

Chloridwiderstand von Betonen

Autor(en): **Merz, Christine / Ungricht, Heidi**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Cementbulletin**

Band (Jahr): **69 (2001)**

Heft 11

PDF erstellt am: **17.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-153876>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

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

Chloridwiderstand von Betonen

In korrosionsgefährdeten Bauwerken stellt der Widerstand des Betons gegenüber eindringenden Chloridionen eine der wichtigsten Eigenschaften dar.

Die Korrosion der Bewehrung ist eine der wichtigsten Schadensursachen an Stahlbeton-Bauwerken im Strassenwesen. Sie wird durch eindringende Salze ausgelöst. Eine mangelhafte Betondeckung und/oder eine zu geringe Dichtigkeit des Deckbetons können schon nach kurzer Zeit zu Schäden führen.

Instandsetzungsarbeiten werden immer teurer und sind wegen des steigenden Verkehrsvolumens immer schwieriger zu realisieren. Eine vom Bundesrat eingesetzte Arbeitsgruppe veröffentlichte 1998 einen Bericht [2], in dem Vorschläge zur Sicherstellung einer möglichst kostengünstigen technisch ausreichenden Substanzerhaltung der Nationalstrassenwerke gemacht wurden. Darin wurden unter anderem Forschungen zum Thema «Null-Unterhaltsverfahren» empfohlen. Gemäss Definition der Arbeitsgruppe sind Null-Unterhaltsverfahren «Bauweisen, die sich gegenüber anderen durch eine ausserordentliche Langlebigkeit bei möglichst geringem Unterhalt auszeichnen».

Die unterhaltsfreie Nutzungsdauer von Stahlbetonbauten wird massgeblich durch den Zeitpunkt des Auftretens der chloridinduzierten Korrosion und der Ge-

schwindigkeit der Schadensentwicklung beeinflusst. In einem korrosionsgefährdeten Bauwerk stellt deshalb der Widerstand des Betons gegenüber eindringenden Chloridionen eine der wichtigsten Eigenschaften dar. Diese Eigenschaft wird im Folgenden «Chloridwiderstand» genannt.

Transportmechanismen und Kenngrössen

Chloridionen können über verschiedene Transportmechanismen in den Beton gelangen. Im nicht wassergesättigten Betonoberflächenbereich dominiert normalerweise das kapillare Saugen («Huckepack»-Transport). In grösseren Tiefen, wo der Beton einen konstanten Feuchtigkeitsgehalt aufweist, bewegen sich Chloridionen mittels Diffusion durch den Porenraum. Die treibende Kraft ist dabei der Ausgleich der Ionenkonzentrationen im Porenwasser.

Die für den Chloridwiderstand wichtigen Transportarten in Betonen so-

wie die dazu gehörenden Kenngrössen sind in *Tabelle 1* zusammengefasst.

Widerstand gegen chloridinduzierte Korrosion

Der Widerstand eines Bauteils aus Stahlbeton gegen chloridinduzierte Korrosion ist um so höher,

- je niedriger das kapillare Saugen und der Chloriddiffusionskoeffizient des Betons sind bzw. je dichter der Beton ist
- je grösser die Betondeckung ist
- je höher die Chloridbindekapazität des Zements ist
- je höher der kritische Chloridgehalt für relevante Korrosion ist
- je höher der elektrische Betonwiderstand ist und je höher die elektrochemischen Widerstände sind.

Zur Sicherstellung oder Erhöhung der Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauten ergeben sich demnach verschiedene Möglichkeiten. In vielen Fällen ist eine genügende Betondeckung in Kombination mit einer

Transportart	Treibende Kraft	Transportkoeffizient	Kenngrösse [Einheit]
Kapillares Saugen	Kapillardruck	Wasseraufnahmekoeffizient Wassereindringkoeffizient	k_A [g/m ² s ^{0,5}] k_E [m/s ^{0,5}]
Ionendiffusion	Konzentrationsgradient	Diffusionskoeffizient	D [m ² /s]
Wasserpermeation	Absolutdruckgefälle	Darcykoeffizient	k_D [m/s]
Migration	Elektrisches Gleichspannungsfeld	Ionenbeweglichkeit	u_i [cm ² /Vs]

Tab. 1 Die wichtigsten Chloridtransportarten in Betonen mit den dazu gehörenden Kenngrössen (nach [3]).

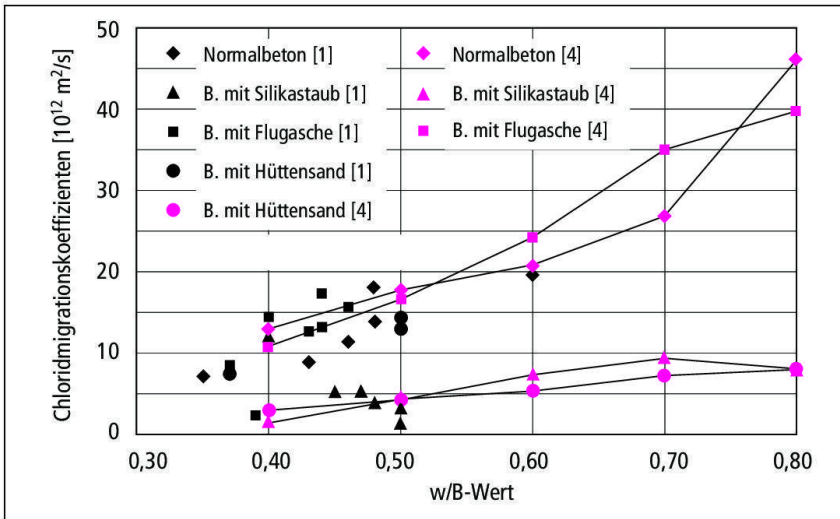


Abb. 1 Chloridmigrationskoeffizienten in Abhängigkeit von Wasserbindemittelwerten; Daten von TFB [1] und [4] (Laborbetone und Betone von Drittprojekten im Alter von 28 Tagen).
Zeichnungen: TFB

vernünftigen Betonqualität die effizienteste Massnahme zur Gewährleistung der erforderlichen Dauerhaftigkeit.

Dichter Beton

Bezogen auf die Dauerhaftigkeit ist die Dichtigkeit bzw. die Permeabilität das wichtigste Qualitätsmass für einen Beton. Neben allfälligen Rissen bestimmt das Porensystem die Dichtigkeit. Je nach Herkunft, Form und Grösse wird zwischen Verdichtungs-, Kapillar- und Gelporen unterschieden. Die Porenradienverteilung sowie der Volumenanteil an Gel-, Kapillar- und Luftporen hängen vor allem vom Zementgehalt, vom w/z-Wert und vom Hydratationsgrad des Zements ab. Junge Betone sind poröser als ältere.

Die verschiedenen Poren stehen miteinander in Verbindung; sie bilden ein kommunizierendes System, das im Kontaktbereich zu den Zuschlag-

körnern besonders durchlässig ist. Für die Wasser- und Schadstoffaufnahme sind vor allem die Kapillarporen verantwortlich. Ein «dichter» Beton weist deshalb einen niedrigen Anteil an wasserfüllbaren Kapillarporen auf.

Neben den Kapillarporen bilden Risse schnelle und direkte Wege beim Eintrag von Schadstoffen. Die Beschränkung der Rissbreiten durch die Bewehrung und konstruktive Massnahmen ist deshalb wichtig. Allerdings reduziert sich die Gefährdung grösstenteils auf wasserführende Risse; trockene bzw. alternierend trockene und nasse Risse sind relativ harmlos.

Erhöhung der Dichtigkeit

Während der Hydratation von Zementen wird Wasser (ungefähr 40 % der ursprünglichen Zementmasse) chemisch oder physikalisch gebunden. Betone mit einem w/z-Wert über 0,40 enthalten damit überschüssiges, freies Wasser, das, wenn es verdunstet, Porenräume bildet. Anders gesagt: Je höher der w/z-Wert ist, desto mehr Kapillarporen werden gebildet, die Wasser und damit auch Schadstoffe aufsaugen können. Ein tiefer w/z-Wert lässt sich mit Verflüssigern (BV und HBV) erreichen. Betone, deren Zuschläge möglichst dicht gepackt sind und einen möglichst grossen Grösstkorndurchmesser aufweisen (gute Sieblinie), benötigen weniger Zementleim; sie sind dadurch dichter.

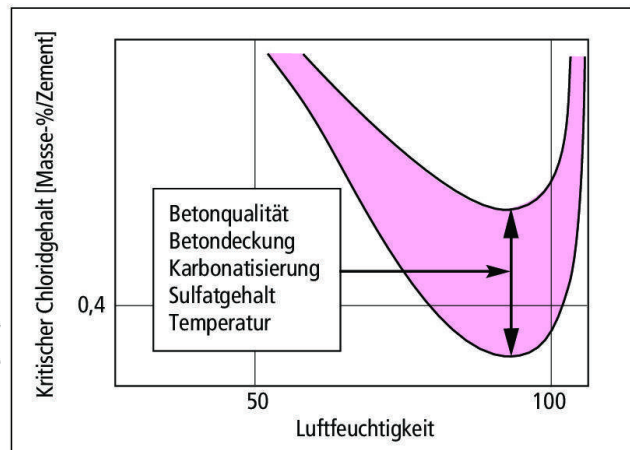


Abb. 2 Einflüsse auf den kritischen Chloridgehalt für die chloridinduzierte Korrosion (nach [3]).

Latent hydraulische und puzzolani-sche Zusatzstoffe wie calciumreiche Flugaschen und Hüttensande bzw. Silikastäube wirken langfristig dichtend auf das Betongefüge, da ihre Reaktionsprodukte Porenräume füllen.

In *Abbildung 1* sind Untersuchungen zum Einfluss der Bindemittelzusammensetzung und des Wasserbindemittelwerts (w/B) auf die Chloridmigrationskoeffizienten von Betonen zusammengefasst.

Die Verfeinerung der Porenstruktur des Zementsteins lässt sich auch durch eine grössere Mahlfeinheit des Zements erreichen.

Chloridbindevermögen von Betonen
Korrosionsfördernd sind nur die freien Chloridionen. Zementstein kann gewisse Mengen an Chloridionen chemisch oder physikalisch binden. Da Chloridionen zudem weniger mobil als Wasser sind, bilden sich relativ schnell Gradienten aus. Bei wiederholter Belastung erschöpft sich die Filterwirkung des Zementsteins; die Chloridfront dringt tiefer in den Beton ein.

Betone aus sulfatbeständigen Zementen mit einem niedrigen C_3A -Gehalt sowie aus hydraulischen Bindemitteln, in denen CEM I teilweise durch Silikastaub ersetzt ist, binden vergleichsweise wenig, Betone aus

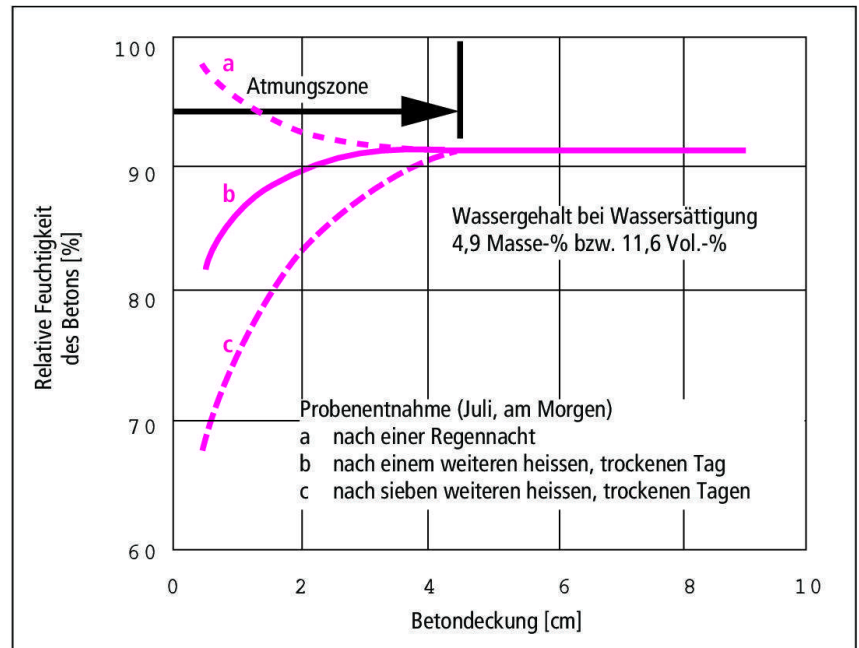


Abb. 3 Einfluss der Umgebung auf den Wassergehalt einer Mole in Helgoland (ermittelt an Bohrkernen), nach [5].

Zementen mit einem hohen Hüttensandanteil relativ viele Chloridionen. Stark sulfatbelastete Betone weisen ebenfalls eine niedrige Chloridbindekapazität auf. Karbonatisierte Betone können Chloridionen kaum mehr binden.

Kritischer Chloridgehalt

Lochkorrosion der Bewehrung in Stahlbeton tritt erst auf, wenn der Chloridgehalt einen kritischen Wert überschritten hat. Zwar wird häufig von einem Grenzwert von 0,4 % Chloridionen (bezogen auf Zementmasse) ausgegangen [3], in Wirklichkeit hängt der Grenzwert aber von zahlreichen Parametern ab (*Abbildung 2*), beispielsweise

- Betonfeuchtigkeit
- pH-Wert des Porenwassers
- Massenverhältnis Cl^-/Na^+
- Chloridionenbindefähigkeit des Zements

- Qualität und Dicke der Betondeckung (Sauerstoffangebot)
- Gehalt des Zementsteins an anderen korrosionsfördernden Stoffen wie beispielsweise SO_4^{2-} .

Chlorideintrag in Betone

Chloridionen gelangen – wie bereits erwähnt – vor allem durch kapillares Saugen und durch Diffusion in Betone. Meist unbedeutend sind Chloridionen im Anmachwasser oder in Zuschlagstoffen.

Bei relativ häufigen Trocken-/Feuchtzyklen, z. B. im Bereich von Spritzwasser, findet in der Atmungszone des Betons (Teil des Deckbetons, der auf Veränderungen der Luftfeuchtigkeit reagiert, siehe *Abbildung 3*) sehr schnell eine Anreicherung von Chloridionen statt. Je grösser die Atmungszone ist, desto tiefer in den Beton hinein findet ein schneller

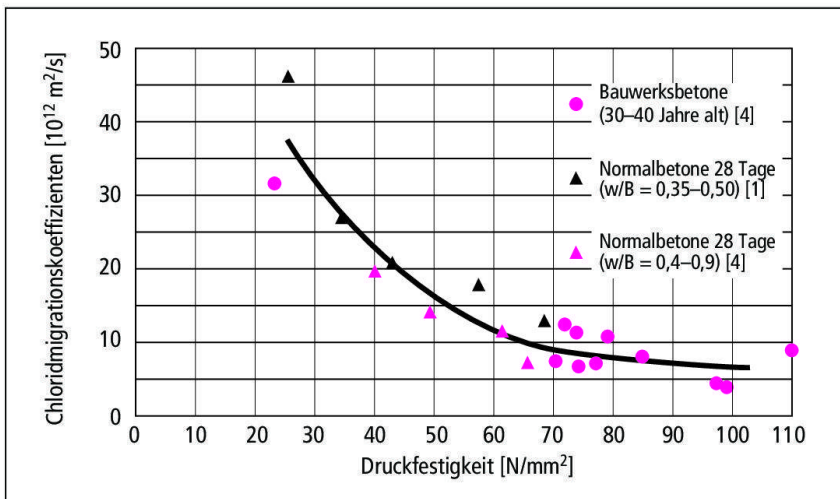


Abb. 4 Chloridmigrationskoeffizienten von Bauwerks- und Normalbetonen in Funktion der Druckfestigkeit.

Chloridtransport statt, der durch kapillares Saugen dominiert wird. Direkt an der Oberfläche können Chloridionen auch wieder ausgewaschen werden, während sie im Innern durch Diffusion in grössere Tiefen gelangen.

Wenn sich der Vorgang des Aufsaugens und Trocknens über die Jahre hinweg oft wiederholt, können teilweise sehr hohe Chloridgehalte in Betonen auftreten.

In der EN 206-1:2000 [6] wird dem grossen Einfluss der Beanspruchung bzw. der Umgebungsbedingungen auf den Eintrag von Chloridionen Rechnung getragen, indem so genannte Expositionsklassen definiert werden. Massgebend für die chloridinduzierte Korrosion ist die Klasse XD, die aufgrund der Umgebungsbedingungen (Feuchtigkeit) in die drei Unterklassen XD1, XD2 und XD3 unterteilt wird (Tabelle 2).

Bestimmung des Chloridwiderstands

Zur Bestimmung des Chloridwiderstands wurden zahlreiche Laborverfahren entwickelt. Sie lassen sich in die folgenden Gruppen unterteilen:

- *Diffusionstests*, d.h. Bestimmung des Chloridionen-Diffusionskoeffizienten in Beton durch Analyse von Chloridprofilen oder der zeitlichen Änderung der Chloridkonzentration in Diffusionszellen
- *Migrationstests*, d.h. durch Anlegen einer elektrischen Spannung beschleunigte Diffusionstests; Resultat: Migrationskoeffizient der Chloridionen im Beton (CTH- oder ibac-Test [7])
- Messung der *elektrischen Leitfähigkeit* an mit konzentrierter Natriumchloridlösung gesättigten Proben (Streicher-Verfahren [8])
- Messung des Ionenflusses nach ASTM C 1202-94 [10].

- Auslagerung von Proben in bzw. Beaufschlagen von Proben mit chloridhaltigem Wasser (Vergleich der Chloridprofile im Beton): Ponding Test [9].

Bei den einfachen Diffusionstests trennt der Probekörper eine chloridhaltige von einer chloridfreien Lösung. Der Diffusionskoeffizient D_{Cl} wird entweder aus der Eindringtiefe der Chloridionen in den Prüfkörper oder aus der zeitliche Veränderung der Konzentration an Chloridionen in der ursprünglich chloridfreien Lösung ermittelt.

Durch das Anlegen einer Gleichspannung an Diffusionszellen wird die Wanderung der Ionen um das Hundertfache und mehr beschleunigt. Auf die eigentliche Diffusion der Chlorid- und weiteren Ionen hat das elektrische Feld aber keinen Einfluss; gemessen werden Migrations- und nicht Diffusionskoeffizienten.

Beim so genannten ibac-Test [7] wird die Eindringtiefe von Chloridionen in wassergesättigte Probekörper ($\varnothing = 50 \text{ mm}$, $h = 50 \text{ mm}$) aus einer 3%igen Natriumchloridlösung gemessen. Zur Beschleunigung der Chlorideinwanderung wird während $\frac{1}{2}$ bis 7 Tagen eine Spannung von 30–40 Volt angelegt.

Korrektur

Im «Cementbulletin» vom Oktober dieses Jahres sollte es auf Seite 3 (mittlere Spalte) heissen:

● CEM III B und CEM III C.

Bitte entschuldigen Sie diesen Fehler.

Kurt Hermann

Betone mit hohem Chloridwiderstand

Der Chloridwiderstand von Betonen kann durch die Reduktion des w/z-Werts, durch die Zugabe von Silikastaub (auch bei Dosierungen von nur 7 Masse-%, bezogen auf die Zementmasse) und durch die Zugabe von Flugasche (30 Masse-%) verbessert werden [1].

Untersuchungen in der TFB [1] und von Mackechnie [4] zeigen, dass ein recht guter Zusammenhang zwi-

LITERATUR

Der vorliegende Artikel basiert grösstenteils auf Manuskripten zur folgenden TFB-Publikation:

[1] **Fritz Hunkeler, Christine Merz und Heidi Ungricht**, «Vergleichende Untersuchungen zum Chloridwiderstand von Betonen».

Diese Publikation wird voraussichtlich in diesem Jahr als VSS-Bericht erscheinen.

Auf die folgenden Publikationen wird im Text speziell hingewiesen;

[2] «Substanzerhaltung der Nationalstrassenwerke», Schlussbericht der Arbeitsgruppe, Bundesamt für Strassen, Bern (1998).

[3] **Hunkeler, F.**, «Grundlagen der Korrosion und der Potentialmessung bei Stahlbetonbauten», VSS-Bericht Nr. 510 (1994).

[4] **Mackechnie, J. R., and Alexander, M. G.**, «Rapid chlorid test comparisons», Concrete International 22 [5], 40–45 (2000).

Expositions-klasse	Umgebung	Migrationskoeffizient
XD1	mässig feuchte Umgebung, z. B. chloridhaltige Sprühnebel	$20 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
XD2	nasse, selten trockene Umgebung (Schwimmbäder; chloridhaltige, Industrieabwässer)	$15 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
XD3	wechselnd nasse und trockene Umgebung (Brückenteile, die chloridhaltigem Spritzwasser ausgesetzt sind; Fahrbahndecken, Parkdecks)	$10 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$

Tab. 2 Mindestanforderungen an Betone für die Expositions-kategorie XD (Korrosion ausgelöst durch Chloride) im Nationalen Vorwort zur EN 206-1 [6].

schen dem Chloridmigrationskoeffizienten nach ibac [7] und der Druckfestigkeit besteht (Abbildung 4).

Als Verfahren zur Bestimmung des Chloridwiderstands im Labor eignet sich der ibac- bzw. CTH-Test. Für die Expositions-kategorie XD (Korrosion ausgelöst durch Chloride) werden in der Schweiz im Nationalen Vorwort zur Norm EN 206-1 für die Unterklassen XD1 bis XD3 die in Tabelle 2 aufgeführten Migrationskoeffizienten (ermittelt mit dem ibac-Verfahren) vorgeschlagen. Diese Minimalanforderungen haben vorläufigen Charakter und müssen noch durch weitere Untersuchungen an Labor- und Bauwerksbetonen sowie durch Langzeitversuche gesichert werden.

Christine Merz
und Heidi Ungricht, TFB

Schlüsselwörter

Chloriddiffusion, Chloridmigration, Chloridionen, Chloridwiderstand, ibac-Verfahren, Null-Unterhaltsverfahren.