

INHALTSVERZEICHNIS

1.	EINLEITUNG	1
1.1	Zielsetzung und baupraktische Relevanz	1
1.2	Gliederung der Arbeit	2
2.	GRUNDLAGEN UND KENNTNISSTAND DER LEBENSDAUERVORHERSAGE	4
2.1	Zu den Begriffen Dauerhaftigkeit, Lebens- und Nutzungsdauer sowie Karbonatisierungstiefe	4
2.2	Zum Begriff service-life-prediction (SLP)	7
2.2.1	SLP-Modell von Tuutti	8
2.2.2	SLP-Modell von Siemes [102]	10
2.3	Erläuterung des Begriffes performance concept (PC)	11
2.4	Zerstörungsfreie Prüfmethode (ZfPM)	13
2.5	Qualitätssicherung (QS) und Inspektion	14
2.6	Bisherige Karbonatisierungsmodelle	16
2.6.1	Karbonatisierung als Folge stationärer CO ₂ -Diffusion	16
2.6.2	Karbonatisierungsgesetz von Schießl [91]	17
2.6.3	Karbonatisierungsgesetz der TU Eindhoven [4]	18
2.6.4	Karbonatisierungsgesetz von Hergenröder [34]	20
2.6.5	Weitere Karbonatisierungsgesetze	21
2.7	Defizite bestehender Lebensdauermodelle	22
3.	VERSUCHE ZUR MODELLENTWICKLUNG	23
3.1	Überblick über das Versuchsprogramm	23
3.2	Erprobung und Anwendung des ISA-Verfahrens	25
3.2.1	Einfluß der betontechnologischen Parameter auf den ISA ₁₀ -Wert	25
3.2.2	Streuung der Meßwerte	26
3.2.3	Einfluß der Feuchte	26
3.2.4	Feuchteverhältnisse zum Meßzeitpunkt	27
3.2.5	Einfluß der Karbonatisierungstiefe	27
3.2.6	Zusammenhang des ISA ₁₀ -wertes mit dem Wasseraufnahmekoeffizienten A	28
3.2.7	Schlußfolgerungen für die Modellentwicklung	29

3.3	Witterungseinflüsse auf die Porosität und Dichtigkeit des oberflächennahen Betons	30
3.3.1	Einfluß der Lagerungsbedingungen auf die transportrelevanten Teilporositäten (Bild 3.8 - 3.11)	30
3.3.2	Einfluß des w/z-Wertes auf die transportrelevanten Teilporositäten (Bild 3.8 - 3.11)	32
3.3.3	Zeitliche Entwicklung der Dichtigkeit	32
3.3.4	Schlußfolgerungen für die Modellentwicklung	33
3.4	Zusammenhang zwischen Porosität und Dichtigkeit	34
3.4.1	Transportkoeffizienten und transportrelevante Porenkennwerte	34
3.4.2	Korrelation des Absorptions- und Diffusionsprodukts	37
3.4.3	Korrelation ISA_{10} und D_c	37
3.4.4	Schlußfolgerungen für die Modellentwicklung	39
3.5	Abnahmekriterium (Prüfplan) der Dichtigkeitsmessung	40
3.6	Zusammenfassung	42
4.	INGENIEURMODELL DER KARBONATISIERUNG VON AUBENBAUTEILEN	43
4.1	Einfluß der Witterung auf die Karbonatisierungstiefe	44
4.1.1	Vorüberlegungen	44
4.1.2	Versuche zum Einfluß der Durchfeuchtung auf den Karbonatisierungsfortschritt	46
4.2	Aufstellung des Karbonatisierungsgesetzes	50
4.2.1	Beschreibung der CO_2 -Diffusion	50
4.2.2	Niederschlagsmodell des Bauwerksstandortes	52
4.2.2.1	Verteilungsfunktion der Dauer der Trocken- und Niederschlagsperiode	52
4.2.2.2	Einfluß der Windverhältnisse des Bauwerksstandortes	55
4.2.2.3	Witterungsbedingte Verzögerung des Karbonatisierungsschrittes	57
4.2.3	Berechnung der Austrocknungsdauer	58
4.2.3.1	Abschätzung der maximal möglichen Durchfeuchtungstiefe $\max x_D$	58
4.2.3.2	Austrocknungsdauer vollständig durchfeuchteter Karbonatisierungstiefen	60
4.2.3.3	Austrocknungsdauer teilweise durchfeuchteter Karbonatisierungstiefen	61
4.2.4	Allgemeines Zeitgesetz der Karbonatisierung von Außenbauteilen	61
4.2.4.1	Abschätzung der Endkarbonatisierungstiefe $x_{c,\infty}$	62
4.2.4.2	Karbonatisierung bei Überschreitung von x_{DM}	64

4.3	Untersuchungen zur Modellgüte	66
4.3.1	Betrachtung zur Streuung der Endkarbonatisierungstiefe	66
4.3.2	Überprüfung der Annahmen stationärer Diffusionsbedingungen	68
4.3.2.1	Vergleich stationärer mit instationären Diffusionsbedingungen	69
4.3.2.2	Einfluß der Nichtlinearität (Veränderlicher Diffusionskoeffizient)	71
4.3.2.3	Numerisches Modell der Berechnung des instationären, nichtlinearen Karbonatisierungsfortschrittes.	71
4.3.3	Abschätzung des Einflusses der Rückdiffusion	73
4.3.4	Abschätzung der Größe D_k	75
4.4	Zusammenfassung	75
5.	MODELL DES CO_2 -DIFFUSIONSKOEFFIZIENTEN (D_c -MODELL)	78
5.1	Ziel und Vorgehen	78
5.2	Aufstellung und Ableitung des Regressionspolynoms	81
5.2.1	Faktorenbereich	81
5.2.2	Regressionspolynom zur Beschreibung des Einflusses des Betonalters und Karbonatisierungsgrades	82
5.2.3	Regressionspolynom zur Beschreibung des Einflusses der übrigen Faktoren	84
5.2.4	Einfluß der betontechnologischen Parameter auf die Diffusionsdichtigkeit	84
5.2.5	Vergleich von Vorhersage und Messung am Beispiel	88
5.3	Abschätzung des Vorhersagefehlers und dessen Berücksichtigung bei der Vorhersage des Diffusionskoeffizienten	88
5.3.1	Auswertung der Residuen	88
5.3.2	Bestimmung des Verteilungstyps von D_0	91
5.3.3	Monte-Carlo-Simulation der Streuung des O_2 -Diffusionskoeffizienten	93
5.3.4	Hinweise für die Bauausführung	98
5.4	Berücksichtigung der Betonfeuchte auf den Diffusionskoeffizienten	99
5.5	Beziehung zwischen dem O_2 - und dem CO_2 -Diffusionskoeffizienten	102
5.6	Ermittlung der CO_2 -Bindefähigkeit des Betons	104
5.7	Verifikation des Regressionspolynoms für D_0 durch Vorhersage der Karbonatisierungstiefe	104
5.8	Zusammenfassung	106

6.	WITTERUNGSMODELL	108
6.1	Ziel und Vorgehen	108
6.2	Bewölkungsgrad und Windrichtung	111
6.3	Windgeschwindigkeit	111
6.4	Temperaturverhältnisse	112
6.4.1	Jahresgang der mittleren Tagestemperatur und Tagestemperatur- schwankung	112
6.4.2	Tagesgang der Temperatur	115
6.5	Wasserdampfgehalt der Atmosphäre	116
6.5.1	Jahresgang des Wasserdampfgehalts und seiner Tagesschwankung	116
6.5.2	Tagesgang des Wasserdampfgehaltes	118
6.5.3	Umrechnung des Wasserdampfgehaltes in die relative Feuchte	120
6.6	Strahlungsverhältnisse	121
6.7	CO ₂ -Konzentration	121
6.8	Modellierung der Braunschweiger Witterung mit dem Witterungs- modell	122
6.9	Nutzen des Witterungsmodells	124
6.9.1	Tagesgang der relativen Feuchte der Aussenluft	124
6.9.2	Verteilungsfunktion der relativen Feuchte	125
6.9.3	Berücksichtigung der Feuchtebedingungen im Ingenieurmodell der Karbonatisierung	128
6.10	Zusammenfassung	129
7.	INSTATIONÄRE, NICHTLINEARE BERECHNUNG DES WÄRME- UND FEUCHTE- ZUSTANDES OBERFLÄCHENNAHER ZONEN VON AUSSENBAUTEILEN - FEUCH- TEMODELL	130
7.1	Ziel und Vorgehen	130
7.2	Berechnung des Temperaturfeldes	131
7.2.1	Diskretisierung	131
7.2.2	Element im Wandinneren	133
7.2.3	Randbedingungen	135
7.2.3.1	Nicht witterungsbeanspruchte Wandoberfläche	135
7.2.3.2	Witterungsbeanspruchte Wandoberfläche	135
7.3	Berechnung des Feuchtefeldes	140
7.3.1	Diskretisierung	140
7.3.2	Element im Wandinneren	141
7.3.2.1	Feuchtebilanz	141
7.3.2.2	Berechnung der Transportströme	141

7.3.2.3	Theoretische Ermittlung des Thermodiffusionskoeffizienten $D_{wD,T}$	143
7.3.2.4	Vereinfachung der Bilanzgleichung der Feuchte bei gemeinsamen WD- und kapillarem Wassertransport	144
7.3.2.5	Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit der Transportkoeffizienten und des Einflusses der Eisbildung	147
7.3.3	Randbedingungen der witterungsbeanspruchten Oberfläche	147
7.3.3.1	Zeiten ohne Schlagregen	148
7.3.3.2	Zeiten mit Schlagregen	148
7.3.4	Übergangsbedingung an der Karbonatisierungstiefe	149
7.3.5	Einfluß der Karbonatisierung auf die Transportkoeffizienten	150
7.4	Wärme- und feuchtetechnische Betoneigenschaften	151
7.4.1	Ermittlung und Größe der Koeffizienten $D_{wD,\varphi}$ und D_K	151
7.4.2	Sorptionseigenschaften	154
7.4.3	Bewertung und Ausblick	155
7.5	Exemplarische Untersuchung zur Streuung der Ergebnisse der Feuchteberechnung	156
7.5.1	Beispiel konstanter Witterungsbedingungen	156
7.5.2	Beispiel nicht konstanter Witterungsbedingungen	157
7.6	Berechnung der Austrocknungsdauer für horizontale Bauteile	159
7.6.1	Austrocknungsdauer in Frühjahr- und Sommermonaten	159
7.6.1.1	Abschätzung der Durchfeuchtungstiefe	160
7.6.1.2	Abschätzung der relativen Feuchte der Porenluft in karbonatisierungswirksamen Zeiten	162
7.6.1.3	Abschätzung der Zeitdifferenz zwischen der Dauer der Trockenperiode und der karbonatisierungswirksamen Zeit	163
7.6.1.4	Ergebnisse der Feuchteberechnung	163
7.6.2	Austrocknungsdauer in Herbst- und Wintermonaten	165
7.7	Berechnung der Austrocknungsdauer für vertikale Bauteile	167
7.8	Meßzeitpunkt der Dichtigkeitsmessungen	169
7.9	Einfluß der Intensität der Sonneneinstrahlung auf die Austrocknungsverhältnisse	172
7.10	Verifikation der für ungeschützt im Freien lagernden Bauteile berechneten Karbonatisierungstiefe	173
7.11	Zusammenfassung	175
8.	AUFSTELLUNG DES ZUVERLÄSSIGKEITSMODELLS	177
8.1	Ziel	177

8.2	Aufstellung des Dauerhaftigkeitskriteriums	178
8.3	R-S-Modell der Dauerhaftigkeit	180
8.3.1	Berechnungsgrundlagen [97, 105]	180
8.3.2	Erforderliche Größe des Sicherheitsindex	183
8.3.3	Sicherheitsbeiwerte des Dauerhaftigkeitsnachweises	185
8.4	Nachweis der Dauerhaftigkeit und Lebensdauer	186
8.4.1	Plausibilitätskontrolle des Lebensdauermodells	186
8.4.2	Einfluß der Witterungsbedingungen auf die Dauerhaftigkeit (im Freien unter Dach)	189
8.4.3	Einfluß der Sorgfalt der Bauausführung auf die Dauerhaftigkeit	191
8.4.4	Einfluß des mutmaßlichen Anstiegs der CO ₂ -Konzentration auf den Karbonatisierungsfortschritt	192
8.5	Zusammenfassung	193
9.	AUFSTELLUNG DES TRANSPORTMODELLS	195
9.1	Ziel und Vorgehen	195
9.2	Räumliches Porenmodell	195
9.2.1	Modellannahmen und reale Porenstruktur	195
9.2.2	Ableitung des mittleren Umwegfaktors und des Verhältnisses Porenlänge zu Porenradius	197
9.2.2.1	Ableitung des Umwegfaktors	198
9.2.2.2	Ableitung des Verhältnisses Porenlänge zu Porenradius	198
9.2.3	Verfügung über die Porenradienverteilung	200
9.3	Theoretische Ermittlung von Transportkoeffizienten	201
9.3.1	Modellierung der Porenradienverteilung	201
9.3.2	Ableitung des Diffusionskoeffizienten D_c	202
9.3.3	Ableitung des Wasseraufnahmekoeffizienten und des ISA ₁₀ -Wertes	205
9.3.4	Ableitung des Permeationskoeffizienten für Gastransporte	207
9.3.4.1	Permeationsgesetz	207
9.3.4.2	Zur Vernachlässigung des Transportanteils der Molekularströmung	209
9.3.4.3	Folgerungen für die Modellierung von Permeationsvorgängen	210
9.3.5	Berücksichtigung der Feuchteabhängigkeit der Transportkoeffizienten	211
9.4	Verifikation der theoretischen Transportkoeffizienten	214

9.5	Korrelation der Transportkoeffizienten unterschiedlicher Transportarten für PZ-Beton	217
9.5.1	Korrelation für trockenen Beton	217
9.5.1.1	Korrelation $D_c - ISA_{10}$	218
9.5.1.2	Korrelation $D_c - K$ bzw. $D_c - M_s$ oder M_p	219
9.5.1.3	Korrelation $ISA_{10} - M_s$ und $ISA_{10} - M_p$	221
9.5.2	Korrelation für feuchten Beton	222
9.6	Verifikation mit dem Transportmodell vorhergesagter Karbonatisierungstiefen	223
9.6.1	Permeationskoeffizient und Karbonatisierung	224
9.6.2	Karbonatisierung und Absorption	225
9.7	Zusammenfassung	225
10.	ANWENDUNG DES LEBENSDAUER- UND TRANSPORTMODELLS AUF DIE QUALITÄTSKONTROLLE, BAUWERKSÜBERWACHUNG UND DIE DAUERHAFTIGKEITSBEURTEILUNG	228
10.1	Ziel	228
10.2	Festlegung der Leistungsfähigkeit durch die Bauteilplanung	228
10.2.1	Nachweis der Leistungsfähigkeit für Bauteile im Freien unter Dach	230
10.2.2	Planungsbeispiel 1	230
10.2.3	Nachweis der Leistungsfähigkeit für Bauteile die ungeschützt im Freien karbonatisieren	231
10.2.3.1	Bauteile mit Endkarbonatisierungstiefe	232
10.2.3.2	Bauteile ohne Endkarbonatisierungstiefe	232
10.2.3.2	Planungsbeispiel 2	232
10.3	Nachweis der Leistungsfähigkeit durch die Qualitätskontrolle	233
10.3.1	Allgemeines Vorgehen	234
10.3.2	Hinweise zur Durchführung der QS	236
10.4	Anmerkungen zur Bauwerksabnahme	236
10.5	Anmerkungen zur Inspektion und Dauerhaftigkeitsbeurteilung	237
10.6	Zusammenfassung	238
11.	ZUSAMMENFASSUNG	240
12.	LITERATUR	245