

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Motivation .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Beton als Zahnradwerkstoff .....</b>	<b>3</b>
2.1	Stand der Forschung/Technik .....	3
2.1.1	Klassifizierung von Beton / Normative Regelung.....	3
2.1.2	Ultrahochleistungsbeton .....	4
2.1.3	Einsatz von Beton außerhalb des Bauwesens .....	4
2.1.4	Zahnräder .....	9
2.1.4.1	Zahnradarten und Zahnradgetriebe .....	9
2.1.4.2	Flankenprofile von Stirnrädern .....	10
2.1.4.3	Tragfähigkeit von geradverzahnten Stirnrädern .....	11
2.1.4.4	Fertigungsverfahren von Zahnrädern .....	18
2.2	Anforderungen an Zahnradwerkstoffe .....	18
2.3	Bewertung von Beton hinsichtlich der Eignung als Zahnradwerkstoff .....	21
2.3.1	Tragfähigkeit.....	21
2.3.2	Gewicht/Masse .....	22
2.3.3	Maßhaltigkeit .....	22
2.3.4	Homogenität und Luftporengehalt .....	25
2.3.5	Oberflächenbeschaffenheit .....	25
2.4	Fazit .....	26
<b>3</b>	<b>Voruntersuchungen zu UHPC/RPC .....</b>	<b>29</b>
3.1	Festlegung der Ausgangsmischungen für die Voruntersuchungen .....	29
3.2	Einfluss der thermischen Behandlung auf die Betonfestigkeiten.....	31
3.3	Einfluss unterschiedlicher Fasern auf die Betonfestigkeiten .....	32
3.4	Einfluss des Mischers auf die Betonfestigkeiten .....	37
3.5	Einfluss einer Vakuumbehandlung auf die Betonfestigkeiten.....	39
3.6	Fazit .....	41
<b>4</b>	<b>Entwicklung geeigneter Mischungszusammensetzungen .....</b>	<b>43</b>
4.1	Einfluss unterschiedlicher Zuschläge auf die Druck-, Biegezug- und Verschleißfestigkeit .....	43
4.2	Optimierung des entwickelten SiC-Betons/HPSICCs .....	46
4.3	Fazit .....	50

<b>5</b>	<b>Charakterisierung wichtiger Werkstoffkennwerte ausgewählter Mischungszusammensetzungen .....</b>	<b>51</b>
5.1	Festlegung der zu charakterisierenden Mischungszusammensetzungen .....	51
5.2	Versuchsübersicht .....	52
5.3	Mischungsherstellung .....	54
5.4	Frischbetoneigenschaften .....	55
5.4.1	Frischbetonrohddichte .....	55
5.4.2	Ausbreitmaß .....	55
5.4.3	Luftporengehalt .....	55
5.4.4	Frischbetontemperatur und Hydratationswärmeentwicklung .....	56
5.5	Festbetoneigenschaften .....	58
5.5.1	Festbetonrohddichte .....	58
5.5.2	Druckfestigkeit .....	59
5.5.3	Drucktragverhalten .....	61
5.5.4	Elastizitätsmodul .....	63
5.5.5	Dynamischer Elastizitätsmodul (Resonanzfrequenzmethode) .....	63
5.5.6	Biegezugfestigkeit .....	65
5.5.7	Zugfestigkeit, Zugtragverhalten und Zug-E-Modul .....	66
5.5.8	Spaltzugfestigkeit .....	70
5.5.9	Kleinlasthärte (Vickershärte) .....	70
5.5.10	Schwindmaß/Dimensionsstabilität .....	72
5.5.11	Wärmeausdehnung .....	76
5.5.12	Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität .....	78
5.5.13	Verschleißfestigkeit nach Böhme .....	79
5.5.14	Porengrößenverteilung und Porosität .....	81
5.5.15	Wassereindringversuche .....	84
5.5.16	Frost-Tausalz-Widerstand/CDF-Test .....	84
5.5.17	Schmierstoffbeständigkeit .....	89
5.5.18	Säurebeständigkeit .....	92
5.5.19	Dämpfung .....	94
5.6	Zusammenfassung und Fazit .....	96
<b>6</b>	<b>Entwicklung eines Herstellungsverfahrens für Zahnräder aus UHPC .....</b>	<b>99</b>
6.1	Herstellungsverfahren - Voruntersuchungen .....	99
6.1.1	Trennende Fertigung .....	99
6.1.2	Urformende Fertigung .....	101
6.1.3	Fazit .....	104

6.2	Form- und Schalungsbau .....	105
6.2.1	Welle-Nabe-Verbindung (WNV) .....	105
6.2.2	Berücksichtigung des Schwindens des Betons .....	107
6.2.3	Oberflächenrauheit .....	108
6.3	Prototypbau .....	113
6.4	Fazit .....	115
<b>7</b>	<b>Untersuchungen zur Zahnfußtragfähigkeit von Betonzahnradern .....</b>	<b>117</b>
7.1	Geeignete Zahnradgeometrie .....	117
7.2	Analytische Bestimmung der Zahnfuß-Nennspannung .....	119
7.3	Numerische Berechnung der Zahnfußspannung mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM) .....	123
7.4	Numerische Untersuchungen zur Zahnfußtragfähigkeit .....	126
7.5	Zahnrad-Demonstrator (Eigenentwicklung) .....	130
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>133</b>
8.1	Zusammenfassung .....	133
8.2	Ausblick .....	134
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>137</b>
<b>Anhang A – Stand der Forschung/Technik .....</b>		<b>153</b>
A.1	Klassifizierung von Beton .....	153
<b>Anhang B – Voruntersuchungen zu UHPC/RPC .....</b>		<b>155</b>
B.1	Festlegung der Ausgangsmischung für die Voruntersuchungen .....	155
B.2	Einfluss unterschiedlicher Fasern auf die Betonfestigkeiten .....	156
B.3	Einfluss des Mischers auf die Betonfestigkeiten .....	160
B.4	Einfluss einer Vakuumbehandlung auf die Betonfestigkeiten .....	160
<b>Anhang C – Entwicklung geeigneter Mischungszusammensetzungen .....</b>		<b>161</b>
C.1	Einfluss unterschiedlicher Zuschläge auf die Druck-, Biegezug- und Verschleißfestigkeit .....	161
C.2	Siliciumcarbid als Zuschlag für Beton .....	162
C.2.1	Herstellung und Aufbereitung .....	162
C.2.2	Materialeigenschaften und Verwendung .....	165
C.3	Optimierung des entwickelten SiC-Betons/HPSICCs .....	166
C.4	Weitere Optimierung des entwickelten SiC-Betons/HPSICC .....	168
C.5	Tabellen zu „Weitere Optimierung des entwickelten SiC-Betons/HPSICC“ .....	174

<b>Anhang D – Charakterisierung wichtiger Werkstoffkennwerte ausgewählter Mischungszusammensetzungen .....</b>	<b>178</b>
D.1 Mischungsherstellung .....	178
D.2 Übersicht über die Anzahl der Probekörper .....	178
D.3 Drucktragverhalten .....	180
D.4 Zugfestigkeit, Zugtragverhalten und Zug-E-Modul .....	182
D.5 Kleinlasthärte (Vickershärte) .....	184
D.6 Schwindmaß/Dimensionsstabilität .....	185
D.7 Verschleißfestigkeit nach Böhme .....	187
D.8 Frost-Tausalz-Widerstand/CDF-Test .....	188
D.9 Schmierstoffbeständigkeit .....	190
D.10 Säurebeständigkeit .....	190
D.11 Festigkeitsentwicklung .....	194
<b>Anhang E – Entwicklung eines Herstellungsverfahrens für Zahnräder aus UHPC .....</b>	<b>195</b>
E.1 Oberflächenrauheit .....	195
E.2 Prototypbau .....	195
<b>Anhang F – Untersuchungen zur Zahnfußtragfähigkeit von Betonzahnrädern</b>	<b>196</b>
F.1 Geeignete Zahnradgeometrie .....	196
F.2 Analytische Berechnung der Zahnfußspannung nach DIN 3990-3 [69] .....	198
F.3 Analytische Berechnung der Flankenpressung nach DIN 3990-2 [67] .....	203
F.4 Numerische Berechnung der Zahnfußspannung mittels der FEM .....	205
F.5 Numerische Untersuchungen zur Zahnfußtragfähigkeit .....	206
F.6 Zahnrad-Demonstrator (Eigenentwicklung) .....	208
<b>Anhang G – Aus dieser Arbeit hervorgegangene Thesen .....</b>	<b>209</b>