

Stefan Röhling | Heinz Meichsner

RISSBILDUNGEN im Stahlbetonbau

Ursachen – Auswirkungen – Maßnahmen

Fraunhofer IRB  Verlag

Stefan Röhling | Heinz Meichsner
Rissbildungen im Stahlbetonbau

Stefan Röhling | Heinz Meichsner

RISSBILDUNGEN im Stahlbetonbau

Ursachen – Auswirkungen – Maßnahmen

Fraunhofer IRB Verlag

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über www.dnb.de abrufbar.

ISBN (Print): 978-3-8167-9645-9

ISBN (E-Book): 978-3-8167-9646-6

Lektorat: Thomas Altmann

Herstellung: Angelika Schmid

Layout: Fraunhofer IRB Verlag

Umschlaggestaltung: Martin Kjer

Satz: Mediendesign Späth GmbH, Birenbach

Druck: Westermann Druck Zwickau GmbH, Zwickau

Die hier zitierten Normen sind mit Erlaubnis des DIN Deutsches Institut für Normung e.V. wiedergegeben. Maßgebend für das Anwenden einer Norm ist deren Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die bei der Beuth Verlag GmbH, Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin, erhältlich ist.

Alle Rechte vorbehalten.

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Fraunhofer IRB Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert werden, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

© Fraunhofer IRB Verlag, 2018

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB

Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Telefon +49 7 11 9 70-2500

Telefax +49 7 11 9 70-2508

irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

Vorwort

Risse sind im Stahlbetonbau wenig erwünschte, aber kaum vermeidbare Erscheinungen, die praktisch in jedem Stahlbetonbauwerk zu finden sind. Aufgrund dieser sehr frühzeitig bekannten Tatsache ging bereits der erste Bemessungsansatz für Stahlbetondecken von Matthias Koenen aus dem Jahr 1886 von einer gerissenen Zugzone aus. Diese Annahme bildet auch in den modernen Bemessungsansätzen die Grundlage. Neben dem Einfluss der Rissbildung auf die Tragfähigkeit sind heute auch die Auswirkungen auf die Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit von herausragender Bedeutung. Um diese Zielstellungen zuverlässig zu erreichen, sind in den vergangenen Jahrzehnten vielfältige und umfangreiche Forschungsarbeiten durchgeführt worden. Dabei sind viele Erkenntnisse über die Entstehung, die Vermeidung und die Begrenzung der Rissbildungen gewonnen worden. Obwohl dadurch umfangreiche Kenntnisse über den Umgang mit Rissen vorliegen, sind noch viele Fragen offen geblieben.

Der aktuelle Wissensstand über die Ursachen der Rissbildung, die Berechnung der Rissbreiten sowie die Dimensionierung und Konstruktion einer zweckmäßigen Bewehrung zur Einhaltung bestimmter Rissbreiten ist inzwischen recht umfangreich geworden und beinhaltet nicht nur übereinstimmende Meinungen. In der Praxis können sich diese Differenzen in den Auffassungen nachteilig auswirken. Nicht zuletzt entstehen gelegentliche Interpretationen des Normtextes und auch Literaturstellen die tatsächlichen Sachverhalte und Zusammenhänge. Auf kaum einem vergleichbaren speziellen Gebiet des Stahlbetonbaus ist die Fehlinterpretation und unterschiedliche Ausdeutung der Normen so verbreitet wie bei den Rissen. Das betrifft auch die Berechnung von Rissbreiten, deren Ergebnisse zwar ausdrücklich als Rechenwerte bezeichnet werden und keinen Anspruch auf genaue Übereinstimmung mit realen Rissen erheben, aber oft Vertragsgrundlage und Abnahmekriterium bilden. Ausgerechnet zum praktischen Umgang mit Rissen und der Messung der Rissbreiten gibt es keinerlei Normung. Dieser Zustand verleitet den Praktiker dazu, unter Bezug auf die in Normen enthaltenen Festlegungen unzulässige Bezüge auf praktisch gemessene Rissbreiten herzustellen und manchmal sogar bis in den Gerichtssaal zu tragen. Hinweise im vorliegenden Buch für zweckmäßige Verhaltensweisen in solchen Situationen sollen diesen unbefriedigenden Zustand etwas mildern.

Für die rechnerische Ermittlung der notwendigen Bewehrung zur Beschränkung der Rissbreite bzw. zum Nachweis der Einhaltung eines vorgegebenen Rechenwertes der Rissbreite wurden theoretisch begründete und experimentell nachgewiesene

Zusammenhänge über den Mechanismus der Rissbildung mathematisch formuliert und in Gleichungen für die praktische Handhabung in der Tragwerksplanung zur Verfügung gestellt. Die Kompliziertheit der Zusammenhänge, die erforderlichen Vereinfachungen und die Streuungen der Eingabewerte führen dazu, dass die rechnerisch ermittelten Rissbreiten nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit der Realität entsprechen. Eine Auffassung, dass die angewandte Methodik eine hinreichend zuverlässige Ermittlung der Rissbreiten bzw. der rissbreitenbeschränkenden Bewehrung erlauben würde, ist durch die praktische Erfahrung nicht bestätigt. Auch die aktuell verbindliche Fassung der DIN EN 1992-1-1 mit dem nationalen Anhang bedeutet keine Verbesserung, sondern schreibt die Modellgenauigkeiten fort. Die einzuhaltenden Rissbreiten haben damit lediglich den Charakter einer Orientierung, um eine sinnvolle Bewehrung festlegen zu können. Eine Verringerung der rechnerischen Rissbreiten kann nur als eine Vergrößerung der Sicherheit gegen unverträgliche Rissbildungen verstanden werden, eine zuverlässige Begrenzung sämtlicher am Bauwerk auftretenden Rissbreiten ist nicht zu erwarten. Hinlänglich ist bekannt, dass die Eintreffenswahrscheinlichkeit vor allem bei kleineren Rissbreiten in der Größenordnung von etwa 75 % liegt. Bei unzureichender Möglichkeit der Vorhersage sich einstellender Rissbreiten bleibt die verbindliche Einhaltung der normativen Grenzwerte eine unsichere Angelegenheit, die zu verschiedenen Konsequenzen führen kann, wie beispielsweise zu zusätzlichen Aufwendungen für das Füllen von Rissen, juristischen Auseinandersetzungen zwischen Auftraggebern und bauausführenden Unternehmen, einem größerem Bewehrungsstahlbedarf oder eben fehlender Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit.

Weder der Begriff der »Rissbreite« noch der des »Rechenwertes der Rissbreite« ist so definiert, dass er am Bauwerk nachgemessen werden könnte. Dazu kommt eine Unschärfe bei der messtechnischen Feststellung von Rissbreiten, die durch die Wahl des Messverfahrens bedingt ist. Am gleichen Riss misst man mit einer optischen Messung (Rissmesslupe, Vergleichsmaßstab) die etwas kleinere Rissbreite sowie mit einer Wegmessung (induktive Wegaufnehmer, Setzdehnungsmesser) die etwas größere Rissuferverschiebung. Ein Vergleich von zwei unterschiedlichen Messwerten mit nur einem Rechenwert führt zu einem Konflikt, der bisher in der Literatur wenig Beachtung gefunden hat.

Seit Jahrzehnten werden wissenschaftliche Untersuchungen durchgeführt, um dieses grundsätzliche Problem zu lösen. Eine Verfeinerung der Berechnungsansätze auf der Grundlage des normgemäß verbindlichen Modells hat sich nicht als zielführend erwiesen. Als maßgebende Schwierigkeit bleibt weiterhin bestehen, dass im gegenwärtigen Normenwerk eine sehr wesentliche Eingangsgröße die Risskraft darstellt, die durch die Bewehrung aufgenommen werden muss und vom Risszeitpunkt und der vorhandenen Betonzugfestigkeit abhängt. Eine begründete Annahme für diese Rechengröße ist ohne Kenntnis der Entwicklung der Zwangsspannungen im Bauteil aber eigentlich nicht zu treffen. Der Übergang von der risskraftbasierten Vorgehensweise zur verformungskonsistenten Betrachtung erscheint als neuer, aussichtsreicher Weg, um die Ursachen der Rissbildung durch zwangbedingte Verformungen und die Wirkung der Bewehrung so zu verknüpfen, dass eine bessere Gewähr der Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit erreicht wird. Diese zwischenzeitlichen Forschungsarbeiten zur Anhebung des Sicherheitsniveaus in der rechnerischen Vorhersage der Rissbreiten haben im nationalen

Anhang zur Norm noch keine entsprechende Berücksichtigung gefunden. Aufrechterhalten bleiben jedoch auch bei diesem Ansatz die Notwendigkeit der Kenntnis der Zwangverformungen und die Schwierigkeiten bei deren Ermittlung.

Bei der ursachenbezogenen Betrachtung der Rissbildung kann zwischen frühem und spätem Zwang unterschieden werden. Bei der frühzeitigen Zwangeinwirkung sind hauptsächlich hydratationsbedingte Faktoren zu berücksichtigen (Wärmeentwicklung, autogenes und chemisches Schwinden), die Vorgänge im späteren Alter werden vor allem durch das Trocknungsschwinden und meteorologisch bedingte Verformungen (Jahresgang der Lufttemperatur) bestimmt. Während bei Lastbeanspruchungen die Kräfte zuverlässig bestimmt werden können, liegen die Verhältnisse bei den Zwangbeanspruchungen völlig anders. Die verschiedenen Beanspruchungen entwickeln sich in den Bauteilen entsprechend abweichender Form und Größe unterschiedlich und ebenso wie die Festigkeitseigenschaften des Betons über einen gewissen Zeitraum hinweg, sodass die rechnerische Erfassung einer risskritischen Situation oder der Zwangverformungen nach dem Temperatureausgleichsvorgang ebenfalls mit größeren Unsicherheiten verbunden ist. Trotz dieser Einschränkungen eröffnet die Berechnung der Zwangverformungen die Möglichkeit der Einschätzung, ob überhaupt mit Rissen gerechnet werden muss und in welchem Maße betontechnologische Gegenmaßnahmen wirkungsvoll sind.

Die Autoren bedanken sich bei allen, die zum Gelingen des Buches beigetragen haben. Der besondere Dank gilt dem Fraunhofer IRB Verlag für die gute Zusammenarbeit. Der Verlag hat sich der Thematik, die Ursachen und Folgen der Rissbildung in Stahlbetonkonstruktionen umfassend darzustellen, mit großer Aufmerksamkeit zugewandt. Die Vorschläge der Autoren zur bildlichen und textlichen Erläuterung der Sachverhalte wurden aufgegriffen und bei der Gestaltung des Buches sehr anerkennenswert umgesetzt. Unser besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Thomas Altmann und seinen Mitarbeitern aus dem Fraunhofer IRB Verlag für die gewohnt angenehme Zusammenarbeit und das daraus entstandene, vorliegende sehr ansprechende Ergebnis als Fachbuch.

Es wäre eine Anerkennung für die Bemühungen des Verlages und der Autoren, wenn durch die Veröffentlichung die Diskussion zu den aufgeworfenen Fragen angeregt und die Vorschläge zur Beherrschung der Rissproblematik Eingang in die Planung und die Bauausführung finden würden.

Dezember 2017

Die Autoren

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Rissbildungen als Bestandteil der Stahlbetonbauweise – Zum Anliegen des Buches –	17
2 Frühe Verformungen und Rissbildungen im plastischen Beton.	23
2.1 Sedimentation und Bluten des Frischbetons, Entstehen von Setzungsrisse.	23
2.2 Plastisches Schwinden und die Entstehung von Frühschwindrisse.	25
2.3 Freigesetzte Blutwassermenge.	26
2.4 Beginn und Dauer der frühen Rissbildungsperiode.	27
2.5 Charakteristische Frühschwindrissbildungen.	28
2.6 Betontechnologische Planung und Bauausführung Beispiel: Herstellung eines ausgedehnten Parkdecks	29
2.6.1 Bauaufgabe und Bauablauf.	30
2.6.2 Abschätzung einer risskritischen Situation.	30
2.6.3 Konzept der Nachbehandlung.	32
2.6.4 Messtechnische Verfolgung der Kapillardruckentwicklung.	33
2.7 Auswirkungen der Frühschwindrissbildung.	35
3 Verformungen und Zwangspannungen in Beton- und Stahlbetonbauteilen.	37
4 Lastunabhängige Verformungen der Beton- und Stahlbetonbauteile.	47
4.1 Auswirkungen der Temperatur im Bauteil.	47
4.1.1 Wärmefreisetzung durch Hydratation des Zements.	48
4.1.2 Temperaturentwicklung im erhärtenden Bauteil.	52
4.1.3 Zwangspannungswirksame Temperaturdifferenz im Bauteil.	55
4.1.4 Temperaturdifferenzen im erhärtenden Bauteilquerschnitt.	58
4.1.5 Witterungsbedingte Temperatureinwirkungen.	60
4.1.6 Temperaturbedingte Verformungen.	65
4.1.7 Überlagerung früher und späterer temperaturbedingter Dehnungen.	67
4.1.8 Überlagerung von temperaturbedingten und Schwinddehnungen.	67

4.2	Einfluss der Temperatur auf die zeitliche Entwicklung der Eigenschaften	68
4.2.1	Grundlagen der Methode des äquivalenten Alters	68
4.2.2	Ermittlung der äquivalenten Erhärtungszeit	69
4.2.3	Bestimmung des Geschwindigkeitsfaktors $k(T)$	71
4.2.4	Anwendungsbereich des Reifekonzepts	72
4.3	Verformungen infolge von Schwinden des Betons	73
4.3.1	Chemisches Schwinden	74
4.3.2	Autogene Schwinddehnung.	75
4.3.3	Trocknungsschwinden	79
4.3.4	Überlagerung und Auswirkungen der Schwindvorgänge.	82
4.3.5	Einfluss schwindreduzierender Zusatzmittel	83
5	Verformungs- und Festigkeitsverhalten des Betons	85
5.1	Festigkeitseigenschaften des Betons	86
5.2	Zugfestigkeit des Betons	88
5.2.1	Kenngößen der Zugfestigkeit	89
5.2.2	Beziehung zwischen Zugfestigkeit und Normdruckfestigkeit.	90
5.2.3	Zugfestigkeit im Bauteil.	92
5.2.4	Zeitabhängige Entwicklung der Zugfestigkeit.	93
5.2.5	Wirkung der Temperatur auf die Zugfestigkeit	96
5.2.6	Wirksame Zugfestigkeit und Mindestbewehrung	97
5.2.7	Festigkeitseigenschaften in Abhängigkeit vom Hydratationsgrad.	98
5.3	Einschätzung des Zustands der Festigkeitsbildung im erhärtenden Bauteil	100
5.4	Spannungs-Dehnungs-Beziehungen und Elastizitätsmodul.	103
5.4.1	Spannungs-Dehnungs-Beziehungen	103
5.4.2	Elastizitätsmodul.	105
5.5	Zugbruchdehnung des Betons	108
5.6	Querdehnung	111
5.7	Relaxation als zwangabbauender Vorgang.	111
5.7.1	Relaxationskoeffizienten aus Kriechbeiwerten	112
5.7.2	Relaxationsverhalten des erhärtenden Betons	113
5.7.3	Einfluss der Relaxation auf die Zwangspannungen im jungen Beton.	116
5.7.4	Relaxation bei veränderlicher Spannung während der Erhärtung	117
5.7.5	Relaxation des erhärteten Betons	119
6	Verformungsbehinderung und Rissbildung in Bauteilen	121
6.1	Arten der Verformungsbehinderung.	123
6.2	Definition des Behinderungsgrads	124
6.2.1	Dehnbehinderung	124
6.2.2	Krümmungsbehinderung.	126
6.3	Bauteiltypische Verformungsbehinderungen und Risiko von Rissbildungen	127
6.4	Behinderungen und Zwangspannungen in Deckenkonstruktionen	128
6.5	Wandkonstruktionen.	131
6.5.1	Äußere und innere Behinderung der Wandscheibe	133
6.5.2	Zwangkräfte und Rissbild	137

6.5.3	Bereich maximaler Rissbreite und Anordnung der rissbreitenbegrenzenden Bewehrung über die Wandhöhe	139
6.5.4	Berücksichtigung des äußeren Bauteilzwangs in den Regelwerken	141
6.5.5	Biegebeanspruchung von Wänden	143
6.5.6	Behälterbauwerke	143
6.6	Boden- und Sohlplatten	147
6.6.1	Einflüsse auf die Zwangbeanspruchung	148
6.6.2	Horizontale Zwangkräfte in den Bodenplatten bei Reibungsbehinderung	150
6.6.3	Bodenplatten bei elastischer Festhaltung durch den Untergrund	153
6.6.4	Zwangbeanspruchungen an Arbeitsfugen	155
6.6.5	Biegebehinderte Sohlplatten	156
6.6.6	Zeitlicher Verlauf der Schnittgrößen in den Bodenplatten	157
6.6.7	Rissbildungen in den Bodenplatten	158
6.6.8	Zwangspannungen bei Aufbetonen	159
6.7	Wände und Decken mit Öffnungen und Einsprünge	160
6.8	Verbindung von Bauteilen aus Alt- und Neubeton an Arbeitsfugen	162
6.9	Zwangspannungen aus innerer Behinderung im Bauteil (Eigenspannungen)	163
6.10	Spannungssituation im Bauteil infolge innerer Behinderung der Schwinddehnung	170
6.11	Rissbreitenveränderungen infolge Temperatur und Schwinden	172
7	Zwangspannungen und Rissbildungen bei Bauwerken mit erhöhten Anforderungen	179
7.1	Wasserundurchlässige Konstruktionen	180
7.1.1	Beanspruchungs- und Nutzungsklassen	181
7.1.2	Entwurfsgrundsatz a) Vermeidung von Trennrissen	183
7.1.3	Entwurfsgrundsatz b) Regelkonforme Begrenzung der Trennrissbreiten	184
7.1.4	Entwurfsgrundsatz c) Zulässigkeit der Trennrisse und nachträgliche Dichtmaßnahmen	185
7.1.5	Technische Nutzung der Selbstheilung bei Entwurfsgrundsatz b)	186
7.1.6	Nachweise und Maßnahmen zur Gewährleistung der Wasserundurchlässigkeit	187
7.2	Flüssigkeitsdichte Bauwerke	188
7.2.1	Grundlagen der Planung und Bemessung	189
7.2.2	Vereinfachter Nachweis der Dichtigkeit	189
7.2.3	Genauere Nachweise der Dichtigkeit	190
7.2.4	Dichtigkeit befahrener und korrosionsgefährdeter Bauwerksteile	196
7.3	Massenbetonbauwerke und massive Bauteile	197
7.4	Fugenlose und fugenreduzierte Baukonstruktionen	202
7.5	Verbundkonstruktionen: Elementdecken und -wände	204
7.6	Beispiele für Rissbildungen infolge besonderer Zwangssituationen	207
7.6.1	Zwischendecke in einer Tiefgarage mit dreieckförmigem Grundriss	207
7.6.2	Parkdeck mit Elementdecken und mit großen Bauteilabmessungen	210
7.6.3	Gärfuttersilo in der Landwirtschaft – später Zwang infolge von Prozesswärme	212
7.6.4	Horizontale Biegerisse in einem kreiszylindrischen Behälter mit heißem Füllgut	214
7.6.5	Vertikale Trennrisse in der Wandkrone eines offenen, kreiszylindrischen Wasserbehälters	215

7.6.6	Deckenrisse unterhalb von rohrförmigen Querschnittsschwächungen für die Belüftung	216
7.6.7	Biegerisse in den Stegen von TT-Platten, die als Wand und Stütze benutzt werden	218
7.6.8	Trennrisse in den Kappen einer Straßenbrücke als Wasserspeicher und Verursacher von Undichtigkeiten	220
8	Maßnahmen zur Verminderung von Zwangspannungen	223
8.1	Steuerung der Temperaturverhältnisse im Bauteil	224
8.2	Optimierung der Betonzusammensetzung	229
8.3	Konstruktive und betontechnologische Maßnahmen zur Verminderung der Behinderung der erhärtenden Betonbauteile	231
9	Ermittlung von Zwangspannungen und Beurteilung der Rissgefahr	235
9.1	Experimentelle Bestimmung der Zwangverformungen und Zwangspannungen	235
9.1.1	Messung der Zwangspannungen im Labor	236
9.1.1.1	Prüfeinrichtungen	236
9.1.1.2	Ergebnisse der Untersuchungen an Prüfkörpern im Labor	237
9.1.2	Messung der Verformungen und Zwangspannungen während der Baudurchführung	240
9.2	Berechnung der Zwangspannungen in Betonbauteilen	243
9.3	Besonderheiten bei der Ermittlung der Schwindspannungen	251
9.4	Abschätzung einer risskritischen Situation, Risskriterien und Rissicherheit	254
9.4.1	Deterministische Nachweisführung	254
9.4.1.1	Spannungs- und dehnungsbezogene Risskriterien	255
9.4.1.2	Kritische Temperaturdifferenzen	256
9.4.2	Probabilistisches Nachweiskonzept	260
9.4.3	Monte-Carlo-Simulation	266
10	Begrenzung der Rissbreiten durch Bewehrung	267
10.1	Normative rechnerische Rissbreiten	268
10.2	Vorgänge bei der Rissbildung im Stahlbetonbauteil	270
10.3	Konzept der Rissbreitenbegrenzung	275
10.4	Maßgebende Faktoren der Nachweise zur Rissbreitenbegrenzung	278
10.4.1	Zulässige Stahlspannungen	279
10.4.2	Betonzugfestigkeit nach normgemäßer Erhärtung	279
10.4.3	Wirksame Zugfestigkeit zum Risszeitpunkt ($f_{ct,eff}$)	280
10.4.4	Eigenspannungen und Vorschädigung der Betonzugzone (Faktor k)	283
10.4.5	Wirkungsbereich der Bewehrung ($A_{c,eff}$)	285
10.4.6	Wirkung der Dauer der Zwangbeanspruchung (Faktor k_t)	287
10.4.7	Einfluss der Spannungsverteilung im Bauteilquerschnitt vor der Rissbildung (Faktor k_c)	288
10.4.8	Überlagerung von Last- und Zwangbeanspruchung	289
10.4.9	Zwangbeanspruchung rechtwinklig zur Haupttragrichtung	289

10.5	Verbund zwischen Bewehrungsstahl und Beton	290
10.5.1	Verbundcharakteristik	290
10.5.2	Einflussfaktoren auf die Verbundfestigkeit	293
10.5.3	Experimentelle Bestimmung der Verbundspannungen	296
10.5.4	Kennwerte der Verbundfestigkeit	299
10.6	Mindestbewehrung für die Begrenzung der Rissbreite ohne direkte Berechnung	300
10.6.1	Mindestbewehrung für die Begrenzung der Rissbreite (DIN EN 1992-1-1, Abschnitt 7.3.2)	300
10.6.2	Begrenzung der Rissbreite ohne direkte Berechnung (vereinfachter Nachweis nach DIN EN 1992-1-1, Abschnitt 7.3.3)	302
10.6.3	Ermittlung rissbreitenbegrenzender Bewehrung	305
10.7	Nachweis der Einhaltung der rechnerischen Rissbreite	307
10.7.1	Maßgebender Risszustand	307
10.7.2	Rissbildung, Verbund und rechnerische Rissbreite	309
10.7.3	Ermittlung der rechnerischen Rissbreite nach DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA	311
10.7.4	Nationale Interpretation: DIN EN 1992-1-1/NA	318
10.7.5	Zusammenstellung der Berechnungsgleichungen nach DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA	320
10.7.6	Weitere Vorschläge zur Ermittlung des Rissabstands und der Rissbreite	321
10.7.7	Ermittlung der Bewehrung und der Rissbreite für Wandbauteile, Anwendung von DIN EN 1992-3 und DIN EN 1992-3/NA	324
10.7.8	Rissbreitenbegrenzende Bewehrung bei Eigenspannungen	330
10.7.9	Rissbreitenbegrenzung bei Elementwänden und -decken	332
10.7.10	Rissbreiten bei Überlagerung von frühem und spätem Zwang	333
10.7.11	Kombination von Stabstahl- und Stahlfaserbewehrung	335
10.8	Bewehrung bei Nichterreichen der Risschnittgröße	338
10.9	Mindestbewehrung auf der Basis der Verformungskompatibilität	339
10.10	Zuverlässigkeit der Berechnung der Rissbreiten	343
10.11	Weitere Ursachen größerer Rissbreiten am Bauwerk	347
11	Entstehung und Eigenschaften der Risse in Stahlbetonbauteilen	349
11.1	Rissbildungsprozess im Zementstein	349
11.2	Vorgänge beim Zugbruch im unbewehrten Beton	351
11.3	Vorgänge beim Zugbruch im bewehrten Beton	357
11.4	Rissbreite, Rissuferverschiebung und Rechenwert der Rissbreite	362
11.5	Differenz zwischen Rissuferverschiebung und Rissbreiten-Messergebnissen	365
11.6	Auswirkungen einer Vermischung der Begriffe Rissbreite und Rissuferverschiebung	369
12	Rissbreitenmessung bei Stahlbetonbauteilen	375
12.1	Die Mehrdeutigkeit der Rissbreitenmessung	375
12.2	Der Rechenwert der Rissbreite und die Messwerte	377
12.3	Normvorgaben für zulässige Rissbreiten	379

12.3.1	Zulässige Rissbreiten für die Minderung der Korrosionsgefährdung der Bewehrung	380
12.3.2	Zulässige Rissbreiten für eine große Selbstdichtungs- / Selbstheilungswahrscheinlichkeit nach der WU-Richtlinie . . .	381
12.3.3	Zulässige Rissbreiten für die Prüfung rissüberbrückender Beschichtungen	382
12.4	Gebräuchliche Messtechnik für Kurzzeit-Rissbreitenmessungen	384
12.4.1	Die gebräuchlichsten optischen Messtechniken	385
12.4.2	Gebräuchliche Wegmesstechnik.	387
12.4.3	Spezialmesstechnik	388
12.5	Gebräuchliche Messtechnik für Langzeitmessungen	388
12.6	Die Bewertung von gemessenen Rissbreiten	393
12.7	Praktische Tipps zur Rissbreitenmessung	394
12.7.1	Beispiel einer Auswertung von Rissbreitenmessungen	398
12.7.2	Rissbreitenmessung und -auswertung nach DBV-Merkblatt »Rissbildung«, Anhang A1	400
12.8	Die Anfertigung eines Rissbildes	402
12.9	Eine vertragliche Vereinbarung von Rissbreitengrenzwerten im Bauleistungsvertrag hat keine sachliche Grundlage	404
12.10	Praxistest: Ein realer Vergleich von Mess- und Rechenwerten der Rissbreite . . .	405
13	Der Einfluss von Rissen in den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit (GZG) von Stahlbetonbauteilen	407
13.1	Allgemeines	407
13.2	Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauwerken und die Bedeutung von Rissen	408
13.3	Für die Bewehrung schädliche Einwirkungen (Expositionsklassen)	410
13.4	Die Depassivierung der Bewehrungsstäbe	411
13.4.1	Depassivierung des Bewehrungsstahls durch Karbonatisierung des Betons (ohne Chlorideinwirkung)	412
13.4.2	Die Depassivierung der Bewehrung durch die Wirkung von Chloridionen an der Stahloberfläche	414
13.4.3	Auslaugung der alkalischen Bestandteile des Zementsteins bei wasserführenden Rissen	417
13.5	Der Korrosionsprozess der Bewehrung im Beton	418
13.5.1	Allgemeines	418
13.5.2	Karbonatisierungsinduzierte Bewehrungskorrosion im ungerissenen Beton. . . .	422
13.5.3	Karbonatisierungsinduzierte Bewehrungskorrosion im Riss.	424
13.5.4	Besonderheiten der chloridinduzierten Korrosion	428
13.6	Zur Beeinträchtigung des Erscheinungsbildes durch Risse.	428
14	Risse und die Selbstdichtung / Selbstheilung in wasserundurchlässigen Bauwerken aus Beton.	431
14.1	Allgemeines	431
14.2	Wie sich die Selbstdichtung vollzieht und wie die Abdichtung aussieht.	434
14.3	Einflüsse und Bedingungen für die Selbstheilung / Selbstdichtung	437
14.3.1	Druckdifferenz zwischen Wasser- und Luftseite	437

14.3.2	Rauigkeit der Rissflächen.	439
14.3.3	Geeignete Partikel für die Rissabdichtung	442
14.3.4	Geringe Rissbreite und große Rissrauigkeit	446
14.3.5	Der Einfluss der Wanddicke auf die Selbstdichtungswahrscheinlichkeit	447
14.3.6	Der Einfluss der Risslänge auf die Selbstdichtungswahrscheinlichkeit	449
14.3.7	Der Einfluss der chemischen Zusammensetzung des Wassers	453
14.3.8	Der Einfluss wiederholter Austrocknung und anschließender erneuter Wasserbeaufschlagung	454
14.3.9	Der Einfluss sich bewegender Rissufer	454
14.4	Transformation der Versuchsergebnisse von Durchflussversuchen in ein Selbtheilungskriterium für die WU-Richtlinie	455
14.4.1	Übertragung der gezielt eingestellten Rissbreiten aus dem Versuch auf den Rechenwert der Rissbreite	455
14.4.2	Interpretation der Messergebnisse in den Selbstdichtungsversuchen.	457
14.4.3	Empfehlungen für ein Selbtheilungskriterium	461
14.5	Dichtigkeitsnachweis für Biegerisse nach der WU-Richtlinie	463
14.6	Die Arbeitsfuge im WU-Bauwerk – kein Sonderfall eines Risses	465
14.6.1	Arbeitsfugen sind Unstetigkeiten im Betongefüge	465
14.6.2	Die geringe Betonzugfestigkeit in Arbeitsfugen	467
14.6.3	Arbeitsfugen sind eine potenzielle Trennung im Betongefüge	468
14.6.4	Arbeitsfugen sind für Wasser durchlässiger als Trennrisse	469
14.6.5	Sonderfall: Arbeitsfugen in Elementwänden für WU-Bauwerke	471
14.7	Wasserwege an der oberen Horizontalbewehrung von dicken Platten	472
15	Widersprüche und kritische Wertungen	475
15.1	Differenzierung des Begriffs der Rissbreite und der Rissgeometrie.	476
15.2	Unsicherheiten bei der rechnerischen Ermittlung der Rissbreiten.	478
15.3	Folgen der streuenden Eingangsgrößen bei zwangbedingten Beanspruchungen	480
15.4	Anmerkungen über den Ansatz der Zugfestigkeit zum Risszeitpunkt.	481
15.5	Gewährleistung der Dauerhaftigkeit ohne Berechnung der Rechenwerte der Rissbreite	482
15.6	Ungenauigkeiten des Selbtheilungskriteriums der WU-Richtlinie	482
15.7	Berücksichtigung der Betonierbarkeit der Bauteile bei der Festlegung der Mindestbewehrung.	483
	Literatur	487
	Stichwortverzeichnis	509

