

## Inhaltsverzeichnis

1	<b>EINLEITUNG</b> .....	1
1.1	Problembeschreibung und Zielsetzung .....	1
1.2	Gliederung der Arbeit .....	1
2	<b>BISHERIGES VORGEHEN ZUR ERMITTLUNG UND VERMEIDUNG VON ZUGSPANNUNGEN WÄHREND DER HYDRATATION</b> .....	3
2.1	Allgemeines .....	3
2.2	Maßnahmen zur Vermeidung von Zwangspannungen und früher Risse .....	4
2.2.1	Überblick .....	4
2.2.2	Betontechnologische Maßnahmen .....	5
2.2.3	Konstruktive Maßnahmen .....	6
2.2.4	Ausführung .....	8
2.2.5	Temperaturkriterien .....	9
2.2.6	Rißkontrolle durch Bewehrung .....	10
2.2.7	Untersuchung jungen Betons im Reißrahmen .....	11
2.2.8	Zwangspannungsberechnung mit Werkstoffmodellen für jungen Beton .....	12
2.3	Werkstoffeigenschaften jungen Betons .....	13
2.3.1	Allgemeines .....	13
2.3.2	Hydratation .....	13
2.3.2.1	Hydratationsphasen und Einflüsse auf die Hydratation .....	13
2.3.2.2	Hydratationsgrad .....	16
2.3.2.3	Messung der Wärmefreisetzung .....	18
2.3.2.4	Reifefunktionen - Wirksames Betonalter .....	20
2.3.2.5	Modellierung des Hydratationsgrads .....	23
2.3.3	Mechanische Kurzzeiteigenschaften .....	24
2.3.3.1	Allgemeines .....	24
2.3.3.2	Druckfestigkeit .....	25
2.3.3.3	Zugfestigkeit .....	26
2.3.3.4	Elastizitätsmodul .....	29
2.3.4	Spannung-Dehnungsverhalten unter Zugbeanspruchung .....	31
2.3.4.1	Zugspannung-Dehnungsbeziehung .....	31
2.3.4.2	Zugbruchdehnung .....	32
2.3.5	Viskoelastisches Verhalten jungen Betons .....	33
2.3.5.1	Bisherige Kenntnisse .....	33

2.3.6	Bewertung der bisherigen Modelle zur Beschreibung der Viskoelastizität jungen Betons unter Zugbeanspruchung .....	38
2.3.7	Schwinden .....	39
2.4	Offene Fragen.....	40
<b>3</b>	<b>DURCHFÜHRUNG UND MESSTECHNIK DER EIGENEN VERSUCHE .....</b>	<b>42</b>
3.1	Überblick.....	42
3.2	Versuchsbetone .....	42
3.3	Adiabatische Kalorimeterversuche .....	44
3.3.1	Vorbemerkungen .....	44
3.3.2	Versuchseinrichtung und -durchführung.....	44
3.4	Versuche zum mechanischen Kurzzeitverhalten .....	45
3.4.1	Vorbemerkungen .....	45
3.4.2	Versuchseinrichtung und -durchführung.....	46
3.5	Kerbzugversuche - KZ .....	46
3.5.1	Vorbemerkungen .....	46
3.5.2	Versuchseinrichtung und -durchführung.....	47
3.6	Versuche zum zeitabhängigen Verhalten jungen Betons unter zentrischem Zug ...	49
3.6.1	Vorbemerkungen .....	49
3.6.2	Versuchseinrichtung und -durchführung.....	50
3.6.3	Meßsysteme .....	53
3.6.4	Versuchsumfang .....	54
3.7	Langzeit-Kriechversuche unter isothermen Bedingungen .....	57
3.7.1	Vorbemerkungen .....	57
3.7.2	Versuchseinrichtung und -durchführung.....	58
3.8	Begleitende Versuche .....	60
3.8.1	Messung des Wärmeausdehnungskoeffizienten.....	60
3.8.2	Messung der lastunabhängigen Verformungen.....	61
<b>4</b>	<b>ERGEBNISSE UND MODELLIERUNG VON WÄRMEFREISETZUNG, ZENTRISCHER ZUGFESTIGKEIT, DRUCKFESTIGKEIT UND ELASTIZITÄTSMODUL... ..</b>	<b>62</b>
4.1	Vorbemerkungen .....	62
4.2	Adiabatische Wärmefreisetzung .....	62
4.2.1	Vorbemerkungen .....	62
4.2.2	Versuchsergebnisse.....	62
4.2.2.1	Standard-Betone.....	62
4.2.2.2	Sonderbetone .....	64

4.2.2.3	Zusammenhang zwischen Frischbetontemperatur und adiabatischer Temperaturerhöhung .....	65
4.2.3	Modellierung der adiabatischen Temperaturerhöhung .....	67
4.3	Hydratationsgradiententwicklung .....	68
4.3.1	Versuchsergebnisse und Modell .....	68
4.3.2	Betonspezifische Parameter $t_k$ und $c_1$ zur Modellierung des Hydratationsgrads....	71
4.3.3	Hydratationsfortschritt auf struktureller Ebene .....	74
4.4	Zentrische Zugfestigkeit, Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul .....	75
4.4.1	Vorbemerkungen .....	75
4.4.2	Entwicklung der zentrischen Zugfestigkeit .....	76
4.4.3	Einfluß einer Vorbelastung auf die zentrische Zugfestigkeit .....	78
4.4.4	Entwicklung der Druckfestigkeit .....	79
4.4.5	Einfluß der Lagerungstemperatur auf Zug- und Druckfestigkeit .....	81
4.4.6	Einfluß von Zementgehalt und Verzögerer auf Zug- und Druckfestigkeit .....	84
4.4.7	Entwicklung des Zugelastizitätsmoduls .....	87
4.4.8	Entwicklung des Druckelastizitätsmoduls .....	89
4.5	Mechanische Eigenschaften beim Übergang vom flüssigen in den festen Zustand .....	90
4.6	Streuung der Werkstoffeigenschaften jungen Betons und Modellunschärfen deterministischer Werkstoffmodelle jungen Betons.....	93
4.6.1	Vorbemerkungen .....	93
4.6.2	Hydratationsgradiententwicklung unter statistischen Aspekten .....	94
4.6.2.1	Vorbemerkungen .....	94
4.6.2.2	Streuung der maximalen adiabatischen Temperaturerhöhung .....	95
4.6.2.3	Streuung des Hydratationsgrads bei Versuchswerten und berechneten Werten....	96
4.6.2.4	Vergleich von gemessenen und berechneten Hydratationsgraden.....	99
4.6.3	Streuung der zentrischen Zugfestigkeit und Druckfestigkeit.....	103
4.6.3.1	Streuung der Meßwerte .....	103
4.6.3.2	Vergleich von gemessenen und berechneten Festigkeiten .....	107
4.7	Zusammenfassung und Diskussion .....	109
5	<b>SPANNUNG-DEHNUNGSLINIE</b> .....	112
5.1	Vorbemerkungen .....	112
5.2	Versuchsergebnisse.....	112
5.3	Modellierung des Zugtragverhaltens von Beton .....	116
5.3.1	Vorbemerkungen .....	116
5.3.2	Modelle der Zugspannung-Dehnungslinie bis zum Erreichen der Zugfestigkeit (Pre-Peak Bereich) .....	116

5.3.3	Bruchmodelle .....	118
5.3.3.1	Allgemeines .....	118
5.3.3.2	Bruchmodell mit diskretem Riß .....	119
5.3.3.3	Bruchmodell mit Rißband .....	121
5.3.4	Modelle der Zugtragfähigkeit nach dem Überschreiten der Zugfestigkeit (Post-Peak Bereich) .....	122
5.4	Bruchmechanische Parameter .....	129
5.4.1	Zugbruchdehnung .....	129
5.4.2	Bruchenergie .....	131
5.4.3	Charakteristische Länge .....	133
5.4.4	Bewertung .....	134
5.5	Modifiziertes Modell zur Beschreibung des Zugverhaltens von Beton .....	136
5.5.1	Übersicht .....	136
5.5.2	Ansteigender Ast ( $\epsilon \leq \epsilon_{CU}$ ) .....	136
5.5.3	Abfallender Ast ( $\epsilon \geq \epsilon_{CU}$ ) .....	139
5.5.4	Ent- und Wiederbeanspruchung im Post-Peak-Bereich .....	144
5.5.4.1	Vorbemerkungen .....	144
5.5.4.2	Einfache empirische Ansätze .....	144
5.6	Zusammenfassung .....	146
6	<b>VISKOELASTISCHES VERHALTEN VON BETON</b> .....	148
6.1	Vorbemerkungen .....	148
6.2	Bisherige Erkenntnisse über das viskoelastische Verhalten von Beton .....	148
6.2.1	Physikalische Ursachen .....	148
6.2.2	Einflußparameter des viskoelastischen Verhaltens von Beton .....	149
6.2.3	Beschreibung von Kriechen und Relaxation bei einstufiger Einwirkung .....	150
6.2.4	Zeitfunktionen für das Kriechen .....	151
6.2.5	Kriechtheorien .....	154
6.2.6	Die Beschreibung des viskoelastischen Verhaltens von Beton mit rheologischen Modellen .....	157
6.2.6.1	Rheologische Grundkörper .....	157
6.2.6.2	Rheologische Modelle von Summen- und Produktansatz .....	163
6.2.7	Superposition .....	164
6.3	Zusammenhang zwischen Kriechen und Relaxation .....	166
6.3.1	Vorbemerkungen .....	166
6.3.2	Superpositionsprinzip .....	166
6.3.3	Ansatz nach Dischinger und Wittmann .....	167

6.3.4	Viskoelastizitätstheorie.....	169
6.3.5	Lösung nach Trost .....	170
6.3.6	Diskussion zur Ableitung von Relaxationsansätzen aus Kriechansätzen.....	170
6.4	Zusammenfassung .....	171
<b>7</b>	<b>KRIECHEN UND RELAXATION JUNGEN BETONS UNTER ZUGBEAN- SPRUCHUNG- EIGENE VERSUCHE UND MODELLBILDUNG .....</b>	<b>173</b>
7.1	Vorbemerkungen .....	173
7.2	Zug-Kriechen jungen Betons - Versuchsergebnisse und Modellierung .....	173
7.2.1	Kriechen bei isothermer Lagerung $T = 20\text{ °C}$ (basic creep).....	173
7.2.2	Streuung der Kriechfunktion.....	178
7.2.3	Vergleich von Kriechansätzen.....	179
7.2.4	Trocknungskriechen (drying creep) .....	181
7.3	Zug-Relaxation jungen Betons - Versuchsergebnisse und Modellierung.....	182
7.3.1	Relaxation bei isothermer Lagerung $T = 20\text{ °C}$ (basic relaxation).....	182
7.3.2	Vergleich verschiedener Relaxationsansätze mit Versuchsergebnissen .....	183
7.3.3	Bewertung der Relaxationsansätze.....	188
7.3.4	Beschreibung von Versuchsergebnissen mit einem einfachen Relaxationsansatz.....	189
7.4	Zugkriechen und Zugrelaxation beim HOZ- und GB-Beton .....	191
7.5	Temperatureinfluß auf das viskoelastische Verhalten jungen Betons .....	193
7.5.1	Vorbemerkungen .....	193
7.5.2	Temperatureinfluß auf das Zugkriechen .....	194
7.5.3	Temperatureinfluß auf die Zugrelaxation.....	195
7.5.4	Kriechansätze zur Berücksichtigung des Temperatureinflusses.....	197
7.5.5	Diskussion und Bewertung.....	201
7.6	Anwendung der Reaktionskinetik auf das viskoelastische Verhalten .....	203
7.7	Klärung der Anwendbarkeit des Boltzmann´schen Superpositionsprinzips.....	209
7.8	Viskoelastisches Verhalten jungen Betons im Post-Peak-Bereich .....	213
7.9	Zusammenfassung .....	219
<b>8</b>	<b>LASTUNABHÄNGIGE VERFORMUNG.....</b>	<b>222</b>
8.1	Vorbemerkungen .....	222
8.2	Schrumpfen und chemisches Schwinden.....	222
8.2.1	Bisherige Kenntnisse .....	222
8.2.2	Versuchsergebnisse zum chemischen Schwinden.....	224
8.2.3	Modellierung des chemischen Schwindens.....	225
8.3	Wärmedehnzahl.....	228

8.4	Zusammenfassung .....	230
9	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK</b> .....	231
10	<b>LITERATUR</b> .....	235
	<b>ANLAGEN</b>	