

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
LEHRSTUHL FÜR BAUSTOFFKUNDE UND WERKSTOFFPRÜFUNG

**MODELL ZUR BESCHREIBUNG DES EINDRINGENS VON
CHLORID IN BETON VON VERKEHRSBAUWERKEN**

Gesa Kapteina

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen
der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Detlef Heinz

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Peter Schießl, i.R.
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen
3. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Harald S. Müller,
Karlsruher Institut für Technologie

Die Dissertation wurde am 25.07.2011 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 16.11.2011 angenommen.

meiner Mutter

VORWORT

Mein erster Dank geht an Herrn Professor Schießl und Herrn Professor Gehlen, welche mir die Möglichkeit eröffneten, diese Arbeit zu schreiben und mit anregenden Diskussionen, wertvollen Hinweisen und Verbesserungsvorschlägen dazu beigetragen haben, die Arbeit wie vorliegend abzuschließen. Herrn Professor Müller danke ich herzlich für die bereitwillige und unkomplizierte Übernahme des Korreferats.

Die Flexibilität, die mir meine Arbeitgeber Herr Professor Schießl, Herr Professor Gehlen und Herr Dr. Sodeikat bei meiner Projektarbeit gewährten, war eine wesentliche Voraussetzung, die vorliegende Arbeit zu realisieren, wofür ich mich an dieser Stelle sehr bedanke. Meinem ehemaligen Kollegen Herrn Professor Dauberschmidt und meinem Kollegen Herrn Dr. Mayer danke ich herzlichst für die immerwährende Bereitschaft, „Chloridprobleme“ zu erörtern und diese Arbeit Korrektur zu lesen. Für das Endkorrekturlesen möchte ich mich ganz besonders bei meiner Kollegin Frau Böhm bedanken, deren Anmerkungen sehr dazu beigetragen haben, diese Arbeit sprachlich abzurunden.

Einen entscheidenden Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit hat meine Familie geleistet. Ein ganz besonderer Dank gilt daher meinem Mann, meinen Kindern, meinem Vater und meiner „Schwiegerfamilie“ für die Unterstützung, die Geduld und die Aufmunterungen, die sie mir während der letzten Jahre entgegengebracht haben.

Das Vorhaben Familie, Arbeit und Dissertation organisatorisch zu vereinbaren, ist öfters an seine Grenzen gestoßen. Daher war es von entscheidender Bedeutung, dass ich temporäre Unterstützung bei der Betreuung meiner Kinder hatte. In diesem Zusammenhang möchte ich vor allem meinen Schwiegereltern und meinem Schwager von ganzem Herzen danken, deren „München-Einsätze“ die Fertigstellung dieser Arbeit erst möglich gemacht haben. Diese mir so selbstverständlich gewährte Unterstützung war meine größte Motivation.

Diese Arbeit ist meiner Mutter gewidmet, die ich seinerzeit mit meinem Wunsch, Bauingenieurwesen studieren zu wollen, völlig überrascht hatte. „Du warst noch nie auf einer Baustelle.“ Recht hatte sie, aber das sollte sich ändern.

München, im Juni 2011

Gesa Kapteina

KURZFASSUNG

Bei Verkehrsbauwerken sind die am Chloridtransport beteiligten Mechanismen vielfältig und variieren expositionsbedingt, was bei physikalisch weitestgehend exakten Modellierungen des Eindringens von Chlorid in Beton zu einer hohen Komplexität führen würde. Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher ein vollprobabilistisches Modell entwickelt, welches auf dem 2. Fick'schen Diffusionsgesetz basiert. Durch dieses Modell können Chloridprofile von Beton aus dem Spritzwasserbereich, einerseits ausreichend anwenderfreundlich und andererseits unter Berücksichtigung der Streuung, ausreichend genau beschrieben werden. Durch die Vernachlässigung der anderen am Chloridtransport beteiligten Mechanismen ergaben sich zwangsläufig Abweichungen zwischen dem Grundansatz und der Realität, weshalb der Diffusionsansatz empirisch angepasst wurde.

ABSTRACT

For road structures the mechanisms of chloride transport are multifarious and vary in dependence of the exposure conditions. The consideration of the involved mechanism within a model describing the penetration of chloride into concrete would hence lead to a highly complex model if the model is supposed to be approach a physical approach. Within this study a full probabilistic model based on the 2nd law of diffusion has been developed for calculating chloride profiles in concrete of road structures exposed to splash from de-icing salt. The provided model allows for the calculation of chloride profiles with an adequate complexity on the one hand and with a sufficient consideration of the existing variation on the other hand. By neglecting the other chloride transport mechanisms involved deviations between the approach based on diffusion and the reality occur. Therefore the diffusion model has been adapted empirically to improve the accuracy of the simulation results.

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Symbol	Einheit	Kurzbezeichnung
<u>Lateinische Buchstaben</u>		
A_R	[-]	Altersterm für verkehrsbedingt mit Spritzwasser beaufschlagten Beton
a_R	[-]	Altersexponent für verkehrsbedingt mit Spritzwasser beaufschlagten Beton
C	[M.-%/z]	Chloridkonzentration bezogen auf den Zementgehalt
C_i	[M.-%/z]	Grundchloridgehalt bezogen auf den Zementgehalt
C_S	[M.-%/z]	Chloridkonzentration an der Oberfläche, daher auch Oberflächenkonzentration bezogen auf den Zementgehalt (Oberfläche, surface)
$C_{S,\Delta x}$	[M.-%/z]	Chloridkonzentration bezogen auf den Zementgehalt in der Tiefenlage Δx , daher auch Ersatzoberflächenkonzentration, entspricht der Ausgangschloridkonzentration gemäß Ansatz [I]
C_{Sa}	[M.-%/z]	durch Extrapolation bestimmte Chloridkonzentration an der Betonoberfläche bezogen auf den Zementgehalt, entspricht der Ausgangschloridkonzentration gemäß Ansatz [II]
C_{crit}	[M.-%/z]	kritischer korrosionsauslösender Chloridgehalt bezogen auf den Zementgehalt
CoV	[-]	Variationskoeffizient
d_c	[mm]	Betondeckung
D_{Eff}	[mm ² /a] bzw. [m ² /s] ¹⁾	allgemeine Bezeichnung des aus Chloridprofilen abgeleiteten effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten
D_{Eff}^*	[mm ² /a] bzw. [m ² /s] ¹⁾	aus Chloridprofilen gemäß Ansatz [I] abgeleiteter effektiver Chloriddiffusionskoeffizient, bei dem das Chloridprofil neben Diffusion auch maßgeblich durch Konvektion geprägt ist
$D_{Eff,R}^*$	[mm ² /a] bzw. [m ² /s] ¹⁾	effektiver Chloriddiffusionskoeffizient von Beton von Straßenbauwerken
$D_{Eff,C}^*$	[mm ² /a] bzw. [m ² /s] ¹⁾	effektiver Chloriddiffusionskoeffizient von Beton von Meeresbauwerken gemäß Gehlen
D_{F2}	[mm ² /a] bzw. [m ² /s] ¹⁾	aus Chloridprofilen gemäß Ansatz [II] abgeleiteter effektiver Chloriddiffusionskoeffizient, bei dem das Chloridprofil neben Diffusion auch maßgeblich durch Konvektion geprägt ist
D_{nss}	[mm ² /a] bzw. [m ² /s] ¹⁾	nicht stationärer Diffusionskoeffizient (2. Fick'sches Diffusionsgesetz)
$D_{nss,\tau}$	[mm ² /a] bzw. [m ² /s] ¹⁾	zum Zeitpunkt τ tatsächlich vorhandener nicht stationärer Diffusionskoeffizient
$D_{RCM,0}$	[mm ² /a] bzw. [m ² /s] ¹⁾	Chloridmigrationskoeffizient
D_{SS}	[mm ² /a] bzw. [m ² /s] ¹⁾	stationärer Diffusionskoeffizient (1. Fick'sches Diffusionsgesetz)
e	[-]	Elastizität der Variablen
erf	[-]	Gauss'sche Fehlerfunktion, auch Errorfunktion
FTW	[-]	Frost-Tau-Wechsel
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
h_{kap}	[m]	maximale kapillare Steighöhe
J	[(kg/s)/m ²]	Massenstromdichte
k_t	[-]	Testmethodenfaktor
k_R	[-]	Regressionsvariable (effektiver Diffusionskoeffizient für Beton von Straßenbauwerken)
m_0	[g]	Masse der Probe
m_{105}	[g]	Masse der bei 105°C bis zur Massekonstanz getrockneten Probe
m_{sat}	[g]	Masse der kapillar wassergesättigten Probe
p_K	[N/m ²]	kapillare Zugkraft
p_{Luft}	[N/m ²]	Luftdruck
p_{Wasser}	[N/m ²]	Wasserdruck

r	[m]	Porenradius der Kapillare
r _{FBR}	[m]	Abstand zum Fahrbahnrand
RH	[-]	relative Luftfeuchte der Umgebungsluft
RH _C	[-]	relative Luftfeuchte, bei dem der Diffusionskoeffizient halb so groß ist wie bei der relativen Luftfeuchte von RH = 1
S _{x=0}	[(M.-%/z)/mm]	oberflächennahe Steigung des Chloridprofils
S̄ _{x=0}	[mm ⁻¹]	normierte oberflächennahe Steigung des Chloridprofils
t	[a]	Zeit
t*	[a]	Betonalter bei Erstbeaufschlagung mit Chlorid
t _{Beton}	[a]	Betonalter
t _{BW-Alter}	[a]	Bauwerksalter
t _{exp}	[a]	Expositionsdauer
t _{Fertigstellung}	[a]	Betonalter bei Bauwerksfertigstellung
t _{saug}	[s]	Saugdauer
t _{0,R}	[a]	Referenzzeitpunkt
t _i	[a]	betrachteter Zeitpunkt
w _{kap}	[-]	kapillarer Wassersättigungsgrad
w/Z	[-]	Wasserzementwert
V _D	[-]	Verhältniswert von Diffusionskoeffizienten, die unter bestimmten Bedingungen aus Chloridprofilen bestimmt bzw. berechnet wurden
x	[mm]	Tiefenlage, ausgehend von der Betonoberfläche
x*	[mm]	Ausgangspunkt, in welchem die Ausgangschloridkonzentration angesetzt wird, variiert je nach Ansatz, x* = 0 für Ansatz [I] bzw. x* = Δx für Ansatz [II]
x _{kap}	[m]	kapillare Eindringtiefe
x _K	[mm]	Tiefenbereich, der durch die Einwirkung bedingt vom 2. Fick'schen Diffusionsgesetz abweichende Chloridkonzentrationen zeigt, gemäß Ansatz [I]
Δx	[mm]	Tiefenbereich, der durch die Einwirkung bedingt vom 2. Fick'schen Diffusionsgesetz abweichende Chloridkonzentrationen zeigt, gemäß Ansatz [II]

1) Im Rahmen der Modelle ist der effektive Chloriddiffusionskoeffizient in [mm²/a] einzusetzen. Die Darstellung bzw. die Diskussion dieser Variablen erfolgt jedoch in der allgemein üblichen Einheit 10⁻¹² [m²/s].

Griechische Buchstaben

α _R	[-]	repräsentativer Alphawert
β ₀	[-]	Mindestzuverlässigkeitsindex
β	[-]	Zuverlässigkeitsindex
η	[Ns/m ²]	dynamische Viskosität des Wassers
Θ:	[-]	Randwinkel Feststoff/Wasser
ρ _w	[kg/m ³]	Dichte von Wasser
σ _{F,L}	[N/m] bzw. [kg/s ²]	Oberflächenspannung Feststoff/Luft
σ _{F,W}	[N/m] bzw. [kg/s ²]	Grenzflächenspannung Feststoff/Wasser
σ _{w,L}	[N/m] bzw. [kg/s ²]	Oberflächenspannung Wasser/Luft

Indices

Alter	Variable bestimmt unter Berücksichtigung des Betonalters
Ausg	Variable bestimmt unter definierten Ausgangsbedingungen
b	mit Näherungslösung berechnete Variable (im Zusammenhang mit der Ausgangschloridkonzentration)
Beton	Variable bestimmt unter Berücksichtigung der Betonmasse
Exposition	Variable bestimmt unter Berücksichtigung der Expositionsdauer
IM	integraler Mittelwert
insp	Im Rahmen einer Inspektion ermittelte Variable
KF	durch Kurvenfitting bestimmte Variable (im Zusammenhang mit der Ausgangschloridkonzentration)
mit Δx	Variable bestimmt mit Berücksichtigung von Δx
ohne Δx	Variable bestimmt ohne Berücksichtigung von Δx
RH	relative Luftfeuchte der Umgebungsluft
SW	Variable bestimmt unter Berücksichtigung einer definierten Schrittweite (Auflösung des ermittelten Chloridprofils)
Zement	Variable bestimmt unter Berücksichtigung des Zementgehalts

1	HINTERGRUND UND ZIELSETZUNG.....	9
2	EINLEITUNG.....	10
2.1	Problemstellung.....	10
2.2	Vorgehen.....	11
3	BEEINTRÄCHTIGUNG DER DAUERHAFTIGKEIT DURCH CHLORIDINDUZIERTE BEWEHRUNGSKORROSION.....	13
4	STAND DER FORSCHUNG.....	16
4.1	Chloridtransport im Beton.....	16
4.1.1	Allgemein.....	16
4.1.2	Diffusion.....	17
4.1.2.1	Theorie und Formeln.....	17
4.1.2.2	Einflussfaktoren auf den Chloriddiffusionswiderstand von Beton (vollgesättigt).....	19
4.1.2.3	Diffusion durch teilgesättigten Beton.....	22
4.1.3	Kapillartransport.....	25
4.1.3.1	Theorie und Formeln.....	25
4.1.3.2	Einflussfaktoren auf die kapillare Saugfähigkeit.....	27
4.1.4	Mikroislinsenpumpe.....	29
4.1.5	Binden von Chloriden.....	31
4.2	Chlorideindringmodelle.....	33
4.2.1	Historie der Modellentwicklung.....	33
4.2.2	Straßenexposition.....	35
4.2.2.1	Allgemein.....	35
4.2.2.2	AiF-Modell.....	35
4.2.2.3	Ungricht-Modell.....	36
4.2.2.4	Lay-Modell.....	38
5	CHLORIDTRANSPORTMECHANISMEN IN VERKEHRSBEDINGT MIT SPRITZWASSER BEAUFSCHLAGTEM BETON.....	39
6	BEWERTUNG DER VORGESTELLTEN MODELLE FÜR DIE STRASSENEXPOSITION.....	43

7	MODELLBILDUNG	45
7.1	Vorgehen.....	45
7.2	Physikalischer Grundansatz.....	46
7.3	Empirischer Ansatz zur Anpassung des physikalischen Grundmodells.....	46
7.4	Modifizierung des Modells zur Berücksichtigung der oberflächennahen Abweichungen vom 2. Fick'schen Diffusionsgesetz.....	48
7.5	Ausgangsgleichung	53
8	VARIABLE DES MODELLS	58
8.1	Chloridoberflächenkonzentration	58
8.2	Grundchloridgehalt.....	61
8.3	Effektiver Chloriddiffusionskoeffizient für verkehrsbedingt mit Spritzwasser beaufschlagten Beton.....	62
8.3.1	Einfluss der Exposition auf den aus Chloridprofilen abgeleiteten effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten.....	62
8.3.1.1	Allgemein	62
8.3.1.2	Konvektiver Chlorideintrag.....	63
8.3.1.3	Chloridaustrag	69
8.3.1.4	Diffusion mit beschränktem Chloridangebot	73
8.3.1.5	Diffusion im teilgesättigten Beton	74
8.3.1.6	Einfluss der Carbonatisierung	79
8.3.1.7	Einfluss des Taumittels	79
8.3.1.8	Einfluss des Betonalters bei der ersten Chloridbeaufschlagung	80
8.3.1.9	Folgerungen für die zeitabhängige Entwicklung des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten von Beton aus Straßenbauwerken.....	84
8.3.2	Zeitabhängiger Verlauf des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten.....	87
8.3.2.1	Datengrundlage und Auswertung.....	87
8.3.2.2	Ableiten eines funktionalen Zusammenhangs auf empirischer Grundlage.....	90
8.3.2.3	Betrachtungen zur Übertragbarkeit auf andere Randbedingungen	92
9	VALIDIERUNG	95
9.1	Zielsetzung und Vorgehen.....	95
9.2	Gegenüberstellung von gemessenen und prognostizierten Chloridkonzentrationen.....	96
9.3	Ergebnis	100

10	LEBENSDAUERBERECHNUNG.....	101
10.1	Modell.....	101
10.1.1	Prognose	101
10.1.2	Bayesisches Update	102
10.2	Sensitivitätsanalyse.....	104
10.2.1	Berechnung	104
10.2.2	Ergebnis	111
10.3	Beispielberechnung.....	112
11	ZUSAMMENFASSUNG.....	114
12	AUSBLICK.....	117
	LITERATUR.....	119

ANHÄNGE

ANHANG A: BEWERTUNG VON AUSLAGERUNGSVERSUCHEN IN HINBLICK AUF DIE MIKROEISLINSENpumpe

ANHANG B: EFFEKTIVER CHLORIDDIFFUSIONSKOEFFIZIENT

B-1: Modellierungsansätze zur Beschreibung der Zeitabhängigkeit des Chloriddiffusionskoeffizienten

B-2: Testmethoden zur Beschreibung des Ausgangswerts des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten von Beton

B-3: Empirischer Ansatz zur Beschreibung des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten nach Gehlen

B-4: Zusammenhang zwischen dem effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten und der oberflächennahen Steigung des Chloridprofils

B-5: Einfluss des Tiefenbereichs Δx gemäß dem Modell nach Gehlen auf den aus Chloridprofilen durch Kurvenfitting bestimmten effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten

ANHANG C: MODELLE FÜR DIE STRASSENEXPOSITION (BERECHNUNGSGLEICHUNGEN)

C-1: AiF

C-2: Ungricht

C-3: Lay

C-4: Gehlen

ANHANG D: EXPOSITIONSUNABHÄNGIGE EINFLÜSSE AUF DEN EFFEKTIVEN CHLORIDDIFFUSIONSKOEFFIZIENTEN

D-1: Genauigkeit der Untersuchungsmethode zur Bestimmung der Chloridkonzentration

D-2: Schrittweite bei der Bohrmehlentnahm

D-3: Zementsteinanreicherung

ANHANG E: SENSITIVITÄTSANALYSE

ANHANG F: BILDER UND TABELLEN

1 HINTERGRUND UND ZIELSETZUNG

Das Anlagevermögen der Infrastrukturbauwerke innerhalb des Bundesfernstraßennetzes wird auf rd. 45 Mrd. Euro geschätzt. Zu diesem Netz zählten im September 2008 rd. 38.300 Brücken- und 220 Tunnelbauwerke [57], deren tragende Struktur zumeist aus Stahl- oder Spannbeton besteht. Das fortgeschrittene Alter des Bauwerksbestands (rd. 40 % sind älter als 38 Jahre), die Tatsache, dass die heutigen Erkenntnisse in Hinblick auf eine dauerhafte Konstruktion bei Planung und Bau der älteren Bauwerke noch nicht vorlagen und eine überproportionale Entwicklung des Verkehrs führen in Deutschland zu einem großen Instandsetzungsbedarf. An den Bauwerken des Bundesfernstraßennetzes durchgeführte Bauwerksprüfungen ergaben, dass 2008 rd. ein Drittel eine kurzfristige Instandsetzung benötigten [57]. Die Durchführung dieser Instandsetzungsmaßnahmen findet im Allgemeinen unter Verkehr statt, da eine Sperrung des Bauwerks, und damit des betreffenden Teilabschnitts innerhalb des Wegenetzes, zu erheblichen Beeinträchtigungen führt. Gerade bei Bauwerken mit übergeordneter funktionaler Bedeutung sollte aber die Beeinträchtigung für den Verkehr während der Instandsetzung so gering wie möglich gehalten werden. Die damit verbundenen Maßnahmen können zu deutlichen Mehrkosten führen, z.B. Zuschläge für Nacharbeit.

Schon im Bundesverkehrswegeplan von 2003 war die Hälfte des Gesamtinvestitionsvolumens für die Erhaltungsinvestitionen vorgesehen [14]. Entsprechend dem „Investitionsrahmenplan bis 2010 für Verkehrsinfrastrukturbauwerke des Bundes“ wurden bereits nahezu zwei Drittel der Investitionsmittel für Erhaltungsinvestitionen eingeplant [13]. Diese Entwicklung wird dazu beitragen, dass zukünftig der Dauerhaftigkeit von bestehenden und zu planenden Infrastrukturbauwerken mehr Beachtung geschenkt wird.

Straßen, Brücken und Tunnel werden in der Winterzeit zur Aufrechterhaltung des Verkehrs mit Hilfe von Tausalz schnee- und eisfrei gehalten. Die im Tausalz vorhandenen Salzionen (im Allgemeinen Chloridionen) können im Laufe der Zeit soweit in den Beton eindringen, dass sie bei Stahl- und Spannbetonbauwerken zu Korrosion der Bewehrung führen und damit die Dauerhaftigkeit des Bauwerks beeinträchtigen. In Deutschland ist mit rd. 70 % die chloridinduzierte Korrosion der Bewehrung der Grund für notwendige Instandsetzungsarbeiten an Brücken [113]. Nach DIN 1045-1:2008 [TR1] ist ein Stahlbetonbauwerk ausreichend dauerhaft, wenn es über die geplante Nutzungsdauer seine Funktion hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit und der Tragfähigkeit ohne wesentlichen Verlust der Nutzungseigenschaften bei einem angemessenen Instandhaltungsaufwand erfüllt. Zur Sicherstellung einer ausreichenden Dauerhaftigkeit sind in den entsprechenden Normen deskriptive Regeln festgelegt [TR1][TR2][TR3][TR4]. Diese Regeln basieren auf der Annahme, dass die geplante Nutzungsdauer eines Bauwerks 50 Jahre (vgl. [TR8]) beträgt, was gemäß der ISO 2394:1998 [TR6] und DIN 1990:2002 [TR7] der geplanten Nutzungsdauer für Gebäude und andere gewöhnliche Tragwerke entspricht. Für monumentale Gebäude, Brücken und andere Ingenieurbauwerke wird in diesem Zusammenhang eine geplante Nutzungsdauer von 100 Jahren genannt. Da die Dauerhaftigkeit von zeitabhängigen Prozessen beeinflusst wird, wurden in jüngster Vergangenheit für Bauwerke mit geplanten Nutzungsdauern von über 50 Jahren oft leistungsbezogene Verfahren angewendet, z.B. [42][48][51] (Tunnel) und [42][50] (Brücken). Im Rahmen von leistungsbezogenen Verfahren wird die notwendige Widerstandsfähigkeit des Materials gegenüber schädigenden Umwelteinflüssen individuell auf die vorhandenen Randbedingungen abgestimmt, wodurch einer ggf. höheren geplanten Nutzungsdauer besser Rechnung getragen werden kann. Die Möglichkeit, diese alternative Vorgehensweise anzuwenden, wird in

der DIN EN 206:2001 [TR4] eröffnet. In Hinblick auf Bewehrungskorrosion wird das leistungsbezogene Verfahren auf der Grundlage von Lebensdauerberechnung bzw. -bemessung (Service Life Design) angewendet. Die vorgesehene Nutzungsdauer wird in diesem Zusammenhang auch als anvisierte Lebensdauer bezeichnet.

Eine Voraussetzung für die Lebensdauerberechnung sind Prognosemodelle, welche die zeitabhängige Entwicklung des Bauwerkszustands beschreiben. Stehen derartige Prognosemodelle zur Verfügung, wird dadurch nicht nur der oben erwähnte leistungsbezogene Entwurf von Bauwerken ermöglicht, sondern auch die Optimierung von Instandsetzungsstrategien. Letzteres ist insbesondere von Interesse, da davon auszugehen ist, dass die Mittel für die Erhaltungsinvestitionen in Zukunft eher knapper verfügbar sein werden [9]. Infolgedessen und auch bedingt durch Tatsache, dass sich der Zustand der Brückenbauwerke in den letzten Jahren deutlich verschlechtert hat [12], wird zukünftig mehr denn je eine Optimierung der Instandsetzungsstrategien erforderlich sein, um die Bauwerke mit begrenzten Haushaltsmitteln gebrauchstauglich, sicher und wirtschaftlich erhalten zu können. Diese Aspekte wurden in den letzten Jahren bei großen Bauvorhaben immer häufiger im Rahmen eines Lebensdauermanagements bzw. eines Lebenszyklusmanagements berücksichtigt [84][86][114]. Die Forschungsaktivitäten auf diesem Gebiet der letzten Jahre bis zum heutigen Zeitpunkt zeugen von der erkannten Notwendigkeit, solche Lebensdauermanagementsysteme weiter zu entwickeln, z.B. [7][113][127][90].

Neben chemischen oder mechanischen Einwirkungen auf den Beton, welche unter Umständen dessen Dauerhaftigkeit beeinflussen, ist für Bauteile im Spritzwasserbereich von Straßen insbesondere der Schutz der Bewehrung gegenüber chloridinduzierter Bewehrungskorrosion über die anvisierte Lebensdauer von entscheidender Bedeutung. Das Ziel dieser Arbeit ist, ein anwenderfreundliches Modell zur Beschreibung des Eindringens von Chlorid in verkehrsbedingt mit Spritzwasser beaufschlagten Beton zu finden. Auf der Grundlage eines solchen Modells kann dann die Dauerhaftigkeit von Straßenbauwerken in Bezug auf chloridinduzierte Korrosion durch Lebensdauerberechnungen abgeschätzt werden.

2 EINLEITUNG

2.1 Problemstellung

Für Meeresbauwerke stehen ausreichend validierte Modelle für das Eindringen von Chlorid in Beton zur Verfügung, welche die Grundlage für eine Lebensdauerberechnung bilden. Bei Straßenbauwerken findet infolge einer über die Expositionsdauer deutlich stärker variierenden Chlorideinwirkung ein Chloridtransport statt, der durch mehrere simultan ablaufende Mechanismen geprägt ist. Dies führt zu komplexen Modellen mit einer Vielzahl von Variablen, welche zum Teil nicht isoliert durch Versuche ermittelt werden können. Darüber hinaus kann eine hohe Komplexität dazu führen, dass das Modell für den sachkundigen Ingenieur schwer anwendbar ist und das Nachvollziehen der Berechnung in seinen wesentlichen Teilen für Dritte kaum noch möglich ist. Dies beeinträchtigt die Glaubwürdigkeit der durch das Modell erstellten Prognose, was insbesondere bei zeitabhängigen Modellen, welche unter Umständen über den Validierungszeitpunkt hinaus Anwendung finden, von elementarer Bedeutung ist.

2.2 Vorgehen

Als Einstieg in das Thema der chloridinduzierten Bewehrungskorrosion und deren Auswirkung auf die Dauerhaftigkeit von Stahlbeton sind die Grundlagen diesbezüglich in **Kapitel 3** zusammengefasst.

Um ein anwenderfreundliches Modell für die Lebensdauerberechnung von Straßenbauwerken in Hinblick auf die chloridinduzierte Korrosion zur Verfügung zu stellen, ist ein Chlorideindringmodell für verkehrsbedingt mit Spritzwasser beaufschlagten Beton zu entwickeln, was der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit ist. Der Stand der Forschung in Bezug auf den Transport von Chlorid in Beton und dessen Beschreibung durch vorhandene Modelle wird zunächst zusammengefasst, vgl. **Kapitel 4**.

Zur Wahl eines geeigneten Modellansatzes sind Kenntnisse über den Transport von Chlorid in Beton von Straßenbauwerken notwendig. Eine Betrachtung hierzu findet sich in **Kapitel 5**. Auf der Grundlage der daraus gewonnenen Erkenntnisse erfolgt eine kurze Bewertung der für die Straßenexposition zuvor vorgestellten Modelle sowie die Modellbildung, vgl. **Kapitel 6** und **Kapitel 7**. Die Variablen des Modells werden in **Kapitel 8** quantifiziert, wobei der effektive Chloriddiffusionskoeffizient eine zentrale Rolle einnimmt. Um die grundsätzliche Eignung des Modells zu demonstrieren, wird eine Validierung durchgeführt, vgl. **Kapitel 9**.

Das Modell zur Beschreibung des Chlorideindringens wird anschließend in ein existierendes Dauerhaftigkeitsmodell implementiert, um so Lebensdauerberechnungen durchführen zu können, vgl. **Kapitel 10.1**. Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse wurden die Eigenschaften dieses für die Straßenexposition anwendbaren Modells analysiert, vgl. **Kapitel 10.2**. Ein Berechnungsbeispiel, welches die mögliche Anwendung des Modells demonstriert, schließt dieses Kapitel ab, vgl. **Kapitel 10.3**.

Das folgende Bild fasst das gewählte Vorgehen zusammen, vgl. **Bild 1**.

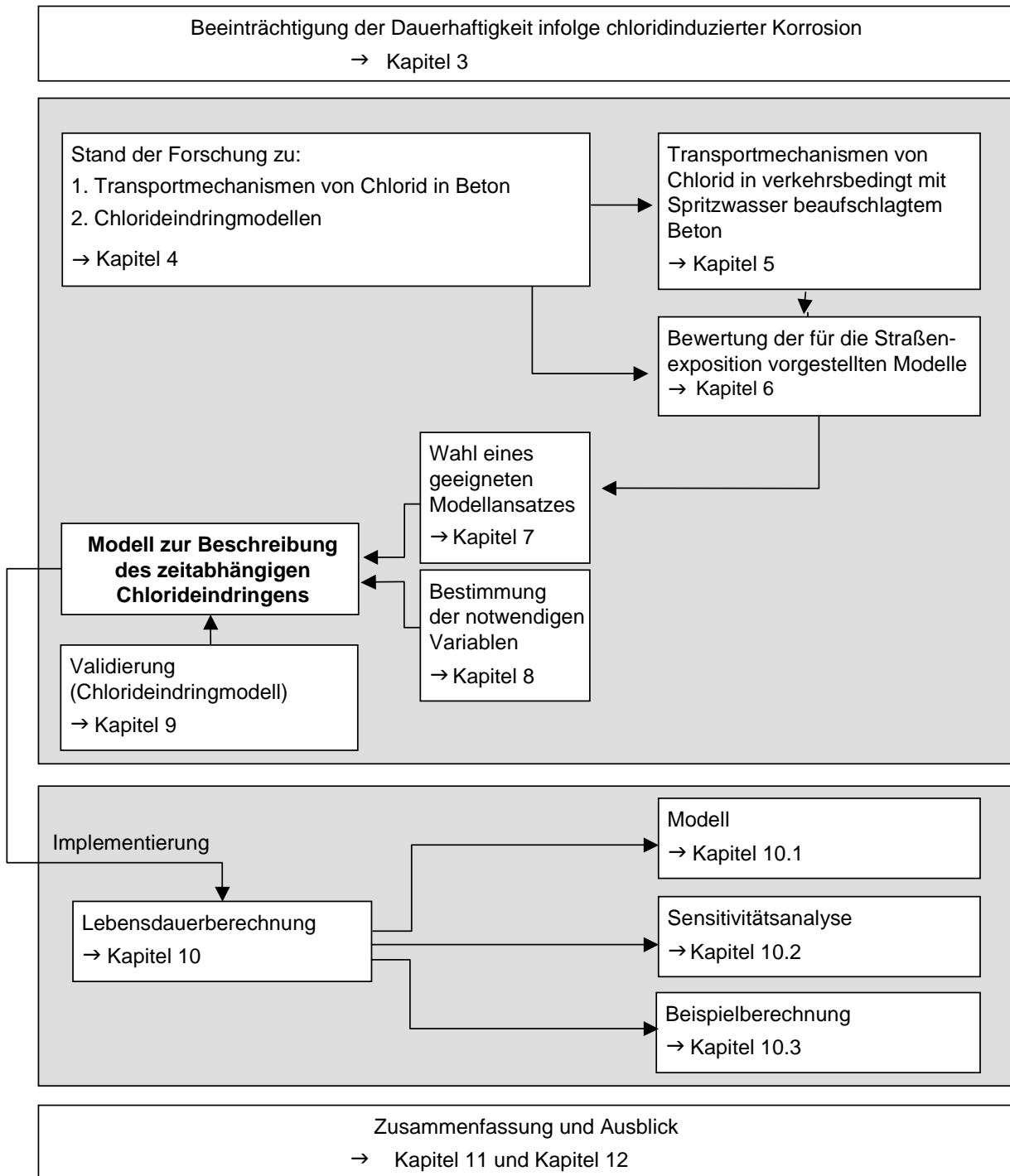


Bild 1: Aufbau der Arbeit

3 BEEINTRÄCHTIGUNG DER DAUERHAFTIGKEIT DURCH CHLORIDINDUZIERTE BEWEHRUNGSKORROSION

Bei der Herstellung von Bewehrungsstahl wird durch Zuführung von Energie das Energieniveau des chemisch stabilen Eisenerzes angehoben. Auf diesem Energieniveau ist der Stahl nicht stabil und hat das Bestreben, wieder in den energieärmeren Zustand zurückzukehren. Unter bestimmten Bedingungen findet dies durch die Rückführung von Eisenatomen zu Eisenoxid statt. Dieser Vorgang wird als elektrochemische Korrosion bezeichnet [116]. Korrosion kann stattfinden, wenn eine Reihe von Voraussetzungen erfüllt ist, **Tabelle 1**. Zur Vermeidung von Korrosion genügt es, wenn eine der genannten Voraussetzungen ausgeschaltet wird.

Tabelle 1: Voraussetzungen für den Korrosionsprozess

Voraussetzungen für den Korrosionsprozess	für konventionelle Stahlbetonbauteile von Straßenbauwerken
1 Die elektrische Leitfähigkeit im Metall muss gegeben sein.	stets erfüllt
2 Die anodische Eisenauflösung muss möglich sein, z.B. nach Depassivierung der Bewehrung infolge von Chlorid → chloridinduzierte Depassivierung	i.d.R. nicht erfüllt
3 Die elektrolytische Leitfähigkeit des Betons muss gegeben sein.	i.d.R. erfüllt
4 Es müssen Potentialdifferenzen vorhanden sein.	i.d.R. erfüllt
5 Es muss Sauerstoff im Beton vorhanden sein.	i.d.R. erfüllt

In Beton eingebettete Bewehrung ist grundsätzlich durch das alkalische Milieu des Betons ($\text{pH} = 12,5 \dots 13,5$) vor Korrosion geschützt. Im Bereich solcher pH-Werte bildet sich auf der Bewehrungsoberfläche eine Oxidschicht, welche die Eisenauflösung praktisch unterbindet (Ausschalten der Voraussetzung Nr. 2 in **Tabelle 1**) und daher auch als Passivschicht bezeichnet wird. Diese ist wenige Nanometer dick und weist eine dichte, nahezu porenfreie Struktur auf.

Ist der Beton Chloriden ausgesetzt, so dringen diese in den Beton ein. Das Eindringen erfolgt dabei nicht als klare Grenze, vielmehr bildet sich im Bereich der Betondeckung ein Konzentrationsgefälle aus, welches im Allgemeinen von außen nach innen abnimmt. In **Bild 2** ist eine solche hyperbolische Chloridkonzentrationsverteilung ohne klar definierte Begrenzung der Eindringtiefe für einen in chloridhaltiger Lösung eingelagerten Beton dargestellt.

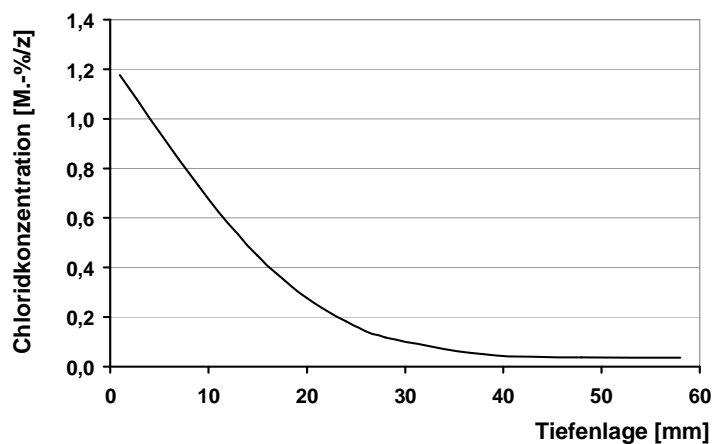


Bild 2: Idealisiertes Chloridprofil aus einem Einlagerungsversuch

Erreicht die Chloridkonzentration in der Porenlösung des Betons an der Bewehrung eine kritische Konzentration, deren Wert von einer Reihe von Faktoren abhängt (z.B. Feuchte- und Sauerstoffgehalt, Zementart), so geht die Passivschicht und als Folge der Schutz der Bewehrung gegenüber Korrosion verloren, was als chloridinduzierte Depassivierung der Bewehrung bezeichnet wird. Sind die weiteren in **Tabelle 1** genannten Voraussetzungen erfüllt (vgl. Voraussetzung Nr. 1, 3 bis 5), beginnt die Bewehrung zu korrodieren, was zu dem in **Bild 3** dargestellten Schadensverlauf führen kann.

Die Schutzwirkung der Passivschicht kann nicht nur infolge Chlorideindringen aufgehoben werden, sondern auch durch Carbonatisierung des Betons oder Einwirken anderer schädlicher Stoffe, was in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht behandelt wird.

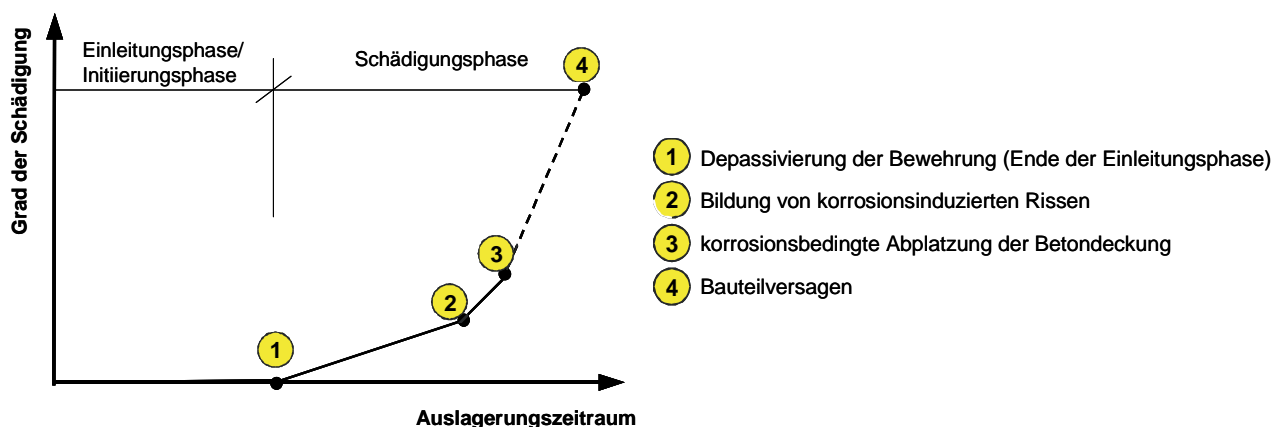


Bild 3: Schematisch dargestellter Schadensverlauf infolge Bewehrungskorrosion nach [40]

Der Schadensverlauf kann in eine Einleitungsphase bzw. Initiierungsphase und die darauf folgende Schädigungsphase unterteilt werden. Während der Einleitungsphase werden Chloride ausgehend von der Bauteiloberfläche zur Bewehrung transportiert, bis dort eine kritische Chloridkonzentration erreicht ist, welche zur Zerstörung der Passivschicht führt. Nach erfolgter Depassivierung ist die Einleitungsphase

beendet und die Bewehrung liegt korrosionsbereit vor [146]. Die Bewehrung und der Beton erleiden in dieser Phase i.d.R. keine Schädigung, vgl. **Bild 3**.

Da bei Straßenbauwerken nach erfolgter Depassivierung der Bewehrung die Voraussetzungen für Korrosion i.d.R. erfüllt sind (vgl. **Tabelle 1**), schließt sich die Schädigungsphase an. Durch chloridinduzierte Korrosion findet im Allgemeinen eine örtlich sehr stark konzentrierte Eisenauflösung statt, was die Tragfähigkeit des betroffenen Bauteils beeinträchtigen kann. Die Eisenauflösung läuft dabei, anders als bei der carbonatisierungsinduzierten Korrosion, i.d.R. ohne Bildung volumenfordernder Korrosionsprodukte ab, weshalb korrosionsbedingte Rissbildung und das Abplatzen der Betondeckung u.U. nicht auftreten, vgl. **Bild 3**. Durch diesen Umstand ist chloridinduzierte Korrosion häufig schwer zu erkennen [116].

Um eine ausreichende Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauwerken gegenüber Korrosion sicherzustellen, muss der ungerissene Stahlbeton normativen Anforderungen in Hinblick auf die Betonzusammensetzung [TR2][TR4] und die Betondeckung [TR1] genügen. Ferner sind nach der Betonage Anforderungen an die Nachbehandlung [TR3] einzuhalten. Durch diese deskriptiven Regeln soll sichergestellt werden, dass der Chlorideinwirkung ein ausreichender Materialwiderstand entgegengesetzt wird. Um der unterschiedlichen Intensität der Chlorideinwirkung Rechnung zu tragen, werden die Anforderungen bezüglich der Betonzusammensetzung und der Betondeckung in Abhängigkeit von Expositionsklassen formuliert. Für taumittelbeaufschlagte Bauteile sind im Zusammenhang mit Bewehrungskorrosion die folgenden Expositionsklassen in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen definiert [TR2][TR4]:

- XD1: mäßige Feuchte,
Bauteile im Sprühnebelbereich von Verkehrsflächen
(z.B. Flächen von Stützen und Widerlagerwänden in großem Abstand zur Straße)
- XD3: wechselnd nass und trocken,
Teile von Brücken mit häufiger Spritzwasserbeanspruchung
(z.B. Flächen von Stützen und Widerlagerwänden in geringem Abstand zur Straße)

4 STAND DER FORSCHUNG

4.1 Chloridtransport im Beton

4.1.1 Allgemein

Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf den Chloridtransport im ungerissenen Beton. Der maßgebliche Transportmechanismus von Chloriden und dessen Effektivität ist hauptsächlich von den Feuchteverhältnissen im Beton abhängig, da das Vorhandensein von Wasser die Grundvoraussetzung für die Beweglichkeit von Chloriden im Beton und damit für den Chloridtransport ist.

In einem wassergesättigten Beton findet der Transport von Chlorid vornehmlich über Diffusion statt. Ist der Beton bereichsweise nicht wassergesättigt, wie dies bei einer intermittierenden Beaufschlagung der Fall ist, dringt Wasser während der Beaufschlagung auch über Kapillartransport in den Beton ein. Im Zuge dessen können auch andere, im Wasser gelöste Bestandteile (z.B. Salze wie Chlorid) in den Beton eindringen. Dieser Vorgang wird als Konvektion (lat. Convehere = mittragen, mitnehmen) bezeichnet. Ist der Beton Frost-Tau-Wechseln ausgesetzt, so kann ein konvektiver Chlorideintrag auch über die Mikroislinsenpumpe stattfinden. Unter baupraktischen Bedingungen findet somit ein Chloridtransport infolge Diffusion und Konvektion im Beton statt. Beim konvektiven Chloridtransport im Zuge eines kapillaren Wassereintrags kommt es dabei infolge Dispersion zu einer s-förmigen Verzerrung des Chloridprofils. Diese wird durch die lokalen Geschwindigkeitsschwankungen in Bezug auf die betrachtete x-Richtung verursacht, welche maßgeblich durch die unterschiedlichen Sauggeschwindigkeiten der am kapillaren Eindringen beteiligten Poren hervorgerufen wird [72]. Dieser als Dispersion bezeichnete Vorgang ist jedoch kein eigenständiger Transportmechanismus.

Ein konvektiver Chloridtransport kann ferner noch über die Permeation erfolgen, welche ein hydrostatisches Druckgefälle voraussetzt, z.B. durch unterschiedlich anstehende Wasserspiegelhöhen an einem Bauteil. Dieser Mechanismus ist für Straßenbauwerke im Zusammenhang mit einer Tausalzbeanspruchung nicht maßgebend und wird daher nicht weiter betrachtet. Die folgenden Kapitel beschränken sich auf eine Darstellung der Transportmechanismen B bis D, vgl. **Tabelle 2**.

Tabelle 2: Maßgebliche Wasser- und Chloridtransportmechanismen, ausgehend von der Bauteiloberfläche in Richtung der Bewehrung

	Wassertransport	Chloridtransport	Verweis
A	Permeation	Konvektion	-
B	-	Diffusion	Kapitel 4.1.2
C	Kapillartransport	Konvektion ¹⁾	Kapitel 4.1.3
D	Mikroislinsenpumpe	Konvektion	Kapitel 4.1.4

¹⁾ Verzerrung der Eindringfront infolge Dispersion

Chloride können im Beton im Porenwasser gelöst und an oder in den Hydratphasen (ein-)gebunden vorliegen. Das Chloridbindevermögen von Beton beeinflusst auch die Transportgeschwindigkeit von Chlorid in Beton, dies wird in **Kapitel 4.1.5** näher erläutert.

4.1.2 Diffusion

4.1.2.1 Theorie und Formeln

Der Begriff Diffusion kommt aus dem lateinischen (lat. Diffundere) und bedeutet so viel wie: ausgießen, verstreuen, ausbreiten. In der Physik steht dieser Begriff für einen Prozess, welcher die Verteilung von Molekülen infolge der thermischen Eigenbeweglichkeit der Teilchen („Brown’sche Molekularbewegung“) beschreibt. Dabei streben die Moleküle eine gleichmäßige Verteilung in einem Medium an. Die Diffusion kann daher als ein Transport einer Substanz infolge eines Konzentrationsgradienten bzw. infolge eines chemischen Potentialunterschieds aufgefasst werden. Die Moleküle bewegen sich dabei entlang des Konzentrationsgradienten vom hohen zum niedrigen Konzentrationsniveau, um so einem Konzentrationsausgleich anzustreben. Zur mathematischen Beschreibung dieses Transportprozesses übertrug Fick 1855 die Gleichungen für die Wärmeleitung von Fourier auf die Diffusion [93]. Demzufolge verhält sich die pro Zeit- und Flächeneinheit transportierte Molekülmenge (Stoffmenge) proportional zum Konzentrationsgradienten. Für den stationären Fall wird dieser Zusammenhang mit dem 1. Fick’schen Diffusionsgesetz beschrieben, vgl. **Gleichung 1**. Die Proportionalitätskonstante wird dabei als Diffusionskoeffizient bezeichnet. Die Bezeichnung des Diffusionskoeffizienten unter stationären Bedingungen variiert in der Literatur. In Anlehnung an [156] wird dieser Diffusionskoeffizient mit den Initialen ss für steady state (engl. für stationär) gekennzeichnet.

$$J = -D_{ss} \frac{dc}{dx} \quad \text{Gleichung 1}$$

J: Massenstromdichte [(kg/s)/m²]
 D_{ss}: stationärer Diffusionskoeffizient [m²/s]
 $\frac{dc}{dx}$: Gefälle der Chloridkonzentration über die Tiefe [(kg/m³)/m]

Für nicht-stationäre Verhältnisse mit zeitlich und örtlich variabler Konzentration gilt das 2. Fick’sche Diffusionsgesetz, vgl. **Gleichung 2**. In Anlehnung an [156] wird dieser Diffusionskoeffizient zunächst mit den Initialen nss für non steady state (engl. für nicht-stationär) gekennzeichnet.

$$\frac{\partial c(x,t)}{\partial t} = D_{nss} \frac{\partial^2 c(x,t)}{\partial x^2} \quad \text{Gleichung 2}$$

Die Lösung dieser Differentialgleichung wird unter Berücksichtigung der folgenden Rand- und Anfangsbedingungen von Crank [28] gemäß **Gleichung 3** angegeben:

Randbedingung:	$C(x,t) = C_s$	für $x = 0$	und $t > 0$
Anfangsbedingung:	$C(x,t) = 0$	für $x > 0$	und $t = 0$

$$C(x,t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_{nss} \cdot t}} \right] \quad \text{Gleichung 3}$$

- $C(x,t)$: Chloridkonzentration in der Tiefe x zum Zeitpunkt t
 D_{nss} : nicht-stationärer Diffusionskoeffizient
 C_s : Chloridkonzentration an der Oberfläche, daher auch Oberflächenkonzentration (Oberfläche, surface), entspricht bei diffusionsgesteuerten Chloridprofilen der Ausgangschloridkonzentration
 x : Tiefenlage, ausgehend von der Betonoberfläche
 t : Zeit
 erf : Gauss'sche Fehlerfunktion, auch Errorfunktion

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^z e^{-t^2} dt \quad \text{Gleichung 4}$$

Das Integral der Fehlerfunktion ist numerisch zu bestimmen:

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{(-1)^n \cdot z^{2n+1}}{n! (2n+1)} \right) \quad \text{Gleichung 5}$$

Die durch **Gleichung 3** beschriebene zeitabhängige Entwicklung der Chloridkonzentration basiert zunächst auf der Annahme einer zeitunabhängigen Oberflächenkonzentration und eines zeitunabhängigen Diffusionskoeffizienten.

Wird die zeitabhängige Beschreibung der Variablen D_{nss} in diese Gleichung implementiert, so ist zu beachten, dass dieser Diffusionskoeffizient der integrale Mittelwert über die diffusionsaktive Zeitspanne ist. Dies bedeutet, dass nicht der zum Zeitpunkt t tatsächlich vorhandene Diffusionskoeffizient in **Gleichung 3** einzusetzen ist, sondern der integrale Mittelwert von dieser Variablen, vgl. **Gleichung 6**.

$$D_{nss}(t) = \frac{1}{t} \cdot \int_0^t D_{nss,\tau}(\tau) d\tau \quad \text{Gleichung 6}$$

Der zeitabhängige integrale Mittelwert (hier: $D_{nss}(t)$) wird im Rahmen einiger Modelle auch als scheinbarer Diffusionskoeffizient, z.B. [4][38][77], oder effektiver Chloriddiffusionskoeffizient [49] benannt. Der zum Zeitpunkt τ tatsächlich vorhandene Diffusionskoeffizient (hier: $D_{nss,\tau}$) wird hingegen als „quasi-aktueller“ (z.B. [72]) oder „momentaner“ (z.B. [156]) Diffusionskoeffizient bezeichnet. Infolge einer fehlenden Standardisierung sind in der Literatur viele, zum Teil auch widersprüchliche Bezeichnungen für den Diffusionskoeffizienten zu finden [72].

Chlorid wird durch verschiedene Mechanismen vom Zementstein gebunden, vgl. **Kapitel 4.1.5**, Seite 31. Die gebundenen Chloridionen haben dabei keinen Einfluss auf den chemischen Potentialunterschied und damit auf die antreibende Kraft des Diffusionsprozesses. Wird der Chloriddiffusionskoeffizient im Rahmen von Versuchen bestimmt, in denen die Chloridbindekapazität des Betons noch nicht erschöpft ist (z.B. Ein-

lagerungsversuche [TR12]), liegen daher grundsätzlich nicht-stationäre Bedingungen vor. Unter nicht-stationären Bedingungen bestimmte Chloriddiffusionskoeffizienten D_{NSS} hängen daher auch von der Chloridbindekapazität des Betons ab.

4.1.2.2 Einflussfaktoren auf den Chloriddiffusionswiderstand von Beton (vollgesättigt)

Aus **Gleichung 1** und **Gleichung 2** ergibt sich, dass der Chloriddiffusionskoeffizient als inverser Chlorideindringwiderstand aufzufassen ist. Der Diffusionswiderstand von Chlorid in wassergesättigtem Beton hängt von einer Reihe von Einflussfaktoren ab. Zur besseren Übersicht werden diese zunächst in Abhängigkeit von den geometrischen Eigenschaften der Betonstruktur und der Lösungseigenschaften beschrieben. Des Weiteren wird der Einfluss der Interaktion zwischen Beton und Lösung behandelt.

- **Geometrische Eigenschaften der Betonstruktur**

Die Beweglichkeit der Chloridionen ist wesentlich von der Verteilung der Porenradien und der Porositätsanteile der Zementsteinmatrix abhängig, da insbesondere die größeren Kapillarporen zum Chloridtransport beitragen [156][101].

Bei einem CEM I-Beton ist der Bereich der Kontaktzone zwischen Zementstein und Gesteinskörnung ein bevorzugter Weg für den Chloridtransport, da dieser poröser als der Zementstein ist. Dies hat zur Folge, dass die Transportgeschwindigkeit von Chloriden in folgender Reihenfolge zunimmt: Zementstein \mapsto Mörtel \mapsto Beton [8]. Durch den Einsatz von Zusatzstoffen, z.B. Steinkohlenflugasche (SFA), bilden sich durch den Füllereffekt und die puzzolanische Reaktion deutlich dichtere Kontaktzonen aus, weshalb der Unterschied der Transportgeschwindigkeit von Chlorid in Zementstein, Mörtel bzw. Beton deutlich geringer ausfällt [156].

Des Weiteren ist der Transportweg von Molekülen durch Beton infolge der Gewundenheit des Porensystems nicht auf dem kürzesten Weg möglich. Die Tortuosität, welche diese Eigenschaft beschreibt (Quotient aus effektiver Weglänge und kürzester Weglänge in x-Richtung), wirkt sich retardierend auf den Transportprozess aus [72].

Die geometrischen Eigenschaften des Betons (Porosität des Zementsteins und der Kontaktzone, Tortuosität) werden im Wesentlichen durch die Zementart, Zugabe von Zusatzstoffen, den Wasserzementwert und die zeitliche Entwicklung des Porengefüges beeinflusst. Die Diffusionseigenschaften von Ionen in Beton lassen sich jedoch nicht ausschließlich durch die geometrischen Eigenschaften des Betons beschreiben [119][156][46].

- **Eigenschaft der Lösung**

Zur Wahrung der elektrischen Neutralität können Chloridionen Cl^- nur im Zusammenhang mit Kationen (z.B. Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Li^+) existieren. In Diffusionsversuchen durch ein nichtreaktives poröses Material wurde gezeigt, dass neben der Ionenkonzentration der Lösung insbesondere die

Lösungszusammensetzung einen großen Einfluss auf den ermittelten Diffusionskoeffizienten hat [124], was auch durch andere Untersuchungen bestätigt werden konnte, z.B. [137][119]. Ein Grund hierfür ist, dass die Diffusionsrate von Kationen und Chloridionen im Zementstein unterschiedlich ist. Dies hat zur Folge, dass, sobald sich Chloridionen (Anionen) entlang eines Konzentrationsgradienten bewegen, ein elektrisches Gegenfeld (counter electrical field) zwischen den Chloridionen und den dazugehörigen, langsameren Kationen erzeugt wird. Die Kombination des wirksamen Antriebs der Diffusion, bestehend aus dem chemischen Potential und dem abbremsenden elektrischen Gegenfeld, wird als elektrochemisches Potential bezeichnet [136]. Da die Diffusionsrate der Kationen variiert, wird die Stärke des elektrischen Gegenfelds auch von der Lösungszusammensetzung bestimmt. Darüber hinaus wird das elektrochemische Potential jedoch auch vom Beton beeinflusst, s.u. (Stichwort: Semimembran).

Die Ionen in einer Lösung beeinflussen sich auch gegenseitig. Die Kenngröße, welche den Einfluss dieser ionogenen Wechselwirkungen auf den Diffusionsprozess beschreibt, ist der Aktivitätskoeffizient γ , welcher in Abhängigkeit der Temperatur, der Lösungskonzentration und der Lösungszusammensetzung variiert. Der Aktivitätskoeffizient für eine NaCl-Lösung nimmt bis zur Chloridkonzentration von rd. 0,5 mol/l mit zunehmender Konzentration ab, wodurch der Ionenfluss reduziert wird. Der Aktivitätskoeffizient kann mit dem Pitzer-Modell am genauesten beschrieben werden [137]. Aufgrund der Komplexität dieses Modells wird im Allgemeinen auf die Debye-Hückel-Theorie zurückgegriffen, welche für verdünnte Lösungen gilt [136][161]. Vergleichsrechnungen von Zhang haben gezeigt, dass bis zur Lösungskonzentration von 0,5 mol/l die Abweichungen vergleichsweise gering sind.

Nach der Debye-Hückel-Theorie diffundieren Ionen nicht als Punktladungen durch einen Elektrolyten, sondern zusammen mit einer jeweils ihrer entgegengesetzt geladenen Ionenatmosphäre. Dementsprechend befinden sich in der näheren Umgebung eines negativ geladenen Iones, bedingt durch die elektrostatische Anziehung bzw. Abstoßung, mehr positiv geladene Ione. Diese Ionenatmosphäre bewirkt eine Abschirmung des negativ geladenen Ions nach außen. Im Porensystem des Betons kommt es im Porenwasser zu Überlagerungen der Ionenatmosphären, wodurch je nach Konzentration und Porengröße entsprechende Abstoßungsenergien überwunden werden müssen.

Für höhere Chloridkonzentrationen ist gemäß [137] der Einfluss der Reibung zwischen den sich bewegenden Ionen zu berücksichtigen.

Interaktion von Lösung und Beton

Infolge der Ladungsdifferenzen zwischen der Porenoberfläche (CSH-Phasen) und dem Elektrolyten (konzentrierte alkalische Porenlösung mit Chlorid) kommt es zu Adsorptionsvorgängen von Anionen und Kationen (Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- etc.) an der Feststoffoberfläche. Gemäß der Theorie der elektrischen Doppelschichten wird dadurch eine Umverteilung der elektrischen Ladung hervor-

rufen, um die Elektroneutralität der Lösung wieder herzustellen. Dies führt zu Potentialdifferenzen zwischen der Feststoffoberfläche und der Lösung, wodurch sich eine elektrische Doppelschicht ausbildet. Diese kann als Energiebarriere am Phasenübergang „Feststoff/Lösung“ angesehen werden, da infolgedessen der Ionentransport abgebremst wird. Wiens [156] verwendet in diesem Zusammenhang den Begriff des „ionogenen Porenverschlusseffekts“. Da Wechselwirkungen zwischen dem Sauerstoffmolekül und der Porenoberfläche weitestgehend ausgeschlossen werden können, konnte der „ionogene Porenverschlusseffekt“ im Wesentlichen durch das Verhältnis des Sauerstoffdiffusionskoeffizienten zum stationären Migrationskoeffizienten (ohne Einfluss der Chloridbindekapazität) nachgewiesen werden [156]. Das Ausmaß der Wechselwirkung und damit des Retardierungseffekts hängt insbesondere von der Größe der am Prozess beteiligten Kapillarporen, der Zusammensetzung und der Konzentration der Lösung ab. Zhang [161] folgert im Rahmen einer theoretischen Betrachtung, dass für Kapillarporen von bestimmter Größe eine Mindestkonzentration notwendig ist, damit die Ionen eindiffundieren können bzw. dass für eine gegebene Ionen-Konzentration die Ionen nur in Kapillarporen über einer bestimmten Größe eindiffundieren können.

Eine weitere Interaktion zwischen Lösung und Beton ist durch die Wirkung des Betons als elektro-negative durchlässige Semimembran gegenüber einer eindiffundierenden Lösung mit Anionen und Kationen gegeben. Infolgedessen wird die Durchtrittsrate von Kationen reduziert [8]. Dies führt dazu, dass sich der Unterschied in der Driftgeschwindigkeit zwischen Kationen und Anionen vergrößert [136], was zur Verstärkung des elektrischen Gegenfelds führt, wodurch die Diffusionsrate reduziert wird.

Durch Untersuchungen an Betonen und Zementmörteln mit Flugasche unter definierten Randbedingungen differenziert Wiens die maßgeblichen Effekte, welche den Diffusionsprozess abbremsen. Der in dieser Arbeit beschriebene „geometrische Porenverschlusseffekt“ ist auf die effektive Abminderung der transport-relevanten Kapillarporenquerschnitte durch CSH-Phasen-Bildung während der puzzolanischen Reaktion zurückzuführen, während der „ionogene Porenverschlusseffekt“ auf die Interaktionen der Chloridionen mit den Porenoberflächen (elektrische Doppelschichten) zurückgeführt wird. Der „ionogene Porenverschlusseffekt“ ist dabei eine Folgeerscheinung des geometrischen Verschlusseffektes, da er insbesondere bei kleinen Porenquerschnitten zum Tragen kommt.

Des Weiteren ist die Diffusionsgeschwindigkeit abhängig von der Temperatur, da die Eigenbeweglichkeit der Moleküle sich mit zunehmender Temperatur erhöht.

Die Ausführungen zeigen, dass der Chloriddiffusionswiderstand von vielen Faktoren abhängt. Daher können die in stationären und nicht-stationären Versuchen ermittelten Chloriddiffusionskoeffizienten D_{nss} und D_{ss} in Abhängigkeit von den Versuchsrandbedingungen erheblich variieren.

4.1.2.3 Diffusion durch teilgesättigten Beton

Diffusion von Chlorid in Beton kann nur über eine mit Wasser beaufschlagte Kapillarpore erfolgen, weshalb die transportierte Chloridmenge stark von den Feuchteverhältnissen im Beton abhängt. Die Feuchteverhältnisse werden auch durch die Speicherkapazität des Betons beeinflusst. In diesem Zusammenhang ist die Sorption, welche die Physi-Chemisorption sowie die Kapillarkondensation umfasst, zu nennen. Durch die Sorption werden Wassermoleküle, im Wesentlichen durch van der Waals-Kräfte, an den Porenwandoberflächen gebunden. Dies geschieht zunächst einlagig. Ab einer relativen Luftfeuchte von rd. 25 % wird von einer mehrlagigen Anlagerung der Wassermoleküle an die innere Oberfläche ausgegangen. Ab relativen Luftfeuchten von rd. 50 % kommt es in Poren mit Radien im Bereich von $1 \text{ nm} < r < 0,1 \mu\text{m}$ zur Erniedrigung des Sättigungsdampfdrucks, wodurch die Poren mit Wasser gefüllt werden (Kapillarkondensation). Mit zunehmender Porengröße wird dieser Einfluss geringer, weshalb sich größere Poren erst bei höheren Luftfeuchten durch Kapillarkondensation füllen [101]. Der Zusammenhang zwischen der relativen Luftfeuchte der Umgebung und der sich im Beton einstellenden Gleichgewichtsfeuchte wird empirisch durch Sorptionsisotherme beschrieben. Hierbei wird zwischen dem Verlauf infolge von Wasseraufnahme (Adsorption) und Wasserabgabe (Desorption) unterschieden, vgl. **Bild 4**.

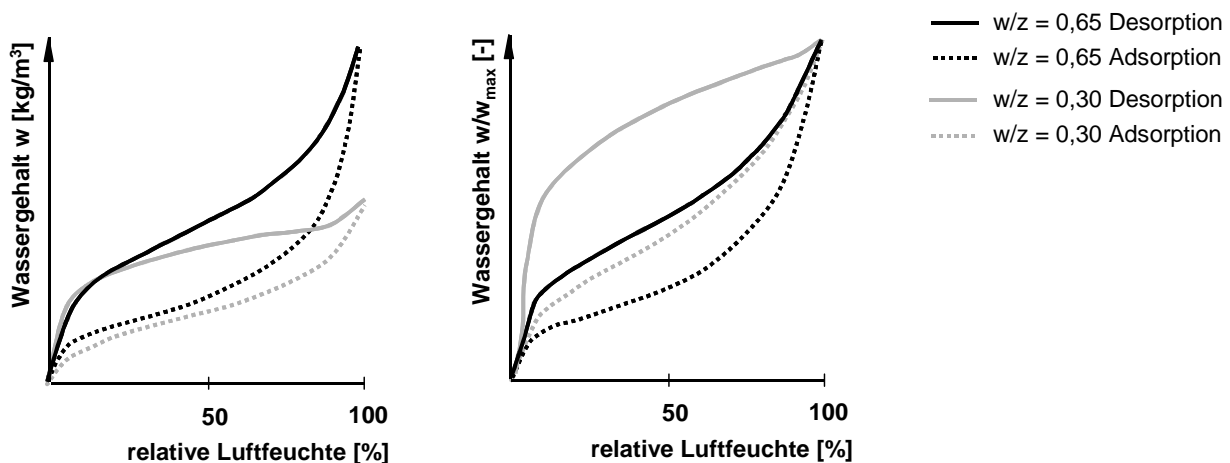


Bild 4: Skizzenhaft dargestellte Ad- und Desorptionsisotherme für zwei Betone mit unterschiedlichen Wasserzementwerten (links) und daraus abgeleitete Verläufe von Wassersättigungsgraden in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte (rechts) nach [159]

Es wird deutlich, dass bei Beton mit einem niedrigen Wasserzementwert die aufnehmbare Wassermenge durch die geringe Gesamtporosität des Betons signifikant geringer ausfällt als bei Beton mit einem hohen Wasserzementwert. Der verhältnismäßig hohe Anteil an Kapillarporen ($50 \text{ nm} < r < 50 \mu\text{m}$) des Betons mit hohem Wasserzementwert bewirkt zudem, dass ein Großteil der Poren erst oberhalb einer relativen Luftfeuchte von rd. 50 % gefüllt werden. Bei dem dichten Beton sind die Gelporen $r < 50 \text{ nm}$, aus denen das Porengefüge vornehmlich besteht, schon durch Kapillarkondensation mit Wasser gefüllt.

Wird der Wassergehalt bei einer relativen Luftfeuchte zu 100 % bzw. $RH = 1$ als Bezugswert zur Bestimmung des Wassersättigungsgrads herangezogen, so ergibt sich der in **Bild 4** dargestellte Zusammenhang zwischen der relativen Luftfeuchte und dem Wassersättigungsgrad. Für Betone mit einem kleinen Wasserzementwert ist der Einfluss der relativen Luftfeuchte ab 70 % auf den Wassersättigungsgrad bei der Desorption vergleichsweise gering.

Ferner beeinflusst auch die Salzbelastung des Betons die Feuchtespeicherung und damit den Wassersättigungsgrad. So kommt es bei natriumchloridhaltigen Betonen ab einer relativen Luftfeuchte von rd. 75 % zur Dampfdruckerniedrigung, was einen Anstieg der Sorptionsisotherme bewirkt [158].

Durch Wasserteilsättigung kann die Effektivität des Diffusionsprozesses reduziert werden, was sich in einem geringeren Chloriddiffusionskoeffizienten widerspiegelt, vgl. z.B. [58][103][72][88][20]. Gründe hierfür sind u.a.:

- In den teilgesättigten Kapillarporen kann Chloriddiffusion nur über den an der Porenoberfläche angelagerten Wasserfilm stattfinden. Dabei ist zu erwarten, dass sich die Interaktion von Chlorid mit der Porenoberfläche verstärkt, wodurch der ionigene Porenverschlusseffekt zunimmt und der Diffusionsprozess abgebremst wird, vgl. **Kapitel 4.1.2.2**, ab Seite 19.
- Nur ein Teil der transportrelevanten Kapillarporen ist ausreichend wassergesättigt. Dabei gilt, je größer der Porendurchmesser, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Pore nicht wassergesättigt ist (vgl. Kapillarkondensation). Infolgedessen werden Transportwege blockiert, wodurch sich der mittlere Transportweg von Chlorid in Beton verlängert (Zunahme der Tortuosität).

Die in der Literatur verwendeten funktionalen Zusammenhänge zwischen Feuchtegehalt und Diffusionskoeffizient sind vielfältig: linear (z.B. [85][20]), exponential (z.B. [72][112]) oder der durch **Gleichung 7** beschriebene Ansatz, welcher von Seatta [103] auf der Basis von Bazant [5] formuliert wurde und im Rahmen weiterer Veröffentlichungen propagiert wird [88][151].

$$\frac{D_{\text{Eff}}^{\text{RH}}}{D_{\text{Eff}}^{\text{RH}=1}} = \left(1 + \frac{(1 - \text{RH})^4}{(1 - \text{RH}_c)^4} \right)^{-1} \quad \text{Gleichung 7}$$

- $D_{\text{Eff}}^{\text{RH}}$: effektiver Chloriddiffusionskoeffizient von Beton in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte RH in 10^{-12} [m^2/s]
- $D_{\text{Eff}}^{\text{RH}=1}$: effektiver Chloriddiffusionskoeffizient von Beton bei einer relativen Luftfeuchte von $RH = 1$ in 10^{-12} [m^2/s] (Annahme: kapillar wassergesättigter Beton)
- RH : relative Luftfeuchte der Umgebungsluft [-]
- RH_c : relative Luftfeuchte, bei dem der Diffusionskoeffizient halb so groß ist wie bei der relativen Luftfeuchte von $RH = 1$ [-]

Systematische Untersuchungen zum Einfluss der Betonfeuchte auf den Chloriddiffusionskoeffizienten sind schwierig durchführbar, da eine praxisrelevante Chloridbeaufschlagung immer auch mit einer Wasserbeaufschlagung einhergeht, wodurch auch ein konvektiver Chloridtransport stattfindet, z.B. [88].

Um definierte Feuchtebedingungen während der Beaufschlagungsphase herzustellen und ein kapillares Saugen auszuschließen, entwickelte Climent [20] einen Versuchsablauf, in dem bis zur Massekonstanz getrocknete Probekörper eine Stunde mit dampfförmiger Salzsäure beaufschlagt wurden. Anschließend wurden die Proben wieder der vorherigen relativen Luftfeuchte über einen definierten Zeitraum ausgesetzt. Nachdem die Lagerung (Diffusionszeitraum) abgeschlossen war, wurden die Chloridkonzentrationen über die Tiefe ermittelt und daraus der Chloriddiffusionskoeffizient abgeleitet. Bei diesem Versuchsablauf ist jedoch unklar, inwieweit die Beaufschlagung mit dampfförmiger Salzsäure unter Umständen die Struktur des oberflächennahen Betons beeinflusst. Da sowohl die Art des Kations (hier H^+) als auch die Konzentration einen Einfluss auf die Diffusionsgeschwindigkeit hat, sind die folgenden Ergebnisse zunächst nur qualitativ zu bewerten, vgl. **Kapitel 4.1.2.2**, ab Seite 19.

Die Auswertung der an Betonprobekörpern (CEM I-Beton, $w/z = 0,6$) bestimmten Chloriddiffusionskoeffizienten für unterschiedliche relative Luftfeuchten RH nach **Gleichung 7** ergibt den in **Bild 5** dargestellten S-förmigen Verlauf.

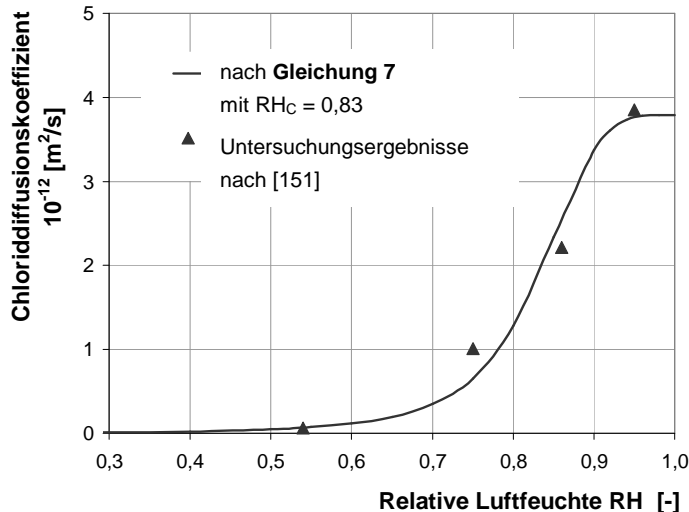


Bild 5: Abhängigkeit des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten und der relativen Luftfeuchte der umgebenden Luft nach Gleichung 7 mit $RH_c = 0,83$ [151]

Die Untersuchungsergebnisse zeigen den deutlichen Einfluss der Luftfeuchte auf den effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten. Ab einer relativen Luftfeuchte von $RH \sim 0,9$ fällt der Chloriddiffusionskoeffizient deutlich ab, was in Übereinstimmung mit anderen Versuchsauswertungen zu dieser Thematik ist [88]. Unterhalb einer relativen Luftfeuchte von $RH \sim 0,6$ findet kaum noch Diffusion statt, was auch durch andere Untersuchungen bestätigt wird, z.B. [71].

4.1.3 Kapillartransport

4.1.3.1 Theorie und Formeln

Poröse Feststoffe nehmen bei direktem Kontakt mit Wasser dieses über Kapillarkräfte solange auf, bis der Sättigungszustand (freie Wassersättigung) erreicht ist. Die folgenden Betrachtungen beziehen sich auf eine senkrechte, zylindrische Kapillare (Zylinderkapillare).

Wird eine Zylinderkapillare einseitig in eine freie Wasserfläche eingetaucht, so findet ohne äußere Einwirkung eine spontane Flüssigkeitsbewegung statt. Das in der Zylinderkapillare aufsteigende Wasser bildet dabei eine konkav gekrümmte Oberfläche (Meniskus), da das Wasser bestrebt ist, so viel wie möglich von der Festkörperoberfläche zu benetzen. Die treibende Kraft ist die kapillare Zugkraft, welche infolge Grenzflächenspannung hervorgerufen wird. Grenzflächen gegen Gase werden auch als Oberflächen bezeichnet. Die Oberflächenspannung entsteht durch das Ungleichgewicht der Anziehungskräfte auf die Wassermoleküle an der Oberfläche. Der sich in einer Kapillare einstellende Randwinkel Θ (auch Benetzungswinkel, z.B. in [154]) hängt dabei von den Grenzflächenspannungen der angrenzenden Stoffe ab, siehe **Gleichung 8**.

$$\cos \Theta = \frac{\sigma_{F,L} - \sigma_{F,W}}{\sigma_{W,L}} \quad \text{Gleichung 8}$$

- Θ : Randwinkel Feststoff/Wasser [-]
 $\sigma_{F,L}$: Oberflächenspannung Feststoff/Luft [N/m bzw. kg/s²]
 $\sigma_{F,W}$: Grenzflächenspannung Feststoff/Wasser [N/m bzw. kg/s²]
 $\sigma_{W,L}$: Oberflächenspannung Wasser/Luft [N/m bzw. kg/s²]

Infolge der in **Gleichung 8** erwähnten Spannungen bildet sich in einer Kapillare ein Randwinkel aus, der eine Krümmung der Grenzfläche Wasser/Luft bewirkt. Durch eine Gleichgewichtsbetrachtung an der Grenzfläche lässt sich die an der Meniskusoberfläche angreifende Zugkraft p_K ableiten, vgl. **Gleichung 9**.

$$p_{\text{Luft}} - p_{\text{Wasser}} = p_K = \frac{2 \cdot \sigma_{W,L}}{r} \cdot \cos \Theta \quad \text{Gleichung 9}$$

- p_{Luft} : Luftdruck [N/m²]
 p_{Wasser} : Wasserdruck [N/m²]
 p_K : kapillare Zugkraft [N/m²]
 Θ : Randwinkel Feststoff/Wasser [-]
 $\sigma_{W,L}$: Oberflächenspannung Wasser/Luft [N/m bzw. kg/s²]
 r : Porenradius der Kapillare [m]

Die maximale Steighöhe des Wassers in einer vertikal orientierten Kapillare wird erreicht, wenn die Kraft infolge des Eigengewichts von Wasser gleich der kapillaren Zugkraft p_K ist, vgl. **Gleichung 10**.

$$h_{\text{kap}} = \frac{p_{\text{K}}}{g \cdot \rho_{\text{W}}} = \frac{2 \cdot \sigma_{\text{W,L}}}{r \cdot g \cdot \rho_{\text{W}}} \cos \Theta$$

Gleichung 10

- h_{kap} : maximale kapillare Steighöhe [m]
 $\sigma_{\text{W,L}}$: Oberflächenspannung Wasser/Luft [N/m bzw. kg/s²]
 r : Porenradius der Kapillare [m]
 g : Erdbeschleunigung [m/s²]
 ρ_{W} : Dichte von Wasser [kg/m³]
 Θ : Randwinkel Feststoff/Wasser [-]

Die Flüssigkeit in einem kapillarporösen Körper wird durch die kapillare Zugkraft beschleunigt, bis das Gleichgewicht zwischen der antreibenden Kraft und dem entgegenwirkenden Strömungswiderstand entsteht (Hagen-Poiseuille-Gesetz). Für den vereinfachten Fall der vertikal orientierten Kapillarpore kann die Lösung für die Steiggeschwindigkeit auf der Grundlage der Navier-Stokes-Gleichung und die Eindringtiefe mit den folgenden Gleichungen beschrieben werden, vgl. z.B. [82][126]:

$$\frac{dx_{\text{kap}}}{dt_{\text{saug}}} = \frac{r^2}{8 \cdot \eta \cdot x_{\text{saug}}} \cdot \frac{2 \cdot \sigma_{\text{W,L}}}{r}$$

Gleichung 11

$\frac{dx_{\text{kap}}}{dt_{\text{saug}}}$: Steiggeschwindigkeit [m/s]

- η : dynamische Viskosität des Wassers [Ns/m²]
 x_{kap} : kapillare Eindringtiefe [m]
 $r, \sigma_{\text{W,L}}$: siehe **Gleichung 10**

$$x_{\text{kap}}(t_{\text{saug}}) = \sqrt{\frac{\sigma_{\text{W,L}} \cdot r}{2 \cdot \eta}} \cdot \sqrt{t_{\text{saug}}}$$

Gleichung 12

- $x_{\text{kap}}(t_{\text{saug}})$: Eindringtiefe nach einer Saugdauer t_{saug} [m]
 t_{saug} : Saugdauer [s]
 $\sigma_{\text{W,L}}, r, \eta$: siehe **Gleichung 11** bzw. **Gleichung 10**

Die in **Gleichung 10** und **Gleichung 11** dargestellten Zusammenhänge haben zur Folge, dass die Wasserfront in den größeren Kapillaren trotz der niedrigeren Kapillarkräfte schneller steigt als in den kleineren, wodurch bei einem Material mit einer Bandbreite von unterschiedlichen Porenradien eine verzerrte Eindringfront entsteht. Die Verzerrung der Eindringfront wird als Dispersion bezeichnet [154].

Die Modellannahme einer zylindrischen, vertikal orientierten Kapillare, welche sich gut zur Beschreibung der wesentlichen Zusammenhänge beim Kapillartransport eignet, stellt jedoch für den Kapillartransport in Beton eine starke Vereinfachung dar, da zum einen Beton von einem Porensystem mit unterschiedlichsten Durchmessern und Geometrien geprägt wird und zum anderen Wechselwirkungen zwischen dem Wasser und dem Beton wirksam werden. So weicht die in Versuchen am Beton bestimmte Wasseraufnahme bereits nach kurzer Saugdauer vom Wurzel-Zeit-Gesetz (vgl. hierzu auch **Gleichung 12**) ab und verzeichnet eine

deutlich verminderte Wasseraufnahmegeschwindigkeit, was in der Literatur als Selbstabdichtung bezeichnet wird [101].

Nach neuesten Untersuchungen wird als Ursache für die Selbstabdichtung des Betons insbesondere das Umlagern von Wasser aus den Kapillarporen in die Gelporen während der Wasseraufnahme sowie das damit verbundene Quellen der Gelpartikel gesehen [101]. Wird Beton mit Wasser beaufschlagt, werden zunächst die größeren Poren mit Wasser gefüllt. Durch die Vernetzung der Poren untereinander saugen die noch nicht gefüllten, kleineren Poren aufgrund der größeren Kapillarkräfte die größeren Poren über die vorhandenen Querverbindungen leer. Die Umlagerung von Wasser aus den Kapillarporen in die kleineren Gelporen hat zur Folge, dass das darin eingelagerte Wasser durch die in diesen Poren großen wirkenden Oberflächenkräfte strukturiert wird, was die Beweglichkeit der Wassermoleküle reduziert. Die vorher beschriebenen Zusammenhänge haben dann keine Gültigkeit mehr (Bingham-Medium [154]). Darüber hinaus bewirkt die Wassereinlagerung in die Gelporen, dass Wassermoleküle auf den Gelpartikeln absorbiert werden. Mit wachsender absorbierte Molekülschicht baut sich ein Spaltdruck zwischen den Gelpartikeln auf, wodurch diese quellen. Durch das Quellen wird der für den kapillaren Weitertransport erforderliche Transportraum reduziert und die Kontinuität des Porensystems teilweise unterbrochen [101]. Eine untergeordnete Rolle bei der Selbstabdichtung des Betons spielt hingegen die zeitabhängige Querschnittsreduzierung des Porengefüges (z.B. durch Hydratation, ggf. Ablagerung löslicher Substanzen [128] oder Verstopfung durch lose Partikel).

Trotz dieser Einschränkungen hat sich als Grundmodell das Zylindermodell als nützlich erwiesen. Weiterführende Modelle gehen vom Wassergehaltsgefälle (z.B. über Diffusionsansatz [69][70][102]) aus oder beruhen auf der Perkolationstheorie.

4.1.3.2 Einflussfaktoren auf die kapillare Saugfähigkeit

Die kapillare Saugfähigkeit ist insbesondere von der Porenradienverteilung des Betons abhängig. Neben Materialeigenschaften wird die kapillare Wasseraufnahme insbesondere durch die Ausgangsfeuchte des Betons, die Temperatur und die NaCl-Konzentration im Aufsaugmedium beeinflusst.

Porenradienverteilung

Das Grundmodell zum Kapillartransport in einer senkrechten, zylindrischen Kapillare zeigt, dass der Porendurchmesser die kapillare Saugfähigkeit beeinflusst. Die Poreneinteilung nach Setzer [120] greift diesen Zusammenhang auf, vgl. **Tabelle 3**.

Tabelle 3: Einfluss der Porenradien auf die Charakteristik des kapillaren Wassertransports nach Setzer [120]

Porenradius r	Art der Pore	Charakteristik des kapillaren Wassertransports	
< 50 nm	Gelpore		
50 nm bis 2 µm	Mikrokapillare	*	große Saughöhe, wird extrem langsam erreicht
2 µm bis 50 µm	Kapillare		innerhalb von 5 bis 10 Tagen wird die maximale Saughöhe erreicht
50 µm bis 2 mm	Makrokapillare		geringe Saughöhe, wird sehr schnell erreicht
> 2mm	Verdichtungspore		

* für den Kapillartransport sind vor allem Poren mit Radien von 50 nm bis 10 µm maßgebend.

Da für den Kapillartransport insbesondere Poren mit Radien von $r = 50 \text{ nm}$ bis $r = 10 \text{ µm}$ eine Rolle spielen, ist die Porenradienverteilung des Betons von Bedeutung, welche insbesondere durch den Wasserzementwert, die Zementart und die Zugabe von Zusatzstoffen beeinflusst wird [156]. Bei oberflächennahem Beton kann mit zunehmender Nachbehandlung eine Verschiebung der Porenradienverteilung zu kleineren Radien festgestellt werden [56].

Feuchteverhältnisse im Beton

Wie effektiv ein kapillarer Wassereintrag ist, wird maßgeblich durch den Feuchtehaushalt des Betons vor der Beaufschlagung bestimmt, da mit zunehmender Ausgangsfeuchte der für die kapillare Wasseraufnahme zur Verfügung stehende, noch freie Porenraum verringert wird, vgl. z.B. [101]. Daher sind auch die Eigenschaften, welche die Speicherkapazität des Betons in Abhängigkeit der klimatischen Randbedingungen beschreiben, von Bedeutung, vgl. **Bild 4**, Seite 22.

Temperatur

Da die Viskosität mit steigender Temperatur schneller abnimmt als die Oberflächenspannung, nimmt die Flüssigkeitsaufnahme mit steigenden Temperaturen zu [128], vgl. auch **Gleichung 12**.

Konzentration der aufgesogenen Lösung

Die Zunahme der Viskosität verläuft mit zunehmender NaCl-Konzentration überproportional, während die Zunahme der Oberflächenspannung proportional verläuft, was bei höheren Konzentrationen zu einer reduzierten Lösungsaufnahme führt [83][101], vgl. auch **Gleichung 12**. Versuche mit NaCl-Lösungen unterschiedlicher Konzentrationen an Betonen mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,7$ [154] und $w/z = 0,3$ [56] zeigen hingegen keine signifikanten Unterschiede, woraus Volkwein [154] folgert, dass der Einfluss der Oberflächenspannung und der Viskosität von anderen Faktoren überlagert wird.

Erfolgt ein konvektiver Chlorideintrag durch die kapillare Aufnahme einer Chloridlösung, so schreitet die Wasserfront schneller voran als die Chloridfront. Als Ursachen hierfür werden die Chloridbindung (vgl. **Kapitel 4.1.5**) sowie ionogene Interaktionen angeführt, wodurch sich dieser Effekt mit zunehmender Zeit verstärkt [154][101]. Die durch Kapillartransport sich einstellenden Chlorideindringtiefen erreichen rd. 40 % bis 70 % der Wassereindringtiefen [154]. Das Verhältnis der Chlorideindringtiefe zur Wassereindringtiefe wird dabei als Retardation bezeichnet.

4.1.4 Mikroislinsenpumpe

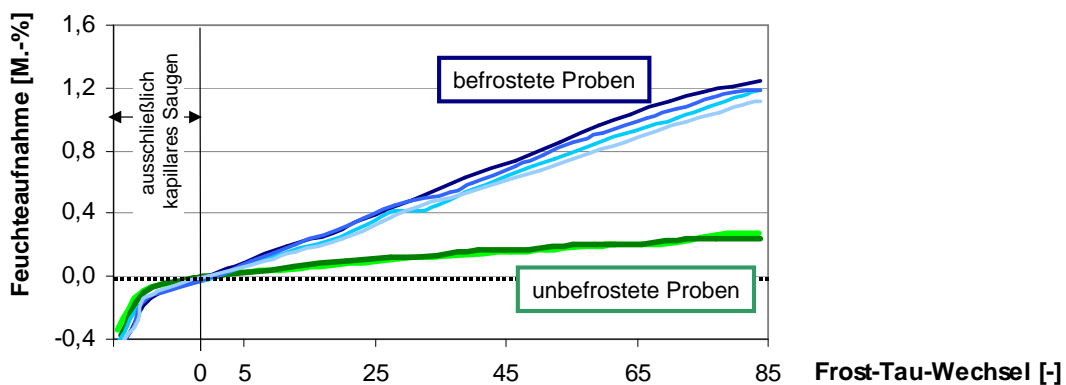
Die Mikroislinsenpumpe ist von Setzer durch ein thermodynamisches Modell beschrieben [121]. Unter der Voraussetzung chemischer und mechanischer Stabilitätskriterien können in dem nanoporösen System des Betons die drei Phasen Wasser, Wasserdampf und Eis in einem weiten Temperaturbereich gleichzeitig stabil sein und koexistieren. Unterhalb des Gefrierpunktes kann daher ungefrorenes Wasser in den kleinen Gelporen ($r < 50$ nm) und gefrorenes Wasser in den größeren Kapillarporen (Kapillarporeneis) nebeneinander im Gefüge vorliegen. Mit fallenden Temperaturen entsteht dabei ein Unterdruck in den Gelporen (1,22 MPa je Kelvin Unterkühlung [29]). Da die Zementsteinmatrix bei hohen Unterdrücken keinesfalls mehr als unendlich starr angesehen werden kann, wird mit sinkender Temperatur immer mehr ungefrorenes Wasser aus den Gelporen in die Kapillarporen gedrückt, wo es sich am Kapillarporeneis anlagert und gefriert. Hat das Eis im vorhandenen Porenraum genügend Expansionsraum, wird infolgedessen eine Kontraktion des Betons beobachtet (Gefrierschwinden).

Beim Erwärmen kehrt sich dieser Vorgang um. Dies bedeutet, dass der Gelporenraum expandiert. Da das herausgedrückte Gelporenwasser noch am Kapillarporeneis angefroren ist, wird der Rücktransport dieses Wassers in die Gelporen bis zum Auftauen des Kapillarporeneises verzögert. Wird in dieser Situation dem expandierenden Gelporenraum Wasser angeboten, so wird dieses rasch aufgenommen, vgl. **Tabelle 4**.

Tabelle 4: Mikroeislinnenmodell nach Setzer mit Bildern aus [122]

Abkühlung	Erwärmung
<ul style="list-style-type: none"> - Unter dem Gefrierpunkt liegen ungefrorenes Gelporenwasser und Kapillarporeneis nebeneinander im Gefüge vor. - Damit diese Koexistenz möglich ist, muss Unterdruck im Gelporensystem bestehen. - Durch den Unterdruck wird Gelporenwasser zum Kapillarporeneis (Eislinsen) transportiert. - Das Gelporenwasser lagert sich dort als Eis an. 	<ul style="list-style-type: none"> - Beim Auftauen findet eine Expansion der Gelporen statt. - Da das durch die Abkühlung herausgedrückte Gelporenwasser noch am Kapillarporeneis gebunden ist, wird externes Wasser in den Gelporenbereich nachgesaugt.

Laborversuche zeigen, dass infolge der Mikroeislinnenpumpe sich die Sättigung von Betonprobkörpern mit jedem Frost-Tau-Wechsel (FTW) erhöht und weit über dem Wert liegt, welcher durch kapillares Saugen erreicht wird, vgl. **Bild 6**. Durch Reduzierung des Wasserzementwerts und durch künstlich dem Beton zugeführte Luftporen (Zusatz von Luftporenbildnern) kann die Feuchtaufnahme während der Frost-Tau-Wechsel in Laborversuchen deutlich reduziert werden [56].



**Bild 6: Einfluss der Mikroeislinnenpumpe auf die Feuchtaufnahme von Beton [81]
(CEM I-Beton, $z = 360 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,6$)**

Durch das beschriebene Phänomen, welches auch als Frostsaugen oder als die Frostpumpe bezeichnet wird, kann der Beton beim Auftauen Wasser aus externen Quellen in den Gelporenraum saugen. Sind in dem Wasser gelöste Ionen enthalten, so können diese durch die Mikroeislinnenpumpe konvektiv in den Beton ein-

tragen werden. Erste Laboruntersuchungen zum Einfluss der Mikroislinsenpumpe am Chlorideintrag zeigen, dass insbesondere bei Beton ohne Zusatzstoffe und ohne künstlich eingeführte Luftporen ein beschleunigter Chlorideintrag stattfindet [74].

4.1.5 Binden von Chloriden

Die Transportgeschwindigkeit von Chlorid in Beton wird u.a. durch das Chloridbindevermögen des Zements beeinflusst. So wurde bei Aufsaugversuchen mit einer chloridhaltigen Lösung festgestellt, dass die Wasserfront schneller als die Chloridfront im Beton voranschreitet, vgl. **Kapitel 4.1.3.2**, Seite 27. Auch die Diffusion von Chlorid in Beton wird durch das Chloridbinden verlangsamt, da infolgedessen die freie Chloridkonzentration in der Porenlösung reduziert wird, was zu einer Reduktion des chemischen Potentials führt, vgl. **Kapitel 4.1.2.2**, Seite 19. In Abhängigkeit von der Bindungsstärke lassen sich generell die folgenden Bindungsarten unterscheiden [156]:

Physisorption

Durch die vergleichsweise schwachen van der Waals-Kräfte lagern sich die Chloridionen adsorptiv auf der Geloberfläche der CSH-Phasen an. Aufgrund der sehr geringen Aktivierungsenergie ist die Physisorption ein vollständig reversibler Vorgang [156]. Die Anlagerung kann dabei einlagig (bei geringen Chloridkonzentrationen) oder mehrlagig (bei höheren Chloridkonzentrationen) erfolgen. Dabei hängen der Belegungsgrad und die Schichtdicke von der Konzentration der frei beweglichen Moleküle und ihrer Bewegungsenergie ab.

Chemisorption

Die Chloridionen werden bei der Chemisorption unter Veränderung der Molekülstruktur an der Geloberfläche der CSH-Phasen an- bzw. eingelagert. Die dabei wirksamen Kräfte sind stärker als die van der Waals-Kräfte, weshalb die Chemisorption ein nur zum Teil reversibler Vorgang ist.

Chemisches Binden

Ein Teil der Chloride wird als Reaktionspartner in stabile Phasen des Zementsteins eingebunden. Die bekannteste chloridhaltige Phase ist das Friedel'sche Salz, welches vor allem durch den Einbau von Chloridionen in die Aluminatphasen (C_3A -Phasen) des Zementsteins entsteht. Generell sind jedoch alle Klinkerphasen an der Chloridbindung beteiligt [132].

Untersuchungen von Wiens zur Chloridbindekapazität zeigen, dass ein Großteil des Chlorids bei nachträglicher Einwirkung chemisorptiv gebunden wird [156]. Dem chemischen Binden wird beim nachträglichen Chlorideintrag, was den praxisnahen Auslagerungsbedingungen entspricht, eine untergeordnete Rolle zugeschrieben [55][140].

Das detaillierte Modellieren von Chloridbinden ist sehr komplex, da mehrere Reaktionen mit unterschiedlichen Reaktionspartnern simultan ablaufen und sich gegenseitig beeinflussen [107]. Aufgrund dieser Problematik hat es sich bei Ingenieuren durchgesetzt, die Bindekapazität durch Chloridbindungsisotherme

zu beschreiben. Diese beschreiben quantitativ den unter definierten Versuchsbedingungen sich einstellenden Gleichgewichtszustand zwischen gebundenen Chloriden (oder dem Gesamtchloridgehalt) und freien Chloriden. Üblicherweise beziehen sich Betrachtungen hierzu auf NaCl. Dabei ist jedoch zu beachten, dass auch das assoziierte Kation einen erheblichen Einfluss auf die Chloridbindekapazität hat [55][29]. Die Langmuir-Isotherme hat sich als besonders geeignet herausgestellt, um die Chloridbindekapazität unter Laborbedingungen mit vergleichsweise geringer Chloridkonzentration $< 0,05 \text{ mol/l}$ zu beschreiben, da bei diesem Modell von einer einlagigen Adsorption von Chlorid an die CSH-Phasen ausgegangen wird. Bei höheren Chloridkonzentrationen ist der Adsorptionsprozess komplexer, da die Anzahl der angelagerten Molekülschichten zunimmt. In diesem Fall kann die Chloridbindung über die empirische Freundlicher-Isotherme beschrieben werden, welche die Bindekapazität für Chloridkonzentrationen in einer Bandbreite von $0,01$ bis 1 mol/l in Laborversuchen gut beschreibt [139]. Ein weiterer Ansatz zur Modellierung einer mehrlagigen Adsorption von Chlorid ist die modifizierte BET-Isotherme [140]. Alle genannten Ansätze sind nicht linear. Der Gleichgewichtszustand zwischen der gebundenen und freien Chloridkonzentration stellt sich in Adsorptionsversuchen nach rd. 7 bis 28 Tagen ein [139][156]. Da das Chloridbinden damit relativ schnell im Vergleich zum Chloridtransport (Diffusion) ist, wird das Binden im Allgemeinen als ein quasi spontaner Vorgang betrachtet [67]. Die durch Laborversuche bestimmte Chloridbindekapazität steigt i.d.R. durch Zugabe von Flugasche oder durch Verwendung von Hochofenzement, was im Wesentlichen auf die größere innere Oberfläche dieser Betone im Vergleich zu CEM I-Beton zurückgeführt wird [58][135][156]. Dem Einfluss des Wasserzementwerts auf die Bindekapazität wird nur eine untergeordnete Rolle zugeschrieben [135].

Die Bindekapazität ist neben materialspezifischen Eigenschaften des Betons auch von Faktoren abhängig, welche von der Exposition beeinflusst werden. Zu diesen zählen die Zusammensetzung der Chloridlösung und deren Konzentration, die Temperatur [67][139], ablaufende Trocknungsprozesse [138], die relative Luftfeuchte [58] und die Konzentration von OH^- -Ionen in der Porenlösung [92]. Das Auslaugen von OH^- -Ionen aus der Betonrandzone, z.B. durch direkte Beregnung oder Meerwassereinwirkung, bewirkt eine Zunahme der Bindekapazität. Dies wird durch die zunehmende Anzahl von freien Adsorptionsstellen für die Chloridionen auf der Zementsteinoberfläche begründet, wenn die Konzentration der um diese Anlagerungsstellen konkurrierenden OH^- -Ionen abnimmt [143]. Untersuchungen an Beton, welcher dem Meerwasser ausgesetzt war, zeigen, dass der Zusammenhang zwischen freien und gebundenen Chloriden annähernd linear ist [108]. Die Abweichung zu dem durch Laborversuche festgestellten Verlauf wird durch das Auslaugen der OH^- -Ionen im Betonrandbereich erklärt, wodurch die Bindekapazität im Randbereich und damit bei hohen Chloridkonzentrationen vergrößert wird. Auch am Beton, welcher aus einer 12 Jahre alten Brücke entnommen wurde [15], zeigte sich ein fast linearer Zusammenhang zwischen freien und gebundenen Chloriden. Auch hier könnte eine Ursache die zur Bauteiloberfläche abnehmende OH^- -Konzentration sein. So haben Untersuchungsergebnisse an Bohrkernen aus dem Spritz- und Sprühnebelbereich von Brücken gezeigt, dass die Konzentration von wasserlöslichem OH^- ab einer Tiefenlage von rd. 50 mm bis zur Bauteiloberfläche abnimmt [152]. Die Ausdehnung dieses Tiefenbereichs mit vergleichsweise geringer OH^- -Konzentration ist dabei deutlich größer als die an den Bohrkernen ermittelten Carbonatisierungstiefen ($\sim 3 \text{ mm}$). Die Abnahme der OH^- -Konzentration konnte hierbei nicht durch Auslaugungsvorgänge erklärt werden, da auch Bohrkern aus vor Regen geschützten Bauteilen diesen Verlauf aufwiesen.

Da das Binden von Chlorid ein zum Teil reversibler Vorgang ist, können durch Veränderung der Randbedingungen auch gebundene Chloride wieder freigesetzt werden. Dies geschieht z.B. beim Einlagern von chloridhaltigem Beton in chloridfreies Wasser. Dabei gehen im Wesentlichen Chloridionen wieder in Lösung, welche über die vergleichsweise schwachen van der Waals-Kräfte physisorptiv gebunden waren, vgl. Physisorption. Der Anteil der so freigesetzten Chloride ist jedoch begrenzt. Bei Desorptionsversuchen an Zementsteinproben wurden nur rd. 40 % der zuvor adsorbierten Chloridmenge aus dem Zementstein entfernt. Bei Betonen mit Flugasche reduzierte sich dieser Wert sogar auf 10 % [156]. Einen weiteren, besonders deutlichen Einfluss auf die Chloridbindekapazität des Betons hat die Carbonatisierung, durch welche fast die gesamte Chloridbindekapazität verloren geht [108][143][29].

Die Ausführungen zu den expositionsbedingten Einflüssen auf die Chloridbindekapazität zeigen, dass infolge der zeitabhängigen Änderung der Porenwasserzusammensetzung auch die Chloridbindekapazität einer zeitlichen Änderung unterworfen sein kann.

4.2 Chlorideindringmodelle

4.2.1 Historie der Modellentwicklung

Bei der Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Stahlbeton in Hinblick auf chloridinduzierte Korrosion kommt der Modellierung des Chloridtransports eine Schlüsselrolle zu, da allgemeingültige Modelle zur Beschreibung der Schädigungsphase bisher fehlen. Die Modelle beziehen sich dabei auf ungerissenen Beton.

Die meisten Modelle, welche das Chlorideindringen beschreiben, fußen auf dem 2. Fick'schen Diffusionsgesetz. Für bestimmte Anfangs- und Randbedingungen lässt sich diese Differenzialgleichung mit der Errorfunktion analytisch lösen [28], vgl. **Gleichung 3**, Seite 18. Das erste auf der Error-Funktion basierende Modell wurde 1970 von Collepardi [26] propagiert, welches für rd. 20 Jahre auch das einzige Modell war. Die zeit- und tiefenabhängige Prognose der Chloridkonzentration erfolgt hierbei auf Grundlage eines konstanten Chloriddiffusionskoeffizienten. Auswertungen von Bauwerksdaten haben jedoch gezeigt, dass diese Variable, welche den inversen Widerstand des Betons gegenüber Chlorideindringen charakterisiert, eine zeitabhängige Größe ist, wobei das Ausmaß der Zeitabhängigkeit stark von der Betonzusammensetzung und den Expositionsbedingungen abhängt, deren Ursachen noch nicht vollends geklärt werden konnten. Zu Beginn der 90^{er} Jahre wurde dieser aus Beobachtungen abgeleitete Zusammenhang zwischen Betonalter und Chloriddiffusionskoeffizient in empirische Modelle über unterschiedliche Funktionen implementiert [52].

Im Rahmen des Europäischen Forschungsprojekts DuraCrete [38] wurde ein solcher empirischer Ansatz mit einem zeitabhängigen Diffusionskoeffizienten vollprobabilistisch ausgewertet [37]. Eine erste praktische Anwendung des im Rahmen von DuraCrete entwickelten Bemessungskonzeptes für die Meerwasserexposition erfolgte bei dem Großprojekt Tunnel Westerschelde in den Niederlanden [52], für welchen eine

Lebensdauer von 100 Jahren anvisiert wurde [48]. Weitere Anwendungen folgten, z.B. der Busan-Geoje Fixed Link (Brücke und Tunnel) in Korea [42].

Die Modifizierung des DuraCrete-Modells durch Gehlen [49] eröffnete die Möglichkeit, auch das Chlorideindringen in Meeresbauwerke infolge einer intermittierenden Beaufschlagung, z.B. durch gezeitenabhängige Wasserstände, zu beschreiben. Dadurch kann der für Dauerhaftigkeitsbetrachtungen relevante Teil des Chloridprofils, welcher infolge der zeitlich nicht konstanten Einwirkung Abweichungen vom 2. Fick'schen Diffusionsgesetz zeigt, trotzdem durch die Errorfunktion beschrieben werden.

Des Weiteren existieren zahlreiche numerische Modelle. Unter diesen sind auch einige physikalische Modellierungen zu finden, welche auf dem Fick'schen Diffusionsgesetz oder der Nernst-Planck-Gleichung basieren, z.B. [135][144][75][68][106]. Da eine physikalische Modellierung darauf abzielt, alle am Chlorideindringen beteiligten Prozesse physikalisch so genau wie möglich zu erfassen, sind diese Modelle im Allgemeinen sehr komplex.

Der historische Abriss der Modellentwicklung zeigt, dass der Ausgangspunkt die Beschreibung des Transports von Chlorid in Beton, welcher ständig einer chloridhaltiger Lösung ausgesetzt ist, war. Unter diesen Randbedingungen, welche auch für Küstenbauwerke im Meerwasser (ständig eingetaucht) oder Gründungsbauteile im chloridhaltigen Grundwasser vorliegen, erfolgt der Chloridtransport im Beton nahezu ausschließlich über Diffusion. Für diese Expositionen kann der Chloridtransport daher auch zutreffend mit Diffusionsmodellen beschrieben werden.

In den Wasserwechselzonen und den Spritzwasserbereichen von Meeresbauwerken erfährt der Beton eine regelmäßige, intermittierende Beaufschlagung mit Meerwasser, wodurch sich im oberflächennahen Bereich eine Konvektionszone ausbildet, in welcher die Chloridverteilung vom Diffusionsgesetz abweicht. Da hinter der Konvektionszone, welche in ihrer Ausdehnung beschränkt ist, die Diffusion der maßgebliche Transportmechanismus ist, eignet sich auch für diese Expositionen ein Modellansatz, welcher auf dem Diffusionsgesetz fußt, vgl. Gehlen-Modell [49]

Beim Transport von Chlorid in Straßenbauwerken hat die Konvektion, u.a. bedingt durch die jahreszeitenabhängige, intermittierende Beaufschlagung und durch die Mikroeislinsepumpe, einen deutlich größeren Einfluss auf die Chloridverteilung im Beton. Ein Modell, welches das Ergebnis des Chloridtransports im Beton von Straßenbauwerken beschreibt, muss diesen Umstand in adäquater Weise berücksichtigen.

4.2.2 Straßenexposition

4.2.2.1 Allgemein

Die ersten Chlorideindringmodelle für Straßenbauwerke fußen auf Modellen, welche für die Meerwasserexposition entwickelt worden sind. Dabei wurden die Variablen der Einwirkungsseite auf die Straßenexposition angepasst. Modelle, welche explizit das Eindringen von Chloriden in Straßenbauwerke beschreiben, sind hingegen rar. Ein Auszug ist in **Tabelle 5** zusammengestellt. Im Folgenden werden die Modelle, welche ausschließlich für die Straßenexposition entwickelt wurden, kurz vorgestellt.

Tabelle 5: Modelle für das Eindringen von Chlorid in Beton von Straßenbauwerken

Hintergrund	Transportmechanismus (physikalischer Grundansatz des Berechnungsmodells)	Berechnungsmethode	Quelle
Modell für Meerwasserexposition entwickelt und mit angepassten Einwirkungsvariablen erweitert	Diffusion (2. Fick'sches Diffusionsgesetz mit zeitunabhängigen Diffusionskoeffizienten)	analytisch durch Errorfunktion	BRIME [31]
	Diffusion (2. Fick'sches Diffusionsgesetz)	numerisch	Life-365 [142]
	Diffusion (2. Fick'sches Diffusionsgesetz mit zeitabhängigen Diffusionskoeffizienten)	analytisch durch Errorfunktion	AiF [112]
Modelle ausschließlich für Straßenexposition entwickelt	konvektiver Chlorideintrag mit anschließender Verteilung der Chloride über Diffusion mit zeitunabhängigen Diffusionskoeffizienten	analytisch durch Errorfunktion	Ungricht [148]
	Diffusion mit Konvektion im Zusammenhang mit hydrodynamischer Dispersion (alles zeitabhängig)	analytisch durch Errorfunktion	Lay [72]

4.2.2.2 AiF-Modell

Das AiF-Modell [112] fußt auf dem 2. Fick'schen Diffusionsgesetz. Um eine Anpassung des Diffusionsmodells auf die Straßenexposition zu erreichen, erfolgte die empirische Anpassung der Variablen vergleichsweise umfassend und ausschließlich in Hinblick auf die Straßenexposition. Unter diesem Gesichtspunkt erscheint eine Zuordnung zu den ausschließlich für die Straßenexposition entwickelten Modellen als nachvollziehbar, vgl. **Tabelle 5**.

In dem AiF-Modell, dessen Grundlage im Wesentlichen das von Gehlen [49] modifizierte Diffusionsmodell ist, nimmt der Chloriddiffusionskoeffizient (hier: scheinbarer Chloriddiffusionskoeffizient) eine zentrale Rolle ein, welcher durch alle beteiligten Transportmechanismen beeinflusst wird. Das Modell von Gehlen wurde dahingehend weiterentwickelt, dass der Chloriddiffusionskoeffizient differenziert nach hydrations- und expositionsbedingten Anteilen beschrieben wird. Für die Beschreibung des hydrationsbedingten Anteils wird dabei der zeitabhängige Verlauf des Chloridmigrationskoeffizienten herangezogen, vgl. **Bild 7**.

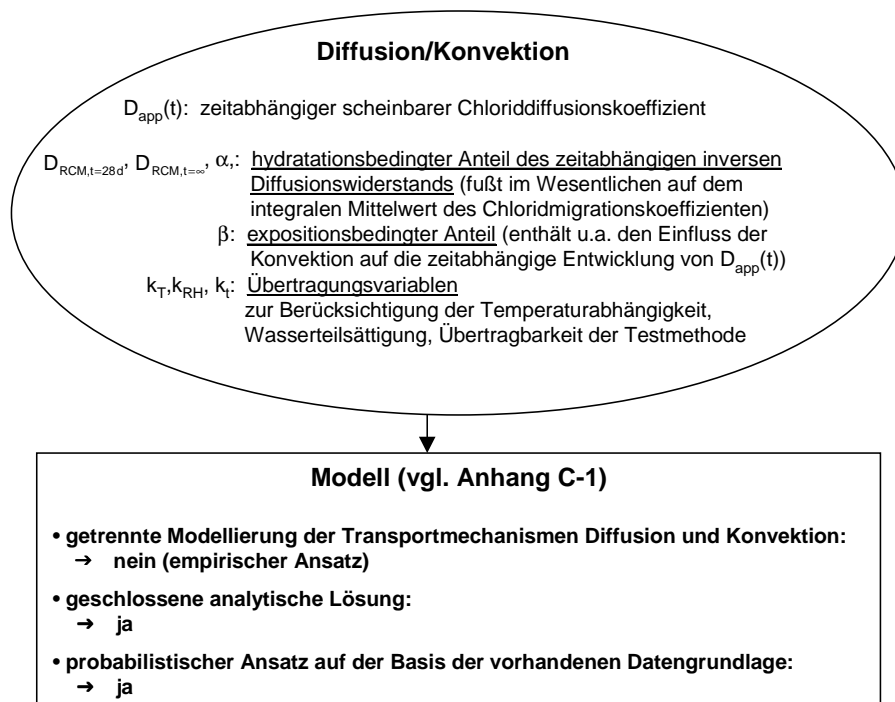


Bild 7: Modellierung von Chloridtransport in verkehrsbedingt mit Spritzwasser beaufschlagtem Beton im Rahmen des AiF-Modells [112], vgl. Anhang C-1

4.2.2.3 Ungricht-Modell

Das Modell von Ungricht [148] berücksichtigt die Umverteilung der im Winter konvektiv eingetragenen Chloride über Diffusion. Dabei wird angenommen, dass sich die konvektiv eintragende Chloridmenge über die mittlere Eintragstiefe gleichmäßig verteilt. Somit sind die Eingangsvariablen zur Beschreibung des konvektiven Chlorideintrags die mittlere Tiefe h des konvektiven Chlorideintrags aus der Winterphase sowie die Chloridkonzentration C_K über die Tiefenlage h . Bei der sich anschließenden Umverteilung der konvektiv eingetragenen Chloride über Diffusion wurde von einem zeitunabhängigen Chloriddiffusionskoeffizienten ausgegangen, vgl. **Bild 8**.

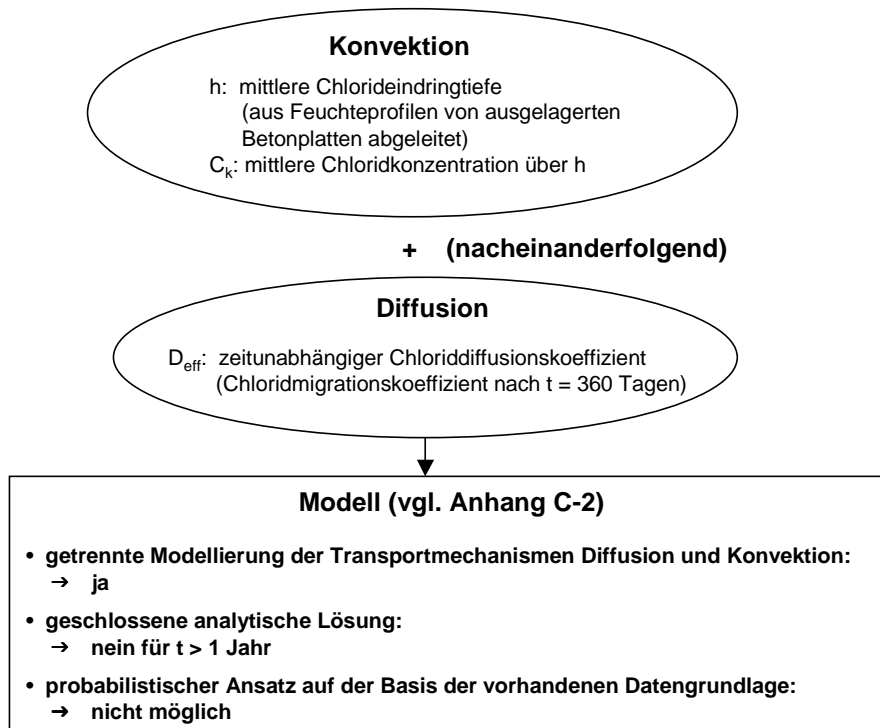


Bild 8: Modellierung von Chloridtransport in verkehrsbedingt mit Spritzwasser beaufschlagtem Beton im Rahmen des Modells von Ungricht [148], vgl. Anhang C-2

Eine Chloridverteilung infolge eines wiederholten konvektiven Chlorideintrags kann mit diesem Modell nicht direkt berechnet werden. Zur Prognose einer Chloridverteilung zum Zeitpunkt t_i ist daher die prognostizierte Umverteilung der eingetragenen Chloridmenge eines jeden Winters separat zu berechnen und anschließend zu überlagern, vgl. **Bild 9**.

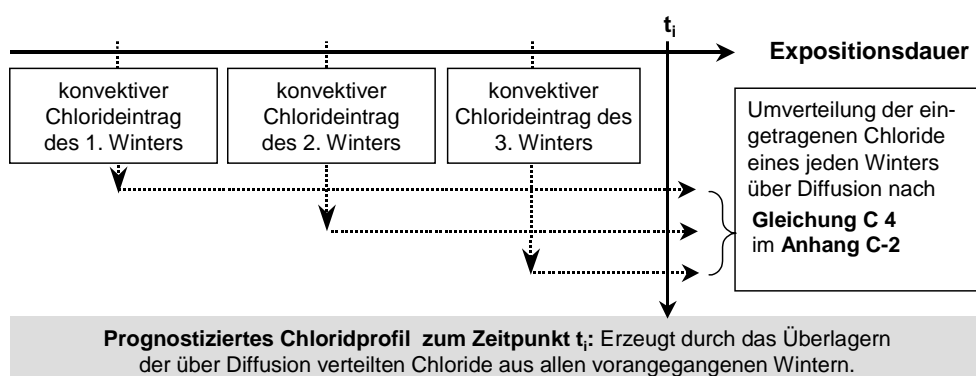


Bild 9: Prognose eines Chloridprofils zum Zeitpunkt t_i nach Ungricht [148]

Eine wesentliche Eingangsvariable dieses Modells ist die mittlere Chlorideindringtiefe h infolge Konvektion. Direkt bestimmte Messwerte hierzu stehen noch nicht zur Verfügung. Die konvektive Eindringtiefe wurde auf der Grundlage von Messdaten abgeschätzt, welche über einen Zeitraum von 2,5 Jahren an ausgelagerten CEM I-Probeplatten entlang einer Tunnelwand aufgezeichnet wurden. Ausgehend von der

mittleren Eindringtiefe des Wassers, welche durch tiefenabhängige Messungen von elektrischen Widerständen ermittelt wurde, erfolgte die Bestimmung der mittleren Chlorideindringtiefe unter Berücksichtigung eines Retardationsfaktors. Die Abschätzung dieses Faktors, der im Wesentlichen das Verhältnis des verzögerten Chlorideintrags zum Wassereintrag beschreibt, erfolgte auf der Grundlage von Versuchsergebnissen [154]. Im Rahmen dieser Laborversuche fand der konvektive Chlorideintrag durch kapillaren Wassertransport statt. Inwieweit dieser Wert auf die Straßenexposition übertragbar ist, in welcher der konvektive Chloridtransport auch über die Mikroeislinsepumpe erfolgt, wurde nicht untersucht. Die Quantifizierung der Variablen impliziert ferner, dass die gesamte, während der Winterzeit eingetragene Chloridmenge im Beton verbleibt. Für längere Expositionsdauern führt dies in Verbindung mit dem wiederholten Überlagern der Chloridprofile, rechnerisch zu einem signifikanten Anstieg der oberflächennahen Chloridkonzentrationen.

4.2.2.4 Lay-Modell

Zur Berechnung der tiefenabhängigen Chloridkonzentration bei Straßenbauwerken aus Beton stellt Lay [72] eine geschlossene analytische Lösung vor, welche neben der Diffusion auch die Konvektion und Dispersion berücksichtigt, vgl. **Bild 10**. Im Rahmen dieses Modells wird davon ausgegangen, dass der Eintrag und die Umverteilung von Chlorid simultan über Konvektion und Diffusion erfolgt.

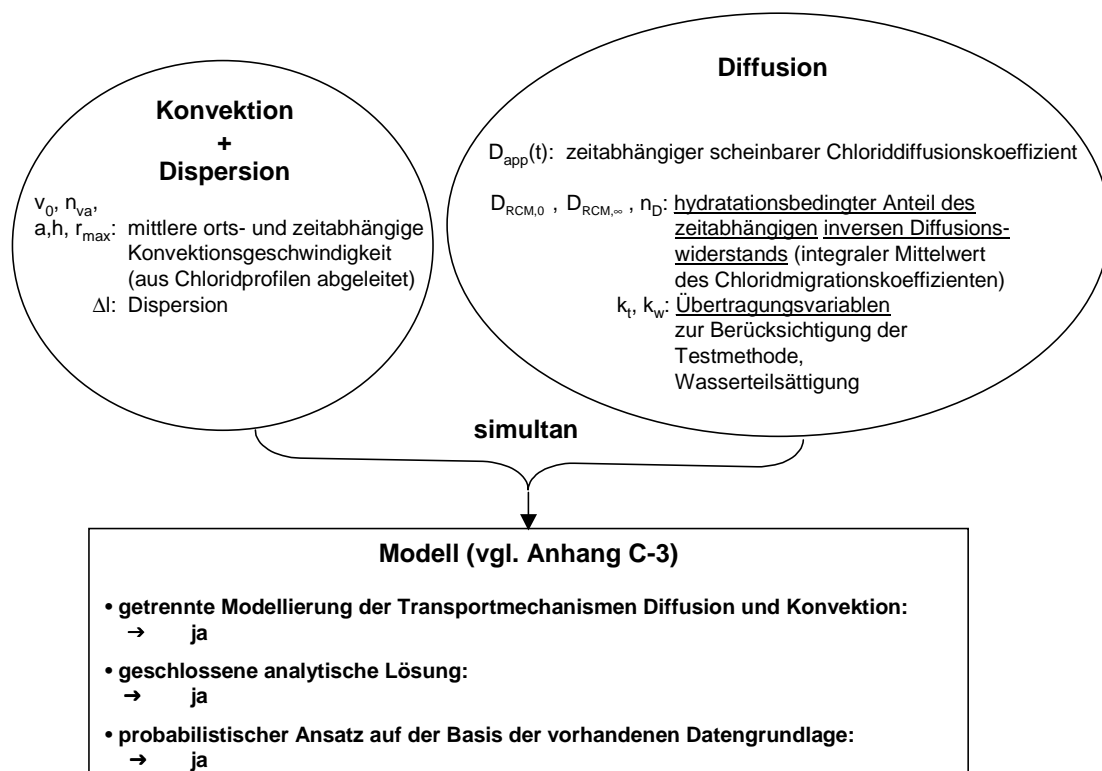


Bild 10: Modellierung von Chloridtransport in verkehrsbedingt mit Spritzwasser beaufschlagtem Beton im Rahmen des Modells von Lay [72], vgl. Anhang C-3

Das Modell ist sehr komplex (vgl. **Gleichung C 5** bis **Gleichung C 15** im **Anhang C-3**) und beinhaltet eine Vielzahl von Variablen, von denen einige nicht direkt quantifiziert werden können. Eine im Rahmen der Lebensdauerberechnung durchgeführte Sensitivitätsanalyse ergab, dass die Variable k_w den größten Einfluss auf das Berechnungsergebnis hat. Diese Variable ist keine physikalische Kenngröße, sondern beschreibt im Wesentlichen die Abweichung der unter Zugrundelegung bestimmter Annahmen berechneten Chloridprofile zu gemessenen Chloridprofilen. Infolgedessen enthält diese Variable neben dem Einfluss der Wasserteilsättigung auf die Diffusion auch weitere Einflüsse, z.B. Temperatur, Chloridbindekapazität.

5 CHLORIDTRANSPORTMECHANISMEN IN VERKEHRSBEDINGT MIT SPRITZWASSER BEAUFSCHLAGTEM BETON

Straßenbauwerke sind im Gegensatz zu Meerwasserbauwerken über das Jahr stark wechselnden, witterungsabhängigen Umgebungsbedingungen ausgesetzt, was weitreichende Folgen für eine physikalische Modellierung des Chloridtransports hat. Eine nähere Betrachtung der Umgebungsbedingungen und der damit verbundenen Chloridtransportmechanismen soll diese Problematik verdeutlichen. Der Chloridtransport kann dabei prinzipiell in den folgenden Formen erfolgen:

- Chloride werden eingetragen (Eintrag)
- Chloride werden umverteilt, sowohl in Richtung der Bewehrung als auch in Richtung der Betonoberfläche (Umverteilung)
- Chloride werden ausgetragen (Austrag).

Die genannten Formen des Chloridtransports können theoretisch auch simultan stattfinden. So führt ein kapillarer Wassereintrag mit chloridhaltigem Wasser zunächst zu einem konvektiven Chlorideintrag. Des Weiteren ist es theoretisch möglich, dass dadurch eine Umverteilung von schon im Beton befindlichen Chloriden erfolgt, indem die ungebundenen Chloride konvektiv weiter in den Beton „hineingeschwemmt“ werden. Eine derartig differenzierte Betrachtung wird aufgrund der damit verbundenen Komplexität jedoch als nicht zielführend angesehen.

Für die folgenden theoretischen Betrachtungen ist die grobe Einteilung des Betons in Abhängigkeit von dessen Feuchtegehalt notwendig, da der Chloridtransport entscheidend davon beeinflusst wird. Zunächst sollen daher die beiden „Grundzustände“ eines nassen und eines trockenen Betons unterschieden werden.

- Nasse Betonoberfläche: Beton, welcher mit einem Wasserfilm benetzt ist und den Gleichgewichtszustand in Hinblick auf die Feuchteverteilung erreicht hat.
- Trockene Betonoberfläche: Beton nach dem Erreichen eines Gleichgewichtszustands in Hinblick auf die Feuchteverteilung, dessen Oberfläche nicht mit einem geschlossenen Wasserfilm benetzt ist. Der absolute Feuchtegehalt des Betons ist dabei von der relativen Luftfeuchte und der Temperatur abhängig. Dieser Gleichgewichtszustand ist für Straßenbauwerke nur ein theoretischer Zustand, da die Feuchtebedingungen in der oberflächennahen Betonrandzone infolge der variierenden Witterungs-

einflüsse (Temperatur, Luftfeuchte, Sonnen- und Windeinwirkung) ständigen Schwankungen unterworfen sind.

Von besonderem Interesse sind die Übergänge zwischen diesen „Grundzuständen“, welche eine kapillare Aufnahme und/oder Abgabe von Wasser bewirken, wodurch der Chloridtransport beeinflusst wird. In der folgenden **Tabelle 6** ist eine Übersicht über die Chloridtransportmechanismen mit ihrer Tiefenwirkung in Abhängigkeit von dem Feuchtezustand des Betons gegeben.

Tabelle 6: Dominierende Chloridtransportmechanismen mit ihrer Tiefenwirkung in Abhängigkeit von dem Feuchtezustand des Betons und dem Chloridangebot

Chloridtransport			Feuchtezustand des Betons					
Form des Chlorid-transport	Richtung	Mechanismus	trocken Betonoberfläche ohne Wasserfilm	trocken/nass trockene Betonoberfläche wird benetzt		nass Betonoberfläche mit Wasserfilm		nass/trocken benetzte Ober- fläche trocknet ab
			unabhängig vom Chlorid- angebot	ohne Chlorid	mit Chlorid	ohne Chlorid	mit Chlorid	unabhängig vom Chlorid- angebot
Chlorideintrag	ins Betoninnere	Diffusion	-	-	ober- flächen- nah	-	ober- flächen- nah	-
		Konvektion (Kapillar- transport)	-	-	bis in größere Tiefenlagen	-	bis in größere Tiefenlagen	-
		Konvektion (Mikroislinsen- pumpe ¹⁾)	-	-	bis in große Tiefenlagen	-	bis in große Tiefenlagen	-
Chloridumverteilung	ins Betoninnere	Diffusion	über die gesamte Betondeckung und darüber hinaus					
		Konvektion (Kapillar- transport)	-	-	-	-	-	-
		Konvektion (Mikroislinsen- pumpe ¹⁾)	-	-	-	-	-	-
	zur Oberfläche	Konvektion (Verdunstung)	-	-	-	-	-	ober- flächen- nah
Diffusion ²⁾		ober- flächen- nah	ober- flächen- nah	-	ober- flächen- nah	-	ober- flächen- nah	
Chlorid- austag	zur Oberfläche	Diffusion (Auslaugen)	-	-	-	ober- flächen- nah	-	-
		Konvektion (Abwaschen)	-	direkt an der Ober- fläche	-	-	-	-

- 1) nur im Zusammenhang mit dem Auftauen des Betons, die Abschätzung der Tiefenwirkung basiert auf der Auswertung von spritzwasserbeaufschlagtem Beton, vgl. **Anhang A** und folgende Anmerkung
- 2) wenn die maximale Chloridkonzentration im Inneren liegt oder Wasser mit einer vergleichsweise geringen Chloridkonzentration an der Oberfläche ansetzt

Anmerkungen zur Mikroislinsenpumpe

Inwieweit die Mikroislinsenpumpe unter Praxisbedingungen einen Beitrag zum Chlorideindringen leistet, ist bisher noch nicht untersucht wurden. Die Auswertung von Untersuchungsergebnissen [148], welche im Rahmen von Auslagerungsversuchen gewonnen wurden, nähren die Vermutung, dass die Mikroislinsenpumpe unter ungünstigen Bedingungen einen signifikanten Beitrag zum Wassereintrag und damit auch zum Chlorideintrag leisten kann, vgl. **Anhang A**.

Auf der Grundlage von Laboruntersuchungen zum Wassereintrag infolge der Mikroislinsenpumpe ist zu erwarten, dass die Reduzierung des Wasserzementwerts sowie der Einsatz von Flugasche und Luftporenbildnern sich günstig auf den Betonwiderstand auswirken. Erste orientierende Laboruntersuchungen zum konvektiven Chlorideintrag durch die Mikroislinsenpumpe bestätigen die Erhöhung der Widerstandsfähigkeit durch den Einsatz von Flugasche und Luftporenbildnern [74]. Da auch die Anzahl der Frost-Tau-Wechsel einen deutlichen Einfluss auf die Feuchteaufnahme hat, vgl. **Bild 6**, Seite 30, ist in Regionen mit großen Temperaturunterschieden innerhalb eines Tages im Winter ein größerer Beitrag der Mikroislinsenpumpe am Chlorideintrag zu erwarten als in Gegenden, in denen die Temperatur nicht so stark variiert. Zu großen Temperaturunterschieden zwischen Nacht und Tag kommt es insbesondere in Gebirgsregionen [27]. Die Anzahl der Frost-Tau-Wechsel (FTW) wird jedoch nicht nur von der geographischen Lage eines Bauteils, sondern auch von der Lage innerhalb des Bauwerks bestimmt. So wurde festgestellt, dass die Anzahl der FTW an Brücken um den Faktor 5 bis 10 variiert, je nachdem, wie geschützt der Beton vor der Witterung war (Kappenbeton, Brückenunterseite) [122].

Anmerkungen zur Chloridumverteilung in Richtung der Betonoberfläche

In **Tabelle 6** ist neben der Umverteilung der Chloride ins Betoninnere auch der Chloridtransport in Richtung der Betonoberfläche aufgeführt. Ist Wasser mit einer vergleichsweise geringen Chloridkonzentration mit dem Beton in Kontakt, so kann zum einen Diffusion von im Beton befindlichen Chloriden in Richtung der Oberfläche stattfinden [65]. Bei intermittierender Wasserbeaufschlagung kann zum anderen auch ein konvektiver Chloridtransport in Richtung der Betonoberfläche durch Verdunstung stattfinden. Während der Verdunstung erfolgt der Phasenwechsel eines Stoffes (hier: Wasser) vom flüssigen in den gasförmigen Zustand, ohne dabei zu sieden. Teilweise wird in diesem Zusammenhang auch der Begriff der Evaporation verwendet [62][35], wobei dieser ursprünglich aus der Meteorologie kommt und das Verdunsten von Wasser über unbewachsenem freien Land oder Wasserflächen bezeichnet.

Folgerungen zum Transport von Chlorid in Beton von Straßenbauwerken

Die **Tabelle 6** zeigt, unter welchen Randbedingungen die jeweiligen Transportmechanismen einen Beitrag zum Chloridtransport leisten. Neben der Tiefenwirkung, welche beim Chlorideintrag direkt in Relation zur Transportgeschwindigkeit steht, hängt der Beitrag der jeweiligen Transportmechanismen zur Chloridverteilung auch von der Wirkungsdauer ab. So ist die Diffusion vergleichsweise langsam, wohingegen die Mikroislinsenpumpe den schnellsten Transportmechanismus darstellt [29]. Die Wirkungsdauer der Mikroislinsenpumpe ist jedoch in Abhängigkeit vorhandener Frost-Tau-Wechsel und des Streusalzangebots zeitlich begrenzt, wohingegen Diffusion im Inneren des Betons über das ganze Jahr stattfindet. Insbesondere

durch den Chloridaustrag weisen Chloridprofile von Straßenbauwerken im Spritzwasserbereich ein Konzentrationsmaximum im Betoninneren auf, vgl. **Bild 11**.

Ein Merkmal der Chloridverteilung bei verkehrsbedingt mit Spritzwasser beaufschlagtem Beton ist die vergleichsweise große Streuung der Chloridkonzentration auch bei scheinbar vergleichbarer Einwirkung und vergleichbarem Beton, z.B. [112]. Allgemein ist zu bedenken, dass der Materialwiderstand von Beton, auch bei gleicher Zusammensetzung, im Vergleich zu anderen Industrieprodukten stärker streut, da es sich um einen nicht homogenen, meistens unter Baustellenbedingungen (witterungsabhängig) hergestellten Baustoff handelt. Ein weiterer wesentlicher Grund für die große, festgestellte Streuung wird auch durch Beanspruchung des Bauteils hervorgerufen, welche je nach Lage auch innerhalb einer Expositionsklasse nach DIN 1045-1:2008 [TR1] stark variieren kann, z.B. infolge der Orientierung und Entfernung der betrachteten Bauteilfläche zur Straße oder inwieweit die Bauteilfläche vor Witterungseinflüssen geschützt ist. Auch die Intensität der Tausalzeinwirkung auf den Beton ist klima- und verkehrsbedingt großen Streuungen unterworfen, vgl. **Bild 11**.

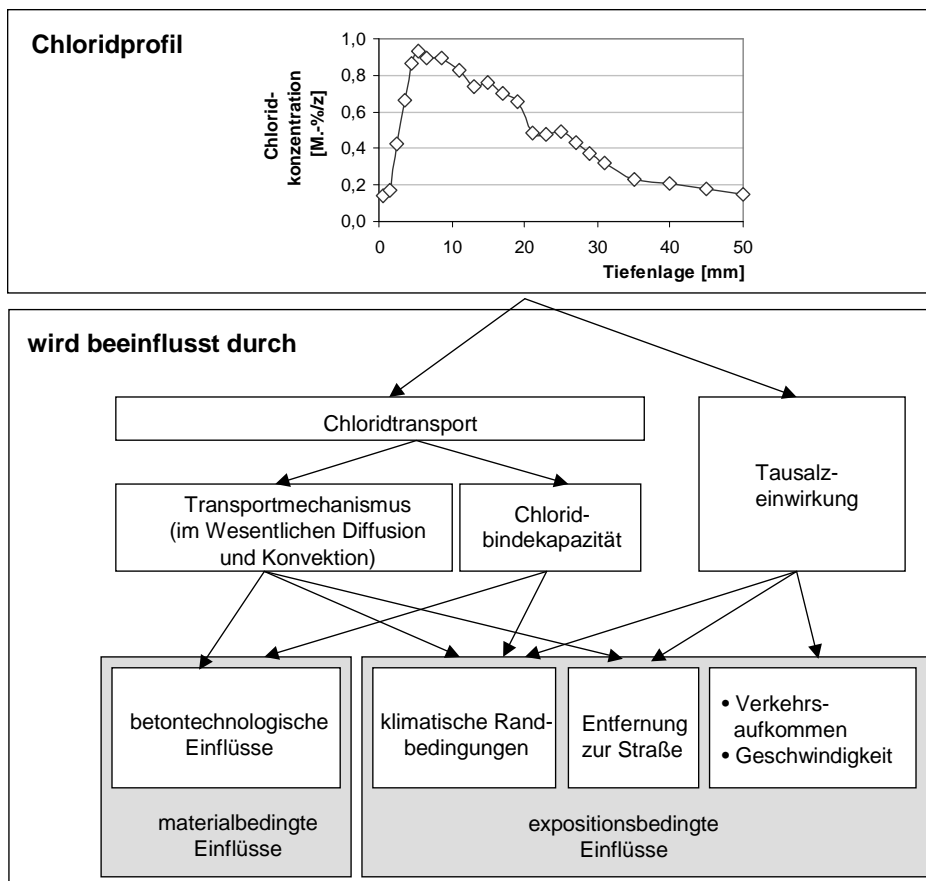


Bild 11: Wesentliche Einflüsse auf das Chloridprofil von Betonen mit verkehrsbedingter Spritzwasserbeaufschlagung

Auch bei gezielten Untersuchungen zum Chlorideintrag an ausgelagerten Probekörpern, bei denen der Beton und die Lagerbedingungen so vergleichbar wie möglich gewählt werden, um material- und expositions-

bedingte Streuungen des Chloridprofils zu minimieren, können die Chloridkonzentrationen u.U. noch erheblich variieren. So wurden aus im Labor hergestellten Betonprobekörpern, welche im gleichen Abstand zur selben Straße über den gleichen Zeitraum ausgelagert wurden, Bohrmehlproben entnommen [78]. Ein Vergleich der daraus abgeleiteten Chloridprofile zeigt eine große Variation, vgl. **Bild 12**.

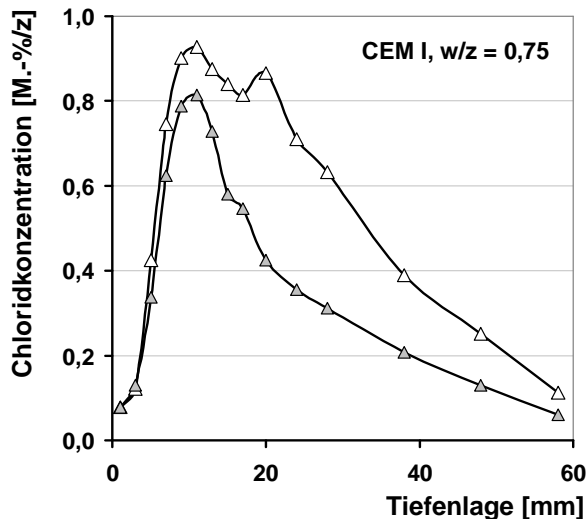


Bild 12: Chloridprofile von Betonprobekörpern, welche ein Jahr im gleichen Abstand zur selben Straße ausgelagert waren [78]

6 BEWERTUNG DER VORGESTELLTEN MODELLE FÜR DIE STRASSENEXPOSITION

Ein Modell zur Beschreibung von Chlorideindringen in Straßenbauwerke sollte die folgenden Anforderungen erfüllen, was durch die meisten für die Straßenexposition vorgestellten Modelle (vgl. **Kapitel 4.2.2** ab Seite 35) nur mit Einschränkungen gilt.

- Anwenderfreundlich

Aus den in **Kapitel 2.1**, Seite 10 beschriebenen Gründen sollte das Modell transparent sein, so dass es auch für Dritte rechnerisch nachvollziehbar ist. Dazu gehört, dass die Berechnung zumindest in ihren wesentlichen Zügen ohne spezielle kommerzielle Programme durchgeführt werden kann (geschlossene analytische Lösung).

Alle vorgestellten Modelle können ohne spezielle kommerzielle Programme zur Prognose von Chloridkonzentrationen verwendet werden. Das Modell nach Ungricht stellt jedoch nur für das erste Jahr nach der Beaufschlagung eine geschlossene analytische Lösung zur Verfügung. Das Modell von Lay, welches eine geschlossene analytische Lösung liefert ist hingegen sehr komplex. Das Verhältnis der Modellkomplexität zur physikalischen Exaktheit ist bei diesem Modell jedoch unvorteilhaft. So enthält eine Variable, welche den größten Einfluss auf das Berechnungsergebnis hat, eine Vielzahl von Einflüssen und ist im Wesentlichen eine Regressionsvariable [72], vgl. **Kapitel 4.2.2.4**, Seite 38.

- **Direkte Quantifizierung der Eingangsvariablen**

Die Eingangsvariablen des Modells sollten so weit wie möglich direkt zu quantifizieren sein.

Dies trifft insbesondere auf das Modell von Lay nicht zu. Im Modell von Ungricht werden Messwerte benötigt, welche nur sehr aufwendig bestimmt werden können. Infolge der schwierigen messtechnischen Erfassung der konvektiven Eindringtiefe des Chlorids, liegen für diese Variable bisher noch keine direkten Messergebnisse vor.

- **Berücksichtigung der Streuung**

Das messbare Ergebnis des Chloridtransports, das Chloridprofil, ist bei Straßenbauwerken einer erheblichen Streuung unterworfen, vgl. **Bild 11**. Durch eine probabilistische Modellierung kann diesen Streuungen Rechnung getragen werden. Dies bedeutet, dass eine breite Datengrundlage für die Quantifizierung der Variablen zur Verfügung stehen sollte. Infolgedessen ist es vorteilhaft, wenn die Variablen durch Untersuchungsmethoden abgeleitet werden können, welche vergleichsweise zerstörungsarm und kostengünstig sind. Eine Quantifizierung von Regressionsvariablen auf der Grundlage von Chloridprofilen bildet daher eine gute Voraussetzung.

Die Quantifizierung der Variablen des AiF-Modells als auch des Modells von Lay erfolgte unter Berücksichtigung der Streuung. Mit diesen Modellen können daher auch probabilistische Berechnungen durchgeführt werden. Die Variablen des Modells von Ungricht sind hingegen noch nicht stochastisch bestimmt worden. In diesem Modell ist die Schaffung einer breiten Datengrundlage, bedingt durch vergleichsweise aufwendige Bestimmung der Eingangsvariablen, schwierig.

Das im Rahmen des AiF-Forschungsprojekts 12525 entwickelte Chlorideindringmodell, welches im Wesentlichen die genannten Anforderungen erfüllt, ist Gegenstand weiterer Betrachtungen im Rahmen der Modellbildung, vgl. auch **Kapitel 7.3** und **Kapitel 7.4**.

7 MODELLBILDUNG

7.1 Vorgehen

Bei Straßenbauwerken sind die am Chloridtransport beteiligten Mechanismen vielfältig und variieren expositionsbedingt stark in ihrer Tiefenwirkung und in ihrer zeitlichen Ausdehnung, vgl. **Tabelle 6**. Eine Modellierung des Chloridtransports, welche alle Mechanismen in adäquater Weise berücksichtigt, wäre infolgedessen sehr komplex. Dabei ist des Weiteren zu beachten, dass die Rolle der Mikroeislinsepumpe am konvektiven Chlorideintrag unter Straßenbedingungen noch nicht ausreichend untersucht wurde. Daher wird eine physikalisch exakte Modellierung dieser Problematik zur Zeit als nicht zielführend angesehen.

Der gegensätzliche Ansatz wäre ein rein empirisches Vorgehen. Beim empirischen Vorgehen werden unter Rückgriff auf Theorien Erfahrungstatsachen (Beobachtungen) erfasst und ausgewertet. Der Leitsatz der empirischen Wissenschaft lautet: „Alle Aussagen müssen an Erfahrungen überprüfbar sein, müssen sich in der Konfrontation mit der Realität überprüfen lassen.“ Mit anderen Worten: „Alle Aussagen einer empirischen Wissenschaft müssen prinzipiell an der Erfahrung scheitern können“, vgl. [95]. Die Validierung des Modells mit unabhängigen Daten ist infolgedessen ein wichtiger Bestandteil einer Modellentwicklung. Da keine Beschreibung eines realen Tatbestandes die Realität in ihrer ganzen Komplexität abbilden kann, muss sich die Beschreibung auf einen relativ kleinen Ausschnitt aus der Wirklichkeit beschränken. Folglich muss immer eine gezielte Selektion der Merkmale des Untersuchungsgegenstands vorgenommen werden (Charakterisierung von relevanten und weniger relevanten Merkmalen), um eine dem Problem angemessene deskriptive Datensammlung zu erheben. Die Extrapolation eines empirischen Modells über den Bereich der verwendeten Datengrundlage hinaus ist ohne weitere Überlegungen zunächst als problematisch anzusehen. Durch Kenntnis der maßgeblichen Mechanismen kann diese Lücke zum Teil wieder geschlossen werden. Dabei ist zu beachten, dass die Vorhersage der zeitabhängigen Entwicklung der Chloridverteilung mit einem physikalischen Modell, welches nicht den maßgeblichen Mechanismen in angemessener Weise Rechnung trägt, auch mit Unsicherheiten behaftet ist.

Da es das Ziel eines jeden Modells sein sollte, die physikalischen Grundsätze so zutreffend wie möglich zu erfassen, wird ein physikalisch/empirischer Modellansatz gewählt. Dies bedeutet, dass ein vereinfachter physikalischer Grundansatz für das zu entwickelnde Modell gesucht wird, welcher den maßgeblichen Transportmechanismus in angemessener Weise berücksichtigt. Da durch die Vernachlässigung der anderen am Chloridtransport beteiligten Mechanismen sich zwangsläufig Abweichungen zwischen dem Grundansatz und der Realität ergeben, muss dieser angepasst werden, was auf empirischer Grundlage erfolgt.

7.2 Physikalischer Grundansatz

Untersuchungen von Betonen aus Straßenbauwerken haben gezeigt, dass die konvektiv eingetragene Chloridmenge über die Expositionsdauer stark abnimmt, [78] vgl. auch **Kapitel 8.3.1.2**, Seite 63. Daher gewinnt mit zunehmender Expositionsdauer die Diffusion immer mehr an Einfluss. Des Weiteren ist es das vorrangige Ziel des gesuchten Modells, die zeitabhängige Entwicklung der Chloridkonzentration in der Tiefenlage der Bewehrung zu berechnen, um eine Prognose der Zuverlässigkeit in Hinblick auf chlorid-induzierte Bewehrungskorrosion zu ermöglichen, vgl. Lebensdauerberechnung in **Kapitel 10** ab Seite 101. Für Bauteile, welche einer Chlorideinwirkung ausgesetzt sind, soll die mittlere Betondeckung der oberflächennahen Bewehrungslage nach DIN 1045-1:2008 [TR1] planmäßig 55 mm betragen. In dieser Tiefenlage ist davon auszugehen, dass der Chloridtransport maßgeblich über Diffusion erfolgt. Aus den genannten Gründen erscheint daher ein vereinfachter physikalischer Ansatz auf der Grundlage des 2. Fick'schen Diffusionsgesetzes als praktikabel. Die Wahl eines Diffusionsansatzes wird auch durch den Verlauf der an Straßenbauwerken ermittelten Chloridprofile bestätigt, welche ab einer bestimmten Tiefenlage eine für Diffusionsvorgänge typische hyperbolische Chloridkonzentrationsverteilung ohne klar definierbare Begrenzung der Eindringtiefe zeigen, vgl. z.B. [112][111][59]. Auch das vorgestellte AiF-Modell fußt auf einem solchen Grundansatz, vgl. **Kapitel 4.2.2.2**, Seite 35.

7.3 Empirischer Ansatz zur Anpassung des physikalischen Grundmodells

Um die Anwendung des Diffusionsansatzes für die Prognose von Chloridprofilen im Beton von Straßenbauwerken zu ermöglichen, erfolgt die Anpassung/Korrektur durch die empirische Beschreibung des nicht-stationären Diffusionskoeffizienten, vgl. **Bild 13**.

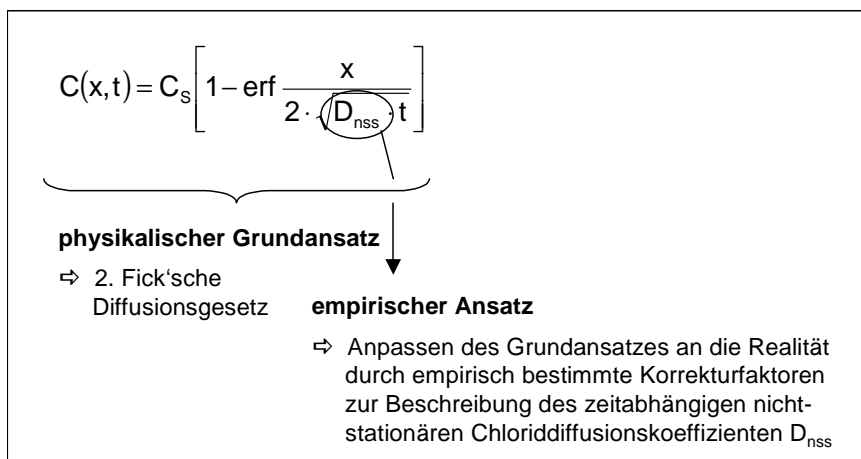


Bild 13: Physikalisch/empirischer Modellansatz zur Beschreibung der tiefen- und zeitabhängigen Chloridkonzentrationen im Beton von Straßenbauwerken

Die Bestimmung des Chloriddiffusionskoeffizienten erfolgt durch die Auswertung von Chloridprofilen in Beton von Straßenbauwerken über ein Kurvenfitting¹. Durch diese Regressionsberechnung wird die Ausgangschloridkonzentration C_s und der Chloriddiffusionskoeffizient unter Berücksichtigung der Expositionsdauer abgeleitet. Der so **durch Kurvenfitting bestimmte Chloriddiffusionskoeffizient wird in dieser Arbeit als effektiver Chloriddiffusionskoeffizient bezeichnet**. Da bei Straßenbauwerken das Chloridprofil auch maßgeblich durch die intermittierende Chlorid- und Wasserbeaufschlagung beeinflusst wird und somit von den Expositionsbedingungen abhängt, stellt der effektive Chloriddiffusionskoeffizient für diese Randbedingungen keine Variable dar, welche ausschließlich den inversen Widerstand des Betons gegenüber einem Chlorideintrag beschreibt. Daher wäre zunächst der Begriff Transportvariable für diese aus Chloridprofilen bestimmte Variable zutreffender gewesen. Da die Bestimmung des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten jedoch auf der Grundlage des 2. Fick'schen Diffusionsgesetzes erfolgt, wurde an dem Begriff des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten festgehalten. Um zu verdeutlichen, dass es sich in diesem Fall um eine Variable handelt, welche nicht ausschließlich von den Materialeigenschaften beeinflusst wird, wird der effektive Chloriddiffusionskoeffizient in diesem Zusammenhang im Index mit einem * gekennzeichnet. Zur Betonung des Umstands, dass diese Variable durch Kurvenfitting von Chloridprofilen bestimmt wird, welche auch von der Exposition beeinflusst werden, wird im Folgenden auch vom effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten gesprochen, welcher aus Chloridprofilen abgeleitet wird oder welcher durch Kurvenfitting bestimmt wird.

Der aus Kurvenfitting abgeleitete effektive Chloriddiffusionskoeffizient von Straßenbauwerken wird sowohl durch die Materialeigenschaften als auch durch die Exposition beeinflusst. Da eine separate Formulierung des materialbedingten Anteils wünschenswert ist, sind in der Vergangenheit Modelle zur Beschreibung des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten entwickelt worden, welche auf eine getrennte Erfassung des materialbedingten Anteils abzielen, vgl. AiF-Modell in **Kapitel 4.2.2.2**, Seite 35 sowie **Anhang C-1**.

Der materialbedingte Anteil des aus Chloridprofilen bestimmten effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten ist im Wesentlichen abhängig von betontechnologischen Eigenschaften und der Chloridbindekapazität. Die betontechnologischen Eigenschaften werden überwiegend durch das Porengefüge beeinflusst, welches dem eindringenden Chlorid durch den geometrischen und den ionogenen Porenverschlusseffekt einen Widerstand entgegensetzt, vgl. **Kapitel 4.1.2.2**, Seite 19. Da das Porengefüge infolge der Hydratation des Betons zeitlichen Änderungen unterworfen ist, muss dieser Anteil zeitabhängig beschrieben werden. In der Literatur sind zur Beschreibung des materialbedingten Anteils unter Berücksichtigung der hydratationsbedingten Änderung Ansätze zu finden, welche auf dem zeitabhängigen Verlauf des Chloridmigrationskoeffizienten fußen [72][112]. Hierbei sind die folgenden Punkte zu beachten:

¹ Auswerten von Chloridprofilen durch Regressionsberechnung. Dazu werden die Wertepaare Chloridkonzentration $C(x,t)$ und die korrespondierende Tiefenlage x mittels Regressionsberechnung durch Minimierung der Abszissenabstandsquadrate ($\sum v_i^2 = \min$) zwischen Messpunkt und Regressionskurve in Übereinstimmung mit dem 2. Fick'schen Diffusionsgesetz zum Untersuchungszeitpunkt t in optimalen funktionalen Zusammenhang gebracht.

- Inwieweit der im Labor bestimmte Chloridmigrationskoeffizient den am Bauwerk vorhandenen hydrationsbedingten Einfluss auf den Chlorideindringwiderstand zutreffend beschreibt, konnte noch nicht geklärt werden. So ergaben am Bauwerk bestimmte Chloridmigrationskoeffizienten z.T. deutlich höhere Werte, als dies unter Berücksichtigung des Betonalters und der Betonzusammensetzung zu erwarten gewesen wäre [98].
- Der zeitabhängige Verlauf des Chloridmigrationskoeffizienten wird sich für Betone mit früher zur Verfügung stehenden Zementen von den Betonen mit heutigen Zementen unterscheiden. Dies ist auf eine immer feinere Aufmahlung des Zementklinkers zurückzuführen, durch welche die Hydratation beschleunigt wird. Die zur Zeit vorliegenden zeitabhängigen Verläufe von Chloridmigrationskoeffizienten stammen von heutigen Betonen, bei welchen der hydrationsbedingte Reduktion rasch abklingt. Bei einem CEM I-Beton findet nach einem Jahr fast keine Änderung des Migrationskoeffizienten mehr statt [72]. Wird der hydrationsbedingte Anteil des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten von alten Betonen auf der Basis von Migrationsversuchsergebnissen heutiger Betonen bestimmt, so ist davon auszugehen, dass dieser unterschätzt wird.
- Um auf der Basis des zeitabhängigen Verlaufs des Chloridmigrationskoeffizienten den hydrationsbedingten Anteil am effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten zu beschreiben, muss der integrale Mittelwert des Migrationskoeffizienten gebildet werden. Die Beschreibung des hydrationsbedingten Anteils ist somit relativ komplex.
- Des Weiteren ist zur vollständigen Beschreibung des materialbedingten Anteils das Chloridbinden separat zu berücksichtigen, da in Folge der Randbedingungen beim Migrationsversuch Chloridbinden nicht in vollem Umfang stattfindet, vgl. **Anhang B-2**.

Infolge der noch nicht ausreichend geklärten Übertragbarkeit des Chloridmigrationskoeffizienten auf den materialbedingten Anteil des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten und der Tatsache, dass die Erfassung dieses Anteils eine sehr komplexe Gleichung nach sich ziehen würde, deren wesentliche Einflussgröße bei Straßenbauwerken empirisch zu bestimmen ist, wurde von einer separaten Beschreibung des materialbedingten Anteils abgesehen.

7.4 Modifizierung des Modells zur Berücksichtigung der oberflächennahen Abweichungen vom 2. Fick'schen Diffusionsgesetz

Durch den physikalisch/empirischen Modellansatz auf der Basis des 2. Fick'schen Diffusionsgesetzes können grundsätzlich Chloridprofile von Beton aus dem Spritzwasserbereich, einerseits ausreichend anwenderfreundlich und andererseits unter Berücksichtigung der Streuung, ausreichend genau beschrieben werden. Durch die intermittierende Wasserbeaufschlagung ist der Feuchtehaushalt in der Betonrandzone ständigen Schwankungen unterworfen [3][112][148]. Dieser oberflächennahe Bereich wird auch als Konvektionszone bezeichnet [109], vgl. **Bild 14**.

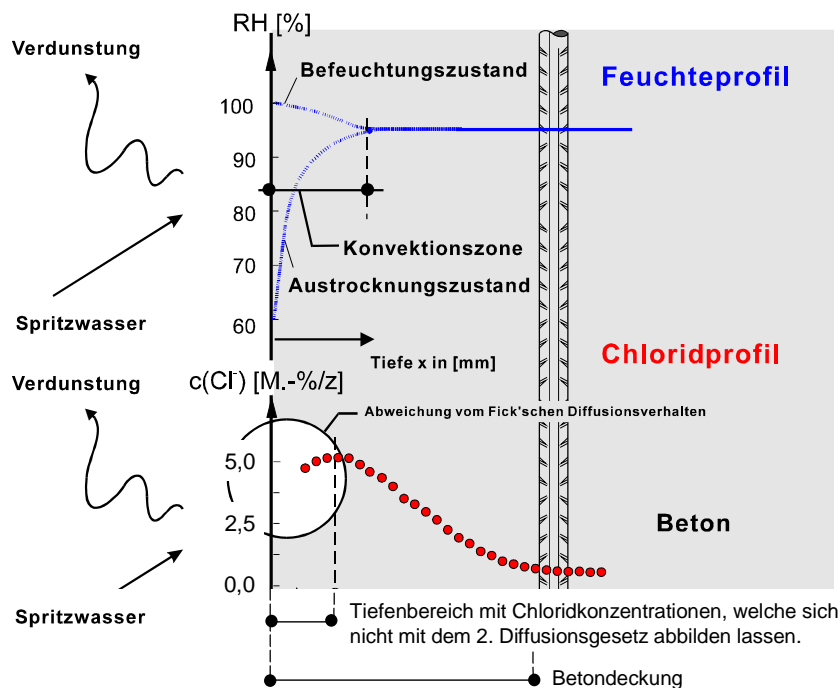


Bild 14: Feuchte- und Chloridprofile, die sich typischerweise bei intermittierender Spritzwasserbeanspruchung einstellen [49]

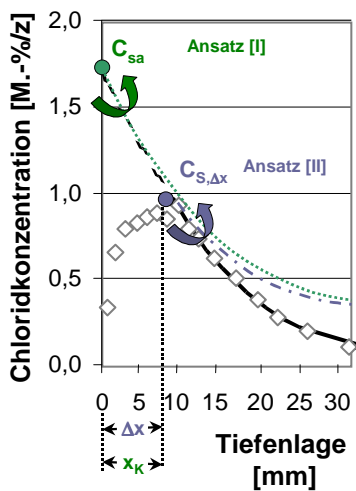
Im Bereich der Konvektionszone können Chloride zum einen in Perioden mit intensiven Niederschlägen ausgewaschen und ausgelaugt werden, was durch die Carbonatisierung des oberflächennahen Randbetons und der damit verbundenen herabgesetzten Chloridbindekapazität begünstigt wird. Zum anderen kann in der darauffolgenden Trocknungsphase durch Verdunstung auch Chlorid in Richtung der Betonoberfläche konvektiv umverteilt werden. Durch diese Mechanismen kann ein Tiefenbereich entstehen, dessen Chloridkonzentrationen sich nicht hinreichend genau mit dem Fick'schen Diffusionsgesetz beschreiben lassen. Ob sich ein derartiger Tiefenbereich ausbildet, hängt insbesondere von der Exposition und damit der Einwirkung ab. Bei Chloridprofilen aus Beton von Straßenbauwerken ist dieser Tiefenbereich im Allgemeinen nur erkennbar, wenn der beprobte Beton sich in unmittelbarer Nähe zur Straße befindet. Ab einem Abstand zum Fahrbahnrand von rd. 2 bis 3 Metern ist damit nicht mehr zu rechnen [112]. Zur Quantifizierung dieser Variablen für Straßenbauwerke wurden 56 Chloridprofile mit einem Konzentrationsmaximum im Inneren ausgewertet (CEM I-Beton, $w/z = 0,45 - 0,6$). Die Auswertung zeigte, dass die Daten stark streuten, was sich auch durch den Variationskoeffizienten ausdrückt, welcher über 100 % ($CoV > 1$) lag [112].

Für die Anwendung eines Diffusionsansatzes zur Prognose der tiefenabhängigen Chloridkonzentration bei Straßenbauwerken bedeutet dies, dass der Tiefenbereich mit Chloridkonzentrationen, welche sich nicht mit dem Diffusionsansatz abbilden lassen, auszuschließen ist. Dies kann durch die zwei im Folgenden erläuterten, unterschiedlich modifizierten Ansätze erfolgen.

- [I] der oben beschriebene oberflächennahe Bereich wird beim Kurvenfitting vernachlässigt und das resultierende Chloridprofil wird bis zur Betonoberfläche extrapoliert, vgl.[89],
(der oberflächennahe Bereich wird im Zusammenhang mit diesem Vorgehen x_K genannt, der mit diesem Ansatz durch Kurvenfitting rechnerisch ermittelte effektive Chlorid-diffusionskoeffizient wird für die folgenden vergleichenden Betrachtungen in Anlehnung an [76] mit D_{F2}^* bezeichnet)
- [II] der oben beschriebene oberflächennahe Bereich wird durch Transformation der x-Achse eliminiert, vgl. [49] und das darauf aufbauende AiF-Modell, **Kapitel 4.2.2.2**, Seite 35
(der oberflächennahe Bereich wird im Zusammenhang mit diesem Vorgehen Δx genannt, der mit diesem Ansatz durch Kurvenfitting rechnerisch ermittelte effektive Chlorid-diffusionskoeffizient wird für die folgenden vergleichenden Betrachtungen in Anlehnung an [49] mit $D_{Eff,C}^*$ bezeichnet)

Durch den Ansatz [I] wird das Chloridprofil über den Tiefenbereich $x \geq x_K$ beschrieben. Die mit diesem Modell berechneten Chloridkonzentrationen im Tiefenbereich $0 \leq x < x_K$ sind nur theoretische Konzentrationen, welche sich durch Extrapolation des Chloridprofils ergeben, vgl. **Bild 15**. Gleiches gilt für die Chloridkonzentration C_{sa} an der Betonoberfläche, welche die Ausgangschloridkonzentration für diesen Modellansatz dargestellt. Diese ist definitionsgemäß zeitunabhängig. Die Tiefenlage in welcher die Ausgangschloridkonzentration angesetzt wird, wird in diesem Zusammenhang auch als Ausgangspunkt x^* bezeichnet. Dieser Ausgangspunkt liegt für den Ansatz [I] bei $x^* = 0$ mm. Werden nun mit diesem Ansatz Chloridprofile zu unterschiedlichen Zeitpunkten berechnet, so drehen sich diese im Wesentlichen um den Ausgangspunkt.

Auch der Ansatz [II] ermöglicht eine Beschreibung des Chloridprofils über den vergleichbaren Tiefenbereich $x \geq \Delta x$. Bedingt durch das Vorgehen wird die Ausgangschloridkonzentration erst in Tiefenlage Δx angesetzt, weshalb sie auch als Ersatzoberflächenkonzentration $C_{S,\Delta x}$ bezeichnet wird. Definitionsgemäß ist diese Konzentration zeitunabhängig. Werden nun mit dem Ansatz Chloridprofile zu unterschiedlichen Zeitpunkten berechnet, so drehen sich diese im Wesentlichen um den Ausgangspunkt, welcher hier Δx ist, vgl. **Bild 15**.



Ansatz [I]:

Vernachlässigen der Chloridkonzentrationen des Tiefenbereichs x_K beim Kurvenfitting, vgl. [89]

$$C(x, t) = C_{sa} \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_{F2}^*(t) \cdot t}} \right]$$

- C_{sa} : durch Extrapolation bestimmte, theoretische Chloridkonzentration an der Oberfläche $x = 0$ mm [M.-%/z]
- $D_{F2}^*(t)$: effektiver Chloriddiffusionskoeffizient zum Zeitpunkt t [mm^2/a]
- x_K : Tiefenbereich, der bedingt durch die Einwirkung vom 2. Fick'schen Diffusionsgesetz abweichende Chloridkonzentrationen zeigt [mm]

Ansatz [II]:

Eliminieren des Tiefenbereichs Δx durch Transformation der x -Achse, vgl. [49]

$$C(x, t) = C_{s,\Delta x} \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x - \Delta x}{2 \cdot \sqrt{D_{\text{eff},C}^*(t) \cdot t}} \right]$$

- $C_{s,\Delta x}$: Ersatzoberflächenkonzentration [M.-%/z]
- $D_{\text{eff},C}^*(t)$: effektiver Chloriddiffusionskoeffizient zum Zeitpunkt t [mm^2/a]
- Δx : Tiefenbereich, der bedingt durch die Einwirkung vom 2. Fick'schen Diffusionsgesetz abweichende Chloridkonzentrationen zeigt [mm]

Bild 15: Umgang mit den in Bezug auf das 2. Fick'schen Diffusionsgesetz abweichenden oberflächennahen Chloridkonzentrationen durch die Ansätze [I] und [II]

Der Unterschied dieser beiden Ansätze [I] und [II] wird insbesondere bei den durch Kurvenfitting bestimmten effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten deutlich. Im Folgenden werden daher die durch Kurvenfitting gemäß beiden Ansätze abgeleiteten effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten gegenübergestellt. Ausgangspunkt dieser Betrachtung ist ein am Bauwerk zum Zeitpunkt $t = 4,6$ a ermitteltes Chloridprofil, vgl. **Bild 16**.

Das Ergebnis des Kurvenfittings zeigt, dass mit beiden Ansätzen das Chloridprofil über die Tiefenlage $x > x_K$ bzw. Δx gut beschrieben werden kann. Die aus dem Kurvenfitting abgeleiteten effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten unterscheiden sich jedoch. Für das gezeigte Beispiel ergibt sich für Ansatz [I] ein rd. 30 % größerer effektiver Chloriddiffusionskoeffizient im Vergleich zu dem von Ansatz [II], vgl. **Bild 16**.

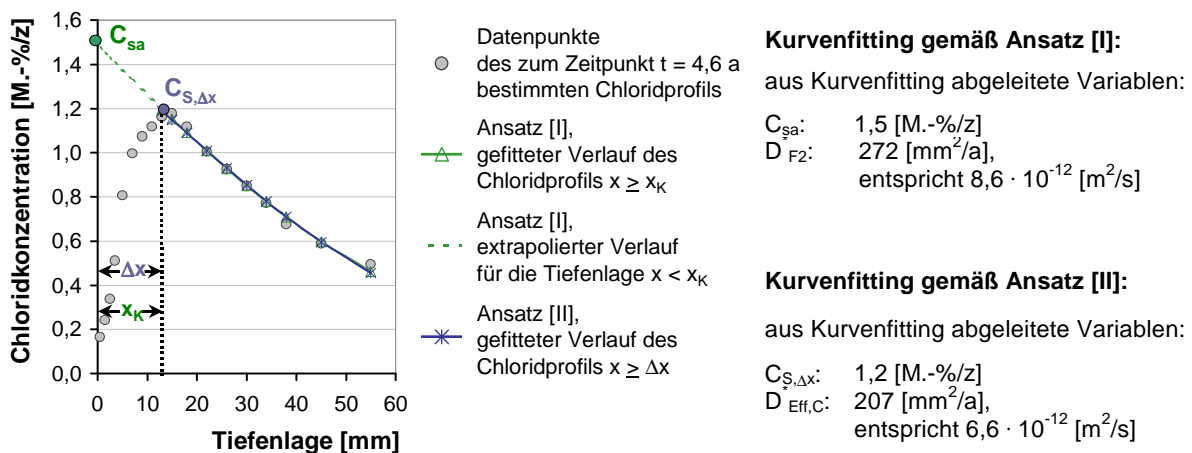


Bild 16: Gegenüberstellung der durch Kurvenfitting nach Ansatz [I] und [II] angepassten Chloridprofile (links) sowie der rechnerisch daraus ermittelten effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten (rechts)

Das folgende Beispiel soll den Einfluss eines veränderlichen Tiefenbereichs x_K bzw. Δx am Chloridprofil auf die aus Chloridprofilen abgeleiteten effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten zeigen. Ausgangspunkt dieses Beispiels ist ein Chloridprofil zum Zeitpunkt t , bei welchem dieser Tiefenbereich variiert wird. Die Chloridkonzentrationen in den Tiefenlage $x \geq x_K$ bzw. Δx bleiben bei allen Chloridprofilen unverändert. Durch Kurvenfitting wurden aus diesen Chloridprofilen die effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten gemäß Ansatz [I] und Ansatz [II] bestimmt, vgl. **Bild 17**.

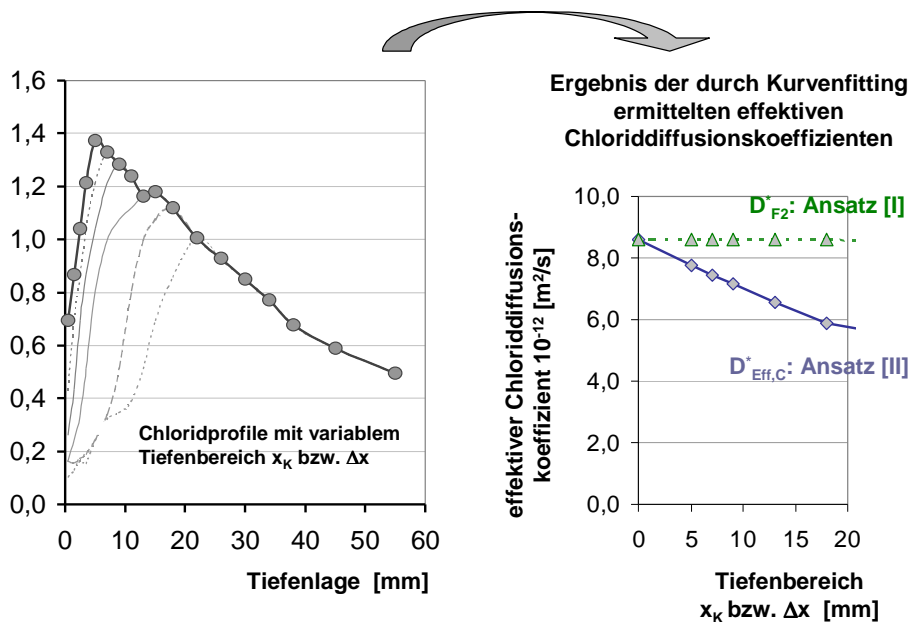


Bild 17: Aus Chloridprofilen mit variablem Tiefenbereich x_K bzw. Δx rechnerisch ermittelte effektive Chloriddiffusionskoeffizienten nach Ansatz [I] und Ansatz [II]

Die aus den Chloridprofilen mit Ansatz [I] rechnerisch ermittelten effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten $D_{F_2}^*$ sind stets größer als $D_{\text{Eff,C}}^*$, welche unter Berücksichtigung von Ansatz [II] ermittelt wurden. Für das gezeigte Beispiel beträgt die maximale Abweichung bezogen auf $D_{F_2}^*$ rd. 45 %. In Abhängigkeit des Tiefenbereichs x_K bzw. Δx variieren die durch Ansatz [III] ermittelten effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten $D_{\text{Eff,C}}^*$ deutlich, vgl. **Bild 17**, rechts. Weitere Betrachtungen sind in den Anhängen **B-4** und **B-5** zu finden.

Folgerung

Der effektive Chloriddiffusionskoeffizient ist idealerweise ein Materialkennwert, welcher den inversen Widerstand des Betons gegenüber Chlorideindringen bei Diffusion beschreibt. Für Straßenbauwerke gilt dies strenggenommen nicht, da durch die empirische Anpassung dieser Variablen auch die Einflüsse der anderen Transportmechanismen auf das Chloridprofil erfasst werden. Bei Chloridprofilen von Beton aus Straßenbauwerken können in Abhängigkeit der Exposition im oberflächennahen Bereich Chloridkonzentrationen vorhanden sein, welche nicht mit dem 2. Fick'schen Diffusionsgesetz beschrieben werden können. Dieser unter Praxisbedingungen stark streuende Tiefenbereich ist folglich bei einer Modellierung auf der Grundlage dieses Gesetzes auszuschließen.

Die durchgeführten Berechnungen zeigen, dass, wenn der Tiefenbereich beim Kurvenfitting vernachlässigt wird (Ansatz [I]), sich die durch Kurvenfitting bestimmten effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten unabhängig vom Tiefenbereich x_K ergeben. Wird der Tiefenbereich durch Transformation der x-Achse eliminiert (Ansatz [III]), ist hingegen der effektive Chloriddiffusionskoeffizient $D_{\text{Eff,C}}^*$ stark von der Ausdehnung des Bereichs Δx abhängig. Für Straßenbauwerke ist dies insbesondere vor dem Hintergrund der festgestellten starken Streuung des sich expositionsabhängig einstellenden Tiefenbereichs Δx als ungünstig zu bewerten, da infolgedessen auch der expositionsbedingte Einfluss auf den effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten verstärkt wird.

Es ist physikalisch nicht begründbar, weshalb der effektive Chloriddiffusionskoeffizient vom sich zufällig einstellenden Tiefenbereich x_K bzw. Δx abhängen sollte. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund zu betrachten, dass diese Variable aus Chloridkonzentrationen in Tiefenlagen $x > x_K$ bzw. Δx abgeleitet wird, in welchen Diffusion der vorherrschende Transportmechanismus ist. Für die Modellierung des Eindringens von Chlorid in Beton von Straßenbauwerke wird daher in der vorliegenden Arbeit der Ansatz [I] verwendet, da dieser der Idealvorstellung vom effektiven Diffusionskoeffizienten als Materialkennwert, welcher unabhängig vom Tiefenbereich x_K bzw. Δx sein sollte, Rechnung trägt.

7.5 Ausgangsgleichung

Zur Beschreibung der tiefen- und zeitabhängigen Entwicklung der Chloridkonzentration für verkehrsbedingt mit Spritzwasser beaufschlagten Beton wurde als Grundansatz das 2. Fick'sche Diffusionsgesetz gewählt, bei welchem der oberflächennahe Tiefenbereich, welcher nicht mit diesem Gesetz abgebildet werden kann, vernachlässigt wird, **Gleichung 13**. Der Ansatz wurde um den Grundchloridgehalt C_i des Betons erweitert, vgl. auch [112][72]. Die empirische Anpassung des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten erfolgt dabei

nach dem Ansatz von Gehlen [49], vgl. **Gleichung C 17** im **Anhang C-4**. Zur Abgrenzung gegenüber anderen Expositionen werden die für Straßenbauwerke bestimmten Regressionsvariablen mit dem Initial R für Road versehen. Aufgrund der zur Verfügung stehenden Daten wurde das Modell im Rahmen dieser Arbeit nur für CEM I-Betone, deren überwiegend vertikal orientierte Bauteiloberflächen im Spritzwasserbereich liegen, ausgewertet. Betrachtungen zur Übertragbarkeit auf andere Randbedingungen werden in **Kapitel 8.3.2.3**, Seite 92 angestellt.

$$C(x, t_{\text{exp}}) = (C_{\text{Sa}} - C_i) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_{\text{Eff,R}}^*(t_{\text{exp}}) \cdot t_{\text{exp}}}} \right] + C_i \quad \text{Gleichung 13}$$

- $C(x, t_{\text{exp}})$: Chloridkonzentration in der Tiefenlage $x > x_K$ nach einer Expositionsdauer t_{exp} bezogen auf den Zementgehalt [M.-%/z]
 x_K : Tiefenbereich, der, durch ggf. intermittierende Chlorideinwirkung bedingt, eine vom 2. Fick'schen Diffusionsgesetz abweichenden Verlauf der Chloridkonzentrationen zeigt [mm]
 C_{Sa} : Chloridkonzentration an der Betonoberfläche bezogen auf den Zementgehalt.
Ist ein Tiefenbereich x_K vorhanden, so ist dies eine theoretische, durch Extrapolation bestimmte Konzentration [M.-%/z]
 C_i : Grundchloridgehalt des Betons bezogen auf den Zementgehalt [M.-%/z]
 x : Tiefenlage, ausgehend von der Betonoberfläche [mm]
 t_{exp} : Expositionsdauer [a], Zeitspanne von der ersten Beaufschlagung bis zum Beobachtungszeitpunkt
erf: Gauss'sche Fehlerfunktion, auch Errorfunktion, vgl. **Gleichung 4**, Seite 18
 $D_{\text{Eff,R}}^*(t_{\text{exp}})$: effektiver Chloriddiffusionskoeffizient von Beton von Straßenbauwerken nach einer Expositionsdauer t_{exp} [mm²/a]

$$D_{\text{Eff,R}}^*(t_{\text{exp}}) = k_R \cdot D_{\text{RCM},0} \cdot k_t \cdot A_R(t_{\text{exp}}) \quad \text{Gleichung 14}$$

- $D_{\text{RCM},0}$: Chloridmigrationskoeffizient nach der RCM (Rapid Chloride Migration)-Methode von wassergesättigtem Beton an definiert hergestellten und vorgelagerten Probekörpern im Alter von 28 d [mm²/a]
 k_t : Testmethodenfaktor, um Abweichungen zwischen Chloridmigrationskoeffizienten, die unter beschleunigten Bedingungen (Rapid Chloride Migration – $D_{\text{RCM},0}$) ermittelt werden, und Diffusionskoeffizienten, die unter natürlichen Bedingungen z.B. im Labor bestimmt werden (Chloride Profiling Method – $D_{\text{CPM},0}$), berücksichtigen zu können [-]
 k_R : Regressionsvariable zur Berücksichtigung von Abweichungen vom effektiven Chlorid-diffusionskoeffizienten im Vergleich zu Einlagerungsversuchen infolge geänderter Randbedingungen, welche Abweichungen vom reinen Diffusionsverhalten oder geänderte Diffusionsgeschwindigkeiten hervorrufen [-]
 $A_R(t_{\text{exp}})$: Altersterm des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten für verkehrsbedingt mit Spritzwasser beaufschlagten Beton [-]

$$A_R(t_{\text{exp}}) = \left(\frac{t_{0,R}}{t_{\text{exp}}} \right)^{a_R} \quad \text{Gleichung 15}$$

- a_R : Exponent zur Berücksichtigung der Zeitabhängigkeit von $D_{\text{Eff,R}}^*(t_{\text{exp}})$, Altersexponent [-]
 $t_{0,R}$: Referenzzeitpunkt [a]

Auf eine separate Modellierung des Temperatureinflusses, wie z.B. bei Meeresbauwerken über die Arrhenius-Gleichung (vgl. **Gleichung C 18** im **Anhang C-4**), wurde hier verzichtet, da davon auszugehen ist, dass der Einfluss der mittleren Temperatur auf den effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten im praxisrelevanten Temperaturbereich vergleichsweise gering ist. Darüber hinaus ist es fraglich, ob der temperaturbedingte Einfluss bei Straßenbauwerken ausreichend genau durch einen solchen Ansatz erfasst werden kann, da z.B. für die Mikroeislinsepumpe insbesondere die Anzahl der aufeinanderfolgenden Frost-Tau-Wechsel relevant ist.

Durch **Gleichung 13** kann somit in der Planungsphase einer Baumaßnahme das Chlorideindringen in den verkehrsbedingt mit Spritzwasser beaufschlagten Bereichen unter Berücksichtigung der in **Tabelle 7** zusammengestellten Variablen prognostiziert werden.

Tabelle 7: Datenherkunft der Variablen zur Prognose von Chloridprofilen von verkehrsbedingt mit Spritzwasser beaufschlagtem Beton nach Gleichung 13

Variable		Beschreibung	Datenherkunft	Quelle
1	C_{Sa}	Chloridoberflächenkonzentration	Auswertung von Chloridprofilen aus vergleichbarer Exposition (Datenbank)	vgl. Kapitel 8.1
2	C_i	Grundchloridgehalt	Auswertung von Chloridprofilen (Datenbank) oder auf der Basis von Analyseergebnissen	vgl. Kapitel 8.2
3	x	Tiefenlage	Wahl in Abhängigkeit von der Aufgabenstellung	
4	$D_{RCM,0}$	Chloridmigrationskoeffizient für ein Probenalter von 28 d	Für eine erste Abschätzung: Versuchsdaten von vergleichbaren Betonen	vgl. z.B. [49][112]
			Im Rahmen einer fundierten Prognose: Prüfergebnis zum Materialwiderstand, Stichwort „Birth Certificate“ [84]	vgl. z.B. [49]
5	$D_{Eff,R}^*$	k_t	Übertragungsfaktoren, die aus der Testmethode für den Chloridmigrationskoeffizienten resultieren	vgl. Kapitel 8.3
6		$t_{0,R}$		
7		Regressionsvariable		
8				
9	t_{exp}	Expositionsdauer	Wahl in Abhängigkeit von der Aufgabenstellung	

Anmerkung zur angesetzten Zeitspanne der Expositionsdauer

Zur Berechnung von Chloridprofilen mit dem 2. Fick’schen Diffusionsgesetz ist in dem Modell die Zeitdauer zu berücksichtigen, in welcher das Chlorid sich umverteilen kann, welche im Folgenden als Expositionsdauer t_{exp} bezeichnet wird. Dies entspricht der Zeitspanne zwischen der ersten Chloridbeaufschlagung t^* und dem betrachteten Zeitpunkt t_i , vgl. **Bild 18**.

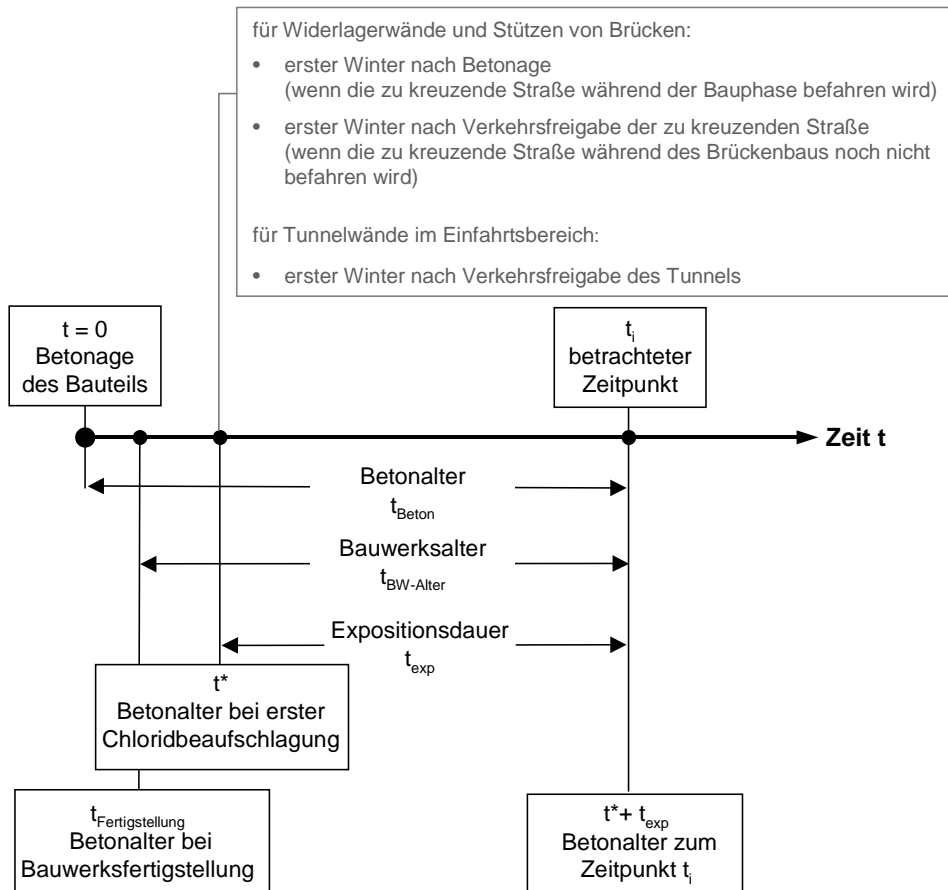


Bild 18: Erläuterungen zum maßgeblichen Zeitraum t_{exp} für die Berechnung von Chlorideindringen in Beton von Straßenbauwerken

Im Rahmen von Einlagerungsversuchen wird üblicherweise das Betonalter angesetzt [TR5][TR12], das, bedingt durch das junge Betonalter bei der Erstbeaufschlagung $t^* = 28$ d, näherungsweise der Expositionsdauer entspricht. Bei Straßenbauwerken hingegen ist der Zeitraum zwischen Betontage und Erstbeaufschlagung und somit auch der Unterschied zwischen Betonalter und Expositionsdauer deutlich ausgeprägter. Dies trifft gerade für größere Baumaßnahmen bedingt durch die lange Bauphase zu.

Wird zur Prognose von Chloridkonzentrationen anstatt der Expositionsdauer das Beton- oder Bauwerksalter angesetzt, weil z.B. das Betonalter bei der ersten Beaufschlagung nicht bekannt ist, so ergeben sich Unterschiede, welche jedoch mit zunehmender Expositionsdauer rasch abnehmen, vgl. **Bild 19**.

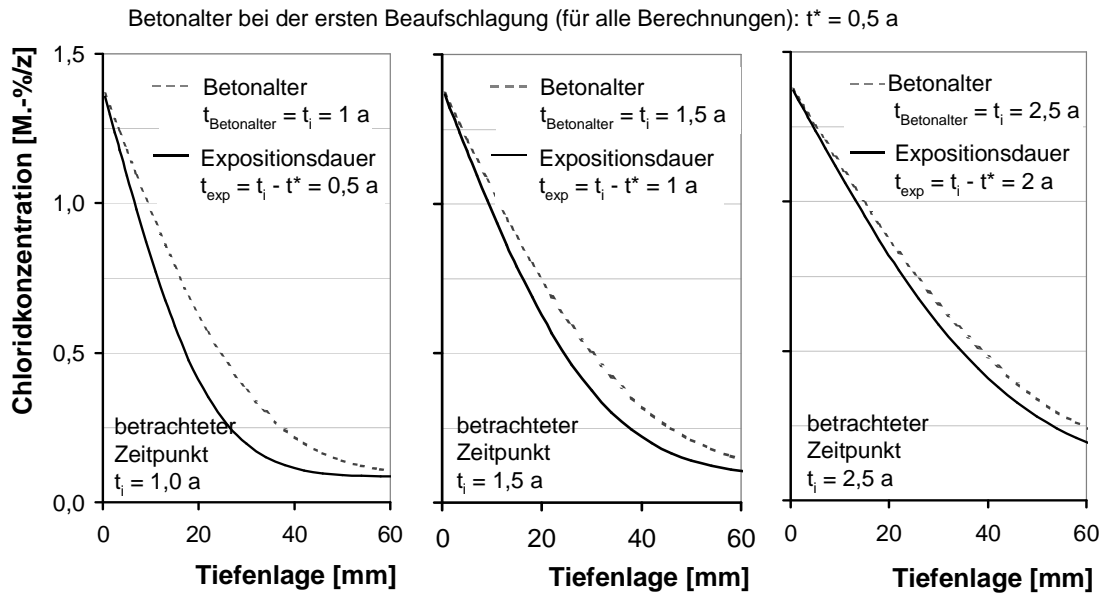


Bild 19: Gegenüberstellung von Chloridprofilen unter Berücksichtigung des Betonalters mit Profilen unter Ansatz der Expositionsdauer

Eine Modifikation des im Rahmen des 2. Fick'schen Diffusionsgesetzes maßgeblichen Zeitraums durch die ausschließliche Berücksichtigung der Zeiträume mit Chloridbeaufschlagung ist nicht sinnvoll, da die Umverteilung der eingetragenen Chloride über Diffusion und somit über die gesamte Expositionsdauer stattfindet.

8 VARIABLE DES MODELLS

8.1 Chloridoberflächenkonzentration

Betrachtungen zur Zeitabhängigkeit

Eine Randbedingung zur Anwendung des 2. Fick'schen Diffusionsgesetzes ist eine über die Zeit konstante Ausgangschloridkonzentration. Im Folgenden werden Untersuchungsergebnisse vorgestellt, welche sich mit der Zeitabhängigkeit der Ausgangschloridkonzentration (je nach Modellansatz C_{Sa} oder $C_{S,\Delta x}$, vgl. **Bild 15**, Seite 51) in Beton von Straßenbauwerken beschäftigen.

Im Rahmen des AiF-Forschungsprojekts 12525 wurden Ersatzoberflächenkonzentrationen $C_{S,\Delta x}$ aus Chloridprofilen von mehreren Bauwerken aus vergleichbarer Lage ausgewertet [112]. Die dabei festgestellte Streuung war sehr groß (Variationskoeffizient $CoV = 0,75$). Die Auswertung ließ keinen Zusammenhang zwischen Ersatzoberflächenkonzentration und Bauwerkalter erkennen, was auch durch weitere Auswertungen bestätigt wird [77]. Da bei der erwähnten Auswertung Chloridprofile von mehreren unterschiedlichen Bauwerken berücksichtigt wurden, wäre es denkbar, dass eine eventuell vorhandene Zeitabhängigkeit durch die starke Streuung der lage- und materialabhängigen Oberflächenkonzentration überdeckt wird. Diesem Aspekt wurde nachgegangen, indem Untersuchungsergebnisse von im Labor hergestellten Betonprobekörpern ausgewertet wurden. Diese Probekörper wurden im gleichen Betonalter entlang einer Straße (gleicher Abstand zum Fahrbahnrand) ausgelagert [78]. So konnte zum einen die Streuung aus der Betonqualität (Zusammensetzung, Nachbehandlung etc.) und zum anderen aus der Einwirkung (Lage zur Straße, Streuintensität, Betonalter bei erster Beaufschlagung etc.) entscheidend reduziert werden. Aber auch hier konnte kein Anstieg der Chloridoberflächenkonzentration über die Expositionsdauer festgestellt werden, vgl. **Bild 20**.

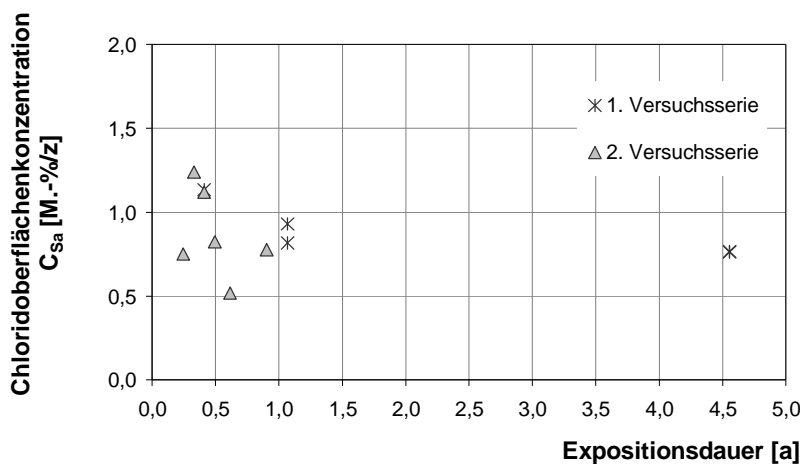


Bild 20: Chloridoberflächenkonzentration, bestimmt an Betonprobekörpern zweier Versuchsserien, welche im gleichen Abstand zum Fahrbahnrand in unmittelbarer Nähe zueinander (gleicher Straßenabschnitt) ausgelagert wurden [78]

Auf der Grundlage der vorgestellten Untersuchungsergebnisse ist die Annahme einer im Mittel zeitunabhängigen Chloridoberflächenkonzentration als zutreffend anzusehen, welche in Abhängigkeit der Jahreszeiten Schwankungen aufweisen kann.

Betrachtungen zur Lageabhängigkeit der Oberflächenkonzentration

Die Chloridoberflächenkonzentration hängt maßgeblich von der Expositionsbedingung und damit von der Lage zur Straße ab. In diesem Zusammenhang spielt auch die Verkehrsbelastung, die Verkehrszusammensetzung und die Fahrgeschwindigkeit eine Rolle. Neben dieser expositionsbedingten Abhängigkeit beeinflusst auch die Betonzusammensetzung (insbesondere die Bindemittelart) diese Variable. Infolge der höheren Chloridbindekapazität ist bei Betonen mit Hüttensand und Flugasche mit einer höheren Chloridoberflächenkonzentration im Vergleich zu einem CEM I-Beton zu rechnen.

In [112] wurde die Ersatzoberflächenkonzentration $C_{S,\Delta x}$ durch die Auswertung von Chloridprofilen in Abhängigkeit der Lage der jeweiligen Betonoberfläche zur Straße quantifiziert. Dabei wurde hauptsächlich auf Chloridprofile zurückgegriffen, welche von Infrastrukturbauwerken aus dem innerstädtischen Bereich stammen. Es wurde davon ausgegangen, dass diese Bauwerke mit CEM I-Beton und Wasserzementwerten in einer Bandbreite von $w/z = 0,45$ bis $w/z = 0,6$ hergestellt wurden. Das Ergebnis dieser Auswertung ist eine lageabhängige Beschreibung des Mittelwerts der Ersatzoberflächenkonzentration für CEM I-Betone, vgl. **Gleichung C 2** im **Anhang C-1**. Die Streuung der Variablen wird über den Ansatz einer Lognormalverteilung mit einem Variationskoeffizienten von $CoV = 0,75$ berücksichtigt.

Eine derartige lageabhängige Auswertung liegt für die extrapolierte Oberflächenkonzentration C_{Sa} jedoch nicht vor. Um einen ersten Eingangswert für die Variable zu erhalten, wurde aus einem Datensatz, welcher 26 Chloridprofile umfasste, eine Näherungslösung entwickelt, um von der lageabhängig beschriebenen Ersatzoberflächenkonzentration $C_{S,\Delta x}$ auf die extrapolierte Oberflächenkonzentration C_{Sa} schließen zu können. Durch die Auswertung von Chloridprofilen von Straßenbauwerken gemäß Ansatz [I] und Ansatz [II] wurden die folgenden Variablen bestimmt: Δx , C_{Sa}^{KF} , $C_{S,\Delta x}^{KF}$. Die Initialen KF sollen in diesem Kontext verdeutlichen, dass es sich um Variablen handelt, welche durch Kurvenfitting ermittelt wurden. Der Zusammenhang zwischen der extrapolierten Oberflächenkonzentration C_{Sa}^{KF} und der Ersatzoberflächenkonzentration $C_{S,\Delta x}^{KF}$ wurde auf der Basis des Strahlensatzes unter Berücksichtigung einer „theoretischen Chlorideindringtiefe“, welche aus einer Regressionsberechnung abgeleitet wurde, beschrieben. Da das gefittete Chloridprofil im oberflächennahen Bereich, bedingt durch den hyperbolischen Verlauf, stärker abfällt als durch den gewählten linearen Ansatz berücksichtigt, wurde ein Korrekturfaktor eingeführt. Das Ergebnis ist eine Näherungslösung zur Berechnung der extrapolierten Chloridoberflächenkonzentration, welche im Folgenden als C_{Sa}^b bezeichnet wird. Die Gegenüberstellung der aus Chloridprofilen abgeleiteten Oberflächenkonzentration C_{Sa}^{KF} zu der berechneten Chloridoberflächenkonzentration C_{Sa}^b zeigt, dass sich diese Näherungslösung für eine erste Abschätzung eignet, vgl. **Bild 21**.

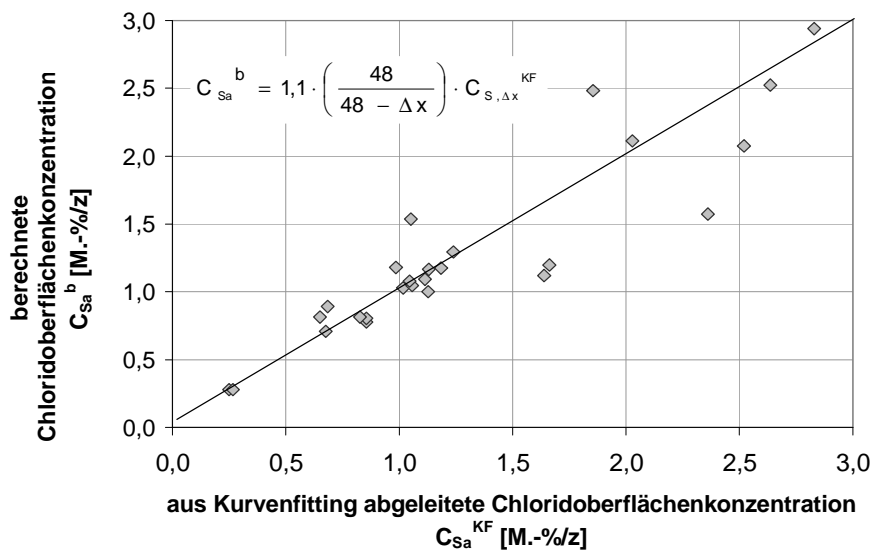


Bild 21: Gegenüberstellung der durch Kurvenfitting abgeleiteten Chloridoberflächenkonzentrationen mit den berechneten Chloridoberflächenkonzentrationen

Bei bekanntem Tiefenbereich Δx und bekannter Ersatzoberflächenkonzentration $C_{S,\Delta x}$ kann somit in erster Näherung hinreichend genau auf die Oberflächenkonzentration C_{Sa} geschlossen werden. Der Tiefenbereich Δx wurde in der Literatur [112], welcher auch die lageabhängige Beschreibung von $C_{S,\Delta x}$ entnommen wurde, im Mittel mit $\Delta x = 9$ mm angegeben. Bei der Auswertung wurden jedoch nur Chloridprofile berücksichtigt, welche ein Konzentrationsmaximum im Inneren, also einen Tiefenbereich Δx aufwiesen. Die im Bericht dargestellten Daten zur Demonstration der Lageabhängigkeit von Δx zeigen, dass auch viele Chloridprofile ohne Tiefenbereich Δx vorhanden waren, vgl. **Bild 22**. Da für die Auswertung der lageabhängigen Beschreibung von $C_{S,\Delta x}$ Chloridprofile mit und ohne Tiefenbereich Δx einbezogen wurden, muss für die Übertragung von $C_{S,\Delta x}$ - auf C_{Sa} - Konzentrationen der mittlere Tiefenbereich Δx , welcher bei rd. 5 mm liegt, unter Beachtung aller Chloridprofile des Spritzwasserbereichs angesetzt werden. Infolgedessen ergibt sich für die Spritzwasserexposition ein Übertragungsfaktor von 1,27, mit welchem die nach **Gleichung C 2** im **Anhang C-1** berechneten Chloridkonzentrationen zu multiplizieren sind.

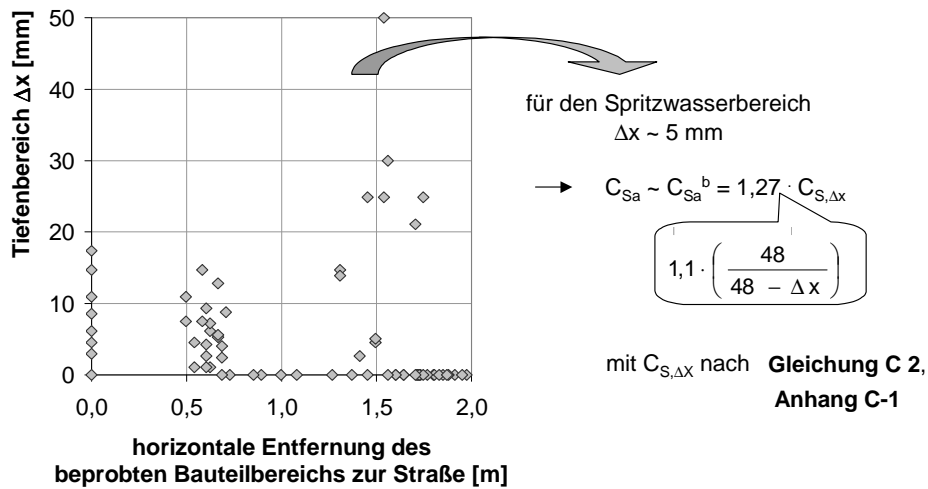


Bild 22: Lageabhängige, aus Chloridprofilen abgeleitete Tiefenbereiche Δx nach [112] und daraus abgeleiteter Übertragungsfaktor für die Umrechnung von $C_{\text{S},\Delta x}$ auf C_{Sa}

8.2 Grundchloridgehalt

Normgemäß hergestellter Beton enthält einen geringen Gehalt Chlorid. Dieser Chloridgehalt kann als gleichmäßig verteilt über die Bauteiltiefe angenommen werden. Der in Summe in den Betonausgangsstoffen enthaltene Chloridgehalt wurde von Lay unabhängig von der Betonzusammensetzung durch die Analyse von beprobten Bauwerksbetonen quantifiziert [72]. Die Auswertung ergab, dass sich der Grundchloridgehalt C_i gut durch eine Lognormalverteilung mit einem Mittelwert von $m = 0,055 \text{ M.-%/z}$ und einer Standardabweichung von $s = 0,028 \text{ M.-%/z}$ beschreiben lässt.

8.3 Effektiver Chloriddiffusionskoeffizient für verkehrsbedingt mit Spritzwasser beaufschlagten Beton

8.3.1 Einfluss der Exposition auf den aus Chloridprofilen abgeleiteten effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten

8.3.1.1 Allgemein

Der effektive Chloriddiffusionskoeffizient des Modells wird aus Chloridprofilen von Beton aus Straßenbauwerken empirisch abgeleitet. Durch die empirische Beschreibung des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten werden die modellierungsbedingten Abweichungen erfasst und somit der physikalische Grundansatz des Diffusionsmodells an die Realität für Beton von Straßenbauwerken angepasst. Dieser rechnerisch ermittelte effektive Chloriddiffusionskoeffizient D_{Eff}^* enthält infolgedessen eine Vielzahl von Einflüssen.

Um den rechnerisch ermittelten effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten von Beton aus Straßenbauwerken besser deuten zu können, folgen theoretische Überlegungen zu den Einflüssen und deren Auswirkung auf diese Variable. Neben allgemeinen Einflüssen wie z.B. untersuchungstechnische Einflüsse bei der Erstellung des Chloridprofils und Beschaffenheit der Betonrandzone ist insbesondere der Einfluss der Chloridtransportvorgänge unter Straßenbedingungen auf den effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten von Interesse. Des Weiteren wird noch der Einfluss der Carbonatisierung, der eines höheren Betonalters bei der ersten Chloridbeaufschlagung sowie der Einfluss der Zusammensetzung des Tausalz auf den effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten behandelt. Im **Anhang D** sind Betrachtungen zur Auswirkung von materialbedingten und untersuchungstechnischen Einflüssen auf den effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten zusammengestellt. Werden diese Einflüsse nicht separat erfasst, so führen sie bei der Auswertung von Chloridprofilen im Wesentlichen zur Erhöhung der Streuung des am gemessenen Chloridprofil bestimmten effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten.

Die Transportvorgänge von Chlorid in Beton, welcher verkehrsbedingt mit Spritzwasser beaufschlagt wird, werden maßgeblich durch die jahreszeitlich bedingte Einwirkungscharakteristik auf den Beton bestimmt. Im Wesentlichen setzt sich die Einwirkung aus einer intermittierenden Chloridbeaufschlagung in der Winterphase und einer intermittierenden Wasserbeaufschlagung während des restlichen Jahres zusammen. Beide Phasen beeinflussen das Chloridprofil und damit den daraus abgeleiteten effektiven Diffusionskoeffizienten D_{Eff}^* , was im Folgenden näher zu untersuchen ist.

Die jahreszeitlich bedingte Einwirkung führt dabei in den oberflächennahen Bereichen überwiegend zu konvektiven Chloridein- und austragen. Aber auch bei der über das Jahr stattfindenden Diffusion ist zu beachten, dass infolge des beschränkten Chloridangebots in der beaufschlagungsfreien Zeit und der nicht vollständigen Wassersättigung des Betons das Chloridprofil und damit der effektive Chloriddiffusionskoeffizient beeinflusst wird, vgl. **Tabelle 8**.

Tabelle 8: Im Zusammenhang mit dem Chloridtransport untersuchte Einflüsse auf den effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten D_{Eff}^*

Von den Jahreszeiten abhängige Einflüsse			
Jahreszeit	Einwirkung wird geprägt durch . . .	Infolge der Einwirkung kommt es im Wesentlichen zu . . .	siehe
Winter	intermittierende Chloridbeaufschlagung	einem konvektiven Chlorideintrag	Kapitel 8.3.1.2
Frühling/ Sommer/ Herbst	intermittierende Wasserbeaufschlagung	einem Chloridaustrag bzw. einer Umverteilung von Chloriden in Richtung der Betonoberflächen	Kapitel 8.3.1.3
		einer Umverteilung von Chloriden in das Betoninnere (Diffusion mit beschränktem Chloridangebot)	Kapitel 8.3.1.4
Weitgehend von den Jahreszeiten unabhängige Einflüsse			
Einfluss eines nicht vollständig wassergesättigten Betons auf die Diffusion			Kapitel 8.3.1.5

Bei den folgenden Betrachtungen wird vor allem der Unterschied des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten infolge einer verkehrsbedingten Spritzwasserbeaufschlagung im Vergleich zu einer ständigen Chloridbeaufschlagung (z.B. Einlagerungsversuch, Unterwasserbereich bei Meerwasserbauwerken) herausgearbeitet, da das 2. Fick'sche Diffusionsgesetz für diesen Bereich seine physikalische Gültigkeit hat.

8.3.1.2 Konvektiver Chlorideintrag

Die konvektiv eingetragene Chloridmenge in Beton von Straßenbauwerken ist für eine gegebene Betonzusammensetzung im Wesentlichen abhängig von

- der Lage des Bauteils zur Straße und
- der Expositionsdauer.

Lage des Bauteils zur Straße

Ein konvektiver Chlorideintrag ist immer an einen Wassereintrag gekoppelt, weshalb das Wasserangebot an der Betonoberfläche im Winter eine Rolle spielt und damit wiederum die Benetzungshäufigkeit. Mit kleiner werdendem Abstand zum Fahrbahnrand nimmt die Benetzungshäufigkeit des Betons von Straßenbauwerken mit chloridhaltigem Wasser zu, wodurch der Wasserfilm an der Oberfläche seltener abreißt, was längere effektive Saugzeiten und dementsprechend größere Eindringtiefen nach sich zieht. Bei der Mikroeislinsepumpe erhöht eine größere Benetzungshäufigkeit die Wahrscheinlichkeit, dass während des Auftauens des Betons externes Wasser zur Verfügung steht, wodurch ein Wassereintrag durch diesen Mechanismus erst ermöglicht wird.

Expositionsdauer

Die konvektiv eingetragene Chloridmenge in Beton von Straßenbauwerken nimmt über die Expositionsdauer stark ab. Untersuchungen haben gezeigt, dass Chloride vornehmlich in den ersten Wintern eingetragen werden. Danach war nur noch ein sehr verhaltener Anstieg der eingetragenen Chloridmenge feststellbar [78]. Die Untersuchungen, aus welchen diese Aussage abgeleitet wurde, wurden an Betonen mit vergleichsweise kurzer Expositionsdauer ($t_{\text{exp}} < 5$ a) durchgeführt. Ergebnisse eines anderen Forschungsvorhabens [59], in dem ältere Verkehrsbauwerke mit einer Expositionsdauer von 35 Jahre untersucht wurden, bestätigen die untergeordnete Rolle des Chlorideintrags bei älteren Bauwerken. Im Rahmen der Untersuchung wurde an zwei Stützen jeweils ein tiefenabhängiges Chloridprofil im Oktober (vor der hauptsächlichen Chloridbeaufschlagung) und ein weiteres Mal im Mai (nach der Chloridbeaufschlagung) erstellt. Die beiden Untersuchungsbereiche an einer Stütze wurden dabei so dicht wie möglich zueinander gewählt. In beiden Fällen war der aus den Chloridprofilen abgeleitete Gesamtchloridgehalt nach der Beaufschlagungsphase (zum späteren Zeitpunkt) geringer als vor der Beaufschlagung, vgl. **Bild 23**. Auch wenn der Grund für die verhältnismäßig deutliche Abweichung der Chloridprofile der Nordstütze nicht ohne weitere Informationen zu klären ist, macht das Ergebnis dieser Untersuchung deutlich, dass der konvektive Chlorideintrag eines Winters für die beprobten Stützen von untergeordneter Bedeutung ist. Auch auf der Basis weiterer Untersuchungen an 24 bis 40 Jahre alten Brücken [59], welche im Abstand von 5 Jahren zweimal beprobt wurden, wurde geschlussfolgert, dass der Chlorideintrag innerhalb der 5 Jahre nicht signifikant war.

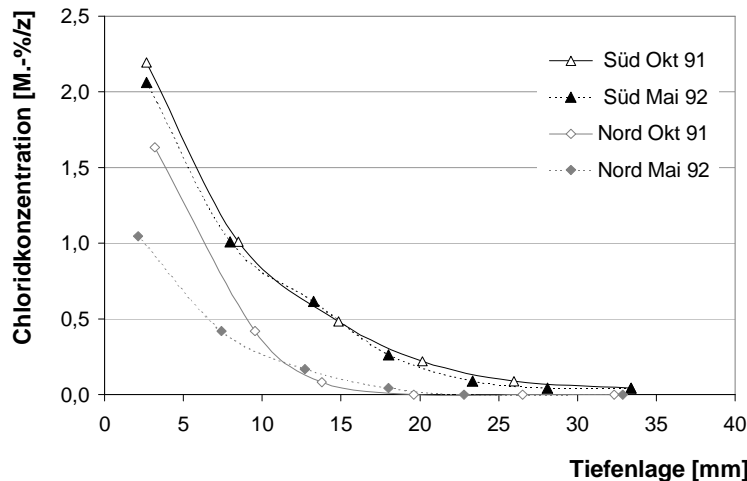


Bild 23: Chloridprofile von einer rd. 35 Jahre alten Stütze, die beiden tiefenabhängigen Bohrmehlentnahmen erfolgten aus unmittelbar benachbarten Bereichen

Die eingetragene Chloridmenge kann auf der Grundlage der ausgeführten Überlegungen im Wesentlichen als eine exponentiell abfallende Funktion über die Expositionsdauer beschrieben werden, welche jahreszeitlichen Schwankungen ausgesetzt ist, vgl. **Bild 24**.

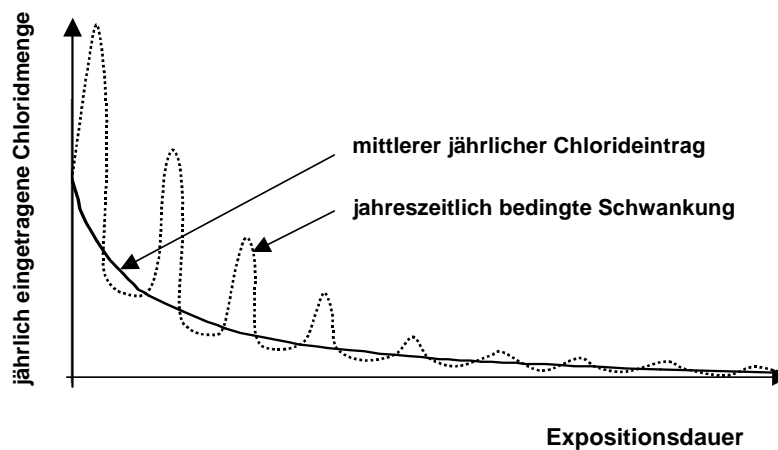


Bild 24: Schematischer Verlauf der jährlich eingetragenen Chloridmenge über die Expositionsdauer

Einfluss des mittleren konvektiven Chlorideintrags auf den aus Chloridprofilen ermittelten effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten

Erfolgt ein konvektiver Chlorideintrag in jungen Beton, gelangt im Vergleich zum diffusionsgesteuerten Chlorideintrag in kurzer Zeit eine große Chloridmenge in den Beton. Wird das in Folge des konvektiven Chlorideintrags sich ergebende Chloridprofil („Konvektion“ in **Bild 25**) nun mit einem Diffusionsansatz beschrieben, ergibt sich ein im oberflächennahen Bereich flacheres Chloridprofil als bei reiner Diffusion (Vergleich gefittetes Chloridprofil „Konvektion“ mit Chloridprofil „Diffusion“ in **Bild 25**). Der sich aus dem gefitteten Chloridprofil rechnerisch ergebende effektive Chloriddiffusionskoeffizient D_{EF}^* ist infolgedessen größer als der des entsprechenden Chloridprofils infolge reiner Diffusion.

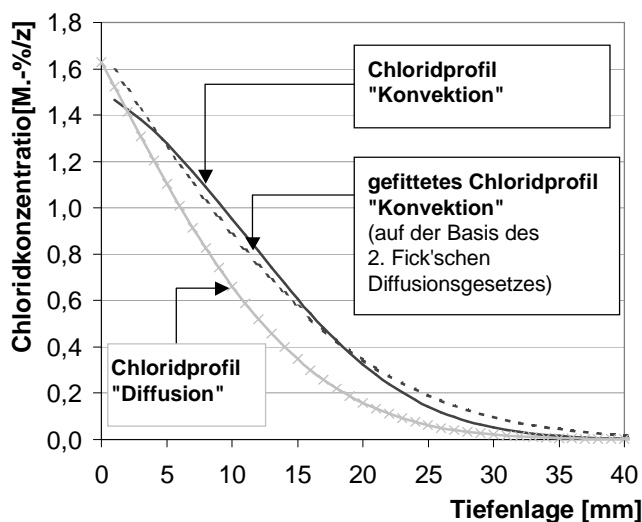


Bild 25: Einfluss der Konvektion auf das Chloridprofil

Findet der Weitertransport der Chloride ausschließlich über Diffusion statt, so konvergiert der effektive Chloriddiffusionskoeffizient D_{Eff}^* des durch Konvektion und Diffusion geprägten Chloridprofils mit zunehmender Expositionsdauer gegen den effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten für Diffusion. Dies bedeutet, dass der effektive Chloriddiffusionskoeffizient des durch Konvektion und Diffusion geprägten Chloridprofils über das Alter stärker abfällt als der effektive Chloriddiffusionskoeffizient von ausschließlich durch Diffusion geprägten Profilen. Findet der Weitertransport der Chloride mit einer reduzierten Diffusionsgeschwindigkeit statt, so verstärkt sich dieser Effekt durch die unterschiedlichen Transportgeschwindigkeiten des Chlorids im jungen Betonalter im Vergleich zu später.

Das folgende Beispiel soll den beschriebenen Einfluss verdeutlichen. Es wurden Chloridprofile unter Berücksichtigung von Konvektion und Diffusion in Abhängigkeit der Expositionsdauer nach Lay berechnet, welche als Ausgangsprofile bezeichnet werden, vgl. **Gleichung C 5** im **Anhang C-3**. Der in diesem Modell anzusetzende scheinbare Chloriddiffusionskoeffizient D_{app} wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit identisch mit $D_{\text{Eff,C}}$ nach Gehlen gewählt, vgl. **Gleichung C 17** im **Anhang C-4**. Mit den Ausgangsprofilen wurde im Folgenden ein Kurvenfitting auf der Basis des 2. Fick'schen Diffusionsgesetzes durchgeführt, vgl. **Bild 26** links. Die durch dieses Vorgehen berechneten effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten D_{Eff}^* wurden über die Expositionsdauer im doppellogarithmischen Maßstab aufgetragen und den effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten nach Gehlen $D_{\text{Eff,C}}$ gegenübergestellt, deren zeitabhängiger Verlauf aus überwiegend durch Diffusion geprägten Chloridprofilen abgeleitet wurde. Der Vergleich zeigt, dass die effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten D_{Eff}^* infolge Konvektion und Diffusion stets über denen infolge Diffusion $D_{\text{Eff,C}}$ liegen. Der Unterschied wird mit zunehmender Expositionsdauer geringer, wodurch sich eine ausgeprägtere Altersabhängigkeit des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten der durch Konvektion und Diffusion geprägten Chloridprofile ergibt, vgl. **Bild 26** rechts obere Gerade.

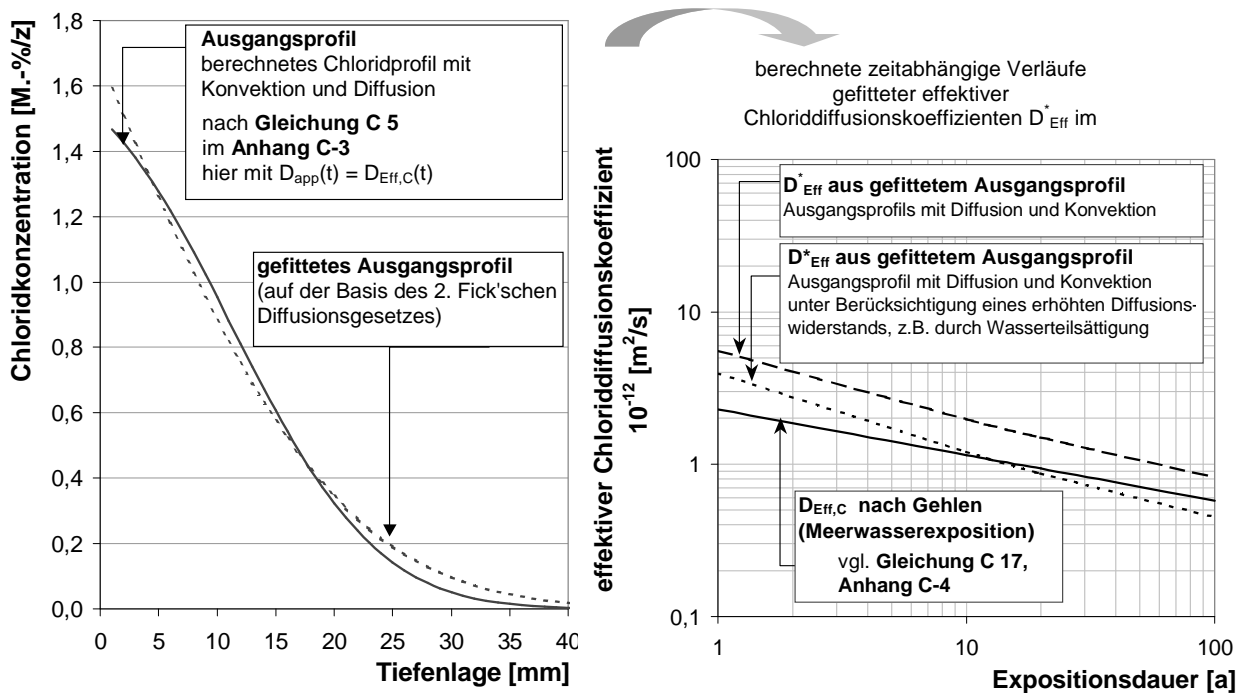


Bild 26: Gegenüberstellung der aus Kurvenfitting abgeleiteten effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten D_{Eff}^* auf der Basis von Chloridprofilen, welche durch Konvektion und Diffusion geprägt sind, mit dem effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten nach Gehlen $D_{Eff,C}$

Um den Einfluss einer reduzierten Diffusionsgeschwindigkeit beim Weitertransport der konvektiv eingebrachten Chloride z.B. durch Wasserteilsättigung zu simulieren, wurde der Diffusionskoeffizient exemplarisch halbiert. Der sich aus dieser Annahme ergebende zeitabhängige Verlauf des berechneten effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten D_{Eff}^* zeigt erwartungsgemäß ein ausgeprägteres Alterungsverhalten, vgl. **Bild 26** rechts.

Einfluss von jahreszeitlich bedingten Schwankungen auf den effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten

In der Winterzeit ist davon auszugehen, dass konvektive Chlorideinträge mehrmals in relativ kurzen Abständen stattfinden können. Um die Auswirkung eines in kurzen Zeitabständen wiederkehrenden konvektiven Chlorideintrags auf das Chloridprofil zu untersuchen, wurden Untersuchungsergebnisse von Hong et al [64] ausgewertet. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde die Auswirkung einer zyklischen Chloridbeanspruchung auf Chloridprofile untersucht. Ein Zyklus bestand aus einer Beaufschlagungsphase (6 h), in der die Probekörper in eine 1-molare NaCl-Lösung eingetaucht wurden und einer sich anschließenden Trocknungsphase. Während der Trocknungsphase wurden die Probekörper bei rd. 50 % relativer Luftfeuchte über unterschiedliche Zeiträume gelagert (18 h \rightarrow Eintageszyklus bzw. 66 h \rightarrow Dreitagezyklus). Nach ausgesuchter Zyklenanzahl (1, 4, 9, 16, 25) wurde nach der Trocknungsphase an den Proben tiefenabhängig der Chloridgehalt bestimmt. Die Expositionsdauer wird im Rahmen der Laborversuche als Auslagerungszeit bezeichnet.

Mit zunehmender Zyklusanzahl kommt es zur oberflächennahen Anreicherung von Chloriden, welche schnell die auf der Basis von Tang [135] berechnete Chloridsättigungskonzentration (für einen vergleichbaren Beton ohne Silikastaub rd. 2,6 M.-%/z) überschreiten, vgl. **Bild 27**.

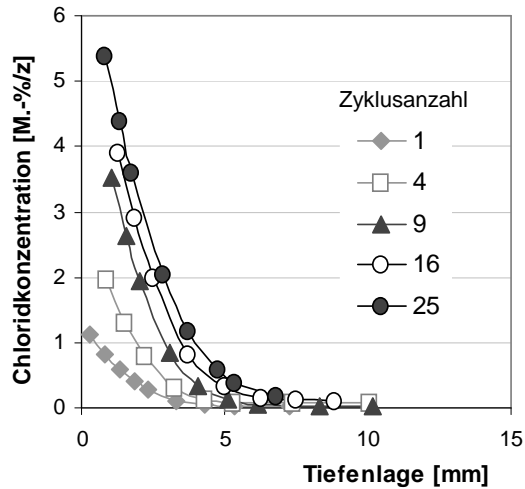


Bild 27: Gefittete Chloridprofile der zyklisch (Dreitageszyklus) mit Chlorid beaufschlagten Probekörper (CEM II/B-S mit SF, $(w/z)_{eq} = 0,4$) [64]

Die festgestellte Chloridanreicherung ist mit einem über die Zeit deutlichen Anstieg der Oberflächenkonzentration verbunden, der mit dem 2. Fick'schen Diffusionsgesetz nicht abgebildet werden kann. Wird diese Tatsache vernachlässigt, so ergeben sich bei der Berechnung des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten Abweichungen. Durch den deutlichen Anstieg der Chloridoberflächenkonzentration ergeben sich rechnerisch geringere effektive Chloriddiffusionskoeffizienten D_{Eff}^* als bei ständiger Chlorideinwirkung, was durch die Auswertung der Chloridprofile bestätigt werden konnte, vgl.

Bild 28.

Ein signifikanter Einfluss des Beaufschlagungszykluses (Dauer der Trocknung 18 h oder 66 h) auf den aus Chloridprofilen abgeleiteten effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten ist nicht erkennbar, vgl.

Bild 28. Die Gegenüberstellung zeigt, dass die effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten der zyklisch beaufschlagten Probekörper um einen Faktor von rd. 2,5 geringer sind als die entsprechenden effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten, welche im Rahmen von Einlagerungsversuchen bestimmt und extrapoliert wurden.

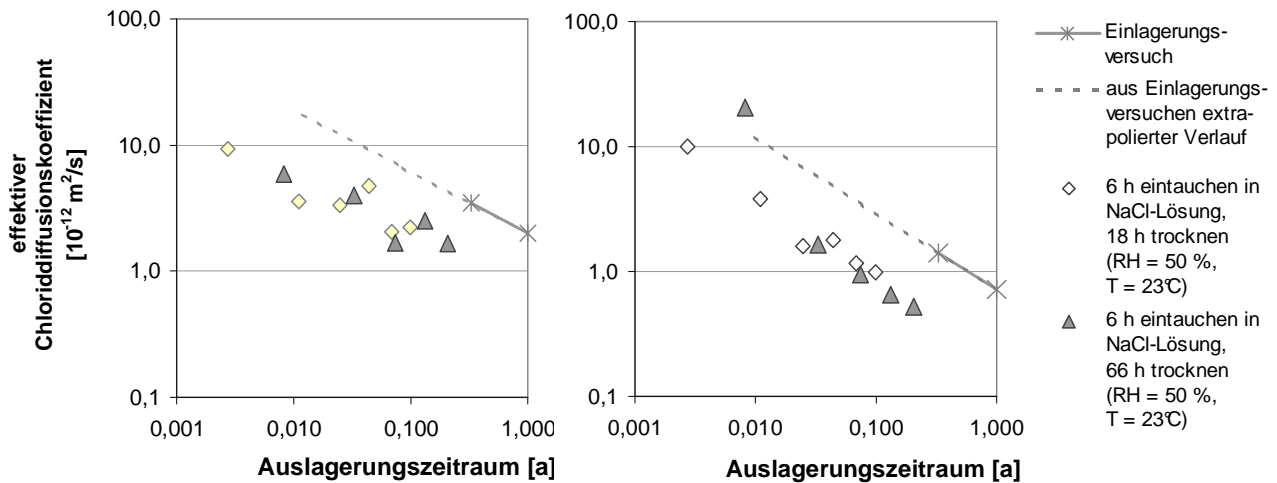


Bild 28: Gegenüberstellung der effektiven Diffusionskoeffizienten von intermittierend beaufschlagten und eingelagerten Probekörpern [64]

links: CEM II/B-S, $w/z = 0,4$; rechts: CEM II/B-S mit 8 % SF, $(w/z)_{eq} = 0,4$

Die extreme Anreicherung von Chloriden im oberflächennahen Bereich wird im Wesentlichen durch die wiederholte Beaufschlagung mit Chlorid hervorgerufen, welche dort zu einer Übersättigung führt. Des Weiteren findet während der Trocknungsphase durch Verdunsten ein konvektiver Rücktransport von Chloriden zur Betonoberfläche statt (Chloridkonzentrationen wurden im Anschluss an die Trocknungsphase bestimmt).

Infolgedessen ist zu erwarten, dass es bei wiederholten konvektiven Chlorideinträgen, wie sie bei Straßenbauwerken während der Wintermonate möglich sind, zu einer temporären Erhöhung der Oberflächenkonzentration über die Gleichgewichtskonzentration kommt. Da Straßenbauwerke niederschlagsbedingt außerhalb der Wintermonate einer intermittierenden Wasserbeaufschlagung ausgesetzt sind, wird durch den damit verbundenen Chloridaustrag diese Überhöhung z.T. wieder abgebaut, vgl. auch das folgende **Kapitel 8.3.1.3**. Die Chloridanreicherung im oberflächennahen Bereich ist umso ausgeprägter zu erwarten, je kleiner die Beaufschlagungsintervalle und je geringer die Auswaschungseffekte sind.

8.3.1.3 Chloridaustrag

Durch eine Wasserbeaufschlagung können oberflächennah Chloride aus dem Beton entfernt werden. Bei Straßenbauwerken sind üblicherweise Niederschläge ursächlich für diesen Vorgang. Infolgedessen kann sich auch der Tiefenbereich x_K ausbilden, deren Chloridkonzentrationen sich nicht mit dem Diffusionsgesetz abbilden lassen, vgl. **Bild 14** auf Seite 49. Untersuchungsergebnisse haben gezeigt, dass sich dieser bei Chloridprofilen von Beton aus Straßenbauwerken erst ab der zweiten Streuperiode deutlich abzeichnet, [78]. Der Chloridaustrag kann prinzipiell über Diffusion oder Konvektion erfolgen.

Chloridaustrag über Diffusion

Wenn ein zuvor mit Chloriden beaufschlagtes Bauteil über einen längeren Zeitraum Kontakt mit chloridfreiem Wasser hat, findet ein diffusionsgesteuertes Auslaugen von Chloriden in das Wasser statt. Im Folgenden werden Untersuchungen ausgewertet, bei denen zuvor mit Chlorid beaufschlagte Probekörper über unterschiedliche Zeiträume in destilliertem Wasser gelagert wurden [65]. Bei den untersuchten Betonen (CEM II/B-S, $w/z = 0,3$ und $0,4$, mit und ohne Zugabe von Silikastaub SF) erfolgte das Auslaugen ausschließlich oberflächennah. Die Tiefenwirkung des Auslaugvorgangs und damit die ausgetragene Chloridmenge reduzierte sich dabei mit zunehmender Dichtheit des Betons.

Durch das oberflächennahe Auslaugen von Chlorid werden die oberflächennahen Konzentrationen deutlich reduziert. Infolgedessen wird das Chloridprofil im oberflächennahen Bereich flacher, vgl. **Bild 29** links. Die damit einhergehende Reduktion der Ausgangschloridkonzentration C_{Sa} kann durch das auf dem 2. Fick'schen Diffusionsgesetz beruhenden Modell nicht abgebildet werden. Wird diese Tatsache vernachlässigt, so ergeben sich bei der Bestimmung des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten D_{Eff}^* der durch Auslaugung geprägten Chloridprofile infolge der flachen Steigung im oberflächennahen Bereich rechnerisch höhere D_{Eff}^* -Werte. Das Ergebnis der ausgewerteten Versuchsdaten bestätigt dies, vgl. **Bild 29** rechts. Der Anstieg des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten D_{Eff}^* über die Expositionsdauer ist konträr zur Entwicklung des effektiven Diffusionskoeffizienten von Probekörpern, welche ständig in chloridhaltiger Lösung lagern (linearer Abfall des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten über die Zeit im doppellogarithmischen Maßstab).

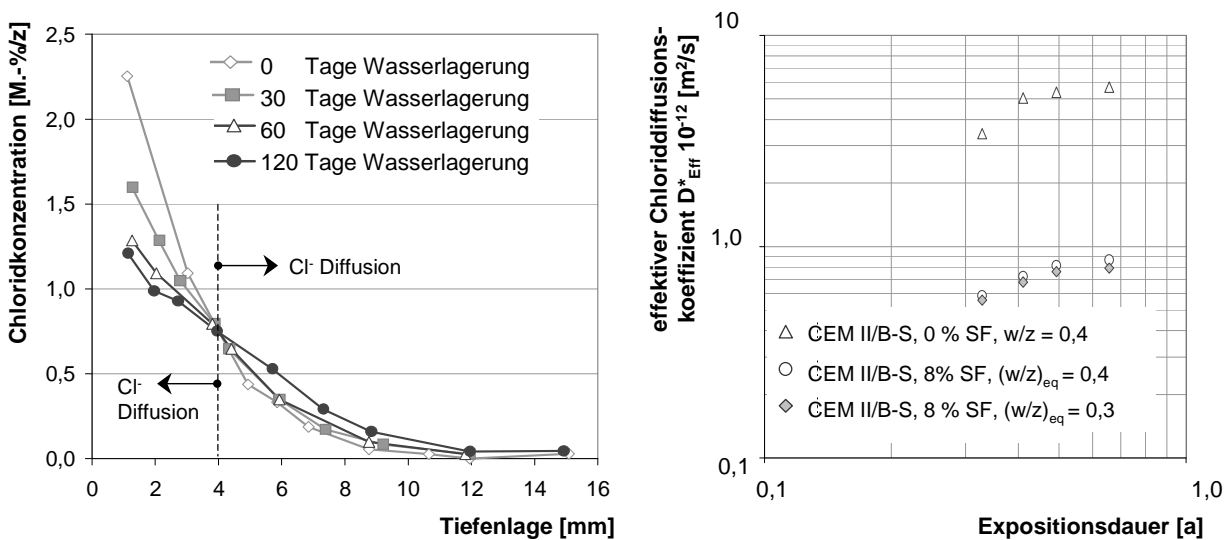


Bild 29: Veränderung des Chloridprofils durch Wasserlagerung (CEM II/B-S mit 8 % SF, $(w/z)_{\text{eq}} = 0,3$) (links) sowie die daraus abgeleiteten Chloriddiffusionskoeffizienten (rechts) [65]

Ein nennenswerter Einfluss durch diffusionsgesteuertes Auslaugen von Chloriden auf das tiefenabhängige Konzentrationsprofil ist nur über Bauteilflächen zu erwarten, auf denen chloridfreies Wasser über einen längeren Zeitraum einwirken und das ausgelaugte Chlorid dann auch abtransportiert werden kann. Bei Verkehrsbauwerken sind diese Randbedingungen im Allgemeinen nicht gegeben, weshalb das diffusionsgesteuerte Auslaugen beim Chloridaustrag nur eine untergeordnete Rolle spielt.

Chloridaustrag über Konvektion

Bei vertikal orientierten Bauteilflächen im Spritzwasserbereich von Verkehrsbauwerken, erfolgt der Austrag überwiegend über Abwaschen des in der Verdunstungsphase zur Betonoberfläche transportierten Chlorids. In Rahmen von Untersuchungen (Hong et al [65]) wurden zuvor mit Chlorid beaufschlagte Betonprobekörper einer zyklischen Beaufschlagung mit destilliertem Wasser unterzogen. Nach der Trocknungsphase ausgesuchter Zyklen (4, 9 und 25) wurde der Chloridgehalt tiefenabhängig analysiert. Analog zur vorher vorgestellten Auswertung der ständig im Wasser eingelagerten Probekörper nimmt der Chloridgehalt im oberflächennahen Bereich mit zunehmender Zeit und damit zunehmender Zyklenanzahl ab, wodurch das Chloridprofil flacher wird, vgl. **Bild 30** links. Die damit einhergehende Reduktion der Steigung im oberflächennahen Bereich des Chloridprofils führt auch hier zu einem Anstieg der rechnerisch ermittelten effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten D_{Eff}^* , vgl. **Bild 30** rechts.

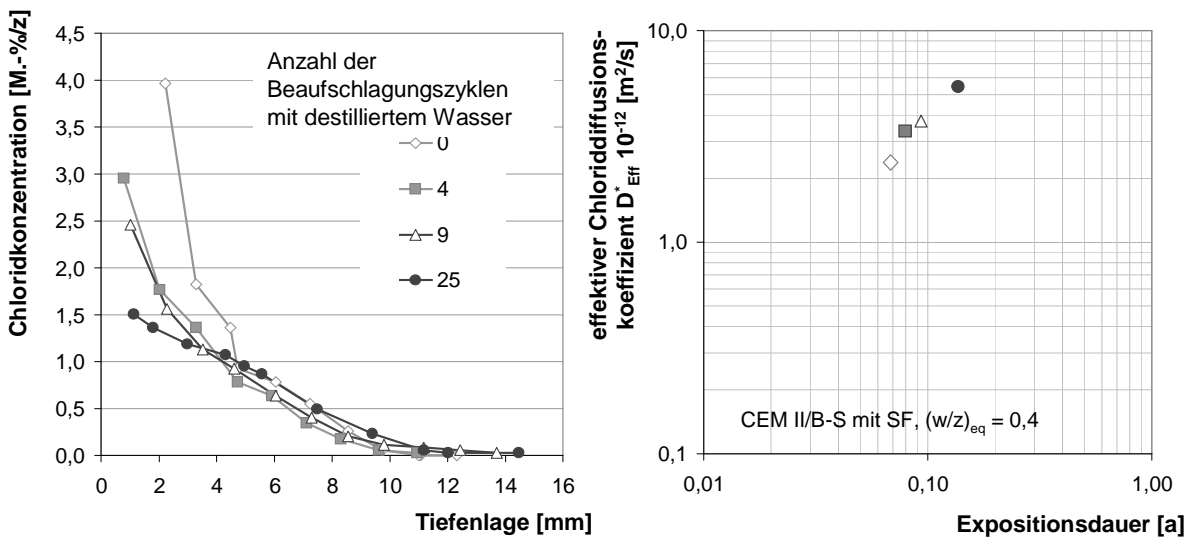


Bild 30: Veränderung des Chloridprofils durch zyklische Beaufschlagung mit destilliertem Wasser (links) und daraus abgeleitete effektive Chloriddiffusionskoeffizienten (rechts) [65]

Die sich durch die zyklische Beaufschlagung mit destilliertem Wasser ergebenden Chloridprofile weisen kein Konzentrationsmaximum im Betoninneren auf und somit auch keinen Tiefenbereich x_K , welcher sich bei Chloridprofilen von Beton aus dem Spritzwasserbereich im Allgemeinen ab der zweiten Streuperiode abzeichnet. Ein Grund, dass sich dieser Tiefenbereich an den Probekörpern nicht abzeichnet, kann das Auslaugen von OH^- -Ionen aus der Betonrandzone sein, welche durch die Einlagerung der Probekörper in destilliertem Wasser zu erwarten ist. Infolgedessen kommt es zu einer Erhöhung der Chloridbindekapazität, wodurch in diesem Bereich weniger Chloride ausgetragen werden [143]. Unter Praxisbedingungen begünstigt mit zunehmender Expositionsdauer auch die Carbonatisierung des oberflächennahen Randbereichs die Ausbildung eines Tiefenbereichs x_K . Da infolge der Carbonatisierung die Chloridbindekapazität des Betons nahezu vollständig verloren geht, was die Effektivität des Chloridaustrags erhöht, vgl. **Kapitel 4.1.5**, Seite 31.

Inwieweit diese unter Laborbedingungen beobachteten Einflüsse auf den effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten bei Beton von Straßenbauwerken zum Tragen kommen, sollen die folgenden Untersuchungsergebnisse zeigen. Entlang einer Straße in Schweden wurden Probekörper ausgelagert und während des ersten Jahres mehrmals beprobt [78]. Die über die Chloridprofile ermittelten Gesamtchloridgehalte nehmen in der Zeit ohne Chlorideinwirkung („beaufschlagungsfreie Zeit“) erwartungsgemäß ab, vgl. **Bild 31**.

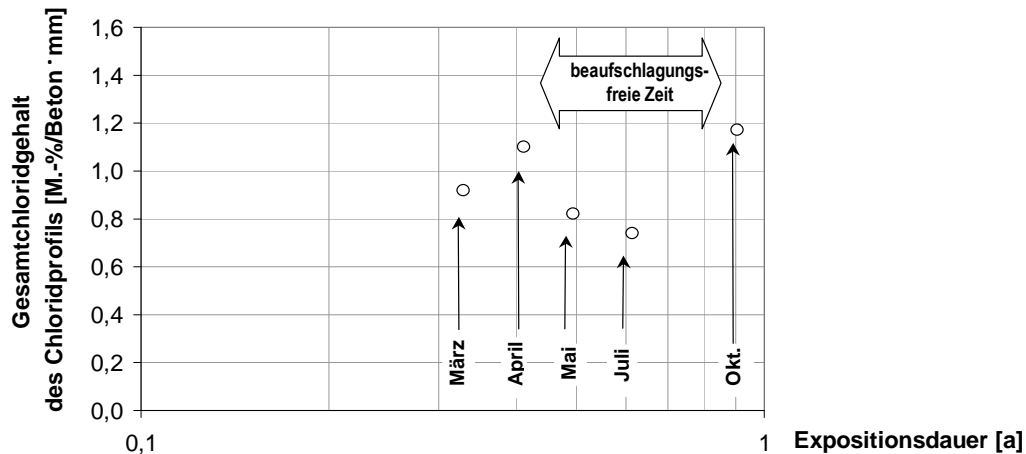


Bild 31: Abnahme des Gesamtchloridgehalts bei ausgelagerten Probekörpern im ersten Jahr der Auslagerung (CEM I, w/z = 0,4) [78]

Infolge des Chloridaustrags aus dem oberflächennahen Randbereich ist zu erwarten, dass die zeitabhängige Reduktion des aus Chloridprofilen abgeleiteten effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten D_{Eff}^* in dieser Zeit sehr verhalten stattfindet oder sogar ein Anstieg erfolgt. Dieser Effekt konnte durch die Auswertung von Chloridprofilen bestätigt werden, vgl. **Bild 32**.

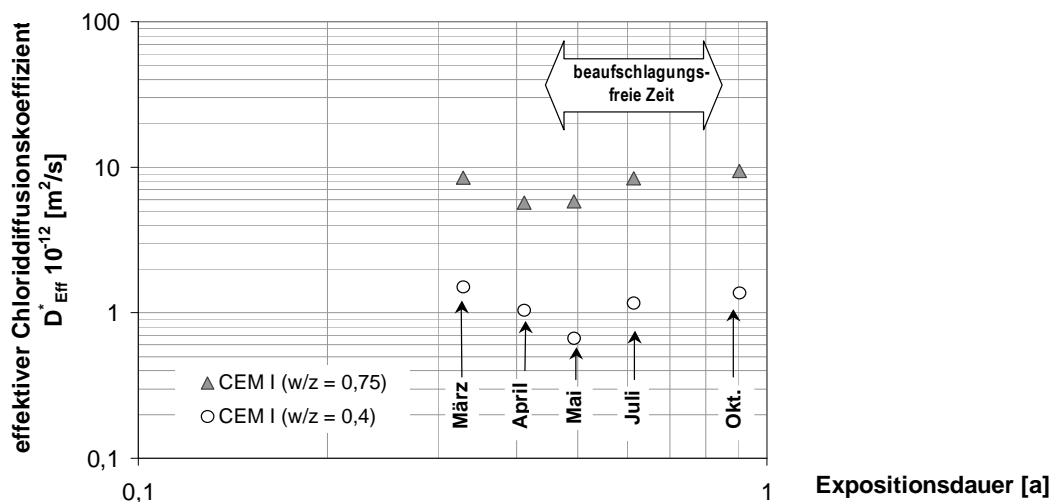


Bild 32: Aus Chloridprofilen abgeleitete effektive Chloriddiffusionskoeffizienten von an Straßen ausgelagerten Betonprobekörpern [78]

Da die jahreszeitbedingte Einwirkung die Chloridoberflächenkonzentration insbesondere im ersten Auslagerungsjahr beeinflusst, kommt es zwangsläufig zu Abweichungen bei der Anwendung des 2. Fick'schen

Diffusionsgesetzes in diesem Zeitraum. Infolgedessen ergibt sich durch den Chloridaustrag eine Erhöhung der rechnerisch an Chloridprofilen ermittelten effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten.

Mit zunehmender Expositionsdauer wird der Einfluss des Chloridaustrags auf den effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten schwächer werden, da zum einen der oberflächennahe Chloridaustrag dazu führt, dass im Allgemeinen ab der zweiten Streuperiode ein Konzentrationsmaximum im Betoninneren entsteht [78]. Infolge der damit verbundenen Ausbildung des Tiefenbereichs x_K , wird ein Teilbereich, in welchem der Chloridaustrag stattfindet, am Chloridprofil „sichtbar“. Gemäß dem gewählten Ansatz werden die Chloridkonzentrationen beim Kurvenfitting im Bereich x_K vernachlässigt, wodurch dieser Effekt teilweise eliminiert wird. Zum anderen werden mit zunehmender Expositionsdauer die Chloridkonzentrationen in größeren Tiefenlagen den effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten stärker beeinflussen, weshalb der Einfluss des Chloridaustrags auf den berechneten effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten D_{Eff}^* mit zunehmender Expositionsdauer nachlässt.

Infolgedessen wird der jahreszeitlich bedingte Chloridaustrag insbesondere die Streuung der aus Chloridprofilen berechneten effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten erhöhen, wobei mit länger werdender Expositionsdauer dieser Einfluss abnimmt.

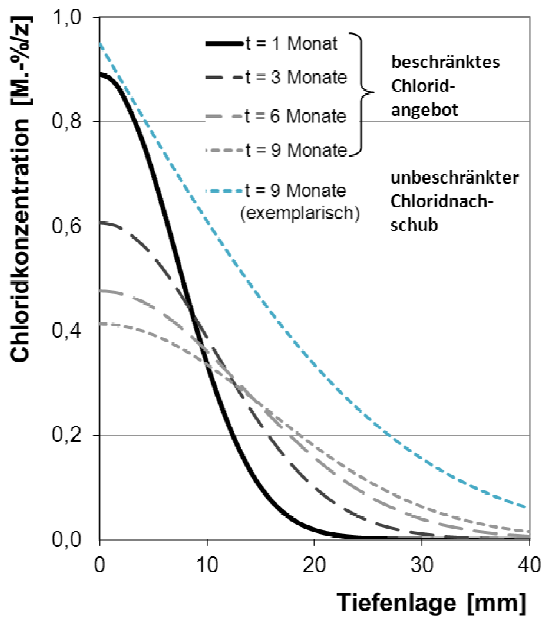
8.3.1.4 Diffusion mit beschränktem Chloridangebot

Die Chlorideinwirkung auf Beton von Straßenbauwerken beschränkt sich auf die Winterphase eines jeden Jahres. Das 2. Fick'sche Diffusionsgesetz geht von einer ständigen Chlorideinwirkung aus. Die Auswirkung einer zeitlich beschränkten Einwirkung auf die Transportgeschwindigkeit kann in diesem Modell daher nicht direkt berücksichtigt werden, sondern erfolgt durch die Anpassung des rechnerisch bestimmten effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten D_{Eff}^* .

Ein Modell zur Beschreibung der tiefenabhängigen Chloridkonzentration infolge einer einmaligen Chlorideinwirkung ist z.B. durch **Gleichung C 4** in **Anhang C-2** gegeben. Gemäß dem Modell erfolgt die Verteilung der konvektiv eingetragenen Chloridmenge, welche über die Eindringtiefe h mit einer konstanten Chloridkonzentration C_K beschrieben wird, über Diffusion. Die sich aus diesen Annahmen berechnete zeitabhängige Entwicklung der Chloridprofile zeigt, dass bedingt durch den fehlenden Chloridnachschieb sich die Chloridkonzentration mit zunehmender Expositionsdauer im oberflächennahen Bereich (konvektive Eindringtiefe h_k) reduziert, vgl. **Bild 33** links.

An entlang einer Autobahn ausgelagerten Betonprobekörpern konnte die Reduktion der Chloridoberflächenkonzentration während der beaufschlagungsfreien Zeit innerhalb des ersten Jahres festgestellt werden, vgl. **Bild 33** rechts. Auswertungen zur zeitabhängigen Entwicklung des Gesamtchloridgehalts dieser Probekörper zeigen, dass der Abfall der Chloridoberflächenkonzentration in der beaufschlagungsfreien Phase jedoch auch dem Chloridaustrag zuzuschreiben ist, vgl. **Bild 31**, Seite 72. Infolge dieser Entwicklung wird sich der Rechenwert für den aus Kurvenfitting abgeleiteten effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten D_{Eff}^* erhöhen.

berechnete Chloridumverteilung infolge einer einmaligen Chloridbeaufschlagung (beschränktes Chloridangebot)



An Probekörpern gemessener Abbau der Chloridoberflächenkonzentration ($x_k = 0$) während des ersten Auslagerungsjahres an CEM I-Betonprobekörpern mit $w/z = 0,4$ [78].

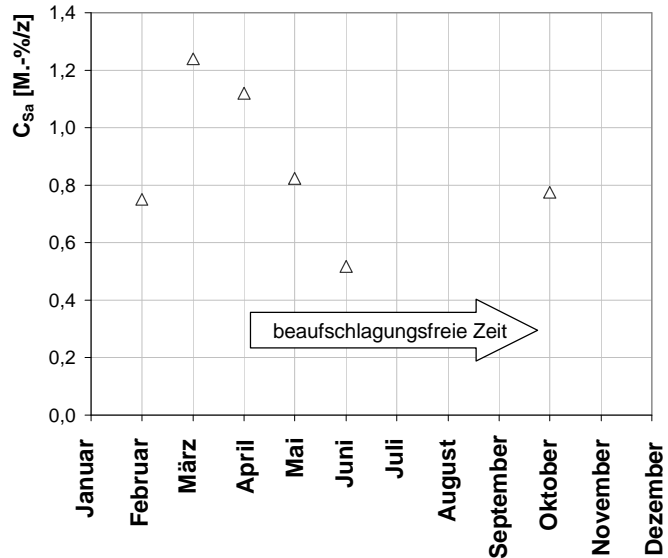


Bild 33: Berechnete zeitabhängige Entwicklung von Chloridprofilen infolge eines einmaligen konvektiven Chlorideintrags mit anschließender Umverteilung durch Diffusion (links), zeitabhängige Entwicklung der Oberflächenkonzentration C_{sa} von entlang einer Straße ausgelagerten Betonprobekörpern (rechts)

Der dargestellte, jahreszeitlich bedingte Einfluss des beschränkten Chloridangebots auf den aus Chloridprofilen abgeleiteten effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten wird sich im Wesentlichen auf den Expositionsbeginn beschränken, da dort die Chloridkonzentration im oberflächennahen Bereich deutlich von der jahreszeitlich bedingten Einwirkung geprägt wird.

Mit länger werdender Expositionsdauer wird das beschränkte Chloridangebot im Wesentlichen zu einer Reduzierung der Diffusionsgeschwindigkeit führen, da, bedingt durch den unterbrochenen Chloridnachschub, der chemische Potentialunterschied verringert wird, welcher der Antrieb der Diffusion ist.

8.3.1.5 Diffusion im teilgesättigten Beton

In größeren Tiefenlagen findet der Chloridtransport hauptsächlich durch Diffusion in nicht vollständig wassergesättigtem Beton statt. Durch die Wasserteilsättigung wird die Effektivität des Diffusionsprozesses eingeschränkt, vgl. **Kapitel 4.1.2.3**, Seite 22.

Infolge der intermittierenden Beaufschlagung von Straßenbauwerken mit Wasser (mit und ohne Chloriden) sind die Feuchteverhältnisse im Beton nicht mit denen von ständig unter Wasser gelagerten Bauteilen vergleichbar. Im Rahmen von Untersuchungen an Straßenbauwerken in München [112] zeigte sich, dass der Wassersättigungsgrad ab einer Tiefenlage von rd. 10 mm bis maximal 40 mm nahezu konstant über die

Tiefe verläuft. Vergleichbares wurde auch durch Untersuchungen an skandinavischen Brücken festgestellt [77]. Die eingeschränkte Tiefenwirkung der witterungsabhängigen Streuung des Feuchtegehalts wurde auch durch tiefenabhängige Messungen von elektrischen Widerständen des Betons bestätigt [112][148], vgl. hierzu auch **Bild 34**. Der in diesem Bild erkennbare leichte Anstieg des elektrischen Widerstands in allen Tiefenlage, wird durch die Austrocknung der eingebauten Probekörper verursacht. Da der elektrische Widerstand von Beton maßgeblich vom Feuchtegehalt abhängt, werden Sensoren, welche diese Widerstände aufzeichnen, auch als Feuchtesensoren bezeichnet [118]. Die Gegenüberstellung von Klimadaten mit kontinuierlich aufgezeichneten Daten von Feuchtesensoren, welche in Probekörpern (CEM I-Beton, w/z = 0,5) eingebaut wurden, zeigt, dass in der frostfreien Zeit sich die Feuchtezunahme infolge eines Niederschlagsereignisses im Allgemeinen auf die äußeren 10 mm beschränkt.

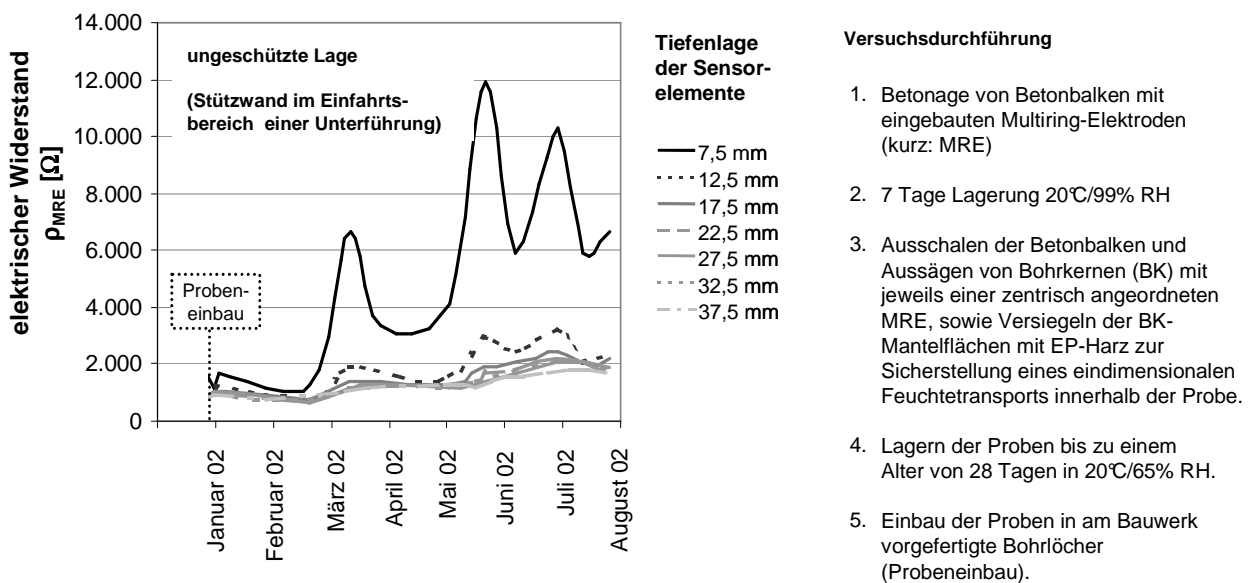


Bild 34: Zeitabhängiger Verlauf von elektrischen Widerständen (Multiring-Elektrode) in unterschiedlichen Tiefenlagen von mit Sensoren bestückten Probekörpern, welche im Spritzwasserbereich von Straßenbauwerken eingebaut wurden [112]

Zur Charakterisierung der Feuchteverhältnisse im Beton wird für die folgenden Betrachtungen der kapillare Wassersättigungsgrad w_{kap} nach **Gleichung 16** herangezogen.

$$w_{kap} = \frac{m_0 - m_{105}}{m_{sat} - m_{105}}$$

Gleichung 16

- w_{kap} : kapillarer Wassersättigungsgrad [-]
 m_0 : Masse der Probe [g]
 m_{105} : Masse der bei 105°C bis zur Massekonstanz getrockneten Probe [g]
 m_{sat} : Masse der kapillar wassergesättigten Probe [g]

In **Tabelle 9** ist eine Übersicht von kapillaren Wassersättigungsgraden von Beton aus Verkehrsbauwerken gegeben. Wie durch die dort dokumentierten Messergebnisse angedeutet, ist von einem deutlichen Einfluss der Entfernung des beprobten Bauteils zur Fahrbahn auf den kapillaren Wassersättigungsgrad auszugehen (vgl. Datensatz Nr. 1, **Tabelle 9**). Demnach sinkt die kapillare Wassersättigung des Betons, je größer die Entfernung der Beprobungsstelle zur Straße ist. Dies wird auch durch andere Untersuchungen bestätigt, wonach die an Brückenpfeilern und Stützwänden bestimmte Wassersättigung mit zunehmender Höhe und damit Entfernung zur Fahrbahn deutlich nachlässt [112]. Ein Grund hierfür ist, dass die Benetzungshäufigkeit bei diesen Bauteilen maßgeblich durch verkehrsbedingtes Spritzwasser- und Sprühnebelaufkommen verursacht wird, welches mit zunehmender Entfernung zur Straße nachlässt.

Tabelle 9: Kapillarer Wassersättigungsgrad des Betons von skandinavischen Brückenbauwerken

Datensatz	Land	Bauteil	horizontaler Abstand des Bauteils zum Fahrbahnrand	w_{kap} [-]: kapillarer Wassersättigungsgrad nach Gleichung 16	
				Werte	statistische Auswertung (betrachtete Tiefenlage 10 - 70 mm)
Nr. 1 [59]	Dänemark	Brückenpfeiler	~ 5 m	0,45 - 0,55	-
			< 2 m	0,6 - 0,75	
			< 2 m	0,6 - 0,7	
Nr. 2 [79]	Schweden	Randbalken	< 2 m	0,8 - 0,85	
			< 2 m	0,8 - 0,85	
			< 2 m	0,7 - 0,8	
			< 2 m	0,7 - 0,8	
			< 2 m	0,65 - 0,7	
			< 2 m	0,5 - 0,7	
Nr. 3 [79]		Brückenpfeiler	< 2 m	0,65 - 0,8	

Bei der statistischen Auswertung des Wassersättigungsgrads von skandinavischem Brückenbauwerken wurden alle Beprobungsstellen mit einem Abstand < 2 m zum Fahrbahnrand berücksichtigt. Dabei ergab sich ein mittlerer Wassersättigungsgrad von $w_{kap} = 0,7$ über die Tiefenlage von 10 mm bis 70 mm, vgl. **Tabelle 9**.

Im Folgenden soll der Einfluss der Wasserteilsättigung auf den effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten für Straßenbauwerke näher betrachtet werden. Da die zur Verfügung stehenden Daten bezüglich der Reduktion des Chloriddiffusionskoeffizienten in Abhängigkeit der Betonfeuchte sich nicht auf den kapillaren Wassersättigungsgrad beziehen, sondern auf die relative Luftfeuchte während der Lagerung, wird die Reduktion des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten infolge einer Wasserteilsättigung zunächst in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte beschrieben, vgl. **Gleichung 17**.

$$V_{D(RH)} = \frac{D_{\text{Eff}}^{RH}}{D_{\text{Eff}}^{RH=1}}$$

Gleichung 17

- $V_{D(RH)}$: Verhältniswert zur Berücksichtigung der reduzierten Diffusionsgeschwindigkeit infolge Wasserteilsättigung, welche sich infolge der Lagerung bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchten einstellt [-]
- D_{Eff}^{RH} : effektiver Chloriddiffusionskoeffizient von Beton bei einer relativen Luftfeuchte RH in 10^{-12} [m^2/s]
- $D_{\text{Eff}}^{RH=1}$: effektiver Chloriddiffusionskoeffizient bei einer relativen Luftfeuchte RH = 1 (Annahme: kapillar wassergesättigter Beton) in 10^{-12} [m^2/s]

Der Verhältniswert $V_{D(RH)}$ nach **Gleichung 17** wurde auf Basis der in **Bild 5**, Seite 24 dargestellten Daten [151] ausgewertet, welche sich auf CEM I-Beton mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,6$ beziehen, vgl. **Bild 35**. Für dichtere Betone ist zu erwarten, dass sich infolge des geringeren Kapillarporenanteils (vgl. Ad- und Desorptionsisotherme in **Bild 4**, Seite 22) bei gleicher relativen Luftfeuchte ein höherer Wasserteilsättigungsgrad ergibt. Durch den größeren Wassersättigungsgrad würde sich der Chloriddiffusionskoeffizient nicht so stark wie beim poröseren Beton verringern, was zu einem höheren Verhältniswert $V_{D(RH)}$ führt.

Um einen Anhaltswert für die zu erwartende Reduktion des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten infolge einer unter Straßenbedingungen typischen Wasserteilsättigung zu erhalten, ist vorerst noch abzuschätzen, bei welcher relativen Luftfeuchte sich ein kapillarer Wassersättigungsgrad von rd. $w_{\text{kap}} \sim 0,7$ (vgl. **Tabelle 9**) einstellt. Untersuchungsergebnisse von Beton- und Mörtelprobekörpern, welche unterschiedlichen relativen Luftfeuchten ausgesetzt waren, zeigten, dass sich ein kapillarer Wassersättigungsgrad von $w_{\text{kap}} \sim 0,7$ für einen Mörtel mit $w/z = 0,5$ bei einer relativen Luftfeuchte von $RH \sim 0,85$ [88] und für einen Beton mit $w/z = 0,6$ bei $RH \sim 0,95$ [20][151] einstellte. Werden diese Zusammenhänge berücksichtigt, so ergibt sich der Verhältniswert $V_{D(RH)}$ in Abhängigkeit von der Porosität des Betons in einer Bandbreite von 0,6 bis fast 1, was einer Reduktion des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten infolge Wasserteilsättigung zwischen näherungsweise 0 % bis 40 % entspricht. Da der Verlauf von $V_{D(RH)}$ von Versuchsdaten mit einem relativ porösen Beton abgeleitet wurde, ist zu erwarten, dass der Einfluss der Wasserteilsättigung auf den Chloriddiffusionskoeffizienten für dichteren Beton (Eingangswert $RH = 0,85$) überschätzt wird, d.h. sich deutlich größere Verhältniswerte als $V_{D(RH)} = 0,6$ ergeben, vgl. **Bild 35**.

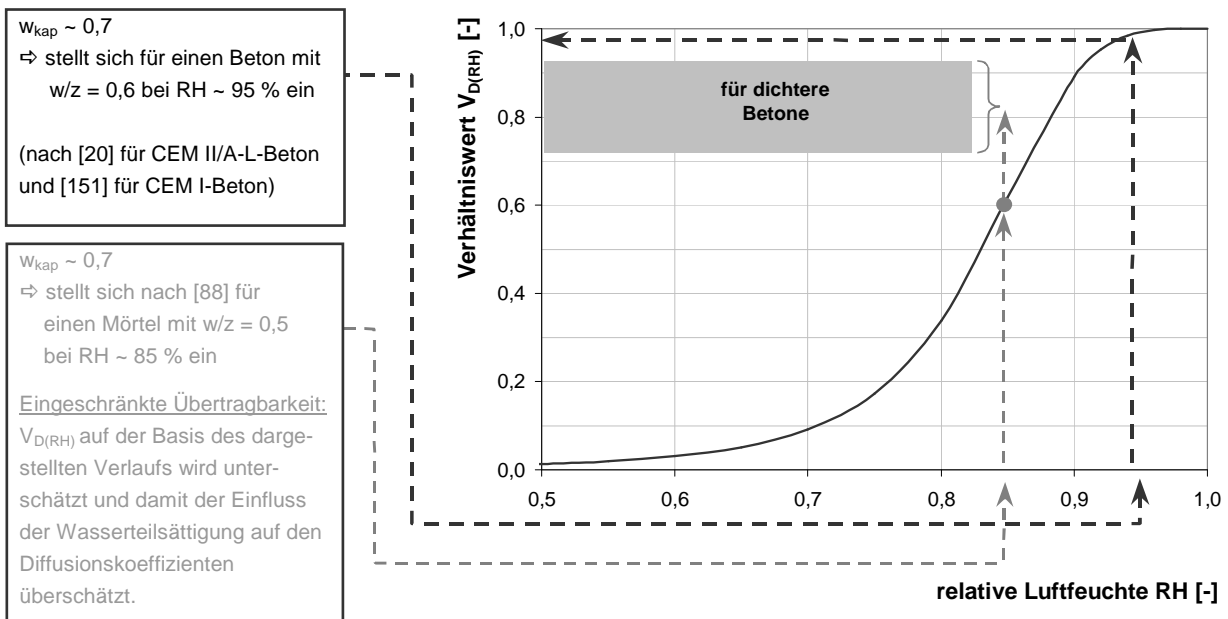


Bild 35: Verhältniswert $V_{D(RH)}$ nach Gleichung 17 auf der Grundlage des in Bild 5 (Seite 24) dargestellten feuchteabhängigen Verlaufs des Diffusionskoeffizienten für Beton mit $w/z = 0,6$

Bei der quantitativen Bewertung des Verhältniswerts $V_{D(RH)}$ ist zu beachten, dass dieser auf der Basis von Versuchen abgeleitet wurde, in denen Beton ($w/z = 0,6$) mit dampfförmiger Salzsäure beaufschlagt wurde. Da hier sowohl die Chlorideinwirkung (Art des Kations und Konzentration) als auch der Betonwiderstand sich deutlich von der Einwirkung und dem Widerstand von Beton im Spritzwasserbereich von Straßen unterscheidet, sind die ermittelten Zahlenwerte lediglich dazu geeignet, die Größenordnung dieses Einflusses abzuschätzen. Auswertungen von Untersuchungen an Mörtelproben ($w/z = 0,5$), welche nach der Beaufschlagung mit Natriumchlorid (Einlagerungsversuche) mit dem Fön getrocknet wurden und anschließend unter definierten Klimabedingungen lagerten, kamen zu einem vergleichbaren Ergebnis [88]. Aber auch hier werden, bedingt durch den Versuchsablauf, weitere Einflüsse erfasst, z.B. konvektiver Chloridtransport durch kapillares Saugen in der Beaufschlagungsphase und Verdunstung in der Trocknungsphase.

Infolge der Wasserteilsättigung des Betons ist eine geringfügige Reduzierung des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten zu erwarten. Wird dabei von einem über die Expositionsdauer konstanten Wasserteilsättigungsgrad ausgegangen, so ergibt sich rechnerisch kein zusätzlicher Einfluss auf den zeitabhängigen Verlauf des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten infolge der Wasserteilsättigung. Wird hingegen eine mit der Zeit zunehmende Austrocknungstiefe angesetzt, so ergibt sich rechnerisch ein ausgeprägteres Alterungsverhalten.

8.3.1.6 Einfluss der Carbonatisierung

Durch die Carbonatisierung des Betons wird sowohl die Porenstruktur als auch die Chloridbindekapazität verändert. In Abhängigkeit von der Zementart kann die Carbonatisierung sowohl zu einer dichteren (Portlandzement) als auch zu einer gröberen (Zemente mit Hüttensand) Porenstruktur führen. Des Weiteren geht die Chloridbindekapazität unabhängig von der Zement- und Salzart nahezu vollständig verloren, da die vorher sorbierten Chloridionen wieder vollständig freigesetzt werden und die chemisch gebundenen Chlorid- und Sulfat-Phasen bei Raumtemperatur durch Kohlendioxid zersetzt werden [29]. Die Reduktion der Chloridbindekapazität hat dabei einen signifikanten Einfluss auf den Widerstand des Betons gegenüber Chlorideindringen. So haben Untersuchungen zum Chlorideindringverhalten in carbonatisiertem und nicht carbonatisiertem Beton mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,6$ gezeigt, dass die Chloride deutlich schneller in die carbonatisierten Probekörper eindringen [157]. Durch die geringe Chloridbindekapazität ergeben sich an den carbonatisierten Probekörpern nahezu unabhängig von der Zementart flachere Gradienten am Chloridprofil über den carbonatisierten Bereich. Der stark herabgesetzte Chlorideindringwiderstand infolge Carbonatisierung wird durch andere Untersuchungen bestätigt [87][141]. Durch die Carbonatisierung des Betonrandbereichs erhöht sich dort bei gleicher Gesamtchloridkonzentration, welche im Allgemeinen durch Bohrmehlanalysen bestimmt werden kann, der Anteil der freien Chloride. Der Anstieg der freien Chloridkonzentration in der carbonatisierten Betonrandzone führt theoretisch im Grenzbereich des carbonatisierten Betons zum nicht carbonatisierten Beton zu einer Erhöhung des chemischen Potentialunterschieds, wodurch der Antrieb der Diffusion verstärkt wird, vgl. **Kapitel 4.1.2.1**, Seite 17.

Die Carbonatisierungstiefe ist für die hier näher untersuchten CEM I-Betone auf den oberflächennahen Bereich reduziert. An bis zu 30 Jahre alten Brücken wurden im Spritzwasserbereich Carbonatisierungstiefen von 3 - 8 mm [77] bzw. 0 - 15 mm [112] gemessen. An 200 untersuchten Straßenbrücken in Großbritannien waren 90 % der gemessenen Carbonatisierungstiefen kleiner als 5 mm. Durch die damit einhergehende herabgesetzte Chloridbindekapazität des Betons erhöht sich auch die Effektivität des Chloridaustrags außerhalb der Wintermonate in diesem Bereich bei Betonen innerhalb der Spritzwasserexposition. Der oberflächennahe Chloridaustrag aus dem carbonatisierten Bereich durch eine intermittierende Wasserbeaufschlagung wirkt dabei der zuvor theoretisch diskutierten Verstärkung des Diffusionsantriebs durch Erhöhung des chemischen Potentials entgegen. Bildet sich infolgedessen ein Tiefenbereich x_K aus, in welchem die Chloridkonzentrationen sich nicht mehr mit dem 2. Fick'schen Diffusionsgesetz beschreiben lassen, wird dieser Bereich durch den hier zu Grunde gelegten Modellansatz vernachlässigt.

8.3.1.7 Einfluss des Taumittels

In Deutschland kommen seit 1960 verstärkt Taumittel zum Einsatz. Im Straßenwinterdienst sind dies Natriumchlorid (NaCl) und Calciumchlorid (CaCl_2). Vor allem bei tieferen Temperaturen wird dem Taumittel zeitweise Calciumchlorid zugemischt. In der Schweiz liegt der Anteil an Calciumchlorid am Gesamtverbrauch in Abhängigkeit von der Temperatur zwischen 0 % und 15 % [149]. Da Natriumchlorid aus wirtschaftlicher Sicht den anderen Taumitteln überlegen ist, wird es jedoch am häufigsten verwendet [122]. In Deutschland ergab eine Befragung von neun Städten zum Taumittleinsatz, dass der Natriumchloridanteil bei den gestreuten Tausalzen bei fast 98 % lag [47].

Die gestreute Salzmenge über einen Winter ist vor allem abhängig von den klimatischen Bedingungen. So variiert in Skandinavien die Anzahl der Streueignisse zwischen 30 und 60 je Winter. Dabei werden jedes Mal rd. 10 bis 25 g/m² NaCl gestreut [60].

Da das assoziierte Kation (hier Natrium oder Calcium) sowohl die Diffusionseigenschaft als auch die Chloridbindekapazität beeinflusst, kann der effektive Chloriddiffusionskoeffizient in Abhängigkeit der Taumittelzusammensetzung variieren, vgl. hierzu auch **Kapitel 4.1.2.2**, Seite 19 und **Kapitel 4.1.5**, Seite 31. In Abhängigkeit des assoziierten Kations wird in der Literatur bei reinem Calciumchlorid von einem um den Faktor 2 abweichenden Chloriddiffusionskoeffizienten im Vergleich zu Natriumchlorid berichtet [8][123].

Die Vernachlässigung von ggf. unterschiedlichen Taumitteltypen und der Intensität der Taumittleinwirkung während der Nutzungsdauer führt bei der Auswertung von Chloridprofilen hinsichtlich des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten zu einer höheren Streuung. Aufgrund des geringen Anteils von Calciumchlorid am Taumittelverbrauch ist dieser Einfluss jedoch vernachlässigbar.

8.3.1.8 Einfluss des Betonalters bei der ersten Chloridbeaufschlagung

Bei der Auswertung der Chloridprofile ist zur Bestimmung des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten die Expositionsdauer anzusetzen, vgl. **Bild 18**, Seite 56. Für die Bestimmung der Expositionsdauer sind Informationen über den Zeitpunkt der ersten Chloridbeaufschlagung notwendig. Da gerade bei älteren Bauwerken eine Rekonstruktion dieses Zeitpunkts auf der Grundlage der vorhandenen Datenbasis kaum möglich ist, muss die Expositionsdauer auf der Basis von Informationen über das Bauwerksalter abgeschätzt werden.

Durch die Berücksichtigung des Betonalters oder des Bauwerksalters anstatt der Expositionsdauer ergeben sich bei den aus Kurvenfitting abgeleiteten effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten geringere D_{Eff}^* -Werte, wodurch der effektive Diffusionskoeffizient unterschätzt wird. Um einen Eindruck über den daraus resultierenden Fehler zu erhalten, wurde unter Berücksichtigung unterschiedlicher Betonalter bei der Erstbeaufschlagung eine Parameterstudie durchgeführt. Hierzu wurde aus Chloridprofilen der effektive Chloriddiffusionskoeffizient einmal unter Berücksichtigung des Betonalters (hier $D_{\text{Eff}}^{*\text{Alter}}$) und ein zweites Mal unter Berücksichtigung der Expositionsdauer (hier $D_{\text{Eff}}^{*\text{exp}}$) bestimmt. Der sich daraus ergebende Verhältniswert $V_{D(\text{Zeit})}$ wird infolge größer werdender Abweichungen zwischen diesen beiden effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten $V_{D(\text{Zeit})}$ kleiner.

Die Parameterstudie zeigt, dass der Fehler bei Berücksichtigung des Betonalters anstatt der Expositionsdauer erwartungsgemäß mit größer werdendem Betonalter bei der Erstbeaufschlagung t^* zunimmt und $V_{D(\text{Zeit})}$ infolgedessen kleiner wird, vgl. **Bild 36**. Dieser Fehler nimmt jedoch mit zunehmender Expositionsdauer rasch ab. Dies bedeutet, dass bei der Auswertung von Chloridprofilen, welche von Bauwerken mit Expositionsdauern unter 10 Jahren stammen, die Bestimmung der Expositionsdauer möglichst genau er-

folgen sollte. Bei Chloridprofilen von Bauwerken mit längeren Expositionsdauern ist i.d.R. der Ansatz des Bauwerksalters für die Expositionsdauer hinreichend genau.

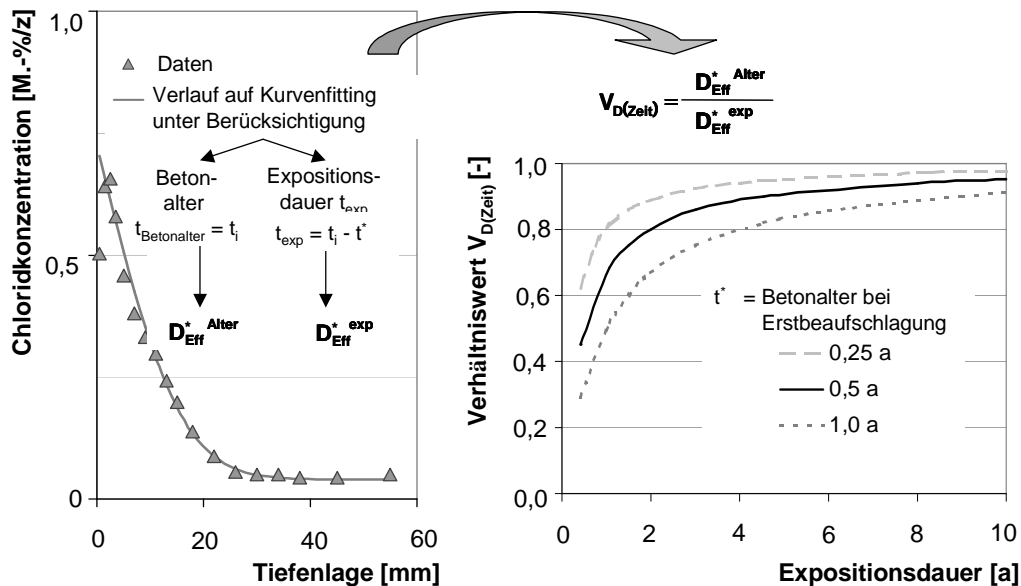


Bild 36: Zeitabhängiger Verhältnisswert $V_{D(zeit)}$ der durch Kurvenfitting unter Berücksichtigung des Betonalters bzw. der Expositionsdauer abgeleiteten effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten

Viel entscheidender als der Ansatz der tatsächlichen Expositionsdauer ist das Alter bei der die erste Beaufschlagung und der dabei wirksame Eindringwiderstand. Ergebnisse von Auslagerungsversuchen zeigen, dass das Betonalter bei der Erstbeaufschlagung einen deutlichen Einfluss auf den aus Chloridprofilen bestimmten effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten hat, obwohl die Expositionsdauer bei der Bestimmung des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten berücksichtigt wurde. Dabei ergeben sich für Betone, welche zu einem späteren Zeitpunkt der ersten Chloridbeaufschlagung ausgesetzt waren, geringere effektive Chloriddiffusionskoeffizienten. Dies ist vor allem dem Umstand geschuldet, dass infolge der weiter fortgeschrittenen Hydratation beim später beaufschlagten Beton eine geringere Porosität vorhanden ist, was diesen widerstandsfähiger gegenüber Chlorideindringen macht (materialbedingter Einfluss).

Systematische Untersuchungen zum materialbedingten Einfluss des Alters bei der Erstbeaufschlagung auf den effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten konnten nicht gefunden werden. Lindvall [78] sieht darin jedoch die Ursache von deutlich abweichenden effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten zweier Versuchsserien. Die Probekörper einer Versuchsserie wurden mit jeweils der gleichen Rezeptur im Labor hergestellt und entlang der gleichen Straße im gleichen Abstand zum Fahrbahnrand ausgelagert. Die Probekörper der 1. Versuchsserie wurden Ende Dezember 1996, die der 2. Versuchsserie Anfang November 1997 ausgelagert. Die Betone beider Versuchsserien waren zum Zeitpunkt der Auslagerung an die Straße rd. 40 Tage alt, was in diesem Fall jedoch nicht dem Alter der Erstbeaufschlagung entspricht. Auch die Witterungsverhältnisse (Vergleich der Temperaturdaten beider Jahre in Bezug auf das Datum) sowie die Streuaktivität auf dem Straßenabschnitt beider Jahre werden als vergleichbar beschrieben, wobei keine Angaben zu den

Tagen, an denen gestreut wurde, vorliegen. In den Monaten und den Folgemonaten, in denen die Auslagerung der Probekörper beider Versuchsserien erfolgte (Dez. 96 und Jan. 97 bzw. Nov. 97 und Dez. 97), wurde auf dem betreffenden Straßenabschnitt gestreut. Aufgrund des früheren Auslagerungszeitpunkts innerhalb des Jahres der Betonprobekörper der 2. Versuchsserie (Auslagerungsbeginn: Nov.) geht Lindvall davon aus, dass diese erst in einem fortgeschritteneren Alter mit Chlorid beaufschlagt wurden [78]. Der Vergleich der aus den Chloridprofilen gefitteten effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten $D_{\text{Eff}}^{*\text{exp}}$ (Annahme: Betonprobekörper wurden direkt nach dem Auslagern an die Straße mit Chlorid beaufschlagt) ergab je nach Betonrezeptur für die 2. Versuchsserie um den Faktor 0,5 bzw. 0,1 geringere Werte, vgl. **Bild 37**.

Da das Alter der Probekörper bei der Erstbeaufschlagung nicht bekannt ist, kann der „rechnerische Fehler“ bei der Ermittlung von D_{Eff}^* nicht vollständig eliminiert werden. Die dabei vernachlässigte Zeitspanne ist jedoch kleiner 30 Tage (vgl. Streuaktivität im Auslagerungsmonat und im Folgemonat). Wird die vernachlässigte Zeitspanne auf der sicheren Seite mit 90 Tagen (entspricht 0,25 Jahre) abgeschätzt, so müssten infolge des rechnerischen Fehlers bei der Bestimmung von D_{Eff}^* die Werte der 2. Versuchsserie um einen Faktor von 0,8 unter denen der Werte der 1. Versuchsserie liegen, vgl. $V_{D(\text{Zeit})} = 0,8$ für $t^* = 0,25$ a, $t_{\text{exp}} = 1$ a in **Bild 36** auf Seite 81. Der festgestellte Unterschied der effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten aus beiden Versuchsserien ist jedoch deutlich größer, was sich durch die geringeren Verhältniswerte V_D wieder spiegelt, vgl. **Bild 37**. Inwieweit andere Randbedingungen (z.B. Anzahl der Frost-Tau-Wechsel) das Chlorideindringen und damit den effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten beeinflusst haben, kann auf der Grundlage dieser Daten nicht rekonstruiert werden.

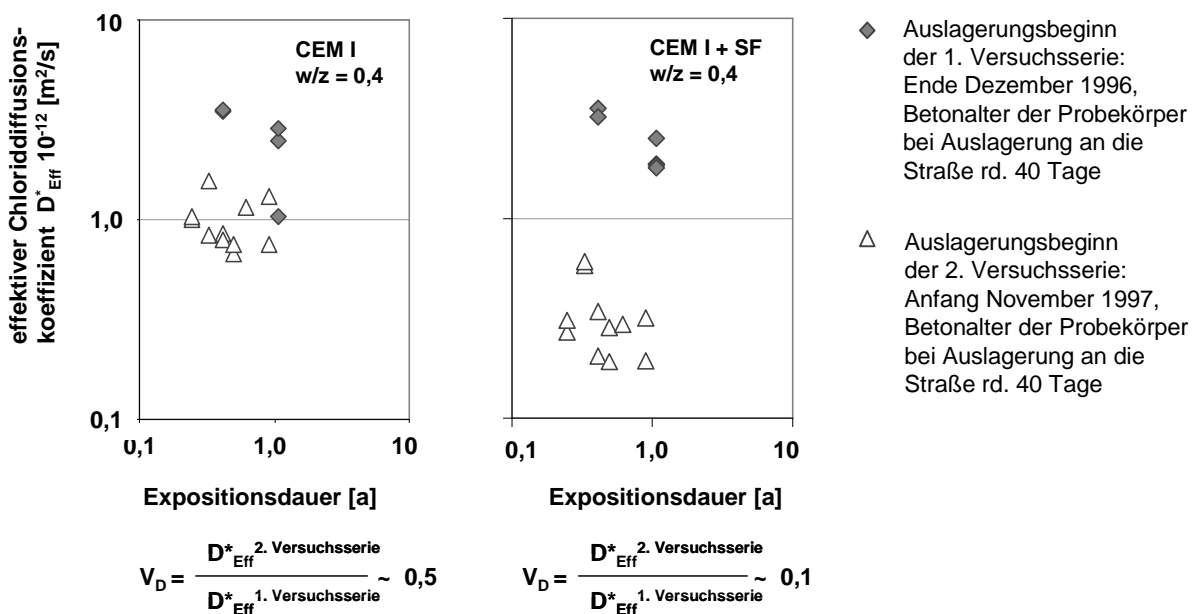


Bild 37: Effektive Chloriddiffusionskoeffizienten ausgelagerter Probekörper unterschiedlicher Versuchsserien [78]

Auch die Ergebnisse von anderen Untersuchungen deuten einen signifikanten Einfluss des Betonalters bei der Erstbeaufschlagung auf das Chlorideindringen an [115]. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden

Betonprobekörper zu unterschiedlichen Zeitpunkten entlang der Bundesautobahn A52 ausgelagert. Die eingetragene Chloridmenge (gemessen über die ersten 10 mm) war bei den Probekörpern, welche ein höheres Betonalter bei der ersten Chloridbeaufschlagung aufwiesen (Serie 7), signifikant geringer als bei den Probekörpern, welche bei der ersten Beaufschlagung relativ jung waren (Serie 19), vgl. Gesamtchloridkonzentrationen beider Serien im Dezember 1985 in **Bild 38**.

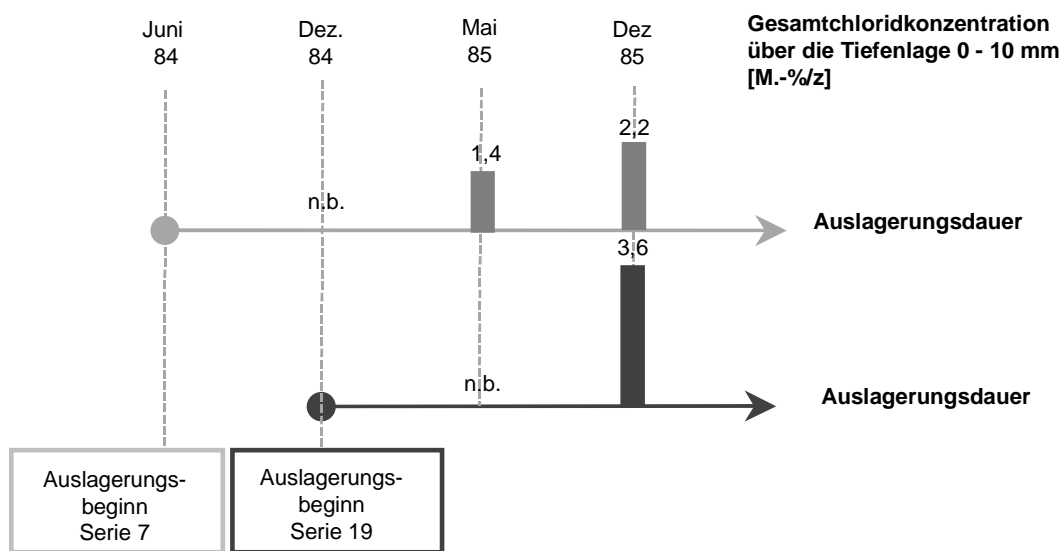


Bild 38: Gesamtchloridkonzentration über die ersten 10 mm von Probekörpern zweier Versuchsserien mit unterschiedlichem Auslagerungsbeginn [115]

Auch wenn systematische Untersuchungen zum Einfluss des Betonalters bei der Erstbeaufschlagung auf den effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten fehlen, ist infolge der zeitabhängigen Entwicklung des Materialwiderstands davon auszugehen, dass sich eine Variation des Betonalters bei der Erstbeaufschlagung insbesondere bei jungen Betonen auf den effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten auswirkt, da hier die zeitabhängige Änderung des Materialwiderstands gegenüber Chlorideindringen infolge der Verdichtung des Porenraums durch die Hydratation und/oder die puzzolanischer Reaktion am ausgeprägtesten ist. Als Anhaltspunkt für die Änderung des Materialwiderstands gegenüber Chlorideindringen können Chloridmigrationskoeffizienten dienen, vgl. **Bild 39**.

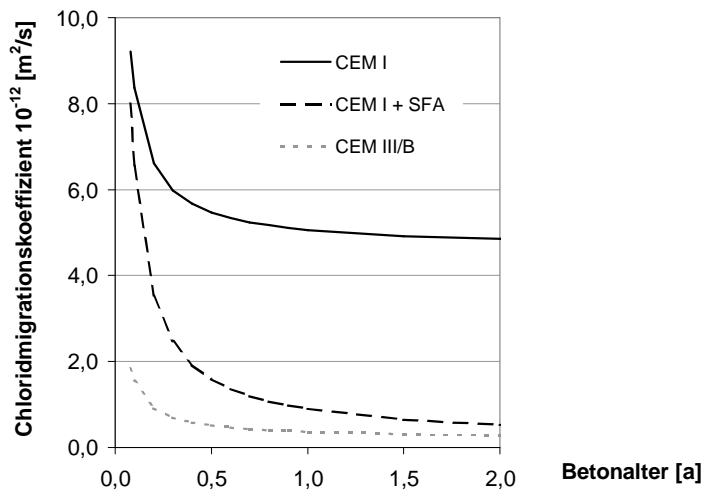


Bild 39: Zeitabhängige Entwicklung von Chloridmigrationskoeffizienten für unterschiedliche Betone ($w/z = 0,45$) nach Lay [72]





8.3.1.9 Folgerungen für die zeitabhängige Entwicklung des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten von Beton aus Straßenbauwerken

Zur Beschreibung des Eindringens von Chlorid in Beton durch verkehrsbedingte Spritzwasserbeaufschlagung mit dem 2. Fick'schen Diffusionsgesetz muss der effektive Chloriddiffusionskoeffizient angepasst werden, da hier, bedingt durch die Einwirkungscharakteristik, das Diffusionsgesetz keine physikalische Gültigkeit mehr hat.

Die Einwirkungscharakteristik auf Beton von Straßenbauwerken ist im Wesentlichen durch jahreszeitliche Einflüsse geprägt, wodurch unterschiedliche Transportmechanismen von Chlorid im Beton aktiviert werden. Eine Bewertung dieser Einflüsse in Hinblick auf den Verlauf des effektiven Diffusionskoeffizienten ist schwierig, da diese in Abhängigkeit der Expositionsdauer das Chloridprofil und damit den effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten unterschiedlich stark beeinflussen. Auf der Grundlage der durchgeführten theoretischen Überlegungen, Versuchsauswertungen sowie der Literaturrecherche können im Wesentlichen zwei Phasen unterschieden werden, in denen unterschiedliche Einflüsse den effektiven Diffusionskoeffizienten dominieren. In der „Anfangsphase“, welche sich auf eine sehr kurze Expositionsdauer beschränkt, findet der Chloridtransport überwiegend über Konvektion statt. Mit zunehmender Expositionsdauer lässt der Einfluss der Konvektion nach und die Diffusion tritt stärker in den Vordergrund. Dies bedeutet, dass der Übergang zwischen der „Anfangsphase“ und der sich anschließenden Phase fließend ist, weshalb letztere hier als „anschließende Phase“ bezeichnet wird. Unterscheiden sich in den beiden Phasen die Auswirkungen auf den effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten D_{eff}^* , so kann daraus auch ein gegenüber Einlagerungsversuchen geändertes Alterungsverhalten abgeleitet werden, welches durch die Variable a_R beschrieben wird, vgl. **Tabelle 10**.

Tabelle 10: Untersuchte Einflüsse auf den aus Chloridprofilen abgeleiteten effektiven Chlorid-diffusionskoeffizienten und die sich daraus ergebenden Auswirkungen auf dessen zeitabhängigen Verlauf

Betrachtete Einflüsse		Auswirkung auf den aus Chloridprofilen abgeleiteten effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten im Vergleich zum Einlagerungsversuch (Variable k_R)		Auswirkung auf das Alterungsverhalten, bzw. den zeitabhängigen Verlauf (Variable a_R)
		Anfangsphase (kurze Expositionsdauer)	anschließende Phase (längere Expositionsdauer)	
transportbedingt	konvektiver Chlorideintrag	↑	⇒	↑
	Chloridaustrag	↑	⇒	↑
	Diffusion mit beschränktem Chloridangebot	↑	↓	↑
	Diffusion im teilgesättigten Beton	↓	↓	⇒ bei zeitunabhängiger Wasser- teilsättigung
im Zusammenhang mit der Straßenexposition	höheres Betonalter bei Erstbeaufschlagung	↓	↓	⇒ Annahme: im Wesentlichen zeitunabhängig*
	Carbonatisierung des oberflächennahen Randbereichs	⇒	⇒	⇒
	Taumittel	⇕	⇕	⇕

-  ,  Führt im Wesentlichen zu einem Anstieg bzw. zu einer Reduktion der betrachteten Variablen, ein schwarzer Pfeil symbolisiert hierbei ein stärkeren Einfluss und ein grauer Pfeil einen schwächeren.
-  Führt im Wesentlichen zu einer erhöhten Streuung der betrachteten Variablen.
-  Kein wesentlicher Einfluss auf die betrachteten Variablen zu erwarten
- * Untersuchungen hierzu fehlen.

Anmerkungen zur Anfangsphase

Zu Beginn der Exposition hat sowohl der konvektive Chlorideintrag als auch der Chloridaustrag einen besonders großen Einfluss auf das Chloridprofil und damit auf den effektiven Chlorid-diffusionskoeffizienten von Beton aus Straßenbauwerken. Durch den konvektiven Chlorideintrag wird zu Expositionsbeginn der effektive Chloriddiffusionskoeffizient $D_{\text{Eff,R}}^*$ im Vergleich zu dem bei Einlagerungsversuchen deutlich erhöht, vgl. **Bild 26**, Seite 67. Dies ist besonders ausgeprägt für konvektive Chlorideinträge mit großer Eindringtiefe (z.B. Mikroeislinsepumpe). Bei wiederholten Chloridbeaufschlagungen mit geringer Tiefenwirkung kann sich infolge der durch Aufkonzentration und Verdunstung bedingten Chloridanreicherung im oberflächennahen Bereich im weiteren Verlauf auch eine Reduzierung des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten $D_{\text{Eff,R}}^*$ ergeben. Wenn diese Chloridkonzentrationen deutlich über der Sättigungskonzentration liegen, wird dieser Effekt in der nächsten Phase mit Niederschlägen durch den Austrag der ungebundenen

Chloride wieder eliminiert. Durch die Abhängigkeit des konvektiven Chloridtransports von der Jahreszeit kommt es in der Anfangsphase zu einer deutlichen jahreszeitlich bedingten Variation des aus Chloridprofilen abgeleiteten effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten.

Des Weiteren ist davon auszugehen, dass ein vergleichsweise hohes Alter bei der Erstbeaufschlagung insbesondere am Expositionsbeginn zu deutlich geringeren effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten $D_{\text{eff,R}}^*$ führt. Dieser Zeitraum kann für unterschiedliche Bauteile und Bauwerke stark variieren. Infolgedessen wird die Streuung eines Datensatzes erhöht, wenn der effektive Chloriddiffusionskoeffizient von Chloridprofilen aus unterschiedlichen Bauteilen und Bauwerken abgeleitet wird.

Anmerkungen zur sich anschließenden Phase

In der sich anschließenden Phase bestimmt der Chloridtransport über Diffusion die Veränderungen des Chloridprofils. Im Vergleich zur Diffusion in Einlagerungsversuchen ist die Transportgeschwindigkeit infolge der Wasserteilsättigung und des beschränkten Chloridangebots geringer.

Die in der Anfangsphase dominierenden Einflüsse bestimmen maßgeblich den Ausgangswert des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten, welcher ausgehend vom Chloridmigrationskoeffizienten zum Referenzzeitpunkt von der Variablen k_R beschrieben wird. Da die Einflüsse, welche zu einer Erhöhung bzw. zu einer Reduzierung des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten führen, sich zum Teil kompensieren (vgl. **Tabelle 10**) und bisher für die Straßenexposition noch nicht getrennt quantifiziert wurden, ist eine Einschätzung der Auswirkung in Bezug auf die Variable k_R nicht möglich.

Die Auswirkungen der untersuchten Einflüsse auf das Alterungsverhalten sind eindeutiger. Hier führt insbesondere der große Unterschied in der Transportgeschwindigkeit der in beiden Phasen dominierenden Mechanismen zu einer ausgeprägten zeitabhängigen Reduzierung des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten. Dadurch ergibt sich im Vergleich zu Einlagerungsversuchen oder der Meerwasserexposition ein höherer Altersexponent a_R .

Die im **Anhang D** diskutierten expositionsunabhängigen Einflüsse auf den effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten zeigen, dass auch diese die Streuung der aus Chloridprofilen abgeleiteten effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten erhöhen können, z.B. infolge Ungenauigkeiten der Untersuchungsmethode bei der Bohrmehlanalyse, Zementsteinanreicherung im oberflächennahen Bereich oder infolge einer nicht angepassten Schrittweite bei der Bohrmehlentnahme. Letzteres kann durch eine Wahl einer geeigneten Schrittweite minimiert werden.

8.3.2 Zeitabhängiger Verlauf des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten

8.3.2.1 Datengrundlage und Auswertung

Zur Beschreibung des zeitabhängigen Verlaufs des effektiven Diffusionskoeffizienten für Straßenbauwerke $D_{\text{eff,R}}^*$ wurden zunächst aus Literaturdaten ([59][78][89][112][111][148][152][153][155]) Chloridprofile zusammengestellt. Infolge der vielen Einflussgrößen wie z.B.

- Bindemittel,
- Wasserzementwert,
- Exposition (XD1 bzw. XD3) und damit im Wesentlichen der Entfernung zum Fahrbahnrand und
- Bauwerks- bzw. Probenalter

wurden zunächst nur Chloridprofile ausgewertet, welche von CEM I-Betonen stammen. Für diese Randbedingungen war der Datenumfang mit Abstand am größten. Die Proben stammen überwiegend von Straßenbauwerken, die nach 1960 gebaut wurden. Für sehr kurze Expositionsdauern lagen keine Daten von beprobten Bauwerken vor. Hier wurden ausgelagerte Probekörper in die Auswertung mit einbezogen. Bedingt durch die Herstellung der Probekörper im Labor ist davon auszugehen, dass diese einen besseren Widerstand gegenüber Chlorideindringen aufweisen als Beton mit vergleichbarer Zusammensetzung von Bauwerken, was zu geringeren effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten der Laborbetone führt. Bei den verwendeten Daten steht dem jedoch entgegen, dass das Betonalter bei der Erstbeaufschlagung vergleichsweise gering war (rd. 50 Tage). Des Weiteren wurden die Probekörper in Süd-Skandinavien ausgelagert, wo witterungsbedingt von einer verstärkten Chlorideinwirkung ausgegangen werden kann. Beide Randbedingungen führen im Gegenzug zu einer Erhöhung des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten. Daher wird davon ausgegangen, dass der günstige Einfluss der Herstellung und Nachbehandlung der Probekörper durch diese Randbedingungen z.T. kompensiert wurden.

Infolge der unterschiedlichen Einwirkungscharakteristik und -intensität ist davon auszugehen, dass die Verläufe der effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten für die Expositionsklassen XD3 (Spritzwasserbereich) und XD1 (Sprühnebelbereich) nicht vergleichbar sind. Daher sollen die vorhandenen Daten dieser beiden Expositionsbereichen getrennt ausgewertet werden. Eine klare Abgrenzung dieser Expositionsbereichen existiert nicht, z.B. durch einen definierten maximalen bzw. minimalen Abstand zum Fahrbahnrand. In Hinblick auf die Dauerhaftigkeit ist die Expositionsklasse XD3 von vorrangigem Interesse, da dort eine intensivere Chlorideinwirkung stattfindet. Daher wurde der zur Verfügung stehende Datenumfang in Abhängigkeit des Abstands zur Straße in Hinblick auf die Exposition XD3 näher untersucht. Für einen Abstand zum Fahrbahnrand $r_{\text{FBR}} \leq 2$ m ist der Datenumfang noch relativ groß. Der Abstand zum Fahrbahnrand beinhaltet dabei sowohl die horizontale als auch die vertikale Entfernung. Eine Eingrenzung des Datensatzes auf $r_{\text{FBR}} \leq 1,8$ m würde für die Expositionsdauer $t_{\text{exp}} > 10$ Jahre eine Halbierung des Datenumfangs nach sich ziehen. Dies ist sehr ungünstig, da Dauerhaftigkeitsbetrachtungen insbesondere für längere Expositionsdauern durchgeführt werden und infolgedessen der Datenumfang hier möglichst umfangreich sein sollte. Auf der Grundlage der durchgeführten Überlegungen wurden für die Auswertung daher alle Chloridprofile berücksichtigt, deren Entnahmestelle in einem Abstand $r_{\text{FBR}} \leq 2$ m zum Fahrbahnrand liegt. Eine Regressionsanalyse der effektiven Diffusionskoeffizienten in Abhängigkeit vom Abstand zum Fahrbahnrand zeigt, dass dieses Vorgehen für den sich daraus ergebenden Datensatz zu rechtfertigen ist, da keine

signifikante Abhängigkeit zwischen dem Abstand und dem effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten vorhanden ist, vgl. **Bild F 1** im **Anhang F**. Diese Erkenntnis deckt sich auch mit Untersuchungsergebnissen aus Skandinavien, wo bis zu einer Höhe von 2,5 m über der Fahrbahnoberkante keine systematische Abhängigkeit des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten festgestellt werden konnte [76].

Abgesehen von wenigen Chloridprofilen, welche an vergleichsweise jungem Beton bestimmt wurden ($t_{\text{exp}} < 5$ Jahre), sind die Betonproben ausschließlich aus vertikal orientierten Flächen gezogen worden (i.d.R. Stützen, Widerlager, Wände von Brücken oder Trogkonstruktionen). Infolge der unterschiedlichen Verweildauer von chloridhaltigem Schmelzwasser auf horizontal und vertikal orientierten Flächen ist für Beton in unmittelbarer Straßennähe grundsätzlich von einer Abhängigkeit der Orientierung auf den effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten auszugehen. Für den Datensatz des vergleichsweise jungen Betons ($t_{\text{exp}} < 5$ Jahre) konnte dies jedoch nicht festgestellt werden, weshalb auch diese Daten zur Auswertung herangezogen wurden, vgl. **Bild F 2** im **Anhang F**.

Der effektive Chloriddiffusionskoeffizient wird durch Kurvenfitting der Chloridprofile auf der Grundlage von **Gleichung 13**, Seite 54 bestimmt. Diese Gleichung berücksichtigt auch den Grundchloridgehalt, welcher im Allgemeinen aus den Chloridprofilen visuell gut abgeschätzt werden kann, wenn im "hinteren Teil" des Profils mindestens zwei Datenpunkte mit ähnlichen Chloridkonzentrationen vorhanden sind. Reichte die beprobte Tiefe für ein derartiges Vorgehen nicht aus, so wurde in Anlehnung an [72] eine sinnvolle Annahme für den Grundchloridgehalt getroffen. Durch Beschreiben des abfallenden Asts eines Chloridprofils sind bei bekanntem bzw. angenommenen Grundchloridgehalt und Expositionsdauer die Variablen C_{sa} und der effektive Chloriddiffusionskoeffizient $D_{\text{eff,R}}^*$ zu bestimmen. Infolgedessen müssen mindestens drei Stützstellen zur Verfügung stehen, welche den über die Tiefe abfallenden Ast des Chloridprofils gut beschreiben. Die Gesamtanzahl der notwendigen Stützstellen hängt somit auch von der Ausdehnung eines eventuell vorhandenen Tiefenbereichs x_K ab. Für die Auswertung der Expositionsklasse XD3 wurden daher Chloridprofile mit mindestens vier Stützstellen herangezogen, deren Tiefenabstufung im oberflächennahen Bereich maximal 10 mm betrug. Bei dem Großteil der zur Verfügung stehenden Chloridprofile waren deutlich mehr Stützstellen und eine deutlich feinere Tiefenabstufung im oberflächennahen Bereich vorhanden. Als hinreichend genaue Beschreibung des Chloridprofils wird in Anlehnung an [78] verstanden, wenn der Korrelationskoeffizient beim Kurvenfitting mindestens einen Wert von 0,98 erreicht.

Die im Rahmen des Kurvenfittings zu berücksichtigende Expositionsdauer konnte für die Chloridprofile der vergleichweisen jungen Betone (< 5 Jahre) gut auf der Grundlage der zur Verfügung stehenden Informationen abgeschätzt werden. Für ältere Betone (> 10 Jahre) wurde für die Expositionsdauer näherungsweise das Bauwerksalter $t_{\text{exp}} = t_{\text{BW-Alter}}$ angesetzt. Der überwiegende Teil der Chloridprofile stammt von Bauwerken, welche zum Untersuchungszeitpunkt älter als 20 Jahre waren. Für diese Profile ist der rechnerisch bedingte Fehler infolge dieser vereinfachenden Annahme vernachlässigbar, vgl. hierzu auch **Bild 36**, Seite 81.

Bei den beprobten Betonen ist davon auszugehen, dass der Wasserzementwert in einer Bandbreite von 0,45 bis rd. 0,55 liegt. Ausnahme sind die Betone einiger Probekörper, welche mit einem Wasserzementwert von

w/z = 0,4 hergestellt wurden [78]. Da die Daten dieser Probekörper ausschließlich für die Ermittlung des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten für geringe Expositionsdauern ($t_{\text{exp}} < 5$ Jahre) verwendet wurden, für welche sonst wenig andere vergleichbare Daten vorlagen, wurde der effektive Chloriddiffusionskoeffizient angepasst, um einem systematischen Fehler bei der Auswertung entgegenzuwirken. Dabei wurde der Einfluss des vergleichsweise geringen Wasserzementwerts auf der Grundlage von Ergebnissen anderer Auslagerungsversuche berücksichtigt [89]. Die dabei beprobten Betone (u.a. mehrere CEM I-Betone mit einem w/z-Wert von 0,4 und 0,5) wurden unter vergleichbaren Expositionsbedingungen ausgelagert und auch nach relativ kurzen Expositionsdauern beprobt (~ 1,5 Jahre), somit können die Randbedingungen als vergleichbar angesehen werden. Die Auswirkung des höheren Wasserzementwerts auf den effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten lag bei einem Faktor von rd. 2. Die ermittelten effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten $D_{\text{Eff,R}}^*$ der Betone mit einem Wasserzementwert von w/z = 0,4 wurden dementsprechend angepasst.

Das Ergebnis der ausgewerteten Datenpaare (effektiver Chloriddiffusionskoeffizient/Expositionsdauer) ist in **Bild 40** dargestellt. Aufgrund des geringen Abstands zur Straße ($r_{\text{FBR}} \leq 2$ m) und der damit verbundenen Einwirkung wird im Folgenden auch der Begriff des „verkehrsbedingt mit Spritzwasser beaufschlagten Betons“ verwendet.

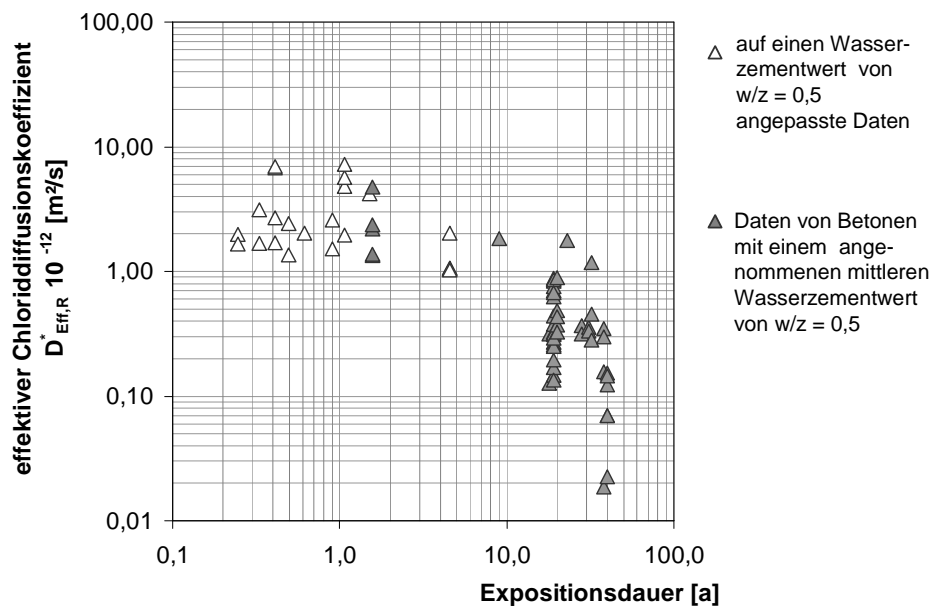


Bild 40: Effektive Diffusionskoeffizienten in Abhängigkeit der Expositionsdauer für CEM I-Betone mit einer verkehrsbedingten Spritzwasserbeaufschlagung

Die Auswertung des Variationskoeffizienten von vier Datenklassen (vgl. **Tabelle 11**) zeigte keinen eindeutigen zeitlichen Trend wie z.B. bei Daten von Meeresbauwerken, deren Variationskoeffizienten mit der Zeit deutlich zunehmen, vgl. [49]. Aufgrund des ausgeprägten Einflusses des konvektiven Chloridein- und austrags auf den effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten während des ersten Jahres erscheint der große Variationskoeffizient zu Expositionsbeginn plausibel.

Tabelle 11: Variationskoeffizienten von vier Klassen mit unterschiedlichen Expositionsdauern

Klassencharakteristika		zusammengefasste Klassen ¹⁾ in Bezug auf die Expositionsdauer t_{exp} [a]				Mittelwert
		0 bis 1,7	18 bis 23	28 bis 32	38 bis 40	
mittlere Expositionsdauer	[a]	0,9	19,3	30,6	39,2	-
Anzahl der Daten	[-]	22	28	7	10	
Variationskoeffizient	[-]	0,6	0,7	0,5	1,3	~ 0,7

1) nicht alle vorhandenen Daten konnten zu Klassen zusammengefasst werden

8.3.2.2 Ableiten eines funktionalen Zusammenhangs auf empirischer Grundlage

Die Ableitung des funktionalen Zusammenhangs zwischen dem effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten $D_{Eff,R}^*$ und der Expositionsdauer t_{exp} erfolgt auf der Grundlage von **Gleichung 14** auf Seite 54.

Ausgangswert

Der Ausgangswert dieser Gleichung ist der Chloridmigrationskoeffizient, welcher im Alter von $t = 28$ d an Betonprobekörpern bestimmt wird. Dieser Materialkennwert korreliert für Normalbetone gut mit dem aus Einlagerungsversuchen bestimmten effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten, wobei die Expositionsdauer im Rahmen dieser Einlagerungsversuche bei 56 Tagen liegt. Der Ausgangswert des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten ist somit der Chloridmigrationskoeffizient zum Referenzzeitpunkt $t_{0,R} = 56$ d. Infolge der festgestellten guten Korrelation der Migrationskoeffizienten zu den Diffusionskoeffizienten nach einer Expositionsdauer von 56 Tagen wurde der Testmethodenfaktor zu eins gesetzt, vgl. **Anhang B-3**.

Der für die Auswertung des zeitabhängigen Verlaufs von $D_{Eff,R}^*$ zu berücksichtigende mittlere Chloridmigrationskoeffizient wurde nach Versuchsdaten von Gehlen für einen Beton mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,5$ abgeschätzt. Bei bekanntem Mittelwert leitete Gehlen die Streuung dieser Variablen mit $CoV = 0,2$ ab [49]. Bei der folgenden Auswertung ist zu berücksichtigen, dass die effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten an Betonen mit unterschiedlichen Wasserzementwerten (Bandbreite von $w/z = 0,45$ bis rd. $w/z = 0,55$) bestimmt wurden. Daher wurde bei der Auswertung des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten auch ein streuender Mittelwert berücksichtigt, um die damit verbundene erhöhte Streuung des Ausgangswerts besser zu erfassen. Bei dieser Streuung wurde davon ausgegangen, dass der Mittelwert eine normalverteilte Variable mit einem Variationskoeffizienten von $CoV = 0,3$ ist. Der Mittelwert wurde nach [49] für einen CEM I-Beton mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,5$ mit $15 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ berücksichtigt. Bedingt durch diese Annahme streut der Mittelwert des Chloridmigrationskoeffizienten so, dass der 5 %-Quantilwert ungefähr dem Migrationskoeffizienten für einen CEM I-Beton mit einem Wasserzementwert $w/z = 0,45$ entspricht und der 95 %-Quantilwert dem eines Betons mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,55$. Durch das beschriebene Vorgehen ergibt sich der Ausgangswert $D_{RCM,0}$ als normalverteilte Variable mit einem Mittelwert von $15 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ und einer Standardabweichung von $5,3 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

Regressionsvariablen a_R , k_R

Unter Zugrundelegung des Ausgangswerts $D_{RCM,0}$ von $15 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ wurde eine Regressionsanalyse durchgeführt (vgl. hierzu [49]), woraus sich die Variablen a_R und k_R ergeben. Die Quantifizierung der Streuung der Variablen erfolgte durch die probabilistische Auswertung von **Gleichung 14**, Seite 54 unter Berücksichtigung der angepassten Streuung der Variablen $D_{RCM,0}$. Die festgestellte Streuung der Variable $D_{\text{Eff},R}^*$ kann ohne weitere Erkenntnisse nicht eindeutig den Regressionsvariablen a_R und k_R zugeordnet werden. Da Informationen hierzu nicht vorliegen, wurde ein pragmatischer Ansatz gewählt und für beide Variablen die gleiche Standardabweichung angesetzt. Das Ergebnis der Auswertung nach [49] ist für verkehrsbedingt mit Spritzwasser beaufschlagten CEM I-Beton in **Tabelle 12** zusammengestellt.

Tabelle 12: Ergebnis der statistischen Auswertung zu den Regressionsvariablen für verkehrsbedingt mit Spritzwasser beaufschlagten CEM I-Beton unter Berücksichtigung von: $k_t = 1$ und $t_{0,R} = 0,154 \text{ a}$

Variable	Einheit	Verteilung*	Mittelwert m	Standardabweichung s
a_R	[-]	BetaD $0 \leq a_R \leq 1$	0,6	0,12
k_R	[-]	ND	0,45	0,12

* ND: Normalverteilung, BetaD: Beta-Verteilung

Die Regressionsvariable a_R bildet das Alterungsverhalten des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten ab, sie entspricht der Steigung des zeitabhängigen Verlaufs im doppellogarithmischen Maßstab. Je größer diese Variable, desto ausgeprägter ist die zeitabhängige Abnahme des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten. Auf der Grundlage der zuvor durchgeführten theoretischen Überlegungen, ist davon auszugehen, dass dieser Wert für die verkehrsbedingte Spritzwasserbeaufschlagung deutlich größer ist als der für CEM I-Betone mit ständiger Chloridbeaufschlagung. Dies kann durch die Auswertung bestätigt werden, da $a_R = 0,6 > a = 0,3$.

Die Regressionsvariable k_R enthält neben den hier diskutierten Einflüssen in Bezug auf die Exposition (konvektiver Chlorideintrag, nicht vollständige Wassersättigung etc.) auch den Einfluss der Temperatur auf den Chloridtransport. Für reine Diffusion kann der temperaturbedingte Einfluss gut mit der Arrhenius-Gleichung abgeschätzt werden (vgl. **Gleichung C 18** im **Anhang C-4**). Durch Berücksichtigung einer mittleren Jahrestemperatur von rd. 9 °C in Deutschland, ergibt sich damit nach Gehlen ein temperaturbedingter Abminderungsfaktor bezüglich $D_{\text{Eff},C}$ von rd. $k_e = 0,53$ [49]. Der hier ermittelte Abminderungsfaktor k_R liegt mit 0,45 in der gleichen Größenordnung.

Das Ergebnis der Auswertung, der zeitabhängige Verlauf des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten für verkehrsbedingt mit Spritzwasser beaufschlagten Beton, ist unter Berücksichtigung der in **Tabelle 12** gegebenen Regressionsvariablen in **Bild 41** dargestellt.

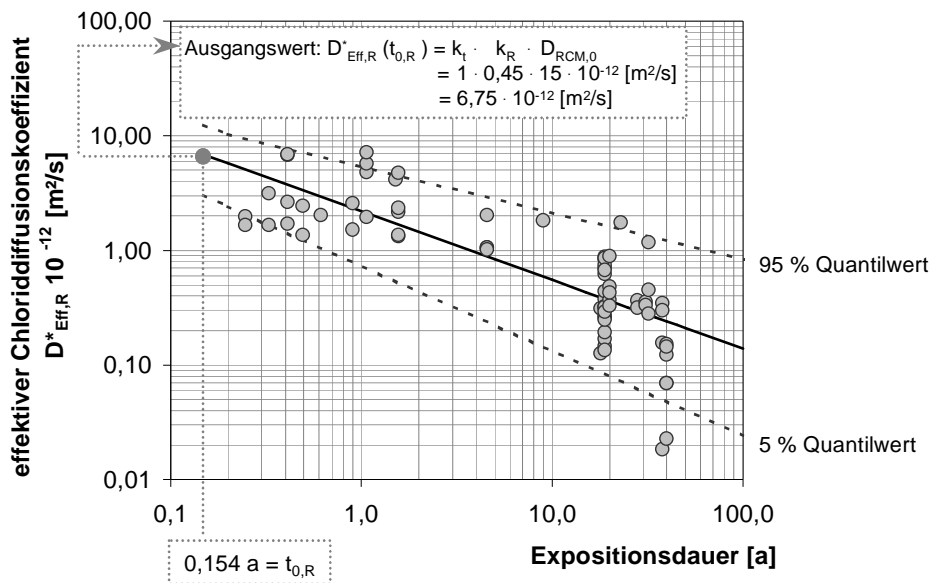


Bild 41: Streuband des modellierten effektiven Diffusionskoeffizienten $D_{\text{Eff,R}}^*$ für verkehrsbedingt mit Spritzwasser beaufschlagten Beton mit den entsprechenden Daten

8.3.2.3 Betrachtungen zur Übertragbarkeit auf andere Randbedingungen

Betonzusammensetzung

Das vorliegende Modell wurde mit Daten kalibriert, bei denen davon ausgegangen wird, dass diese von einem CEM I-Beton mit Wasserzementwerten in einer Bandbreite von 0,45 bis rd. 0,55 stammen, bzw. dahingehend umgerechnet wurden.

Bei der Beschreibung des materialspezifischen Einflusses auf den effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten durch den Chloridmigrationskoeffizienten ist weiterhin zu beachten, dass einige Faktoren bei der Übertragbarkeit noch nicht ausreichend geklärt sind. So haben z.B. dem Beton künstlich zugeführte Luftporen keinen signifikanten Einfluss auf den Chloridmigrationskoeffizienten [112][72]. Laborversuche zeigen hingegen, dass durch künstlich zugeführte Luftporen der Widerstand des Betons gegenüber einem Wassereintrag durch kapillares Saugen sowie durch die Mikroislinsenpumpe erhöht wird [56][138]. Da der konvektive Chlorideintrag immer einen Wassereintrag voraussetzt, wird bei Beton mit zusätzlich eingeführten Luftporen infolgedessen eine kleinere Chlorideindringtiefe erwartet, was zu geringeren effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten führen würde, vgl. **Kapitel 8.3.1.2**, Seite 63. Inwieweit sich künstlich eingeführte Luftporen unter praxisrelevanten Expositionsbedingungen auf den effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten $D_{\text{Eff,R}}^*$ auswirken, wurde noch nicht systematisch untersucht. Erste orientierende Versuche im skandinavischen Klima deuten auf einen untergeordneten Einfluss der Luftporen hin [89]. 49

Für Meeresbauwerke wurde gezeigt, dass die Reduzierung des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten über die Expositionsdauer abhängig vom Bindemittel ist. Da die in diesem Modell hergeleiteten Regressionsvariablen zur Beschreibung der Altersabhängigkeit von CEM I-Betonen abgeleitet wurden, ist die direkte Übertragung des Modells im Zusammenhang mit diesen Variablen auf andere Bindemittel nicht ohne weiteres möglich. Für Betone mit Hüttensand (im Wesentlichen CEM III/A, CEM III/B, CEM II/A-S und CEM II/B-S) ist durch die höhere Chloridbindekapazität [135] und die über das Betonalter ausgeprägtere Verdichtung des Porengefüges durch die latent hydraulische Reaktion von einer deutlicheren Reduzierung des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten auszugehen, vgl. Altersexponent für Meeresbauwerke [49] und zeitabhängige Entwicklung des Chloridmigrationskoeffizienten [72]. Gleiches gilt für Betone mit Steinkohlenflugasche. Für Betone mit diesen Bindemitteln ist von einem ausgeprägteren Abfall des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten auszugehen.

Expositionsbedingungen

Der Zusammenhang zwischen effektivem Chloriddiffusionskoeffizienten und Expositionsdauer wurde ab $t_{\text{exp}} > 5$ a ausschließlich von Chloridprofilen aus Beton mit vertikal orientierten Oberflächen abgeleitet, welche sich in einem Abstand $r_{\text{FBR}} < 2$ m zum Fahrbahnrand befinden. Infolge des vergleichsweise geringen Abstands zur Straße werden diese Bauteilflächen daher der Expositionsklasse XD3 (Spritzwasserbereich) zugeordnet.

Im Folgenden soll das für diese Randbedingungen modellierte Streuband des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten weiteren Daten aus anderen Expositionen gegenübergestellt werden. Zunächst wurden rd. 60 Chloridprofile aus Bauteilbereichen ausgewertet, die sich in einem größeren Abstand zum Fahrbahnrand befinden ($r_{\text{FBR}} > 3$ m, Mittelwert des Datensatzes rd. 4,5 m). Diese Bauteilflächen wurden dem Sprühnebelbereich zugeordnet. Die Gegenüberstellung dieser Daten mit dem Streuband der Spritzwasserexposition (vertikal orientierte Bauteilflächen) zeigt, dass die effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten der Sprühnebelexposition tendenziell geringer sind, vgl. **Bild 42** links. Der Unterschied zwischen dem CEM I- und dem CEM III-Beton scheint hierbei von untergeordneter Bedeutung zu sein. Die mit zunehmendem Abstand zum Fahrbahnrand geringer werdenden effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten werden auch durch andere Untersuchungen bestätigt [148].

Bei chloridbeaufschlagten horizontalen Betonoberflächen (z.B. Brückenkappen) wird von einer längeren Verweildauer der chloridhaltigen Lösung auf der Betonoberfläche ausgegangen als bei vertikal orientierten Oberflächen. In Hinblick auf den konvektiven Chlorideintrag (kapillares Saugen und Mikroislinsepumpe) wird daher bei einem Chlorideintrag über eine horizontale Betonoberfläche eine größere Eindringtiefe erwartet, vgl. **Kapitel 8.3.1.2**, Seite 63. Dies wurde durch Untersuchungen bestätigt [79]. Größere konvektive Eindringtiefen führen dabei zu größeren effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten, vgl. **Kapitel 8.3.1.2**, Seite 63, weshalb für Beton, bei welchem der konvektive Chlorideintrag über horizontale Oberflächen stattfindet, ungünstigere Werte erwartet werden, als durch diesen Ansatz prognostiziert.

Neben der Brückenkappe ist auch die Parkhausdecke ein Bauteil, dessen beaufschlagte Fläche horizontal orientiert ist. Bei der Chlorideinwirkung auf horizontale Oberflächen ist zu beachten, dass diese auch von

den baulichen Randbedingungen abhängt, z.B. Gefällesituation. Für einen ersten Überblick wurden effektive Chloriddiffusionskoeffizienten von Parkhausdecken (n = 25, vgl. [98]) dem hier abgeleiteten Streuband gegenübergestellt. Die Gegenüberstellung zeigt, dass die effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten der Parkhäuser tendenziell größer sind, vgl. **Bild 42** rechts. Somit würde das Ergebnis einer Lebensdauerberechnung auf mit den hier bestimmten Regressionsvariablen auf der unsicheren Seite liegen. Bei dem zur Verfügung stehenden Datensatz konnte nur für vereinzelte Daten rekonstruiert werden, ob die Proben aus ungerissem Beton genommen wurden. Daten aus Rissen sind bei dieser Gegenüberstellung zu vernachlässigen, da das Modell nur für ungerissenen Beton anwendbar ist.

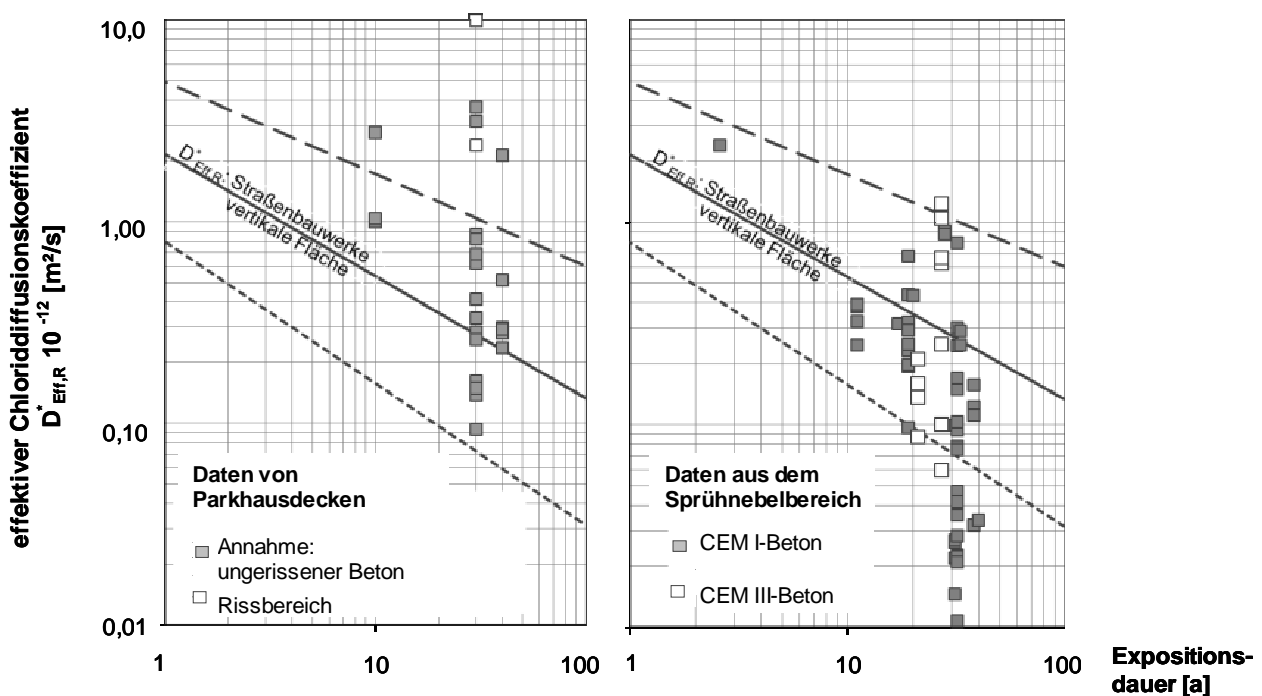


Bild 42: Gegenüberstellung des modellierten Streubands des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten für verkehrsbedingt mit Spritzwasser beaufschlagten Beton $D_{\text{Eff,R}}^*$ mit entsprechenden Daten aus dem Sprühnebelbereich [59][112][111][152][153][155] und aus Parkhausdecken [98]

Zu den Randbedingungen, welche das Chlorideindringen in Beton beeinflussen, zählt auch das verwendete Taumittel. Bei Straßenbauwerken variiert dieses je nach klimatischen Randbedingungen und Verfügbarkeit. Bei der durchgeführten Auswertung zum zeitabhängigen Verlauf des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten ist davon auszugehen, dass die Chloridprofile überwiegend infolge einer NaCl-Einwirkung verursacht wurden. Werden überwiegend andere Taumittel verwendet, so muss von signifikant abweichenden Werten für den effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten ausgegangen werden, vgl. **Kapitel 8.3.1.7, Seite 79.**

9 VALIDIERUNG

9.1 Zielsetzung und Vorgehen

Der Begriff Validierung leitet sich aus dem Lateinischen "validum facere" ab, was „gültig machen“ bedeutet. Bei der Modellvalidierung wird untersucht, ob das abstrakte Modell die Realität befriedigend repräsentiert. Gegenstand der Analyse ist folglich, die Gültigkeit (Validität) des Modells zu überprüfen. Grundsätzlich ist eine vollständige Übereinstimmung zwischen Realität und Modell nicht möglich, da Abstraktionen und Idealisierungen die Grundlage einer Modellbildung sind. Folglich werden in einem Modell sehr viel weniger Einflussgrößen (idealerweise die wichtigsten) berücksichtigt, als in der Realität an dem abzubildenden Prozess beteiligt sind, wodurch sich Modell und Realität auch unterschiedlich verhalten. Genau genommen können daher Modelle, anders als Prüfverfahren [134], nie validiert oder verifiziert (lat. verum facere - wahr machen) werden, sondern lediglich durch die demonstrierte Übereinstimmung zwischen Beobachtung und Modellvorhersage bestätigt oder bekräftigt werden [91]. Zu diesem Zweck werden die Modellprognosen den Beobachtungen gegenübergestellt und bewertet. Dies wird im Folgenden trotz des berechtigten Einwands als Validierung [73][94] bzw. Verifikation [80] bezeichnet, da dies eine übliche Bezeichnung für diese vergleichende Analyse ist. Eine weitere Begrifflichkeit, welche für diese Gegenüberstellung verwendet wird, ist das Benchmarking [25][34].

Bei der Validierung des hergeleiteten Modells muss zunächst die Zielsetzung bestimmt werden. Eine Übersicht möglicher Ziele ist in **Tabelle 13** gegeben. Wie aus den dort gegebenen Anmerkungen abgeleitet werden kann, beschränkt sich die folgende Validierung auf die Vorhersage des Chloridprofils, vgl. 2. Ziel in **Tabelle 13**.

Tabelle 13: Mögliche Ziele einer Validierung

Ziel	Validierungsgegenstand	Anmerkung
1. Validierung der Vorhersage des effektiven Chlorid-diffusionskoeffizienten	Gleichung 15 Seite 54	Alle in Frage kommenden Daten wurden hier für die Modellkalibrierung verwendet, somit stehen keine unabhängigen Daten für eine Validierung zur Verfügung.
2. Validierung der Vorhersage des Chloridprofils	Gleichung 13 Seite 54	Chloridprofile, welche nicht den Anforderungen an die Modellkalibrierung genügt haben, können hierfür mit Einschränkungen verwendet werden.

Im Idealfall sollte ein Prognosemodell in der Lage sein, das Chloridprofil über die gesamte Eindringtiefe und Lebensdauer des Bauwerks zutreffend zu beschreiben. Um die Modellkomplexität zu begrenzen, sind Vereinfachungen für den oberflächennahen Bereich getroffen worden, weshalb dieser Bereich nicht für die Validierung herangezogen werden kann. Des Weiteren wäre es wünschenswert, wenn durch die Validierung der zeitabhängige Anstieg der Chloridkonzentration in unterschiedlichen Tiefenlagen bestätigt werden könnte. Dadurch wäre es z.B. möglich, den Einfluss einer ggf. nicht zutreffend quantifizierten Chloridoberflächenkonzentration C_{sa} auf die berechneten tiefenabhängigen Chloridkonzentrationen zu minimieren, vgl. hierzu auch **Kapitel 10.2** (Sensitivitätsanalyse). Dieses Vorgehen erfordert jedoch eine vergleichbare Datenbasis zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten. Ist diese Voraussetzung nicht erfüllt, so muss sich die

Validierung auf die Gegenüberstellung der berechneten Chloridkonzentrationen mit den am Bauwerk bestimmten Chloridkonzentrationen zu einem Zeitpunkt beschränken.

Zur Validierung wurden zunächst Chloridprofile aus einer vergleichbaren Exposition gesucht (hier im Wesentlichen: Abstand zum Fahrbahnrand). Ferner musste der beprobte Beton (Bindemittel und w/z-Wert) und die Expositionsdauer zum Zeitpunkt der Beprobung vergleichbar sein. Um die Streuung der Chloridprofile beschreiben zu können, ist ein ausreichend großer Strichprobenumfang notwendig. Aus einer Chloridatenbank mit rd. 900 Chloridprofilen, welche im Rahmen eines Forschungsprojekts angelegt wurde [112], wurden daher zunächst die Randbedingungen gesucht, für welche der Datenumfang möglichst groß war. Angaben zur Betonzusammensetzung lagen meist nicht vor. Es wurde davon ausgegangen, dass die Proben hauptsächlich von Bauwerken stammen, welche mit CEM I-Beton und einem Wasserzementwert von w/z ~ 0,5 hergestellt wurden. Fälle, in denen eine davon abweichende Zementart bekannt war, wurden nicht ausgewertet [112]. Alle in diesem Zusammenhang verwendeten Chloridprofile wurden aufgrund der großen Schrittweite bei der Bohrmehlentnahme nicht für die empirische Anpassung des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten herangezogen und können infolgedessen als unabhängig betrachtet werden.

Nur für Beton von verhältnismäßig alten Bauwerken ($t_{\text{BW-Alter}} = 32$ a) standen genug Chloridprofile zur Verfügung, um die Streuung zu erfassen. Für diese Datensätze wurden Streubänder (5 %-, 50 %- und 95 %-Quantilwerte) abgeleitet und den mit dem Modell berechneten Streubändern (Prognosen) gegenübergestellt.

9.2 Gegenüberstellung von gemessenen und prognostizierten Chloridkonzentrationen

Auswerten der Chloridprofile

Der ausgewertete Datensatz setzt sich aus Chloridprofilen mit den folgenden Randbedingungen zusammen:

- Alle Chloridprofile stammen von Straßenbauwerken entlang der Autobahn A1 im Bundesland NRW.
- Die Entnahmetiefen aller berücksichtigten Chloridprofile waren 0 - 20 mm, 20 - 40 mm, 40 - 60 mm (Schrittweite 20 mm), was mittleren Tiefenlagen von $x = 10$ mm, 30 mm und 50 mm entspricht.
- Die Expositionsdauer (näherungsweise über das Bauwerksalter abgeschätzt) lag zwischen $t_{\text{exp}} = 30,7$ - 32,7 Jahren. Der aus dem Datensatz berechnete arithmetische Mittelwert beträgt $t_{\text{exp}} = 32$ Jahre.
- Der horizontale Abstand der Bohrmehlentnahmestelle zum Fahrbahnrand lag zwischen 160 - 165 cm. Der aus dem Datensatz berechnete arithmetische Mittelwert beträgt 162 cm.
- Der vertikale Abstand der Bohrmehlentnahmestelle zur Fahrbahnoberkante betrug 20, 50 oder 100 cm.

Es ist davon auszugehen, dass bei den vorhandenen Randbedingungen die Chloridprofile des Bauwerksbetons ein Konzentrationsmaximum im Inneren, und damit einen Tiefenbereich x_K , aufweisen. Durch die vorhandene Schrittweite bei der Bohrmehlentnahme kann diese Information nicht abgebildet werden, weshalb die durch Bohrmehlanalyse bestimmte Chloridkonzentration der ersten Tiefenlage (0 - 20 mm) deutlich unterschätzt wird. Eine Korrektur dieser Konzentration kann nicht vorgenommen werden, da Informationen

zum Konzentrationsverlauf in diesem Bereich fehlen. Daher ist die erste Tiefenlage bei der Gegenüberstellung der Daten zu der Prognose zu vernachlässigen. Trotz dieser Einschränkung sind der Vollständigkeit halber zunächst alle Tiefenlagen ausgewertet worden.

In Abhängigkeit von der vertikalen Entfernung der Bohrmehlentnahmestelle zur Fahrbahnoberkante wurden drei Chloridprofilgruppen gebildet, welche dahingehend benannt sind, „20“, „50“ und „100“ [cm]. Die Chloridkonzentrationen einer jeden Gruppe wurden für jede Tiefenlage stochastisch ausgewertet. Die Auswertung ergab, dass alle neun Datensätze (drei Chloridprofilgruppen à drei Tiefenlagen) sich gut mit einer Lognormalverteilung beschreiben lassen, vgl. **Bild 43**. Eine Überprüfung dieser Hypothese auf dem 5 %-Signifikanzniveau durch den Kolmogorov-Smirnov-Test und den Anderson-Darling-Test ergab, dass diese nicht verworfen werden sollte, wobei der zur Verfügung stehende Datenumfang für eine zuverlässige Aussage zu gering ist.

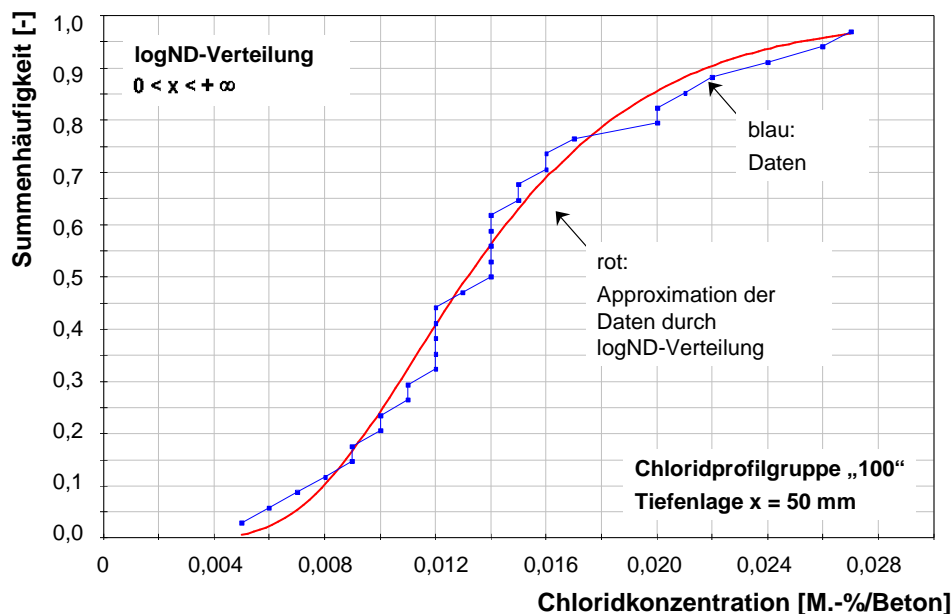


Bild 43: Beispielhafte Darstellung der vorgenommenen Auswertung, hier in einer Tiefenlage $x = 50$ mm der Chloridprofilgruppe „100“

Da keine Informationen zur Betonzusammensetzung vorhanden waren, wurde als Umrechnungsfaktor zur Berechnung der Chloridkonzentration bezogen auf den Zement vereinfachend der Faktor 7 angesetzt. Das Ergebnis der Auswertung ist der **Tabelle F 1** im **Anhang F** zu entnehmen. Die Streuung der Chloridkonzentrationen ist z.T. sehr groß, vgl. **Bild 44** links. Die Variationskoeffizienten waren für die Chloridprofilgruppe „20“ mit bis zu $CoV = 0,85$ (Tiefenlage: 20 – 40 mm) am größten. Für die Chloridprofilgruppe „100“ war der Variationskoeffizient mit $CoV = 0,4$ (Tiefenlage: 40 – 60 mm) am geringsten. Die mittleren Chloridkonzentrationen in einer jeden Entnahmetiefe sind erwartungsgemäß für die Chloridprofilgruppe „20“ am größten und für „100“ am geringsten, wobei der Unterschied der Chloridprofile zwischen den Chloridprofilgruppen sehr gering ist, vgl. z.B. Chloridprofilgruppe 50“ und „100“ in **Bild 44** rechts.

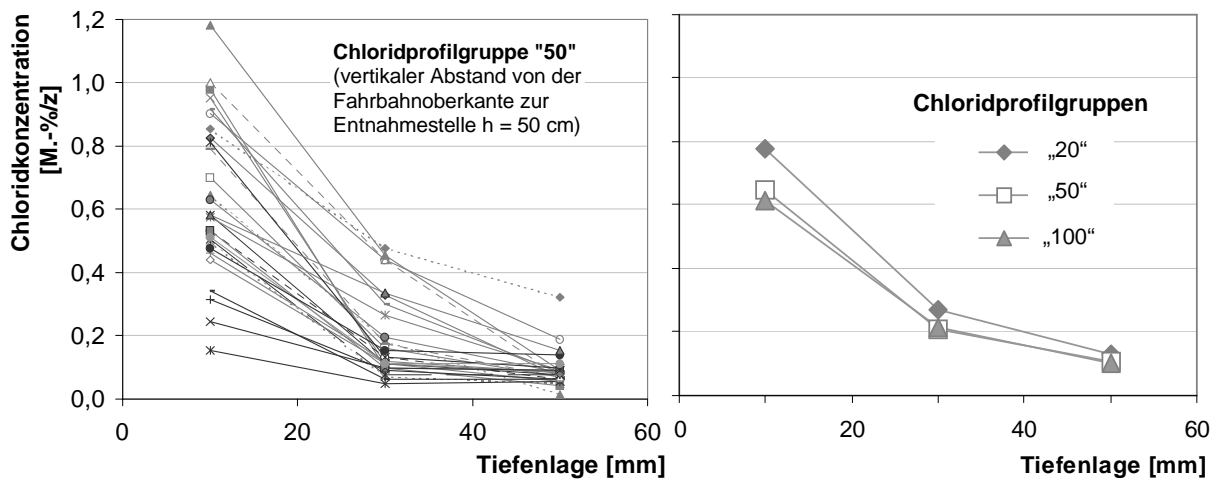


Bild 44: Chloridprofile der Chloridprofilgruppe "50" (links), mittlere Chloridkonzentrationen aller untersuchten Chloridprofilgruppen (rechts)

Aus diesen Chloridkonzentrationen wurden für jede Chloridprofilgruppe Streubänder abgeleitet, um diese anschließend den prognostizierten Streubändern gegenüberstellen zu können, vgl. **Bild F 3** im **Anhang F**.

Prognose der Chloridkonzentration

Die Prognose der Chloridkonzentration in den jeweiligen Tiefenlagen erfolgte mit **Gleichung 13**, Seite 54, unter Verwendung der in **Tabelle F 2** in **Anhang F** zusammengestellten Variablen. Die Auswertung der prognostizierten Chloridkonzentrationen zeigt, dass auch die prognostizierten Daten zutreffend mit einer Lognormalverteilung beschrieben werden können, was durch die Überprüfung auf dem 5 %-Signifikanzniveau durch den Kolmogorov-Smirnov-Test und den Anderson-Darling-Test bestätigt werden konnte.

Auf der Grundlage dieser Auswertung wurden die Streubänder der prognostizierten Chloridprofile in den unterschiedlichen Abständen zur Fahrbahnoberkante (20, 50 und 100 cm über OK Fahrbahn) berechnet, vgl. **Bild F 4** im **Anhang F**, Seite F4.

Gegenüberstellung

Die Gegenüberstellung der prognostizierten mit den aus Bauwerksdaten abgeleiteten Streubändern zeigt, dass sowohl das 50 %-Quantil (Median) als auch das 95 %-Quantil der Prognose deutlich über den entsprechenden Quantilen der aus Bauwerksdaten abgeleiteten Stichprobe liegen, vgl. **Bild 45**. Da die Daten lognormalverteilt sind, liegt das 50 %-Quantil näher am 5 %-Quantil. Die Gegenüberstellung wurde infolge der beschriebenen Problematik bzgl. des zu erwartenden Tiefenbereichs x_K auf die Tiefenlagen größer 20 mm beschränkt, vgl. Seite 96.

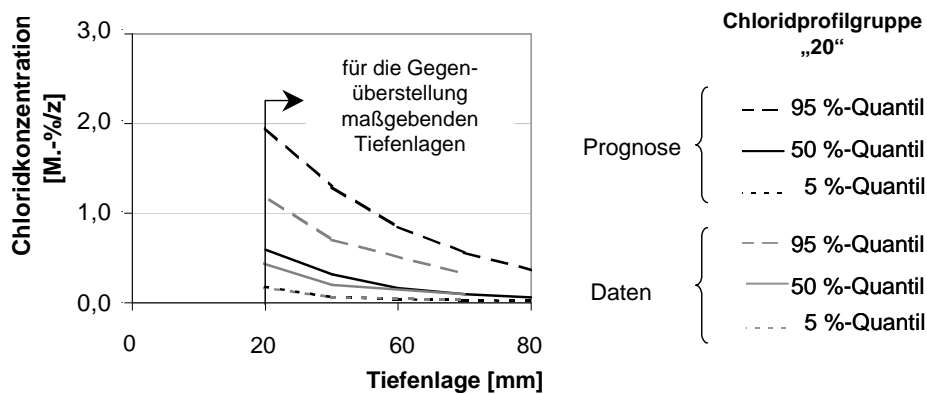


Bild 45: Gegenüberstellung des prognostizierten Streubands (Quantilwerte der Prognose) mit dem aus Bauwerksdaten ermittelten Streuband, hier für die Chloridprofilgruppe „20“

Zur abschließenden Gegenüberstellung der Prognosedaten mit den Bauwerksdaten wurden die prognostizierten Chloridkonzentrationen entsprechend der Schrittweite (20 mm) bei der Bohrmehlentnahme auf die mittleren Chloridkonzentrationen in den Tiefenlagen $x = 30$ und $x = 50$ mm umgerechnet, vgl. Bild 46 für Chloridprofilgruppe „20“.

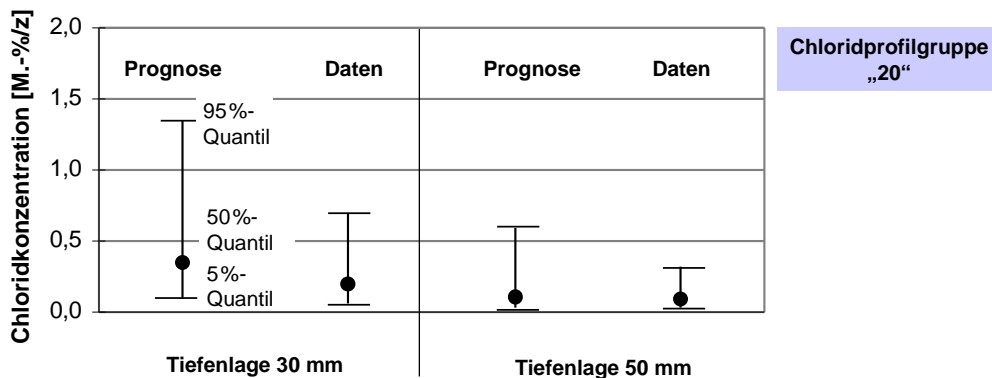


Bild 46: Gegenüberstellung der prognostizierten Streubänder mit denen aus Bauwerksdaten abgeleiteten Streubändern für unterschiedliche Tiefenlagen, Chloridprofilgruppe „20“

Der Grund für die deutlich geringere Streuung der Bauwerksdaten wird vor allem in der relativ homogenen Stichprobe gesehen. So stammen alle untersuchten Chloridprofilgruppen von Bauwerken entlang einer Autobahn, mit nahezu identischem Abstand zur Fahrbahn und damit mit nahezu identischer Beaufschlagungsintensität. Die entsprechende Gegenüberstellung für die anderen Chloridprofilgruppen kommt zu einem vergleichbaren Ergebnis, vgl. **Bild F 6** im **Anhang F**.

Anmerkung zur angesetzten Chloridoberflächenkonzentration

Für die Prognose der Streubänder wurde die Chloridoberflächenkonzentration C_{Sa} nach **Kapitel 8.1**, Seite 58 angesetzt, da diese Variable an Hand der zur Verfügung stehenden Chloridprofile nicht bestimmt werden konnte. Infolge der geringen Tiefenabstufung bei der Bohrmehlanalyse ist kein Tiefenbereich x_K erkennbar, in welchem die Chloridkonzentrationen bedingt durch einen Chloridaustrag deutlich niedriger liegen

können. Dies führt zu einer Unterschätzung der Chloridkonzentration in der ersten Tiefenlage (0 - 20 mm) und damit zu einem flacheren Chloridprofil im oberflächennahen Bereich. Wird nun die Chloridoberflächenkonzentration C_{Sa} auf der Grundlage eines solchen Chloridprofils mit nicht erkanntem x_K -Bereich bestimmt, so wird diese unterschätzt. Die Gegenüberstellung der nach **Kapitel 8.1** bestimmten Oberflächenkonzentration von z.B. $C_{Sa} = 1,71 \text{ M.-%/z}$ (für Chloridprofilgruppe „50“) mit den Chloridprofilen (vgl. **Bild 44** auf Seite 98) lässt jedoch vermuten, dass diese Konzentration C_{Sa} deutlich zu hoch ist. Dies könnte an der unterschiedlichen Grundgesamtheit liegen. Die der Quantifizierung C_{Sa} zu Grunde liegenden Chloridprofile stammen vornehmlich von Infrastrukturbauwerken aus dem innerstädtischen Bereich aus Süddeutschland (überwiegend München), während die hier ausgewerteten Daten von Bauwerken aus NRW kommen, welche entlang einer Autobahn stehen. Der Streusalzeinsatz lag in der Vergangenheit in München z.T. um ein Vielfaches über dem anderer vergleichbar großer Städte in NRW [147]. Infolgedessen ist es fraglich ob eine Quantifizierung der Chloridoberflächenkonzentration C_{Sa} auf der Basis der vorhandenen Daten für die hier ausgewerteten Bauwerke zutreffend ist.

9.3 Ergebnis

Im Rahmen der Validierung wurden Chloridkonzentrationen in unterschiedlichen Tiefenlagen berechnet und den am Bauwerk (Brückenbauwerke entlang einer Autobahn in NRW) gemessenen Chloridkonzentrationen gegenübergestellt. Die Berechnung der Chloridkonzentrationen erfolgte auf der Grundlage von **Gleichung 13**, Seite 54 unter Berücksichtigung einer nach **Kapitel 8.1**, Seite 58 quantifizierten Chloridoberflächenkonzentration und der abgeleiteten Regressionsvariablen zur Beschreibung des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten $D_{\text{Eff,R}}^*$, vgl. **Tabelle F 2** im **Anhang F**. Die Gegenüberstellung zeigt, dass die unter Berücksichtigung dieser Annahmen prognostizierten 50 %- und 95 %-Quantilwerte der Chloridkonzentrationen stets größer waren als die am Bauwerk bestimmten Konzentrationen. Betrachtungen zur Chloridoberflächenkonzentration zeigen, dass davon auszugehen ist, dass die im Modell berücksichtigte Chloridoberflächenkonzentration (abgeleitet von Daten aus Süddeutschland) zu hoch ist. Dieser Umstand könnte daher zur festgestellten Überschätzung der prognostizierten Chloridkonzentrationen beigetragen haben. Da eine unabhängige Stichprobe von Infrastrukturbauwerken aus Süddeutschland für die Validierung nicht zur Verfügung stand, konnte dieser Einfluss jedoch nicht weiter untersucht werden. Auch die Streuung der durch das Modell prognostizierten Chloridkonzentration war größer als die der gemessenen Daten. Die geringeren Streuungen innerhalb Gruppe der auswerteten Bauwerksdaten waren zu erwarten, da diese relativ homogen ist. Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Prognose der auf dieser Grundlage bestimmten Chloridkonzentrationen eine Abschätzung auf der sicheren Seite für das Ende der Einleitungsphase nach sich zieht, vgl. **Bild 3**, Seite 14.

10 LEBENSDAUERBERECHNUNG

10.1 Modell

10.1.1 Prognose

Die im Folgenden vorgestellte Lebensdauerberechnung fußt auf der Zuverlässigkeitstheorie, welche auch die Grundlage der Tragwerksbemessung nach DIN 1045-1:2008 [TR1] ist. Im Rahmen von Grenzzustandsbetrachtungen werden hier Widerstand und Einwirkung gegenübergestellt. Eine Einführung in die Zuverlässigkeitstheorie kann z.B. [44] entnommen werden. Detaillierte Informationen in Hinblick auf Lebensdauerberechnungen können der Literatur entnommen werden, z.B. [49][72].

Neben chemischen oder mechanischen Einwirkungen auf den Beton, welche u.U. dessen Dauerhaftigkeit beeinflussen, ist für Bauteile im Spritzwasserbereich von Straßen insbesondere der Schutz der Bewehrung gegenüber chloridinduzierter Bewehrungskorrosion von entscheidender Bedeutung. Die in der Praxis verwendeten Modelle zur Lebensdauerberechnung in Hinblick auf Bewehrungskorrosion beziehen sich auf das Ende der Einleitungsphase, die Depassivierung, vgl. **Bild 3**, Seite 14. Dieser Zustand wird in diesem Zusammenhang als Grenzzustand bezeichnet. Bei chloridinduzierter Bewehrungskorrosion ist der Grenzzustand erreicht, wenn die Chloridkonzentration in Höhe der äußeren Bewehrungslage den kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalt erreicht hat. Die Gegenüberstellung des kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts C_{crit} mit der prognostizierten Chloridkonzentration in der Tiefenlage der äußeren Bewehrung $C(d_c, t_{exp})$ wird als Grenzzustandsgleichung bezeichnet, vgl. **Gleichung 18**.

$$g(C_{crit}, C(d_c, t_{exp})) = C_{crit} - C(d_c, t_{exp})$$

Gleichung 18

C_{crit} : kritischer korrosionsauslösender Chloridgehalt bezogen auf den Zementgehalt [M.-%/z],
nach [49] als beta-verteilte Variable in den Grenzen $0,2 \leq C_{crit} \leq 2$
quantifiziert mit $m = 0,6$ und $s = 0,15$

$C(d_c, t_{exp})$: Chloridkonzentration bezogen auf den Zementgehalt in der Tiefenlage d_c (Betondeckung)
nach einer Expositionsdauer t_{exp} [M.-%/z],
für verkehrsbedingt mit Spritzwasser beaufschlagten CEM I-Beton
mit $w/z \sim 0,5$, siehe **Gleichung 13**, Seite 54 mit $x = d_c$

Die Lebensdauerberechnung erfolgt durch die vollprobabilistische Auswertung der Grenzzustandsgleichung. Für die Auswertung von **Gleichung 18** müssen dementsprechend alle in **Tabelle 14** aufgeführten Variablen mit ihren Streuungen quantifiziert werden. Da solche Berechnungen i.d.R. nicht von Hand durchzuführen sind, werden kommerzielle Computerprogramme zur Auswertung der Grenzzustandsgleichung verwendet, z.B. [100]. Um einen ersten Eindruck zu gewinnen, kann das prognostizierte Chloridprofil auch mit einem Taschenrechner auf Mittelwertbasis berechnet werden. Somit kann der wesentliche Bestandteil dieser Berechnung ohne ein spezielles Berechnungsprogramm nachvollzogen werden. Das Ziel der vollprobabilistischen Auswertung ist die Berechnung der Zuverlässigkeit gegenüber chloridinduzierter Depassivierung der äußeren Bewehrungslage in rissfreiem Beton. Diese Zuverlässigkeit wird über den sogenannten Zuverlässigkeitsindex β ausgedrückt.

Tabelle 14: Quantifizierung der Variablen für den Grenzzustand der chloridinduzierten Depassivierung der Bewehrung von spritzwasserbeaufschlagten Straßenbauwerken

Variable		Einheit	Beschreibung	Quelle
1	C_{Sa}	[M.-%/z]	Chloridoberflächenkonzentration	vgl. Kapitel 8.1 , Seite 58
2	C_i	[M.-%/z]	Grundchloridgehalt	[72], vgl. auch Kapitel 8.2 , Seite 61
3	d_c	[mm]	Betondeckung	normative Anforderungen (z.B. [TR1]) oder ausgewertete Messwerte
4	$D_{RCM,0}$	[mm ² /a]	Chloridmigrationskoeffizient für ein Probenalter von 28 d	Untersuchungsergebnis oder Daten von vergleichbaren Betonen, z.B. [49]
5	$D_{t,R}^*$	k_t	Testmethodenfaktor	vgl. Tabelle 12 , Seite 91
6		$t_{0,R}$	Bezugszeitpunkt	
7		k_R	Regressionsvariable	
8		a_R		
9	t_{exp}	[a]	Expositionsdauer	Aufgabenstellung
10	C_{crit}	[M.-%/z]	kritischer korrosionsauslösender Chloridgehalt	[49]

Für eine Bewertung der berechneten Zuverlässigkeit kann diese einer geforderten Zuverlässigkeit gegenüber gestellt werden. Geforderte Zuverlässigkeiten gegenüber ungewollten Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit werden häufig auf der Grundlage von Kosten-Nutzen-Analysen festgelegt [41][96]. In der Literatur werden in diesem Zusammenhang Mindestzuverlässigkeitsindices in Abhängigkeit der Randbedingungen (Expositionsklasse, Zugänglichkeit, Möglichkeit der Inspektion) in einer Bandbreite von $\beta_0 = 0,5$ bis $\beta_0 = 1,5$ angegeben. Für die Expositionsklasse XD3 (Spritzwasserbeanspruchte Bereiche, z.B. Flächen von Stützen und Widerlagerwänden in geringem Abstand zur Straße) wird demnach bei vorhandener Inspektionsmöglichkeit ein Zuverlässigkeitsindex von $\beta_0 = 0,5$ gefordert, wenn die in einem Wartungsplan festgelegten Inspektionen auch durchgeführt werden [30].

In Rissen, welche bis zur Bewehrung reichen, kann Chlorid schneller zur Bewehrung vordringen als über den rissfreien Beton, z.B. [36][66][110][111]. Das hier verwendete Prognosemodell bezieht sich auf Bauteile, bei denen die Chloridbeaufschlagung über eine vertikal orientierte Oberfläche im Spritzwasserbereich erfolgt. Bei Brücken zählen zu diesen Flächen insbesondere Stützen und Widerlagerwände, bei Tunneln Portale und Seitenwände. Hierbei handelt es sich um vornehmlich druckbeanspruchte oder überdrückte Bauteile, bei denen Risse in der Regel eine untergeordnete Rolle spielen. Sind Risse bis zur Bewehrung vorhanden, so sind für diese Bereiche in Hinblick auf die Dauerhaftigkeit weitere Betrachtungen notwendig.

10.1.2 Bayesisches Update

Für ein Lebensdauermanagement müssen neben der Prognose der zu erwartenden Zustandsentwicklung, welche durch Lebensdauerberechnungen erfolgt, auch Elemente der aktuellen Zustandsbeurteilung enthalten sein, um die Wartung und Instandhaltung von Bauwerken planen und damit die Bauwerksbestände optimal bewirtschaften zu können [10]. Die Integration von Bauwerksdaten kann dabei über ein Bayesische Update

erfolgen. Durch dieses wird die Ausgangsberechnung im Laufe der Nutzung mit Hilfe von Informationen über den aktuellen Bauwerkszustand zugeschräuft [43]. Die Zuschärfung wird dabei durch den Einbezug von realen, am betrachteten Bauwerk gewonnenen Inspektions- oder Monitoringdaten erreicht. Die hierzu notwendigen Rechenregeln sind als Bayesisches Update bekannt und wurden maßgeblich von dem Mathematiker Thomas Bayes (1702 - 1761) entwickelt. Hintergrundinformationen zu diesem Vorgehen können [TR11] entnommen werden. Durch das Bayesische Update können statistische Unsicherheiten und Modellunsicherheiten in der Prognose minimiert werden.

Bei der Anwendung des Prognosemodells für konkrete Bauwerke ist zu bedenken, dass für die Quantifizierung der Variablen (C_{Sa} , $D_{\text{Eff,R}}^*$) Chloridprofile ausgewertet wurden, die von Betonen von Straßenbauwerken aus unterschiedlichen Regionen (und damit unterschiedlichem Klima), entlang unterschiedlich stark befahrenen Straßen stammen. Im Rahmen der Auswertung wurde davon ausgegangen, dass diese Datengrundlage die Grundgesamtheit $G\{u\}$ charakterisiert. Da die klimatischen Randbedingungen, welche den Transport von Chlorid in Beton von Straßenbauwerken maßgeblich prägen, bei den der Grundgesamtheit zu Grunde liegenden Bauwerken stark variiert, sind auch die daraus abgeleiteten Variablen einer großen Streuung unterworfen, z.B. rd. $\text{CoV} = 0,75$ für die Chloridoberflächenkonzentration. Die bauwerksspezifische Untergesamtheit $G_i\{u_i\}$ ist jedoch nur ein Teil dieser Grundgesamtheit $G\{u\}$. Da für ein noch nicht existierendes Bauwerk jedoch noch keine Informationen bezüglich der Untergesamtheit vorliegen, müssen die Erwartungswerte der jeweiligen Variablen auf der Grundlage der Grundgesamtheit geschätzt werden, obwohl die Erwartungswerte der Grundgesamtheit $G\{u\}$ und der Untergesamtheit $G_i\{u_i\}$ nicht übereinstimmen.

Soll für ein bestehendes Bauwerk eine Lebensdauerberechnung durchgeführt werden, so ist es daher immer sinnvoll, ein Update durchzuführen, um die Prognose zu präzisieren. Je nach dem, was für Informationen im Rahmen des Updates integriert werden, können unterschiedliche Teile der Lebensdauerberechnung zugeschräuft werden.

Reduzierung der Unsicherheit in Bezug auf die Chlorideindringgeschwindigkeit

Durch die Bohrmehlentnahme in unterschiedlichen Tiefenlagen kann die am Bauwerk vorhandene Chloridkonzentrationsverteilung bestimmt werden. Diese Informationen können zur Zuschärfung der Prognosegenauigkeit genutzt werden. Dabei ist für jede zu berücksichtigende Tiefenlage eine Gleichheitsbedingung zu formulieren, vgl. **Gleichung 19**.

$$U_i(C_{\text{insp}}, C(x_{\text{insp}}, t_{\text{insp}})) = C_{\text{insp}} - C(x_{\text{insp}}, t_{\text{insp}})$$

Gleichung 19

- C_{insp} : zum Inspektionszeitpunkt t_{insp} ermittelter Chloridgehalt in der Tiefenlage x_{insp} [M.-%/z]
 $C(x_{\text{insp}}, t_{\text{insp}})$: prognostizierte Chloridkonzentration in der Tiefenlage x_{insp} [M.-%/z]
zum Inspektionszeitpunkt t_{insp} , siehe **Gleichung 13**, Seite 54

Reduzierung der Unsicherheit in Bezug auf die Chlorideindringgeschwindigkeit und den kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalt C_{crit}

Neben der Eindringgeschwindigkeit von Chloriden ist aber auch die Variable „kritischer korrosionsauslösender Chloridgehalt im Beton, C_{crit} “ mit Unsicherheiten behaftet, vgl. auch **Kapitel 10.2**. Durch den Einbezug von Korrosionssensordaten (Monitoringdaten) können Unsicherheiten diesbezüglich reduziert werden. Die in den Beton eingebauten Sensorelemente, welche sich in definierten Tiefenlagen befinden, geben ein Korrosionsstromsignal oder weisen einen deutlich erhöhten Widerstand auf, sobald dort der kritische korrosionsauslösende Chloridgehalt erreicht ist, z.B. [117][61][63]. Diese Informationen können über Ungleichungen in ein Update integriert werden [125]. Der Informationsgewinn in Bezug auf die Prognose des Depassivierungszeitpunkts ist hierbei größer als durch den Einbezug von Chloridkonzentrationen in definierten Tiefenlagen.

10.2 Sensitivitätsanalyse

10.2.1 Berechnung

Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse ist zu klären, in welchem Maß die Unsicherheiten des Berechnungsergebnisses von den Unsicherheiten der Eingangsvariablen abhängen [104]. Durch die FORM-Methode kann das Modellverhalten (z.B. Sensitivitäten) bezüglich eines Grenzwerts untersucht werden.

Um den Einfluss der Variablen auf das Berechnungsergebnis zu untersuchen, eignen sich die repräsentativen Alphawerte α_R . Diese geben Auskunft, in welchem Maß die quantifizierten Variablen, unter Berücksichtigung der Verteilung, des Mittelwerts und der Standardabweichung, den berechneten Zuverlässigkeitsindex beeinflussen. Daher werden sie auch als Wichtungsfaktoren bezeichnet.

Ferner lassen sich auf der Grundlage der Grenzzustandsgleichung auch Sensitivitätsmaße analog zu den lokalen Methoden berechnen, welche die Veränderung des Berechnungsergebnisses (hier β) absolut oder relativ infolge einer variierten Eingangsgröße angeben, vgl. **Gleichung E 1** und **Gleichung E 2** im **Anhang E**. Anders als bei der klassischen lokalen Sensitivitätsanalyse geschieht dies jedoch im Rahmen der FORM-Berechnung unter Berücksichtigung der Variabilität aller Variablen.

In dem zur Berechnung dieser Sensitivitätsmaße verwendeten Programm [100] wird die absolute Änderung des Zuverlässigkeitsindex β infolge der Variation des Mittelwerts oder der Standardabweichung um 1 % als „Sensitivität“ bezeichnet. Das dementsprechende relative Sensitivitätsmaß wird als Elastizität e bezeichnet. Die Elastizitäten können somit als normierte Sensitivitäten betrachtet werden, d.h., zur Berechnung der Elastizität wird die Sensitivität durch den Ausgangszuverlässigkeitsindex $|\beta|$ geteilt [54]. Daraus folgt, dass die Elastizität für $\beta = 0$ nicht definiert ist und dementsprechend die Interpretation von berechneten Elastizitäten für sehr kleine β -Werte nicht zielführend ist.

Zunächst soll das Prognosemodell für einen CEM I-Beton ($w/z = 0,5$) in Hinblick auf die repräsentativen Alphawerte α_R und die Elastizitäten e ausgewertet werden. Die Einwirkung wurde für einen Abstand des

Betons zur Fahrbahnkante von rd. 1,5 m gewählt (horizontal: 1,5 m, vertikal: 0,2 m). Die Betondeckung wurde entsprechend der Exposition XD3 nach DIN 1045-1:2008 [TR1] festgelegt. Die Berechnung mit den in **Tabelle F 3** in **Anhang F** gegebenen Variablen wird im Folgenden als Ausgangsberechnung bezeichnet.

Der Einfluss der Variablen am Berechnungsergebnis der Ausgangsberechnung für eine Expositionsdauer von 50 Jahren wird durch die repräsentativen Alphawerte α_R in **Bild 47** dargestellt. Ergeben sich durch einen ansteigenden Mittelwert höhere Zuverlässigkeitsindices, so wird in diesem Zusammenhang von einer Widerstandsvariable gesprochen. Die repräsentativen Alphawerte α_R ergeben sich für Widerstandsvariable positiv und für Einwirkungsvariablen negativ. Die Auswertung zeigt, dass insbesondere der Altersexponent a_R und die stark streuende Chloridoberflächenkonzentration C_{Sa} den berechneten Zuverlässigkeitsindex β beeinflussen. Der Grundchloridgehalt C_i hat einen vernachlässigbaren Einfluss. Der Einfluss aller für die Beschreibung des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten notwendigen Variablen ist dabei geringfügig größer als der Einfluss aller restlichen Variablen zusammen. Eine Auswertung der repräsentativen Alphawerte aller Variablen über die Expositionsdauer zeigte, dass diese nahezu konstant über die Expositionsdauer verlaufen.

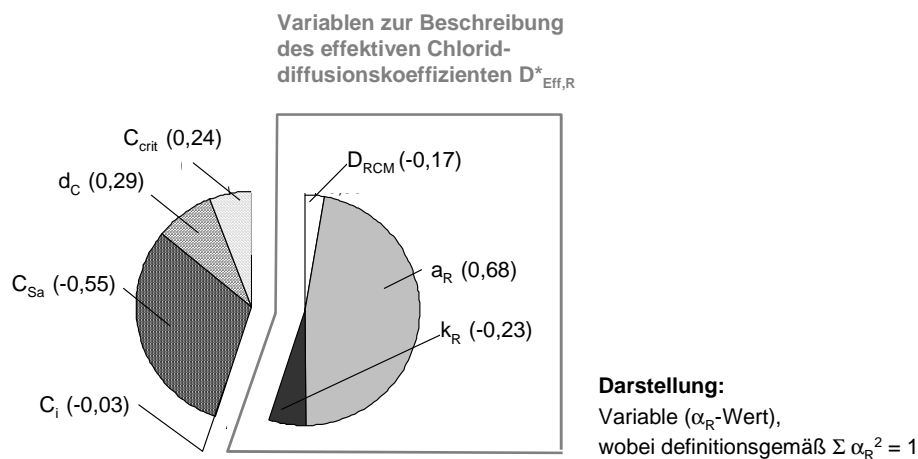


Bild 47: Repräsentative Alphawerte α_R für die Variablen der Ausgangsberechnung ($t_{\text{exp}} = 50 \text{ a}$)

Die Auswertung der Elastizitäten zeigt, dass eine Erhöhung des Mittelwerts um 1 % neben den Regressionsvariablen a_R und k_R insbesondere bei der Betondeckung d_c und dem kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalt C_{crit} den größten Zuverlässigkeitsanstieg hervorruft (verhältnismäßig hohe $|e|$, vgl. **Bild 48**). Die Elastizitäten der Standardabweichungen sind bis auf die des Altersexponenten a_R relativ gering. Auf eine Auswertung der Elastizitäten des Grundchloridgehalts wurde aufgrund der untergeordneten Rolle dieser Variablen verzichtet.

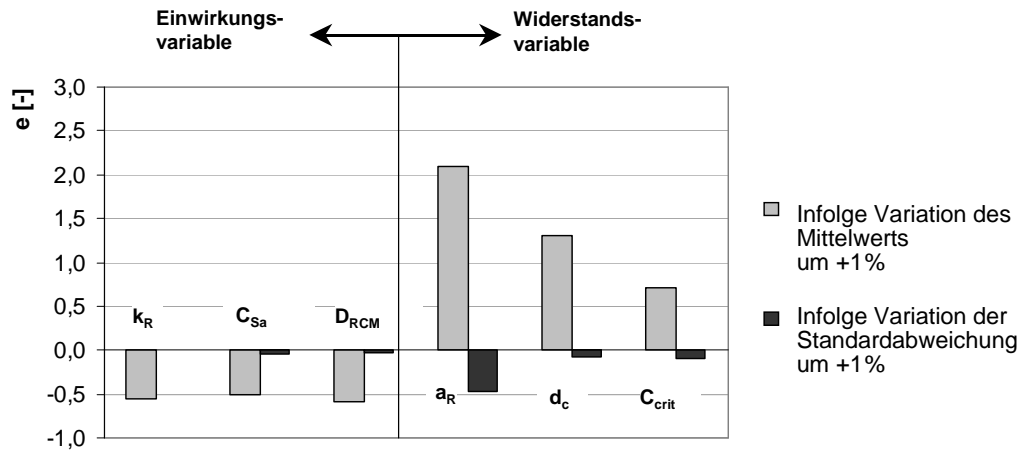


Bild 48: Elastizitäten für die Ausgangsberechnung ($t_{exp} = 50$ a)

Drei Variable, deren Streuung in Mittelwert und Standardabweichung das Berechnungsergebnis am stärksten beeinflusst (a_R , d_c und C_{crit}), wurden diesbezüglich genauer untersucht, um die Auswirkung der Variation auf den in der Praxis relevanten Bereich besser zu erfassen. Des Weiteren wurde die Chloridoberflächenkonzentration C_{Sa} mit einbezogen, da diese einen großen Einfluss auf die berechnete Zuverlässigkeit hat, vgl. **Bild 47**. Im Rahmen einer Parameterstudie wurden sowohl der Mittelwert als auch die Streuung im Vergleich zur Ausgangsberechnung variiert und der Einfluss auf das Ergebnis (β) ausgewertet, vgl. **Tabelle 15**.

Die Variable C_{crit} ist in der Ausgangsberechnung mit einer Beta-Verteilung angesetzt worden. Da diese bei großen Streuungen sehr sensibel auf Änderungen ihrer Parameter reagiert, wurde bei dieser orientierenden Berechnung der kritische korrosionsauslösende Chloridgehalt als eine lognormalverteilte Variable angesetzt. Für die Parameterstudie des Altersexponenten a_R konnte der Ansatz einer Beta-Verteilung aufgrund der vergleichsweise geringen Streuung beibehalten werden.

Tabelle 15: Variation der Variablen im Rahmen der Sensitivitätsanalyse

Variable	Einheit	Verteilung*	Variationsbereich **		Anmerkungen zum angesetzten Variationsbereich
			Mittelwert	Streuung	
C_{crit} kritischer korrosionsauslösender Chloridgehalt	[M.-%/Z]	logND	0,4 - 1,2 (0,6)	CoV = 0,2-0,6 (0,25)	Mittelwert und Variationskoeffizient: Die Quantifizierung dieser Variablen erfolgte auf der Basis von Laboruntersuchungen. Unter Praxisbedingungen wird ein höherer Mittelwert und eine größere Streuung erwartet, weshalb der untersuchte Variationsbereich dorthin verschoben wird, vgl. auch Anmerkungen zur Quantifizierung des kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts auf Seite 109.
C_{Sa} Chloridoberflächenkonzentration	[M.-%/Z]	logND	1 - 2 (1,81)	CoV = 0,6-0,8 (0,75)	Mittelwert: nahezu symmetrischer Variationsbereich Variationskoeffizient: Eine ggf. bessere Auswertungsgrundlage könnte geringere Variationskoeffizienten zur Folge haben. Infolgedessen wurde der Variationsbereich zu geringeren Variationskoeffizienten verschoben.
a_R Altersexponent	[mm]	BetaD $0 \leq a_R \leq 1$	0,55 – 0,65 (0,6)	s = 0,9-0,15 (0,12)	Mittelwert: symmetrischer Variationsbereich Standardabweichung: symmetrischer Variationsbereich (eine Erhöhung der Variation zieht eine Reduzierung der Variation von k_R nach sich)
d_c Betondeckung	[mm]	ND	40 - 60 (55)	s = 5-11 (8)	Mittelwert: Um den Einfluss einer ggf. zu geringen Betondeckung abzubilden, wurde der Mittelwert zu geringeren Werten verschoben. Standardabweichung: Die Streuung der Betondeckung ist unabhängig vom Mittelwert, weshalb für die Standardabweichung ein symmetrischer Variationsbereich gewählt wurde.

* logND: Lognormalverteilung; BetaD: Beta-Verteilung; ND: Normalverteilung

** die in Klammern angegebenen Werte entsprechen der Quantifizierung der Ausgangsberechnung

Für die folgenden Berechnungen wurden die Variablen der Ausgangsberechnung zu Grunde gelegt (vgl. **Tabelle F 3 im Anhang F**), wobei jeweils eine der in **Tabelle 15** genannten Variablen mit dem dort angegebenen Variationsbereich berücksichtigt wurde. Der Einfluss dieser Variation auf den prognostizierten Zuverlässigkeitsindex β nach einer Expositionsdauer von 50 Jahren ist in **Bild 49** dargestellt.

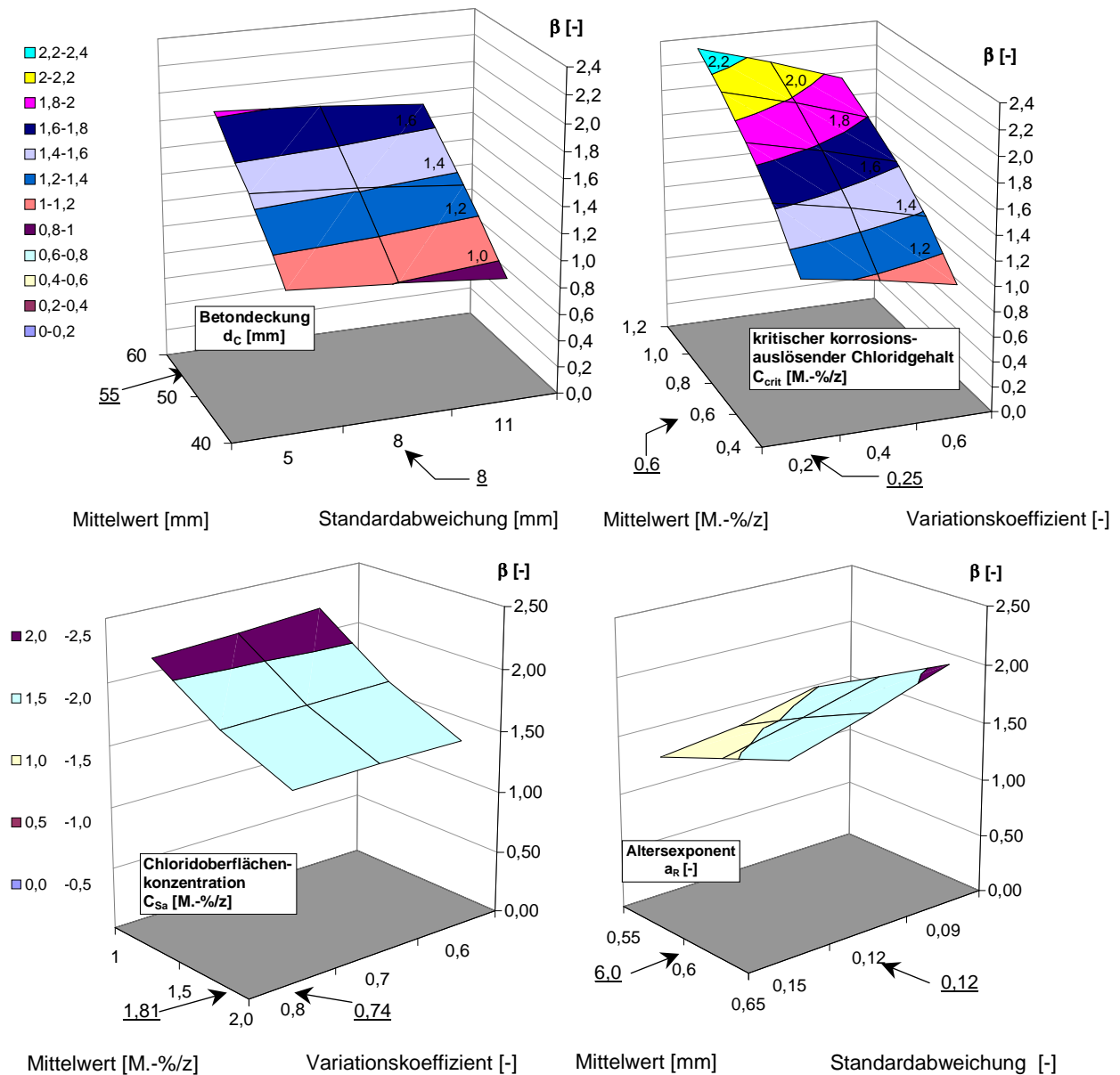


Bild 49: Einfluss der Variation ausgesuchter Variablen auf den Zuverlässigkeitsindex $\beta(t_{exp} = 50 \text{ a})$, Eingangswerte nach Tabelle F 3 im Anhang F und Tabelle 15 (Ausgangsberechnung: $\beta(t_{exp} = 50 \text{ a}) = 1,6$, Quantifizierung der Ausgangsberechnung ist auf den Achsen vermerkt)

Für die untersuchten Variationsbereiche hat die Wahl des Mittelwerts einen größeren Einfluss auf die berechnete Zuverlässigkeit als die Streuung. Lediglich eine größere Streuung des kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts C_{crit} und des Altersexponenten a_R verursachen einen vergleichsweise deutlichen Abfall des berechneten Zuverlässigkeitsindex, vgl. **Bild 49**.

Anmerkung zur Quantifizierung des kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts

Die im Rahmen der Lebensdauerberechnung verwendete Quantifizierung der Variable C_{crit} erfolgte auf der Basis von Laborversuchen, in welchen der kritische korrosionsauslösende Chloridgehalt an Mörtel-elektroden mit unterschiedlicher Mörtelzusammensetzung bestimmt wurde [6]. Bei diesen Untersuchungen wurden die Elektroden auf + 500 mV gegenüber der Wasserstoffelektrode polarisiert. Diese ausgeprägte Polarisierung bewirkt, dass, anders als unter Praxisbedingungen, jegliche Verletzung der Passivschicht zu einer Depassivierung des Bewehrungsstahls führt [33]. Der sich aus diesen Versuchsergebnissen ergebende Mittelwert liegt bei 0,48 M.-%/z [49]. Um den Einfluss der Praxisbedingungen im Vergleich zu den Laborbedingungen Rechnung zu tragen, wurde im Rahmen der verwendeten Quantifizierung von C_{crit} , der Mittelwert unter Berücksichtigung weiterer in der Literatur zusammengestellter Daten [53] zu dieser Thematik von 0,48 auf 0,6 M.-%/z erhöht [49], vgl. „Aktuelle Quantifizierung von C_{crit} “ in **Bild 50**. Im Rahmen neuerer Laboruntersuchungen wurde der kritische korrosionsauslösende Chloridgehalt bei einer geringeren Polarisierung bestimmt, wodurch sich im Vergleich zu den zuvor erläuterten Laboruntersuchungen deutlich höhere Werte ergeben [99], vgl. Labordaten von Harnisch/Raupach. Die Auswertung der Untersuchungsergebnisse von britischen Straßenbrücken ergab einen nahezu identischen Mittelwert, wobei die Daten jedoch deutlich stärker streuen [150], vgl. Bauwerksdaten von Brücken nach Vassie. Da der kritische korrosionsauslösende Chloridgehalt eine Variable ist, welche von einer Vielzahl von Einflüssen abhängt (z.B. Porigkeit und chemische Zusammensetzung der Übergangsschicht von Stahl und Beton, Art der Chloride, Feuchte- und Sauerstoffgehalt etc., vgl. [32]), erscheint eine im Vergleich zu den Labordaten höhere Streuung der Bauwerksdaten plausibel.

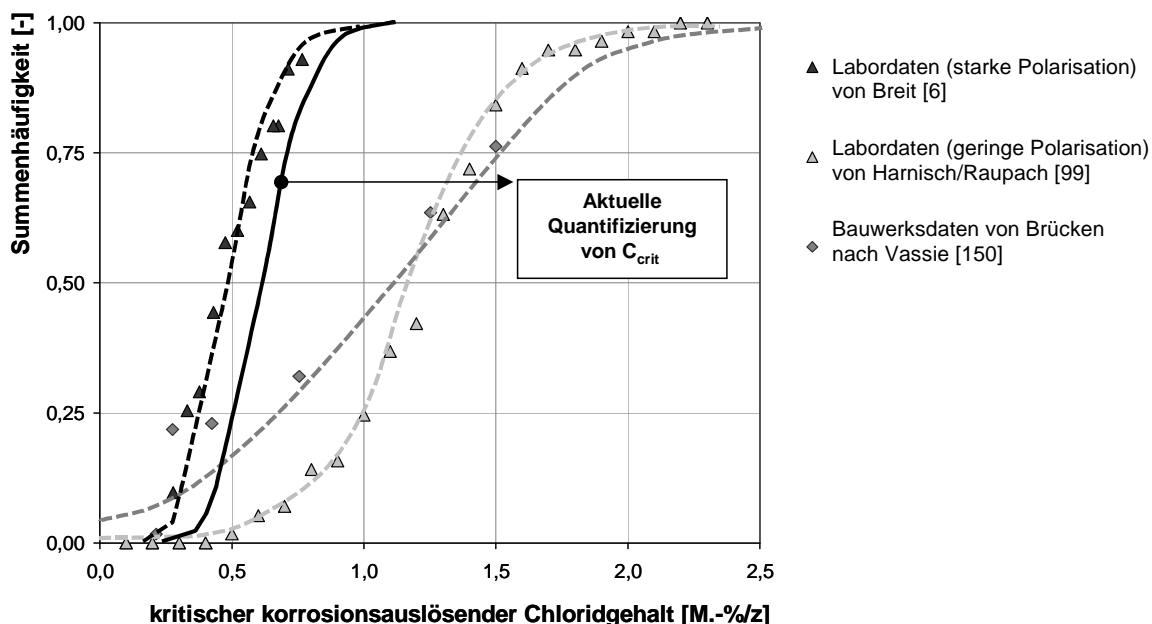


Bild 50: Gegenüberstellung der aus unterschiedlichen Datengrundlagen abgeleiteten Summenhäufigkeiten des kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts mit der aktuellen Quantifizierung von C_{crit} für Lebensdauerberechnungen nach [49]

Sowohl bei einer Erhöhung der Streuung als auch des Mittelwerts von C_{crit} gewinnt diese Variable deutlich an Einfluss auf den berechneten Zuverlässigkeitsindex β in Bezug auf chloridinduzierte Depassivierung, der Bewehrung was auch durch den Anstieg des repräsentativen Alphawerts α_R in Abhängigkeit des Variationskoeffizienten und des Mittelwertes deutlich wird, vgl. **Bild 51**.

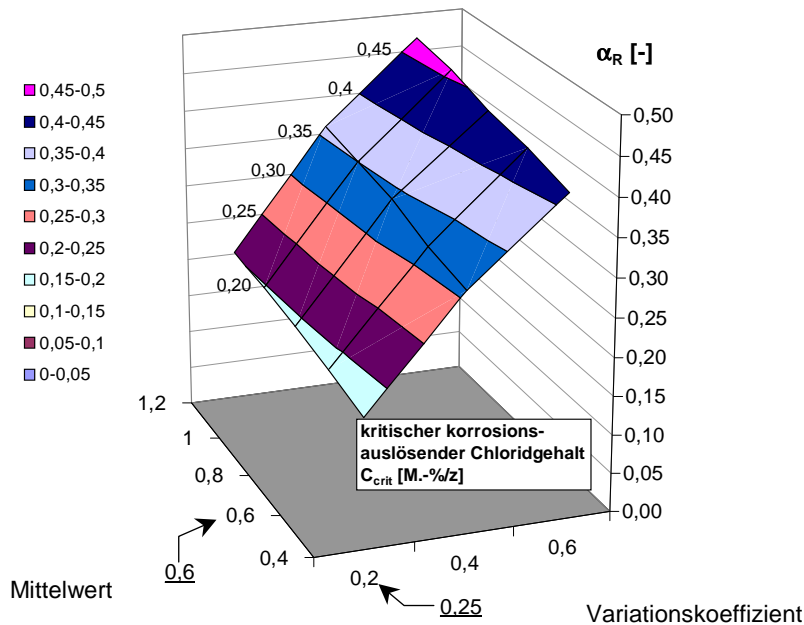


Bild 51: Einfluss des Variationskoeffizienten vom kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalt auf den repräsentativen Alphawert α_R (Quantifizierung der Ausgangsberechnung ist auf den Achsen vermerkt)

Um einen Eindruck über den Einfluss einer ggf. geänderten Quantifizierung der Variablen C_{crit} auf die α_R -Werte aller Variablen, und damit der Bedeutung dieser in Bezug auf den berechneten Zuverlässigkeitsindex β zu erhalten, wurde C_{crit} auf der Grundlage der Untersuchungsergebnisse von Vassie [99] abgeschätzt. Wie schon im Rahmen der Parameterstudie gezeigt, nimmt infolge des größeren Mittelwertes und der größeren Streuung der Einfluss des kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts am Berechnungsergebnis deutlich zu. Im Gegenzug reduziert sich der Einfluss aller anderen Variablen, vgl. **Bild 52** mit **Bild 47**, Seite 105. Der Einfluss aller für die Beschreibung des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten notwendigen Variablen wird dabei kleiner als der Einfluss aller restlichen Variablen zusammen. Dies bedeutet, dass für eine derart modifizierte Quantifizierung von C_{crit} bei Lebensdauerberechnungen das Modell zur Beschreibung des zeitabhängigen Eindringens von Chlorid in Beton an Einfluss auf das Berechnungsergebnis verliert.

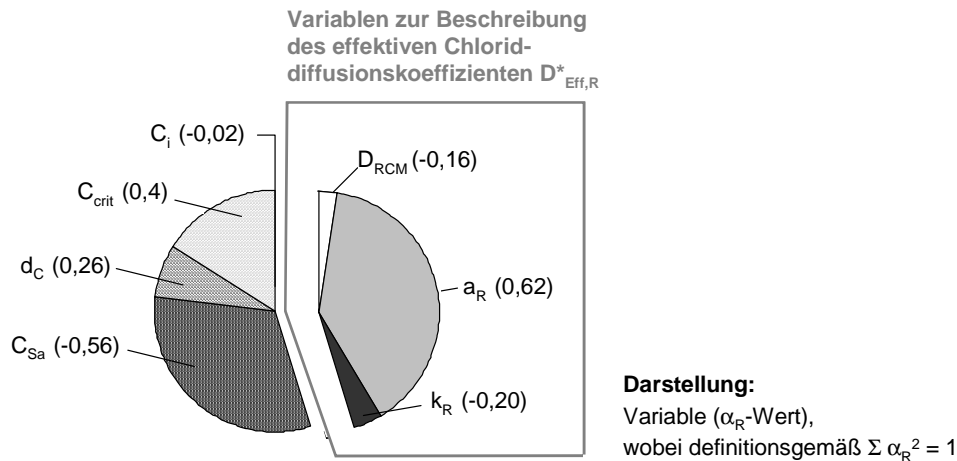


Bild 52: Repräsentative Alphawerte α_R unter Berücksichtigung eines kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts auf der Grundlage von Untersuchungsergebnissen nach Vassie, vgl. Bild 50

10.2.2 Ergebnis

Die durchgeführten Sensitivitätsanalysen der Lebensdauerberechnung zeigen, dass neben den Variablen des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten (D_{RCM} , a_R , k_R) auch andere Variable einen deutlichen Einfluss auf das Berechnungsergebnis haben, z.B. Chloridoberflächenkonzentration C_{Sa} , Betondeckung d_c und der kritische korrosionsauslösende Chloridgehalt C_{crit} . Da auch physikalische Modellansätze im Rahmen der Lebensdauerberechnung die Betondeckung, den kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalt und eine Variable enthalten müssen, welche die Ausgangschloridkonzentration in einer definierten Tiefenlage beschreibt, ist davon auszugehen, dass die Prognosegenauigkeit durch eine physikalische Modellierung nicht entscheidend reduziert werden kann. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund, dass davon auszugehen ist, dass die bisherige Quantifizierung von C_{crit} für Straßenbauwerke zu konservativ ist. Eine erste Modifizierung dieser Variablen auf der Grundlage von Bauwerksdaten bewirkte, dass der Einfluss der Variablen C_{crit} auf den berechneten Zuverlässigkeitsindex deutlich zunimmt, wodurch im Gegenzug das Chlorideindringmodell an Einfluss verliert. Bedingt durch den großen Einfluss des kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts sollte die Quantifizierung dieser Variablen unter Berücksichtigung der Umgebungsbedingungen von Straßenbauwerken sowie von Bauwerksbeton präzisiert werden.

Des Weiteren wurde gezeigt, dass insbesondere der Altersexponent und die Chloridoberflächenkonzentration den berechneten Zuverlässigkeitsindex β am stärksten beeinflussen. Der Einfluss der Oberflächenkonzentration C_{Sa} auf das prognostizierte Chloridprofil wurde schon im Rahmen der Validierung festgestellt. Die Quantifizierung dieser Variable sollte infolgedessen präzisiert werden, da die bisherige Quantifizierung lediglich eine Näherungslösung darstellt, welche auf Daten von Infrastrukturbauwerken aus dem innerstädtischen Bereich aus Süddeutschland basiert.

10.3 Beispielberechnung

Im Folgenden soll eine Lebensdauerberechnung für Brückenpfeiler durchgeführt werden, welche sich in unmittelbarer Nähe zum Fahrbahnrand befinden. Um das Zuschärfen der Prognose durch ein Update zu demonstrieren, sollen die im Rahmen der Validierung ausgewerteten Inspektionsdaten verwendet werden. Um diese Daten nutzen zu können, wurden die Randbedingungen für die Ausgangsberechnung auf dieses Beispiel abgestimmt. Infolgedessen wurden die folgenden Annahmen getroffen:

- Lage des Brückenpfeilers zur Straße: horizontaler Abstand zum Fahrbahnrand 162 cm
- betrachteter Bereich: Höhe über Fahrbahnoberkante: 100 cm (vertikaler Abstand)
- Betonzusammensetzung: CEM I, w/z ~ 0,5,
- Betondeckung: nom c = 55 mm [TR1].

Die auf der Grundlage dieser Annahmen quantifizierten Variablen für die Lebensdauerberechnung sind in **Tabelle F 4** im **Anhang F** zusammengefasst. Die vollprobabilistische Auswertung der Grenzzustandsgleichung (vgl. **Gleichung 18**, Seite 101) wurde mit dem Programm SYSREL aus dem Programmpaket STRUREL [100] vorgenommen. Die durch die Ausgangsberechnung prognostizierte Zuverlässigkeit gegenüber chloridinduzierter Bewehrungsdepassivierung nimmt erwartungsgemäß mit zunehmender Expositionsdauer ab, was durch die weiter fortschreitende Chlorideindringtiefe hervorgerufen wird. Der Zuverlässigkeitsindex β nach 50 Jahren ergibt sich demnach zu $\beta (t_{\text{exp}} = 50 \text{ a}) = 1,7$, vgl. Ausgangsberechnung in **Bild 53**.

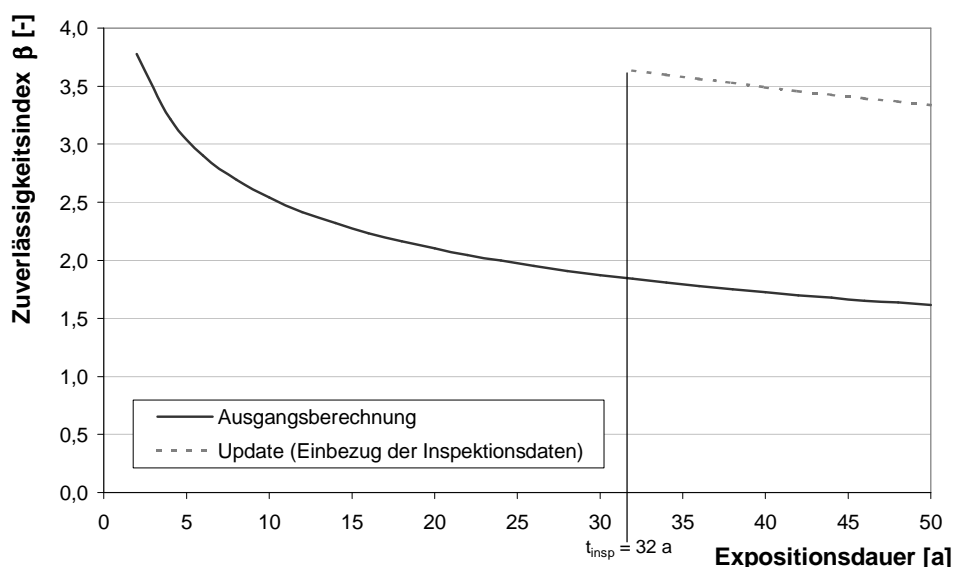


Bild 53: Zeitabhängiger Verlauf der prognostizierten Zuverlässigkeitsindices in Hinblick auf chloridinduzierte Depassivierung der Bewehrung für die Ausgangsberechnung und das Update

Für das Update wurden Informationen bezüglich der tiefenabhängig bestimmten Chloridkonzentrationen integriert, welche im Rahmen von Inspektionen an den rd. 32 Jahre alten Brücken ermittelt wurden. Dabei wurden Chloridkonzentrationen von 33 Bohrmehlproben aus den mittleren Tiefenlagen $x = 10, 30$ und 50 mm bestimmt. Für das Update wurden jedoch nur die Chloridkonzentrationen der zweiten und dritten Tiefenlage berücksichtigt, da infolge der Schrittweite bei der Bohrmehlentnahme zu erwarten ist, dass die Chloridkonzentration der ersten Tiefenlage deutlich unterschätzt wird, vgl. **Kapitel 9.2**, Seite 96. Für die mittlere Tiefenlagen $x = 30$ mm und $x = 50$ mm wurde je eine Gleichheitsbedingung gemäß **Gleichung 19**, Seite 103 formuliert. Die Quantifizierung der dafür notwendigen Variablen ist in **Tabelle F 5** im **Anhang F** zusammengestellt. Durch den Einbezug dieser Inspektionsdaten wird die Unsicherheit in Bezug auf den effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten sowie der Chloridoberflächenkonzentration minimiert. Im Rahmen der Validierung wurden die gemessenen Chloridkonzentrationen den prognostizierten Chloridkonzentrationen gegenübergestellt. Dabei zeigte sich, dass sowohl der Mittelwert als auch die Streuung der prognostizierten Chloridkonzentrationen größer war, vgl. **Bild 45**, Seite 99. Durch die Integration der Inspektionsergebnisse ist infolgedessen ein deutlicher Anstieg der Zuverlässigkeit zu erwarten, was durch das Update bestätigt werden konnte, vgl. **Bild 53**. Der Zuverlässigkeitsindex β nach 50 Jahren ergibt sich für das Update zu $\beta (t_{\text{exp}} = 50 \text{ a}) = 3,4$.

Für eine Bewertung der berechneten Zuverlässigkeit wird zunächst die nach [30] geforderte Mindestzuverlässigkeit von $\beta_0 = 0,5$ zu Grunde gelegt. Dabei wird davon ausgegangen, dass der Brückenpfeiler zugänglich ist und somit eine Inspektionsmöglichkeit gegeben ist und die Inspektionen im Rahmen eines Wartungsplans auch durchgeführt werden. Die berechneten Zuverlässigkeitindices sowohl der Ausgangsberechnung als auch des Updates liegen deutlich über diesem Wert. Wenn an dem Brückenpfeiler keine regelmäßigen Inspektionen im Rahmen eines Wartungsplans durchgeführt werden sollen, wird nach [30] eine Mindestzuverlässigkeit von $\beta_0 = 1,5$ gefordert. Die berechneten Zuverlässigkeitindices liegen auch über diesem Zuverlässigkeitsniveau. Dies bedeutet, dass der betrachtete Bereich des Brückenpfeilers über die nächsten 20 Jahre ausreichend dauerhaft gegenüber chloridinduzierter Bewehrungskorrosion ist.

11 ZUSAMMENFASSUNG

Mit Hilfe von Lebensdauerberechnungen (Service Life Design) können in Hinblick auf die Dauerhaftigkeit leistungsbezogene Entwurfsverfahren angewendet oder Instandsetzungsstrategien optimiert werden. Eine Voraussetzung für die Anwendbarkeit von Lebensdauerberechnungen sind Prognosemodelle, welche die zeitabhängige Entwicklung des Bauwerkszustands beschreiben. Neben chemischen oder mechanischen Einwirkungen auf den Beton, welche u.U. dessen Dauerhaftigkeit beeinflussen, ist für Bauteile im Spritzwasserbereich von Straßen insbesondere der Schutz der Bewehrung gegenüber chloridinduzierter Bewehrungskorrosion von entscheidender Bedeutung. Deshalb wurde im Rahmen dieser Arbeit ein anwenderfreundliches Modell entwickelt, welches in der Lage ist, die vorhandenen Streuungen abzubilden und dessen Eingangsvariablen so weit wie möglich direkt quantifiziert werden können. Die bisher zur Verfügung stehenden Modelle für die Straßenexposition erfüllen diese Anforderungen nur bedingt.

Bei Straßenbauwerken sind die am Chloridtransport beteiligten Mechanismen vielfältig und variieren expositionsbedingt stark in ihrer Tiefenwirkung und in ihrer zeitlichen Ausdehnung, was im Falle einer physikalisch weitestgehend exakten Modellierung der am Chloridtransport beteiligten Transportprozesse (im folgenden „physikalische Modellierung“) zu einer hohen Komplexität führen würde. Durch die Auswertung von Literaturdaten wurde gezeigt, dass davon auszugehen ist, dass auch unter Praxisbedingungen die Mikro-eislinsenpumpe einen konvektiven Eintrag von Chlorid verursacht. Da systematische Untersuchungen zu dieser Thematik fehlen, wird eine physikalische Modellierung des Chloridtransports für verkehrsbedingt mit Spritzwasser beaufschlagten Beton zur Zeit als nicht zielführend angesehen. Da es das Ziel eines jeden Modells sein sollte, die tatsächlichen Mechanismen so zutreffend wie möglich zu erfassen, wurde ein physikalisch/empirischer Modellansatz gewählt. Durch diesen Modellansatz auf der Basis des 2. Fick'schen Diffusionsgesetzes können grundsätzlich Chloridprofile von Beton aus dem Spritzwasserbereich, einerseits ausreichend anwenderfreundlich und andererseits unter Berücksichtigung der Streuung, ausreichend genau beschrieben werden. Durch die Vernachlässigung der anderen am Chloridtransport beteiligten Mechanismen (z.B. konvektiver Chloridein- und Chloridaustrag) ergeben sich zwangsläufig Abweichungen zwischen dem Grundansatz und der Realität, weshalb der Diffusionsansatz angepasst werden musste. Die notwendige Anpassung erfolgte durch die empirische Beschreibung des nicht-stationären Diffusionskoeffizienten.

Ist der Beton einer intermittierenden Spritzwasserbeaufschlagung ausgesetzt, ist der Feuchtehaushalt in der Betonrandzone ständigen Schwankungen unterworfen, was im oberflächennahen Bereich zu Chloridkonzentrationen führen kann, welche sich nicht mit dem 2. Fick'schen Diffusionsgesetz abbilden lassen. Daher muss der Diffusionsansatz diesbezüglich modifiziert werden. Zwei Ansätze wurden in diesem Zusammenhang diskutiert. Im Ansatz [I] werden die gemessenen Chloridkonzentrationen im oberflächennahen Bereich, welcher sich nicht mit dem Diffusionsgesetz abbilden lässt, vernachlässigt, während im Ansatz [II] dieser Bereich durch Transformation der x-Achse eliminiert wird. Der Unterschied dieser beiden auf den ersten Blick nahezu identischen Ansätze wurde mit Hilfe von Parameterstudien verdeutlicht. Da im Ansatz [II] der effektive Chloriddiffusionskoeffizient eine signifikante Abhängigkeit vom eliminierten Tiefenbereich aufweist, der effektive Chloriddiffusionskoeffizient jedoch idealerweise eine Materialkonstante sein sollte, wurde das Grundmodell nach Ansatz [I] modifiziert.

Für die empirische Beschreibung des Chloriddiffusionskoeffizienten wurden Chloridprofile von Beton aus Straßenbauwerken ausgewertet. Der zeitabhängige Verlauf des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten wurde nach dem Ansatz von Gehlen beschrieben. Die notwendigen Regressionsvariablen wurden durch die aus Kurvenfitting von Chloridprofilen abgeleiteten effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten bestimmt. Infolge der zur Verfügung stehenden Datengrundlage beschränkt sich das Modell mit den hergeleiteten Regressionsvariablen auf Bauteilbereiche, bei denen der Chlorideintrag über vertikal orientierte Flächen erfolgt.

Da der effektive Chloriddiffusionskoeffizient in dem Modell zur Beschreibung des Eindringens von Chlorid in Beton von Verkehrsbauwerken eine zentrale Rolle spielt, wurden zahlreiche theoretische Überlegungen zu den überwiegend expositionsbedingten Einflüssen (konvektiver Chloridein- und austrag, Diffusion mit beschränktem Chloridangebot, Diffusion im teilgesättigten Beton) auf diese Variable angestellt. Auf der Grundlage der daraus gewonnenen Erkenntnisse wurden zwei Phasen unterschieden, in denen unterschiedliche Einflüsse und damit Transportprozesse von Chlorid in Beton den effektiven Diffusionskoeffizienten dominieren. In der „Anfangsphase“, welche sich auf eine sehr kurze Expositionsdauer beschränkt, findet der Chloridtransport überwiegend über Konvektion statt. Mit zunehmender Expositionsdauer lässt der Einfluss der Konvektion nach und die Diffusion tritt stärker in den Vordergrund. Es wurde gezeigt, dass infolgedessen im Vergleich zu Beton von Meerwasserbauwerken bei Beton von Straßenbauwerken eine deutlich stärkere Reduzierung des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten mit der Zeit zu erwarten ist. Auch führen viele der betrachteten Einflüsse zu einer Erhöhung der Streuung dieser Variablen, da die Einflüsse aus dem vorhandenen Datenmaterial nicht herausgerechnet werden können (z.B. Zementsteinanreicherung, Betonalter bei der ersten Chloridbeaufschlagung, Taumittelzusammensetzung).

Die durchgeführte Validierung des Modells zur Beschreibung des Chlorideindringens in Straßenbauwerke zeigt, dass die prognostizierten Chloridkonzentrationen (Expositionsdauer < 32 Jahre) in größeren Tiefenlagen an den untersuchten Bauwerken überschätzt wurden. Betrachtungen zum Einfluss der Chloridoberflächenkonzentration zeigen, dass davon auszugehen ist, dass auch eine zu hoch angesetzte Chloridoberflächenkonzentration zu der Überschätzung beigetragen hat. Auch die Streuung der Chloridkonzentration der im Rahmen der Validierung untersuchten Stichprobe war geringer als durch das Modell prognostiziert. Da die Datengrundlage der Stichprobe durch ihre vergleichbare Exposition (alle Bauwerke entlang einer Autobahn in NRW) relativ homogen war, war dies zu erwarten. Somit wurden die mit dem Modell unter Berücksichtigung der quantifizierten Variablen berechneten Chloridkonzentrationen in Hinblick auf chloridinduzierte Bewehrungsdepassivierung auf der sicheren Seite prognostiziert.

Das Modell zur Beschreibung des Eindringens von Chlorid in Beton von Straßenbauwerken wurde anschließend in ein existierendes Dauerhaftigkeitsmodell implementiert, um so Lebensdauerberechnungen durchführen zu können. Das Ergebnis dieser Berechnung ist der Zuverlässigkeitsindex β gegenüber chloridinduzierter Depassivierung der äußeren Bewehrungslage in rissfreiem Beton von Straßenbauwerken. Die durchgeführten Sensitivitätsanalysen zeigen, dass neben dem effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten auch andere Variable einen deutlichen Einfluss auf den berechneten Zuverlässigkeitsindex β haben, z.B. Chloridoberflächenkonzentration, Betondeckung und der kritische korrosionsauslösende Chloridgehalt C_{crit} .

Die Auswertung und Diskussion von Literaturdaten machte in diesem Zusammenhang deutlich, dass davon auszugehen ist, dass für Straßenbauwerke die bisherige Quantifizierung des kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts als nicht zutreffend erscheint. Vor dem Hintergrund, dass für Straßenbauwerke der kritische korrosionsauslösende Chloridgehalt im Mittelwert größer und stärker streuend zu erwarten ist, wurden Parameterstudien durchgeführt, um die damit verbundenen Konsequenzen zu erfassen. Die Auswertung ergab, dass der Einfluss des kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts auf das Berechnungsergebnis mit größer werdenden Mittelwert und größer werdender Streuung deutlich zunimmt. Gleichzeitig reduziert sich der Einfluss aller anderen Variablen. Zur Veranschaulichung wurde der Einfluss aller Variablen auf den berechneten Zuverlässigkeitsindex β unter Berücksichtigung einer modifizierten Variable C_{crit} berechnet. Die Modifikation erfolgte dabei auf der Grundlage von Literaturdaten von Bauwerken. Das Ergebnis dieser Berechnung zeigt, dass die Summe der Einflüsse aus der Chloridoberflächenkonzentration, der Betondeckung und dem kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalt größer ist als die der Variablen, welche zur Beschreibung des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten notwendig sind. Da auch „physikalische Modelle“ zur Beschreibung des Eindringens von Chlorid in Beton im Rahmen der Lebensdauerberechnung die Betondeckung, den kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalt und eine Variable enthalten müssen, welche die „Ausgangschloridkonzentration“ in einer definierten Tiefenlage beschreibt (hier C_{sa}), ist davon auszugehen, dass die Prognosegenauigkeit durch eine „physikalische Modellierung“ nicht entscheidend erhöht werden kann. Somit bestätigt das Ergebnis der Sensitivitätsanalyse auch die Wahl des vergleichsweise übersichtlichen Modellansatzes zur Beschreibung von Chlorideintrag in Beton von Straßenbauwerken im Zusammenhang mit Lebensdauerberechnungen.

Im sich anschließenden Berechnungsbeispiel, wird eine mögliche Anwendung des Modells demonstriert, wobei die im Rahmen der Validierung ausgewerteten Inspektionsdaten mittels eines Updates berücksichtigt wurden. Der zu erwartende vorteilhafte Einfluss der Inspektionsdaten auf den berechneten Zuverlässigkeitsindex wurde bestätigt.

12 AUSBLICK

Ausgehend von dem präsentierten physikalisch/empirischen Modellansatz zur Beschreibung des Eindringens von Chlorid in Beton von Straßenbauwerken, sollte zukünftige Forschung zum Ziel haben, den Einfluss der Umgebungsbedingungen und des Materials auf die prognostizierten Chloridkonzentrationen genauer zu erfassen. Eine zentrale Rolle im Modell zur Beschreibung des Eindringens von Chlorid in Beton von Straßenbauwerken nimmt der effektive Chloriddiffusionskoeffizient $D_{\text{Eff,R}}^*$ ein, welcher neben dem materialbedingten Einfluss alle durch den Chloridtransport vorhandenen Einflüsse verschmiert abbildet.

Eine Formulierung des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten mit einem material- und expositionsbedingten Anteil wäre zukünftig wünschenswert, da so insbesondere der Einfluss des Betonalters bei der Erstbeaufschlagung auf den effektiven Chloriddiffusionskoeffizient berücksichtigt werden könnte. Dies ist vor allem vor dem Hintergrund erstrebenswert, da die Auswertung von Literaturdaten darauf hindeutet, dass das Betonalter bei der Erstbeaufschlagung den effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten deutlich beeinflussen kann und gerade bei Infrastrukturbauwerken der Beton bei der Erstaufschlagung ein erhebliches Alter aufweisen kann. In der Vergangenheit wurde versucht, den materialbedingten Einfluss, welcher infolge der Hydratation zeitabhängig ist, über den im Labor an Probekörpern bestimmten Verlauf des Chloridmigrationskoeffizienten zu beschreiben. Für einen derartigen Ansatz, ist die **Übertragbarkeit der im Labor an Probekörpern bestimmten Chloridmigrationskoeffizienten zu den an Bauwerksbeton bestimmten Chloridmigrationskoeffizienten** sicherzustellen.

Die Auswertung der Literaturdaten hat gezeigt, dass die Transportmechanismen von Chlorid in Beton von Straßenbauwerken unter Praxisbedingungen noch nicht umfänglich erfasst wurden. Dabei ist insbesondere der Beitrag der Mikroislinsenpumpe und der Chloridbindekazität unter Straßenbedingungen auf den effektiven Chloriddiffusionskoeffizient näher zu untersuchen. Ist z.B. die **Mikroislinsenpumpe** maßgeblich am Chlorideintrag beteiligt, so ist zu untersuchen, ob für Betone mit Zusatz von Luftporenbildnern sich infolgedessen höhere Eindringwiderstände gegenüber dem konvektiven Chlorideintrag unter Straßenbedingungen ergeben. Dies ist vor allem vor dem Hintergrund von Interesse, dass der im Migrationsversuch bestimmte inverse Widerstand gegenüber Chlorideindringen keine Abhängigkeit von nachträglich eingeführten Luftporen zeigt. Die **Chloridbindekazität**, welche einen entscheidenden Beitrag zur Reduktion des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten leistet, kann infolge der zeitabhängigen Änderung der Porenwasserzusammensetzung auch einer zeitlichen Änderung unterworfen sein. Dabei ist von Interesse, inwieweit dies bei Straßenbauwerken eine Rolle spielt und sich des Weiteren auf den effektiven Chloriddiffusionskoeffizient auswirkt.

Die durchgeführten Sensitivitätsanalysen der Lebensdauerberechnung zeigen, dass neben dem effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten $D_{\text{Eff,R}}^*$, insbesondere die **Chloridoberflächenkonzentration** die berechnete Zuverlässigkeit der Bewehrung gegenüber chloridinduzierter Korrosion beeinflusst. Da diese Variable bisher nur überschlägig auf der Grundlage von Daten abgeschätzt wurde, welche aus dem innerstädtischen Bereich aus Süddeutschland stammen, ist diese Quantifizierung zu präzisieren. Bedingt durch den großen Einfluss dieser Variablen sollte die Quantifizierung so differenziert wie möglich erfolgen (Lage zur Straße,

u.U. auch Differenzierung zwischen Bauwerken aus dem innerstädtischen Bereich und entlang Bundesstraßen/Autobahnen und der geographischen Lage).

Auch der **kritische korrosionsauslösenden Chloridgehalt** beeinflusst deutlich den im Rahmen der Lebensdauerberechnung ermittelten Zuverlässigkeitsindex. Betrachtungen zu dieser Variable zeigen, dass auch die Quantifikation dieser Variable in Bezug auf Straßenbauwerke präzisiert werden sollte, da erwartet wird, dass die bisherige Quantifizierung für Straßenbauwerke zu konservativ ausfällt.

Darüber hinaus wäre eine Erweiterung der Datengrundlage für dieses Modell wünschenswert, um zum einen die effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten von jungem Beton, da hier vergleichsweise wenig Daten zur Verfügung standen, und zum anderen von vergleichsweise alten Betonen zuverlässiger absichern zu können. Letzteres ist von besonderem Interesse, da diese Informationen für die Prognose der Lebensdauer (i.d.R. > 50 Jahre) von großem Wert sind. Eine breitere Datengrundlage würde dabei auch die direkte Validierung des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten ermöglichen.

Die Integration der Erkenntnisse aus zukünftiger Forschung zu den beschriebenen Punkten würde genauere Aussagen bzgl. der Dauer der Einleitungsphase und damit zum Zeitpunkt der Depassivierung des Bewehrungsstahls von mit Spritzwasser beaufschlagtem Beton ermöglichen. Bei Stahlbetonbauwerken stellt der Grenzzustand der Depassivierung bisher die Grundlage der angewendeten Lebensdauermodelle dar. Aber auch Rissbildungen und Abplatzungen über korrodierender Bewehrung kennzeichnen wichtige Grenzzustände der Dauerhaftigkeit und Tragfähigkeit von Stahlbetonbauwerken. Daher sollen zukünftig im Rahmen von Lebensdauerberechnungen auch diese Grenzzustände berücksichtigt werden können. Derzeitige Forschungsaktivitäten beschäftigen sich daher intensiv mit der Modellierung der Schädigungsphase, z.B. im Rahmen des durch die DFG geförderten Projekts FOR 537: „Modellierung des Schadensfortschritts bei Korrosion von Stahl in Beton und Bemessung von Stahlbetonbauteilen auf Dauerhaftigkeit“. Da die Einleitungsphase bei Stahlbetonbauwerken i.d.R. jedoch der Schädigungsphase immer vorausgeht, hat im Rahmen von Lebensdauerberechnung eine Präzisierung des prognostizierten Depassivierungszeitpunkts auch einen Einfluss auf die prognostizierte Zuverlässigkeit gegenüber den Grenzzuständen, welche im Zusammenhang mit der Schädigungsphase stehen. Insofern stellt eine möglichst präzise Prognose der Einleitungsphase auch eine gute Grundlage für Lebensdauerberechnungen dar, in Rahmen welcher Grenzzustände der Schädigungsphase betrachtet werden.

LITERATUR

- [1] Andrade, C.; Castellote, M.; Alonso, C.; González, C.: Non-steady-state chloride diffusion coefficients obtained from migration and natural diffusions tests. Part I: Comparison between several methods of calculations. In: *Material and Structures*, Vol. 33, January-February 2000, S. 21-28.
- [2] Andrade, C.: "Determination of electrical resistivity in concrete specimens – Direct method", A translation of UNE 83301 (Ensayos de hormigón. Fabricación y conservación de probetas. 1991), und UNE 83302 (Ensayos de hormigón. Fabricación y conservación de testigos. 1984) in CHLORTEST, EU-Project (5th FP GROWTH) G6RD-CT-2002-00855, 20052004.
- [3] Bakker, R.F.M.; Roessink, G.: Zum Einfluß der Karbonatisierung und der Feuchte auf die Korrosion der Bewehrung im Beton. - In: *Beton-Informationen* 31 (1991) Nr. 3/4, S. 32-35.
- [4] Bamforth, P.B.: Enhancing reinforced concrete durability – Guidance on selecting measures for minimising the risk of corrosion of reinforcement in concrete. Technical Report No. 61, Concrete Society, 2004.
- [5] Bazant, Z. P.; Najjar, L. J. : Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete. In: *Matériaux et Construction*, Vol. 5, No. 25, 1972.
- [6] Breit, W.: Untersuchungen zum kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalt für Stahl in Beton. In: *Schriftenreihe Aachener Beiträge zur Bauforschung*, Institut für Bauforschung der RWTH Aachen, Nr. 8, Dissertation, 1997.
- [7] BRIME, "Bridge Management in Europe", Final Report. No. D14; EU-Project (European Commission DG VII, 4th Framework Programme), Contract No.: RO-97-SC.2001.
- [8] Brodersen, H.: Zur Abhängigkeit der Transportvorgänge verschiedener Ionen im Beton von Struktur und Zusammensetzung des Zementsteins. Dissertation, Technische Hochschule Aachen, 1982.
- [9] Budelmann, H.: Alter Wein in neuen Schläuchen. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 105 (2010), Heft 8, S. 485.
- [10] Budelmann, H.: Bauwerksüberwachung-Mehr als Messen. In *Beton- und Stahlbeton* 102 (2007), Heft 12, S. 811.
- [11] Bundesanstalt für Wasserbau, BAW, Karlsruhe · Hamburg · Ilmenau: Chlorideindringwiderstand von Beton (BAW-Merkblatt „Chlorideindringwiderstand“), Dezember 2004.
- [12] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Bericht über die Qualität, Dauerhaftigkeit und Sicherheit von Spannbetonbrücken. Berlin, Januar 2006.
- [13] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Investitionsrahmenplan bis 2010 für die Verkehrsinfrastruktur des Bundes (IRP). Berlin, April 2007.

- [14] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen: Bundesverkehrswegeplan 2003 – Grundlagen für die Zukunft der Mobilität in Deutschland. Berlin, Juli 2003.
- [15] Cáseres, L.; Sagiúés, A.A.; Kranc, S.C.; Weyers, R.E.: In situ leaching method for determination of chloride in concrete pore water. In: *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, 2006, S. 492-503.
- [16] Castellote, M.; Andrade, C.; Alonso, C.: Chloride-binding isotherms in concrete submitted to non-steady state migration experiments. In: *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, 1999, S. 1799-1806.
- [17] Castellote, M.; Andrade, C.; Alonso, C.: Measurement of the steady and non-steady state chloride diffusion coefficients in a migration test by means of monitoring the conductivity in the anolyte chamber - Comparison with natural diffusion tests. In: *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, 2001, S. 1411-1420.
- [18] Castellote, M.; Alonso, C.; Andrade, C.; Chadbourn, G. A.: Oxygen and chloride diffusion in cement pastes as a validation of chloride diffusion coefficients obtained by steady state migration tests. In: *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, 2001, S. 621-625.
- [19] Castellote, M.; Andrade, C.: Round-Robin Test on Chloride Analysis in Concrete. Part 1: Analysis of Total Chloride Content. Report from TC 178-TMC: "Testing and Modelling Chloride Penetration in Concrete". RILEM, 2000.
- [20] Climent, M.A.; de Vera, G.; López, J.F. ; Viqueira, E.; Andrade, C.: A test method for measuring chloride diffusion coefficients through nonsaturated concrete - Part 1. The instantaneous plane source diffusion case. In: *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, 2002, S. 1113-1123.
- [21] CHLORTEST, "Resistance of concrete to chloride ingress – from laboratory tests to infield performance", Report: Pre-evaluation of different test methods. No. D5-8, WP2, prepared by Castellote, M.; Andrade, C.; EU-Project (5th FP GROWTH) G6RD-CT-2002-00855, 2005.
- [22] CHLORTEST, "Resistance of concrete to chloride ingress – from laboratory tests to infield performance", Report: Final evaluation of test methods. No. D16-19, WP5, prepared by Tang, L.; EU-Project (5th FP GROWTH) G6RD-CT-2002-00855, 2005.
- [23] CHLORTEST, "Resistance of concrete to chloride ingress – from laboratory tests to infield performance". Report: Guideline for Practical Use of Methods for Testing the Resistance of Concrete to Chloride Ingress. No. D23, WP6, prepared by Tang, L.; EU-Project (5th FP GROWTH) G6RD-CT-2002-00855, 2005.
- [24] CHLORTEST, "Resistance of concrete to chloride ingress – from laboratory tests to infield performance". Report: Testing Resistance of Concrete to Chloride Ingress – A proposal to CEN for consideration as EN standard. No. D22, WP6, prepared by Tang, L.; EU-Project (5th FP GROWTH) G6RD-CT-2002-00855, 2005.

- [25] CHLORTEST: “Resistance of concrete to chloride ingress – from laboratory tests to infield performance”. Report: Modelling of Chloride Ingress. No. D14-15, WP4, prepared by Nilsson, L.-O.; EU-Project (5th FP GROWTH) G6RD-CT-2002-00855, 2005.
- [26] Collepari, M.; Marcialis, A.; Turriziani, R: The kinetics of chloride ions penetration in concrete (in Italian). *Il Cemento*, Vol. 67, 1970, S. 157-164.
- [27] COST 344: Improvements to Snow and Ice Control on European Roads and Bridges. TG 3/3a: Best Practice. Final Draft March, 2002.
- [28] Crank, J.: *The mathematics of diffusion*, Oxford University Press, 2. Ausgabe, 1975.
- [29] Dahme, U.: Chlorid in karbonatisierendem Beton, Speicher- und Transportmechanismen. Dissertation, Mitteilungen aus dem Institut für Bauphysik und Materialwissenschaft der Universität Duisburg Essen, Heft 12. Cuvillier Verlag Göttingen, 2006.
- [30] DAfStb: Positionspapier des DAfStb zur Umsetzung des Konzepts von leistungsbezogenen Entwurfsverfahren unter Berücksichtigung von DIN EN 206-1, Anhang J. In: *Beton- und Stahlbetonbau*, 103, Heft 12, 2008.
- [31] Daly, A.F.: Modelling of deterioration in bridges. BRIME Project, PL 97-2220, Deliverable D11. March, 1999.
- [32] Dauberschmidt, C.: Untersuchungen zu den Korrosionsmechanismen von Stahlfasern in chloridhaltigem Beton. Dissertation. ibac - Institut für Bauforschung der RWTH Aachen, 2006.
- [33] Dauberschmidt, C.; Vestner, S.: Bauwerksdiagnose bei chloridhaltigem Beton – mit dem Mix der Methoden zur erfolgreichen Planung. In: *Heftreihe Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V.*, Nr. 19, “Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen – Aktuelle Regelwerke und Hinweise zum Stand der Technik, 2010, S. 65-80.
- [34] DARTS - Durable and Reliable Tunnel Structures: Benchmarking overview report. Report No. R6.1, prepared by Meeuwissen, P.; European Commission, Growths 2000, Contract G1RD-CT-2000-00467, Project GrD1-25633, 2004.
- [35] Derjaguin, B.V.; Nerpin, S.V.; Churayev, N.V.: Effect of film transfer upon evaporation of liquids from capillaries. In: *RILEM Bulletin*, Vol. 29, S. 93-97, 1965.
- [36] Djerbi, A.; Bonnet, S.; Khelidj, A.; Baroghel-bouny, V.: Influence of traversing crack on chloride diffusion into concrete. In: *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, 2008, S. 877-883.
- [37] DuraCrete – Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures: Statistical Quantification of the Variables in the Limit State Functions. Report No.: BE 95-1347, Brussels: European Union - Brite EuRam, 1997. - Contract BRPR-CT95-0132, 2000.
- [38] DuraCrete – Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures: Deterioration Modelling. Report No.: BE 95-1347, Brussels: European Union - Brite EuRam, 1997. - Contract BRPR-CT95-0132, S. 62-63, 2000.

- [39] DuraCrete – Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures: Compliance Tests State-of-the-Art. Brussels: European Union - Brite EuRam, 1997. - Contract BRPR-CT95-0132, Project BE95-1347, Document BE95-1347/R6, September 1997.
- [40] DuraCrete – Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures: Final Technical Report. Brussels: European Union - Brite EuRam, 1997. - Contract BRPR-CT95-0132, Project BE95-1347, Document BE95-1347/R17, 2000.
- [41] DuraCrete – Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures: General Guidelines for Durability Design. Brussels: European Union - Brite EuRam, 1997. - Contract BRPR-CT95-0132, Project BE95-1347, Document BE95-1347/R14, 2000
- [42] Edvardsen, C.K.; Kim, J.I.; Kim, J.C.: Practical Implementation of a Reliability-based Concrete Durability Design. In: Proceeding of Conference Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, Cape Town, South Africa, 21-23 November 2005, Taylor & Francis.
- [43] Faber, M.H.; Sørensen, J.D.: Bayesian Sampling Using Conditions Indicators. In: Workshop Proceedings of the Third International IABMAS Workshop on Life-Cycle Cost Analysis and Design of Civil Infrastructure Systems and the JCSS workshop on Probabilistic Modelling of Deterioration Process in Concrete Structures, LCC and JCSS 2003, Lausanne, 24-26 March 2003.
- [44] Fischer, L.: Einführung in die Zuverlässigkeitstheorie tragender Baukonstruktionen. In: Das neue Sicherheitskonzept im Bauwesen – Ein Leitfaden für Bauingenieure, Architekten und Studenten. Bautechnik Spezial (Sonderheft), Ernst & Sohn Verlag, S. 130-141, 2001.
- [45] Frederikson, J.M.; Sørensen, H.E.; Andersen, A.; Klinhoffer, O.: The Effect of Water/Cement Ration on Chloride Transport into Concrete – Immersion, Migration and Resistivity Tests. Copenhagen, Danish Road Directorate, Report No. 54, 1996.
- [46] Friedmann, H.; Amiri, O.; Ait-Mokhtar, A.: Shortcomings of geometrical approach in multi-species modelling of chloride migration in cement-based materials. In: Magazine of Concrete Research. No. 3, March, S. 119-124, 2008.
- [47] Gartiser, S.; Reuther, R.; Gensch, C.-O.: Machbarkeitsstudie zur Formulierung von Anforderungen für ein neues Umweltzeichen für Enteisungsmittel für Straßen und Wege, in Anlehnung an DIN EN ISO 14024. In: Schriftenreihe der Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Text: 09/03. Forschungsbericht 200 95 308/04, 2009.
- [48] Gehlen, C.; Schießl, P.: Probability-Based Durability Design for the Western Scheldt Tunnel. Structural Concrete Journal of the fib P1, No. 2, S. 1-7, 1999.
- [49] Gehlen, C.: Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken – Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion. In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 510, Dissertation, Beuth-Verlag, Berlin, 2000.

- [50] Gehlen, C.; Schießl, P.; Pabsch, G.: Probabilistic Service Life Design: Application of the DURACRETE-Approach to Existing Structures, fib-Symposium Concrete and Environment, Berlin 2001, 3-5 October, S. 73.
- [51] Gehlen, C.; Pabsch, G.: Durability Assessment of a Railway Tunnel. In: (Re)Claiming the underground Space, J. Saveur (e.), Proceedings of the ITA World Tunneling Congress 2003, 12-17 April 2003, Amsterdam, S. 125-130.
- [52] Gehlen, C.; Schießl, P.; Schießl-Pecka, A.: Hintergrundinformationen zum Positionspapier des DAfStb zur Umsetzung des Konzepts von leistungsbezogenen Entwurfsverfahren unter Berücksichtigung von DIN EN 206-1, Anhang J, für dauerhaftigkeitsrelevante Problemstellungen. In: Beton- und Stahlbetonbau 103 (2008), Heft 12, S. 840-851.
- [53] Glass, G.K.; Buenfeld, N.R.: Chloride Threshold Levels for Corrosion Induced Deterioration of Steel in Concrete. In: RILEM International Workshop on Chloride Penetration into Concrete, Saint-Remy-Les-Chevreuse, October 15 – 18, 1995.
- [54] Gollwitzer, S.; Kirchgäßner, B.; Fischer, R.; Rackwitz, R.: PERMAS-RA/STRUREL system of programs for probabilistic reliability analysis. In: Structural Safety, Vol. 28, 2006, S. 108-129.
- [55] Gunkel, P.: Die Bindung von Chlorid im Zementstein und die Zusammensetzung chloridhaltiger Porenlösungen. In: Beton-Informationen, Heft 1, 1989, S. 3-11.
- [56] Guse, U.; Hilsdorf, H.K.: Dauerhaftigkeit hochfester Betone. In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 487, Beuth-Verlag Berlin, 1998.
- [57] Haardt, P.: Brücken an Bundesfernstraßen – Schutz und Instandsetzung im Regelungsbereich der ZTV-ING. In: Beton. Heft 12, 2009.
- [58] HETEK: Report No. 53 – Chloride penetration into concrete – State of the Art Transport processes, corrosion initiation, test methods and prediction models. Road Directorate, Denmark Ministry of Transport, 1996.
- [59] HETEK: Report No. 82 - Investigation of chloride penetration into bridge columns exposed to de-icing salt. Road Directorate, Denmark Ministry of Transport, 1996.
- [60] HETEK: Report No. 83 – A System for estimation of Chloride ingress into Concrete – Theoretical background. Road Directorate, Denmark Ministry of Transport, 1997.
- [61] Hill, W.: Einsatz einfacher Sensorsysteme für das Korrosionsmonitoring von Stahlbetonbauwerken. In: Felsbau Magazin, Nr. 3, Juni 2010, S. 191-193.
- [62] Hilsdorf, H.K.; Kottas, R.: Beanspruchung von Brückenbauwerken durch Frost und Tausalze – Teil 3 – Messungen an Brücken, Forschungsbericht. DBV. Nr. 119, AiF-Nr. 7189. Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Universität Karlsruhe, 1995.

- [63] Holst, A.; Budelmann, H.: Development of embeddable multiprobe sensors for corrosion monitoring and service life prediction of reinforced concrete structures. In: The Third International fib congress and exhibition, incorporating the PCI Annual Convention and Bridge Conference: Washington, DC, May 29 – June 2, 2010, Proceedings disc. Chicago (III.): PCI Recast/Prestressed Concrete Institute, 2010. CD-ROM.
- [64] Hong, K.; Hooton, R.D.: Effects of cyclic chloride exposure on penetration of concrete cover. In: Cement and Concrete Research. Vol. 30, 2000. S. 1199-1207.
- [65] Hong, K.; Hooton, R.D.: Effects of fresh water exposure on chloride contaminated concrete. In: Cement and Concrete Research. Vol. 29, 1999. S. 1379-1386.
- [66] Ismail, M.; Toumi, A.; Francois; Gagné, R.: Effect of crack opening on the local diffusion of chloride in cracked mortar samples. In: Cement and Concrete Research. Vol. 38, 2008. S. 1106-1111.
- [67] Jensen, O.M.: Chloride Ingress in Cement Paste and Mortar Measured by Electron Probe Micro Analysis, Series R No. 51, Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, Lyngby, 1999.
- [68] Johannesson, B.: Transport and sorption phenomena in concrete and others porous media, PhD thesis, report TVBM-1019, div. of Building Materials, Lund Institute of Technology, Lund, Schweden, 2000.
- [69] Kießl, K.: Kapillarer dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen. Dissertation. Universität Gesamthochschule Essen, 1983.
- [70] Krischer, O.; Kast, W.: Die wissenschaftliche Grundlagen der Trocknungstechnik. 3. Auflage Springer, Berlin Heidelberg New York, 1978.
- [71] Lawatsch, K.-H.; Volkwein, A.: Eindringen von Chloriden in Abhängigkeit von der Feuchte des Betons. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Bonn, Az.: Bl 5-80.01 81-20. 1984.
- [72] Lay, S.: Abschätzung der Wahrscheinlichkeit tausalzinduzierter Bewehrungskorrosion – Baustein eines Systems zum Lebenszyklusmanagement von Stahlbetonbauwerken. In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 568, Beuth-Verlag, Berlin, Dissertation, 2006.
- [73] Leech, C.; Lockington, D; Hooton, R.D.; Galloway, G.; Cowin, G.; Dux, P.: Validation of Mualem's Conductivity Model and Prediction of Saturated Permeability from Sorptivity. In: ACI Materials Journal, Vol. 105, January-February, 2008, S. 44-51.
- [74] Li, B.; Tang, L.: The effects of mineral additions on chloride penetration into concrete under frost action. In: Life-Cycle Engineering - Biondini & Frangopol (eds), Taylor and Francis Group, London, 2008, S. 189-194.
- [75] Li, L.Y.; Page, C.L.: Modelling of electrochemical chloride extraction from concrete - influence of ionic activity coefficients. In: Computational Materials Science, Vol. 9, 1998, S. 303-308.

- [76] Lindvall, A.; Andersen, A.; Nilsson, L.-O.: Chlorid ingress data from Danish and Swedish road bridges exposed to splash from de-icing salt. Chalmers University of Technology, Department of Building Materials 2000.
- [77] Lindvall, A.: Environmental Action and Response. Chalmers University of Technology, Department of Building Materials, report P-01:3, Göteborg, 2001.
- [78] Lindvall, A.: Chloride ingress in a Swedish road environment – five years exposure for three concrete compositions. Chalmers University of Technology, Department of Building Materials, report P-02:04, Göteborg, 2002.
- [79] Lindvall, A.: Investigation of chloride and moisture conditions in seven reinforced concrete bridges. Chalmers University of Technology, Department of Building Materials, Göteborg, 2002.
- [80] Lindvall, A.; Tang, L.: A Procedure for Verification of Models Used to Predict Chloride Ingress into Concrete. Fédération Internationale du Béton, In: Proceedings of the 2nd International Congress, June 5-8, 2006 – Naples, Italy.
- [81] Lohaus, L.: Anforderungen an die Dauerhaftigkeit von Betonbauwerken im Wasserbau, 2. Krefelder Planertag am 31. Oktober 2007.
- [82] Lunk, P.: Kapillares Eindringen von Wasser und Salzlösungen in Beton, Dissertation, Aedificatio Publishers, Fraunhofer IRB Verlag, 1997.
- [83] Lunk, P.; Mayer, G.; Wittmann, F.H.: Einfluss des Eindringens von Chloriden auf die wartungsfreie Nutzungsdauer von Stahlbetontragwerken, ASTRA, FA 82/93, VSS-Bericht Nr. 536, 1998.
- [84] Mayer, T.F.; Schießl, P.; Schießl-Pecka, A.: Lebensdauermanagement für das Parkhaus der Allianz-Arena in München. In: Beton. Heft 9, 2009, S. 388-391.
- [85] Meijers, S.J.H.; Bijen, J.M.; de Borst, R.; Fraaij, A.L.A.: Computational results of a model for chloride ingress in concrete including convection, drying-wetting cycles and carbonation. In: Materials and Structures, Vol. 38, March 2005, S. 145-154.
- [86] Müller, H.S.; Vogel, M.: Lebenszyklusmanagement im Betonbau. In: Beton. 58. Jhrg., Heft 5, 2008 S. 206- 215.
- [87] Ngala, V.T.; Page, C.L.: Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes. In: Cement and Concrete Research. Vol. 27, 1997, S. 995-1007.
- [88] Nielsen, E.P.; Geiker, M.R.: Chloride diffusion in partially saturated cementitious material. In: Cement and Concrete Research, Vol. 33, 2003, S. 133-138.
- [89] Nilsson, L.O.; Andersen, A.; Luping, T.; Utgennant, P.: Chloride ingress data from field exposure in a Swedish road environment. Department of Buildings and Materials; Chalmers University of Technology, Publication P-00:5, Göteborg, 2000.

- [90] NTH-Top-Down-Projektverbund: Strategien und Methoden des Life-Cycle-Engineerings für Ingenieurbauwerke und Gebäude. ab Juli 2010 für 2 Jahre von der Niedersächsischen Technischen Hochschule (NTH) gefördert.
- [91] Oreskes, N.; Shrader-Frechette, K.; Belitz, K.: Verification, Validation and Confirmation of numerical models in the earth sciences. In: Science. No. 263, 1994, S. 641-646.
- [92] Page, C.L.; Lambert, P.; Vassie, P.R.W.: Investigations of reinforcement corrosion. The pore electrolyte phase in chloride-contaminated concrete. In: Materials and Structures. Vol. 24, 1991, S. 243-252.
- [93] Philibert, J.: One and a Half Century of Diffusion: Fick, Einstein, before and beyond. In: Diffusion Fundamentals. Vol. 2, 2005. S. 1.1-1.10.
- [94] Polder, R.B.; de Rooij, M.R.: Durability of marine concrete structures - field investigations and modelling. In: Heron, Vol. 50, Nr. 3, 2005, S. 133-153.
- [95] Popper, K. R.: Logik der Forschung. 4. Auflage, Mohr Verlag, Tübingen, 1971.
- [96] Rackwitz, R.: Zuverlässigkeitsbetrachtungen bei Verlust der Dauerhaftigkeit von Bauteilen und Bauwerken. In: Kurzberichte aus der Bauforschung 40 (1990), Nr. 4, S. 297-301.
- [97] Raupach, M.; Dauberschmidt, C.: Dauerhaftigkeit von Küstenbauwerken - Anforderungen an Diffusionskoeffizienten von Beton. Prüfbericht F 903, Institut für Bauforschung Aachen (ibac), 2003.
- [98] Raupach, M.; Harnisch, J.; Wolf, L.: Praxisnahe Untersuchungen zur Vorhersage des Chlorideindringens in unbeschichtete Parkbauten. Abschlussbericht F 936, Institut für Bauforschung Aachen (ibac), 2007.
- [99] Raupach, M.; Harnisch, J.: Investigations Into the Time to Corrosion and Corrosion Initiation Chloride Contents for Steel in Concrete. Eurocorr 2010, 13-17 September – Moscow/Russia, 2010.
- [100] RCP Consulting: STRUREL, A Structural Reliability Analysis Program System, RCP Consulting, München, 1995.
- [101] Rucker-Gramm, P.: Modellierung des Feuchte- und Salztransports unter Berücksichtigung der Selbstabdichtung in zementgebundenen Baustoffen. Dissertation. Technische Universität München, Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung, 2008.
- [102] Rucker, P.; Beddoe, R.E.; Krus, M.: Neue Erkenntnisse zu den Transportmechanismen von Feucht und Chlorid in Beton. In: Tagungsbericht der 15. ibausil. Band 2, Weimar, 2003, S. 893-903.
- [103] Saetta, A.V.; Scotta, R.V.; Vitaliani, R.V.: Analysis of chloride diffusion into partially saturated concrete, In: ACI Materials Journal.; Vol. 90, September, 1993, S. 441-451.
- [104] Saltelli, A.; Chan, K.; Scott, E.M.: Sensitivity Analysis. John Wiley and Sons, Chichester, 2000.
- [105] Saltelli A.; Tarantola, S.; Campolongo, F; Ratto, M.: Sensitivity Analysis in Practice – A Guide to Assessing Scientific Models, John Wiley and Sons, Chichester, 2004.

- [106] Samson, E.; Marchand, J.; Robert, L.; Bournazel, J.P.: Modeling the mechanisms of ion diffusion in porous media. In: International journal for numerical methods in engineering, 46, 1999, S. 2043-2060.
- [107] Samson, E.; Marchand, J.; Beaudoin, J.J.: Modeling the influence of chemical reactions on the mechanisms of ionic transport in porous materials – An overview. In: Cement and Concrete Research, Vol. 30, 2000, S. 1895-1902.
- [108] Sandberg, P.: Studies of chloride binding in concrete exposed in a marine environment. In: Cement and Concrete Research, Vol. 29, 1999, S. 473-477.
- [109] Sandberg, P.: Critical Evaluation of Factors Affecting Chloride Initiated Reinforcement Corrosion in Concrete. Report TVBM-3068, Dissertation. Lund Institute of Technology, Division of Building Materials, Schweden, 1995.
- [110] Schießl, P.: Einfluß von Rissen auf die Dauerhaftigkeit von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen. In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 370, Beuth-Verlag, Berlin, 1986.
- [111] Schießl, P.; Brameshuber, W.; Gehlen, C.; Wiegrink, K.-H.: Einfluss von Rissen auf die Korrosion von Spannstahl in Brücken. Forschungsbericht F 390, Institut für Bauforschung Aachen (ibac), 1999.
- [112] Schießl, P.; Lay, S.: Dauerhaftigkeitsbemessung von Stahlbetonkonstruktionen. Forschungsbericht, AiF 12525 N, DBV 225, München, 2003.
- [113] Schießl, P.; Mayer, T.F.: Lebensdauermanagement. Schlussbericht der ersten Phase des DAfStb/BMBF-Verbundforschungsvorhabens nachhaltig Bauen mit Beton. In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 572, Beuth-Verlag, Berlin, 2007.
- [114] Schießl, P.; Schießl-Pecka, A.; Mayer, T.F.: Monitoring als Bestandteil des Lebensdauer-managements von Betonbauwerken. Münchener Massivbau-Seminar Juni 2007 der TU München anläßl. 80. Geburtstag Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. techn. h.c. Herbert Kupfer; 2007.
- [115] Schießl, P.; Schulz, R.-R., Weber, J.: Zum Eindringen von Chloriden in Normalbeton bei praxisnaher Lagerung und Beaufschlagung. Deutsche Forschungsgemeinschaft, Forschungsbericht F 199, F 227, F 244, Institut für Bauforschung Aachen (ibac), 1986.
- [116] Schießl, P.; Sodeikat, C.: Schäden an Stahlbetonbauwerken. In: Schäden an Betonbauwerken – Neuere Methoden einer Instandsetzung. Schriftenreihe des Verbandes Deutscher Architekten- und Ingenieurvereine, Band 2, 2003, S. 1-19.
- [117] Schießl, P.; Raupach, M.: Zerstörungsfreie permanente Überwachung der Korrosionsgefahr für die Bewehrung von Stahlbetonbauwerken – Sensorsysteme für direkten und nachträglichen Einbau. Fachtagung Bauwerksdiagnose – Praktische Anwendungen Zerstörungsfreier Prüfungen, 21.-22. Januar 1999, München, In: DGZfP-Berichtsband 66-CD: Plakat 27, 1999, S. 341-348.

- [118] Schießl, P.; Weydert, R.: Überwachungssysteme für die Korrosionsgefahr des Stahls im Beton. Abschlussbericht. Fraunhofer IRB-Verlag, 1998.
- [119] Schimmelwitz, P.; Hoffmann, D.; Maultzsch, M.: Untersuchungen zur Einwirkung von Tausalzen auf Brückenbauwerke aus Stahlbeton. Bonn-Bad Godesberg, Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau. In: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Nr. 370, S. 25-51, 1982.
- [120] Setzer, M.J.: Transportvorgänge und Porenstruktur. In: Mitteilungen aus dem Forschungsinstitut des Vereins der österreichischen Zementfabrikanten, Heft 39, 1986, S. 7-17.
- [121] Setzer, M.J.: Frostscha-den - Grundlagen und Prüfung. In: Beton- und Stahlbetonbau 97 (2002), Heft 7, S. 350-359.
- [122] Siebel, E. et al: Übertragbarkeit von Frost-Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse – Sachstandsbericht. In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 560. Beuth-Verlag, Berlin, 2005.
- [123] Smolzck, H.-G.: Stand der Kenntnis über Chloriddiffusion im Beton. In: Betonwerk + Fertigteil-Technik. 50 (1984), Heft 12, S. 837-843.
- [124] Snyder, K. A.; Marchand, J.: Effect of speciation on the apparent diffusion coefficient in nonreactive porous systems, In: Cement and Concrete Research. Vol. 31, 2001, S. 1837-1845.
- [125] Sodeikat, C.; Dauberschmidt, C.; Schiessl, P.; Gehlen, C.; Kapteina; G.: Korrosionsmonitoring von Stahlbetonbauwerken für Public Private Partnership Projekte. In: Beton- und Stahlbetonbau 101 (2006), Heft 12, S. 932-942.
- [126] Sommer, E.: Beitrag zur Frage der kapillaren Flüssigkeitsbewegung in porösen Stoffen bei Be- und Entfeuchtungsvorgängen, Dissertation, Darmstadt, 1971.
- [127] Sonderforschungsbereich 477: „Sicherstellung der Nutzungsfähigkeit von Bauwerken mit Hilfe innovativer Bauwerksüberwachung“: Abschluss-Symposium 2010, gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft DFG, 2010.
- [128] Sosoro, M.; Reinhardt, H.W.: Eindringverhalten von Flüssigkeiten in Beton in Abhängigkeit von der Feuchte der Probekörper und der Temperatur. In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 445, Beuth-Verlag Berlin, 1994.
- [129] Springenschmid, R.: Anleitung zur Bestimmung des Chloridgehaltes von Beton. Arbeitskreis: Prüfverfahren – Chlorideindringtiefe. Leitung: Springenschmid. In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 401, Beuth-Verlag, Berlin, 1998.
- [130] Stanish, K.D.; Thomas, M.: The use of bulk diffusion tests to establish time-dependent concrete chloride diffusion coefficients. In: Cement and Concrete Research, Vol. 33, 2003, S. 55-62.
- [131] Stanish, K.D.; Hooton, R.D.; Thomas, M.D.A.: Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete: A Literature Review. FHWA Contract DTFH61-97-R-00022, Prediction of Chloride Penetration in Concrete. 1997.

- [132] Stark, J.; Wicht B.: Dauerhaftigkeit von Betonen – Der Baustoff als Werkstoff. Birkhäuser Verlag, 2001, S. 94-96.
- [133] Taffe, A.; Wilsch, G.; Schaurich, D.; Weritz, F.: Einsatz der Laser-induzierten Breakdown Spektroskopie (LIBS) im Bauwesen – Teil 2: Ermittlung von bauschädlichen Salzen. In: Beton- und Stahlbeton. Vol. 99, Heft 9, 2004, S. 761-762.
- [134] Taffe, A.; Wiggenhauser, H.; Raupach, M.: Validierung zerstörungsfreier Prüfverfahren im Bauwesen. In: Beton- und Stahlbeton. Vol. 103, Heft 12, 2008, S. 828-836.
- [135] Tang, L.: Chloride Transport in Concrete – Measurement and Protection. Dissertation. Chalmers University of Technology Göteborg, Schweden, Oktober 1996.
- [136] Tang, L.: Concentration dependence of diffusion and migration of chloride ions – Part 1. Theoretical considerations. In: Cement and Concrete Research, Vol. 29, 1999, S. 1463-1468.
- [137] Tang, L.: Concentration dependence of diffusion and migration of chloride ions – Part 2. Experimental Evaluations. In: Cement and Concrete Research, Vol. 29, 1999, S. 1469-1474.
- [138] Tang, L.: Engineering expression of the ClinCon model for prediction of free and total chloride ingress in submerged marine concrete. In: Cement and Concrete Research, Vol. 38, 2008, S. 1092-1097.
- [139] Tang, L.; Nilsson, L.O.: Chloride binding capacity and binding isothermes of OPC pastes and mortars. In: Cement and Concrete Research, Vol. 23, 1993, S. 247-253.
- [140] Tang, L.; Nilsson, L.O.: Chloride Binding Isotherms - An approach by applying the modified BET equation. In Proceedings of the International Workshop on Chloride Penetration into Concrete, Oct. 15-18 1995, St. Rémy-lès-Chevreuse, 1995.
- [141] Thoke-Weidlich, S.: Alkaliionendiffusion in carbonatisierte und nicht carbonatisierte Betone. Dissertation, Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Hannover, 2002.
- [142] Thomas, M.D.A.; Bentz, E.C.: Life-365 Computer Program for Predicting the Service Life and Life-Cycle Costs of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides. Manual, October 2000.
- [143] Tritthart, J.: Chloride binding in cement: The influence of the hydroxide concentration in the pore solution of hardened cement past on chloride binding. In: Cement and Concrete Research. Vol. 19, 1989 S. 683-691.
- [144] Truc, O.: Prediction of Chloride Penetration into Saturated Concrete - Multi-Species Approach. Dissertation. Chalmers University of Technology Göteborg, Schweden und Toulouse, Frankreich 2000.
- [145] Truc, O.; Ollivier, J.P.; Carcassès, M.: A new way for determining the chloride diffusion coefficient in concrete from steady state migration test. In: Cement and Concrete Research, Vol. 30, 2000. S. 217-226.

- [146] Tuutti, K.: Corrosion of Steel in Concrete. Swedish Cement and Concrete Research Institute. In: CBI Research, No. Fo 4:82. Stockholm, 1982.
- [147] Umweltbundesamt: Augustin, K.; Gregor, H.-D.: Streusalzbericht I. Berlin: Umweltbundesamt, 1981.
- [148] Ungricht, H.: Wasserhaushalt und Chlorideintrag in Beton - Einfluss der Exposition und der Betonzusammensetzung. Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich, Selbstverlag, Zürich, 2004.
- [149] Ungricht, H.; Hunkeler, F.: Massnahmen gegen chloridinduzierte Korrosion und zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit. Bundesamt für Strassen, Schweizerische Eidgenossenschaft. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Mai 2008.
- [150] Vassie, P.: Reinforcement corrosion and the durability of concrete bridges. Paper 8798- Structural Engineering Group, In: ICE Journal, Issue 76, August 1984, S. 713-723.
- [151] de Vera, G.; Climent, M.A.; Viqueira, C.A; Andrade, C.: A test method for measuring chloride diffusion coefficients through partially saturated concrete. Part II: The instantaneous plane source diffusion case with chloride binding consideration. In: Cement and Concrete Research, Vol. 37, S. 714-724, 2007.
- [152] Volkwein, A.; Dorner, H.: Untersuchungen zur Chloridkorrosion der Bewehrung von Autobahnbrücken aus Stahl- oder Spannbeton. In: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. Bonn-Bad Godesberg, Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau. Heft 460, 1986.
- [153] Volkwein, A.: Spätschäden an Spannbetonbauteilen – Chloridgehaltsmessungen in Bayern, Dywidag Forschung und Entwicklung, Bericht Nr. 45/10, München, 1983.
- [154] Volkwein, A.: Untersuchungen über das Eindringen von Wasser und Chlorid in Beton. TU München, Berichte aus dem Baustoffinstitut, Heft 1, Dissertation, 1991.
- [155] Wesche, K.; Neroth, G.: Eindringen von Chloriden und Karbonatisierung des Beton im Sprühnebelbereich von Straßen. In: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bonn-Bad Godesberg, Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau. Heft 370, 1982, S. 1-21.
- [156] Wiens, U.: Zur Wirkung von Steinkohlenflugasche auf die chloridinduzierte Korrosion von Stahl in Beton. In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 551, Dissertation, Beuth-Verlag, Berlin, 2005.
- [157] Wierig, H.-J.; Langkamp, H.: Über die Chloridpenetration in nichtcarbonatisierte und carbonatisierte Betone. In: ZFG International 48, 1995, Nr. 3, S. 184-192.
- [158] Wittmann, F.H.: Feuchtigkeitsaufnahme und Feuchtigkeitstransport in porösen Baustoffen, Bautenschutz und Bausanierung. Vol. 2, Nr. 4, 1979, S. 115-124.
- [159] Wittmann, F.H.: Porosität und Feuchtigkeitsgehalt, WTA-Schriftenreihe, Nr. 3, 1992, S.1-22.

- [160] Zhang, J.; Lounis, Z.: Sensitivity Analysis of simplified diffusion-based corrosion initiation model of concrete structures exposed to chlorides. In: Cement and Concrete Research. Vol. 36, 2006, S. 1312-1323.
- [161] Zhang, T.; Gjrv, O.E.: Diffusion behavior of chloride ions in concrete. In: Cement and Concrete Research. Vol. 26, No. 6, 1996, S. 907-917.

Technische Regelwerke

- [TR1] DIN 1045-1:2008. Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 1: Bemessung und Konstruktion. Beuth Verlag. August 2008.
- [TR2] DIN 1045-2:2008. Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1. Beuth Verlag. August 2008.
- [TR3] DIN 1045-3:2008. Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 3: Bauausführung. Beuth Verlag. August 2008.
- [TR4] DIN EN 206-1:2001. Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206-1:2000. Beuth Verlag. Juli 2001.
- [TR5] DIN EN 13396:2004. Produkt und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken – Prüfverfahren - Messung des Eindringens von Chloridionen; Deutsche Fassung EN 13396:2004. Beuth Verlag. September 2004.
- [TR6] ISO 2394: 1998. General principles on reliability of structures. Second edition. 1998.
- [TR7] DIN 1990:2002. Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung, Deutsche Fassung EN 1990:2002. Beuth Verlag. Oktober 2002.
- [TR8] DIN-Fachbericht 100: Beton – Zusammenstellung von DIN EN 206-1 und DIN 1045-2. Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag. 2005.
- [TR9] DIN EN 14629: 2007. Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandhaltung von Betonbauwerken – Prüfverfahren – Bestimmung des Chloridgehalts in Festbeton; Deutsche Fassung EN 14629: 2007. Beuth Verlag. Juni 2007.
- [TR10] FprCEN/TS 12390-11:2009 (D): Prüfung von Festbeton-Teil 1: Bestimmung des Chloridwiderstands von Beton – Einseitig gerichtete Diffusion, Entwurf der Vornorm CEN/TS 12390-11, 24.02.2009.
- [TR11] JCSS – Joint Committee on Structural Safety: Probabilistic Assessment of Existing Structures. RILEM Publications S.A.R.L, Diamantidis (Ed.), 2001.
- [TR12] Nordtest Method: NT BUILD 443. Concrete, Hardened: Accelerated Chloride Penetration, 1995.
- [TR13] Nordtest Method: NT BUILD 492. Chloride Migration Coefficient From Non-Steady-State Migration Experiments, 1999.

ANHANG A

Bewertung von Auslagerungsversuchen in Hinblick auf die Mikroislinsenpumpe

Zur Abschätzung des Einflusses der Mikroeislinsepumpe unter Praxisbedingungen ist zu beachten, dass die hier vorgestellten Versuche nicht zur Klärung dieser Fragestellung konzipiert wurden. Infolgedessen sind auch die Randbedingungen nicht so gewählt, dass eine entgültige Beantwortung dieser Frage möglich ist.

Ungricht [148] lagerte Probepplatten (unterschiedliche Betone, alle ohne Luftporenbilder) im Spritzwasser- und Sprühwasserbereich einer Tunnelwand aus und führte umfangreiche Messungen zum tiefenabhängigen Chloridgehalt, Feuchtigkeitszustand und zum Temperaturverlauf über eine Auslagerungszeit von 2,5 Jahren durch. Neben Bohrmehlproben wurde der Großteil der Messergebnisse zerstörungsfrei über einbetonierte tiefengestaffelte Widerstands- und Temperatursensoren gewonnen. Die Probepplatten (600/500/100 mm) wurden im Portalbereich seitlich an der Tunnelwand des Naxbergtunnels angeordnet, durch welchen die A2 in der Schweiz führt. Im Winter kommt es in dieser Region zu ergiebigen Niederschlägen und die Temperatur kann weit fallen. Diese klimatischen Randbedingungen spiegeln sich auch in der Intensität der Winterdienstesätze wider, welche über den Untersuchungszeitraum an rd. 40 Tagen im Jahr durchgeführt wurden. Bei der Bewertung der Ergebnisse ist zu beachten, dass aufgrund der geringen Probendicke (100 mm) und des nicht vorhandenen thermischen Schutzes der Rückseite der Beton der Probepplatten über die Tiefe stärker auskühlt, als dies bei einem vergleichbaren massiven Betonbauteil der Fall wäre.

In Abhängigkeit von der Tiefenwirkung von Wassereinträgen in die Probekörper definierte Ungricht drei unterschiedliche Kategorien von Ereignissen und hielt fest, unter welchen klimatischen Randbedingungen diese vorzugsweise auftraten, vgl. **Tabelle A 1**.

Tabelle A 1: Klimatische Randbedingungen beim Eintrag von Wasser in Beton (durchschnittliche Betonqualität w/z ~ 0,5) nach Ungricht [148]

		Definition von Ereignissen in Abhängigkeit von deren Tiefenwirkung (messbarer Feuchteanstieg)		
		Großereignis	mittleres Ereignis	Kleinereignis
		≥ 30 bis 40 mm	rd. 10 bis 30 mm	≤ 10 mm
Klimatische Randbedingungen	Relative Luftfeuchte	> 80 bis 90 % r.F., nahezu 100 % über eine längere Zeit	> 80 bis 90 % r.F.	100 % wird kaum oder nur für sehr kurze Zeit erreicht.
	Beton-temperatur	$-4 \leq T_{\text{Beton}} \leq +3^{\circ}\text{C}$	$-4 \leq T_{\text{Beton}} \leq +3^{\circ}\text{C}$	$-4 \leq T_{\text{Beton}} \leq +6^{\circ}\text{C}$
	Luft-temperatur	$T_{\text{Luft}} > T_{\text{Beton}}$	$T_{\text{Luft}} < T_{\text{Beton}}$	$T_{\text{Luft}} < T_{\text{Beton}}$
	Temperatur-tendenz	Temperaturanstieg ↑	Temperaturabfall ↓	Temperaturabfall ↓

Ungricht stellt in ihren Untersuchungen fest, dass große Wassereinträge nur in den Wintermonaten und da insbesondere beim Auftauen des Betons auftraten. Die verstärkte Wasseraufnahme bei tiefen Temperaturen wird durch verstärkte kapillare Wasseraufnahme infolge Kondensation an der Betonoberfläche erklärt, wodurch der Beton lange nass bleibt und dadurch den Nachschub beim kapillaren Saugen gewährleistet. Ab März bis etwa November trocknet der Beton langsam von außen nach innen aus. Selbst infolge extremer Niederschlagsereignisse im Sommer konnte nur ein sehr geringer Wassereintrag festgestellt werden, dessen Tiefenwirkung auf die ersten zehn Millimeter beschränkt war. Dies wird durch die vergleichsweise schnelle Verdunstung von Wasser an der Betonoberfläche infolge der hohen Temperaturen erklärt, wodurch sich der Wassernachschub reduziert, da der Wasserfilm an der Oberfläche häufiger abreißt. Das folgende **Bild A 1** zeigt deutlich, dass keine Korrelation zwischen der Wasseraufnahme und der Niederschlagshöhe erkennbar ist.

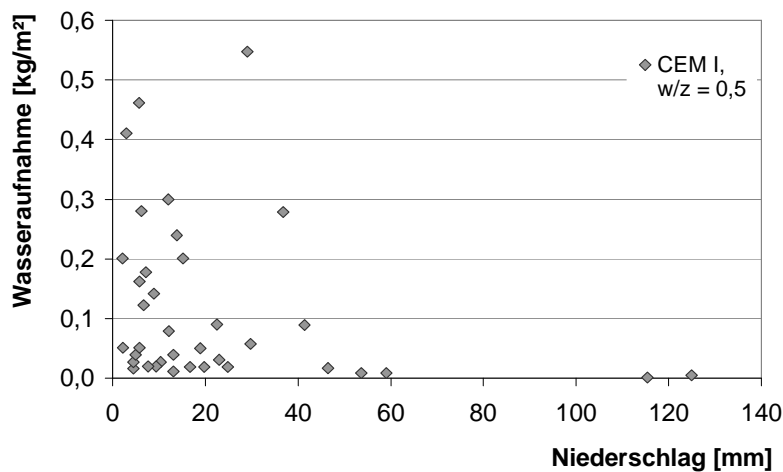


Bild A 1: Gesamte an Probekörpern gemessene Wasseraufnahme in Abhängigkeit von den Niederschlägen am Tag bzw. an den Tagen des Wassereintrags [148]

Im Rahmen dieser Messungen wurde die größte Wassermenge beim Auftauen des Betons eingetragen, die dabei ermittelte Tiefenwirkung betrug maximal bis zu 70 mm. Bei einem extremen Ereignis wurde eine fast synchrone Veränderung des Wassergehalts in allen Tiefenlagen festgestellt, was Ungricht als messtechnisch bedingte Erscheinung interpretiert. Ein im Winter über die Tiefenlagen bis 20 mm fast synchroner Anstieg ist jedoch auch bei der freien Chloridkonzentration erkennbar, vgl. **Bild A 2**. Die bis in große Tiefenlagen fast ohne Zeitverzögerung stattfindende Erhöhung der Chloridkonzentration wurde auch an Brückenkappen festgestellt, hier bis in Tiefenlagen von rd. 50 mm [72].

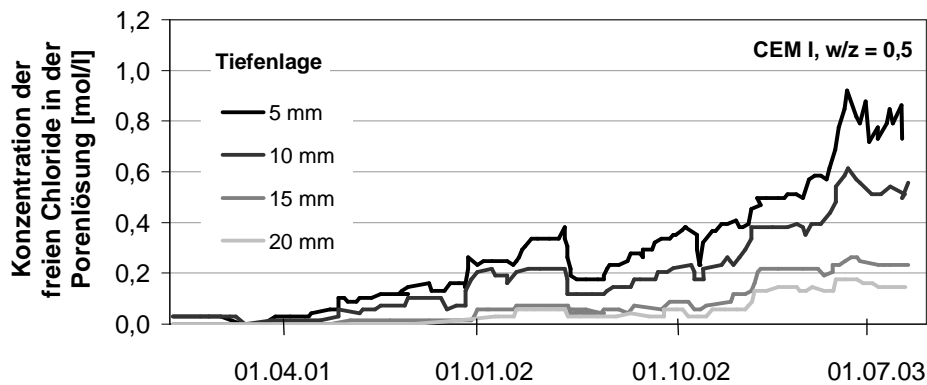


Bild A 2: Freier Chloridgehalt im Porenwasser in Abhängigkeit von der Zeit, gemessen mit Chloridsensoren in verschiedenen Tiefenstufen [148]

Die Auswertung der klimatischen Randbedingungen ergab, dass die ausgeprägtesten Wassereinträge bei ansteigenden Betontemperaturen um den Gefrierpunkt stattfinden, vgl. **Bild A 3**. Des Weiteren zeigt der Vergleich des CEM I-Betons mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,5$ zu einem Beton mit $w/z = 0,35$ deutlich den Einfluss der Betonqualität in Hinblick auf den Wassereintrag.

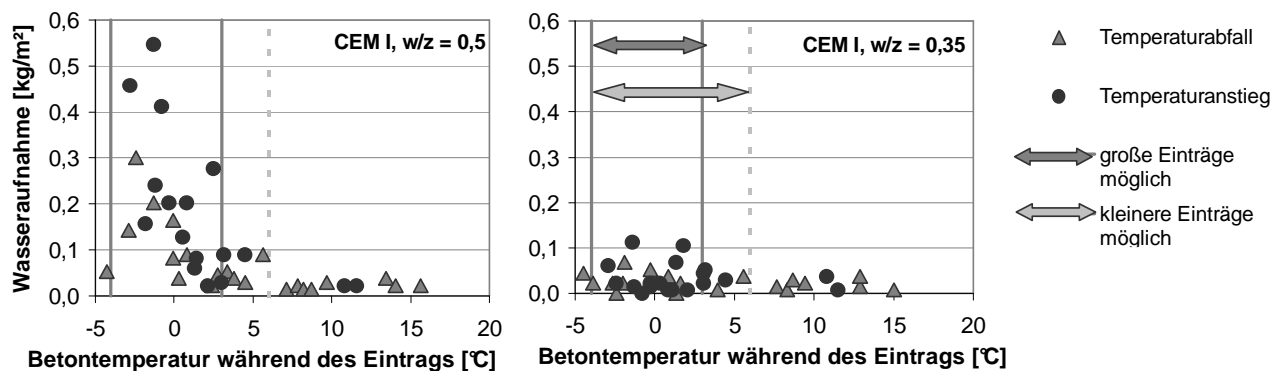


Bild A 3: Wasseraufnahme in Abhängigkeit von der mittleren Betontemperatur während des Eintrags für einen CEM I-Beton mit $w/z = 0,5$ (links) und $w/z = 0,35$ (rechts) [148]

Dies bedeutet, dass die größten Wassereinträge unter Randbedingungen festgestellt wurden, in denen die Mikroislinsenpumpe wirksam ist. Der im Winter festgestellte, fast synchrone Anstieg der freien Chloridkonzentration bis in größere Tiefenlagen lässt vermuten, dass es sich hier um einen konvektiven Chlorideintrag infolge der Mikroislinsenpumpe handelt.

Die Bewertung der durch Ungricht ausgewerteten Messergebnisse aus den Auslagerungsversuchen nährt die Vermutung, dass die Mikroislinsenpumpe unter ungünstigen Bedingungen einen signifikanten Beitrag zum Wassereintrag und damit auch zum Chlorideintrag leisten kann. In diesem Zusammenhang ist davon auszugehen, dass die Betonzusammensetzung (CEM I-Beton, w/z = 0,5 ohne zusätzlich eingeführte Luftporen \mapsto Beton mit vergleichsweise geringem Widerstand gegenüber diesem Transportmechanismus) und die Temperaturbedingungen die Wirkung der Mikroislinsenpumpe verstärken.

ANHANG B

EFFEKTIVER CHLORIDDIFFUSIONSKOEFFIZIENT

- B-1: Modellierungsansätze zur Beschreibung der Zeitabhängigkeit des Chloriddiffusionskoeffizienten**
- B-2: Testmethoden zur Beschreibung des Ausgangswerts des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten**
- B-3: Empirischer Ansatz zur Beschreibung des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten nach Gehlen**
- B-4: Zusammenhang zwischen dem effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten und der oberflächennahen Steigung des Chloridprofils**
- B-5: Einfluss des Tiefenbereichs Δx gemäß dem Modell nach Gehlen auf den aus Chloridprofilen durch Kurvenfitting bestimmten effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten**

B-1: Modellierungsansätze zur Beschreibung der Zeitabhängigkeit des Chloriddiffusionskoeffizienten

Es herrscht Einigkeit darin, dass der aus Chloridprofilen durch Kurvenfitting bestimmte effektive Chloriddiffusionskoeffizient eine altersabhängige Variable ist, welche mit zunehmendem Alter geringer wird. In den Transportmodellen, welche auf dem 2. Fick'schen Diffusionsgesetz fußen, ist der Diffusionskoeffizient zunächst als eine zeitunabhängige Kenngröße definiert. Für diesen Fall entspricht der integrale Mittelwert des Chloriddiffusionskoeffizienten dem momentanen Chloriddiffusionskoeffizienten. Für einen zeitabhängigen Chlorideindringwiderstand ist dies jedoch nicht der Fall. Aus mathematischer Sicht kann das 2. Fick'sche Diffusionsgesetz bei einem zeitabhängigen Diffusionskoeffizienten nur dann verwendet werden, wenn der integrale Mittelwert des Diffusionskoeffizienten Eingang in die Gleichung findet. Die Berücksichtigung der Zeitabhängigkeit kann dabei über zwei unterschiedliche Ansätze erfolgen. So ist zwischen einem mathematischen (Ansatz A) und einem empirischen Ansatz (Ansatz B) zu differenzieren. Da die Variablen, welche zur Beschreibung des effektiven Diffusionskoeffizienten herangezogen werden, in beiden Ansätzen teilweise gleich oder ähnlich benannt sind, deren Bedeutung aber unterschiedlich ist, werden die beiden Ansätze im Folgenden kurz erläutert. Im Zusammenhang mit den folgenden Erläuterungen wird zur Verdeutlichung, dass der nicht stationäre Chloriddiffusionskoeffizient D_{nss} ein integraler Mittelwert ist, diese Variable als D^{IM} bezeichnet. Die Benennung des zum Zeitpunkt τ tatsächlich vorhandenen Chloriddiffusionskoeffizienten $D_{\text{nss},\tau}$, welcher auch als momentaner Diffusionskoeffizient bezeichnet wird, erfolgt analog mit D^{momentan} .

Ansatz A (mathematisch):

Wie vorher beschrieben, ist der über die Expositionsdauer integrale Mittelwert D^{IM} des momentanen Diffusionskoeffizienten D^{momentan} Eingangswert in das 2. Fick'sche Diffusionsgesetz. Dies bedeutet, dass ausgehend vom zeitabhängigen Verlauf des momentanen Diffusionskoeffizienten D^{momentan} der integrale Mittelwert D^{IM} über die Expositionsdauer zu berechnen ist, vgl. **Bild B 1** links. In der Literatur sind meistens Näherungslösungen zu finden, welche die Expositionsdauer mit dem Betonalter gleichsetzen, vgl. **Bild B 1** rechts.

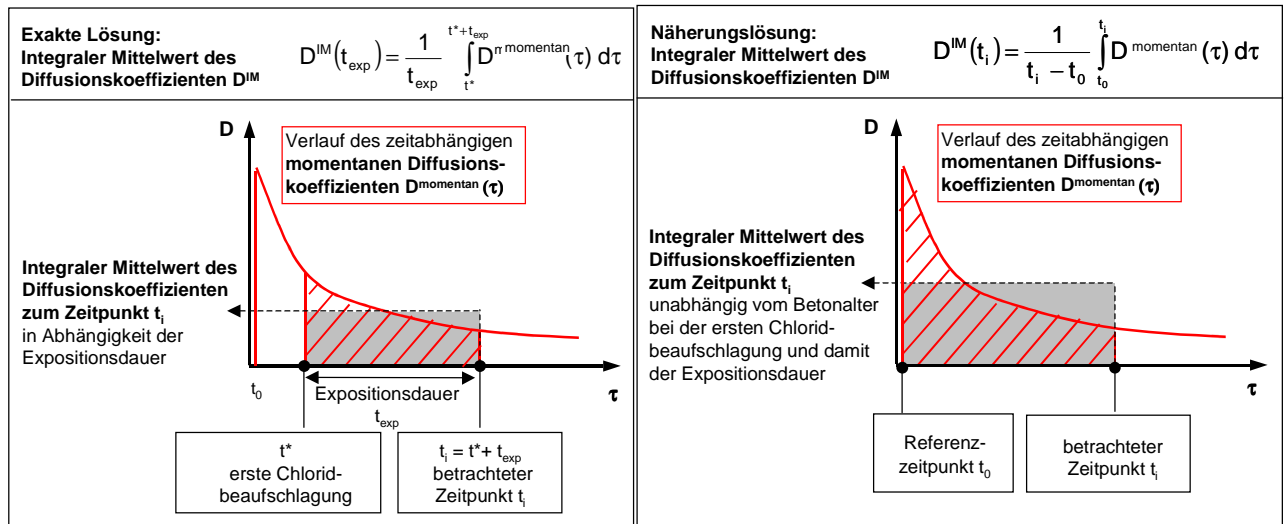


Bild B 1: Zusammenhang zwischen dem momentanen Diffusionskoeffizienten $D^{momentan}$ und dem integralen Mittelwert D^{IM}

Eine Gegenüberstellung dieser beiden in **Bild B 1** dargestellten Vorgehen zeigt, dass, bedingt durch den monoton fallenden Verlauf von $D^{momentan}$, sich für die Näherungslösung größere integrale Mittelwerte ergeben. Mit zunehmender Expositionsdauer verringert sich diese Abweichung, vgl. auch **Kapitel 8.3.1.8**.

Ein derartiges Vorgehen setzt voraus, dass der zeitabhängige Verlauf des „momentanen“ Diffusionskoeffizienten bekannt ist. Der durch Einlagerungsversuche bestimmte Chloriddiffusionskoeffizient (Kurvenfittings von Chloridprofilen) kann infolge der langen Versuchsdauer von mindestens 35 Tagen [TR12] nicht direkt verwendet werden. Da die Versuchsdauer beim Chloridmigrationstest dagegen nur wenige Stunden beträgt, wird in einigen Modellen der momentane Diffusionskoeffizient auf der Grundlage des zeitabhängigen Verlaufs des Chloridmigrationskoeffizienten beschrieben, z.B. [72][135].

Wird der zeitabhängige Verlauf des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten auf der Grundlage des Chloridmigrationskoeffizienten beschrieben, so sind die Einflüsse, welche der Migrationsversuch nicht oder nicht hinreichend genau erfasst, über entsprechende Modelle oder Variablen zu berücksichtigen. Hierzu zählt bei Einlagerungsversuchen z.B. das Chloridbinden [135][138]. Soll mit diesem Ansatz der Chloridtransport infolge einer intermittierender Chloridbeaufschlagung beschrieben werden, bei welchem auch konvektive Transportmechanismen den Transport von Chlorid in Beton beeinflussen (z.B. durch kapillaren Wassereintrag und Wasseraustrag oder die Mikroeislinsepumpe), so müssen diese über zusätzliche Gleichungen berücksichtigt werden, um den effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten beschreiben zu können [72].

Ansatz B (empirisch):

Beim empirischen Ansatz wird der integrale Mittelwert des Chloriddiffusionskoeffizienten durch eine Funktion beschrieben, welche aus Beobachtungen abgeleitet wurde. Bei diesen Beobachtungen handelt es sich um aus Chloridprofilen durch Kurvenfitting abgeleitete Diffusionskoeffizienten, z.B. [89][38]. Diese abgeleiteten Chloriddiffusionskoeffizienten, welcher für Meeresbauwerke z.B. als „effektive Chloriddiffusionskoeffizienten“ $D_{\text{Eff},C}$ bezeichnet werden [49], entsprechen dabei im Wesentlichen dem integralen Mittelwert D^{IM} .

Werden Chloridprofile, welchen eine vergleichbare Einwirkung und ein vergleichbarer Betonwiderstand zu Grunde liegt, über die Zeit ausgewertet, so kann für Meeresbauwerke im doppellogarithmischen Maßstab ein linearer Zusammenhang zwischen $D_{\text{Eff},C}$ und der Expositionsdauer mittels Regressionsanalyse beschrieben werden [49]. Ausgehend vom Ausgangswert nimmt der effektive Diffusionskoeffizient über die Expositionsdauer ab. Der Regressionskoeffizient, welcher diese Entwicklung beschreibt, ist der Alters-exponent a , welcher die negative Steigung im doppellogarithmischen Maßstab darstellt, vgl. **Bild B 2**.

Durch das empirische Anpassen des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten kann prinzipiell auch das Ergebnis des Chlorideindringens beschrieben werden, welches sich infolge einer intermittierenden Chlorid-beaufschlagung einstellt, bzw. infolge des Zusammenwirkens anderer als Diffusion stattfindender Transport-mechanismen.

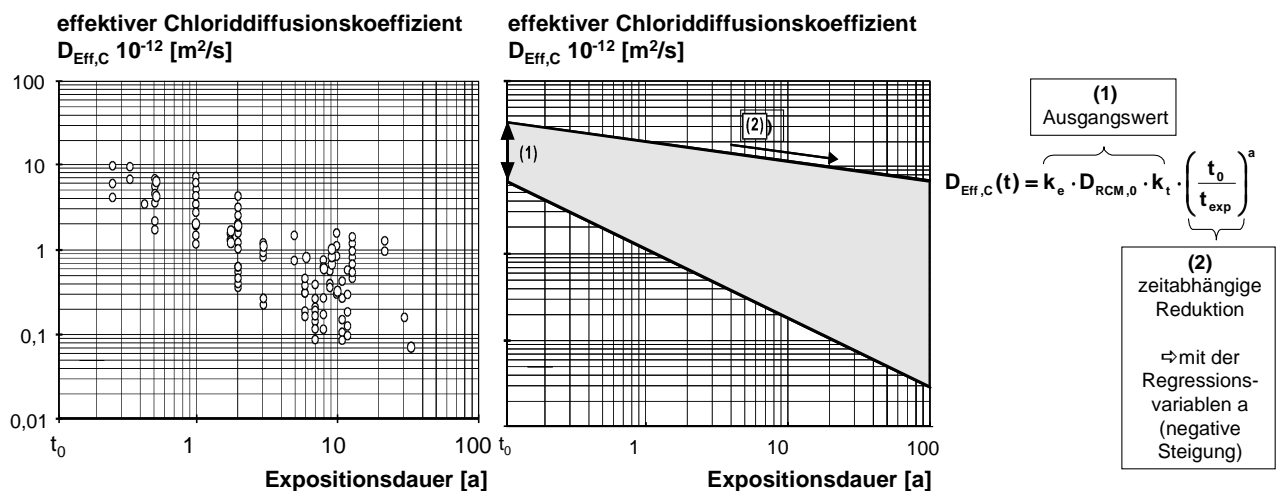


Bild B 2: Effektive Chloriddiffusionskoeffizienten von Portlandflugaschezementbeton, bestimmt an Meerwasserbauwerken und Probekörpern aus Einlagerungsversuchen über die Expositionsdauer (links) [49], Regression der Daten mit Streuband (rechts) [49]

Abschließende Bemerkung

Soll ein Modell basierend auf dem 2. Fick'schen Diffusionsgesetz zur Beschreibung des Chlorideindringens herangezogen werden, ist stets der integrale Mittelwert des Diffusionskoeffizienten D^{IM} die relevante Größe. Der Weg zur Bestimmung dieser Variablen kann jedoch unterschiedlich ausfallen, vgl. Ansatz A und B. Der Vollständigkeit halber ist zu erwähnen, dass auch noch Mischformen aus den beiden Ansätzen existieren [130]. Die wesentlichen Unterschiede der beiden vorgestellten Ansätze A und B sind in **Bild B 2** zusammengestellt.

Tabelle B 1: Übersicht der in diesem Kapitel vorgestellten Ansätze zur Beschreibung des integralen Mittelwerts des Diffusionskoeffizienten D^{IM}

Ansatz	Ausgangssituation	momentaner bzw. quasi-aktueller Chloriddiffusionskoeffizient	Integraler Mittelwert des Chloriddiffusionskoeffizienten*	Voraussetzung für die Anwendbarkeit
A mathematischer Ansatz	Kenntnis des Verlaufs des momentanen Chloriddiffusionskoeffizienten	wird durch Modelle beschrieben	wird rechnerisch aus dem Verlauf des momentanen Chloriddiffusionskoeffizienten abgeleitet	Jeder am Chloridtransport beteiligte Mechanismus muss über entsprechende Modelle in den Ansatz integriert werden.
B empirischer Ansatz	Kenntnis des Verlaufs des integralen Mittelwerts des Chloriddiffusionskoeffizienten (effektiver Diffusionskoeffizient) unter bestimmten Randbedingungen	-	D^{IM} wird aus Beobachtungen empirisch abgeleitet und durch Formeln beschrieben	D^{IM} enthält implizit alle unter den gegebenen Randbedingungen vorhandenen Einflüsse auf den Chloridtransport, weshalb mit diesem Ansatz zunächst nur der Chloridtransport unter vergleichbaren Randbedingungen berechnet werden kann.

* Eingangsvariable für Modelle, welche auf dem 2. Fick'schen Diffusionsgesetz fußen

Der empirische Ansatz (vgl. Ansatz B in **Tabelle B 1**) ermöglicht die direkte Beschreibung des integralen Mittelwerts, welcher im Rahmen des Modells nach Gehlen als der effektive Chloriddiffusionskoeffizient bezeichnet wird. Dieser Kennwert beinhaltet infolgedessen die gesamte Einwirkungsgeschichte des beprobten Bauteils. Dabei werden alle Einflüsse erfasst, welche die Chloridtransportgeschwindigkeit von Chloriden in Beton beeinflussen. Dazu zählen neben materialspezifischen zeitabhängigen Eigenschaften auch expositionsbedingte. Dabei spielt insbesondere eine Rolle, inwieweit andere Chloridtransportmechanismen als die Diffusion unter den gegebenen Bedingungen zum Tragen kommen. Daher kann ein auf dieser Grundlage abgeleiteter altersabhängiger Verlauf nicht ohne weiteres auf andere Expositionen und Betonzusammensetzungen übertragen werden.

B-2: Testmethoden zur Beschreibung des Ausgangswerts des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten

Zur Beschreibung des Chlorideindringwiderstands von Beton stehen mehrere Testmethoden zur Verfügung, welche grob in die folgenden drei Kategorien eingeteilt werden:

- Diffusionsversuch
Einlagerungsversuch, siehe EN 13396 [TR5] oder NT BUILD 443 [TR12]
- Migrationsversuch
stationärer Migrationsversuch, siehe NT BUILD 492 [TR13] oder BAW-Merkblatt [11]
INSA steady-state migration test [145]
Multi-regime migration test (sowohl stationär als auch nicht-stationärer Migrationskoeffizient) [17]
- Indirekte Versuchsmethoden, welche z.B. auf Widerstandsmessung basieren
Resistivity test [2]

Eine kurze Beschreibung der unterschiedlichen Testmethoden ist z.B. in [24] und [131] gegeben. Infolge der z.T. sehr unterschiedlichen Randbedingungen (Versuchsdauer, einwirkende Chloridkonzentration) können die aus diesen Versuchen abgeleiteten Chlorideindringwiderstände nicht ohne Weiteres miteinander verglichen werden. Ein wesentlicher Unterschied ist, ob der aus den Versuchen abgeleitete Chlorideindringwiderstand unter stationären oder nicht-stationären Verhältnissen bestimmt wurde. Wird der Chlorideindringwiderstand unter nicht-stationären Versuchsverhältnissen bestimmt, wird hierbei das simultan zum Eindringvorgang stattfindende Chloridbinden berücksichtigt. Die aus den genannten Einlagerungsversuchen abgeleiteten Diffusionskoeffizienten sind daher nicht-stationäre Kennwerte.

Die konventionelle, experimentelle Ermittlung des Chloriddiffusionskoeffizienten erfolgt durch Einlagerungsversuche. Dabei werden Betonprobekörper unter festgelegten Randbedingungen in chloridhaltiger Lösung gelagert. Nach entsprechenden Einlagerungszeiträumen wird Bohrmehl tiefengestaffelt entnommen und hinsichtlich des Chloridgehalts analysiert. Aus dem daraus sich ergebenden Chloridprofil wird durch Kurvenfitting dann der Chloriddiffusionskoeffizient ermittelt. Durch eine Einlagerungsdauer von mindestens 35 Tagen [TR12] ist dieses Vorgehen sehr zeitaufwendig. Mit Hilfe eines an der Chalmers Tekniska Högskola (CTH) entwickelten Migrationstests (Rapid-Chloride-Migration, RCM-Test) wird der Chloridmigrationskoeffizient (hier: D_{RCM}) unter nicht-stationären Versuchsbedingungen bestimmt, vgl. z.B. [TR13] [39]. Das Grundprinzip des Migrationsversuchs basiert auf der Beschleunigung des Ionentransportes (negativ geladene Chloridionen) durch das Anlegen eines elektrischen Feldes. Dadurch wird die Versuchsdauer auf wenige Stunden verkürzt.

Inwieweit die relevanten Merkmale des nicht-stationären Diffusionsvorgangs bei Chlorid in Beton durch den nicht-stationären Migrationstest berücksichtigt werden, ist dabei nicht vollends geklärt. So ist z.B. noch die Frage zu beantworten, inwieweit die ionogenen Effekte und die Bindevorgänge durch das Anlegen eines elektrischen Feldes beeinflusst werden [1][136]. Untersuchungen zu Chloridbindungsisothermen zeigen deutlich unterschiedliche Verläufe, wenn diese durch Migrationsversuche und nicht durch Diffusionsversuche bestimmt werden [16]. Tang schlussfolgert auf der Grundlage von nicht-stationären Versuchen, dass der

Chloridmigrationskoeffizient den Chloriddiffusionskoeffizienten für den Fall einer reduzierten Chloridbindung gut abbilden kann [23]. Bei stationären Versuchen zum Einfluss des elektrischen Feldes auf die elektrische Interaktion zwischen den Ionen und der Zementsteinoberfläche wird geschlussfolgert, dass das elektrische Feld diese scheinbar nicht beeinflusst [18]. In [136] wird hingegen ein funktionaler Zusammenhang zwischen dem stationären Diffusions- und dem Migrationskoeffizienten auf der Grundlage von ionogenen Effekten hergeleitet. Während für die gewählten Testbedingungen in [18] das Verhältnis von Diffusionskoeffizient zu Migrationskoeffizient bei rd. 1 lag, wurde in [136] für einen vergleichbaren Beton dieser zu 0,6 bestimmt. In [46] wiederum wird gezeigt, dass durch die Berücksichtigung der ionogenen Interaktion infolge der elektrischen Doppelschicht sich die im Migrationsversuch einstellende Stromdichte gut beschreiben lässt, was darauf hindeutet, dass dieser Effekt durch den Migrationsversuch erfasst wird. Auch die Ergebnisse aus vergleichenden Untersuchungen zu Migrations- und Diffusionskoeffizienten unter stationären Bedingungen deuten darauf hin [18].

Im Rahmen des europäischen Forschungsprojekts CHLORTEST [23] wird aufgrund der vielen im Detail offenen Fragen hierzu geschlussfolgert, dass der unter nicht-stationären Bedingungen bestimmte Chloridmigrationskoeffizient nicht notwendigerweise vergleichbar mit dem Diffusionskoeffizienten ist, Auswertungen von Versuchsdaten haben jedoch gezeigt, dass diese beiden Betonkennwerte in einem vergleichsweise jungen Betonalter eine zufällig gute Übereinstimmung aufweisen [21][22], was auch durch andere Quellen bestätigt wird [49][97].

B-3: Empirischer Ansatz zur Beschreibung des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten nach Gehlen

Im Rahmen des 2. Fick'schen Diffusionsgesetzes ist der zeitabhängige Diffusionskoeffizient definitionsgemäß ein integraler Mittelwert. Die Gleichung zur Beschreibung des zeitabhängigen effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten nach Gehlen setzt sich im Wesentlichen aus zwei Teilen zusammen, einem Ausgangswert und einem Term, welcher die zeitabhängige Reduktion beschreibt, vgl. **Bild B 2** im **Anhang B-1**. Neben Übertragungsvariablen enthält der Ausgangswert den Chloridmigrationskoeffizienten $D_{RCM,0}$. Dieser wird in Versuchen an Betonprobekörpern mit vergleichsweise kurzer Versuchsdauer bestimmt und kann daher auch als momentaner Chloriddiffusionskoeffizient zum Untersuchungszeitpunkt aufgefasst werden [72][156]. Aufgrund dessen wäre zu erwarten, dass die Gleichung für $D_{Eff}(t)$ die Formel zur Beschreibung des integralen Mittelwerts über die Zeit enthält, vgl. **Bild B 1** im **Anhang B-1**. Dies ist jedoch nicht der Fall und stellt auf den ersten Blick einen Widerspruch dar. Um diesen zu klären, muss der Aufbau der Gleichung näher betrachtet werden. Zur Beschreibung des zeitabhängigen Verlaufs des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten sind zunächst Chloridprofile von Betonen mit vergleichbarer Zusammensetzung aus vergleichbarer Exposition ausgewertet worden. Durch Kurvenfitting dieser Chloridprofile wurden effektive Chloriddiffusionskoeffizienten bestimmt, welche hier als $D_{Eff,C}$ bezeichnet werden. Der effektive Chloriddiffusionskoeffizient $D_{Eff,C}$ ist dabei ein integraler Mittelwert. Der zeitabhängige Verlauf dieser integralen Mittelwerte wurde mit Hilfe von Regressionsvariablen beschrieben. Im Rahmen dieses empirischen Ansatzes für den zeitabhängigen effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten wird demnach der Verlauf des integralen Mittelwerts direkt beschrieben, vgl. hierzu auch **Kapitel B-1** im **Anhang B**.

Obwohl die Gleichung des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten direkt den integralen Mittelwert beschreibt, ist der Ausgangswert dieser Gleichung der Chloridmigrationskoeffizient, welcher prinzipiell als momentaner Chloriddiffusionskoeffizient (mit eingeschränkter Chloridbindung) aufzufassen ist. Dies erscheint auf den ersten Blick als irritierend. Da jedoch der Chloridmigrationskoeffizient von Beton (w/z in einer Bandbreite von 0,4 bis 0,6) und der durch Einlagerungsversuche bestimmte effektive Chloriddiffusionskoeffizient (integraler Mittelwert) im jungen Betonalter eine gute Korrelation aufweisen, vgl. **Bild B 3**, kann der Ausgangswert zum Referenzzeitpunkt t_0 des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten gut mit dem Chloridmigrationskoeffizienten beschrieben werden. Des Weiteren zeigt die Gegenüberstellung der beiden Kennwerte auch, dass der Testmethodenfaktor k_t zur Übertragung des Chloridmigrationskoeffizienten auf den effektiven Diffusionskoeffizienten mit $k_t = 1$ angesetzt werden kann.

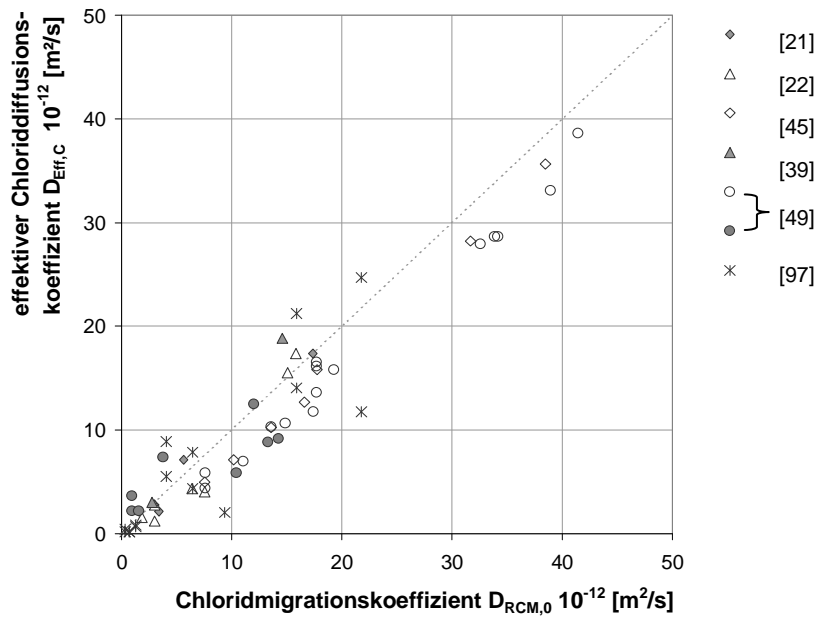


Bild B 3: Gegenüberstellung des Chloridmigrationskoeffizienten (bestimmt mit RCM-Test) mit dem effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten (bestimmt durch Einlagerungsversuche)

B-4: Zusammenhang zwischen dem effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten und der oberflächennahen Steigung des Chloridprofils

Die folgenden Betrachtungen sollen den Zusammenhang zwischen dem effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten und der oberflächennahen Steigung des Chloridprofils verdeutlichen, dessen Verhältnis im Wesentlichen umgekehrt proportional ist. Dies bedeutet für den Vergleich zweier diffusionsgesteuerter Chloridprofile mit gleicher Chloridoberflächenkonzentration nach gleicher Expositionsdauer: je steiler das Chloridprofil im oberflächennahen Bereich, desto geringer ist der effektive Chloriddiffusionskoeffizient.

Durch die Anwendung des 2. Fick'schen Diffusionsgesetzes ergibt sich, ausgehend von der Ausgangschloridkonzentration, welche im Rahmen des hier betrachteten Ansatzes [I] C_{Sa} ist, der tiefenabhängige Verlauf der Chloridkonzentrationen nach einer Expositionsdauer t_{exp} . Der in **Bild B 4** als A bezeichnete Term beschreibt dabei die Reduktion der Chloridkonzentration über die Tiefenlage x in Abhängigkeit des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten D_{Eff}^* und der Expositionsdauer t_{exp} . Der Term A ist dabei dimensionslos, normiert und unabhängig von C_{Sa} . Wird nun die Expositionsdauer t_{exp} als konstant vorausgesetzt, so hängt dieser Term und infolgedessen auch das Chloridprofil und dessen Steigungsverlauf vom effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten D_{Eff}^* ab.

$$C(x, t_{exp}) = C_{Sa} \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_{Eff}^* (t_{exp}) \cdot t_{exp}}} \right]$$

Term A (x, D_{Eff}^*, t_{exp})
 → dimensionslos [-]
 → normiert $0 \leq A \leq 1$
 → unabhängig von der Ausgangschloridkonzentration, hier C_{Sa}

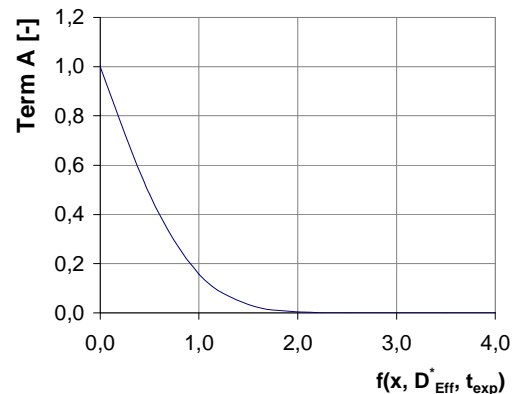


Bild B 4: Eigenschaften von Term A

Wenn im Folgenden von der Steigung gesprochen wird, ist in diesem Zusammenhang stets der Betrag der Steigung gemeint, welche hier näherungsweise durch den Vorwärtsdifferenzquotienten berechnet wird. Ferner wird ausschließlich die Steigung in der Tiefenlage betrachtet, in welcher die Ausgangschloridkonzentration C_{Sa} angesetzt wird. Für den hier betrachteten Modellansatz [I] entspricht dies der Tiefenlage $x^* = 0$. Die dort berechnete Steigung wird als oberflächennahe Steigung bezeichnet und durch $|S_{x=0}|$ kenntlich gemacht, vgl. **Gleichung B 1**.

$$|S_{x=0}| = \left| \frac{dC(x, t_{\text{exp}})}{dx} \right| \sim \frac{|C(x^* + \Delta\bar{x}, t_{\text{exp}}) - C(x^*, t_{\text{exp}})|}{\Delta\bar{x}}$$

Gleichung B 1

- $|S_{x=0}|$: Betrag der oberflächennahen Steigung des Chloridprofils nach einer Expositionsdauer t_{exp} [(M.-%/z)/mm] wird hier nur als oberflächennahe Steigung bezeichnet
- $C(x, t_{\text{exp}})$: Chloridkonzentration in der Tiefenlage x nach einer Expositionsdauer t_{exp} [M.-%/z]
- $C((x^* + \Delta\bar{x}), t_{\text{exp}})$: Chloridkonzentration in der Tiefenlage $(x^* + \Delta\bar{x})$ nach einer Expositionsdauer t_{exp} [M.-%/z]
- x^* : Tiefenlage, in welcher die Ausgangschloridkonzentration ansteht [mm], gemäß Modellansatz hier $x^* = 0$ mm
- $\Delta\bar{x}$: Inkrement der Tiefenlage x [mm], in den folgenden Berechnungen mit 1 mm angesetzt

Die gemäß **Gleichung B 1** definierte oberflächennahe Steigung $|S_{x=0}|$ ist für einen Zeitpunkt t_{exp} vom effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten und von der Ausgangschloridkonzentration abhängig. Da der Term A und damit der effektive Chloriddiffusionskoeffizient unabhängig von C_{Sa} ist, muss für Vergleichszwecke dieser Einfluss durch eine Normierung eliminiert werden, vgl. **Gleichung B 2**.

$$\underline{|S_{x=0}|} = \frac{|S_{x=0}|}{C_{\text{Sa}}}$$

Gleichung B 2

- $\underline{|S_{x=0}|}$ Betrag der oberflächennahen normierten Steigung des Chloridprofils nach einer Expositionsdauer t_{exp} [mm⁻¹] wird hier nur als normierte oberflächennahe Steigung bezeichnet
- $C_{\text{Sa}} (x^* = 0)$: hier als Ausgangschloridkonzentration bezeichnet [M.-%/z]

Die Notwendigkeit, die oberflächennahe Steigung zu normieren, ergibt sich wenn Chloridprofile mit unterschiedlichen Ausgangschloridkonzentrationen zu vergleichen sind. Nur durch die Normierung kann das umgekehrt proportionale Verhältnis von effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten zu oberflächennaher Steigung abgebildet werden, wie das folgende Beispiel verdeutlicht.

Ausgehend von einem „Ausgangsprofil“ wurden Chloridkonzentrationen oberflächennah erhöht, hier über eine Tiefenlage von rd. 10 mm, siehe Vorgehen (1) in **Bild B 5**. Daraus ergibt sich eine Erhöhung der oberflächennahen Steigung $|S_{x=0}|$, hier von $7,5 \rightarrow 8,4 \cdot 10^{-2}$ [(M.-%/z)/mm], wobei der effektive Chloriddiffusionskoeffizient von 2,6 auf $2,4 \cdot 10^{-12}$ [m²/s] abfällt. Durch eine Erhöhung der Chloridkonzentrationen über eine größere Tiefenlage (hier über rd. 20 mm, vgl. Vorgehen (2) in **Bild B 5**) ergeben sich ebenfalls größere oberflächennahe Steigungen im Vergleich zum Ausgangsprofil, vgl. $7,5 \rightarrow 9,2 \cdot 10^{-2}$ [(M.-%/z)/mm]. Der effektive Chloriddiffusionskoeffizient steigt jedoch auch von 2,6 auf $2,7 \cdot 10^{-12}$ [m²/s]. Wird die normierte oberflächennahe Steigung $\underline{|S_{x=0}|}$ betrachtet, so kann das umgekehrt proportionale Verhältnis des Diffusionskoeffizienten zur Steigung wieder abgebildet werden.

	$ S_{x=0} $	D^*_{Eff}	$ S_{x=0} $
(2)	9,2	2,7	6,1
(1)	8,4	2,4	6,5
Ausgangs-chloridprofil	7,5	2,6	6,2

$|S_{x=0}|$ in 10^{-2} [(M.-%/z)/mm]

D^*_{Eff} in 10^{-12} [m²/s]

$|S_{x=0}|$ in 10^{-2} [1/mm]

Chloridkonzentration [M.-%/z]

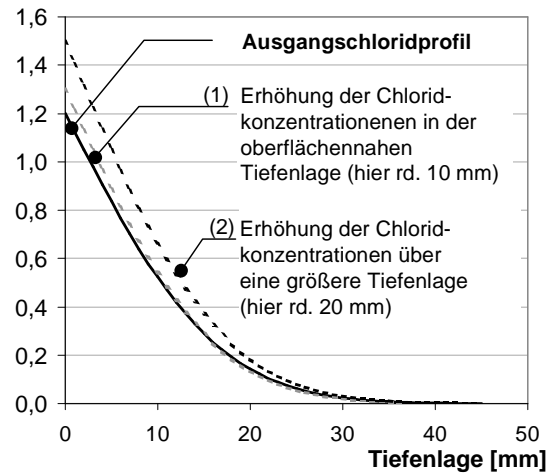


Bild B 5: Umgekehrt proportionaler Zusammenhang zwischen dem effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten D^*_{Eff} und der normierten oberflächennahen Steigung $|S_{x=0}|$

B-5: Einfluss des Tiefenbereichs Δx gemäß dem Modell nach Gehlen auf den aus Chloridprofilen durch Kurvenfitting bestimmten effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten

Wird der Tiefenbereich Δx mit Chloridkonzentrationen, welche sich nicht mit dem Diffusionsansatz beschreiben lassen, durch die Transformation der x-Achse eliminiert (vgl. Ansatz [II] in **Bild 15**), so beeinflusst dies den durch Kurvenfitting bestimmten effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten. Um einen qualitativen Eindruck der daraus resultierenden Abweichungen zu einem effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten, welcher ohne Transformation der x-Achse bestimmt wurde (vgl. Ansatz [I] in **Bild 15**), zu erhalten, wurden Parameterstudien durchgeführt. Im Rahmen dieser Parameterstudien wurden die folgenden, durch Kurvenfitting von Chloridprofilen bestimmten effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten verglichen:

- aus dem Ausgangsprofil ohne Tiefenbereich Δx abgeleiteter effektiver Chloriddiffusionskoeffizient
→ $D_{\text{Eff}}^{\text{ohne } \Delta x}$
- aus dem Ausgangsprofil mit Tiefenbereich Δx abgeleiteter effektiver Chloriddiffusionskoeffizient
→ $D_{\text{Eff}}^{\text{mit } \Delta x}$

Dafür wurden zunächst fiktive Ausgangschloridprofile ohne Tiefenbereich Δx berechnet (vgl. **Gleichung C 16** in **Anhang C-4**). Der dabei angesetzte effektive Chloriddiffusionskoeffizient entspricht $D_{\text{Eff}}^{\text{ohne } \Delta x}$. Bei den Ausgangschloridprofilen wurden unterschiedliche Expositionsdauern und Bindemittelkombinationen (CEM I und CEM I + SFA mit w/z ~ 0,5) berücksichtigt. Anschließend wurde mit diesen Ausgangschloridprofilen unter Annahme eines Tiefenbereichs $\Delta x = 9 \text{ mm}$ bzw. $\Delta x = 5 \text{ mm}$ ein Kurvenfitting durchgeführt, woraus sich der effektive Chloriddiffusionskoeffizient $D_{\text{Eff}}^{\text{mit } \Delta x}$ ergab. Die Abweichung dieser beiden effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten wird durch den Verhältniswert $V_{D(\Delta x)} = D_{\text{Eff}}^{\text{mit } \Delta x} / D_{\text{Eff}}^{\text{ohne } \Delta x}$ abgebildet. Das beschriebene Vorgehen ist in **Bild B 6** zusammengefasst.

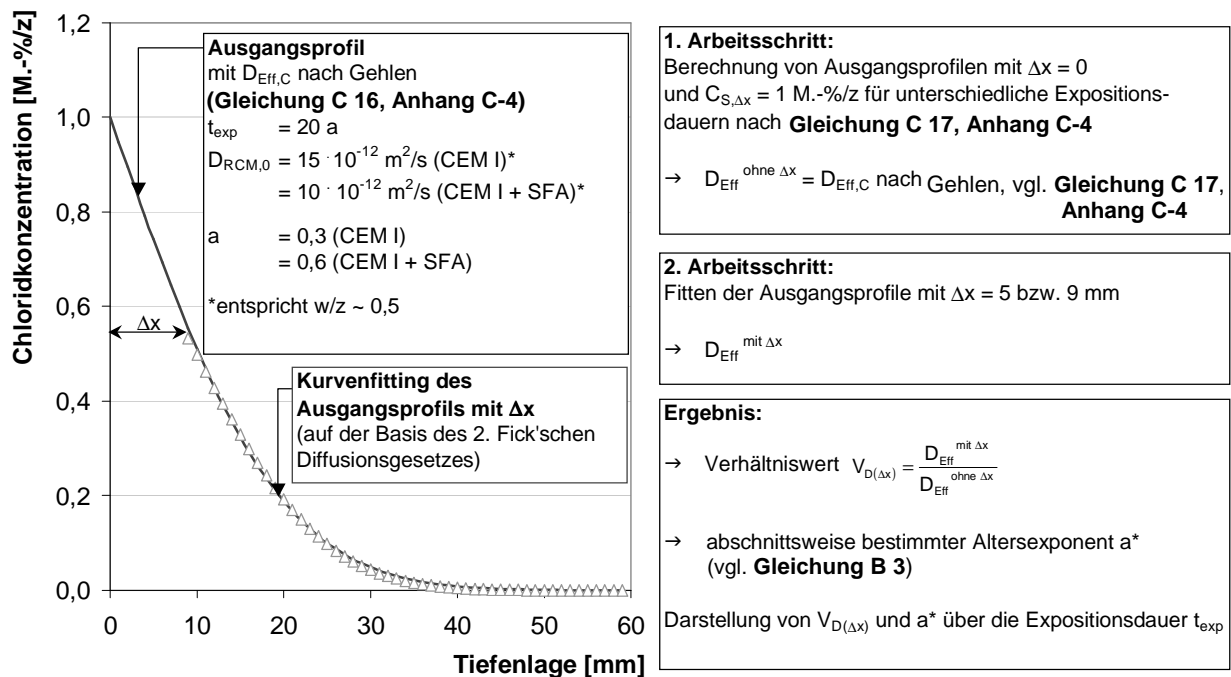


Bild B 6: Vorgehen zur Erkundung des qualitativen Einflusses von Δx auf die durch Kurvenfitting bestimmten effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten

Die durchgeführten rechnerischen Untersuchungen zeigen, dass der Verhältniswert der Diffusionskoeffizienten $V_{D(\Delta x)}$ stets kleiner eins ist. Dies bedeutet, dass der effektive Chloriddiffusionskoeffizient $D_{\text{Eff}}^{\text{ohne } \Delta x}$ stets größer als der gefittete effektive Chloriddiffusionskoeffizient $D_{\text{Eff}}^{\text{mit } \Delta x}$ ist, vgl. Bild B 7. Der Unterschied zwischen beiden effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten wächst erwartungsgemäß mit größer werdendem Tiefenbereich Δx ($V_{D(\Delta x)}$ wird kleiner). Mit zunehmender Expositionsdauer nimmt der Unterschied ab. Für einen CEM I-Beton mit einem Tiefenbereich von $\Delta x = 5 \text{ mm}$ ergibt sich ab einer Expositionsdauer von rd. 30 Jahren für $D_{\text{Eff}}^{\text{mit } \Delta x}$ ein rd. 10 % geringerer Wert als für $D_{\text{Eff}}^{\text{ohne } \Delta x}$ ($V_{D(\Delta x)} = 0,9$).

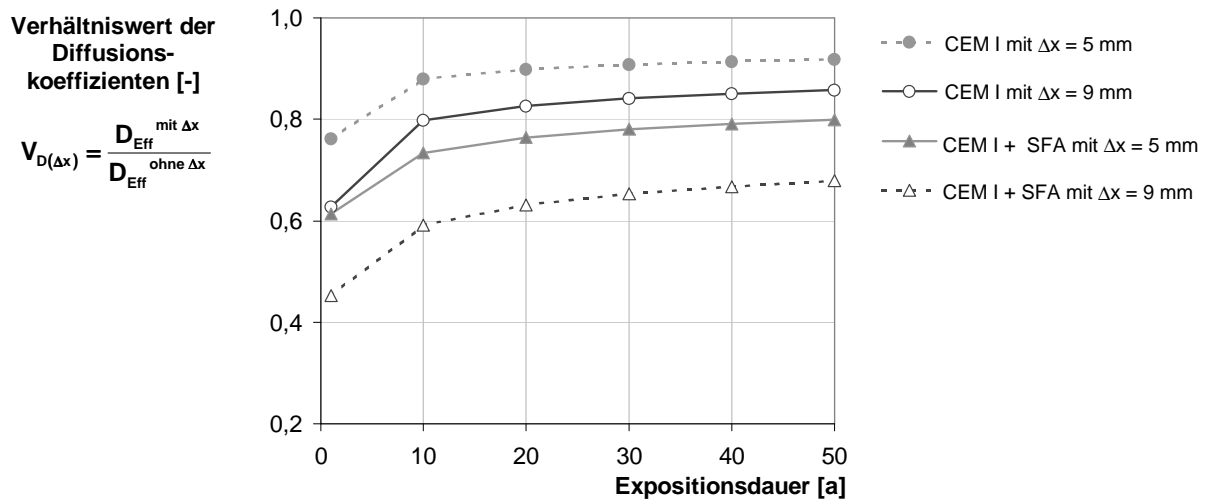


Bild B 7: Verhältniswert der effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten $V_{D(\Delta x)}$ über die Expositionsdauer

Des Weiteren wird deutlich, dass auch der Widerstand des Betons gegenüber Chlorideindringen den Verhältniswert beeinflusst. So ergibt sich unter Berücksichtigung eines identischen Tiefenbereichs Δx beim Beton mit Flugasche (CEM I + SFA) ein deutlich geringerer Verhältniswert $V_{D(\Delta x)}$ als beim CEM I-Beton, dessen Chlorideindringwiderstand geringer ist. Da jedoch bei Betonen mit hohem Chlorideindringwiderstand sich bedingt durch die geringe Kapillarporosität kleine Tiefenbereiche Δx ausbilden (vgl. [78]), kommt dieser in der Parameterstudie gezeigte Einfluss unter Praxisbedingungen nicht in dem gezeigten Umfang zum Tragen ($V_{D(\Delta x)} \sim 0,6$ für CEM I + SFA mit $\Delta x = 9$ mm).

Eine Auswertung von Chloridprofilen von Betonprobekörpern mit unterschiedlichen Rezepturen, welche bis zu 4,5 Jahren entlang einer schwedischen Straße ausgelagert waren ([78]), zeigte, dass der Unterschied zwischen den beiden effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten mit zunehmender Kapillarporosität des Betons (CEM I + 5 % SF \mapsto CEM I (w/z = 0,4) \mapsto CEM I (w/z = 0,75)) zunimmt. Das bedeutet, dass der infolge zunehmender Kapillarporosität größer werdende Tiefenbereich Δx den effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten stärker beeinflusst als der damit verbundene geringere Widerstand des Betons gegenüber Chlorideindringen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Unterschied zwischen $D_{\text{Eff}}^{\text{ohne } \Delta x}$ und $D_{\text{Eff}}^{\text{mit } \Delta x}$ mit größer werdendem Tiefenbereich Δx und steileren Chloridprofilen größer wird, vgl.

Tabelle B 2.

Tabelle B 2: Einfluss auf den Unterschied zwischen $D_{\text{Eff}}^{\text{ohne } \Delta x}$ und $D_{\text{Eff}}^{\text{mit } \Delta x}$

Entwicklung des Chloridprofils		sich daraus ergebener Unterschied zwischen $D_{\text{Eff}}^{\text{ohne } \Delta x}$ und $D_{\text{Eff}}^{\text{mit } \Delta x}$
Größer werdender Tiefenbereich Δx	$\Delta x \uparrow$	wird größer, was sich durch kleiner werdende Verhältnismerte $V_{D(\Delta x)}$ ausdrückt, vgl. Bild B 7 .
Steiler werdendes Chloridprofil	$D_{\text{RCM}} \downarrow$	
	$a \uparrow$	
	$t \downarrow$	

Der über die Zeit nicht konstante Verlauf des Verhältnismerte $V_{D(\Delta x)}$ (vgl. **Bild B 7**) zeigt, dass auch der rechnerisch ermittelte Altersexponent auf der Basis der $D_{\text{Eff}}^{\text{mit } \Delta x}$ -Werte sich von dem der $D_{\text{Eff}}^{\text{ohne } \Delta x}$ -Werte unterscheidet. Zur Verdeutlichung des Einflusses von Δx auf den altersabhängigen Verlauf des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten wurde für die $D_{\text{Eff}}^{\text{mit } \Delta x}$ -Werte des Weiteren der Altersexponent entsprechend **Gleichung B 3** abschnittsweise bestimmt.

$$a^* = \frac{\log_{10}(D_{\text{Eff}}^*(t_{\text{exp},2})) - \log_{10}(D_{\text{Eff}}^*(t_{\text{exp},1}))}{\log_{10}(t_{\text{exp},1}) - \log_{10}(t_{\text{exp},2})} \quad \text{Gleichung B 3}$$

- a^* : abschnittsweise bestimmter Altersexponent zur Berücksichtigung der Zeitabhängigkeit von D_{Eff}^* in der Zeitspanne $t_{\text{exp},1}$ bis $t_{\text{exp},2}$ [-]
- $D_{\text{Eff}}^*(t_{\text{exp},1})$: effektiver Chloriddiffusionskoeffizient von Beton nach einer Expositionsdauer $t_{\text{exp},1}$ [mm²/a]
- $D_{\text{Eff}}^*(t_{\text{exp},2})$: effektiver Chloriddiffusionskoeffizient von Beton nach einer Expositionsdauer $t_{\text{exp},2}$ [mm²/a]
- $t_{\text{exp},1}$: Expositionsdauer $t_{\text{exp},1}$ [a]
- $t_{\text{exp},2}$: Expositionsdauer $t_{\text{exp},2}$ [a]

Der nach **Gleichung B 3** abschnittsweise bestimmte Altersexponent a^* auf Basis der $D_{\text{Eff}}^{\text{ohne } \Delta x}$ -Werte entspricht hierbei definitionsgemäß dem Altersexponent a nach Gehlen, welcher konstant über die Expositionsdauer ist ($a = 0,3$ für CEM I und $a = 0,6$ für CEM I + SFA, vgl. [49]). Für den effektiven Diffusionskoeffizienten $D_{\text{Eff}}^{\text{mit } \Delta x}$ ist a^* hingegen altersabhängig. Die rechnerisch ermittelte Altersexponent a^* wird mit zunehmender Expositionsdauer größer, ist dabei jedoch stets kleiner als der entsprechende Altersexponent a , vgl. **Bild B 8**.

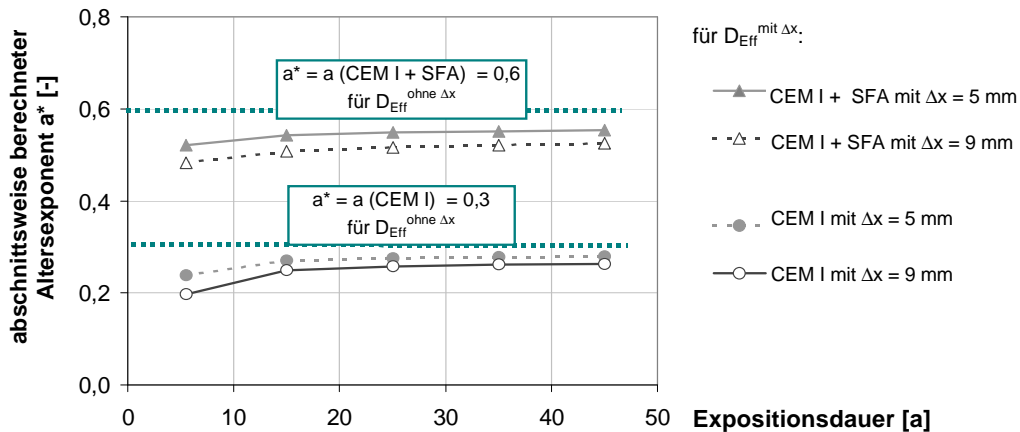


Bild B 8: Abschnittsweise bestimmter Altersexponent a^* über die Expositionsdauer

Die Erklärung für die systematisch niedrigeren effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten $D_{\text{Eff}}^{\text{mit } \Delta x}$ im Vergleich zu den jeweiligen $D_{\text{Eff}}^{\text{ohne } \Delta x}$ -Werten ist der durch die Transformation der x-Achse bedingte überproportionale Abfall der Ausgangschloridkonzentration im Verhältnis zur oberflächennahen Steigung im Ausgangspunkt. Der Ausgangspunkt x^* variiert je nach Ansatz, $x^* = 0$ für $D_{\text{Eff}}^{\text{ohne } \Delta x}$ (Ansatz [I]) und $x^* = \Delta x$ für $D_{\text{Eff}}^{\text{mit } \Delta x}$ (Ansatz [II]), vgl. **Bild B 9**. Durch die Transformation der x-Achse reduziert sich die Steigung des Profils im jeweiligen Ausgangspunkt (von $|S_{x=x^*}|$ von 2,2 auf $2,0 \cdot 10^{-2}$ [(M.-%/z)/mm]). Die normierte oberflächennahe Steigung steigt jedoch infolge der überproportional reduzierten Ausgangschloridkonzentration (hier von C_{Sa} auf $C_{\text{S},\Delta x}$), vgl. $|S_{x=x^*}|$ von 1,5 auf $1,7 \cdot 10^{-2}$ [1/mm]. Da sich der effektive Chloriddiffusionskoeffizient umgekehrt proportional zur normierten oberflächennahen Steigung verhält, zieht die Transformation der x-Achse einen geringeren effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten für $D_{\text{Eff}}^{\text{mit } \Delta x}$ nach sich.

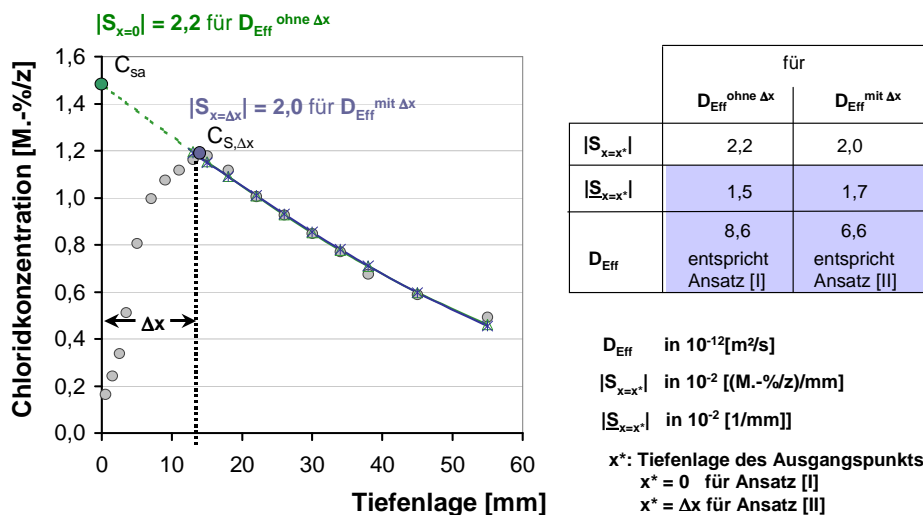


Bild B 9: Steigungsbetrachtung an den gefitteten Chloridprofilen gemäß beider Ansätze

ANHANG C

BERECHNUNGSGLEICHUNGEN DER VERWENDETEN MODELLE ZUR BESCHREIBUNG VON CHLORIDEINDRINGEN IN BETON

C-1: AiF (Straßenexposition)

C-2: Ungricht (Straßenexposition)

C-3: Lay (Straßenexposition)

C-4: Gehlen (Meerwasserexposition)

C-1: AiF

Modell zur Beschreibung des Eindringens von Chlorid in Beton von Verkehrsbauwerken nach [112].

Anfangsbedingung: $C(x,t) = 0$ für $x > 0$ und $t = 0$
 Randbedingung: $C(x,t) = c_s$ für $x = 0$ und $t > 0$

$$C(x,t) = (C_{S,\Delta x} - C_{ini}) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x - \Delta x}{2 \cdot \sqrt{D_{app}(t) \cdot t_{exp}}} \right) \right] + C_{ini} \quad \text{Gleichung C 1}$$

$C(x,t)$: Gesamtchloridgehalt im Beton zum Alter t in einem Abstand zur Betonoberfläche x [M.-%/z]
 $C_{S,\Delta x}$: Chloridkonzentration in der Tiefe Δx in Abhängigkeit der anstehenden Chlorideinwirkung [M.-%/z], Mittelwert nach **Gleichung C 2** für CEM I-Beton

$$\text{mean } C_s(a, h) = \left[0,465 - 0,051 \cdot \ln(a + 1) - (0,00065 \cdot (a + 1)^{-0,187}) \cdot h \right] \cdot \left(\frac{M_{\text{Beton}}}{M_{\text{Zement}}} \right) \quad \text{Gleichung C 2}$$

h : Höhe über Fahrbahnoberkante [cm]
 a : horizontaler Abstand zum Fahrbahnrand [cm]
 $M_{\text{Beton}}/M_{\text{Zement}}$: Massenverhältnis [-]

C_{ini} : Grundchloridgehalt, eingebracht durch Ausgangsstoffe [M.-%/z]
 x : Tiefenlage, ausgehend von der Betonoberfläche [mm]
 Δx : Tiefenbereich, der, durch ggf. intermittierende Chlorideinwirkung bedingt, vom Fick'schen Verhalten abweichende Chloridkonzentrationen zeigt [mm]
 t : Betonalter [a]
 t_{exp} : Expositionszeit [a]
 erf : Gauss'sche Fehlerfunktion, auch Errorfunktion, vgl. **Gleichung 4**, Seite 18
 $D_{app}(t)$: scheinbarer Chloriddiffusionskoeffizient von Beton [mm^2/a]

$$D_{app}(t) = \frac{\left[\frac{D_{RCM,t=28d} - D_{RCM,t=\infty}}{(1 - \alpha - \beta)} \cdot \left(\left(\frac{t_0}{t} \right)^{(\alpha + \beta)} \cdot t - t_0 \right) + \frac{D_{RCM,\infty}}{(1 - \beta)} \cdot \left(\left(\frac{t_0}{t} \right)^\beta \cdot t - t_0 \right) \right]}{t - t_0} \cdot k_t \cdot k_T \cdot k_{RH} \quad \text{Gleichung C 3}$$

$D_{RCM,t=28d}$: Chloridmigrationskoeffizient zum Alter von $t = 28$ Tagen [mm^2/a]
 $D_{RCM,t=\infty}$: Chloridmigrationskoeffizient im unendlichen Alter [mm^2/a]
 t_0 : Referenzalter, hier 28 Tage [a]
 α : hydrationsbedingter Altersexponent [-]
 β : Altersexponent zur Berücksichtigung von Nass-Trocken-Wechseln und weitere Einflüsse aus der Umwelt [-]
 k_T : Übertragungsparameter, um Abweichungen zwischen Chloridmigrationskoeffizienten, die unter beschleunigten Bedingungen (Rapid Chloride Migration - D_{RCM}) ermittelt werden, und dem effektiven Diffusionskoeffizienten, die im Labor durch Einlagerungsversuche bestimmt werden, zu berücksichtigen [-]
 k_t : Parameter zur Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit [-]
 k_{RH} : Parameter zur Berücksichtigung der Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte [-]

C-2: Ungericht

Modell zur Beschreibung des Eindringens von Chlorid in Beton von Verkehrsbauwerken nach [148].

Anfangsbedingung: $C(x,t) = C_K$ für $0 < x < h$ und
 $C(x,t) = 0$ für $x > h$ für $t = 0$

$$C(x,t) = \frac{C_K}{2} \cdot \left[\operatorname{erf}\left(\frac{h-x}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t}}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{h+x}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t}}\right) \right]$$

Gleichung C 4

- $C(x,t)$: Chloridkonzentration in der Tiefe x zum Zeitpunkt t [M.-%/z]
 C_K : Chloridkonzentration aus dem Kapillartransport [M.-%/z]
 D : effektiver Chloriddiffusionskoeffizient von Chlorid in Beton [mm^2/a]
hier: gewählt auf der Basis des im Alter von 360 Tagen bestimmten Chloridmigrationskoeffizienten
 h : mittlere Tiefe des konvektiven Chlorideintrags aus der Winterphase
(mittlere kapillare Eindringtiefe) [mm], hier: 10 mm, vgl. [148]
 x : Tiefe, mit einem korrespondierenden Chloridgehalt $C(x,t)$
 t : Zeit [a]
erf: Gauss'sche Fehlerfunktion, auch Errorfunktion, vgl. **Gleichung 4**, Seite 18

C-3: Lay

Modell zur Beschreibung des Eindringens von Chlorid in Beton von Verkehrsbauwerken nach [72].

Anfangsbedingung: $C(x,t) = 0$ für $x > 0$ für $t = 0$
 Randbedingung: $C(x,t) = c_s$ für $x = 0$ für $t > 0$

$$C(x,t) = \frac{c_s - c_i}{2} \cdot \left[\left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{(x - v(t) \cdot t)}{2 \cdot \sqrt{D_L(t) \cdot t}} \right) \right) + \exp \left(\frac{v(t) \cdot x}{D_L(t)} \right) \cdot \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{(x + v(t) \cdot t)}{2 \cdot \sqrt{D_L(t) \cdot t}} \right) \right) \right] + c_i \quad \text{Gleichung C 5}$$

$C(x,t)$: Gesamtchloridgehalt im Beton zum Alter t in einem Abstand zur Betonoberfläche x [M.-%/z]
 x : Tiefenlage, ausgehend von der Betonoberfläche [mm]
 t : Betonalter [a]
 c_s : Chloridkonzentration an der Betonoberfläche ($x = 0$) [M.-%/z], siehe **Gleichung C 6**
 c_i : Grundchloridgehalt des Betons [M.-%/z]
 erf : Gauss'sche Fehlerfunktion, auch Errorfunktion, vgl. **Gleichung 4**, Seite 18
 $v(t)$: mittlere Konvektionsgeschwindigkeit von Chlorid zum Zeitpunkt t [mm/a], siehe **Gleichung C 7**
 $D_L(t)$: longitudinaler, hydrodynamischer Dispersionskoeffizient zum Zeitpunkt t [mm²/a], siehe **Gleichung C 9**

$$c_s = \left[(c_s - c_i) \cdot \left(1 - \frac{\sqrt{a^2 + h^2}}{r_{c,max}} \right) + c \right] \cdot \varepsilon_{c_s} \quad \text{Gleichung C 6}$$

a : horizontaler Abstand zum Fahrbahnrand [m]
 h : Höhe über Fahrbahnoberkante [m]
 $r_{c,max}$: Entfernung, ab der die Oberflächenkonzentration gleich dem Grundchloridgehalt c_i ist [m]
 ε_{c_s} : Streufaktor für die Oberflächenkonzentration [-]

$$v(t) = \frac{v_0 \cdot \left(t \cdot \left(\frac{t_0}{t} \right)^{n_v} - t_0 \right)}{(t - t_0) \cdot (1 - n_v)} \cdot \left(1 - \frac{\sqrt{a^2 + h^2}}{r_{max}} \right) \cdot \varepsilon_v \cdot k_{v(w/b)} \quad \text{Gleichung C 7}$$

v_0 : mittlere Konvektionsgeschwindigkeit zum Referenzzeitpunkt t_0 [mm/a]
 n_v : Altersexponent für die mittlere Konvektionsgeschwindigkeit [-]
 r_{max} : Entfernung zur Straße, ab welcher keine Konvektion mehr stattfindet [m]

- ε_v : Streuungsfaktor für die Konvektionsgeschwindigkeit [-]
 a : Höhe über Fahrbahn [m]
 h : horizontaler Abstand von der Fahrbahnaußenkante [m]
 $k_{v(w/b)}$: Übertragungsvariable zur Berücksichtigung der Abhängigkeit des w/b -Wertes auf die Konvektionsgeschwindigkeit in Bezug auf einen Referenzbeton (CEM I, $w/b = 0,50$) [-], siehe **Gleichung C 8**

$$k_{v(w/b)} = \left[\frac{(w/b - w/b_{\text{grenz}})^{\frac{1}{4}} \cdot \left(1 + 4 \cdot \frac{w/b}{3}\right)^{a_{v(w/b)}}}{(0,5 - w/b_{\text{grenz}})^{\frac{1}{4}} \cdot \left(1 + 4 \cdot \frac{0,5}{3}\right)} \right] \cdot \varepsilon_{v(w/b)} \quad \text{Gleichung C 8}$$

- w/b_{Grenz} : Wasser-Bindemittel-Verhältnis, ab welchem Kapillarporen entstehen [-]
 $a_{v(w/b)}$: Regressionsvariable zur Berücksichtigung der Abhängigkeit des Bindens von der Sauggeschwindigkeit und der Tortuosität vom w/b -Wert [-]

$$D_L(t) = D_{\text{app}}(t) + D_M(t) \quad \text{Gleichung C 9}$$

- $D_{\text{app}}(t)$: scheinbarer Diffusionskoeffizient für Chlorid [mm^2/a], siehe **Gleichung C 10**

$$D_{\text{app}}(t) = \left[\frac{D_{\text{RCM},0} - D_{\text{RCM},\infty}}{(t - t_0) \cdot (1 - n_D)} \cdot \left(\left(\frac{t_0}{t} \right)^{n_D} \cdot t - t_0 \right) + D_{\text{RCM},\infty} \right] \cdot k_t \cdot k_w \cdot k_{D(w/b)} \quad \text{Gleichung C 10}$$

- $D_{\text{RCM},0}$: Chloridmigrationskoeffizient nach RCM-Methode zum Referenzalter t_0 [mm^2/a]
 $D_{\text{RCM},\infty}$: Chloridmigrationskoeffizient nach RCM-Methode nach Hydratationsende [mm^2/a]
 t_0 : Referenzalter [a]
 n_D : hydratationsbedingter Altersexponent für den scheinbaren Diffusionskoeffizienten [-]
 k_t : Testmethodenfaktor [-]
 k_w : Wassersättigungsfaktor des scheinbaren Diffusionskoeffizienten ($0 \leq k_w \leq 1$) [-], siehe **Gleichung C 11**

$$k_w = \frac{D_{\text{app}}(w)}{D_{\text{RCM}}^*(w = 100\%)} = w^{a_w} \quad \text{Gleichung C 11}$$

- $D_{\text{app}}(w)$: scheinbarer Diffusionskoeffizient bei Wassersättigungsgrad w [mm^2/a]
 $D_{\text{RCM}}^*(w = 100\%)$: Dispersionsbereinigter Chloridmigrationkoeffizient [mm^2/a]
 w : Wassersättigungsgrad des Betons [-]
 a_w : Regressionsvariable, hier $a_w = 3,2$ [-]

$k_{D(w/b)}$: Faktor zur Berücksichtigung einer Veränderung des Wasser-Bindemittel-Verhältnisses in Bezug auf den Referenzwert von $w/b = 0,45$ [-], siehe **Gleichung C 12**

$$k_{D(w/b)} = \frac{1 + \frac{1}{0,45^{a_{w/b}}}}{1 + \frac{1}{(w/b)^{a_{w/b}}}} \cdot \varepsilon_{D(w/b)} \quad \text{Gleichung C 12}$$

$a_{D(w/b)}$: Maß für die Empfindlichkeit der Tortuosität auf eine Änderung von w/b [-]

$\varepsilon_{D(w/b)}$: Streuungsfaktor der Variablen $k_{D(w/b)}$ [-]

$D_M(t)$: mechanischer Dispersionskoeffizient [mm^2/a], siehe **Gleichung C 13**

$$D_M(t) = \Delta l(w/b) \cdot v(t) \quad \text{Gleichung C 13}$$

$\Delta l(w/b)$: Dispersivität in [mm], in Abhängigkeit des w/b -Wertes siehe **Gleichung C 14** bzw. **Gleichung C 15**

$$\Delta l(w/b > 0,4) = a_{\Delta l(w/b)} + b_{\Delta l(w/b)} \cdot (w/b - 0,4) \quad \text{Gleichung C 14}$$

$$\Delta l(w/b \leq 0,4) = a_{\Delta l(w/b)} \quad \text{Gleichung C 15}$$

$a_{\Delta l(w/b)}$: Regressionsvariable zur Berücksichtigung des w/b -Wertes auf die Dispersivität [-]

$b_{\Delta l(w/b)}$: Regressionsvariable zur Berücksichtigung des w/b -Wertes auf die Dispersivität [-]

$v(t)$: Konvektionsgeschwindigkeit von Chlorid zum Zeitpunkt t [mm/a], siehe **Gleichung C 15**

C-4: Gehlen

Modell zur Beschreibung des Eindringens von Chlorid in Beton von Meeresbauwerken nach [49].

Anfangsbedingung: $C(x,t) = 0$ für $x > 0$ und $t = 0$
 Randbedingung: $C(x,t) = C_{S,\Delta x}$ für $x = \Delta x$ und $t > 0$

$$C(x,t) = C_{S,\Delta x} \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x - \Delta x}{2 \cdot \sqrt{D_{\text{Eff,C}}(t) \cdot t}} \right]$$

Gleichung C 16

$C(x,t)$: Chloridkonzentration in der Tiefe x zum Beobachtungszeitpunkt t [M.-%/z]

$C_{S,\Delta x}$: Chloridkonzentration in der Tiefe Δx in Abhängigkeit von der anstehenden Chlorideinwirkung, auch Ersatzoberflächenkonzentration [M.-%/z]

x : Tiefenlage, ausgehend von der Betonoberfläche [mm]

Δx : Tiefenbereich, der, durch ggf. intermittierende Chlorideinwirkung bedingt, vom Fick'schen Diffusionsgesetz abweichende Chloridkonzentrationen zeigt [mm]

t : Beobachtungszeitpunkt [a],
entspricht hier dem Betonalter und näherungsweise dem Auslagerungszeitraum

erf: Gauss'sche Fehlerfunktion, auch Errorfunktion, vgl. **Gleichung 4**, Seite 18

$D_{\text{Eff,C}}(t)$: Effektiver Chloriddiffusionskoeffizient von Beton zum Beobachtungszeitpunkt t [mm²/a]

$$D_{\text{Eff,C}}(t) = k_e \cdot D_{\text{RCM,0}} \cdot k_t \cdot A(t)$$

Gleichung C 17

$D_{\text{RCM,0}}$: Chloridmigrationskoeffizient nach RCM (Rapid Chloride Migration)-Methode von wassergesättigtem Beton an definiert hergestellten und vorgelagerten Probekörpern im Alter von 28d [m²/s]

k_t : Übertragungsparameter, um Abweichungen zwischen Chloridmigrationskoeffizienten, die unter beschleunigten Bedingungen (Rapid Chloride Migration – $D_{\text{RCM,0}}$) ermittelt werden, und Diffusionskoeffizienten, die unter natürlichen Bedingungen z. B. im Labor bestimmt werden (Chloride Profiling Method – $D_{\text{CPM,0}}$), berücksichtigen zu können [-]

k_e : Variable zur Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten [-]

$$k_e = \exp \left(b_e \left(\frac{1}{T_{\text{ref}}} - \frac{1}{T_{\text{IST}}} \right) \right)$$

Gleichung C 18

b_e : Regressionsparameter [K]

T_{Ref} : Referenztemperatur [K]

T_{IST} : Temperatur der Umgebungsluft bzw. Bauteiltemperatur [K]

$A(t)$: Altersterm des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten [-]

$$A(t) = \left(\frac{t_0}{t} \right)^a$$

Gleichung C 19

a : Exponent zur Berücksichtigung der Zeitabhängigkeit von $D_{\text{Eff,C}}(t)$, Altersexponent [-]

t_0 : Referenzzeitpunkt [a]

ANHANG D

EXPOSITIONSUNABHÄNGIGE EINFLÜSSE AUF DEN EFFEKTIVEN CHLORIDDIFFUSIONSKOEFFIZIENTEN

D-1: Genauigkeit der Untersuchungsmethode

D-2: Schrittweite bei der Bohrmehlentnahme

D-3: Zementsteinanreicherung

D-1: Genauigkeit der Untersuchungsmethode zur Bestimmung der Chloridkonzentration

Das tiefenabhängig am Bauwerk gezogene Bohrmehl wird im Labor hinsichtlich der Chloridkonzentration untersucht. Das dafür gebräuchlichste Verfahren ist die Tritation [TR9][129]. Die Präzision der potenziometrischen Titration wurde im Rahmen von Ringversuchen untersucht [19]. Die durch die Analysegenauigkeit bedingte Streuung lag hierbei für hohe Chloridkonzentrationen bei rd. 1 % und für geringe Chloridkonzentrationen bei rd. 10 %. Für einen ersten Eindruck dieses Einflusses wurde unter der Annahme, dass die Ungenauigkeit der höheren oberflächennahen Chloridkonzentrationen bei rd. + 1 % und bei den niedrigeren Chloridkonzentrationen bei rd. - 10 % liegt, ergibt sich für das exemplarisch gezeigte Beispiel eine Abweichung von rd. - 7 %, vgl. **Bild D 1**.

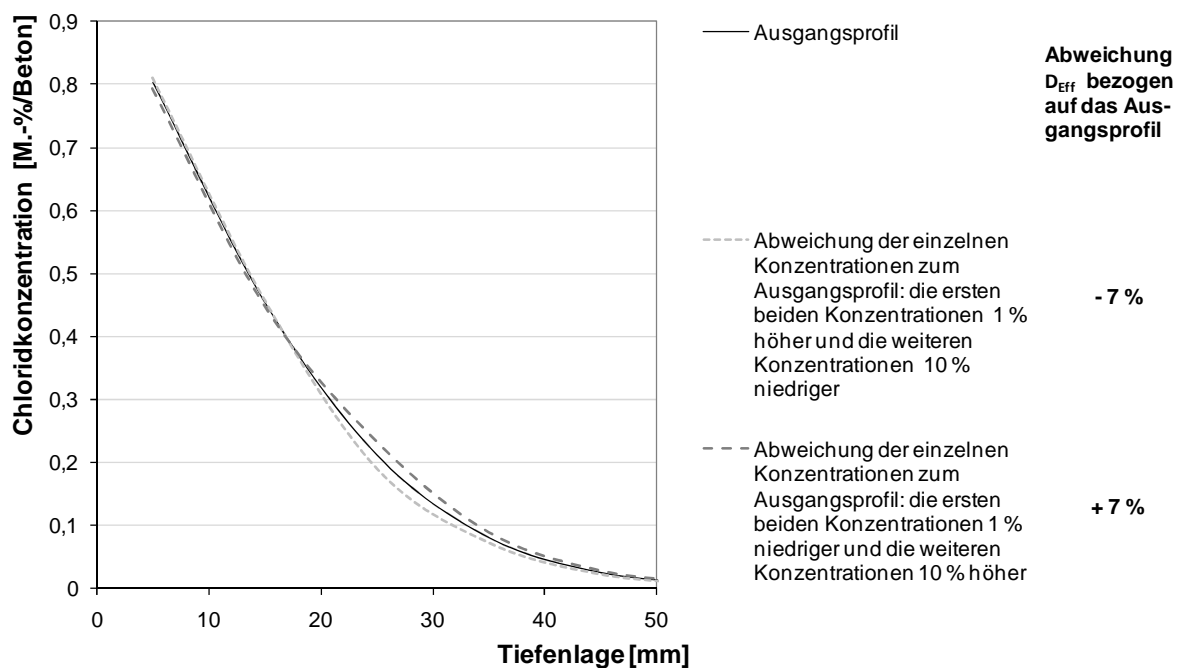


Bild D 1: Einfluss von Streuungen von Chloridkonzentrationen auf den aus Chloridprofilen abgeleiteten effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten

Durch das gewählte Vorgehen (keine zufällige Streuung über die Tiefenlage) ergeben sich verhältnismäßig hohe Abweichungen. Die unter Praxisbedingungen vorhandene Streuung der analysierten Chloridmenge je Tiefenlage wird des Weiteren durch die Inhomogenität des Betons beeinflusst, welche bei dieser Betrachtung nicht berücksichtigt wurde, vgl. hierzu auch die Betrachtungen einer Zementsteinanreicherung im Bereich der Bauteiloberfläche im **Anhang D-3**.

D-2: Schrittweite bei der Bohrmehlentnahme

Um die Analysekosten zu minimieren, wird die Anzahl der Bohrmehlproben zur Erstellung eines Chloridprofils begrenzt, was im Allgemeinen zur Erhöhung der Schrittweite führt. Da die Wahl der Schrittweite das Chloridprofil beeinflusst, ergeben sich infolgedessen Abweichungen bei der Bestimmung des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten. Hochauflösende Verfahren, wie z.B. die Laser-induzierte Breakdown Spektroskopie (LIBS) [133], welche diese systematische Unsicherheit umgehen, stehen zwar zur Verfügung, haben sich jedoch aus wirtschaftlicher Sicht bisher für praktische Anwendungen noch nicht durchsetzen können.

Bedingt durch den hyperbelartigen Verlauf des Chloridprofils führt eine größere Schrittweite bei der Bohrmehlentnahme zu einem flacheren Chloridprofil im oberflächennahen Bereich und damit zu größeren effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten. Dieser Einfluss nimmt mit steiler werdendem Chloridprofil, also geringer werdendem effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten, zu.

Um den Einfluss der Schrittweite bei der Bohrmehlentnahme auf den effektiven Diffusionskoeffizienten zu quantifizieren, wurden zunächst mehrere Chloridprofile (Ausgangsprofile) mit unterschiedlichen Chlorideindringwiderständen mit dem Modell nach Gehlen berechnet, vgl. **Gleichung C 16** in **Anhang C-4**. Die sich dabei ergebenden effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten wurden mit $D_{\text{Eff}}^{\text{Ausg}}$ bezeichnet. An jedem Ausgangsprofil wurde der Einfluss einer unterschiedlichen Schrittweite (SW) auf das Chloridprofil simuliert, in dem das Ausgangsprofil schrittweitenabhängig in mehrere Tiefenbereiche aufgeteilt wurde. Über die jeweiligen Tiefenbereiche wurde die mittlere Chloridkonzentration berechnet und in der mittleren Tiefenlage angesetzt. Durch Kurvenfitting wurde an diesen neuen Chloridprofilen der effektive Chloriddiffusionskoeffizient bestimmt, welcher in diesem Zusammenhang mit der jeweiligen Schrittweite als $D_{\text{Eff}}^{\text{SW}}$ bezeichnet wird. Dabei wurde zunächst die Ausbildung eines Konzentrationsmaximums im Betoninneren vernachlässigt, vgl. **Bild D 2**.

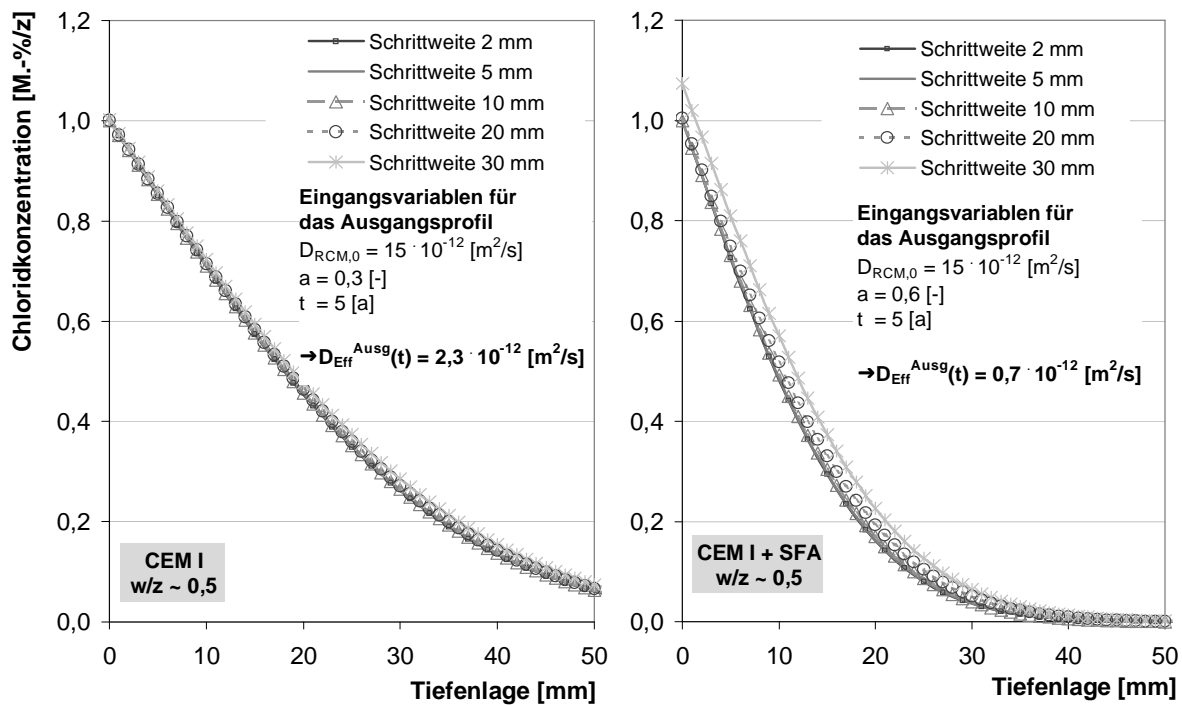


Bild D 2: Ausgangschloridprofile und daraus abgeleitete Chloridprofile für unterschiedliche Schrittweiten

Der Einfluss der Schrittweite auf den effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten wird durch den Verhältniswert $V_{D(SW)}$ dieser beiden Variablen ($D_{Eff}^{SW}/D_{Eff}^{Ausg}$) angegeben. Die Parameterstudie zeigt, dass der Einfluss der Schrittweite auf den effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten bis zu einer Schrittweite von $SW = 10$ mm vernachlässigbar ist, vgl. **Bild D 3**. Die Abweichungen sind bei vergleichbarer Expositionsdauer und Einwirkung bei den Betonen mit Flugasche (CEM I + SFA) größer als bei den CEM I-Betonen, da die Ausgangschloridprofile der Betone mit Flugasche steiler sind, vgl. hierzu **Bild D 2**.

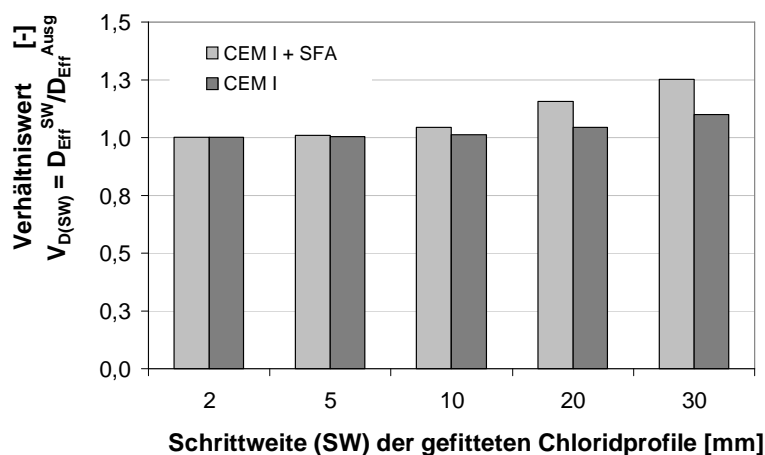


Bild D 3: Auswirkung der Schrittweite bei der Bohrmehlentnahme auf den effektiven Diffusionskoeffizienten

Weist das Ausgangschloridprofil ein Konzentrationsmaximum im Betoninneren, also einen Tiefenbereich x_K auf, so ist für die Auswertung des Profils von Bedeutung, ob dieser Bereich noch am Chloridprofil erkennbar ist. Sobald dieser Bereich durch eine zu große Schrittweite nicht mehr abgebildet werden kann, führt dies zu einer deutlichen Reduktion der Chloridkonzentration in der ersten Tiefenlage und damit zu einem Anstieg des aus dem Chloridprofil abgeleiteten effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten. Der effektive Chloriddiffusionskoeffizient wird in dem gezeigten Beispiel infolgedessen um rd. 50 % überschätzt, vgl. Verhältniswert $V_{D(SW)} = 1,5$ für Schrittweite 20 mm in **Bild D 4**.

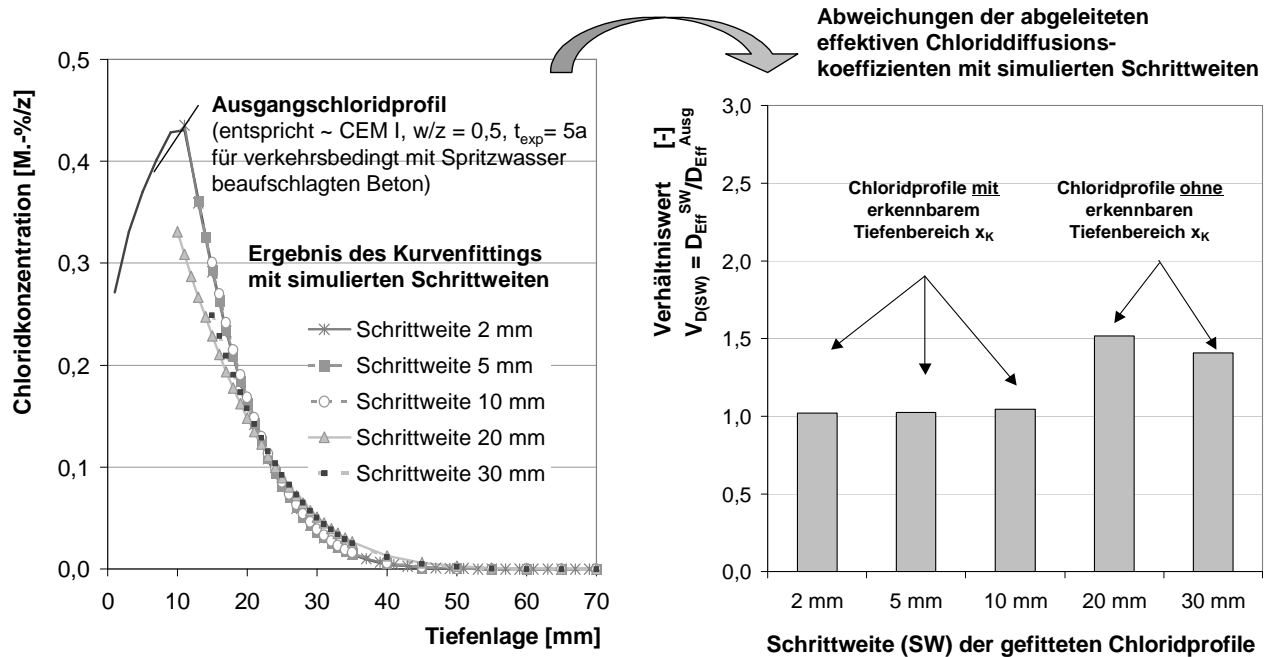


Bild D 4: Auswirkung der Schrittweite bei der Bohrmehlentnahme auf das Ausgangsprofil mit einem Tiefenbereich $x_K = 10$ mm (links) auf den daraus abgeleiteten effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten (rechts)

Da der durch Fitten abgeleitete effektive Chloriddiffusionskoeffizient von der Quantität des Tiefenbereichs x_K und der Chloridverteilung innerhalb des Bereichs x_K , abhängt, sind die in **Bild D 4** dargestellten Quotienten lediglich als exemplarische Werte anzusehen.

D-3: Zementsteinanreicherung

Chloride werden nur vom Zementstein gebunden. Bei der Chloridprofilerstellung wird im Allgemeinen aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten nur der Gesamtchloridgehalt (Summe aus gebundenen und freien Chloriden) bezogen auf die Probenmasse, also die Betonmasse, ermittelt. Wird der effektive Chlorid-diffusionskoeffizient aus einem solchen Chloridprofil abgeleitet, so impliziert dieses Vorgehen die Annahme einer gleichmäßigen Zementverteilung über die betrachteten Tiefenlagen des Betons. Ist nun eine signifikante oberflächennahe Zementsteinanreicherung vorhanden, welche durch das beschriebene Auswerteszenario keine Berücksichtigung findet, so wird die freie Chloridkonzentration im oberflächennahen Bereich überschätzt, da dort, bedingt durch den größeren Zementgehalt, mehr Chloride bezogen auf die Betonmasse gebunden werden. Die Ausdehnung einer evtl. vorhandenen Zementsteinanreicherung, welche ausgehend von Untersuchungen von i.d.R. < 10 mm angenommen werden kann [78], ist u.a. von den folgenden Faktoren abhängig:

- Orientierung der betrachteten Betonoberfläche (horizontal/vertikal)
- Stabilität der Betonmischung
- Größtkorn
- u.U. eingetragene Verdichtungsenergie.

Eine Abschätzung des Zementgehalts einer Betonprobe kann auf der Grundlage des ermittelten Calcium-oxidgehalts (CaO-Gehalt) erfolgen, wenn der Calciumgehalt des Zuschlags vernachlässigbar ist. Ist eine Zementsteinanreicherung an der Oberfläche vorhanden, so kann sich ein Bereich mit verhältnismäßig niedrigem Zementgehalt anschließen (Bereich, aus welchem die Zementsuspension beim Verdichten zur Oberfläche hin „ausgeschwemmt“ wurde). Durch diesen Effekt wird der Chloridkonzentrationsgradient bezogen auf den Beton zusätzlich verstärkt. Einen besonders großen Einfluss hat dieser gekoppelte Effekt, wenn sich das Chloridkonzentrationsprofil auf diesen Bereich beschränkt. Infolge der in **Bild D 5** dargestellten Zementsteinanreicherung ist das „Betonprofil“ im oberflächennahen Bereich deutlich steiler als das „Zement-Profil“, wodurch der Widerstand des Betons gegenüber Chlorideindringen überschätzt wird. Für das gezeigte Beispiel errechnet sich ein über Faktor 2 höherer effektiver Chloriddiffusionskoeffizient aus dem „Betonprofil“ im Vergleich zum „Zement-Profil“.

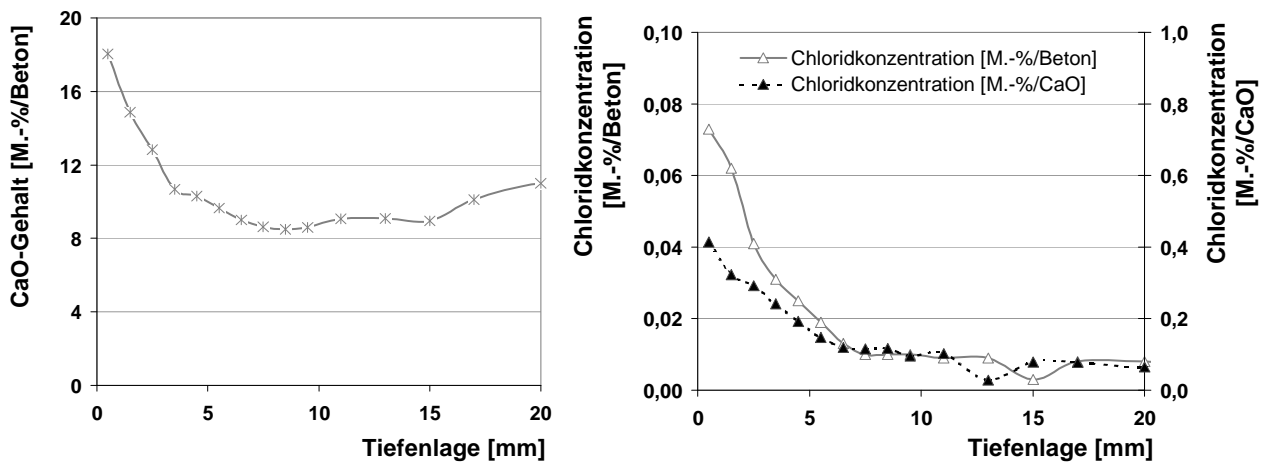
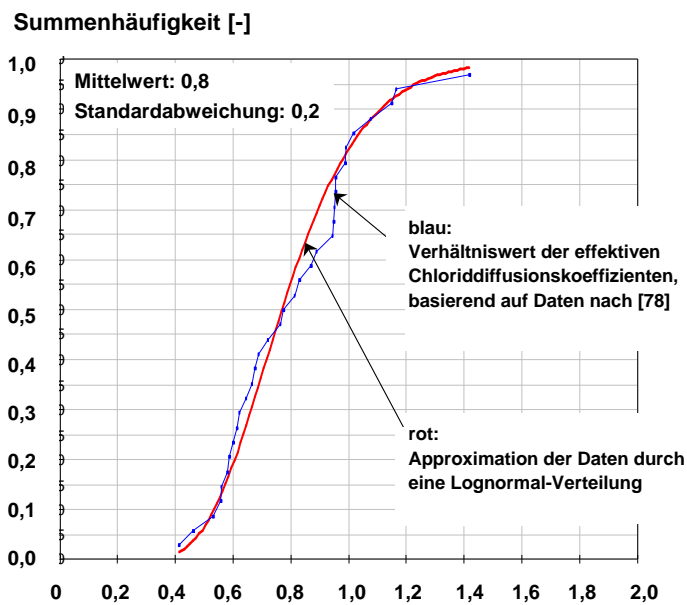


Bild D 5: CaO-Gehalt über die Tiefenlage eines Probekörpers mit den dazugehörigen Chloridprofilen bezogen auf die Beton- und die CaO-Masse [78]

Dieser Einfluss kann minimiert werden, in dem die ersten Tiefenlagen des Chloridprofils bei der Bewertung vernachlässigt werden, vgl. z.B. Prüfvorschriften [TR12][TR10]. Dies setzt jedoch eine ausreichend kleine Schrittweite bei der Tiefenauflösung des Chloridprofils voraus, was bei Bauwerksuntersuchungen selten der Fall ist.

Um den quantitativen Einfluss dieses Effekts zu erfassen, wurden Untersuchungen [78] ausgewertet, in denen neben dem tiefenabhängigen Chloridgehalt auch der CaO-Gehalt bestimmt wurde. So konnte der effektive Chloriddiffusionskoeffizient einmal in Bezug auf den Beton $D_{\text{Eff}}^{\text{Beton}}$ und ein zweites Mal in Bezug auf den Zement-Gehalt $D_{\text{Eff}}^{\text{Zement}}$ ausgewertet werden.

Werden diese beiden effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten ins Verhältnis ($D_{\text{Eff}}^{\text{Beton}}/D_{\text{Eff}}^{\text{Zement}}$) gesetzt, so zeigt sich, dass der daraus resultierende Verhältniswert $V_{D(\text{Zement})}$ im Mittel bei rd. 0,8 liegt. Dies bedeutet, dass infolge der inhomogenen Verteilung des Zementsteins der effektive Chloriddiffusionskoeffizient bezogen auf die Betonmasse $D_{\text{Eff}}^{\text{Beton}}$ geringer ist als der effektive Chloriddiffusionskoeffizient, welcher sich auf den Zementgehalt ($D_{\text{Eff}}^{\text{Zement}}$) bezieht, vgl. **Bild D 6**.



$$V_{D(\text{Zement})} = \frac{D_{\text{Eff}}^{\text{Beton}}}{D_{\text{Eff}}^{\text{Zement}}}$$

Bild D 6: Statistische Auswertung des Verhältniswerts $V_{D(\text{Zement})}$

Eine Vernachlässigung der Zementsteinanreicherung bei der Bestimmung des effektiven Diffusionskoeffizienten führt bei dem exemplarisch ausgewerteten Datensatz von bis zu 4,7 Jahre alten Probekörpern zu rd. 20 % geringen und auch zu stärker streuenden Werten für den effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten. Da mit zunehmendem Alter auch der Bereich hinter der Zementsteinanreicherung höhere Chloridkonzentrationen aufweist und somit die Form des Chloridprofils prägt, ist zu erwarten, dass dieser Einfluss mit der Zeit schwächer wird. Bildet sich ein Tiefenbereich x_K aus, so kann der Einfluss der Zementsteinanreicherung auf den effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten zumindest teilweise eliminiert werden.

ANHANG E

SENSITIVITÄTSANALYSE

Die Methoden zur Sensitivitätsanalyse lassen sich zunächst in die folgenden Kategorien einteilen:

- Faktor-Screening-Methoden, die nur qualitative Aussagen erlauben und
- Methoden, die quantitative Aussagen zulassen.

Die Faktor Screening Methoden werden insbesondere dann eingesetzt, wenn aufgrund einer Vielzahl von Eingangsvariablen oder einer ausgeprägten Modellkomplexität der Rechenaufwand für quantitative Untersuchungsmethoden zu hoch ist. Durch diese Methoden erhält man eine Rangfolge der Eingangsgrößen bezüglich deren Relevanz auf das Berechnungsergebnis. Für folgende quantitative Betrachtungen kann das Modell dann um die nicht relevanten Variablen reduziert werden. Typische Screening-Methoden sind das OAT- und das Morris-Design [105].

Des Weiteren können die Methoden zur Sensitivitätsanalyse in lokale und globale Methoden unterteilt werden. Diese und die FORM/SORM-Methode, welche eine Sonderstellung diesbezüglich einnimmt, sollen im Folgenden kurz erläutert werden.

Lokale Methoden

Im Rahmen von lokalen Methoden wird nur der Einfluss der Variation einer Eingangsvariablen zu einem Zeitpunkt betrachtet. Das Vorgehen ist demzufolge eindimensional. Der Einfluss wird quantitativ durch ein lokales Sensitivitätsmaß ausgedrückt. Lokale Methoden basieren stets auf partiellen Ableitungen. Dies bedeutet, dass nur Aussagen über das Modellverhalten innerhalb eines begrenzten Intervalls um den Punkt, in welchem die partielle Ableitung gebildet wurde, getroffen werden können. Für Chlorideindringmodelle wurden lokale Sensitivitätsanalysen z.B. in [160] durchgeführt.

Wird das Berechnungsergebnis als Y bezeichnet und der Vektor mit den Eingangsgrößen als $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$, so gibt es im Rahmen der lokalen Methoden zur Sensitivitätsanalyse im Wesentlichen die folgenden Betrachtungsweisen:

(A) Berechnen des Effekts auf das Berechnungsergebnis Y infolge einer Änderung des nominalen Werts der Eingangsgröße X_i ($i = 1, 2, \dots, n$).

$$S_{1,i} = \frac{\partial Y}{\partial X_i}$$

Gleichung E 1

(B) Berechnen des relativen Effekts auf das Berechnungsergebnis Y infolge einer festgelegten Änderung (im Allgemeinen 1 %) des nominalen Werts der Eingangsgröße X_i ($i = 1, 2, \dots, n$).

$$S_{2,i} = \frac{\partial Y}{\partial X_i} \frac{x_i^0}{Y^0}$$

Gleichung E 2

(C) Berechnen des relativen Effekts auf das Berechnungsergebnis Y infolge einer festgelegten Änderung (im Allgemeinen 1 %) der Standardabweichung der Eingangsgröße $\sigma(X_i)$ ($i = 1, 2, \dots, n$).

$$S_{3,i} = \frac{\partial Y}{\partial X_i} \frac{\sigma(x_i)}{\sigma(Y)}$$

Gleichung E 3

Globale Methoden

Im Rahmen von globalen Methoden wird sowohl die Verteilungsfunktion der Eingangsgrößen als auch die gleichzeitige Variation dieser berücksichtigt. Typische globale Methoden sind SOBOL und FAST [105]. Ein wesentlicher Vorteil dieser genannten Methoden ist, dass keine Einschränkungen bezüglich der Modelleigenschaften bestehen (Monotonie oder Additivität), weshalb sie auch als modellfreie Methoden bezeichnet werden.

FORM/SORM

Eine Sonderstellung nimmt die FORM-Methode (first order reliability method) und die SORM-Methode (second order reliability method) ein. Die sich aus dieser Berechnung ergebenden Sensitivitätsindices beziehen sich nur auf den Bereich mit der höchsten Versagensdichte.

ANHANG F

BILDER UND TABELLEN

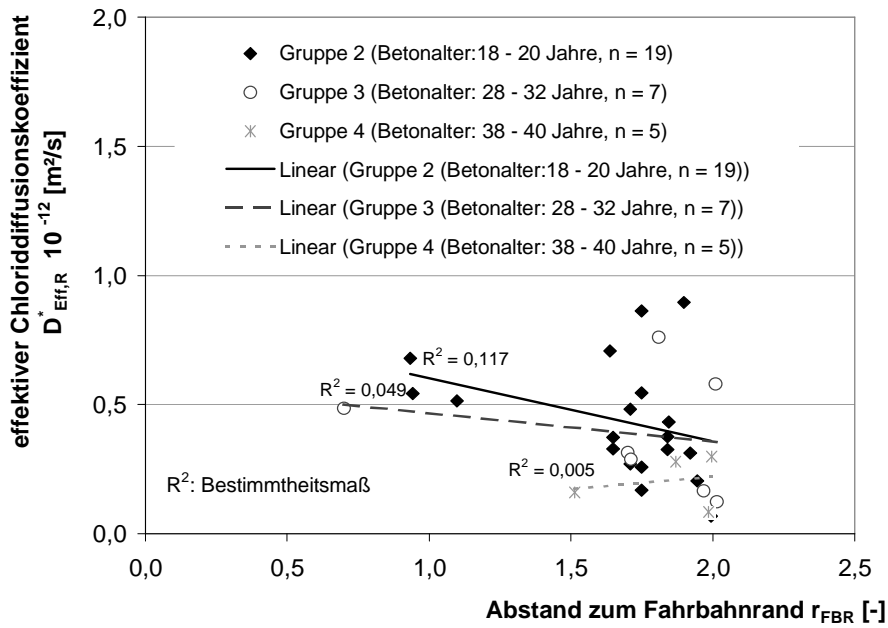


Bild F 1: Effektive Diffusionskoeffizienten $D_{\text{Eff,R}}^*$ in Abhängigkeit vom Abstand zum Fahrbahnrand und daraus abgeleitete Bestimmtheitsmaße

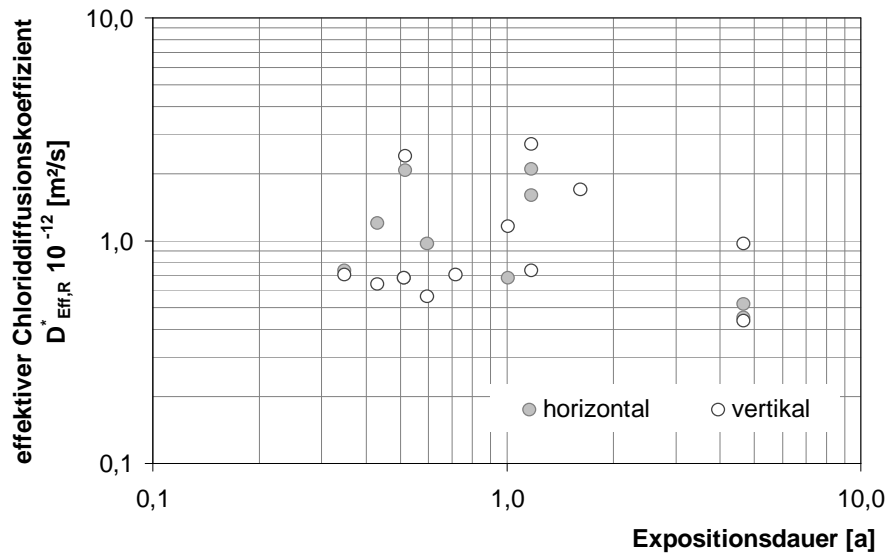


Bild F 2: Aus horizontal und vertikal orientierten Flächen abgeleitete effektive Chloriddiffusionskoeffizienten

Tabelle F 1: Validierung - Auswertung der Chloridkonzentrationsprofile für die untersuchten Chloridprofilgruppen von Bauwerken mit einer Expositionsdauer von rd. 32 a

Chloridprofilgruppe*	Verteilung	Umfang des Datensatzes n [-]	Tiefenlage x [mm]	Mittelwert m [M.-%/z]	Standardabweichung s [M.-%/z]	Variationskoeffizient CoV [-]
„20“	logND	25	10	0,776	0,468	0,60
			30	0,272	0,234	0,86
			50	0,130	0,104	0,80
„50“	logND	30	10	0,648	0,297	0,46
			30	0,210	0,157	0,75
			50	0,109	0,079	0,73
„100“	logND	33	10	0,613	0,250	0,41
			30	0,214	0,154	0,72
			50	0,100	0,041	0,41

* Bezeichnung entspricht dem vertikalen Abstand h der Entnahmestelle zur Fahrbahnoberkante in [cm]

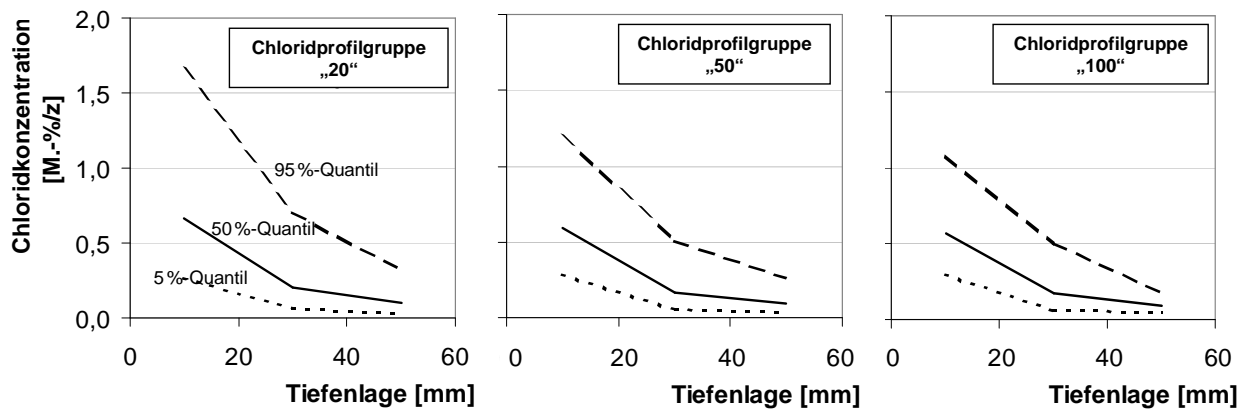


Bild F 3: Aus Messdaten abgeleitete Streubänder der Chloridprofile für die drei untersuchten Chloridprofilgruppen

Tabelle F 2: Validierung - Quantifizierung der Variablen zur Berechnung der Streubänder der Chloridkonzentrationen in unterschiedlichen Tiefenlagen $C(x, t_{exp} = 32 \text{ a})$

Variable	Einheit	Verteilung*	Mittelwert m	Standardabweichung s	Quelle	
1	C_{Sa}	[M.-%/z]	logND	1,78	1,30	h = 20 cm
				1,71	1,28	h = 50 cm
				1,6	1,20	h = 100 cm
				1,00	0,75	h = 20 cm Abschätzung auf der Grundlage der Chloridprofile (modifiziert)
2	C_i	[M.-%/z]	logND	0,055	0,028	vgl. Kapitel 8.2 , Seite 61
3	x	[mm]	c	10 bis 60	-	Aufgabenstellung
4	$D_{RCM,0}$	[mm ² /a]	ND	470	94	Annahme
5	D^{*Efr}	k_t	[-]	c	1	-
6		$t_{0,R}$	[a]	c	0,153	-
7		k_R	[-]	ND	0,45	0,12
8		a_R	[-]	BetaD $0 \leq a_R \leq 1$	0,6	0,12
9	t_{exp}	[a]	c	32	-	Aufgabenstellung

* logND: Lognormalverteilung; BetaD: Beta-Verteilung; c: konstant; ND: Normalverteilung

** Eingangsvariablen: $M_{Beton}/M_{Zement} = 7$, $a = 162 \text{ cm}$ und $h = 20 \text{ cm}, 50 \text{ cm}$ bzw. 100 cm

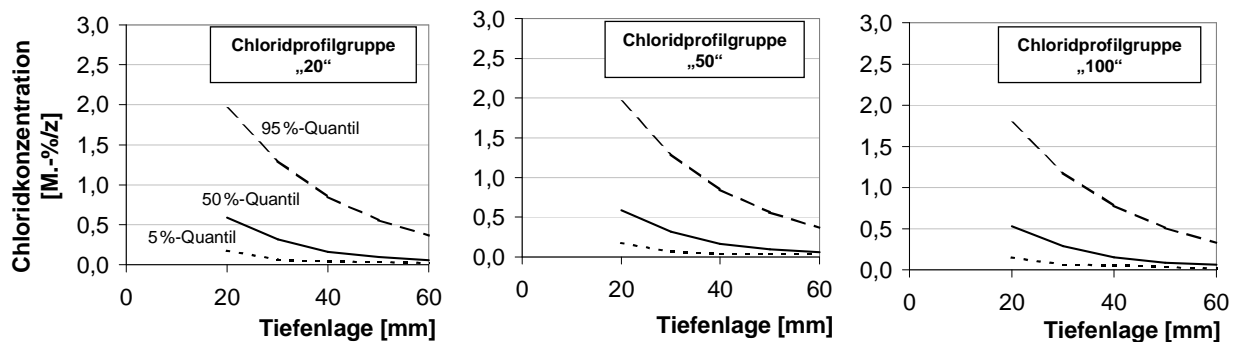


Bild F 4: Prognostizierte Streubänder für unterschiedliche Entfernungen zur Fahrbahnoberkante (20 cm, 50 cm, 100 cm)

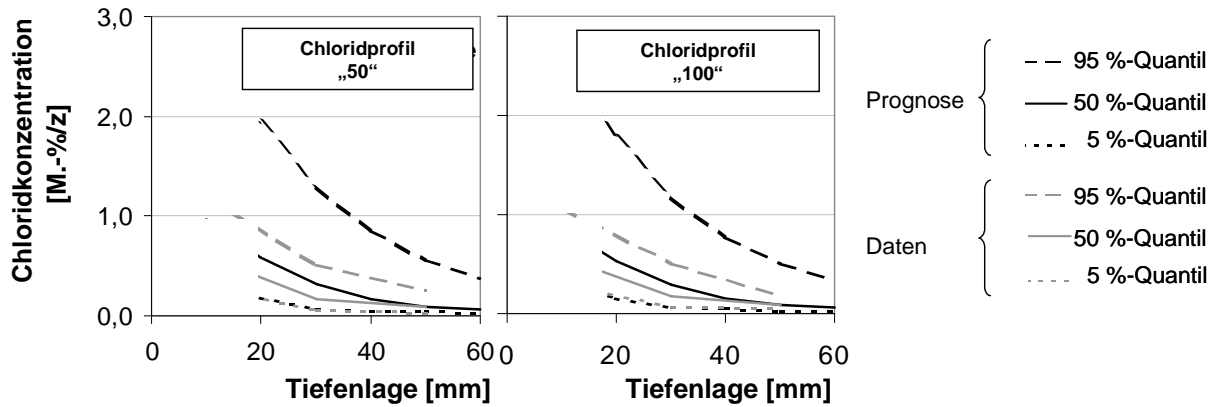


Bild F 5: Gegenüberstellung der berechneten mit den prognostizierten Streubändern für unterschiedliche Entfernungen zur Fahrbahnoberkante (50 cm, 100 cm)

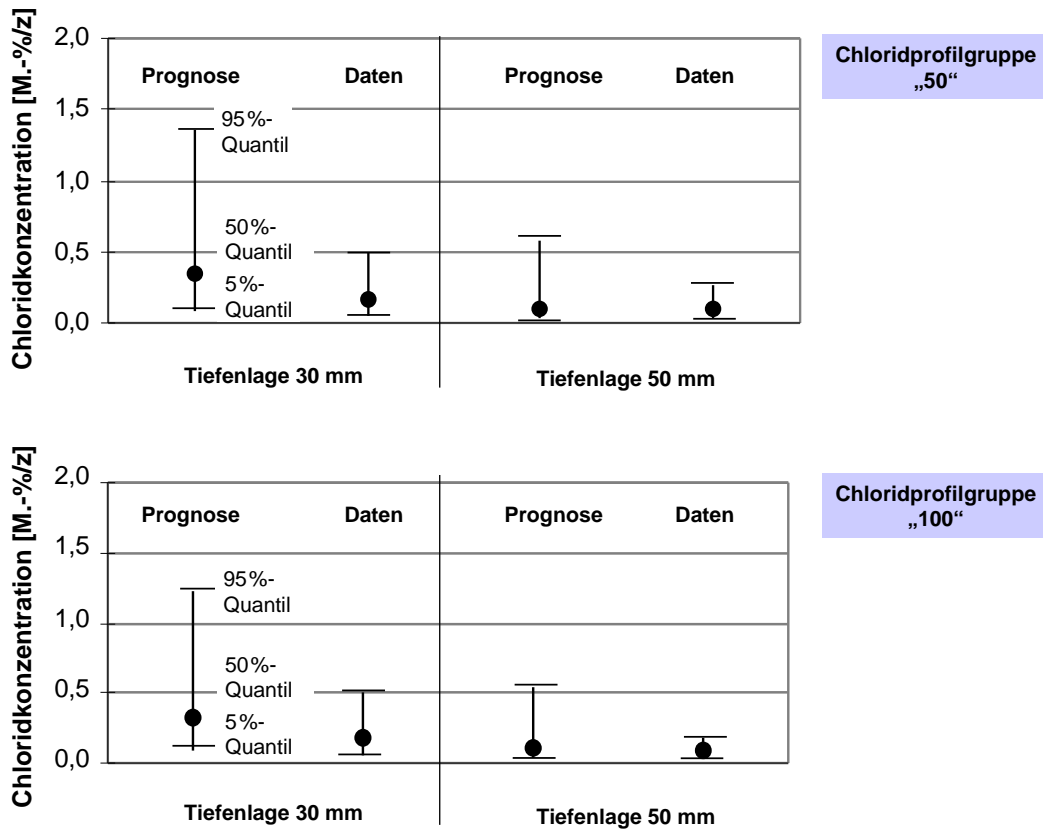


Bild F 6: Gegenüberstellung der berechneten mit den prognostizierten Streubändern für unterschiedliche Entfernungen zur Fahrbahnoberkante (50 cm, 100 cm)

Tabelle F 3: Sensitivitätsanalyse - Quantifizierung der Variablen für den Grenzzustand der chloridinduzierten Depassivierung (Ausgangsberechnung)

Variable		Einheit	Verteilung*	Mittelwert m	Standard- abweichung s	
1	C _{Sa}	[M.-%/z]	logND	1,81**	1,35**	
2	C _i	[M.-%/z]	logND	0,055	0,028	
3	d _c	[mm]	ND	55	8	
4	D* _{Eff,R}	D _{RCM,0}	[mm ² /a]	ND	470	94
5		k _t	[-]	c	1	-
6		t _{0,R}	[a]	c	0,153	-
7		k _R	[-]	ND	0,45	0,12
8		a _R	[-]	BetaD 0 ≤ a _R ≤ 1	0,6	0,12
9	t _{exp}	[a]	c	50	-	
10	C _{crit}	[M.-%/z]	BetaD 0,2 ≤ C _{crit} ≤ 2	0,6	0,15	

* logND: Lognormalverteilung; BetaD: Beta-Verteilung; c: konstant; ND: Normalverteilung

** Eingangsvariablen: M_{Beton}/M_{Zement} = 7, mit a = 1,5 m, h = 0,2 m

Tabelle F 4: Beispielberechnung - Quantifizierung der Variablen für den Grenzzustand der chloridinduzierten Depassivierung (Ausgangsberechnung)

Variable		Einheit	Verteilung*	Mittelwert m	Standard- abweichung s	Bemerkung	
1	C _{Sa}	[M.-%/z]	logND	1,6	1,2	vgl. Kapitel 8.1 , Seite 58	
2	C _i	[M.-%/z]	logND	0,055	0,028	vgl. Kapitel 8.2 , Seite 61	
3	d _c	[mm]	ND	55	8	[TR1], unter der Annahme von normalverteilten Daten und dem min c-Wert als 5 %-Quantilwert	
4	D* _{Eff,R}	D _{RCM,0}	[mm ² /a]	ND	470	vgl. Tabelle 12 , Seite 91	
5		k _t	[-]	c	1		-
6		t _{0,R}	[a]	c	0,153		-
7		k _R	[-]	ND	0,45		0,12
8		a _R	[-]	BetaD 0 ≤ a _R ≤ 1	0,6		0,12
9	t _{exp}	[a]	c	0-50	-	Aufgabenstellung	
10	C _{crit}	[M.-%/z]	BetaD 0,2 ≤ C _{crit} ≤ 2	0,6	0,15	[49]	

* logND: Lognormalverteilung; BetaD: Beta-Verteilung; c: konstant; ND: Normalverteilung

** Eingangsvariablen: M_{Beton}/M_{Zement} = 7, mit a = 1,62 m, h = 1,0 m

Tabelle F 5: Beispielberechnung - Quantifizierung der zusätzlichen Variablen für das Update

Variable	Einheit	Verteilung*	Mittelwert m	Standard- abweichung s	Quelle	
11	t_{insp}	[a]	c	32	-	Inspektionsergebnisse, vgl. Tabelle F 1
12	$x_{\text{insp},1}$	[mm]	c	30	-	
	$x_{\text{insp},2}$	[mm]	c	50	-	
13	$C(x_{\text{insp},1}, t_{\text{insp}})^{**}$	[M.-%/Z]	logND	0,21	0,15	
	$C(x_{\text{insp},2}, t_{\text{insp}})^{**}$	[M.-%/Z]	logND	0,10	0,04	

* c: konstant; logND: Lognormalverteilung

** Annahme bei der Umrechnung der Chloridkonzentration bezogen auf die Zementmasse: $M_{\text{Beton}}/M_{\text{Zement}} = 7$

