



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](http://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](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)  
[www.baufachinformation.de](http://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 hydrationsbedingte 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 Temperaturengleichvorgang 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
<b>1 Rissbildungen als Bestandteil der Stahlbetonbauweise – Zum Anliegen des Buches –</b>	<b>17</b>
<b>2 Frühe Verformungen und Rissbildungen im plastischen Beton.....</b>	<b>23</b>
2.1 Sedimentation und Bluten des Frischbetons, Entstehen von Setzungsrisen. . . .	23
2.2 Plastisches Schwinden und die Entstehung von Fröhschwindrisen . . . . .	25
2.3 Freigesetzte Blutwassermenge. . . . .	26
2.4 Beginn und Dauer der frühen Rissbildungsperiode . . . . .	27
2.5 Charakteristische Fröhschwindrissbildungen. . . . .	28
2.6 Betontechnologische Planung und Bauausföhrung 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 Fröhschwindrissbildung. . . . .	35
<b>3 Verformungen und Zwangspannungen in Beton- und Stahlbetonbauteilen. . . . .</b>	<b>37</b>
<b>4 Lastunabhängige Verformungen der Beton- und Stahlbetonbauteile. . . . .</b>	<b>47</b>
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
<b>5</b>	<b>Verformungs- und Festigkeitsverhalten des Betons . . . . .</b>	<b>85</b>
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
<b>6</b>	<b>Verformungsbehinderung und Rissbildung in Bauteilen . . . . .</b>	<b>121</b>
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
<b>7</b>	<b>Zwangspannungen und Rissbildungen bei Bauwerken mit erhöhten Anforderungen . . . . .</b>	<b>179</b>
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
<b>8</b>	<b>Maßnahmen zur Verminderung von Zwangspannungen . . . . .</b>	<b>223</b>
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
<b>9</b>	<b>Ermittlung von Zwangspannungen und Beurteilung der Rissgefahr . . . . .</b>	<b>235</b>
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
<b>10</b>	<b>Begrenzung der Rissbreiten durch Bewehrung . . . . .</b>	<b>267</b>
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
<b>11</b>	<b>Entstehung und Eigenschaften der Risse in Stahlbetonbauteilen . . . . .</b>	<b>349</b>
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
<b>12</b>	<b>Rissbreitenmessung bei Stahlbetonbauteilen . . . . .</b>	<b>375</b>
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
<b>13</b>	<b>Der Einfluss von Rissen in den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit (GZG) von Stahlbetonbauteilen . . . . .</b>	<b>407</b>
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
<b>14</b>	<b>Risse und die Selbstdichtung / Selbstheilung in wasserundurchlässigen Bauwerken aus Beton. . . . .</b>	<b>431</b>
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
<b>15</b>	<b>Widersprüche und kritische Wertungen . . . . .</b>	<b>475</b>
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
	<b>Literatur . . . . .</b>	<b>487</b>
	<b>Stichwortverzeichnis . . . . .</b>	<b>509</b>



# 1 Rissbildungen als Bestandteil der Stahlbetonbauweise – Zum Anliegen des Buches –

Immer wieder treten in Stahlbetonkonstruktionen Risse auf, die Anlass von Bedenken bei der Abnahme der Baukonstruktion oder während der Nutzung sind. Dabei wird verkannt, dass Rissbildungen ein Bestandteil der Stahlbetonbauweise und in der Regel unvermeidbar sind. Entscheidend ist, die Möglichkeit der Entstehung von Rissen bereits in der Planungsphase zu berücksichtigen, Vorsorge in Hinblick auf die Auswirkungen zu treffen und Maßnahmen zur Begrenzung der Rissbildungen zu ergreifen.

Die Ursachen für Rissbildungen sind vielfältig. Stahlbeton ist ein Verbundbaustoff; die Übertragung der Zugkräfte aus dem Beton in den Bewehrungsstahl ist mit Verformungs-differenzen und daher mit Rissbildungen verbunden. Insofern ist die Tragwirkung der Bauteile an diesen Mechanismus gebunden und nicht zu vermeiden.

Nach dem Einbau des Frischbetons, während der Erhärtung und im Gebrauchszustand treten lastunabhängige Verformungen aus Temperatur und Schwinden auf, die bei konstruktiven Behinderungen oder auch aufgrund der Eigenmasse beträchtliche Zwangbeanspruchungen hervorrufen können. Überschreiten diese Zwangspannungen die Zugfestigkeit des Betons, sind Rissbildungen die zwangsläufige Folge. Diese Rissbildungen verändern zwar das Tragverhalten der Konstruktion, können aber auch zur Reduzierung dieser Beanspruchungen und zur Entspannung in der Konstruktion beitragen. Insofern ist eine Rissbildung zwar unerwünscht, aber erst dann zu beanstanden, wenn daraus eine Gefährdung für das Tragwerk entsteht. Die Aufgabe der Tragwerksplanung und der Vorbereitung der Bauausführung besteht deshalb darin, die Rissbildungen zu berücksichtigen und Maßnahmen zur Verminderung der Zwangkräfte und zur Begrenzung der Rissbreiten vorzusehen. Diese Maßnahmen können die konstruktive Gestaltung und die Bemessung einer ausreichenden Bewehrung, die Betonzusammensetzung und den Bauablauf, die Anordnung von Abdichtungen und ggf. die Durchführung von nachträglichen Injektionen betreffen.

Die Abschätzung der rissverursachenden Verformungen und der sich einstellenden Rissbreiten ist unbestritten mit größeren Schwierigkeiten und Unsicherheiten verbunden. Die Aussagen zu den lastunabhängigen Verformungen und den Behinderungen sind an zahlreiche Annahmen gebunden, die oft nur innerhalb von bestimmten Grenzen angegeben werden können. In der Phase der Tragwerksplanung müssen bereits Festlegungen getroffen werden, ohne dass die Bedingungen der Baudurchführung bekannt sind. Eine besondere Problematik ist dabei die zeitliche Abhängigkeit der Betoneigenschaften.

Zur Begrenzung der Rissbreite ist eine Mindestbewehrung anzuordnen. Die Bemessung geht dabei von sogenannten rechnerischen Rissbreiten aus, die lediglich eine Rechengröße darstellen, aber oft fälschlich mit den am Bauwerk auftretenden Rissbreiten gleichgesetzt werden.

Eine wichtige Aufgabe des Konstrukteurs besteht darin, die Anordnung der Bewehrung optimal an die Bedingungen der Bauausführung anzupassen. Die Bewehrung muss so gestaltet werden, dass ein qualitätsgerechter Betoneinbau und eine ausreichende Verdichtung des Frischbetons möglich sind.

Die Beurteilung der Rissbildungen am Bauwerk und der wahrscheinlichen Auswirkungen auf die Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit hat eine erhebliche Bedeutung. Die Anforderungen an die Dichtigkeit und die Beständigkeit gegenüber Korrosion haben ständig zugenommen und sind durch die Ausdehnung der Einsatzgebiete der Stahlbetonbauwerke und die Erfahrungen in den letzten Jahrzehnten begründet. Die Abschätzung der Rissbreiten und die Beurteilung der Konsequenzen hat dabei eine erhebliche Brisanz.

In diesem Buch sollen die komplexen Zusammenhänge, die zur Rissbildung führen und der Umgang mit den Rissen in Theorie und Praxis dargestellt werden. Der Inhalt wurde in den einzelnen Kapiteln wie folgt gegliedert:

In **Kapitel 2** wird auf die sehr frühzeitigen Verformungen eingegangen, die unmittelbar nach dem Einbau und Verdichten des Frischbetons einsetzen und eine Frühhissbildung nach sich ziehen können. Zu diesem Zeitpunkt verfügt der Beton über keine Festigkeit und ist besonders sensibel gegenüber jeglicher Beanspruchung. Diese Erscheinungen sind zwar seit langem bekannt, werden aber erst jetzt als Bestandteil des Rissgeschehens während der Erhärtung des Betons angesehen. Diese sehr früh entstehenden Risse werden oft nicht wahrgenommen, bilden aber den lokalen Ansatz für spätere Rissentwicklungen. Neuere Messtechnik gestattet, die Spannungen in der Baudurchführung zu verfolgen und rechtzeitig Nachbehandlungsmaßnahmen einzuleiten.

Mit **Kapitel 3** wird die Darstellung des Zusammenhanges von Verformungen, Zwangspannungen und

Rissbildungen begonnen. Begriffe wie junger Beton, später Zwang und dergleichen werden erläutert, die Einflussfaktoren auf die Zwangspannungen genannt und die Auswirkungen der mechanischen Eigenschaften des erhärtenden Betons geschildert. Es zeigt sich, dass die Untersuchungen der Auswirkungen von Zwangspannungen nicht zeitlich abgegrenzt werden können und das Verhalten des Betons im gesamten Erhärtungs- und Nutzungszeitraum betrachtet werden muss.

**Kapitel 4** behandelt umfassend die lastunabhängigen Verformungen der Bauteile. Die thermischen und autogenen Verformungen sind dabei relativ zuverlässig erfassbar, ebenso der Einfluss der Temperatur auf den Erhärtungsverlauf, da diese Phänomene mit der Hydratation des Zements in Verbindung stehen. Heute stehen Geräte zur Verfügung, die die Temperatur feststellen und auf dieser Grundlage eine Aussage über den Erhärtungszustand und die zu erwartenden Verformungen ermöglichen. Eine rechnerische Ermittlung der Temperatur ist bei jungem Beton sehr aufwendig, sodass eine Abschätzung auf der Basis von Orientierungswerten zweckmäßig ist, die aus Beobachtungen gewonnen wurden. Der Zusammenhang zwischen Temperatur und Verformung kann durch Messungen an Bauteilen vor Ort festgestellt werden. Schwierig einzuschätzen ist das Trocknungsschwinden über lange Zeiträume in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen. Die Streubreite ist in Abhängigkeit von der Betonzusammensetzung und den Umgebungsbedingungen relativ groß, die Aussage demzufolge nicht verlässlich.

In **Kapitel 5** wird das Bauteilverhalten während der Erhärtung und bei Beanspruchungen behandelt. Im Mittelpunkt steht die zeitabhängige Entwicklung der Zugfestigkeit, die für die Ermittlung der Mindestbewehrung und die Abschätzung einer wahrscheinlichen Rissbildung eine Schlüsselrolle spielt. Dabei wird auch auf die Kopplung mit dem Hydratationsgrad eingegangen, die auch in Rechenprogrammen verwendet wird. Die anderen mechanischen Kenngrößen wie E-Modul und Zugbruchdehnung werden ebenfalls in der Zeitabhängigkeit dargestellt und wechselseitige Bezüge angegeben. Eingegangen wird auch auf die Möglichkeit, die Entwicklung der Eigenschaften während der Bauausführung abzuschätzen. Dabei wird

von der Reife des Betons ausgegangen, die sich aus der temperaturbedingten Korrektur der Erhärtungszeit ergibt. Ausführlich wird auf die viskoelastischen Eigenschaften des Betons eingegangen, da die Kenntnis der Relaxation für die realistische Beurteilung der Zwangsspannungen von großer Bedeutung ist. Die Relaxation im jungen Beton erklärt auch die Zugspannungen, die sich während der Erhärtung im Bauteil entwickeln.

**Kapitel 6** widmet sich der Verformungsbehinderung, die zur spannungswirksamen Dehnung und Rissbildung in den Stahlbetonbauteilen führt. Die Grundformen der Behinderung, die in allen Konstruktionen als zentrischer und außermittiger Zwang zu finden sind, bilden auch die Basis für die Berechnung der Zwangsspannungen und die Abschätzung der rechnerischen Rissbreite. Ausführlich behandelt werden dabei die Bedingungen in den Wänden und Bodenplatten, die in vielfältigen Formen und Abmessungen die hauptsächlichen Bestandteile sehr unterschiedlicher Bauwerke sind. Eingegangen wird auch auf die Eigenspannungen, die aufgrund innerer Behinderungen im Bauteil entstehen und zu Randrissen führen können. Dabei wird auch die normative Festlegung diskutiert, nur in Abhängigkeit von der Bauteildicke eine Abminderung der Zugfestigkeit vorzunehmen, da pauschal Randrisse unterstellt werden. Schließlich wird darauf eingegangen, dass das entstandene Rissbild durch Temperaturwechsel und das Schwinden verändert werden kann.

**Kapitel 7** verfolgt die Zwangsspannungen und Rissbildungen in Bauwerken mit erhöhten Anforderungen. Diese resultieren aus den besonderen Bedingungen bei wasserundurchlässigen und flüssigkeitsdichten Konstruktionen, aus den größeren Abmessungen bei Massenbetonbauteilen sowie aus der spezifischen Konstruktion bei Elementdecken und -wänden. Die Vielfalt der zwangbedingten Beanspruchungen wird anhand einiger Beispiele von ausgeführten Bauwerken ergänzend dargestellt. Dabei wird auf das Rissbild und die Rissursachen ebenso eingegangen, wie auf die Minimierung oder Vermeidung der Rissbildungen.

In **Kapitel 8** werden Maßnahmen zur Verminderung der Zwangsspannungen erläutert. Diese umfassen die konstruktiven Möglichkeiten, die im Zuge der Tragwerksplanung zu berücksichtigen sind, und die

Vorgehensweise zur Steuerung der Temperaturverhältnisse im Bauteil durch Betonzusammensetzung, Bauausführung und Nachbehandlung. Die Reduzierung der Zwangkräfte ist eine wesentliche Komponente der Strategie zur Beherrschung der Rissbildung und Sicherstellung der Dauerhaftigkeit und Gebrauchstauglichkeit.

Die Ausführungen in **Kapitel 9** wenden sich der messtechnischen und rechnerischen Ermittlung der Zwangsspannungen zu. Die messtechnische Untersuchung der Zwangsspannungen im Labor führt zu sehr wesentlichen Hinweisen für die Berechnung, auf der Baustelle gibt sie während der Baudurchführung Aufschluss über die Beanspruchungssituation. In der Berechnung wird darauf eingegangen, wie die Angaben der vorlaufenden Kapitel verwendet werden können und wie schrittweise der Spannungsaufbau nachvollzogen werden kann. Dabei wird auf die thermischen Beanspruchungen und die Besonderheiten des Einflusses des Schwindens eingegangen. Anhand von Risskriterien wird deterministisch und probabilistisch eingeschätzt, inwieweit eine Rissgefährdung vorhanden ist.

**Kapitel 10** ist der zweiten Komponente der Strategie zur Beherrschung der Rissbildungen vorbehalten. Sehr ausführlich werden die Grundlagen des Verbundes und der Überleitung der Zwangsschnittgrößen bei Rissbildung in die Bewehrung sowie die Modellvorstellungen zur Berechnung der Mindestbewehrung und der rechnerischen Rissbreite behandelt. Die Unterschiede in der Auslegung der europäischen Norm DIN EN 1992-1-1 bzw. DIN EN 1992-1-1/NA werden dabei herausgearbeitet. Weiterhin wird auf die Streuungen eingegangen, die sich bei der Ermittlung der rechnerischen Rissbreite infolge der Abweichungen in den Eingabewerten und den Modellparametern ergeben. Auf die Bedeutung einer realistischen Annahme der zeitabhängigen Zugfestigkeit und der Abminderung der Festigkeitseigenschaften durch die eigenspannungsbedingten Rissbildungen wird gesondert eingegangen. Die Darlegungen führen zwangsläufig zu der Einschätzung, dass die rechnerischen Rissbreiten selbst als Rechengröße nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit akzeptiert werden können. Neben der normgemäßen Annahme der Risschnittgröße

als maßgebend für die Ermittlung der Rissbreite wird auch auf verformungskompatible Konzepte eingegangen, die die Verformung im Bauteil zugrunde legen. Diese insgesamt auftretende Verformung muss durch die Summe der Rissbreiten im Bauteil kompensiert werden.

In **Kapitel 11** werden die Rissentstehung und die wesentlichen Risseigenschaften behandelt. Risse entstehen aus kleinen Unregelmäßigkeiten im Betongefüge, die immer vorhanden sind und die sich bei einer Beanspruchung durch Last oder Zwang mit neu gebildeten Mikrorissen mit wachsender Dehnung zum realen Riss vereinigen. Im Zugversuch an einem unbewehrten Versuchskörper, mit dem eine Zwangbeanspruchung simuliert wird, beginnt die Rissentstehung bei Erreichen der Zugfestigkeit. Im sogenannten absteigenden Ast, in dem sich der Riss eigentlich erst bildet, reißen die Rissuferflächen allmählich auseinander und sind etwa bei einer Rissuferverschiebung von 0,15 mm völlig getrennt. Erst dann ist der Riss fertig.

Kurz vor Erreichen der Zugfestigkeit entstehen an der künftigen Rissstelle plastische Verformungen, die sogenannte Rissprozesszone; in ihr entsteht dann der Riss. Die Reste der Rissprozesszone bleiben an den Rissflächen haften und verengen den entstehenden Risspalt etwas. Dadurch entsteht eine Differenz zwischen dem Risspalt einerseits und der Längenänderung des Bauteils über den Riss hinweg andererseits (Rissuferverschiebung). Sowohl der Risspalt (Rissbreite) als auch die Rissuferverschiebung werden in Theorie und Praxis als die Rissbreite des Risses bezeichnet und behandelt, obwohl es sich in beiden Fällen um unterschiedliche Werte handelt. Die Differenz kann bis zu 0,1 mm betragen und darf für übliche Risse mit bis zu 0,4 mm Rissbreite nicht vernachlässigt werden. Diese nicht ganz neue, aber von der Fachwelt bisher nicht zur Kenntnis genommene Tatsache, hat mehrere Konsequenzen für den Umgang mit Rissen im Stahlbetonbau.

Wie Rissbreiten zu messen sind und welche Probleme dabei bestehen, wird in **Kapitel 12** behandelt. Rissbreite und Rissuferverschiebung eines Risses werden mit unterschiedlichen Messgeräten bestimmt. Mit der optischen Messung (Vergleichsmaßstab, Rissmesslupe) wird die Rissbreite gemessen. Die Rissufer-

verschiebung wird als Weg der beiden durch den Riss getrennten und sich voneinander entfernenden Teile im Betonbauteil gemessen (Setzdehnungsmesser, induktive Wegaufnehmer). Beide Werte sind für den gleichen Riss nicht zahlengleich und können sich bis zu 0,1 mm unterscheiden. Da bis in die Gegenwart sowohl in der Wissenschaft als auch in der Praxis kein Unterschied zwischen beiden Werten gemacht wird, hat das die ohnehin im Betonbau gewohnten Streubreiten von Messwerten zusätzlich vergrößert.

Der Rechenwert der Rissbreite ist allein durch die Berechnungsvorschrift in der Norm als Längendifferenz zwischen der Bewehrung und dem Beton definiert. Mit der genormten Berechnungsmethode für den Rechenwert der Rissbreite kann kein Dehnungsanteil aus der Rissprozesszone berücksichtigt werden. Deshalb ist er eine Rissuferverschiebung, also etwas größer als die mit der Rissmesslupe messbare Rissbreite. Er ist ein ideeller Wert, der am realen Riss nicht messbar ist. Eine vertragliche Vereinbarung einzuhalten der Rissbreiten ist deshalb sachlich nicht haltbar und für den Bauunternehmer ein hohes Risiko.

Leider gibt es keine Prüfnorm zur Messung von Rissbreiten. So haben sich in der Praxis drei unterschiedliche Messmethoden herausgebildet, die am gleichen Riss zu drei verschiedenen Rissbreitenwerten führen.

Das Kapitel enthält Angaben zu gebräuchlichen Messinstrumenten, zu ihren zweckmäßigen Anwendungsmöglichkeiten und zur Auswertung.

In **Kapitel 13** werden mögliche Auswirkungen von Rissen für die Nutzung von Bauwerken behandelt. Jeder Riss bedeutet eine Trennung des Betongefüges, in die Substanzen eindringen, die den Beton und vor allem die Bewehrung schädigen können. Das kann Auswirkungen auf die Nutzungsdauer eines Bauwerks haben. Außerdem genügt in vielen Fällen bereits das Vorhandensein von Rissen, um Sichtflächen zu beeinträchtigen. Bei vielen Praktikern ist nicht bekannt, dass es für Rissbreiten bis 0,5 mm keinen direkten Zusammenhang zwischen Korrosionsgefährdung und Rissbreite gibt. Es ist also überflüssig, für den in der DIN EN 1992-1-1 geregelten Bereich bis zu einem Rechenwert der Rissbreite von 0,4 mm die Rissbreiten streng zu differenzieren. Das erleichtert auch die

Auswertung von Rissbreitenmessungen am Bauwerk. Die für die chloridinduzierte Korrosion geltenden Besonderheiten werden erläutert.

In **Kapitel 14** werden Risseigenschaften behandelt, die bei Einwirkung von Wasser auf gerissene Bauteile von Bedeutung sind. In erster Linie betrifft das die Selbstheilung/Selbstdichtung von Trennrissen. In der WU-Richtlinie sind dazu empirisch gewonnene Erkenntnisse aus den 1980er- und 1990er-Jahren aufgenommen worden. Aus heutiger Sicht sind diese Erkenntnisse ergänzungsbedürftig, was Auswirkungen auf den diesbezüglichen Inhalt der WU-Richtlinie haben muss.

Das Selbstdichtungskriterium der WU-Richtlinie ist nach gegenwärtigem Kenntnisstand zu optimistisch. Das hat zwei Ursachen:

- Bei der Formulierung des Selbstdichtungskriteriums anhand von fast 70 Durchflussversuchen mit systematisch variierten Parametern ist relativ großzügig verfahren worden. Beispielsweise ist ein zulässiger Rissbreitenwert von 0,2 mm höchstens bei sehr geringen Druckdifferenzen von bis zu 2 mWS gerechtfertigt.
- Die Gleichsetzung der sehr sorgfältig mit Messlupe eingestellten Rissbreiten im Versuch mit Rechenwerten der Rissbreite ist nicht korrekt. Dazu kommt, dass besonders bei kleinen Rissbreiten bis 0,15 mm die Vorhersagewahrscheinlichkeit mit 70 bis 80 % so gering ist, dass sehr oft mit wasserführenden Rissen zu rechnen sein wird, wo die Festlegungen der WU-Richtlinie Dichtigkeit in Aussicht stellen.

Arbeitsfugen in WU-Bauwerken haben andere Eigenschaften als durch Bruch der Betonstruktur entstandene Risse. Dadurch sind sie viel anfälliger gegenüber Wasserdruckbeanspruchungen und erfordern bei der Planung und Realisierung eine besondere Sorgfalt. Die Rissprozesszone im natürlichen Riss scheint günstigere Bedingungen für die Rissraugigkeit zu schaffen als eine noch so gut aufgeraute Arbeitsfugenfläche.

Die WU-Richtlinie enthält Forderungen für die Mindestdruckzonenhöhe bei Biegerissen in WU-Bauwerken, gibt aber keine Auskunft, wie die Druckzonenhöhe im Gebrauchszustand berechnet werden kann. Deshalb wird in diesem Kapitel eine Methode

zur Bestimmung der Druckzonenhöhe bei Biegerissen behandelt.

In **Kapitel 15** sind einige Schlussfolgerungen und Hinweise zusammengefasst, die sich aus der kritischen Betrachtung der im Buch geschilderten Zusammenhänge ergeben. Dabei wird auf die Ursachen und die Folgen einer zu umfangreichen Mindestbewehrung, die nicht definierten Rissbreiten in der Berechnung und bei der Messung am Bauwerk und dergleichen eingegangen.

Die Behandlung der Thematik »Rissbildungen im Stahlbetonbau« steht unter der Prämisse, dass die in Bauwerken entstehenden Verformungen aus Schwinden und Temperatur, also durch nicht oder nur sehr begrenzt beeinflussbare äußere Umgebungsbedingungen und betonstoffliche Vorgänge, nicht verhindert werden können. Sind diese Verformungen behindert, entstehen Zwangkräfte und bei Überschreitung der Zugfestigkeit oder der Verformungsfähigkeit des Betons Rissbildungen. Wenn das Tragwerk nicht statisch bestimmt oder durch Fugen getrennt geplant wird und größere Bauteilabmessungen aufweist, ist immer mit einer Zwangsituation und mit Rissbildungen zu rechnen. Unvertretbar wäre, wenn den zu erwartenden Zwangkräften durch eine steifere Konstruktion oder durch eine umfangreiche Bewehrung begegnet würde. Demgegenüber wird bei dem Entwurf des Tragwerks das Ziel verfolgt, die Zwangkräfte zu vermindern und die unvermeidbare Rissbildung durch Bewehrung zu steuern. Die kontrollierte Rissbildung ist dabei eine wesentliche Maßnahme zur Verringerung der Zwangverformung.

Maßgabe für die Herstellung zwangbeanspruchter Stahlbetonbauten ist, die zur Verfügung stehenden Möglichkeiten in der Tragwerks- und Ausführungsplanung abzustimmen und unter Abwägung der Vor- und Nachteile ein Optimum anzustreben. In vielen Fällen ist dabei ein Weg durch Konfliktbereiche zu finden, wie beispielsweise

- die Abdichtung von zwangmindernden Fugen,
- die Dichtigkeit von Bauteilen mit begrenzter Rissbildung oder
- die Verminderung der Hydratationswärme und Bauteiltemperatur bei langsamerer Erhärtung und Festigkeitsbildung während der Baudurchführung.

Die oft einseitige und unabgestimmte Behandlung der Problematik kann die Sicherheit vermindern, die erforderliche Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit zu erreichen. Alle Überlegungen stehen unter der Randbedingung, dass sich Zwangverformungen und Zwangkräfte rechnerisch nur unsicher erfassen lassen. Außerdem sind die Vorhersage der Lage der Risse im Tragwerk und die zu erwartende Rissbreite proble-

matisch. Insofern ist immer Vorsorge zu treffen, dass nicht tolerierbare Risse nachträglich dauerhaft geschlossen werden können. Die Schwierigkeiten bei der Herstellung zwangbeanspruchter Stahlbetonkonstruktionen können beträchtlich sein und größere Folgekosten nach sich ziehen, auch wenn Regelwerke und Veröffentlichungen oftmals einen anderen Eindruck vermitteln.

## 2 Frühe Verformungen und Rissbildungen im plastischen Beton

Bereits unmittelbar nach dem Einbau des Frischbetons treten Verformungen auf, die selbst im plastischen Zustand zu Rissbildungen führen und dadurch die Dauerhaftigkeit und Gebrauchstauglichkeit nachteilig beeinflussen können. Ursachen sind neben dem Setzen des Frischbetons das Frühschwinden in der Randzone des Bauteils infolge eines Wasserverlusts durch Verdunstung. In DIN EN 13760:2011-07 und DIN EN 1045-3 wird deshalb darauf hingewiesen, dass das Frühschwinden durch eine geeignete Nachbehandlung gering zu halten ist bzw. verhindert werden muss. Dieser Forderung kann jedoch häufig nicht entsprochen werden, da bei Industrieböden, Parkdecks und ähnlichen Bauteilen zwischen dem ersten Oberflächenabschluss und der endgültigen, abschließenden Bearbeitung oder unmittelbar danach eine Begehbarkeit des Bauteils und die Möglichkeit der Nachbehandlung nicht gegeben ist. Diese »Nachbehandlungslücke« ist oft die Ursache, dass wiederholt Rissbildungen aufgetreten sind. Die vorhandene Bewehrung kann in diesem Stadium die sich einstellende Rissbreite nicht begrenzen. Im Folgenden wird auf die Ursachen der Frührissbildungen und deren Vermeidung am Beispiel der Ausführung eines ausgedehnten Parkdecks eingegangen. Dadurch soll auch auf Rissbildungen aufmerksam gemacht werden, die in der Bauausführung oft nicht die notwendige Beachtung finden.

### 2.1 Sedimentation und Bluten des Frischbetons, Entstehen von Setzungsrisen

Ein Frischbeton üblicher Zusammensetzung kann als eine Suspension betrachtet werden, in der alle Bestandteile mit Wasser umhüllt und frei beweglich sind. Unter der Einwirkung der Vibrationsverdichtung und aufgrund der Schwerkraft sinken die schwereren Gesteinskörnungen in den unteren Bereich des Bauteils ab, das sogenannte Blutwasser steigt zur Oberfläche auf und bildet dort zunächst einen durchgängigen Wasserfilm (Bild 2.1). Das Freisetzen des überschüssigen Zugabewassers im Zuge der Sedimentation stellt in dieser Frühphase bei ungeschützten horizontalen Bauteilflächen einen Schutz vor Austrocknung dar und ist damit hilfreich. Auch ein gewisses Nachsaugen dieses

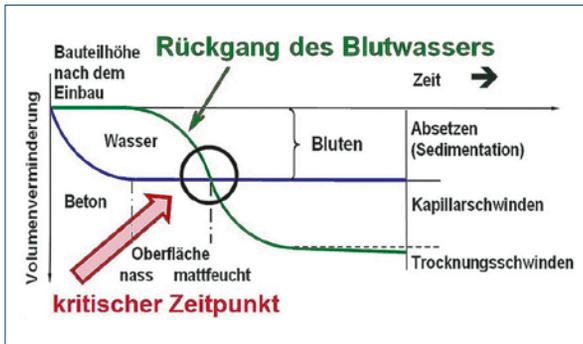


Bild 2.1: Sedimentation, Blutwasser an der Bauteiloberfläche und kritischer Zeitpunkt für den Beginn des Kapillarschwindens

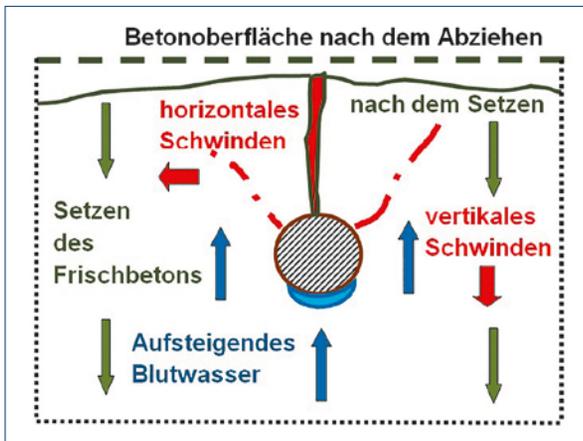


Bild 2.2: Setzen des Frischbetons nach dem Einbau, aufsteigendes Blutwasser und anschließendes plastisches Schwinden



Bild 2.3: Setzungsrisse über der horizontalen Bewehrung

Wassers zurück in die Randzone des Bauteils findet infolge beginnender Hydratationsvorgänge statt und ist vorteilhaft.

Nachteilig zu beurteilen sind Wasseransammlungen unter den oben liegenden Bewehrungsstäben, groben Gesteinskörnungen und Einbauteilen sowie ein Aufschwimmen von Zementleim und die Bildung einer Randschicht (Bild 2.2). Weiterhin ist zu beachten, dass über verformungsbehindernden Konstruktionsteilen breitere Risse mit Abmessungen von mehreren Millimetern entstehen können, wie beispielsweise über der Bewehrung (Bild 2.3). Die Risstiefe ist dagegen gering und betrifft nur den oberen Randbereich des Bauteils. Diese Setzungsrisse können jedoch in Verbindung mit dem plastischen Schwinden tiefer in das Bauteil hineinreichen. Nicht alle Setzungsrisse sind sofort sichtbar, sondern können sich bei später einsetzenden weiteren Verformungen bis zum Bauteilrand verlängern. Maßnahmen zur Begegnung von Setzungsrisse sind neben der Betonzusammensetzung (Wassergehalt, Sieblinie) eine rechtzeitige Nachverdichtung.

Die Menge an Blutwasser hat sich in den letzten Jahrzehnten merklich verringert. Ursachen sind beispielsweise die Herabsetzung des Wasserzementwertes zur Erzielung hochfester Betone und die Vergrößerung des Wasserrückhaltevermögens durch die Zunahme von Feinstoffen in der Frischbetonmischung. Unter dem Gesichtspunkt der Vermeidung von Frühschwindrisse erscheint eine Optimierung der Betonzusammensetzung mit dem Ziel eines ausreichenden Blutwasserreservoirs durchaus angemessen. Die Steigerung der Betondruckfestigkeit wäre danach nur anzustreben, wenn konstruktiv unbedingt erforderlich.

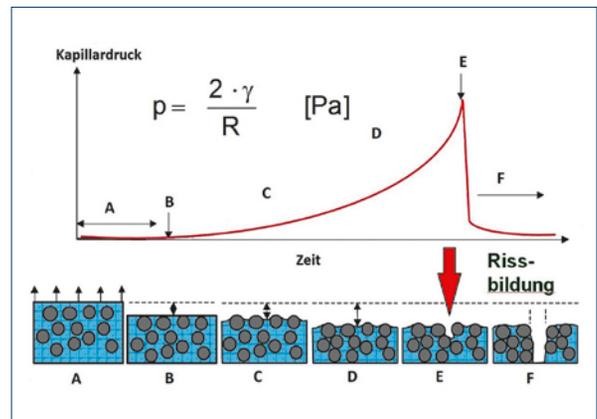
## 2.2 Plastisches Schwinden und die Entstehung von Frühschwindrissen

Ist eine horizontale Bauteiloberfläche ungeschützt der Außenluft ausgesetzt, verdunstet zunächst die Blutwasserschicht ohne jegliche Verformung des Gefüges (Bild 2.4, Phase A). Die Verluste durch die Trocknung werden durch nachstoßendes Blutwasser ausgeglichen. Die fortschreitende Komprimierung des Feststoffgerüsts durch die Setzung (Bild 2.4, Phase B) erschwert den Nachschub des Blutwassers, sodass die Verdunstungsrate überwiegt. In der dann abgetrockneten Oberfläche, die charakteristisch nur noch mattfeucht erscheint (Bild 2.1), bilden sich Menisken zwischen den Feststoffpartikeln (Zement, Zusatzstoffe, Gesteinskörnung) aus, die Kapillarkräfte und damit ein horizontales Schwinden und eine Versteifung des Gefüges hervorrufen (Bild 2.4, Phase C). So lange noch eine Setzung stattfindet, wachsen die Kapillarkräfte nur langsam an. Mit der Einschränkung der Beweglichkeit und Behinderung des Flüssigkeitstransports (kritischer Punkt in Bild 2.5) beschleunigt sich der Aufbau des Kapillardrucks. Wenn die Randzone weiter austrocknet, vertiefen sich die Menisken und wandern in das Bauteilinnere (Bild 2.4, Phase D). Dabei werden die Räume zwischen den Partikeln mit den größeren Radien  $R$  zuerst entleert. Der Kapillardruck  $p_k$  steigt ständig weiter an, bis das Gefüge keinen ausreichenden Widerstand entgegensetzen kann und ein Lufteinbruch stattfindet. Die Rissbildung hat lokal begonnen (Bild 2.4, Phase E).

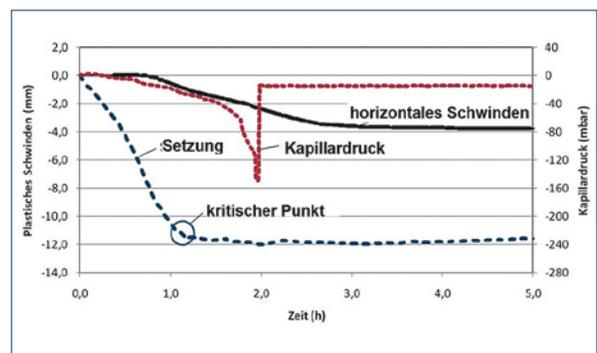
Der Druck und der Zeitpunkt, an dem der Lufteintritt stattfindet, sind dominante Größen ([Wit], [Slo2]). Das weitere Schwinden vertieft und verbreitert die Risse (Bild 2.4, Phase F). Für die Nachbehandlung ist von Bedeutung, dass die Kapillarspannungen sofort zurückgehen, wenn Wasser zugeführt wird. Wirkungsvoll ist demzufolge jede Maßnahme, die ein Austrocknen der Randzone verhindert oder wieder aufhebt.

Aufgrund der unterschiedlichen Partikelgröße und der Partikelverteilung im Zementleim vollzieht sich der Lufteintritt nicht gleichzeitig in allen Poren, sondern örtlich getrennt. Dies erklärt die örtlich unter-

schiedlichen Ergebnisse von Kapillardruckmessungen [Slo2]. Im Zuge der weiteren Austrocknung vereinigen sich die als Risspitzen wirkenden Störstellen im Gefüge. Das geschieht bevorzugt an Übergangszonen zwischen größeren Gesteinskörnungen und Zementleim und unter dem Einfluss einer Verformungsbehinderung, sodass eine Rissfront entsteht.



**Bild 2.4:** Verdunstung des Wassers an der Bauteiloberfläche und Entwicklung des Kapillardrucks bis zur Rissbildung (nach [Com1])



**Bild 2.5:** Plastisches Schwinden vertikal (Setzen des Betons) und horizontal (Kapillarschwinden) sowie Kapillardruck eines trocknenden Betons ( $w/z = 0,65$ ) in den ersten fünf Stunden [Fon1]

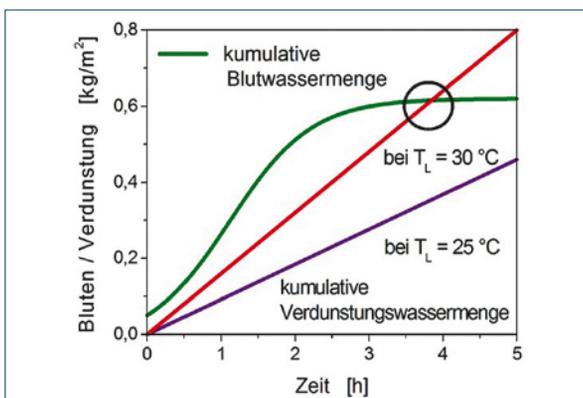
Der Kapillardruck und das Kapillarschwinden sind von einer Reihe von Faktoren mit unterschiedlicher und bei Überlagerung auch mit gegensätzlicher Auswirkung abhängig. Ein Anstieg tritt grundsätzlich auf mit der Zunahme der Verteilung und des Volumens der feinen Partikel in der Betonmischung. Dazu zählen die Zementmahlfeinheit (höherfeste Zemente), die Erhöhung des Mehlkorngehaltes und die Betonzusatzstoffe mit großer Oberfläche (Silikastaub) sowie Flugasche. Ungünstig sind eine Verringerung des Wasserzementwertes sowie ein größeres Wasserrückhaltevermögen, der Einsatz wassersaugender Gesteinskörnungen, ein höherer Zementleimgehalt, ein verzögertes Erstarren (Betonzusatzmittel) und eine langsame Hydratation und Festigkeitsentwicklung (Zementart und -sorte). Bei einer langsamen Erhärtung dauern die Erstarrungs- und Liegezeit sowie die gesamte plastische Periode länger an. Die Umgebungstemperatur beschleunigt die Verdunstung und damit die frühzeitige Austrocknung, andererseits auch die Strukturbildung und den Widerstand gegen Rissbildung. Vorteilhaft ist ein verspäteter Trocknungsbeginn (Blutwasser, Nachbehandlung), besonders bei schnell

erhärtenden Zementen. Mit ansteigendem Wasserzementwert wird der rissauslösende Kapillardruck verringert und auf einen späteren Zeitpunkt verschoben, jedoch auch das spätere Trocknungsschwinden angehoben. Damit scheint sich für die Betonzusammensetzung ein günstiger Bereich bei  $w/z = 0,45$  bis  $0,55$  einzustellen [Wit1].

Verschiedene Untersuchungen zeigen die Widersprüchlichkeit und die Komplexität der Einwirkungen der Faktoren Wasserzementwert, Zementleimgehalt und Blutwassermenge auf. Eine eindeutige Beurteilung ist derzeit noch nicht möglich.

Die Rissneigung ist nicht prognostizierbar und nur qualitativ im Sinne von »größer oder kleiner« abschätzbar. Eine Berechnung der Schwindspannungen und der Rissicherheit ist aufgrund der fehlenden Informationen zu den Kenngrößen des Betons bis zum Erhärtungsende aussichtslos. Eine Vorhersage durch vorauslaufende Untersuchungen im Labor ist aufgrund der maßgebenden Einwirkungen während der Baudurchführung ohne praktischen Nutzen. Gegenwärtig erscheint als Hilfsmittel lediglich die Messung des Kapillardrucks im Bauteil geeignet.

## 2.3 Freigesetzte Blutwassermenge



**Bild 2.6:** Entwicklung von Blut- und Verdunstungswassermenge und Beginn des risskritischen Zustandes im Bauteil; schematische Darstellung der Bilanz zwischen dem aufsteigenden Blutwasser und der verdunstenden Wassermenge ( $T_L$  = Lufttemperatur)

Nach [DBV4] kann bei befahrenen Konstruktionsteilen lediglich mit einem Blutwasservolumen von  $V_{BW} < 0,2$  Vol.-% (2,0 M.-%) gerechnet werden. Verschiedene Untersuchungen zeigen jedoch, dass der Anteil wesentlich größer ist. [Kre1] gibt bei einem Beton für befahrene Bauteile ein  $V_{BW} \approx 0,5$  Vol.-% und aus Untersuchungen des VDZ ein  $V_{BW} = 0,2$  bis  $0,5$  Vol.-% an. Diese Werte werden als Orientierung für die später zu beschreibende Betonzusammensetzung des Parkdecks angesehen und ergeben für das 12 cm dicke Bauteil etwa  $0,6 \text{ kg/m}^2$  (Bild 2.6). Festzustellen ist, dass die Blutwassermenge zunächst sehr rasch ansteigt und dann anschließend nur noch asymptotisch auslaufend zunimmt, sodass für das Parkdeck anfänglich mit nicht mehr als etwa  $0,3 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ h})$  gerechnet werden kann (Bild 2.6). Da die Verdunstung unter sommerlichen Bedingungen diesen Wert in der Regel übersteigt, kann

das Blutwasser nur als Unterstützung, nicht aber als ausreichend für eine rissfreie Herstellung der Verkehrsflächen angesehen werden. In der DIN EN 13670:2011-07 wird deshalb sehr begründet eine unverzüglich nach der Oberflächenbearbeitung anzuschließende Nachbehandlung und eine Zwischennachbehandlung bei einer zeitlich verschobenen Oberflächenbearbeitung gefordert. Die dazu genannten Maßnahmen sind bei nicht gegebener Begehbarkeit eingeschränkt oder würden den Wassergehalt der Randzone ungünstig verändern; auf die Notwendigkeit und die Möglichkeiten der Nachbehandlung nach der Oberflächenbearbeitung wird normativ nicht eingegangen.

## 2.4 Beginn und Dauer der frühen Rissbildungsperiode

Unmittelbar nach dem Einbau des Frischbetons beginnen Hydratationsreaktionen des Zements und der anderen reaktionsfähigen Feinststoffe, die das zunehmende Ansteifen bewirken und schließlich das Erstarren hervorrufen – ein Vorgang, dem zeitlich das Erhärten des Betons folgt. Charakteristisch für diesen Zeitraum sind die drastischen Veränderungen der Eigenschaften (Bild 2.7). Zunächst wächst die Steifigkeit schnell an und die Verformbarkeit nimmt entsprechend ab, sodass auftretende Eigen- und Zwangsspannungen einen Zugbruch des noch labilen Gefüges herbeiführen können (Bild 2.8). Frühe Spannungen können dabei aus Temperaturänderungen (abendliche Abkühlung) und der inneren Austrocknung infolge von Hydratation (chemisches/autogenes Schwinden) bei niedrigen Wasserzementwerten  $w/z < 0,40$  entstehen.

Die plastische Frühschwindrissbildung kann damit nicht erklärt werden, da der risskritische Bereich vor dem normgemäßen Erstarrungsbeginn beginnt und

Die Blutwassermenge ist keine durch ein genormtes Prüfverfahren generell erfasste Eigenschaft des Frischbetons und nur für Beton mit Zusatzmitteln geregelt (DIN 480-4). Die Prüfmethode im Merkblatt [DBV4] verhindert nicht, dass praxisrelevante Faktoren (Verflüssigung durch Verdichtung, Bauteildicke usw.) zu größeren Streuungen der Ergebnisse führen. Da bei der Auslieferung das Betonwerk im Regelfall keine Angaben zum Wasserabsondern mitteilt, liegt keine Kenntnis über diese besondere Frischbetoneigenschaft vor.

die Rissbildung in der Periode großer Dehnungsfähigkeit stattfindet. Die wiederholt geäußerte Schlussfolgerung, dass Risse demzufolge erst nach dem Erstarrungsbeginn auftreten können, ist experimentell als nicht zutreffend bewiesen [Slo1]. Tatsächlich wird die Beweglichkeit des Gefüges durch die Kapillarkräfte drastisch eingeschränkt, sodass die Schwindverformungen die frühzeitig beobachteten Risse hervorrufen. Entscheidend ist und bleibt der Trocknungsbeginn an der Oberfläche des Bauteils (Bild 2.6).

Mit der weiteren Hydratation entsteht ein stabiles Gefüge des jungen Betons mit sich ständig steigenden Festigkeitskennwerten und abnehmender Frühschwindrissgefahr. Oft wird ein Grenzwert von  $f_{ct} = 1 \text{ N/mm}^2$  diskutiert, ab dem eine kapillare Rissbildung nicht mehr auftreten kann. Insofern ergibt sich ein Zeitraum mit der Möglichkeit einer Schwindrissbildung vom Einbau und Verdichten des Frischbetons bis nach Erstarrungsende (Bild 2.7). Die Nachbehandlung ist auf diesen Zeitraum abzustimmen.

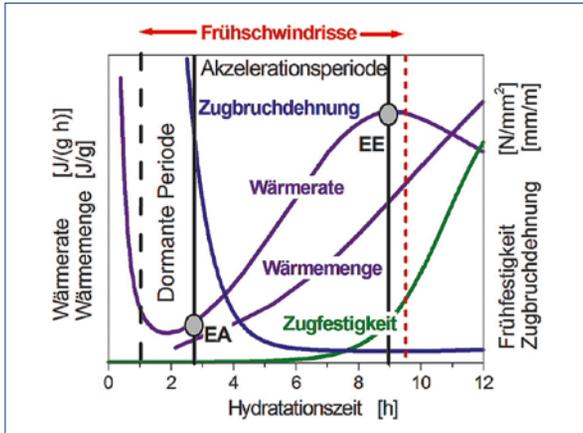


Bild 2.7: Veränderungen und Entwicklung der Eigenschaften eines Betons aus CEM I 32,5 R bis zum Erhärtungsbeginn

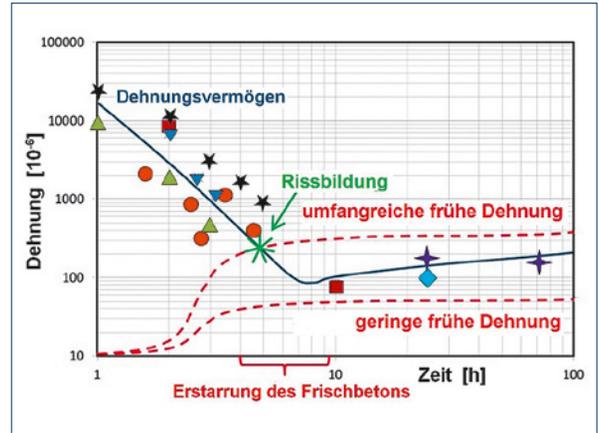


Bild 2.8: Dehnungsvermögen des erhärtenden Betons nach verschiedenen Untersuchungen (nach Angaben von [Bos2])

## 2.5 Charakteristische Frühschwindrissbildungen

Die Ausbildung von plastischen Schwindrissen ist zufällig, nicht vorhersehbar und wird von mehreren Faktoren wie zum Beispiel Windrichtung, Behinderung durch Seitenschalungen oder Bauteilauflagerung, Verlauf der Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung bestimmt. Ein solches Rissbild unterscheidet sich deutlich von einem Rissbild, das im erhärtenden Beton unter thermischer oder hygrischer Dehnung verur-

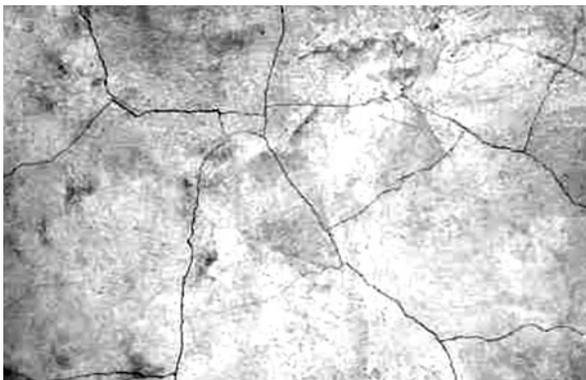


Bild 2.9: Netzartige plastische Schwindrisse auf einer Betonoberfläche bei direkter Sonneneinstrahlung und unter Windeinfluss

sacht wird. Die Risse sind in der Regel netzartig miteinander verbunden und vermitteln einen schollenartigen Eindruck (Bild 2.9: Netzartige plastische Schwindrisse auf einer Betonoberfläche bei direkter Sonneneinstrahlung und unter Windeinfluss). Eine strahlenförmige, sich verästelnde Form (Bild 2.10 a) oder mehrere parallele Einzelrisse (Bild 2.10 b) unterschiedlicher Länge und Breite, eng benachbart oder auch mehrere Meter entfernt, sind ebenfalls möglich. Bereits geringe Abweichungen der Austrocknungsbedingungen können das Rissbild deutlich verändern.

Die Risslängen können nur wenige Zentimeter, aber auch mehrere Meter betragen. Die plastischen Schwindrisse beginnen an der Bauteiloberfläche und setzen sich mit abnehmender Breite in die Tiefe fort. Während für massige Bauteile eine begrenzte Tiefe von bis zu 10 cm angegeben wird [Gru2], können bei Bauteilen geringerer Dicke auch Durchrisse entstehen ([Esp1], [Esp2]). Daraus ergeben sich Risstiefen von 15 bis 20 cm. Anhand eigener Überprüfungen mit Bohrkernen konnten diese Angaben bestätigt werden; ebenso, dass die Stahlbetonplatten eines Parkdecks ohne Ausnahme durchtrennt worden waren. Aus anderen Berichten geht hervor, dass auch 30 cm dicke



**Bild 2.10 a und b:** Frühschwindrissbildungen auf den Stahlbetonplatten eines Parkdecks (Aufnahmen nach dem Bewässern der Risse)

Deckenplatten Trennrisse aufwiesen und die Haarrisse an der Unterseite zu unzutreffenden Einschätzungen führten.

Die Rissbreiten können erfahrungsgemäß etwa 0,5 bis 2 mm, in einzelnen Fällen bis 3 mm betragen [Gru1]. In vielen Fällen sind die Risse nur sehr schmal (Haarrisse) und deshalb leicht zu übersehen oder werden im Zuge der Oberflächenbearbeitung scheinbar geschlossen. Durch Besprühen mit Wasser können die Risse leicht sichtbar gemacht werden. Später einsetzende Dehnungen (thermisch und hygri-sch bedingte Dehnungen, Lastbeanspruchung) weiten die Risse auf, wodurch die Verwendungsfähigkeit der Bauteile durchaus in Frage gestellt werden kann.

Die Rissbreite wird durch die traditionelle Bewehrung nicht begrenzt. Mit einem Zusatz von kurzen Fasern (z.B. Polypropylen, 5 cm lang) können Schwindrisse in der Breite begrenzt und verteilt werden. Zur Wirksamkeit unterschiedlicher Fasern gibt es jedoch widersprüchliche Aussagen, der Wirkungsmechanismus gilt als noch nicht vollständig geklärt.

Wenn die Risse sehr frühzeitig erkannt werden, könnten diese durch eine Nachverdichtung geschlossen werden. Inwieweit damit die Trennung des Gefüges vollständig aufgehoben wird, kann nicht eindeutig ausgesagt werden. Zu diesen Fragen gibt es keine systematischen Untersuchungen.

## 2.6 Betontechnologische Planung und Bauausführung Beispiel: Herstellung eines ausgedehnten Parkdecks

Die Vorgehensweise zur Vermeidung der Frühschwindrissbildung wird am Beispiel der Ausführung eines großflächigen Parkdecks erläutert [Röh7]. Bei dieser Bauaufgabe wurden etwa 12000 m<sup>2</sup> frei bewitterte Parkfläche in Einzelflächen von 3,50 m × 3,50 m hergestellt. Die Dicke betrug 120 mm, bei Anpassungen an

die Gefällesituation bis auf 180 mm ansteigend. Für die Wärmedämmung wurde ein extrudierter Hartschaum eingesetzt. Die meteorologischen Bedingungen waren in einem Zeitraum vom Frühsommer bis zum Beginn des Winters sehr unterschiedlich.