

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
1.1	Problembeschreibung und Zielsetzung	1
1.2	Gliederung der Arbeit	1
2	BISHERIGES VORGEHEN ZUR ERMITTLUNG UND VERMEIDUNG VON ZUGSPANNUNGEN WÄHREND DER HYDRATATION	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
3	DURCHFÜHRUNG UND MESSTECHNIK DER EIGENEN VERSUCHE	42
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
4	ERGEBNISSE UND MODELLIERUNG VON WÄRMEFREISETZUNG, ZENTRISCHER ZUGFESTIGKEIT, DRUCKFESTIGKEIT UND ELASTIZITÄTSMODUL... ..	62
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	SPANNUNG-DEHNUNGSLINIE	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	VISKOELASTISCHES VERHALTEN VON BETON	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
7	KRIECHEN UND RELAXATION JUNGEN BETONS UNTER ZUGBEAN- SPRUCHUNG- EIGENE VERSUCHE UND MODELLBILDUNG	173
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
8	LASTUNABHÄNGIGE VERFORMUNG.....	222
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	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	231
10	LITERATUR	235
	ANLAGEN	