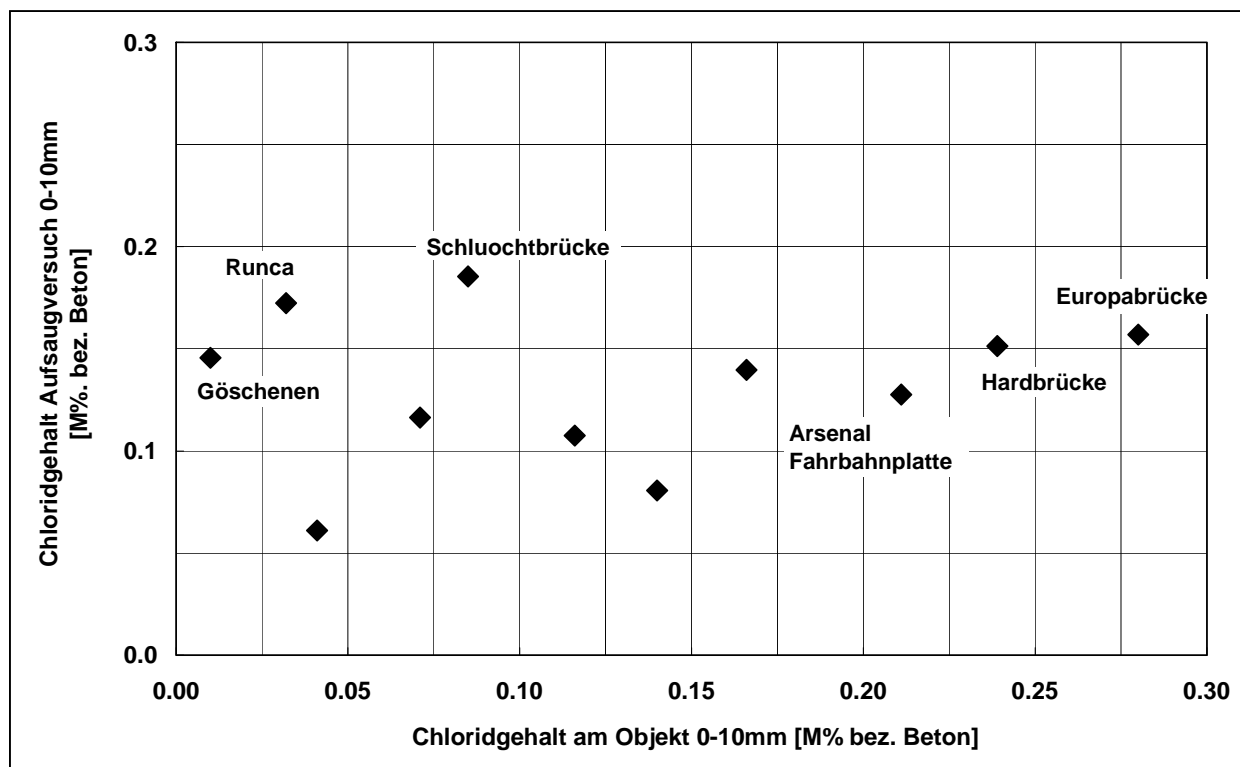


Bild 6.19: Zusammenhang zwischen dem an Bauwerksproben in 0 bis 10mm Tiefe gemessenen Chloridgehalt und den Werten aus den Aufsaugversuchen der Bauwerksbetone.

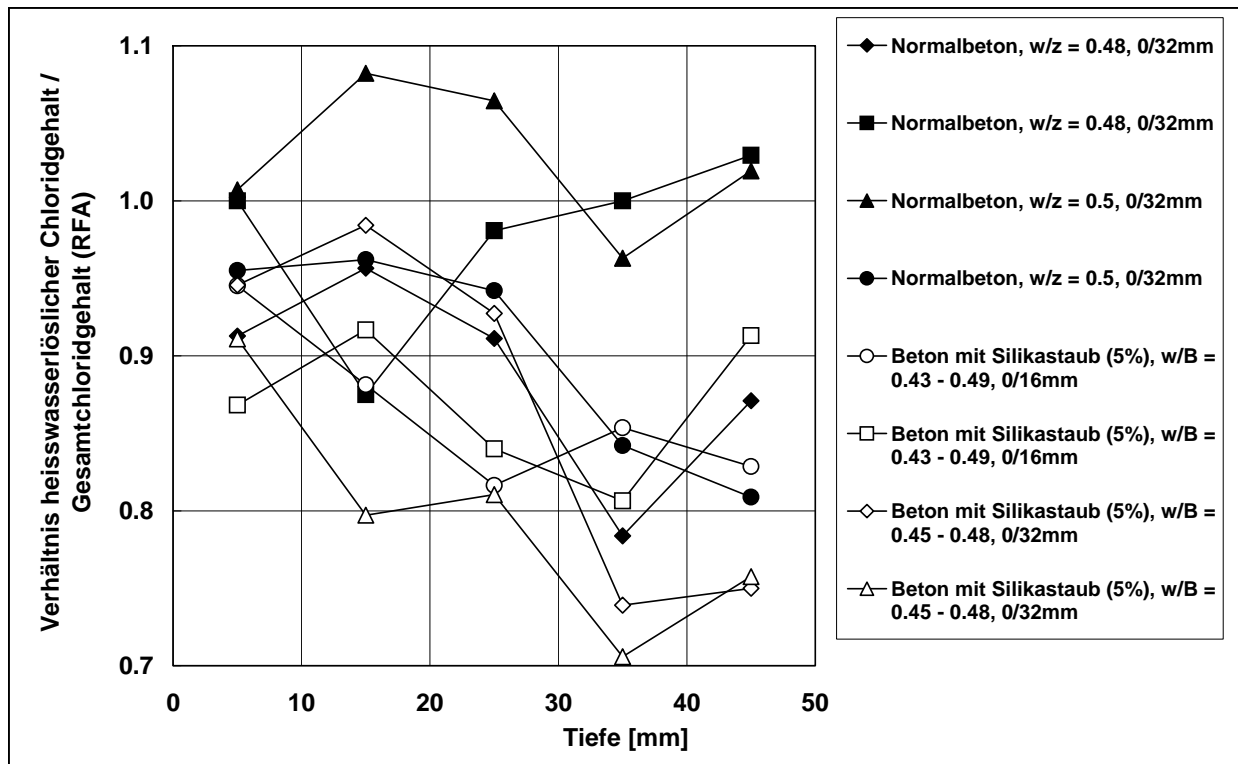


Bild 6.20: Verhältnis des heisswasserlöslichen Chloridgehaltes zum Gesamtchloridgehalt (Bestimmung mit der Röntgenfluoreszenzanalyse, RFA) in Abhängigkeit von der Eindringtiefe bei den Aufsaugversuchen mit den Betonen der Compognabrücke (mit und ohne Silikastaub, Alter 90 Tage).

6.3.5 Folgerungen aus den Aufsaugversuchen

Die Ergebnisse der Aufsaugversuche lassen folgende Schlussfolgerungen zu:

- Die Aufsaugversuche ergeben mit der angewendeten Versuchsanordnung unabhängig von der Betonqualität ähnliche Chloridprofile. Qualitätsunterschiede bei den Betonsorten zeigen sich vorab beim Ausmass der Chloridanreicherung im Bereich der Betonoberfläche und bei der Tiefe, bei der der Chloridgehalt die aus dem kapillar füllbaren Porenvolumen und der Menge der aufgenommenen Salzlösung berechnete SOLL-Konzentration erreicht bzw. unterschreitet. Diese Tiefe kann grob als Retardierungsfront bezeichnet werden.
- Die Frage, welche der verschiedenen Grössen, die aus dem Aufsaugversuch abgeleitet werden können (z.B. Chloridgehalt bzw. Chloridanreicherung im Bereich der Betonoberfläche oder Tiefe der Chloridanreicherung) sich für die Beurteilung der Betonqualität am besten eignet, kann nicht beantwortet werden. Hierzu wären weitere Untersuchungen notwendig.
- Zwischen der Chloridkonzentration an der Oberfläche (0 bis 10mm) und der Chloridanreicherung (Differenz zur SOLL-Konzentration) sowie der Tiefe der Chloridanreicherung und der Wasserleitfähigkeit, dem Chloridmigrationskoeffizienten, der Leitfähigkeit nach Streicher sowie der Ladungsmenge im ASTM-Test besteht sowohl bei den Laborbetonen wie auch bei den Bauwerksbetonen ein gewisser Zusammenhang.
- Die Chloridprofile im Aufsaugversuch können durch zu kurze oder zu lange Versuchszeiten verfälscht werden. Eine im Vergleich zum Porenvolumen zu kurze Versuchszeit führt zu ei-

ner unvollständigen Wassersättigung der Bohrkerne, eine zu lange Versuchszeit zu einer Chloridanreicherung (Aufkonzentration) im Bereich der oberen Stirnseite. Die Zeit bis zur vollen Wassersättigung kann ohne Erfahrungswerte nicht ohne weiteres abgeschätzt werden.

- Beim Aufsaugversuch und bei der Wasserleitfähigkeitsprüfung ergaben sich teilweise sehr unterschiedliche Werte für die aufgenommene Wassermenge und die Steighöhe nach 24 Stunden. Die Ursachen für diese Unterschiede sind nicht klar und sollten weiter untersucht werden. Möglich ist, dass die unterschiedliche Versuchsanordnung (freie bzw. abgedeckte Mantelfläche der Bohrkerne) zu einem unterschiedlichen Aufsaugverhalten führt.

Eine definitive Klärung der Ursachen für diese Unterschiede ist insbesondere deshalb dringend, weil die Wasserleitfähigkeitsprüfung in der Schweiz eine wichtige Rolle bei der Beurteilung von Betonen spielt. Es könnte sein, dass sie zu einer zu günstigen Beurteilung von Betonen führt, d.h. am Bauwerk müsste man mit höheren Wasser- und Salzeindringtiefen rechnen als man auf Grund der Resultate der Wasserleitfähigkeitsprüfung erwarten würde.

7. Diskussion der Ergebnisse

7.1 Vergleich der Einflussfaktoren mit Literaturergebnissen

7.1.1 Zementart- und Betonzusatzstoffe

Zwischen den Resultaten dieser Arbeit und jenen aus Publikationen zeigen sich generell ähnliche Tendenzen. Die wichtigsten Ergebnisse werden im Folgenden kurz besprochen.

Die ermittelten Migrationskoeffizienten nehmen tendenziell mit zunehmendem Anteil an Betonzusatzstoffen ab, wobei der Silikastaub die stärkste Wirkung aufweist (**Bild 7.1**). Der in der Literatur beschriebene starke Einfluss von Flugasche und Hüttensand konnte in dieser Arbeit allerdings nur teilweise bestätigt werden. Dies geht auch aus den Resultaten für die Ladungsmenge, Leitfähigkeit (Streicher) und Gaspermeabilität hervor (**Bild 6.5**). Die unterschiedliche Reaktivität von Flugasche und Hüttensand, die Zugabe der Zusatzstoffe zum Zement (werkseitiges Zumahlen oder Zumischen) oder zum Beton, Wechselwirkungen zwischen Zement, Betonzusatzmittel und den Betonzusatzstoffen (Korngrößenverteilung), die unterschiedliche Zementart und –festigkeitsklasse sowie der Zeitpunkt der Messung könnten mögliche Erklärungsansätze liefern. Es sei hier angemerkt, dass zum Einfluss der Zementfestigkeitsklasse auf den Chloridwiderstand keine Resultate publiziert wurden.

Bei gleichem Anteil an Betonzusatzstoffen liegen die Migrationskoeffizienten deutlich (bis um den Faktor 10) über den aus der Literatur bekannten Diffusionskoeffizienten (**Bilder 4.3 und 4.37**). Als Ursachen kommen z.B. in Frage: geringere Chloridbindung im Migrationsversuch und eine allenfalls ungenügende Berücksichtigung der Randbedingungen des Migrationsversuchs bei der Berechnung des Migrationskoeffizienten (**Kapitel 4.1 und 4.2**).

Die von Mackechnie [Mackechnie 2000] und Gehlen [Gehlen 2000] gemessenen Migrationskoeffizienten stimmen bei vergleichbaren w/z- bzw. w/B-Werten sowohl bei den Normalbetonen wie auch bei den Betonen mit einem ähnlichen Zusatzstoffanteil gut mit unseren Werten überein (Ausnahmen: Betone mit dem hohen Hüttensandanteil bzw. CEM III/B-Zemente). Bei konstantem Zusatzstoffanteil nehmen die Migrationskoeffizienten mit steigendem w/B-Wert zu.

Die im Alter von 360 Tagen gemessenen Leitfähigkeiten (Streicher) liegen im Bereich der wenigen publizierten an 28 Tage alten Betonen ermittelten Werte (**Bild 7.2**). Der Einfluss der Betonzusatzstoffe ist sehr ähnlich wie beim Migrationskoeffizienten (**Bild 7.1**). Die geringe Datenmenge erlaubt nicht, die altersbedingten Veränderungen der Leitfähigkeit zu beurteilen.

Bei der Wasserleitfähigkeit ist der positive Einfluss von Betonzusatzstoffen nicht klar erkennbar, weder bei den 28-Tage- noch bei den 360-Tage-Werten (**Bild 7.3**). Grössere Unterschiede in der Wirkung im Vergleich zu den anderen Verfahren fallen vor allem bei den Betonen mit Silikastaub und Hüttensand auf (**Bilder 6.5, 7.1 und 7.2**).

Abschliessend sei erwähnt, dass eine Kombination von Betonzusatzstoffen (z.B. Silikastaub mit Hüttensand oder Flugasche), die in dieser Arbeit nicht geprüft wurde, teilweise zu besseren Resultaten führt als die Verwendung von nur einem Zusatzstoff.

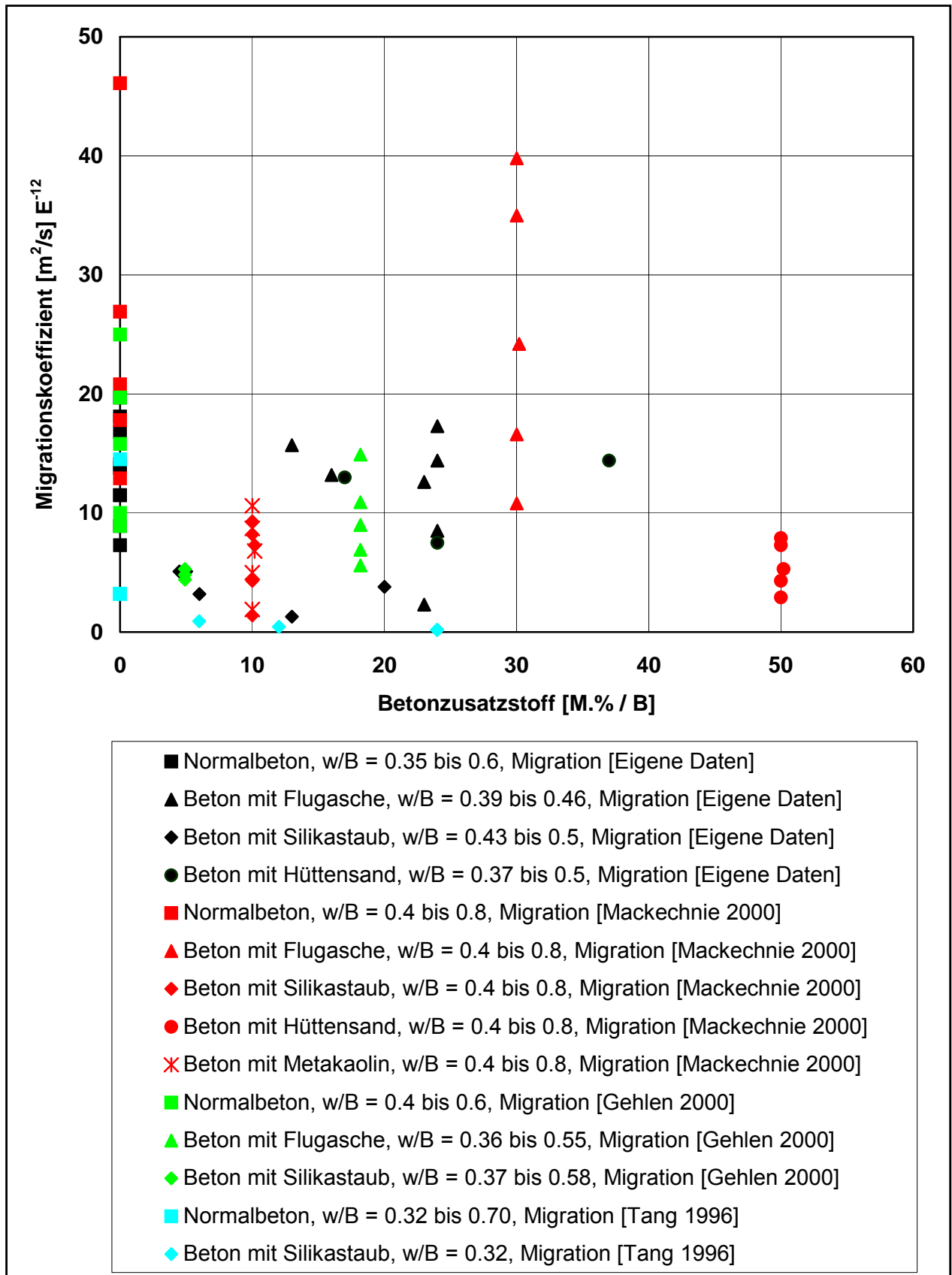


Bild 7.1: Abhängigkeit des Migrationskoeffizienten (28-Tage-Werte) vom Anteil an Betonzusatzstoffen am gesamten Bindemittelgehalt. Vergleich der Werte verschiedener Autoren [Mackechnie 2000, Gehlen 2000, Tang 1996a] mit jenen dieser Arbeit.

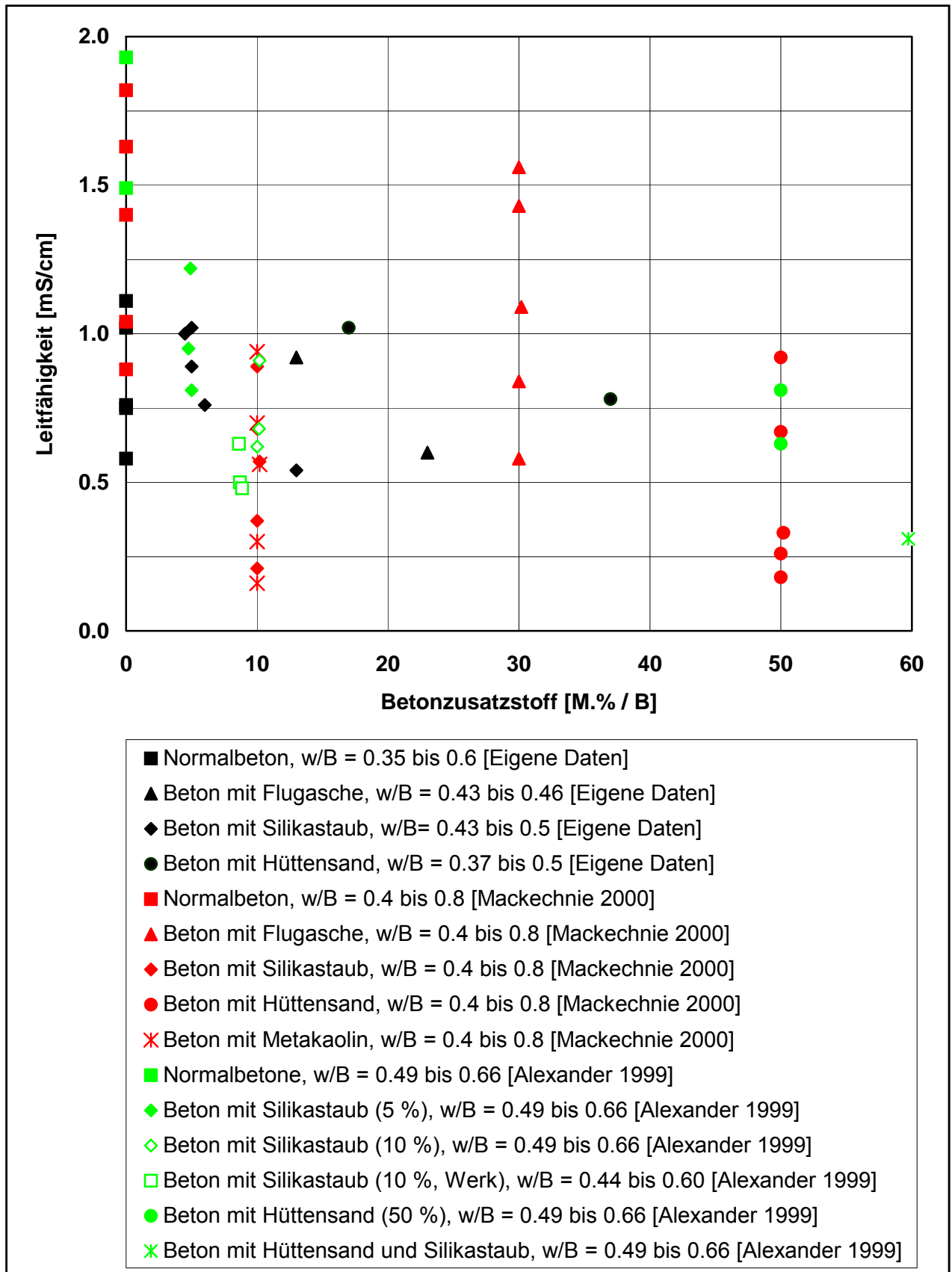


Bild 7.2: Abhängigkeit der Leitfähigkeit (Streicher) vom Anteil an Betonzusatzstoffen am gesamten Bindemittelgehalt. Vergleich der Werte von verschiedenen Autoren [Mackechnie 2000, Alexander 1999b] (28-Tage-Werte) mit jenen dieser Arbeit (Laborbetone und Betone aus Drittprojekten, 360-Tage-Werte).

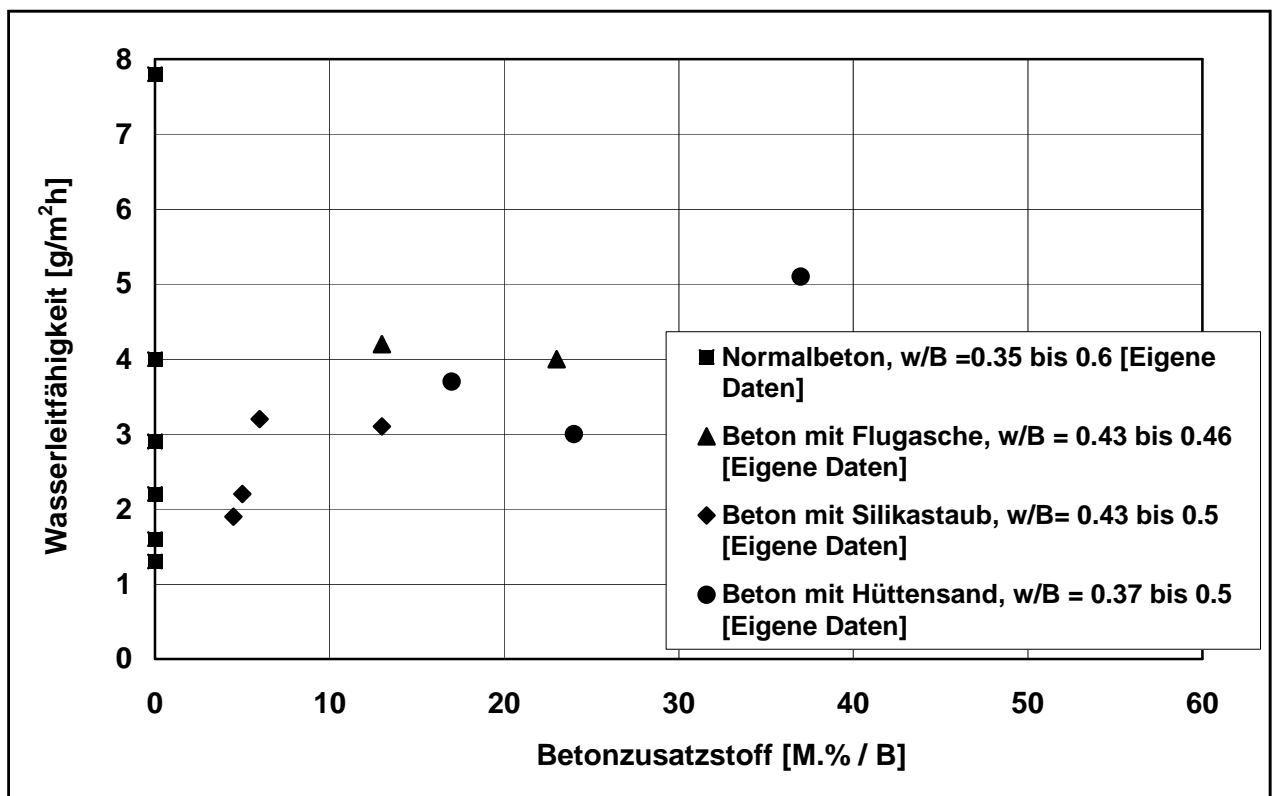
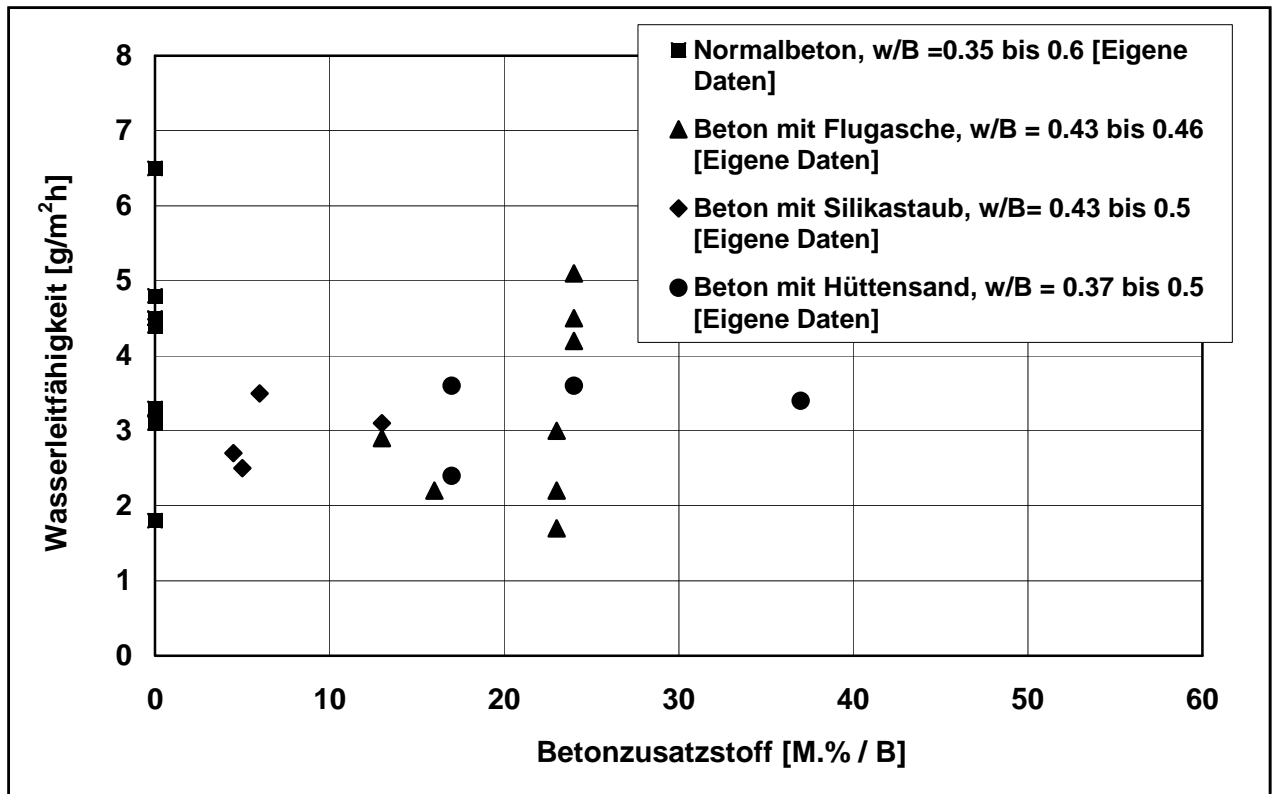


Bild 7.3: Abhängigkeit der Wasserleitfähigkeit vom Anteil an Betonzusatzstoffen am gesamten Bindemittelgehalt (Laborbetone und Betone aus Drittprojekten).

oben: 28-Tage-Werte

unten: 360-Tage-Werte

7.1.2 w/z- und w/B-Wert

Hierzu liegt eine ausführliche Publikation von Mackechnie und Alexander [Mackechnie 2000] vor. Für die Untersuchung haben sie 30 Betonrezepturen mit und ohne Betonzusatzstoffe (10% Silikastaub, 30% Flugasche, 50% Hüttensand und 10% Metakaolin bezogen auf den gesamten Bindemittelgehalt) sowie mit unterschiedlichen w/z- bzw. w/B-Werten (0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8) mit verschiedenen Messverfahren im Alter von 28 Tagen geprüft. Der Wassergehalt wurde bei 160 l/m^3 konstant gehalten. Beim Beton mit einem w/z-Wert von 0.5 und ohne Zusatzstoffe betrug der Zementgehalt 320 kg/m^3 . Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in den **Bildern 7.4 bis 7.6** im Vergleich zu den Werten dieser Arbeit dargestellt.

Beim Migrationskoeffizienten (**Bild 7.4**) – hier liegen auch Resultate von [Gehlen 2000] und [Tang 1996a] vor – ist bei den Normalbetonen zwischen unseren und den Werten von Mackechnie [Mackechnie 2000] und Gehlen [Gehlen 2000] eine gute bis sehr gute Übereinstimmung festzustellen. Dies gilt in vermindertem Masse auch für die Betone mit Silikastaub und Flugasche. Demgegenüber sind die Werte von Mackechnie für die Betone mit Hüttensand und jene von Gehlen für den Beton mit einem hohen Hüttensandgehalt (Zement CEM III/B 42,5 NW HS NA: Hüttensandzement mit niedriger Hydratationswärme, hohem Sulfatwiderstand und niedrigem Alkaligehalt) deutlich tiefer als unsere Werte. Generell zeigt sich, dass der Migrationskoeffizient von Normalbetonen mit zunehmendem w/B-Wert deutlich ansteigt. Diese Tendenz ist bei den Werten von Mackechnie für die Betone mit Hüttensand und Silikastaub weniger ausgeprägt.

Bei der Leitfähigkeit (**Bild 7.5**) ist die Übereinstimmung zwischen den Werten der beiden Arbeiten ordentlich, weniger gut als beim Migrationskoeffizienten. Die Abhängigkeit der Leitfähigkeit vom w/B-Wert ist sehr ähnlich wie beim Migrationskoeffizienten.

Bei der Ladungsmenge im ASTM-Schnelltest (ASTM C1202) (**Bild 7.6**) liegen unsere Resultate generell höher als jene von Mackechnie, obwohl es sich bei den eigenen Daten um die 360-Tage-Werte handelt. Auch aus dem **Bild 4.10** geht die grosse Bandbreite der Werte hervor. Bei Messungen einzelner Autoren an gleichartigen Betonen ist die Bandbreite deutlich geringer. Die eigenen Resultate liegen eher im mittleren bis oberen Bereich der Bandbreite. Dies deutet auf einen systematischen Unterschied hin.

Die von Mackechnie et al. aus dem AASTHO T259-80-Test berechneten Diffusionskoeffizienten (**Bilder 4.1 und 4.3**) zeigen kaum wesentliche Unterschiede zwischen den Betonen mit Zusatzstoffen. Sie nehmen mit dem w/B-Wert nur leicht zu. Im Gegensatz zu den anderen Prüfungen wird hier ein positiver Einfluss der Flugasche festgestellt. Die Autoren erklären diesen Unterschied damit, dass die Flugasche evtl. zu langsam reagiert und ihre Wirkung sich erst in einem höheren Betonalter entfaltet. Die beschränkte Chloridbindung während der kurzen Versuchsdauer der anderen Verfahren wird ebenfalls als Grund in Erwägung gezogen. Diese Prüfung wurde in dieser Arbeit nicht eingesetzt.

Insgesamt sind die Ergebnisse von [Mackechnie 2000] und unserer Arbeit gut vergleichbar. Die Betone mit Hüttensand schneiden, wie schon erwähnt, in dieser Arbeit schlechter ab. Die möglichen Gründe wurden im **Kapitel 7.1.1** bereits angesprochen.

In **Bild 7.7** ist die Wasserleitfähigkeit gegen den w/B-Wert dargestellt. Im Vergleich zu **Bild 6.12** (Wasserleitfähigkeit vs. w/z bzw. w/z_{eq}) ist die Korrelation eher besser. Im Vergleich zu den Normalbetonen liegt die Wasserleitfähigkeit bei Betonen mit Flugasche höher, bei Betonen mit Silikastaub tiefer. Es ist demnach richtig, bei der Berechnung des w/z_{eq} -Wertes die Flugasche mit einem k-Wert <1 anzurechnen.

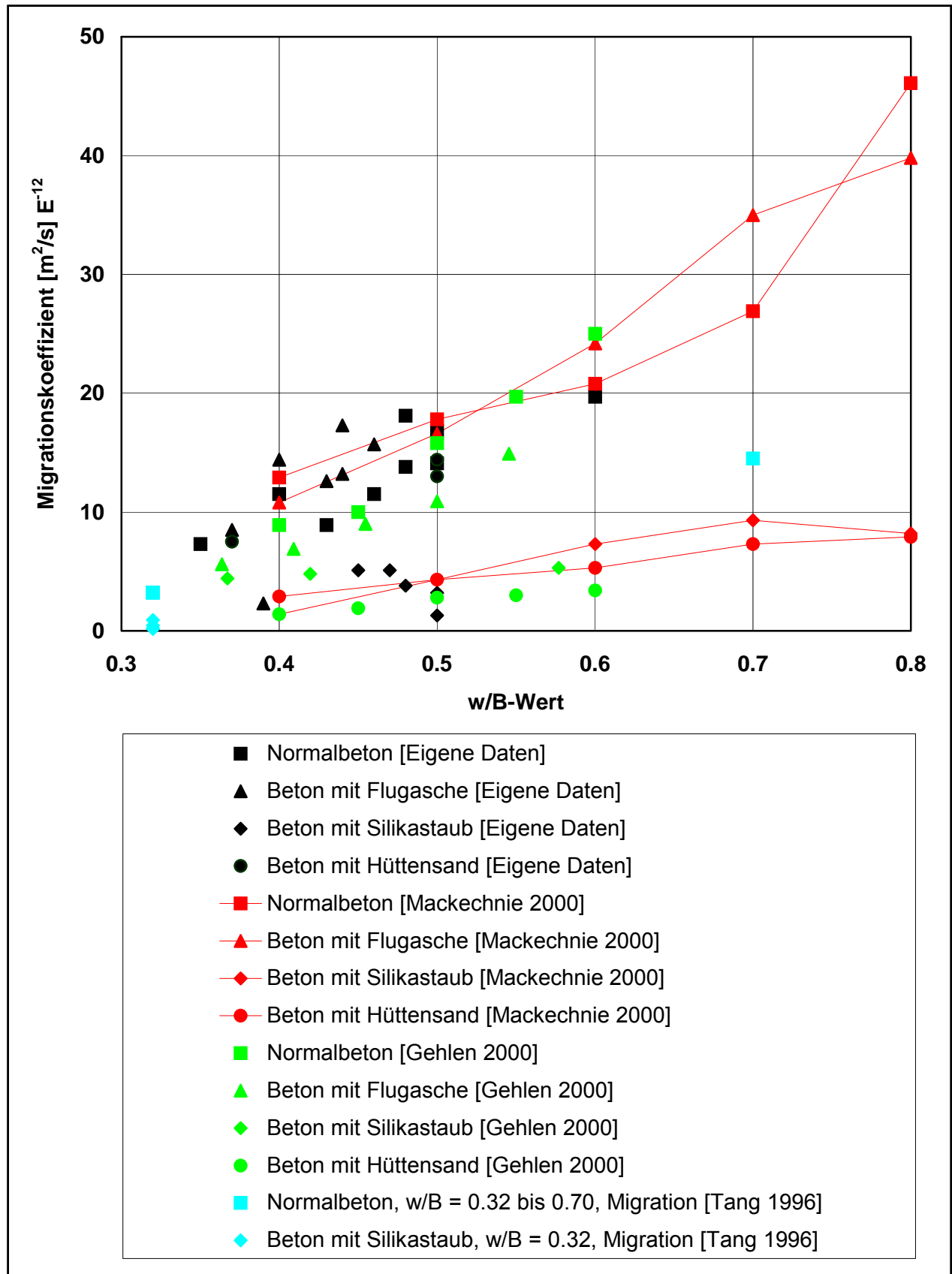


Bild 7.4: Chloridmigrationskoeffizient in Abhängigkeit vom w/B-Wert. Vergleich der Daten von [Mackechnie 2000], [Gehlen 2000], [Tang 1996a] mit jenen dieser Arbeit (Laborbetone und Betone von Drittprojekten im Alter von 28 Tagen).

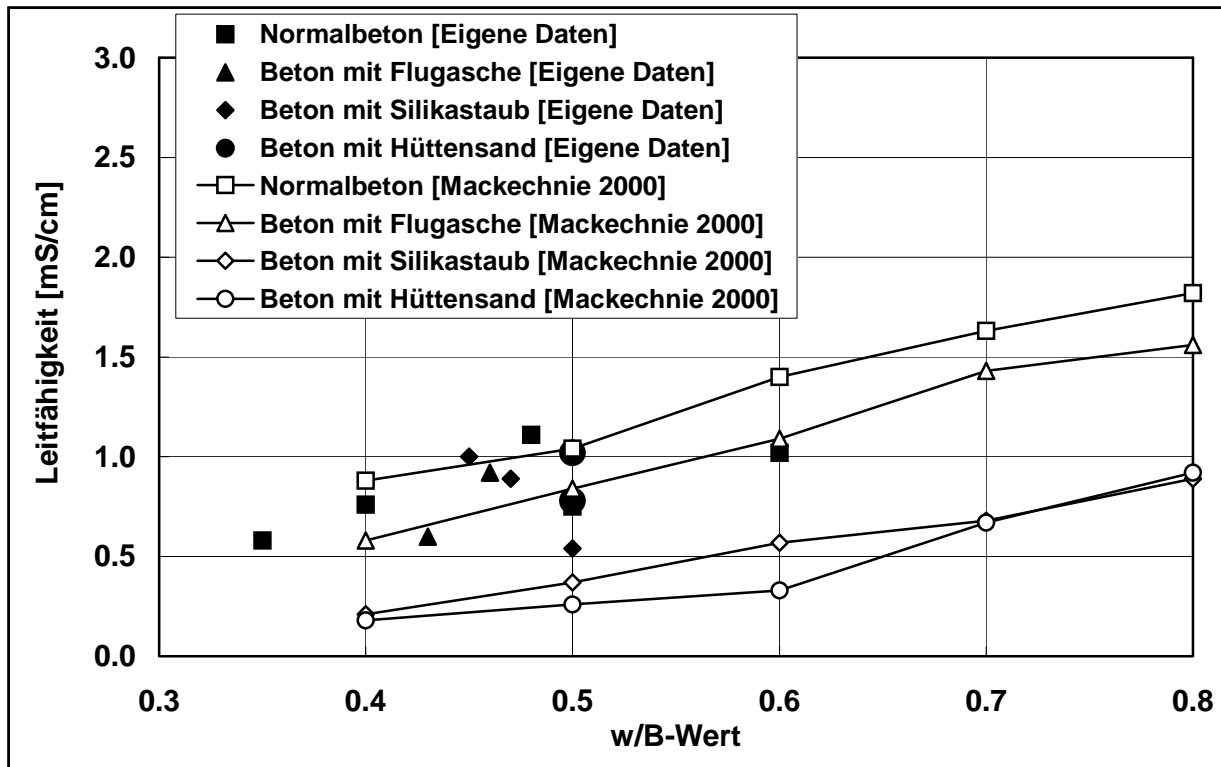


Bild 7.5: Leitfähigkeit (Streicher-Verfahren) in Abhängigkeit vom w/B-Wert. Vergleich der 28-Tage-Werte von [Mackechnie 2000] mit den Werten dieser Arbeit (Laborbetone und Betone von Drittprojekten im Alter von 360 Tagen).

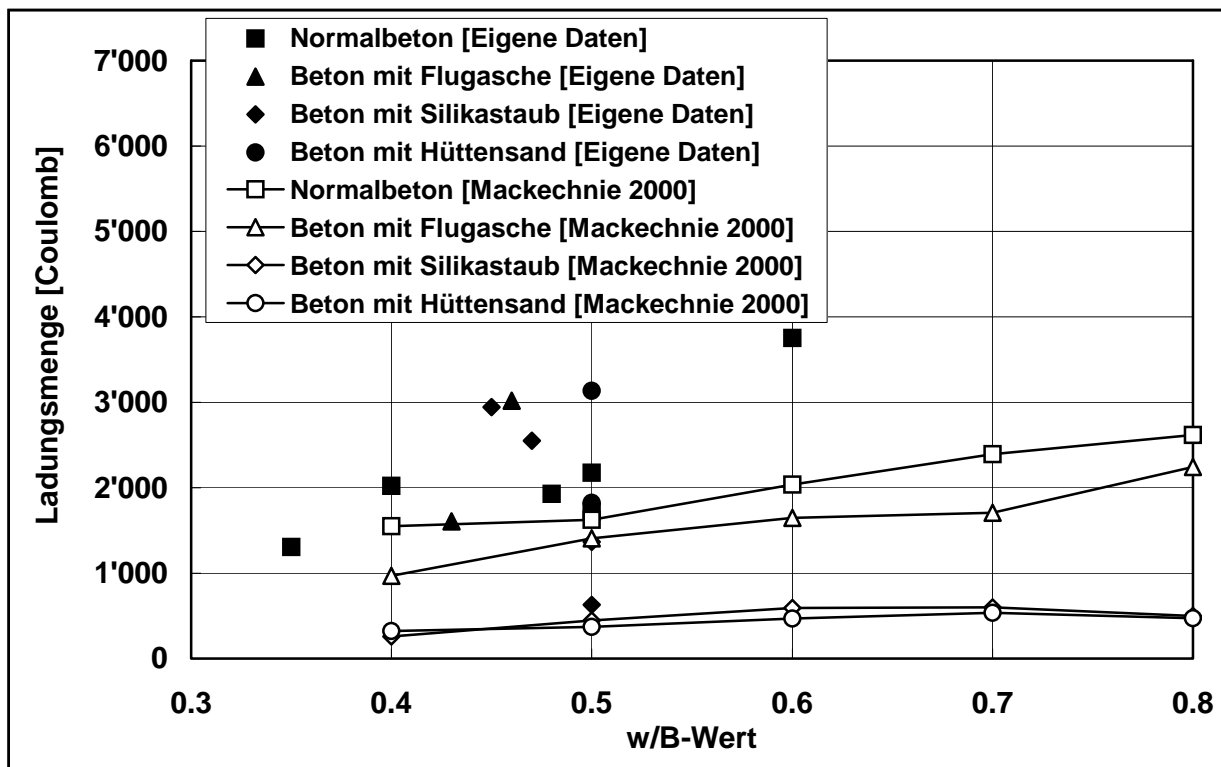


Bild 7.6: Ladungsmenge in Abhängigkeit vom w/B-Wert. Vergleich der 28-Tage-Werte von Mackechnie [Mackechnie 2000] mit den Werten dieser Arbeit (Laborbetone und Betone von Drittprojekten im Alter von 360 Tagen).

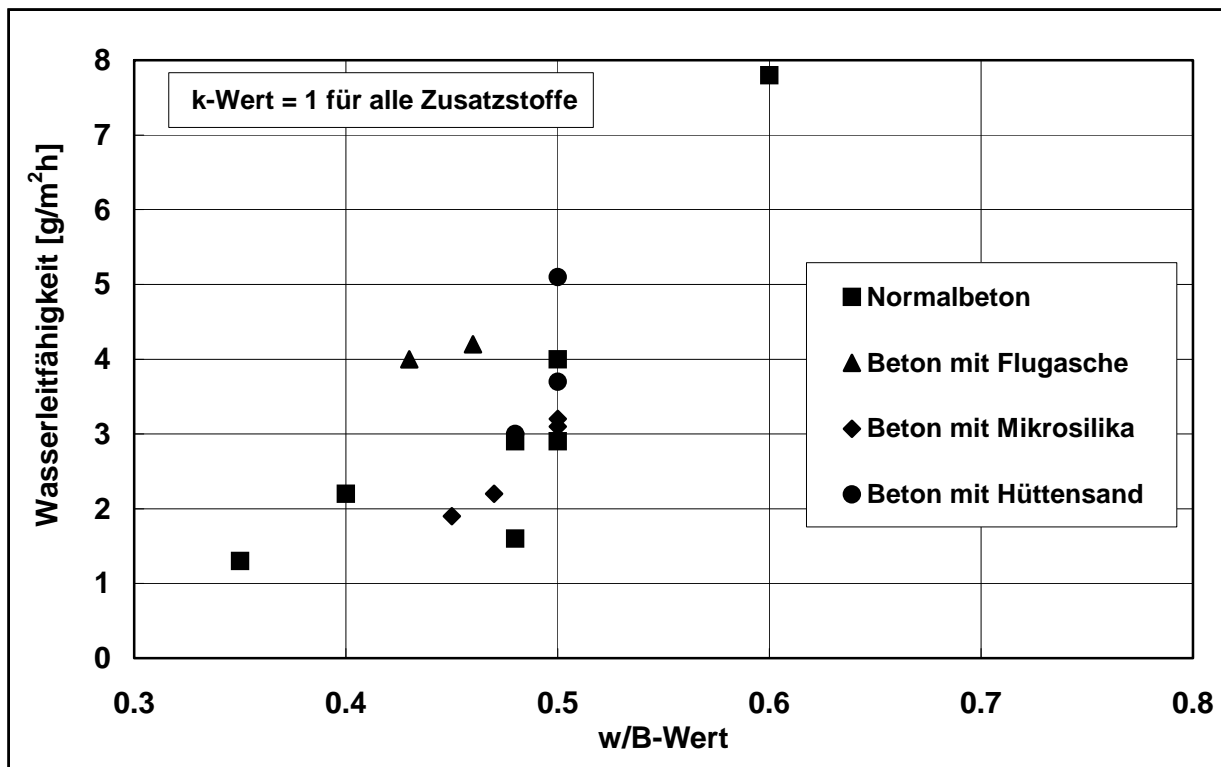
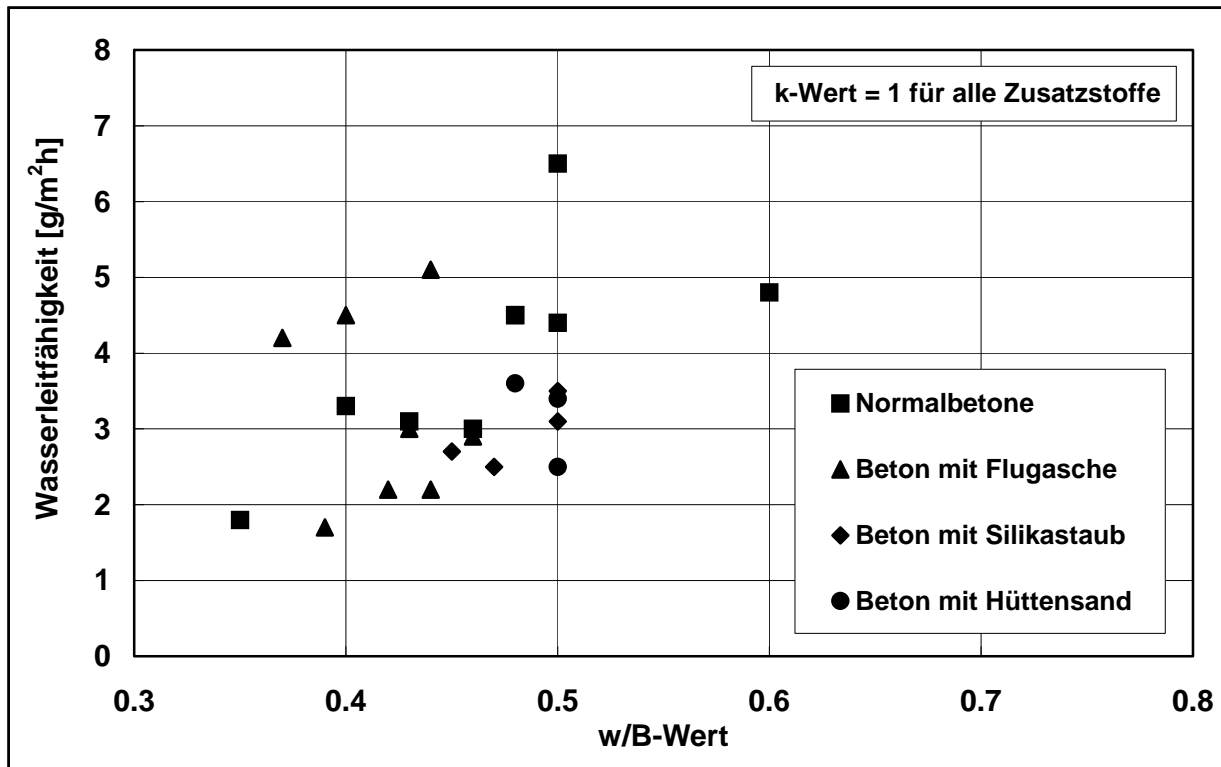


Bild 7.7: Abhängigkeit der Wasserleitfähigkeit vom w/B-Wert. Vergleiche **Bild 6.12**.

oben: 28-Tage-Werte

unten: 360-Tage-Werte

7.1.3 Druckfestigkeit

Die **Bilder 7.8 bis 7.10** zeigen generell, dass der Migrationskoeffizient, die Ladungsmenge und die Leitfähigkeit mit zunehmender Druckfestigkeit abnehmen.

Der Migrationskoeffizient weist bei gleicher Druckfestigkeit sehr unterschiedliche Werte auf. Ein ganz entscheidender Einfluss hat die Betonzusammensetzung, insbesondere die Art des Betonzusatzstoffes (**Bild 7.8a**). Betrachtet man gleichartige Betone, so ist ein klarer Zusammenhang zwischen Migrationskoeffizient und Druckfestigkeit erkennbar. In **Bild 7.8b** sind die Resultate dieser Arbeit für die Normalbetone nach dem Prüfalter aufgeschlüsselt. Bei gleicher Druckfestigkeit sind die Werte für den Migrationskoeffizienten ähnlich. Die Literaturdaten wie auch die Werte der Bauwerksbetone zeigen keine systematischen Abweichungen von den eigenen Werten. Die aus den verfügbaren Migrationskoeffizienten von Normalbetonen berechneten Ausgleichskurven sind in **Bild 7.8c** dargestellt. Die Ausgleichskurve ohne Bauwerksbetone unterscheidet sich bei höheren Druckfestigkeiten kaum von jener Ausgleichskurve, bei der die Bauwerksbetone berücksichtigt wurden. Bei Druckfestigkeiten $<30\text{N/mm}^2$ liegen die Unterschiede über etwa $5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

Daraus darf man schliessen, dass der Einfluss des Alters auf den Migrationskoeffizienten nur auf die altersbedingte Festigkeitssteigerung bzw. Gefügeverdichtung des Betons zurückzuführen ist und andere Einflüsse keine oder eine untergeordnete Rolle spielen.

Die in den **Bildern 7.8a und b** eingezeichneten Ausgleichskurven (Exponentialgleichung der Form $y = ax^b$, y: Migrationskoeffizient, x: Druckfestigkeit, a und b: Konstanten) lassen sich wie folgt darstellen:

Bild 7.8a (eigene Daten, ohne Bauwerksbetone)

28-Tage:	$y = 9'913 x^{-1.684}$,	$R^2 = 0.88$	(Gl. 7.1)
90-Tage:	$y = 33'511 x^{-1.917}$,	$R^2 = 0.99$	(Gl. 7.2)
360-Tage:	$y = 238'979 x^{-2.439}$,	$R^2 = 0.91$	(Gl. 7.3)

Bild 7.8b (eigene Daten sowie jene von [Tang 1996a], [Gehlen 2000] und [Mackechnie 2000])

Eigene und Literaturdaten	$y = 10'494 x^{-1.675}$,	$R^2 = 0.79$	(Gl. 7.4)
Alle Daten, inkl. Bauwerksbetone	$y = 5'472 x^{-1.528}$,	$R^2 = 0.72$	(Gl. 7.5)

Eine Zunahme der Druckfestigkeit bewirkt erwartungsgemäss eine Abnahme der Ladungsmenge (**Bild 7.9**). Bei gleicher Druckfestigkeit sind unsere wenigen Werte von den Normalbetonen deutlich höher als jene von [Sherman 1996]. Auffallend ist in **Bild 7.10**, dass unsere Werte für die Leitfähigkeit (Streicher) eine wesentlich geringere Bandbreite aufweisen als jene von [Alexander 1999b]. Vorab auffallend sind die deutlich tieferen Werte bei den Normalbetonen. Diese stimmen mit den Werten von [Mackechnie 2000] weit besser überein (**Bild 7.5**). Eventuell spielt hier das Alter bei der Prüfung eine wichtige Rolle.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass zwischen der Druckfestigkeit und den verschiedenen Kenngrössen für den Chloridwiderstand in der Regel nur bei gleichartigen Betonen eines Autors ein Zusammenhang vorhanden ist. Beim ibac-Test bzw. beim Migrationskoeffizienten von Normalbetonen waren offenbar bei den verschiedenen Arbeiten auch die relevanten Details der Prüfung sehr ähnlich (**Kapitel 7.2**), so dass in diesem Falle auch die Resultate verschiedener Autoren recht gut übereinstimmen. Die Wirkung von Betonzusatzstoffen auf die Druckfestigkeit und die Kenngrössen des Chloridwiderstandes kann sehr unterschiedlich sein. Sie ist zudem von verschiedenen Faktoren abhängig (s. **Kapitel 7.1.1**). Dies verunmöglicht, aus der Druckfestigkeit alleine mit genügender Sicherheit die Kenngrössen für den Chloridwiderstand abzuleiten.

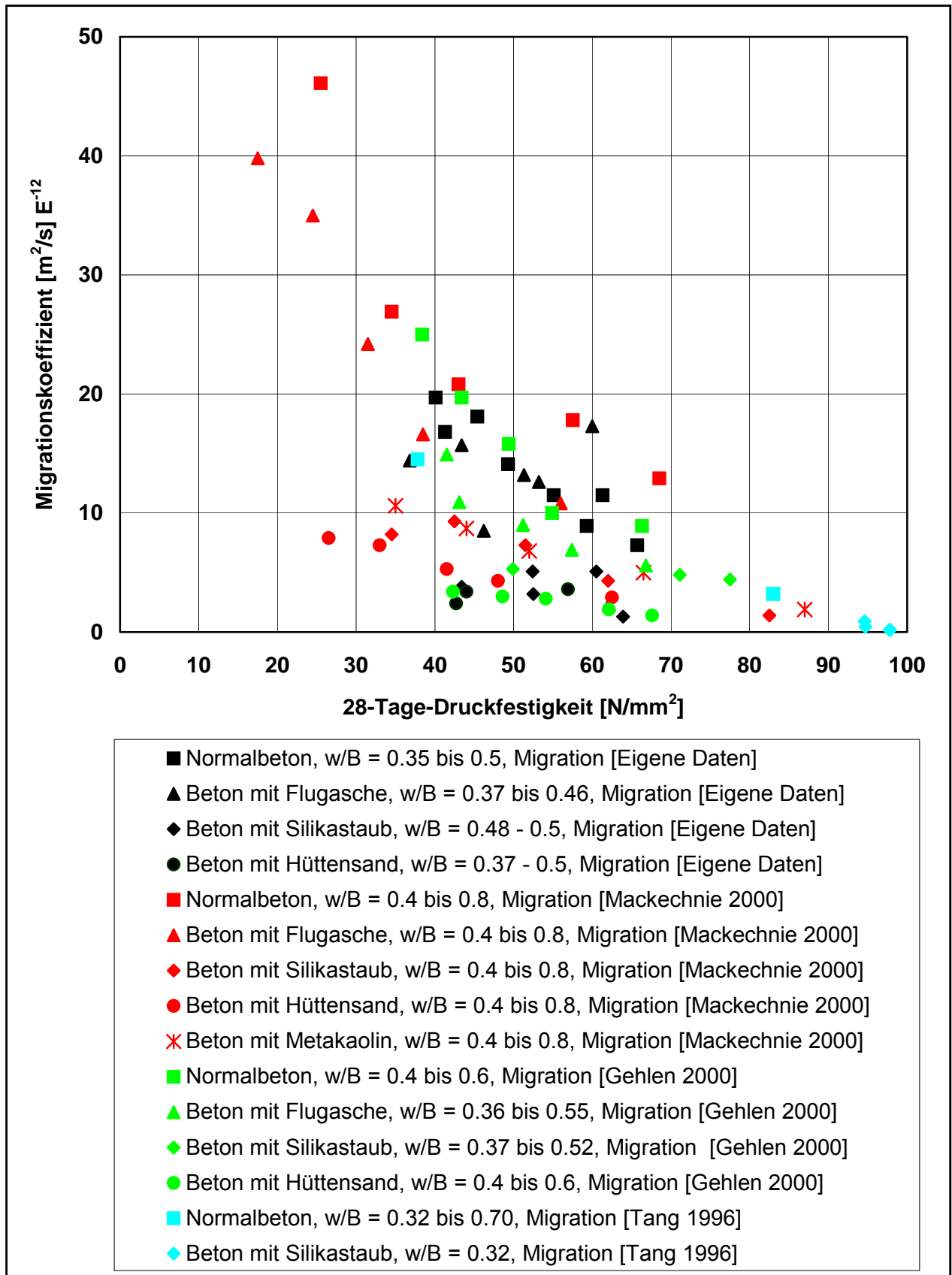


Bild 7.8a: Beziehung zwischen Migrationskoeffizient und Druckfestigkeit. Zusammenstellung aller verfügbaren Resultate.

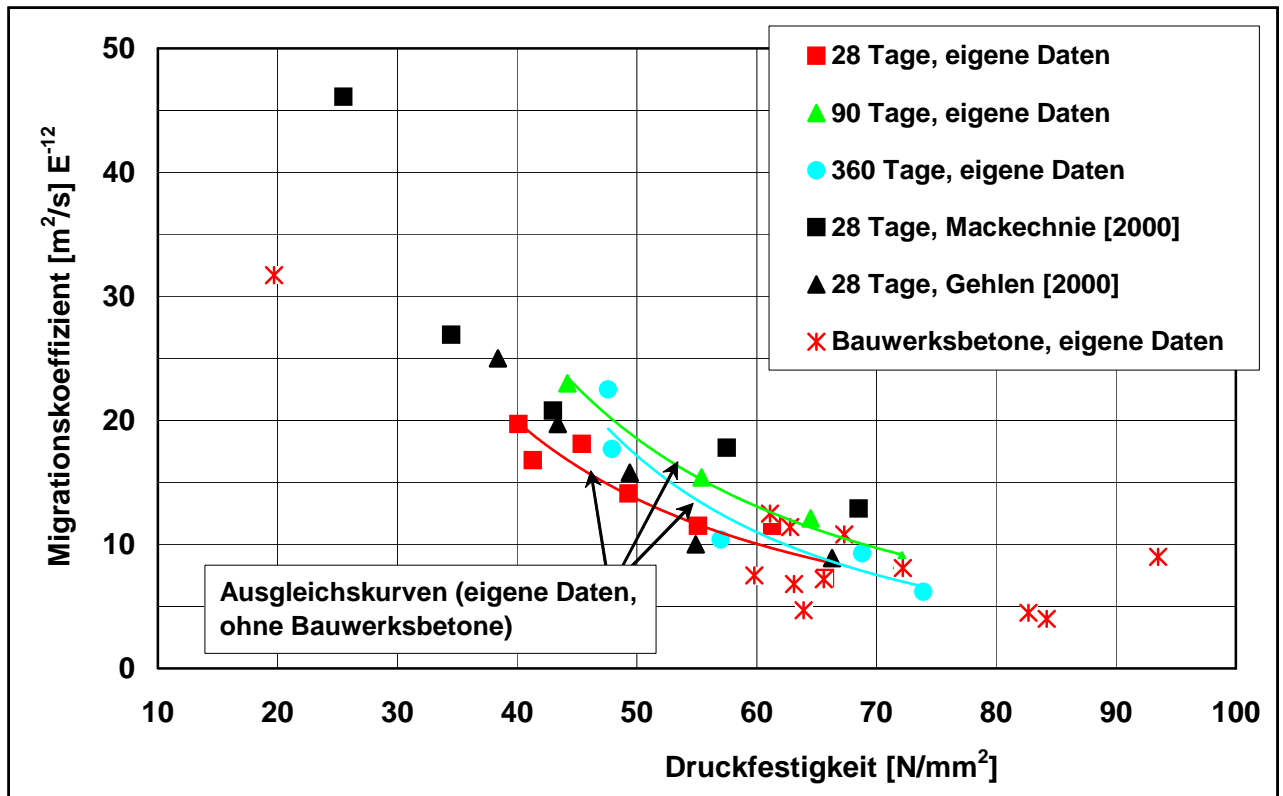


Bild 7.8b: Beziehung zwischen Migrationskoeffizient und Druckfestigkeit für Normalbetone.

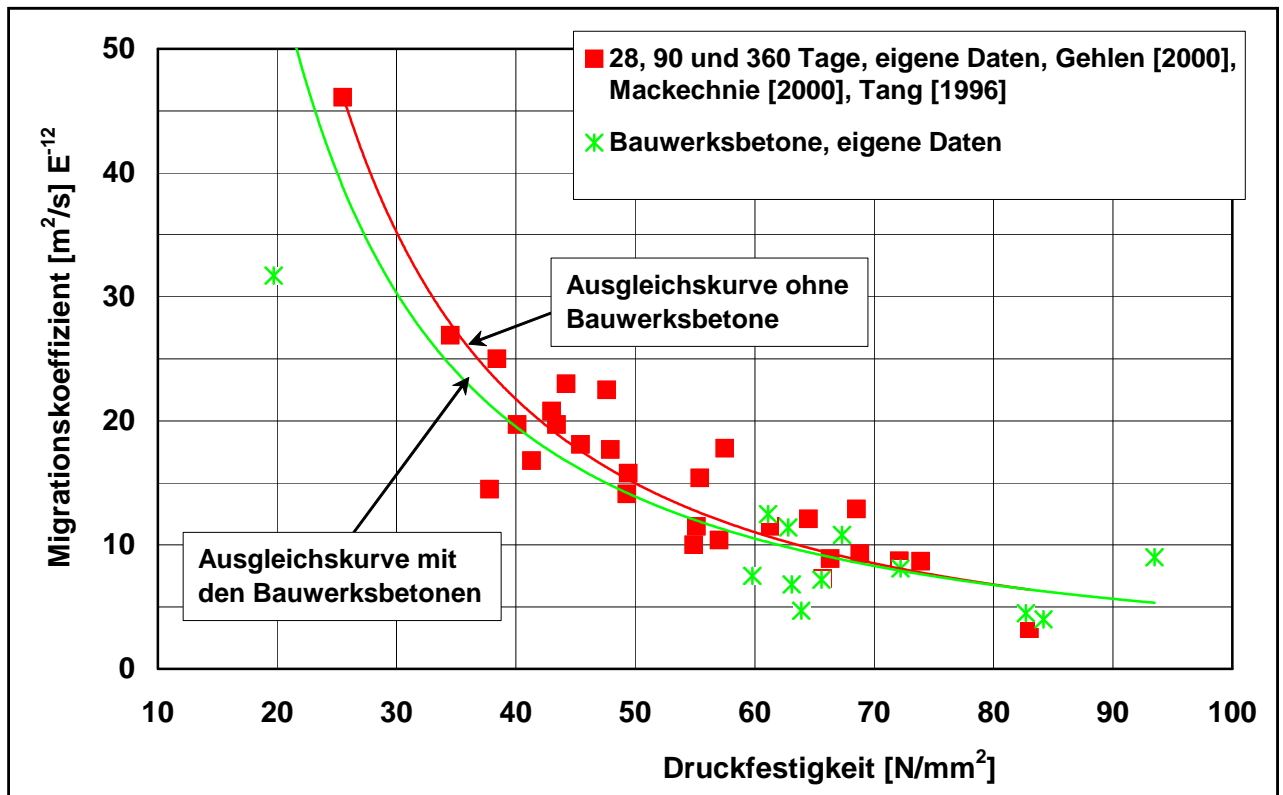


Bild 7.8c: Beziehung zwischen Migrationskoeffizient und Druckfestigkeit für Normalbetone. Die Ausgleichskurven wurden mit und ohne Bauwerksbetone berechnet.

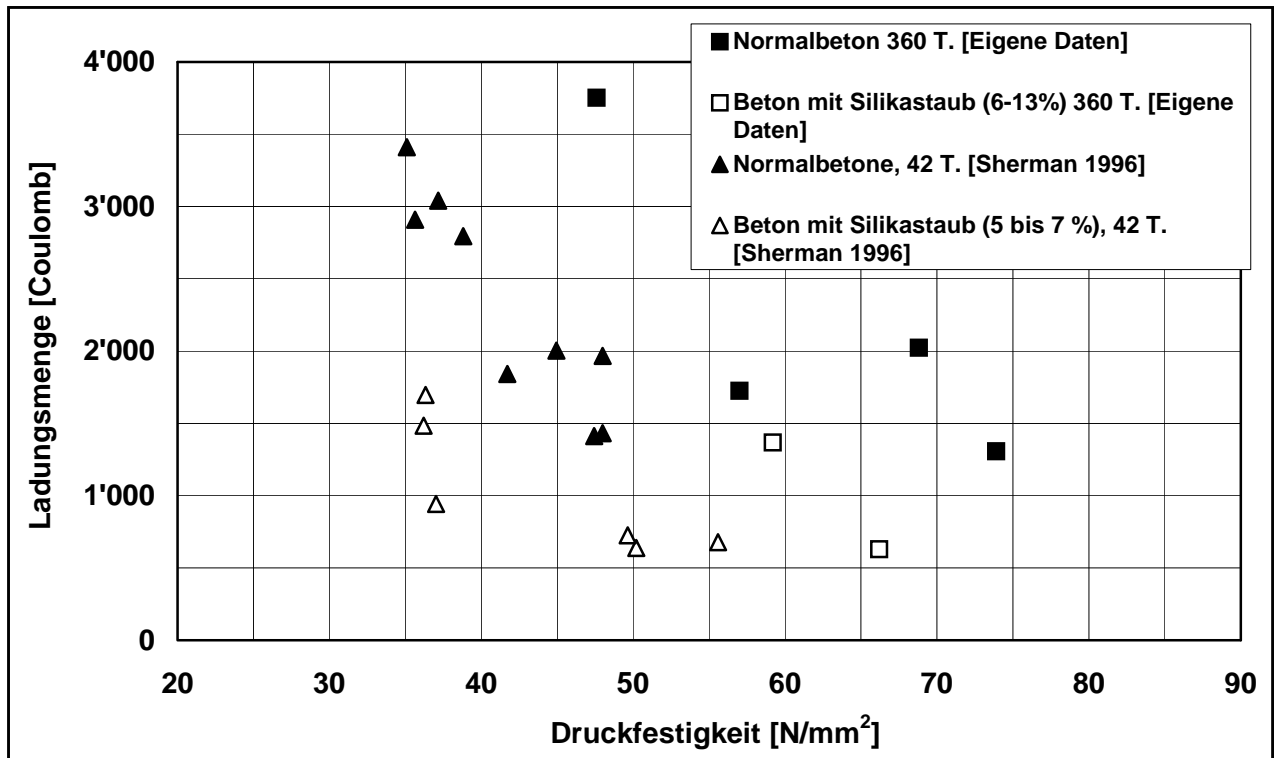


Bild 7.9: Beziehung zwischen Ladungsmenge und Druckfestigkeit für Normal- und silikastaubhaltige Betone. Vergleich der Resultate von [Sherman 1996] (Probenalter: 42 Tage) und dieser Arbeit (Probenalter: 360 Tage).

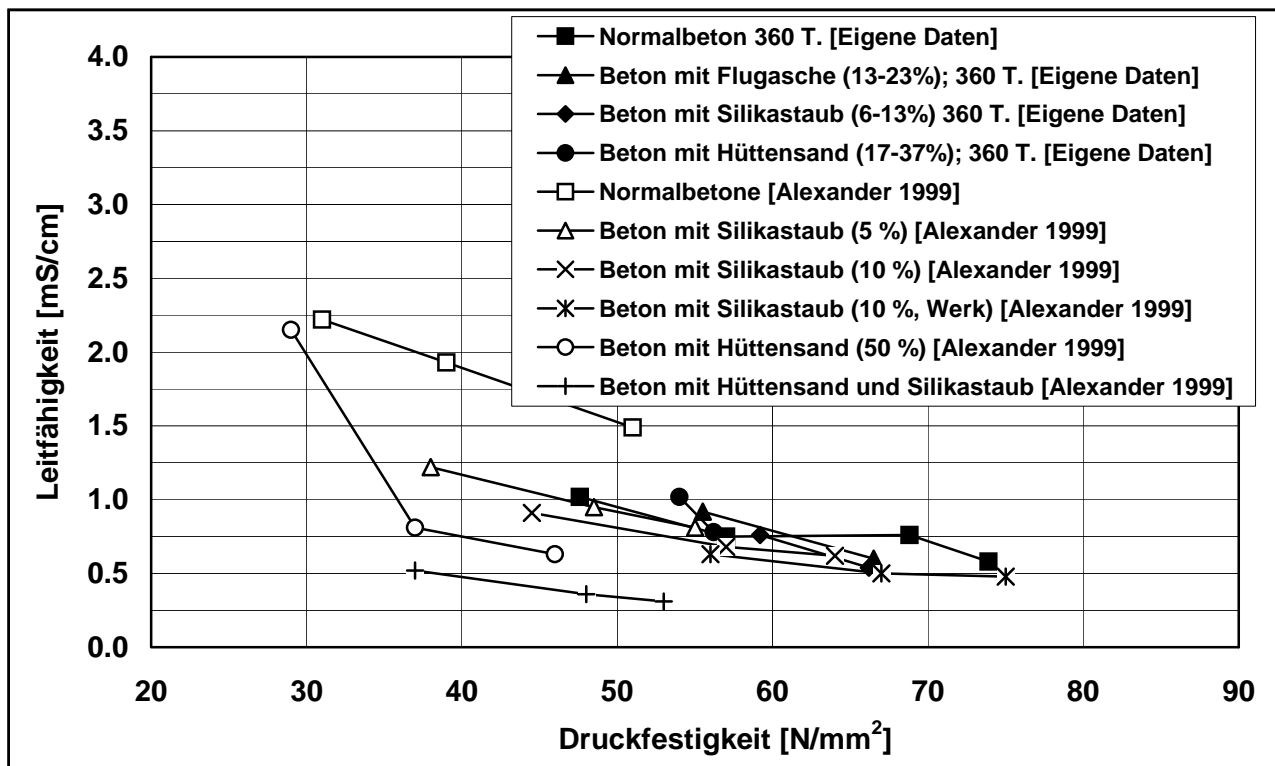


Bild 7.10: Beziehung zwischen Leitfähigkeit (Streicher-Test) und Druckfestigkeit. Vergleich der Resultate von [Alexander 1999b] (28-Tage-Werte) und dieser Arbeit (360-Tage-Werte).

7.1.4 Alter der Proben

Der Zeitpunkt der Prüfung ist für die Bestimmung des Chloridwiderstandes wichtig, da sich die Kenngrößen über die Zeit verändern können (abhängig u.a. von der Betonzusammensetzung), wie dies im **Kapitel 4.4** bereits erläutert und auch in dieser Arbeit verschiedentlich gefunden wurde (**Bilder 6.5 und 6.6**). **Bild 7.11** zeigt beispielhaft die zeitliche Veränderung der Ladungsmenge.

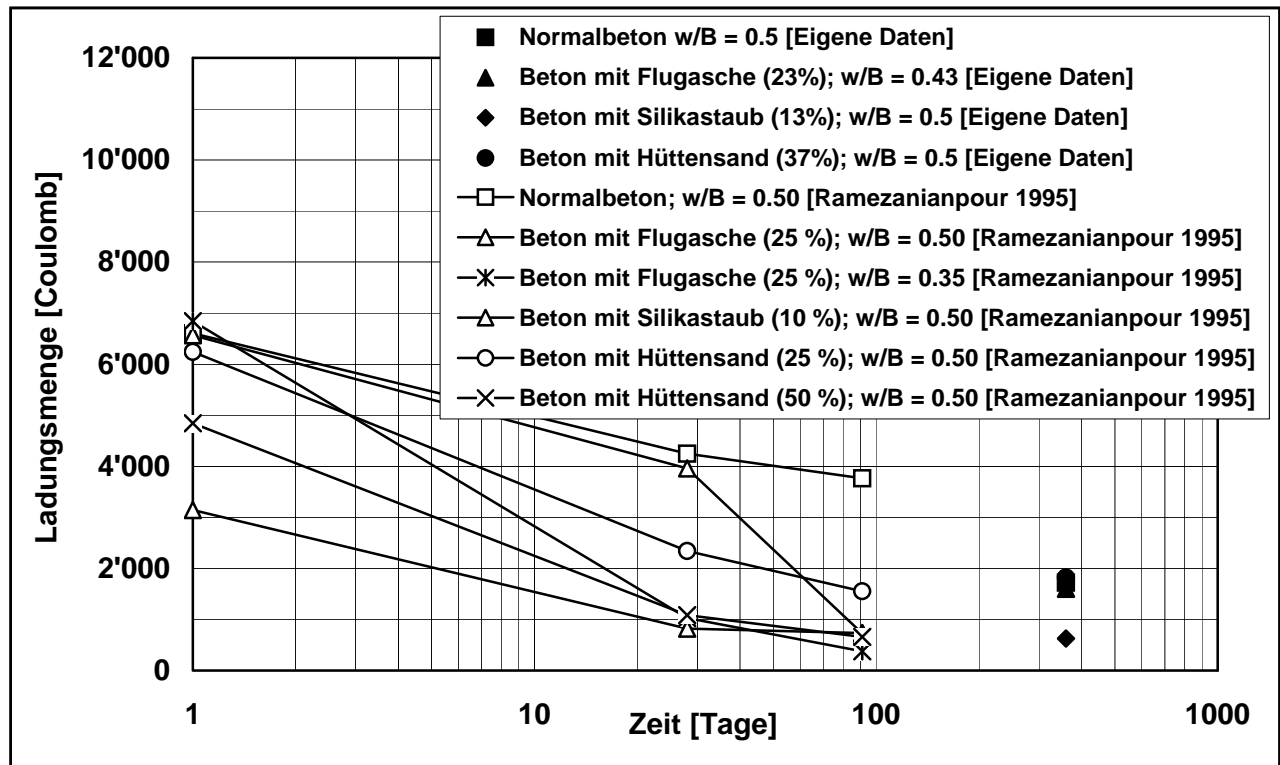


Bild 7.11: Zeitliche Entwicklung der Ladungsmenge. Vergleich der Resultate von [Ramezianipour 1995] und jener dieser Arbeit.

7.1.5 Vergleich mit den Resultaten von Lunk (Wasseraufsaugversuch)

Die vorstehend erläuterten Resultate stehen grundsätzlich mit den Ergebnissen der Arbeiten von Lunk und Wittmann [Lunk 1998a] in Übereinstimmung, insbesondere auch was die Wirkung von Silikastaub betrifft. Diese Ergebnisse weisen darauf hin, dass der im ibac-Test (wie auch im ASTM-Schnelltest) gefundene sehr günstige Einfluss von Silikastaub nicht methodisch bedingt, sondern effektiv vorhanden ist.

Lunk setzte den Wasseraufsaugversuch mit und ohne Chlorid zur Charakterisierung des Chloridwiderstandes von Betonen ein [Lunk 1997, 1998a]. Mit diesen Versuchen stellte er fest, dass die kapillare Wasseraufnahme

- mit abnehmendem w/z-Wert und abnehmender Porosität abnimmt.
- mit abnehmendem Feuchtigkeitsgehalt grösser wird.
- bei der Verwendung von Hochofen- und Flugaschezement sowie durch die Zugabe von Silikastaub und - in geringerer Masse - durch Luftporenbildner reduziert werden kann.

Die zeitliche Wasseraufnahme (Masse, Eindringtiefe) wurde durch ein allgemeines Potenzgesetz beschrieben:

- Masse: $m = a t^{n1}$
- Tiefe: $x = b t^{n2}$

Das Potenzgesetz wurde gewählt, weil das kapillare Saugen vom \sqrt{t} - Gesetz mit $n = 0.5$ abwich. Die gefundenen Werte für die verschiedenen Parameter sind in der **Tabelle 7.1** zusammengestellt. Daraus geht hervor, dass die Abweichung vom \sqrt{t} - Gesetz um so grösser ausfällt, je kleiner die Massenzunahme und die Eindringtiefe ist. Die tiefsten Werte weisen der Beton mit einem w/z-Wert von 0.3 und der Beton mit Silikastaub auf.

Ein Vergleich mit Literaturdaten ist nicht möglich, da solche fehlen.

Einfluss	a, kg/m ² h ⁿ¹	n1	b, mm/h ⁿ²	n2
w/z-Wert				
0.7	1.09	0.38	11.69	0.38
0.6	0.82	0.36	9.91	0.36
0.5	0.55	0.32	8.63	0.32
0.4	0.32	0.28	6.28	0.28
0.3	0.20	0.25	5.06	0.27
Zementart und Zusätze (w/z- bzw. w/B-Wert: 0.5)				
Portlandzement mit hohem Sulfatwiderstand	0.51	0.37	8.00	0.37
Portlandzement (CEM I)	0.55	0.32	8.63	0.32
Flugaschezement	0.48	0.24	7.44	0.26
Flugaschehüttensandzement	0.41	0.25	6.82	0.27
Hochofenzement	0.38	0.24	6.58	0.26
Portlandzement mit Silikastaub	0.30	0.25	5.74	0.26

Tabelle 7.1: Zusammenstellung der Parameter des kapillaren Saugens [Lunk 1998a].

7.1.6 Zusammenfassung

Die in den **Bildern 7.1 bis 7.11** gezeigten Resultate sind in der **Tabelle 7.2** in Kurzform zusammengefasst. Daraus geht hervor, dass bei den meisten Einflüssen zwischen dieser Arbeit und der Literatur eine weitgehende Übereinstimmung vorhanden ist. Weiter sei darauf hingewiesen, dass eine Kombination von Betonzusatzstoffen (z.B. Silikastaub mit Hüttensand oder Flugasche) teilweise zu noch besseren Resultaten führt. Solche Kombinationen wurden in dieser Arbeit aber nicht geprüft.

Einfluss	Kommentar zu den Ergebnissen	
	Literaturergebnisse	Eigene Ergebnisse
Zementart bzw. Betonzusatzstoffe (bei ähnlichem w/z- bzw. w/B-Wert:		
<ul style="list-style-type: none"> Portlandzement 	Betone mit reinem Portlandzement (Normalbetone) weisen gegenüber Betonen mit Mischzementen (MS, HS, FA) oder mit Betonzusatzstoffen einen geringeren CI-R auf. Siehe Kapitel 4.1 .	Die Literaturergebnisse werden durch die eigenen Resultate weitgehend bestätigt. Siehe Bilder 6.5, 6.6, 7.1, 7.2, 7.4 bis 7.6
<ul style="list-style-type: none"> Silikastaub (MS) 	Betone mit einem MS-Gehalt von 5 bis 10 %/B weisen gegenüber Normalbetonen einen deutlich verbesserten CI-R auf. Siehe Kapitel 4.1 .	Die Literaturergebnisse werden durch die eigenen Resultate weitgehend bestätigt. Siehe Bilder 6.5, 6.6, 7.1, 7.2, 7.4 bis 7.6
<ul style="list-style-type: none"> Flugasche (FA) 	Betone mit einem FA-Gehalt >10 bis 20%/B weisen gegenüber Normalbetonen einen deutlich verbesserten CI-R auf. Siehe Kapitel 4.1 .	Bei den Betonen mit FA ist ein signifikanter Einfluss erst beim höheren Gehalten (>30%/z bzw. >20%/B) festzustellen. Die verwendete FA ist offenbar nicht sehr reaktiv. Siehe Bilder 6.5, 6.6, 7.1, 7.2, 7.4 bis 7.6
<ul style="list-style-type: none"> Hüttensand (HS) 	Betone mit einem HS-Gehalt >30%/B weisen gegenüber Normalbetonen einen deutlich verbesserten CI-R auf. Siehe Kapitel 4.1 .	Der Einfluss des HS-Gehaltes ist im Vergleich zu Literaturergebnissen generell weniger ausgeprägt und erst bei hohen Gehalten gut ersichtlich. Siehe Bilder 6.5, 6.6, 7.1, 7.2, 7.4 bis 7.6
Wasser-Zementwert (w/z-Wert) bzw. Wasser-Bindemittelwert (w/B-Wert)	Der CI-R nimmt mit abnehmendem w/z- bzw. w/B-Wert zu. Zwischen verschiedenen Betonsorten bestehen grössere Unterschiede. Bei gleichem w/z- bzw. w/B-Wert zeigen MS-haltige Betone die besten Resultate. Siehe Kapitel 4.2 .	Die Literaturergebnisse werden durch die eigenen Resultate bestätigt. Siehe Bilder 6.5, 6.10, 7.3 bis 7.5 .
Druckfestigkeit	Der CI-R nimmt mit zunehmender Druckfestigkeit tendenziell zu. Zwischen verschiedenen Betonsorten bestehen grössere Unterschiede (teilweise abhängig vom Prüfverfahren). Bei gleicher Druckfestigkeit weisen Betone mit MS, FA oder HS einen grösseren CI-R als Normalbetone auf. Siehe Kapitel 4.3 .	Die Literaturergebnisse werden durch die eigenen Resultate bestätigt. Siehe 6.6 bis 6.9, 6.12, 7.6 bis 7.10 .
Alter des Betons	Der CI-R von Betonen mit HS, FA und MS nimmt mit dem Alter stärker zu als jener von Normalbetonen. Siehe Kapitel 4.4 .	Die Literaturergebnisse werden durch die eigenen Resultate nur teilweise bestätigt, insbesondere nicht für MS-haltige Betone. Siehe Bilder 6.5, 6.6, 7.11 .

Tabelle 7.2: Vergleich der Resultate aus der Literatur und aus diesem Forschungsprojekt betr. der Einflüsse auf den Chloridwiderstand (CI-R).
FA: Flugasche; MS: Silikastaub; HS: Hüttensand

7.2 Vergleich und Beurteilung der Messverfahren zur Bestimmung des Chloridwiderstandes

Im **Kapitel 4.11** wurden die Ergebnisse aus verschiedenen Arbeiten miteinander verglichen. Die Korrelation zwischen den verschiedenen Verfahren ist im Allgemeinen nur mittelmässig. Die eigenen Resultate bestätigen dies weitgehend. Am Schlechtesten schneiden die Gaspermeabilität und der Wasseraufsaugversuch ab.

Die Wasserleitfähigkeit (**Bild 7.7**) als spezifisch schweizerisches Verfahren kann mit dem Wasseraufnahmekoeffizienten (**Bild 4.9**) verglichen werden. Tendenziell ergeben sich ähnliche Aussagen. Grundsätzlich stimmen sie auch mit den Ergebnissen von [Lunk 1998a] überein (**Kapitel 7.1.5**). Bei den Normalbetonen ist die Übereinstimmung mit den anderen Kenngrössen (Migrationskoeffizient, Leitfähigkeit, Ladungsmenge) recht gut (**Bild 6.6**). Demgegenüber sind bei den Betonen mit Betonzusatzstoffen grössere Unterschiede zu beobachten (**Bild 6.5**).

Für den Vergleich der verschiedenen Verfahren ist die bereits oben erwähnte Arbeit von Mackechnie und Alexander [Mackechnie 2000] sehr nützlich. Diese haben 30 Betonrezepturen mit verschiedenen Prüfverfahren untersucht:

- ASHTO T259-80 (Ponding-Test mit Bestimmung des Diffusionskoeffizienten aus den Chloridprofilen)
- ibac-Test
- Leitfähigkeits-Test (Streicher)
- ASTM-Schnelltest.

Es ist die bisher einzige publizierte Arbeit mit einer ähnlichen Zielsetzung wie dieses Projekt. In den **Bildern 7.12 bis 7.14** sind der Migrationskoeffizient, die Ladungsmenge und die Leitfähigkeit (Streicher) gegeneinander dargestellt. Dabei muss berücksichtigt werden, dass bei der vorliegenden Arbeit die Ladungsmenge und die Leitfähigkeit an 360 Tage alten Proben gemessen wurde. Aus diesen Bildern geht hervor, dass bei den Normalbetonen, den Bauwerksbetonen und den Betonen mit Flugasche zwischen zwei Kenngrössen eine mehr oder weniger lineare Beziehung vorhanden ist. Dies kann bei den Betonen mit Hüttensand und Mikrosilika nicht in allen Bildern festgestellt werden. Die Ursache hierfür ist nicht bekannt.

Die **Bilder 7.12 und 7.14** zeigen, dass unsere Werte für die Ladungsmenge deutlich höher liegen als jene von [Mackechnie 2000]. Dies wurde bereits in den vorhergehenden Kapiteln festgestellt und ist vermutlich auf prüftechnische Unterschiede zurückzuführen.

Demgegenüber stimmen die Migrationskoeffizienten und die Leitfähigkeiten bei den Normalbetonen gut überein (**Bilder 7.4 und 7.5**). Daraus darf man schliessen, dass für die schlechtere Übereinstimmung bei den Betonen mit Silikastaub, Flugasche oder Hüttensand vermutlich nicht prüftechnische, sondern eher materialtechnologische Gründe verantwortlich sind (**Kapitel 7.1.1**).

Die Ergebnisse der Wasseraufsaugversuche mit chloridhaltigem Wasser können nicht mit Literaturdaten verglichen werden, da dieses Verfahren von anderen Forschungsstellen bisher nicht eingesetzt wurde.

In **Bild 7.15** sind die Standardabweichungen in % vom Mittelwert beim ibac-Test dargestellt (eigene Versuche mit in der Regel drei Proben). Beim Migrationskoeffizienten muss im Mittel mit einer Standardabweichung von etwa $\pm 16\%$ gerechnet werden. Bei einer Vertrauensgrenze von 95% beträgt die Standardabweichung etwa $\pm 33\%$ (zweimal Standardabweichung) (**Bild 7.15a**). Die in unseren Messungen festgestellten Standardabweichungen liegen im gleichen Bereich wie jene von [Gehlen 2000] (**Bild 7.15b, oben**).

Eine Analyse der verschiedenen Fehlerquellen bei der Bestimmung des Migrationskoeffizienten wurde von [Tang 1996b] durchgeführt (**Bild 7.15b, unten**). Diese ergab, dass die Bestimmung der Chlorideindringtiefe die grösste Fehlerquelle darstellt. Dass die Bestimmung der Chlorideindringtiefe stark streuen kann, wurde auch von [Andrade 1999a,b] gefunden.

Die **Tabelle 7.3** gibt einen Überblick über die Güte der Korrelationen zwischen den verschiedenen, in diesem Projekt eingesetzten Prüfverfahren mit den Werten aller Betone. Die Korrelationen zwischen den verschiedenen Verfahren sind unterschiedlich, in der Regel aber nicht besonders gut. Werden nur die Werte von gleichartigen Betonen verwendet, z.B. nur von den Normalbetonen, sind die Korrelationen teilweise besser. Allerdings ist dann in der Regel auch die Datenmenge gering und zuverlässige Aussagen sind kaum mehr möglich.

Zur Beurteilung der möglichen Laborprüfungen des Chloridwiderstandes wurden verschiedene Kriterien angewendet (**Tabelle 7.4**). Aus dieser Zusammenstellung geht hervor, dass

- alle Verfahren ihre Vor- und Nachteile haben.
- die Güte der Korrelationen beim ibac- und Streicher-Test sowie bei der Wasserleitfähigkeitsprüfung besser ist als beim ASTM-Schnelltest. Beim Wasseraufsaugversuch ist keine gesicherte oder abschliessende Beurteilung möglich.
- nur beim ibac-Test und bei der Wasserleitfähigkeit Werte für die Wiederhol- und Vergleichsstandardabweichung vorliegen [Gehlen 2000] (**Bild 7.15b, oben**).
- Beurteilungskriterien - abgesehen vom ASTM-Schnelltest - nicht in einer Norm fixiert sind.
- der ASTM-Schnelltest, der ibac-Test, der Streicher-Test und die Wasserleitfähigkeitsmessung als routinemässige Laborprüfung grundsätzlich geeignet sind, nicht aber der Aufsaugversuch mit chloridhaltigem Wasser.

Für die Umsetzung der Null-Unterhalts-Strategie und für die Dauerhaftigkeitsbemessung von neuen sowie für Zustandsbeurteilungen von bestehenden Stahlbetonbauten werden Simulationsrechnungen und Prognosen in Zukunft immer wichtiger. In diesem Sinne hat der ibac-Test, der Kenngrössen für mehr oder weniger etablierte Modelle liefert, gegenüber dem Streicher-Test oder der Wasserleitfähigkeit unbestreitbare Vorteile. Dieses Verfahren dürfte zudem die grösste Chance haben als EN-Norm eingeführt zu werden. Bei der Wasserleitfähigkeitsprüfung und dem Aufsaugversuch müsste der Einfluss der Versuchsanordnung (z.B. der Abdeckung der Mantelfläche) geklärt werden.

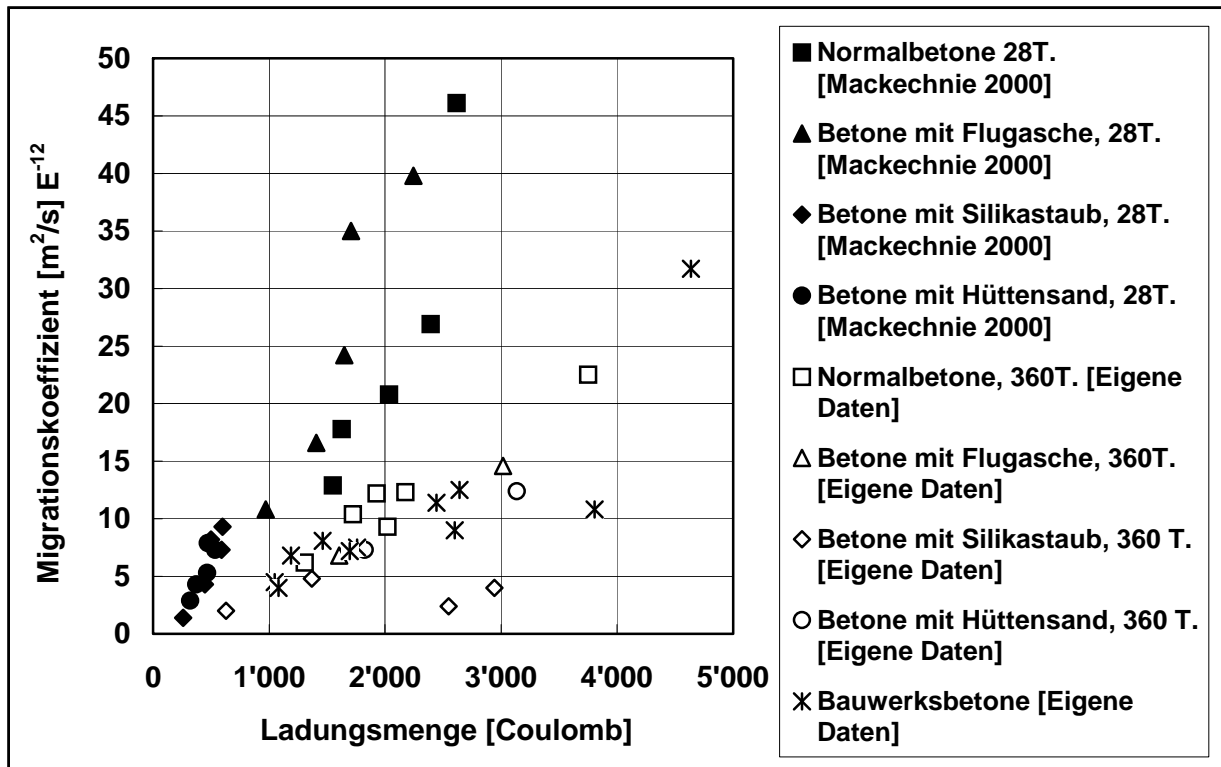


Bild 7.12: Beziehung zwischen Chloridmigrationskoeffizient (ibac-Test) und Ladungsmenge (ASTM-Schnelltest). Die Daten von [Mackechnie 2000] entsprechen den 28-Tage-Werten, die eigenen Daten stammen von 360 Tage alten Laborproben und älteren Bauwerksproben.

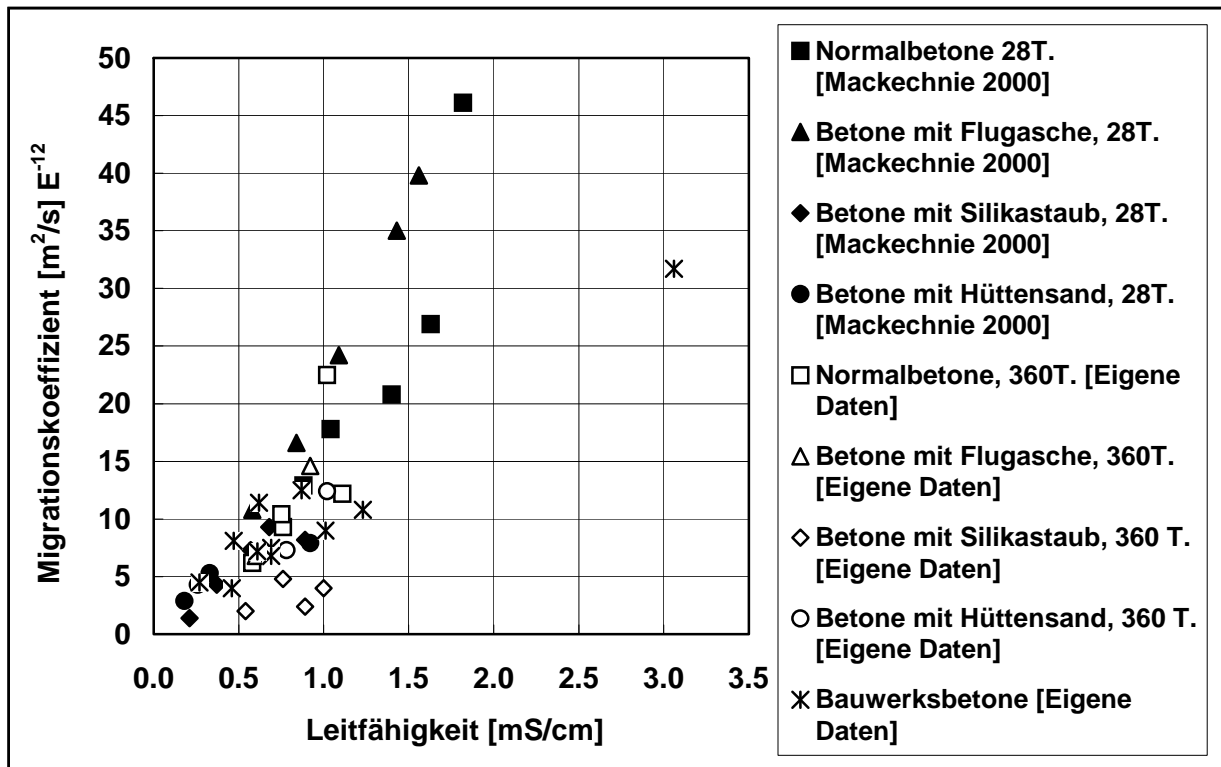


Bild 7.13: Beziehung zwischen Chloridmigrationskoeffizient (ibac-Test) und Leitfähigkeit (Streicher). Daten von [Mackechnie 2000]: 28-Tage-Werte; eigene Daten: 360 Tage alte Laborproben und Bauwerksproben.

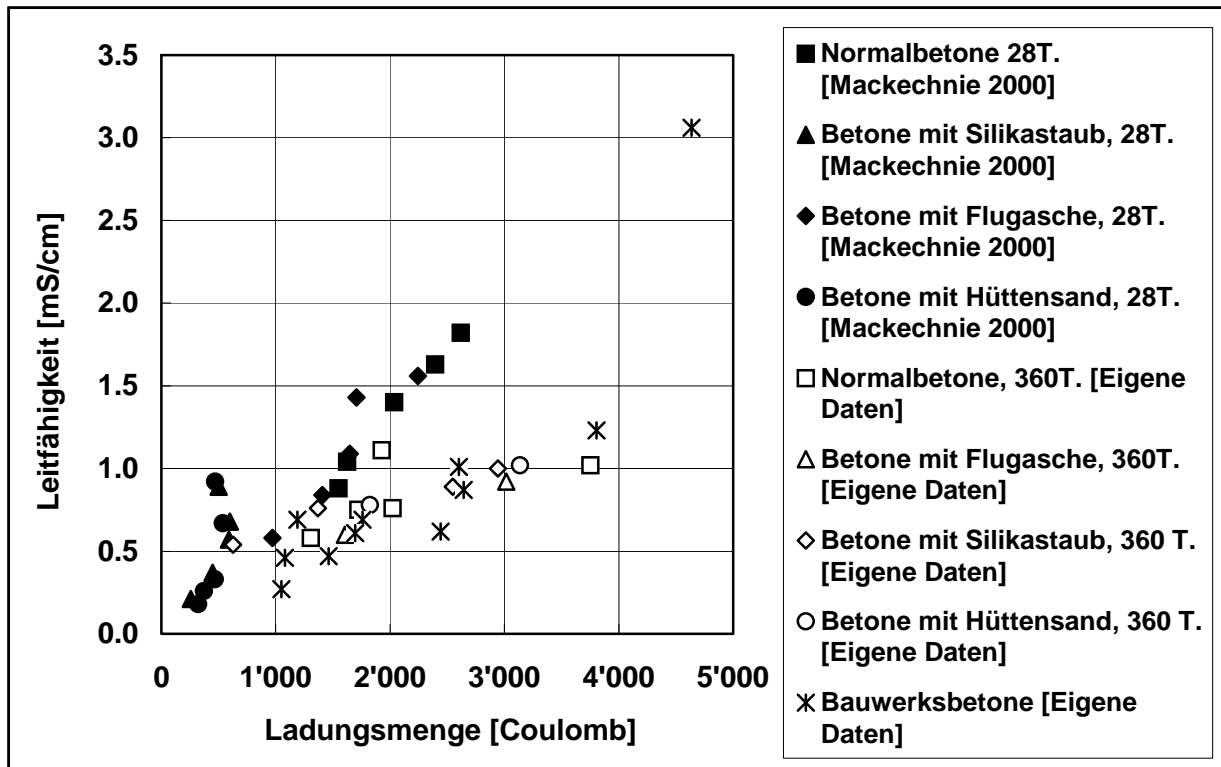


Bild 7.14: Beziehung zwischen Leitfähigkeit (Streicher) und Ladungsmenge (ASTM-Schnelltest). Daten von [Mackechnie 2000]: 28-Tage-Werte; eigene Daten: 360 Tage alte Laborproben und Bauwerksproben.

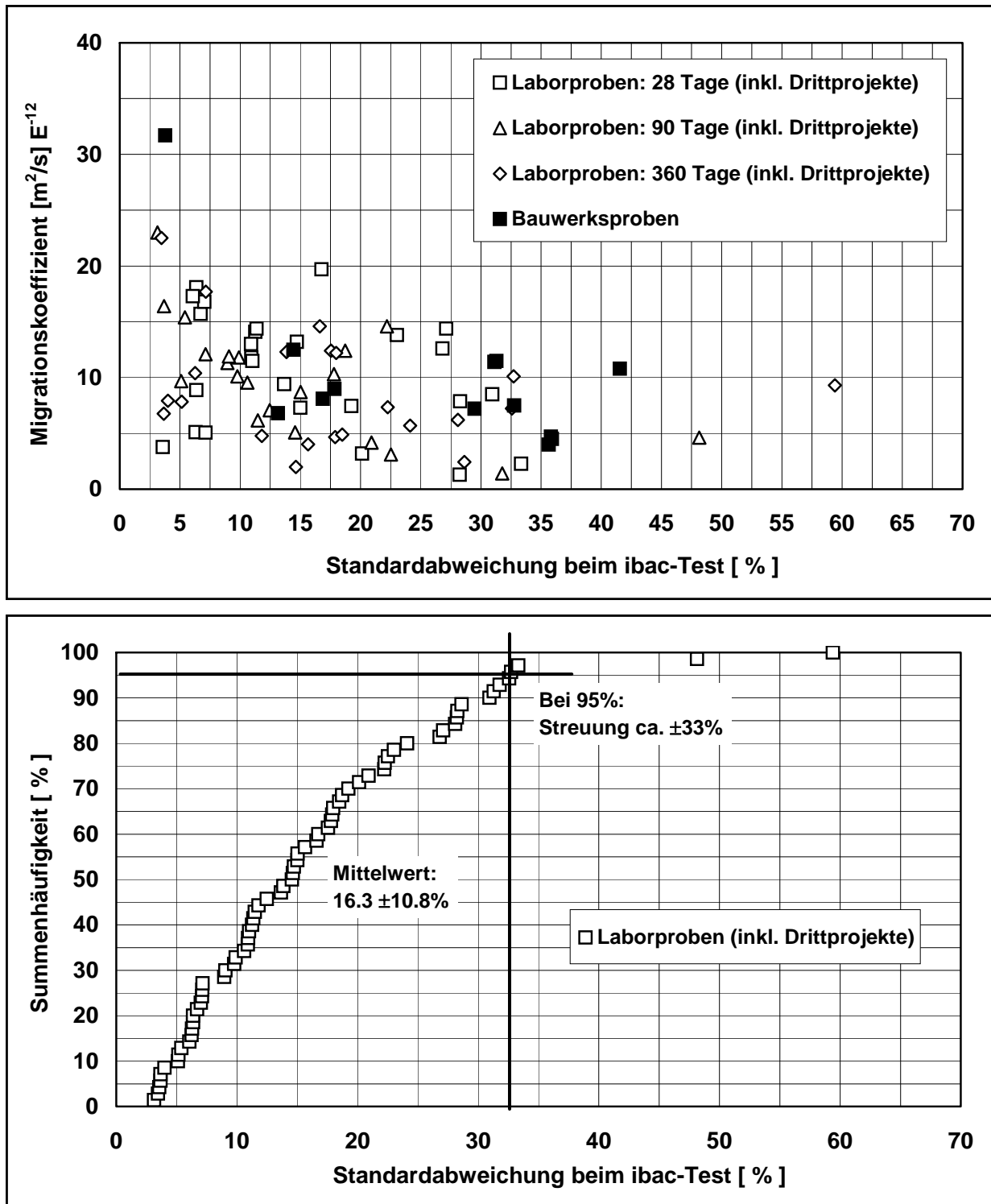


Bild 7.15a: Oben: Standardabweichung in % vom Mittelwert von in der Regel 3 Proben beim ibac-Test in Abhängigkeit vom mittleren Migrationskoeffizienten (eigene Versuche).
Unten: Summenhäufigkeitskurve der Standardabweichungen (% vom Mittelwert) beim ibac-Test.

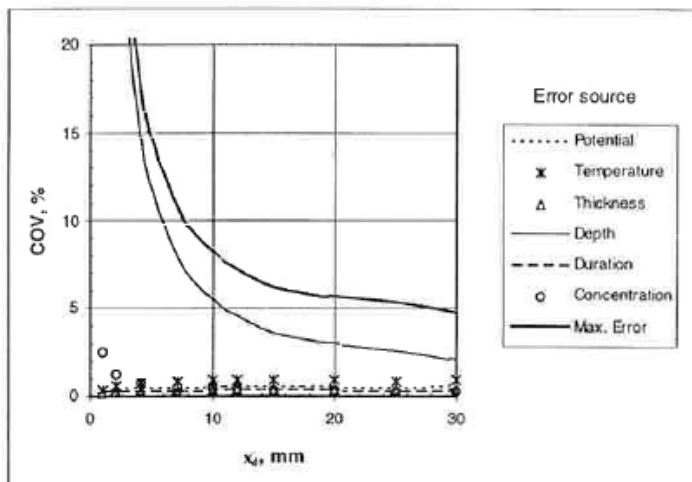
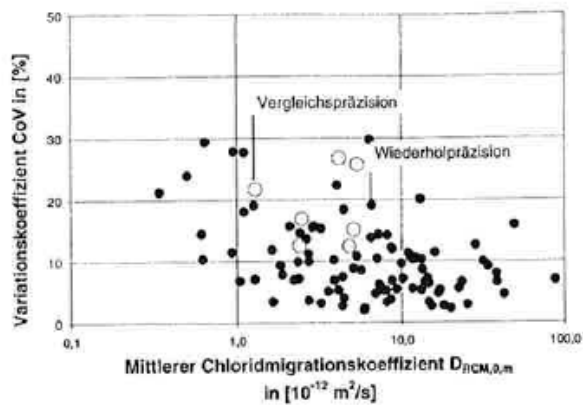


Bild 7.15b: Oben: Variationskoeffizient (CoV, Standardabweichung in % vom Mittelwert) in Abhängigkeit vom mittleren Chloridmigrationskoeffizienten. Eingetragen ist die Wiederhol- und Vergleichsstandardabweichung (hier als Präzision bezeichnet) [Gehlen 2000].

Unten: Variationskoeffizient (CoV) in Abhängigkeit von der Eindringtiefe. Einfluss verschiedener Fehlerquellen [Tang 1996b].

Verfahren zur Bestimmung des Chloridwiderstandes		Verfahren zur Bestimmung des Chloridwiderstandes				
		ASTM-Schnelltest	ibac- bzw. CTH-Test	Leitfähigkeit (Streicher-Test)	Wasserleitfähigkeit	Gas-permeabilität
ASTM-Schnelltest						
ibac- bzw. CTH-Test		gut				
Leitfähigkeit (Streicher-Test)		gut	mittel			
Wasserleitfähigkeit		mittel	mittel	schlecht		
Gaspermeabilität		schlecht	schlecht	schlecht	schlecht	
Wasseraufsaugversuch	1)	mittel	mittel	mittel	mittel	schlecht
	2)	schlecht	schlecht	schlecht	schlecht	schlecht
	3)	schlecht	schlecht	mittel	schlecht	schlecht

1) bzgl. Chloridgehalt in 0 - 10mm Tiefe.

2) bzgl. mittlerer Tiefe der Chloridanreicherung (Chloridgehalt über der aus der Porosität berechneten Sollkonzentration)

3) bzgl. Differenz des Chloridgehaltes an der Oberfläche (0 – 10mm Tiefe) zu der aus der Porosität berechneten Sollkonzentration

Tabelle 7.3: Qualitative Beurteilung der Korrelation zwischen den verschiedenen Verfahren zur Bestimmung des Chloridwiderstandes. Berücksichtigt wurden die 360-Tage-Werte. Die Korrelationskoeffizienten sind im **Anhang 2** aufgelistet.

Beurteilung: Korrelationskoeffizienten <0.4: schlecht; 0.4 bis 0.6: mittel; >0.6: gut.

Kriterien	Verfahren zur Bestimmung des Chloridwiderstandes				
	ASTM-Schnelltest	ibac- bzw. CTH-Test	Leitfähigkeit (Streicher-Test)	Wasserleitfähigkeit	Wasser-aufsaugversuch
Probenmaterial	3 BK, H: 50mm, Ø 50 oder 95mm	3 BK, H: 50mm, Ø 50mm	3 BK, H: 30mm Ø 50mm oder 100mm	3 BK, H: ≥50mm, Ø 50mm	3 BK, H: ≥100mm, Ø 50mm
Zeitbedarf für Proben-vorbereitung und Prüfung	5 Tage	8 Tage	10 Tage	14 Tage	3 Wochen
Hauptproblem, -nachteil	Verschiedene Details sind in der Norm ungenügend geregelt (Vorbehandlung)	Bei unbekanntem Verhalten des Betons, Vorversuche notwendig (i.A. 20 V, 24 h)	keine Kenngrösse für die Simulation, Prognosen oder Lebensdauerberechnung kleine Chance als EN-Norm	keine Kenngrösse für die Simulation, Prognosen oder Lebensdauerberechnung kaum Chance als EN-Norm	Auswertung keine Kenngrösse für die Simulation, Prognosen oder Lebensdauerberechnung kaum Chance als EN-Norm
Fehleranfälligkeit, praktische Handhabung, Probleme, Schwachstellen	Probeneinbau ist heikel ständige Überwachung notwendig (evtl. Lösung wechseln)	Messfehler bei kleinen Eindringtiefen	volle und gleichmässige Sättigung mit der Chloridlösung Fehlmessung (seitliche Abdichtung der Proben kritisch) Einbau ohne Luftblasen, Kontakt Elektrode/Probe	Probenvorbehandlung (ausreichende Trocknung der Proben) Einfluss der Abdeckung der Mantelfläche ist zu klären	Probenvorbehandlung (ausreichende Trocknung der Probe) Einfluss der Abdeckung der Mantelfläche ist zu klären
Überprüfbarkeit der Messergebnisse	nein	ja	ja (mehrmaliges Messen der gleichen Probe möglich)	(ja) (evtl. Wiederholung der Messung möglich)	nein

Tabelle 7.4: Beurteilung der verschiedenen Verfahren zur Bestimmung des Chloridwiderstandes.

Fortsetzung: nächste Seite

Fortsetzung

Kriterien	Verfahren zur Bestimmung des Chloridwiderstandes				
	ASTM-Schnelltest	ibac- bzw. CTH-Test	Leitfähigkeit (Streicher-Test)	Wasserleitfähigkeit	Wasser-aufsaugversuch
Güte der Korrelation zu anderen Kenngrössen (Tabelle 7.3)	mittel bis gut ¹⁾	mittel bis gut ¹⁾	schlecht bis gut ¹⁾	schlecht bis mittel ¹⁾	schlecht bis mittel
Wiederholstandardabweichung	?	[Gehlen 2000]: 20%	?	VPL ²⁾ : $\pm 0.5 \text{g/m}^2 \text{h}$ (10%)	fehlt
Vergleichsstandardabweichung	?	[Gehlen 2000]: 12 - 27%	?	VPL ²⁾ : $\pm 1.5 \text{g/m}^2 \text{h}$ (30%)	fehlt
Mittlere Standardabweichung der Einzelwerte (eigene Erfahrungen)	220 Coulomb (11%)	$1.4 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ (16%)	0.2mS/cm (20%)	$0.4 \text{g/m}^2 \text{ h}$ (13%)	keine Angaben mögliche, da Datenmenge zu gering
preisbestimmende Faktoren	Zeit (während Versuch)	Zeit (vor und nach Versuch)	Zeit (vor und nach Versuch)	Zeit (vor und nach Versuch)	Zeit für Versuch, Cl ⁻ -Analysen (Beton)
Beurteilungskriterien	gemäss Norm (Tabelle 4.5)	offen (Erfahrungswerte, Norm SIA 262/1 ³⁾)	gemäss Streicher (Tabelle 4.7)	offen (Erfahrungswerte)	?
grundsätzliche Eignung als Laborprüfung	ja	ja	ja	ja	nein
Hauptvorteil	eingeführte Norm	evtl. Chance als EN-Norm (RILEM)	evtl. selektiver bei sehr dichten Betonen	in der Schweiz als Norm anerkannt	
Empfehlung	nicht mehr verwenden	verwenden	(verwenden? Evtl. für bestehende, chlorid-verseuchte Bauwerke)	(verwenden?)	nicht verwenden

1) Ohne Gaspermeabilität und Wasseraufsaugversuch

2) Aus einem Ringversuch des VPL.

3) Hierzu wurde das Projekt „Betoneigenschaften gemäss SN EN 206-1:2000“ gestartet (Finanzierung durch das ASTRA und die EMPA sowie durch die Verbände cemsuisse, FSHBZ, SBV, SIA und VSTB).

Tabelle 7.4: Beurteilung der verschiedenen Verfahren zur Bestimmung des Chloridwiderstandes (**Fortsetzung**).

7.3 Korrelation zwischen den verschiedenen Verfahren zur Bestimmung des Chloridwiderstandes mit materialtechnologischen Kenngrössen

Die **Tabelle 7.5** fasst die Korrelationen zwischen den verschiedenen Verfahren zur Bestimmung des Chloridwiderstandes und den materialtechnologischen Kenngrössen zusammen (**Kapitel 6.1.5**). Die besten Korrelationen sind sehr unterschiedlich. Dies ist nicht weiter erstaunlich, da dafür die Werte aller Betone verwendet wurde. Die Korrelationen sind teilweise besser, wenn nur die Werte von gleichartigen Betonen, z.B. nur Normalbetone, benutzt werden. Allerdings ist dann auch die Datenmenge in der Regel gering und zuverlässige Aussagen sind kaum möglich.

Beim Wasseraufsaugversuch liegen zu wenige Resultate für eine zuverlässige Beurteilung vor. Aus der Literatur ist aber bekannt, dass zwischen Wasseraufnahme und w/B-Wert bzw. Porosität eine enge Beziehung herrscht [Sosoro 1995, Lunk 1997]. Bei dem im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten Wasseraufsaugversuch (**Kapitel 6.3**) konnte nicht abschliessend ermittelt werden, welche der möglichen Parameter (Chloridgehalt in 0 - 10mm Tiefe, mittlerer Tiefe der Chloridanreicherung oder die Chloridanreicherung an der Oberfläche) sich als Kenngrössen für die Beurteilung und Charakterisierung eignen. Hierfür wären weitere Untersuchungen erforderlich.

Im Übrigen konnte zwischen den Kenngrössen für den Chloridwiderstand bei den untersuchten Betonmischungen (Laborbetone und Betone aus Drittprojekten) weder mit dem Gesamtwassergehalt in der Betonmischung noch mit dem Zementsteinvolumen ein allgemein gültiger Zusammenhang gefunden werden (**Bild 7.16**). Die Datenmenge ist allerdings gering und es ist nicht auszuschliessen, dass ein solcher für gleichartige Betone besteht, bei denen nur das Zementsteinvolumen oder der Gesamtwassergehalt verändert wird.

Verfahren zur Bestimmung des Chloridwiderstandes		Materialtechnologische Kenngrössen		
		Druckfestigkeit	w/B-Wert	Kapillarporosität
ASTM-Schnelltest		gut	mittel	gut
ibac- bzw. CTH-Test		mittel (gut)	mittel (schlecht)	schlecht (schlecht)
Leitfähigkeit (Streicher-Test)		schlecht	schlecht	mittel
Wasserleitfähigkeit		mittel (mittel)	gut (schlecht)	schlecht (gut)
Gaspermeabilität		schlecht	gut	schlecht
Wasseraufsaugversuch (nur wenige Ergebnisse)	1)	schlecht	mittel	mittel
	2)	schlecht	schlecht	schlecht
	3)	schlecht	mittel	mittel

1) bzgl. Chloridgehalt in 0 - 10mm Tiefe.

2) bzgl. mittlerer Tiefe der Chloridanreicherung (Chloridgehalt über der aus der Porosität berechneten Sollkonzentration)

3) bzgl. Chloridanreicherung (Differenz des Chloridgehaltes zu der aus der Porosität berechneten Sollkonzentration) an der Oberfläche, d.h. in 0 – 10mm Tiefe

Tabelle 7.5: Korrelation zwischen den verschiedenen Verfahren zur Bestimmung des Chloridwiderstandes und materialtechnologischen Kenngrössen (360-Tage-Werte). In Klammern: 28-Tage-Werte.

Die Korrelationskoeffizienten sind im **Anhang 2** aufgelistet. Beurteilung: Korrelationskoeffizienten <0.4: schlecht; 0.4 bis 0.6: mittel; >0.6: gut.

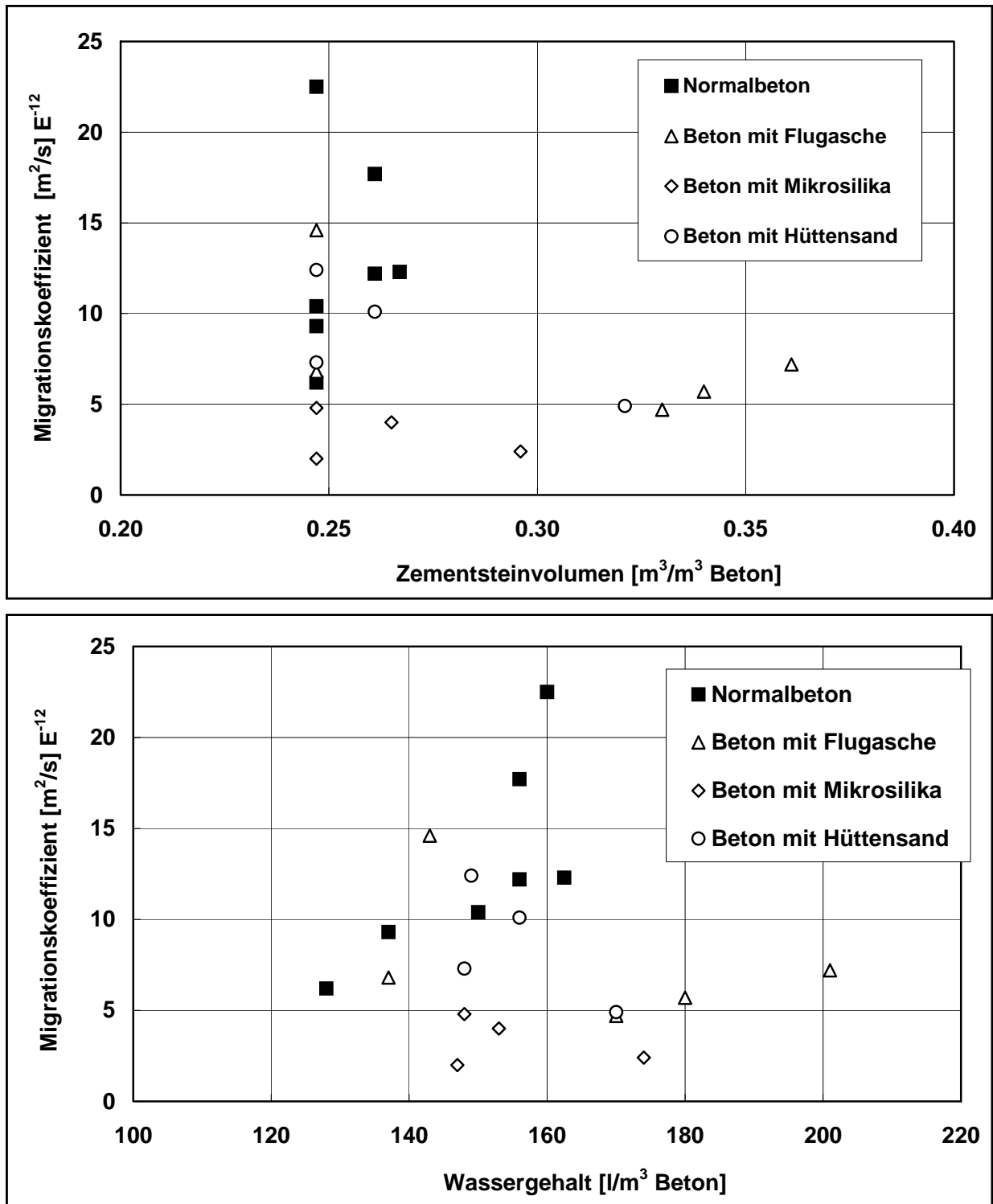


Bild 7.16: Beziehung zwischen Chloridmigrationskoeffizient und Zementsteinvolumen (oben) bzw. Gesamtwassergehalt (unten) (360-Tage-Werte).

7.4 Vergleich der Bauwerksbetone mit den Laborbetonen, Übertragbarkeit der Resultate

Die Resultate an Bauwerksproben können, von ganz wenigen Ausnahmen abgesehen, problemlos mit den Resultaten an den Laborbetonen oder den Betonen von Drittprojekten verglichen werden.

Als Ausnahme ist neben dem Nischenbeton auch der Beton der Europabrücke zu betrachten (**Kapitel 6 und 7**). Bei der Europabrücke weisen die gemessenen Werte für den Migrationskoeffizienten, die Wasserleitfähigkeit und die Ladungsmenge trotz sehr hoher Festigkeit auf einen eher tiefen Chloridwiderstand des Betons hin. Die Ergebnisse passen nicht in das Gesamtbild. Die Ursache hierfür ist nicht klar.

Die Bauwerksbetone weisen - abgesehen von einigen wenigen Ausnahmen – erwartungsgemässe Werte für die Druckfestigkeit, Kapillarporosität und Wasserleitfähigkeit auf.

Auffallend ist, dass die Kenngrössen für den Chloridwiderstand von Bauwerksbetonen im Allgemeinen deutlich besser sind als die Werte von ähnlich zusammengesetzten Laborbetonen (**Tabelle 6.3**). Mit grosser Sicherheit ist dies auf das unterschiedliche Alter zurückzuführen.

Die **Bilder 7.17 bis 7.20** zeigen einige Chloridprofile von verschiedenen Bauwerken mit den zugehörigen Migrationskoeffizienten und, soweit vorhanden, mit weiteren Kenngrössen. Die einzelnen Kenngrössen variieren bis etwa zu einem Faktor 3. **Bild 7.18** zeigt die grossen Schwankungen über die Länge der Galerie Harzbüchel in St. Gallen. Die bei den Bauwerksbetonen gemessenen Werte entsprechen etwa einem Normalbeton mit einem w/z -Wert <0.4 im Alter von 28 Tagen. Damals wurden aber kaum Betone mit sehr tiefen w/z -Werten eingesetzt. Die im heutigen Zustand teilweise recht hohen Chloridwiderstände sind deshalb primär auf die Nachhydratation des Zementes zurückzuführen.

Für einen korrekten und gesicherten Vergleich müssten die 28-Tage-Werte für die Bauwerksbetone zur Verfügung stehen. Damals wurde aber in der Regel nur die Druckfestigkeit gemessen. Leider sind auch diese Daten nur in Ausnahmefällen vorhanden. Trotzdem stellt die Druckfestigkeit die einzig mögliche Bezugsgrösse für Korrelationen dar, da eine Rückrechnung von aktuellen Werten möglich ist (**Kapitel 7.5**).

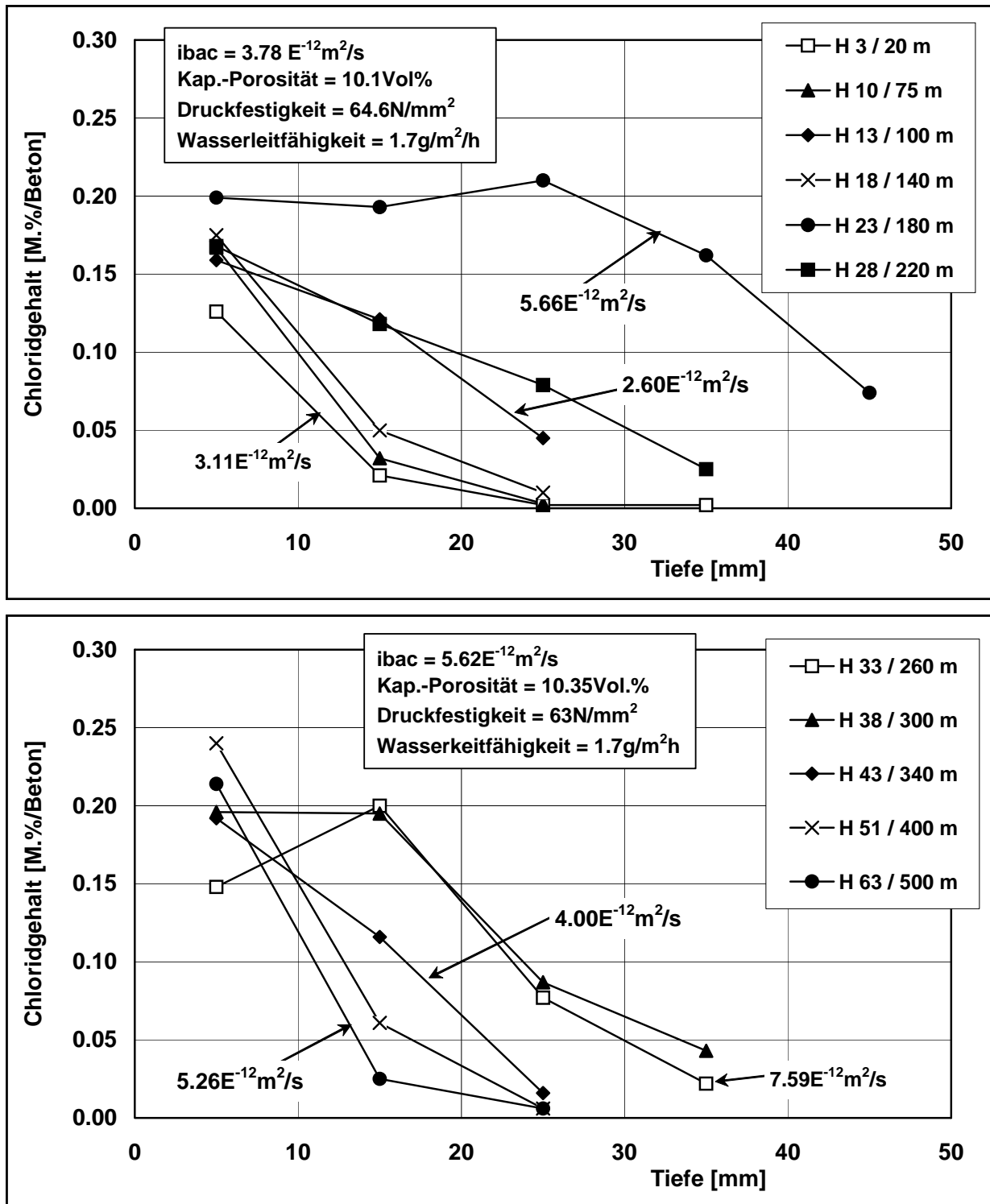


Bild 7.17a: Chloridprofile der Aussenseite der Mittelwand der Galerie Harzbüchel, Stadt St. Gallen, mit den zugehörigen Migrationskoeffizienten, welche am inneren Teil des Bohrkerns bestimmt wurden. Eingetragen sind zudem verschiedene Kenngrößen des Betons.

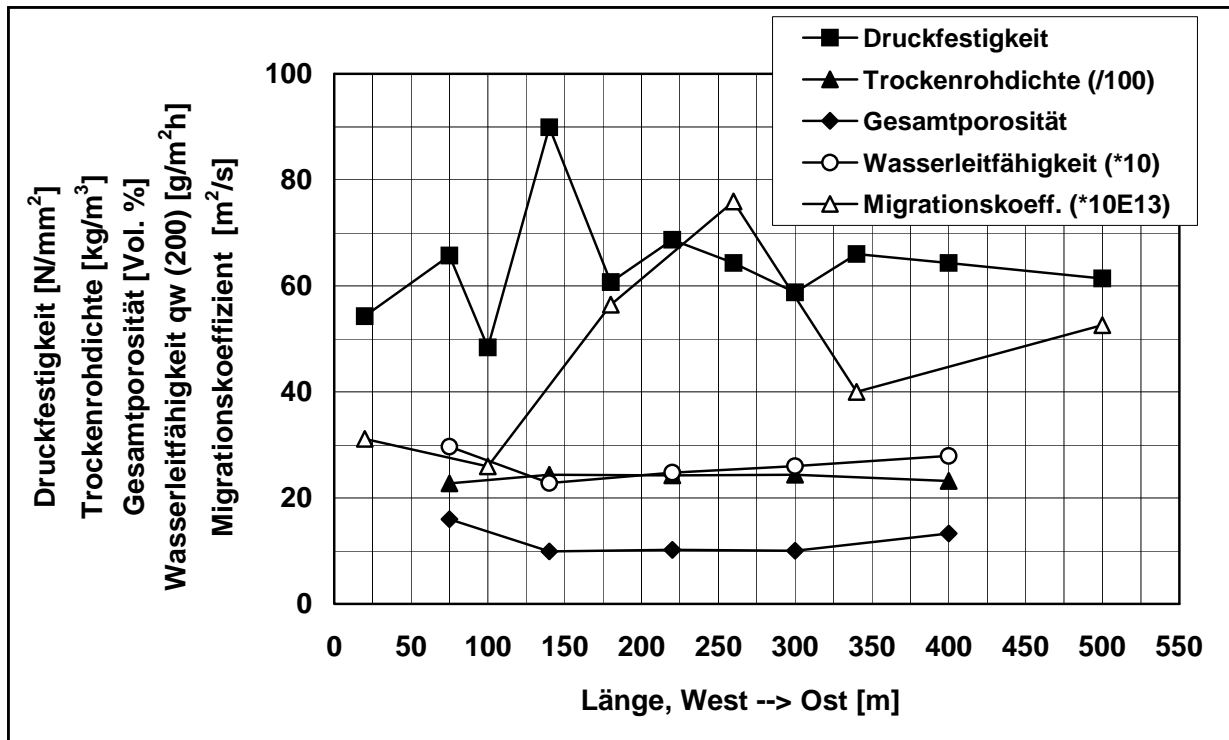


Bild 7.18: Druckfestigkeit, Trockenrohddichte, Gesamtporosität und Wasserleitfähigkeit der Aussenseite der Mittelwand der Galerie Harzbüchel, Stadt St. Gallen, mit den zugehörigen Migrationskoeffizienten, die am inneren Teil der Bohrkerne bestimmt wurden.

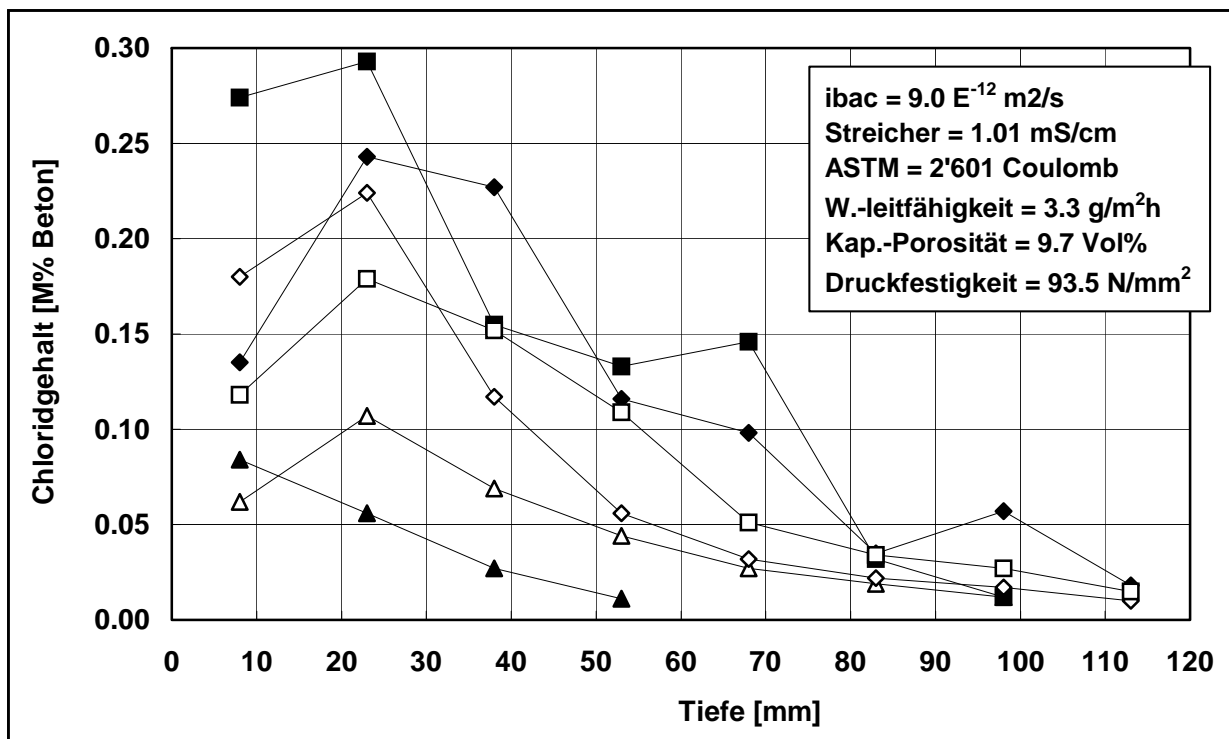


Bild 7.19: Chloridprofile aus der Innen- und Aussenseite des Stegs des Hohlkastens der Europabrücke. Eingetragen sind zudem verschiedene Kenngrößen des Betons.

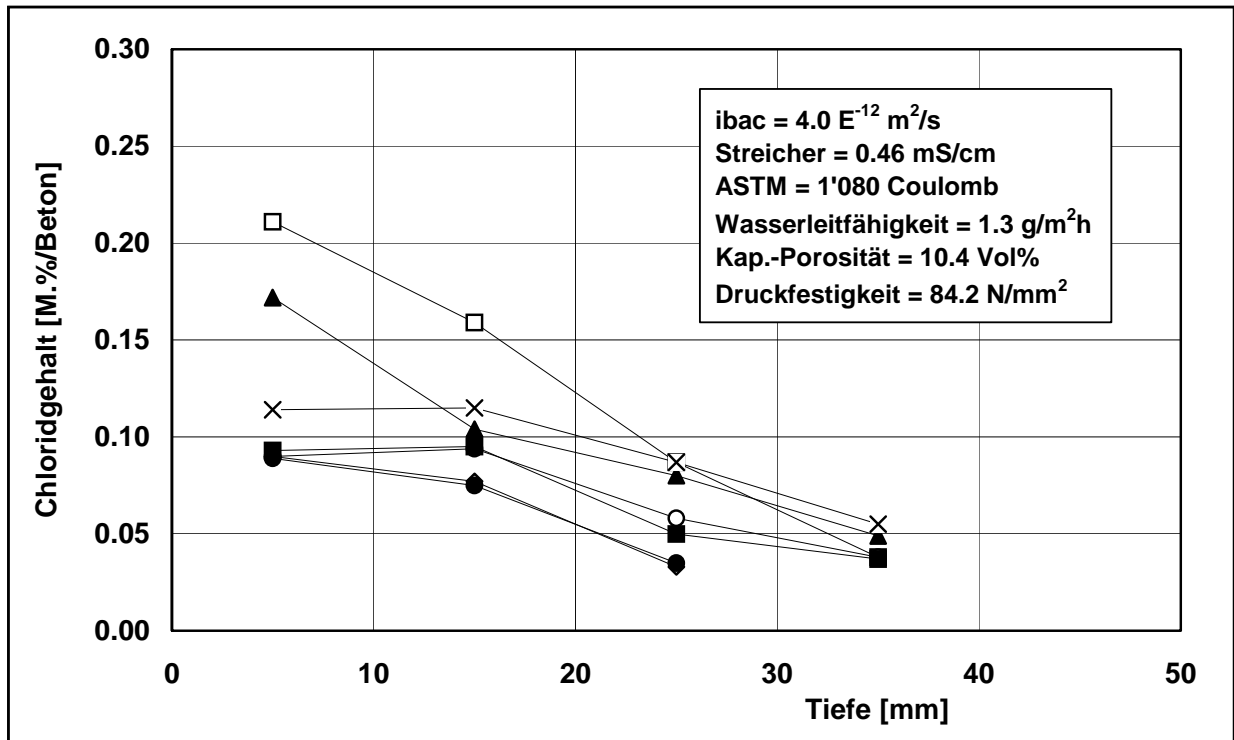


Bild 7.20: Chloridprofile aus der Fahrbahnplatte der Arsenalbrücke. Eingetragen sind zudem verschiedene Kenngrößen des Betons.

7.5 Anforderungen an Beton für Bauteile mit hohem Chloridwiderstand

Im **Kapitel 7.1.3** wurde festgestellt, dass die Kenngrößen für den Chloridwiderstand bei den Bauwerksbetonen wegen des höheren Alters deutlich besser sind als jene der vergleichbaren Laborbetone. Die vorhandenen Ergebnisse an Bauwerksproben (Chloridprofile und Kenngrößen für Chloridwiderstand) deuten an, dass die Anforderungen an den Chloridwiderstand recht hoch angesetzt werden müssen, damit Bauwerke oder Bauteile, die stark chloridhaltigem Wasser ausgesetzt sind, die im Tiefbau erwartete Nutzungszeit von 70 bis 100 Jahren ohne wesentlichen Unterhalt erreichen können.

Um einen groben Hinweis auf die möglichen 28-Tage-Werte für den Migrationskoeffizienten und die Wasserleitfähigkeit als Kenngrößen des Chloridwiderstandes zu erhalten, wurde die Druckfestigkeit der Bauwerksbetone auf 28 Tage zurück gerechnet (**Bilder 7.21 und 7.22**). Für die Rückrechnung wurde die "EMPA-Formel" (**Gleichung 7.6**) verwendet.

$$f_{cw,28\text{-Tage}} = \frac{f_{c,Prüfalter}}{0.41(\log[\text{Alter}] + 1)} \quad (\text{Gl. 7.6})$$

Dabei bedeuten:

$f_{cw, 28\text{-Tage}}$:	28-Tage-Druckfestigkeit
$f_{c, Prüfalter}$:	Druckfestigkeit der Proben bei der Prüfung
Alter:	Alter der Proben bei der Prüfung in Jahren

Mit der graphischen Auswertung nach [Wood 1991] liegen die Werte generell um etwa 10N/mm^2 höher, was in Anbetracht der damals vermutlich gestellten Anforderungen und der damaligen Betontechnologie eher unrealistisch ist. Im Folgenden wird deshalb nur die "EMPA-Formel" verwendet, da diese die Wirklichkeit nach unserer Einschätzung besser wiedergibt.

Bei diesem Vorgehen wird angenommen, dass es sich bei den untersuchten Bauwerksbetonen um klassische Betone mit einem Portlandzement, d.h. ohne Betonzusatzstoffe, handelt. Die Rückrechnung zeigt, dass die meisten Bauwerksbetone im Alter von 28 Tagen eine Druckfestigkeit von etwa 30 bis 40 N/mm^2 hatten, was etwa einem w/z-Wert zwischen 0.5 und 0.7 entspricht.

Mit den zurück gerechneten Druckfestigkeiten können aus dem **Bild 7.21** die Migrationskoeffizienten und aus **Bild 7.22** die Wasserleitfähigkeit im Alter von 28 Tagen abgeschätzt werden (**Tabelle 7.6**). Die in **Bild 7.22** dargestellte Ausgleichskurve (Exponentialgleichung: $y = ax^b$, y: Wasserleitfähigkeit, x: Druckfestigkeit, a und b: Konstanten) lässt sich wie folgt darstellen:

$$y = 2'532 x^{-1.664}, \quad R^2 = 0.761 \quad (\text{Gl. 7.7})$$

Druckfestigkeit		Schätzwerte aus den Bildern 7.21 und 7.22 für:	
Alter: 20 bis 40 Jahre, N/mm ²	Alter: 28 Tage, N/mm ² 1)	Migrationskoeffizient, m ² /s	Wasserleitfähigkeit, g/m ² h
70 bis 100	30 bis 40	20 10 ⁻¹² bis 35 10 ⁻¹²	4 bis (9?)

1) Rückrechnung gemäss Gleichung 7.6 ("EMPA-Formel")

Tabelle 7.6: Abschätzung des Migrationskoeffizienten und der Wasserleitfähigkeit für Bauwerksbetone im Alter von 28 Tagen aus den **Bildern 7.21 und 7.22**.

Die geschätzten Migrationskoeffizienten liegen zwischen 20 und 35x10⁻¹² m²/s. Sie sind damit etwa um den Faktor 2 bis 4 höher als die heutigen Werte. Bei der Wasserleitfähigkeit ist der altersbedingte Unterschied etwas geringer.

Der Vergleich der **Bilder 7.21 und 7.22** deutet an, dass der ibac-Test selektiver ist und die damit bestimmten Migrationskoeffizienten weniger streuen als die Wasserleitfähigkeit. Die Migrationskoeffizienten der Bauwerksbetone ordnen sich ausgezeichnet in die Datenreihe der Laborbetone ein (siehe dazu auch **Kapitel 7.1.3**). Dies ist bei der Wasserleitfähigkeit nicht der Fall.

Die vorgefundenen Chloridprofile bei stark belasteten Bauteilen (**Bilder 7.17 bis 7.20**) mit hohen Chloridgehalten im Randbeton (bis 0.3M.% bez. Beton) und bis in sehr grosse Tiefen zeigen ebenfalls den geringen Chloridwiderstand des jungen Betons dieser Bauwerke an. Berücksichtigt man die Zusammenhänge aus **Bild 7.23** und die bei den Bauwerken gemessenen Chloridprofile, so lassen sich die minimalen Anforderungen an den Beton für Bauteile, die chloridhaltigem Wasser ausgesetzt sind, abschätzen (**Tabelle 7.7**). Dabei wird davon ausgegangen, dass bei derartigen Bauteilen, die Betonüberdeckung mindestens 40 bis 50mm beträgt.

Für höhere Überdeckungen sind höhere Migrationskoeffizienten zulässig. Bei der Erhöhung der Überdeckung von z.B. 40 auf 70mm ergibt sich aus **Bild 7.23**, dass der Migrationskoeffizient etwa dreimal höher sein darf, damit der Chloridgehalt auf Bewehrungsniveau erst nach Ablauf einer bestimmten Zeit den kritischen Wert erreicht. In der **Tabelle 7.7** wurde die zulässige Erhöhung mit einem Faktor von 2 bis 3 konservativ angesetzt. Dabei wurde berücksichtigt, dass die Wirkung des kapillaren Saugens in tieferen Betonschichten und das langfristige Zusammenwirken mit der Diffusion noch wenig erforscht sind.

Für die Expositionsklasse XD 2 können wegen mangelnder Erfahrung keine näheren Angaben gemacht werden. Es wird aber empfohlen, vorläufig die gleichen Werte zu verwenden wie bei der Expositionsklasse XD 3.

Will man die in der **Tabelle 7.7** aufgeführten Werte für den Migrationskoeffizienten für Abschätzungen, Prognosen oder Lebensdauerbetrachtungen benutzen, muss berücksichtigt werden, dass die gemessenen Chloridmigrationskoeffizienten bis zehnmal grösser sein können als die Chloriddiffusionskoeffizienten (**Bild 4.37**).

Abschliessend muss betont werden, dass die in **Bild 7.23** dargestellten Zusammenhänge auf einem reinen Diffusionsprozess bei den Chloriden basieren. Bei den Chloridprofilen von Bauwerken hat sicherlich teilweise auch das kapillare Saugen eine gewisse Rolle gespielt. Man darf aber davon ausgehen, dass das kapillare Saugen mit zunehmendem Abstand zur Betonoberfläche abnimmt (geringeres Austrocknen). Ob die Anforderungen gemäss **Tabelle 7.7** in der Tat ausreichend sind, kann erst mit der entsprechenden Erfahrung beurteilt werden.

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 7.7: Empfehlung für zulässige Einzelwerte für den 28-Tage-Migrationskoeffizienten von Betonen für die Expositionsklasse XD (Korrosion ausgelöst durch Chloride).

Damit die in der **Tabelle 7.7** angegebenen zulässigen Einzelwerte in der Praxis erreicht werden, müssen die prüftechnische und die Materialstreuung berücksichtigt werden. **Für eine 95%ige Wahrscheinlichkeit, dass die geforderten Werte erreicht werden, muss der anzustrebende Mittelwert um etwa 33% reduziert werden.**

Die in der **Tabelle 7.7** genannten Anforderungen sind als vorläufige Empfehlung zu betrachten. Im Rahmen des Projektes **Betoneigenschaften gemäss SN EN 206-1:2000**, das vom ASTRA und der EMPA sowie von verschiedenen Verbänden (cemuisse, FSHBZ, SBV, SIA und VSTB) finanziert wird, sollen weitere Erfahrungen gesammelt werden. Die vorgesehene Projektdauer beträgt zwei Jahre (2003 und 2004).

In Anbetracht der hohen volkswirtschaftlichen Kosten von frühzeitigen Korrosionsschäden an den Verkehrsbauten aus Stahl- und Spannbeton, müssen alle verfügbaren wirtschaftlichen Massnahmen umgesetzt werden, um dem Ziel des Null-Unterhaltes näher zu kommen. Die Anforderungen in **Tabelle 7.7** sind deshalb nicht als übertrieben zu betrachten. Sie können durch den Einsatz von Betonzusatzstoffen leichter erreicht werden als mit Normalbetonen (**Tabelle 7.8**). Dies gilt insbesondere für die Anforderungen bei der Expositionsklasse XD 3 und der geringeren Überdeckung. Die übrigen Anforderungen sollten mit heute im Tiefbau üblichen Betonen der Festigkeitsklasse B 40/30, die korrekt eingebracht, verdichtet und nachbehandelt werden, vermutlich knapp erreicht werden. Eventuell ist eine geringfügige Reduktion des w/z_{eq} - bzw. des w/B -Wertes erforderlich.

Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten selbstverdichtenden Betone von Drittprojekten unterscheiden sich nicht grundlegend in ihrem Verhalten von den übrigen Betonen. Es besteht deshalb vorläufig keinen Anlass, bei diesen Betonen andere Anforderungen an den Chloridmigrationskoeffizienten zu stellen.

Beton	w/z _{eq}	w/B	CEM I 42.5, kg/m ³	Betonzusatzstoff		Expositionsklasse	
				Art	%/Z	XD1	XD3
G	0.6	0.60	267			nein	nein
A	0.5	0.50	300			ja	nein
B	0.4	0.40	342			ja	ja (360 Tage)
C	0.35	0.35	367			ja	ja
I	0.5	0.50	277	Silikastaub	7	ja	ja
D	0.5	0.50	255	Silikastaub	15	ja	ja
K	0.5	0.46	269	Flugasche	15	ja	nein
E	0.5	0.43	244	Flugasche	30	ja	ja (90 Tage)
H	0.5	0.50	249	Hüttensand	20	ja	nein
F	0.5	0.50	186	Hüttensand	60	ja	ja (90 Tage)

Tabelle 7.8: Betonsorten, die die Anforderungen für eine Überdeckung von 40 bis 50 mm gemäss **Tabelle 7.7** erfüllen können. Prüfalalter in der Regel: 28 Tage.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Anforderungen gemäss **Tabelle 7.7** einen provisorischen Charakter haben und als Empfehlung zu betrachten sind. Sie müssen durch weitere Untersuchungen an Labor- und Bauwerksbetonen sowie durch Langzeiterfahrung gesichert werden. Insbesondere sollte mittels Modellrechnungen noch nachgewiesen werden, ob diese für sehr lange Nutzungszeiten (100 Jahre) ausreichend sind. Der Chloridmigrationskoeffizient ist eine Kenngrösse der Betonqualität, der, wie jeder andere Qualitätsparameter in Funktion der Nutzungsbedingungen des Bauwerks und der konstruktiven Verhältnisse (z.B. Überdeckung) beurteilt und festgelegt werden muss.

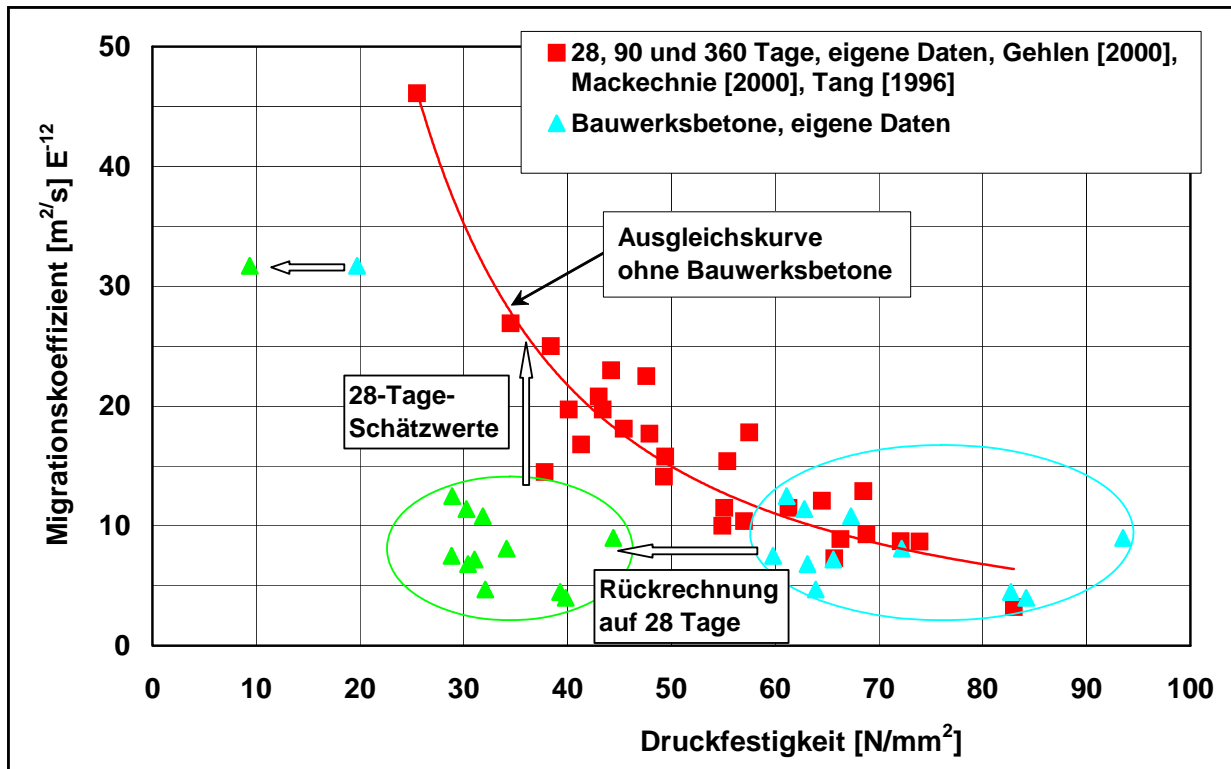


Bild 7.21: Chloridmigrationskoeffizient in Funktion der Druckfestigkeit. Die Druckfestigkeit der Bauwerksbetone im Alter von 28 Tagen wurde mit der „EMPA-Formel“ zurück gerechnet. Die eingezeichnete Ausgleichskurve (ohne Bauwerksbetone) wurde aus den vorhandenen Daten dieser Arbeit und aus der Literatur berechnet.

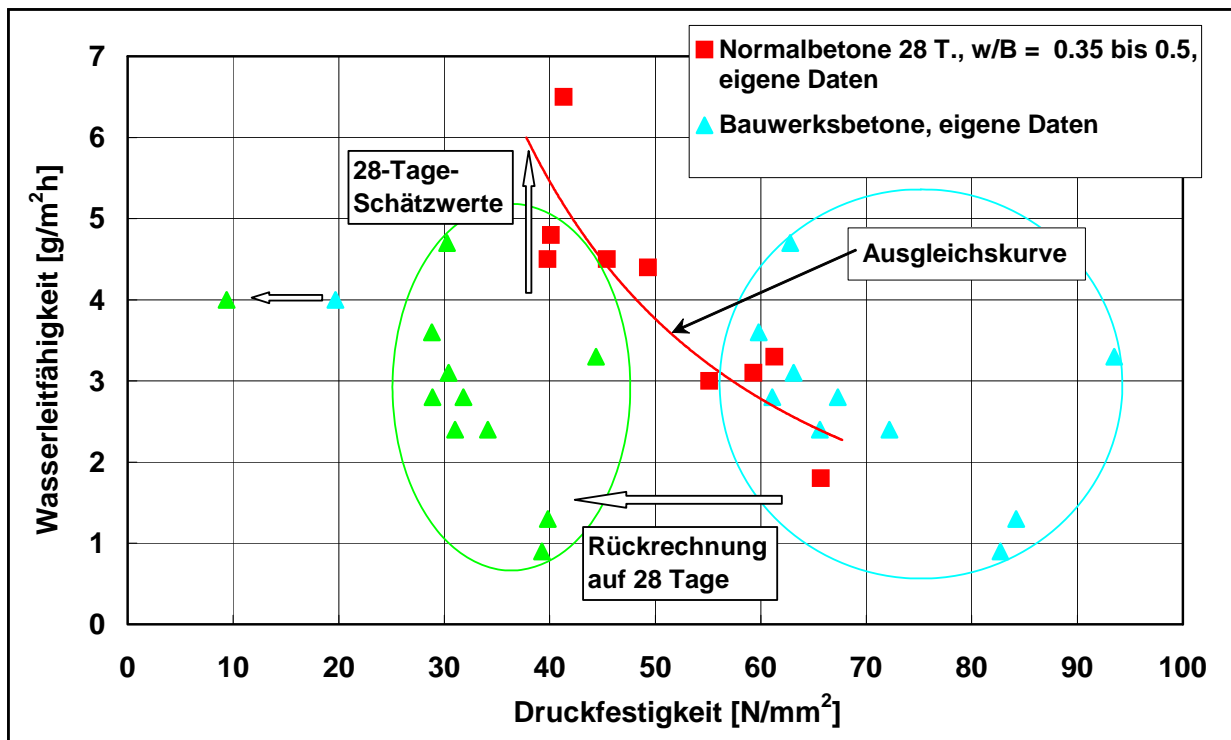


Bild 7.22: Wasserleitfähigkeit in Funktion der Druckfestigkeit. Die Druckfestigkeit der Bauwerksbetone im Alter von 28 Tagen wurde nach der „EMPA-Formel“ abgeschätzt. Die eingezeichnete Ausgleichskurve wurde aus den 28-Tage-Werten dieser Arbeit berechnet.

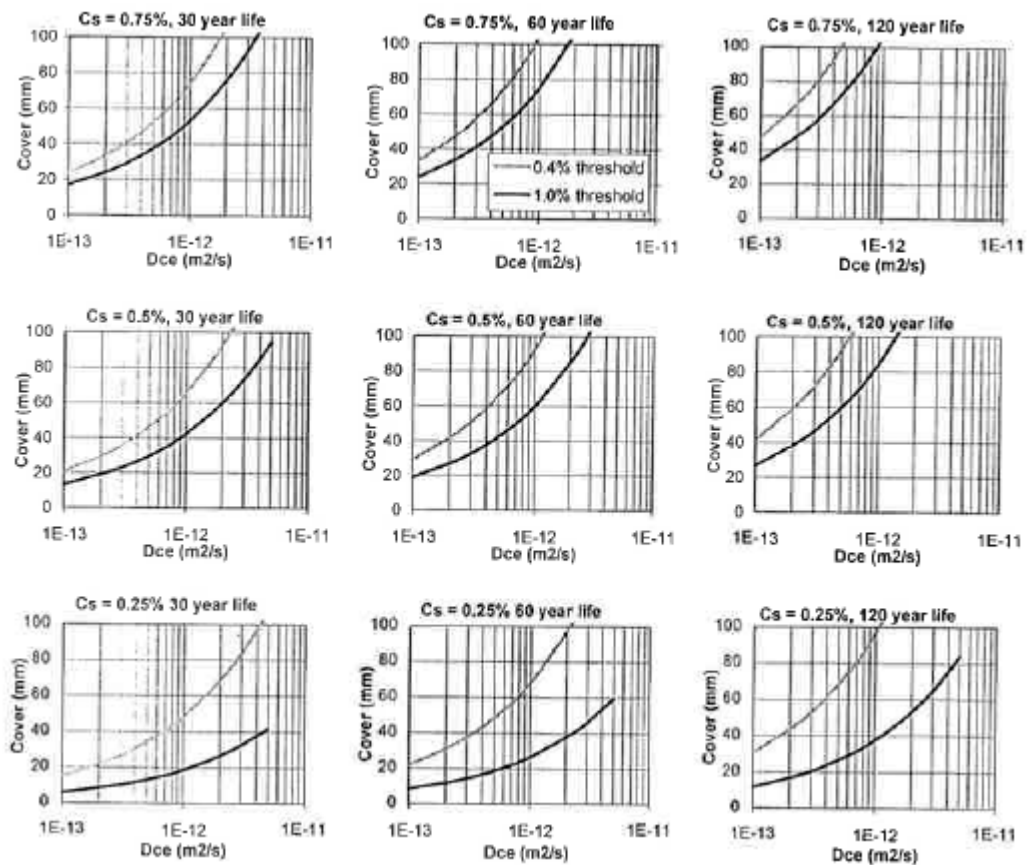


Bild 7.23: Einfluss des Chloriddiffusionskoeffizienten, der Oberflächenkonzentration, und der Betondeckung auf die Zeit, bis der kritische Chloridgehalt (0.4 bzw. 1.0 M.% bez. Zementgehalt) auf Bewehrungsniveau erreicht ist [Bamforth 1996].

8. Weiterer Forschungsbedarf

Die umfangreiche Literaturlauswertung wie auch die eigenen Untersuchungen haben gezeigt, dass in verschiedenen Themenbereichen nach wie vor Wissenslücken vorhanden sind. Weitere Forschungsarbeiten sind deshalb notwendig, um sowohl für Neubauten wie auch für Instandsetzungen von Stahlbetonbauten ausreichende Kenntnisse und Erfahrungen zu haben, um dem Ziel des „Null-Unterhaltes“ näher zu kommen.

- Die Beziehung zwischen Chloridmigrationskoeffizient und dem Aufbau der Chloridprofile am Bauwerk sollte durch Langzeitstudien an exponierten Bauwerken breiter abgestützt werden. Hierfür sollten Pilotprojekte realisiert werden (**Kapitel 9**).
- In einigen Literaturstellen konnte die positive Wirkung der Kombination von verschiedenen Betonzusatzstoffen, wie z.B. Hüttensand mit Silikastaub oder Flugasche mit Silikastaub gezeigt werden. Es können aber dazu mangels systematischer Untersuchungen keine Empfehlungen gemacht werden. Insbesondere für Betone, an die gleichzeitig Anforderungen hinsichtlich Frühfestigkeit, Widerstand gegen den Sulfatangriff oder die Alkali-Aggregat-Reaktion gestellt werden, könnte die Kombination verschiedener Zusatzstoffe Erfolg versprechende Lösungen bieten (**Kapitel 9**).

In diesem Zusammenhang müssten auch die Ursachen der teilweise erheblichen Abweichungen unserer Ergebnisse von jenen der ausländischen Publikationen betreffend der Wirkung von Flugasche und Hüttensand genauer abgeklärt werden. Die möglichen Ansatzpunkte wurden oben bereits erwähnt. Ergänzend dazu müsste der Einfluss der Chloridbindung auf den Chloridwiderstand der Betone genauer studiert werden.

- Mittels Modellrechnungen sollte nachgewiesen werden, ob und unter welchen Bedingungen die hier vorgeschlagenen Anforderungen (**Tabelle 7.7**) für sehr lange Nutzungszeiten (100 Jahre) ausreichend sind. Insbesondere sollten Untersuchungen im Zusammenhang mit der Expositionsklasse XD 2 (Beton in dauerndem Kontakt mit chloridhaltigem Wasser) und zum Einfluss eines starken kapillaren Saugens durchgeführt werden. Damit soll überprüft werden, ob die Vereinfachung des Modells (berücksichtigt nur die Diffusion der Chloride) auch unter realen Bedingungen mit unterschiedlichen Anteilen an Diffusionsvorgängen und kapillarem Saugen beim Eintrag und Transport der Chloride zulässig ist.
- Es sollten Prüfungen an z.B. Stahlfaserbetonen und kunststoffmodifizierten Instandsetzungsmörteln durchgeführt werden. Es wäre zu prüfen, ob sich das ibac-Verfahren für die Beurteilung eignet. Langzeitstudien an Bauwerken sind auch hier erforderlich.
- Über die Langzeitwirkung von Oberflächenschutzsystemen wurden bisher nur vereinzelt Daten publiziert und es besteht grundsätzlich grosser Kenntnisbedarf. Neben spezifischen Prüfverfahren, die entwickelt werden müssen, sind auch die Beurteilungskriterien der Materialien und des Gesamtsystems mit dem Beton zu definieren. Zu beachten ist, dass es auf dem Markt Oberflächenschutzsysteme gibt, die nicht wasserbeständig sind, und die deshalb nicht mit allen hier vorgestellten Verfahren geprüft werden können.
- Es ist denkbar, dass der Einsatz von Leichtbeton in Zukunft zunimmt. Daten zum Chloridwiderstand von Leichtbetonen sind aber kaum vorhanden.

9. Empfehlungen für die Praxis

Betonbauten, die dauernd durch chloridhaltiges Kontakt- oder Spritzwasser belastet sind, eine lange bis sehr lange Nutzungszeit haben und der Strategie des Null-Unterhaltes genügen sollen, erfordern besondere konstruktive (z.B. zur Reduktion der Rissbreite) und betontechnologische Massnahmen [Hunkeler 2000b und 2001]. Folgende Möglichkeiten stehen im Vordergrund:

- Erhöhung der Überdeckung der Bewehrung. Diese Massnahme ist sicher wirtschaftlich, ist aber nicht immer in der notwendigen Masse möglich.
- Verwendung von dichteren Betonsorten (Reduktion der Kapillarporosität durch Reduktion des w/z- bzw. w/B-Wertes). Dies ist ebenfalls eine wirtschaftliche Massnahme, sie stösst aber an technische Grenzen (z.B. Verarbeitbarkeit des Frischbetons).
- Einsatz von nichtrostenden Stählen. Dies ist eine teure Massnahme und nur dann gerechtfertigt, wenn die erforderliche Überdeckung nicht erreicht und kein ausreichend dichter Beton verwendet werden kann oder grössere, evtl. wasserführende Risse im Beton zu erwarten sind.
- Anwendung von Oberflächenschutzsystemen (z.B. Hydrophobierung oder Beschichtung). Da diese Systeme einen periodischen Unterhalt benötigen, sollten sie nur dann eingesetzt werden, wenn die vorher genannten Massnahmen nicht sicher zum Ziel führen oder, wenn die gestellten Anforderungen bei der Ausführung nicht erreicht wurden, oder dies aus anderen Gründen zweckmässig ist (z.B. Reinigung, farbliche Gestaltung und Helligkeit von Tunnelwänden) oder als temporärer Schutz des jungen Betons.

In den meisten Fällen dürfte die Kombination von erhöhter Überdeckung und dichteren Betonsorten zielführend sein. Wurden die Anforderungen an die zulässige Rissbreite oder an die Dichtigkeit des Betons bei der Ausführung nicht erfüllt, kann im Rahmen der Nachbesserung z.B. eine Tiefenhydrophobierung [Gerdes 2002] appliziert werden. Diese ist in der Lage den Chlorideintrag über einen beschränkten Zeitraum sehr wesentlich zu reduzieren [Lunk 1998b]. Diese Massnahme erfordert aber eine periodische Überwachung und Erneuerung.

Hinsichtlich der Anforderungen an den Chloridwiderstand von Betonen für exponierte neue Bauwerke mit langer Nutzungszeit sei auf die **Tabelle 7.7** verwiesen. 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, Betonzusatzmitteln und Betonzusatzstoffen (Korngrößenverteilung). Entsprechende Vorversuche sind deshalb zwingend. Diese können auch dazu dienen, die Messung des elektrischen Widerstandes an Probekörpern als rasche Schnellprüfung im Rahmen der laufenden Qualitätskontrolle auf der Baustelle (z.B. an Würfeln)

zu validieren. Diese Möglichkeit bietet sich an, da zwischen dem Migrationskoeffizienten und dem elektrischen Widerstand eine recht gute Beziehung gefunden wurde (**Kapitel 4**).

Bei exponierten Bauwerken, die eine sehr lange Nutzungsdauer haben müssen (z.B. Brücken oder Tunnels), sind neben dem Chloridwiderstand oft Anforderungen an andere Betoneigenschaften zu erfüllen, z.B. Verarbeitbarkeit, Frühfestigkeit, Widerstand gegen Sulfatangriff oder gegen die Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR). Diese werden sehr wesentlich von der Zementart bzw. von der Art und Menge der Betonzusatzstoffe beeinflusst. Anforderungen an den Beton müssen deshalb unter Berücksichtigung und nach dem Abwägen verschiedenster Aspekte formuliert werden. Zielkonflikte sind deshalb häufig unvermeidlich. Die **Tabelle 9.1** gibt einige Hinweise zum Einsatz einiger Zementarten.

Zementart	Anwendung für Betone
Portlandzement mit hohem Sulfatwiderstand	<ul style="list-style-type: none"> • mit hohen Anforderungen an den Sulfatwiderstand
Zement mit Silikastaub	<ul style="list-style-type: none"> • mit erhöhten Anforderungen an die Frühfestigkeit • mit erhöhten Anforderungen an die Dichtigkeit • mit AAR-empfindlichen Gesteinskörnungen (Zuschlägen)
Zement mit Flugasche	<ul style="list-style-type: none"> • mit erhöhten Anforderungen an die Dichtigkeit • mit AAR-empfindlichen Gesteinskörnungen (Zuschlägen) • mit speziellen Anforderungen an die Hydratationswärme (massige Bauteile) • (mit erhöhten Anforderungen an den Sulfatwiderstand) • (mit speziellen Anforderungen an die Auslaugung / Versinterung)
Zement mit Hüttensand	<ul style="list-style-type: none"> • mit erhöhten Anforderungen an die Dichtigkeit • mit AAR-empfindlichen Gesteinskörnungen (Zuschlägen) • mit speziellen Anforderungen an die Hydratationswärme (massige Bauteile) • mit erhöhten Anforderungen an den Sulfatwiderstand • mit speziellen Anforderungen an die Auslaugung / Versinterung

Tabelle 9.1: Einsatz verschiedener Zementarten für Betone mit erhöhten und/oder speziellen Anforderungen an den Beton.

Die in der **Tabelle 9.1** angegebenen Anforderungen an Betone können neben der Wahl der geeigneten Zementart mit einer entsprechenden Kombination von z.B. Portlandzement und Betonzusatzstoffen erreicht werden. Gewisse Anforderungen (z.B. Frühfestigkeit, Frost- und Frost-Tausalzbeständigkeit) können auch teilweise oder ganz über Betonzusatzmittel gelöst werden. Weitere Aspekte, wie z.B. Bauverfahren, Bauablauf (z.B. Ausschulfristen), Betoneigenschaften (z.B. E-Modul, Kriechen, Schwinden), sind evtl. zusätzlich zu berücksichtigen.

Um für häufig wiederkehrende Anforderungsprofile geeignete Lösungen zu haben (z.B. erhöhter Chloridwiderstand, Beständigkeit gegen AAR), sollten entsprechende **Pilotprojekte** durchgeführt werden.

Literaturverzeichnis

- AASTHO 1986 **AASTHO T259-80 (1986)**: Standard method of test for resistance of concrete to chloride ion penetration. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASTHO 1993 **AASTHO T277-93 (1993)**: Standard method of test for electrical indication of concrete's ability to resist chloride. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Al-Khaja 1997 **Al-Khaja W.A. (1997)**: Influence of temperature, cement type, and level of concrete consolidation on chloride ingress in conventional and high-strength concretes. *Construction and Building Materials*, Vol.11. No.1, pp.9-13.
- Alexander 1999a **Alexander M.G., Streicher P.E. and Mackechnie J.R. (1999)**: Rapid chloride conductivity testing of concrete. Department of Civil Engineering, University of Cape Town, Research Monograph No.3, pp.35.
- Alexander 1999b **Alexander M.G. and Magee B.J. (1999)**: Durability performance of concrete containing condensed silica fume. *Cement and Concrete Research* 29, pp. 917-922.
- Amiri 1998 **Amiri O., Ait-Mokhtar A., Loche J.M. et Dumargue P. (1998)**: Nouvelle approche de détermination d'un coefficient d'électromigration des ions chlorures dans le béton. *Material Science and Concrete Properties*, 1st International Meeting, 5-6 march 1998, Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, Institut National des Sciences Appliquées - Université Paul Sabatier, Toulouse, France, pp. 165-172.
- Amiri 2000 **Amiri O., Ait-Mokhtar A. et Dumargue P. (2000)**: Optimisation de l'exploitation de l'essai d'électrodifusion d'ions chlorures dans le béton. *Revue française de génie civil*, Vol. 4, no. 2-3, pp. 161-173.
- Ammar 1998 **Ammar A.B., Loche J.M. and Dumargue P. (1998)**: Accelerated testing of chloride diffusivity in cement based materials: New test operating mode. Fourth CANMET /ACI /JCI international conference, Tokushima, Japan: *Recent Advances in Concrete Technology*; Editor: Malhotra V.M., SP 179-35, pp. 587-603.
- Ampadu 1999 **Ampadu K.O., Torii K. and Kawamura M. (1999)**: Beneficial effect of fly ash on chloride diffusivity of hardened cement paste. *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, pp. 585-590.
- Andrade 1993 **Andrade C. (1993)**: Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements. *Cement and Concrete Research* 23, pp. 724.
- Andrade 1994a **Andrade C., Alonso C. and Acha M. (1994)**: Chloride diffusion coefficient of concrete containing fly ash calculated from migration tests. *Corrosion and Corrosion protection of Steel in Concrete*. Editor: R.N. Swamy, publ. by Sheffield Academic Press, pp. 783-793.
- Andrade 1994b **Andrade C. and Sanjuán M.A. (1994)**: Experimental procedure for calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from migration tests. *Advances in Cement Research*, Vol. 6, No. 23, pp. 127-134.
- Andrade 1994c **Andrade C. and Sanjuan M.A. (1994)**: Chloride diffusion coefficient obtained from migration tests of high performance concrete. *Concrete*, RILEM 3C Coord. Committee for concrete technology, Editor: H. Sommer, pp. 208-218.
- Andrade 1994d **Andrade C., Sanjuán M.A. and Recuero A., Río O. (1994)**: Calculation of chloride diffusivity in concrete from migration experiments, in non-steady state conditions. *Cement and Concrete Research*, Vol. 24, No. 7, pp. 1214-1228.
- Andrade 1995 **Andrade C., Castellote M., Cervigón D. and Alonso C. (1995)**: Chloride migration in concrete: theory and modelling. *Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen*, 1. Jahrgang, Heft 6, pp. 485-506.

- Andrade 1996 **Andrade C. and Whiting D. (1996):** A comparison of chloride ion diffusion coefficients derived from concentration gradients and non-steady state accelerated ionic migration. *Materials and Structures*, Vol. 29, pp. 476-484.
- Andrade 1997 **Andrade C., Díez J.M. and Alonso C. (1997):** Mathematical modeling of a concrete surface "skin effect" on diffusion in chloride contaminated media. *Advanced Cement Based Materials*, Vol. 6, No. 2, pp. 39-44
- Andrade 1999a **Andrade C., Castellote M., Alonso C. and Gonzalez C. (1999):** Testing and modeling chloride Ingress into concrete. Progress Report 1999. Project Nr. SP1 of WG B-3 / COST 521 "Corrosion of Steel in reinforced concrete structures, Workshop 21-24.9.99, Editor: Raharinaivo A., LCPC".
- Andrade 1999b **Andrade C., Castellote M., Alonso C. and González C. (1999):** Relation between colourimetric chloride penetration depth and charge passed in migration tests of the type of standard ASTM C1201-91. *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, pp. 417-421.
- Andrade 2000 **Andrade C., Castellote M., Alonso C. and Gonzales C. (2000):** Non-steady-state chloride diffusion coefficients obtained from migration and natural diffusion tests. Part I: Comparison between several methods of calculation. *Materials and Structures / Matériaux et Constructions*, Vol. 33, January-February 2000, pp. 21-28.
- ASTM 1991 **ASTM C1202-91 (1991):** Standard Test Method for Electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. American Society for Testing and Materials.
- ASTM 1994 **ASTM C 1202-94 (1994):** Standard Test Method for Electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. American Society for Testing and Materials.
- Bamforth 1996 **Bamforth, P.B. (1996):** Definition of exposure classes and concrete mixes requirements for chloride contaminated environments. *Corrosion of reinforcement in concrete*. Editors: Page C.L., Bamforth P.B., Figg J.W., The Royal Society of Chemistry, Cambridge, pp. 176-188.
- Bamforth 1997 **Bamforth P.B., Price W.F. and Emerson M. (1997):** An international review of chloride ingress into structural concrete. Transport Research Laboratory Contractor Report 359, pp.162.
- Bamforth 1999 **Bamforth P.B. (1999):** The derivation of input data for modelling chloride ingress from eight-year UK coastal exposure trials. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 51, No.2, pp. 87-96.
- Barbarulo 2000 **Barbarulo R., Marchand J., Snyder K.A. and Prené S. (2000):** Dimensional analysis of ionic transport problems in hydrated cement systems. Part I. Theoretical considerations. *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, pp. 1955-1960.
- Baroghel-Bouny 1998 **Baroghel-Bouny V., Rougeau P., Care S. and Gwsewitch J. (1998):** Etude comparative de la durabilité des bétons B30 et B80 des ouvrages jumeaux de Bourges. I - Microstructures, propriétés de durabilité et retrait; II - Etude expérimentale de la pénétration des ions chlorures par différentes méthodes. *Bulletin LCP*, No.217, 61-73; *Bulletin LCP*, No.217, pp. 75-84.
- Bhattacharjee 1998 **Bhattacharjee B. and Nagesh M. (1998):** Modeling of Chloride Diffusion in Concrete and Determination of Diffusion Coefficients. *ACI Materials Journal*, Vol. 95, Nr. 2.
- Bigas 1996 **Bigas J.P., Lambert F. et Ollivier J.P. (1996):** Modélisation globale des interactions physico-chimiques régies par des isothermes non linéaires entre ions chlore et mortier de ciment Portland. *Materials and Structures/Matériaux et construction*, Vol. 29, pp. 277-285.
- Breit 1997a **Breit W. (1997):** Kritischer korrosionsauslösender Chloridgehalt - Teil 1: Allgemeines, Kurzbericht Nr. 68, ibac, RWTH Aachen.
- Breit 1997b **Breit W. (1997):** Kritischer korrosionsauslösender Chloridgehalt - Teil 1: Untersuchungen an Mörttelektroden in chloridhaltigen Lösungen, Kurzbericht Nr. 70, ibac, RWTH Aachen.

- Breit 1997c **Breit W. (1997):** Kritischer korrosionsauslösender Chloridgehalt - Teil 2: Untersuchungen an Stahl in chloridhaltigen alkalischen Lösungen, Kurzbericht Nr. 69, ibac, RWTH Aachen.
- Breit 1998a **Breit W. (1998):** Kritischer korrosionsauslösender Chloridgehalt - Sachstand (Teil 1) / Beton 7/98, S. 442-449.
- Breit 1998b **Breit W. (1998):** Kritischer korrosionsauslösender Chloridgehalt - Neuere Untersuchungsergebnisse (Teil 2) / Beton 8/98, S. 511-523.
- Buenfeld 1987 **Buenfeld N.R. and Newman J.B. (1987):** Examination of three Methods for Studying Ion Diffusion in cement Pastes, Mortars and Concrete. Materials and Structures, Vol. 20, pp. 3-20.
- Buenfeld 1998a **Buenfeld N., Glass G. K., Hassanein A. M. and Zhang J. (1998):** Chloride transport in concrete subjected to electric field. Journal of materials in civil engineering. November, pp. 220 – 228.
- Buenfeld 1998b **Buenfeld N.R. and Okundi E. (1998):** Effect of cement content on transport in concrete. Magazine of Concrete Research, Vol. 50, Nr. 4, pp. 339-351.
- Castellote 1999 **Castellote M., Andrade C. and Alonso M.C. (1999):** Changes in Concrete Pore Size Distribution due to electrochemical chloride migration trials. ACI Materials Journal, Vol.90, No.3, pp. 314 – 319.
- Castellote 2000 **Castellote M., Andrade C. and Alonso C. (2000):** Phenomenological mass-balanced -based model of migration tests in stationary conditions. Application to non steady-state tests. Cement and Concrete Research, Vol. 30, pp. 1185-1893.
- Castellote 2001a **Castellote M., Andrade C. and Alonso C. (2001):** Measurement of the steady and the non-steady-state chloride diffusion coefficients in a migration test by means of monitoring the conductivity in the anolyte chamber. Comparison with natural diffusion tests. Cement and Concrete Research, Vol. 31, pp. 1411-1420.
- Castellote 2001b **Castellote M., Alonso C., Andrade C., Chadbourn G.A. and Page C.L. (2001):** Oxygen and chloride diffusion in cement pastes as a validation of chloride diffusion coefficients obtained from steady-state migration tests. Cement and Concrete research, Vol. 31, pp. 621-625.
- Chatterji 1994 **Chatterji S. (1994):** Transportation of ions through cement based materials. Part 2. Adaptation of the fundamental equations and relevant comments. Cement and Concrete Research, Vol. 24, No.6, pp. 1010-1014.
- Chatterji 1995 **Chatterji S. (1995):** On the application of Fick's second law to chloride ion migration through Portland cement concrete. Cement and Concrete Research, Vol. 25, No.2, pp. 299-303.
- Colleparidi 1972 **Colleparidi M. et al. (1972):** Penetration of chloride ions into cement pastes and concrete. Journal of American Ceramic Society, Vol. 25.
- Dehghanian 1997 **Dehghanian C. and Arjemandi M. (1997):** Influence of slag blended cement concrete on chloride diffusion rate. Cement and Concrete Research, Vol. 27, No. 6, pp. 937-945.
- Delagrave 1996 **Delagrave A., Marchand J. and Samson E. (1996):** Prediction of Diffusion Coefficients in Cement-based Materials on the Basis of Migration Experiments. Cement and Concrete Research, Vol. 26, Nr.12, pp.1831-1842.
- Delagrave 1997 **Delagrave A., Marchand J., Olivier J.-P., Julien S. and Hazrati K. (1997):** Chloride binding capacity of various hydrated cement paste systems. Advanced Cement Based Materials, Vol. 6, No.1, pp. 28-35.
- Detwiler 1999 **Detwiler R.J., Whiting D.A. and Lagergren E.S. (1999):** Statistical approach to ingress of chloride in silica fume concrete for bridge decks. ACI Materials Journal, Vol. 96, No.6, pp. 670-675.

- Dhir 1990 **Dhir R. K., Jones M.R., Ahmed H.E.H. and Seneviratne A.M.G. (1990):** Rapid estimation of chloride diffusion coefficient in concrete. Magazine of Concrete Research, Vol. 42, Nr. 152, pp. 177-185.
- Dhir 1996 **Dhir R.K., Jones M.R. and McCarthy M.J. (1996):** Binder content influences on chloride ingress in concrete. Cement and Concrete Research, Vol. 26, No.12, pp.1761-1766.
- Dhir 1998 **Dhir R.K., Jones M.R. and Ng S.L.D (1998):** Prediction of total chloride content profile and concentration / time -dependent diffusion coefficients for concrete. Magazine of Concrete Research, Vol. 50, No. 1, pp. 37-48.
- EN 1998 **prEN 13396 (1998):** Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Prüfverfahren - Messung des Eindringens von Chloridionen.
- EN 2000 **EN 206-1 Beton- Teil 1:** Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität, Dezember 2000. Schweizer Norm: SN EN 206-1:2002; SIA 162.051.
- Flückiger 1993 **Flückiger D. (1993):** Perkolationsbetrachtungen zum Feuchtigkeitstransport in porösen Körpern - Anwendung der Perkolations-theorie auf den kapillaren Wassertransport in Zementstein, Diss. ETH Nr. 10223, 1993.
- Francy 1998 **Francy O. and François R. (1998):** Measuring chloride diffusion coefficients from non-steady state diffusion tests. Cement and Concrete Research, Vol. 28, No. 7, pp. 947-953.
- Gehlen 2000 **Gehlen Ch. (2000):** Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken. Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion. D 82 (Diss. RWTH Aachen), Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 510, pp. 106.
- Gerdas 2002 **Gerdas A. (2002):** Transport und chemische Reaktion siliciumorganischer Verbindungen in der Betonrandzone. Building Materials Report Nr. 15, Aedificatio Verlag, Unterengstringen.
- Glass 1997 **Glass G.K., Hassanein N.M. and Buenfeld N.R. (1997):** Neural network modelling of chloride binding. Magazine of Concrete Research, Vol. 49, No. 181, pp. 323-335.
- Helland 2001 **Helland S. (2001):** Service life of concrete offshore structures. Structural Concrete, Vol. 2, Nr. 3, pp.121-125.
- Hunkeler 1994 **Hunkeler F. (1994):** Grundlagen der Korrosion und der Potentialmessung bei Stahlbetonbauten / VSS-Bericht Nr. 510.
- Hunkeler 1996a **Hunkeler F. (1996):** The resistivity of pore water solution - a decisive parameter of rebar corrosion and repair methods. Construction and Building Materials, Vol. 10., No. 5, pp. 381-389.
- Hunkeler 1996b **Hunkeler F. (1996):** Die Bedeutung der Permeabilität für Betonbauwerke, TFB-Kurs 955271, Permeabilität von Betonen, Schulungszentrum TFB.
- Hunkeler 1998 **Hunkeler F. (1998):** Die Bedeutung der Betonqualität auf den Chlorid- und Karbonatisierungswiderstand, TFB-Kurs 974761, Dauerhafte Betonbauwerke – unser Ziel, Schulungszentrum TFB.
- Hunkeler 2000a **Hunkeler F. (2000):** Wasser im Beton: Einfluss auf Transportvorgänge und Korrosion, HCB Beton-Tagung, ETH Zürich, 31. Aug. 2000.
- Hunkeler 2000b **Hunkeler F. (2000):** Einsatz von nichtrostenden Bewehrungsstählen im Betonbau, ASB/EVED Forschungsauftrag 89/00, VSS-Bericht Nr. 543.
- Hunkeler 2001 **Hunkeler F. (2001):** Utilisation d'aciers d'armature inoxydables dans les ouvrages en béton, ASB/EVED Forschungsauftrag 95/00, VSS-Bericht Nr. 558.
- Jacobs 1994 **Jacobs F. (1994):** Permeabilität und Porengefüge zementgebundener Werkstoffe. Building Materials Report Nr. 7, Aedificatio Verlag, Freiburg/Unterengstringen.
- Jacobs 1998 **Jacobs F. (1998):** Permeability to gas of partially saturated concrete. Magazine of Concrete Research, Vol. 50, No. 2, pp. 115-121.

- Jensen 1999 **Jensen M.O., Hansen F. P., Coats A.M. and Glasser F.P. (1999):** Chloride ingress in cement paste and mortar. *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, pp.1497-1504.
- Jones 1993 **Jones M.R., McCarthy M.J. and Dhir R.K. (1993):** Chloride resistant concrete. *Concrete 2000*, Editors: Dhir R.K. and Jones M.R., E&FN Spon, London, pp. 1429-1444.
- Jones 1995 **Jones M.R., Dhir R.K. and Gill J.P. (1995):** Concrete surface treatment: effect of exposure temperature on chloride diffusion resistance. *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No.1, pp.197-208.
- Karl 1993 **Karl J.H. und Solacolu C. (1993):** Verbesserung der Betonrandzone, *Beton*, Nr. 5, pp. 222-225.
- Kaufmann 1992 **Kaufmann J. und Studer W (1992):** Wasserhaushalt von Bauwerksbeton, Zwischenbericht EMPA Nr. 139973/1, 1992.
- Lee 1996 **Lee S.L., Wong S.F., Swaddiwudhipong S., Wee T.H. and Loo Y.H. (1996):** Accelerated test of ingress of chloride ions in concrete under pressure and concentration gradients. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 48, No. 174, pp. 15-25.
- Leutenegger 2002 **Leutenegger T. (2002):** Simulation des Eintrages von chloridhaltigem Wasser in Beton, Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion, ETH Zürich, Diplomarbeit Sommersemester 2002.
- Lu 1997 **Lu X. (1997):** Application of the Nernst-Einstein equation to concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, No. 2, pp. 293-302.
- Lu 1998 **Lu X. (1998):** Rapid determination of the chloride diffusivity in concrete. *Concrete under severe conditions 2, Environment and Loading. Proceedings of the second international conference CONSEC '98, Norway*; edited by: Giorv O.E., Sakai K., Banthia N.; E&FN Spon, London, pp. 1963-1969.
- Lunk 1997 **Lunk P. (1997):** Kapillares Eindringen von Wasser und Salzlösungen in Beton. Diss. ETH Nr. 12181, Building Materials Report Nr. 8, Aedificatio Verlag, Unterengstringen, pp. 198.
- Lunk 1998a **Lunk P. (1998):** Einfluss des Eindringens von Chloriden auf die wartungsfreie Nutzungsdauer von Stahlbetontragwerken. ASB/EVED Forschungsauftrag 82/93, VSS-Bericht Nr. 536.
- Lunk 1998b **Lunk P., Müller T. und Wittmann F.H. (1998):** Feuchtigkeits- und Ionen transport in gerissenen Stahlbetonbauteilen. ASB/EVED Forschungsauftrag 85/90, VSS-Bericht Nr. 538.
- Maage 1994 **Maage M., Helland St. and Carlsen J.E. (1994):** Chloride penetration in high performance concrete exposed to marine environment. *Proceedings of the RILEM Int. Workshop, Durability of High performance Concrete, RILEM 3C Coord. Committee for concrete technology*, editor:H. Sommer, pp.194-207.
- MacDonald 1995 **MacDonald K. A. and Northwood D.O. (1995):** Experimental measurements of chloride ion diffusion rates using a to - compartment diffusion cell: Effects of material and test variables. *Cement and Concrete Research*, Vol.25, No.7, pp.1407-1416.
- Mackechnie 2000 **Mackechnie J.R. and Alexander M.G. (2000):** Rapid chloride Test comparisons. *Concrete International*, Mai, pp. 40-45.
- Mangat 1992 **Mangat P.S. and Molloy B.T. (1992):** Factors Influencing Chloride induced Corrosion of Reinforcement in Concrete. *Materials and Structures*, Vol. 25, pp. 404-411.
- Mangat 1994 **Mangat P.S. and Molloy B.T. (1994):** Prediction of long term chloride concentrations in concrete. *Materials and Structures*, Vol. 27, pp. 338-346.
- Mangat 1999 **Mangat P.S. and Limbachiya M.C. (1999):** Effect of initial curing on chloride diffusion in concrete repair materials. *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, pp.1475-1485.
- Major 1993 **Major J. (1993):** Permeabilität des Betons als Funktion der Porosität und des Wassergehaltes. Nachdiplomarbeit, Prof. F. Wittmann, IBWK der Abt. II der ETH Zürich.

- McGrath 1996 **McGrath P.F. and Hooton R.D. (1996):** Influence of voltage on chloride diffusion coefficients from chloride migration tests. *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, No. 8, pp. 1239-1244.
- McGrath 1999 **McGrath P.F. and Hooton R.D. (1999):** Re-evaluation of the AASTHO T259-day salt ponding test. *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, pp. 1239-1248.
- McCarter 2000 **McCarter W.J., Starrs G. and Chrisp T.M. (2000):** Electrical conductivity, diffusion and permeability of Portland cement-based mortars. *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, pp. 1395-1400.
- Mejlbro 1996 **Mejlbro J. (1996):** The complete solution of Fick's second law of diffusion with time-dependent diffusion coefficient and surface concentration. *Durability of concrete in saline environment Cementsa. Danderyd Sweden.*
- Merz 2001 **Merz Ch. und Ungricht H. (2001):** Betonseiteige Massnahmen, TFB-Kurs 804551, Schulungszentrum TFB.
- Ngala 1995 **Ngala V.T., Page C.L., Parrott L.J. and Yu, S.W. (1995):** Diffusion in cementitious materials: II. Further Investigations of chloride and oxygen diffusion in well-cured OPC and OPC / 30% PFA Pastes. *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 4, pp. 819-826.
- Ngala 1997 **Ngala V.T. and Page C.L. (1997):** Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes. *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, No. 7, pp. 995-1007.
- Nilsson 1994 **Nilsson L.O., Massat M. and Tang L. (1994):** The effect of non-linear chloride binding on the prediction of chloride penetration into concrete structures / ACI, 3rd International Conference on Durability of Concrete, Nice, editor: V.M. Malhotra, SP 145-24, pp. 469-486.
- Otsuki 1992 **Otsuki N. et al. (1992):** Evaluation of AgNO₃ solution spray method für measurement of chloride penetration into hardened cementitious matrix materials. *ACI Materials Journal*, Vol. 89, No. 6, pp. 587-592.
- Otsuki 1999 **Otsuki N., Hisada M., Otani T. and Maruyama T. (1999):** Theoretical evaluation of diffusion coefficient of chloride ion mortar from mobility. *ACI Materials Journal*, Vol. 96, No.6, pp. 627-633.
- Ozyildirim 1994 **Ozyildirim C. (1994):** Rapid chloride permeability testing of silica-fume concrete. *Cement, Concrete, and Aggregates, CCAGPD*, Vol. 16, No.1, pp. 53-56.
- Page 1981 **Page C.L., Short N.R. and Tarras A. (1981):** Diffusion of chloride ions in hardened cement pastes. *Cement and Concrete Research*, Vol.11, pp. 395-406.
- Prince 2001 **Prince W. and Gagné R. (2001):** The effects of types of solutions used in accelerated chloride migration tests for concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, pp. 775-780.
- RILEM 1993 **RILEM Technical Committee TC 116 (1993):** Performance Criteria for Concrete Durability - State of the Art Report.
- Ramezaniapour 1995 **Ramezaniapour A.A. and Malhotra V.M. (1995):** Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly ash or silica fume. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 17, pp. 125-133.
- Raupach 2001 **Raupach M. und Göpfert T. (2001):** Bemessung von Stahlbetontübbings auf Dauerhaftigkeit. *Beton*, Nr. 7, pp. 360 -363.
- Reinhardt 1995 **Reinhardt H.-W. and Frey R.W. (1995):** Vacuum concrete with improved imperviousness against organic fluids / *ACI Materials Journal*, Vol. 92, No. 5, Sept.-Oct., pp. 507-510.
- Roelfstra 2000 **Roelfstra G. (2000):** Modèle d'évolution des ponts-routes en béton, Thèse, no. 2310 EPF Lausanne, pp. 153.

- Roy 2000 **Roy D.M., Jiang W. and Silsbee M.R. (2000):** Chloride diffusion in ordinary, blended and alkali-activated cement pastes and its relation to other properties. Cement and Concrete Research, Vol. 30, pp. 1879-1884
- Salta 1999 **Salta M. (1999):** Methods for measure concrete resistance to chloride penetration. Progress report, Project P2 / COST 521 Corrosion of Steel in reinforced concrete structures, Workshop 21-24.9.99, Editor: Raharinaivo A., LCPC.
- Samson 2000 **Samson E., Marchand J. and Beaudoin J.J. (2000):** Modeling the influence of chemical reactions on the mechanisms of ionic transport in porous materials. Cement and Concrete Research, Vol. 30, pp. 1895-1902.
- Schiessl 1997 **Schiessl P. und Wiens U. (1997):** Einfluss von Steinkohlenflugasche auf die chlorid-induzierte Korrosion von Stahl in Beton, ibac RWTH Aachen, Forschungsbericht Nr. 436.
- Schiessl 2001a **Schiessl P. und Wiens U. (2001):** Neue Erkenntnisse zum Einfluss von Steinkohlenflugasche auf chloridinduzierte Korrosion von Stahl in Beton, Beton, Nr.1, pp. 10 – 17.
- Schiessl 2001b **Schiessl P. und Wiens U. (2001):** Neue Erkenntnisse zum Einfluss von Steinkohlenflugasche auf chloridinduzierte Korrosion von Stahl in Beton (Teil 2), Beton, Nr. 2, pp. 66 – 71.
- Schröder 1998 **Schröder P. und Müller Ch. (1998):** Verwendung von Steinkohleflugasche (SFA) in Hochleistungsbetonen. ibac 1998, Jahresbericht des ibac der RWTH Aachen. Forschungsbericht F521, pp. 51-53.
- Shermann 1996a **Shermann M. R., McDonald D.B. and Pfeifer D.W. (1996):** Durability aspects of precast prestressed concrete. Part 1: Historical review / PCI Journal, July-August, pp. 62-74.
- Shermann 1996b **Shermann M. R., McDonald D.B. and Pfeifer D.W. (1996):** Durability aspects of precast prestressed concrete. Part 2: Chloride permeability study. PCI Journal, July-August, pp. 75-95.
- Shi 1998 **Shi C., Stegemann J.A. and Caldwell R.J. (1998):** Effect of supplementary Cementing Materials on the specific conductivity of pore solution and its implications on the rapid chloride permeability test (AASHTO T277 and ASTM C1202) results. ACI Materials Journal, Vol.95, No. 4, pp. 389-394.
- Siemens 1998 **Siemens T., Polder R. and de Vries H. (1998):** Design of concrete structures for durability. Example: chloride penetration in the lining of a bored tunnel. Heron, Vol. 43, No. 4, pp. 227-244.
- Sosoro 1995 **Sosoro M. (1995):** Modell zur Vorhersage des Eindringverhaltens von organischen Flüssigkeiten in Beton, DafStb, Heft Nr. 446.
- Streicher 1994 **Streicher P.E. and Alexander M.G. (1994):** A critical evaluation of chloride diffusion test methods for concrete. 3rd CANMET / ACI Int. Conf. on Durability of Concrete, supplementary papers, Nice, France, pp. 517-530.
- Streicher 1995a **Streicher P.E., Alexander M.G. (1995):** A chloride conduction test for concrete. Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 6, pp. 1284-1294.
- Streicher 1995b **Streicher P.E., Alexander M.G. (1995):** Diffusibility changes due to the presence of chloride ions. Mechanisms of chemical degradation of cement-based systems. Editors: K. L. Scrivener, J.F. Young, publ. By E&FN Spon, pp. 51.57.
- Studer 2000 **Studer W. (2000):** Frosttausalzbeständigkeit und Wasserdichtigkeit von Beton. Prüfharmonisierung bringt Neuerungen. Schweizer Baublatt Nr. 91, pp. 26-30.
- Sugiyama 1996 **Sugiyama T., Bremner T.W. and Tsuji Y. (1996):** Determination of chloride diffusion coefficient and gas permeability of concrete and their relationship. Cement and Concrete research, Vol.26, No.5, pp. 781-790.

- Sugiyama 2001 **Sugiyama T., Tsuji Y. and Bremner T.W. (2001):** Relationship between coulomb and migration coefficient of chloride ions for concrete in a steady-state chloride migration test. Magazine of Concrete Research, Vol. 53, No. 01, pp. 13-24.
- Tang 1992 **Tang L., Nilsson L.-O. (1992):** Rapid determination of chloride diffusivity in concrete by applying an electrical field. ACI Materials Journal, Vol. 98, No.1, pp. 49-53.
- Tang 1995a **Tang L. (1995):** On Chloride diffusion coefficients obtained by using the electrically accelerated methods. Proceeding of RILEM International Workshop on chloride penetration into Concrete.
- Tang 1995b **Tang L. and Nilsson L.-O. (1995):** Accelerated tests for chloride diffusivity and their application in prediction of chloride penetration. Mechanisms of chemical degradation of cement-based systems. Editors: K. L. Scrivener, J.F. Young, publ. by E&FN Spon, pp. 387-396.
- Tang 1996a **Tang L. (1996):** Electrically accelerated methods for determining chloride diffusivity in concrete - current development. Magazine of Concrete Research, Vol. 48, No. 176, pp. 173-179.
- Tang 1996b **Tang L. (1996):** Chloride transport in concrete - Measurement and prediction. Chalmers University of Technology, Dep. of Building Materials, Publication P-96:6, PHD Thesis.
- Tang 1999a **Tang L. (1999):** Concentration dependence of diffusion and migration of chloride ions. Part I. Theoretical considerations. Cement and Concrete Research, Vol. 29, pp. 1463-1468.
- Tang 1999b **Tang L. (1999):** Concentration dependence of diffusion and migration of chloride ions. Part 2. Experimental evaluations. Cement and Concrete Research, Vol. 29, pp. 1469-1474.
- TFB 2001 **TFB Wildegg (2001):** Null-Unterhaltsstrategie bei Verkehrsbauten: Ziele und Umsetzung: TFB-Veranstaltung Nr. 804551, 8. Mai 2001.
- Tinic 1981 **Tinic C. und Burkhard A. (1981):** Aufsaugversuche an Betonproben mit Wasser und Kochsalzlösungen, Schweizer Ingenieur und Architekt, 1981, S. 362-365.
- Thomas 1996 **Thomas M. (1996):** Chloride thresholds in marine concrete. Cement and Concrete Research, Vol. 26, No. 4, pp. 513-519.
- Thomas 1998 **Thomas M.D.A. and Evans C.M. (1998):** Chloride penetration in high - performance concrete containing silica fume and fly ash. Concrete under severe conditions 2, Environment and Loading. Proceedings of the second international conference CONSEC '98, Norway; edited by: Giorv O.E., Sakai K., Banthia N.; E&FN Spon, London, pp.646-655.
- Thomas 1999 **Thomas M. D. A. and Bamforth P.B. (1999):** Modelling chloride diffusion in concrete, effect of fly ash and slag. Cement and Concrete Research, Vol. 29, pp. 487-495.
- Tong 2001 **Tong L. and Giorv O.E. (2001):** Chloride diffusivity based on migration testing. Cement and Concrete Research, Vol. 31, pp. 973-982.
- Torrent 1993 **Torrent R. und Ebensperger L. (1993):** Studie über die Methoden zur Messung und Beurteilung der Kennwerte des Überdeckungsbetons auf der Baustelle. ASB/EVED Forschungsauftrag 89/89, VSS-Bericht Nr. 503.
- Truc 1998 **Truc O., Ollivier J.-P. et Carcasses M. (1998):** Comparaison: CTH rapid method / Essai de migration en régime stationnaire. Material Science and Concrete Properties, 1st International Meeting, 5-6 march 1998, Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, Institut National des Sciences Appliquées - Université Paul Sabatier, Toulouse, France, pp. 239-246.
- Truc 2000a **Truc O., Ollivier J.P. and Carcassès M. (2000):** A new way for determining the chloride diffusion coefficient in concrete from steady state migration test. Cement and Concrete Research, Vol. 30, pp. 217-226.

- Truc 2000b **Truc O., Ollivier J.-P. and Nilsson L.-O. (2000):** Numerical simulation of multi-species transport through saturated concrete during a migration test - MsDiff code. Cement and Concrete Research, Vol. 30, pp. 1581-1592.
- Tumidajski 1995 **Tumidajski P.J., Chan G.W., Feldman R.F. and Strathdee G. (1995):** A Boltzmann-Matano analysis of chloride diffusion. Cement and Concrete Research, Vol. 25, No.7, pp. 1556-1566.
- Volkwein 1991 **Volkwein A. (1991):** Untersuchungen über das Eindringen von Wasser und Chlorid in Beton, TU München, Berichte aus dem Baustoffinstitut, Heft 1, 1991.
- Volkwein 1993 **Volkwein A. (1993):** Untersuchungen über das Eindringen von Wasser und Chlorid in Beton, Beton- und Stahlbetonbau, Vol. 88, Heft 8, S. 223-226.
- Wee 1997 **Wee T.H., Wong S.F., Swaddiwudhipong S. and Lee S.L. (1997):** A prediction method for long-term chloride concentration profiles in hardened cement matrix materials. ACI Materials Journal, Vol. 94, No. 6, pp. 565-576.
- Wee 2000 **Wee T.H., Suryavanshi A.K. and Tin S.S. (2000):** Evaluation of rapid chloride permeability Test (RCPT) Results for concrete containing mineral admixtures. ACI Materials Journal, Vol. 97, No.2, pp. 221-232.
- Whiting 1981 **Whiting D. (1981):** Rapid determination of the chloride permeability of concrete. Final Report No. FHWA/RD 81/119, Federal Highway Administration, NTIS No.PB 82140724.
- Wiens 1996 **Wiens U. (1996):** Einfluss von Steinkohleflugasche auf die chloridinduzierte Korrosion von Stahl in Beton. Mitteilungen Institut für Bauforschung Aachen ibac, Kurzbericht Nr. 57, F 436, pp. 68-70.
- Wierig 1995 **Wierig H.-J. und Langkamp H. (1995):** Über die Chloridpenetration in nichtcarbonatisierte und carbonatisierte Betone. ZKG International, Vol. 48, Nr. 3, pp. 184-192.
- Wong 2001 **Wong S.F., Wee T.H, Swaddiwudhipong and Lee S.L. (2001):** Study of water movement in concrete, magazine of Concrete Research, Vol. 53, No. 3, pp. 205-220.
- Wood 1991 **Wood S.L. (1991):** Evaluation of long-term properties of concrete. ACI Materials Journal, Vol. 88, No.6, pp. 630-643.
- Zhang 1994 **Zhang T. and Giorv O.E. (1994):** An electrochemical method for accelerated testing of chloride diffusivity in concrete. Cement and Concrete Research, Vol. 24, No.8, pp. 1534-1548.
- Zhang 1995 **Zhang T. and Giorv O.E. (1995):** Effect of ionic interaction in migration testing of chloride diffusivity in concrete. Cement and Concrete research, Vol. 25, No.7, pp. 1535-1542.
- Zhang 1998 **Zhang T. and Giorv O.E. (1998):** Migration Testing of chloride diffusivity in concrete. Concrete under severe conditions 2, Environment and Loading. Proceedings of the second international conference CONSEC '98, Norway; edited by: Giorv O.E., Sakai K., Banthia N.; E&FN Spon, London, pp. 2197-2208.
- Zhao 1998 **Zhao T.J., Zhou Z.H., Zhu J.Q. and Feng N.Q. (1998):** An alternating test method for concrete permeability. Cement and Concrete Research, Vol. 28, No.1, pp. 7-12.
- Zimmermann 2000 **Zimmermann L. (2000):** Korrosionsinitiiierender Chloridgehalt von Stahl in Beton. Diss. ETH Nr. 13870.

Anhang 1

Zusammenstellung der Resultate

- Laborbetone
- Betone von Drittprojekten
- Betone von bestehenden Bauwerken

Laborbetone

Betonrezeptur	A CEMI 42.5, W/Z 0.5		B CEMI 42.5, W/Z 0.4		C CEMI 42.5, W/Z 0.35	
Prüfungen 28 Tg	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.
Druckfestigkeit [N/mm ²]	50.3 48.8 48.9	49.3 0.8	60.9 60.6 62.5	61.3 1.0	57.3 59.5 62.9	59.9 2.8
Wasserleitfähigkeit q _w bei Bauteildicke = 300mm [q/n ² h]		4.40 0.86		3.3 0.47		2.0 0.41
Kapillar füllbares Porenvolumen [Vol. %]		11.2 0.8		9.8 1.5		8.2 1.0
Steighöhe 24h [mm]		33.7 2.9		30.8 1.7		26.8 2.4
Gaspermeabilität [m ²]	5.60E-17 3.90E-17 7.00E-17	5.50E-17 1.55E-17	1.00E-17 1.20E-17 1.10E-17	1.10E-17 1.00E-18	1.60E-17 1.30E-17 1.50E-17	1.50E-17 1.53E-18
Chloridmigrationskoeffizient nach ibac [m ² /s]	1.32E-11 1.59E-11 1.31E-11	1.41E-11 1.59E-12	1.57E-11 9.75E-12 9.22E-12	1.15E-11 3.60E-12	5.76E-12 1.02E-11 7.66E-12	7.88E-12 2.23E-12
Prüfungen 90 Tg	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.
Druckfestigkeit [N/mm ²]	54.7 55.2 56.3	55.4 0.8	64.8 65.1 63.5	64.5 0.9	63.2 66.7 65.6	65.2 1.8
Gaspermeabilität [m ²]	6.80E-17 7.10E-17 6.70E-17	6.80E-17 2.08E-18	1.40E-17 1.50E-17 1.50E-17	1.50E-17 5.77E-19	9.00E-18 9.00E-18 1.20E-17	1.00E-17 1.73E-18
Chloridmigrations-koeffizient nach ibac [m ² /s]	1.45E-11 1.61E-11 1.57E-11	1.54E-11 8.33E-13	1.30E-11 1.13E-11 1.19E-11	1.21E-11 8.62E-13	1.03E-11 9.42E-12 9.47E-12	9.68E-12 4.94E-13
Prüfungen 360 Tg	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.
Druckfestigkeit [N/mm ²]	55.4 57.1 58.6	57.00 1.6	67.7 69.5 69.2	68.8 1.0	63.7 66.6 66.2	65.5 1.6
Wasserleitfähigkeit q _w bei Bauteildicke = 300mm [q/n ² h]		4 0.54		2.2 0.24		1.9 0.26
Kapillar füllbares Porenvolumen [Vol. %]		10.5 0.9		8.3 0.4		7.7 1.0
Steighöhe 24h [mm]		33.1 1.7		27.4 2.0		26.3 1.4
Gaspermeabilität [m ²]	8.50E-17 6.90E-17 5.40E-17	6.90E-17 1.55E-17	1.20E-17 7.00E-18 9.00E-18	9.00E-18 2.52E-18	7.00E-18 1.40E-17 1.00E-17	1.00E-17 3.51E-18
Chloridmigrationskoeffizient nach ibac [m ² /s]	1.09E-11 9.98E-12 2.11E-12	1.04E-11 6.51E-13	1.20E-11 1.30E-11 2.96E-12	9.31E-12 5.53E-12	8.20E-12 8.01E-12 7.58E-12	7.93E-12 3.18E-13
ASTM [Coulomb]	1632 1771 1767	1724 79	2293 1782 1991	2022 257	1210 1347 1470	1342 130
Leitfähigkeit nach Streicher [mS/cm]	0.77 0.87 0.62	0.75 0.13	0.69 0.7 0.89	0.76 0.11	0.83 0.69 0.51	0.68 0.16
Aufsaugversuch Chloridprofil [M% bez. Beton]	Mittlerer Chloridgehalt im Profil	Differenz zu Sollkonz., Mittelwert	Mittlerer Chloridgehalt im Profil	Differenz zu Sollkonz., Mittelwert	Mittlerer Chloridgehalt im Profil	Differenz zu Sollkonz., Mittelwert
0-10mm	0.155	0.085	0.123	0.071		
10-20mm	0.065	-0.005	0.047	-0.006		
20-30mm	0.070	0.000	0.034	-0.019		
30-40mm	0.062	-0.009	0.037	-0.016		
40-50mm	0.057	-0.013	0.057	0.004		

Laborbetone

Betonrezeptur	C (Wiederholung) CEMI 42.5, W/Z 0.35		D CEMI 42.5, Mikrosilika 15M%		E CEMI 42.5, Flugasche 30M%	
Prüfungen 28 Tg	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.
Druckfestigkeit [N/mm ²]	64.9 66.3 65.9	65.7 0.7	64.3 63.3 64.2	63.9 0.6	51.7 54.3 53.6	53.2 1.3
Wasserleitfähigkeit q _w bei Bauteildicke = 300mm [q/n ² h]		1.8 0.24		3.1 0.31		3.0 0.54
Kapillar füllbares Porenvolumen [Vol. %]		8.3 0.9		10.1 0.9		9.9 1.0
Steighöhe 24h [mm]		25.3 1.4		29.9 1.7		29.3 2.2
Gaspermeabilität [m ²]	6.00E-18 5.00E-18 7.00E-18	6.00E-18 1.00E-18	1.20E-17 3.60E-17 1.50E-17	2.10E-17 1.31E-17	1.80E-17 1.50E-17 1.20E-17	1.50E-17 3.00E-18
Chloridmigrationskoeffizient nach ibac [m ² /s]	7.80E-12 6.04E-12 8.05E-12	7.30E-12 1.10E-12	1.45E-12 1.55E-12 8.75E-13	1.29E-12 3.64E-13	1.06E-11 1.07E-11 1.65E-11	1.26E-11 3.38E-12
Prüfungen 90 Tg	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.
Druckfestigkeit [N/mm ²]	70.7 72.8 72.7	72.1 1.2	67.1 70.4 69.3	68.9 1.7	62.0 58.5 60.5	60.3 1.8
Gaspermeabilität [m ²]	7.00E-18 8.00E-18 1.00E-17	9.00E-18 1.53E-18	2.20E-17 4.70E-17 3.00E-17	3.30E-17 1.28E-17	1.90E-17 2.10E-17 2.60E-17	2.20E-17 3.61E-18
Chloridmigrations-koeffizient nach ibac [m ² /s]	7.79E-12 1.02E-11 8.11E-12	8.71E-12 1.31E-12	1.86E-12 9.64E-13 1.41E-12	1.41E-12 4.48E-13	8.40E-12 1.02E-11 1.01E-11	9.55E-12 1.01E-12
Prüfungen 360 Tg	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.
Druckfestigkeit [N/mm ²]	73.7 74.7 73.4	73.9 0.7	64.7 66.2 67.8	66.2 1.6	66.7 66.5 66.3	66.5 0.2
Wasserleitfähigkeit q _w bei Bauteildicke = 300mm [q/n ² h]		1.3 0.13		3.1 0.58		4.0 0.70
Kapillar füllbares Porenvolumen [Vol. %]		8.0 0.7		9.4 0.8		9.4 0.9
Steighöhe 24h [mm]		22.0 1.0		34.0 2.3		34.9 2.5
Gaspermeabilität [m ²]	1.70E-18 1.60E-18 1.50E-18	1.60E-18 1.00E-19	5.00E-17 3.30E-17 5.10E-17	4.50E-17 1.01E-17	2.10E-17 2.90E-17 2.30E-17	2.40E-17 4.16E-18
Chloridmigrationskoeffizient nach ibac [m ² /s]	4.26E-12 6.68E-12 7.64E-12	6.20E-12 1.74E-12	1.89E-12 2.30E-12 1.74E-12	1.98E-12 2.90E-13	6.87E-12 6.94E-12 6.48E-12	6.76E-12 2.48E-13
ASTM [Coulomb]	1372 1390 1160	1307 128	728 627 530	628 99	1351 1634 1833	1606 242
Leitfähigkeit nach Streicher [mS/cm]	0.60 0.55 0.59	0.58 0.03	0.49 0.60 0.52	0.54 0.06	0.57 0.68 0.56	0.6 0.07
Aufsaugversuch Chloridprofil [M% bez. Beton]	Mittlerer Chloridgehalt im Profil	Differenz zu Sollkonz., Mittelwert	Mittlerer Chloridgehalt im Profil	Differenz zu Sollkonz., Mittelwert	Mittlerer Chloridgehalt im Profil	Differenz zu Sollkonz., Mittelwert
0-10mm	0.098	0.051	0.098	0.053	0.094	0.041
10-20mm	0.039	-0.008	0.036	-0.009	0.047	-0.006
20-30mm	0.040	-0.008	0.040	-0.005	0.039	-0.014
30-40mm	0.040	-0.007	0.048	0.003	0.044	-0.009
40-50mm	0.048	0.001	0.029	-0.016	0.039	-0.014

Laborbetone

Betonrezeptur	F CEMI 42.5, Hüttensand 60M%		G CEMI 42.5, W/Z 0.6		H CEMI 42.5, Hüttensand 20M%	
Prüfungen 28 Tg	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.
Druckfestigkeit [N/mm ²]	44.8 43.5 43.7	44.0 0.7	40.5 39.6 40.3	40.1 0.5	43.3 43.6 41.2	42.7 1.3
Wasserleitfähigkeit q _w bei Bauteildicke = 300mm [q/n ² h]		3.4 0.46		4.8 0.51		2.5 0.34
Kapillar füllbares Porenvolumen [Vol. %]		10.6 1.9		10.4 1.0		10.7 1.0
Steighöhe 24h [mm]		30.6 2.5		36.6 1.3		26.0 1.8
Gaspermeabilität [m ²]	5.80E-17 4.20E-17 6.10E-17	5.40E-17 1.02E-17	6.40E-17 3.60E-17 4.80E-17	4.90E-17 1.40E-17	5.30E-17 2.40E-17 5.30E-17	4.30E-17 1.67E-17
Chloridmigrationskoeffizient nach ibac [m ² /s]	1.42E-11 1.06E-11 1.84E-11	1.44E-11 3.90E-12	1.87E-11 2.33E-11 1.69E-11	1.97E-11 3.30E-12	1.45E-11 1.17E-11 1.27E-11	1.30E-11 1.42E-12
Prüfungen 90 Tg	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.
Druckfestigkeit [N/mm ²]	51.4 52.1 48.3	50.6 2.0	41.9 45.8 44.9	44.2 2.0	47.8 49.2 50.2	49.1 1.2
Gaspermeabilität [m ²]	6.50E-17 3.70E-17 5.10E-17	5.10E-17 1.40E-17	4.80E-17 2.90E-17 4.10E-17	3.90E-17 9.61E-18	4.00E-17 3.80E-17 5.50E-17	4.40E-17 9.29E-18
Chloridmigrations-koeffizient nach ibac [m ² /s]	7.62E-12 7.53E-12 6.05E-12	7.07E-12 8.82E-13	2.24E-11 2.28E-11 2.38E-11	2.30E-11 7.21E-13	1.20E-11 1.28E-11 1.05E-11	1.18E-11 1.17E-12
Prüfungen 360 Tg	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.
Druckfestigkeit [N/mm ²]	57.9 54.1 56.6	56.2 1.9	48.5 47.1 47.1	47.6 0.8	54.6 53.1 54.4	54 0.8
Wasserleitfähigkeit q _w bei Bauteildicke = 300mm [q/n ² h]		5.1 0.57		7.8 0.61		3.7 0.79
Kapillar füllbares Porenvolumen [Vol. %]		10.3 1.0		11.9 0.6		10.5 1.3
Steighöhe 24h [mm]		37.9 3.3		43.5 1.5		31.9 2.1
Gaspermeabilität [m ²]	7.00E-17 5.60E-17 5.10E-17	5.90E-17 9.85E-18	3.90E-17 3.90E-17 3.50E-17	3.80E-17 2.31E-18	4.70E-17 4.40E-17 3.30E-17	4.10E-17 7.37E-18
Chloridmigrationskoeffizient nach ibac [m ² /s]	8.64E-12 5.50E-12 7.84E-12	7.33E-12 1.63E-12	2.34E-11 2.20E-11 2.21E-11	2.25E-11 7.81E-13	1.38E-11 9.89E-12 1.35E-11	1.24E-11 2.18E-12
ASTM [Coulomb]	1861 1975 1637	1825 172	4472 3396 3389	3752 623	3175 3372 2861	3136 258
Leitfähigkeit nach Streicher [mS/cm]	0.77 0.93 0.65	0.78 0.14	1.03 0.99 1.03	1.02 0.02	1.02 1.31 0.72	1.02 0.30
Aufsaugversuch Chloridprofil [M% bez. Beton]	Mittlerer Chloridgehalt im Profil	Differenz zu Sollkonz., Mittelwert	Mittlerer Chloridgehalt im Profil	Differenz zu Sollkonz., Mittelwert	Mittlerer Chloridgehalt im Profil	Differenz zu Sollkonz., Mittelwert
0-10mm	0.153	0.099	0.191	0.120	0.129	0.070
10-20mm	0.065	0.010	0.070	-0.001	0.058	-0.001
20-30mm	0.052	-0.003	0.054	-0.018	0.047	-0.012
30-40mm	0.043	-0.012	0.059	-0.012	0.050	-0.009
40-50mm	0.043	-0.012	0.058	-0.014	0.056	-0.003

Laborbetone

Betonrezeptur	I CEMI 42.5, Mikrosilika 7M%		K CEMI 42.5, Flugasche 15M%		H (Wiederholung) CEMI 42.5, Hüttensand 20M%	
	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.
Prüfungen 28 Tg						
Druckfestigkeit [N/mm ²]	51.7	52.5	43.3	43.4	40.4	41.5
	51.3	1.7	44.7	1.2	41.9	0.9
	54.5		42.3		42.1	
Wasserleitfähigkeit qw bei Bauteildicke = 300mm [q/n ² h]		3.5 0.30		2.9 0.91		4.5 0.76
Kapillar füllbares Porenvolumen [Vol.%]		10.9 1.2		10.0 0.8		10.4 1.3
Steighöhe 24h [mm]		24.8 0.7		28.6 3.4		35.0 2.0
Gaspermeabilität [m ²]	2.50E-17	2.20E-17	2.70E-17	2.60E-17	7.14E-17	6.60E-17
	1.70E-17	4.36E-18	2.30E-17	3.06E-18	7.43E-17	1.20E-17
	2.40E-17		2.90E-17		5.22E-17	
Chloridmigrationskoeffizient nach ibac [m ² /s]	2.55E-12	3.18E-12	1.56E-11	1.57E-11	1.07E-11	9.41E-12
	3.15E-12	6.40E-13	1.68E-11	1.05E-12	8.13E-12	1.29E-12
	3.83E-12		1.47E-11		9.38E-12	
Prüfungen 90 Tg						
Druckfestigkeit [N/mm ²]	59.3	59.1	49.8	50.00	47.5	47.6
	58.2	0.9	48.9	1.2	46.7	0.9
	59.9		51.2		48.5	
Gaspermeabilität [m ²]	2.60E-17	3.10E-17	4.30E-17	3.80E-17	7.10E-17	6.67E-17
	3.00E-17	5.57E-18	3.50E-17	4.62E-18	7.40E-17	1.19E-17
	3.70E-17		3.50E-17		5.20E-17	
Chloridmigrations-koeffizient nach ibac [m ² /s]	3.90E-12	4.18E-12	1.11E-11	1.46E-11	1.01E-11	1.13E-11
	3.48E-12	8.74E-13	1.75E-11	3.24E-12	1.19E-11	1.01E-12
	5.16E-12		1.52E-11		1.18E-11	
Prüfungen 360 Tg						
Druckfestigkeit [N/mm ²]	60.1	59.2	56.5	55.5	48.0	49.2
	59.1	0.9	52.9	2.3	50.9	1.5
	58.4		57.1		48.7	
Wasserleitfähigkeit qw bei Bauteildicke = 300mm [q/n ² h]		3.2 0.43		4.2 0.98		4.9 0.59
Kapillar füllbares Porenvolumen [Vol.%]		11.0 0.7		10.1 0.6		9.8 1.2
Steighöhe 24h [mm]		29.0 1.0		34.0 4.0		39.0 2.0
Gaspermeabilität [m ²]	3.50E-17	3.10E-17	2.50E-17	3.20E-17	1.46E-16	9.50E-17
	2.90E-17	3.79E-18	4.20E-17	8.74E-18	5.60E-17	4.61E-17
	2.80E-17		3.00E-17		8.40E-17	
Chloridmigrationskoeffizient nach ibac [m ² /s]	5.23E-12	4.78E-12	1.24E-11	1.46E-11	7.53E-12	7.82E-12
	4.15E-12	5.64E-13	1.42E-11	2.42E-12	8.10E-12	4.03E-13
	4.97E-12		1.72E-11			
ASTM [Coulomb]	1167	1367	3070	3017	2013	2004
	1390	190	3250	264	2136	136
	1544		2731		1864	
Leitfähigkeit nach Streicher [mS/cm]	0.74	0.76	1.03	0.92	1.21	1.09
	0.89	0.13	0.91	0.10	0.98	0.12
	0.63		0.83		1.09	
Aufsaugversuch Chloridprofil [M% bez. Beton]	Mittlerer Chloridgehalt im Profil	Differenz zu Sollkonz., Mittelwert	Mittlerer Chloridgehalt im Profil	Differenz zu Sollkonz., Mittelwert		
	0-10mm	0.102	0.045	0.145	0.072	
	10-20mm	0.064	0.007	0.076	0.003	
	20-30mm	0.072	0.015	0.067	-0.006	
	30-40mm	0.065	0.008	0.053	-0.021	
	40-50mm	0.049	-0.009	0.057	-0.017	

Beton von Drittprojekten

Bauwerk	Compognabrücke 325ka/m ³ CEMI 42.5 W/Z 0.5		Compognabrücke 325ka/m ³ CEMI 42.5 W/Z		Compognabrücke 350ka/m ³ CEMI 42.5 W/B 0.45-	
	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.
Prüfungen 28 Tg						
Druckfestigkeit [N/mm ²]	41.1 41.4	41.3 0.2	45.5 45.2	45.4 0.2	min.: 57.7 max.: 63.6	60.5 1.6
Wasserleitfähigkeit q _w bei Bauteildicke = 300mm [g/n ² h]		6.50 0.80		4.5 0.60		2.5 0.20
Kapillar füllbares Porenvolumen [Vol.%]						
Steighöhe 24h [mm]						
Gaspermeabilität [m ²]	3.60E-17 3.90E-17 4.10E-17	3.90E-17 2.52E-18	1.40E-17 1.90E-17 1.80E-17	1.70E-17 2.65E-18	5.00E-18 6.00E-18 6.00E-18	6.00E-18 5.77E-19
Chloridmigrationskoeffizient nach ibac [m ² /s]	1.65E-11 1.81E-11 1.58E-11	1.68E-11 1.18E-12	1.90E-11 1.85E-11 1.68E-11	1.81E-11 1.15E-12	5.06E-12 5.43E-12 4.79E-12	5.10E-12 3.21E-13
Prüfungen 90 Tg						
Druckfestigkeit [N/mm ²]						
Gaspermeabilität [m ²]	4.60E-17 2.90E-17 2.50E-17	3.30E-17 1.12E-17	1.40E-17 1.40E-17 1.50E-17	1.40E-17 5.77E-19	1.50E-17 7.00E-18 6.00E-18	9.00E-18 4.93E-18
Chloridmigrations-koeffizient nach ibac [m ² /s]	1.70E-11 1.65E-11 1.58E-11	1.64E-11 6.03E-13	1.34E-11 1.40E-11 9.71E-12	1.24E-11 2.32E-12	3.91E-12 2.65E-12 2.75E-12	3.11E-12 7.00E-13
Aufsaugversuch Chloridprofil [M% bez. Beton], Mittelwerte	Heisswasser- aufschluss	RFA	Heisswasser- aufschluss	RFA	Heisswasser- aufschluss	RFA
0-10mm	0.124	0.126	0.134	0.140	0.148	0.164
10-20mm	0.078	0.076	0.065	0.071	0.054	0.060
20-30mm	0.066	0.066	0.046	0.049	0.041	0.050
30-40mm	0.050	0.056	0.032	0.036	0.030	0.036
40-50mm	0.054	0.060	0.031	0.033	0.025	0.029
Prüfungen 360 Tg						
Druckfestigkeit [N/mm ²]						
Wasserleitfähigkeit q _w bei Bauteildicke = 300mm [g/n ² h]		2.9 0.30		1.6 0.22		2.2 0.15
Kapillar füllbares Porenvolumen [Vol.%]		11.4 1.5		10.8 1.1		11.2 0.9
Steighöhe 24h [mm]		27.4 2.5		20.8 2.4		24 0.6
Gaspermeabilität [m ²]	6.50E-17 3.60E-17 3.50E-17	4.50E-17 1.70E-17	3.20E-17 2.80E-17 2.10E-17	2.70E-17 5.57E-18	1.20E-17 1.00E-17 9.00E-18	1.10E-17 1.53E-18
Chloridmigrationskoeffizient nach ibac [m ² /s]	1.43E-11 1.14E-11 1.13E-11	1.23E-11 1.70E-12	1.46E-11 1.04E-11 1.14E-11	1.22E-11 2.19E-12	3.11E-12 2.47E-12 1.72E-12	2.43E-12 6.96E-13
ASTM [Coulomb]	2129 1940 2456	2175 261	1934 2091 1761	1928 165	2591 2339 2717	2549 192
Leitfähigkeit nach Streicher [mS/cm]	1.53 2.34 1.71	1.86 0.43	1.11 1.33 0.91	1.11 0.21	1.15 0.82 0.69	0.89 0.24
Aufsaugversuch Chloridprofil [M% bez. Beton]	Mittlerer Chloridgehalt im Profil	Differenz zu Sollkonz., Mittelwert	Mittlerer Chloridgehalt im Profil	Differenz zu Sollkonz., Mittelwert	Mittlerer Chloridgehalt im Profil	Differenz zu Sollkonz., Mittelwert
0-10mm	0.081	0.012	0.097	0.043	0.131	0.078
10-20mm	0.053	-0.017	0.041	-0.013	0.043	-0.010
20-30mm	0.053	-0.017	0.042	-0.012	0.043	-0.010
30-40mm	0.047	-0.022	0.037	-0.017	0.031	-0.022
40-50mm	0.044	-0.028				

Beton von Drittprojekten

Bauwerk	Compognabrücke		SCC Mischung 2		SCC Mischung 4	
	325ka/m ³ CEMI 42.5, W/B 0.43		350ka/m ³ CEMI 42.5, W/B		350ka/m ³ CEMI 42.5, W/B 0.4	
Prüfungen 28 Tg	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.
Druckfestigkeit [N/mm ²]	min.: 49.1 max.: 55.7	52.4 1.6		60		36.8
Wasserleitfähigkeit qw bei Bauteildicke = 300mm [g/n ² h]		2.7 0.20		5.1 0.80		4.5 0.40
Kapillar füllbares Porenvolumen [Vol.%]						
Steighöhe 24h [mm]						
Gaspermeabilität [m ²]	1.20E-17 4.90E-17 8.00E-18	2.30E-17 2.26E-17				
Chloridmigrationskoeffizient nach ibac [m ² /s]	4.69E-12 5.41E-12 5.09E-12	5.06E-12 3.61E-13	1.63E-11 1.84E-11 1.73E-11	1.73E-11 1.05E-12	1.26E-11 1.58E-11 1.48E-11	1.44E-11 1.64E-12
Prüfungen 90 Tg	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.
Druckfestigkeit [N/mm ²]				59.9		39.7
Gaspermeabilität [m ²]	7.00E-18 7.00E-18 5.00E-18	6.00E-18 1.15E-18				
Chloridmigrations-koeffizient nach ibac [m ² /s]	6.26E-12 5.49E-12 2.09E-12	4.61E-12 2.22E-12	1.14E-11 1.14E-11	1.14E-11 0.00E+00	9.00E-12 1.08E-11 1.06E-11	1.01E-11 9.87E-13
Aufsaugversuch Chloridprofil [M% bez. Beton], Mittelwerte	Heisswasser-aufschluss	RFA				
0-10mm	0.141	0.152				
10-20mm	0.059	0.066				
20-30mm	0.049	0.057				
30-40mm	0.029	0.040				
40-50mm	0.025	0.033				
Prüfungen 360 Tg	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.
Druckfestigkeit [N/mm ²]						
Wasserleitfähigkeit qw bei Bauteildicke = 300mm [g/n ² h]		1.9 0.28				
Kapillar füllbares Porenvolumen [Vol.%]		10.5 1.4				
Steighöhe 24h [mm]		23 1.1				
Gaspermeabilität [m ²]	9.00E-18 5.00E-18 1.30E-17	9.00E-18 4.00E-18				
Chloridmigrationskoeffizient nach ibac [m ² /s]	4.48E-12 4.26E-12 3.30E-12	4.01E-12 6.27E-13	9.84E-12 6.60E-12 5.26E-12	7.23E-12 2.35E-12	7.14E-12 5.53E-12 4.41E-12	5.69E-12 1.37E-12
ASTM [Coulomb]	3211 2972 2647	2943 283				
Leitfähigkeit nach Streicher [mS/cm]	1.16 0.98 0.87	1 0.15				
Aufsaugversuch Chloridprofil [M% bez. Beton]	Mittlerer Chloridgehalt im Profil	Differenz zu Sollkonz., Mittelwert				
0-10mm	0.108	0.056				
10-20mm	0.047	-0.005				
20-30mm	0.038	-0.014				
30-40mm	0.032	-0.020				
40-50mm						

Beton von Drittprojekten

Bauwerk	SCC Mischung 11		SCC Mischung 10		Nesslaboden	
	350ka/m ³ CEMI 42.5, W/B 0.37		350ka/m ³ CEMI 42.5, W/B 0.37		325ka/m ³ CEMI 42.5, W/Z 0.47	
Prüfungen 28 Tg	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.
Druckfestigkeit [N/mm ²]		46.2		56.9	39.8 39.9 39.6	39.8 0.2
Wasserleitfähigkeit qw bei Bauteildicke = 300mm [g/n ² h]		4.2 0.26		3.6 0.13		4.5 1.1
Kapillar füllbares Porenvolumen [Vol.%]		11.9 0.5		11.9 0.5		10.4 0.7
Steighöhe 24h [mm]						
Gaspermeabilität [m ²]					4.20E-17 6.10E-17 8.30E-17	6.20E-17 2.05E-17
Chloridmigrationskoeffizient nach ibac [m ² /s]	6.11E-12 8.01E-12 1.13E-11	8.49E-12 2.63E-12	6.23E-12 7.12E-12 9.04E-12	7.46E-12 1.44E-12	1.01E-11 1.55E-11 1.57E-11	1.38E-11 3.18E-12
Prüfungen 90 Tg	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.
Druckfestigkeit [N/mm ²]					45.3 44.4	44.9 0.6
Gaspermeabilität [m ²]					3.60E-17 3.20E-17 3.00E-17	3.30E-17 3.06E-18
Chloridmigrations-koeffizient nach ibac [m ² /s]	5.88E-12 4.41E-12 4.98E-12	5.09E-12 7.41E-13	6.31E-12 6.78E-12 5.39E-12	6.16E-12 7.07E-13	1.24E-11 1.27E-11 1.07E-11	1.19E-11 1.08E-12
Aufsaugversuch Chloridprofil [M% bez. Beton], Mittelwerte					Wasserleitfähigkeit qw bei Bauteildicke = 300mm	3.7 0.4
0-10mm					Kapillar füllbares	12.2 0.6
10-20mm						
20-30mm						
30-40mm						
40-50mm						
Prüfungen 360 Tg	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.
Druckfestigkeit [N/mm ²]					48.7 47.1	47.9 1.1
Wasserleitfähigkeit qw bei Bauteildicke = 300mm [g/n ² h]						2.9 0.37
Kapillar füllbares Porenvolumen [Vol.%]						10.0 1.4
Steighöhe 24h [mm]						29.1 1.6
Gaspermeabilität [m ²]					5.50E-17 4.10E-17 3.80E-17	4.50E-17 9.07E-18
Chloridmigrationskoeffizient nach ibac [m ² /s]	5.24E-12 5.06E-12 3.71E-12	4.67E-12 8.36E-13	5.92E-12 4.54E-12 4.22E-12	4.89E-12 9.03E-13	1.91E-11 1.67E-11 1.72E-11	1.77E-11 1.27E-12
ASTM [Coulomb]						
Leitfähigkeit nach Streicher [mS/cm]						
Aufsaugversuch Chloridprofil [M% bez. Beton]						
0-10mm						
10-20mm						
20-30mm						
30-40mm						
40-50mm						

Beton von Drittprojekten

Bauwerk	Nollabrücke		Schöneichtunnel		Schöneichtunnel	
	325ka/m ³ CEMII/A-S, W/B 0.48		350ka/m ³ CEMI 42.5, W/Z 0.46		450ka/m ³ CEMII/A-L, W/Z 0.41-	
Prüfungen 28 Tg	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.
Druckfestigkeit [N/mm ²]	42.5 44.3 43.4	43.4 0.9	min.: 53.7 max.: 57.3	55.1 1.6	min.: 58.1 max.: 60.9	59.3 1.1
Wasserleitfähigkeit qw bei Bauteildicke = 300mm [g/n ² h]		3.6 0.5		3.0 0.4		3.1 0.2
Kapillar füllbares Porenvolumen [Vol.%]		11.4 0.8		11.7 0.6		13.4 0.2
Steighöhe 24h [mm]				27.1 2.0		25.9 0.7
Gaspermeabilität [m ²]	4.00E-17 3.70E-17 4.30E-17	4.00E-17 3.00E-18				
Chloridmigrationskoeffizient nach ibac [m ² /s]	1.32E-11 1.07E-11 1.14E-11	1.18E-11 1.29E-12	1.17E-11 1.26E-11 1.01E-11	1.15E-11 1.27E-12	8.84E-12 9.48E-12 8.35E-12	8.89E-12 5.67E-13
Prüfungen 90 Tg	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.
Druckfestigkeit [N/mm ²]	48.5 50.8	49.7 1.6				
Gaspermeabilität [m ²]	1.80E-17 2.40E-17 2.30E-17	2.20E-17 3.21E-18				
Chloridmigrations-koeffizient nach ibac [m ² /s]	1.23E-11 8.66E-12 1.01E-11	1.03E-11 1.83E-12				
Aufsaugversuch Chloridprofil [M% bez. Beton], Mittelwerte	Wasserleitfähigkeit qw bei Bauteildicke = 300mm	4.1 0.9				
0-10mm	Kapillar füllbares	11.0 1.1				
10-20mm						
20-30mm						
30-40mm						
40-50mm						
Prüfungen 360 Tg	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.
Druckfestigkeit [N/mm ²]	50.6 51.2	50.9 0.4				
Wasserleitfähigkeit qw bei Bauteildicke = 300mm [g/n ² h]		3.0 0.69				
Kapillar füllbares Porenvolumen [Vol.%]		12.3 1.7				
Steighöhe 24h [mm]		26.2 1.6				
Gaspermeabilität [m ²]	4.00E-17 2.10E-17 2.40E-17	2.80E-17 1.02E-17				
Chloridmigrationskoeffizient nach ibac [m ² /s]	1.38E-11 9.01E-12 7.46E-12	1.01E-11 3.31E-12				
ASTM [Coulomb]						
Leitfähigkeit nach Streicher [mS/cm]						
Aufsaugversuch Chloridprofil [M% bez. Beton]						
0-10mm						
10-20mm						
20-30mm						
30-40mm						
40-50mm						

Beton von Drittprojekten

Bauwerk	Schöneichtunnel 361kg/m ³ CEMII/A-L, W/Z		Schöneichtunnel 361kg/m ³ CEMII/A-L, W/Z		Schöneichtunnel 425kg/m ³ CEMII/A-L, W/Z	
	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert u. Standardabw.
Prüfungen 28 Tg						
Druckfestigkeit [N/mm ²]	61.1 63.5 61.8	62.1 1.2	61.7 61.4 61.1	61.4 0.3	min.:42.4 max.: 45.0	43.4 1.0
Wasserleitfähigkeit qw bei Bauteildicke = 300mm [g/n ² h]		1.7 0.3		2.2 0.2		
Kapillar füllbares Porenvolumen [Vol.%]		12.2 0.6		12.3 0.4		
Steighöhe 24h [mm]		20.0 1.1		22.9 0.9		
Gaspermeabilität [m ²]						
Chloridmigrationskoeffizient nach ibac [m ² /s]	1.67E-12 3.12E-12 2.02E-12	2.27E-12 7.57E-13			3.67E-12 3.86E-12	3.76E-12 1.34E-13
Prüfungen 90 Tg						
Druckfestigkeit [N/mm ²]	73.8 75.5 76.1	75.1 1.2				
Gaspermeabilität [m ²]						
Chloridmigrations-koeffizient nach ibac [m ² /s]						
Aufsaugversuch Chloridprofil [M% bez. Beton], Mittelwerte 0-10mm 10-20mm 20-30mm 30-40mm 40-50mm						
Prüfungen 360 Tg						
Druckfestigkeit [N/mm ²]						
Wasserleitfähigkeit qw bei Bauteildicke = 300mm [g/n ² h]						
Kapillar füllbares Porenvolumen [Vol.%]						
Steighöhe 24h [mm]						
Gaspermeabilität [m ²]						
Chloridmigrationskoeffizient nach ibac [m ² /s]			2.94E-12 2.63E-12 3.19E-12	2.92E-12 2.80E-13		
ASTM [Coulomb]						
Leitfähigkeit nach Streicher [mS/cm]						
Aufsaugversuch Chloridprofil [M% bez. Beton] 0-10mm 10-20mm 20-30mm 30-40mm 40-50mm						

Betone von Drittprojekten

Bauwerk	Schöneichtunnel	
	370ka/m ³ CEMII/A-L, W/Z 0.44.	
Prüfungen 28 Tg	<i>Einzelwerte</i>	<i>Mittelwert u. Standardabw.</i>
Druckfestigkeit [N/mm ²]	min.: 40.9 max.: 54.7	51.3 5.9
Wasserleitfähigkeit qw bei Bauteildicke = 300mm [g/n ² h]		2.2 0.2
Kapillar füllbares Porenvolumen [Vol.%]		14.0 0.7
Steighöhe 24h [mm]		21.2 1.2
Gaspermeabilität [m ²]		
Chloridmigrationskoeffizient nach ibac [m ² /s]	1.53E-11 1.27E-11 1.15E-11	1.32E-11 1.94E-12
Prüfungen 90 Tg	<i>Einzelwerte</i>	<i>Mittelwert u. Standardabw.</i>
Druckfestigkeit [N/mm ²]		
Gaspermeabilität [m ²]		
Chloridmigrations-koeffizient nach ibac [m ² /s]		
Aufsaugversuch Chloridprofil [M% bez. Beton], Mittelwerte 0-10mm 10-20mm 20-30mm 30-40mm 40-50mm		
Prüfungen 360 Tg	<i>Einzelwerte</i>	<i>Mittelwert u. Standardabw.</i>
Druckfestigkeit [N/mm ²]		
Wasserleitfähigkeit qw bei Bauteildicke = 300mm [g/n ² h]		
Kapillar füllbares Porenvolumen [Vol.%]		
Steighöhe 24h [mm]		
Gaspermeabilität [m ²]		
Chloridmigrationskoeffizient nach ibac [m ² /s]		
ASTM [Coulomb]		
Leitfähigkeit nach Streicher [mS/cm]		
Aufsaugversuch Chloridprofil [M% bez. Beton] 0-10mm 10-20mm 20-30mm 30-40mm 40-50mm		

Bauwerksbetone

Bauwerk	Hergiswil Fahrbahnplatte		Hergiswil Hohlkasten		Arsenal Stützen		
	<i>Einzelwerte</i>	<i>Mittelwert u. Standardabw.</i>	<i>Einzelwerte</i>	<i>Mittelwert u. Standardabw.</i>	<i>Einzelwerte</i>	<i>Mittelwert u. Standardabw.</i>	
Druckfestigkeit [N/mm ²]	60.6	67.3	72.2	61.1	77.9	72.2	
	77.3	8.8	47.4	12.6	62.6	8.4	
	64.1		63.8		76.1		
Wasserleitfähigkeit q _w bei Bauteildicke = 300mm [g/m ² h]		2.8		2.8		2.4	
		2.14		0.52		0.86	
Kapillar füllbares Porenvolumen [Vol. %]		9.3		9.9		10.2	
		1.1		0.7		0.4	
Steighöhe 24h [mm]		30.4		31.2		26	
		9.7		3.4		5	
Gaspermeabilität [m ²]	6.71E-16	4.13E-16	3.60E-17	3.90E-17	6.00E-17	3.00E-17	
	5.50E-16	3.47E-16	3.00E-17	1.19E-17	2.00E-17	2.61E-17	
	1.80E-17		5.30E-17		1.10E-17		
Chloridmigrationskoeffizient nach ibac [m ² /s]	5.70E-12	1.08E-11	1.24E-11	1.25E-11	8.78E-12	8.13E-12	
	1.28E-11	4.49E-12	1.44E-11	1.80E-12	9.05E-12	1.37E-12	
	1.40E-11		1.08E-11		6.56E-12		
ASTM [Coulomb]	3814	3806	2512	2643	1502	1463	
	4029	227	2887	212	1245	201	
	3575		2529		1641		
Leitfähigkeit nach Streicher [mS/cm]	1.65	1.23	1.03	0.87	0.53	0.47	
	1.15	0.39	0.68	0.18	0.51	0.10	
	0.89		0.89		0.35		
Aufsaugversuch Steighöhe 24h [mm]	65	59	40	41	40	51	
	63	9	40	1	58	10	
	49		42		55		
Aufsaugversuch Chloridprofil [M% bez. Beton]	Mittlerer Chloridgehalt im Profil	Differenz zu Sollkonz., Mittelwert	Mittlerer Chloridgehalt im Profil	Differenz zu Sollkonz., Mittelwert	Mittlerer Chloridgehalt im Profil	Differenz zu Sollkonz., Mittelwert	
	0-10mm	0.140	0.082	0.116	0.039	0.121	0.063
	10-20mm	0.064	0.007	0.076	-0.001	0.053	-0.005
	20-30mm	0.049	-0.009	0.082	0.004	0.046	-0.012
	30-40mm	0.047	-0.011	0.070	-0.008	0.046	-0.012
	40-50mm	0.040	-0.017	0.073	-0.005	0.039	-0.019
Chloridprofile am Objekt Höchster Chloridgehalt 0-10mm [M%. bez. Beton]	0.166		0.071				

Bauwerksbetone

Bauwerk	Arsenal Fahrbahnplatte		Kirchberg Stütze		Schluochtbrücke		
Prüfungen	<i>Einzelwerte</i>	<i>Mittelwert u. Standardabw.</i>	<i>Einzelwerte</i>	<i>Mittelwert u. Standardabw.</i>	<i>Einzelwerte</i>	<i>Mittelwert u. Standardabw.</i>	
Druckfestigkeit [N/mm ²]	95.3; 88; 43.4	84.2	95.6; 83.3;	82.7	25	19.7	
	91.0; 88.5	21.0	76.1; 73.2	7.8	19.3	5.2	
	110; 73.4		83.9; 84.0		14.7		
Wasserleitfähigkeit q _w bei Bauteildicke = 300mm [q/m ² h]		1.3		0.9		4.0	
Kapillar füllbares Porenvolumen [Vol.%]		0.24		0.70		0.81	
		10.4		7.8		17.0	
Steighöhe 24h [mm]		0.8		0.7		1.4	
		19.0		17.0		26.0	
Gaspermeabilität [m ²]		2.0		7.0		2.0	
			1.53E-16	2.23E-16	3.50E-17	1.43E-16	
			1.64E-16	1.12E-16	4.50E-17	1.77E-16	
Chloridmigrationskoeffizient nach ibac [m ² /s]			3.53E-16		3.47E-16		
	5.63E-12	3.99E-12	5.74E-12	4.45E-12	3.26E-11	3.17E-11	
	3.29E-12	1.43E-12	2.64E-12	1.62E-12	3.09E-11	1.20E-12	
ASTM [Coulomb]			4.98E-12				
	1011	1080	1183	1049	4984	4637	
	1407	299	957	119	4290	491	
Leitfähigkeit nach Streicher [mS/cm]			1007				
	0.58	0.46	0.29	0.27	3.36	3.06	
	0.48	0.13	0.20	0.06	3.66	0.80	
Aufsaugversuch Steighöhe 24h [mm]			0.31		2.15		
	35	39	99	95	25	25	
	42	4	99	6	25	0	
Aufsaugversuch Chloridprofil [M% bez. Beton]			88				
		Mittlerer Chloridgehalt im Profil	Differenz zu Sollkonz., Mittelwert	Mittlerer Chloridgehalt im Profil	Differenz zu Sollkonz., Mittelwert	Mittlerer Chloridgehalt im Profil	Differenz zu Sollkonz., Mittelwert
	0-10mm	0.128	0.074	0.081	0.047	0.186	-0.044
	10-20mm	0.049	-0.005	0.030	-0.003	0.128	-0.101
	20-30mm	0.037	-0.017	0.031	-0.003	0.118	-0.112
	30-40mm	0.033	-0.021	0.033	0.000	0.105	-0.125
40-50mm	0.026	-0.028	0.029	-0.004	0.098	-0.131	
Chloridprofile am Objekt Höchster Chloridgehalt 0-10mm [M%. bez. Beton]	0.211		0.140		0.085		

Bauwerksbetone

Bauwerk	Runcasut Fahrbahnplatte		Zuchwil Stütze		Hardstrasse Pfeiler		
Prüfungen	<i>Einzelwerte</i>	<i>Mittelwert u. Standardabw.</i>	<i>Einzelwerte</i>	<i>Mittelwert u. Standardabw.</i>	<i>Einzelwerte</i>	<i>Mittelwert u. Standardabw.</i>	
Druckfestigkeit [N/mm ²]	65.7	59.8	64.5	62.8	72.7	63.1	
	62.3	7.5	65.7	4.0	56.8	8.5	
	51.3		58.3		59.7		
Wasserleitfähigkeit q _w bei Bauteildicke = 300mm [q/m ² h]		3.6 0.43		4.7 2.94		3.1 1.10	
Kapillar füllbares Porenvolumen [Vol.%]		10.9 0.4		10.7 2.6		8.8 0.5	
Steighöhe 24h [mm]		31.0 2.0		34.0 9.0		32.0 4.0	
Gaspermeabilität [m ²]	1.70E-17	9.00E-18	6.00E-18	4.00E-18	6.00E-18	2.00E-17	
	5.00E-18	7.23E-18	5.00E-18	2.08E-18	3.70E-17	1.55E-17	
	4.00E-18		2.00E-18		2.00E-17		
Chloridmigrationskoeffizient nach ibac [m ² /s]	4.75E-12	7.54E-12	1.04E-11	1.14E-11	6.05E-12	6.77E-12	
	8.49E-12	2.46E-12	1.54E-11	3.55E-12	6.49E-12	8.94E-13	
	9.38E-12		8.54E-12		7.77E-12		
ASTM [Coulomb]	1784	1760	2610	2443	1029	1190	
	1939	193	2204	213	1267	139	
	1556		2516		1273		
Leitfähigkeit nach Streicher [mS/cm]	0.67	0.69	0.76	0.62	0.69	0.69	
	0.60	0.11	0.53	0.12	0.69	0.00	
	0.82		0.58		0.69		
Aufsaugversuch Steighöhe 24h [mm]	52	53	39	40	68	69	
	56	2	47	7	56	13	
	52		33		82		
Aufsaugversuch Chloridprofil [M% bez. Beton]	Mittlerer Chloridgehalt im Profil	Differenz zu Sollkonz., Mittelwert	Mittlerer Chloridgehalt im Profil	Differenz zu Sollkonz., Mittelwert	Mittlerer Chloridgehalt im Profil	Differenz zu Sollkonz., Mittelwert	
	0-10mm	0.172	0.120	0.061	-0.019	0.151	0.103
	10-20mm	0.064	0.012	0.076	-0.004	0.059	0.011
	20-30mm	0.056	0.003	0.083	0.003	0.040	-0.008
	30-40mm	0.045	-0.007	0.081	0.001	0.042	-0.007
	40-50mm	0.040	-0.012	0.072	-0.008	0.038	-0.011
Chloridprofile am Objekt Höchster Chloridgehalt 0-10mm [M%. bez. Beton]	0.032		0.041		0.239		

Bauwerksbetone

Bauwerk	Göschenen		Europabrücke		Galerie Harzbüchel	
Prüfungen	<i>Einzelwerte</i>	<i>Mittelwert u. Standardabw.</i>	<i>Einzelwerte</i>	<i>Mittelwert u. Standardabw.</i>	<i>Einzelwerte</i>	<i>Mittelwert u. Standardabw.</i>
Druckfestigkeit [N/mm ²]	69.4	65.6	91.7	93.5	min.: 48.4	63.9
	59.4	5.4	97.6	3.6	max.: 89.9	9.9
	68.0		91.2			
Wasserleitfähigkeit q _w bei Bauteildicke = 300mm [q/m ² h]		2.4		3.3		1.7
Kapillar füllbares Porenvolumen [Vol.%]		0.25		1.03		0.2
		10.2		9.7		10.2
Steighöhe 24h [mm]		0.7		1.2		1.0
		26.0		31.0		22.2
Gaspermeabilität [m ²]		1.0		5.0		0.6
	1.50E-17	2.90E-17				
	1.90E-17 5.30E-17	2.09E-17				
Chloridmigrationskoeffizient nach ibac [m ² /s]	5.01E-12	7.19E-12	7.83E-12	8.98E-12	min.: 2.60E-12	4.70E-12
	7.30E-12	2.12E-12	1.01E-11	1.61E-12	max.: 7.59E-12	1.68E-12
	9.25E-12					
ASTM [Coulomb]	1750	1695	2254	2601		
	1808	149	2850	310		
	1525		2698			
Leitfähigkeit nach Streicher [mS/cm]	0.47	0.61	1.02	1.01		
	0.66	0.12	1.02	0.02		
	0.70		0.99			
Aufsaugversuch Steighöhe 24h [mm]	56	60	46	55		
	60	4	64	9		
	64		55			
Aufsaugversuch Chloridprofil [M% bez. Beton]	Mittlerer Chloridgehalt im Profil	Differenz zu Sollkonz., Mittelwert	Mittlerer Chloridgehalt im Profil	Differenz zu Sollkonz., Mittelwert		
	0-10mm	0.146	0.093	0.157	0.102	
	10-20mm	0.053	0.000	0.064	0.009	
	20-30mm	0.041	-0.012	0.046	-0.008	
	30-40mm	0.038	-0.015	0.039	-0.016	
	40-50mm	0.038	-0.015	0.037	-0.017	
Chloridprofile am Objekt Höchster Chloridgehalt 0-10mm [M%. bez. Beton]	0.010		0.280		0.214	

Anhang 2

Lineare Korrelationskoeffizienten

- Korrelation zwischen den Messwerten der Betone im Alter von 360 Tagen und mehr
- Korrelation zwischen den Messwerten der Betone im Alter von 28 Tagen
- Korrelation zwischen den Messwerten der Betone im Alter von 28 Tagen und jenen im Alter von 360 Tagen und mehr
- Korrelation zwischen den Messwerten der Aufsaugversuche mit den Labor- und Bauwerksbetonen

Lineare Korrelationskoeffizienten zwischen den gemessenen Parametern im Alter von 28 sowie 360 Tagen und mehr (Laborbetone, Betone aus Drittprojekten und Bauwerksbetone)

Korrelation zwischen den Messwerten der Betone im Alter von 360 Tagen und mehr		Korrelation zwischen den Messwerten der Betone im Alter von 28 Tagen		Korrelation zwischen den Messwerten der Betone im Alter von 28 Tagen und jenen im Alter von 360 Tagen und mehr	
Parameter	Korr. – koeffi- zient	Parameter	Korr. – koeffi- zient	Parameter	Korr. – koeffi- zient
Druckfestigkeit / Migrationskoeffizient	-0.590	Druckfestigkeit / Migrationskoeffizient	-0.622	Druckfestigkeit / Migrationskoeffizient	-0.615
Druckfestigkeit / Leitfähigkeit	-0.380			Druckfestigkeit / Leitfähigkeit	-0.623
Druckfestigkeit / Ladungsmenge ASTM	-0.771			Druckfestigkeit / Ladungsmenge ASTM	-0.607
Druckfestigkeit / Wasserleitfähigkeit	-0.527	Druckfestigkeit / Wasserleitfähigkeit	-0.487	Druckfestigkeit / Wasserleitfähigkeit	-0.511
Druckfestigkeit / Gaspermeabilität	0.063	Druckfestigkeit / Gaspermeabilität	-0.525	Druckfestigkeit / Gaspermeabilität	-0.548
Wasserleitfähigkeit / Migrationskoeffizient	0.594	Wasserleitfähigkeit / Migrationskoeffizient	0.596	Wasserleitfähigkeit / Migrationskoeffizient	0.403
Wasserleitfähigkeit / Ladungsmenge ASTM	0.419			Wasserleitfähigkeit / Ladungsmenge ASTM	0.104
Wasserleitfähigkeit / Leitfähigkeit	0.198			Wasserleitfähigkeit / Leitfähigkeit	0.736
Wasserleitfähigkeit / Gaspermeabilität	-0.105	Wasserleitfähigkeit / Gaspermeabilität	0.361	Wasserleitfähigkeit / Gaspermeabilität	0.529
Gaspermeabilität / Migrationskoeffizient	0.020	Gaspermeabilität / Migrationskoeffizient	0.322	Gaspermeabilität / Migrationskoeffizient	0.378
Gaspermeabilität / Leitfähigkeit	0.121			Gaspermeabilität / Leitfähigkeit	0.248
Gaspermeabilität / Ladungsmenge ASTM	0.316			Gaspermeabilität / Ladungsmenge ASTM	0.344

Korrelation zwischen den Messwerten der Betone im Alter von 360 Tagen und mehr		Korrelation zwischen den Messwerten der Betone im Alter von 28 Tagen		Korrelation zwischen den Messwerten der Betone im Alter von 28 Tagen und jenen im Alter von 360 Tagen und mehr	
Parameter	Korr.-koeffizient	Parameter	Korr. -koeffizient	Parameter	Korr. -koeffizient
Kapillarporosität / Leitfähigkeit	0.469	Kapillarporosität / Druckfestigkeit	-0.628	Kapillarporosität / Leitfähigkeit	0.450
Kapillarporosität / Ladungsmenge ASTM	0.617			Kapillarporosität / Ladungsmenge ASTM	0.213
Kapillarporosität / Migrationskoeffizient	0.327	Kapillarporosität / Migrationskoeffizient	0.205	Kapillarporosität / Migrationskoeffizient	0.175
w/B / Wasserleitfähigkeit	0.815			w/B / Wasserleitfähigkeit	0.229
Kapillarporosität / Wasserleitfähigkeit	0.380	Kapillarporosität / Wasserleitfähigkeit	0.615	Kapillarporosität / Wasserleitfähigkeit	0.492
Kapillarporosität / Gaspermeabilität	0.316	Kapillarporosität / Gaspermeabilität	0.661	Kapillarporosität / Gaspermeabilität	0.540
w/B / Gaspermeabilität	0.616	w/B / Gaspermeabilität	0.602	w/B / Gaspermeabilität	0.513
Migrationskoeffizient / Leitfähigkeit	0.430	w/B / Wasserleitfähigkeit	0.299	Druckfestigkeit / Druckfestigkeit	0.946
Migrationskoeffizient / Ladungsmenge ASTM	0.669	w/B / Kapillarporosität	0.686	Migrationskoeffizient / Migrationskoeffizient	0.759
Ladungsmenge ASTM / Leitfähigkeit	0.606	w/B / Druckfestigkeit	-0.414	Wasserleitfähigkeit / Wasserleitfähigkeit	0.279
w/B / Ladungsmenge ASTM	0.400				
w/B / Migrationskoeffizient	0.558	w/B / Migrationskoeffizient	0.314		
w/B / Leitfähigkeit	0.268				

Korrelation zwischen den Messwerten der Aufsaugversuche mit den Labor- und Bauwerksbetonen¹⁾

Parameter	Korr.-koeffizient
Chloridgehalt in 0-10mm Tiefe / Ladungsmenge ASTM	0.457
Chloridgehalt in 0-10mm Tiefe / Chloridmigrationskoeffizient	0.480
Chloridgehalt in 0-10mm Tiefe / Leitfähigkeit	0.487
Chloridgehalt in 0-10mm Tiefe / Wasserleitfähigkeit	0.481
Chloridgehalt in 0-10mm Tiefe / Kapillarporosität	0.435
Chloridgehalt in 0-10mm Tiefe / Gaspermeabilität	0.103
Chloridgehalt in 0-10mm Tiefe / Druckfestigkeit	-0.369
Chloridgehalt in 0-10mm Tiefe / w/B	0.529

Mittlere Tiefe der Anreicherung über der SOLL-Konzentration / Ladungsmenge ASTM	-0.242
Mittlere Tiefe der Anreicherung über der SOLL-Konzentration. / Leitfähigkeit	-0.242
Mittlere Tiefe der Anreicherung über der SOLL-Konzentration. / Chloridmigrationskoeffizient	-0.338
Mittlere Tiefe der Anreicherung über der SOLL-Konzentration. / Druckfestigkeit	0.128
Mittlere Tiefe der Anreicherung über der SOLL-Konzentration / Wasserleitfähigkeit	0.025
Mittlere Tiefe der Anreicherung über der SOLL-Konzentration / Gaspermeabilität	0.026
Mittlere Tiefe der Anreicherung über der SOLL-Konzentration / Kapillarporosität	-0.200
Mittlere Tiefe der Anreicherung über der SOLL-Konzentration. / w/B	0.140

Differenz zur SOLL-Konzentration in 0-10mm Tiefe / Ladungsmenge ASTM	-0.197
Differenz zur SOLL-Konzentration in 0-10mm Tiefe / Leitfähigkeit	-0.452
Differenz zur SOLL-Konzentration in 0-10mm Tiefe / Chloridmigrationskoeffizient	-0.355
Differenz zur SOLL-Konzentration in 0-10mm Tiefe / Druckfestigkeit	0.300
Differenz zur SOLL-Konzentration in 0-10mm Tiefe / Wasserleitfähigkeit	0.152
Differenz zur SOLL-Konzentration in 0-10mm Tiefe / Gaspermeabilität	-0.045
Differenz zur SOLL-Konzentration in 0-10mm Tiefe / Kapillarporosität	-0.445
Differenz zur SOLL-Konzentration in 0-10mm Tiefe / w/B	0.422

1): inklusive Werte der Compognabrücke