

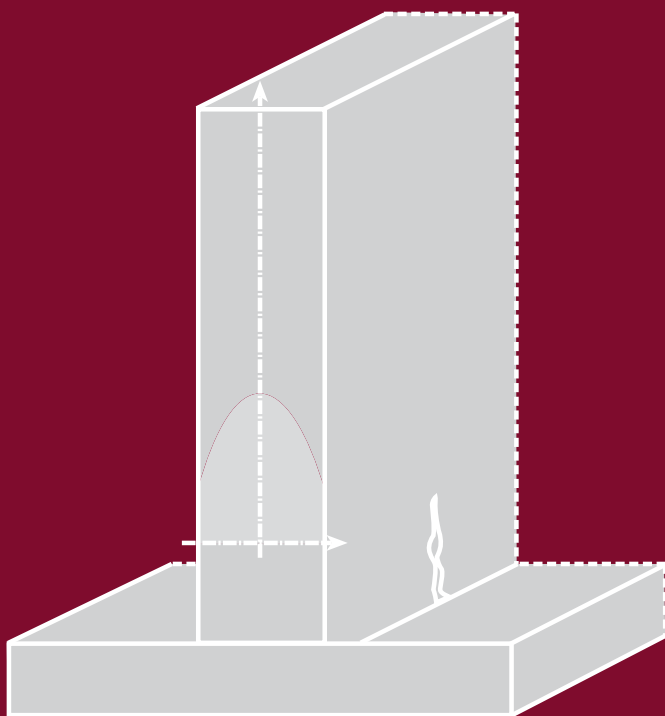
Röhling

edition beton

Zwangsspannungen infolge Hydratationswärme

Veränderungen bei der Ermittlung der
rissbreitenbegrenzenden Bewehrung nach
EC 2 gegenüber DIN 1045-1:2008-08

2. überarb. Auflage



VERLAG



BAU+TECHNIK

Röhling
Zwangsspannungen
infolge
Hydratationswärme

Röhling

Zwangsspannungen infolge Hydratationswärme

2., durchgesehene und erweiterte Auflage

VERLAG  BAU+TECHNIK

VLB-Meldung

Röhling, Stefan:

Zwangsspannungen infolge Hydratationswärme

2., durchgesehene und erweiterte Auflage 2009

Düsseldorf: Verlag Bau+Technik GmbH, 2009

eISBN 978-3-7640-0726-3

© by Verlag Bau+Technik GmbH, Düsseldorf 2005
Gesamtproduktion: Verlag Bau+Technik GmbH,
Postfach 12 01 10, 40601 Düsseldorf
www.verlagbt.de

Druck: Konrad Tritsch GmbH, Ochsenfurt-Hohestadt

Vorwort zur 2. durchgesehenen und erweiterten Auflage

Die Problematik der Erfassung der Zwangsspannungen und die Vermeidung dadurch hervorgerufener Rissbildungen in erhärtenden Betonbauteilen besitzt auch weiterhin eine große Aktualität. Nach der positiven Aufnahme der Publikation wurde nun eine Neuausgabe erforderlich. Dabei war eine Reihe von Aspekten zu berücksichtigen, die eine verhältnismäßig umfangreiche Bearbeitung erforderten.

In der Zwischenzeit haben vielfältige Veränderungen in den Regelwerken stattgefunden. Dazu gehören nicht nur Korrekturen und Ergänzungen der DIN 1045-1, sondern neue Richtlinien und zugehörige Kommentare, wie beispielsweise die DAfStb-Richtlinien „Massige Bauteile aus Beton“ und „Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton“ oder die Richtlinie „Begrenzung der Rissbildung im Stahlbeton- und Spannbetonbau“ des DBV.

Weiterhin ist die Übergangsfrist für die Ausführung von Bauwerken, die nach der DIN 1045 (07.88) geplant wurden, abgelaufen, sodass für die Rissbreitenbeschränkung der Bewehrung diese Vorschrift nicht mehr zu beachten ist und aus dem Abschnitt 8 herausgenommen werden konnte.

Außerdem liegen nun Erfahrungen aus der Anwendung der DIN 1045-1:2001 vor, die zeigen, dass durch die Auswahl der Expositionsklassen teilweise Überfestigkeiten provoziert werden, die bei der Ermittlung der rissbreitenbeschränkenden Bewehrung eine Rolle spielen.

Aus der Beteiligung an praktischen Bauaufgaben resultierend und Hinweisen von Nutzern folgend, wurden die Vorgänge bei der Wärmeentwicklung durch die Hydratation, das chemische und Trocknungsschwinden sowie das Kriechen und die Relaxation ausführlicher dargestellt und dazu nähere Angaben bereitgestellt. Weiterhin ist auch der Tatsache Rechnung getragen worden, dass sich unterschiedliche lastunabhängige Verformungen während der Erhärtung überlagern und eine Rissbildung hervorrufen können. Einige Abschnitte wurden erweitert und um Beispiele ergänzt, dazu gehören die experimentelle Erfassung der Hydratationswärme, die Temperatur- und Spannungsmessung, die probabilistische Beurteilung der Rissicherheit, die Ermittlung der rissbreitenbeschränkenden Bewehrung in dicken Bauteilen u.a.

Schließlich wurden Druckfehler beseitigt und andere Korrekturen vorgenommen.

Für die Hinweise, die zur vorgenannten Erweiterung und zu Verbesserungen beigetragen haben, sind Verlag und Autor zu Dank verpflichtet. Beide hoffen, dass auch die neue Auflage in den Fachkreisen gut aufgenommen und in der täglichen Praxis bei der Planung und Bauvorbereitung genutzt wird und wiederum zu einer regen Diskussion beiträgt.

Düsseldorf / Taucha im April 2009

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Symbole	1
Zementchemische Symbole	5
1 Einführung	7
2 Kinetik des Hydratations- und Erhärtungsprozesses	15
2.1 Charakteristische Phänomene des Hydratationsprozesses	15
2.2 Hydratationsgrad als Kenngröße des Hydratationsfortschritts	17
2.3 Mathematische Beschreibung der Hydratations- und Erhärtungsvorgänge	20
2.3.1 Funktionen zur Beschreibung der zeitlichen Entwicklung der Eigenschaften unter isothermischen Bedingungen	20
2.3.2 Reaktionskinetische Formulierung	23
2.4 Wasserzementwert und Hydratationsgrad	24
2.5 Wirkung der Temperatur auf den Hydratations- und Erhärtungsverlauf ...	26
2.5.1 Einfluss unterschiedlicher Temperaturen auf die Reaktionskinetik	27
2.5.2 Temperatur-Zeit-Beziehungen	30
2.5.3 Anwendungsgrenzen	34
2.5.4 Anwendungsbeispiel	36
3 Wärmeentwicklung im erhärtenden Beton	39
3.1 Hydratationsverhalten des Zementes und Wärmeentwicklung	39
3.2 Wärmeentwicklung der Normzemente	45
3.2.1 Orientierende Angaben zu den Zementarten und -sorten	46
3.2.2 Beschreibung des Verlaufes der Wärmefreisetzung	50
3.3 Ermittlung der Hydratationswärme aus der Zusammensetzung des Zementes	51
3.4 Experimentelle Bestimmung der Hydratationswärme durch Laborprüfungen	55
3.4.1 Lösungskalorimeter	57
3.4.2 Wärmeflusskalorimeter	58
3.4.3 Adiabatische und teiladiabatische Kalorimeter	59
3.4.4 Transformation von Wärmeentwicklungskurven	60
3.5 Experimentelle Ermittlung der Entwicklung der Hydratationswärme im Feldversuch	62
4 Temperaturverlauf und Temperaturverteilung im Bauteil	65
4.1 Grundlagen der Temperaturfeldberechnung	65
4.2 Thermische Eigenschaften des erhärtenden Betons	67
4.2.1 Wärmeleitfähigkeit (Wärmeleitzahl)	67
4.2.2 Wärmekapazität	70
4.2.3 Temperaturleitzahl	72
4.3 Thermische Randbedingungen	72
4.3.1 Temperatur des Frischbetons	72
4.3.2 Lufttemperatur	77

4.3.3	Wärmeübergangsbedingungen an der Oberfläche	80
4.3.4	Rohrinnenkühlung	91
4.3.5	Temperatur des Untergrundes	91
4.4	Adiabatische Temperaturentwicklung im Bauteil	91
4.5	Berechnung des Temperaturverlaufes und der Temperaturverteilung in Bauteilquerschnitten	92
4.5.1	Analytische Lösung der Wärmeleitungsgleichung	93
4.5.2	Numerische Methoden zur Berechnung des Temperaturfeldes	94
4.5.3	Zweidimensionale instationäre Temperaturverteilung	99
4.5.4	Charakteristika der Wärme- und Temperaturentwicklung	99
4.5.5	Beispiele für den Verlauf der mittleren Bauteiltemperatur	100
4.5.6	Beispiele für Temperaturdifferenzen in Bauteilen	103
4.5.7	Temperaturdifferenzen zwischen Wänden und Fundamenten	107
4.5.8	Besonderheiten bei Betonierabschnitten und langer Betonierdauer	107
4.6	Vereinfachte Ermittlung des Temperaturverlaufes im Bauteil	109
4.7	Abschätzung der Temperaturverhältnisse im Bauteil	112
4.7.1	Temperaturanstieg und -ausgleich im Bauteil	112
4.7.2	Abschätzung der Zeitpunkte für maßgebende Temperaturverhältnisse ..	119
4.7.3	Abschätzung von Temperaturdifferenzen zwischen Bauteilrand und -kern	121
4.7.4	Temperaturverhältnisse in Bodenplatten	126
4.8	Temperaturverlauf im Bauteil unter saisonalen Bedingungen	126
4.9	Messtechnische Erfassung der Temperaturen im Bauteil	128
5	Eigenschaften des erhärtenden Betons	131
5.1	Festigkeitsverhalten des jungen Betons	132
5.1.1	Zeitliche Entwicklung der Betondruckfestigkeit	133
5.1.2	Zugfestigkeit des Betons	137
5.1.3	Spannungs-Dehnungs-Beziehungen und Elastizitätsmodul	142
5.1.4	Auswirkung der Erhärtungstemperatur auf das Festigkeitsverhalten	148
5.1.5	Prognose der Festigkeitsentwicklung während der Erhärtung des Bauteiles (Reife-Untersuchungen)	150
5.1.6	Festigkeitskenngrößen in Abhängigkeit von Hydratationswärmemenge und Hydratationsgrad	151
5.1.7	Verknüpfung der mechanischen Kenngrößen	155
5.2	Zugbruchdehnung des Betons	157
5.3	Kriechen und Relaxation	162
5.3.1	Kriechen	163
5.3.2	Relaxation	173
5.3.3	Einfluss der Erhärtungstemperatur	178
5.3.4	Kriechen und Relaxation bei Betonen mit Spannungsgeschichte	179
5.4	Temperaturbedingte Verformungen	181
5.5	Feuchte- und hydratationsbedingte Eigenverformungen	183
6	Zwangsspannungen in erhärtenden Betonbauteilen	191
6.1	Mechanismus der Entstehung der Zwangsspannungen	191
6.2	Temperaturverhältnisse, Verformungsbehinderungen und Zwangsspannungen in Bauteilen	194

6.2.1	Zwang im Bauteilquerschnitt (innere Verformungsbehinderung)	195
6.2.2	Zwang am Bauteilrand (äußere Verformungsbehinderung)	198
6.2.3	Überlagerung von Zwangs- und Eigenspannungen	201
6.2.4	Öffnung von Arbeitsfugen	203
6.3	Experimentelle Untersuchungen zum Verlauf der Zwangs- verformungen/-spannungen im Labor	203
6.3.1	Möglichkeiten zur Messung der Zwangsspannungen	204
6.3.2	Ergebnisse der Untersuchungen an Prüfkörpern im Labor	205
6.4	Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Zwangsspannungen	209
6.4.1	Modellgrundlagen zur Berechnung der Zwangsspannungen	211
6.4.2	Verformungen und Spannungen in erhärtenden Betonbauteilen	219
6.4.3	Charakterisierung der äußeren Verformungsbehinderung	223
6.5	Ermittlung der Zwangsspannungen in Sohlen und Fundamentplatten	227
6.5.1	Dehnbehinderte Sohlplatten bei Interaktion mit dem Untergrund	227
6.5.2	Dehnbehinderte Sohlplatten auf Trennlagen	234
6.5.3	Biegebehinderte Sohlplatten	238
6.5.3	Sohlplatten auf Pfahlgründungen und gegliederte Sohlunterkanten	241
6.5.5	Zeitlicher Verlauf der Schnittkräfte in Sohlplatten	241
6.6	Verformungsbehinderung und Spannungen in Wänden	242
6.6.1	Äußerer Behinderungsgrad $R_{a,L}$	244
6.6.2	Innerer Behinderungsgrad über die Wandhöhe $R_{a,H}$	248
6.6.3	Biegebeanspruchung der Wand	251
6.6.4	Überlagerung der Behinderung und kritische Spannungen in der Wandscheibe	252
6.6.5	Zwangsspannungen in Deckenscheiben	253
6.7	Zwangsspannungen in massigen blockartigen Baukörpern	253
6.8	Zwangsspannungen in Verbundbauteilen	254
6.9	Überschlägige Beurteilung der Zwangsspannungssituation	255
6.9.1	Berechnung der Zwangsspannungen in Zeitschritten (Tabellenkalkulation)	256
6.9.2	Abschätzung der Zwangsspannungsverhältnisse mit Mittelwerten	260
6.9.3	Abschätzung der Zwangsspannungen mit sehr vereinfachenden Annahmen	264
6.10	Überlagerung mit weiteren lastunabhängigen Beanspruchungen	267
6.10.1	Einwirkung von Schwindspannungen	267
6.10.2	Temperaturbeanspruchungen	269
6.11	Messung der Verformungen und Zwangsspannungen während der Baudurchführung	270
7	Rissbildung und Rissicherheit	275
7.1	Vorgänge bei der Rissbildung	275
7.2	Reißneigung des Betons	278
7.3	Bauteile mit erhöhtem Risiko einer Rissbildung	279
7.4	Risskriterien und Nachweis der Rissicherheit	282
7.4.1	Deterministische Nachweisführung	284
7.4.2	Probabilistisches Nachweiskonzept	294
7.4.3	Monte-Carlo-Simulation	302
7.5	Vorgaben für Temperaturgrenzwerte	304

8	Rissbreitenbeschränkung durch Bewehrung	313
8.1	Konzept der Rissbreitenbeschränkung	314
8.2	Vorgänge bei der Rissbildung im Stahlbetonbauteil	315
8.3	Ermittlung der Mindestbewehrung und Nachweis der Rissbreitenbeschränkung	318
8.3.1	Bestandteile der Nachweisführung	319
8.3.2	Grundlagen der Berechnung der Rissbreite	329
8.3.3	Begrenzung der Rissbreite ohne direkte Berechnung (Vereinfachter Nachweis nach DIN 1045-1, 11.2.3)	334
8.3.4	Ermittlung der rissbreitenbegrenzenden Bewehrung (Direkte Berechnung nach DIN 1045-1, Abschnitt 11.2.4)	341
8.3.5	Nachweis der Einhaltung der rechnerischen Rissweite w_k	347
8.3.6	Berechnungsbeispiele	348
8.3.7	Nichterreichen der Risschnittgröße	354
8.3.8	Ursachen unverträglicher Rissbreiten	355
8.3.9	Zwangsbeanspruchungen nach dem Abfließen der Hydratationswärme	356
8.4	Reduzierung der Rissbreite durch Zugabe von Stahlfasern	356
8.5	Hinweis zur Anordnung der Bewehrung über Wandhöhe	358
8.6	Regelungen zur Rissbreite	358
8.6.1	Definition der rechnerischen Rissbreite	359
8.6.2	Messung von Rissbreiten	361
8.6.3	Auswertung der Rissbreiten am Bauwerk	362
8.6.4	Auswirkungen der Risse	364
8.6.5	Selbstdichtung der Risse im Bauwerk	366
8.6.6	Festlegung rechnerischer Rissbreiten	368
9	Maßnahmen gegen und bei Rissbildungen	373
9.1	Maßnahmen zur Verminderung der Zwangsbeanspruchungen	373
9.1.1	Steuerung der Temperaturverhältnisse im Bauteil	375
9.1.2	Konstruktive Maßnahmen zur Reduzierung der Behinderung der erhärtenden Betonbauteile	382
9.1.3	Optimierung der Betonzusammensetzung	384
9.1.4	Vorspannung der erhärtenden Konstruktion	388
9.2	Maßnahmen bei Rissbildung (Füllen von Rissen)	389
9.2.1	Ziele und Vorbereitung der Rissanierung	389
9.2.2	Rissfüllstoffe	391
9.2.3	Tränken von Rissen	393
9.2.4	Abdichten von Rissen durch Injektion	394
9.2.5	Dehnfähiges Verbinden der Rissufer	394
9.2.6	Kraftschlüssiges Verbinden der Rissufer	395
10	Literaturzusammenstellung	397
10.1	Normen	397
10.2	Literatur	398
	Anhang	429

Zwangsspannungen infolge Hydratationswärme

Formelzeichen und Symbole

Abmessungen, Querschnittswerte, Kräfte

A_c	Gesamtfläche des Betonquerschnittes	[m ²]
A_s	Querschnittsfläche des Betonstahles	[mm ²]
F	Fundament, Kraft	[kN]
H	Horizontalkraft	[kN]
L	Länge	[m]
M	Moment	[kNm]
N	Längskraft	[kN]
R	Behinderungsgrad der Formänderungen	[-]
W	Wand	[m, cm]
b	Bauteilbreite	
b_m	mitwirkende Plattenbreite für einen Plattenbalken	[m]
b_i	Gurtplattenbreite	[m]
b_w	Stegbreite	[m]
c_{min}	Mindestbetondeckung	
c_{nom}	Nennmaß der Betondeckung	
d	Durchmesser	
h, h_{ges}	Bauteildicke, Querschnittsabmessungen	
h_{Pf}	Pfahltiefe (bei Bodenplatten)	

Zusammensetzung des Betons

z, g, f, s, w	Anteile von Zement, Gesteinskörnung, Flugasche, Silikastaub und Wasser der Betonzusammensetzung	[kg/m ³]
$w/z, w/b$	Wasserzementwert, Wasserbindemittelwert	[mm]
D_{max}	Nennwert des Größtwertes der Gesteinskörnung	
V_w	Volumen des Anmachwassers in der Zementpaste	[cm ³]
V_z	Volumen des Zementes	[cm ³]
V_{hyd}	Volumen der Hydrate	[cm ³]
V_p	Porenvolumen im Zementstein	[cm ³]
ρ	Dichte	[kg/m ³]
ρ_b	Betonrohddichte	[kg/m ³]

Thermische Größen, Wärme- und Temperaturentwicklung

q	Wärmefreisetzungsrate (= dQ/dt)	[kJ/kg h]
q_{max}	maximale Wärmerate	[kJ/kg h]
Q_i	Hydratationswärme der Klinkerbestandteile	[kJ/kg]
Q_z	Hydratationswärme des Zementes	[kJ/kg]
$Q_{sl}; Q_f; Q_s$	Hydratationswärme des Hüttensandes, der Flugasche und des Silikastaubes	[kJ/kg]
Q_{pot}	Hydratationswärme bei vollständiger Hydratation	[kJ/kg]
Q_{max}	maximale Hydratationswärme in Abhängigkeit von den Hydratationsbedingungen	[kJ/kg]
Q_{WP}	bis zum Wendepunkt der Kurve (bei q_{max}) freigesetzte Hydratationswärme	[kJ/kg]
$Q_{iso}; Q_{ad}; Q_{tad}$	Wärmeentwicklung unter isothermen, adiabatischen bzw. teiladiabatischen (Bauteil-) Bedingungen	[kJ/kg]
E_A	(scheinbare) Aktivierungsenergie	[kJ/mol]
R	Universelle Gaskonstante (= 8,314)	[J/mol K]
T	Temperatur	[°C]
T^*	absolute (Kelvin-) Temperatur	[K]
T_A	Aktivierungstemperatur (= E_A/R)	[K]
$T_L; T_{LN}; T_{LT}$	Lufttemperatur als Tagesmittel, bzw. nachts und am Tag	[°C]
T_U	Temperatur der Umgebung als tiefste Endtemperatur während des Temperaturengleichvorganges	[°C]
T_{bo}, T_{c0}	Frischbetontemperatur	[°C]
T_{bm}, T_m	mittlere Bauteiltemperatur	[°C]
T_{02}	2. Nullspannungstemperatur	[°C]
T_{cr}	Bauteiltemperatur zum Risszeitpunkt	[°C]
T_K, T_R	Temperatur im Kern und am Rand des Bauteiles	[°C]
ΔT	Temperaturerhöhung bzw. -differenz	[K]
$\Delta T_{ad}; \Delta T_{tad}$	Temperaturanstieg unter adiabatischen bzw. teiladiabatischen Bedingungen	[K]
ΔT_{HW}	(fiktiver) Temperaturanstieg, der aus der im Bauteil freigesetzten Hydratationswärme resultieren würde	[K]
ΔT_{max}	Temperaturanstieg bis zur Maximaltemperatur (= $T_{bo} - T_{max}$)	[K]
ΔT_{02}	Temperaturdifferenz während des Ausgleichvorganges (= $T_{02} - T(t)$)	[K]
ΔT_{cr}	Temperaturdifferenz zum Risszeitpunkt (= $T_{02} - T_{cr}$)	[K]
$\Delta T_L, \Delta T_U$	Temperaturdifferenz während des Ausgleichvorganges (= $T_{max} - T_L$) bzw. (= $T_{max} - T_U$)	[K]
$\Delta T_{BT}; \Delta T_{WF}$	Temperaturdifferenz im Bauteil zwischen Kern und Rand bzw. zwischen Wand und Fundament	[K]
a	Temperaturleitfähigkeit des Betons	[m ² /h]
c_b	spezifische Wärmekapazität des Betons	[kJ/kg K]
$c_z; c_g; c_w$	spezifische Wärmekapazität des Zementes, der Gesteinskörnung und des Wassers	[kJ/kg K]

c_{st}, c_{sch}	spezifische Wärmekapazität des Stahles bzw. der Schalung	[kJ/kg K]
k	Wärmedurchgangszahl	
$k(T)$	temperaturabhängige Geschwindigkeitskonstante der Reaktion	[-]
t_e	äquivalente (wirksame, Reife-) Erhärtungszeit	[h]
t_k	Bezugszeit	[h]
t_0	Zeit bei Belastungsbeginn	[m ² K h) / kJ]
R_0	Wärmedurchgangswiderstand	
S_b	Wärmespeicherkapazität des Betons (= $c_b \cdot \rho_b$)	[kJ/m ³ K]
v_w	Windgeschwindigkeit	[m/s]
α_a	äußerer Wärmeübergangskoeffizient (= $\alpha_k + \alpha_s$)	[kJ/m ² h K]
α_k	Wärmeübergangskoeffizient bei Konvektion	[kJ/m ² h K]
α_s	Wärmeübergangskoeffizient bei Strahlung	[kJ/m ² h K]
α_{tot}	summarischer Wärmeübergangskoeffizient	[kJ/m ² h K]
α_T	Temperaturdehnzahl	[1/K]
λ_b	Wärmeleitfähigkeit des Betons	[kJ/m h K]

Formänderungs- und Festigkeitsverhalten, Spannungen

E_c, E_{ct}	Druck- bzw. Zug-Elastizitätsmodul	[kN/mm ²]
E_{cm}	mittlerer Elastizitätsmodul für Normalbeton (als Sekante bei $\sigma_c \approx 0,4 f_{cm}$)	[kN/mm ²]
E_{c0m}	E-Modul des Betons als Tangente im Ursprung der Spannungs-Dehnungs-Linie nach 28 Tagen	[kN/mm ²]
$E_{c,eff}$	effektiver (wirksamer) E-Modul unter Berücksichtigung der Relaxation	[kN/mm ²]
$E_R, E_S; E_{UB}$	E-Modul der Sohlplatte, des Erdbodens und des Unterbetons	[kN/mm ²]
E_s	Elastizitätsmodul für Betonstahl	[kN/mm ²]
I_c	Trägheitsmoment des Betonquerschnittes	[m ⁴]
f_c, f_{cc}	Druckfestigkeit des Betons	[N/mm ²]
f_{cd}	Bemessungswert der einaxialen Festigkeit des Betons	[N/mm ²]
$f_{c,cube}$	Druckfestigkeit des Betons, geprüft am Würfel (150 mm)	[N/mm ²]
f	charakteristische Würfeldruckfestigkeit bei Lagerung nach DIN EN 12390-2 (150 mm)	[N/mm ²]
$f_{c,dry}$	Würfeldruckfestigkeit bei Lagerung nach DIN EN 12390-2, Anhang NA oder DIN 1048-5	[N/mm ²]
$f_{c,cyl}$	Betondruckfestigkeit, geprüft am Zylinder	[N/mm ²]
$f_{ck}, f_{ck,cyl}$	charakteristische Zylinderdruckfestigkeit im Alter von 28 Tagen ($h = 300$ mm, $d = 150$ mm)	[N/mm ²]
f_{cm}	mittlere Zylinderdruckfestigkeit	[N/mm ²]
f_{ct}	zentrische Zugfestigkeit	[N/mm ²]
f_{ctm}	mittlere zentrische Zugfestigkeit	[N/mm ²]
f_{cte}	wirksame Betonzugfestigkeit	[N/mm ²]

$f_{ctk; 0,05}$	charakteristischer Wert des 5%-Quantils der zentrischen Betonzugfestigkeit	[N/mm ²]
$f_{ctk; 0,95}$	charakteristischer Wert des 95 %-Quantils der zentrischen Betonzugfestigkeit	[N/mm ²]
$f_{ct,sp}$	Spaltzugfestigkeit des Betons (DIN 1045-1)	[N/mm ²]
f_{tk}	charakteristischer Wert der Zugfestigkeit des Betonstahls	[N/mm ²]
$f_{tk,cal}$	charakteristischer Wert der Zugfestigkeit des Betonstahls für die Bemessung	[N/mm ²]
f_{yd}	Bemessungswert der Streckgrenze des Betonstahls	[N/mm ²]
f_{yk}	charakteristischer Wert der Streckgrenze des Betonstahls	[N/mm ²]
$f_{0,2k}$	charakteristischer Wert der 0,2%-Dehngrenze des Betonstahles	[N/mm ²]
t_0	Alter des Betons bei Erstbelastung	
w_k	Rechenwert der Rissbreite	[mm]
α	Hydratationsgrad	[-]
α_0	Hydratationsgrad am Beginn der Festigkeitsentwicklung	[-]
$\alpha(t)$	Hydratationsgrad zum Zeitpunkt t	[-]
$\alpha_T, \alpha_{TC}, \alpha_{Te}$	Temperaturdehnzahl; allgemein, bei Kontraktion und Expansion	[1/K]
α_e	Verhältnis der Elastizitätsmoduln von Betonstahl und Beton	[-]
ϵ_{ci}	elastische Dehnung des Betons	[mm/mm]
$\Delta\epsilon_i$	Dehnungsinkrement zum Zeitpunkt t_i	[mm/mm]
ϵ_0	lastunabhängige (freie) Dehnung	[mm/mm]
ϵ_{0T}	Temperaturdehnung	[mm/mm]
ϵ_{cas}	Formänderung infolge autogenem Schwinden	[mm/mm]
ϵ_{cds}	Trocknungsschwinddehnung des Betons	[mm/mm]
$\epsilon_{cu}, \epsilon_{ctu}$	Bruchdehnung des Betons	[mm/mm]
ϵ_{cc}	Kriechdehnung des Betons	[mm/mm]
ϵ_{el}	elastische Dehnung	[mm/mm]
ϵ_{pl}	plastische Dehnung	[mm/mm]
ϵ_{frei}	freie, ungehinderte Verformung	[mm/mm]
ϵ_{beh}	behinderte Verformung	[mm/mm]
ϵ_s	Dehnung des Betonstahles	[mm/mm]
κ	Krümmung	[-]
μ	Reibungsbeiwert	[-]
σ_c, σ_{ct}	Spannung bzw. Zugspannung im Beton	[N/mm ²]
σ_s	Spannung im Betonstahl	[N/mm ²]
σ_{cr}	Spannung infolge Zwang, Rissspannung	[N/mm ²]
$\Delta\sigma$	Spannungsinkrement	[N/mm ²]
φ	Kriechfunktion	[-]
ψ	Relaxationsfunktion	[-]
C_{cr}, ω_{cr}, TCI	Rissindizes	[-]

Zementchemische Symbole

Schreibweise der Oxide in der Zementchemie

A	Al_2O_3	C	CaO
F	Fe_2O_3	H	H_2O
S	SiO_2	S	SO_3

Bezeichnungen der Klinkerphasen

C_2S	$2 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	(Dikalziumsilikat)
C_3S	$3 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	(Trikalziumsilikat)
C_3A	$3 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	(Trikalziumaluminat)
C_4AF	$4 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	(Kalziumaluminatferrit)
CH	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	(Kalziumhydroxid)
Cs	CaSO_4	(Kalziumsulfat)

1 Einführung

Mit der Erhärtung des Betons unvermeidbar verbunden ist die Freisetzung von Hydrationswärme, die vor allem in dickeren Bauteilen zu einem beträchtlichen Temperaturanstieg und anschließenden Rissbildungen führen kann. Dieses Problem ist seit Beginn einer breiteren Anwendung der Betonbauweise bekannt. Bereits 1920 wurde in ersten Veröffentlichungen der Wärmestau in massiven Konstruktionen und die Rissgefahr behandelt. 1930 wurde ein technisches Komitee des American Concrete Institute gegründet, um Hilfestellung bei der Planung und Ausführung von massigen Bauteilen zu geben (ACI 207). Aufgrund der bis dahin gesammelten Erfahrungen wurden beim Bau des Hoover-Dammes in den Jahren 1931 – 1935 Zemente mit niedriger Hydrationswärme verwendet. Zusätzlich waren Kühlleitungen eingebaut worden. Das Bauwerk war beispielgebend und die erprobte Betontechnologie wurde auf andere Bauprojekte übertragen.

In den anschließenden Jahren bildeten die Maßnahmen zur Senkung der Wärmeentwicklung durch Einsatz von Puzzolanen zur Substitution des Portlandzement-Klinkers, Vorkühlen der Zuschläge, Reduzierung des Zementeinsatzes usw. einen Schwerpunkt der Betontechnologie. Ab etwa 1950 wurden zunehmend Untersuchungen durchgeführt, die sich mit der Berechnung der Temperaturverteilung und den entstehenden Spannungen beschäftigten. In den letzten Jahrzehnten wurde dem Einfluss der Entwicklung der mechanischen Kenngrößen und dem Grad der Verformungsbehinderung verstärkt Aufmerksamkeit gewidmet. Durch experimentelle Untersuchungen an Bauteilen während der Bauausführung wurden vielfältige Erkenntnisse über wichtige Einflussfaktoren auf die Höhe der Zwangsspannungen, wie die Abmessungen der Bauteile, die wechselseitigen Behinderungen, die Frischbetontemperatur u.a. gewonnen.

Die Problematik der hydrationswärmebedingten Spannungen und Rissbildungen ist auch heute von großer Aktualität. Sehr schnell musste festgestellt werden, dass auch bei Bauteilen geringerer Dicke nicht nur das Trocknungsschwinden mit nachteiligen Auswirkungen verbunden sein kann, sondern durchaus auch ungünstige Temperaturverhältnisse entstehen können, die Risse hervorrufen. Dies erklärt die Vielzahl der Veröffentlichungen zur Steuerung der Wärmeentwicklung und Abschätzung der Rissgefahr in Wänden, Tunnelschalen, Sohlplatten und anderen vergleichbaren Bauteilen. Die Tätigkeit der RILEM-Arbeitsgruppe TC-119 TCE (Thermal Cracking in Concrete at Early Ages), das Forschungsprogramm HETEK (Danish R & D Project on High Performance Concrete), das europäische Projekt IPACS (Improved Production of Advanced Concrete Structures) und die laufenden Untersuchungen NORCRACK sowie Dissertationen und Forschungsberichte in mehreren Ländern sind Ausdruck der Bedeutung der thermisch bedingten Rissbildung für die Eigenschaften der Betonkonstruktionen. Es ist heute unstrittig, dass die sich in den Bauteilen herausbildenden Temperaturverhältnisse nicht nur Risse verursachen können, die die Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit sowie den optischen Eindruck beeinträchtigen und damit insgesamt die Wirtschaftlichkeit nachteilig beeinflussen, sondern hohe Temperaturen sich auch auf die Festigkeit und andere Eigenschaften des erhärteten Betons ungünstig auswirken.

Die Ursachen der Zwangsspannungen sind in der Besonderheit des Baustoffes Beton begründet und sind prinzipiell seit langem bekannt. Die sich relativ langsam und nicht kongruent herausbildenden Festigkeitseigenschaften des jungen Betons führen dazu, dass

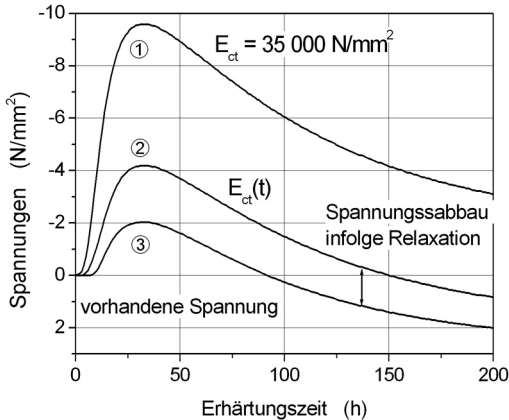


Bild 1.1:
Entwicklung der temperaturbedingten Zwangsspannungen in Abhängigkeit vom Werkstoffverhalten des Betons

durch die mit der Eigenerwärmung verbundene Ausdehnung zunächst eine plastische Verformung des erhärtenden Betongefüges erfolgt und niedrige Druckspannungen entstehen, die anschließende Abkühlung aber bei fortgeschrittener Erhärtung beträchtliche Zugspannungen hervorruft. Deutlich wird die Auswirkung der zeitabhängigen Betoneigenschaften im unterschiedlichen Spannungsverlauf in Bild 1.1.

Wäre der E-Modul von Anfang an vorhanden und konstant, würde die Entwicklung der Spannung völlig der Temperatur folgen ①; nach dem Temperatúrausgleich ist das Bauteil wieder spannungslos. Wenn der E-Modul erst im Zuge der Erhärtung anwächst, wird nur ein Teil der Temperaturerhöhung in Druckspannungen umgesetzt ②. Mit der Abkühlung werden die Druckspannungen schnell abgebaut und aus der weiteren Rückverformung entstehen bei einem vergrößerten E-Modul bleibende Zugspannungen. Das tatsächliche Festigkeitsverhalten des jungen Betons ist neben einer zeitabhängigen Entwicklung des E-Moduls noch durch Relaxationsvorgänge gekennzeichnet, die in der Anfangsphase der Erhärtung besonders intensiv wirksam sind. Die Druckspannungen sind dadurch relativ gering und werden sehr schnell abgebaut ③, höhere Zugspannungen sind jedoch die Folge.

Der Temperaturrückgang ab dem Maximum findet hauptsächlich zu einem Zeitpunkt statt, an dem der E-Modul sich bereits asymptotisch dem Endwert nähert, die Relaxation nur noch geringfügig wirkt und nahezu proportionale Verkürzungen zu beträchtlichen Zugspannungen führen. Übersteigen diese Zugspannungen die aktuell vorhandene Zugfestigkeit, sind zwangsläufig Risse die Folge.

Die Temperaturverhältnisse im Bauteil sind zu verschiedenen Zeitpunkten kritisch. Die Erwärmung und Ausdehnung der betonierten Wand in Bild 1.2 ruft Zugspannungen im Fundament hervor. Die während der Expansionsphase entstehende Temperaturverteilung im Querschnitt kann zu Oberflächenrissen führen. Die im Zuge der Abkühlung wirksame Verformung kann durchgehende Spaltresse hervorrufen.

Wie bei dem Bauteil in Bild 1.2 können sich die unterschiedlichen Beanspruchungen überlagern und ein entsprechendes Rissbild ergeben. Verformungen sind immer dann mit

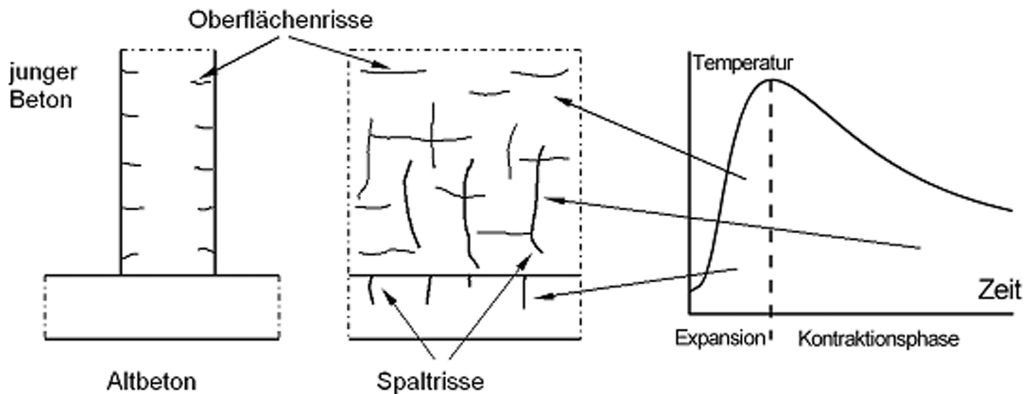


Bild 1.2:
Entstehung von Oberflächen- und Spaltrissen während der Erwärmung und Abkühlung einer Wand

Spannungen verbunden, wenn eine Behinderung vorhanden ist und die freie Dehnung verhindert wird. Bei der Ausführung der üblichen Bauwerke ist dies in bestimmtem Maße immer gegeben.

Wenn die Zeitabhängigkeit der Einwirkungen und der Festigkeitskenngößen zunächst vereinfachend nicht beachtet wird, ergibt sich die Zwangsspannung σ_{cr} infolge Behinderung und unter Einwirkung der Relaxation zu:

$$\sigma_{cr} = \underbrace{\Delta T}_{\text{Beanspruchung}} \cdot \underbrace{\alpha_T \cdot E_{ct} \cdot \psi}_{\text{Eigenschaften des Betons}} \cdot \underbrace{R}_{\text{konstruktive Bedingungen}}$$

ΔT ist dabei die vorhandene, d.h. messbare Temperaturdifferenz, E_{ct} der Zugelastizitätsmodul, α_T der lineare thermische Ausdehnungskoeffizient und ψ der Relaxationskoeffizient. Die Nachgiebigkeit der behindernden Konstruktionsteile (z.B. Fundamente) wird durch den Faktor R charakterisiert.

Aufgrund der Tatsache, dass die Faktoren α_T und ψ praktisch nicht, der E-Modul nur in Ausnahmefällen durch eine besondere Zusammensetzung des Betons gezielt verändert werden kann und der Behinderungsgrad R nur sehr begrenzt beeinflussbar ist, kommt der Beherrschung der Temperaturdifferenz zur Vermeidung der Rissgefahr eine besondere, wenn nicht gar ausschlaggebende Bedeutung zu. Insofern ist nahe liegend, zur Vermeidung von Zwangsspannungsrissen zulässige Temperaturdifferenzen vorzugeben bzw. einzuhalten. Die betontechnologische Vorbereitung und Bauausführung ist dann darauf gerichtet, den Wärmehaushalt im Bauteil so zu steuern, dass risskritische Temperaturverhältnisse vermieden werden. Dazu stehen eine Reihe von Maßnahmen zur Verfügung, die in Abhängigkeit von der Bauteilgeometrie und den Umgebungsbedingungen zum Einsatz kommen.

Die Berechnung der Zwangsspannungen ist mit beträchtlichen Schwierigkeiten verbunden, die sich aus der Zeitabhängigkeit der Eigenschaften des Betons und deren mathematischer Formulierung, der komplizierten Wirkung der Relaxation und der unsicheren Erfassung der konstruktiven Bedingungen ergeben. Verhältnismäßig einfach ist dagegen die Bestimmung des Temperaturverlaufes und der Temperaturverteilung im Bauteil. Voraussetzung ist aber eine sorgfältige Modellierung der Wärmeentwicklung sowie eine zutreffende Beschreibung der Zusammenhänge zwischen Reaktionstemperatur und -geschwindigkeit.

Die Genauigkeit der berechneten Zwangsspannungen ist insofern eingeschränkt, da alle Eingabegrößen naturgemäß Streuungen aufweisen. Eine wirklichkeitsnahe Ermittlung ist überhaupt in Frage gestellt, wenn keine experimentell abgesicherten Eingangswerte zur Verfügung stehen. Für übliche Bauvorhaben trifft dies sicher weitgehend zu. Die dann möglichen Aussagen sind damit zwangsläufig mit großen Unsicherheiten verbunden. Vielfach wurde deshalb auch die Meinung vertreten, dass von einer rechnerischen Erfassung des Spannungszustandes keine realistischen Ergebnisse erwartet werden können.

In den letzten 20 Jahren wurde international mit großer Intensität daran gearbeitet, allgemeingültige Gesetzmäßigkeiten in der Entwicklung der Eigenschaften und im Festigkeitsverhalten des jungen Betons zu erkennen und für eine praxisorientierte Berechnung der Zwangsspannungen bereitzustellen. Dabei standen vor allem die Ausarbeitung von immer zutreffenderen Modellen, der Einsatz von leistungsfähigen Rechnerprogrammen und die Untersuchung des Festigkeitsverhaltens des jungen Betons im Mittelpunkt. Die Untersuchungen haben sich von der Erfassung der Phänomene sehr deutlich in Richtung der Hydratationsprozesse orientiert, die die Erhärtung bedingen, die Wärmeentwicklung verursachen und Grundlage der Eigenschaften sind.

Im Ergebnis sind methodische Grundlagen für Planungswerkzeuge ausgearbeitet worden, die aber gegenwärtig in Deutschland nur selten angewendet werden. Die Ursachen liegen nicht allein in den Schwierigkeiten beim praktischen Gebrauch, sondern vor allem darin, dass weder in der Regel die Auftraggeber, noch die Vorschriften ein Konzept der Rissvermeidung verlangen. Demgegenüber wird ein Nachweis der Wirksamkeit betontechnologischer Maßnahmen und der Rissicherheit vor der Baudurchführung beispielsweise in den skandinavischen Ländern und Japan zwingend gefordert. Eine Änderung könnte durch die Beteiligung deutscher Unternehmen an Bauvorhaben im Ausland und den dabei erforderlichen vorlaufenden Untersuchungen zu den Betoneigenschaften, zur Verarbeitung des Betons und den Risiken während der Erhärtung im Rahmen des sogenannten Pre-Testing eintreten.

Wenn die Rissvermeidung durch Maßnahmen zur Verminderung der Zwangsbeanspruchungen nicht nachgewiesen werden kann, ist zur Vermeidung einer unkontrollierten Rissbildung und größerer Rissbreiten eine Mindestbewehrung vorgeschrieben, deren Ermittlung und Anordnung in DIN 1045-1:2001-07 und der bisherigen DIN 1045 (7.88) übereinstimmend geregelt sind. Diese Mindestbewehrung ist im Allgemeinen nur für die relativ kurzzeitigen Zwangsbeanspruchungen erforderlich, beeinflusst aber, wenn die Bewehrung zusätzlich eingelegt werden muss, die Kosten nachteilig. Darüber hinaus kann die Mindestbewehrung die Entstehung von Rissen, auch einzelner breiterer Risse, nicht grundsätzlich verhindern. Die Sicherheit gegenüber Rissbildung kann zwar durch die Verringe-

rung der zulässigen rechnerischen Rissbreiten erhöht werden, gleichzeitig werden aber die Wirtschaftlichkeit und Betonierbarkeit ungünstig beeinflusst, da die einzusetzende Bewehrungsstahlfläche weiter ansteigt. Gegenwärtig wird versucht, Stahlfasern zur Rissicherung heranzuziehen, die dem Frischbeton beigemischt werden.

Aufgrund der Probleme bei der rechnerischen Ermittlung der Zwangsspannungen wird in der Regel auch nicht von der normgemäßen Möglichkeit Gebrauch gemacht, die Bemessung der Bewehrung nach den tatsächlich auftretenden Zwangsbeanspruchungen durchzuführen. Die Festlegung einer Mindestbewehrung wird in der Praxis als eine durch Vorschriften abgesicherte Standardlösung angesehen, die außerdem mit dem Vorzug verbunden wird, dass in der Tragwerksplanung keine Abstimmung mit ausführungstechnischen Maßnahmen vorgenommen werden muss. Das Vertrauen in diese Vorgehensweise allein ist aber nicht immer gerechtfertigt. Die Annahme der zum Risszeitpunkt wirksamen Zugfestigkeit kann unzutreffend sein. Die rechnerische Ermittlung der Rissweite täuscht eine Genauigkeit vor, die gar nicht vorhanden sein kann. Nachfolgende Beanspruchungen können zu Rissen führen, wenn die Nachweisführung nur auf frühen Zwang beschränkt wird.

Risse, die trotz technologischer und konstruktiver Vorsichtsmaßnahmen auftreten können, führen in vielen Fällen zur Ablehnung oder Minderung der Bauleistung durch den Auftraggeber, da offensichtlich der Tatbestand des Mangels erfüllt ist. Diese Maßgabe ist aber ungerechtfertigt, wenn die Gebrauchstauglichkeit und die Standsicherheit nicht in Frage gestellt sind. Risse stellen aber auch dann keinen Mangel dar und können akzeptiert werden, wenn eine Verpressung der Risse vorgenommen und die Gebrauchstauglichkeit hergestellt werden kann. Die Technologie der Rissverpressung ist damit ein wichtiges Instrument zur Sicherung der funktionsgerechten Ausführung von Stahlbetonbauteilen, die unter Zwang im jungen Alter erhärten. Wenn der optische Eindruck beeinträchtigt ist, kann eine andere Beurteilung gerechtfertigt sein.

Die Kosten für die Rissverpressung sind oftmals niedriger als für die rissbreitenbegrenzende Bewehrung. Daraus eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung abzuleiten und auf die Mindestbewehrung zu verzichten, ist zumindest unvorsichtig.

Die Beherrschung der Auswirkungen der Zwangsspannungen ist eine komplexe Aufgabenstellung. Die Ziele bestehen einerseits darin, durch die Vermeidung bzw. Minimierung der Risse eine dauerhafte und funktionstüchtige Konstruktion zu gewährleisten. Zum anderen ist aus Kostengründen eine Reduzierung der Mindestbewehrung und der Maßnahmen zum Schließen der Risse anzustreben. Schließlich darf der im erhärteten Beton verbleibende Spannungszustand nicht zu einer kritischen Situation bei den folgenden Beanspruchungen durch Schwinden oder bei fehlender Überbauung durch den Temperaturrückgang im folgenden Winter führen. Betontechnologische Maßnahmen nehmen dabei einen wichtigen Platz ein. In Bild 1.3 ist beispielsweise dargestellt, wie die Betontechnologie beitragen kann, die Bewehrung effektiv zur Einhaltung einer vorgegebenen rechnerischen Rissweite einzusetzen.

Da es nach dem gegenwärtigen Stand noch nicht möglich ist, die Zwangsspannungen mit der im technischen Bereich erforderlichen Zuverlässigkeit zu berechnen, kann eine hinreichende Sicherheit gegen unverträgliche Rissbildung nur dann erreicht werden, wenn die

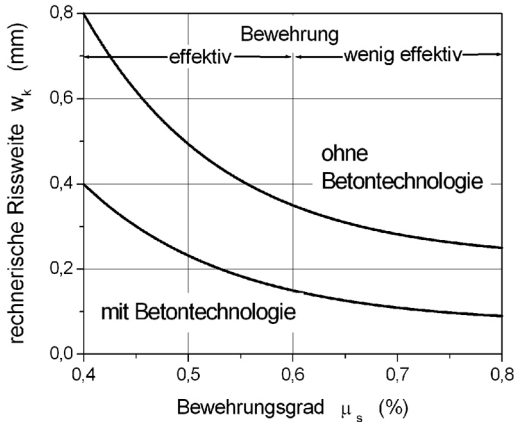


Bild 1.3:
Verminderung der rissbreitenbeschränkenden Bewehrung durch betontechnologische Maßnahmen (schematisch), nach [Eie1]

in der Praxis oft getrennt betrachteten Vorgehensweisen in Kombination angewandt werden. Dies gilt besonders für Bauwerke, deren Dichtheit von vorrangiger Bedeutung ist, wie beispielsweise bei Anlagen mit wassergefährdenden Stoffen.

Die Strategie zur Rissbeherrschung umfasst aus dieser Sicht die Bestandteile:

- Betontechnologische und konstruktive Maßnahmen zur Reduzierung der Zwang induzierenden Ursachen
- Berechnung der risskritischen Situation und Ableitung der zu diesem Zeitpunkt vorhandenen Zugfestigkeit
- Bemessung der rissbeschränkenden Bewehrung anhand der Zugfestigkeit zum Risszeitpunkt

Entsprechend dieser Maßgabe werden im Folgenden die Schritte behandelt, die notwendig sind, die Wahrscheinlichkeit der Rissbildung zu verringern und bei Rissbildung die Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit sicherzustellen. Deshalb werden beispielsweise das Nachbruchverhalten und die Zwangsspannungen im gerissenen Zustand nicht betrachtet.

Das daraus resultierende Konzept ist in Bild 1.4 zusammengefasst und spiegelt sich in der Gliederung wider. Eine zentrale Stellung nehmen die Modellierung der Wärmeentwicklung und die Berechnung der Temperaturfelder ein. Diese Temperaturprognose bildet weiterhin eine wesentliche Grundlage für die Beschreibung der Materialeigenschaften des jungen Betons und ist eine Voraussetzung für die Berechnung der Spannungen.

Im Ergebnis sind dann die Möglichkeiten vorhanden, die Rissgefahr anhand von Grenzwerten einzuschätzen. Dabei kann dem Nachweis der Einhaltung des Bruchdehnungs- oder Festigkeitskriteriums der Vorzug gegeben werden, oder der von Temperaturgrenzwerten. Für die letztgenannte Vorgehensweise kann aus den einzelnen Abschnitten ein einfaches Werkzeug für die Planung und Kontrolle in der Baudurchführung abgeleitet werden, mit dem das Rissrisiko beurteilt wird.

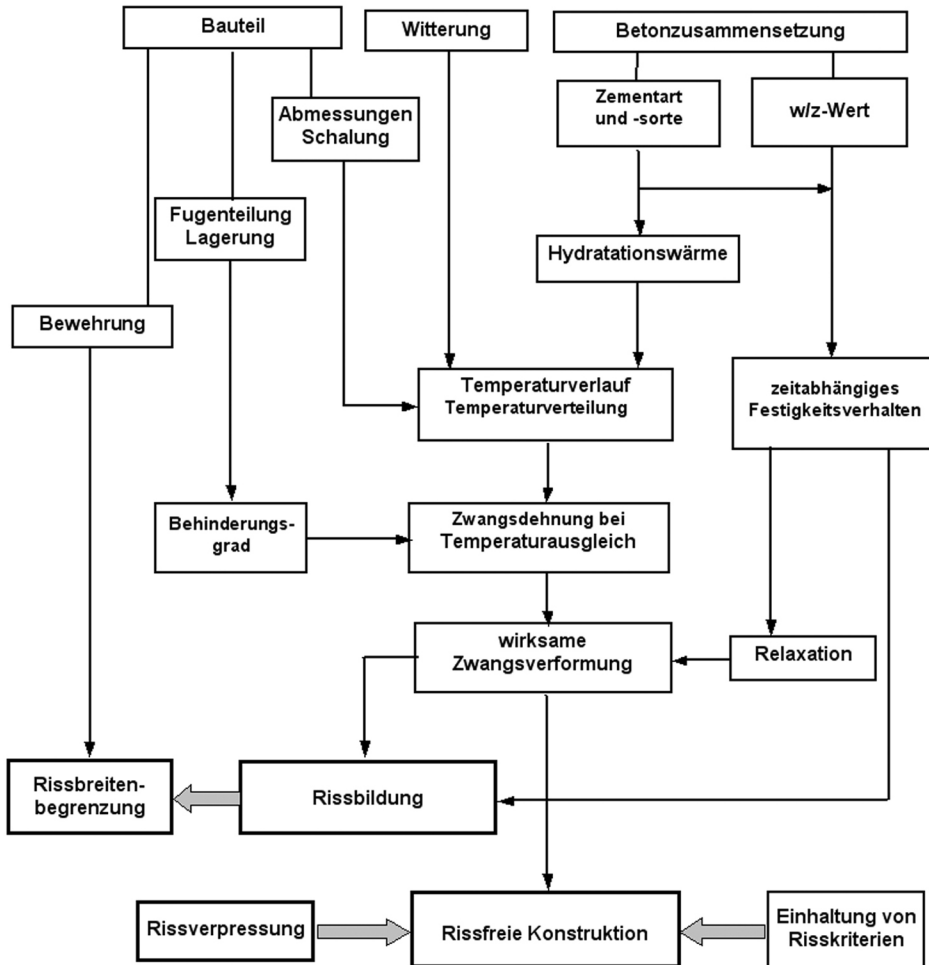


Bild 1.4:
Übersicht zu den maßgebenden Einflussfaktoren auf die Rissbildung infolge Hydratationswärme und den Maßnahmen zur Erzielung einer rissfreien Konstruktion

Die Vorgabe begründeter Temperaturdifferenzen kann dabei durchaus als eine geeignete risspräventive Maßnahme angesehen werden, solange keine Planungswerkzeuge zur Verfügung stehen, mit denen der bauteilspezifische Zusammenhang zwischen den stofflichen Parametern und der Rissentstehung beherrscht werden kann.

Durch Untersuchung der Wirksamkeit verschiedener Vorgehensweisen zur Einhaltung der Risskriterien und Ableitung der Konsequenzen für die Zusammensetzung des Betons, Ausführung der Betonarbeiten und Steuerung der Erhärtingsbedingungen ist dann die Voraussetzung gegeben, einen wirtschaftlichen Vergleich der einzelnen Maßnahmen durchführen zu können. Weitere Anforderungen an die Zusammensetzung des Betons er-

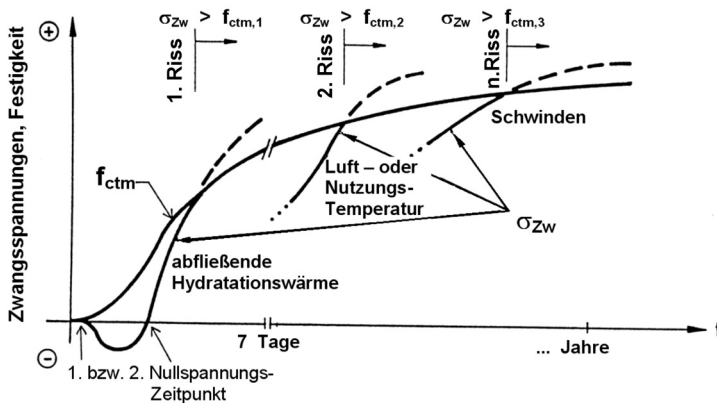


Bild 1.5:
Überlagerung verschiedener Zwangsspannungszustände. Entwicklung der Zugfestigkeit und der Zwangsspannungen von der Herstellung des Bauteiles bis zur Nutzung (schematisch)

geben sich aus der Festigkeits- und Expositionsklasse entsprechend Funktion und Beanspruchung des Bauteiles.

Die Festlegung der Zusammensetzung des Betons stellt eine Optimierungsaufgabe dar. Die Zielstellung besteht darin, die geforderten Frisch- und Festbetoneigenschaften mit möglichst geringen Temperaturdifferenzen und Zwangsspannungen zu erreichen. Die Auswahl eines Zementes mit normgemäß niedriger Hydratationswärme ist dabei nur ein Aspekt, der zum beabsichtigten Ergebnis beiträgt, aber allein nicht zwangsläufig die günstigste Variante darstellt.

Eine Erfahrung der Praxis ist, dass mitunter Risse auftreten, die bei einem anscheinend vergleichbaren Bauwerk nicht festgestellt worden sind. Die Schlussfolgerung ist dann, dass eine zielgerichtete Vermeidung von Rissen sehr fraglich ist. Wenn die Ausführungsbedingungen näher untersucht werden, stellt sich aber heraus, dass etwas andere Frischbeton- und Lufttemperaturen vorlagen und der verwendete Zement eine abweichende Charakteristik der Wärmeentwicklung aufwies. Insgesamt war dann die zwangsverursachende Situation nicht identisch und die Rissbildung nachvollziehbar. Eine Schlussfolgerung besteht demzufolge darin, die für die Zwangsbeanspruchung maßgebenden Faktoren so genau wie möglich zu erfassen. Bei nicht vorhersehbaren Witterungsbedingungen können daraus auch alternative Konzepte resultieren, die dann je nach Bedarf wahlweise zur Anwendung kommen.

Die Erfassung und Berücksichtigung der aus der Hydratationswärme resultierenden Spannungen ist eine wichtige Aufgabe der Tragwerksplanung und Bauvorbereitung und verdient entsprechende Aufmerksamkeit. Dabei darf aber nicht übersehen werden, dass dieser frühe Zwang nur die erste und nicht die einzige Beanspruchung mit der Gefahr der Rissbildung und Beeinträchtigung der Gebrauchstauglichkeit darstellt. Durch das Schwinden und bei Außenbauteilen die Temperaturdifferenz im folgenden Winter können höhere bzw. weitere Zwangsspannungen wirksam werden, die die Festigkeit des Betons übersteigen und eine größere rissbreitenbeschränkende Bewehrung erfordern. Insofern bildet die Bemessung auf Zwang im jungen Beton nur den ersten Schritt in der Nachweisführung zur Sicherung der normgemäßen Gebrauchstauglichkeit.

2 Kinetik des Hydratations- und Erhärtungsprozesses

Aus der Reaktion der Klinkermineralien mit dem Wasser entstehen neue chemische Verbindungen, die die wasserunlösliche Struktur des Zementsteines bilden. Für diesen sehr komplexen Vorgang wird der Begriff Hydratation verwendet. Mit dem Aufbau der neuen Hydratstruktur entstehen aber nicht nur die Voraussetzungen für die technisch wichtigen Eigenschaften des Zementsteins und Betons, sondern sind auch unvermeidbar eine Reihe von Phänomenen verbunden, die direkt zur Problematik der Zwangsspannungen führen. Insofern ist jede theoretische Untersuchung der Zusammenhänge, die die Spannungen und Rissbildungen verursachen, eng mit der Kenntnis der Hydratationsvorgänge verbunden. Dadurch wird auch die mathematische Formulierung der Beziehung zwischen den Eigenschaften des erhärtenden Betons und das zeitabhängige Verhalten erleichtert. Beispiele dafür sind die Arbeiten von [Bre2], [Koe4], [Lau1], [Röh3].

2.1 Charakteristische Phänomene des Hydratationsprozesses

Der Hydratationsprozess ist mit folgenden Vorgängen, die für das Festigkeitsverhalten und die Entstehung von Spannungen relevant sind, verbunden:

- *Bildung von Hydraten im Anmachwasserraum sowie an der Oberfläche und innerhalb der Korngrenzen der Zementpartikel*
Mit Zunahme der Hydrate wird die anfängliche freie Beweglichkeit der Frischbetonmischung eingeschränkt (Ansteifen, Erstarren). Ist eine Mindesthydratmenge vorhanden, wird der ursprüngliche Anmachwasserraum überbrückt und die Festigkeitsentwicklung beginnt (Abschnitt 5.1.5). Diese endet dann, wenn keine neuen Hydrate mehr entstehen. Das hydratisierte Gefüge des Zementsteins ist die Grundlage der makroskopischen Eigenschaften des Betons.
- *Volumenverminderung*
Die Ausgangsstoffe haben ein größeres Volumen als die Neubildungen. Die Volumenverminderung im Zuge der Hydratation wird als chemisches oder autogenes Schwinden bezeichnet und kann bei hochfesten Betonen erhebliche Spannungen im Bauteil verursachen (Abschnitt 5.5).
- *Reaktionsenthalpie*
Durch die Hydratation gehen die Ausgangsstoffe mit höherer Energie in ein System mit niedrigerem Energieniveau über (Thermochemie des Hydratationsvorganges). Die Energiedifferenz wird als Reaktionswärme freigesetzt (Abschnitt 3).
- *Physikalische Bindung von Wasser*
In dem entstehenden Zementstein wird Wasser durch Adsorption an den Oberflächen der gelförmigen Hydrate oder in Zwischenschichten eingelagert und stellt ein Strukturelement dar. Durch höhere Temperatur und Austrocknung werden die Wassermoleküle entfernt und dadurch Schwindvorgänge hervorgerufen (Trocknungsschwinden, Abschnitt 5.5).

Die chemischen, physikalischen und morphologischen Veränderungen finden am Anfang der Erhärtung zeitlich verschoben statt und sind deshalb vor allem für den jungen Beton bedeutsam. Trocknungsprozesse dagegen laufen über einen sehr langen Zeitraum

hinweg ab und können noch nach Jahren im weitestgehend erhärteten Beton Auswirkungen hervorrufen.

Während des Erhärtungsvorganges vollzieht sich nicht nur der Aufbau der Zementsteinstruktur, sondern parallel laufend auch die Freisetzung der Reaktionswärme. Festigkeits- und Wärmeentwicklung sind demzufolge untrennbar miteinander verbunden und deshalb nur in einem begrenzten Rahmen getrennt steuerbar (Bild 2.1). Die bestehenden Gesetzmäßigkeiten bilden deshalb die Grundlage einer mathematischen Beschreibung und Prognose des zeitlichen Ablaufes der Entwicklung der einzelnen Phänomene und deren Beziehungen untereinander.

Der Hydratationsprozess ist eine Abfolge mehrerer Perioden mit sehr unterschiedlicher Reaktionskinetik (Bild 2.2) und vollzieht sich in Abhängigkeit von vielfältigen Stoff- und Zustandsgrößen (z.B. Klinkerzusammensetzung, Mahlfineinheit des Zementes, Nebenbestandteile des Zementes, chemische Zusatzmittel, Temperatur und Druck) sowie weiteren Randbedingungen (z.B. Wasserzementwert).

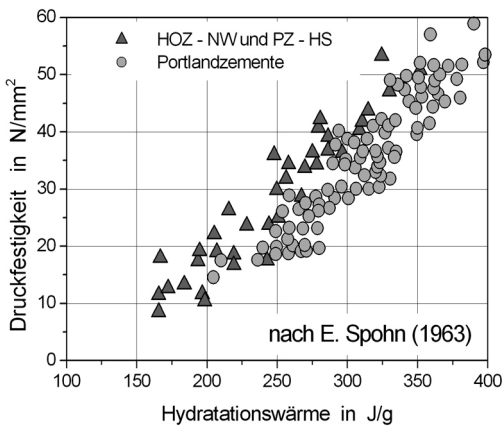


Bild 2.1:
Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und Hydratationswärme nach den Untersuchungen von E. Spohn (Bedingung: übereinstimmende Wasserzementwerte)

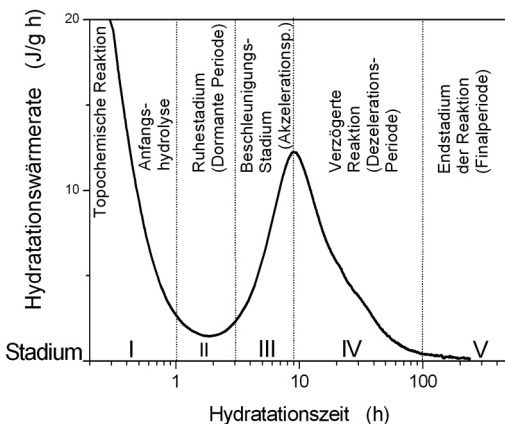


Bild 2.2:
Reaktionsablauf und -stadien bei der Hydratation des Klinkerminerals C3S im Portlandzement (Reaktionskinetik gekennzeichnet durch die Hydratationswärmerate, schematisch). Unterteilung der Hydratationszeit nach Mindess und Young, siehe [Hen3]

Der Ablauf und der Stand der Hydratation können sehr gut anhand der Wärmeentwicklung verfolgt werden. Die erste Berührung der Portlandzementpartikel mit dem Anmachwasser ist mit einer kurzen, aber intensiven Reaktion an deren Oberfläche verbunden, die durch eine hohe Wärmeentwicklungsrate charakterisiert ist (Stadium I, Induktionsperiode), Bild 2.2). Die entstehende Hydratschicht unterbindet die weitere Reaktion weitestgehend (Dormante oder Ruheperiode mit relativ geringer Hydratationsaktivität, Stadium II). Das Aufbrechen der Randschicht (Umkristallisation, osmotischer Druck u.a.) stellt die Reaktivität der Zementkornoberfläche wieder her. Die Geschwindigkeit der Reaktion wird wieder durch chemische Prozesse gesteuert, nimmt ständig zu (Stadium III, Akzelerationsperiode) und durchläuft ein deutlich ausgeprägtes Maximum, das den Wendepunkt im Verlauf der Hydratation charakterisiert (Bild 2.2 und 2.5). Kennzeichnend ist die Hydratbildung in größerem Umfang.

Mit dem Vordringen der Reaktionsfront in das Innere der Zementpartikel wird die Hydratation erschwert. Nach Erreichen des Maximums der Hydratationsgeschwindigkeit bestimmt die diffusionskontrollierte Reaktion immer stärker und dann ausschließlich den weiteren Ablauf; die Hydratation wird verlangsamt (Stadium IV, Retardations- oder Dezelerationsperiode) und klingt asymptotisch aus (Stadium V, Finalperiode), Bild 2.2.

Im Ergebnis entsteht der charakteristische Verlauf in Abhängigkeit von der Zeit in Form einer S-förmigen Kurve, die den evolutionären Charakter des Prozesses zum Ausdruck bringt.

2.2 Hydratationsgrad als Kenngröße des Hydratationsfortschritts

Zwischen dem Anteil des Zementes, der in Hydrate umgewandelt worden ist, und dem Stand der Entwicklung der Eigenschaften des Zementsteines sowie des Betons besteht ein enger Zusammenhang. Es ist deshalb nahe liegend, einen solchen Grad der Umwandlung des Zementes als eine universelle Bezugsgröße zur Beschreibung des Verlaufes des Hydratationsprozesses und der Herausbildung wichtiger Eigenschaften anzusehen und in Rechnerprogrammen zu verwenden, Beispiele dafür sind in [Bre2], [Huc1], [Lau1], [Röh4], [Ros1], [Ros2] zu finden. Die Schwierigkeit liegt jedoch in der Feststellung des zu einem bestimmten Zeitpunkt hydratisierten Zementvolumens.

Neben einer direkten Bestimmung der Phasengehalte durch röntgenografische (QXRD) und IR-spektroskopische Untersuchungsmethoden kann bei technischen Untersuchungen der Hydratationszustand nur indirekt über die Messung der mit dem Hydratationsprozess verbundenen Phänomene, d.h. der chemischen Wasserbindung, der Schrumpfung des hydratisierenden Zementvolumens oder der freigesetzten Hydratationswärme ermittelt werden. Die experimentelle Vorgehensweise ist beispielsweise in [Röh2] dargestellt. Vereinzelt ist auch die Festigkeitsentwicklung herangezogen worden, um den Hydratationsfortschritt zu charakterisieren.

Das Verhältnis zwischen dem Messwert zu einzelnen Zeitpunkten und dem bei vollständiger Umsetzung des Zementes wird im Allgemeinen bei allen Untersuchungsmethoden als Hydratationsgrad bezeichnet, bei der Messung der Hydratationswärme auch als thermischer Reaktionsgrad oder Enthalpiegrad. Durch diese Kenngröße, die keine physikalisch