

Zwangbeanspruchungen und Rissbreitenentwicklung im Nutzungszeitraum unter Berücksichtigung der erhärtungsbedingten Spannungsgeschichte

Katrin Turner

Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, Deutschland

Dirk Schlicke

Institut für Betonbau, TU Graz, Österreich

KURZFASSUNG:

In Kooperation mit der Bundesanstalt für Wasserbau wird derzeit am Institut für Betonbau der TU Graz ein mechanisch konsistentes Bemessungsmodell für Rissbreitenbegrenzung von zwangbeanspruchten Stahlbetonbauteilen entwickelt. Hierbei wird unter Einhaltung der Verformungskompatibilität die gesamte Bauteillebensdauer betrachtet. Die Grundlagen für das Bemessungsmodell wurden in [1] und [2] geschaffen, wobei diese zunächst die erhärtungsbedingte Zwangbeanspruchung betrachten. Das Modell ist allerdings so konzipiert, dass die Überlagerung mit Zwangbeanspruchungen im Nutzungszeitraum möglich ist.

In diesem Aufsatz werden aktuelle Ergebnisse zu der zu erwartenden Spannungsgeschichte zwangbeanspruchter Bauteile vorgestellt. Auf Basis von Versuchen mit eigens konzipierten Stahlrahmen kann die Spannungsgeschichte von Betonbauteilen realistisch simuliert werden. Ausgehend von der erhärtungsbedingten Zwangbeanspruchung, die zu einem bestimmten Spannungsniveau und Risszustand im Bauteil führt, wird die zeitliche Entwicklung der Zwangkraft im Nutzungszeitraum untersucht. Der Einfluss von Viskoelastizität, Rissbildung sowie von lokalen Effekten wie Verbundkriechen kann dabei erfasst werden.

1 Motivation

Bei dem risskraftbasierten Bemessungskonzept zur Ermittlung der Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite nach EN 1992-1-1 [3] wird die Überlagerung von erhärtungsbedingten Zwangbeanspruchungen und den Zwangbeanspruchungen im Nutzungszeitraum nicht explizit berücksichtigt.

Wie in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** beschrieben, stützt sich diese Vorgehensweise auf die Annahme, dass einerseits die Schnittgröße des frühen Zwangs infolge Kriechen des Betons abgebaut wird. Andererseits ist aufgrund der geringen Steifigkeit nach der Rissbildung die Schnittgröße des späten Zwangs bei vergleichbarer Verformungseinwirkung entsprechend klein. Eingehende Untersuchungen zur Überlagerung der Schnittgrößen infolge frühen und späten Zwangs fehlen jedoch bisher.

Mit diesem F+E-Vorhaben soll gezeigt werden, ob diese Annahmen zu Bemessungsergebnissen auf der sicheren Seite führen oder für eine dauerhafte Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit eine Überlagerung von frühem und spätem Zwang bei der Bemessung erforderlich sein kann.

2 Versuchskonzept

2.1 Versuchsaufbau

Die Untersuchung der Spannungsgeschichte von gezwängten Betonbauteilen wird von zwei eigens dafür konzipierten Stahlrahmen (Abbildung 1) ermöglicht.

Zwischen deren Häuptern werden Stahlbetonstäbe (Querschnitt 25 x 25 cm, Bewehrung 4Ø14) horizontal hängend einbetoniert. Gemäß der Vorstel-

lung entsprechen diese einer bewehrten Querschnittsfaser in einem Bauteil und erfahren eine wirklichkeitsnahe Zwängungssituation.

In den Stäben wird nach dem Betoneinbau durch ein variables Dämmsystem eine Temperaturschicht aus erhärtungsbedingter Hydratationswärmefreisetzung vergleichbar mit massigen Bauteilen erreicht. Das Verformungsbestreben infolge der Temperaturänderung und autogenem Schwinden kann im Stahlrahmen zu einem großen Anteil behindert werden und führt zum Aufbau einer Zwangskraft.



Abbildung 1 Versuchsräumen

Nach dem Erreichen der Ausgleichstemperatur wird die Verformungseinwirkung im Nutzungszeitraum mit im Versuchsräumen angeordneten Hydraulikzylindern (siehe Abbildung 2) über eine Relativverschiebung der Rahmenhäupter herbeigeführt. Diese zusätzlichen Verformungseinwirkungen können so eingestellt werden, dass sie einer saisonalen Temperaturänderung oder einer Überlagerung mit Lasteinwirkung entsprechen.

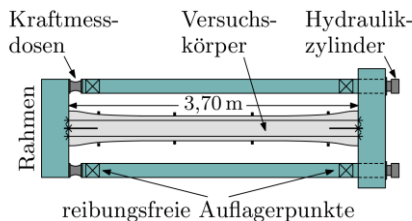


Abbildung 2 schematische Darstellung der Versuchsräumen

Es werden immer zwei Stahlbetonbalken, die unterschiedliche Randbedingungen aufweisen, parallel untersucht. Dadurch können insbesondere aus dem Vergleich der Messergebnisse neue Erkenntnisse zum Bauteilverhalten gewonnen werden.

2.2 Messungen

Die Entwicklung der Zwangskraft wird mit Kraftmessdosen aufgezeichnet. Durch die Überwachung der Temperatur der Prüfkörper sowie deren Ver-

formung entlang ihrer Längsachse wird die Geschlossenheit des Messsystems gewährleistet. Weiter werden Rissbewegung, die Betondehnung zwischen den Rissen, Kolbenweg der Hydraulikzylinder und das Raumklima aufgezeichnet.

Umfassende Untersuchungen an Begleitkörpern dienen zur Überprüfung der thermischen und mechanischen Materialeigenschaften des verwendeten Betons.

2.3 Versuchsprogramm

Beginnend im Oktober 2012 wurden im Labor für konstruktiven Ingenieurbau der technischen Universität Graz vier Versuchsserien mit je zwei Versuchskörpern durchgeführt. Die Serien dauerten zwischen ein und sieben Monaten und es wurde ein für Schleusen-kammerwände üblicher Beton der Festigkeitsklasse C 25/30 mit 300 kg CEM III/A 32,5N verwendet.

2.3.1 Versuchsserien 1 & 2

In den ersten beiden Versuchsserien wurde vorrangig der Einfluss der Nachbehandlung und der zeitabhängigen Volumenänderung des Betons unter Belastung (Viskoelastizität) auf den Aufbau der Zwangbeanspruchung im Erhärtungszeitraum betrachtet.

Zu diesem Zweck wurden Schalung und Dämmung an den Versuchskörpern zu unterschiedlichen Zeitpunkten (Maximaltemperatur im Bauteil bzw. Umgebungsausgleichstemperatur) entfernt.

Anschließend wurde durch Einsatz der Hydraulikzylinder eine äußere Verformungseinwirkung in die Versuchskörper eingetragen. Diese wurde gesteigert, bis ein Einzelriss bzw. abgeschlossenes Rissbild vorlagen. Damit konnte in weiterer Folge die Änderung der Zwangskraft in Abhängigkeit vom Rissbild untersucht werden.

2.3.2 Versuchsserien 3 & 4

Hier wurde der Fokus der Untersuchungen auf die Änderung der Rissbreite im zeitlichen Verlauf gelegt. Die Nachbehandlung der beiden Versuchskörper erfolgte deshalb identisch.

Um den lokalen Effekt des Verbundkriechens quantifizieren zu können, wurden in Versuchsserie 3 und 4 die Stahldehnungen im Einleitungsbereich eines Risses punktuell mit Dehnmessstreifen gemessen. Das hierfür gewünschte Rissbild wurde

mit bis zu drei Querschnittsschwächungen entlang der Längsachse des Betonstabs erzeugt. Außerdem wurde die Schwindeinwirkung an einem Begleitkörper mit gleicher Querschnittsabmessung und 1 m Länge erfasst.

3 Versuchsergebnisse

3.1 Erhärtungszeitraum

Abbildung 3 zeigt die Messergebnisse von Serie 1 und 2. Ausgehend von der gleichen Frischbetontemperatur zeigen alle vier Versuchskörper ein gleiches Verhalten in der erhärtungsbedingten Erwärmungsphase.

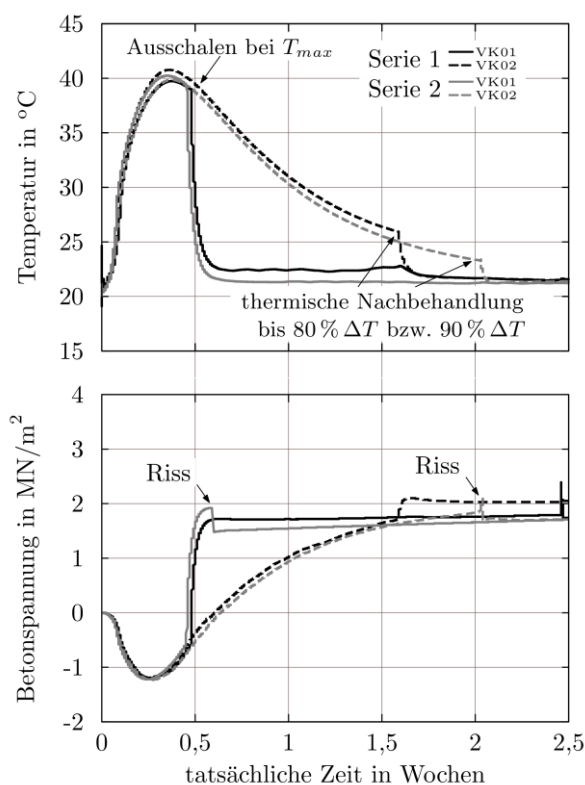


Abbildung 3 Einfluss der Nachbehandlungsdauer auf den Temperaturverlauf (oben) und die Spannungsentwicklung (unten)

Das mit der Erwärmung einhergehende Längsausdehnungsbestreben wird durch die Rahmenkonstruktion nahezu vollständig behindert. Der dadurch hervorgerufene Druckspannungsaufbau ist geprägt durch den sich entwickelnden Elastizitätsmodul. In der vorliegenden Behinderungssituation führt das viskoelastische Betonverhalten zu einer Reduktion der Druckspannung, weil die zeitabhängigen Volumenänderungen ebenfalls behin-

dert werden und es zu Relaxation kommt. Dadurch wird das Spannungsmaximum einige Stunden vor dem Temperaturmaximum erreicht.

Nach Erreichen der Maximaltemperatur wurde bei jeweils einem Versuchskörper pro Serie die Dämmung und Schalung entfernt (VK01). Die durch den nun größeren Wärmeübergang beschleunigte Abkühlung führt gemeinsam mit der Viskoelastizität zu einem raschen Abbau der Druckspannung. Der Spannungsnulldurchgang wird daher früher erreicht als in den Versuchskörpern, welche in Schalung und Dämmung belassen wurden, bis die Ausgleichstemperatur nahezu erreicht war (VK02).

Hierbei hat sich gezeigt, dass die thermische Nachbehandlung keinen Einfluss auf die Rissbildung hatte. Unabhängig von der Nachbehandlung blieben beide Versuchskörper der Serie 1 ungerissen, wohingegen die Versuchskörper von Serie 2 beide einen Riss vor Erreichen der Ausgleichstemperatur aufwiesen. Dafür können geringfügig höhere Spannungen bzw. die Streuung der Betonzugfestigkeit verantwortlich gemacht werden.

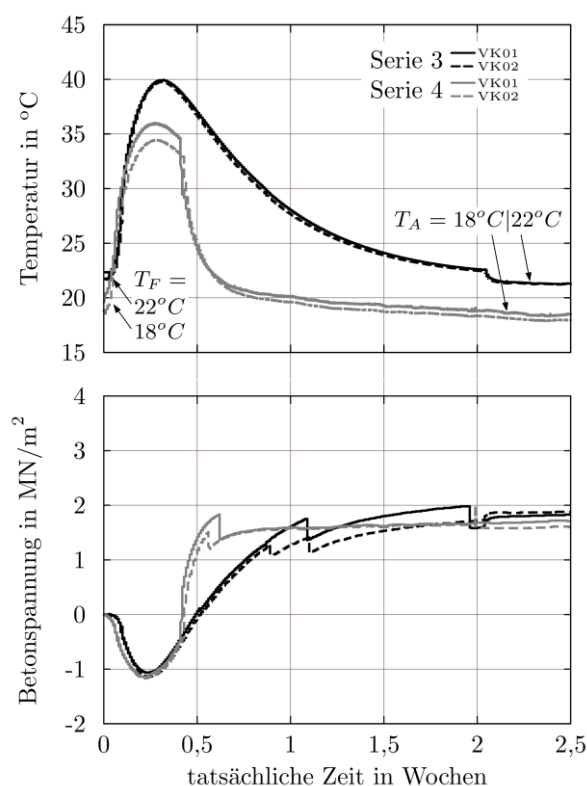


Abbildung 4 Einfluss von Frischbeton- und Umgebungslufttemperatur auf den Temperaturverlauf (oben) und die Spannungsentwicklung (unten)

Aufgrund unterschiedlicher Jahreszeiten bei der Durchführung von Serie 3 und 4 unterscheiden sich diese hinsichtlich Frischbetontemperatur T_F und Umgebungstemperatur T_A . Der Einfluss auf die Temperaturerhöhung im Bauteil ΔT ist dabei erkennbar (Abbildung 4). Die Spannungsverläufe weisen aber die gleichen Charakteristika wie bei den vorangegangenen Versuchsserien auf. Wie bereits erwähnt, wurde hier die Rissbildung durch die Anordnung von Querschnittsschwächungen beeinflusst.

Bei Erreichen der Ausgleichstemperatur ist unabhängig vom Risszustand kein signifikanter Abbau der eingepprägten Zwangskraft zu erkennen.

Die erhärtungsbedingte Zwangbeanspruchung führt zu einem bestimmten Spannungsniveau und Risszustand im Bauteil. Ausgehend von diesem Zustand wurde die zeitliche Entwicklung der Zwangskraft im Nutzungszeitraum untersucht.

3.2 Nutzungszeitraum

Um den Einfluss von Temperaturänderungen im Nutzungszeitraum zu simulieren, wurde mit Hilfe der Hubzylinder eine Verformungseinwirkung aufgebracht. Da die eingepprägte Zwangspannung aus der Herstellungsphase ca. 80 % der Zugfestigkeit beträgt, führt bereits eine Einwirkung äquivalent zu einer Abkühlung von ca. 2 °C zu erneuter Rissbildung. An einigen Versuchskörpern wurde die Einwirkung bis zum Erreichen eines abgeschlossenen Rissbilds gesteigert. Die dazu erforderliche Verformung entsprach dabei ca. einer Abkühlung um 45 °C.

Der Zeitraum nach Erreichen der Ausgleichstemperatur ist im Versuch außerdem durch eine Einwirkung aus Trocknungsschwinden und den Effekt des Verbundkriechens im Einleitungsbereich vorhandener Risse geprägt.

Aus Abbildung 5 kann interpretiert werden, dass bei den Proben mit Einzelrissen das Schwinden maßgeblich ist und die damit verbundene Verkürzung zu einem kontinuierlichen Anstieg der Zugspannung führt. Das Verbundkriechen zeigt sich im abgeschlossenen Rissbild als dominanter und führt zu einer Reduktion der Betonzugspannung.

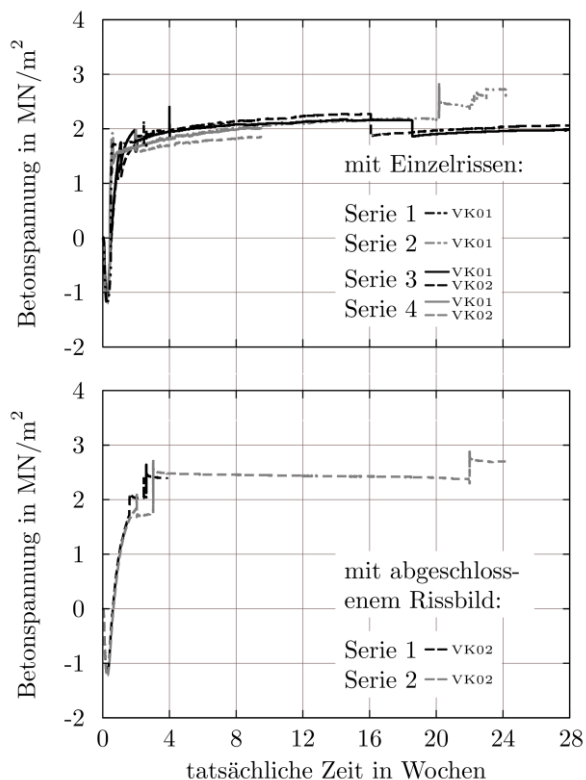


Abbildung 5 Einfluss von Schwinden und Verbundkriechen im Nutzungszeitraum bei unterschiedlichem Rissbild

Die Änderung der Rissbreite wird exemplarisch in Abbildung 6 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass Nachbehandlung und Risszeitpunkt keinen großen Einfluss auf die Rissbreite haben. Lokale Effekte und Schwinden führen bei den Versuchskörpern mit abgeschlossenem Rissbild trotz abnehmender Stahlspannung zu einer Zunahme der Rissbreite.

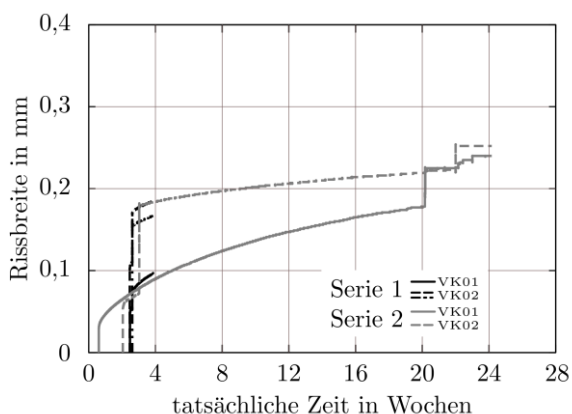


Abbildung 6 Änderung der Rissbreite im Zeitverlauf

4 Einflussgrößen auf die Spannungsgeschichte zwangbeanspruchter Bauteile

4.1 Zwangkraftabbau infolge Viskoelastizität

Um die Wirkungsweise der viskoelastischen Betoneigenschaften zu verdeutlichen, wird in Abbildung 7 (unten) ein im Versuch gemessener Spannungsverlauf dem mit elastischen Materialeigenschaften berechneten Verlauf gegenübergestellt.

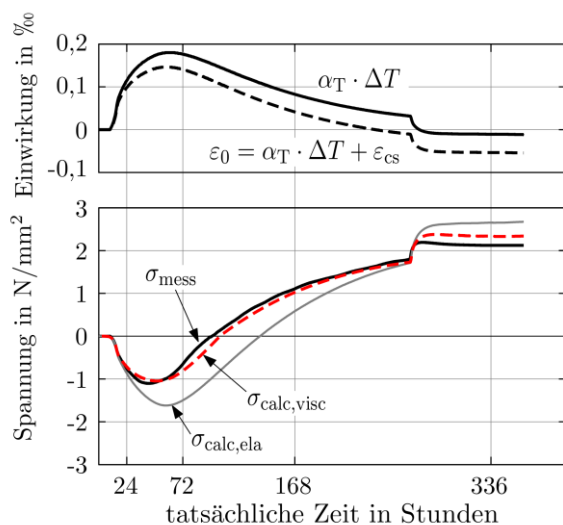


Abbildung 7 Einfluss der Viskoelastizität auf die Spannungsgeschichte im Erhärtungszeitraum aus [2]

Es ist zu erkennen, dass der Druckspannungsaufbau stark durch das hohe viskoelastische Potenzial im jungen Beton gekennzeichnet ist. Das gemessene Druckspannungmaximum wird vor Erreichen der Maximaltemperatur im Bauteil erreicht und ist im Vergleich zur elastischen Lösung signifikant geringer. Auch der rasche Abbau der Druckspannung und der Aufbau der Zugspannung nach Erreichen der zweiten Nullspannungstemperatur im Bauteil sind durch die Viskoelastizität geprägt. Jedoch nimmt der Einfluss aufgrund der Alterung bereits deutlich ab.

Die Spannung wird nach Erreichen der Ausgleichstemperatur bei ca. 285 Stunden kaum weiter reduziert. Die Zwangbeanspruchung aus dem Erhärtungszeitraum scheint daher im Bauteil zu einem großen Teil eingepreßt zu sein.

Damit steht die Befürchtung nahe, dass eine grundlegende Bemessungsannahme des risskraftbasierten Bemessungskonzepts zur Ermittlung der

Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite nach EN 1992-1-1 im späten Alter verletzt wird. Für eine dauerhafte Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit kann daher eine Überlagerung von frühem und spätem Zwang bei der Bemessung erforderlich sein.

In [2] wird ein analytischer Ansatz zur Berücksichtigung der viskoelastischen Effekte vorgestellt. Es handelt sich dabei um ein zeitschrittbasierendes Berechnungsmodell, in dem das reine viskoelastische Materialverhalten auf Grundlage der Kriechkurven aus EN 1992-1-1 berücksichtigt wird.

Wie in Abbildung 7 ersichtlich ist, kann die im Versuch aufgetretene Zwangspannung im Herstellungszeitraum gut abgeschätzt werden.

4.2 Zwangkraftabbau infolge Rissbildung

Mit der Rissbildung kann sich ein Teil der im ungerissenen Bauteil behinderten Verformung in der Form von Rissen einstellen. Dadurch kommt es zu einem Abbau der Zwangkraft.

Um dies zu veranschaulichen, wird die Verformungskompatibilität am ungerissenen (1) und am gerissenen Bauteil (2) dargestellt:

$$\varepsilon_0 = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\sigma_I}{E_c} \quad (1)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{\Delta l}{l} + \frac{w_{cr}}{l} - \frac{\sigma_{II}}{E_c} \quad (2)$$

ε_0Verformungseinwirkung

$\Delta l/l$frei einstellbare Verformungsantwort

$\sigma_{I,II}/E_c$spannungswirksame Verformungsantwort

w_{cr}Rissbreite

lrelevante Bauteillänge (siehe [2])

Die Größe des Zwangkraftabbaus ist allerdings stark vom Rissbild und der vorhandenen Bewehrung abhängig. Im Fall von Einzelrissen und einem vollständig gezwängten System kann eine Abschätzung mit (3) erfolgen.

$$\frac{\sigma_{II}}{\sigma_I} = \left(0,8 \cdot \frac{l_e}{l} \cdot \frac{1}{\alpha_e \rho_s} + 1 \right)^{-1} \quad (3)$$

l_eEinleitungslänge

l relevante Bauteillänge (siehe [2])

α_e Verhältnis der E-Moduln E_s/E_c

ρ_s geometrischer Bewehrungsgrad

Bei teilweise gezwängten Systemen ist der Abbau der Zwangskraft geringer.

Um den bedeutenden Einfluss des Bewehrungsgrads ρ_s und des Verhältnisses der E-Moduln α_e zu veranschaulichen, erfolgt in Abbildung 8 eine Auswertung von (3).

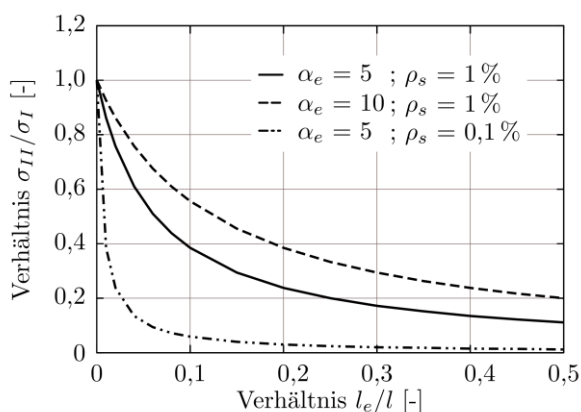


Abbildung 8 Zwangkraftabbau bei Einzelrisbildung

Da der Bewehrungsgrad bei Bauteilen mit zunehmender Querschnittsdicke abnimmt, ist davon auszugehen, dass der Zwangkraftabbau in massigen Bauteilen besonders signifikant ist.

4.3 Einfluss von Rissbildung auf die Bauteilsteifigkeit

Hat im Bauteil bereits Rissbildung stattgefunden, treffen neue Einwirkungen im Nutzungszeitraum auf eine reduzierte Bauteilsteifigkeit.

Weil die Größe der von Verformungseinwirkungen hervorgerufenen Zwangbeanspruchung in hohem Maß von der Bauteilsteifigkeit beeinflusst wird, fällt die Spannungsantwort bei gleicher Verformungseinwirkung deutlich geringer aus. Zusätzlich wird der Behinderungsgrad des Bauteils vom Verhältnis zwischen der Bauteilsteifigkeit und der Steifigkeit der behindernden Randbedingung bestimmt. Der Bauteilsteifigkeit wird daher in beiden Fällen eine signifikante Rolle beigemessen.

Im ungerissenen Zustand I kann die Steifigkeit des Bauteils über die Betrachtung des ideellen Querschnitts abgeleitet werden.

Bei Einzelrisbildung steigt die mittlere Stahldehnung im Einleitungsbereich jedoch an und damit sinkt die Steifigkeit. Die Bauteilsteifigkeit ändert sich bei Bildung eines einzelnen Risses nur dann nur unwesentlich, wenn das Bauteil deutlich länger als die Einleitungslänge ist (vgl. [4]). Mit fortschreitender Rissbildung oder wenn das Verhältnis der Einleitungslänge l_e zur relevanten Bauteillänge l gemäß [2] groß ist, kann ein deutlicher Steifigkeitsabfall EA_{II}/EA_I beobachtet werden. Dieser ist äquivalent zum Zwangkraftabbau bei Einzelrisbildung in Abbildung 8.

Im abgeschlossenen Rissbild ist die Mitwirkung des Betons zwischen den Rissen stark reduziert und die Bauteilsteifigkeit dementsprechend gering. Entsprechend [4] kann mit Annahme eines kleinstmöglichen Rissabstands die Bauteilsteifigkeit abgeschätzt werden (siehe Abbildung 9).

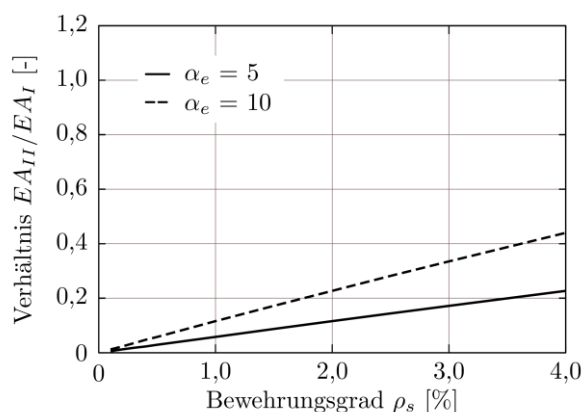


Abbildung 9 Steifigkeitsabfall im abgeschlossenen Rissbild

Der sukzessive Steifigkeitsabfall bei Übergang vom ungerissenen Zustand zum abgeschlossenen Rissbild konnte im Versuch ermittelt werden.

Die in 4.4 beschriebenen zeitabhängigen Effekte haben ebenfalls Einfluss auf die Bauteilsteifigkeit und sind daher zu berücksichtigen.

4.4 Einfluss von Verbundkriechen und Trocknungsschwinden auf die Rissbreite

Trocknungsschwinden und Verbundkriechen führen im Zeitverlauf zu einer Zunahme der Rissbreite.

In die Verformungskompatibilität eines gerissenen Bauteils fließt die Rissbreitenänderung auf Seite der Verformungsantwort ein (siehe (2)). Nur ein Teil des Trocknungsschwindens muss außerdem

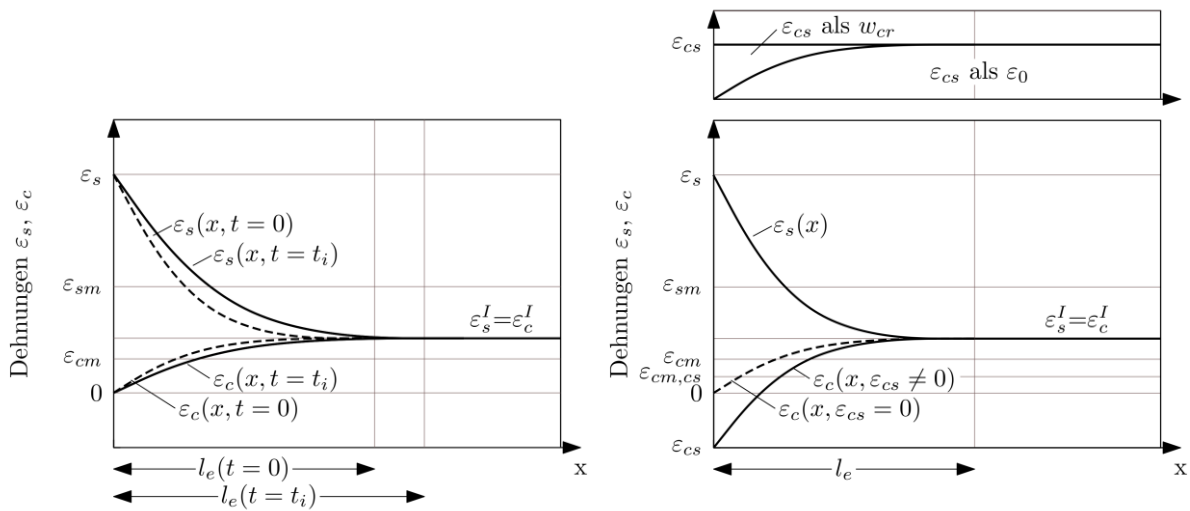


Abbildung 10 Dehnungsverlauf beim Einzelriss infolge Verbundkriechens (links) und Trocknungsschwindens (rechts)

auf der Seite der Einwirkung berücksichtigt werden.

Mit Hilfe des Verbundgesetzes kann die bedingte Rissbreitenzunahme gemäß dem heutigen Verständnis der Zusammenhänge in der Verbundlänge aus [4], sowohl für den Einzelriss als auch für das abgeschlossene Rissbild, einfach abgeschätzt werden.

4.4.1 Einzelriss

Beim Einzelriss resultiert die Zunahme der Rissbreite infolge Verbundkriechens aus der Vergrößerung der Einleitungslänge l_e bei gleichbleibender Dehnungsdifferenz zwischen Stahl und Beton (siehe Abbildung 10, links).

Die Schwinddehnung erzeugt im Beton eine Zug-

spannung. Wie in Abbildung 10 (rechts) ersichtlich, wird bei Rissbildung diese Spannung an der Rissstelle frei und führt zu einer Vergrößerung der Dehnungsdifferenz zwischen Stahl und Beton. Das Trocknungsschwinden wird daher im Bereich der Einleitungslänge nur teilweise in eine Rissbreitenänderung umgewandelt. Im ungerissenen Bauteilbereich ist das Schwinden auf Einwirkungsseite wirksam.

4.4.2 Abgeschlossenes Rissbild

Der Effekt des Verbundkriechens auf die Stahl- und Betondehnung zwischen zwei Rissen des abgeschlossenen Rissbilds wird in Abbildung 11 (links) dargestellt. Da der Rissabstand eingepreßt ist, führt die Verbundverschlechterung zu einer

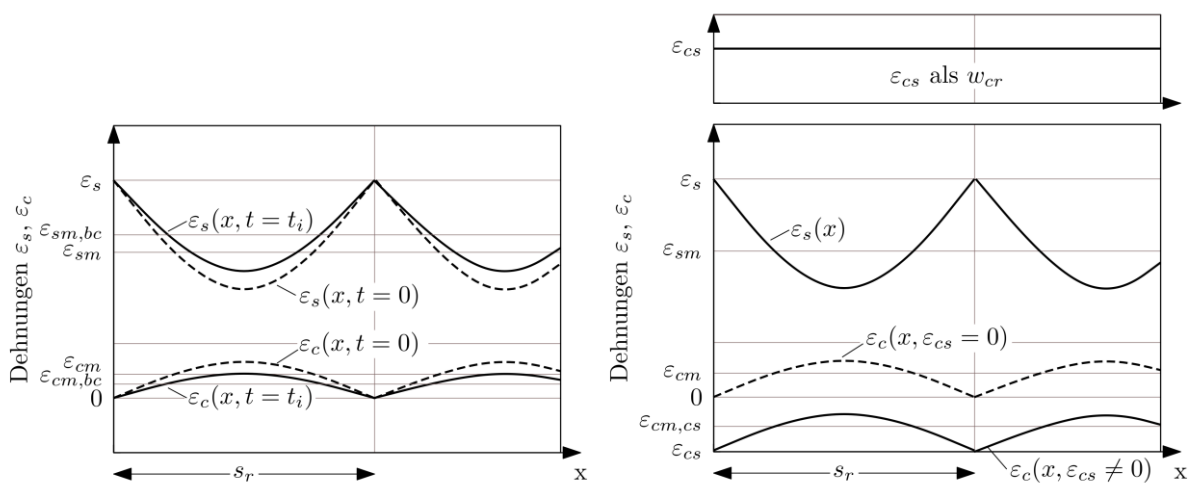


Abbildung 11 Dehnungsverlauf im abgeschlossenem Rissbild infolge Verbundkriechens (links) und Trocknungsschwindens (rechts)

Abnahme der Betondehnung und einer Zunahme der Stahldehnung.

Abbildung 11 (rechts) zeigt den Einfluss des Trocknungsschwindens auf die Dehnungsdifferenz zwischen Stahl und Beton. Die Schwinddehnung stellt sich auch im Bereich zwischen den Rissen als freie Dehnung ein. Das Schwinden ist daher über die gesamte Bauteillänge als Rissbreitenänderung wirksam.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden erste Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben „Mindestbewehrung unter Zwangseinwirkung“ des Instituts für Betonbau in Kooperation mit der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) vorgestellt. Mit dem gezeigten Versuchsaufbau kann die Spannungsgeschichte zwangbeanspruchter Bauteile simuliert werden und der Einfluss von Viskoelastizität, Rissbildung sowie von lokalen Effekten auf die Zwangskraft erfasst werden.

Die heutige Bemessungspraxis mit der Annahme zum Abbau der erhärtungsbedingten Zwangbeanspruchung auf der Zugseite (wie in [4] beschrieben) konnte nicht bestätigt werden. Nur die Rissbildung selbst hat einen signifikanten Einfluss auf einen möglichen Abbau der Zwangbeanspruchung aus der Erhärtungsphase. Für eine dauerhafte Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit kann daher eine Überlagerung von frühem und spätem Zwang bei der Bemessung erforderlich sein.

Um die gezeigten Ergebnisse hinsichtlich des viskoelastischen Materialverhaltens von Beton unter Zugbeanspruchung zu bestätigen, werden derzeit Materialuntersuchungen mit ein- und mehrstufigen Belastungen durchgeführt.

Ein weiterer Schritt der Untersuchungen liegt in der Möglichkeit zur Implementierung der Erkenntnisse in Bemessungsregeln. Dafür wird ein Bemessungsansatz auf Basis der Verformungskompatibilität, welcher bereits für erhärtungsbedingte Zwangbeanspruchungen entwickelt wurde ([1], [2]), angepasst.

6 Literatur

- [1] Bödefeld, J.: *Rissmechanik in dicken Stahlbetonbauteilen bei abfließender Hydratationswärme*. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Nr. 92, Karlsruhe, 2010.
- [2] Schlicke, D.: *Mindestbewehrung zwangbeanspruchter Betonbauteile unter Berücksichtigung der erhärtungsbedingten Spannungsgeschichte und der Bauteilgeometrie*. Technische Universität Graz, Dissertation am Institut für Betonbau, 2014.
- [3] EN 1992-1-1: 2011-01 (2011): *EC2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. Deutsche Fassung. Normenausschuss Bauwesen (NABau).
- [4] Bödefeld, J.; Ehmman, R.; Schlicke, D.; Tue, N. V.: *Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreiten in Stahlbetonbauteilen infolge des Hydratationsprozesses - Teil 1: Risskraftbasierter Nachweis nach DIN EN 1992-1-1*. Beton- und Stahlbetonbau 107-1, S. 32 - 37, Ernst & Sohn, Berlin, 2012.
- [5] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 466: *Grundlagen und Bemessungshilfen für die Rissbreitenbeschränkung im Stahlbeton und Spannbeton*. Beuth-Verlag, Berlin, 2000.