

BAWMerkblatt

Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauwerken bei Carbonatisierung und Chlorideinwirkung (MDCC)

Ausgabe 2019

BAW-Merkblätter, -Empfehlungen und -Richtlinien Herausgeber

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)
Kußmaulstraße 17
76187 Karlsruhe

Postfach 21 02 53
76152 Karlsruhe

Tel.: 0721 9726-0
Fax: 0721 9726-4540

info@baw.de
www.baw.de

Übersetzung, Nachdruck – auch auszugsweise – nur mit Genehmigung des Herausgebers: © BAW 2019

Inhaltsverzeichnis	Seite
1 Anwendungshinweise	2
2 Verfahren zum Erhalt oder zur Wiederherstellung der Passivität des Betonstahls	7
2.1 Formelzeichen	7
2.2 Literatur und Normative Verweisungen	7
2.3 Allgemeines	8
2.4 Verfahren 7.1 „Erhöhung bzw. Teilersatz der Betondeckung“	8
2.5 Verfahren 7.2 „Ersatz von chloridhaltigem oder carbonatisiertem Beton“	10
2.6 Verfahren 7.4 „Rekalisierung von carbonatisiertem Beton durch Diffusion“	13
3 Verfahren zur Abschätzung der Restnutzungsdauer und zur Bemessung von neu zu errichtenden Bauteilen und von Instandsetzungsmaßnahmen mittels Betonersatz bei Carbonatisierung	15
3.1 Formelzeichen	15
3.2 Literatur und Normative Verweisungen	16
3.3 Allgemeines	17
3.4 Ermittlung der Restnutzungsdauer bei Carbonatisierung	17
3.5 Bemessung von neu zu errichtenden Bauteilen und Betonersatz bei Carbonatisierung	18
3.5.1 Einfache Bemessung für Beton, Spritzbeton, Trockenbeton oder Vergussbeton	18
3.5.2 Einfache Bemessung bei unbekannter Zusammensetzung	18
3.5.3 Bemessung mit Hilfe von Nomogrammen	19
3.6 Beispiele zur Abschätzung der Restnutzungsdauer und zur Bemessung von neu zu errichtenden Bauteilen und von Instandsetzungsmaßnahmen mittels Betonersatz bei Carbonatisierung	23
3.6.1 Ermittlung der Restnutzungsdauer eines vertikal nach Norden orientierten Fassadenelementes	23
3.6.2 Bemessung der Schichtdicke bei Betonersatz für eine planmäßige Gesamtnutzungsdauer von $t_{SL} = 50$ Jahren (Fassadenelement vom Abschnitt 3.6.1)	23
4 Verfahren zur Abschätzung der Restnutzungsdauer und zur Bemessung von neu zu errichtenden Bauteilen und von Instandsetzungsmaßnahmen mittels Betonersatz bei Chloridbeaufschlagung	25
4.1 Formelzeichen	25
4.2 Literatur und Normative Verweisung	26
4.3 Allgemeines	27
4.4 Ermittlung der Restnutzungsdauer bestehender Bauteile bei Chloridbeaufschlagung	28
4.4.1 Allgemeines	28
4.4.2 Bestimmung von $D_{app}(t_0=28d)$ auf Basis von Chloridprofilen zu einem Untersuchungszeitpunkt	31
4.4.3 Bestimmung von $D_{app}(t_0=28d)$ auf Basis von Chloridprofilen zu mehreren Untersuchungszeitpunkten	33
4.5 Bemessung von neu zu errichtenden Bauteilen und Betonersatz bei Chloridbeaufschlagung	34
4.5.1 Einfache Bemessung für Beton, Spritzbeton, Trockenbeton oder Vergussbeton	34
4.5.2 Bemessung mit Hilfe von Nomogrammen	34
4.6 Nomogramme zur Abschätzung der Restnutzungsdauer und zur Bemessung von neu zu errichtenden Bauteilen und von Instandsetzungsmaßnahmen mittels Betonersatz bei Chloridbeaufschlagung	36
4.7 Beispiele zur Abschätzung der Restnutzungsdauer und zur Bemessung von neu zu errichtenden Bauteilen und von Instandsetzungsmaßnahmen mittels Betonersatz bei Chloridbeaufschlagung	58
4.7.1 Ermittlung der Restnutzungsdauer eines Meerwasserbauwerkes (Chloridprofile aus Untersuchungen zu einem Zeitpunkt vorhanden)	58

4.7.2	Ermittlung der Restnutzungsdauer eines Meerwasserbauwerkes (Chloridprofile aus Untersuchungen in zwei unterschiedlichen Zeitpunkten vorhanden)	59
4.7.3	Berechnung des erforderlichen Chlorideindringwiderstands des Betons für den Bau eines Bauteils mit den in Tabelle 4.8 gegebenen Randbedingungen	61
Anlagen		63

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1:	Übersicht über die Dauerhaftigkeitsbemessung von neu zu errichtenden Bauteilen bei Carbonatisierung ¹⁾	3
Tabelle 1.2:	Übersicht über die Dauerhaftigkeitsbemessung von Betonersatz bei Carbonatisierung ¹⁾	4
Tabelle 1.3:	Übersicht über die Dauerhaftigkeitsbemessung von neu zu errichtenden Bauteilen unter Chlorideinwirkung ¹⁾	5
Tabelle 1.4:	Übersicht über die Dauerhaftigkeitsbemessung von Betonersatz unter Chlorideinwirkung ¹⁾	6
Tabelle 3.1:	Empfehlungen zum Zielwert des Zuverlässigkeitsindex bei XC-exponierten Bauteilen gemäß [11]	17
Tabelle 3.2:	Verteilung der Windrichtungen während Niederschlagsereignissen	24
Tabelle 4.1:	Altersexponenten α_{app} (vereinfachend, falls keine Chloridprofile zu mehreren Zeitpunkten vorhanden sind) bzw. α_{RCM} in Abhängigkeit der Zementart	32
Tabelle 4.2:	Übersicht über die Nomogramme zur Abschätzung der Restnutzungsdauer und zur Bemessung von neu zu errichtenden Bauteilen und von Instandsetzungsmaßnahmen mittels Betonersatz für die Expositionsklassen XS3 / XD3 ¹⁾ (aus [13])	38
Tabelle 4.3:	Informationen zum Bauteil	58
Tabelle 4.4:	Gemessene Chloridgehalte zum Inspektionszeitpunkt von 20 Jahren	58
Tabelle 4.5:	Informationen zum Bauteil	59
Tabelle 4.6:	Gemessene Chloridgehalte zum Inspektionszeitpunkt von 15 Jahren	60
Tabelle 4.7:	Gemessene Chloridgehalte zum Inspektionszeitpunkt von 35 Jahren	60
Tabelle 4.8:	Informationen zum Bauteil	61

Bildverzeichnis

Bild 2.1:	Schematische Darstellung der Bedingungen für das Verfahren 7.1 (bei Carbonatisierung)	9
Bild 2.2:	Schematische Darstellung der Bedingungen für das Verfahren 7.1 (bei Chloridbeaufschlagung)	10

Bild 2.3:	Schematische Darstellung der Bedingungen für das Verfahren 7.2 (bei Carbonatisierung bis hinter die Bewehrung)	11
Bild 2.4:	Schematische Darstellung der Bedingungen für das Verfahren 7.2 (Tiefe des kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts bis maximal 30 mm hinter der Bewehrung)	12
Bild 2.5:	Schematische Darstellung der Bedingungen für das Verfahren 7.2 (Tiefe des kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts größer als 30 mm hinter der Bewehrung)	13
Bild 2.6:	Schematische Darstellung der Bedingungen für das Verfahren 7.4	14
Bild 3.1:	Nachweis der Betondeckung bzw. Schichtdicke bei Carbonatisierung für Bauteile der Expositionsklasse XC3 (vor Bewitterung geschützt) für eine Zielzuverlässigkeit von $\beta_0 = 0,5$ (aus [10])	21
Bild 3.2:	Nachweis der Betondeckung bzw. Schichtdicke bei Carbonatisierung für Bauteile der Expositionsklassen XC1 (ständig nass), XC2 und XC4 für einen Zielzuverlässigkeit von $\beta_0 = 1,5$ (aus [10])	22
Bild 3.3:	Ermittlung der Mindestschichtdicke mit Hilfe des Nomogramms im Bild 3.2	24
Bild 4.1:	Ermittlung von $C_{S,\Delta x,insp}$ und $D_{app}(t_{insp})$ (siehe auch Gleichung 1)	29
Bild 4.2:	Ablaufschema zur Ermittlung der Restnutzungsdauer	30
Bild 4.3:	Ermittlung des Altersexponenten α_{app} aus den berechneten scheinbaren Chloriddiffusionskoeffizienten von zu unterschiedlichen Zeitpunkten ermittelten Chloridprofilen	33
Bild 4.4:	Exemplarische Ermittlung des Altersexponenten α_{nss} mittels Regressionsanalyse an Chloriddiffusionskoeffizienten D_{nss} . Die einzeln ausgewiesenen Chloriddiffusionskoeffizienten repräsentieren den Materialwiderstand für unterschiedlich lange Expositionszeiten ($t_0 = 28$ d, $t_1 = 90$ d, $t_2 = 365$ d und $t_3 = 730$ d) jeweils als konstante Größe über den betrachteten Zeitraum. Zeitliche Entwicklung des D_{nss} in normaler (links) und doppel-logarithmischer (rechts) Skalierung	36
Bild 4.5:	Eingangsparameter der Nomogramme	37
Bild 4.6:	Nomogramm für XS3 / XD3, Ziellebensdauer $t_{SL}=100$ Jahre, Zielzuverlässigkeit $\beta_0=1,5$, $0 \leq D(t_0) \leq 2$	39
Bild 4.7:	Nomogramm für XS3 / XD3, Ziellebensdauer $t_{SL}=100$ Jahre, Zielzuverlässigkeit $\beta_0=1,5$, $2 \leq D(t_0) \leq 20$	40
Bild 4.8:	Nomogramm für XS3 / XD3, Ziellebensdauer $t_{SL}=70$ Jahre, Zielzuverlässigkeit $\beta_0=1,5$, $0 \leq D(t_0) \leq 2$	41
Bild 4.9:	Nomogramm für XS3 / XD3, Ziellebensdauer $t_{SL}=70$ Jahre, Zielzuverlässigkeit $\beta_0=1,5$, $2 \leq D(t_0) \leq 20$	42
Bild 4.10:	Nomogramm für XS3 / XD3, Ziellebensdauer $t_{SL}=50$ Jahre, Zielzuverlässigkeit $\beta_0=1,5$, $0 \leq D(t_0) \leq 2$	43
Bild 4.11:	Nomogramm für XS3 / XD3, Ziellebensdauer $t_{SL}=50$ Jahre, Zielzuverlässigkeit $\beta_0=1,5$, $2 \leq D(t_0) \leq 20$	44
Bild 4.12:	Nomogramm für XS3 / XD3, Ziellebensdauer $t_{SL}=40$ Jahre, Zielzuverlässigkeit $\beta_0=1,5$, $0 \leq D(t_0) \leq 2$	45

Bild 4.13:	Nomogramm für XS3 / XD3, Ziellebensdauer $t_{SL}=40$ Jahre, Zielzuverlässigkeit $\beta_0=1,5$, $2 \leq D(t_0) \leq 20$	46
Bild 4.14:	Nomogramm für XS3 / XD3, Ziellebensdauer $t_{SL}=30$ Jahre, Zielzuverlässigkeit $\beta_0=1,5$, $0 \leq D(t_0) \leq 2$	47
Bild 4.15:	Nomogramm für XS3 / XD3, Ziellebensdauer $t_{SL}=30$ Jahre, Zielzuverlässigkeit $\beta_0=1,5$, $2 \leq D(t_0) \leq 20$	48
Bild 4.16:	Nomogramm für XS3 / XD3, Ziellebensdauer $t_{SL}=20$ Jahre, Zielzuverlässigkeit $\beta_0=1,5$, $0 \leq D(t_0) \leq 20$	49
Bild 4.17:	Nomogramm für XS3 / XD3, Ziellebensdauer $t_{SL}=10$ Jahre, Zielzuverlässigkeit $\beta_0=1,5$, $0 \leq D(t_0) \leq 20$	50
Bild 4.18:	Nomogramm für XS3 / XD3, Ziellebensdauer $t_{SL}=100$ Jahre, Zielzuverlässigkeit $\beta_0=0,5$, $0 \leq D(t_0) \leq 20$	51
Bild 4.19:	Nomogramm für XS3 / XD3, Ziellebensdauer $t_{SL}=70$ Jahre, Zielzuverlässigkeit $\beta_0=0,5$, $0 \leq D(t_0) \leq 20$	52
Bild 4.20:	Nomogramm für XS3 / XD3, Ziellebensdauer $t_{SL}=50$ Jahre, Zielzuverlässigkeit $\beta_0=0,5$, $0 \leq D(t_0) \leq 20$	53
Bild 4.21:	Nomogramm für XS3 / XD3, Ziellebensdauer $t_{SL}=40$ Jahre, Zielzuverlässigkeit $\beta_0=0,5$, $0 \leq D(t_0) \leq 20$	54
Bild 4.22:	Nomogramm für XS3 / XD3, Ziellebensdauer $t_{SL}=30$ Jahre, Zielzuverlässigkeit $\beta_0=0,5$, $0 \leq D(t_0) \leq 20$	55
Bild 4.23:	Nomogramm für XS3 / XD3, Ziellebensdauer $t_{SL}=20$ Jahre, Zielzuverlässigkeit $\beta_0=0,5$, $0 \leq D(t_0) \leq 20$	56
Bild 4.24:	Nomogramm für XS3 / XD3, Ziellebensdauer $t_{SL}=10$ Jahre, Zielzuverlässigkeit $\beta_0=0,5$, $0 \leq D(t_0) \leq 20$	57
Bild 4.25:	Ermittlung von $D_{app}(t_{insp})$ und $C_{S,\Delta x,insp}$ zum Zeitpunkt $t_{insp} = 20$ Jahre durch Regressionsanalyse (z. B. mit Hilfe der Funktion „Solver“ in Microsoft Excel)	58
Bild 4.26:	Abschätzung der erforderlichen Mindestbetondeckung mit Hilfe der Nomogramme im Bild 4.10 (links) und Bild 4.12 (rechts)	59
Bild 4.27:	Ermittlung von $D_{app}(t_{insp})$ und $C_{S,\Delta x,insp}$ zum Inspektionszeitpunkt von 15 Jahren (links) und 35 Jahren (rechts) durch Regressionsanalyse (z. B. mit Hilfe der Funktion „Solver“ in Microsoft Excel)	60
Bild 4.28:	Abschätzung der erforderlichen Mindestbetondeckung mit Hilfe der Nomogramme im Bild 4.7 (links) und Bild 4.9 (rechts)	61
Bild 4.29:	Ermittlung des erforderlichen Chloridmigrationskoeffizienten $D_{RCM}(t_0)$ mit Hilfe des Nomogramms im Bild 4.7	62

Änderungen

Gegenüber dem **BAWMerkblatt** Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauwerken bei Carbonatisierung und Chlorideinwirkung (MDCC), Ausgabe 2017, wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- Aufnahme der Änderung A1:2017,
- Überarbeitung der Tabelle 1.2,
- Aufnahme von ANMERKUNG 2 in 2.3 (2),
- Aufnahme von Fußnote 1 in 4.1,
- Aufnahme einer weiteren Bindemittelkombination und die Fußnote 5 in Tabelle 4.1,
- Erweiterung des Absatzes (4) in 4.5.2 mit Angaben zum Übereinstimmungsnachweis,
- 4.6 (6) wurde gestrichen,
- neue Formatierung der Nomogramme in 4.6,
- geringfügige Änderung zur Prüflösung in Anlage B, B4,
- Änderung und Präzisierung des Alters der Prüfkörper in Anlage B, B6.1,
- Aufnahme von Anmerkung hinsichtlich des Bindemittelgehalts in Anlage B, B6.3,
- Berücksichtigung von Gesteinskörnungen bei der Ermittlung der Eindringtiefen in Anlage B, B7.1,
- wenige redaktionelle und sprachliche Änderungen.

Frühere Ausgaben

BAWMerkblatt Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauwerken bei Carbonatisierung und Chlorideinwirkung (MDCC), Ausgabe 2017.

Änderung A1:2017 zu **BAWMerkblatt** Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauwerken bei Carbonatisierung und Chlorideinwirkung (MDCC), Ausgabe 2017.

Vorbemerkung

Dieses Merkblatt ersetzt das **BAWMerkblatt** Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauwerken bei Carbonatisierung und Chlorideinwirkung (MDCC), Ausgabe 2017.

In diesem Merkblatt werden semiprobabilistische leistungsbezogene Nachweisverfahren dargestellt, die allen am Baugeschehen Beteiligten ein transparentes Umgehen mit der Bemessung und Bewertung der Dauerhaftigkeit hinsichtlich carbonatisierungs- und chloridinduzierter Betonstahlkorrosion ermöglichen.

1 Anwendungshinweise

- (1) Dieses Merkblatt beinhaltet Nachweisverfahren, die dem Planer eine durchgängige Anleitung zur
 - Abschätzung der Restnutzungsdauer bestehender Stahlbetonbauteile,
 - Dauerhaftigkeitsbemessung von neu zu errichtenden Stahlbetonbauteilen,
 - Dauerhaftigkeitsbemessung von Instandsetzungsmaßnahmen mittels Betonersatzhinsichtlich carbonatisierungs- und chloridinduzierter Betonstahlkorrosion (Expositionsklassen XC, XD und XS) bereitstellen.
- (2) Bei den Nachweisverfahren wird eine Depassivierung des Betonstahls durch das in den Beton eindringende Medium (CO_2 , Cl^-) als Grenzzustand (ungewollter Bauteilzustand) zugrunde gelegt. Die darauf folgende Korrosion des Betonstahls und ihre Folgen werden nicht berücksichtigt, da diese derzeit nicht mit ausreichender Genauigkeit abgebildet und nachgewiesen werden können.
- (3) Die Anwendung dieser Nachweisverfahren setzt besondere Fachkunde voraus.
- (4) Die angewendeten Transportmodelle zur Prognose der CO_2 -Eindringtiefe bzw. des tiefenabhängigen Chloridgehalts sowie das Verfahren zur Abschätzung der Restnutzungsdauer bestehender Bauwerke gelten für intakte, ungerissene Betonbereiche. Ist ein passiver Schutz der Bewehrungsoberfläche vor Korrosion durch den umhüllenden Beton nicht gegeben – z. B. aufgrund von Fehlstellen, bewehrungskreuzenden Trennrissen etc. – ist die Dauerhaftigkeit des Bauteils gesondert zu betrachten.
- (5) Die Dauerhaftigkeitsbemessung und die Abschätzung der Restnutzungsdauer sind stets auf Bauteilbereiche zu beziehen, für die eine Gleichmäßigkeit der Betonzusammensetzung, der Ausführungsart und -qualität und der Einwirkungsbedingung angenommen werden kann.
- (6) In den Tabellen 1.1 bis 1.4 sind die Ansätze zur Bemessung der Dauerhaftigkeit von Bauteilen der Expositionsklassen XC, XD und XS gemäß diesem Merkblatt (MDCC) sowie den Vorgaben der ZTV-W LB 215 (Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen Wasserbau für Wasserbauwerke aus Beton und Stahlbeton) und ZTV-W LB 219 (Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen Wasserbau für die Instandsetzung der Betonbauteile von Wasserbauwerken) zusammengestellt. In den Bemessungsvarianten sind jeweils die erforderlichen Mindestbetondeckungen bzw. Mindestschichtdicken zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit für die jeweilige Zielnutzungsdauer vorgegeben (bzw. werden berechnet). Die Anforderungen der ZTV-W LB 215 und ZTV-W LB 219 hierzu werden mit der Fußnote ¹⁾ der Tabellen berücksichtigt.

Expositions- klasse	Planmäßige Nutzungsdauer	Dauerhaftigkeitsbemessung
XC1 (ständig nass) ²⁾ , XC2, XC4	$t_{SL} \leq 50$ Jahre	Normanforderungen nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 sowie DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA (für Materialien mit bekannter Zusammensetzung) <u>oder</u> Prüfung Carbonatisierungswiderstand $d_{K,90} \leq 2$ mm ³⁾ und Mindestbetondeckung $c_{min} = 25$ mm (insbesondere für Materialien mit unbekannter Zusammensetzung) <u>oder</u> Nachweis mit Nomogrammen in MDCC
	$t_{SL} > 50$ Jahre	Nachweis mit Nomogrammen in MDCC
XC3	$t_{SL} \leq 50$ Jahre	Normanforderungen nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 sowie DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA (für Materialien mit bekannter Zusammensetzung) <u>oder</u> Prüfung Carbonatisierungswiderstand $d_{K,90} \leq 2$ mm ³⁾ und Mindestbetondeckung $c_{min} = 20$ mm (insbesondere für Materialien mit unbekannter Zusammensetzung) <u>oder</u> Nachweis mit Nomogrammen in MDCC
	$t_{SL} > 50$ Jahre	Nachweis mit Nomogrammen in MDCC

¹⁾ Anforderungen an Mindestbetondeckung nach ZTV-W LB 215 sind stets einzuhalten:

ZTV-W LB 215 (2012):

(9) Die Mindestbetondeckung c_{min} beträgt 50 mm, das Vorhaltemaß ΔC_{dev} beträgt 10 mm, ...

²⁾ Keine Anforderungen bei der Expositionsklasse XC1 (trocken)

³⁾ Carbonatisierungstiefe von maximal 2 mm nach 90 Tagen Lagerung in der Kurzzeitlaborprüfung nach Anlage A

Tabelle 1.1: Übersicht über die Dauerhaftigkeitsbemessung von *neu zu errichtenden* Bauteilen bei Carbonatisierung ¹⁾

Expositions- klasse	planmäßige Nutzungsdauer	Instandsetzungssysteme nach ZTV-W LB 219			
		3. Beton	4. Spritzbeton (verankert, bewehrt)	5. Spritzmörtel/Spritzbeton (unverankert, unbewehrt)	
				6. Betonersatz im Handauftrag (unverankert, unbe- wehrt)	
				a) bekannte Zusammensetzung	b) unbekannte Zusammensetzung
XC1 (ständig nass) ²⁾ , XC2, XC4	t _{SL} ≤ 50 Jahre	Normanforderungen nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 bzw. DIN EN 14487 und DIN 18551 sowie DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA <u>oder</u> Prüfung Carbonatisierungswiderstand d _{K,90} ≤ 2 mm ³⁾ und Mindestschichtdicke d _{E,min} = 25 mm <u>oder</u> Nachweis mit Nomogrammen in MDCC		Prüfung Carbonatisie- rungswiderstand d _{K,90} ≤ 2 mm ³⁾ und Min- destschichtdicke d _{E,min} = 25 mm <u>oder</u> Nachweis mit Nomo- grammen in MDCC	
	t _{SL} > 50 Jahre	Nachweis mit Nomogrammen in MDCC			
XC3	t _{SL} ≤ 50 Jahre	Normanforderungen nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 bzw. DIN EN 14487 und DIN 18551 sowie DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA <u>oder</u> Prüfung Carbonatisierungswiderstand d _{K,90} ≤ 2 mm ³⁾ und Mindestschichtdicke d _{E,min} = 20 mm <u>oder</u> Nachweis mit Nomogrammen in MDCC		Prüfung Carbonatisie- rungswiderstand d _{K,90} ≤ 2 mm ³⁾ und Min- destschichtdicke d _{E,min} = 20 mm <u>oder</u> Nachweis mit Nomo- grammen in MDCC	
	t _{SL} > 50 Jahre	Nachweis mit Nomogrammen in MDCC			

¹⁾ Anforderungen an Mindestbetondeckung nach ZTV-W LB 219 sind stets einzuhalten; verbleibende Altbetondeckungen dürfen berücksichtigt werden, sofern die im Abschnitt 2 dieses Merkblatts beschriebenen Randbedingungen für den Altbeton eingehalten werden: ZTV-W LB 219 (2017), Abschnitt 0.2:

- Die Mindestbetondeckung c_{min} beträgt 40 mm, das Vorhaltemaß Δc beträgt 10 mm.
- Werden bei Spritzmörtel/Spritzbeton gemäß Abschnitt 4 und 5 die Oberflächen spritzrau belassen, ist die Mindestbetondeckung c_{min} um 5 mm zu erhöhen.

²⁾ Keine Anforderungen bei der Expositionsklasse XC1 (trocken)

³⁾ Carbonatisierungstiefe von maximal 2 mm nach 90 Tagen Lagerung in der Kurzzeitlaborprüfung nach Anlage A

Tabelle 1.2: Übersicht über die Dauerhaftigkeitsbemessung von **Betonersatz bei Carbonatisierung** ¹⁾

Expositions- klasse	planmäßige Nutzungsdauer	Dauerhaftigkeitsbemessung
XS2, XS3, XD2, XD3	$t_{SL} \leq 50$ Jahre	Normanforderungen nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 sowie Bindemittelauswahl ²⁾ und Betondeckung ¹⁾ nach ZTV-W LB 215 <u>oder</u> Nachweis mit Nomogrammen in MDCC
	$t_{SL} > 50$ Jahre	Nachweis mit Nomogrammen in MDCC
XS1, XD1	$t_{SL} \leq 100$ Jahre	Normanforderungen nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 sowie DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA

¹⁾ Anforderungen an Mindestbetondeckung nach ZTV-W LB 215 sind stets einzuhalten:

ZTV-W LB 215 (2012):

(9) Die Mindestbetondeckung c_{min} beträgt 50 mm, das Vorhaltemaß Δc_{dev} beträgt 10 mm, ...

²⁾ ZTV-W LB 215 (2012):

(51) Für Betone der Expositionsclassen XD2, XS2, XD3 und XS3 dürfen nur folgende Bindemittel verwendet werden:

- CEM I- und CEM II-Zemente nach (22), in Verbindung mit Flugasche als Betonzusatzstoff, wobei der Flugaschegehalt mindestens 20 M.-% von (z+f) betragen muss.
- CEM III/A in Verbindung mit Flugasche als Betonzusatzstoff, wobei der Flugaschegehalt mindestens 10 M.-% von (z+f) betragen muss.
- CEM III/B.

Tabelle 1.3: Übersicht über die Dauerhaftigkeitsbemessung von *neu zu errichtenden* Bauteilen unter Chlorideinwirkung ¹⁾

Expositions- klasse	planmäßige Nutzungsdauer	Instandsetzungssysteme nach ZTV-W LB 219			
		3. Beton	4. Spritzbeton (verankert, bewehrt)	5. Spritzmörtel/Spritzbeton (unverankert, unbewehrt)	
				6. Betonersatz im Handauftrag (unverankert, unbe- wehrt)	
				a) bekannte Zusammensetzung	b) unbekannte Zusammensetzung
XS2, XS3, XD2, XD3,	$t_{SL} \leq 50$ Jahre	Normanforderungen nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 bzw. DIN EN 14487 und DIN 18551 sowie Bindemittelauswahl ²⁾ und Be- tondeckung ¹⁾ nach ZTV-W LB 219 <u>oder</u> Nachweis mit Nomogrammen in MDCC		Nachweis mit Nomogrammen in MDCC	
	$t_{SL} > 50$ Jahre	Nachweis mit Nomogrammen in MDCC			
XS1, XD1	$t_{SL} \leq 100$ Jahre	Normanforderungen nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 bzw. DIN EN 14487 und DIN 18551 sowie Bindemittelauswahl ²⁾ und Betondeckung ¹⁾ nach ZTV-W LB 219		Bemessung nach Ermessen des Sachkundigen Planers	

¹⁾ Anforderungen an Mindestbetondeckung nach ZTV-W LB 219 sind stets einzuhalten; verbleibende Altbetondeckungen dürfen berücksichtigt werden, sofern die im Abschnitt 2 dieses Merkblatts beschriebenen Randbedingungen für den Altbeton eingehalten werden: ZTV-W LB 219 (2017), Abschnitt 0.2:

- Bei Bauteilen mit den Expositionsclassen XD und XS beträgt die Mindestbetondeckung c_{min} 50 mm, das Vorhaltemaß Δc beträgt 10 mm. Die Mindestbetondeckung c_{min} darf bis auf 40 mm abgesenkt werden, wenn ein entsprechender Nachweis der Dauerhaftigkeit für die vorgesehene Restnutzungsdauer geführt wird.
- Werden bei Spritzmörtel/Spritzbeton gemäß Abschnitt 4 und 5 die Oberflächen spritzrau belassen, ist die Mindestbetondeckung c_{min} um 5 mm zu erhöhen.

²⁾ ZTV-W LB 219 (2017), Abschnitt 3.4.3 (189) bzw. Abschnitt 4.4.3 (346) (sowie Abschnitt 5.4 (397) und Abschnitt 6.4 (439)): Für Betone der Expositionsclassen XD2, XD3, XS2 und XS3 dürfen nur folgende Bindemittel nach Abschnitt (171) bzw. (328) verwendet werden:

- CEM I und CEM II-Zemente in Verbindung mit Flugasche als Betonzusatzstoff, wobei der Flugaschegehalt mindestens 20 M.-% von (z+f) betragen muss.
- CEM III/A in Verbindung mit Flugasche als Betonzusatzstoff, wobei der Flugaschegehalt mindestens 10 M.-% von (z+f) betragen muss.

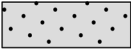
Tabelle 1.4: Übersicht über die Dauerhaftigkeitsbemessung von **Betonersatz** unter **Chlorideinwirkung** ¹⁾

2 Verfahren zum Erhalt oder zur Wiederherstellung der Passivität des Betonstahls

2.1 Formelzeichen

c	Betondeckung [mm]
d_a	Dicke des alkalischen Betons über der Bewehrung [mm]
$d_{c=1,5\%}$	Tiefe mit einem Chloridgehalt von 1,5 M.-% bezogen auf den Zementgehalt [mm]
$d_{c,krit}$	Tiefe des kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts [mm]
$d_{c,krit=0,5\%}$	Tiefe des kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts von 0,5 M.-% bezogen auf den Zementgehalt [mm]
d_E	Dicke des Betonersatzes [mm]
d_k	Carbonatisierungstiefe [mm]
$d_k(t_R)$	Carbonatisierungstiefe am Ende der Restnutzungsdauer [mm]
d_s	Betonstahldurchmesser [mm]

Legende der Bilder 2.1 bis 2.6:

	nicht carbonatisiert, chloridfrei
	carbonatisiert
	chloridbelastet
	Betonersatz / Betonergänzung

2.2 Literatur und Normative Verweisungen

- [1] DIN 1045-2 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1.
- [2] DIN EN 1504-9 Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken – Definitionen, Anforderungen, Qualitätsüberwachung und Beurteilung der Konformität – Teil 9: Allgemeine Grundsätze für die Anwendung von Produkten und Systemen.
- [3] DIN EN 14629 Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken – Prüfverfahren – Bestimmung des Chloridgehaltes in Festbeton.
- [4] DIN EN ISO 8501-1 Vorbereitung von Stahloberflächen vor dem Auftragen von Beschichtungsstoffen – Visuelle Beurteilung der Oberflächenreinheit – Teil 1: Rostgrade und Oberflächenvorbereitungsgrade von unbeschichteten Stahloberflächen und Stahloberflächen nach ganzflächigem Entfernen vorhandener Beschichtungen.
- [5] DIN EN ISO 8501-4 Vorbereitung von Stahloberflächen vor dem Auftragen von Beschichtungsstoffen – Visuelle Beurteilung der Oberflächenreinheit – Teil 4: Ausgangszustände, Vorbereitungsgrade und Flugrostgrade in Verbindung mit Hochdruck-Wasserwaschen.

- [6] Positionspapier des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton zum aktuellen Stand der Technik – Kritischer korrosionsauslösender Chloridgehalt. In Beton- und Stahlbetonbau 110, 2015, Heft 11, Seiten 784 bis 786.

2.3 Allgemeines

- (1) Zur vorbeugenden Abwehr von Korrosionsschäden bzw. zur Unterdrückung bereits ablaufender Korrosionsprozesse an der Bewehrung werden im Abschnitt 2 dieses Merkblatts die folgenden drei Verfahren gemäß DIN EN 1504-9, aus dem Prinzip „7. Erhalt oder Wiederherstellung der Passivität“, behandelt:
- Verfahren 7.1 „Erhöhung bzw. Teilersatz der Betondeckung“
 - Verfahren 7.2 „Ersatz von chloridhaltigem oder carbonatisiertem Beton“
 - Verfahren 7.4 „Realkalisierung von carbonatisiertem Beton durch Diffusion“

ANMERKUNG: Die genauen Bezeichnungen der Verfahren 7.1 und 7.2 in DIN EN 1504-9 [2] lauten: Verfahren 7.1 „Erhöhung der Betondeckung mit zusätzlichem Mörtel oder Beton“, Verfahren 7.2 „Ersatz von schadstoffhaltigem oder karbonatisiertem Beton“.

- (2) Wenn bei Stahlbetonbauteilen im Bereich der Bewehrungslage Chloridgehalte über 0,5 % Cl, bezogen auf die Zementmasse ermittelt werden, ist bei der Instandhaltungsplanung festzulegen, ob Maßnahmen zur Abwehr von Korrosionsschäden erforderlich sind. Dies gilt auch dann, wenn an der Betonoberfläche keine Anzeichen von Korrosion an der Bewehrung feststellbar sind. Bei unbekannter Betonzusammensetzung ist der Zementgehalt auf der sicheren Seite liegend abzuschätzen. Werden Zusatzstoffe vom Typ II verwendet und auf den Zementgehalt angerechnet, darf der Chloridgehalt als Chloridionengehalt (Massenanteil bezogen auf den Zement), zuzüglich der Gesamtmasse der zu berücksichtigenden Zusatzstoffe, angesetzt werden, d. h. $M\text{-}\% / z_{eq}$ (s. DIN 1045-2 [1] und Abschnitt 4.1).

ANMERKUNG 1: Der Chloridgehalt von 0,5 M.-%, bezogen auf die Zementmasse, dient als ein „Schwellenwert“ für den kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalt im Bereich der Bewehrungslage für den ungerissenen Beton. Dieser Schwellenwert ist von dem kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalt insofern abzugrenzen, dass bei dessen Überschreitung nicht notwendigerweise der kritische Grenzzustand der Depassivierung eintritt, sondern lediglich eine Ereigniskette, nämlich eine Begutachtung durch den Sachkundigen Planer mit gegebenenfalls anschließenden Maßnahmen, in Gang gesetzt wird (s. [6]). Für die Beurteilung des Chloridgehaltes im Bereich von Rissen oder Fehlstellen und die Erfordernis für eine Instandsetzung ist eine gesonderte Betrachtung des Sachkundigen Planers notwendig.

ANMERKUNG 2: Mit „Chloridgehalt“ wird in diesem Merkblatt der Gesamtgehalt an säurelöslichem (freiem und gebundenem) Chlorid im Festbeton bezeichnet. Die Bestimmung des Chloridgehalts erfolgt nach DIN EN 14629 [3].

2.4 Verfahren 7.1 „Erhöhung bzw. Teilersatz der Betondeckung“

- (1) Bei diesem Verfahren wird nach Betonabtrag der Betonersatz per Hand, durch Betonieren oder im Spritzverfahren aufgetragen.
- (2) Mit diesem Verfahren wird das Ziel verfolgt, die vorhandene Passivität der Bewehrung über die Restnutzungsdauer zu erhalten.

- (3) Hinsichtlich der Carbonatisierung ist hierfür nachzuweisen, dass die Carbonatisierungsfront den Bewehrungsstahl nicht vor dem Ende der Restnutzungsdauer erreicht. Die Dicke der nicht carbonatisierten Altbetonschicht darf bei diesem Nachweis berücksichtigt werden (vgl. Bild 2.1).

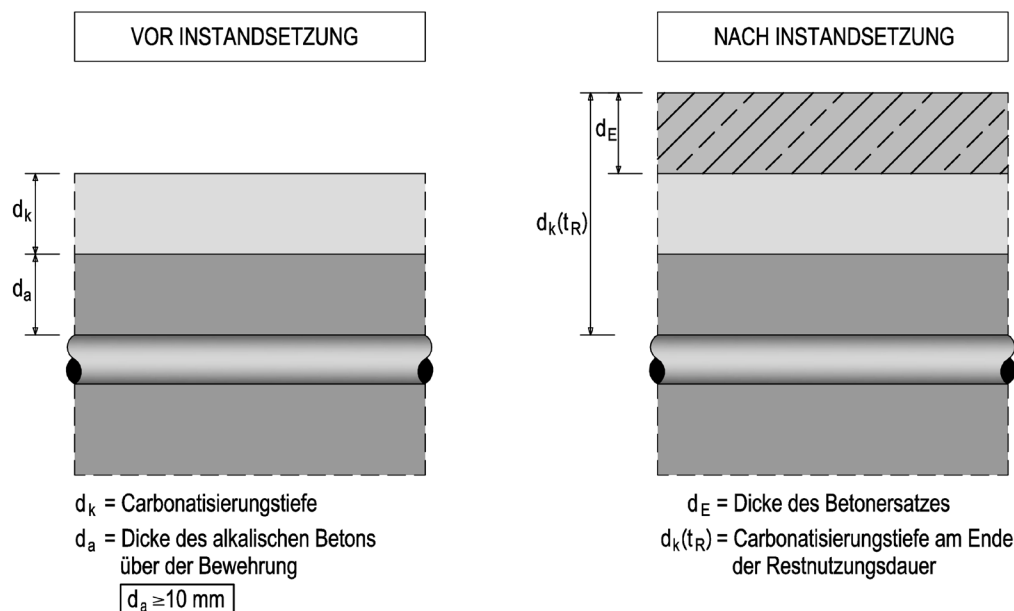


Bild 2.1: Schematische Darstellung der Bedingungen für das Verfahren 7.1 (bei Carbonatisierung)

- (4) Das Verfahren kann bei Chlorideinwirkung nur angewendet werden, wenn sichergestellt ist, dass durch Umverteilung des bereits im Altbeton vorhandenen Chlorids unter dem Einfluss des nach der Instandsetzung eindringenden Chlorids über den Zeitraum der Restnutzungsdauer keine Depassivierung der Bewehrung erfolgen kann. Dies kann gemäß Bild 2.2 als gegeben angenommen werden, wenn gleichzeitig:
- a) der Abstand des kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehaltes von 0,5 M.-%, bezogen auf den Zementgehalt, (s. 2.3 (2)) zur Bewehrungsoberfläche mindestens 10 mm beträgt und
 - b) der Chloridgehalt in der verbleibenden Altbetonschicht 1,5 M.-%, bezogen auf den Zementgehalt, nicht überschreitet.

Der Altbeton muss ggf. so tief abgetragen werden, bis diese Kriterien eingehalten sind.

ANMERKUNG: Der Transport von Chlorid aus dem Altbeton in den Betonersatz wird bei diesem Nachweis nicht betrachtet.

- (5) Bei der Bemessung der Schichtdicke des Betonersatzes d_E darf der Chloridgehalt in der ergänzten Schicht an der der Beaufschlagung abgewandten Seite (strichpunktierte Linie in Bild 2.2, rechts) einen Wert von 0,5 % Cl, bezogen auf die Zementmasse, vor dem Ende der Restnutzungsdauer nicht überschreiten. Dabei ist die Bemessung der Dicke des Betonersatzes d_E im Hinblick auf den kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalt vereinfachend am einseitig beaufschlagten Einschichtsystem ohne Einflüsse aus dem Altbeton durchzuführen.

- (6) Für die Bemessung der Schichtdicke des Betonersatzes sind in den Abschnitten 3 und 4 dieses Merkblatts entsprechende Nachweisverfahren für Systeme mit bekannter und unbekannter Zusammensetzung enthalten.

ANMERKUNG: Die neue Betondeckung darf bei entsprechender Nachweisführung eine geringere Dicke als die alte Betondeckung aufweisen. Hierbei sind die Anforderungen an die Mindestbetondeckung einzuhalten.

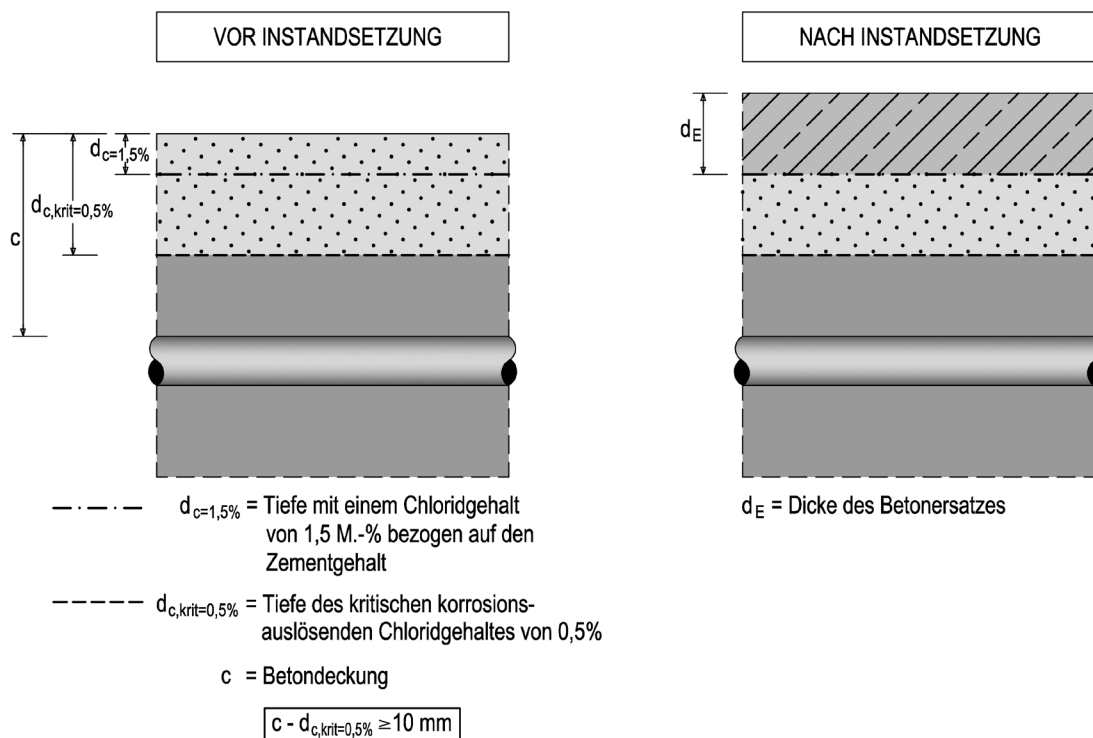


Bild 2.2: Schematische Darstellung der Bedingungen für das Verfahren 7.1 (bei Chloridbeaufschlagung)

- (7) Abweichung zu den vorstehenden Regelungen muss der Sachkundige Planer bei sehr großen Chlorideindringtiefen entscheiden, welcher Chloridgehalt bis in eine bestimmte Tiefe hinter der Bewehrung verbleiben darf.
- (8) Polymermörtel und Polymerbetone sind für dieses Verfahren nicht anwendbar.

2.5 Verfahren 7.2 „Ersatz von chloridhaltigem oder carbonatisiertem Beton“

- (1) Bei diesem Verfahren wird nach Betonabtrag der Betonersatz per Hand, durch Betonieren oder im Spritzverfahren aufgetragen.
- (2) Dieses Verfahren darf angewendet werden,
- a) wenn die Bewehrung durch Carbonatisierung örtlich oder vollflächig depassiviert ist, oder
 - b) wenn der kritische korrosionsauslösende Chloridgehalt (s. 2.3 (2)) örtlich oder vollflächig überschritten ist.

In diesem Fall wird carbonatisierter oder chloridhaltiger Altbeton durch Betonersatz ersetzt und gegebenenfalls ergänzt.

- (3) Mit diesem Verfahren wird das Ziel verfolgt, die Passivität der Bewehrung wiederherzustellen und über die Restnutzungsdauer zu erhalten.
- (4) Bei bis hinter die Bewehrung carbonatisiertem Altbeton ist dieser bei Betonstahldurchmessern $d_s < 16$ mm bis mindestens 10 mm hinter und 20 mm neben der Bewehrung zu entfernen. Bei Betonstählen mit Durchmesser $d_s \geq 16$ mm sind hinter den Betonstählen mindestens 15 mm Altbeton zu entfernen (s. Bild 2.3). Der Altbeton muss darüber hinaus so weit entfernt werden, dass ein hohlstellenfreies Einbringen des Betonersatzes ermöglicht wird. Bei der Festlegung des Betonausbruches sind Auswirkungen auf die Standsicherheit zu beachten.

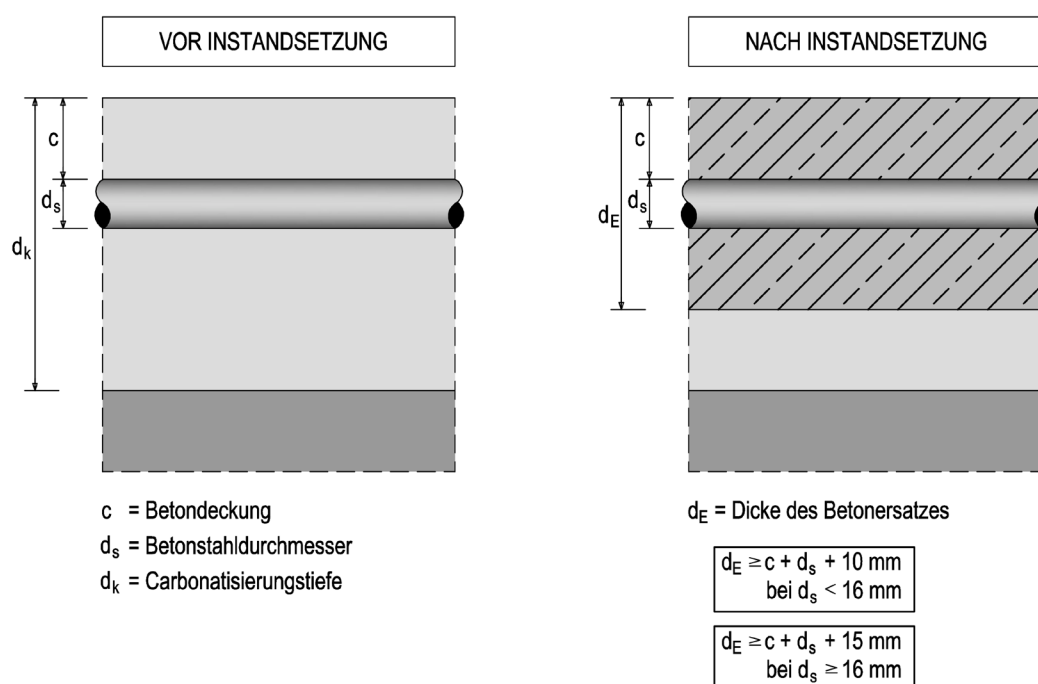


Bild 2.3: Schematische Darstellung der Bedingungen für das Verfahren 7.2 (bei Carbonatisierung bis hinter die Bewehrung)

- (5) Der Altbeton mit Chloridgehalten oberhalb des kritischen korrosionsauslösenden Wertes (s. 2.3 (2)) ist vollständig zu entfernen (s. Bild 2.4). Bei großen Chlorideindringtiefen muss der Beton bis mindestens 30 mm hinter die Bewehrung entfernt werden (s. Bild 2.5). In diesem Fall darf der Chloridgehalt im verbleibenden Altbeton 1,5 M.-%, bezogen auf den Zementgehalt, nicht überschreiten. Höhere verbleibende Chloridgehalte im Altbeton sind nur bei entsprechenden Nachweisen zulässig.

ANMERKUNG: Schwankungen der Chlorideindringtiefen können durch Sicherheitszuschläge berücksichtigt werden.

- (6) Das Größtkorn des Betonersatzes ist auf die Abtragstiefe hinter der Bewehrung abzustimmen. Es darf maximal 1/3 der Abtragstiefe hinter der Bewehrung betragen.
- (7) Stahloberflächen sind so zu behandeln, dass im gesamten freigelegten Bereich mindestens ein Oberflä-

chenvorbereitungsgrad Sa 2 nach DIN EN ISO 8501-1 [4] oder Wa 2 nach DIN EN ISO 8501-4 [5] oder St 2 nach DIN EN ISO 8501-1 [4] erreicht wird.

- (8) Im Hinblick auf Carbonatisierung ist sicherzustellen, dass am Ende der Restnutzungsdauer die Carbonatisierungsfront im Betonersatz den Bewehrungsstahl nicht erreicht.
- (9) Bei Chlorideinwirkung ist sicherzustellen, dass der kritische korrosionsauslösende Chloridgehalt auf der Bewehrungsoberfläche nicht vor dem Ende der Restnutzungsdauer erreicht wird. Die Bemessung der Dicke des Betonersatzes im Hinblick auf den kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalt ist am einseitig exponierten Einschichtsystem durchzuführen.
- (10) Für die Bemessung der Schichtdicke des Betonersatzes sind in den Abschnitten 3 und 4 dieses Merkblatts entsprechende Nachweisverfahren für Systeme mit bekannter und unbekannter Zusammensetzung enthalten.

ANMERKUNG: Die neue Betondeckung darf bei entsprechender Nachweisführung eine geringere Dicke als die alte Betondeckung aufweisen. Hierbei sind die Anforderungen an die Mindestbetondeckung einzuhalten.

- (11) Polymermörtel und Polymerbetone sind für dieses Verfahren nicht anwendbar.

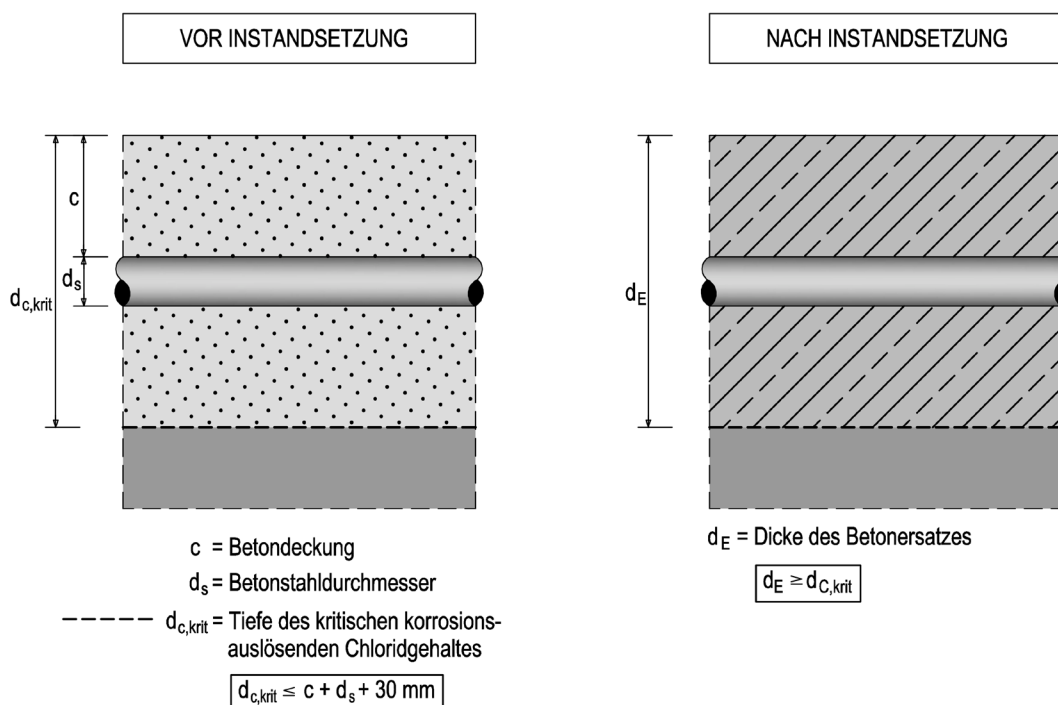


Bild 2.4: Schematische Darstellung der Bedingungen für das Verfahren 7.2 (Tiefe des kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts bis maximal 30 mm hinter der Bewehrung)

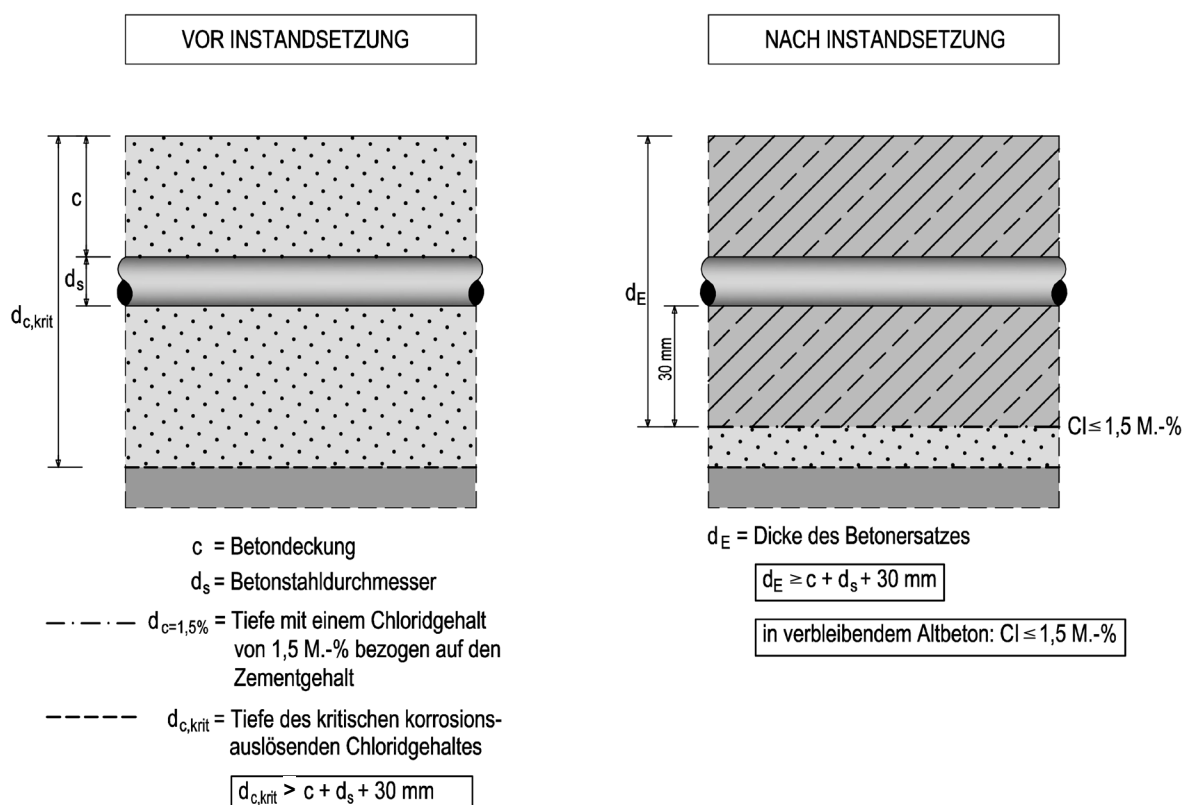


Bild 2.5: Schematische Darstellung der Bedingungen für das Verfahren 7.2 (Tiefe des kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts größer als 30 mm hinter der Bewehrung)

2.6 Verfahren 7.4 „Realkalisierung von carbonatisiertem Beton durch Diffusion“

- (1) Bei diesem Verfahren wird nach Betonabtrag der Betonersatz per Hand, durch Betonieren oder im Spritzverfahren aufgetragen.
- (2) Dieses Verfahren darf angewendet werden, wenn die Bewehrung durch Carbonatisierung örtlich oder vollflächig depassiviert ist oder nur noch wenige Millimeter Abstand zwischen Carbonatisierungsfront und Bewehrungsstahl liegen und kein Chlorid in den Beton eingedrungen ist. Die Realkalisierung wird durch Diffusion der Hydroxidionen aus dem aufgetragenen Betonersatz und dem nicht carbonatisierten Altbeton in den carbonatisierten Altbeton erreicht, die dort den pH-Wert erhöhen und die Bewehrung repassivieren.
- (3) Mit diesem Verfahren wird das Ziel verfolgt, die Passivität der Bewehrung wiederherzustellen und über die Restnutzungsdauer zu erhalten.
- (4) Geschädigter (gelockerter) Altbeton ist zu entfernen.
- (5) Das Verfahren darf nur angewandt werden, wenn die Carbonisierungstiefe im Altbeton kleiner als 40 mm ist.
- (6) Die Bemessung der Dicke der Betonergänzung ist vereinfachend am einseitig exponierten Einschichtsystem durchzuführen. Es ist nachzuweisen, dass am Ende der Restnutzungsdauer die Carbonatisierungs-

front im aufgetragenen Betonersatz verbleibt. Unabhängig von der Bemessung ist eine Mindestdicke für den Betonersatz von 20 mm einzuhalten (s. Bild 2.6).

ANMERKUNG: Durch Einhaltung der Randbedingungen in den Absätzen (5) und (6) wird davon ausgegangen, dass, bedingt durch beidseitige Diffusion von Hydroxidionen in den carbonatisierten Altbeton, eine ausreichende Alkalität für eine dauerhafte Repassivierung des Bewehrungsstahles zur Verfügung steht.

- (7) Für die Bemessung der Schichtdicke des Betonersatzes ist im Abschnitt 3 dieses Merkblatts entsprechende Nachweisverfahren für Systeme mit bekannter und unbekannter Zusammensetzung gegeben.

ANMERKUNG: Die neue Betondeckung darf bei entsprechender Nachweisführung eine geringere Dicke als die alte Betondeckung aufweisen. Hierbei sind die Anforderungen an die Mindestbetondeckung einzuhalten.

- (8) Polymermörtel oder Polymerbetone sind für dieses Verfahren nicht anwendbar.

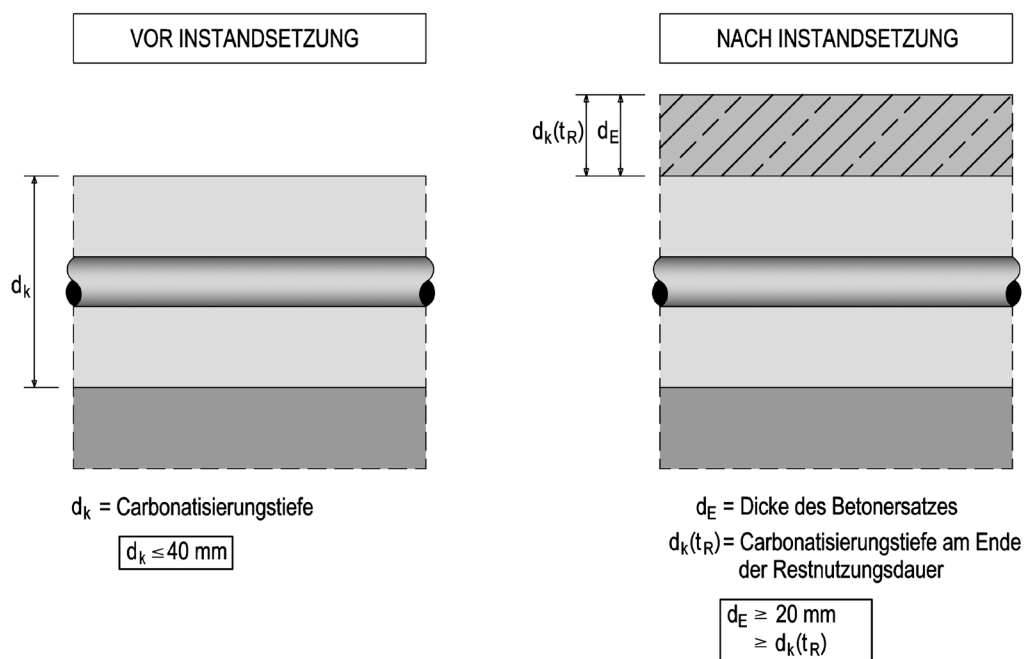


Bild 2.6: Schematische Darstellung der Bedingungen für das Verfahren 7.4

3 Verfahren zur Abschätzung der Restnutzungsdauer und zur Bemessung von neu zu errichtenden Bauteilen und von Instandsetzungsmaßnahmen mittels Betonersatz bei Carbonatisierung

3.1 Formelzeichen

β_0	Zielwert des Zuverlässigkeitsindex (Zielzuverlässigkeit) [-]
$c_{\min}$	Mindestbetondeckung [mm]
c_{nom}	Nennwert der Betondeckung [mm], entspricht dem charakteristischen Wert (d. h. Mittelwert) der Betondeckung
$d_{E,\min}$	Mindestschichtdicke [mm]; 5 %-Quantil der gemessenen oder berechneten Dicke; Bemessungswert der Schichtdicke (= $d_{E,d}$)
$d_{E,\text{nom}}$	nominale Schichtdicke [mm]; mittlere Schichtdicke; charakteristischer Wert der Schichtdicke
$d_{k,90}$	Carbonatisierungstiefe nach 90 Tagen Lagerung in der Kurzzeitlaborprüfung nach Anlage A [mm]
Δc	Vorhaltemaß der Betondeckung [mm], welches sicherstellt, dass der größte Teil (95 % einer Normalverteilung) der Betondeckung größer ist als die Mindestbetondeckung
Δd_E	Vorhaltemaß der Schichtdicke [mm], welches sicherstellt, dass der größte Teil (95 % einer Normalverteilung) der Schichtdicke größer ist als die Mindestschichtdicke
γ_f	Sicherheitsbeiwert [-]
h_{Nd}	Tagesmenge Niederschlag [mm]
k	Faktor zur Berücksichtigung der Einflüsse aus der Materialzusammensetzung, der Ausführungsart und -qualität und der Einwirkungsintensität auf den Carbonatisierungsfortschritt des Betons [mm/Jahr ^{0,5}]
k_d	am Bauteil über Inspektion ermittelter Bemessungswert der Carbonatisierungsrate [mm/Jahr ^{0,5}]
k_{NAC}	im Kurzzeitlaborversuch ermittelte Carbonatisierungsrate bei natürlicher CO ₂ -Konzentration der Luft ((0,040 ± 0,001) Vol.-%) und 20 °C / 65 % r. F. [mm/Jahr ^{0,5}]
p_{SR}	Schlagregenwahrscheinlichkeit für vertikale Flächen (für horizontale Flächen $p_{\text{SR}} = 1,0$) [-]
RH_{ist}	relative Luftfeuchte (Umgebungsfeuchte) [%]
t_c	Nachbehandlungsdauer [d]
t_{insp}	Zeitpunkt der Inspektion (Ermittlung der Carbonatisierungstiefe) [Jahr]
t_{SL}	planmäßige Nutzungsdauer (Zielnutzungsdauer) [Jahr]; SL = Service Life
ToW	Regenhäufigkeit (Time of Wetness) [-]
$x_{c,d}(t)$	Bemessungswert der Carbonatisierungstiefe [mm] zum Zeitpunkt t [Jahr]
$x_{\text{cm}}(t)$	mittlere Carbonatisierungstiefe im Kurzzeitlaborversuch [mm] zum Zeitpunkt $t \geq 140$ Tage
W	Faktor zur Berücksichtigung des Einflusses aus den meso-klimatischen Feuchtebedingungen am Bauteil auf den Carbonatisierungsfortschritt des Betons [-]

3.2 Literatur und Normative Verweisungen

- [1] DAfStb Vergussbeton und Vergussmörtel: Herstellung und Verwendung von zementgebundenem Vergussbeton und Vergussmörtel.
- [2] DAfStb Trockenbeton-Richtlinie: Herstellung und Verwendung von Trockenbeton und Trockenmörtel.
- [3] DIN EN 206-1 Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206-1.
- [4] DIN 1045-2 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1.
- [5] DIN 18551 Spritzbeton – Nationale Anwendungsregeln zur Reihe DIN EN 14487 und Regeln für die Bemessung von Spritzbetonkonstruktionen.
- [6] DIN EN 1990 Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990 + A1 + A1/AC.
- [7] DIN EN 14487 Spritzbeton – Teil 1: Begriffe, Festlegungen und Konformität; Deutsche Fassung EN 14487-1.
- [8] *fib* bulletin 34, Model Code for Service Life Design, 2006.
- [9] Gehlen, Ch. (2000): Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken. Heft 510 der Schriftenreihe des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton, Beuth Verlag, Berlin.
- [10] Greve-Dierfeld S. von (2015): Bemessungsregeln zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit XC-exponierter Stahlbetonbauteile. Heft 622 der Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Beuth Verlag, Berlin.
- [11] Positionspapier des DAfStb zur Umsetzung des Konzepts von leistungsbezogenen Entwurfsverfahren unter Berücksichtigung von DIN EN 206-1, Anlage J in: Beton- und Stahlbetonbau 103 (2008, Heft 12, Seiten 837 bis 839).
- [12] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau (ZTV-W) für Wasserbauwerke aus Beton und Stahlbeton (Leistungsbereich 215), Ausgabe 2012. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS).
- [13] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau (ZTV-W) für die Instandsetzung der Betonbauteile von Wasserbauwerken (Leistungsbereich 219), Ausgabe 2017. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).

3.3 Allgemeines

- (1) Für Betonbauteile unter CO₂-Angriff (Expositionsklassen XC1 bis XC4) beinhaltet folgender
 - Abschnitt 3.4 einen vereinfachten Nachweis für die Abschätzung der Restnutzungsdauer bestehender Bauteile (ohne Instandsetzung)
 - Abschnitt 3.5.3 einen vereinfachten Nachweis für die Bemessung von neu zu errichtenden Bauteilen sowie von Instandsetzungsmaßnahmen mittels Betonersatz in Abhängigkeit der geplanten Nutzungsdauer.
- (2) Die Restnutzungsdauer bzw. die planmäßige Nutzungsdauer (nach dem Bau bzw. nach der Instandsetzungsmaßnahme) wird verknüpft mit der Festlegung eines relevanten Grenzzustandes und einem Zuverlässigkeitsniveau, das während dieser Zeit entsprechend dem Grenzzustand nicht unterschritten werden darf.
- (3) Globale Vorgaben für das Zuverlässigkeitsniveau sind in DIN EN 1990 [6] enthalten. Für die Nachweise nach diesem Merkblatt werden die Empfehlungen aus [11] zugrunde gelegt, siehe Tabelle 3.1.

Expositionsklasse	XC1		XC2	XC3	XC4
Beschreibung	trocken (innen)	ständig nass	nass, selten trocken	mäßige Feuchte (außen, geschützt)	wechselnd nass und trocken (außen, bewittert)
Zielwert des Zuverlässigkeitsindex β_0	keine Anforderung	1,5	1,5	0,5	1,5

Tabelle 3.1: Empfehlungen zum Zielwert des Zuverlässigkeitsindex bei XC-exponierten Bauteilen gemäß [11]

3.4 Ermittlung der Restnutzungsdauer bei Carbonatisierung

- (1) Als vereinfachtes Verfahren für die Prognose der Carbonatisierungstiefe kann das Wurzel-Zeit-Gesetz verwendet werden:

$$x_{c,d}(t) = \gamma_f \cdot k \cdot W \cdot \sqrt{t} \quad (1)$$

Dabei ist:

$x_{c,d}(t)$	Bemessungswert der Carbonatisierungstiefe [mm] zum Zeitpunkt t [Jahr]
k	Faktor zur Berücksichtigung der Einflüsse aus der Materialzusammensetzung, der Ausführungsart und -qualität und der Einwirkungsintensität auf den Carbonatisierungsfortschritt des Betons [mm/Jahr ^{0,5}]
W	Faktor zur Berücksichtigung des Einflusses aus den meso-klimatischen Feuchtebedingungen am Bauteil auf den Carbonatisierungsfortschritt des Betons [–]
γ_f	Beiwert zur Sicherstellung der Zielzuverlässigkeit [–] (aus [10]) $\gamma_f = 1,25$ für XC1 (ständig nass), XC2 und XC4 ($\beta_0 = 1,5$) $\gamma_f = 0,70$ für XC3 ($\beta_0 = 0,5$)

- (2) Der Bemessungswert der Carbonatisierungsrate k_d , gebildet aus den Parametern k und W und dem Sicherheitsbeiwert γ_f , kann direkt aus Messungen der Carbonatisierungstiefe am Bauteil ermittelt werden:

$$k_d = \gamma_f \cdot k \cdot W = \gamma_f \cdot \frac{x_c(t_{insp})}{\sqrt{t_{insp}}} \text{ [mm/Jahr}^{0,5}] \quad (2)$$

Dabei ist:

$x_c(t_{insp})$ mittlere Carbonatisierungstiefe [mm] zum Untersuchungs-/ Inspektionszeitpunkt t_{insp} [Jahr]

- (3) Das Wurzel-Zeit-Gesetz liegt mit zunehmender Umgebungsfeuchtigkeit zunehmend auf der sicheren Seite.
- (4) Das Kriterium für die Restnutzungsdauer ergibt sich aus dem Vergleich des Verlaufes des Bemessungswertes der Carbonatisierungstiefe mit der vorhandenen, durch Inspektion ermittelten Mindestbetondeckung:

$$x_{c,d}(t) < c_{min} \quad (3)$$

- (5) Als Mindestbetondeckung c_{min} ist das 5%-Quantil der am Bauteil gemessenen Betondeckung anzusetzen oder Informationen aus den Planungsunterlagen auszuwerten.

3.5 Bemessung von neu zu errichtenden Bauteilen und Betonersatz bei Carbonatisierung

3.5.1 Einfache Bemessung für Beton, Spritzbeton, Trockenbeton oder Vergussbeton

(1) Für

- Beton nach DIN EN 206-1 [3] in Verbindung mit DIN 1045-2 [4],
- Spritzbeton nach DIN EN 14487 [7] in Verbindung mit DIN 18551 [5],
- Trockenbeton nach DAfStb-Richtlinie „Herstellung und Verwendung von Trockenbeton und Trockenmörtel“ [2] oder
- Vergussbeton nach DAfStb-Richtlinie „Herstellung und Verwendung von zementgebundenem Vergussbeton und Vergussmörtel“ [1]

kann die Betondeckung / Schichtdicke für eine Nutzungsdauer von 50 Jahren deskriptiv auf Basis der relevanten Expositionsklassen XC1 bis XC4 unter Einhaltung der Anforderungen an die Mindestbetondeckung sowie an Baustoffe und Bauausführung in den entsprechenden Normen und Regelwerken festgelegt werden.

3.5.2 Einfache Bemessung bei unbekannter Zusammensetzung

- (1) Bei einer Carbonatisierungstiefe von maximal 2 mm nach 90 Tagen Lagerung ($d_{K,90}$) in der Kurzzeitlaborprüfung nach Anlage A kann die erforderliche Mindestbetondeckung c_{min} bzw. die Mindestschichtdicke $d_{E,min}$ des Betonersatzes auf der sicheren Seite liegend wie folgt gewählt werden:
- c_{min} bzw. $d_{E,min} = 20$ mm für XC3 bei einer geplanten Nutzungsdauer von 50 Jahren
 - c_{min} bzw. $d_{E,min} = 25$ mm für XC1 (ständig nass), XC2 und XC4 bei einer geplanten Nutzungsdauer von 50 Jahren.
- (2) Der charakteristische Wert der Betondeckung c_{nom} (nominale Betondeckung) bzw. der Schichtdicke $d_{E,nom}$ (nominale Schichtdicke) des Betonersatzes wird wie folgt berechnet:

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c$$

bzw.

$$d_{E,nom} = d_{E,min} + \Delta d_E$$

Dabei ist:

Δc Vorhaltemaß der Betondeckung [mm], $\Delta c = 10$ mm nach ZTV-W LB 215 [12]

Δd_E Vorhaltemaß der Schichtdicke [mm], abhängig vom Untergrund und der Ausführungsart zwischen 5 mm und 15 mm anzusetzen (10 mm nach ZTV-W LB 219 [13])

ANMERKUNG 1: Die nominale Schichtdicke entspricht der mittleren Schichtdicke. Das Vorhaltemaß Δd_E soll sicherstellen, dass der größte Teil (95 % einer Normalverteilung) der Schichtdicke größer ist als der Bemessungswert der Schichtdicke $d_{E,d} = d_{E,min}$. Dies gilt auch für Δc ; $c_d = c_{min}$.

ANMERKUNG 2: Der Nachweis zur Bemessung der Betondeckung und der Schichtdicke setzt die Einhaltung der Vorgaben im Hinblick auf die Ausführungsart und -qualität gemäß ZTV-W LB 215 [12] bzw. ZTV-W LB 219 [13] voraus.

3.5.3 Bemessung mit Hilfe von Nomogrammen

- (1) Der Nachweis erfolgt mit Hilfe von Nomogrammen (aus [10]), die auf Ergebnissen vollprobabilistischer Berechnungen mit validierten Vorhersagemodellen ([8, 9]) basieren. Die Nomogramme bilden den funktionalen Zusammenhang zwischen gewichtigen Modellvariablen ab, wobei jedoch nur eine stark reduzierte Anzahl von Modellvariablen für die Nachweise berücksichtigt wird.
- (2) Für die Bemessung wird eine mögliche Depassivierung des Betonstahls durch das Erreichen der Carbonatisierungsfront auf der Höhe der Betonstahloberfläche als Grenzzustand zugrunde gelegt.
- (3) Beim Nachweis wird aus den Nomogrammen in Abhängigkeit der charakteristischen Werte der im Labor bestimmten Carbonatisierungsrate k_{NAC} , der vorgesehenen Nachbehandlungsdauer t_c , der erwarteten Umgebungsfeuchte RH_{ist} , der erwarteten Häufigkeit der Wasserbenetzung der Bauteiloberfläche $ToW \cdot p_{SR}$ und der planmäßigen (weiteren) Nutzungsdauer t_{SL} der Bemessungswert der Betondeckung c_{min} (Mindestbetondeckung) bzw. der Schichtdicke des Betonersatzes $d_{E,min}$ (Mindestschichtdicke) abgelesen.
- (4) Der charakteristische Wert der Betondeckung c_{nom} (nominale Betondeckung) bzw. der Schichtdicke $d_{E,nom}$ (nominale Schichtdicke) des Betonersatzes ergibt sich nach 3.5.2 (2).
- (5) Die Carbonatisierungsrate k_{NAC} [mm/Jahr^{0,5}] gibt die Carbonatisierungsgeschwindigkeit bezogen auf die aktuelle natürliche CO₂-Konzentration der Luft an und wird wie folgt berechnet:

$$k_{NAC} = \frac{x_{cm}(t)}{\sqrt{t}} \quad (4)$$

Dabei ist:

$x_{cm}(t)$ mittlere Carbonatisierungstiefe im Kurzzeittestlaborversuch nach Anlage A [mm] zum Zeitpunkt t [Jahr] ($t \geq 140$ Tage)

- (6) Die mittlere Carbonatisierungstiefe $x_{cm}(t)$ wird in der Kurzzeittestlaborprüfung nach Anlage A ermittelt.
- (7) Bei vor direkter Bewitterung geschützten Bauteilen (Expositionsklasse XC3) kann der Bemessungswert der Betondeckung c_{min} bzw. der Schichtdicke $d_{E,min}$ aus dem Nomogramm im Bild 3.1 abgelesen werden.

- (8) Bei Bauteilen der Expositionsklassen XC1 (ständig nass), XC2 und XC4 kann der Bemessungswert der Betondeckung $c_{\min}$ bzw. der Schichtdicke $d_{E,\min}$ aus dem Nomogramm im Bild 3.2 abgelesen werden. Dabei wird die witterungsbedingte Verzögerung des Carbonatisierungsfortschritts (Wasserbenetzung auf der Bauteiloberfläche) durch die beiden Parameter ToW und p_{SR} berücksichtigt, die wie folgt definiert sind:

p_{SR} Schlagregenwahrscheinlichkeit für vertikale Flächen (für horizontale Flächen $p_{SR} = 1,0$) [-]

$$ToW = \frac{\text{Anzahl der Tage pro Jahr mit } h_{Nd} \geq 2,5 \text{ mm}}{365} \quad (5)$$

mit

ToW Regenhäufigkeit (Time of Wetness) [-]

h_{Nd} Tagesmenge Niederschlag [mm]

- (9) Die Parameter der Einwirkung RH_{ist} , p_{SR} und h_{Nd} können der nächstgelegenen Wetterstation, Erfahrungswerten oder relevanter Literatur entnommen werden.

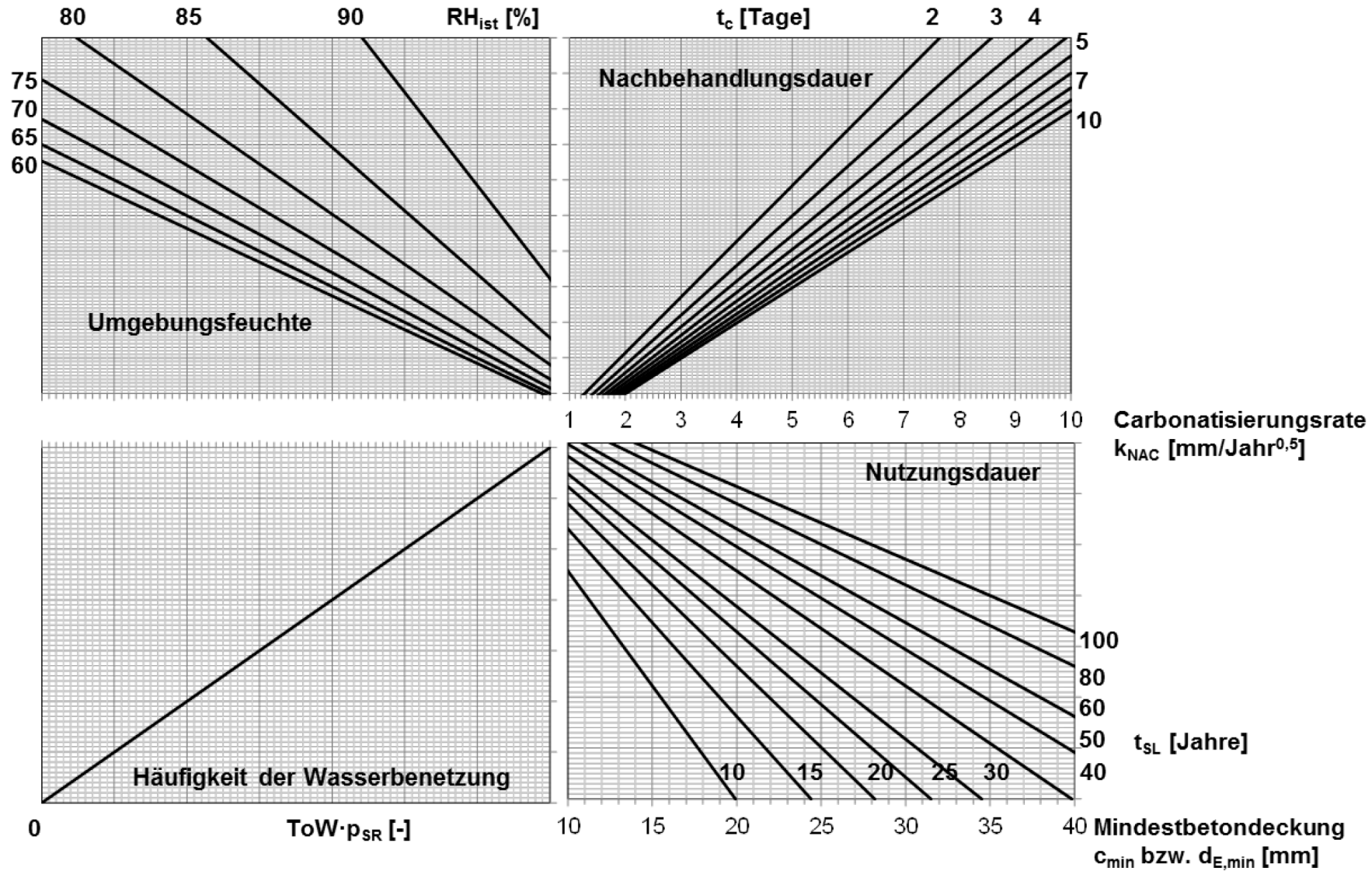


Bild 3.1: Nachweis der Betondeckung bzw. Schichtdicke bei Carbonatisierung für Bauteile der Expositionsklasse XC3 (vor Bewitterung geschützt) für eine Zielzuverlässigkeit von $\beta_0 = 0,5$ (aus [10])

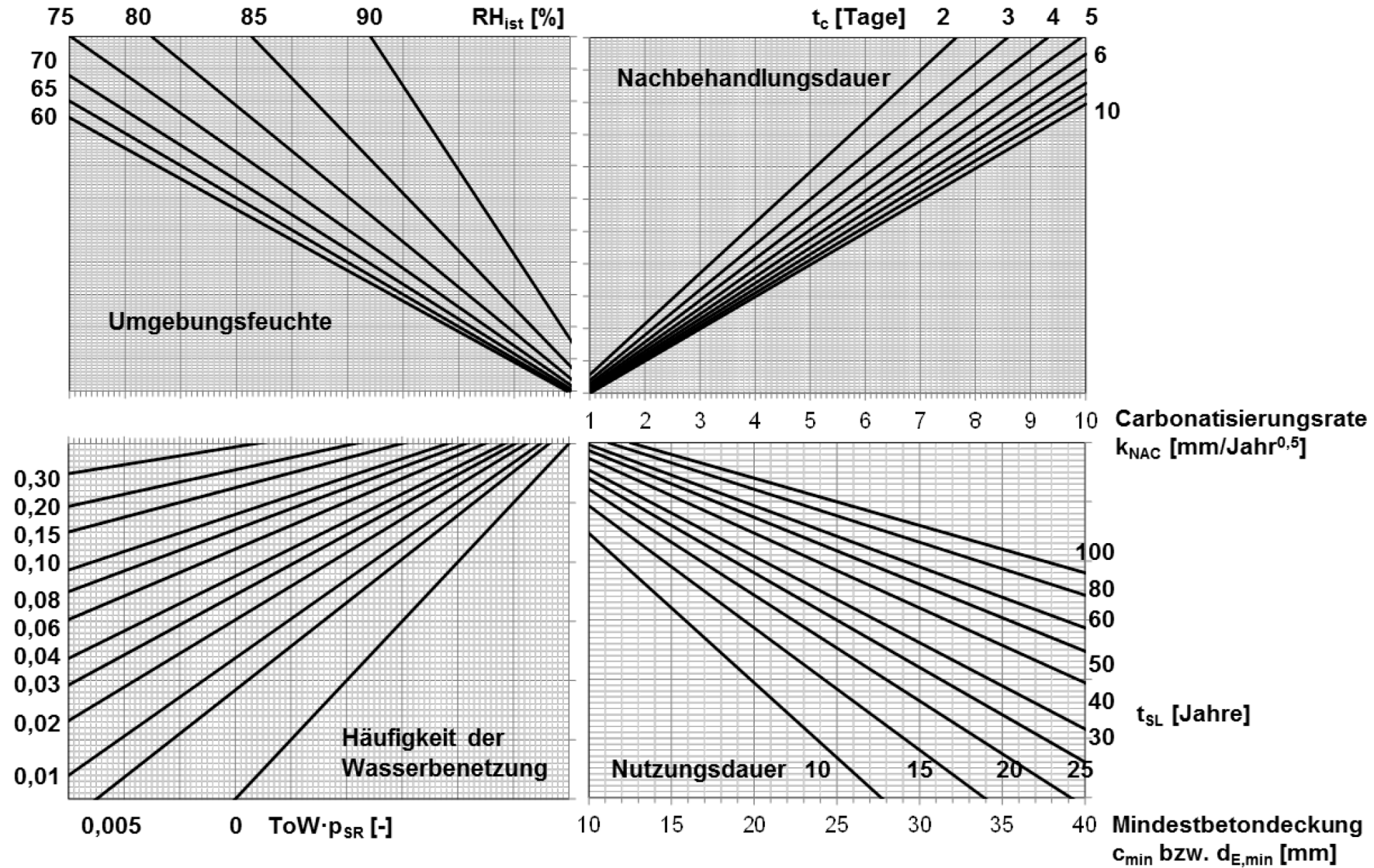


Bild 3.2: Nachweis der Betondeckung bzw. Schichtdicke bei Carbonatisierung für Bauteile der Expositionsklassen XC1 (ständig nass), XC2 und XC4 für einen Zielzuverlässigkeit von $\beta_0 = 1,5$ (aus [10])

3.6 Beispiele zur Abschätzung der Restnutzungsdauer und zur Bemessung von neu zu errichtenden Bauteilen und von Instandsetzungsmaßnahmen mittels Betonersatz bei Carbonatisierung

3.6.1 Ermittlung der Restnutzungsdauer eines vertikal nach Norden orientierten Fassadenelementes

Randbedingungen:

- Expositionsklasse: XC4
- Sicherheitsniveau: $\beta_0 = 1,5$

Inspektionsdaten:

- Zeit der Inspektion $t_{\text{insp}} = 9$ Jahre (Bauteilalter)
- ermittelte Carbonatisierungstiefe bei t_{insp} : $x_c(t_{\text{insp}}) = 9$ mm
- ermittelte Mindestbetondeckung: $c_{\text{min}} = 15$ mm

Lösung:

XC4 $\rightarrow \beta_0 = 1,5$ (Tabelle 3.1) und $\gamma_f = 1,25$ (s. 3.4 (1))

$$\text{Formel (2)} \rightarrow k_d = \gamma_f \cdot \frac{x_c(t_{\text{insp}})}{\sqrt{t_{\text{insp}}}} = 1,25 \cdot \frac{9}{\sqrt{9}} = 3,75 \left[\frac{\text{mm}}{\text{Jahr}^{0,5}} \right]$$

In Formel (1) wird für $x_{c,d}(t)$ die Mindestbetondeckung $c_{\text{min}} = 15$ mm angesetzt

$$\rightarrow t = \left(\frac{x_{c,d}(t)}{k_d} \right)^2 = \left(\frac{15}{3,75} \right)^2 = 16 \text{ Jahre}$$

$$\rightarrow t_{\text{gesamt}} = 16 \text{ Jahre} \rightarrow \text{Restnutzungsdauer: } 16 - 9 = 7 \text{ Jahre}$$

3.6.2 Bemessung der Schichtdicke bei Betonersatz für eine planmäßige Gesamtnutzungsdauer von $t_{\text{SL}} = 50$ Jahren (Fassadenelement vom Abschnitt 3.6.1)

Zeitpunkt der Instandsetzungsmaßnahme (angenommen): $t = 16$ Jahre

Ergebnis der Prüfung des Carbonatisierungswiderstandes des Instandsetzungsmaterials nach Anlage A:

$x_{\text{cm}} = 3,4$ mm nach 140 Tagen Lagerung

geplante Nachbehandlungsdauer $t_c = 7$ Tage

Information aus der nächstgelegenen Wetterstation:

- Durchschnittswert der Umgebungsfeuchte $RH_{\text{ist}} = 70$ %
- durchschnittliche Anzahl der Tage mit $h_{\text{Nd}} \geq 2,5$ mm = 62 Tage im Jahr
- durchschnittliche Verteilung der Windrichtungen während Niederschlagsereignissen:

N	Anteil in [%] der Niederschläge bei Wind aus der Richtung						
	NO	O	SO	S	SW	W	NW
3,2	3,1	2,8	5,0	8,1	22,1	25,1	17,0

Tabelle 3.2: Verteilung der Windrichtungen während Niederschlagsereignissen

Lösung:

$$\text{Formel (4)} \rightarrow k_{NAC} = \frac{3,4}{\sqrt{140/365}} = 5,5 \text{ [mm/Jahr}^{0,5}\text{]}$$

$$\text{Formel (5)} \rightarrow \text{ToW} = \frac{62}{365} = 0,170 \text{ [-]}$$

$$\text{Fassade nach Norden gerichtet} \rightarrow \text{aus Tabelle 3.2: } \rho_{SR} = 0,032 + 0,031 + 0,170 = 0,233 \text{ [-]}$$

$$\text{ToW} \cdot \rho_{SR} = 0,170 \cdot 0,233 = 0,040 \text{ [-]}$$

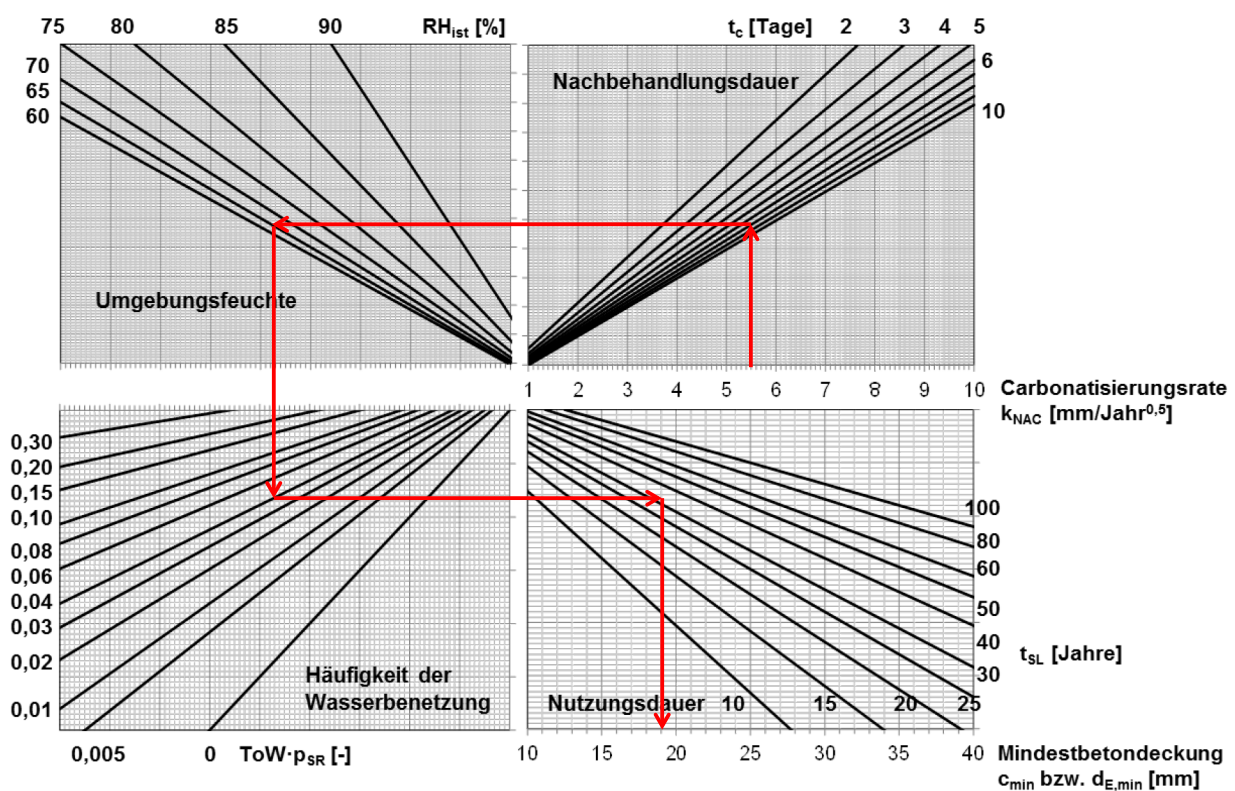
gezielte Restnutzungsdauer nach der Instandsetzungsmaßnahme: $t_{SL} = 50 - 16 = 34$ JahreEingangswerte für das Nomogramm im Bild 3.2: $k_{NAC} = 5,5 \text{ [mm/Jahr}^{0,5}\text{]}$, $t_c = 7 \text{ d}$, $RH_{ist} = 70 \%$, $\text{ToW} \cdot \rho_{SR} = 0,040$, $t_{SL} = 34$ JahreBild 3.2 $\rightarrow d_{E,min} \sim 19 \text{ [mm]}$ Vorhaltemaß der Schichtdicke $\Delta d_E = 10 \text{ mm} \rightarrow d_{E,nom} \approx 29 \text{ [mm]}$ 

Bild 3.3: Ermittlung der Mindestschichtdicke mit Hilfe des Nomogramms im Bild 3.2

4 Verfahren zur Abschätzung der Restnutzungsdauer und zur Bemessung von neu zu errichtenden Bauteilen und von Instandsetzungsmaßnahmen mittels Betonersatz bei Chloridbeaufschlagung

4.1 Formelzeichen

α_{app}	Altersexponent [-] zur Abschätzung der Restnutzungsdauer, ermittelt durch Regressionsanalyse an Chloridprofilen aus dem Bauwerk oder (vereinfachend) aus der Literatur (Tabelle 4.1)
α_{nss}	Altersexponent [-] zur Bemessung von neu zu errichtenden Bauteilen und von Instandsetzungsmaßnahmen mittels Betonersatz, ermittelt durch Diffusionsversuche nach DIN EN 12390-11
α_{RCM}	Altersexponent [-] zur Bemessung von neu zu errichtenden Bauteilen und von Instandsetzungsmaßnahmen mittels Betonersatz, ermittelt aus der Literatur (Tabelle 4.1)
β_0	Zielwert des Zuverlässigkeitsindex (Zielzuverlässigkeit) [-]
$C(x, t)$	Chloridgehalt [M.-%/ z_{eq}] in der Tiefe x von der Bauteil- bzw. Probekörperoberfläche [mm] zum Zeitpunkt t [Jahr] ¹
C_0	Eigenchloridgehalt des Betons [M.-%/ z_{eq}] ¹
c_{min}	Mindestbetondeckung [mm]
c_{nom}	Nennwert der Betondeckung [mm], entspricht dem charakteristischen Wert (d. h. Mittelwert) der Betondeckung
$C_{S,\Delta x}$	Chloridgehalt an der Bauteiloberfläche (bei $\Delta x = 0$) bzw. in der Tiefe Δx zum Beobachtungszeitpunkt in Abhängigkeit der anstehenden Chloridquelle, welche als konstante Einwirkung angenommen wird (Oberflächenchloridgehalt) [M.-%/ z_{eq}] ¹
$D(t_0)$	Sammelbezeichnung für $D_{app}(t_0)$, $D_{nss}(t_0)$ und $D_{RCM}(t_0)$ [m^2/s]
$D_{app}(t)$	Scheinbarer Chloriddiffusionskoeffizient des Betons [m^2/s] zum Zeitpunkt t
$D_{nss}(t)$	instationärer Chloriddiffusionskoeffizient [m^2/s] nach dem einseitigen Diffusionsversuchs nach DIN EN 12390-11
$D_{RCM}(t_0)$	Chloridmigrationskoeffizient [m^2/s] nach dem Schnellchloridmigrationsversuch RCM im Anlage B
$d_{E,min}$	Mindestschichtdicke [mm]; 5 %-Quantil der gemessenen oder berechneten Dicke; Bemessungswert der Schichtdicke (= $d_{E,d}$)
$d_{E,nom}$	nominale Schichtdicke [mm]; mittlere Schichtdicke; charakteristischer Wert der Schichtdicke
Δc	Vorhaltemaß der Betondeckung [mm], welches sicherstellt, dass der größte Teil (95 % einer Normalverteilung) der Betondeckung größer ist als der Mindestbetondeckung
Δd_E	Vorhaltemaß der Schichtdicke [mm], welches sicherstellt, dass der größte Teil (95 % einer Normalverteilung) der Schichtdicke größer ist als der Mindestschichtdicke
Δx	Tiefenbereich, in dem ggf. das Chlorideindringverhalten durch intermittierende Chlorideinwirkung (XS3 / XD3) vom Fick'schen Diffusionsverhalten abweicht [mm]
erfc	Komplementäre der Gauß'schen Fehlerfunktion (1-erf)
i	Anzahl von Messzeitpunkten [-]

¹ Siehe ANMERKUNG 2 im Abschnitt 2.3, (2)

K	Konstante bei der Regressionsanalyse zur Ermittlung von α_{app} [-]
k_e	Faktor zur Berücksichtigung der Differenz zwischen der Lufttemperatur bei den Laborprüfungen (= 20 °C) und der mittleren Jahrestemperatur der umgebenden Luft (= 10 °C) des Bauwerks (hier $k_e = 0,56$) [-]
M.-%/ z_{eq}	Maßeinheit für Chloridgehalt im Beton; Massenanteil bezogen auf den Zementgehalt zuzüglich der Gesamtmasse der zu berücksichtigenden Zusatzstoffe; s. Abschnitt 2.3 (2). Zum Beispiel darf für die Berechnung von z_{eq} bei Verwendung von Flugasche der zu berücksichtigende Flugascheanteil maximal 1/3 des Zementgehalts betragen.
t_0	Referenzzeitpunkt, $t_0 = 0,0767$ [Jahr] (28 d)
t_{insp}	Zeitpunkt der Inspektion (Beprobung des Bauwerks zur Ermittlung des Chloridprofils) [Jahr]
t_{SL}	planmäßige Nutzungsdauer (Zielnutzungsdauer) [Jahr]; SL = Service Life

4.2 Literatur und Normative Verweisung

- [1] DAfStb Vergussbeton und Vergussmörtel Herstellung und Verwendung von zementgebundenem Vergussbeton und Vergussmörtel.
- [2] DAfStb Trockenbeton-Richtlinie Herstellung und Verwendung von Trockenbeton und Trockenmörtel.
- [3] DIN EN 197-1 (Entwurf) Zement – Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement; Deutsche Fassung EN 197-1:2014
- [4] DIN EN 206-1 Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206-1.
- [5] DIN 1045-2 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1.
- [6] DIN 18551 Spritzbeton – Nationale Anwendungsregeln zur Reihe DIN EN 14487 und Regeln für die Bemessung von Spritzbetonkonstruktionen.
- [7] DIN EN 1990 Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990 + A1 + A1/AC.
- [8] DIN EN 14487 Spritzbeton – Teil 1: Begriffe, Festlegungen und Konformität; Deutsche Fassung EN 14487-1.
- [9] DIN EN 12390-11 Prüfung von Festbeton – Teil 11: Bestimmung des Chloridwiderstandes von Beton – Einseitig gerichtete Diffusion.
- [10] *fib* bulletin 34, Model Code for Service Life Design, 2006.
- [11] Gehlen, Ch. (2000): Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken. Heft 510 der Schriftenreihe des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton, Beuth Verlag, Berlin.
- [12] Positionspapier des DAfStb zur Umsetzung des Konzepts von leistungsbezogenen Entwurfsverfahren unter Berücksichtigung von DIN EN 206-1, Anhang J in: Beton- und Stahlbetonbau 103 (2008, Heft 12, Seiten 837 bis 839).

- [13] Rahimi, A. (2017): Semiprobabilistisches Nachweiskonzept zur Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauteilen unter Chlorideinwirkung. Heft 626 der Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Beuth Verlag, Berlin.
- [14] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau (ZTV-W) für Wasserbauwerke aus Beton und Stahlbeton (Leistungsbereich 215), Ausgabe 2012. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS).
- [15] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau (ZTV-W) für die Instandsetzung der Betonbauteile von Wasserbauwerken (Leistungsbereich 219), Ausgabe 2017. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).

4.3 Allgemeines

- (1) Für Betonbauteile unter Chlorideinwirkung (Expositionsklassen XD2, XS2, XD3 und XS3) beinhaltet folgender
 - Abschnitt 4.4 einen vereinfachten Nachweis für die Abschätzung der Restnutzungsdauer bestehender Bauteile (ohne Instandsetzung)
 - Abschnitt 4.5.2 einen vereinfachten Nachweis für die Bemessung von neu zu errichtenden Bauteilen sowie von Instandsetzungsmaßnahmen mittels Betonersatz in Abhängigkeit der geplanten Nutzungsdauer.
- (2) Die Nachweise erfolgen mit Hilfe von Nomogrammen im Abschnitt 4.6 (aus [13]), die auf den Ergebnissen vollprobabilistischer Berechnungen mit validierten Vorhersagemodellen ([10, 11]) basieren. Die Nomogramme bilden den funktionalen Zusammenhang zwischen gewichtigen Modellvariablen ab, wobei jedoch nur eine stark reduzierte Anzahl von Modellvariablen für die Nachweise berücksichtigt wird.
- (3) Die Nomogramme wurden vorrangig zur Bemessung von neu zu errichtenden Bauteilen sowie von Instandsetzungsmaßnahmen mittels Betonersatz entwickelt. Diese können auch zur Abschätzung der Restnutzungsdauer bestehender Bauwerke angewendet werden, sofern die auf Basis der am Bauteil gemessenen Chloridgehalte ermittelten Kennwerte ($D_{app}(t_0)$, α_{app} , $C_{S,\Delta x}$) innerhalb des Wertebereiches der Nomogramme liegen.
- (4) Die Restnutzungsdauer bzw. die planmäßige Nutzungsdauer (nach dem Bau bzw. nach der Instandsetzungsmaßnahme) wird verknüpft mit der Festlegung eines relevanten Grenzzustandes und einem Zuverlässigkeitsniveau, das während dieser Zeit entsprechend dem Grenzzustand nicht unterschritten werden darf. Aus Wirtschaftlichkeits- und baupraktischen Gründen wurde bei der Erstellung der Nomogramme eine ggf. geringfügige Unterschreitung der Zielzuverlässigkeit zugelassen [13].
- (5) Als Grenzzustand wird eine mögliche Depassivierung des Betonstahls durch das Erreichen eines kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehaltes (angenommen als eine statistische Größe mit Beta-Verteilung mit Mittelwert / Standardabweichung / untere Grenze / obere Grenze von: $\mu = 0,60$ / $\sigma = 0,15$ / $a = 0,20$ / $b = 2,00$ [M.-%/ z_{eq}] (s. [11])) auf Höhe der Betonstahloberfläche zugrunde gelegt.
- (6) Globale Vorgaben für das Zuverlässigkeitsniveau sind in DIN EN 1990 [7] enthalten. Für die Nachweise nach diesem Merkblatt werden die Empfehlungen aus [12] zugrunde gelegt. Demnach ist vorzugsweise ein Zielwert des Zuverlässigkeitsindex von $\beta_0 = 1,5$ einzuhalten. Ein geringerer Zielwert des Zuverlässigkeitsindex von $\beta_0 = 0,5$ ist unter der Voraussetzung anwendbar, dass eine Korrosion des Betonstahls

durch regelmäßige Überwachung und Inspektion des Bauteils frühzeitig zu erkennen und das Bauteil für eine Instandsetzung zugänglich ist. In einem frühen Stadium der Betonstahlkorrosion kann der Aufwand einer Instandsetzung erfahrungsgemäß geringer gehalten werden.

- (7) Zur Abschätzung des Zeitraums vom Beginn der Chloridbeaufschlagung bis zur Depassivierung des Betonstahls (Initiierungsphase) wird der zeit- und tiefenabhängige Chlorideindringverlauf im Beton anhand der Gleichung (1), welche auf dem zweiten Fick'schen Diffusionsgesetz basiert, berechnet.

$$C(x, t) = C_0 + (C_{S, \Delta x} - C_0) \cdot \operatorname{erfc} \frac{x - \Delta x}{2 \cdot \sqrt{D_{app}(t) \cdot t}} \quad (1)$$

Dabei ist:

$C(x, t)$	Chloridgehalt [M.-%/z _{eq}] in der Tiefe x von der Bauteil- bzw. Probekörperoberfläche [mm] zum Zeitpunkt t
$C_{S, \Delta x}$	Chloridgehalt an der Bauteiloberfläche (bei $\Delta x = 0$) bzw. in der Tiefe Δx zum Beobachtungszeitpunkt in Abhängigkeit der anstehenden Chloridquelle, welche als konstante Einwirkung angenommen wird (Oberflächenchloridgehalt) [M.-%/z _{eq}]
Δx	Tiefenbereich, in dem ggf. das Chlorideindringverhalten durch intermittierende Chlorideinwirkung vom Fick'schen Diffusionsverhalten abweicht [mm] (XS2 / XD2: $\Delta x = 0$, XS3 / XD3: $\Delta x = 10$ mm)
C_0	Eigenchloridgehalt des Betons [M.-%/z _{eq}] (für die Restnutzungsdauer und die Schichtdickenbestimmung kann der Eigenchloridgehalt von 0 M.-%/z _{eq} angesetzt werden, sofern der aus Daten abgeleitete tatsächliche Gehalt $\leq 0,1$ M.-%/z _{eq} ist)
$D_{app}(t)$	Scheinbarer Chloriddiffusionskoeffizient des Betons [mm ² /Jahr] oder [m ² /s] zum Zeitpunkt t
t	Zeitdauer vom Beginn der Beaufschlagung bis zur Inspektion bzw. die Lebensdauer [Jahr]
erfc	Komplementäre der Gauß'schen Fehlerfunktion (= 1-erf)

4.4 Ermittlung der Restnutzungsdauer bestehender Bauteile bei Chloridbeaufschlagung

4.4.1 Allgemeines

- (1) Im nachfolgend beschriebenen Verfahren zur Abschätzung der Restnutzungsdauer bestehender Bauwerke werden die Bemessungsnomogramme im Abschnitt 4.6 angewendet. Diese Nomogramme dienen vorrangig der Bemessung von neu zu errichtenden Bauteilen sowie von Instandsetzungsmaßnahmen mittels Betonersatz. Die Nomogramme können auch zur Abschätzung der Restnutzungsdauer bestehender Bauwerke angewendet werden, wenn die auf Basis der am Bauteil gemessenen Chloridgehalte ermittelten Kennwerte ($D_{app}(t_0)$, α_{app} , $C_{S, \Delta x}$) innerhalb des Wertebereiches der Nomogramme liegen.
- (2) Die Eingangsparameter der Nomogramme zur Ermittlung der Restnutzungsdauer sind der scheinbare Chloriddiffusionskoeffizient $D_{app}(t_0)$, der Altersexponent α_{app} , der Oberflächenchloridgehalt bzw. der Chloridgehalt in der Tiefe Δx (Konvektionszone) $C_{S, \Delta x}$ und die Mindestbetondeckung c_{min} . Der tiefenabhängige Chloridgehalt und die Betondeckung können durch entsprechende Untersuchungen des Bauteils hergeleitet werden.
- (3) Als Mindestbetondeckung c_{min} sind das 5%-Quantil der am Bauteil gemessenen Betondeckung anzusetzen oder Informationen aus den Planungsunterlagen auszuwerten.

- (4) Die weiteren Eingangsparameter werden aus dem Chloridprofil abgeleitet, welches den Mittelwert der tiefengestaffelt gemessenen Chloridgehalte darstellt (hier wird vorausgesetzt, dass die Chloridprofile Bauteilbereichen zugehören, die eine gleichmäßige Betonzusammensetzung, Ausführungsart und -qualität und Einwirkungsbedingung aufweisen, s. 1 (5)). Der scheinbare Chloriddiffusionskoeffizient zum Zeitpunkt der Inspektion $D_{app}(t_{insp})$ sowie der Oberflächenchloridgehalt bzw. der Chloridgehalt in der Tiefe Δx (Konvektionszone) $C_{S,\Delta x,insp}$ werden durch eine Regressionsanalyse unter Verwendung von Gleichung (1) in Abschnitt 4.3 berechnet. Dabei werden die Quadrate der Abweichungen (v_i^2) zwischen nach Gleichung (1) berechneten und mittels Probenahme am Bauteil bestimmten Chloridgehalten $C(x_i, t)$ ermittelt. Die Summe dieser sogenannten Fehlerquadrate wird in der Regressionsanalyse minimiert (Methode der kleinsten Fehlerquadrate), vgl. Bild 4.1.

Für Bauteile der Expositionsklasse XS3 / XD3 sind Messwerte innerhalb der Konvektionszone $\Delta x = 10$ mm bei der Regression nicht zu berücksichtigen.

Für eine realitätsnahe Ermittlung des Verlaufs des Chloridgehalts soll die Größe eines Messtiefenbereiches zwischen 5 und 20 mm gewählt werden (vorzugsweise 10 mm). Für die Regressionsanalyse sind mindestens drei Messwerte in unterschiedlichen Tiefen erforderlich; empfohlen wird eine Regressionsanalyse mit mehr Messwerten. Innerhalb der Betondeckung ist in mindestens drei Tiefenbereichen der Chloridgehalt zu ermitteln. Die erste mittlere Messtiefe (in der Mitte eines Messtiefenbereiches) soll im oberflächennahen Bereich für XS2 / XD2 nicht mehr als 10 mm betragen, d. h. Probenahme im oberflächennahen Randbereich von 20 mm. Für die Bauteile der Expositionsklassen XS3 / XD3 soll der erste Messtiefenbereich, der auf die Konvektionszone folgt, zwischen 10 und 30 mm betragen (z. B. Probenahme von 10 bis 20 mm, was eine mittlere Messtiefe von 15 mm ergibt).

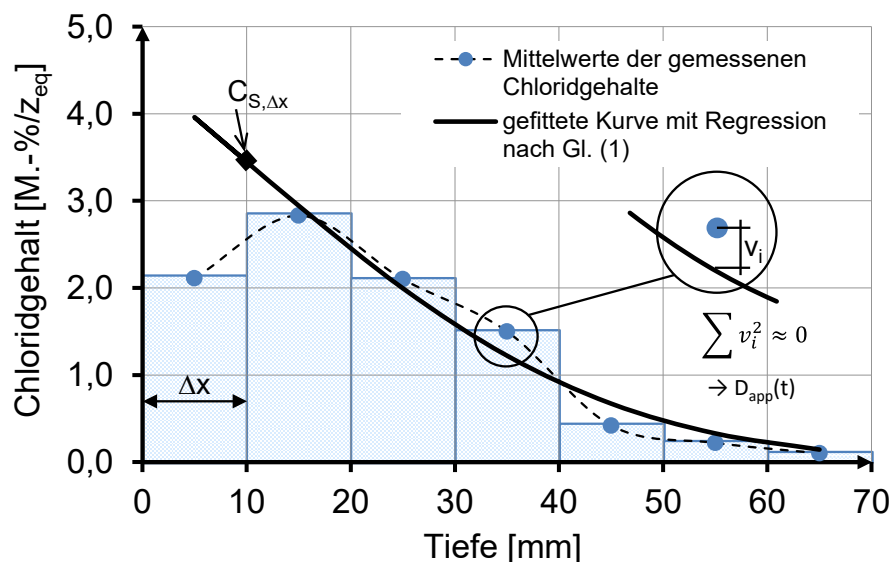
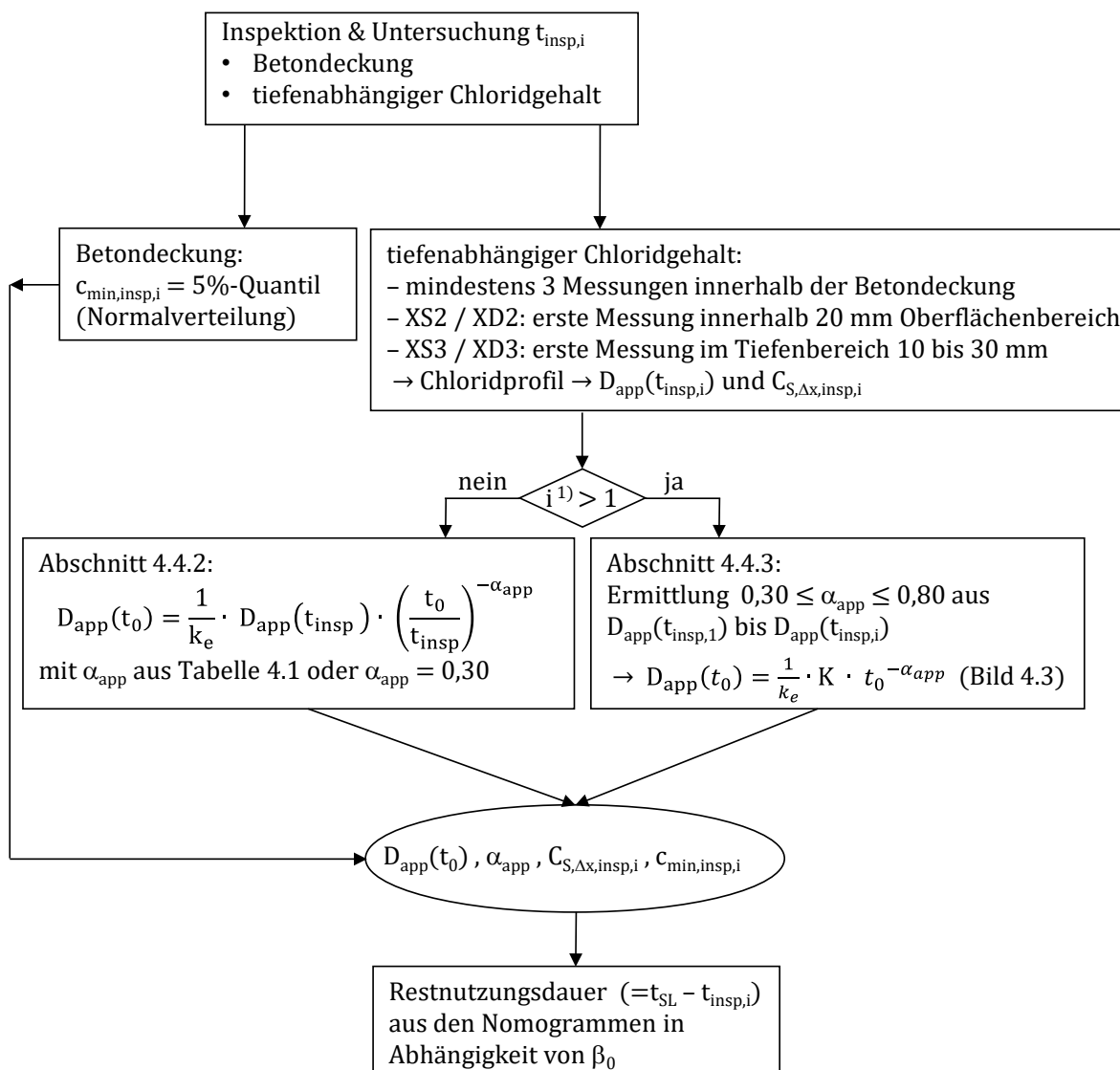


Bild 4.1: Ermittlung von $C_{S,\Delta x,insp}$ und $D_{app}(t_{insp})$ (siehe auch Gleichung 1)

ANMERKUNG: Es können in der Praxis Chloridprofile ermittelt werden, die den hier getroffenen Annahmen (z. B. Konvektionszone von $\Delta x = 10$ mm für XS3 / XD3 und $\Delta x = 0$ mm für XS2 / XD2) nicht entsprechen bzw. vom Fick'schen Diffusionsverhalten (Gleichung (1)) stark abweichen (Bestimmtheitsmaßgrad $R^2 < 80\%$). Für diese Fälle kann das hier dargestellte Verfahren zur Abschät-

zung der Restnutzungsdauer nicht angewendet werden. Die Randbedingungen zur Anwendung der Nomogramme sind 4.6 (5) zu entnehmen.

- (5) Für die Nutzung der Nomogramme ist der scheinbare Chloriddiffusionskoeffizient im Alter von 28 Tagen $D_{app}(t_0=28d)$ erforderlich. Falls Chloridprofile von nur einem Inspektionszeitpunkt verfügbar sind, muss die Bestimmung von $D_{app}(t_0=28d)$ nach Abschnitt 4.4.2 erfolgen. Für den Fall, dass Chloridprofile aus Inspektionen zu verschiedenen Zeitpunkten vorliegen, soll dessen Bestimmung gemäß Abschnitt 4.4.3 erfolgen. Voraussetzung hierfür ist, dass die erste hierbei einbezogene Inspektion mindestens 10 Jahre nach Beaufschlagungsbeginn erfolgt ist, der zeitliche Abstand zwischen den Inspektionen muss jeweils mindestens 5 Jahre betragen.
- (6) Bild 4.2 stellt den schematischen Ablauf der Ermittlung der Restnutzungsdauer eines Bauteils in Abhängigkeit vom Vorliegen von Inspektionsdaten dar.



¹⁾ $t_{insp,i=1} \geq 10$ Jahre; bei $i > 1$ soll der zeitliche Abstand zwischen den Messungen mindestens 5 Jahre betragen

Bild 4.2: Ablaufschema zur Ermittlung der Restnutzungsdauer

4.4.2 Bestimmung von $D_{app}(t_0=28d)$ auf Basis von Chloridprofilen zu einem Untersuchungszeitpunkt

- (1) Der scheinbare Chloriddiffusionskoeffizient im Alter von 28 Tagen $D_{app}(t_0=28d)$ ist mit Hilfe der Gleichung (2) aus dem ermittelten $D_{app}(t_{insp})$ und dem Altersexponenten α_{app} zu berechnen. Mangels Chloridprofile aus Bauwerksuntersuchungen zu weiteren Zeitpunkten wird vereinfachend ein bindemittelabhängiger Wert für den Altersexponenten α_{app} nach Tabelle 4.1 angesetzt.

$$D_{app}(t_0) = \frac{1}{k_e} \cdot D_{app}(t_{insp}) \cdot \left(\frac{t_0}{t_{insp}}\right)^{-\alpha_{app}} \quad (2)$$

mit:

- α_{app} Altersexponent [-] zur Abschätzung der Restnutzungsdauer, ermittelt durch Regressionsanalyse an Chloridprofilen aus dem Bauwerk oder (vereinfachend) aus der Literatur (s. Tabelle 4.1)
- k_e Faktor zur Berücksichtigung der Differenz zwischen der Lufttemperatur bei den Laborprüfungen (= 20 °C) und der mittleren Jahrestemperatur der umgebenden Luft (= 10 °C angenommen für Deutschland) des Bauwerks (hier $k_e = 0,56$) [-]

ANMERKUNG 1: Die Kennwerte zum Zeitpunkt t_0 (z. B. $D_{app}(t_0)$) in den Nomogrammen im Abschnitt 4.6, Bilder 4.6 bis 4.24, basieren auf einer Temperaturannahme von 20 °C. Die bauwerksbezogenen Kennwerte (z. B. $D_{app}(t_{insp})$) beziehen sich auf eine angenommene mittlere Jahrestemperatur von 10° C. In diesem Fall ist k_e ein konstanter Faktor (=0,56, berechnet mit Hilfe der Arrhenius-Gleichung [11]).

ANMERKUNG 2: Bei Bindemittelarten bestehend aus Kombinationen aus Zement und Zusatzstoff ist der Altersexponent der am ehesten verwandten Zementart nach Tabelle 4.1 zu wählen (z. B. CEM I + 6% Silicastaub → CEM II/A-D).

- (2) Bei unbekannter Bindemittelart kann der Altersexponent auf der sicheren Seite liegend zu 0,30 angenommen werden.
- (3) Mit den ermittelten $D_{app}(t_0)$, α_{app} , $C_{S,\Delta x,insp}$ und $C_{min,insp}$ kann die Restnutzungsdauer mit Hilfe der Nomogramme im Abschnitt 4.6, Bilder 4.6 bis 4.24, abgeschätzt werden.

Zementart nach EN 197-1:2014 [3]		Altersexponent α_{app} bzw. α_{RCM} [-]
CEM I		0,30 ³⁾
CEM II	CEM II/A-S	0,35 ⁴⁾
	CEM II/B-S	0,37 ⁴⁾
	CEM II/A-D	0,40 ⁴⁾
	CEM II/A-P	0,40 ⁴⁾
	CEM II/B-P	0,40 ⁴⁾
	CEM II/A-Q	0,40 ⁴⁾
	CEM II/B-Q	0,40 ⁴⁾
	CEM II/A-V ¹⁾	0,60 ³⁾
	CEM II/B-V	0,60 ⁴⁾
	CEM II/A-W	– ⁶⁾
	CEM II/B-W	– ⁶⁾
	CEM II/A-T	0,40 ⁴⁾
	CEM II/B-T	0,40 ⁴⁾
	CEM II/A-L	0,30 ⁴⁾
	CEM II/B-L	– ⁶⁾
	CEM II/A-LL	0,30 ⁴⁾
	CEM II/B-LL	– ⁶⁾
	CEM II/A-M	– ⁶⁾
	CEM II/B-M	– ⁶⁾
CEM III	CEM III/A	0,40 ⁴⁾
	CEM III/B	0,45 ³⁾
	CEM III/C	0,45 ⁴⁾
CEM IV	CEM IV/A	– ⁶⁾
	CEM IV/B	– ⁶⁾
CEM V	CEM V/A	– ⁶⁾
	CEM V/B	– ⁶⁾
CEM III/A + ca. 10% Flugasche ²⁾		0,50 ⁴⁾
CEM II ⁵⁾ + ca. 20 % Flugasche ²⁾		0,55 ⁴⁾

¹⁾ Flugaschegehalt mindestens 18 M.-%/Gesamtmasse

²⁾ wirksame Bindemittelart; Zusammensetzung mit den Zementarten nach DIN EN 197-1 nicht abbildbar

³⁾ auf Basis von Untersuchungen abgeleiteter Wert

⁴⁾ auf Basis der Zementzusammensetzung angenommener Wert

⁵⁾ CEM II/A-S, CEM II/B-S, CEM II/A-T, CEM II/B-T, CEM II/A-LL

⁶⁾ Zementart gemäß DIN 1045-2 für XS/XD nicht zugelassen

Tabelle 4.1: Altersexponenten α_{app} (vereinfachend, falls keine Chloridprofile zu mehreren Zeitpunkten vorhanden sind) bzw. α_{RCM} in Abhängigkeit der Zementart

4.4.3 Bestimmung von $D_{app}(t_0=28d)$ auf Basis von Chloridprofilen zu mehreren Untersuchungszeitpunkten

- (1) Falls Chloridprofile aus Inspektionen zu verschiedenen Zeitpunkten vorliegen, kann der Altersexponent α_{app} gemäß Bild 4.3 ermittelt werden (Regressionsanalyse mit Trendfunktion „Potenz“, s. auch 4.5.2 (3)). Voraussetzung hierfür ist, dass die erste hierbei einbezogene Inspektion mindestens 10 Jahre nach Beaufschlagungsbeginn erfolgt ist und der zeitliche Abstand zwischen den Inspektionen jeweils mindestens 5 Jahre beträgt. Alternativ kann die Ermittlung des Altersexponenten auch auf Felduntersuchungen von Bauwerken mit gleicher Betonzusammensetzung, Ausführungsart und -qualität und Einwirkungsbedingung erfolgen. Der Altersexponent α_{app} darf einen maximalen Wert von 0,80 nicht überschreiten ($0,30 \leq \alpha_{app} \leq 0,80$).

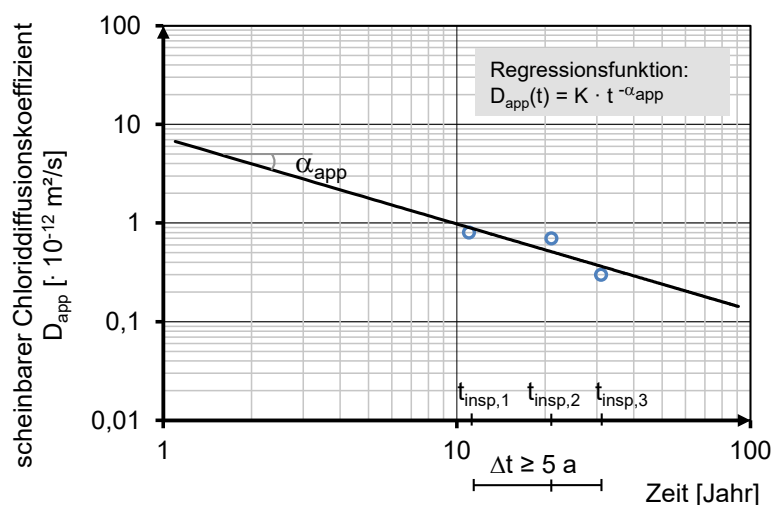


Bild 4.3: Ermittlung des Altersexponenten α_{app} aus den berechneten scheinbaren Chloriddiffusionskoeffizienten von zu unterschiedlichen Zeitpunkten ermittelten Chloridprofilen

- (2) $D_{app}(t_0=28d)$ wird durch die im Bild 4.3 ermittelte Regressionsfunktion wie folgt berechnet:

$$D_{app}(t_0) = \frac{1}{k_e} \cdot K \cdot t_0^{-\alpha_{app}} \quad (3)$$

Darin ist K eine Konstante, die durch die Regressionsanalyse entsteht; der Temperaturfaktor beträgt $k_e = 0,56$ (s. 4.4.2 (1)).

Sind Chloridprofile zu nur zwei Untersuchungszeitpunkten vorhanden, kann der Altersexponent α_{app} nach Gleichung (4) berechnet werden; die Berechnung von $D_{app}(t_0=28d)$ erfolgt nach Gleichung (5):

$$\alpha_{app} = \frac{\log\left(\frac{D_{app}(t_{insp,2})}{D_{app}(t_{insp,1})}\right)}{\log\left(\frac{t_{insp,1}}{t_{insp,2}}\right)} \quad (4)$$

$$D_{app}(t_0) = \frac{1}{k_e} \cdot D_{app}(t_{insp,i}) \cdot \left(\frac{t_0}{t_{insp,i}}\right)^{-\alpha_{app}} \quad (5)$$

Falls für den Altersexponenten ein Wert angenommen wird (z. B. ein maximaler Wert von 0,80, da der berechnete Wert die obere Grenze von 0,8 überschreitet), erfolgt die Berechnung von $D_{app}(t_0=28d)$ mit dem $D_{app}(t_{insp,i})$ aus der letzten Inspektion nach Gleichung (5).

- (3) Mit den berechneten Altersexponenten α_{app} und $D_{app}(t_0)$ sowie $C_{S,\Delta X,insp}$ aus der letzten Inspektion kann die Restnutzungsdauer mit Hilfe der Nomogramme im Abschnitt 4.6, Bilder 4.6 bis 4.24, abgeschätzt werden.

4.5 Bemessung von neu zu errichtenden Bauteilen und Betonersatz bei Chloridbeaufschlagung

4.5.1 Einfache Bemessung für Beton, Spritzbeton, Trockenbeton oder Vergussbeton

(1) Für

- Beton nach DIN EN 206-1 [4] in Verbindung mit DIN 1045-2 [5],
- Spritzbeton nach DIN EN 14487 [8] in Verbindung mit DIN 18551 [6],
- Trockenbeton nach DAfStb-Richtlinie „Herstellung und Verwendung von Trockenbeton und Trockenmörtel“ [2] oder
- Vergussbeton nach DAfStb-Richtlinie „Herstellung und Verwendung von zementgebundenem Vergussbeton und Vergussmörtel“ [1]

kann die Betondeckung / Schichtdicke für eine Nutzungsdauer von 50 Jahren deskriptiv auf Basis der relevanten Expositionsklassen XS und XD unter Einhaltung der Anforderungen an die Mindestbetondeckung sowie an Baustoffe und Bauausführung in den entsprechenden Normen und Regelwerken festgelegt werden.

4.5.2 Bemessung mit Hilfe von Nomogrammen

- (1) Die Bemessung von neu zu errichtenden Bauteilen sowie von Instandsetzungsmaßnahme mittels Betonersatz erfolgt durch die Nomogramme im Abschnitt 4.6, Bilder 4.6 bis 4.24. Als Eingangsparameter sind erforderlich:
- der charakteristische Materialwiderstand über die Wertepaare Chloridmigrationskoeffizient $D_{RCM}(t_0)$ und Altersexponent α_{RCM} oder Chloriddiffusionskoeffizient $D_{nss}(t_0)$ und Altersexponent α_{nss} ,
 - das Chloridangebot der umgebenden Chloridquelle über den Parameter $C_{S,\Delta X}$,
 - die planmäßige Nutzungsdauer t_{SL} und
 - der festzulegende Zielwert des Zuverlässigkeitsindex β_0 .
- (2) Für die Beschreibung des Materialwiderstands von Materialien mit bekannter Zusammensetzung anhand des Wertepaares $D_{RCM}(t_0)$ und α_{RCM} wird an Probekörpern im Alter von 28 Tagen die RCM-Prüfung nach Anlage B durchgeführt. Der Altersexponent α_{RCM} ist in Abhängigkeit der Bindemittelart der Tabelle 4.1 zu entnehmen.
- (3) Der Materialwiderstand kann auch durch die Ermittlung der Parameter $D_{nss}(t_0)$ und α_{nss} mittels Diffusionsversuchen in Anlehnung an DIN EN 12390-11 [9] charakterisiert werden. Der Diffusionsversuch ist an Prüfkörpern durchzuführen, welche nach der Herstellung zur Nachbehandlung 28 Tage unter Wasser gelagert worden sind. Der instationäre Chloriddiffusionskoeffizient $D_{nss}(t_0)$ wird durch Beprobung der Prüfkörper nach $t_0 = 28$ Tagen Beaufschlagung mit Chloridlösung und Erstellung der Chloridprofile ermittelt. Zur Ermittlung des Altersexponenten α_{nss} sind der Diffusionsversuch an den Prüfkörpern für insgesamt mindestens zwei Jahre durchzuführen und Chloriddiffusionskoeffizienten zu mindestens drei weiteren Zeitpunkten (nach ca. 90, 365 und 730 Tagen Beaufschlagung mit Chloridlösung) zu ermitteln.

Die zeitliche Entwicklung des Chloriddiffusionskoeffizienten D_{nss} eines Materials ist exemplarisch in Bild 4.4 in normaler und doppel-logarithmischer Skalierung dargestellt. Der Altersexponent α_{nss} wird durch eine Regressionsanalyse (Trendlinie Regressionstyp „Potenz“) quantifiziert. Die Regressionsfunktion ($y=a \cdot x^{-\alpha}$) und der Bestimmtheitsmaßgrad (R^2) sind im Bild 4.4 angegeben. Der Exponent der Regressionsfunktion ergibt den Altersexponenten α_{nss} (hier $\alpha_{\text{nss}} \sim 0,35$). Der Altersexponent α_{nss} darf Werte zwischen 0,30 und 0,80 einnehmen.

- (4) Zur Beschreibung des Chlorideindringwiderstands von Materialien mit unbekannten Zusammensetzungen ist das Wertepaar $D_{\text{nss}}(t_0)$ und α_{nss} mittels Diffusionsversuchen nach DIN EN 12390-11 [9] zu ermitteln. Als Bezugswerte für Übereinstimmungsnachweise sind gleichzeitig am selben Material die Chloridmigrationskoeffizienten D_{RCM} zum Probenalter von 28 und 56 Tagen zu ermitteln. Im Rahmen von Übereinstimmungsnachweisen dürfen die Abweichungen von den beiden Bezugswerten (bei der Erstprüfung ermittelten D_{RCM} -Werten) nicht mehr als 25% betragen.
- (5) Alternativ zu (4) kann die Bemessung der Schichtdicke bei der Anwendung von Materialien mit unbekannten Zusammensetzungen anhand eines durch die RCM-Prüfung gewonnenen Chloridmigrationskoeffizienten $D_{\text{RCM}}(t_0)$ und eines niedrigen (ungünstigen) Altersexponenten α_{RCM} von 0,30 ermittelt werden.
- (6) Mit den gewählten Eingangsparametern wird der Bemessungswert der Betondeckung c_{min} (Mindestbetondeckung) bzw. der Schichtdicke $d_{\text{E,min}}$ (Mindestschichtdicke) aus den Nomogrammen abgelesen. Der charakteristische Wert der Betondeckung c_{nom} (nominale Betondeckung) bzw. der Schichtdicke $d_{\text{E,nom}}$ (nominale Schichtdicke) des Betonersatzes wird wie folgt berechnet:

$$c_{\text{nom}} = c_{\text{min}} + \Delta c$$

bzw.

$$d_{\text{E,nom}} = d_{\text{E,min}} + \Delta d_{\text{E}}$$

Dabei ist:

Δc Vorhaltemaß der Betondeckung [mm], $\Delta c = 10$ mm nach ZTV-W LB 215 [14]

Δd_{E} Vorhaltemaß der Schichtdicke [mm], abhängig vom Untergrund und der Ausführungsart zwischen 5 mm und 15 mm anzusetzen (10 mm nach ZTV-W LB 219 [15])

ANMERKUNG 1: Die nominale Schichtdicke entspricht der mittleren Schichtdicke. Das Vorhaltemaß Δd_{E} soll sicherstellen, dass der größte Teil (95 % einer Normalverteilung) der Schichtdicke größer ist als der Bemessungswert der Schichtdicke $d_{\text{E,d}} = d_{\text{E,min}}$. Dies gilt auch für Δc ; $c_{\text{d}} = c_{\text{min}}$.

ANMERKUNG 2: Der Nachweis zur Bemessung der Betondeckung und der Schichtdicke setzt die Einhaltung der Vorgaben im Hinblick auf die Ausführungsart und -qualität gemäß ZTV-W LB 215 [14] bzw. ZTV-W LB 219 [15] voraus.

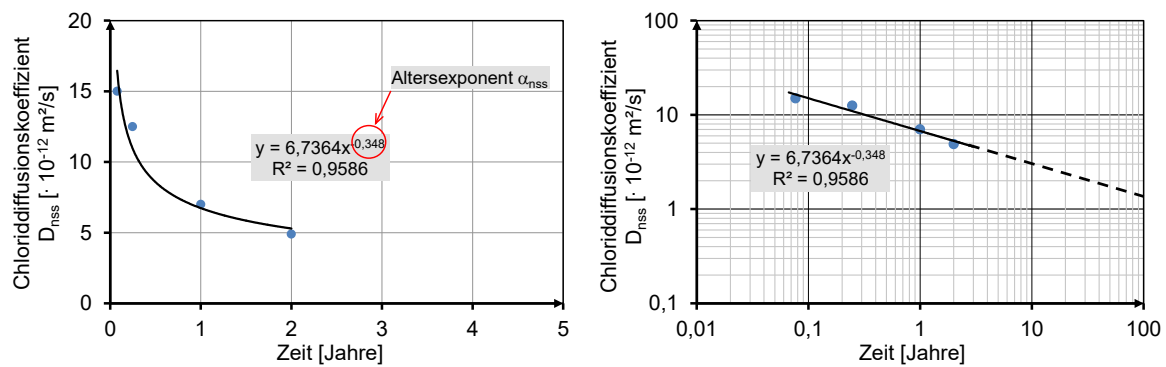


Bild 4.4: Exemplarische Ermittlung des Altersexponenten α_{nss} mittels Regressionsanalyse an Chloriddiffusionskoeffizienten D_{nss} . Die einzeln ausgewiesenen Chloriddiffusionskoeffizienten repräsentieren den Materialwiderstand für unterschiedlich lange Expositionszeiten ($t_0 = 28 \text{ d}$, $t_1 = 90 \text{ d}$, $t_2 = 365 \text{ d}$ und $t_3 = 730 \text{ d}$) jeweils als konstante Größe über den betrachteten Zeitraum. Zeitliche Entwicklung des D_{nss} in normaler (links) und doppel-logarithmischer (rechts) Skalierung

4.6 Nomogramme zur Abschätzung der Restnutzungsdauer und zur Bemessung von neu zu errichtenden Bauteilen und von Instandsetzungsmaßnahmen mittels Betonersatz bei Chloridbeaufschlagung

- (1) Bild 4.5 enthält eine zusammenfassende Erläuterung der Eingangsparameter der Nomogramme.
- (2) Die Nomogramme sind für die Expositionsklassen XS3 / XD3 erstellt worden. Sie können auch für die Bauteile der Expositionsklassen XS2 / XD2 verwendet werden, indem die Mindestbetondeckung bzw. die Mindestschichtdicke als Ausgangsparameter (Ergebnis der Bemessung) um 10 mm (angenommener Mittelwert der Tiefe der Konvektionszone) verringert und als Eingangsparameter (z. B. zur Ermittlung des erforderlichen $D_{RCM}(t_0)$) um den Betrag von 10 mm erhöht wird.
- (3) Empfehlungen zur Wahl der Zielzuverlässigkeit β_0 sind in [12] enthalten, s. auch 4.3 (6).
- (4) Aus Ausführungs- und baupraktischen Gründen wurden das Mindestmaß und der Maximalwert der Mindestbetondeckung / Mindestschichtdicke zu 20 bzw. 80 mm gesetzt.

Ermittlung der Restnutzungsdauer	
Betondeckung und Chloridprofile aus Inspektion $t_{\text{insp},i}$ $C_{s,\Delta x,\text{insp},i}$ $C_{\text{min},\text{insp},i}$	
$i = 1 \rightarrow$ Abschnitt 4.4.2 : α_{app} aus Tabelle 4.1 oder $\alpha_{\text{app}} = 0,30$ $D_{\text{app}}(t_0 = 28\text{d}) = \frac{1}{0,56} \cdot D_{\text{app}}(t_{\text{insp},i}) \cdot \left(\frac{t_0 = 28\text{d}}{t_{\text{insp},i}} \right)^{-\alpha_{\text{app}}}$ $i > 1 \rightarrow$ Abschnitt 4.4.3: $D_{\text{app}}(t_0 = 28\text{d})$ und $0,30 \leq \alpha_{\text{app}} \leq 0,80$ aus Regression durch $D_{\text{app}}(t_{\text{insp},1})$ bis $D_{\text{app}}(t_{\text{insp},i})$ $\rightarrow D_{\text{app}}(t_0) = \frac{1}{0,56} \cdot K \cdot t_0^{-\alpha_{\text{app}}} \quad (\text{Bild 4.3})$	
Bemessung von neu zu errichtenden Bauteilen und von Instandsetzungsmaßnahmen mittels Betonersatz	
$D_{\text{RCM}}(t_0 = 28\text{d})$ aus RCM-Prüfung (Anlage B) - Probenalter zum Beginn der Prüfung (Nachbehandlung unter Wasser): $t_0 = 28\text{ d}$ - Dauer der Prüfung (Chloridbeaufschlagung): 6 h bis 7 d α_{RCM} aus Tabelle 4.1, oder = 0,30 $C_{s,\Delta x}$ aus Literatur oder vergleichbaren bestehenden Bauwerken	$D_{\text{nss}}(t_0 = 28\text{d})$ aus Diffusionsprüfung (DIN EN 12390-11) - Probenalter zum Beginn der Prüfung (Nachbehandlung unter Wasser): $t_0 = 28\text{ d}$ - Dauer der Prüfung (Chloridbeaufschlagung): 28 d α_{nss} aus Diffusionsprüfung in einem Zeitraum von mind. zwei Jahren, durch Regression aus ermittelten $D_{\text{nss}}(t)$ von entnommenen Chloridprofilen zu den Zeitpunkten von 28 d, 90 d, 365 d, 730 d (oder mehr), $0,30 \leq \alpha_{\text{nss}} \leq 0,80$ $C_{s,\Delta x}$ aus Literatur oder vergleichbaren bestehenden Bauwerken

Bild 4.5: Eingangsparameter der Nomogramme

(5) Bei der Anwendung der Nomogramme sind folgende Randbedingungen zu beachten:

- für $D_{\text{RCM}}(t_0)$ darf der größte Einzelwert 25 % des Mittelwerts nicht überschreiten,
- für $D_{\text{nss}}(t_0)$ darf der Bestimmtheitsmaßgrad R^2 95 % nicht unterschreiten,
- für $D_{\text{app}}(t_{\text{insp}})$ darf der Bestimmtheitsmaßgrad R^2 80 % nicht unterschreiten,
- das Vorhaltemaß der Betondeckung Δc bzw. Schichtdicke Δd_E muss zwischen 5 und 15 mm betragen,
- die Eingangswerte basieren auf einer mittleren Jahrestemperatur des Bauteils von ca. 10° C,
- die Eingangswerte für die Diffusionskoeffizienten beziehen sich auf ein Proben- (zu Beginn der Prüfung) oder Bauteilalter von $t_0 = 28$ Tagen,
- die Nomogramme sind für Betone / Produkte mit einem Eigenchloridgehalt C_0 von max. 0,1 M.-%/z_{eq} (Cl 0,10 nach DIN EN 206-1 [4]) anwendbar.

(6) Tabelle 4.2 gibt eine Übersicht über die Nomogramme.

Zielwert des Zuverlässigkeits- index β_0	Planmäßige Nutzungsdauer t_{SL}	Bild-Nr.		
		$D_{RCM}(t_0)$ bzw. $D_{nss}(t_0)$ bzw. $D_{app}(t_0)$ [$\cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$]		
		0 – 2	2 – 20	0 – 20
1,5	100	4.6	4.7	
	70	4.8	4.9	
	50	4.10	4.11	
	40	4.12	4.13	
	30	4.14	4.15	
	20			4.16
	10			4.17
0,5	100			4.18
	70			4.19
	50			4.20
	40			4.21
	30			4.22
	20			4.23
	10			4.24

¹⁾ für die Expositionsklassen XS2 / XD2 können dieselben Nomogramme verwendet werden, wenn die Mindestbetondeckung bzw. die Mindestschichtdicke als **Ausgangsparameter** (d. h. den aus dem Nomogramm ermittelten Wert) um den Betrag 10 mm (Konvektionszone Δx) verringert wird, d. h. $c_{min} - 10 \text{ mm}$. Falls jedoch die Mindestbetondeckung bzw. die Mindestschichtdicke als **Eingangsparameter** verwendet wird, ist diese um 10 mm zu erhöhen, d. h. $c_{min} + 10 \text{ mm}$.

Tabelle 4.2: Übersicht über die Nomogramme zur Abschätzung der Restnutzungsdauer und zur Bemessung von neu zu errichtenden Bauteilen und von Instandsetzungsmaßnahmen mittels Betonersatz für die Expositionsklassen XS3 / XD3¹⁾ (aus [13])

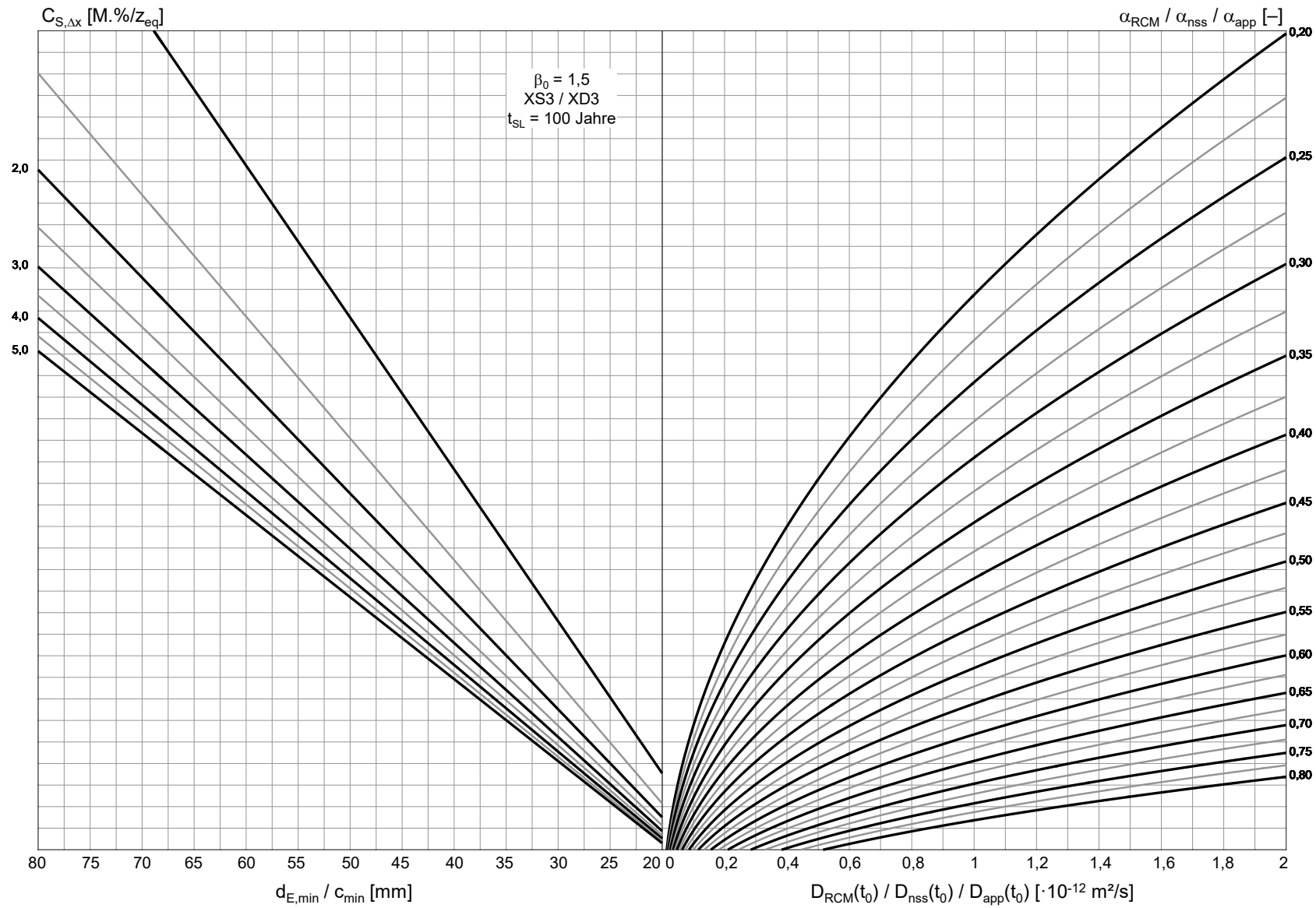


Bild 4.6: Nomogramm für XS3 / XD3, Ziellebensdauer $t_{SL}=100$ Jahre, Zielzuverlässigkeit $\beta_0=1,5$, $0 \leq D(t_0) \leq 2$

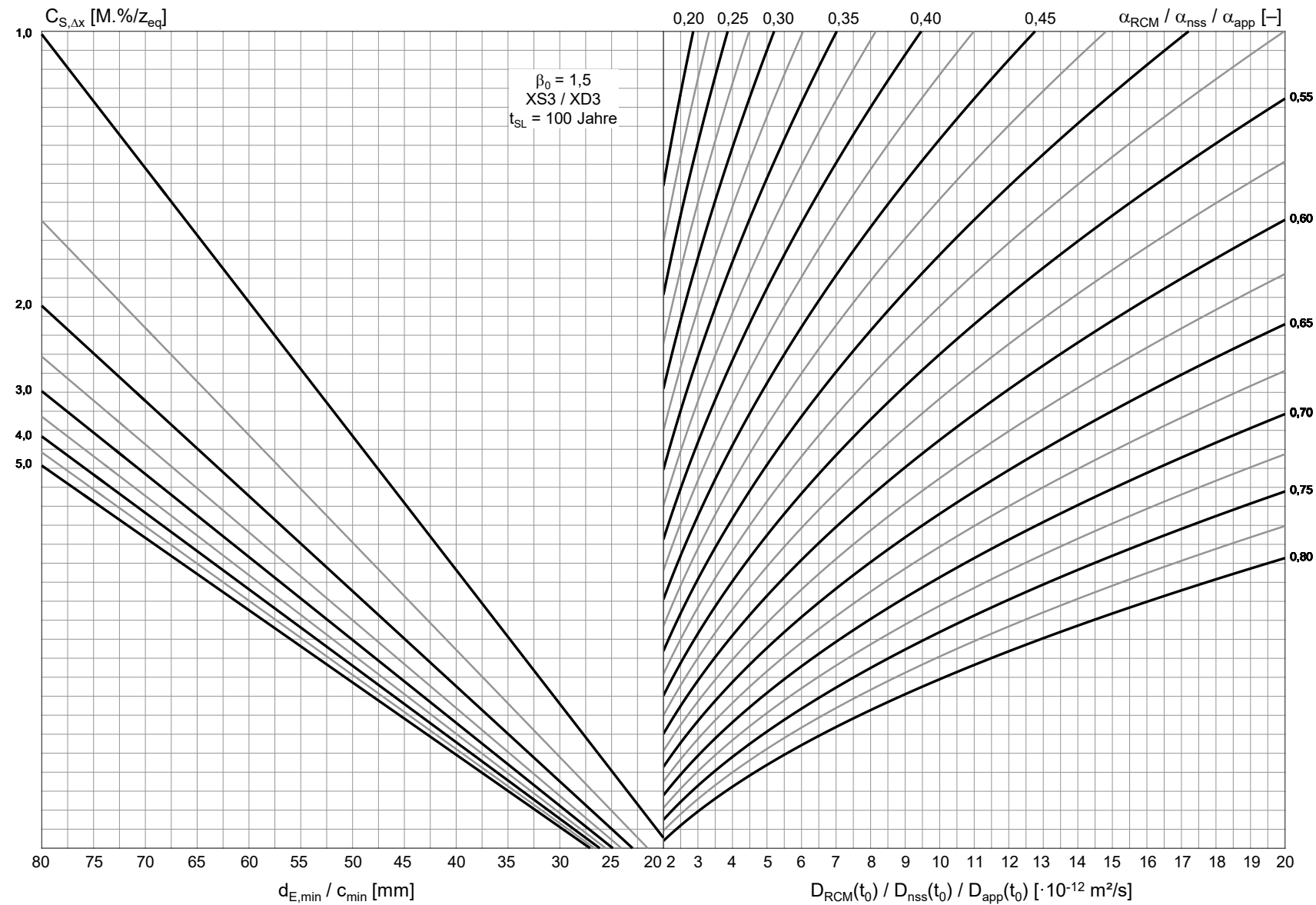


Bild 4.7: Nomogramm für XS3 / XD3, Ziellebensdauer $t_{SL}=100$ Jahre, Zielzuverlässigkeit $\beta_0=1,5$, $2 \leq D(t_0) \leq 20$

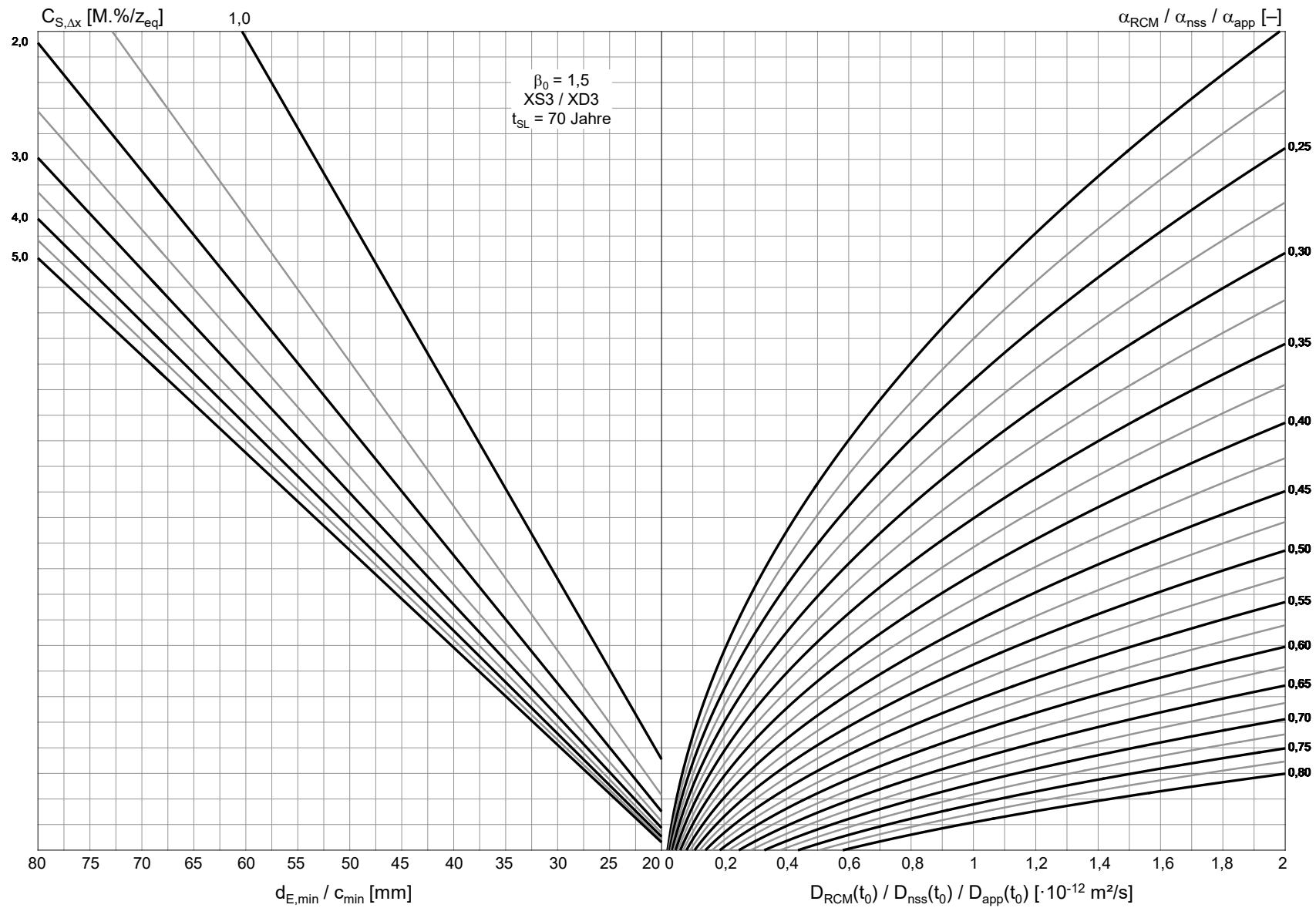


Bild 4.8: Nomogramm für XS3 / XD3, Ziellebensdauer $t_{SL}=70$ Jahre, Zielzuverlässigkeit $\beta_0=1,5$, $0 \leq D(t_0) \leq 2$

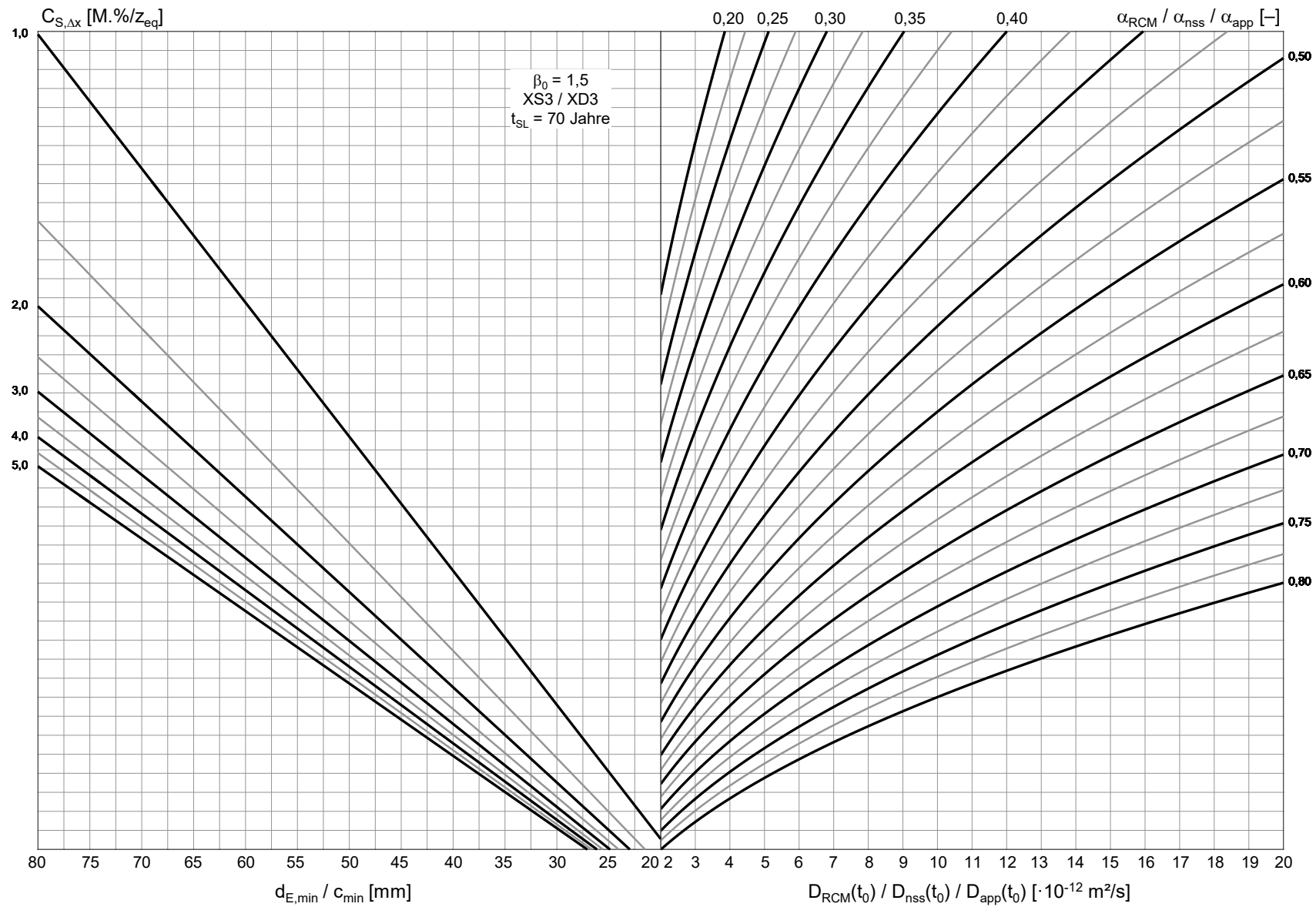


Bild 4.9: Nomogramm für XS3 / XD3, Ziellebensdauer $t_{SL}=70$ Jahre, Zielzuverlässigkeit $\beta_0=1,5$, $2 \leq D(t_0) \leq 20$

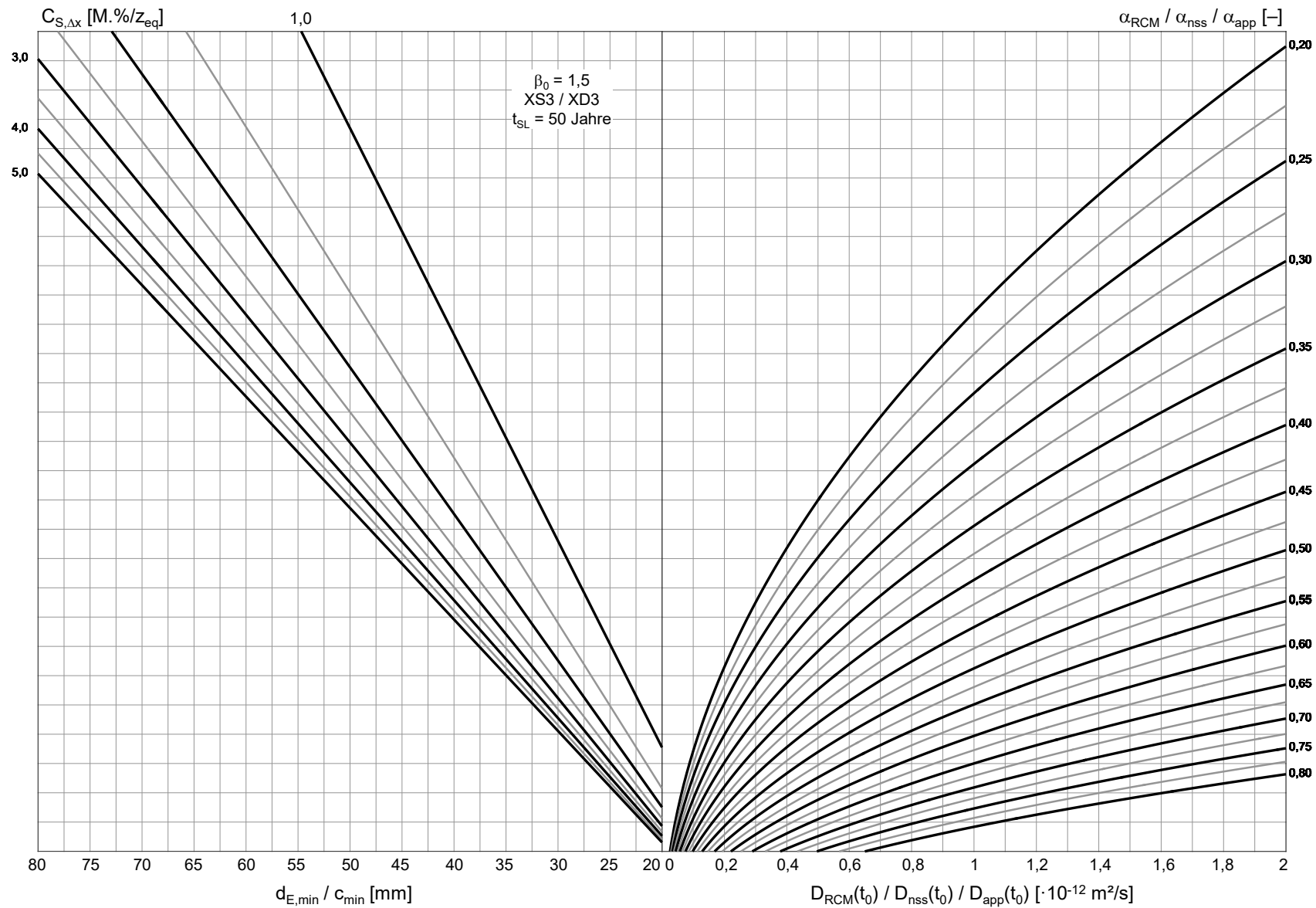


Bild 4.10: Nomogramm für XS3 / XD3, Ziellebensdauer $t_{SL}=50$ Jahre, Zielzuverlässigkeit $\beta_0=1,5$, $0 \leq D(t_0) \leq 2$

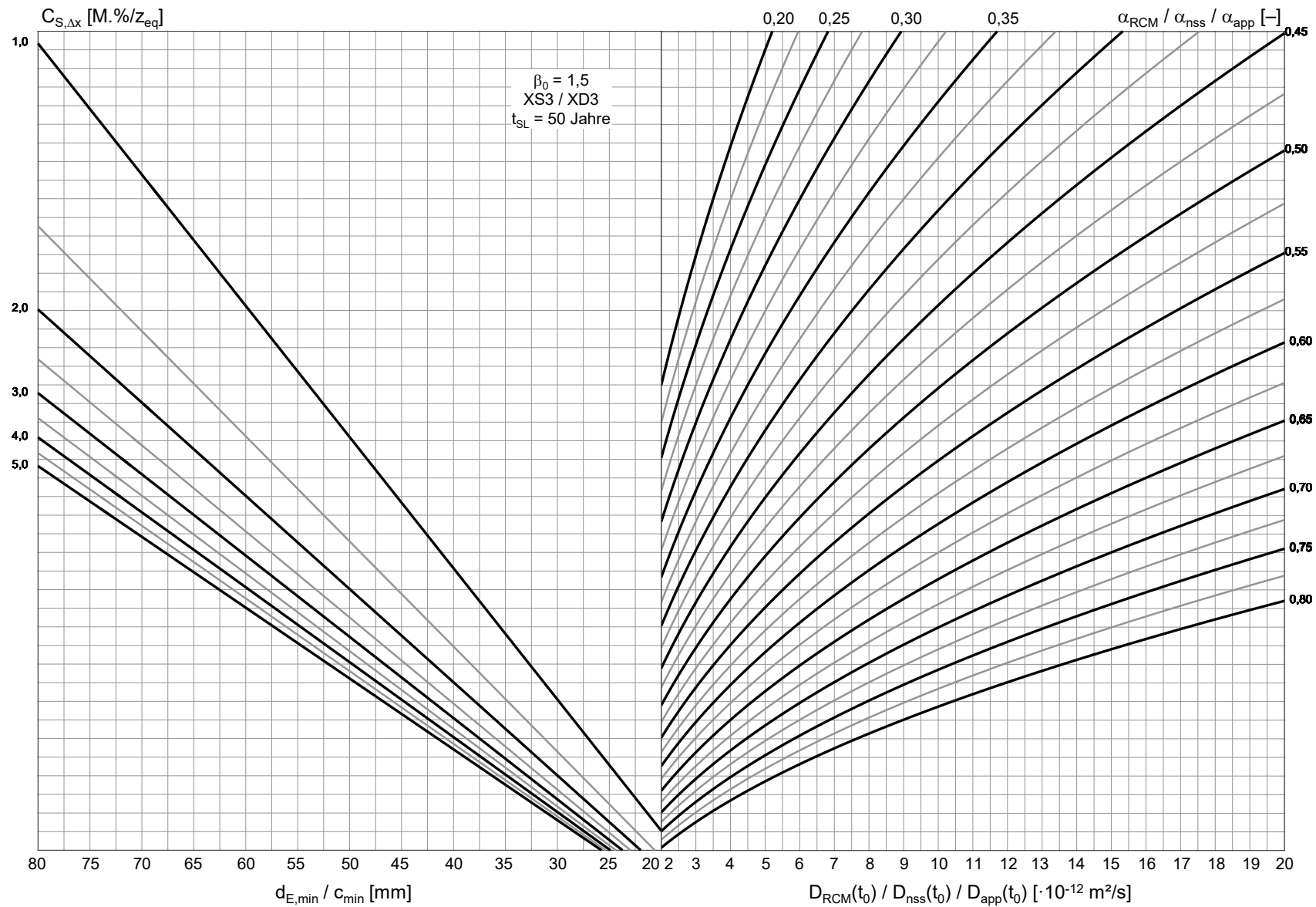


Bild 4.11: Nomogramm für XS3 / XD3, Ziellebensdauer $t_{SL}=50$ Jahre, Zielzuverlässigkeit $\beta_0=1,5$, $2 \leq D(t_0) \leq 20$

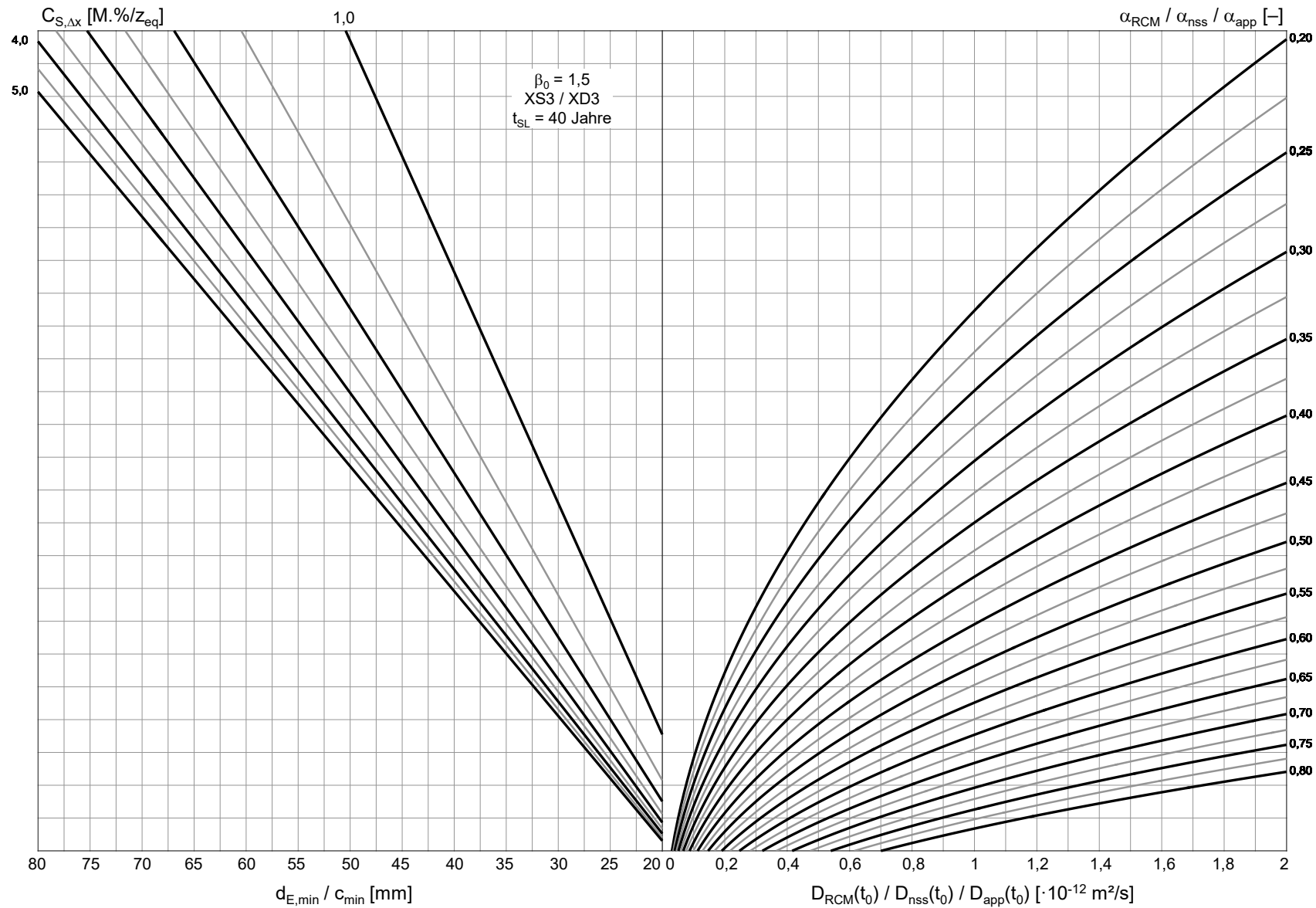


Bild 4.12: Nomogramm für XS3 / XD3, Ziellebensdauer $t_{SL}=40$ Jahre, Zielzuverlässigkeit $\beta_0=1,5$, $0 \leq D(t_0) \leq 2$

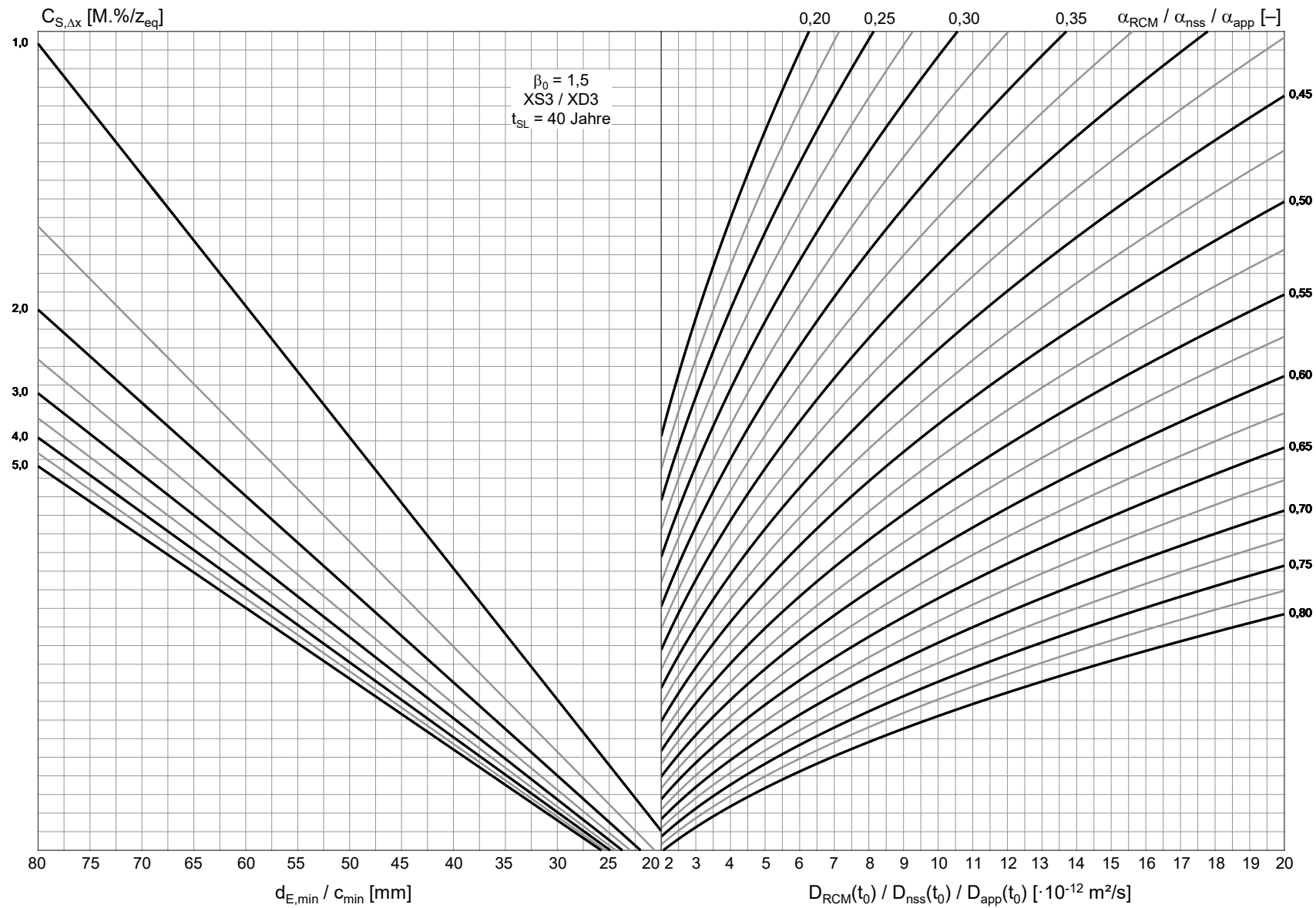


Bild 4.13: Nomogramm für XS3 / XD3, Ziellebensdauer $t_{SL}=40$ Jahre, Zielzuverlässigkeit $\beta_0=1,5$, $2 \leq D(t_0) \leq 20$

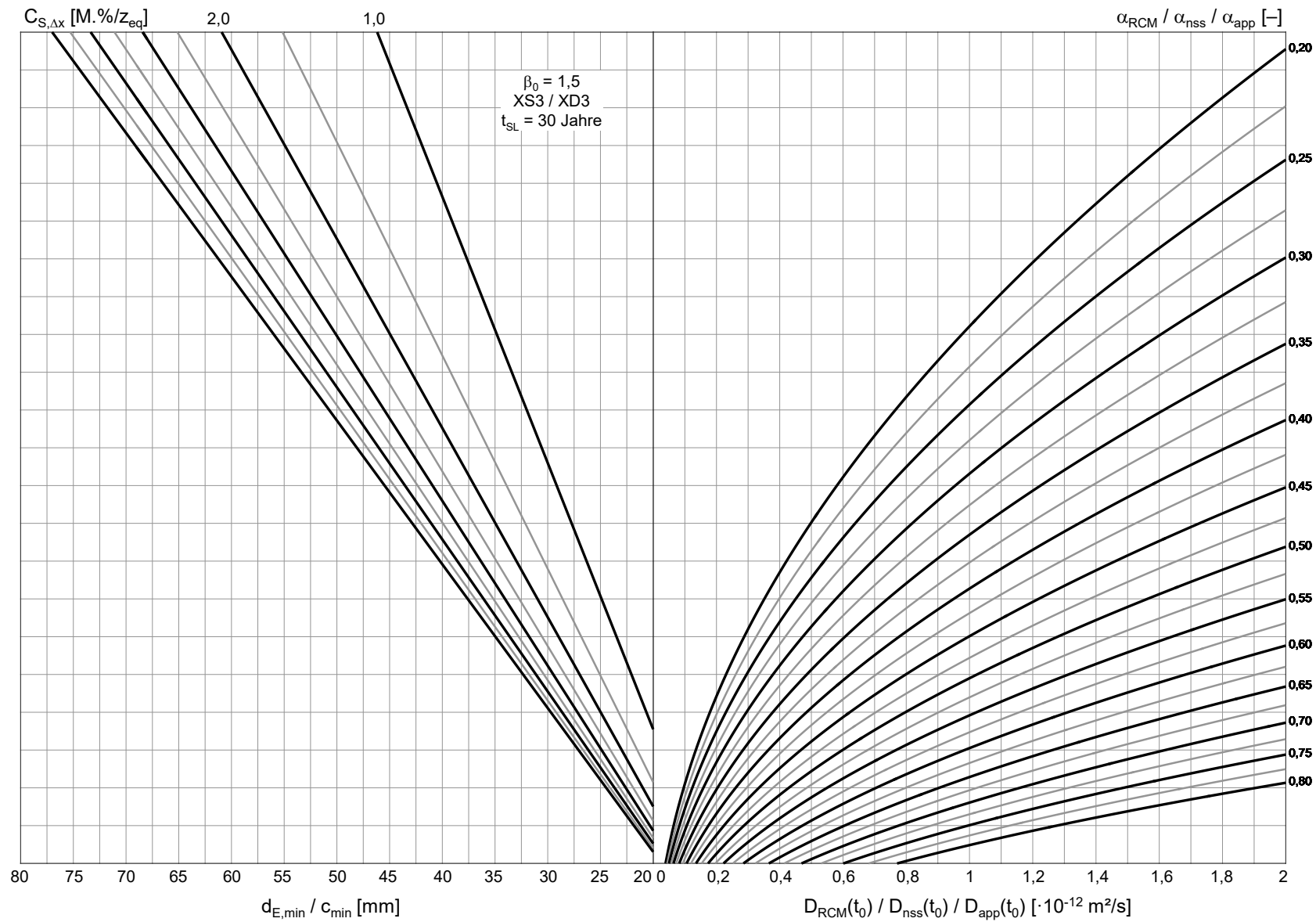


Bild 4.14: Nomogramm für XS3 / XD3, Ziellebensdauer $t_{SL}=30$ Jahre, Zielzuverlässigkeit $\beta_0=1,5$, $0 \leq D(t_0) \leq 2$

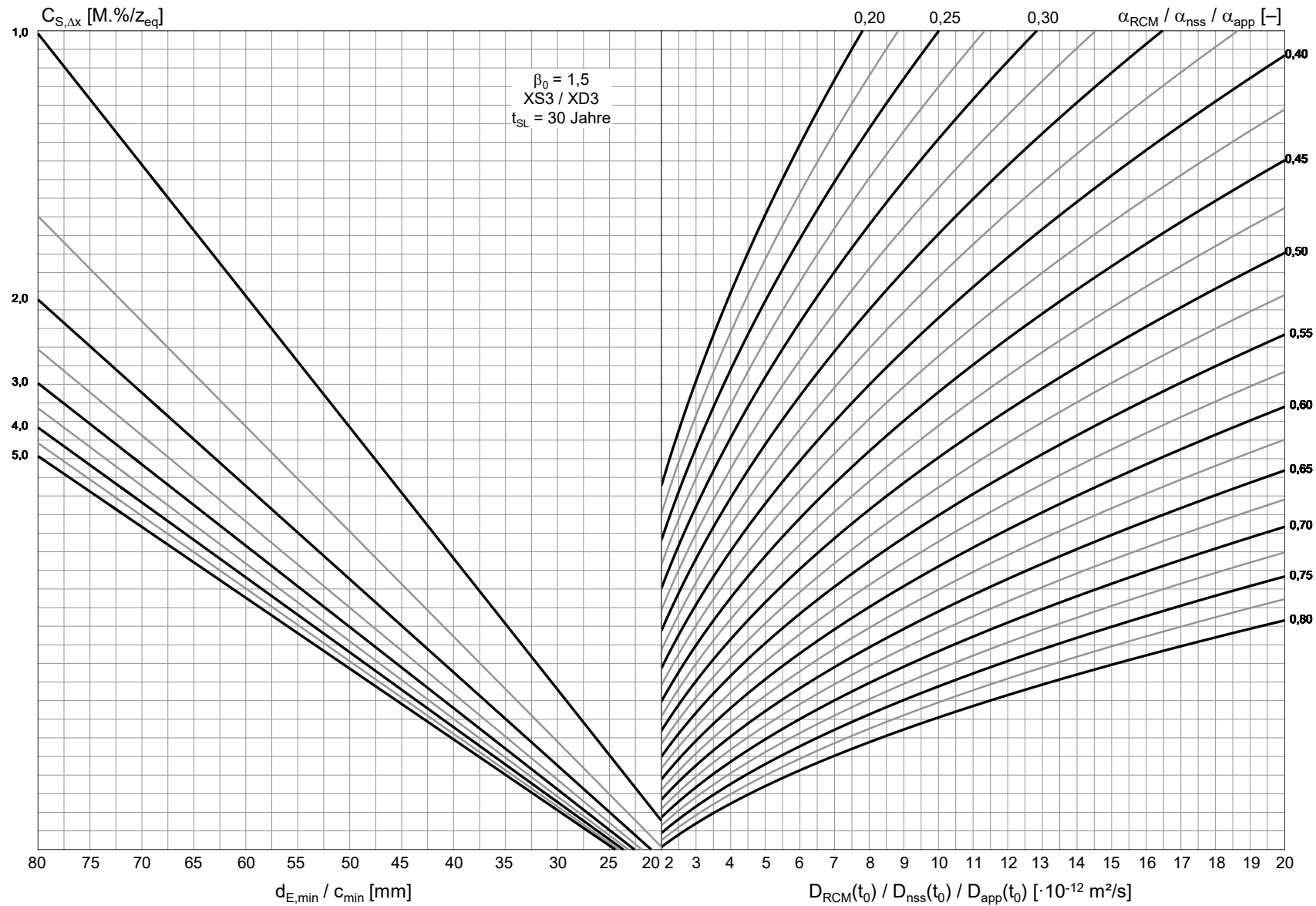


Bild 4.15: Nomogramm für XS3 / XD3, Ziellebensdauer $t_{SL}=30$ Jahre, Zielzuverlässigkeit $\beta_0=1,5$, $2 \leq D(t_0) \leq 20$

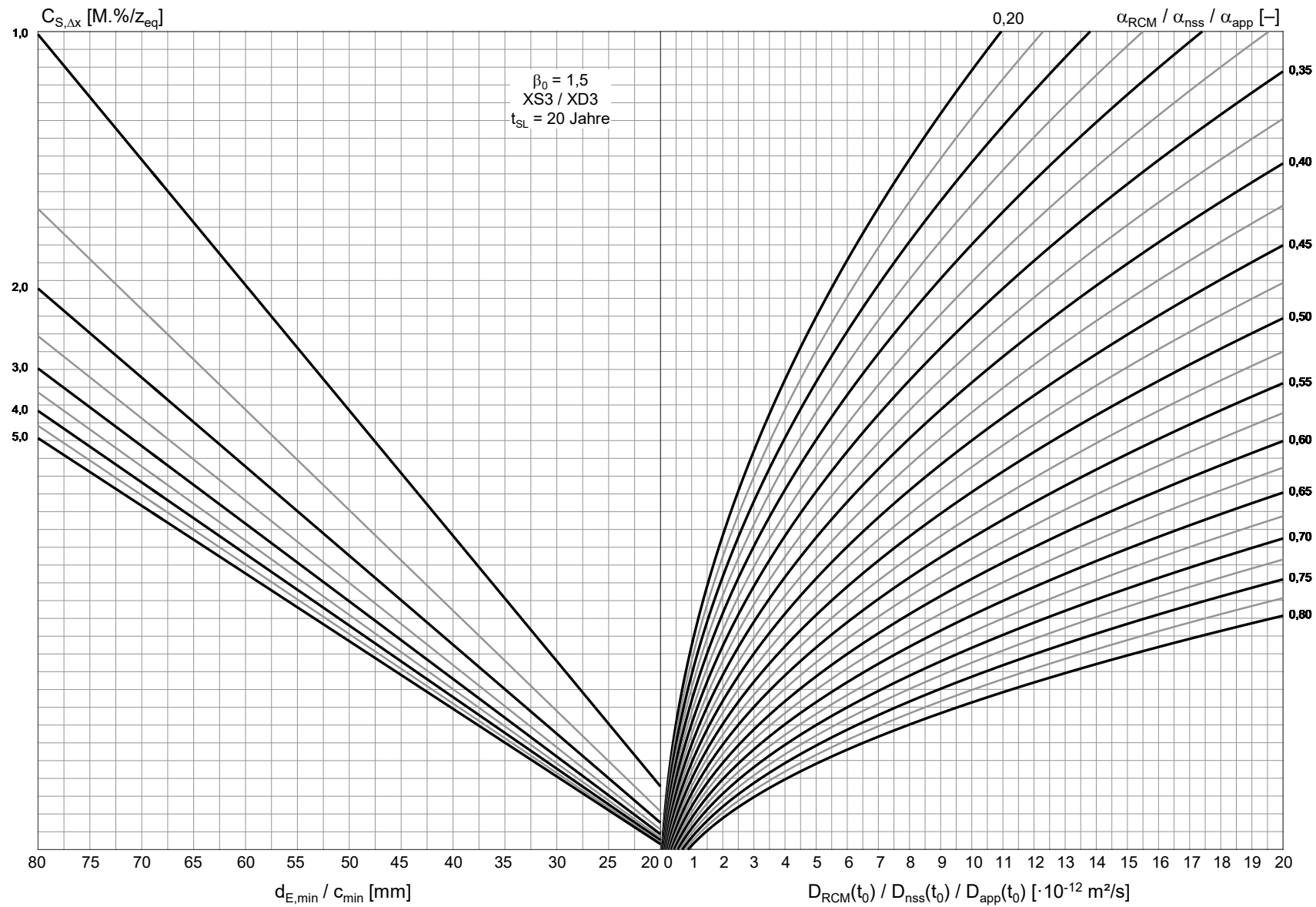


Bild 4.16: Nomogramm für XS3 / XD3, Ziellebensdauer $t_{SL}=20$ Jahre, Zielzuverlässigkeit $\beta_0=1,5$, $0 \leq D(t_0) \leq 20$

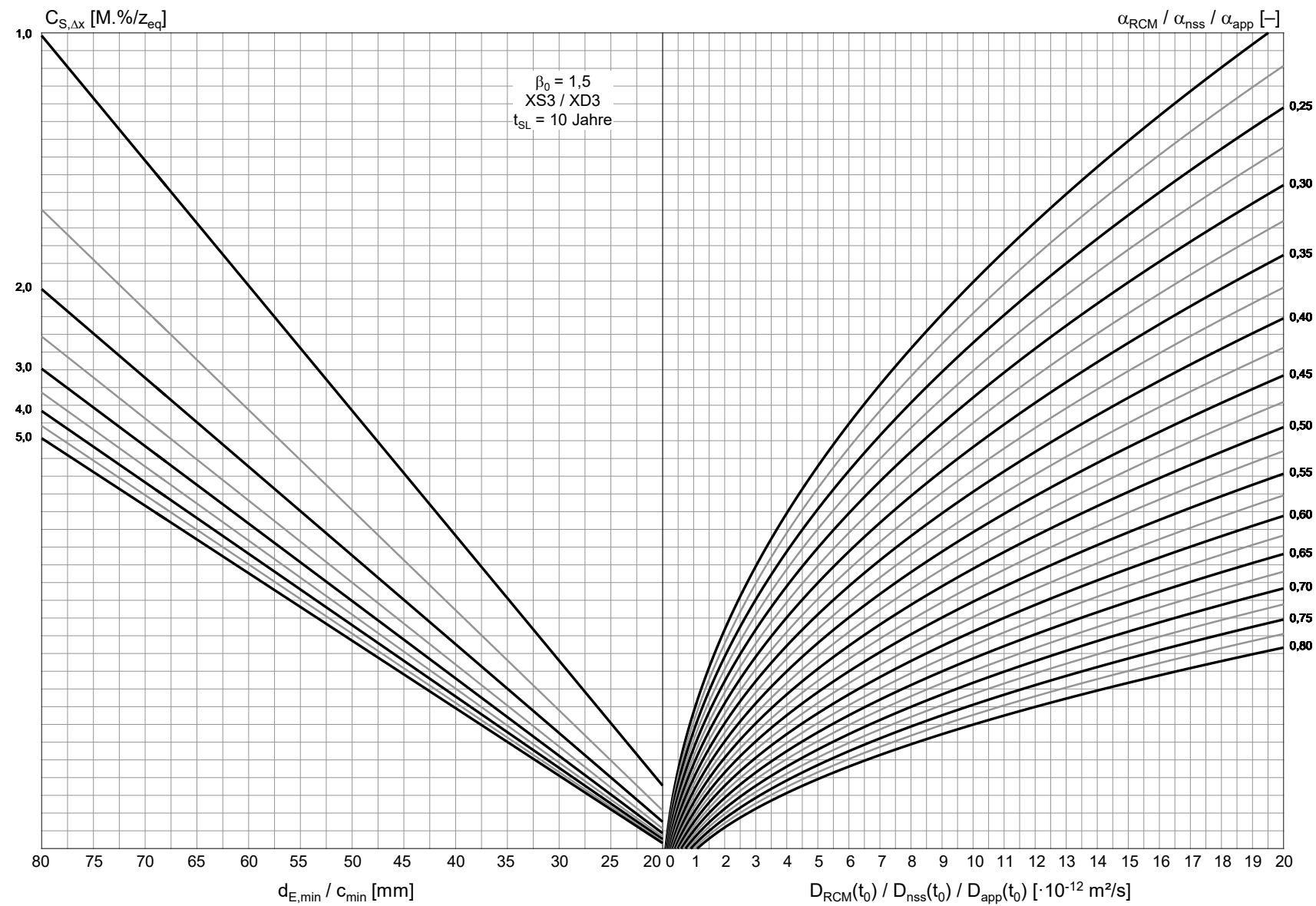


Bild 4.17: Nomogramm für XS3 / XD3, Ziellebensdauer $t_{SL}=10$ Jahre, Zielzuverlässigkeit $\beta_0=1,5$, $0 \leq D(t_0) \leq 20$

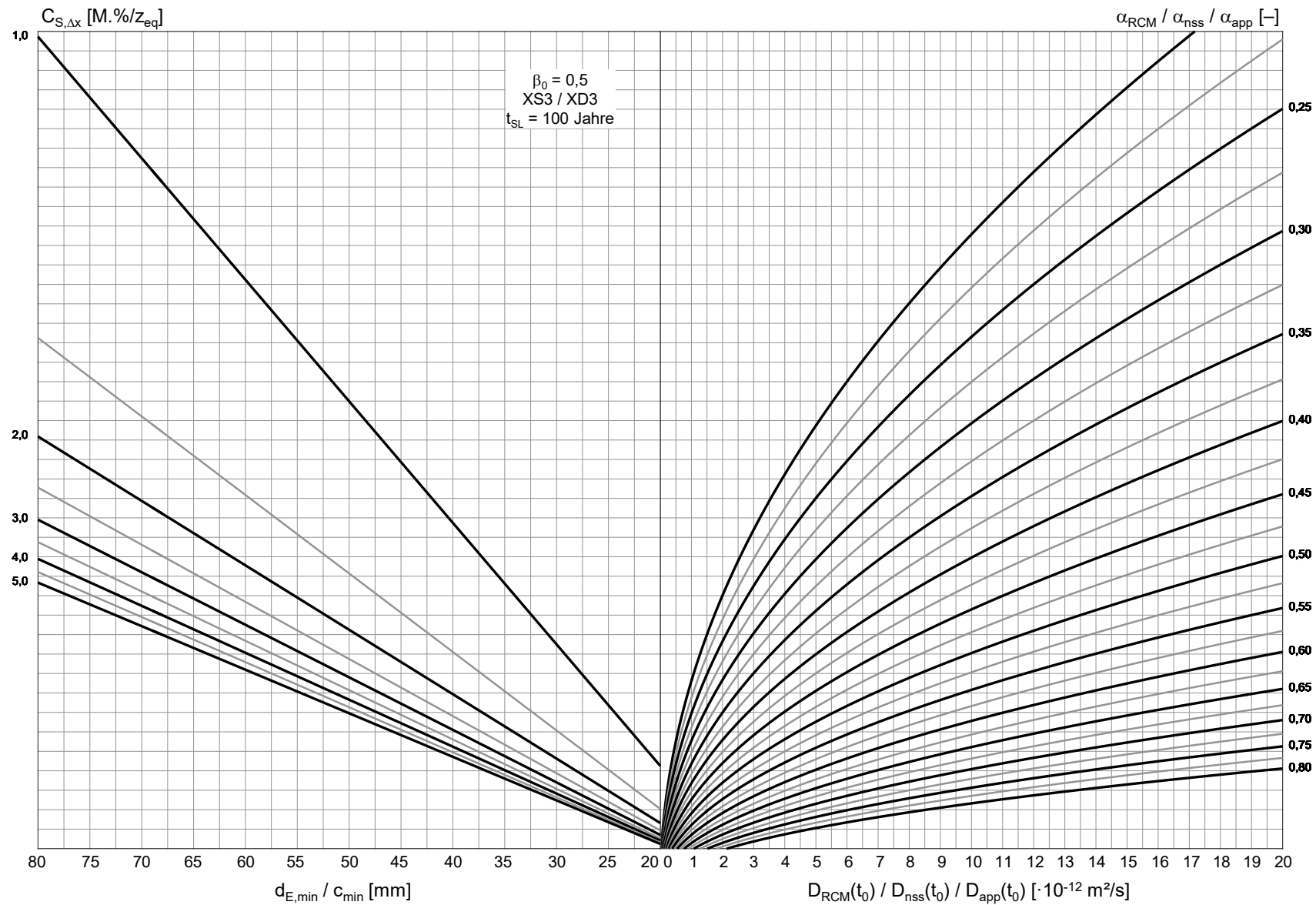


Bild 4.18: Nomogramm für XS3 / XD3, Ziellebensdauer $t_{SL}=100$ Jahre, Zielzuverlässigkeit $\beta_0=0,5$, $0 \leq D(t_0) \leq 20$

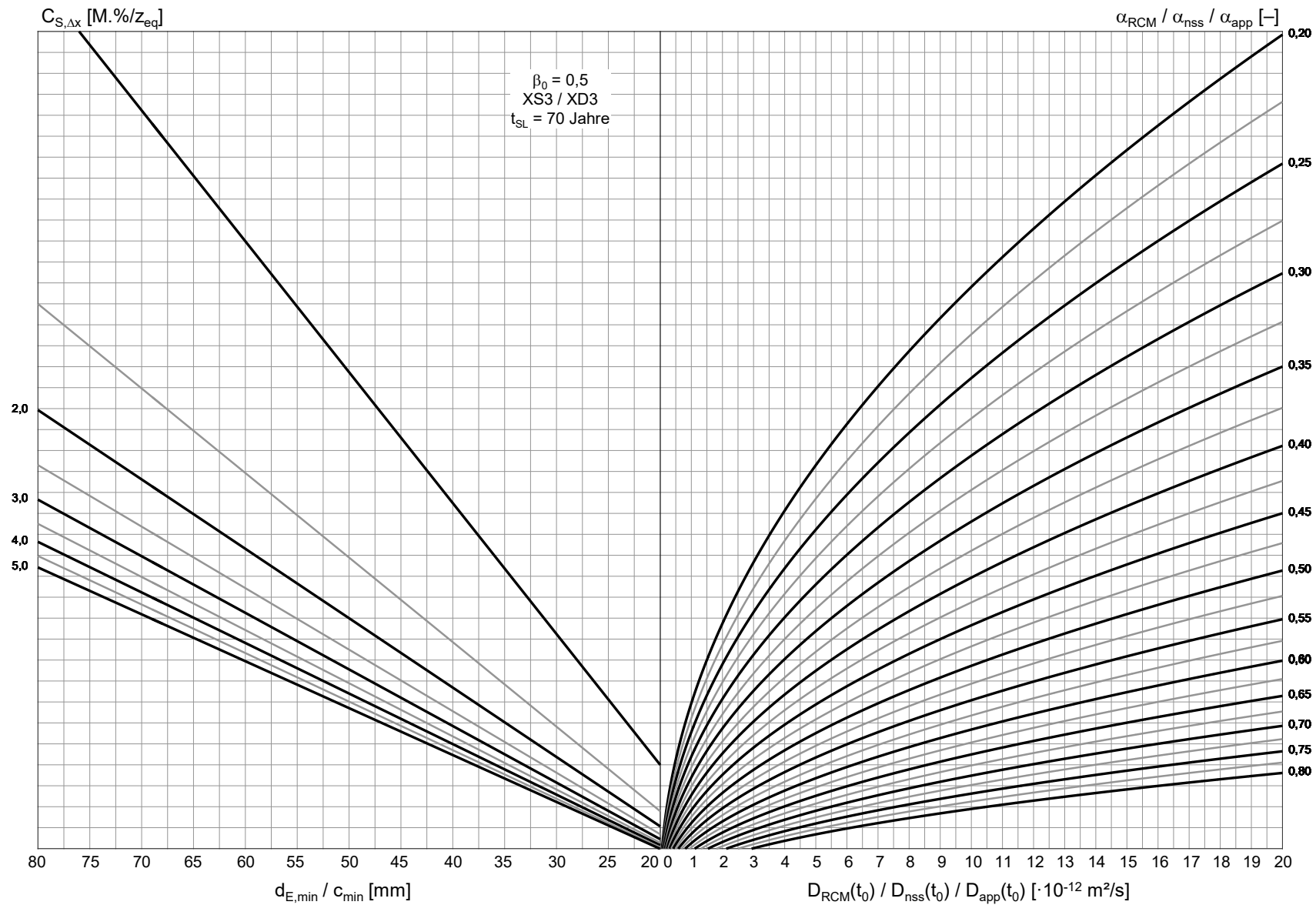


Bild 4.19: Nomogramm für XS3 / XD3, Ziellebensdauer $t_{SL}=70$ Jahre, Zielzuverlässigkeit $\beta_0=0,5$, $0 \leq D(t_0) \leq 20$

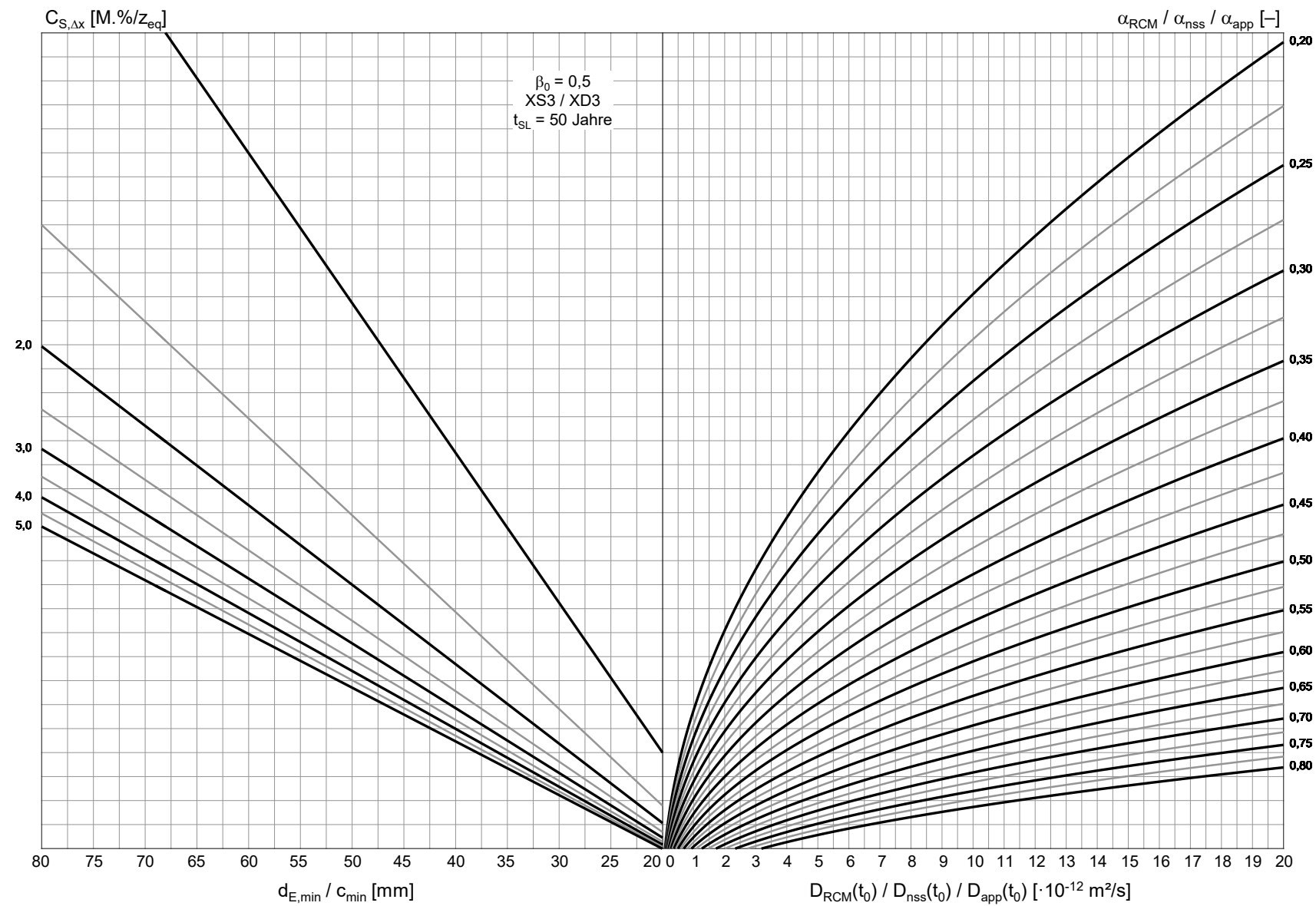


Bild 4.20: Nomogramm für XS3 / XD3, Ziellebensdauer $t_{SL}=50$ Jahre, Zielzuverlässigkeit $\beta_0=0,5$, $0 \leq D(t_0) \leq 20$

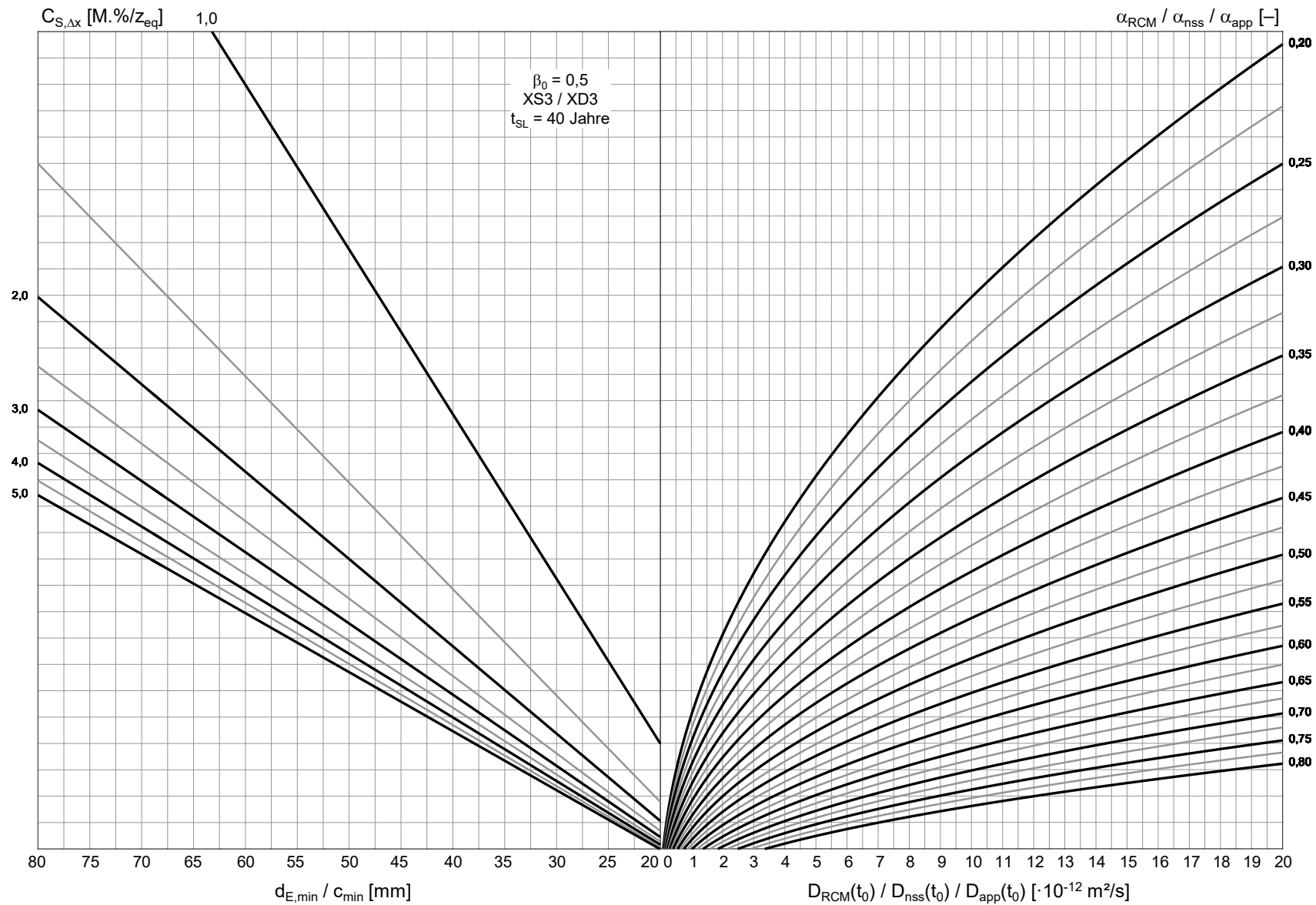


Bild 4.21: Nomogramm für XS3 / XD3, Ziellebensdauer $t_{SL}=40$ Jahre, Zielzuverlässigkeit $\beta_0=0,5$, $0 \leq D(t_0) \leq 20$

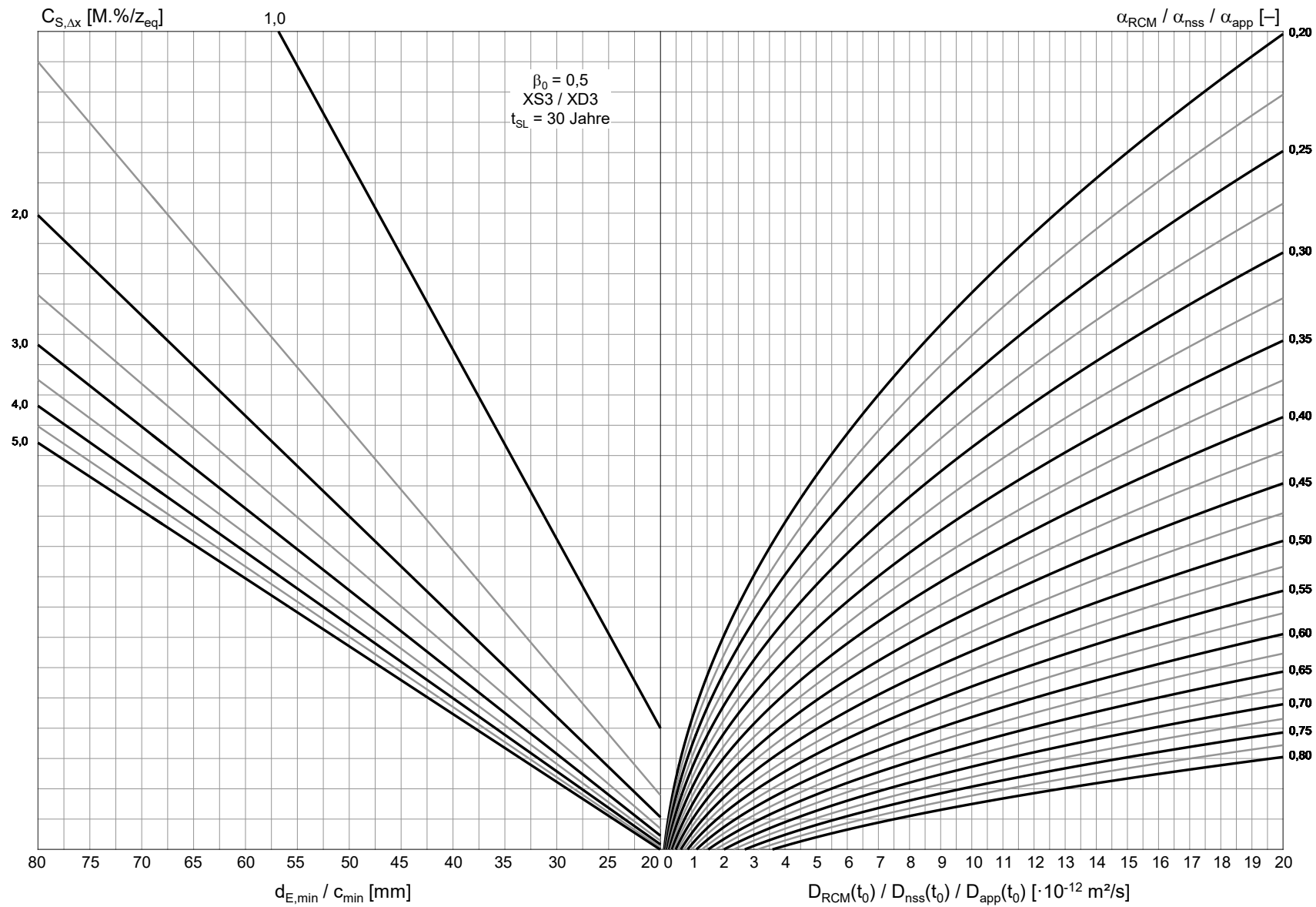


Bild 4.22: Nomogramm für XS3 / XD3, Ziellebensdauer $t_{SL}=30$ Jahre, Zielzuverlässigkeit $\beta_0=0,5$, $0 \leq D(t_0) \leq 20$

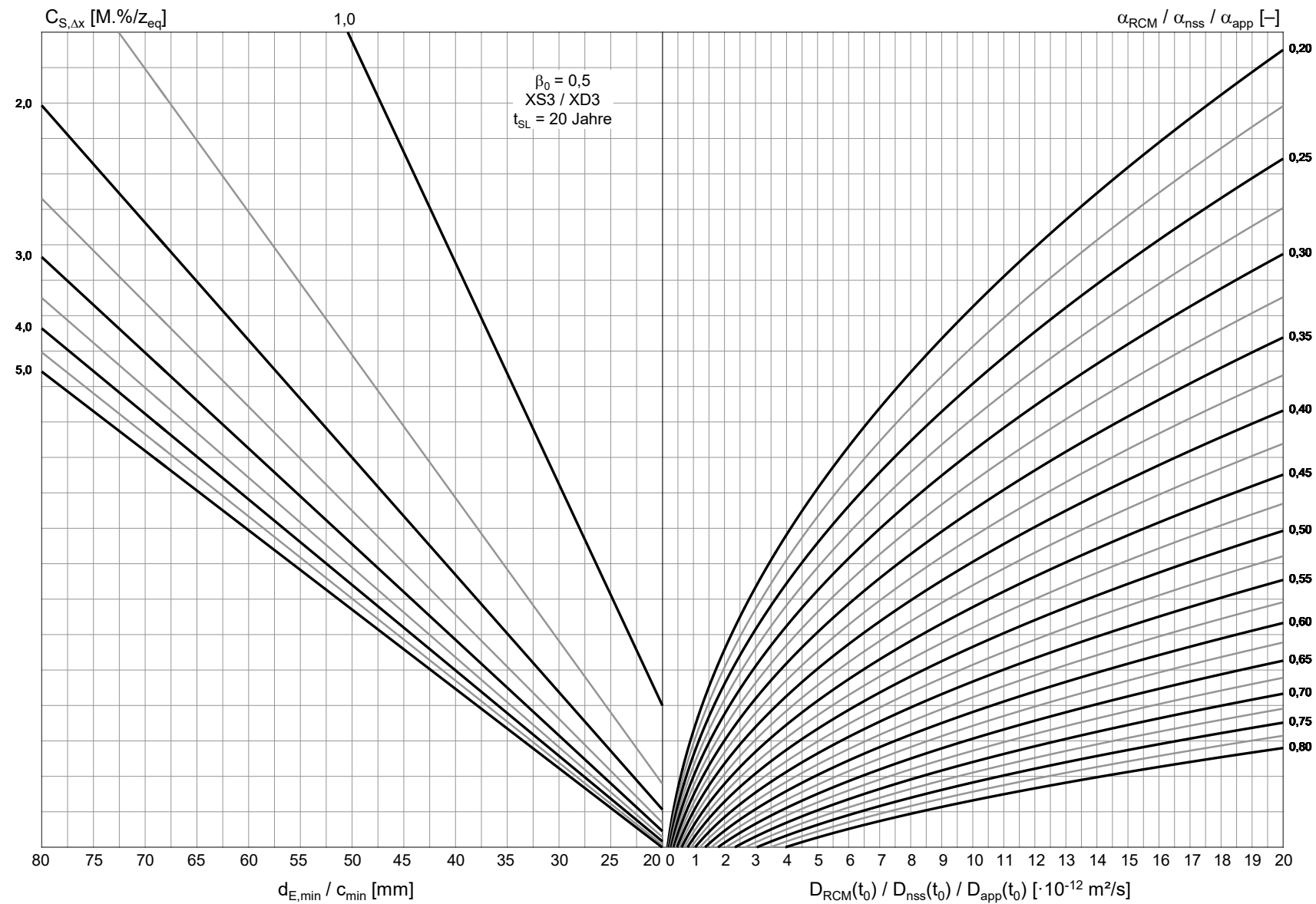


Bild 4.23: Nomogramm für XS3 / XD3, Ziellebensdauer $t_{SL}=20$ Jahre, Zielzuverlässigkeit $\beta_0=0,5$, $0 \leq D(t_0) \leq 20$

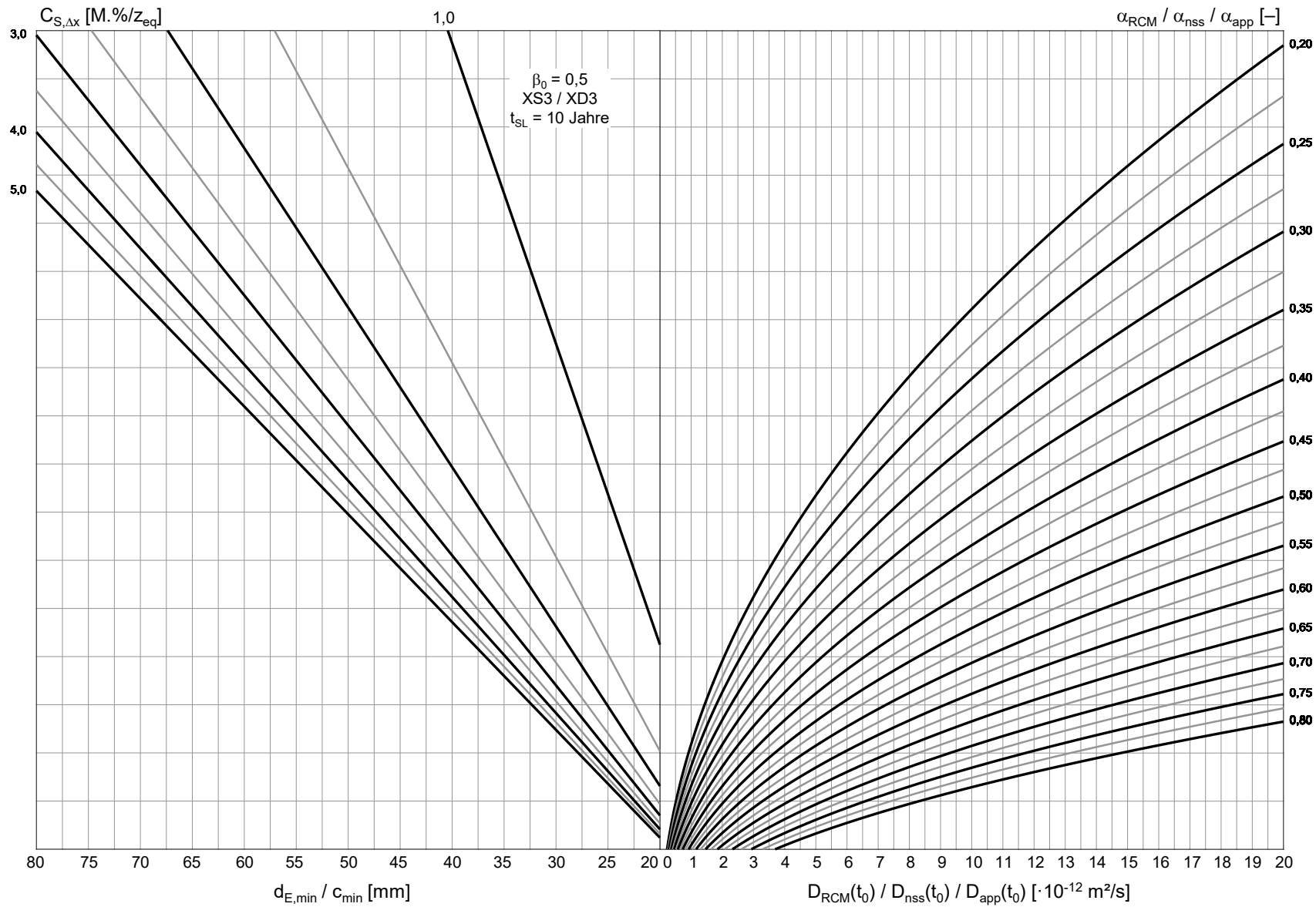


Bild 4.24: Nomogramm für XS3 / XD3, Ziellebensdauer $t_{SL}=10$ Jahre, Zielzuverlässigkeit $\beta_0=0,5$, $0 \leq D(t_0) \leq 20$

4.7 Beispiele zur Abschätzung der Restnutzungsdauer und zur Bemessung von neu zu errichtenden Bauteilen und von Instandsetzungsmaßnahmen mittels Betonersatz bei Chloridbeaufschlagung

4.7.1 Ermittlung der Restnutzungsdauer eines Meerwasserbauwerkes (Chloridprofile aus Untersuchungen zu einem Zeitpunkt vorhanden)

Bauteiltyp und -ort	Meerwasserbauwerk an der Nordseeküste, XS3
Betonzusammensetzung	CEM III/A
Bauteilalter zum Inspektionszeitpunkt	20 Jahre
Betondeckung	$c_{\text{nom}} = 60 \text{ mm}$, $\Delta c = 10 \text{ mm}$ ($c_{\text{min}} = 50 \text{ mm}$)
Zielzuverlässigkeit	$\beta_0 = 1,5$

Tabelle 4.3: Informationen zum Bauteil

	Chloridgehalt [M.-%/z _{eq}]				
	mittlere Messtiefe [mm]				
	5	15	25	35	45
Mittelwert	3,01	2,41	0,55	0,43	0,06

Tabelle 4.4: Gemessene Chloridgehalte zum Inspektionszeitpunkt von 20 Jahren

Lösung:

Aus den gemessenen Chloridgehalten wird mit Hilfe von Excel die Parameter $D_{\text{app}}(t_{\text{insp}})$ und $C_{S,\Delta x,\text{insp}}$, wie im Bild 4.25 dargestellt, berechnet.

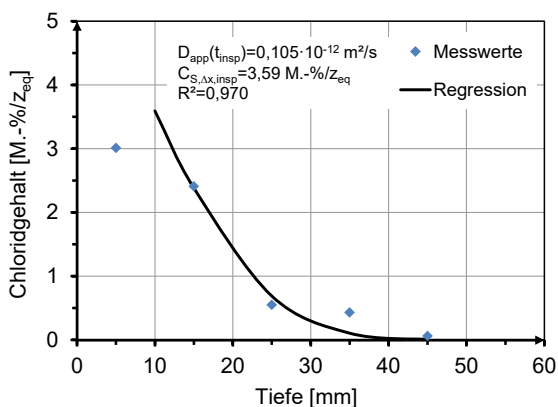


Bild 4.25: Ermittlung von $D_{\text{app}}(t_{\text{insp}})$ und $C_{S,\Delta x,\text{insp}}$ zum Zeitpunkt $t_{\text{insp}} = 20 \text{ Jahre}$ durch Regressionsanalyse (z. B. mit Hilfe der Funktion „Solver“ in Microsoft Excel)

Bild 4.25 → $D_{\text{app}}(t_{\text{insp},1}) = 0,105 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ und $C_{S,\Delta x,\text{insp},1} = 3,59 \text{ M.-%/z}_{\text{eq}}$

CEM III/A → Altersexponent $\alpha_{app} = 0,40$ (s. Tabelle 4.1)

$$\text{Gleichung (2): } D_{app}(t_0) = \frac{1}{k_e} \cdot D_{app}(t_{insp}) \cdot \left(\frac{t_0}{t_{insp}}\right)^{-\alpha_{app}} = \frac{1}{0,56} \cdot 0,105 \cdot 10^{-12} \cdot \left(\frac{0,0767}{20}\right)^{-0,40} = 1,74 \cdot 10^{-12} \frac{m^2}{s}$$

Eingangswerte für die Nomogramme: $c_{min}=50$ mm, $C_{S,\Delta x,insp} = 3,59$ M.-%/ z_{eq} , $D_{app}(t_0) = 1,74 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, $\alpha_{app}=0,40$

Aus den Bildern 4.6 bis 4.17 ($\beta_0 = 1,5$) wird das entsprechende Nomogramm ausgesucht.

Bild 4.10 ($t_{SL} = 50$ Jahre) → $c_{min} \sim 50,6$ mm

Bild 4.12 ($t_{SL} = 40$ Jahre) → $c_{min} \sim 47,7$ mm

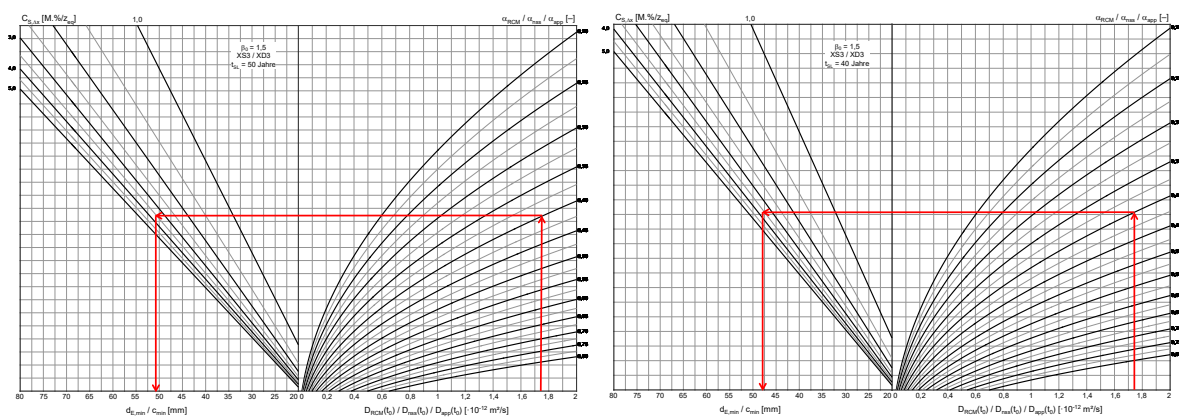


Bild 4.26: Abschätzung der erforderlichen Mindestbetondeckung mit Hilfe der Nomogramme im Bild 4.10 (links) und Bild 4.12 (rechts)

Lineare Interpolation → $t_{SL} \sim 48$ Jahre → Restnutzungsdauer beträgt ca. 28 Jahre (= 48-20).

4.7.2 Ermittlung der Restnutzungsdauer eines Meerwasserbauwerkes (Chloridprofile aus Untersuchungen in zwei unterschiedlichen Zeitpunkten vorhanden)

Bauteiltyp und -ort	Meerwasserbauwerk an der Nordseeküste, XS3
Betonzusammensetzung	unbekannt
Bauteilalter zum Inspektionszeitpunkt	15 und 35 Jahre
Betondeckung	$c_{nom} = 60$ mm, $\Delta c = 10$ mm ($c_{min} = 50$ mm)
Zielzuverlässigkeit	$\beta_0 = 1,5$

Tabelle 4.5: Informationen zum Bauteil

	Chloridgehalt [M.-%/z _{eq}]					
	mittlere Messtiefe [mm]					
	5	15	25	35	45	55
Mittelwert	3,10	2,25	0,35	0,27	0,05	0,01

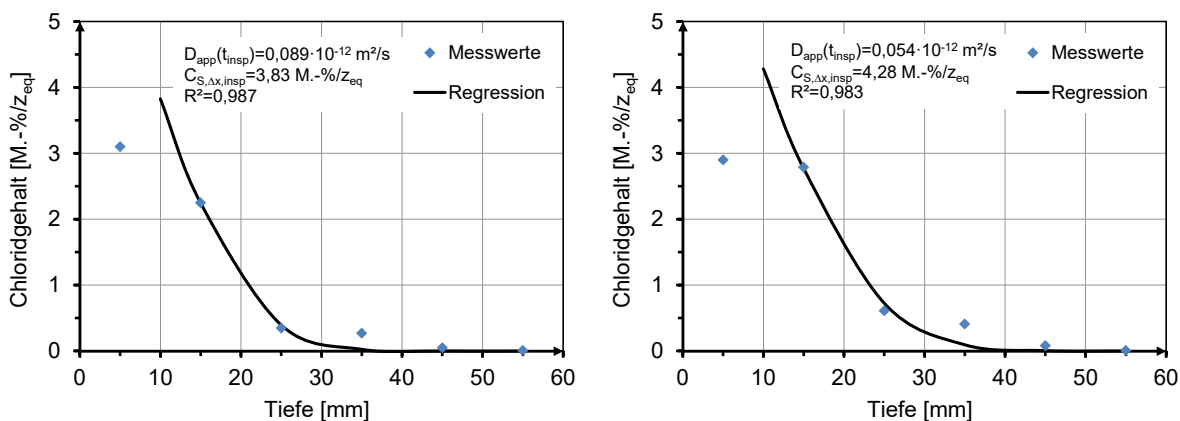
Tabelle 4.6: Gemessene Chloridgehalte zum Inspektionszeitpunkt von 15 Jahren

	Chloridgehalt [M.-%/z _{eq}]					
	mittlere Messtiefe [mm]					
	5	15	25	35	45	55
Mittelwert	2,90	2,79	0,61	0,41	0,08	0,01

Tabelle 4.7: Gemessene Chloridgehalte zum Inspektionszeitpunkt von 35 Jahren

Lösung:

Aus den gemessenen Chloridgehalten werden mit Hilfe von Excel die Parameter $D_{app}(t_{insp})$ und $C_{S,Ax,insp}$, wie im Bild 4.27 dargestellt, berechnet.

Bild 4.27: Ermittlung von $D_{app}(t_{insp})$ und $C_{S,Ax,insp}$ zum Inspektionszeitpunkt von 15 Jahren (links) und 35 Jahren (rechts) durch Regressionsanalyse (z. B. mit Hilfe der Funktion „Solver“ in Microsoft Excel)Bild 4.27, links $\rightarrow D_{app}(t_{insp,1}) = 0,089 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ Bild 4.27, rechts $\rightarrow D_{app}(t_{insp,2}) = 0,054 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$

$$\text{Gleichung (4): } \alpha_{app} = \frac{\log\left(\frac{D_{app}(t_{insp,2})}{D_{app}(t_{insp,1})}\right)}{\log\left(\frac{t_{insp,1}}{t_{insp,2}}\right)} = \frac{\log\left(\frac{0,054}{0,089}\right)}{\log\left(\frac{15}{35}\right)} = 0,59$$

$$\text{Gleichung (5): } D_{app}(t_0) = \frac{1}{0,56} \cdot 0,054 \cdot 10^{-12} \cdot \left(\frac{0,0767}{35}\right)^{-0,59} = 3,57 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$$

Bild 4.27, rechts $\rightarrow C_{S,\Delta x,insp,2} = 4,28 \text{ M.-%}/z_{eq}$

Eingangswerte für die Nomogramme: $c_{min}=50 \text{ mm}$, $C_{S,\Delta x,insp,2} = 4,28 \text{ M.-%}/z_{eq}$, $D_{app}(t_0) = 3,57 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$,
 $\alpha_{app}=0,59$

Aus den Bildern 4.6 bis 4.17 ($\beta_0 = 1,5$) wird das entsprechende Nomogramm ausgesucht.

Bild 4.7 ($t_{SL} = 100 \text{ Jahre}$) $\rightarrow c_{min} \sim 53,6 \text{ mm}$

Bild 4.9 ($t_{SL} = 70 \text{ Jahre}$) $\rightarrow c_{min} \sim 49,8 \text{ mm}$

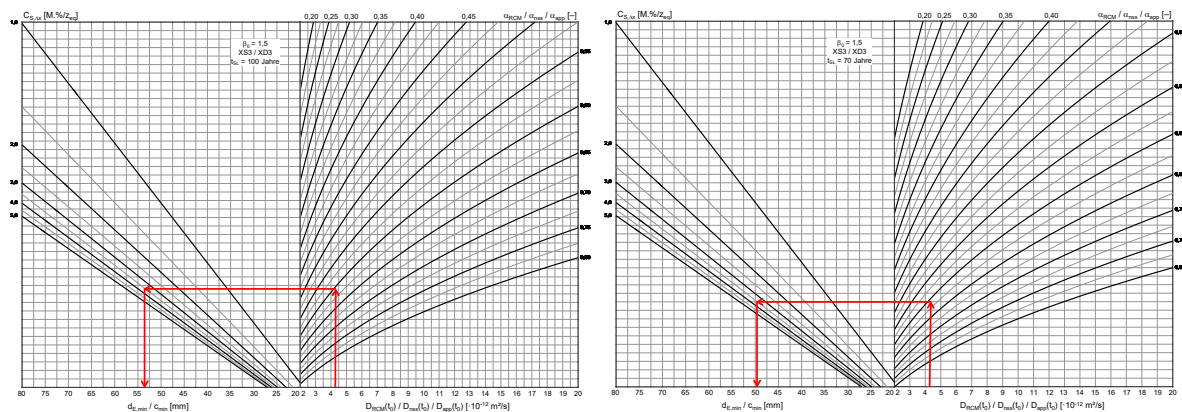


Bild 4.28: Abschätzung der erforderlichen Mindestbetondeckung mit Hilfe der Nomogramme im Bild 4.7 (links) und Bild 4.9 (rechts)

Lineare Interpolation $\rightarrow t_{SL} \sim 71 \text{ Jahre} \rightarrow \text{Restnutzungsdauer beträgt ca. 36 Jahre (=71-35)}.$

4.7.3 Berechnung des erforderlichen Chlorideindringwiderstands des Betons für den Bau eines Bauteils mit den in Tabelle 4.8 gegebenen Randbedingungen

Bauteiltyp und -ort	Brückenpfeiler, XD2
Betondeckung	$c_{nom} = 60 \text{ mm}$, $\Delta c = 10 \text{ mm}$ ($c_{min} = 50 \text{ mm}$)
Gewählte Bindemittelart	CEM I + 20% Flugasche
Geschätzte Chloridbeanspruchung	$C_{S,\Delta x} = 2,5 \text{ M.-%}/z_{eq}$
Zielnutzungsdauer	$t_{SL} = 100 \text{ Jahre}$
Zielzuverlässigkeit	$\beta_0 = 1,5$

Tabelle 4.8: Informationen zum Bauteil

Lösung:

CEM I + 20% FA $\rightarrow$ Tabelle 4.1: $\alpha_{RCM} = 0,60$ (CEM II/AV)

XD2 ($\Delta x = 0$) → Mindestbetondeckung als Eingangsparameter um 10 mm erhöhen: $c_{\min} = 50 + 10 = 60$ mm (s. 4.6 (2) sowie Tabelle 4.2)

Eingangswerte für das Nomogramm: $c_{\min} = 60$ mm, $C_{S,\Delta x} = 2,5$ M.-%/z_{eq}, $\alpha_{RCM} = 0,60$

$\beta_0 = 1,5$ und $t_{SL} = 100$ Jahre → Bild 4.7

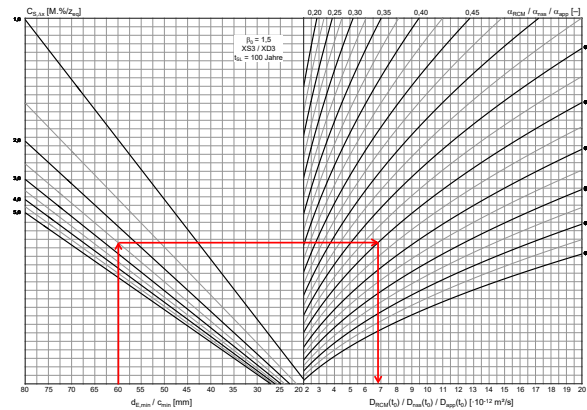


Bild 4.29: Ermittlung des erforderlichen Chloridmigrationskoeffizienten $D_{RCM}(t_0)$ mit Hilfe des Nomogramms im Bild 4.7

$$\rightarrow D_{RCM}(t_0) \leq 6,8 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$$

Anlagen

Anlage A Kurzzeitlaborprüfverfahren zur Bestimmung des Carbonatisierungswiderstands

Der Nachweis des Carbonatisierungswiderstands kann nach diesem Merkblatt auf unterschiedliche Weise erfolgen (s. Abschnitt 3.5).

Die Prüfung des Carbonatisierungswiderstands wird jeweils in Anlehnung an E DIN EN 12390-10:2017-04 „Prüfung von Festbeton - Teil 10: Bestimmung des Karbonatisierungswiderstandes von Beton bei atmosphärischer Konzentration von Kohlenstoffdioxid“ durchgeführt.

Zur Prüfung von **Beton** (Größtkorndurchmesser $D > 4 \text{ mm}$) werden drei Balken mit den Abmessungen $100 \times 100 \times 500 \text{ mm}^3$ und zur Prüfung von **Mörtel** ($D \leq 4 \text{ mm}$) drei Prismen mit den Abmessungen $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ hergestellt. Die Nachbehandlungsdauer beträgt 7 Tage (1 Tag in der Schalung, 6 Tage unter Wasser bei 20 °C).

Zur Prüfung von **Spritzbeton** gemäß DIN EN 14488-1 „Prüfung von Spritzbeton - Teil 1: Probenahme von Frisch- und Festbeton“ ist eine Platte von mindestens $500 \times 500 \times 100 \text{ mm}^3$ und zur Prüfung von **Spritzmörtel** eine Spritzpfanne gemäß Bild A1 möglichst in einem Arbeitsgang herzustellen. Die Innenflächen der Spritzpfannen sind durch Strahlen mit einem festen Strahlmittel aufzurauen. Während der Herstellung der Probekörper, d. h. bis zu ihrer Entnahme aus dem Spritzstand, muss die Umgebung eine Temperatur von $(20 \pm 5) \text{ °C}$ und eine relative Luftfeuchte von $(50 \pm 20) \%$ aufweisen. Nach Beendigung des Spritzvorgangs ist die Platte bzw. Spritzpfanne sofort aus dem Spritzstand zu entnehmen, die Oberfläche ist abzuziehen und zu glätten. Die Platte bzw. Pfanne ist nach der Herstellung in einem geschlossenen Raum bei einer Lufttemperatur von $15 \text{ bis } 22 \text{ °C}$ für (24 ± 2) Stunden in der Form zu belassen, die freie Oberfläche ist durch Abdecken mit feuchten Tüchern vor Feuchteverlust zu schützen. Anschließend sind die Platten zu entformen. Wenn die Festigkeitsentwicklung der Platten ein Entformen nach 24 Stunden nicht zulässt, kann die Lagerungsdauer in den Spritzformen auf (48 ± 2) Stunden verlängert werden. Die Platte bzw. Pfanne wird danach bis zum Alter von 7 Tagen unter Wasser ($20 \pm 2 \text{ °C}$) gelagert. Anschließend werden aus der Spritzplatte drei Balken mit den Abmessungen $100 \times 100 \times 500 \text{ mm}^3$ und aus der Pfanne drei Prismen mit den Abmessungen $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ herausgesägt.

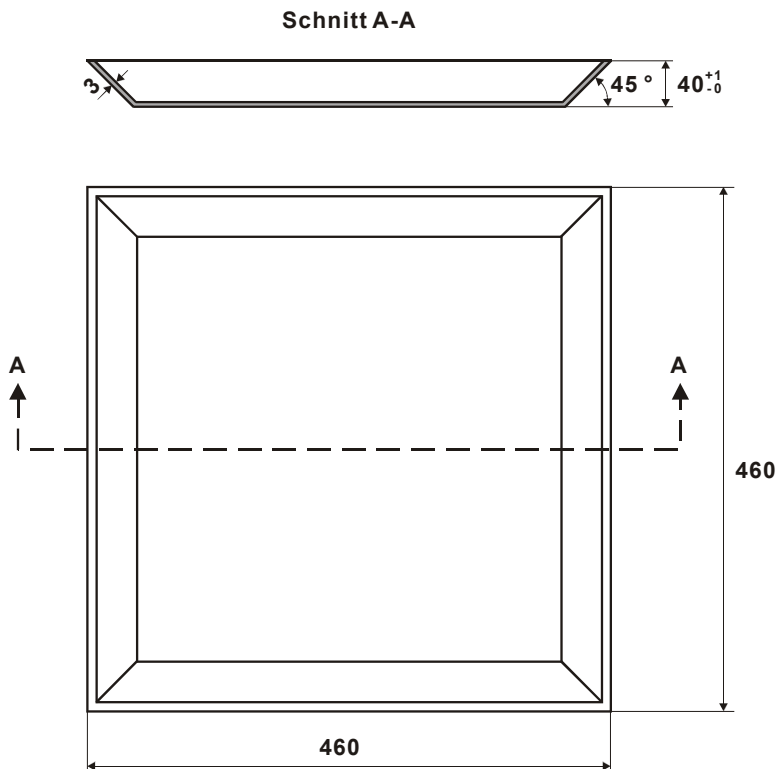


Bild A1: Spritzpfanne aus Stahlblech (Masse in [mm])

Die Balken bzw. Prismen werden anschließend in einer Klimakammer gelagert. Die Temperatur in der Klimakammer muss $20 \pm 2^\circ\text{C}$, die relative Luftfeuchte muss $65 \pm 5\%$ und die CO_2 -Konzentration muss $(0,04 \pm 0,001)$ Vol.-% betragen (= Normklima, entspricht in etwa der natürlichen CO_2 -Konzentration der Luft).

Für die einfache Bemessung nach Abschnitt 3.5.2 wird die Carbonatisierungstiefe nach 90 Tagen Lagerung in der Klimakammer ($d_{K,90}$) an frischen Bruchflächen der Probekörper ermittelt.

Für den Nachweis mit den Bemessungsnomogrammen (s. Abschnitt 3.5.3) wird die Carbonatisierungstiefe nach mindestens 140 Tagen Lagerung in der Klimakammer an frischen Bruchflächen der Probekörper gemessen. Sollte die mittlere Carbonatisierungstiefe x_{cm} unter 2 mm liegen, ist die Prüfung solange zu verlängern, bis eine mittlere Carbonatisierungstiefe von $x_{cm} \geq 2$ mm ermittelt wird.

Anlage B Schnelllaborprüfverfahren zur Bestimmung des Chlorideindringwiderstands zementgebundener Stoffe (Rapid Chloride Migration Test, RCM)

B1 Kurzbeschreibung des Verfahrens

Die Prüfung zur Ermittlung des Chloridmigrationskoeffizienten ermöglicht es, den Widerstand von zementgebundenen Stoffen (Beton, Mörtel, Instandsetzungsmaterialien) gegenüber Chlorideindringen in kurzer Zeit zu ermitteln. Untersucht wird das Eindringen von Chlorid in einen Probekörper unter Einfluss eines elektrischen Feldes. Nach Ende der Spannungsbeaufschlagung und nach Spalten der Probe wird mittels Indikatorlösungen die Eindringtiefe der Front der freien Chloridionen ermittelt. Aus der Eindringtiefe, der Höhe der angelegten Spannung und weiteren Parametern wird der Chloridmigrationskoeffizient berechnet. Der ermittelte Kennwert kann zur Dauerhaftigkeitsbemessung von Bauteilen unter Chlorideinwirkung nach Abschnitt 4 dieses Merkblatts angewendet werden.

B2 Literatur und Normative Verweisungen

- [1] Brite EuRam; European Union: DuraCrete - Final Technical Report. DuraCrete - Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete Structures Brüssel: European Union - Brite EuRam, 2000. Contract BRPR-CT95-0132, Project BE95-1347, Document BE95-1347/R17, May 2000.
- [2] DIN EN 14488-1 Prüfung von Spritzbeton – Teil 1: Probenahme von Frisch- und Festbeton.
- [3] DIN EN 12390-2 Prüfung von Festbeton – Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen.
- [4] Gehlen, Ch. (2000): Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken. Heft 510 der Schriftenreihe des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton, Beuth Verlag, Berlin.
- [5] NT Build 492 Concrete, Mortar and Cement-Based Repair Materials – Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments.

B3 Definitionen

Begriffe

Migrationszelle	ein über die Grundflächen mit zwei unterschiedlichen Lösungen beaufschlagter zylindrischer Probekörper mit seitlicher Abdichtung aus nichtleitendem Material
Migrationsapparat	Versuchsbehälter mit Migrationszellenhalterung, Migrationszelle, Prüflösungen, Elektroden und Elektronik
Migration	durch das Anlegen einer elektrischen Spannung hervorgerufener Transport von Ionen
Chloidmigrationskoeffizient	Kennwert zur Beschreibung des Widerstands eines Materials gegenüber dem Eindringen von Chlorid unter Einwirkung einer elektrischen Spannung

Formelzeichen

c_d	farbumschlagauslösende Chloridkonzentration, $c_d = 0,07$ [mol/l]
c_0	Chloridkonzentration der Kaliumhydroxidlösung [mol/l]
d, h	Zylinderdurchmesser und Zylinderhöhe [m]
D_{RCM}	Chloridmigrationskoeffizient [m^2/s]
E	elektrische Feldstärke [V/m]
erf^{-1}	inverse Fehlerfunktion
F	Faraday'sche Konstante, $F = 9,649 \cdot 10^4$ [J/(V·mol)]
h	Höhe des Probekörpers [m]
m_w	Masse des Probekörpers nach Wasserlagerung [kg]
ρ_{nr}	Rohdichte des wassergesättigten Probekörpers [kg/m^3]
R	Gaskonstante, $R = 8,315$ [J/(K·mol)]
t	Versuchsdauer (Dauer der Spannungsbeaufschlagung) [s]
t_v	Versuchsdauer [h]
T	absolute, mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs [K]
T_v	mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs [°C]
U	absoluter Wert der angelegten Spannung [V]
x_d	mittlere Eindringtiefe der Chloridionen der beiden Probekörperhälften [m]
x_{max}	maximale Eindringtiefe [m]
z	Ionenladung, für Chloridionen $z = 1$ [-]

B4 Prüfeinrichtung

Prüfraum mit einer Temperatur von $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$

Waage mit einer Messunsicherheit von max. $\pm 0,05 \text{ g}$

Messschieber mit einer Messunsicherheit von max. $\pm 0,05 \text{ mm}$

Lineal

Wasserbad zur Lagerung der Probekörper unter Wasser bei $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$

Ultraschallbad mit Leitungswasser

Thermometer

Trockenschrank mit Belüftung und einstellbarer Temperatur

Migrationsapparat bestehend aus (s. a. Bilder B1 bis B3):

- Migrationszelle für Probekörper mit einem Durchmesser von 50 mm oder 100 mm (gewebeverstärkter Gummischlauch, Probe mit Schlauchschellen (s. Bild B3) aus nichtrostendem Stahl abgedichtet (s. Bild B2))
- Migrationszellenhalterung aus nicht korrodierendem Material
- Gleichrichter mit Spannungsregler (bis 40 V)
- Voltmeter, Amperemeter
- Elektroden aus nicht korrodierendem Stahl
- Versuchsbehälter aus nicht korrodierendem Material

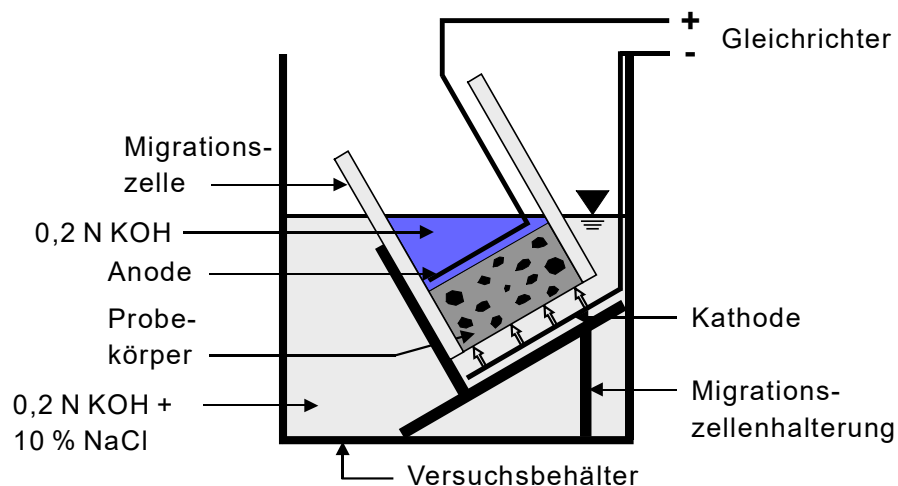


Bild B1: Prinzipskizze des Migrationsapparates

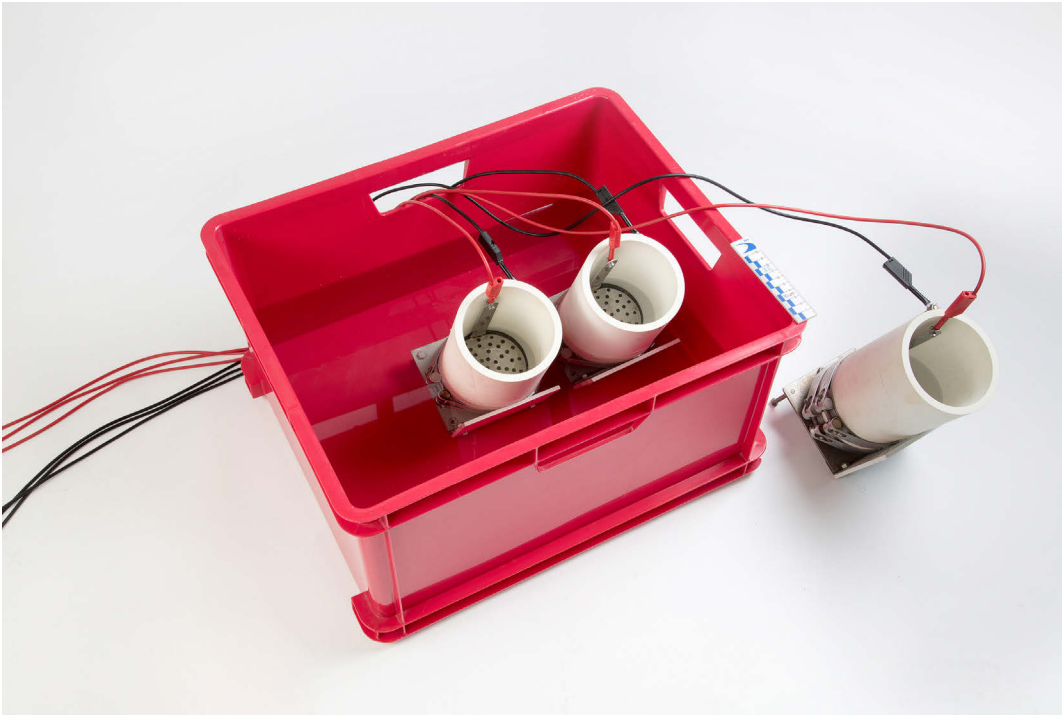


Bild B2: Foto eines Migrationsapparates



Bild B3: Schlauchschele aus nichtrostendem Stahl

Prüflösungen:

- 0,2 N Kaliumhydroxidlösung
- 10 % NaCl (100 g NaCl auf 900 g 0,2 N Kaliumhydroxidlösung)
- 0,1 N Silbernitratlösung
- 0,1 % Fluorescein in Ethylalkohol (0,1 g Fluorescein in 100 g 70%-igem Ethylalkohol, Lagerung in einem lichtundurchlässigen Behälter) oder alternativ 5 % Kaliumdichromat in Wasser

B5 Probekörper

B5.1 Anforderungen an die Größe und Anzahl der Probekörper

Eine Prüfserie besteht aus mindestens drei zylindrischen Probekörpern mit einem Durchmesser von (50 ± 1) mm oder (100 ± 1) mm und einer Höhe von (50 ± 5) mm. Der Durchmesser d und die Höhe h sind mit einer Genauigkeit von 0,1 mm zu bestimmen. Der Probekörperdurchmesser muss mindestens das Dreifache des Größtkorndurchmessers der Gesteinskörnung betragen.

B.5.2 Herstellung, Lagerung und Probekörpervorbereitung

B.5.2.1 Probekörper zur Prüfung von Mörtel und Beton

Herstellung

Zur Prüfung von Beton- und Mörtelmischungen sind zunächst mindestens drei Probekörper in Form von Würfeln mit mindestens 150 mm Kantenlänge oder Zylinder mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Höhe von 200 mm herzustellen. Die Herstellung und Verdichtung der Probekörper erfolgen gemäß DIN EN 12390-2 [3], wobei für die Verdichtung ein Rütteltisch zu verwenden ist.

Nachbehandlung

Die Probekörper werden für 24 ± 2 Stunden in der Schalung belassen, wobei die freie Oberseite vor Austrocknung geschützt wird. Danach werden die Probekörper ausgeschalt. Wenn die Festigkeitsentwicklung des Betons langsam ist, kann die Ausschallfrist auf 48 ± 2 Stunden verlängert werden.

Nach dem Ausschalen werden die Probekörper bis zur Gewinnung der zylindrischen Probekörper in Leitungswasser bei $20 \pm 2^\circ\text{C}$ gelagert.

Gewinnung der Probekörper

Bei Würfeln werden die zylindrischen Probekörper gemäß Abschnitt B5.1 i. d. R. kurz vor dem Einbau in die Migrationszelle durch Herausbohren aus den Würfeln senkrecht zur Herstellungsoberfläche gewonnen. Von diesen zylindrischen Probekörpern ist durch Sägeschnitt parallel zur ungeschalteten Oberfläche (Herstellungsoberfläche) eine Schicht von 10 mm abzutrennen.

Bei Zylindern (Durchmesser 100 mm und Höhe 200 mm) werden die zylindrischen Probekörper gemäß Abschnitt B5.1 i. d. R. kurz vor dem Einbau in die Migrationszelle aus der Mitte der Zylinder entnommen. Dafür ist der erste Sägeschnitt in einem Abstand von 75 mm parallel zur ungeschalteten Oberfläche (Herstellungsoberfläche) zu führen.

Durch Schleifen der Schnittfläche ist sicherzustellen, dass eine ebene Oberfläche entsteht. Die so entstandene Oberfläche ist die Prüffläche. Anschließend sind die Probekörper durch einen weiteren zur Prüffläche parallelen Sägeschnitt auf eine Höhe von (50 ± 2) mm abzulängen. Abplatzungen und Poren im Übergangsbereich Mantelfläche/Grundflächen sollen im Durchmesser < 1 mm sein. Ein Abgleichen der Grundflächen durch Aufbringen eines Abgleichmaterials ist nicht zulässig.

Die so vorbereiteten Probekörper werden bis zur Prüfung weiterhin auf Rosten in einem Wasserbad mit Leitungswasser bei $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ gelagert.²

² Bei Probekörpern, die nach der Herstellung nicht dauernd unter Wasser gelagert wurden, kann eine Vakuumsättigung gemäß [5] erforderlich werden.

B5.2.2 Probekörper zur Prüfung von Spritzmörtel und Spritzbeton

Herstellung und Nachbehandlung

Zur Prüfung von Spritzbeton gemäß DIN EN 14488-1 [2] ist eine Platte von mindestens 500 x 500 x 100 mm³ und von Spritzmörtel eine Platte von mindestens 300 x 300 x 80 mm³ möglichst in einem Arbeitsgang herzustellen. Die Oberfläche der Platten ist spritzrau zu belassen. Die Platten sind nach der Herstellung in einem geschlossenen Raum bei einer Lufttemperatur von 15 bis 22°C für (24 ± 2) Stunden in der Form zu belassen, die freie Oberfläche ist durch Abdecken mit feuchten Tüchern vor Feuchteverlust zu schützen. Anschließend sind die Platten zu entformen. Wenn die Festigkeitsentwicklung der Platten ein Entformen nach 24 Stunden nicht zulässt, kann die Lagerungsdauer in den Spritzformen auf (48 ± 2) Stunden verlängert werden.

Nach dem Ausschalen werden die Platten bis zur Gewinnung der zylindrischen Probekörper in Leitungswasser bei (20 ± 2)°C gelagert.

Gewinnung der Probekörper

Die zylindrischen Probekörper gemäß Abschnitt B5.1 werden i. d. R. kurz vor dem Einbau in die Migrationszelle, aus jeder Platte durch Bohrungen senkrecht zur spritzrau belassenen Oberfläche gewonnen. Von diesen zylindrischen Probekörpern ist durch Sägeschnitt parallel zur spritzrau belassenen Oberfläche eine Schicht von 10 mm – ausgehend von der tiefsten Stelle der spritzrauen Probekörperoberfläche – abzutrennen. Durch Schleifen der Schnittfläche ist sicherzustellen, dass eine ebene Oberfläche entsteht. Die so entstandene Oberfläche ist die Prüffläche. Anschließend sind die Probekörper durch einen weiteren zur Prüffläche parallelen Sägeschnitt auf eine Höhe von (50 ± 2) mm abzulängen. Abplatzungen und Poren im Übergangsbereich Mantelfläche/Grundflächen sollen im Durchmesser < 1 mm sein. Ein Abgleichen der Grundflächen durch Aufbringen eines Abgleichmaterials ist nicht zulässig. Die so vorbereiteten Probekörper werden bis zur Prüfung weiterhin auf Rosten in einem Wasserbad mit Leitungswasser bei (20 ± 2) °C gelagert.

B6 Ablauf des Prüfverfahrens

B6.1 Einbau der Probekörper in die Migrationszelle

Die Prüfung erfolgt 28 Tage nach der Herstellung.³ Unmittelbar vor der Prüfung werden die gemäß B5.2 vorbereiteten zylindrischen Probekörper aus der Wasserlagerung entnommen und mit einer Ablesegenauigkeit von 0,1 g gewogen (m_w). Anschließend sind die Probekörper gegebenenfalls für (120 ± 10) Sekunden ins Ultraschallbad zu bringen, um oberflächlich anhaftende Luftblasen zu entfernen.

Danach sind die Proben so in die Migrationszelle einzubauen, dass sich die Prüffläche auf der chloridbeaufschlagten Seite (unten liegend) befindet.

Die Probekörper müssen mit der Unterseite bündig mit der Migrationszelle abschließen, um das Aufsteigen entstehender Gasblasen zu ermöglichen. Die Probekörper müssen mittels der Schlauchschellen gegen seitliches Eindringen von Prüfflüssigkeit vollständig abgedichtet werden.

³ Für die Anwendung der Bemessungsnomogramme im Abschnitt 4 muss die Prüfung 28 Tage nach der Herstellung der Probekörper erfolgen. Bei abweichendem Prüfungsalter ist eine Dauerhaftigkeitsbemessung mittels Nomogramme nicht möglich. Im Hinblick auf Übereinstimmungsnachweise an Materialien mit unbekannter Zusammensetzung ist die Prüfung zusätzlich im Alter von 56 Tagen durchzuführen (siehe Absatz (4), Abschnitt 4.5.2).

B6.2 Einbau der Migrationszelle in den Migrationsapparat

Nach dem Einbau der Probekörper in die Migrationszellen sind diese in den Migrationsapparat zu stellen. Pro Migrationszelle sind rd. 300 ml (Probekörperdurchmesser 100 mm) 0,2 normale Kaliumhydroxidlösung oberhalb der Probekörper einzufüllen. Die Migrationszelle ist ca. 30° gegen die Horizontale geneigt einzubauen, um ein ungehindertes Aufsteigen entstehender Gasblasen zu gewährleisten. Der Versuchsbehälter ist mit Chloridlösung (10% NaCl in 0,2 normaler Kaliumhydroxidlösung) bis zum Meniskus der Kaliumhydroxidlösung in der Migrationszelle zu füllen (s. Bild B1). Die beiden Lösungen dürfen nicht vermischt werden.

B6.3 Durchführung der Chloridmigration

Anoden und Kathoden werden an einen Gleichrichter (bis 40 V, ca. 0,5 A je Migrationszelle) angeschlossen (dabei ist auf die richtige Polung zu achten). Die Prüfung wird durch Anlegen einer Spannung von $(30 \pm 0,2)$ V gestartet.

Unmittelbar nach Beginn und vor Ende der Spannungsbeaufschlagung werden die Spannung und die Stromstärke der jeweiligen Migrationszelle sowie die Temperaturen der beiden Prüflösungen gemessen und festgehalten.

Die Dauer des Versuchs ist abhängig vom elektrischen Widerstand der Probenmatrix (im Wesentlichen Dichte), und wird entsprechend Tabelle B1 bzw. Tabelle B2 anhand der gemessenen Anfangsstromstärke bei der Spannung von $(30 \pm 0,2)$ V festgelegt. Die tatsächliche Prüfspannung wird ebenfalls abhängig von der gemessenen Anfangsstromstärke bei der Spannung von $(30 \pm 0,2)$ V angebracht (s. Tabelle B1 und B2). Mit diesen Versuchszeiten werden sinnvolle Eindringtiefen von 10 bis 30 mm angestrebt.

Bei Materialien mit einem erhöhten Bindemittelgehalt ($> \text{ca. } 350 \text{ kg/m}^3$, z. B. Instandsetzungsmörtel/-beton) können längere Versuchsdauern erforderlich werden.

Anfänglicher Strom I_0 bei einer Spannung von 30 V $d = 50\text{mm}$, $h = 50\text{mm}$ [mA]	Prüfspannung U [V]	Versuchsdauer [h]
$I_0 < 1$	30	168
$1 \leq I_0 < 2$		96
$2 \leq I_0 < 7$		48
$7 \leq I_0 < 15$	20	24
$15 \leq I_0 < 30$	15	24
$30 \leq I_0$	10	6

Tabelle B1: Prüfspannung und Versuchsdauer in Abhängigkeit von dem gemessenen Anfangsstrom bei einer Spannung von 30 Volt bei Probekörpern mit einem Durchmesser von 50 mm

Anfänglicher Strom I_0 bei einer Spannung von 30 V $d = 100\text{mm}$, $h = 50\text{mm}$ [mA]	Prüfspannung U [V]	Versuchsdauer [h]
$I_0 < 5$	30	168
$5 \leq I_0 < 10$		96
$10 \leq I_0 < 30$		48
$30 \leq I_0 < 60$		24
$60 \leq I_0 < 90$	25	24
$90 \leq I_0 < 120$	20	24
$120 \leq I_0 < 180$	15	24
$180 \leq I_0 < 360$	10	24
$360 \leq I_0$		6

Tabelle B2: Prüfspannung und Versuchsdauer in Abhängigkeit von dem gemessenen Anfangsstrom bei einer Spannung von 30 Volt bei Probekörpern mit einem Durchmesser von 100 mm

B6.4 Ausbau der Probekörper, Spalten und Auftragen des Indikators

Nach dem Ausschalten und Entkabeln des Gleichrichters werden die Migrationszellen aus der chloridhaltigen Lösung entnommen und die Probekörper umgehend ausgebaut, mit Leitungswasser abgespült und mit einem Tuch oberflächentrocken abgetupft. Anschließend werden die Probekörper der Länge nach gespalten (zweigeteilt parallel zur Richtung des Chlorideintrags).

Bei Verwendung von Kaliumdichromatlösung werden die Bruchflächen beider Probekörperhälften im noch feuchten Zustand zuerst mit der Silbernitratlösung und anschließend – nach einer kurzen Oberflächentrocknung (ca. 10 min) – mit der Kaliumdichromatlösung besprüht.

Bei Verwendung von Fluoresceinlösung werden die Bruchflächen beider Probekörperhälften im noch feuchten Zustand zuerst mit der Fluoresceinlösung und anschließend – nach einer kurzen Oberflächentrocknung (ca. 10 min) – mit der Silbernitratlösung besprüht. Die Probekörper sind in einem beleuchteten Raum oder im Tageslicht für mindestens 24 h zu lagern.

Der Bereich, in den Chloride eingedrungen sind, zeichnet sich infolge der Indikatorbehandlung durch eine deutlich hellere Färbung ab.

Die Eindringtiefe wird anhand des visuell erkennbaren Farbunterschieds pro Probekörperhälfte an 6 Stellen (bei $d_s = 50$ mm, s. Bild B4) bzw. 9 Stellen (bei $d_s = 100$ mm, s. Bild B5) im Abstand von ca. 10 mm mittels eines Messschiebers auf 0,5 mm genau gemessen ($x_1, x_2 \dots x_n$).

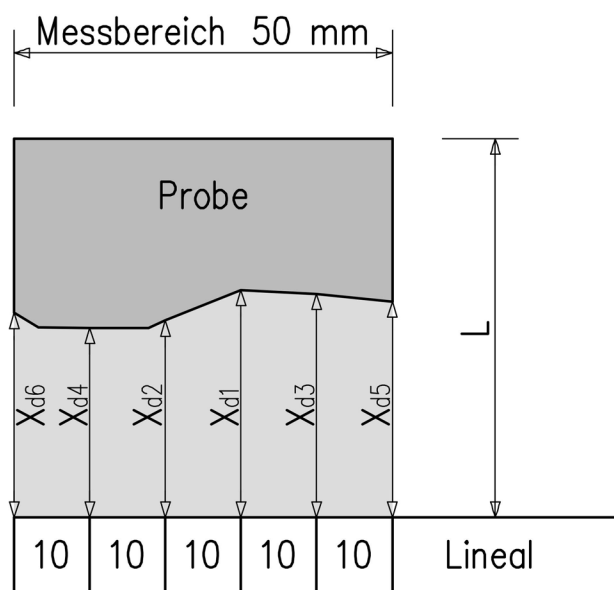


Bild B4: Messstellenanordnung für die Bestimmung der Chlorideindringtiefe bei Probekörper mit einem Durchmesser von 50 mm

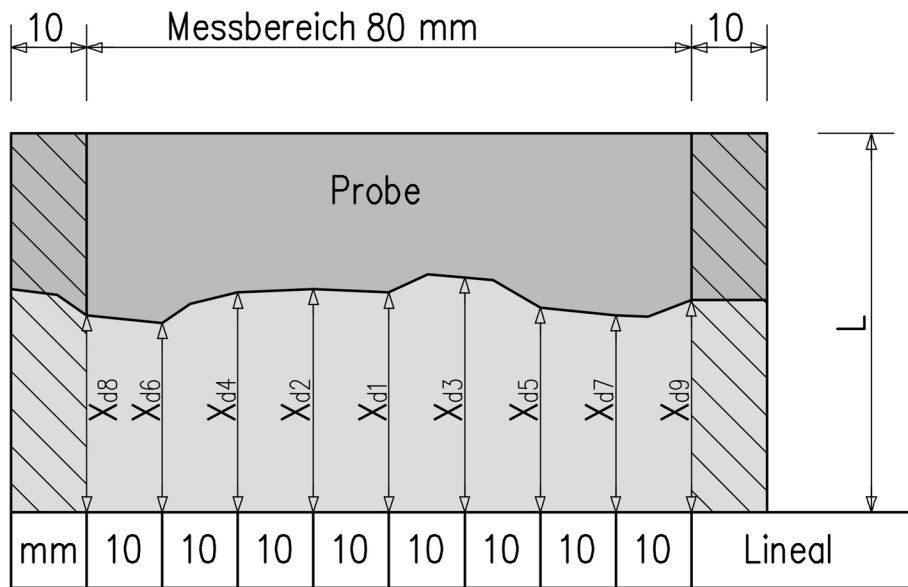


Bild B5: Messstellenanordnung für die Bestimmung der Chlorideindringtiefen bei Probekörper mit einem Durchmesser von 100 mm

B7 Versuchsauswertung

B7.1 Bestimmung der mittleren und maximalen Eindringtiefe

Aus den einzelnen Eindringtiefen eines Probekörpers ($x_1, x_2, \dots, x_n$) wird der arithmetische Mittelwert x_d auf 0,5 mm genau ermittelt. Sind Bereiche mit stark erhöhten Eindringtiefen (z. B. im Randbereich oder im Bereich größerer Poren) bzw. mit stark verminderten Eindringtiefen durch anwesende Gesteinskörnungen festzustellen, so können diese Eindringtiefen bei der Ermittlung von x_d verworfen werden, sofern die Anzahl der vernachlässigbaren Stellen $\leq 1/3$ der Anzahl aller gemessenen Stellen ist.

Weiterhin ist die maximale Eindringtiefe $x_{\max}$ zur Ermittlung von x_d anzugeben.

B7.2 Rohdichte der wassergesättigten Probekörper ρ_{nr}

Die Rohdichte der wassergesättigten Probekörper ρ_{nr} ist zu bestimmen. Für zylindrische Probekörper ergibt sich diese zu:

$$\rho_{nr} = \frac{4m_w}{d^2 \pi h} \quad (1)$$

d, h Zylinderdurchmesser und Zylinderhöhe [m]

m_w Masse des Probekörpers nach Wasserlagerung [kg]

ρ_{nr} Rohdichte des wassergesättigten Probekörpers [kg/m³]

B7.3 Bestimmung des Chloridmigrationskoeffizienten D_{RCM}

Der Chloridmigrationskoeffizient ist auf Basis folgender Grundgleichung zu bestimmen:

$$D_{RCM} = \frac{RT}{zFE} \cdot \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t} \quad (2)$$

mit:

$$E = \frac{U - 2}{h} \quad (3)$$

$$\alpha = 2 \cdot \sqrt{\frac{RT}{zFE}} \cdot \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2c_d}{c_0} \right) \quad (4)$$

D_{RCM} Chloridmigrationskoeffizient [m^2/s]

z Ionenladung, für Chloridionen $z = 1$ [-]

F Faraday'sche Konstante, $F = 9,649 \cdot 10^4$ [$\text{J}/(\text{V} \cdot \text{mol})$]

U absoluter Wert der angelegten Spannung [V]

E elektrische Feldstärke [V/m]

R Gaskonstante, $R = 8,315$ [$\text{J}/(\text{K} \cdot \text{mol})$]

T absolute mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs [K]

h Höhe des Probekörpers [m]

x_d mittlere Eindringtiefe der Chloridionen der beiden Probekörperhälften [m]

t Versuchsdauer (Dauer der Spannungsbeaufschlagung) [s]

erf^{-1} Inverse Fehlerfunktion

c_d farbumschlagauslösende Chloridkonzentration, $c_d = 0,07$ [mol/l]

c_0 Chloridkonzentration der Kaliumhydroxidlösung [mol/l]

Mit $\operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2 \times 0,07}{1,9} \right) = 1,27$ für eine 10 %ige NaCl-Lösung (= 1,9 normal) ergibt sich folgende vereinfachte Gleichung für D_{RCM} :

$$D_{RCM} = \frac{2,39 \cdot 10^{-8} (273 + T_V) h}{(U - 2) t_V} \left(x_d - 0,0236 \sqrt{\frac{(273 + T_V) h x_d}{U - 2}} \right) \quad (5)$$

mit:

T_V mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs [$^{\circ}\text{C}$]

t_V Versuchsdauer [h]

Das Prüfergebnis wird pro Probekörper in der Form $x, y \cdot 10^{-z} \text{ m}^2/\text{s}$ dargestellt, z.B. $1,5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

B8 Bericht

Der Prüfbericht muss folgende Angaben enthalten:

- Herstellungsdatum
- Mischungsbezeichnung
- Probekörperabmessungen
- Masse der Probekörper nach Wasserlagerung
- Rohdichte der wassergesättigten Probekörper
- Prüfdatum und Uhrzeit (Prüfbeginn und Prüfende)
- Versuchsdauer (berechnet aus Prüfbeginn und Prüfende)
- ggf. Lagerungsdauer im Ultraschallbad
- NaCl-Konzentration der Prüflösung
- Spannung zu Beginn und am Ende des Versuchs
- Stromstärke zu Beginn und am Ende des Versuchs
- Temperaturen der Elektrolytlösungen zu Beginn und am Ende des Versuchs
- Einzelwerte der Eindringtiefen $x_1 \dots x_n$
- mittlere (x_d) und maximale (x_{max}) Chlorideindringtiefe pro Probekörper
- Einzelwerte und Mittelwert mit größtem Einzelwert des Chloridmigrationskoeffizienten pro Serie

B9 Anforderungen an das Prüfinstitut, Rückstellproben

Das Prüfinstitut, in dem die Schnelllaborprüfungen durchgeführt werden, muss nachweislich eine ausreichende Erfahrung im Umgang mit der Prüfmethode besitzen.

Werden Rückstellproben benötigt, sind diese gemäß den vereinbarten Lagerungsbedingungen zu lagern bzw. an den Auftraggeber zu übergeben.

Das Prüfprotokoll und der Prüfbericht sind im Prüfinstitut zu archivieren.

B10 Präzisionsdaten

Die Prüfstreuung des Migrationskoeffizienten kann üblicherweise durch die Wiederholpräzision und die Vergleichspräzision beschrieben werden. Die Prüfstreuungen des Verfahrens werden über den Variationskoeffizienten (Quotient aus Standardabweichung und Mittelwert) ausgedrückt.

Die Präzisionsdaten für die Bestimmung des Migrationskoeffizienten sind:

Wiederholpräzision 11,0 %

Vergleichspräzision 20,0 % (errechnet als 90 %-Quantil der Wiederholpräzision)

Die Präzisionsdaten wurden im Rahmen eines internationalen Forschungsvorhabens gewonnen [1, 4].