

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Author's Postprint

Bödefeld, Jörg

Rissmechanik in dicken Stahlbetonbauteilen bei abfließender Hydratationswärme

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/104575>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Bödefeld, Jörg (2010): Rissmechanik in dicken Stahlbetonbauteilen bei abfließender Hydratationswärme. In: Beiträge zum Doktorandensymposium 2010 - 51.

Forschungskolloquium. [Beton - Werkstoff der Superlative], 11.-12. November 2010. Berlin: DAfStB. S. 757-768.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Erstveröffentlichung in: W. Breit, W. Kurz, J. Schnell, C. Kohlmeyer (Hrsg.): Beiträge zum Doktorandensymposium 2010, 51. Forschungskolloquium, 11. und 12. November 2010 an der TU Kaiserslautern, Band 1. Berlin: DAfStb-Verlag, S. 757-768.

Für eine korrekte Zitierbarkeit ist die Seitennummerierung der Originalveröffentlichung für jede Seite kenntlich gemacht.

S. 757

Rissmechanik in dicken Stahlbetonbauteilen bei abfließender Hydratationswärme

Jörg Bödefeld

Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe
joerg.boedefeld@baw.de

Zusammenfassung

Zur Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit und der Dauerhaftigkeit von Stahlbetonkonstruktionen werden diese mit einer als Mindestbewehrung bezeichneten Bewehrung zur Begrenzung der während der Hydratationsphase auftretenden Rissbreiten ausgestattet. Um das Verständnis der Rissmechanik während der Hydratationsphase zu untersuchen, werden nichtlineare Berechnungen an einem FE-Modell mit diskreter Rissbildung durchgeführt. Die maßgebenden Parameter werden hydrationsgradabhängig formuliert.

Die Erkenntnisse weisen Schwächen am bestehenden, spannungsorientierten Bemessungskonzept nach. Die Schwächen können durch ein verformungsorientiertes Bemessungskonzept beseitigt werden. Die erforderliche Verformung lässt sich sehr gut durch die äquivalente Temperaturdifferenz für zentrischen Zwang, die in Abhängigkeit der Hydratationswärme formuliert werden kann, und des Abstandes der Primärrisse, der aus dem äußeren Zwang bestimmt wird, ermitteln. Der Querschnitt muss diese Verformung durch Primär— und Sekundärrisse ermöglichen. Aus dem Rechenmodell können mit mechanischen Ansätzen die Verformungsmöglichkeit und die Spannung im Primärriss in Abhängigkeit der Anzahl der Sekundärrisse bestimmt werden. Zusammen mit der Begrenzung der Rissbreite im Primärriss ergibt sich eine mechanisch konsistente, geschlossene Formel zur Ermittlung des erforderlichen Bewehrungsquerschnittes für die Mindestbewehrung.

1 Einführung

1.1 Allgemeines

Die passende Dimensionierung der Bewehrung zur Aufnahme der Beanspruchungen im jungen Betonalter ist bis heute nicht umfassend und abschließend geklärt. Wird die für dünne Bauteile entwickelte Vorgehensweise auf dicke Stahlbetonbauteile mit Querschnittsdicken $h > 0,8$ m übertragen, ergeben sich extrem hohe Bewehrungsgehalte. Hohe Bewehrungsgehalte sind schwierig

einzubauen, führen zu Problemen beim Betoniervorgang und sind aus der Erfahrung heraus nicht erforderlich. In der vorliegenden Arbeit soll die Rissmechanik bei jungem Beton analysiert werden. Dazu werden FEM-Berechnungen mit nichtlinearen Stoffgesetzen, die das Materialverhalten während der Hydratation möglichst realistisch erfassen, durchgeführt. Letztendlich wird ein mechanisch konsistenter Bemessungsvorschlag zur Dimensionierung der rissbreitenbegrenzenden Bewehrung für die Hydratationsphase des Betons hergeleitet. Die Hintergründe sind ausführlich in [1] beschrieben.

Bödefeld: Rissmechanik in dicken Stahlbetonbauteilen
bei abfließender Hydratationswärme.

S.758

In: W. Breit, W. Kurz, J. Schnell, C. Kohlmeyer (Hrsg.): Beiträge zum Doktorandensymposium 2010, 51. Forschungskolloquium, 11. und 12. November 2010 an der TU Kaiserslautern, S. 757-768.

1.2 Bisherige Vorgehensweise

Im bisherigen Gedankenmodell zur Dimensionierung der Bewehrung für abfließende Hydratationswärme ist der Zeitpunkt der Rissbildung von großer Bedeutung. Zu diesem Zeitpunkt wird gewährleistet, dass die Rissbreite im Bereich der Bewehrung das gewünschte Maß nicht überschreitet. Basierend auf der Kenntnis, dass die Zwangsbeanspruchung zu einer sukzessiven Rissbildung führt und somit die Zwangskraft bei gewöhnlicher Verformungseinwirkung ($\epsilon \leq 0,8 \text{ ‰}$, entspricht $\Delta T \leq 80\text{K}$) die Risslast nicht übersteigt, stellt die Risslast F_{cr} die obere Grenze der Zwangskraft dar, siehe Abbildung 1.

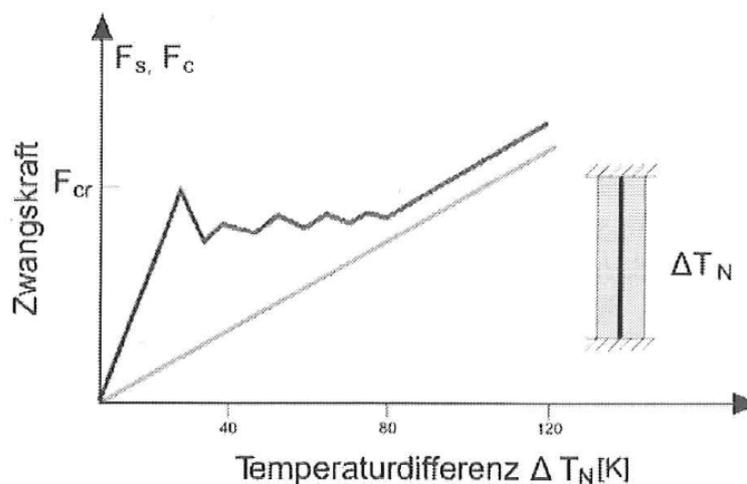


Abbildung 1: Begrenzung der Zwangskraft durch Rissbildung, [2]

Um die Bewehrung dimensionieren zu können, muss in diesem Modell die Schnittgröße zum Risszeitpunkt bekannt sein. Für diese Schnittgröße erfolgt eine Dimensionierung der Bewehrung zur Begrenzung der Rissbreite.

Mit der Ausgabe 2008 der DIN 1045-1 [3] wird dazu zwischen dünnen ($h < 5 \cdot d_1$) und dickeren Bauteilen unterschieden. Wesentlicher Punkt ist dabei, dass die Einhaltung der Rissbreite nur für die Zwangskraft in der Wirkungszone der Bewehrung erforderlich ist. Dies wird mit der günstigen Wirkung der sekundären Rissbildung begründet. Zusätzlich ist sicher zu stellen, dass bei Trennrissbildung die Bewehrung nicht fließt und große Rissbreiten vermieden werden. Dies wird erreicht, indem die Risskraft die Streckgrenze der Bewehrung nicht überschreiten darf.

Der Faktor k zur Berücksichtigung von Eigenspannungen darf bei der Ermittlung der Risskraft auf $k = 0,5$ abgemindert werden, wenn die Querschnittsdicke $h > 0,8$ m ist. Zusätzlich darf die Bewehrung um 15 % reduziert werden, wenn langsam erhärtende Zemente ($r \leq 0,3$) zum Einsatz kommen.

Rechnerische Untersuchungen zu dem verwendeten Gedankenmodell liegen nur punktuell vor, [4], [5], [6]. Eine quantitative Berücksichtigung der qualitativ beschriebenen Effekte ist nicht gegeben. Von entscheidender Bedeutung ist die Festlegung der Zugfestigkeit zum Risszeitpunkt. Nach [3] darf 50 % der mittleren Zugfestigkeit nach 28 Tagen angesetzt werden, was den Bauausführenden durch Hinweise in der Baubeschreibung und auf den Ausführungsplänen zur Berücksichtigung bei der Festlegung des Betons rechtzeitig mitzuteilen ist. Aus baupraktischen Erfahrungen heraus muss bezweifelt werden, dass diese Vorgehensweise geeignet ist, die Zugfestigkeit zum Risszeitpunkt zu begrenzen.

Nur wenn der Zeitpunkt der Rissbildung nicht mit Sicherheit innerhalb der ersten 28 Tagen liegt, ist mit $f_{ct,eff} = 3,0$ N/mm² zu rechnen. Eine Entscheidungshilfe gibt es nicht. Dafür beeinflusst die Entscheidung den Bewehrungsgehalt direkt mit einem Faktor > 2 . Ohne die Berücksichtigung der Reduktion der Zugfestigkeit zum Risszeitpunkt führt das Bemessungskonzept zu extrem unwirtschaftlichen Bewehrungsgehalten.

Bödefeld: Rissmechanik in dicken Stahlbetonbauteilen
bei abfließender Hydratationswärme.

S.759

In: W. Breit, W. Kurz, J. Schnell, C. Kohlmeyer (Hrsg.): Beiträge zum Doktorandensymposium 2010, 51. Forschungskolloquium, 11. und 12. November 2010 an der TU Kaiserslautern, S. 757-768.

2 Analyse des Rissbildungsprozesses

2.1 Rechenmodell

Um die Wechselwirkung zwischen den einzelnen Parametern während des Rissbildungsprozesses gezielt untersuchen zu können, wird im Rahmen dieser Arbeit die Zwangsbeanspruchung durch die Betrachtung eines Bereiches zwischen zwei Primärrissen idealisiert (Abbildung 2). Hiermit kann das eigentlich dreidimensionale Problem durch ein ebenes Modell vereinfacht und ausreichend genau beschrieben werden. Der Vergleich mit der Realität ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Länge des Modells entspricht dem Abstand zweier Primärrisse und wird entsprechend dem Untersuchungsziel angepasst. Die Breite der Scheibe entspricht der Wanddicke und wird im Folgenden als Querschnittsdicke h bezeichnet. Die Höhe der heraus getrennten Scheibe ist für die Untersuchung ohne Bedeutung. Zur numerischen Modellierung ist es ausreichend, ein Viertel der Scheibe abzubilden, da die Symmetrieeigenschaften ausgenutzt werden können, vgl. Abbildung 3a. Die Ermittlung der Spannungen während der Betonerhärtung erfolgt mit der Methode der finiten Elemente (FEM) an dem zweidimensionalen Modell gemäß Abbildung 3b. Am linken Rand befinden sich zwischen der Festhaltung und dem Betonkontinuum diskrete Risselemente zur Simulation des Primärrisses. Die Festhaltung liegt mitten im Riss. Die Zugfestigkeit der Elemente des Betonkontinuums besitzt keine Begrenzung, womit die Verformungsfreiheit konservativ im diskreten Riss gebündelt wird. Zusätzlich wird das Modell um Bewehrung erweitert, die mit Verbundelementen an den Beton gekoppelt ist.

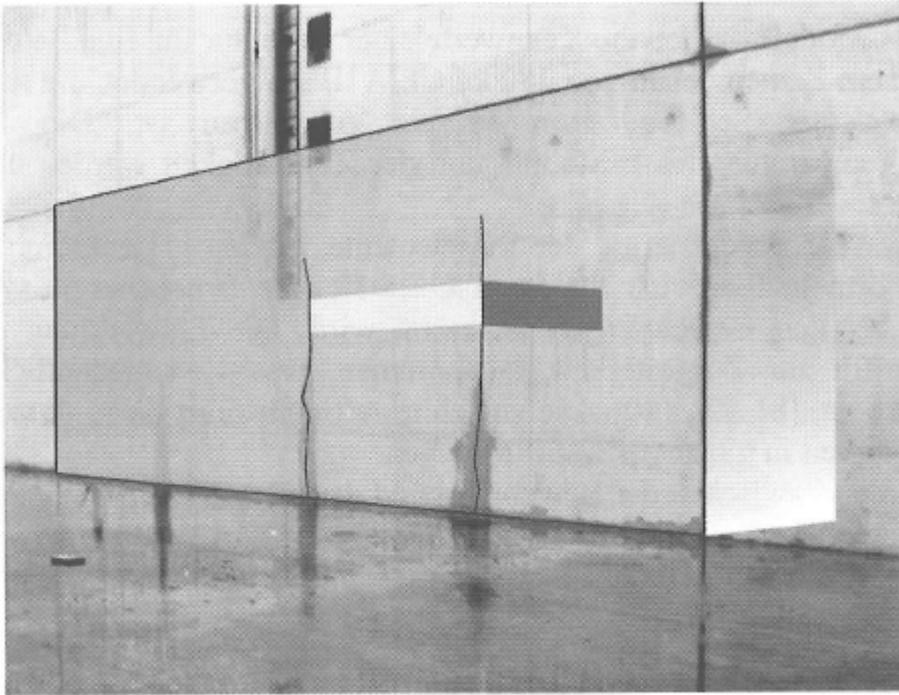


Abbildung 2: Idealisierung des Systems

Bödefeld: Rissmechanik in dicken Stahlbetonbauteilen bei abfließender Hydratationswärme. S.760
In: W. Breit, W. Kurz, J. Schnell, C. Kohlmeyer (Hrsg.): Beiträge zum Doktorandensymposium 2010, 51. Forschungskolloquium, 11. und 12. November 2010 an der TU Kaiserslautern, S. 757-768.

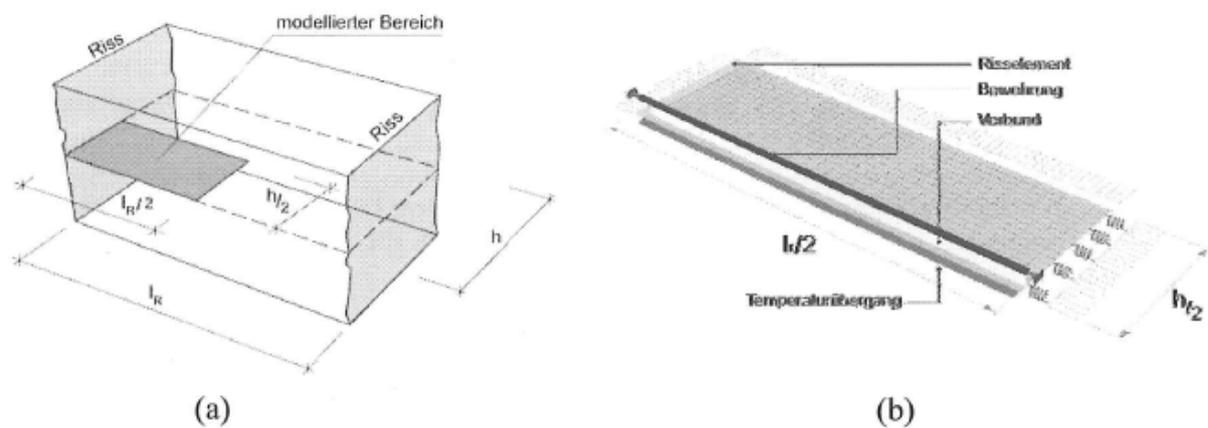


Abbildung 3: Darstellung des Rechenmodells

Die während der Hydratation auftretende Wärme kann nur über die simulierte Oberfläche abfließen. An den drei anderen Rändern findet kein Wärmeaustausch statt (adiabatische Lagerung).

Eine äußere Verformungsbehinderung wird durch den rechten, elastisch gelagerten Rand abgebildet, bei dem über eine Kopplung der Knoten ein Ebenbleiben erzwungen wird. Mit der Wahl der Federsteifigkeit c kann der Zwang gesteuert werden. Wird die Steifigkeit zu $c=0$ gesetzt und die Kopplung der Knoten aufgehoben, erfährt das Modell keinen äußeren Zwang sondern es entsteht ein reiner Eigenspannungszustand. Mit $c \rightarrow \infty$ wird das System voll gezwängt. Die Eigenspannungen werden in diesem Fall mit zentrischem Zwang überlagert.

Für das Basis-Modell werden die Kennwerte einer Rezeptur für eine Betonfestigkeitsklasse C 25/30 mit einem Zementgehalt von 280 kg CEM H/B-S verwendet, die für den Neubau der Kammerwände einer Schleuse zum Einsatz gekommen ist. Die Entwicklung der adiabatischen Temperatur, des E-Moduls und der Zugfestigkeit werden über die wirksame Zeit formuliert.

Die Werte für die Bruchenergie der Risselemente werden [7] entnommen. Mit den dort angegebenen Formeln lässt sich für einen C 25/30 eine Bruchenergie von $G_F = 87 \text{ N/m}$ ermitteln, die bei den Berechnungen angesetzt wird. Die Entwicklung der Bruchenergie $G_F(t_{\text{eff}})$ wird affin zur Zugfestigkeit angenommen, was verschiedentlich mit Versuchen bestätigt worden ist, [8], [9], [10]. Die gewählte Affinität führt dazu, dass die Bruchenergie und die Zugfestigkeit in gleichem Maße ansteigen.

Um den Verbund zwischen der Bewehrung und dem Beton realistisch zu erfassen, werden Verbundelemente zwischen Bewehrung und Beton eingeführt. Verwendet wurde dabei das in [11] aufgestellte Verbundgesetz mit c als freiem Parameter und 31 als Grenzschlupf, ab dem τ_{max} übertragen werden kann:

$$\begin{aligned} \tau(s) &= c \cdot \left(5 \cdot \left(\frac{s}{s_1} \right) - 4,5 \cdot \left(\frac{s}{s_1} \right)^2 + 1,4 \cdot \left(\frac{s}{s_1} \right)^3 \right) && \text{für } 0 < s \leq s_1 \\ \tau(s) &= 1,9 \cdot c && \text{für } s \geq s_1 \end{aligned} \quad (1)$$

Für die angesetzte Rezeptur ergibt sich nach [7] eine maximal übertragbare Schubspannung von $\tau_{\text{max}} = \tau(s \geq s_1) : 5,8 \text{ N/mm}^2$.

Bödefeld: Rissmechanik in dicken Stahlbetonbauteilen
bei abfließender Hydratationswärme. S.761
In: W. Breit, W. Kurz, J. Schnell, C. Kohlmeyer (Hrsg.): Beiträge zum Doktorandensymposium 2010,
51. Forschungskolloquium, 11. und 12. November 2010 an der TU Kaiserslautern, S. 757-768.

Während der Erhärtung muss die Entwicklung des Verbundes berücksichtigt werden, um bei jungem Beton die Verbundsteifigkeit nicht zu überschätzen. Die übertragbare Verbundspannung wur-

Autorenfassung

Bödefeld: Rissmechanik in dicken Stahlbetonbauteilen bei abfließender Hydratationswärme, 2010

de dazu an die Entwicklung der Zugfestigkeit gekoppelt, indem für den Parameter c des Verbundgesetzes nicht die mittlere Zugfestigkeit f_{ctm} - wie in [11] empfohlen - sondern die sich entwickelnde Zugfestigkeit $f_{ct,eff}$ angesetzt wird.

Sollen die mit den Verbundspannungs-Schlupf-Beziehungen nach [11] ermittelten Rissbreiten mit den analytischen Verfahren zur Rissbreitenbegrenzung z.B. nach [3] und [12] verglichen werden, ist eine Modifikation des Parameters s_1 erforderlich. Die durch umfangreiche Versuche abgesicherten Rissbreitennachweise nach [3] legen - basierend auf [7] - eine mittlere Verbundspannung von $\tau_{sm} = 1,8 f_{ct,eff}$ im Lasteinleitungsbereich zu Grunde. Bei einer zu erwartenden Rissbreite im Bereich von $0,15 \leq w \leq 0,25$ mm ergibt sich für die angenommene, maximal übertragbare Schubspannung τ_{max} ein Grenzschlupf von $s_1 = 0,01$ mm.

2.2 Reiner Eigenspannungszustand

Um sich dem Problem zu nähern, werden zu Beginn Berechnungen ohne Begrenzung der Zugspannungen im diskreten Risselement und ohne Bewehrungselemente durchgeführt. Es können damit einige allgemeingültige Erkenntnisse gewonnen werden, die teilweise in [2] veröffentlicht wurden.

Zur Darstellung des Ablaufs der Temperaturen und Spannungen während der Hydratation werden in Abbildung 4 beide Verläufe für den Rand- und den Kernbereich über die Zeit aufgetragen. Die Ergebnisse wurden für einen Querschnitt mit $h = 0,8$ m gewonnen, der im Allgemeinen die untere Grenze für massive Betonquerschnitte darstellt.

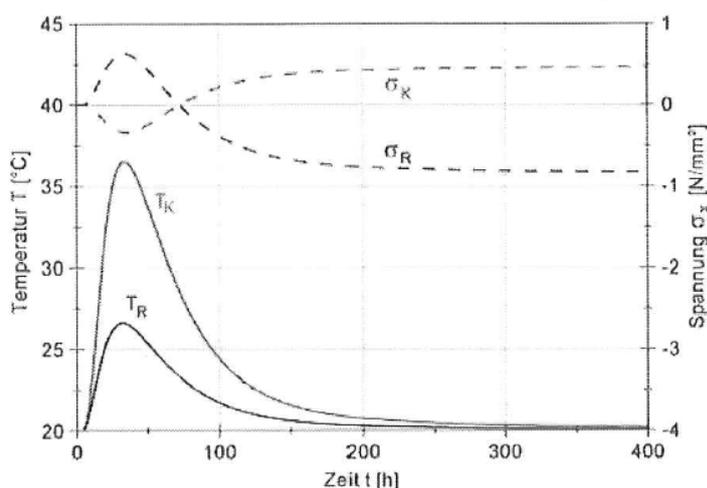


Abbildung 4: Temperatur und Spannung im Rand- und Kernbereich, $h = 0,8$ m

Es wird deutlich, dass die Temperaturen im Kern signifikant höher ansteigen als im Randbereich, was zu einer entsprechenden Temperaturdifferenz führt. Dabei wird im Kern die adiabatische Temperaturerhöhung nicht erreicht, womit bei den gewählten Randbedingungen erst bei einem Quer-

Autorenfassung

Bödefeld: Rissmechanik in dicken Stahlbetonbauteilen bei abfließender Hydratationswärme, 2010

schnitt von ca. $h \geq 4$ m zu rechnen ist. Das Temperaturmaximum wird für den Rand und den Kern nahezu gleichzeitig erreicht. Dieser Effekt hängt ebenfalls mit der Querschnittsabmessung zusammen. Bei dickeren Querschnitten wird das Maximum im Kern später erreicht als im Randbereich. Die Temperaturen gleichen sich nach ca. $t = 400$ h (entspricht 17 d) der Umgebungstemperatur von $T_{\text{Umg}} = 20^\circ\text{C}$ an.

Bödefeld: Rissmechanik in dicken Stahlbetonbauteilen
bei abfließender Hydratationswärme.

S.762

In: W. Breit, W. Kurz, J. Schnell, C. Kohlmeyer (Hrsg.): Beiträge zum Doktorandensymposium 2010, 51. Forschungskolloquium, 11. und 12. November 2010 an der TU Kaiserslautern, S. 757-768.

In einer ersten Phase werden im Randbereich Zugspannungen und im Kernbereich Druckspannungen aufgebaut. Der Kernbereich würde bei freier Verformung eine große Temperaturexansion erfahren, die durch den Randbereich, der sich wesentlich weniger erwärmt, verhindert wird. Die maximalen Randzugspannungen treten zum gleichen Zeitpunkt wie die maximalen Kerntemperaturen auf, erst mit größeren Querschnittsdicken eilen die maximalen Randspannungen voraus.

Der Effekt kehrt sich in der zweiten Phase während der Abkühlung um, einhergehend mit einem Wechsel der Spannungen: der Randbereich erfährt Druckspannungen, der Kernbereich Zugspannungen. Es ist ersichtlich, dass die Zugspannungen im Randbereich während der ersten Phase vom Betrag her größer sind als die Zugspannungen im Kernbereich in der zweiten Phase. Zusätzlich sind die Ordinaten im Randbereich immer größer als im Kernbereich, was darauf hin deutet, dass die im Kernbereich betroffene Fläche jeweils signifikant größer ist als die im Randbereich betroffenen Fläche, da die Eigenspannungen über den Querschnitt integriert keine Schnittgröße ergeben.

Es lassen sich damit zwei charakteristische Zeitpunkte erkennen, die für die Betrachtung der Spannungen in dicken Querschnitten von großer Bedeutung sind:

- der Zeitpunkt der maximalen Zugspannungen im Randbereich, die ungefähr zum Zeitpunkt des Temperaturmaximums im Kern auftreten,
- der Zeitpunkt der maximalen Kernzugspannungen, die sich bei Temperaturengleich einstellen.

Im Folgenden werden die Spannungsverteilungen zu diesen beiden Zeitpunkten für Querschnittsdicken zwischen $h = 0,3$ m und $h = 10$ m dargestellt. Um die Ergebnisse vergleichen zu können, sind in Abbildung 5 die Spannungen über die normierte Querschnittsdicke aufgetragen.

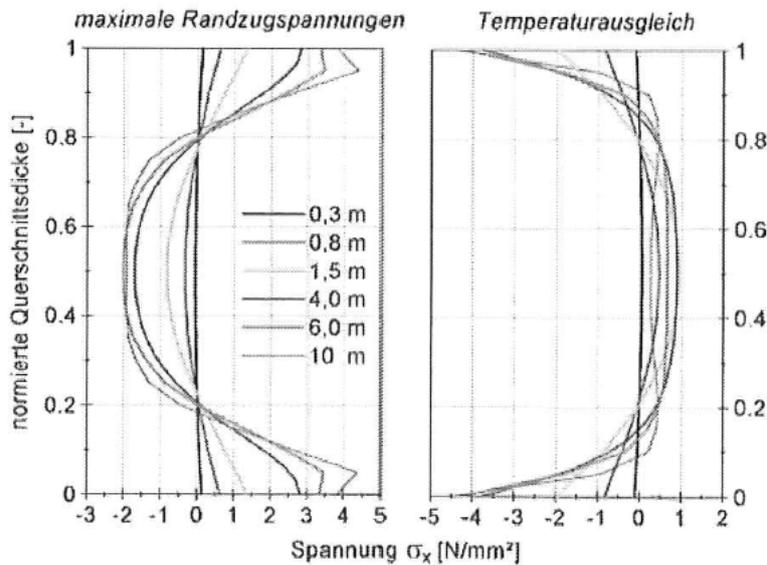


Abbildung 5: Eigenspannung zu den charakteristischen Zeitpunkten

Es wird deutlich, dass mit zunehmender Querschnittsdicke die Eigenspannungen ansteigen. Bei einer Querschnittsdicke $h = 0,3$ m sind die Eigenspannungen von untergeordneter Bedeutung, erst ab $h = 0,8$ m Querschnittsdicke sind Spannungen mit einer relevanten Größenordnung erkennbar. Die Annahme der DIN 1045-1, 2008, ab einer Bauteildicke von $h = 0,8$ m die Eigenspannungen mit einem konstanten Faktor $k = 0,8$ zu berücksichtigen, wird damit nicht bestätigt.

Bödefeld: Rissmechanik in dicken Stahlbetonbauteilen
bei abfließender Hydratationswärme.

S.763

In: W. Breit, W. Kurz, J. Schnell, C. Kohlmeyer (Hrsg.): Beiträge zum Doktorandensymposium 2010, 51. Forschungskolloquium, 11. und 12. November 2010 an der TU Kaiserslautern, S. 757-768.

Der unter Zug stehende randnahe Bereich des Querschnitts beträgt bei allen Querschnittsdicken ca. 20% der Querschnittsdicke pro Seite. Wird die übertragbare Zugspannung im diskreten Riss auf die Zugfestigkeit begrenzt, zeigt sich ab einer Querschnittsdicke von $h > 1,5$ m eine Überschreitung der sich entwickelnden Zugfestigkeit. Da der Beton auf Grund des Tension-Softening-Verhaltens auch anschließend noch Zugspannungen übertragen kann, treten erst ab einer Querschnittsdicke von $h > 3$ m oberflächennahe Risse auf, die keine Zugspannungen mehr übertragen können.

Im Kern ist auch bei $h = 4$ m nicht mit Rissbildung zu rechnen. Ab einer Querschnittsdicke von $h = 1,5$ m nimmt der unter Zug stehende Bereich im Kern zu, was zu einer weiter ansteigenden Druckspannung am Rand führt. Die zum Zeitpunkt der Randzugspannung aufgetretenen Risse werden damit geschlossen und überdrückt.

Wird im Rechenmodell zusätzlich Bewehrung berücksichtigt, werden der Zwang und damit die Eigenstressungen im Querschnitt gehalten. Der bewehrte Querschnitt verhält sich nahezu identisch mit einem Querschnitt im Zustand I, vgl. Abbildung 6 zum Zeitpunkt der maximalen Randzugspannungen (a) bzw. zum Zeitpunkt des Temperaturausgleichs (b).

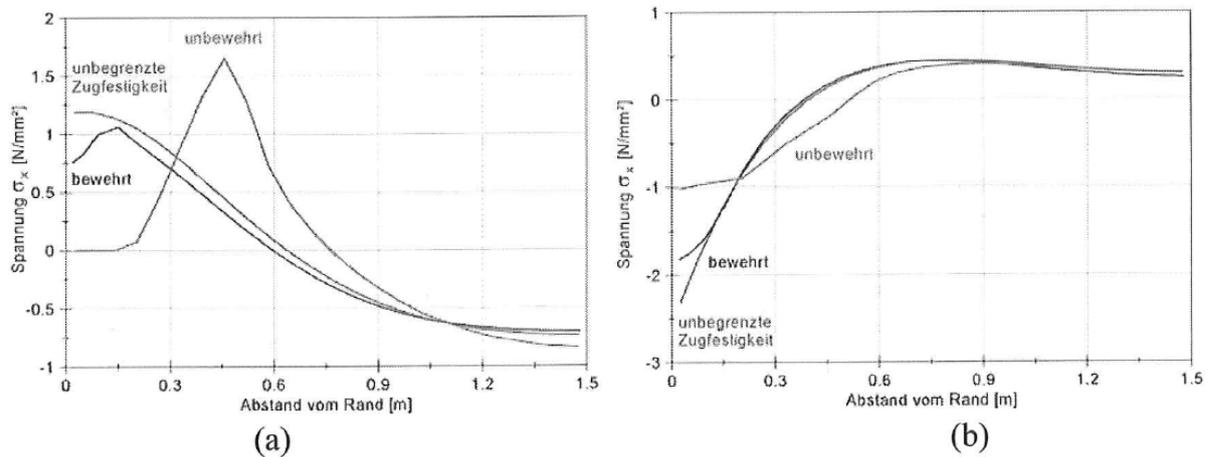


Abbildung 6: Einfluss der Bewehrung für $h = 3 \text{ m}$

Es kann gezeigt werden, dass relativ geringe Bewehrungsquerschnitte in der Größenordnung der konstruktiven Mindestbewehrung nach [13] ausreichen, um eine Rissbreite von $w_k = 0,25 \text{ mm}$ sicherzustellen. Die oberflächennahen Risse sind zum Ende der Hydratationsphase komplett überdrückt.

2.3 Zentrischer Zwang

Die Berechnungen in Abschnitt 2.2 haben gezeigt, dass es allein aus Eigenspannungen nicht zu Durchrissbildung kommen kann. Es ist daher ein zusätzlicher Zwang erforderlich, um eine Rissbildung zu einem späteren Zeitpunkt zu erzeugen, die dann den gesamten Querschnitt erfasst und zu Durchrissen führt. Dazu wird die Steifigkeit der Lagerung am rechten Rand des Modells auf $c = \infty$ gesetzt, siehe Abbildung 3b.

Der damit entstehenden zentrische Zwang ist in Abbildung 7 für einen 2 m Querschnitt und eine Berechnung ohne Begrenzung der Zugspannungen (Zustand I) dargestellt.

Bödefeld: Rissmechanik in dicken Stahlbetonbauteilen
bei abfließender Hydratationswärme.

S.764

In: W. Breit, W. Kurz, J. Schnell, C. Kohlmeyer (Hrsg.): Beiträge zum Doktorandensymposium 2010,
51. Forschungskolloquium, 11. und 12. November 2010 an der TU Kaiserslautern, S. 757-768.

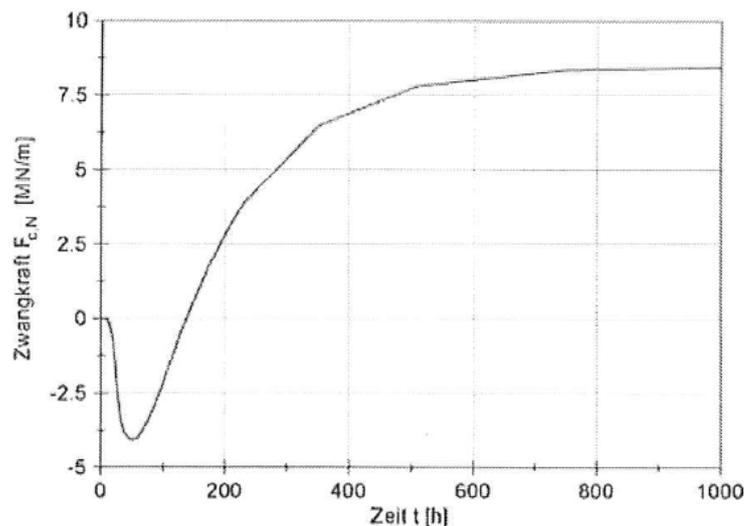


Abbildung 7: Zentrische Zwangskraft für $h = 2$ m

Der Querschnitt erfährt zunächst eine zentrische Druckbeanspruchung, die die parallel entstehenden Randzugspannungen (Eigenspannungen) überdrückt. Erst die Überlagerung zwischen der zentrischen Zwangsbeanspruchung und den Eigenspannungen führt zu einer Überschreitung der Zugfestigkeit. Der Ort im Querschnitt, an dem die Rissbildung beginnt, wandert mit zunehmender Querschnittsdicke nach außen. Zur Verdeutlichung des Sachverhalts ist in Abbildung 8 die Zugspannung zum Risszeitpunkt im Verhältnis zur aktuellen Zugfestigkeit (normierte Spannung σ_x/f_{ct}) und der Ort des Rissursprungs im Verhältnis zur Querschnittsdicke (normierter Abstand vom Rand x_{cr}/h) aufgetragen.

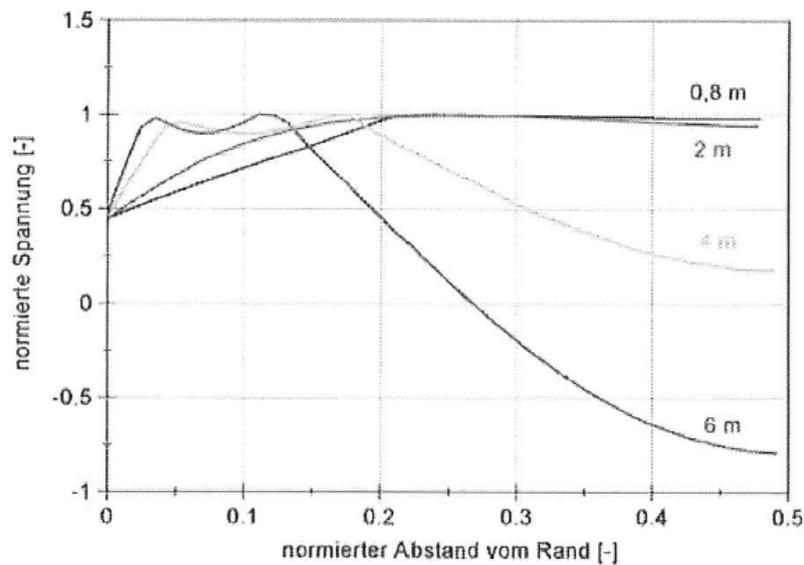


Abbildung 8: Spannungsverteilung zum Risszeitpunkt im diskreten Riss

Während bei dünnen Querschnitten der Risszeitpunkt mit dem Zeitpunkt zusammenfällt, zu dem bereits die Kernzugspannungen auftreten und der Querschnitt von der Mitte reißt, ist bei den dickeren Querschnitten der Einfluss der zeitlich früher auftretenden Randzugspannungen noch deutlich zu erkennen und die Querschnitte reißen in Randnähe. Damit kann gezeigt werden, wie signifikant die Eigenspannungen den Rissprozess beeinflussen. Der Anteil des Querschnitts, in dem zum gleichen Zeitpunkt die Spannung die Zugfestigkeit erreicht, sinkt mit wachsender Querschnittsdicke. Die Spannungsverteilung nähert sich mit zunehmender Querschnittsdicke der Spannungsverteilung bei maximalen Randzugspannungen an. Entsprechend wird der Querschnitt mit $h = 6$ m auch nicht plötzlich durchreißen, wovon bei Querschnitten mit $h = 0,8$ m und $h = 2,0$ m ausgegangen werden kann.

Bödefeld: Rissmechanik in dicken Stahlbetonbauteilen
bei abfließender Hydratationwärme.

S.765

In: W. Breit, W. Kurz, J. Schnell, C. Kohlmeyer (Hrsg.): Beiträge zum Doktorandensymposium 2010, 51. Forschungskolloquium, 11. und 12. November 2010 an der TU Kaiserslautern, S. 757-768.

Mit der Integration der Kurven in Abbildung 8 über den gesamten Querschnitt kann der Faktor k berechnet werden, der den Einfluss der Eigenspannungen gemäß [3] bei der Rissbildung berücksichtigen soll. Hintergrund dabei ist, dass die Eigenspannungen bei durchgehenden Rissen abgebaut werden und so nicht mit Bewehrung abgedeckt werden müssen. Im Widerspruch zu DIN 1045-1, 2008, fällt auf, dass der Faktor k zunächst bis zu einer Querschnittsdicke von $h = 2$ m ansteigt und erst danach abfällt. Der Ansatz von $k = 0,5$ ab einer Querschnittsdicke von $h = 0,8$ m

Autorenfassung

Bödefeld: Rissmechanik in dicken Stahlbetonbauteilen bei abfließender Hydratationswärme, 2010

scheint vor diesem Hintergrund unsicher, die Beschränkung auf $k = 0,5$ auch für größere Querschnittsdicken mit $h \gg 4$ m scheint nach diesen Betrachtungen dagegen sehr konservativ.

Es kann darüber hinaus gezeigt werden, dass bei einem Querschnitt mit einer Dicke von $h = 1,5$ m zum Risszeitpunkt bereits 80 - 90 % der Zugfestigkeit erreicht sind. Eine Reduktion der Zugfestigkeit zum Risszeitpunkt zur Dimensionierung der Bewehrung ist damit bei dicken Querschnitten nicht gerechtfertigt.

Eine Variation der Steifigkeit des rechten Randes simuliert unterschiedliche Behinderungsgrade. Der Rissbildungsprozess wird davon sehr stark beeinflusst. Es ist möglich, sowohl eine Steifigkeit zu wählen, die nicht zu Rissbildung führt, als auch eine Steifigkeit zu wählen, die zu einer sehr großen Zwangskraft im Beton zum Zeitpunkt der Rissbildung führt. Die Festlegung der Risskraft ohne Kenntnis des Behinderungsgrades ist daher mit großen Unsicherheiten behaftet.

Mit der Rissbildung geht die Zwangskraft aus dem Beton in die Bewehrung über, vgl. Abbildung 9. Die auftretende Rissbreite reduziert die Zwangsbeanspruchung dabei sofort, so dass die Zwangskraft in der Bewehrung nach der Rissbildung deutlich kleiner ist als die Zwangskraft im Beton vor der Rissbildung. Im Fall eines 2 m Querschnitts mit einer Bewehrung von $a_s = 20,94$ cm²/m werden beispielsweise nur 20% der Zwangskraft des Betons nach der Rissbildung von der Bewehrung aufgenommen. Zusätzlich begrenzt die am Rand des Querschnitts eingelegte Bewehrung die Rissbreite nur in ihrem Wirkungsbereich. Im Kern des Querschnitts ist eine größere Rissbreite möglich, die bei dickeren Querschnitten die freie Verformung infolge des Abkühlprozesses erreichen kann.

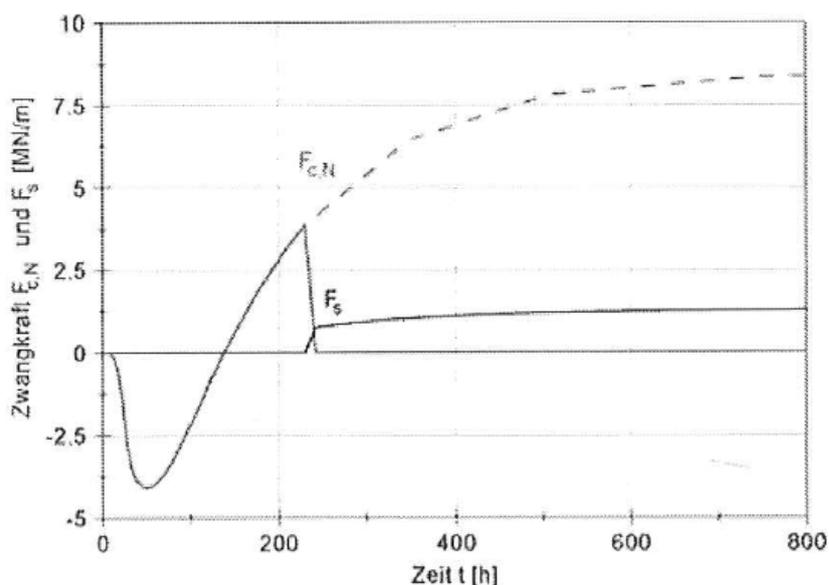


Abbildung 9: Zwangskraft in Beton und Bewehrung, $h = 2$ m

Es wurde bereits darauf hingewiesen, dass der Abstand der Primärrisse, der rechnerisch durch die Modelllänge simuliert wird, sowohl im Modell wie auch in der Realität entscheidenden Einfluss auf das Nachrissverhalten hat. Der Rissabstand wird dabei nur von den äußeren Randbedingungen beeinflusst und ist von der Bewehrungsmenge und der Betonrezeptur unabhängig. In [14] wurden Untersuchungen zum Rissabstand durchgeführt. Es wird gezeigt, dass bei bewehrten Wand-Fundamentalsystemen üblicher Abmessungen der Abstand der Primärrisse der 1,2-fachen Wandhöhe entspricht.

Bödefeld: Rissmechanik in dicken Stahlbetonbauteilen
bei abfließender Hydratationswärme.

S.766

In: W. Breit, W. Kurz, J. Schnell, C. Kohlmeyer (Hrsg.): Beiträge zum Doktorandensymposium 2010, 51. Forschungskolloquium, 11. und 12. November 2010 an der TU Kaiserslautern, S. 757-768.

Abbildung 9 zeigt auch, dass die Zwangskraft in der Bewehrung nach der Rissbildung weiter ansteigt. Dies ist zu erwarten, da die weitere Abkühlung des Querschnitts eine Verkürzung induziert und die Zwangskraft in der Bewehrung deutlich kleiner als die Risskraft des Betonquerschnitts ist. Zum Erreichen der Verformungskompatibilität ist eine Erhöhung der Zwangskraft in der Bewehrung und der Rissbreite erforderlich. Durch eine Variation der Zugfestigkeit kann gezeigt werden, dass die Zugfestigkeit zum Risszeitpunkt für die Spannung in der Bewehrung nach Abschluss der Hydrationsphase irrelevant ist. Vielmehr ist die im Zustand I ermittelte Zwangskraft im Beton ein Maß für die Beanspruchung in der Bewehrung.

Neben den beschriebenen Primärrissen treten im Querschnitt mit zunehmender Dicke auch Sekundärrisse auf, die nur den Wirkungsbereich der Bewehrung erfassen. Zur Analyse der Sekundärrissbildung wurde das Modell um diskrete Sekundärrisse erweitert, deren Lage und Verlauf aus dem Primärriss-Modell ermittelt wurden. Die Neigung der Sekundärrisse kann mit $26,5^\circ$ gegen die Vertikale angenommen werden, ein Rissabstand der Sekundärrisse von 20 cm führt zu plausiblen Ergebnissen.

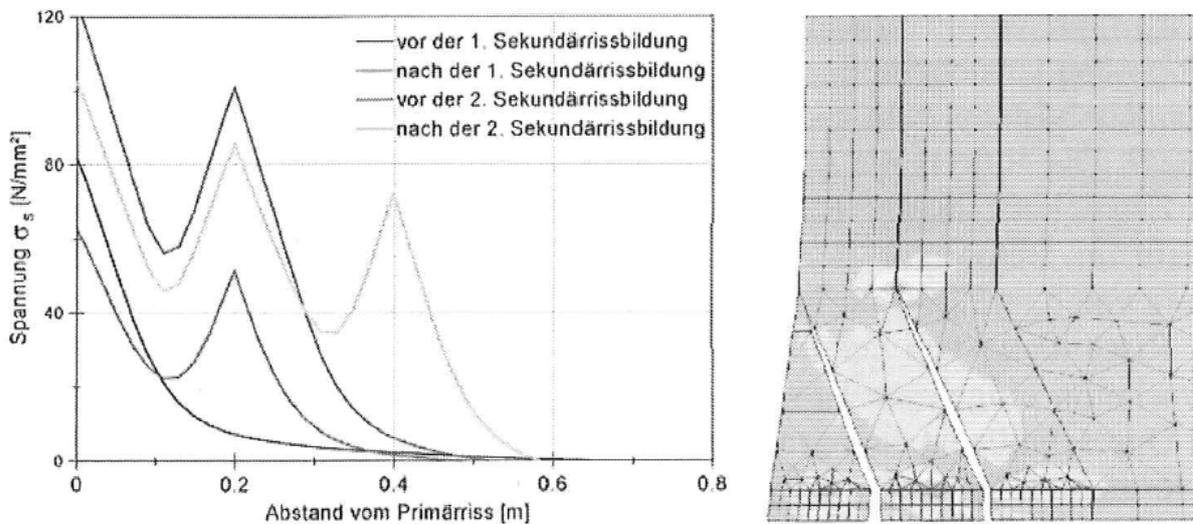


Abbildung 10: Spannungsverlauf und Rissöffnung bei Sekundärrissbildung

Die Ergebnisse zeigen, dass die Zwangsbeanspruchung in der Bewehrung zu Sekundärrissbildung führen kann. Zwischen den Sekundärrissen verbleibt ein Anteil der Spannungen im Beton. Die Spannung in der Bewehrung nimmt daher vom Primärriss zum Sekundärriss sowie zu weiteren Sekundärrissen ab. Eine sukzessive Sekundärrissbildung ist damit nur möglich, wenn die Spannung in der Bewehrung an der Stelle des Primärrisses weiter ansteigt. Die Auswertung einer Parametervariation zeigt, dass der Wirkungsbereich der Bewehrung sehr gut mit der Formel aus [4] abgebildet werden kann.

3 Verformungsorientierter Ansatz

Um das Verfahren auf eine Bemessung im Hinblick auf die Verformungskompatibilität umzustellen, kann die im Zustand I ermittelte zentrische Zwangskraft im Beton in eine Zwangsverformung umgerechnet werden. Dazu wird ein Ansatz über eine äquivalente Temperaturdifferenz gewählt, die die aufzunehmende Verformung charakterisiert:

Autorenfassung

Bödefeld: Rissmechanik in dicken Stahlbetonbauteilen bei abfließender Hydratationswärme, 2010

Bödefeld: Rissmechanik in dicken Stahlbetonbauteilen
bei abfließender Hydratationswärme.

S.767

In: W. Breit, W. Kurz, J. Schnell, C. Kohlmeyer (Hrsg.): Beiträge zum Doktorandensymposium 2010, 51. Forschungskolloquium, 11. und 12. November 2010 an der TU Kaiserslautern, S. 757-768.

$$\Delta T_N = \frac{N_{c,u}}{E_{c0m} \cdot \alpha_T \cdot h \cdot b} \quad (2)$$

mit

ΔT_N	äquivalente Temperaturdifferenz für zentrischen Zwang,
$N_{c,u}$	Zwangkraft im Beton bei Temperatenausgleich,
E_{c0m}	mittlere Elastizitätsmodul des Betons als Tangentenmodul,
α_T	Wärmeausdehnungskoeffizient,
h	Querschnittsdicke,
b	Querschnittsbreite.

Die äquivalente Temperaturdifferenz kann über die adiabatische Temperaturerhöhung formuliert werden. Die zwischen zwei Primärrissen im Abstand l_{cr} erforderliche Verformung w_{frei} zur Kompensation des Zwangs ermittelt sich dann zu:

$$w_{frei} = \Delta T \cdot \alpha_T \cdot l_{cr} \quad (3)$$

Eine Auswertung der Analyse zur Sekundärrissbildung zeigt, dass sich das aus dem Primärriss w^P und n Sekundärrissen ergebende Verformungspotenzial über die Rissbreite des Primärrisses formulieren lässt. Die zur Verformungskompatibilität erforderliche Anzahl an Sekundärrissen ergibt sich damit zu:

$$n \geq 1,1 \cdot \left(\frac{\Delta T_N \cdot \alpha_T \cdot l_{CR}}{w^P} - 1 \right) \quad (4)$$

Unter Berücksichtigung des im Beton verbleibenden Anteils der Verbundspannung ergibt sich die erforderliche Stahlspannung im Primärriss in Abhängigkeit von n :

$$\sigma_{s,erf} = (1 + n \cdot 0,3) \cdot \frac{f_{ctm}}{eff \rho} \quad (5)$$

Gleichzeitig darf die Rissbreite im Primärriss die angestrebte Rissbreite nicht überschreiten:

$$\sigma_{s,zul} = \frac{w^P \cdot eff \rho \cdot E_s}{0,18 \cdot d_s} + \frac{0,39 \cdot f_{ctm}}{eff \rho} \quad (6)$$

Bödefeld: Rissmechanik in dicken Stahlbetonbauteilen
bei abfließender Hydratationswärme.

S.768

In: W. Breit, W. Kurz, J. Schnell, C. Kohlmeyer (Hrsg.): Beiträge zum Doktorandensymposium 2010, 51. Forschungskolloquium, 11. und 12. November 2010 an der TU Kaiserslautern, S. 757-768.

4 Zusammenfassung

Um die Rissmechanik in dicken Stahlbetonbauteilen während der Hydratationsphase zu analysieren, wurden FE-Untersuchungen am idealisierten Modell einer dicken Stahlbetonscheibe durchgeführt. Es zeigt sich, dass der bisherige, Risskraft-orientierte Ansatz Schwächen aufweist. Die gewählten Faktoren zur Reduktion der sich ergebenden Bewehrung (z.B. k , $f_{ct,eff}$) entbehren einer mechanischen Begründung. Bereits in [15] wurde darauf hingewiesen, dass Zwang ein geometrisches Verträglichkeitsproblem ist. Wird im Zustand I die sich bis zum Temperatenausgleich ergebende Betonzwangkraft ermittelt und in eine äquivalente Temperaturdifferenz umgerechnet, lässt sich ein verformungsorientierter Ansatz formulieren. Der behinderten Zwangverformung wird ein Verformungspotenzial aus Primär- und Sekundärrissen gegenübergestellt. Es ergibt sich eine geschlossene Formulierung für den erforderlichen Bewehrungsquerschnitt. Weitergehende Untersuchungen haben gezeigt, dass für die Praxis eine Festlegung der äquivalenten Temperaturdifferenz in Abhängigkeit der adiabatischen Temperaturerhöhung unter Berücksichtigung einiger, weniger Parameter wie Querschnittsdicke und Betonfestigkeitsklasse möglich ist.

Literatur

- [1] Bödefeld, J.: Rissmechanik in dicken Stahlbetonbauteilen bei abfließender Hydratationswärme, Mitteilungsblatt Nr. 92 der Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, 2010

Autorenfassung

Bödefeld: Rissmechanik in dicken Stahlbetonbauteilen bei abfließender Hydratationswärme, 2010

- [2] Tue, V.T., Dietz, J., Bödefeld, J.: Einfluss der Eigenspannung auf die Rissbildung bei dicken Bauteilen im jungen Betonalter, in: Beton- und Stahlbetonbau 102, Heft 4, Berlin 2007
- [3] DIN 1045-1: Tragwerke aus Stahlbeton und Spannbeton, Teil 1: Bemessung und Konstruktion, Berlin, August 2008
- [4] Fischer, A.: Modelluntersuchungen zur Ermittlung des Rissabstandes dicker Bauteile aus Stahlbeton, Fortschrittsberichte VDI, Reihe 4: Bauingenieurwesen, Nr. 118, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 1993
- [5] Helmus, M.: Experimental Approach To The Minimum Reinforcement In Thick Concrete Elements, in: Darmstadt Concrete, Vol. 2, Darmstadt, 1987
- [6] Puche, M.: Rissbreitenbeschränkung und Mindestbewehrung bei Eigenspannungen und Zwang, DAfStb, Heft 396, Beuth Verlag, Berlin, 1988
- [7] GEB-Bulletin d'Information: CEB-FIP Model Code 1990, Design Code, Verlag Thomas Telford, London, 1993
- [8] Brameshuber, W., Hilsdorf, H.K.: Development of Strength and Deformability of Very Young Concrete, SEM/RILEM International conference on fracture of concrete and rock, Houston, 1987
- [9] de Schutter, G., Taerwe, L.: Fracture Energy of Concrete at Early Ages, in: Materials and Structures, Vol. 30, 1997
- [10] Gutsch, A.: Stoffeigenschaften jungen Betons - Versuche und Modelle, Dissertation TU Braunschweig, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Heft 140, Braunschweig, 1998
- [11] Dörr, K.: Ein Beitrag zur Berechnung von Stahlbetonscheiben unter besonderer Berücksichtigung des Verbundverhaltens, Dissertation TH Darmstadt, 1980
- [12] Erläuterungen zu DIN 1045-1, DAfStb, Heft 525, Berlin, 2003
- [13] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen Wasserbau, Leistungsbereich 215 Beton und Stahlbeton, ZTV-W LB 215, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen, Bonn, 2004
- [14] Tue, N.V., Schlicke, D.: Untersuchungen zum Rissabstand bei massiven Wand-Fundament-Systemen infolge der Beanspruchung aus der Hydratationswärme, Bericht der König und

Autorenfassung

Bödefeld: Rissmechanik in dicken Stahlbetonbauteilen bei abfließender Hydratationwärme, 2010

Heunisch Planungsgesellschaft mbH im Auftrag der Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe, Leipzig, 2009, unveröffentlicht

[15] Menn, C.: Zwang und Mindestbewehrung, in: Beton- und Stahlbetonbau 81, Heft 4, Verlag Ernst&Sohn, Berlin, 1986