

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
1.1	Problem- und Zielstellung .....	2
1.2	Vorgehensweise .....	3
<b>2</b>	<b>Stand des Wissens</b>	<b>5</b>
2.1	Strain Hardening Cement-based Composite (SHCC) .....	6
2.1.1	Begriffserläuterung .....	6
2.1.2	Werkstoffspezifische Angaben .....	7
2.2	Dauerhaftigkeit von Reparaturschichten .....	9
2.2.1	Allgemeines .....	9
2.2.2	Dauerhaftigkeit von SHCC .....	10
2.2.3	Auswirkung von Rissen auf die Dauerhaftigkeit von Beton .....	12
2.3	Feuchtetransport in mineralischen Werkstoffen .....	14
2.3.1	Allgemeines zu Transportmechanismen .....	14
2.3.2	Permeabilität mineralischer Werkstoffe in gerissenem Zustand .....	14
2.3.3	Kapillare Wasseraufnahme mineralischer Werkstoffe in gerissenem Zustand .....	20
2.4	Zur Eignung von SHCC für die Sanierung gerissener Betonoberflächen (aus mechanischer Sicht) .....	24
2.4.1	Anforderungen durch gerissene Untergründe .....	24
2.4.2	Untersuchungen zur Rissüberbrückung .....	25
2.4.3	Anwendungsbeispiele .....	29
2.5	Eigenschaften des Verbundes zwischen SHCC und gerissenen Beton- bzw. Stahlbetonbauteilen .....	30
2.5.1	Allgemeines zum Verbund mineralischer Werkstoffe .....	30
2.5.2	Besonderheiten des Verbundverhaltens von SHCC und Beton .....	33
2.5.3	Schädigungsmechanismen in Verbundfugen .....	35
2.5.4	Experimentelle Erfassung der Verbundeigenschaften .....	37
2.5.5	Slant-Shear-Test .....	39
2.5.6	Verbunduntersuchungen an SHCC-Reparaturschichten .....	44
2.6	Bruchmechanische Modellierung von Verbundfugen .....	47
2.6.1	Wichtige Grundlagen zur Bruchmechanik zementgebundener Materialien .....	47
2.6.2	Modell des fiktiven Risses .....	50
2.6.3	Mixed mode Rissbildung .....	52
2.6.4	Zur Bruchmechanik von Verbundfugen .....	55
2.6.5	Dilatanz infolge Tangentialverschiebung in einer Verbundfläche .....	56
2.6.6	Verbundmodellierung für Fugen zwischen SHCC und Beton .....	64
2.7	Inverse Analyse zur Bestimmung bruchmechanischer Werkstoffkennwerte .....	68
2.7.1	Allgemeines .....	68

2.7.2	Prinzip der inversen Analyse mit Bezug auf bruchmechanische Werkstoffkennwerte .....	69
2.7.3	Optimierung eines Parametersatzes .....	70
2.7.4	Schlussfolgerungen zur inversen Analyse .....	71
2.8	Zusammenfassung und Forschungsbedarf .....	72
2.8.1	Zu dauerhaftigkeitsrelevanten Eigenschaften von Rissbildern .....	72
2.8.2	Experimentelle Verbunduntersuchungen .....	73
2.8.3	Numerische Verbunduntersuchung mittels inverser Analyse .....	74
<b>3</b>	<b>Methode zur Charakterisierung von Rissbildern</b> .....	<b>75</b>
3.1	Zur gewählten Vorgehensweise .....	75
3.2	Identifikation dauerhaftigkeitsrelevanter Charakteristika eines Rissbildes .....	76
3.3	Dokumentation einer Vielzahl von Rissen mit kleinen Rissabständen .....	77
3.3.1	Notwendige Vorarbeiten .....	78
3.3.2	Bildaufnahme .....	78
3.3.3	Bildauswertung .....	78
3.3.4	Einflussgrößen auf die Genauigkeit der Rissbilddokumentation .....	80
3.4	Rissbildcharakterisierung .....	81
3.4.1	Rissdichte .....	81
3.4.2	Rissbreitenverteilung .....	82
3.4.3	Rissabstandsverteilung .....	84
3.4.4	Risslängenverteilung .....	85
3.5	Zusammenfassung zur Rissbildcharakterisierung .....	85
<b>4</b>	<b>Untersuchungen zur Wasserdurchlässigkeit und zur kapillaren Wasseraufnahme</b> .....	<b>87</b>
4.1	Allgemeines zum Versuchsumfang und zur gewählten Vorgehensweise .....	87
4.1.1	Überblick zu den experimentellen Untersuchungen .....	87
4.1.2	Verwendete Materialien und Herstellungsprozess .....	87
4.1.3	Nachbehandlungskonzept .....	89
4.1.4	Erläuterungen zum Versuchsaufbau für die Untersuchungen zur Wasserdurchlässigkeit .....	91
4.1.5	Erläuterungen zum Versuchsaufbau für die kapillare Wasseraufnahme .....	93
4.2	Untersuchungen zur Wasserdurchlässigkeit von SHCC-Proben mit Trennrissen .....	94
4.2.1	Zielstellung und Versuchsumfang .....	94
4.2.2	Vorschädigung und Präparation der Probekörper .....	95
4.2.3	Versuchsdurchführung .....	96
4.2.4	Ergebnisse zur Durchflussmessung .....	97
4.2.5	Ergebnisse zur Rissbildcharakterisierung .....	99
4.2.6	Auswertung der Durchflussmessung auf der Basis der Rissbildcharakterisierung .....	100
4.2.7	Vergleich von theoretisch ermittelten und gemessenen Durchfluss .....	100
4.3	Untersuchungen zur Wasserdurchlässigkeit von mit SHCC sanierten und gerissenen Betonproben .....	103

4.3.1	Zielstellung und Versuchsumfang.....	103
4.3.2	Vorschädigung und Präparation der Probekörper .....	104
4.3.3	Ergebnisse zur Rissbildcharakterisierung .....	105
4.3.4	Versuchsdurchführung .....	107
4.3.5	Ergebnisse zur Durchflussmessung.....	107
4.3.6	Vergleich von theoretisch ermittelten und gemessenen Wasserdurchlässigkeiten .....	110
4.4	Kapillare Wasseraufnahme von SHCC.....	113
4.4.1	Zielstellung und Versuchsumfang.....	113
4.4.2	Versuchsaufbau und -ablauf.....	113
4.4.3	Ergebnisse zur kapillaren Wasseraufnahme an ungeschädigtem Material .....	114
4.4.4	Untersuchungen zur Porenstruktur von SHCC .....	118
4.5	Untersuchungen zur kapillaren Wasseraufnahme von SHCC-Proben in gerissenem Zustand .....	120
4.5.1	Zielstellung und Versuchsumfang.....	120
4.5.2	Ergebnisse zur Rissbildcharakterisierung .....	121
4.5.3	Ergebnisse zur kapillaren Wasseraufnahme an geschädigtem Material .....	122
4.6	Kapillare Wasseraufnahme dünner SHCC-Scheiben zur Abschätzung des Einflusses der Risszwischenräume .....	124
4.6.1	Zielstellung und Versuchsumfang.....	124
4.6.2	Ergebnisse zur kapillaren Wasseraufnahme von SHCC-Scheiben verschiedener Dicke.....	125
4.7	Kapillare Wasseraufnahme von SHCC-Bruchflächen .....	127
4.7.1	Zielstellung und Versuchsumfang.....	127
4.7.2	Ergebnisse zur kapillaren Wasseraufnahme unterschiedlicher Oberflächen .....	129
4.8	Modellbildung zur kapillaren Wasseraufnahme von geschädigtem SHCC .....	132
4.8.1	Modellvorstellung .....	132
4.8.2	Nachrechnung von Versuchsergebnissen.....	140
4.9	Zusammenfassung zur Permeabilität und kapillaren Wasseraufnahme von SHCC ...	142
<b>5</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen zum Verbundverhalten zwischen SHCC und Beton</b>	<b>147</b>
5.1	Allgemeines zum Versuchsumfang und zur gewählten Methodik .....	147
5.2	Kennwerte der verwendeten Materialien und der Verbundkörper.....	148
5.2.1	Entwicklung der Druckfestigkeit .....	148
5.2.2	Entwicklung des Elastizitätsmoduls.....	148
5.2.3	Bestimmung der Makrotexturtiefe der Verbundflächen .....	149
5.3	Zentrische Zugversuche .....	149
5.3.1	Zielstellung und Versuchsumfang.....	149
5.3.2	Versuchsaufbauten und Probenherstellung .....	150
5.3.3	Zentrische Zugversuche an ungekerbten SHCC-Proben.....	152
5.3.4	Zentrische Zugversuche an gekerbten SHCC-Proben.....	153
5.3.5	Zentrische Zugversuche an Verbundproben .....	157

5.4	Keilspaltversuche.....	158
5.4.1	Zielstellung und Versuchsumfang .....	158
5.4.2	Versuchsaufbau.....	160
5.4.3	Probekörperherstellung .....	160
5.4.4	Ergebnisse der Keilspaltversuche .....	161
5.4.5	Inverse Analyse zur Bestimmung der bruchmechanischen Materialparameter.....	162
5.5	Zug-Scherversuche (mixed mode).....	165
5.5.1	Zielstellung und Versuchsumfang .....	165
5.5.2	Versuchsaufbau.....	166
5.5.3	Probekörperherstellung .....	168
5.5.4	Versuchsergebnisse.....	168
5.6	Photogrammetrische Erfassung der in den Keilspaltversuchen erzeugten Bruchflächen .....	169
5.6.1	Zielstellung .....	169
5.6.2	Versuchsaufbau und Ablauf der photogrammetrischen Oberflächenanalyse.....	170
5.6.3	Auswertung der Oberflächenanalyse .....	171
5.7	Zusammenfassung zur experimentellen Untersuchung des bruchmechanischen Verhaltens von Verbundfugen zwischen SHCC und Beton.....	174
<b>6</b>	<b>Inverse Analyse zur Parameteridentifikation bezüglich des Verbundverhaltens zwischen SHCC und Beton</b>	<b>175</b>
6.1	Konzeptioneller Aufbau der inversen Analyse.....	175
6.2	Verbundmodell .....	176
6.2.1	Anforderungen an das Verbundmodell.....	176
6.2.2	Modellansatz.....	178
6.2.3	Schädigung durch Abnahme der Zugfestigkeit .....	182
6.2.4	Schädigung durch Abnahme der Schubfestigkeit .....	184
6.2.5	Kombination der Entfestigungseigenschaften und gegenseitige Beein- flussung im Schädigungsprozess unter mixed mode-Beanspruchung .....	185
6.2.6	Mechanisches Ersatzmodell für die Mesoebene.....	188
6.2.7	Berücksichtigung der Dilatanz.....	189
6.2.8	Modell zur Berechnung der Kontakt- und Reibspannungen .....	195
6.2.9	Verbundfugenbezogene Spannungen .....	197
6.2.10	Darstellung der Wirkungsweise des entwickelten Verbundmodells .....	198
6.3	Programmtechnische Umsetzung der inversen Analyse.....	199
6.3.1	Mechanisches Ersatzmodell.....	199
6.3.2	Fehlermaße zur Validierung der numerischen Lösung.....	201
6.3.3	Optimierung der Parametersätze.....	203
6.3.4	Programm zur inversen Analyse von Scherversuchen .....	204
6.4	Sensitivitätsanalyse .....	204
6.4.1	Allgemeines .....	204
6.4.2	Wichtung der Fehlerwerte .....	206

6.4.3	Reproduzierbarkeit und Eindeutigkeit der Ergebnisse.....	207
6.4.4	Einfluss der Netzfeinheit auf die Genauigkeit der Ergebnisse.....	209
6.4.5	Erforderliche Anzahl an Anpassungsschritten .....	211
6.4.6	Sensitivität gegenüber einzelnen Modellparametern .....	211
6.5	Inverse Analyse der Zug-Scherversuche.....	214
6.5.1	Methodische Vorgehensweise und Umfang der inversen Analysen.....	214
6.5.2	Auswertung der inversen Analysen .....	216
6.5.3	Auswertung für verschiedene Verbundwinkel.....	218
6.6	Zusammenfassung zur inversen Analyse von Zug-Scher-versuchen.....	220
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	<b>223</b>
7.1	Zusammenfassung .....	223
7.2	Anregungen für weiterführende Untersuchungen .....	224
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>225</b>
<b>A</b>	<b>Anlagen</b> .....	<b>239</b>
A.1	Anwendungsbeispiele für SHCC als Sanierungsmaterial .....	239
A.2	Ergänzende Informationen zum Stand der Technik.....	241
A.2.1	Verbunduntersuchungen SHCC / Beton .....	241
A.2.2	Entfestigungsfunktionen für Modell des fiktiven Risses .....	242
A.2.3	Dilatanzwirkung infolge Rissflankenverschiebungen.....	243
A.2.4	Model zur Rissverzahnung nach Nissen (1987) .....	244
A.3	Daten zur Rissbildcharakterisierung .....	245
A.3.1	Einfluss der Anzahl an Auswertelinien.....	245
A.3.2	Herleitung der Wichtungsfunktion für den CWV in Bezug auf die Wasserdurchlässigkeit .....	246
A.3.3	Ergebnisse zur Rissbreitenverteilung von Trennrissen .....	247
A.3.4	Ergebnisse zur Rissbreitenverteilung auf gerissenen Reparaturschichten .....	249
A.4	Daten zur Untersuchung des Feuchtetransports.....	250
A.4.1	Versuchsaufbau Wasserdurchlässigkeit .....	250
A.4.2	Verifizierung der Durchflussmengenermittlung .....	251
A.4.3	Ergebnisse zur hydraulischen Durchflussmessung an Trennrissen .....	252
A.4.4	Ergebnisse zur kapillaren Wasseraufnahme von Trennrissen in SHCC.....	253
A.4.5	Geschwindigkeit der kapillaren Wasseraufnahme .....	253
A.4.6	Ergebnisse zur kapillaren Wasseraufnahme von Oberflächen.....	254
A.4.7	Ergebnisse zur Modellierung der kapillaren Wasseraufnahme von SHCC mit Trennrissen .....	255
A.5	Daten zur Untersuchung des Verbundverhalten .....	256
A.5.1	Mischregime.....	256
A.5.2	Experimentelle Ergebnisse der zentrischen Zugversuche.....	256
A.5.3	Experimentelle Ergebnisse der Zug-Scherversuche.....	257
A.6	Daten zur inversen Analyse von Scherversuchen .....	262

A.6.1	Programm „ <i>Bondsoft</i> “ .....	262
A.6.2	Eingangsparameter für die einzelnen Untersuchung .....	263
A.6.3	Auswertung zur Wichtung der Fehlerwerte .....	264
A.6.4	Ergänzende Auswertung zur Reproduzierbarkeitsanalyse .....	266
A.6.5	Ergänzende Auswertungen zur Netzfeinheit sowie zur Anzahl der numerisch ermittelten Punkte .....	267
A.6.6	Ergänzende Auswertung bzgl. der Anzahl der Anpassungsschritte .....	269
A.6.7	Ergänzende Auswertung zum Gesamtfehler der durchgeführten inversen Analysen ..	271
A.6.8	Ergebnisse der inversen Analyse IA 1 .....	272
A.6.9	Ergebnisse der inversen Analyse IA 2 .....	272