

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Turner, Katrin; Nguyen, Viet Tue

Mindestbewehrung für fugenlose Wasserbauwerke unter frühem und spätem Zwang

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/105299>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Turner, Katrin; Nguyen, Viet Tue (2018): Mindestbewehrung für fugenlose Wasserbauwerke unter frühem und spätem Zwang. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Entwicklungen und Fortschritte im Brücken- und massiven Verkehrswasserbau. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 61-68.

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.



Mindestbewehrung für fugenlose Wasserbauwerke unter frühem und spätem Zwang

Dr. techn. Katrin Turner (TU Graz)

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Nguyen Viet Tue (TU Graz)

Zu den Stärken fugenloser Betonbauwerke zählen geringere Herstellungs- und Erhaltungskosten sowie eine verbesserte Robustheit der Konstruktion im Vergleich zu konventionell fugenbehafteten Bauwerken. Die Beanspruchungen infolge von Verformungseinwirkungen steigen jedoch deutlich an und werden besonders im Nutzungszeitraum – hervorgerufen durch klimatisch bedingte Temperaturänderungen, Bauwerkssetzungen, usw. – wesentlich für die Bemessung.

Während in der aktuellen Bemessungsnorm die Mindestbewehrung zwangbeanspruchter Betonbauteile auf Grundlage eines risskraftbasierten Ansatzes ermittelt wird, bietet die Betrachtung der Verformungskompatibilität eine verlässlich sichere und gleichzeitig wirtschaftliche Alternative. Während bisher nur die erhärtungsbedingten Zwangbeanspruchungen betrachtet wurden, zeigt der vorliegende Beitrag wie die Überlagerung von frühem und spätem Zwang auf einer gemeinsamen, mechanischen Grundlage beantwortet wird.

1. Verformungskompatibilität vs. Gleichgewicht der Kräfte

Die derzeitige Bemessungsregel in Eurocode 2 [1] zur Festlegung der Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite basiert auf dem Kräftegleichgewicht mit der Spannungsergebnierenden vor der Rissbildung. Dabei sind die Zugfestigkeit des Betons ($f_{ct,eff}$) und die Querschnittsfläche (A_{ct}) bzw. nach [2] die Effektivzone bei massigen Bauteilen ($A_{c,eff}$) wichtige Parameter, siehe Gl. (1).

$$A_{s,min} = \frac{f_{ct,eff} \cdot A_{c,eff}}{\sigma_s} \geq \frac{k \cdot f_{ct,eff} \cdot A_{ct}}{f_{yk}} \quad (1)$$

Die strikte Anwendung von Gl. (1) bei massigen Bauteilen führt aber zu sehr hohen Bewehrungsgehalten, deren Notwendigkeit in der Praxis nicht bestätigt werden kann. Dies gilt insbesondere bei fugenlosen Bauwerken, bei denen eine späte Rissbildung mit hoher Betonzugfestigkeit nicht ausgeschlossen werden kann. Die Betrachtung der Verformungskompatibilität ist in diesen Fällen sinnvoller.

Bereits in [3] wurde hervorgehoben, dass Zwangbeanspruchungen als Verformungsproblem betrachtet werden sollen. Das Verformungsbestreben des Bauteils wird durch Temperaturdehnungen ($\alpha_T \cdot \Delta T$), Schwinddehnungen ($\varepsilon_{cas} + \varepsilon_{cds}$) und Kriechen (ε_{cc}) hervorgerufen und bei teilweiser oder voller Verformungsbehinderungen entstehen Spannungen entsprechend Gl. (2). Der Behinderungsgrad a drückt dabei das Verhältnis von spannungswirksamer Dehnung und Gesamtdehnung aus.

$$\sigma_{beh} = -E_c \cdot (\alpha_T \cdot \Delta T + \varepsilon_{cas} + \varepsilon_{cds} + \varepsilon_{cc}) \cdot a \quad (2)$$

Für eine wirtschaftliche Bemessung macht man sich dabei die geometrisch vorgegebene Bildung von Primärrissen zu Nutze und - im Gegensatz zur gesamten Bauteillänge in Beanspruchungsrichtung - wird nur die relevante Bauteillänge l_{cr} betrachtet, siehe Bild 1. Dabei ist anzumerken, dass die relevante Bauteillänge um ein vielfaches größer ist als die Einleitungslänge im Stahlbetonbau. Die behinderte Verformung kann dann mit Gl. (3) ausgedrückt werden.

$$w_{beh} = \frac{\sigma_{beh}}{E_c} \cdot l_{cr} \tag{3}$$

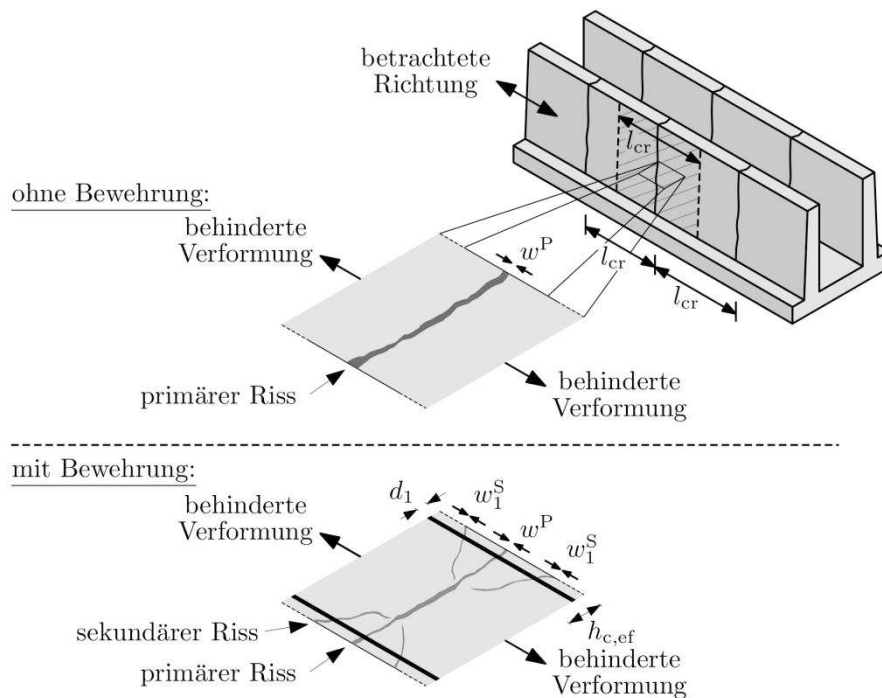


Bild 1: Grundidee der Verformungskompatibilität betreffend das geometrisch vorgegebene Rissbild und den Einfluss der Bewehrung bei dicken Bauteilen

Die Verformungskompatibilität stellt das Gleichgewicht des behinderten Anteils der Verformungseinwirkung mit der Verformungsantwort des Systems dar. Im gerissenen Bauteil besteht die Verformungsantwort aus Rissbreiten und einer elastischen Dehnung des Betons zwischen den Rissen. Um die Rissbreite im Primärriss zu begrenzen ($w^P \leq w_{zul}$), ist es die Aufgabe der Bewehrung neue Risse entstehen zu lassen. Die sogenannten Sekundärrisse treten paarweise in der Randzone des Bauteils auf, wenn die Spannung in der Effektivzone die Zugfestigkeit des Betons überschreitet.

Die erforderliche Anzahl der Sekundärrisspaare n kann in Abhängigkeit vom Rissbreitenkriterium w_{zul} , der Verformungseinwirkung und der Bauteilgeometrie bestimmt werden. Da es sich dabei um keine einfache Aufgabe handelt, wurden Vereinfachungen – auf die später noch eingegangen wird – eingeführt. Die erforderliche Mindestbewehrung kann dann mit Gl. (4) bestimmt werden, welche auf [4] basiert und in [5] modifiziert wurde.

$$A_{s,min} = \sqrt{\frac{d_s \cdot d_1^2 \cdot b^2 \cdot f_{ct,eff}}{w_{zul} \cdot E_s}} \cdot \sqrt{0,5 + 0,34 \cdot n} \quad (4)$$

Zu Vergleichszwecken wird der erste Term aus Gl. (1) umgeformt und durch Einsetzen der Effektivzone kann Gl. (6) angeschrieben werden.

$$A_{c,eff} = m \cdot d_1 \cdot b \quad \text{mit } 2,5 \leq m \leq 5,0 \quad (5)$$

$$A_{s,min} = \sqrt{\frac{d_s \cdot d_1^2 \cdot b^2 \cdot f_{ct,eff}}{w_{zul} \cdot E_s}} \cdot 0,41 \cdot m \quad (6)$$

Für die Darstellung in Bild 2 wurden die Gl. (4) und (6) für realistische Wertebereiche von m und n ausgewertet. Der Vergleich zeigt eindrucksvoll, dass der risskraftbasierte Ansatz bei massigen Bauteilen ($h > 0,8 \text{ m}$) zu deutlich höheren Bewehrungsmengen führt. Und dies obwohl der zweite Term von Gl. (1) vernachlässigt wurde, für besonders massige Bauteile aber maßgebend ist.

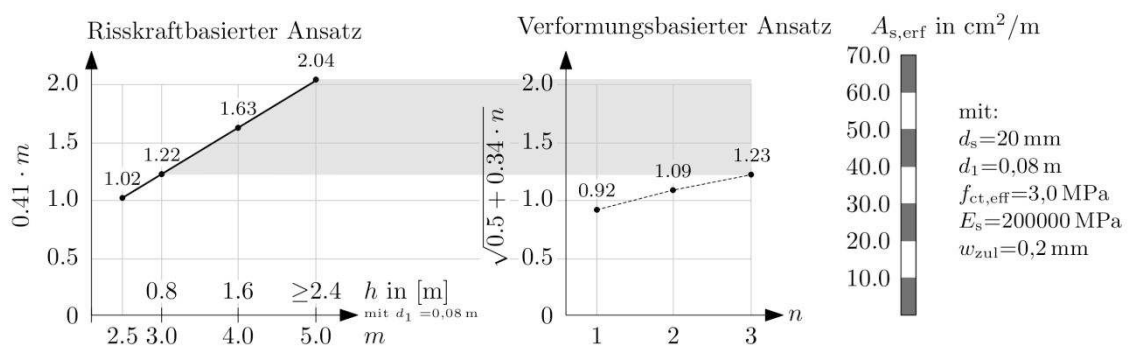


Bild 2: Vergleich der erforderlichen Mindestbewehrung gemäß risskraftbasiertem und verformungsbasiertem Ansatz anhand der Multiplikationsterme in Gl. (4) und (6)

2 Zwangbeanspruchung und Rissbreitenentwicklung im Nutzungszeitraum unter Berücksichtigung der erhärtungsbedingten Spannungen

Betonbauwerke im Wasserbau erfahren aufgrund der hohen Bauteilmassigkeit im Erhärungszeitraum hohe Zwangbeanspruchungen und bisher wurden in der Bemessung meist nur diese betrachtet. Bei fugenlosen Bauwerken mit großer Abmessung in Längsrichtung entstehen aber auch im Nutzungszeitraum signifikante Verformungseinwirkungen. Daher muss die Überlagerung der Zwangbeanspruchungen untersucht werden.

2.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Für die experimentelle Untersuchung der Spannungsgeschichte von gezwängten Betonbauteilen wurden an der Technischen Universität Graz mit Unterstützung der BAW Zwangrahmen entwickelt, siehe Bild 3. Eine detaillierte Beschreibung kann [6] entnommen werden.

Die kontinuierliche Untersuchung beginnt mit der erhärtungsbedingten Temperatur- und Spannungsgeschichte. Der Temperaturanstieg durch die Freisetzung von Hydratationswärme ist durch Verwendung eines variablen Dämmsystems trotz der geringen Querschnittsabmessung des Versuchskörpers repräsentativ für ein massiges Bauteil. Die passive Behinderung des Verformungsbestrebens hängt von der Steifigkeit des Zwangrahmens und des Versuchskörpers ab und bildet hinsichtlich Größe und zeitlicher Änderung die Behinderungssituation z.B. von Wänden auf Fundamenten ab. Das Spannungsniveau nach Abfließen der Hydratationswärme (= Ausgleichstemperatur) dient als Ausgangspunkt für die Überlagerung mit Einwirkungen repräsentativ für den Nutzungszeitraum.

Zu diesem Zweck kann die Passivität des Rahmens temporär aufgehoben werden ohne dabei die zuvor eingetragenen Spannungen zu beeinflussen. Dann kann das bewegliche Querhaupt des Zwangrahmens entkoppelt werden und mit Hilfe von Hydraulikzylindern wird eine Relativverschiebung der Querhäupter erzeugt, siehe Bild 3 (rechts, unten). Die Verformungseinwirkung kann gesteigert werden, bis es zu erster oder erneuter Rissbildung im Versuchskörper kommt. Außerdem trägt das Trocknungsschwinden zu der Verformungseinwirkung bei sobald die Schalung entfernt wurde. Um die geringere Austrocknung von massigen Bauteilen abzubilden, wurde daher bei manchen Versuchskörpern eine dampfundurchlässige Folie aufgebracht.

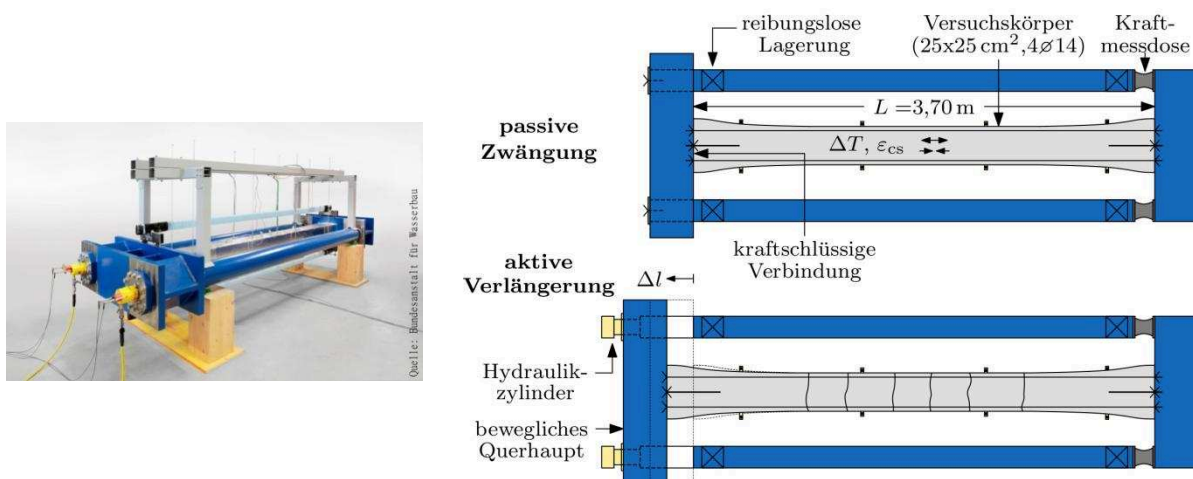


Bild 3: Zwangrahmen (links, Quelle: BAW), schematische Darstellung der Funktionsweise für die passive (rechts, oben) und aktive Phase (rechts, unten)

Seit Oktober 2012 wurden im Labor für konstruktiven Ingenieurbau der Technischen Universität Graz fünf bis zu 12 Monate dauernde Versuchsserien mit jeweils zwei Versuchskörpern durchgeführt. Der dabei eingesetzte Beton weist eine für Schleusenammern repräsentative Betonrezeptur auf (C35/45, 300 kg CEM III/A 32,5N).

2.2 Versuchsergebnisse

Die erste Phase der Versuche repräsentiert die Herstellungsphase des realen Bauteils und endet bei Erreichen der Ausgleichstemperatur. Theoretische Überlegungen zum ausgeprägten viskoelastischen Materialverhalten im jungen Beton legen eine fortschreitende Spannungsrelaxation im Verlauf der Zeit nahe. In den Versuchen konnte dieser Effekt unabhängig vom Risszustand nicht beobachtet werden und die im Erhärtungszeitraum aufgebauten Zugspannungen blieben beinahe vollständig erhalten. Durch Vergleichsberechnungen konnte das Trocknungsschwinden als Grund dafür ausgeschlossen werden, siehe [5].

Bild 4 zeigt die Langzeitresultate für die Spannungsgeschichten und die dazugehörige Rissbreitenentwicklung getrennt für die Versuchskörper mit Einzelrissbildung (links) und abgeschlossener Rissbildung (rechts). Der Einsatz der Hydraulikzylinder spiegelt sich durch die plötzliche Zunahme der Betonspannung wider, während ein Abfall der Spannung auf die Rissbildung zurückzuführen ist. Trocknungsschwinden und Verbundkriechen haben ebenfalls – jedoch entgegengesetzten – Einfluss auf die Spannungsgeschichte. Beide Effekte führen zu einer Zunahme der Rissbreite im Verlauf der Zeit. Detaillierte Informationen zu den individuellen Ergebnissen können [5] entnommen werden.

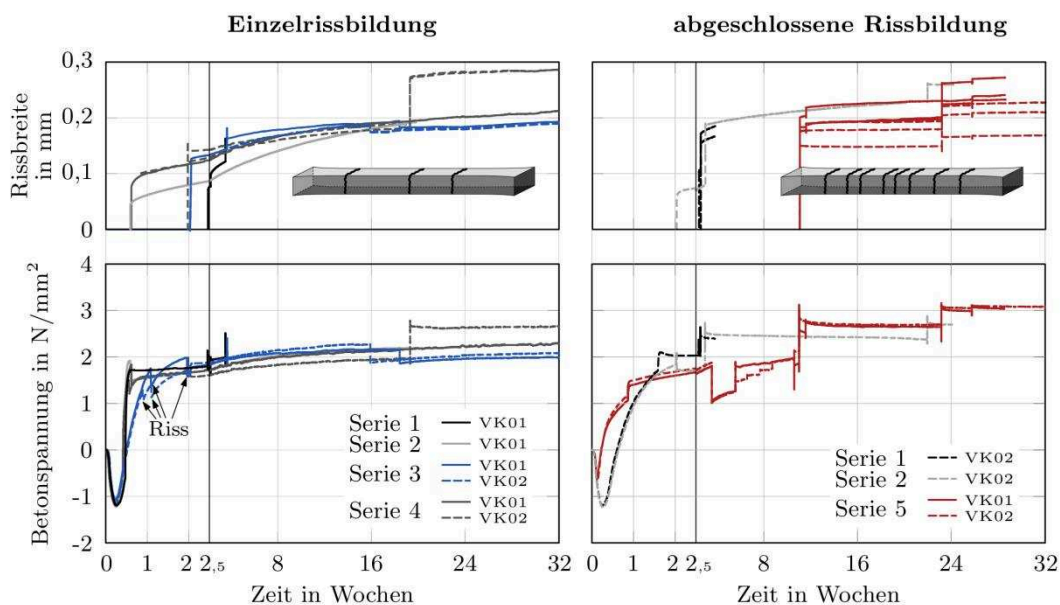


Bild 4: Spannungsgeschichte und Entwicklung der Rissbreite in Versuchskörpern mit Einzelrissbildung (links) und abgeschlossenem Rissbild (rechts)

In den Versuchskörpern mit Einzelrissbildung ist das Verkürzungsbestreben zufolge Trocknungsschwindens dominant und führt zu einem kontinuierlichen Anstieg der Zugspannungen und Rissbreiten. Beim abgeschlossenen Rissbild ist der lokale Effekt in der Einleitungslänge (Verbundkriechen) einflussreicher und die axiale Steifigkeit der Versuchskörper, und damit einhergehend die Betonspannung, nehmen im Zeitverlauf ab. Trotz der sinkenden Stahlspannung nehmen die Rissbreiten jedoch zu.

In die Versuchskörper der Serie 5 wurde zu verschiedenen Zeitpunkten ein Spannungsniveau von 3,2 N/mm² eingetragen. Es hat sich gezeigt, dass sich die Verschlechterung der Verbundeigenschaften mit der Zeit verlangsamt und die Verbundspannung immer größer als 70% des Werts bei Kurzzeitbelastung bleibt. Die diesbezügliche Bemessungsannahme in EC 2 [1] kann damit bestätigt werden.

2.3 Wichtige Erkenntnisse für die Bemessung von fugenlosen Bauwerken

Eine häufige Vereinfachung in der Bemessungspraxis basiert auf der Annahme, dass die Überlagerung von frühem und spätem Zwang nicht maßgebend für die Bemessung wird. Ein dafür erforderlicher signifikanter Abbau der erhärtungsbedingten Spannungen nach Erreichen der Ausgleichstemperatur konnte in den Versuchen jedoch nicht bestätigt werden, siehe Bild 5. Aus diesem Grund ist es erforderlich, bei der Bemessung von fugenlosen Bauwerken die Verformungseinwirkungen entsprechend Gl. (7) gemeinsam zu betrachten. Dabei sind $w_{beh,0}$ und $w_{beh,1}$ die behinderten Verformungen in der Erhärtungs- (Index 0) und Nutzungsphase (Index 1).

$$w_{beh,gesamt} = w_{beh,0} \oplus w_{beh,1} \tag{7}$$

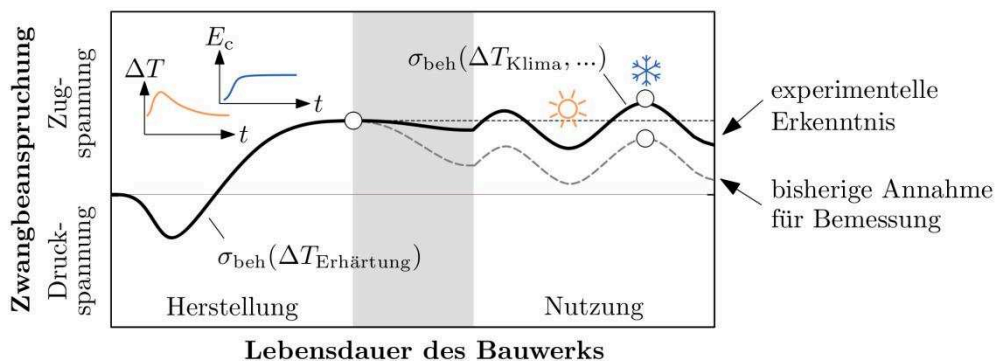


Bild 5: Schematische Überlagerung von Zwangbeanspruchungen im Erhärtungs- und Nutzungszeitraum; bisherige Annahme vs. experimentelle Erkenntnis

3 Ermittlung der erforderlichen Anzahl der Sekundärrisspaare unter Berücksichtigung der Betondehnung zwischen den Rissen

Vereinfachend wurde in [4] davon ausgegangen, dass die behinderte Verformung im ungerissenen Bauteil ausschließlich mit den entstehenden Rissbreiten kompensiert wird, siehe Gl. 7. Für praktische Fälle liegt diese Annahme auf der sicheren Seite und führt zu einer direkten Berechnung der erforderlichen Anzahl der Sekundärrisspaare n . Durch Umformung von Gl. (8) und Einsetzen von $w^P = w_{zul}$ kann diese mit Gl. (9) bestimmt werden.

$$w_{beh} = \sum w \quad \text{mit } w_{beh} = \frac{\sigma_{beh}}{E_c} \cdot l_{cr} \text{ und } \sum w = w^P + \sum_{i=1}^n w_i^S = w^P \cdot (1 + 0,9 \cdot n) \tag{8}$$

$$n = 1,1 \cdot \left(\frac{w_{beh}}{w_{zul}} - 1 \right) \tag{9}$$

Jedoch werden damit zwei entgegengesetzte Effekte vernachlässigt. Einerseits werden dabei die Abnahme der Bauteilsteifigkeit ($EA^{\text{II}} < EA^{\text{I}}$), deren mögliche Auswirkung auf den Behinderungsgrad ($a^{\text{II}} \geq a^{\text{I}}$) und den damit einhergehenden Anstieg der behinderten Verformung nicht verfolgt. Andererseits bleibt der Beitrag der Betondehnung zwischen den Rissen zur Verformungskompatibilität, der besonders bei Bauteilen mit großem Primärrissabstand signifikant sein kann, unberücksichtigt. Genauer kann daher Gl. (10) angeschrieben werden.

$$w_{\text{beh}} \cdot \frac{a^{\text{II}}}{a^{\text{I}}} = \sum w + \varepsilon_{\text{cm}} \cdot l_{\text{cr}} \quad (10)$$

Damit kann die Anzahl der erforderlichen Sekundärrisspaare reduziert werden und schlussendlich wird weniger Mindestbewehrung benötigt. Um auch bei der Bemessung fugenloser Bauwerke wirtschaftlich sein zu können, wurde die Interaktion von Rissbildung und Zwangkraftabbau in massigen Bauteilen experimentell im aktiven Zwangrahmen und computergestützt untersucht, siehe [5]. Als Ergebnis kann die Zwangspannung nach der Rissbildung in Abhängigkeit von Bewehrungsgrad und Anzahl der Risse bestimmt werden. Diese Eingangsgrößen sind bei der Bemessungsaufgabe jedoch nicht bekannt und eine iterative Vorgehensweise unpraktisch. Aus diesem Grund wurde eine Korrelationsanalyse durchgeführt und letztendlich ist eine weiterhin direkte Ermittlung von n mit Gl. (11) möglich.

$$n = 1,1 \cdot \left(\frac{w_{\text{beh.gesamt}}}{w_{\text{zul}}} \cdot \frac{k_{\text{mod}}}{a^{0,6}} - 1 \right) \quad (11)$$

mit $k_{\text{mod}} = \begin{cases} 0,75 & \text{für } \sigma_{\text{beh}} < 2 \cdot f_{\text{ctm}} \\ 0,85 & \text{für } \sigma_{\text{beh}} \geq 2 \cdot f_{\text{ctm}} \end{cases}$

Das Ergebnis von Gl. (11) muss auf die nächste natürliche Zahl aufgerundet werden. Nachfolgend kann die Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite wie gehabt mit Gl. (4) bestimmt werden.

4 Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wurden die Ergebnisse des BAW FuE-Projekts „Zwangsbeanspruchung bei dicken, gerissenen Stahlbetonquerschnitten“ in Kooperation mit der TU Graz vorgestellt.

Der gezeigte Versuchsaufbau mit zwei Zwangrahmen erlaubt die realistische Simulation der gesamten Spannungsgeschichte von gezwängten Betonbauteilen. Die übliche Bemessungspraxis mit Annahme eines starken Abbaus der erhärtungsbedingten Spannungen konnte nicht bestätigt werden. Daher ist für die dauerhafte Gebrauchstauglichkeit von fugenlosen Betonbauwerken eine gemeinsame Betrachtung von frühem und spätem Zwang erforderlich.

Der Bemessungsansatz auf Basis der Verformungskompatibilität – zuerst entwickelt für die Betrachtung des frühen Zwangs allein – wurde aufgegriffen und adaptiert. Nun ist auch die Berücksichtigung der Einwirkungen im Nutzungszeitraum durch Überlagerung aller Verformungseinwirkungen möglich. Außerdem wurde der Beitrag der Betondehnung zwischen den Rissen zur Verformungskompatibilität für eine weitere Optimierung genutzt.

Literatur

- [1] Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings; German version EN 1992-1-1:2004 + AC:2010
- [2] DIN EN 1992-1-1/NA: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau. Deutsches Institut für Normung, Berlin, Ausgabe: 2013-04
- [3] Menn, C. (1986): Zwang und Mindestbewehrung. In: Beton- und Stahlbetonbau, Vol. 81-4, S. 94–99, Ernst & Sohn, Berlin. doi:10.1002/best.198600140.
- [4] Bödefeld, J. (2010): Rissmechanik in dicken Stahlbetonbauteilen bei abfließender Hydratationswärme. Dissertation, Universität Leipzig.
- [5] Turner, K. (2017): Ganzheitliche Betrachtung zur Ermittlung der Mindestbewehrung für fugenlose Wasserbauwerke. Dissertation, Technische Universität Graz.
- [6] Turner, K.; Schlicke, D. and Tue, N. V. (2017): Systematic investigations with restraining frames for reinforced concrete. In: Proceedings of the 2nd International RILEM/COST Conference on Early Age Cracking and Serviceability in Cement-based Materials and Structures, Vol. 2, S. 579–584, RILEM Publications S.A.R.L., ISBN: 978-2-35158-200-8.