

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Herausforderung	1
1.2. Zielsetzung	3
1.3. Abgrenzung	4
1.4. Aufbau der Arbeit	5
2. Stand des Wissens	7
2.1. Beschreibung des Ermüdungsprozesses	7
2.1.1. Ermüdungsprozess bei Stahl	7
2.1.2. Ermüdungsprozess bei Beton	10
2.1.2.1. Schädigungsphasen der Betonermüdung	11
2.1.2.2. Rissbildungsmechanismus	11
2.2. Beschreibung der Ermüdungsfestigkeit	13
2.2.1. Definition des Begriffs der Ermüdungsfestigkeit	13
2.2.2. Kenngrößen der Ermüdungsfestigkeit	14
2.2.3. Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit	16
2.2.3.1. Beschreibung des Einstufenversuchs	16
2.2.3.2. Beschreibung des Mehrstufenversuchs	18
2.2.3.3. Weitere Versuchsformen	19
2.2.3.4. Wesentliche Methoden zur Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit	20
2.2.3.5. Darstellung der Ermüdungsfestigkeit in Zeitfestigkeits-Schaubildern	24
2.2.3.6. Darstellung von Dauerfestigkeits-Schaubildern	27
2.2.4. Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit	27
2.2.4.1. Beton	27
2.2.4.2. Beton- und Spannstahl	30
2.2.4.3. Weitere Phänomene in Bezug auf die Materialermüdung	32
2.3. Normative Regelungen zur Ermüdungsfestigkeit	38
2.3.1. Nachweiskonzept im Spannbetonbau	38
2.3.1.1. Ermüdungsnachweise für Beton	39
2.3.1.2. Ermüdungsnachweis für Beton- und Spannstahl	40
2.3.1.3. Ermüdungswirksame Lasten	43
2.4. Bisherige experimentelle Untersuchungen zur Ermüdungsfestigkeit	43
2.4.1. Ermüdungsversuche am Betonstahl	43
2.4.2. Ermüdungsversuche am Spannstahl	43

2.4.3. Ermüdungsversuche an Spannbetonbauteilen	46
2.4.3.1. Versuche von MÜLLER (1985) [112]	46
2.4.3.2. Versuche von OERTLE ET AL. (1987) [121]	47
2.4.3.3. Versuche von WOLLMANN ET AL. (1988) [177]	49
2.4.3.4. Versuche von BÖKAMP (1990) [9]	50
2.4.3.5. Versuche von VOSS/FALKNER (1993) [166]	51
2.4.3.6. Versuche von ABEL (1996) [1]	52
2.4.3.7. Versuche von ESKOLA (1996) [46]	53
2.4.3.8. Versuche von HEGGER/NEUSER (1998) [66]	54
2.4.3.9. Versuche von REMITZ/EMPELMANN (2015) [135]	55
2.4.3.10. Versuche von HEEKE/MAURER (2016) [64]	56
3. Experimentelle Untersuchungen	59
3.1. Versuchsprogramm	59
3.1.1. Ermüdungsversuche an Spannbetonträgern	59
3.1.2. Versuche zur Verbundfestigkeit von Spannstahllitzen	63
3.2. Ermüdungsversuche an Spannbetonbalken	66
3.2.1. Beschreibung der Versuchskörper	66
3.2.2. Baustoffe	68
3.2.3. Herstellung der Versuchskörper	73
3.2.4. Beschreibung des Versuchsstandes	77
3.2.5. Verwendete Messtechnik	79
3.2.5.1. Messsensorik	79
3.2.5.2. Messwerterfassung	84
3.2.6. Versuchsablauf	86
3.2.7. Wahl des Belastungsniveaus	88
3.2.8. Ermittlung der Vorspannkraft zum Versuchsstart	91
3.2.9. Darstellung der Versuchsergebnisse	93
3.2.9.1. Lage der Spanndrahtbrüche	93
3.2.9.2. Bruchzeitpunkte der Spannstahldrähte	96
3.2.9.3. Bruchzeitpunkte der Betonstähle	96
3.2.9.4. Verformungsverhalten der Dauerschwingversuche	99
3.2.9.5. Zyklische Steifigkeit	101
3.2.9.6. Betonstahlspannungen	102
3.3. Versuche zum Verbundverhalten von Spannstahllitzen	111
3.3.1. Beschreibung der Versuchskörper	111
3.3.2. Baustoffe	113
3.3.3. Versuchseinrichtung	114
3.3.4. Messtechnik	116
3.3.5. Versuchsablauf	117
3.3.6. Darstellung der Versuchsergebnisse	118
3.4. Erweiterte Materialprüfungen	121
3.4.1. Ermüdungsfestigkeit der Spannstahllitzen	121

3.4.2. Ermüdungsfestigkeit der Betonstähle	123
3.4.3. Einfluss einer zyklischen Vorbelastung auf die Spannungs-Dehnungs-Beziehung des Betonstahls	124
4. Versuchsauswertung	127
4.1. Ermüdungsversuche an Spannbetonträgern	127
4.1.1. Versuche ohne gemischte Bewehrung	127
4.1.1.1. Nachweis einer Dauerschwingfestigkeit	127
4.1.1.2. Vergleich der Bruchzeitpunkte mit den Wöhlerkurven der DIN EN 1992-2/NA128	
4.1.1.3. Definition von Versagenskriterien	132
4.1.1.4. Vorschlag zur Anpassung der Ermüdungsfestigkeitskurve	138
4.1.1.5. Darstellung der relativen Versuchsverläufe	139
4.1.1.6. Einfluss der Umlenkpressung und des Stapelfaktors	140
4.1.2. Versuche mit gemischter Bewehrung	147
4.1.2.1. Bestimmung des Beanspruchungsniveaus im Spannglied	147
4.1.2.2. Einfluss der Verbundsteifigkeit auf die Spannungsverteilung bei gemischter Bewehrung	149
4.1.2.3. Rechnerische Ermittlung des Verhältniswertes ξ für die unterschiedlichen Verbundsteifigkeiten	155
4.1.2.4. Messwertgestützte Ermittlung des Verhältniswertes der unterschiedlichen Verbundsteifigkeiten	158
4.1.2.5. Einfluss aus dem Verhältnis Betonstahlfläche zur Spannstahlfläche	160
4.1.2.6. Genauere Betrachtung der Spannungsverläufe bei den Versuchen GB06 und GB07	167
4.2. Verbundversuche	170
4.2.1. Bestimmung des Verbundumfangs	170
4.2.2. Bestimmung der Verbundschubspannungen	174
4.2.3. Bestimmung der Verbundmodelle der untersuchten Spannstahllitzen	177
4.2.4. Kenngröße zur Beschreibung der Verbundspannung	180
4.2.5. Bestimmung des Verhältniswertes ξ auf Grundlage der eigenen Verbundversuche .	182
4.2.5.1. Verbundfestigkeitskennwert für Betonstahl	182
4.2.5.2. Ermittlung von ξ auf Grundlage verschiedener Verbundmodelle	184
4.2.5.3. Vergleich der rechnerischen und versuchsbasiert ermittelten Verhältniswerte ξ	186
4.2.6. Vorschlag eines Verbundmodells bei gemischter Bewehrung	188
5. Simulation	193
5.1. Vorbemerkungen zu Simulationen bei Spannbetonbauteilen unter ermüdungswirksamen Beanspruchungen	193
5.2. Simulation der Kontaktpressungen im Spannglied	194
5.2.1. Beschreibung des Problems	194
5.2.2. Anwendung der Finite-Element-Methode (FEM)	195
5.2.3. Bereits durchgeführte Simulationsrechnungen	196

5.2.4. Beschreibung des Rechenmodells	197
5.2.4.1. Verwendete Software	197
5.2.4.2. Werkstoffeigenschaften	197
5.2.4.3. Spanngliedgeometrie	198
5.2.4.4. Hüllrohrgeometrie	199
5.2.4.5. Modellbildung und Vernetzung	200
5.2.4.6. Randbedingungen	201
5.2.4.7. Kontaktflächen	201
5.2.4.8. Lastaufbringung	202
5.2.4.9. Litzenanordnung	203
5.2.5. Submodell zur Untersuchung einer adaptiven Vernetzung	204
5.2.5.1. Hintergrund für Anwendung des Submodells	204
5.2.5.2. Analytische Lösung für Hertzsche Pressungen	204
5.2.5.3. Berechnungen am Submodell	208
5.2.5.4. Fazit aus der Berechnung am Submodell	210
5.2.6. Simulationsberechnungen an einer Einzellitze	211
5.2.6.1. Übersicht der verschiedenen Simulationsmodelle	211
5.2.6.2. Aufbringen der Beanspruchung	212
5.2.6.3. Beanspruchungen zwischen den einzelnen Spanndrähten	213
5.2.6.4. Lage der Kontaktstellen zwischen Litze und Hüllrohr	213
5.2.6.5. Übertragene Umlenkkräfte zwischen Litze und Hüllrohr	215
5.2.6.6. Berechnung der Kontaktpressungen	216
5.2.6.7. Geometrischer Erhöhungsfaktor für die Einzellitze	217
5.2.7. Simulationsrechnungen an Litzenbündeln	217
5.2.7.1. Übersicht der Simulationsmodelle	217
5.2.7.2. Kontaktstellen zwischen den einzelnen Litzen und zum Hüllrohr	219
5.2.7.3. Bestimmung der Rippenkräfte	219
5.3. Folgerungen aus den Simulationsergebnissen	221
5.3.1. Bestimmung eines geometrischen Erhöhungs- bzw. Stapelfaktors	221
5.3.2. Ausblick	223
6. Diskussion	225
6.1. Vorbemerkungen	225
6.2. Modifikation der Ermüdungsfestigkeitskurve	225
6.2.1. Auswirkungen auf die Ermüdungsnachweise	226
6.2.2. Beschreibung des Nachweisverfahrens als Betriebsfestigkeitsnachweis mit dem ELM4227	
6.2.3. Kurzvorstellung der Beispielbauwerke	229
6.2.4. Bestimmung der rechnerischen Restnutzungsdauer	232
6.2.4.1. Beispiel 1: BW179	232
6.2.4.2. Beispiel 2: BW882	234
6.2.5. Beurteilung der rechnerischen Restlebensdauer nach ELM4	235
6.3. Durchführung eines Rissmonitorings an einem Brückenbauwerk	237
6.3.1. Ausgangslage	237

6.3.2. Beschreibung des Brückenmonitorings	237
6.3.3. Zu erwartende Rissbreitenänderung infolge Spanndrahtausfall	238
6.3.4. Darstellung ausgewählter Messwerte aus dem Monitoring	242
6.3.5. Kritische Bewertung des Rissmonitorings	244
6.4. Beurteilung der tatsächlichen Umlenkräfte an Brückenbauwerken	246
6.5. Anwendung des geometrische Erhöhungsfaktors	249
6.5.1. Anpassung der Grenzwerte in den Zulassungen	251
6.5.2. Optimierung der Spannglied- bzw. Hüllrohrgeometrie	252
6.6. Vorschlag eines modifizierten ξ -Wertes	253
6.7. Bestimmung der Bewehrungsverhältnisse A_s/A_p an ausgeführten Brückenbauwerken	257
6.8. Weitere Aspekte zur Beurteilung des Ermüdungsnachweises nach aktuellem Stand der Normung	259
7. Zusammenfassung und Ausblick	263
7.1. Zusammenfassung	263
7.2. Ausblick und Forschungsbedarf	268
A. Experimentelle Untersuchungen	A-1
A.1. Materialeigenschaften	A-1
A.2. Ergebnisse aus den Ermüdungsversuchen an Spannbetonträgern	A-5
A.2.1. Anfahren der Oberlast zur Bestimmung der wirksamen Vorspannkraft	A-5
A.2.2. Darstellung der einzelnen Versuchsergebnisse	A-8
A.3. Ergebnisse aus Verbundversuchen	A-39
A.4. Ergebnisse aus erweiterter Materialprüfung	A-47
B. Versuchsdatenbank	B-1
B.1. Ermüdungsversuche an Spannbetonbauteilen	B-1
B.2. Versuche zur Bestimmung der Spannungsumlagerung bei gemischter Bewehrung	B-7
B.3. Verbundversuche an Spannstahlitzen anderer Autoren	B-9
C. FEM-Berechnungen	C-1
C.1. Linear-elastischen Betonlängsspannungen der Versuchsreihe GB	C-1
C.2. Simulationsrechnungen Litzenbündel	C-3
D. Weitergehende Untersuchungen zur Versuchsreihe GB	D-1