

Balco AB

Balco, technische Studien zu Balkonverglasungen

- Auswirkungen auf Karbonatisierung
und Bewehrungskorrosion

Vorexemplar

Stockholm, den 15.07.2010

Balco, technische Studien zu Balkonverglasungen

**- Auswirkungen auf Karbonatisierung und
Bewehrungskorrosion**

Datum 15.07.2010
Auftragsnummer 61221037830
Auflage/Status Vorexemplar

Per Hammarström
Auftragsleiter

Ali Farhang
Sachbearbeiter

Per Hammarström
Prüfer

Ramböll Sverige AB
Box 17009, Krukmakargatan 21
104 62 Stockholm
SCHWEDEN

Telefon +46-(0)10-615 60 00
Fax +46-(0)10-615 20 00
www.ramboll.se

Unr 61221037830

HR-Nummer 556133-0506

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	1
1.1	Auftragsbeschreibung	1
1.2	Orientierung	1
2.	Hintergrund der Karbonatisierung und Bewehrungskorrosion	3
2.1	Initiierung der Bewehrungskorrosion durch Karbonatisierung	3
2.2	Korrosion eingegossener Bewehrungen in karbonatisiertem Beton	6
3.	Auswirkungen von Verglasungen auf die relative Feuchtigkeit des Betons	8
3.1	Nasszeit.....	9
3.2	Oberflächenfeuchtigkeit	10
3.3	Feuchtigkeitsprofil im Beton.....	13
3.4	Auswirkung einer Verglasung auf Oberflächenfeuchtigkeit und Nasszeit .	14
4.	Auswirkung der Verglasung auf die Oberflächenkonzentration des Kohlendioxids und die Luftwechselrate	15
5.	Auswirkung der Verglasung auf die Karbonatisierung.....	15
6.	Auswirkung der Verglasung auf die Bewehrungskorrosion	21
7.	Auswirkung der Verglasung auf die Lebensdauer der Betonkonstruktion.....	22
7.1	Berechnung der Propagierungszeit (mit und ohne Verglasung)	23
8.	Auswirkung der Verglasung auf Frostschäden im Beton	28
8.1	Innere Frostschäden durch das Gefrieren von Süßwasser.....	28
9.	In Finnland durchgeführte Messungen	29
9.1	Einleitung.....	29
9.2	Durchgeführte Messungen und Ergebnisse	30
9.3	Wichtige Schlussfolgerungen aus dem Experiment von Mattila.....	34
10.	Schlussfolgerungen	36
11.	Referenzen	37
Anlage A	Berechnungsmodell für die Initiierungszeit der Bewehrungskorrosion laut DuraCrete	
Anlage B	Berechnungsmodell für die Propagierungszeit der Bewehrungskorrosion laut DuraCrete	

Balco, technische Studien zu Balkonverglasungen - Auswirkungen auf Karbonatisierung und Bewehrungskorrosion

1. Einleitung

1.1 Auftragsbeschreibung

Ramböll hat von der Balco AB den Auftrag erhalten, einige vermutete positive Auswirkungen der Verglasung von Balkonen, darunter Korrosionsschutz, Lärmreduzierung sowie Verringerung des Energieverbrauchs, wissenschaftlich zu beweisen. Dieser Bericht beschäftigt sich mit dem Korrosionsschutz.

1.2 Orientierung

Bei der Verglasung von Balkonen kommt es in Bezug auf den Korrosionsschutz zu wichtigen Veränderungen.

Nachstehend werden unter jedem Punkt sowohl die Veränderung als auch ihre möglichen Auswirkungen beschrieben.

Veränderung	Eventuelle Auswirkung (Hypothesen)
Die Fassade wird vor den direkten Auswirkungen des Windes geschützt, und damit wird die Luftwechselrate drastisch gesenkt.	Das sollte Auswirkungen auf die Karbonatisierungsgeschwindigkeit im Beton haben.
Die Fassade wird vor direkten Niederschlägen geschützt.	Die Feuchtigkeitsbelastung auf den gesamten Beton wird drastisch gesenkt. Die relative Feuchtigkeit im Beton wird gesenkt, was zu einer Reduzierung der Korrosionsrate in der Bewehrung des karbonatisierten Betons führen sollte. Die Karbonatisierungsgeschwindigkeit sollte bei einer niedrigen relativen Feuchtigkeit zunehmen. Das Risiko der Korrosion in sonstigen Stahlkonstruktionen und Stahldetails sollte sinken.
Die Luft auf dem Balkon wird	Wenn die Temperatur auf einem verglasten

sowohl durch die Strahlung der Sonne als auch das eventuelle Heizen des Raumklimas erwärmt.	Balkon steigt, sinkt zugleich die Luftfeuchtigkeit auf dem verglasten Balkon. Das Risiko der Kondensierung auf den Betonflächen sollte sinken.
Die Oberseite des Betons kann nach dem Verglasen mit Bodenbelag belegt werden.	Das sorgt für zusätzlichen Schutz vor Karbonatisierung und Feuchtigkeitsbelastung.

Die obigen Veränderungen deuten auf wesentliche Auswirkungen auf den Korrosionsschutz aufgrund eines veränderten Feuchtigkeitsgehalts im gesamten Beton sowie eine Veränderung der Korrosionsrate bei der Bewehrung im Beton hin.

Die genannten Auswirkungen einer Verglasung auf Karbonatisierung und Bewehrungskorrosion wurden in diesem Bericht gemäß den nachstehenden Rubriken theoretisch untersucht:

- Eine theoretische Studie zu den Auswirkungen der Verglasung auf die relative Feuchtigkeit des Betons
- Eine theoretische Studie zu den Auswirkungen der Verglasung auf die Oberflächenkonzentration des Kohlendioxids und die Luftwechselrate.
- Eine theoretische Studie zu den Auswirkungen der Verglasung auf Bewehrungskorrosion aufgrund (i) einer veränderten Karbonatisierungsgeschwindigkeit und (ii) eines geringeren Feuchtigkeitsgehalts im Beton.
- Ein theoretischer Vergleich der Lebensdauer im Hinblick auf Bewehrungskorrosion in karbonatisiertem Beton bei einem Balkon, der Regen ausgesetzt ist, sowie bei einem verglasten Balkon.

In diesem Bericht wird der Fall mit und ohne Verglasung untersucht, und es wird davon ausgegangen, dass die Verglasung vollständig ist. Eine teilweise offene Verglasung ist aus Sicht des Korrosionsschutzes uninteressant.

Die theoretischen Studien sind mindestens ein Jahr lang mit den folgenden Messungen zu vervollständigen:

- Verifizierung der Auswirkungen der Verglasung auf die relative Feuchtigkeit im Beton durch Probenahmen und/oder In-situ-Messungen. Auch die Luftfeuchtigkeit und -temperatur sollten an ein paar geeigneten Referenzobjekten gemessen werden.

- Verifizierung der Auswirkungen der Verglasung auf die Oberflächenkonzentration des Kohlendioxids und die Luftwechselrate durch Messungen bei geeigneten Referenzobjekten.
- Verifizierung der Auswirkungen der Verglasung auf die Korrosionsrate in geeigneten Referenzobjekten.

Bis zum jetzigen Zeitpunkt sind keine Messungen erfolgt, ähnliche Experimente wurden jedoch in Finnland durchgeführt, und eine kurze Zusammenfassung wichtiger Beobachtungen wird in diesem Bericht vorgestellt.

2. Hintergrund der Karbonatisierung und Bewehrungskorrosion

2.1 Initiierung der Bewehrungskorrosion durch Karbonatisierung

Da sich bei Zementreaktionen alkalische Hydroxide bilden, ist Beton normalerweise ein sehr alkalisches Material mit einem pH-Wert von 13-14. Auf einem in den Beton gegossenen Stahl bildet sich darum eine dünne Schicht schwerlöslicher Verbindungen, die den Stahl vor Korrosion schützen. Dieses Verfahren nennt sich „Passivierung“. Sie kann jedoch unterbrochen werden, so dass es zu Bewehrungskorrosion kommt, wenn der pH-Wert des umliegenden Betons sinkt.

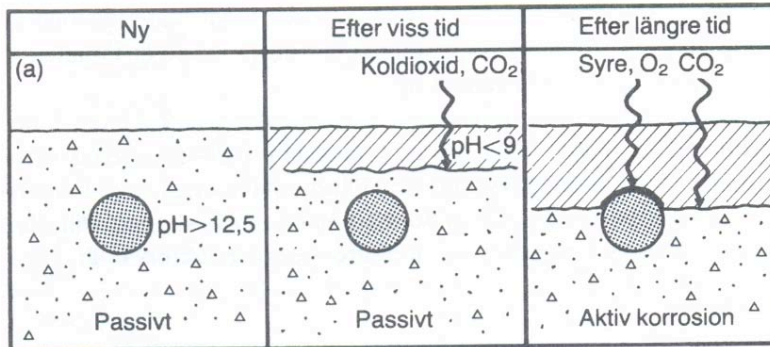
Wenn der Beton sich in einer Umgebung befindet, in der die relative Feuchtigkeit (RH) des Betons innerhalb eines bestimmten Intervalls liegt, kommt es zu einer chemischen Reaktion. Das Kohlendioxid in der Luft dringt in den Beton ein, löst sich in der Feuchtigkeit der Kapillarporen auf und bildet Kohlensäure, die das Calciumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$ des Betons in Calciumcarbonat umwandelt.

Dieser Verlauf wird Karbonatisierung genannt und ist eine vollkommen natürliche Reaktion, die dazu führt, dass der Beton sich auf irgendeine Weise verschlechtert. Außerdem hat sie zur Folge, dass der pH-Wert im Beton von 13-14 auf 7-8 sinkt.

Die Durchdringung von Kohlendioxid im Beton ist ein Diffusionsverfahren. Es geht schnell, wenn der Beton ziemlich trocken ist. Die Reaktion der Kohlensäure tritt jedoch nicht auf, wenn der Beton zu trocken ist. Bei einer relativen Feuchtigkeit von ca. 65 % sind die Voraussetzungen, dass Kohlendioxid eindringt, daher am günstigsten.

Die Karbonatisierung fängt an der Oberfläche an und dringt dann, wie eine Front, immer weiter in den Beton ein. Der Beton unterteilt sich in einen äußeren Teil mit einem niedrigen pH-Wert und einen inneren mit einem hohen pH-Wert. Nach und nach erstreckt sich der äußere Teil so weit bis ins Innere, dass er die

Bewehrungseisen erreicht, deren Passivität gebrochen wurde. Wenn dann ausreichend Feuchtigkeit im Beton vorhanden ist, fängt der Bewehrungsstahl an zu korrodieren, siehe Abbildung 2.1.



Ny	Neu
Efter viss tid	Nach einer gewissen Zeit
Efter längre tid	Nach längerer Zeit
Koldioxid, CO ₂	Kohlendioxid, CO ₂
Syre, O ₂ CO ₂	Sauerstoff, O ₂ , CO ₂
Passivt	Passive
Aktivt korrosion	Aktive Korrosion

Abbildung 2.1: Karbonatisierung (aus Burström, Byggnadsmaterial (Baumaterialien). 2001).

Die Karbonatisierung erfolgt schneller auf trockenen als auf feuchten Oberflächen, da das Wasser das Kohlendioxid daran hindert, sich im Beton zu verflüssigen. Zugleich erfolgt die Korrosion am schnellsten in einem möglichst feuchten Umfeld. Das hat zur Folge, dass die Bewehrungskorrosion infolge der Karbonatisierung am schnellsten in einem Umfeld, in dem die RH zwischen 70-100 % liegt, erfolgt.

Wenn der Karbonatisierungsprozess einmal läuft, ist seine Geschwindigkeit hauptsächlich vom Wasserzementwert (WZW) des Betons abhängig. Ein niedriger WZW bedeutet eine größere Dichte, die wiederum dazu führt, dass die Karbonatisierungsfront sich langsamer fortbewegt.

Damit es überhaupt zu einer Korrosion kommt, ist außer dem Zugang zu Wasser auch Zugang zu Säure notwendig. Daher stellt ein dichter und gut verdichteter Beton einen größeren Schutz für den Stahl dar als ein lockerer. Da das Volumen von korrodiertem Stahl zwei bis fünf Mal so groß ist wie das eines nicht korrodierten Stahls, entstehen Spannungen im Beton, die nach und nach dazu führen, dass er bricht und auseinander fällt. Das nennt man Rostsprengung. Bewehrungskorrosion führt außerdem dazu, dass der Querschnitt des Bewehrungsstahls kleiner wird, und damit sinkt auch die Tragfähigkeit.

Die äußeren Faktoren, wie Regen, sind oft schwer zu beeinflussen, während man die materialbezogenen Faktoren oft durch die Wahl unterschiedlicher Betonzusammenstellungen und -härtungen beeinflussen kann. Bindemittel spielen für die Karbonatisierungsgeschwindigkeit eine wichtige Rolle, da die Zusammenstellung des Bindemittels ausschlaggebend für die Menge karbonatisierten Materials und auch die Dichte des Betons im Verhältnis CO_2 ist. Beton aus Portlandzement hat einen höheren Anteil an karbonisierbarem Kalk als Beton, dem Flugasche oder Feinkieselerde hinzugefügt wurde, obwohl es später schwer zu beweisen ist, dass sie schneller karbonatisiert sind. Beton mit Flugasche und Feinkieselerde hat eine dichtere Struktur, und dadurch kann das CO_2 schwerer eindringen. Daher ist es schwierig, die Materialauswirkungen auf die Karbonatisierung zu generalisieren (Betonhandboken-Material (Betonhandbuch – Material), 1997).

Der Wasserzementwert ist ein weiterer wichtiger Faktor, der für die Karbonatisierungsgeschwindigkeit von Bedeutung ist, da die Dichte im Beton stark vom Wasserzementwert abhängig ist. Ein hoher Wasserzementwert führt zu einer niedrigeren Dichte, und zugleich sinkt der Anteil karbonisierbarer Stoffe, da der Wasseranteil groß ist.

Außer den Beschaffenheiten der Deckschicht ist ihre Stärke von sehr großer Bedeutung für die Zeit, bis die Karbonatisierungsfront die Bewehrung erreicht. Eine Verdoppelung der Stärke der Deckschicht steigert die Initiierungszeit um den Faktor 4, (Betonhandboken-Material, 1997).

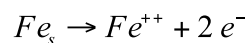
Auch die Arbeitsausführung des Betons ist von Bedeutung für die Karbonatisierung. Zur Verzögerung des Prozesses ist es wichtig, dass man eine möglichst dichte und homogene Deckschicht erhält.

2.2 Korrosion eingegossener Bewehrungen in karbonatisiertem Beton

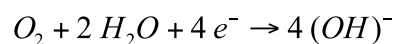
Korrosion kann man mit dem einfachen Modell erklären, dass Ladungen zwischen einer Anode und einer Kathode transportiert werden. Dieser Vorgang wird durch einen Spannungsunterschied zwischen diesen angetrieben. Der Spannungsunterschied ist von unterschiedlichen äußeren Einflüssen abhängig, die je nach pH-Wert, Säuregehalt, Feuchtigkeitsgehalt, Chloridgehalt oder einer Kombination aus diesen variiert. Positive Metallionen (Fe^{2+}) werden an der Anode freigesetzt und reagieren an der Kathode mit Hydroxylionen (OH^-) und bilden Rost ($Fe(OH)_2$). Es gibt zwei unterschiedliche Arten der Korrosion: gerader Fraß und punktförmiger Fraß („pitting“=Lochfraß). Wenn die anodischen und kathodischen Oberflächen ungefähr gleich groß sind, erhält man einen geraden Fraß. Ist die anodische Oberfläche jedoch viel kleiner als die kathodische, erhält man stattdessen Lochfraß, der oft aufgrund von Chloridansammlungen auftritt. Diese Form der Korrosion ist sehr tiefgehend und kann ernste Auswirkungen auf bewehrte Konstruktionen haben (Burström, Byggnadsmaterial (Baumaterial), 2001).

In einem karbonatisierten Beton (wenn der pH-Wert in der Porenlösung unter 9 liegt) und wenn Säure und Wasser verfügbar sind, können Anoden- und Kathodenreaktionen folgendermaßen beschrieben werden.

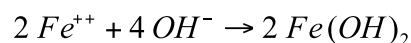
Die nachstehende Differenzialgleichung zeigt die Freigabe von Elektronen.



und die kathodische Reaktion mit Säure und Wasser als:

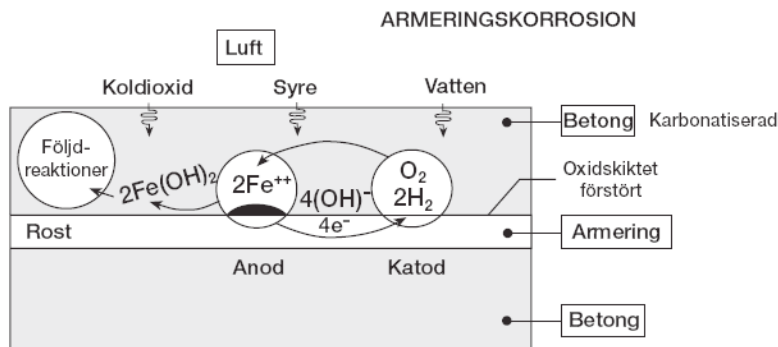


Der Bereich der Stahlfläche, die mit dem passiven Schutzfilm bedeckt ist, dient als Kathode. Elektronen, die von der Anode freikommen, werden durch den Stahl zur Oberfläche der Kathode transportiert. Die Säurediffusion in den Betonporen oder aus der Umgebungsluft fängt die hereinkommenden Elektronen vom Stahl ab und sorgt für eine Senkung der Säure im Beisein von Wasser, das dann Hydroxilionen bildet. Infolgedessen werden die Ionen im Porenwasser aufgelöst, wo sie mit den Hydroxilionen reagieren und Eisenhydroxid bilden.



Primäre Faktoren dafür, dass die Korrosion überhaupt einsetzt, sind:

- Verfügbarkeit von Säure
- Die Feuchtigkeit des Betons
- der pH-Wert des Betons



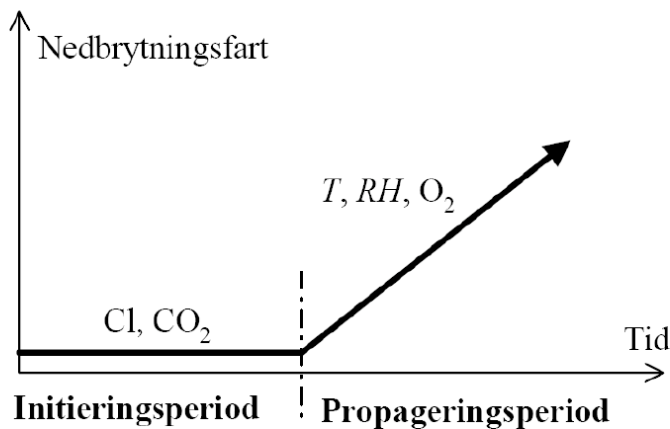
ARMERINGSKORROSION	BEWEHRUNGSKORROSION
Luft	Luft
Koldioxid	Kohlendioxid
Syre	Sauerstoff
Vatten	Wasser
Betong Karbonatiserad	Karbonatisierter Beton
Fölgdreaktioner	Folgereaktionen
Oxidskiktet förstört	Oxidschicht zerstört
Rost	Rost
Anod	Anode
Katod	Kathode
Betong	Beton
Delreaktioner	Teilreaktionen

Abbildung 1.2: Korrosion unter Einwirkung von Karbonatisierung

Der Stahl in Betonkonstruktionen ist durch eine deckende Betonschicht geschützt, die sehr alkalisch ist. Das sorgt dafür, dass die Korrosion anfänglich nicht einsetzen kann. Der Korrosionsprozess kann laut Tuutti (Tuutti, 1982) in eine Initiierungs- und Propagierungszeit unterteilt werden. In der Initiierungszeit kommt es nicht zu einer Korrosion, es kommt jedoch zu Veränderungen in der Deckschicht. Die Korrosion kann einsetzen, wenn die Front der Karbonatisierung der Deckschicht die Bewehrung erreicht hat oder wenn die Chloridkonzentration an der Bewehrung einen kritischen Wert erreicht hat, den Chloridgrenzwert. Die Korrosionszeit wird auch Propagierungszeit genannt, und bei Freiluftbauten handelt es sich um einen relativ kurzen Zeitraum, bei unserem Klima ca. 5-20 Jahre.

Da dieser Zeitraum so kurz ist, sind längere Initiierungszeiten notwendig, um längere Lebensdauern zu erhalten. Die Länge der Initiierungszeit ist von einer Reihe von Faktoren, wie Umfeld, Durchlässigkeit, Zementsorte und Wasserzementwert, abhängig (Betonhandboken-Material, 1997).

Eine andere Alternative ist die Veränderung der Voraussetzungen für die Bewehrungskorrosion und damit die Verlängerung der Propagierungszeit. Man kann die Korrosionsrate und die Lebensdauer beispielsweise durch die Senkung der Feuchtigkeit des Betons beeinflussen, siehe Abschnitt 3.



Nedbrytningsfart	Zersetzungsgeschwindigkeit
Initieringsperiod	Initiierungszeit
Propageringsperiod	Propagierungszeit
Tid	Zeit

Abbildung 2.3: Korrosionsmodell laut Tuutti (Tuutti, 1982)

3. Auswirkungen von Verglasungen auf die relative Feuchtigkeit des Betons

Einer der wichtigsten Parameter, der dafür sorgt, dass eine gegossene Bewehrung korrodiert, ist Feuchtigkeit in der deckenden Betonschicht. Das Feuchtigkeitsprofil im Beton direkt unter dessen Oberfläche ist wiederum von den Feuchtigkeitsverhältnissen auf der Betonoberfläche abhängig.

Für Balkone ohne Verglasung gelten an der Betonoberfläche zwei Feuchtigkeitsquellen. Die erste ist Wasser auf der Betonoberfläche (Feuchtigkeitsfilm), die oft als Nasszeit in Stunden gemessen wird. Die andere ist die Oberflächenfeuchtigkeit des Betons aufgrund der relativen Feuchtigkeit in der Luft (RH in %) in der verbleibenden Zeit, wenn die Oberfläche nicht nass ist.

3.1 Nasszeit

Die Oberfläche kann Niederschlag, Oberflächenkondensation und/oder ablaufendem Wasser ausgesetzt sein, und das wird mit dem Begriff Nasszeit angegeben. Die Nasszeit ist die Zeit, in der die Oberfläche der Konstruktion aufgrund von Oberflächenkondensation, Niederschlag und Wasser, das aus höher gelegenen Teilen abläuft, nass ist.

Die Nasszeit ist nicht identisch mit der Zeit, während der die Oberfläche Niederschlag, Oberflächenkondensation und/oder ablaufendem Wasser ausgesetzt ist. Es gibt eine gewisse zeitliche Verschiebung, da der Feuchtigkeitsfilm sich nicht unmittelbar bildet, wenn die Oberfläche Nässe ausgesetzt ist, und der Film nicht sofort verschwindet, wenn sie ihr nicht mehr ausgesetzt ist. Entscheidend für den Unterschied zwischen der Nasszeit der Oberfläche und der Zeit, an dem sie Niederschlag usw. ausgesetzt ist, sind die feuchtigkeitstechnischen Eigenschaften des Materials, z.B. die Wasseraufnahmefähigkeit.

In Abbildung 3.1 sind Unterschiede zwischen der Nasszeit (definiert als ein Feuchtigkeitsfilm, dessen Stärke über einem gewissen Wert liegt) und der Ausgesetztzeit an Niederschlag (Schlagregen) bzw. Oberflächenkondensation zu sehen.

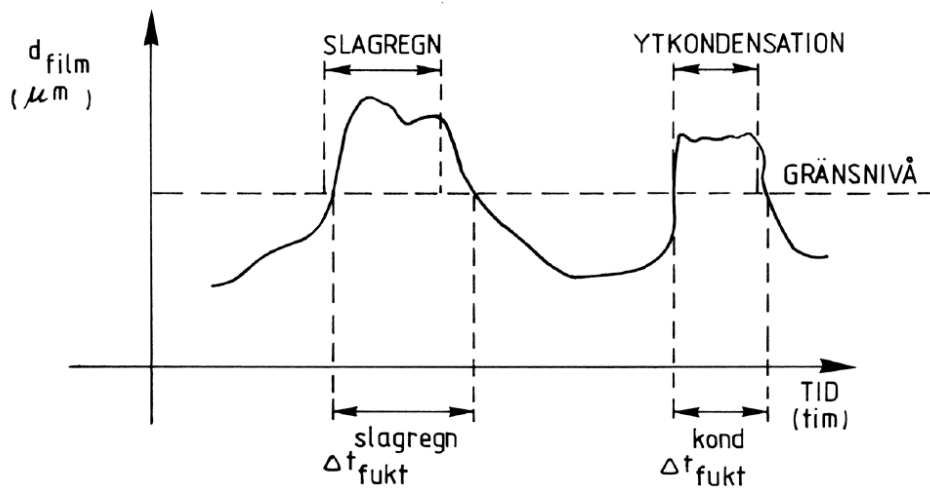


Abbildung 3.1: Prinzipielles Aussehen der Unterschiede zwischen Feuchtigkeitsbelastung und Nasszeit für eine vertikale Oberfläche in einem porösen Material, Svennerstedt (1989). (aus BFR Nr. 12, 2007)

Film	Film
SLAGREGN	SCHLAGREGEN
YTKONDENSATION	OBERFLÄCHENKONDENSATION
GRÄNSNIVÅ	GRENSNIVEAU
Slagregn	Schlagregen

Fukt	Feuchtigkeit
Kond	Kondensation
Fukt	Feuchtigkeit
TID (tim)	ZEIT (h)

Laut Abbildung 3.1 fällt der Unterschied zwischen der Nasszeit und der Zeit des Ausgesetztseins bei Schlagregen größer aus als bei Oberflächenkondensation. Das liegt daran, dass die zugeführte Feuchtigkeitsmenge bei Schlagregen viel größer ist als bei Oberflächenkondensation, was wiederum dazu führt, dass eine viel größere Feuchtigkeitsmenge in das Material eindringt. Infolgedessen ist das Material ausreichend feucht, auch nachdem der Regen aufgehört hat, weil ein Feuchtigkeitsfilm mit einem gewissen Durchmesser erhalten bleiben kann. Die durch die Oberflächenkondensation zugeführte Feuchtigkeitsmenge ist jedoch nicht ausreichend, da der Feuchtigkeitsfilm für längere Zeit einen bestimmten Durchmesser haben sollte.

3.2 Oberflächenfeuchtigkeit

Das Zusammenspiel zwischen der RF der Luft und der Feuchtigkeit der Oberfläche lässt sich mit Hilfe der nachstehenden Gleichung berechnen.

Die Feuchtigkeitsverhältnisse an der Oberfläche können als äquivalente Oberflächenfeuchtigkeit (RF) und Nasszeit ausgedrückt werden. Die äquivalente Oberflächenfeuchtigkeit kann als eine Funktion, bestehend aus der äquivalenten Oberflächentemperatur und den Feuchtigkeitsverhältnissen in der Umgebungsluft ausgedrückt werden, siehe nachstehende Gleichung, (BFR Nr. 12, Vägledning för livslängdsdimensionering av Betonkonstruktioner, 2007 (Leitfaden für die Bemessung der Lebensdauer von Betonkonstruktionen).

$$RF_{\text{Oberfl.,äqu}} = \frac{RF_{\text{Luft}} \cdot v_s(T_{\text{Luft}})}{v_s(T_{\text{Oberfl.,äqu.}})} = \frac{v_{\text{Luft}}}{v_s(T_{\text{Oberfl.,äqu.}})}$$

$RF_{\text{Oberfl.,äqu}}$ ist die relative Feuchtigkeit an der Oberfläche. [%]

RF_{Luft} ist die relative Feuchtigkeit in der Luft. [%]

$v_s(T_{\text{Luft}})$ ist der Sättigungsgrad in der Luft an einem bestimmten T_{Luft}
[g/m³]

$v_s(T_{\text{Oberfl., äqu.}})$ ist der Sättigungsgrad in der Luft an einem bestimmten

$T_{\text{yta,ekv}}$ [g/m³]

v_{Luft} ist der Dampfgehalt der Luft. [g/m³]

Abbildung 3.2 zeigt für eine horizontale Betonfläche, wie eine berechnete äquivalente Oberflächenfeuchtigkeit der gemessenen Luftfeuchtigkeit folgt.

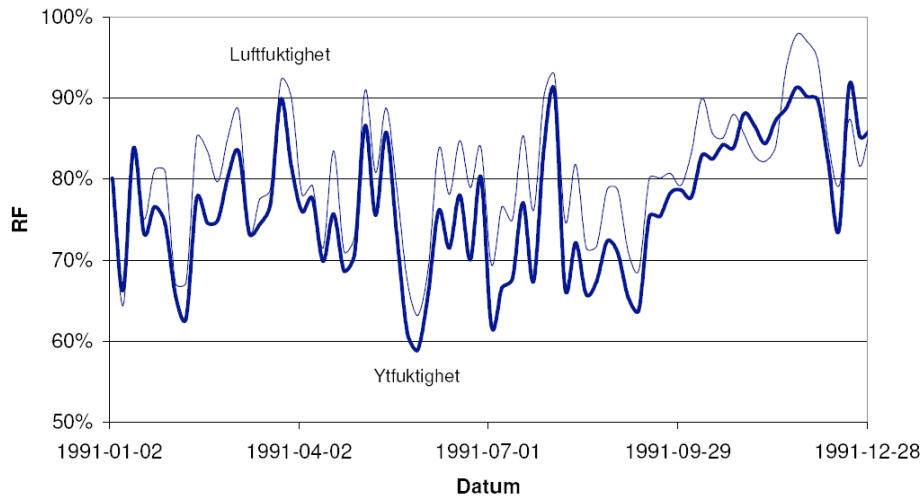


Abbildung 3.2: Gemessene Luftfeuchtigkeiten und berechnete Oberflächenfeuchtigkeiten für eine horizontale Betonfläche in Holzkirchen (Süddeutschland) 1991. (Mittelwerte für fünf Tage). Daten von IBP (1995). Aus BFR Nr. 12, 2007)

Luftfuktighet	Luftfeuchtigkeit
Ytfuktighet	Oberflächenfeuchtigkeit
Datum	Datum

Aus Abbildung 3.2 geht hervor, dass die gemessene Luftfeuchtigkeit im Allgemeinen höher ist als die äquivalente Oberflächenfeuchtigkeit. Das liegt daran, dass die äquivalente Oberflächentemperatur oft höher ist als die Lufttemperatur. Eine höhere Lufttemperatur sorgt für einen höheren Sättigungsgrad an der

Oberfläche, und das sorgt dafür, dass der Quotient $\frac{v_s(T_{\text{Luft}})}{v_s(T_{\text{Oberfl. äqu.}})}$ kleiner als 1 ist

und die Oberflächenfeuchtigkeit $RF_{\text{Oberfl. äqu.}}$ geringer als die relative Feuchtigkeit RF_{Luft} ausfällt

Wenn die äquivalente Oberflächenfeuchtigkeit 100 % RF überschreitet, d.h. die äquivalente Außentemperatur ist niedriger als der Taupunkt der Luft, kondensiert die Feuchtigkeit auf der Oberfläche. Wie viel Feuchtigkeit kondensiert, ist abhängig von dem Unterschied zwischen dem Dampfgehalt der Luft und der Sättigungsdampfmenge an der Oberfläche sowie dem Vermögen des Materials, Feuchtigkeit aufzunehmen.

Abbildung 3.3 zeigt die gemessenen Luftfeuchtigkeiten und die berechneten äquivalenten Oberflächenfeuchtigkeiten für eine horizontale Betonfläche in

Holzkirchen (Süddeutschland) (Mittelwerte aus vier Stunden – zwei Wochen im Juli 1995).

Aus Abbildung 3.3 geht hervor, dass der Unterschied zwischen Luft- und Oberflächenfeuchtigkeit groß ist (die Mittelwerte aus vier Stunden). Der Unterschied ist an sonnigen Tagen am größten, da die, $T_{\text{Oberfl. äqu.}}$, dann deutlich höher als die Lufttemperatur, T_{Luft} , ist. In Nächten mit einer großen Abstrahlung kann $RF_{\text{Oberfl. äqu.}}$ über 100 % liegen, und das bedeutet eine Oberflächenkondensation, d.h. $T_{\text{Oberfl. äqu.}}$ ist geringer als die Tagestemperatur, (BFR Nr. 12, 2007).

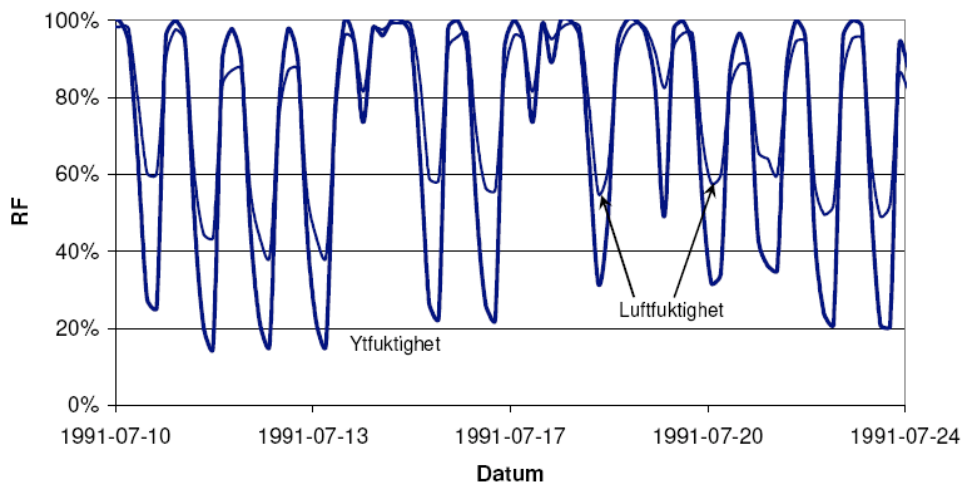


Abbildung 3.3: Gemessene Luftfeuchtigkeiten und berechnete Oberflächenfeuchtigkeiten für eine horizontale Betonfläche in Holzkirchen (Süddeutschland) 1991. (Mittelwerte für fünf Tage). Daten von IBP (1995). Aus BFR Nr. 12, 2007, Vägledning för livslängdsdimensionering av Betonkonstruktioner, 2007)

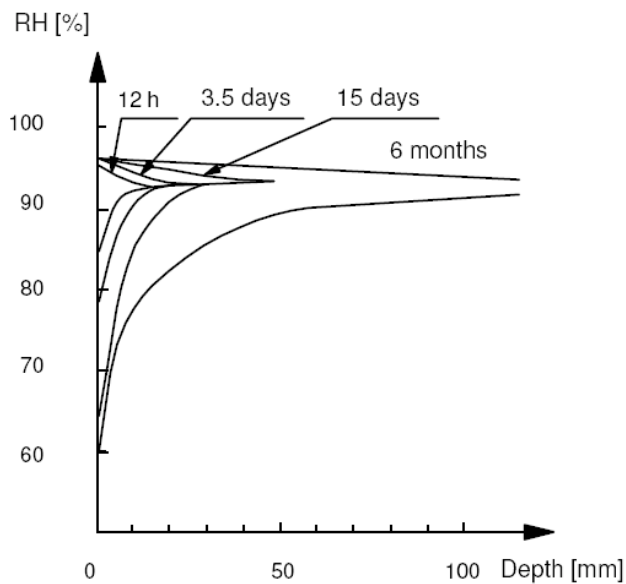
Luftfuktighet	Luftfeuchtigkeit
Ytfuktighet	Oberflächenfeuchtigkeit
Datum	Datum

Die Variation von $T_{\text{Oberfl. äqu.}}$ im Verhältnis zu T_{Luft} ist entscheidend für das Risiko der Oberflächenkondensation. Sehr wahrscheinlich ist das Risiko der Kondensation auf einem verglasten Balkon viel geringer als auf einem Balkon ohne Verglasung. Das liegt daran, dass $T_{\text{Oberfl. äqu.}}$ aufgrund der Verglasung immer größer als T_{Luft} sein wird. Das sollte in einem verglasten Balkon mit Hilfe von Feuchtigkeits- und Temperaturmessungen untersucht werden.

3.3 Feuchtigkeitsprofil im Beton

Die Oberflächenfeuchtigkeit und die Nasszeit des Betons sowie ihre Variationen geben Anlass zu einer Reaktion, beschrieben als der Feuchtigkeitszustand des Betons. Dieser variiert mit der Tiefe und der Zeit, abhängig von Ausmaß und Variationen der Oberflächenfeuchtigkeit und der Nasszeiten, und kann mit Hilfe des Gesetzes der Konservierung von Material und Energie bestimmt werden.

Hier folgt ein Beispiel dafür, wie der Feuchtigkeitszustand in einer Dimension (1D), abhängig von den Randbedingungen, aussehen kann. Informationen dazu, wie man den Feuchtigkeitszustand praktisch bestimmen kann, sind in DuraCrete (1999), (BFR Nr. 12, 2007) zu finden.



12h	12h
3.5 days	3,5 Tage
15 days	15 Tage
6 months	6 Monate
Depth	Tiefe

Abbildung 3.4: Berechnete Feuchtigkeitsprofile in Beton, das zyklischen Feuchtigkeitsbelastungen ausgesetzt ist. Arfvidsson & Hedenblad (1991). (aus BFR Nr. 12, Vägledning för livslängdsdimensionering av Betonkonstruktioner, 2007)

Im Allgemeinen verändert sich der Feuchtigkeitszustand deutlich langsamer als der Temperaturzustand. Das geht aus Abbildung 3.4 hervor. Dort werden Veränderungen der Feuchtigkeitsbelastungen an der Oberfläche in ca. 30 mm Tiefe erst nach einer zweiwöchigen Aussetzung bemerkt, und bei 100 mm erst nach 6 Monaten.

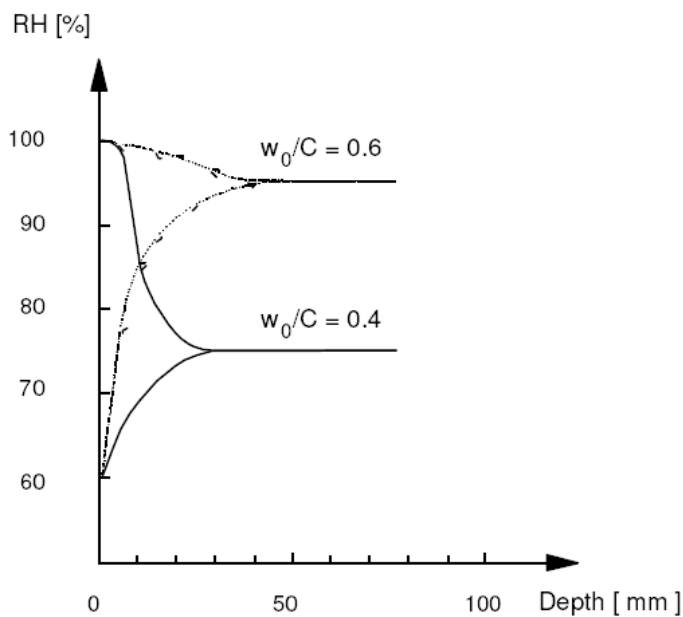


Abbildung 3.5: Berechnete Feuchtigkeitsprofile in Betonsorten mit unterschiedlichen Zusammenstellungen, die zyklischen Feuchtigkeitsbelastungen ausgesetzt sind. Arfvidsson & Hedenblad (1991).

Der Wasserzementwert wird als der Quotient- w_0/C definiert und angezeigt, und er wirkt sich auf die Austrocknung und Annässung aus. Der Feuchtigkeitszustand in größerer Tiefe ist relativ konstant, wird jedoch von der Zusammensetzung des Betons und w_0/C beeinflusst, wie aus Abbildung 3.5 hervorgeht.

Der Wasserzementwert wird als der Quotient- w_0/C definiert und angezeigt, und er wirkt sich auf die Austrocknung und Annässung aus. Der Feuchtigkeitszustand in größerer Tiefe ist relativ konstant, wird jedoch von der Zusammensetzung des Betons und w_0/C beeinflusst, wie aus Abbildung 3.5 hervorgeht.

3.4 Auswirkung einer Verglasung auf Oberflächenfeuchtigkeit und Nasszeit

Die wahrscheinlichen Auswirkungen einer Verglasung auf die Bewehrungskorrosion entstehen aufgrund von veränderten Feuchtigkeitsverhältnissen in Betonplatte und Umgebungsluft. Wenn die Betonfläche für einen gewissen Zeitraum trocken gehalten wird, sinkt die Feuchtigkeit des Betons auf Bewehrungsebene, und damit sinkt die Korrosionsrate in der Propagierungsphase.

Die Nasszeit aufgrund von Niederschlag, ablaufendem Wasser liegt bei fast Null.

Nasszeiten aufgrund von Oberflächenkondensation nehmen stark ab. Das ist darauf zurückzuführen, dass sowohl die Temperatur der Luft als auch und vor allem die Temperatur der Betonoberfläche bei einem verglasten Balkon höher liegt. Durch Messung der Temperatur und Feuchtigkeit von Luft und Beton kann

man die Senkung der Nasszeit in Stunden aufgrund der Oberflächenkondensation berechnen.

Die Feuchtigkeit der Raumluft sinkt (im Vergleich zur Feuchtigkeit der Außenluft), und damit sinkt die Oberflächenfeuchtigkeit aufgrund der Verglasung. In welchem Ausmaß die Oberflächenfeuchtigkeit sinkt, hängt von der Erwärmung der Raumluft ab, die durch Sonnenstrahlung und Konvektion erfolgt (Erwärmung der Raumluft).

4. Auswirkung der Verglasung auf die Oberflächenkonzentration des Kohlendioxids und die Luftwechselrate

Die charakteristische Kohlendioxidkonzentration in der freien Luft direkt an einer Betonoberfläche liegt bei ungefähr $5,0 \cdot 10^{-4}$ kg/m³ (pro m³ Luft). Sie ist in den letzten Jahren jedoch stark gestiegen, und Langzeitprognosen gehen in einer hundertjährigen Perspektive von Werten von bis zu $8,0 \cdot 10^{-4}$ kg/m³ aus (BFR Nr. 12, 2007).

Für Betonoberflächen in mehr oder weniger geschlossenen Räumen fällt die Kohlendioxidkonzentration geringer aus, da die Betonoberflächen das Kohlendioxid in der Luft aufnehmen. Wie viel niedriger die Konzentration ausfällt, ist davon abhängig, wie hoch die Luftwechselrate in diesen Räumen ist und wie viel Kohlendioxid aufgenommen wird, d.h. die Zusammensetzung des Betons, das Mikroklima und wie tief die Karbonatisierung bereits vorgedrungen ist.

Es ist sehr wahrscheinlich, dass die Verglasung von Balkonräumen zu einer Senkung der Luftwechselrate auf Betonoberflächen beiträgt. Luftwechselrate und Kohlendioxidkonzentration müssen auf Balkonen mit und ohne Verglasung gemessen werden, um eventuelle Unterschiede feststellen zu können. Ohne ausreichende Messungen lassen sich die Auswirkungen der Verglasung auf die Luftwechselrate und die Co₂ Konzentration auf Betonflächen nur schwer bestimmen.

5. Auswirkung der Verglasung auf die Karbonatisierung

Karbonatisierung entsteht, wenn Kohlendioxid aus der Luft in den Beton eindringt und mit dem Calciumhydroxid reagiert. Es bildet sich eine Karbonatisierungsfrent,

die schrittweise immer tiefer in den Beton eindringt, was zu einer starken Senkung des pH-Wertes im Beton führt. Die Korrosion kann einsetzen, wenn die Karbonatisierungsfront die Bewehrung erreicht hat.

Die Geschwindigkeit der Karbonatisierungsfront ist abhängig von der CO_2 -Konzentration der Umgebung, dem Vermögen des Betons, CO_2 aufzunehmen, und der Diffusionsgeschwindigkeit des CO_2 .

Da es sich bei Beton nicht um ein homogenes Material handelt, verläuft die Karbonatisierung im Querschnitt unterschiedlich schnell. Daher wird ein angemessener Mittelwert für die Karbonatisierung berechnet.

Ein einfaches Berechnungsmodell für die Karbonatisierungsfront, d.h. die Karbonatisierungstiefe, lässt sich folgendermaßen beschreiben(4):

$$x = k \sqrt{t}$$

wobei

x die Karbonatisierungstiefe ist

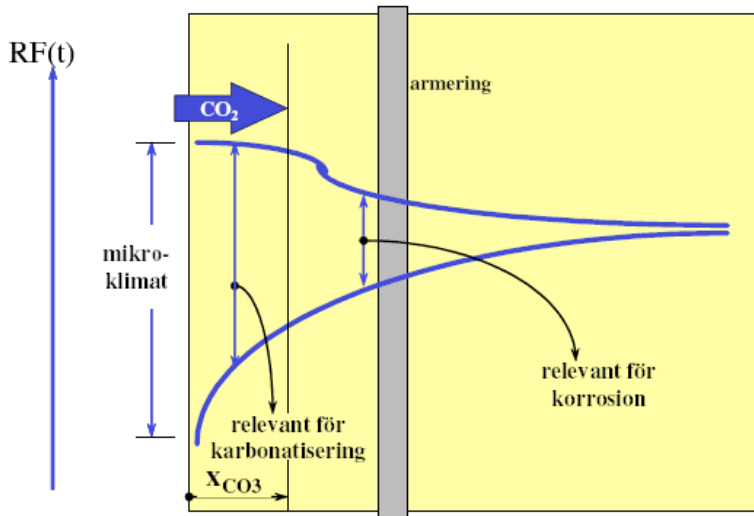
k der Koeffizient ist

t die Zeit ist

Der Wert des Koeffizienten (k) lässt sich theoretisch berechnen, wenn man den Diffusionskoeffizienten des Betons für CO_2 , die CO_2 -Absorption des Betons sowie die CO_2 -Konzentration der Umgebung kennt.

Der Karbonatisierungsverlauf ist relativ kompliziert, wenn man alle wichtigen Teilprozesse unter tatsächlichen Klimaverhältnissen beachtet. Was die Betonplatte ohne Verglasung betrifft, variieren die Feuchtigkeitsverhältnisse der Deckschicht normalerweise in den unterschiedlichen Jahreszeiten, und sie werden stark vom Regen beeinflusst, der auf die Betonoberfläche trifft. Feuchtigkeitsschwankungen beim Beton sind Abbildung 5.1, (BFR Nr. 12, 2007) zu entnehmen.

Die Diffusion von Kohlendioxid sollte daher regelmäßig an einer relativ feuchten Deckschicht mit einem großen Diffusionswiderstand erfolgen, der in unterschiedlichen Tiefen jedoch unterschiedlich ist. Zu anderen Zeiten ist die Deckschicht relativ trocken, und der Diffusionswiderstand ist dann deutlich geringer, insbesondere direkt an der trockenen Oberfläche. Darüber hinaus hat der Teil des Betons, der karbonatisiert ist, andere feuchtigkeitsbindende Eigenschaften als tiefer gelegener Beton, (BFR Nr. 12, 2007).



mikroklima	Mikroklima
armering	Bewehrung
relevant für karbonatisierung	relevant für die Karbonatisierung
relevant für korrosion	relevant für die Korrosion

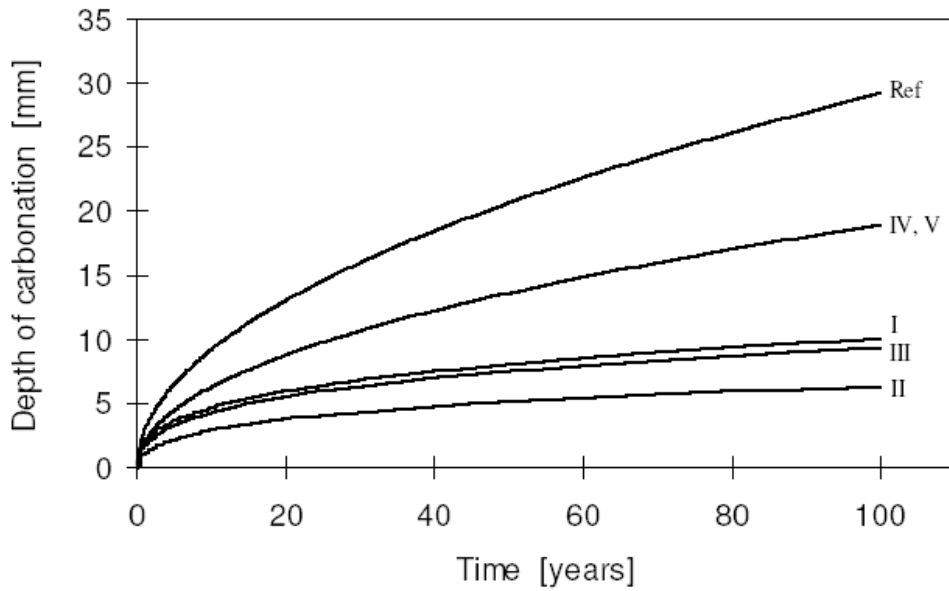
Abbildung 5.1: Auswirkungen von Feuchtigkeitsschwankungen auf die Initiierung der Bewehrungskorrosion bei Karbonatisierung, (BFR Nr. 12, 2007).

Kohlendioxid muss mit dem Großteil der karbonatisierbaren Kalkmenge reagieren, bevor es weiter eindringen kann. Wie viel, hängt u.a. vom Feuchtigkeitsgrad und dem Alter des Betons ab.

Eine korrekte Beschreibung all dieser Aspekte erfordert ein kompliziertes Computermodell. CEB hat 1997 ein solches „Mikromodell“ entwickelt. Es wird jedoch vor allem zur Quantifizierung der Parameter in einfacheren „Mesomodellen“ verwendet. Die Modelle für die Initiierung der Bewehrungskorrosion aufgrund von Karbonatisierung laut DuraCrete (1998) sind dieselben wie das „Mesomodell“ laut CEB (1997), (BFR Nr. 12, 2007).

Die Karbonatisierungsgeschwindigkeit wird von einer Reihe materialbedingter und äußerer Faktoren beeinflusst, wie oben ausgeführt. Das Umfeld beeinflusst den Feuchtigkeitszustand der Deckschicht. In einem trockenen Beton kommt es entweder erst gar nicht zu einer Karbonatisierung oder aber sie verläuft sehr langsam, da sie eine gewisse Feuchtigkeit benötigt. Eine maximale Karbonatisierung erfolgt bei einer günstigen Feuchtigkeit von 50-60 % RF. Steigt die relative Feuchtigkeit oder nähert sie sich dem gesättigten Zustand, d.h. bei einer RF von 100 %, wird die Karbonatisierung langsam oder findet erst gar nicht statt. Bei einer so hohen relativen Feuchtigkeit kann das Kohlendioxid, das die Karbonatisierung vorantreibt, nur schwer durch das Wasser dringen.

Abbildung 5.2 zeigt die Karbonatisierungstiefe als Funktion der Zeit in unterschiedlichen Teilen ein und derselben Konstruktion, aus CEB (1997).

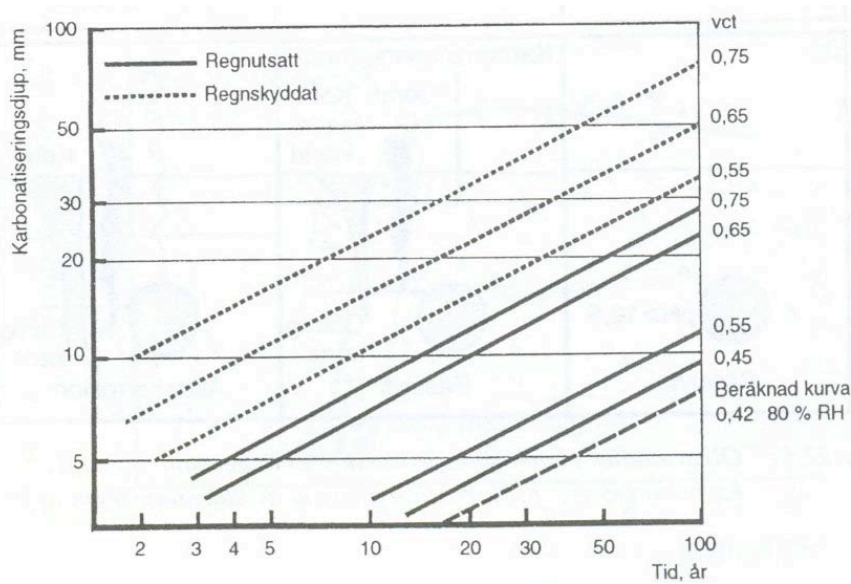


Depth of carbonation [mm]	Tiefe der Karbonatisierung [mm]
Time [years]	Zeit [Jahre]

Abbildung 5.2. Karbonatisierungstiefe als Funktion der Zeit in unterschiedlichen IV ein und derselben Konstruktion, d.h. unterschiedliche Werte auf n , k_1 und k_2 , CEB (1997).

- Ref. ist Raumklima,
- I-III sind unterschiedliche Teile, die Regen ausgesetzt sind
- IV & V sind vor Regen geschützt.

Es hat sich herausgestellt, dass die Karbonatisierungsgeschwindigkeit bei Konstruktionen, die Regen ausgesetzt sind, im Vergleich zu vor Regen geschützten Konstruktionen geringer ausfällt, siehe Abbildung 5.3,



Karbonatiseringsdjup mm	Karbonatiseringstiefe, mm
Regnutsatt	Regen ausgesetzt
Regnskyddat	vor Regen geschützt
Beräknad kurva	Berechnete Kurve
Tid, år	Zeit, Jahre

Abbildung 5.3: Karbonatisierungstiefe für Konstruktionen, die Regen ausgesetzt bzw. vor Regen geschützt sind (Betonhandboken-Material, 1997).

Die Unterschiede in Bezug auf die Karbonatisierungsgeschwindigkeit in Abbildung 5.2 und 5.3 beruhen daher auf Unterschieden in Bezug auf den Feuchtigkeitsgehalt des Betons. Die Diffusion von Kohlendioxid in den Kapillarporen des Betons beruht auf dem Feuchtigkeitsgehalt in den Kapillarporen, und die Feuchtigkeitsabhängigkeit ist groß. Die Relative Feuchtigkeit (RF) in der Deckschicht des Betons hat direkten Einfluss auf den Widerstand gegen die Diffusion des Kohlendioxids und damit auf die Initiierungszeit der Bewehrungskorrosion. Die Feuchtigkeitsabhängigkeit wird in der nachstehenden Abbildung 5.4 dargestellt, (BFR Nr. 12, 2007).

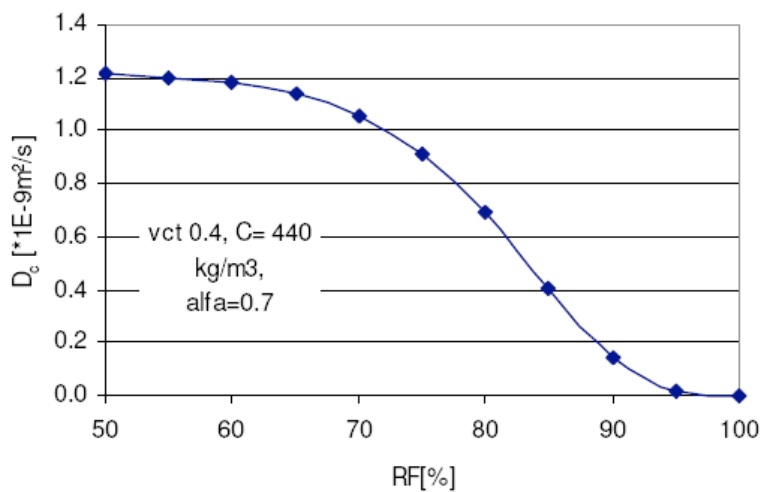


Abbildung 5.4: Feuchtigkeitsabhängigkeit des Diffusionskoeffizienten für Kohlendioxid, laut DuraCrete (Duracrete, 1998), (BFR Nr. 12, 2007).

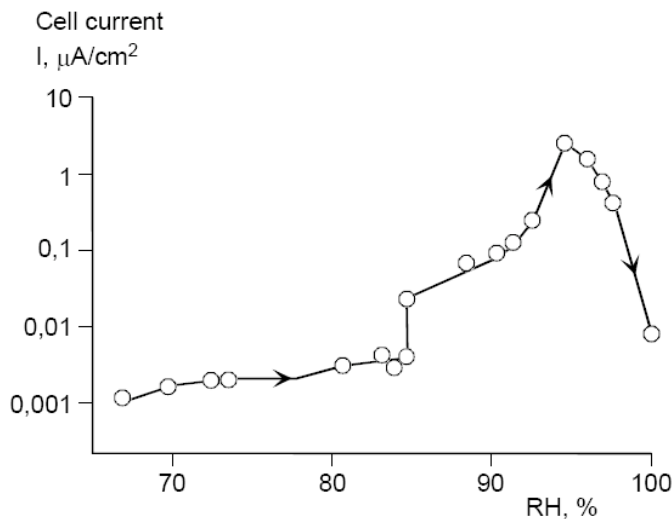
Der Diffusionskoeffizient ist höher und bei einer Feuchtigkeit zwischen 50 und 70 % fast konstant. Zwischen 70 und 90 % nimmt der Diffusionskoeffizient ab. Für eine RF über 90 % ist der Diffusionskoeffizient fast unbedeutend.

Es ist sehr wahrscheinlich, dass die relative Feuchtigkeit des Betons an der Oberfläche nach einer Verglasung der Balkonplatten (Verglasung oberhalb und unterhalb der Platte) abnimmt und anschließend die RF weiter im Innern der Deckschicht beeinflusst wird. Wahrscheinlich sinkt die RF im Beton nach einer Verglasung von einem Wert über 90 % auf einen Wert zwischen 70 und 80 %. Das bedeutet einen höheren Diffusionskoeffizienten und damit eine höhere Karbonatisierungsgeschwindigkeit. Um die Feuchtigkeitsschwankungen in der Balkonplatte nach einer Verglasung zu untersuchen, sollten Feuchtigkeitmessungen mit und ohne Verglasung durchgeführt werden.

6. Auswirkung der Verglasung auf die Bewehrungskorrosion

Balkonverglasungen erfüllen im nördlichen Klima hauptsächlich die Funktion, Regenwasser, Schnee und Staub draußen und die Wärme drinnen zu halten. Es ist deutlich, dass eine Balkonverglasung das der Feuchtigkeit Ausgesetztsein nicht nur dadurch beeinflusst, dass verhindert wird, dass Feuchtigkeit auf den Balkon dringt, sondern auch, indem ein Mikroklima geschaffen wird, das zur Trocknung beiträgt. Die Sonnenstrahlung sowie die thermische Strömung durch die Außenwand oder ein hinter dem Balkon befindliches Fenster erhöhen sehr wahrscheinlich die Temperatur auf dem Balkon, was die Sättigung bleibend erhöht und den Feuchtigkeitsgehalt im Beton sehr wahrscheinlich noch mehr senkt.

Abbildung 6.1 ist zu entnehmen, dass, wenn die Feuchtigkeit im Beton (auf Bewehrungsebene) unter 90 % RF sinkt, die Korrosionsrate um 90 % sinkt (Tuutti 1982). Was die potentielle Beschleunigung der Karbonatisierung aufgrund des Austrocknens des Betons betrifft (Parrott 1987), beträgt die Steigerung nur 10-20 %. Auch frühere Erfahrungen bei der Sanierung von Balkonen zeigen, dass die Korrosion aufgrund von Karbonatisierung normalerweise eintritt, wenn die Feuchtigkeitsbelastung am höchsten ist, jedoch nicht, wenn entgegengesetzte Verhältnisse herrschen.



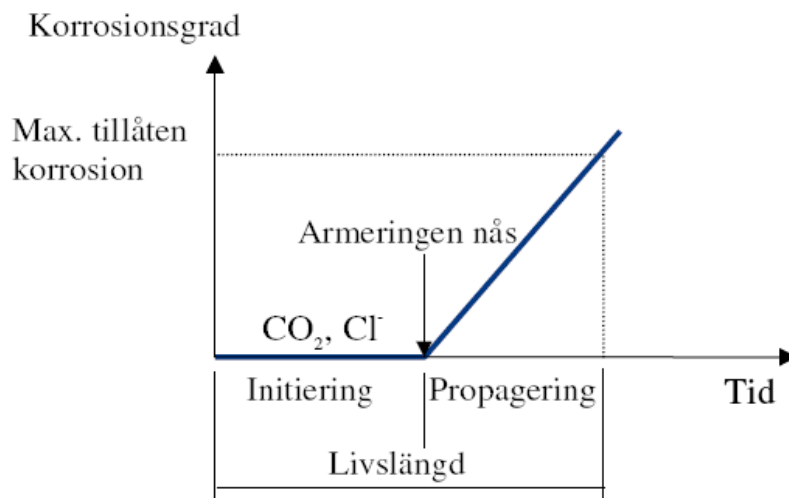
Cell current	Zellstrom
--------------	-----------

Abbildung 6.1: Zusammenhang zwischen der RF des Betons und dem Korrosionsstrom laut Tuutti (Tuutti, 1982).

Zusammenfassend führt eine Verglasung zu einer trockeneren Betonfläche, weniger Feuchtigkeit im Beton und einer niedrigeren Korrosionsrate des Bewehrungsstahls in karbonatisiertem Beton. Dabei handelt es sich um die günstigste Auswirkung der Verglasung von Balkonen auf den Korrosionsschutz. Um die Feuchtigkeitsschwankungen in der Balkonplatte vor und nach der Verglasung herauszufinden, sollten Feuchtigkeitsmessungen in Referenzobjekten mit und ohne Verglasung durchgeführt werden.

7. Auswirkung der Verglasung auf die Lebensdauer der Betonkonstruktion

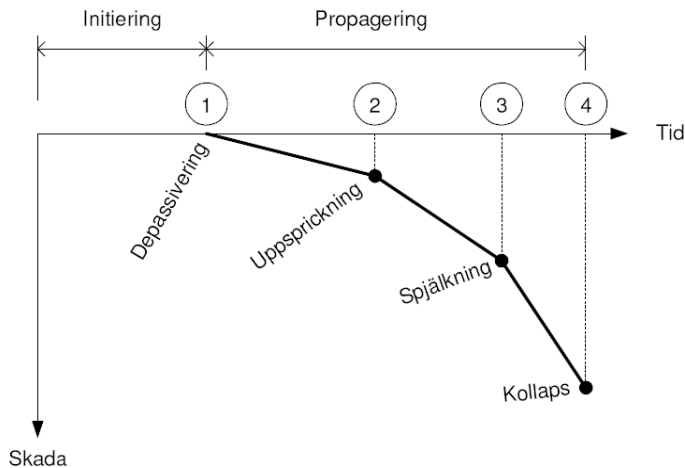
Eine der häufigsten Ursachen für das Einsetzen von Korrosion ist die Karbonatisierung. Die Korrosion der Bewehrung ist oft die Ursache für eine Begrenzung der Lebensdauer von Betonkonstruktionen. Normalerweise unterteilt man die Lebensdauer in eine Initiierungszeit (wie lange es dauert, bis die Bewehrung zu korrodieren beginnt) und eine Propagierungszeit (wie lange es dauert, bis die maximale zugelassene Korrosion erreicht ist), siehe Abbildung 7.1.



Korrosionsgrad	Korrosionsgrad
Max. tillåten korrosion	maximal zulässige Korrosion
Armering nås	Bewehrung wird erreicht
Initiering	Initiierung
Propagering	Propagierung
Tid	Zeit
Livslängd	Lebensdauer

Abbildung 7.1: Korrosionsmodell laut Tuutti (Tuutti, 1982)

Die maximal zulässige Korrosion bezeichnet oft den Korrosionsgrad, der zum Abplatzen der deckenden Betonschicht im Beton führt, d.h. Punkt 3 in Abbildung 7.2, (BFR Nr. 12, 2007).



Initiering	Initiierung
Propagering	Propagierung
Depassivering	Depassivierung
Uppsprickning	Aufreißen
Spjälkning	Abplatzen
Kollaps	Kollaps
Tid	Zeit

Abbildung 7.2: Illustration der unterschiedlichen Ereignisse in Zusammenhang mit der Bewehrungskorrosion

Bei der Berechnung der Lebensdauer der Betonkonstruktion kann man entweder nur die Initiierungszeit verwenden oder eine bestimmte Korrosion zulassen.

Mit Hilfe von Modellen, die angeben, wie schnell das Kohlendioxid durch die Deckschicht dringt, kann man bestimmen, wie lange die Initiierungszeit dauert, siehe Anlage A. Die Propagierungszeit lässt sich mit Hilfe von Modellen, die die Korrosionsrate und die maximal zulässige Korrosion beschreiben, bestimmen, siehe Anlage B.

7.1 Berechnung der Propagierungszeit (mit und ohne Verglasung)

Die Berechnung erfolgt gemäß den Berechnungsmodellen in Anlage B. Hier wird die Propagierungszeit in Jahren für die gegenwärtige Spaltbreite (entspricht 1,0 mm) berechnet, die wahrscheinlich zum Abplatzen führt. Das Kriterium für das

Abplatzen einer deckenden Betonschicht wird laut Duracrete auf 1,0 festgelegt, (BFR Nr. 12, 2007).

Die Propagierungszeit wird für die folgenden Fälle berechnet:

1. Balkonplatte ohne Verglasung (ungeschützt)
2. Balkonplatte mit Verglasung (geschützt)

Die Balkonplatte in dieser Berechnung ist eine bewehrte Balkonplatte mit einer deckenden 20 mm Betonschicht und einer Zugfestigkeit von 2 MPa. Die Bewehrung an der Oberkante hat einen Durchmesser von 16 mm. Hier wird die Lebensdauer für die Summe der Initiierungs- und Propagierungszeiten der Bewehrungskorrosion berechnet.

Berechnung für ungeschützten Balkon, Fall 1:

Die Berechnung folgt den Modellen gemäß Duracrete, (BFR Nr. 12, 2007) in Anlage B. Die Parameter für die Berechnung des Widerstands lauten:

$\rho_0^k = 57$	Ωm , potentieller elektrolytischer Widerstand
$t_{hydr} = 1$	Jahre, das Alter des Betons, jedoch höchstens ein Jahr
$n_{res}^k = 0,23$	Exponent für Zeitabhängigkeit
$k_{c,res}^k = 1,0$	Härtungsfaktor
$k_{RH,res}^k = 1,08$	Feuchtigkeitsfaktor, gilt für RH = 90 %
$k_{cl,res}^k = 1,0$	Chloridfaktor
$T = 10$	$^{\circ}\text{C}$, Mitteltemperatur, bestimmte Voraussetzung
$k^k = 0,025$	$^{\circ}\text{C}^{-1}$, Faktor für die Temperaturabhängigkeit

Der Temperaturfaktor des Widerstandes wird nach der nachstehenden Gleichung berechnet:

$$k_{T,res}^k = (1 + K^k (T - 20))^{-1} = (1 + 0,0025 (10 - 20))^{-1} = 1,33 \quad ^{\circ}\text{C}^{-1}$$

Widerstand laut nachstehender Gleichung:

$$\rho^k = \rho_0^k \cdot \left(\frac{t_{hydr}}{t_0} \right)^{n_{res}^k} \cdot k_{c,res}^k \cdot k_{T,res}^k \cdot k_{RH,res}^k \cdot k_{cl,res}^k$$

$$\rho^k = 57 \cdot \left(\frac{365}{28} \right)^{0,23} \cdot 1,0 \cdot 1,33 \cdot 1,08 \cdot 1,0 = 148 \quad \mu\text{m}$$

Parameter für die Berechnung der Korrosionsrate:

$m_0 = 882$	$\mu\text{m}\cdot\Omega\text{m}/\text{Jahre}$, konstant
$F_{cl}^k = 1,0$	Faktor für die Chloridkorrosionsrate
$\alpha^k = 2,0$	Faktor für eventuellen Lochfraß
$\gamma_v = 1,0$	Partialkoeffizient für die Korrosionsrate

$$V^d = \frac{m_0}{\rho^k} \alpha^k F_{cl}^k \gamma_v = \frac{882}{147} \cdot 2,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 11,9 \quad \mu\text{m}/\text{Jahr}$$

Für die Berechnung der Rostangriffstiefe wird davon ausgegangen, dass die relative Länge nasser Zeiträume $w_t = 0,75$ beträgt. Die Rostangriffstiefe beträgt dann laut nachstehender Gleichung:

$$P^d = V^d w_t (t - t_i^d) = 11,9 \cdot 0,75 \cdot (48 - 30) = 161 \quad \mu\text{m}$$

Die zum Auslösen eines Spalts notwendige Rostangriffstiefe beträgt laut nachstehender Gleichung mit Werten der Regressionskoeffizienten laut Anlage B:

$$p_0^d = a_1 + a_2 \frac{x^d}{d} + a_3 f_{c,sp}^d = 74,4 + 7,3 \cdot \frac{20 - 0}{16} - 17,4 \cdot 2,0 = 48,7 \quad \mu\text{m}$$

Die Spaltbreite laut nachstehender Gleichung mit Parametern laut Anlage 2:

$$w^d = w_0 + b^d (p^d - p_0^d) = w_0 + \gamma_b b^k (p^d - p_0^d)$$

$$w^d = 0,050 + 0,0886 \cdot (161 - 48,7) = 1,01 \quad \text{mm}$$

Hier wird davon ausgegangen, dass die Korrosion nach 30 Jahren anfängt, wenn die Karbonatisierungsfront die Bewehrung erreicht. Anschließend dauert es weitere 19 Jahre, bis die Korrosion zum Abplatzen der Deckschicht der oberen Bewehrung, d.h. einer Spaltbreite von 1 mm, führt.

Berechnung für geschützten Balkon, Fall 2:

Die Berechnung folgt den Modellen gemäß Duracrete, (BFR Nr. 12, 2007) in Anlage B. Die Parameter für die Berechnung des Widerstands:

$$\rho_0^k = 57 \quad \Omega\text{m}, \text{ potentieller elektrolytischer Widerstand}$$

$t_{hydr} = 1$	Jahre, das Alter des Betons, jedoch höchstens ein Jahr
$n_{res}^k = 0,23$	Exponent für Zeitabhängigkeit
$k_{c,res}^k = 1,0$	Härtungsfaktor
$k_{RH,res}^k = 1,08$	Feuchtigkeitsfaktor, gilt für RH = 80 %
$k_{cl,res}^k = 1,0$	Chloridfaktor
$T = 10$	°C, Mitteltemperatur, bestimmte Voraussetzung
$k^k = 0,025$	°C ⁻¹ , Faktor für die Temperaturabhängigkeit

Der Temperaturfaktor des Widerstandes wird nach der nachstehenden Gleichung berechnet:

$$k_{T,res}^k = (1 + K^k (T - 20))^{-1} = (1 + 0,0025 (15 - 20))^{-1} = 1,14 \quad \text{°C}^{-1}$$

Widerstand laut nachstehender Gleichung:

$$\rho^k = \rho_0^k \cdot \left(\frac{t_{hydr}}{t_0} \right)^{n_{res}^k} \cdot k_{c,res}^k \cdot k_{T,res}^k \cdot k_{RH,res}^k \cdot k_{cl,res}^k$$

$$\rho^k = 57 \cdot \left(\frac{365}{28} \right)^{0,23} \cdot 1,0 \cdot 1,14 \cdot 3,18 \cdot 1,0 = 374 \quad \mu\text{m}$$

Parameter für die Berechnung der Korrosionsrate:

$m_0 = 882$	$\mu\text{m} \cdot \Omega\text{m}/\text{Jahre}$, konstant
$F_{cl}^k = 1,0$	Faktor für die Chloridkorrosionsrate
$\alpha^k = 2,0$	Faktor für eventuellen Lochfraß
$\gamma_v = 1,0$	Partialkoeffizient für die Korrosionsrate

$$V^d = \frac{m_0}{\rho^k} \alpha^k F_{cl}^k \gamma_v = \frac{882}{314} \cdot 2,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 4,7 \quad \mu\text{m}/\text{Jahr}$$

Für die Berechnung der Rostangriffstiefe wird davon ausgegangen, dass die relative Länge nasser Zeiträume $w_t = 0,75$ beträgt. Die Rostangriffstiefe beträgt dann laut nachstehender Gleichung:

$$P^d = V^d w_t (t - t_i^d) = 4,7 \cdot 0,5 \cdot (98 - 30) = 160 \quad \mu\text{m}$$

Die zum Auslösen eines Spalts notwendige Rostangriffstiefe beträgt laut nachstehender Gleichung mit Werten der Regressionskoeffizienten laut Anlage B:

$$p_0^d = a_1 + a_2 \frac{x^d}{d} + a_3 f_{c,sp}^d = 74,4 + 7,3 \cdot \frac{20-0}{16} - 17,4 \cdot 2,0 = 48,7 \text{ } \mu\text{m}$$

Die Spaltbreite laut nachstehender Gleichung mit Parametern laut Anlage 2:

$$w^d = w_0 + b^d (p^d - p_0^d) = w_0 + \gamma_b b^k (p^d - p_0^d)$$

$$w^d = 0,050 + 0,0886 \cdot (170 - 48,7) = 1,01 \text{ mm}$$

Hier wird davon ausgegangen, dass die Korrosion nach 30 Jahren anfängt, wenn die Karbonatisierungsfrent die Bewehrung erreicht. Anschließend dauert es weitere 68 Jahre, bis die Korrosion zum Abplatzen der Deckschicht der oberen Bewehrung, d.h. einer Spaltbreite von 1 mm, führt.

Vergleich der Propagierungszeiten (Fall 1 und 2):

Ein Vergleich der Propagierungszeiten (Korrosion, die zum Abplatzen der Deckschicht führt) von Bewehrungsstahl in einer bereits karbonatisierten Betonplatte in einem Balkon mit und ohne Verglasung zeigt den positiven Effekt der Verglasung auf die Lebensdauer.

Tabelle 7.1 zeigt die Auswirkung der Verglasung auf die Propagierungszeit für Balkonplatten

Balkon	Durchschnittl. Feuchtigkeit des Betons RF [%]	Initiierungszeit, [Jahre]	Propagierungszeit, [Jahre]	Lebensdauer [Jahre]
Ungeschützt	> 90	30	18	48
Geschützt	< 80	30	68	98
Unterschied	> 10	0	50	50

Hier wird davon ausgegangen, dass die Verglasung nach 30 angebracht wird, wenn die gesamte deckende Betonschicht karbonatisiert ist und die Korrosion nach 30 Jahren einsetzt, wenn die Karbonatisierungsfrent die Bewehrung erreicht. Aufgrund eines niedrigeren Feuchtigkeitsgehalts in verglasten Balkonplatten dauert es deutlich länger, d.h. 68 Jahre, bevor die Korrosion zum Abplatzen der Deckschicht an der oberen Bewehrung (d.h. einer Spaltbreite von 1 mm) führt. Die entsprechende Propagierungszeit für eine Balkonplatte ohne Verglasung wurde auf 18 Jahre berechnet.

Das bedeutet, dass sich die Verglasung die Propagierungsphase, d.h. die theoretische Korrosionszeit, um ca. 68-18 = 50 Jahre verlängert hat.

8. Auswirkung der Verglasung auf Frostschäden im Beton

Die wichtigsten Zersetzungsmechanismen in Schweden in Bezug auf die Lebensdauereinschätzung neuer Betonkonstruktionen sind Frost und Bewehrungskorrosion.

Es gibt zwei völlig unterschiedliche Arten von Frostschäden in Betonkonstruktionen: innere Frostschäden durch das Gefrieren von Süßwasser bzw. Frostablösung beim Gefrieren in einem salzhaltigen Umfeld.

8.1 Innere Frostschäden durch das Gefrieren von Süßwasser

Balkone sind oft von Frostschäden durch gefrorenes Süßwasser betroffen. Ein Teil des Wassers im Porensystem des Betons ist so fest gebunden, dass es nur bei sehr niedrigen Temperaturen gefrieren kann. Das restliche Porenwasser ist Wasser, das gefrieren kann und sich beim Gefrieren zu Eis ausdehnt. Die Ausdehnung sorgt für eine starke Zunahme des Porenwasserdrucks, einem „hydraulischen Druck“, der das Material zersprengen kann. Entscheidend dafür, ob es dazu kommt oder nicht, ist, wie viel des verfügbaren Porensystems mit Wasser gefüllt ist. Das wird mit dem Sättigungsgrad S ausgedrückt.

Den Sättigungsgrad bezeichnet die Grenze, wann in Zusammenhang mit dem Gefrieren auftretende Frostschäden den „kritischen Sättigungsgrad“ S_{kr} erreichen. Es handelt sich dabei um eine Eigenschaft des Materials, die sich mit Hilfe eines Prüfverfahrens ermitteln lässt. Sie ist nicht immer konstant, sondern sinkt etwas mit der Gefriertemperatur, $S_{kr(T)}$. Das Risiko auf Entstehung innerer Frostschäden hängt demzufolge damit zusammen, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, dass der „aktuelle Sättigungsgrad“ S_{akt} den kritischen $S_{kr(T)}$ übersteigt und gleichzeitig der Beton gefriert.

Die Größe von S_{akt} in einer Betonkonstruktion ist ein feuchtmechanisches Problem. Sie ist abhängig von den feuchtmechanischen Eigenschaften, der Struktur des Luftporensystems und den Variationen des Mikroklimas auf der Betonoberfläche im Laufe der Zeit.

Betonoberflächen, die Wasser ausgesetzt sind, erreichen relativ schnell einen Sättigungsgrad, der dem kritischen Punkt, dem „Knickpunkt“, entspricht. Anschließend verläuft die Feuchtigkeitsaufnahme sehr langsam. Der Sättigungsgrad von Konstruktionen, die in ständigem Kontakt zu Wasser stehen, steigt im Laufe der Zeit, je mehr das Luftporensystem sich mit Wasser füllt. Die Zeitperspektive dafür sind jedoch Monate, Jahre, Jahrzehnte und sogar Jahrhunderte!

Da S_{akt} größer ist als $S_{kr(T)}$, wenn der Beton gefriert, entsteht in dem Bereich, in dem $S_{akt} > S_{kr(T)}$, ein lokaler Frostschaden. Das führt örtlich zu einer starken Verschlechterung der Haltbarkeit und Steifigkeit des Betons. Wenn der Umfang zu

groß wird, kann eine innere Frostsprengung zu Rissen oder einer Abspaltung der Außenschicht führen.

Es ist sehr wahrscheinlich, dass der aktuelle Sättigungsgrad in einem verglasten Balkon im Verhältnis zum kritischen Sättigungsgrad sinkt, da der Balkon vor Feuchtigkeit und Regen geschützt wird. Das Risiko auf Frostschäden sollte sich verringern. Um das zu ermitteln, sollten Feuchtigkeitsmessungen an Referenzobjekten mit und ohne Verglasung durchgeführt werden.

9. In Finnland durchgeführte Messungen

9.1 Einleitung

In Finnland hat J.S. Mattila von der Universität Tampere die Korrosionsrate bei Proben in Balkonen mit und ohne Verglasung gemessen. In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Messungen, Beobachtungen und Schlussfolgerungen der von Mattila in Finnland, (Mattila, 2003), durchgeführten Untersuchungen wiedergegeben.

Laut Mattila ist die Auswertung der Effizienz von Balkonverglasungen zur Senkung der Feuchtigkeitsbelastung und des Wassergehalts von Betonkonstruktionen ein kompliziertes Problem. Auch wenn diese Auswirkungen offenbar positiver Art zu sein scheinen, ist eine quantitative Bewertung ohne Messdaten vom Feld unmöglich. Eine potentielle Methode zur Auswertung der Auswirkung einer Balkonverglasung auf den Feuchtigkeitsgehalt im Beton ist die Überwachung mit Hilfe elektronischer Ausrüstung. Das ist allerdings aus zweierlei Gründen eine wissenschaftlich nicht empfehlenswerte Methode. Erstens ist die Genauigkeit der elektronischen Feuchtigkeitsmessung nicht besonders hoch. Die Korrosionsrate in karbonisiertem Beton kann beispielsweise innerhalb eines Jahrzehnts weniger abweichen als die Empfindlichkeit der Messapparatur. Die verwendeten Feuchtigkeitsmesser funktionieren am besten ausschließlich im hygroskopischen Bereich, während bekannt ist, dass die Korrosion am schnellsten in teilweise gesättigtem Beton voranschreitet, d.h. bei einem super-hygroskopischen Feuchtigkeitsintervall (Alonso et al, 1988). Darum ist die Feuchtigkeitsmessung keine zuverlässige Methode, um die Auswirkung der Verglasung auf die Korrosion zu untersuchen, insofern als die Abnahme des Feuchtigkeitsgehalts nicht systematisch erfolgt und sehr groß ist (Mattila, 2003).

Eine Möglichkeit, das Problem Feuchtigkeitsmessung zu umgehen, ist die Messung des Korrosionsgrads selbst. Die Korrosionsrate von gegossenen Stahlstangen in karbonatisiertem Beton lässt sich relativ einfach kontrollieren, beispielsweise mit Hilfe der Methode des Polarisationswiderstands (Stern & Geary 1957). Das ist eine vernünftige Methode, um sich ein quantitatives Bild des schützenden Effekts von Balkonverglasungen zu machen, da die Korrosion von der Feuchtigkeit und der Temperatur der Umgebung abhängig ist.

9.2 Durchgeführte Messungen und Ergebnisse

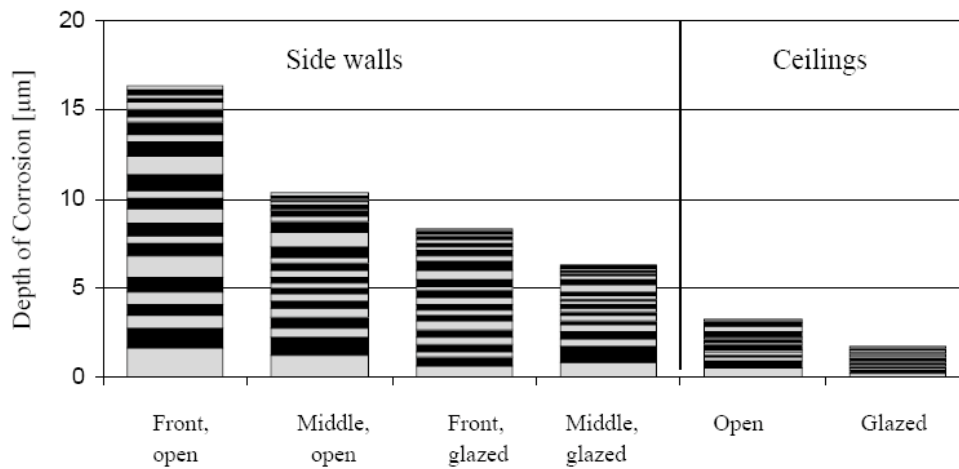
Zu diesem Zweck wurde eine maßgeschneiderte Ausrüstung zur Überwachung der Korrosionsrate für Stahl im Beton entwickelt. Die Einheit verwendet die Technik des Polarisationswiderstands zur Messung der gegenwärtigen Korrosionsrate (Stern & Geary 1957). Die kumulativen Korrosionsangriffe lassen sich mit Hilfe der gesammelten Daten einfach berechnen. Die Einheit verwendet moderne Datentechnik, so dass das elektrische Potential des Stahls direkt von einem Computer überprüft wird. Der Apparat führt vollautomatisch eine ständige Überwachung der Korrosion durch und ist mit einem mobilen Datenanschluss ausgestattet, um Daten aus dem Feld zu sammeln. Die Einheit kann maximal 120 Messkanäle handhaben, genauer beschrieben in Mattila 2003.

Man sollte grundsätzlich beachten, dass die Angaben von einem Feld gesammelt werden sollten, in dem alle Parameter vom Mikroklima in dem Balkon bestimmt werden, das den Grad der Zersetzung bestimmt.

Für die Überwachung wurden spezielle Messfühler vorbereitet und auf Balkonen an vorhandenen Gebäuden angebracht. Die Messfühler enthalten Bewehrungsstahl und geeignete Elektroden zur Überwachung der Korrosionsrate des Polarisationswiderstands.

Die Effizienz der Balkonverglasung zur Senkung der Korrosion wurde ausgewertet, indem die Korrosionsrate des Bewehrungsstahls im karbonatisierten Beton überwacht wurde, sowohl bei verglasten als auch bei offenen Balkonen. Das Überwachungssystem misst den gegenwärtigen Korrosionsstrom [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]. Mit Hilfe des gegenwärtigen Korrosionsstroms kann man die kumulativen Radiusabnahme des Stahls in μm (d.h. tiefer Korrosionsangriff) berechnen, indem man den Korrosionsstrom in die Zeit integriert und das Faradaysche Gesetz anwendet.

Die kumulative Radiusabnahme während der 25 Monate der Überwachung wird in Abbildung 9.1 dargestellt. Die Ergebnisse fielen in allen drei untersuchten Gebäuden sehr ähnlich aus.



Depth of corrosion (mm)	Korrosionstiefe (mm)
Side walls	Seitenwände
Ceilings	Decken
Front, open	Vorderseite, offen
Middle, open	Mitte, offen
Front, glazed	Vorderseite, verglast
Middle, glazed	Mitte, verglast
Open	Offen
Glazed	Verglast

Abbildung 9.1. Durchschnittliche kumulative Radiusabnahme des Stahls in drei Gebäuden innerhalb von 25 Monaten (aus Mattila 2003)

Die Teile in den jeweiligen Balken in der Abbildung stehen für die Monatswerte mit Radiusabnahme, d.h. der untere Teil jedes Stapels stellt eine im ersten überwachten Monat gemessene Radiusabnahme, also Dezember 2000, dar, und der obere Teil ist der letzte überwachte Monat, also Dezember 2002.

Abbildung 9.1 zeigt, dass die Balkonverglasung die Korrosionsrate für Stahl im Beton deutlich und systematisch gesenkt hat. Die Senkung während der Überwachungszeit betrug ungefähr 30 bis 50 % in den Seitenwänden und 50 % in den Platten. Die Auswertung der gemessenen Mengen (Radiusabnahme), Ergebnisse von Alonso et al 1998, Andrade et al 1993, können als Richtlinie verwendet werden. Daraus geht hervor, dass eine durchschnittliche Radiusabnahme von 50 µm erforderlich ist, um den ersten sichtbaren Riss (0,05-0,1 mm) feststellen zu können. Aufgrund dessen kann man die zeitliche Dauer der aktiven Korrosion vor der Rissbildung in den untersuchten Strukturen grob berechnen. Das Ergebnis dieser Berechnung wird in Tabelle 9.1 dargestellt.

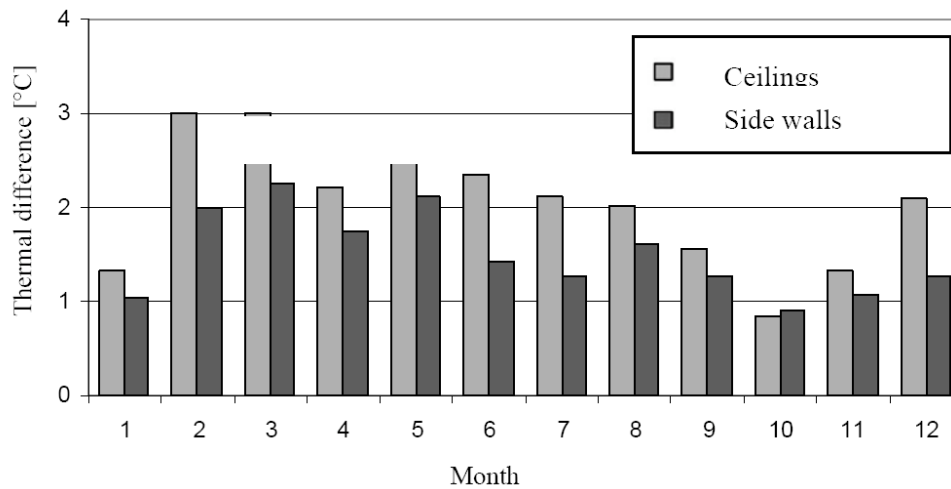
Tabelle 9.1. Durchschnittliche jährliche Korrosionstiefe und berechnete zeitliche Dauer der aktiven Korrosion in verglasten und offenen Balkonen (aus Mattila 2003)

	Balcony side walls		Ceiling surfaces	
	Glazed	Open	Glazed	Open
Average yearly corrosion depth during the monitoring period [μm]	4	7	1	2
Calculated duration of the active corrosion [a]	12	7	50	25

Balcony side walls	Seitenwände des Balkons
Ceiling surfaces	Deckenoberflächen
Glazed	Verglast
Open	Offen
Average yearly corrosion depth during the monitoring period [μm]	Durchschnittliche jährliche Korrosionstiefe während des Beobachtungszeitraums
Calculated duration of the active corrosion [a]	Berechnete Dauer der aktiven Korrosion [a]

Tabelle 9.1 zeigt, dass die Lebensdauer der Strukturen deutlich verlängert werden kann. Besondere Beachtung verdienen die niedrigen Korrosionsraten in Deckenflächen. Die berechnete Zeit der aktiven Korrosion vor dem Aufreißen beträgt bei offenen Balkonen circa 25 Jahre, und durch eine Verglasung kann dieser Wert verdoppelt werden. Ergebnisse zeigen, dass die Lebensdauer verglaster Balkone ohne größere Sanierungsmaßnahmen um Jahrzehnte verlängert wird.

Auch die Temperatur im Beton wurde einmal in der Stunde an derselben Stelle überprüft, an der die Korrosion gemessen wurde. Die gemessenen Temperaturen wurden zu Mittelwerten im Monat für verglaste und offene Balkone verarbeitet. Die monatlichen Temperaturunterschiede zwischen verglasten und offenen Balkonen werden in Abbildung 9.2 dargestellt. Der positive Unterschied bedeutet, dass die Temperatur auf verglasten Balkonen höher war.

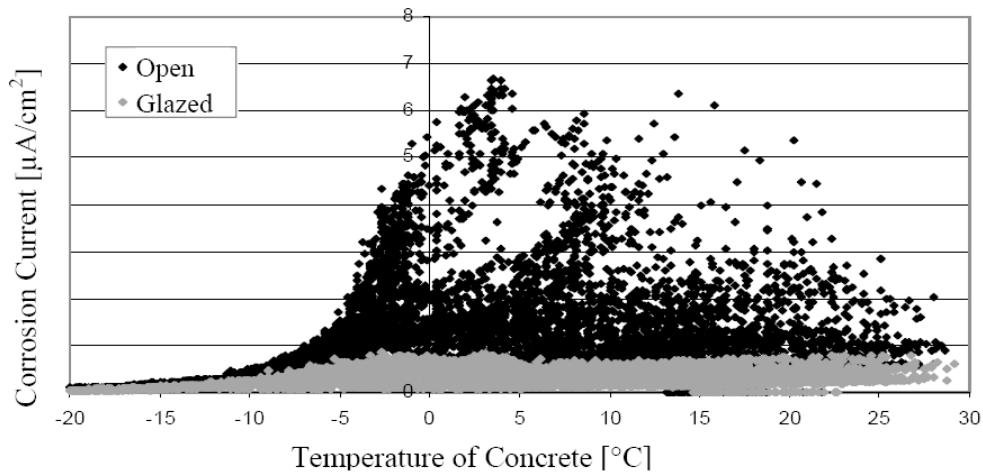


Ceilings	Decken
Side walls	Seitenwände
Thermal difference [°C]	Temperaturunterschied [°C]
Month	Monat

Abbildung 9.2. Der Unterschied der monatlichen mittleren Temperatur im Beton bei verglasten und offenen Referenzbalkonen. Der positive Unterschied ist die Situation, bei der die Temperatur auf verglasten Balkonen höher war (aus Mattila 2003)

Aus der mittleren Temperatur des Betons in Abbildung 9.2 geht hervor, dass die Temperatur bei verglasten Balkonen systematisch höher ist. Auf verglasten Balkonen waren die Temperaturen auf halber Höhe der Seitenwand im Durchschnitt ca. 1,5 °C und an der Decke im Durchschnitt ca. 2 °C höher als auf offenen Balkonen. Dieser Temperaturunterschied herrschte auch in der kalten Jahreszeit, als die Strahlung der Sonne sehr schwach war. Diese augenscheinlich kleinen Temperaturunterschiede sind als wichtig zu betrachten, da sie die Differenz der Sättigung erhöhen und damit das Trocknen des Betons fördern.

Um das Risiko auf Frostschäden aufgrund der Korrosionsrate beurteilen zu können, werden alle Messungen der Korrosionsraten als Funktion der Temperatur im Beton zum Zeitpunkt der Sättigung der Korrosionsrate angezeigt. Diese wird in Abbildung 9.3 dargestellt.



Open	Offen
Glazed	Verglast
Corrosion Current [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]	Korrosionsstrom [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]
Temperatur of Concrete [$^{\circ}\text{C}$]	Temperatur des Betons [$^{\circ}\text{C}$]

Abbildung 9.3. Gegenwärtiger Korrosionsstrom als Funktion der Temperatur des Betons zum Zeitpunkt der Sättigung der Korrosionsrate. (aus Mattila, 2003)

Abbildung 9.3 ist zu entnehmen, dass die Korrosionsrate in verglasten Balkonen unter $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ bleibt. Die Entwicklung von Frostschäden verlangt eine fast vollständige Sättigung der Feuchtigkeit. Das bedeutet, dass die Korrosion sich bei mindestens 4 bis $5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ausbreitet. Damit werden Frostschäden an den Verglasungen verhindert. Bei der Beurteilung der Zuverlässigkeit der Ergebnisse sollte man beachten, dass die Ergebnisse stark vom Klima abhängen, insbesondere von der Niederschlagsmenge während der Überwachungszeit. Da der Zeitraum nur etwas mehr als zwei Jahre betrifft, müssen die Voraussetzungen nicht notwendigerweise mit den langfristig durchschnittlichen Bedingungen übereinstimmen.

9.3 Wichtige Schlussfolgerungen aus dem Experiment von Mattila

Die Korrosion wurde durch die Überwachung der Korrosionsrate für Stahl in karbonatisiertem Beton mit Hilfe von Messfühlern gemessen. Aufgrund der Ergebnisse hat Mattila die folgenden Schlussfolgerungen gezogen:

- Eine Balkonverglasung verlängert die Lebensdauer von Balkonen aus bewehrtem Beton durch die Senkung der Feuchtigkeitsbelastung und die

Erhöhung sowohl der Lufttemperatur als auch der Temperatur des Betons und damit der Verbesserung seiner Fähigkeit auszutrocknen.

- Die Lebensdauer wurde aufgrund von aktiver Korrosion um ca. 5 Jahre in den Seitenwänden und circa 25 Jahre in der Unterseite der Platten verlängert. Insbesondere Letzteres macht unnötige und umfangreiche Sanierungsmaßnahmen in der unteren Oberfläche der Balkonplatten überflüssig.
- Die Voraussetzungen für das Entstehen von Frostschäden wurden durch die Verglasungen vollkommen beseitigt.

10. Schlussfolgerungen

Ziel dieses Berichts ist die Auswertung der Auswirkungen einer Verglasung auf die Karbonatisierung, Bewehrungskorrosion und Lebensdauer von Betonplatten in Balkonen. Eine durch die Karbonatisierung eingesetzte Bewehrungskorrosion und Frost wurden als wichtigste Schadensmechanismen angesehen.

Die in diesem Bericht beschriebenen theoretischen Analysen deuten darauf hin, dass Verglasungen viele positive Auswirkungen haben:

- + Die geringere Feuchtigkeitsbelastung nach der Verglasung führt zu einem trockeneren Beton und einer wesentlich niedrigeren Korrosionsrate.
- + Die Lebensdauer steigt nach der Verglasung wesentlich.
- + Das Risiko auf Frostschäden sinkt aufgrund von weniger Feuchtigkeit im Beton.
- + Das Raumklima auf einem verglasten Balkon verbessert sich, und die Lufttemperatur steigt um ein paar Grad. Damit sinkt das Risiko der Oberflächenkondensation auf Betonflächen.

Die Verglasung hat allerdings auch negative Auswirkungen auf Folgendes:

- Die Karbonatisierungsgeschwindigkeit steigt aufgrund des niedrigeren RH des Betons, d.h. des niedrigeren Feuchtigkeitsgehalts in Kapillarporen.

Die in Finnland durchgeführten Messungen bestätigen einige der obigen theoretischen Schlussfolgerungen. Um die positiven Auswirkungen einer Balkonverglasung quantitativ zu zeigen, sollten Messungen durchgeführt werden. Es wird empfohlen, während eines ausreichend langen Zeitraums (mindestens 1 Jahr) in einigen Referenzobjekten mit und ohne Verglasung die Feuchtigkeit und Temperatur sowohl in der Luft als auch im Beton zu messen.

Eine alternative Methode ist die Messung der Korrosionsrate mit Hilfe einer geeigneten Ausrüstung. Zu diesem Zweck kann man ein paar Proben auf Balkonen mit und ohne Verglasung platzieren oder die Korrosionsrate in den Balkonplatten selbst auf Balkonen mit und ohne Verglasung messen.

11. Referenzen

Burström, Per Gunnar. Byggnadsmaterial. 2001. ISBN 91-44-011768.

Ljungkrantz, Christer, o.a. Betonhandbok-Material. Stockholm : AB Svensk Byggtjänst och Cementsa, 1994. ISBN 91-7332-709-3.

BFR Nr. 12, Vägledning för livslängdsdimensionering av Betonkonstruktioner, 2007.

Duracrete, Models for environmental actions on concrete structures, 1999.

Stern, M. and Geary, A.L. 1957 'Electrochemical polarization, I. A theoretical analysis of the shape of polarization curves', Journal of the Electrochemical Society, January 1957. 56 – 63

Neville, A.M. Properties of Concrete. 1995 vierte Auflage. ISBN 0-582-23070-5.

Verbeck, G J. Mechanism of Corrosion of Steel in Concrete. u.o. : ACI SP 49-3, 1975.

C. Alonso, M. Castellote, C. Andrade. Chloride threshold dependence of pitting potential of reinforcements. u.o. : Electrochimica Acta 47, 3469–3481, 2002.

Alonso, C., Andrade, C. and González, J.A, 'Relation between resistivity and corrosion rate of reinforcements in carbonated mortar made with several cement types', Cement and Concrete Research 8, 687 – 698, 1988.

Mohammed, T.U und Hamada, H. Corrosion of steel bars in concrete with various steel surface condition. u.o. : ACI Materials Journal 103, 233-243, 2006.

Ullberg, Mats. Elektrokemiska aspekter på korrosion i svenska reaktorinneslutningar. u.o. : SKI Rapport 2007:13, 2006. ISSN 1104-1374, ISRN SKI-R-07/13-SE.

J. S. Mattila. Effect of Balcony Glazing on the Durability of Concrete Structures in Nordic Climate Tampere University of Technology, Tampere, Finland, 2003.

Tuutti, K. 'Corrosion of steel in concrete', Swedish Cement and Concrete Research Institute CBI, Research 4:82. Stockholm, 1982.

Anlage A:

In Anlage A wird das Berechnungsmodell für die Initiierungszeit aufgrund von Karbonatisierung beschrieben.

Modell für die Berechnung der Initiierungszeit

Das Karbonatisierungsmodell und die dazugehörigen Parameter werden in Duracrete (1998) beschrieben. Die Modelle laut DuraCrete (1998) für die Initiierung der Bewehrungskorrosion aufgrund von Karbonatisierung sind dieselben wie das „Mesomodell“ laut CEB (1997).

$$x_{CO_2} = \sqrt{\frac{2 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot D_c \cdot c}{B_{CO_2}}} \cdot \sqrt{t} \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^n$$

dort ist

- x_{CO_2} Karbonatisierungstiefe [m],
- D_c Diffusionskoeffizient für Kohlendioxid [m^2/s],
- c Kohlendioxidkonzentration in der Umgebungsluft [$kgCO_2/m^3$ luft]
- t effektive Dauer [s],
- t_0 eine Referenzzeit, das Alter des Betons, wenn D_c gemessen wird,
- B_{CO_2} Bindungskapazität des Kohlendioxids, d.h. der Kohlendioxidmenge, die für die Karbonatisierung benötigt wird [$kg CO_2/m^3$ Beton],
- n Klimaparameter
- k sind Parameter in Bezug auf Klima, Härting bzw. verwendeter Testmethode.

Der Diffusionskoeffizient D_c wird in der Regel nicht gesondert gemessen. Aus der Messung der Karbonatisierungstiefe geht der Quotient B_{CO_2}/D_c hervor, auch „effektiver Karbonatisierungswiderstand“ RCO_2 genannt. Damit dieser verwendet werden kann, müssen im Allgemeinen alle übrigen Parameter des Modells bekannt und unter Kontrolle sein.

In fib (2004) wurden die Parameter k und n leicht zu einem äußeren Faktor k_e und einem Härtingfaktor k_c und einem Alterungsexponenten n umformuliert. Die Differenzialgleichung lautet dann

$$x_k(t) = \sqrt{\frac{2 \cdot c_{s,ca}^k \cdot k_{e,ca}^k \cdot k_{c,ca}^k \cdot \gamma_{Rca} \cdot t \cdot (t_0/t)^{2 \cdot n_{ca}^k}}{R_{0,ca}^k}} + \Delta x$$

Die Initiierungszeit kann mit Hilfe der nachstehenden Differenzialgleichung berechnet werden:

$$t(x) = \left(\frac{(x_k - \Delta x)^2 \cdot R_{0,ca}^k}{2 \cdot c_{s,ca}^k \cdot k_{e,ca}^k \cdot k_{c,ca}^k \cdot \gamma_{Rca} \cdot t_0^{2 \cdot n_{ca}^k}} \right)^{\frac{1}{1 - 2 \cdot n_{ca}^k}}$$

in der

$R_{0,ca}^k$ als Jahr(kg/m³)/mm charakteristischer Wert für den Karbonatisierungswiderstand definiert wird, der dem Wert $D_{0,ca}$ wie oben ($R = D - 1$) entspricht

t_0 als Alter des Betons bei Probenahme der Betons, 28 d, definiert wird

$c_{s,ca}^k$ als kg/m³ der Oberflächenkonzentration des Kohlendioxids definiert wird

$k_{c,ca}^k$ als charakteristischer Wert des Härtungsfaktors definiert wird

$k_{e,ca}^k$ als charakteristischer Wert für äußere Faktoren definiert wird

n_{ca}^k als charakteristischer Wert für den Exponenten für die Zeitabhängigkeit definiert wird

x_k als deckende Betonschicht, mm, definiert wird

Δx als ausführende Toleranz, mm, definiert wird

γ_{Rca} als Partialkoeffizient für den Chlorideindringungswiderstand definiert wird

vbt als Wasser-Bindemittelrate definiert wird

Klimaparameterwerte

Es wurde außerdem beachtet, dass die Betonzusammenstellung und -härtung zwischen den unterschiedlichen Teilen der Konstruktion etwas abweicht.

Die Klimaparameter k_1 und n sind einerseits von der RF in der Luft direkt an der Betonoberfläche und andererseits von der Temperatur und zeitlichen Dauer feuchter Zeiträume aufgrund von (Schlag-)Regen abhängig, siehe Abbildung A-1 und A.2, ur CEB (1997).

In der Praxis werden die vor Regen geschützten Teile der Betonkonstruktion bemessen, d.h. die RF der Luft an der Betonoberfläche ist der wichtige Klimaparameter. Um überhaupt relevant zu sein, muss die Feuchtigkeit jedoch so

hoch sein, dass es zu einer Korrosion kommt, wenn diese ausreichend initiiert wird, siehe auch Abbildung 5.2 in diesem Bericht.

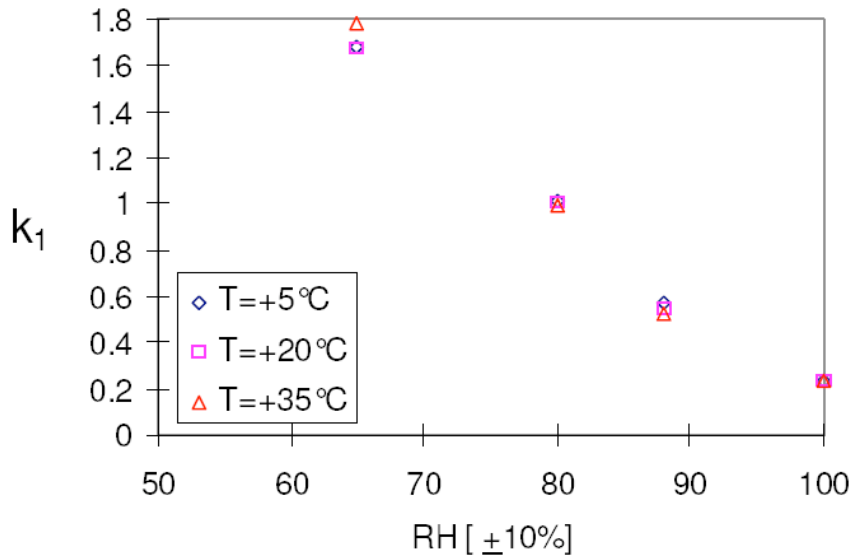


Abbildung A.1: Klimaparameter k_1 im Karbonatisierungsmodell als Funktion der Luftfeuchtigkeit, CEB (1997)

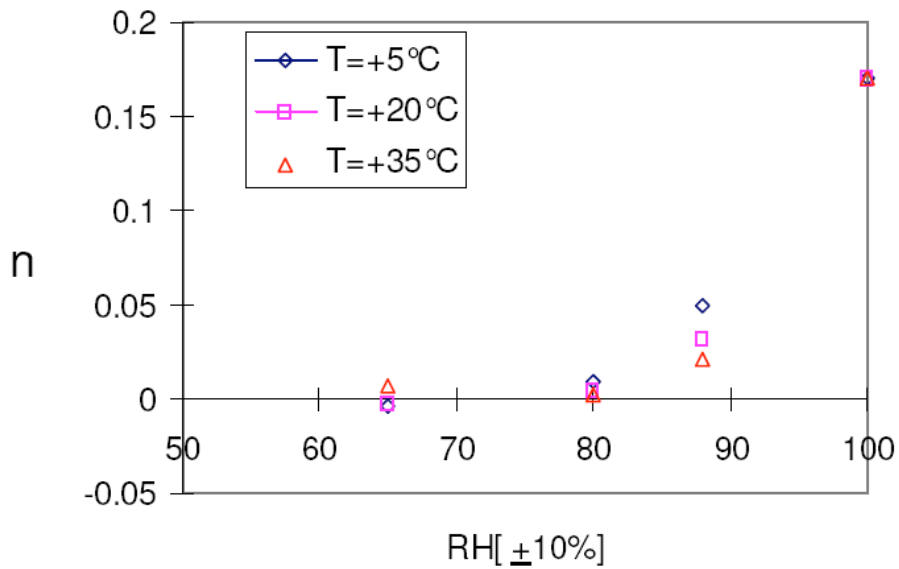


Abbildung A.2: Klimaparameter n im Karbonatisierungsmodell als Funktion der Luftfeuchtigkeit, CEB (1997)

Das Modell für die Initiierung der Bewehrungskorrosion aufgrund von Karbonatisierung umfasst eine große Anzahl Parameter

$$x_k(t) = \sqrt{\frac{2 \cdot c_{s,ca}^k \cdot k_{e,ca}^k \cdot k_{c,ca}^k \cdot \gamma_{Rca} \cdot t \cdot (t_0/t)^{2 \cdot n_{ca}^k}}{R_{0,ca}^k}} + \Delta x$$

Geometrie:

Ein charakteristischer Wert für die Deckschicht oder der bei der Bemessung verwendete Nominalwert dient als Mittelwert.

Material:

Es wird davon ausgegangen, dass der Betonhersteller den Karbonatisierungswiderstand aufgrund einer standardisierten Testmethode angeben kann. Charakteristische Werte werden als 5 %-Fraktile auf Basis der Testergebnisse bestimmt, DuraCrete (2000)

Äußere Einflüsse:

Die Oberflächenkonzentration des Kohlendioxids ist die einzige Variabel, die ausschließlich vom Umfeld abhängig ist:

$$C_{c,sa}^k = 5,0 \times 10^{-4} \text{ kg/m (m}^3 \text{ Luft)}$$

Die Kohlendioxidkonzentration kann steigen.

Durchführung:

Der Härtungsfaktor $k_{c,ca}$ ist von der Härtungszeit laut Tabelle A.1 abhängig

Tabelle A.1: Charakteristischer Wert für den Faktor $k_{c,ca}$ als Funktion der Härtungszeit.

Härtungstid, dagar	$k_{c,ca}^k$
1	4,05
3	2,10
7	1,00
28	0,76

Härtungstid, dagar	Härtungszeit, Tage
--------------------	--------------------

Parameter, die von Material und Umfeld abhängig sind:

Der äußere Faktor $k_{e,ca}$ ist von der Ausgesetzttheit und dem Bindemittel laut Tabelle A.2 abhängig.

Tabelle A.2: Charakteristischer Wert für den Faktor $k_{e,ca}$ im Hinblick auf Bindemittel und Ausgesetzttheit. Wie man sieht, ist der Unterschied aufgrund der Zementsorte in diesem Fall zu vernachlässigen.

Exponering	$k_{e,ca}^k$	
	Portlandcement (CEM I)	Slaggcement (CEM II/A-S)
Laboratorium 65 % RF	1,00	1,00
Utomhus regnskyddat	0,86	0,85
Utomhus regnutsatt	0,48	0,50

Exponering	Ausgesetzttheit
Portlandcement	Portlandzement
Slaggcement	Schlackenzement
Laboratorium	Labor
Utomhus regnskyddat	Im Freien, vor Regen geschützt
Utomhus regnutsatt	Im Freien, Regen ausgesetzt

Exponent für Zeitabhängigkeit n_{ca} ist von der Ausgesetzttheit und dem Bindemittel laut Tabelle A.3 abhängig.

Tabelle A.3: Charakteristischer Wert für den Exponenten für Zeitabhängigkeit n_{ca} .

Exponering	n_{ca}^k	
	Portlandcement (CEM I)	Slaggcement (CEM II/A-S)
Laboratorium 65 % RF	0	0
Utomhus regnskyddat	0,098	0,132
Utomhus regnutsatt	0,40	0,43

Exponering	Ausgesetzttheit
Portlandcement	Portlandzement
Salggcement	Schlackenzement
Laboratorium	Labor
Utomhus regnskyddat	Im Freien, vor Regen geschützt
Utomhus regnutsatt	Im Freien, Regen ausgesetzt

Empfohlene Werte für Deckschichtabweichungen und Partialkoeffizienten sind Tabelle 7.4 zu entnehmen.

Tabelle A.4: Deckschichtabweichungen und Partialkoeffizienten in Bezug auf Karbonatisierung.

Relativ kostnad för reparationer	Låg	Normal	Hög
Δx täckskiktavvikelse (mm)	8	14	20
γ_{Rca} karboniseringsmotstånd	1,30	2,10	3,00

Relativ kostnad för reparationen	Relative Kosten für Sanierungen
Låg	niedrig
Normal	normal
Hög	hoch
Täckskiktavvikelse (mm)	Deckschichtabweichung (mm)
karboniseringsmotstånd	Karbonatisierungswiderstand

Der Diffusionskoeffizient D_c für Kohlendioxid [m^2/s] kann an einer karbonatisierten Probe des betreffenden Betons gemessen werden, entweder direkt aus dem Kohlendioxidstrom oder indirekt aus der Sauerstoffdiffusion. Die diesbezüglichen Messmethoden müssen noch weiter entwickelt und verifiziert werden. Die Feuchtigkeitsabhängigkeit kann durch Feldmessungen an älteren Konstruktionen verifiziert werden. Dann werden gleichzeitig die Karbonisierungstiefe und das Feuchtigkeitsprofil in der Deckschicht gemessen.

In der Regel werden der Diffusionskoeffizient D_c bzw. die Menge karbonisierbaren Kalks B_{CO_3} nicht separat gemessen. Aus einer Karbonisierungstiefenmessung ergibt sich der Quotient D_c/B_{CO_1} als ein Widerstand R_{ca} . Damit dieser verallgemeinernd verwendet werden kann, müssen alle übrigen Parameter des Modells bekannt und unter Kontrolle sein. Am besten wird dies bei einem Laborversuch mit konstanten äußeren Bedingungen und einer erhöhten Kohlendioxidkonzentration durchgeführt, d.h. in einem beschleunigten Karbonisierungstest.

Der äußere Faktor k_e und der Alterungsexponent n können durch Feldmessungen an älteren Konstruktionen beurteilt werden. Der Alterungsfaktor verlangt eine Messung an denselben Teilen einer Konstruktion, mindestens an zwei Zeitpunkten, die zeitlich relativ weit auseinander liegen.

Der äußere Faktor wird durch die Durchführung von Messungen an unterschiedlichen Teilen ein und derselben Konstruktion, die unterschiedlichen Klimabelastungen ausgesetzt waren, quantifiziert. Auch die Feuchtigkeitsverhältnisse im Beton werden dokumentiert. Da solche Teile vermutlich auch unterschiedliche Alterungsfaktoren haben, lassen sich äußere Faktoren nur schwer durch eine einmalige Messung gesondert quantifizieren.

Der Härtungsfaktor k_c lässt sich experimentell nur schwer relevant bestimmen. Bei der traditionellen Art und Weise werden Betonproben auf unterschiedliche Weise gehärtet und anschließend ein paar Jahre lang oder mit einer beschleunigten Karbonatisierung bei einer erhöhten Kohlendioxidkonzentration karbonatisiert. Durch den Vergleich zwischen unterschiedlichen Karbonatisierungstiefen lässt sich der Härtungsfaktor k_c bestimmen.

Der auf diese Art und Weise bestimmte Härtungsfaktor gilt dann für die jeweilige Testzeit. Für längere Ausgesetztzeit, d.h. lange Lebensdauern, wird der Faktor immer kleiner, da eine mangelhafte Härtung die größten Auswirkungen auf die äußeren Teile des Betons hat.

Anlage B:

In Anlage B wird das Berechnungsmodell für das Abplatzen der Deckschicht aufgrund von Bewehrungskorrosion während der Propagierungszeit beschrieben.

Die gemessenen Bedingungen für ein Abplatzen der Deckschicht

Die Messbedingungen basieren auf dem Kriterium, dass der Bemessungswert w^d seinen kritischen Wert w_{cr} erreicht.

$$g = w_{cr} - w^d \geq 0$$

Bemessungswerte

Rissbreite:

Der Bemessungswert für die Rissbreite kann auf Basis der nachstehenden Ausdrücke ermittelt werden, die durch Regressionsanalyse bestimmt werden

$$w^d = w_0 \quad \text{om} \quad p_0 \leq p^d$$

$$w^d = w_0 + b^d (p^d - p_0^d) \quad \text{om} \quad p_0 > p_0^d$$

dabei ist

w_0 die Breite des sichtbaren Risses

b^d der Bemessungswert für Parameter, die von der Platzierung der Bewehrungsstange abhängig ist

p^d der Bemessungswert für die gegenwärtige Rostangriffstiefe in μm

p_0^d der Bemessungswert für das Eindringen in μm , das das Aufbrechen auslöst

Bemessungswert für die Rostangriffstiefe, die das Aufbrechen auslöst:

Eine eventuelle Korrosion beeinflusst die Konstruktion auf zweierlei Weise:

Die Haftung nimmt aufgrund von Ablösungskräften ab und gibt Anlass für niedrigere Hebelarme auf der gedrückten Seite der Betonkonstruktion. Der Bewehrungsbereich wird bei einer eventuellen Korrosion kleiner.



Korrosion av armering	Korrosion der Bewehrung
Ökande volym	Unbekannte Volumen
Armeringens area minskar	Bewehrungsbereich wird kleiner
Spjälkkrafter	Ablösungskräfte
Vidhäftningen påverkas	Haftung wird beeinflusst
Inre hävarmen minskar	Innerer Hebel wird kleiner

Abbildung B.1: Korrosion der Bewehrung und ihre Auswirkungen auf die Konstruktion

Die nachstehende Formel kann für die Berechnung des Bemessungswert für die Rostangriffstiefe verwendet werden, die die Ablösung einleitet, p_0^d .

$$p_0^d = a_1 + a_2 \frac{x^d}{d} + a_3 f_{c,sp}^d$$

dabei ist/sind

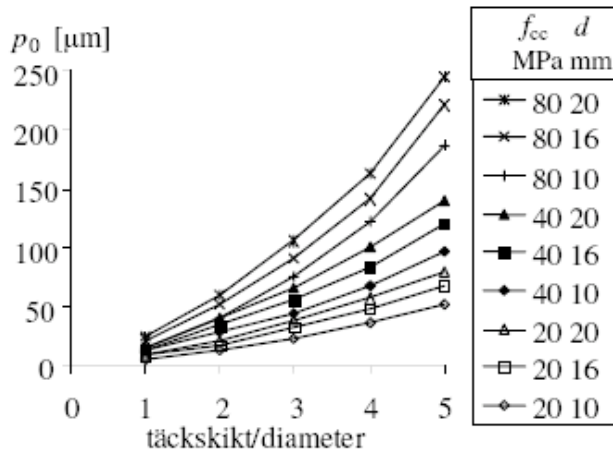
a_1, a_2, a_3 Regressionskoeffizienten

x^d Bemessungswert für die Deckschicht

d Stangendurchmesser

$f_{c,sp}^d$ Bemessungswert für die Zugfestigkeit des Betons in MPa

Alternativ kann der Dimensionswert p_0^d der nachstehenden Figur entnommen werden.



Täckskikt/diameter	Deckschicht/Durchmesser
--------------------	-------------------------

Abbildung B.2: Korrosionstiefe, die die Deckschicht (p_0^d) sprengt, abhängig von der Deckschicht, dem Durchmesser der Bewehrungsstange und dem Beton, für eine maximale Steingröße von 16 mm.

Gegenwärtige Rostangriffstiefe nach der Zeit t :

$$p^d = 0 \quad \text{om} \quad t \leq t_i^d$$

$$p^d = V^d \cdot w_t \cdot (t - t_i^d) \quad \text{om} \quad t > t_i^d$$

dabei ist

V^d Bemessungswert für die Korrosionsrate

w_t relative Länge der feuchten Zeiträume, wenn der Beton eine RF ≥ 85 % hat

t_i^d Bemessungswert für die Zeit bis zur Korrosionsinitiierung

Bemessungswert für die Korrosionsrate

$$V^d = \frac{m_0}{\rho^k} \cdot \alpha^k \cdot F_{cl}^k \cdot \gamma_V$$

Dabei ist

m_0 Konstante in Zusammenhang mit der Korrosionsrate – Widerstand

F_{cl}^k charakteristischer Wert des Faktors für die Chloridkorrosionsrate

α^k charakteristischer Wert des Faktors für den Lochfraß

ρ^k charakteristischer Wert für Widerstand

γ_V Partialkoeffizient der Korrosionsrate

Charakteristischer Wert für Widerstand:

$$\rho^k = \rho_0^k \cdot \left(\frac{t_{hydr}}{t_0} \right)^{n_{res}^k} \cdot k_{c,res}^k \cdot k_{T,res}^k \cdot k_{RH,res}^k \cdot k_{cl,res}^k$$

ρ_0^k charakteristischer Wert für den potentiellen elektrolytischen Widerstand

t_0 das Alter des Betons zum Zeitpunkt der Abnahmeprüfung

t_{hydr} das gegenwärtige Alter des Betons, es wird jedoch höchstens 1 Jahr angerechnet

n_{res}^k charakteristischer Wert für den Exponenten des Widerstands für die Zeitabhängigkeit

$k_{c,res}^k$ charakteristischer Wert für den Härtungsfaktor des Widerstands

$k_{T,res}^k$ charakteristischer Wert für den Temperaturfaktor des Widerstands

$k_{RH,res}^k$ charakteristischer Wert für den Feuchtigkeitsfaktor des Widerstands

$k_{cl,res}^k$ charakteristischer Wert für den Chloridfaktor des Widerstands

$$k_{T,res}^k = \left(1 + K^k (T - 20) \right)^1$$

K^k charakteristischer Wert für einen Faktor, der die Temperaturabhängigkeit des Widerstands beschreibt

T Temperatur in °C

Zeit bis zur Korrosionsinitiierung:

Abhängig davon, ob es sich um eine chlorid- oder karbonatisierungsinitiierte Korrosion handelt, kann die Zeit mit Hilfe unterschiedlicher Berechnungen bestimmt werden.

Parameter, der die Lage der Bewehrung im Querschnitt beachtet:

$$b^d = b^k \cdot \gamma_b$$

dabei ist

b^k charakteristischer Wert

γ_b Partialkoeffizient

Die Zugfestigkeit des Betons:

Für die Zugfestigkeit des Betons wird in diesem Zusammenhang der charakteristische Wert als Bemessungswert verwendet.

$$f_{c,sp}^d = f_{c,sp}^k$$

Die charakteristischen Werte

Geometrie:

Der charakteristische Wert für die Deckschicht ist der bei der Bemessung verwendete Nominalwert oder der Mittelwert, wenn es sich um gemessene Werte handelt.

Material:

Der potentielle elektrolytische Widerstand ρ_0 wird als eine Variabel verwendet, die die Spaltfestigkeit mit dem charakteristischen Wert als 5 %-Fraktile definiert. Es wird davon ausgegangen, dass der Betonhersteller die Spaltfestigkeit aufgrund einer standardisierten Testmethode angeben kann, z.B. Two Electrode Method (TEM).

Die charakteristische Zugfestigkeit f_{ctk} für den Beton wird laut geltender Norm, wie beispielsweise BBK 04 oder Eurokod 2 (EN 1992-1-1), als 5 %-Fraktile definiert. Der Exponent für die Zeitabhängigkeit n_{res} wird in der nachstehenden Tabelle dargestellt.

Tabelle B.1: Exponent für Zeitabhängigkeit im Hinblick auf Widerstand.

Zementtyp	n_{res}^k
Portlandzement (CEM I)	0,23
Schlackenzement (CEM II/A-S)	0,54
Flugaschzement (CEM II/A-V, II/B-V)	0,62

Äußere Einwirkungen:

Temperatur und relative Feuchtigkeit werden als jährliche Mittelwerte definiert und können mit Hilfe meteorologischer Daten für den jeweiligen Ort definiert werden.

In den nachstehenden Tabellen werden Werte für den Faktor der Chloridkorrosionsrate F_{cl} , der relativen Länge nasser Zeiträume w_t , der Temperaturfaktor K , der Faktor für Lochfraß a und der Chloridfaktor des Widerstands $k_{cl,res}$ angegeben.

Tabelle B.2: Charakteristische Werte für den Faktor für die Chloridkorrosionsrate, F_{cl} .

Vorkommen von Chloriden	F_{cl}^k
Ja	2,63
Nein	1,0

Tabelle B.3: Charakteristische Werte für die relative Länge nasser Zeiträume (wenn der Beton eine RF ≥ 85 % hat).

Feuchtigkeitsverhältnisse	w_t
Trocken, bzw. mäßig feucht, geschützt	0
Niedergeschlagenes Salzwasser	0,5
Zyklische Nässe und Trockenheit, ungeschützt vor Regen/ Salzwasser	0,75
Nass, selten trocken, Tideland	1,0

Tabelle B.4: Charakteristische Werte für den Temperaturfaktor K .

Temperatur	K_k
< 20°C	0,025
> 20°C	0,073

Tabelle B.5: Charakteristische Werte für den Faktor für Lochfraß a .

Vorkommen von Chloriden	a^k
Ja	9,28
Nein	2,0

Tabelle B.6: Charakteristische Werte für den Chloridfaktor des Widerstands $k_{cl,res}$.

Vorkommen von Chloriden	$k_{cl,res}^k$
Ja	0,72
Nein	1,0

Ausführung:

Charakteristischer Wert für den Härtungsfaktor des Widerstands $k_{c,res}$ wird auf $k_{c,res} = 1,0$ eingestellt.

Parameter, die von Material und Umfeld abhängig sind:

Die Werte für den Feuchtigkeitsfaktor des Widerstands $k_{RH,res}$ sind der nachstehenden Tabelle zu entnehmen.

Tabelle B.7: Charakteristische Werte für den Feuchtigkeitsfaktor des Widerstands $k_{RH,res}$.

Feuchtigkeitsverhältnisse	$k_{RH,res}^k$	
	Portlandzement, (CEM I)	Schlackenzement, (CEM IIA/-S)
Ungeschützt	1,44	1,44
50 % RF	7,58	14,7
65 % RF	6,45	7,00
80 % RF	3,18	3,80
95 % RF	1,08	1,17
Ständig unter Wasser	1,0	1,0

Sonstige Parameter:

Tabelle B.8: Charakteristische Werte für sonstige Parameter sind der nachstehenden Tabelle zu entnehmen.

Parameter	Charakteristischer Wert	Einheit
w_0	0,05	mm
w_{cr}	1,0	mm
a_1	74,4	μm
a_2	7,3	μm
a_3	17,4	$\mu\text{m}/\text{MPa}$
b	ök: 0,0086 uk: 0,0104	mm/ μm
m_0	882	mm $\times\Omega\text{m}/\text{Jahr}$

Partialkoeffizienten

Für die chloridinitiierte Korrosion können die Partialkoeffizienten γ_b und γ_v immer auf 1,0, gestellt werden, da die Propagierungsphase unbedeutend zur Lebensdauer beiträgt. Für die karbonatisierunginitiierte Korrosion ist die

Propagierungsphase von größerer Bedeutung. Darum werden die Partialkoeffizienten γ_b und γ_v in der nachstehenden Tabelle angegeben.

Tabelle B.9: Die Partialkoeffizienten γ_b und γ_v für die karbonatisierungsinitiierte Korrosion.

Relative Kosten für Sanierungen	Niedrig	Normal	Hoch
γ_b	1,30	1,40	1,55
γ_v	1,30	1,40	1,50