

# Berechnungsmodelle für Betonbauteile unter frühem Temperaturzwang

K. Schikora, B. Eierle

*Institut für Statik, Baumechanik und Bauinformatik, TU München*

Aus: Tagungsband  
Baustatik-Baupraxis 7,  
Balkema-Verlag, Seiten  
423-430, Rotterdam:  
1999.

**ZUSAMMENFASSUNG:** Betonbauteile sind rißgefährdet, wenn die Temperaturgeschichte während der Hydratation zu Zwangspannungen führt. Es werden Grundlagen vorgestellt, mit denen eine wirklichkeitsnahe Vorhersage des Rißrisikos möglich ist. Entscheidend ist die Formulierung eines viskoelastischen Stoffgesetzes, welches die Charakteristik des zeitlich erhärtenden Materials abbildet. Darüber hinaus wird anhand von Beispielen gezeigt, wie durch Anwendung von diskreten Rißmodellen eine realistische Aussage über die zu erwartende Bandbreite der Rißweiten getroffen werden kann, und somit eine wirtschaftliche Bemessung der Bewehrung möglich ist.

## 1 PROBLEMSTELLUNG

Beim Abbinden des Zementes führt der exotherme Hydratationsprozeß zur Erwärmung des Bauteils. Noch bevor aufgrund einer niedrigen Umgebungstemperatur und nachlassender Wärmefreisetzung die Abkühlung beginnt, bilden sich Festkörpereigenschaften aus. Ist die Verformung ganz oder auch nur teilweise behindert, so führt dies zu Zwangspannungen, die bei Überschreiten der aktuellen Zugfestigkeit Risse verursachen. Sind die Rißbreiten aus Gründen der Gebrauchstauglichkeit zu begrenzen, so führt die Anwendung der gängigen Mindestbewehrungsregelungen aus den Normen oft zu unwirtschaftlich hohen Bewehrungsmengen, da weder Bauteilgeometrie, Grad der Verformungsbehinderung noch Erhärtungsbedingungen berücksichtigt werden.

Wegen der enormen wirtschaftlichen Bedeutung wird dieser Problembereich bereits seit einiger Zeit seitens der Baustoffwissenschaften untersucht. Letztendlich ist jedoch eine auf das betreffende Bauteil abgestimmte Bemessung nur möglich, wenn entsprechende Rechenverfahren seitens der Baustatik entwickelt werden. Bisherige Forschungsarbeiten beschäftigten sich haupt-

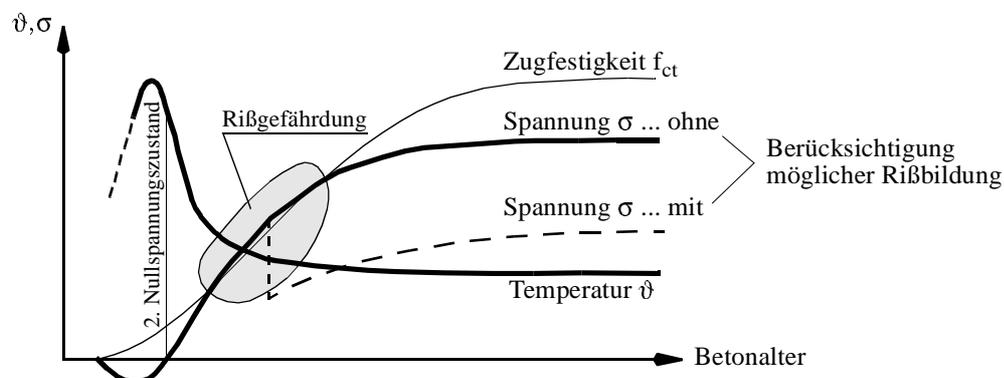


Abb. 1: Entwicklung von Abbinde- und Zwangspannung im jungen Beton

sächlich damit, das Rißrisiko eines Bauteils vorherzubestimmen. Dazu sind im wesentlichen zwei Teilprobleme zu lösen:

1. Vorhersage oder Messung des zeitlichen Temperaturverlaufes während der Hydratation.
2. Vorhersage der mechanischen Zustandsgrößen, die infolge der Hydratationstemperaturen auftreten. Gleichzeitig ist auch die Vorhersage der Entwicklung mechanischer Kenngrößen, insbesondere von Zugfestigkeit und Steifigkeit notwendig.

Mit diesen Methoden läßt sich feststellen, ob ein Bauteil rißgefährdet ist, und es können konstruktive und baustofftechnische Maßnahmen zur Reduzierung des Rißrisikos ergriffen werden. Kommt man allerdings zu dem Schluß, daß eine Mindestbewehrung notwendig ist, erfolgt die Bemessung meist nach den normenseitigen Regelungen. Zur vollständigen und wirtschaftlichen Lösung muß deshalb ein weiterer Punkt untersucht werden:

3. Abschätzung der möglichen Rißbreiten am Bauwerk durch Simulation der Rißvorgänge und der Verformungsbehinderungen unter Einbeziehung von Grenz betrachtungen.

Diese Vorgehensweise führt zu einer Mindestbewehrung, die günstige bauteilspezifische Einflüsse berücksichtigt und somit erheblich wirtschaftlicher sein kann als pauschale Normenregelungen.

## 2 THEORETISCHE LÖSUNGSMETHODEN

Im allgemeinen sind die zugrunde liegenden physikalischen Probleme des Feuchte- und Wärmetransportes und der Mechanik miteinander gekoppelt. In guter Näherung können bei kleinen Verformungen und bei langsam ablaufender Änderung der Zustandsgrößen Feuchte- und Wärmetransportvorgänge vom mechanischen Verhalten eines Kontinuums entkoppelt betrachtet werden.

Bei der Berechnung hydratisierender Betonbauteile tritt als zusätzlich koppelnder Effekt der Fortschritt der Hydratation auf. Der Hydratationsgrad  $\alpha$  beschreibt in Abhängigkeit des Betonalters und der Erhärtingsbedingungen die Wärmeproduktion des Betons und geht in die Berechnung der Verschiebungsfelder durch die Abhängigkeit der Werkstoffparameter ein (Abb. 2).

In den hier angestellten Berechnungen wurde auf eine Feuchteberechnung verzichtet. Allerdings wird die Feuchteabhängigkeit der mechanischen Materialparameter im Mittel durch die empirische Abhängigkeit vom Hydratationsgrad berücksichtigt. Das Schwinden kann ebenfalls im Mittel in Abhängigkeit der Zeit bzw. des Hydratationsgrades als eingepreßte Dehnung berücksichtigt werden.

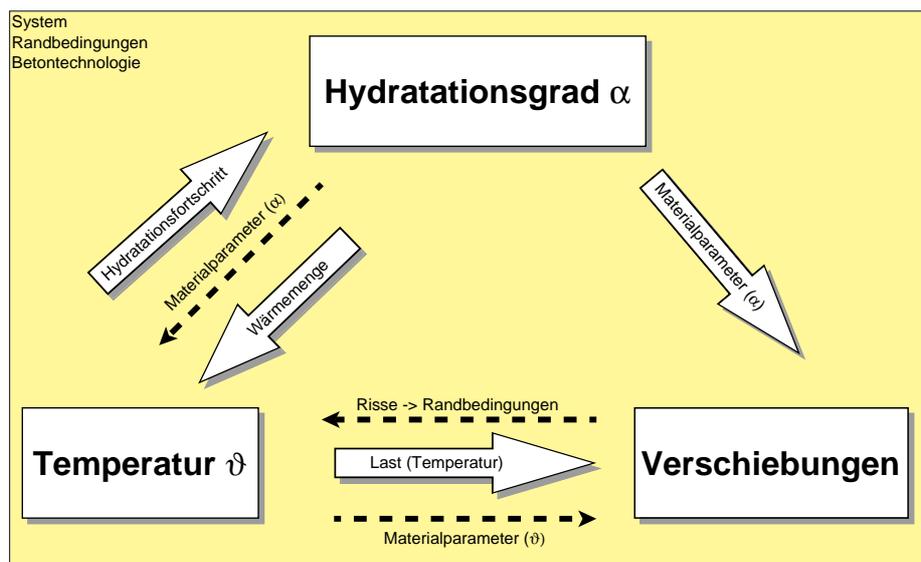


Abb. 2: Kopplung von Hydratation, Temperatur und Verschiebungen/Spannungen

Es lassen sich grundsätzlich verschiedene Grade der Kopplung von Temperatur- und Spannungsproblem unterscheiden, die für die behandelten Problemstellungen sinnvoll sind:

- A *Volle Kopplung*: Die Berechnung der Temperatur- und Verschiebungsfelder erfolgt simultan.
- B *Einseitige Kopplung mit Hydratationsberechnung*: Bei der einseitigen Kopplung wird der Hydratations- und Temperaturzustand vorab getrennt vom Verschiebungszustand berechnet.
- C *Einseitige Kopplung ohne Hydratationsberechnung*: Falls das verwendete Programm nicht die Möglichkeit bietet, Hydratationsfelder zu berechnen, muß die Hydratationswärmemenge  $q(t)$  zur Temperaturberechnung eingegeben werden. Dieses Vorgehen ist dann sinnvoll und dem Kopplungsgrad B quasi gleichwertig, wenn Messungen vorliegen, welche die Wärmeentwicklung der verwendeten Betonrezeptur unter Bauwerksbedingungen beschreiben. Alternativ kann auch die Entwicklung der Bauwerkstemperatur  $\vartheta(t)$  und der Hydratation  $\alpha(t)$  direkt vorgegeben werden.
- D *Überschlägige Methode mit Ersatztemperaturen*: Für eine Abschätzung des Spannungszustandes kann die instationäre Rechnung durch eine stationäre Berechnung ersetzt werden. Dazu wird eine Ersatztemperaturalast  $\vartheta_{\text{ers}}$  auf das statische System aufgebracht und der Spannungszustand mit einem effektiven Elastizitätsmodul  $E_{\text{eff}}$  berechnet. Die Ersatztemperatur wird in der Regel als Differenz zwischen der 2. Nullspannungstemperatur und der Umgebungstemperatur gewählt, wobei eine Unterteilung in Abschnitte erforderlich sein kann. Die Bestimmung der Ersatzsteifigkeit ist sehr unsicher, da nicht nur ein gewichteter Mittelwert des E-Moduls gebildet, sondern auch das viskose Verhalten erfaßt werden muß (vgl. Abschnitt 4.3).

### 3 HYDRATATIONSMODELL

Da die Hydratationsgeschwindigkeit je nach Betonzusammensetzung und Ausgangssituation im Bauteil stark schwankt, ist die Zeit kein geeigneter Parameter zur Klassifizierung des Hydratationsfortschrittes. Deshalb wurden in der Literatur mehrere Vorschläge zur Definition eines dimensionslosen Beiwertes gemacht, der als Hydratationsgrad  $\alpha$  bezeichnet wird. Die gebräuchlichste Definition ist das Verhältnis der bis zum betrachteten Zeitpunkt  $t$  freigesetzten Hydratationswärmemenge zur gesamten Hydratationswärmemenge bei vollständig abgeschlossener Hydratation:

$$\alpha(t) = \frac{Q(t)}{Q_{\infty}} \quad 0 \leq \alpha(t) \leq 1 \quad (1)$$

Der zeitliche Verlauf des Hydratationsgrades hängt von den Erhärtingsbedingungen ab. Hohe Temperaturen beschleunigen die Wärmeproduktion; niedrigere Temperaturen führen zu einer länger andauernden, jedoch geringeren Wärmefreisetzung. Um eine einheitliche Bezugsgröße in der Zeit für unterschiedliche Hydratationsbedingungen zu erhalten, wird ein fiktives *wirksames Betonalter*  $\tau_w$  als Zeitgröße eingeführt. Die Zeitachse wird dabei so verzerrt, daß die Zusammenhänge eines äquivalenten isothermen Referenzprozesses bei 20°C gelten. Für die Berechnung von  $\tau_w$  aus der realen Zeit  $t$  und der Temperatur  $\vartheta(t)$  wurden verschiedene Ansätze vorgeschlagen [10].

Liegen keine Meßwerte über die Wärmefreisetzung im Bauteil vor, so muß in das FE-Programm ein analytischer Ansatz für den Verlauf der Hydratation in Abhängigkeit des wirksamen Betonalters  $\alpha(\tau_w)$  implementiert werden (Kopplungsgrade A oder B). Auch dafür liegen experimentell verifizierte Ansätze vor [3,10]. Die Wärmefreisetzung  $q(t)$  kann somit ermittelt werden:

$$Q = Q_{\infty} \cdot \alpha \quad \Rightarrow \quad q = \dot{Q} = Q_{\infty} \cdot \dot{\alpha} = Q_{\infty} \cdot \frac{\partial \alpha}{\partial \tau_w} \cdot \frac{\partial \tau_w}{\partial t} \quad (2)$$

## 4 VERFORMUNGSBERECHNUNG

### 4.1 Allgemeines

Bei der Berechnung von Bauteilen unter frühem Temperaturzwang kann aufgrund der geringen Druckspannungen in aller Regel von einem linear-viskoelastischen Verhalten im Druckbereich ausgegangen werden. Bei Zugbeanspruchung ist neben dem viskoelastischen Verhalten auch das spröde Verhalten des Betons durch bruchmechanische Modelle zu berücksichtigen. Das verwendete Modell geht von der additiven Zerlegung der Gesamtverzerrungen in elastische, viskose, thermische, schwindabhängige und rißbedingte Anteile aus (Abb. 3).

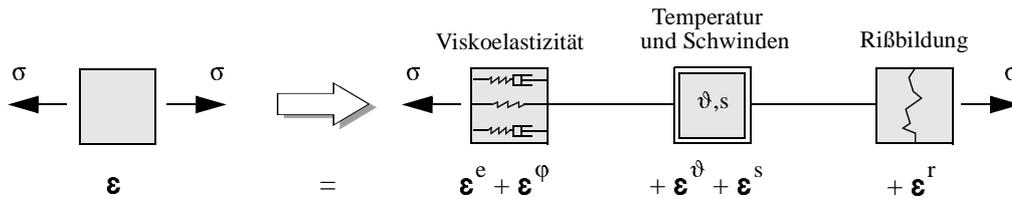


Abb. 3: Modellvorstellung für die Verformungsanteile des Betons bei Zugbeanspruchung

### 4.2 Materialparameter in Abhängigkeit des Hydratationsgrades

Die Veränderlichkeit der elastischen und der meisten bruchmechanischen Materialkenngrößen in Abhängigkeit von  $\alpha$  kann der Literatur entnommen werden [7,8,10]. Über die Veränderlichkeit der Bruchenergie, die sich bei der numerischen Simulation des Zugversagens von Beton weitgehend als Bezugsgröße durchgesetzt hat, gibt es wenige Hinweise in der Literatur [2]. Hier wird vorgeschlagen, für den Verlauf der Bruchenergie einen der Steifigkeitsentwicklung entsprechenden Ansatz zu wählen:

$$G_f(\alpha) = G_{f,\infty} \frac{E(\alpha)}{E_\infty} \quad (3)$$

### 4.3 Kriechfunktionen

Das viskoelastische Verhalten von jungem Beton wird in den meisten Fällen in Form empirisch ermittelter Kriechfunktionen definiert. Dabei ist zwischen zwei Definitionen für die Kriechfunktion zum Zeitpunkt  $t$  infolge einer Spannungsänderung zum Zeitpunkt  $t_0$  zu unterscheiden :

$$\varphi(t, t_0) = \frac{\epsilon^\varphi(t)}{\epsilon^e(t_0)} = \frac{\epsilon^\varphi(t)}{\Delta\sigma(t_0)/E(t_0)} \quad \text{bzw.} \quad \varphi_{28}(t, t_0) = \frac{\epsilon^\varphi(t)}{\epsilon_{28}^e} = \frac{\epsilon^\varphi(t)}{\Delta\sigma(t_0)/E_{28}} \quad (4)$$

Während die meisten theoretischen Untersuchungen auf der ersten Definition  $\varphi$  basieren, sind in den neueren Betonbaunormen ausschließlich Kriechfunktionen  $\varphi_{28}$  enthalten, die auf die 28-Tage-Steifigkeit bezogen sind. Viskoelastische Stoffgesetze, welche die elastischen und viskosen Dehnungsanteile getrennt beschreiben, gehen in der Regel von der Definition  $\varphi$  aus (vgl. Abschnitt 4.4). Bei Anwendung genormter Kriechfunktionen  $\varphi_{28}$  ist deshalb gegebenenfalls eine entsprechende Umrechnung erforderlich (vgl. Gleichung (5)). Von Laube [7] wurden empirische Kriechfunktion  $\varphi$  speziell für jungen Beton angegeben.

Um instationäre Berechnungen zu vermeiden, werden in der Praxis häufig stationäre Lastfälle mit einem effektiven E-Modul  $E_{\text{eff}}$  gerechnet, wenn der Spannungszustand im betrachteten Zeitraum  $t_0$  bis  $t_1$  annähernd konstant ist (vgl. Kopplungsgrad  $D$ , Abschnitt 2). Die z. B. in EC2 ange-

gebene Gleichung für  $E_{\text{eff}}$  basiert auf der Definition von  $\varphi$ , wird jedoch auch auf Kriechfunktionen  $\varphi_{28}$  angewandt. Dies ist genau genommen nur für ein Belastungsalter  $t_0$  von 28 Tagen korrekt. Liegt die Betonsteifigkeit bei Belastungsbeginn noch wesentlich unter  $E_{28}$ , was u.a. auch bei vorgespannten Bauwerken auftritt, ist bei Anwendung der genormten Kriechfunktionen  $\varphi_{28}$  von folgender Gleichung auszugehen:

$$E_{\text{eff}} = \frac{E(t_0)}{1 + \varphi(t_1, t_0)} = \frac{E(t_0)}{1 + \frac{E(t_0)}{E_{28}} \varphi_{28}(t_1, t_0)} \quad \text{mit} \quad \varphi_{28}(t, t_0) = \frac{E_{28}}{E(t_0)} \varphi(t, t_0) \quad (5)$$

#### 4.4 Viskoelastisches Stoffgesetz

Bei einer zeitlichen Veränderlichkeit der Steifigkeit, die im Gegensatz zu plastischen Phänomenen unabhängig vom Spannungszustand stattfindet, treten einige Besonderheiten im Stoffgesetz auf. Bauteile mit anwachsender Steifigkeit (Erhärten, Erstarren) verhalten sich grundsätzlich anders als Bauteile mit abnehmender Steifigkeit (Aufweichen, Schmelzen, Schädigung). Dies spiegelt sich in unterschiedlichen konstitutiven Gleichungen wider, die in Tabelle 1 für den eindimensionalen Fall anhand rheologischer Modelle für eine einmalige Spannungsänderung  $\sigma(t_0)$  veranschaulicht sind.

Die Erhärtung entspricht dem spannungslosen Einbau von Federn in einen gedachten Modellkörper [1]. Die Schädigung kann als Ausbau spannungsbehafteter Federn gedeutet werden, was neben der Steifigkeitsänderung auch ein Freiwerden von Kräften bedeutet. Deren Umlagerung führt bei unveränderter Last zu elastischen Dehnungen, welche oft auch als inelastische Dehnungsanteile bezeichnet werden. Tritt gleichzeitig zur Erhärtung auch eine Schädigung auf, so ist ein verallgemeinertes Stoffgesetz anzuwenden.

Tabelle 1: Modelle und Gleichungen für das elastische Verhalten bei Erhärtung und Schädigung

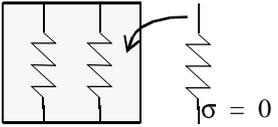
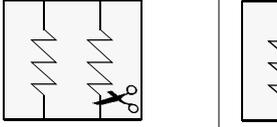
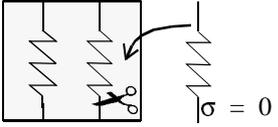
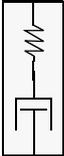
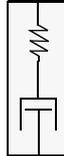
	<i>Erhärtung</i>	<i>Schädigung</i>	<i>Erhärtung mit Schädigung</i>
Modellvorstellung			
Elastizitätsmodulentwicklung	$E(t) = \beta(t)E_{\infty}$	$E(t) = [1 - \delta(t)]E_{\infty}$	$E(t) = \beta(t)[1 - \delta(t)]E_{\infty}$
Rheologischer Modellkörper			
Sofortige elastische Dehnung	$\boldsymbol{\varepsilon}^e(t_0) = \mathbf{D}(t_0)\boldsymbol{\sigma}(t_0)$		
Elastische Dehnungsrate	$\boldsymbol{\varepsilon}^e(t) = 0$	$\boldsymbol{\varepsilon}^e(t) = \dot{\mathbf{D}}(t)\boldsymbol{\sigma}(t_0)$	$\boldsymbol{\varepsilon}^e(t) = \frac{\dot{\delta}}{1 - \delta}\mathbf{D}(t)\boldsymbol{\sigma}(t_0)$
Bezeichnungen	Inverse Werkstoffmatrix $\mathbf{D}(t) = \mathbf{E}(t)^{-1}$ Erhärtungsgrad $\beta \in (0, 1]$ , $\dot{\beta} \geq 0$ Schädigungsgrad $\delta \in [0, 1)$ , $\dot{\delta} \geq 0$		

Abb. 4 zeigt das zeitabhängige Verformungsverhalten eines Körpers, der mit einem konstanten eindimensionalen Spannungszustand belastet wird, bei Anwendung verschiedener elastischer Rechenmodelle.

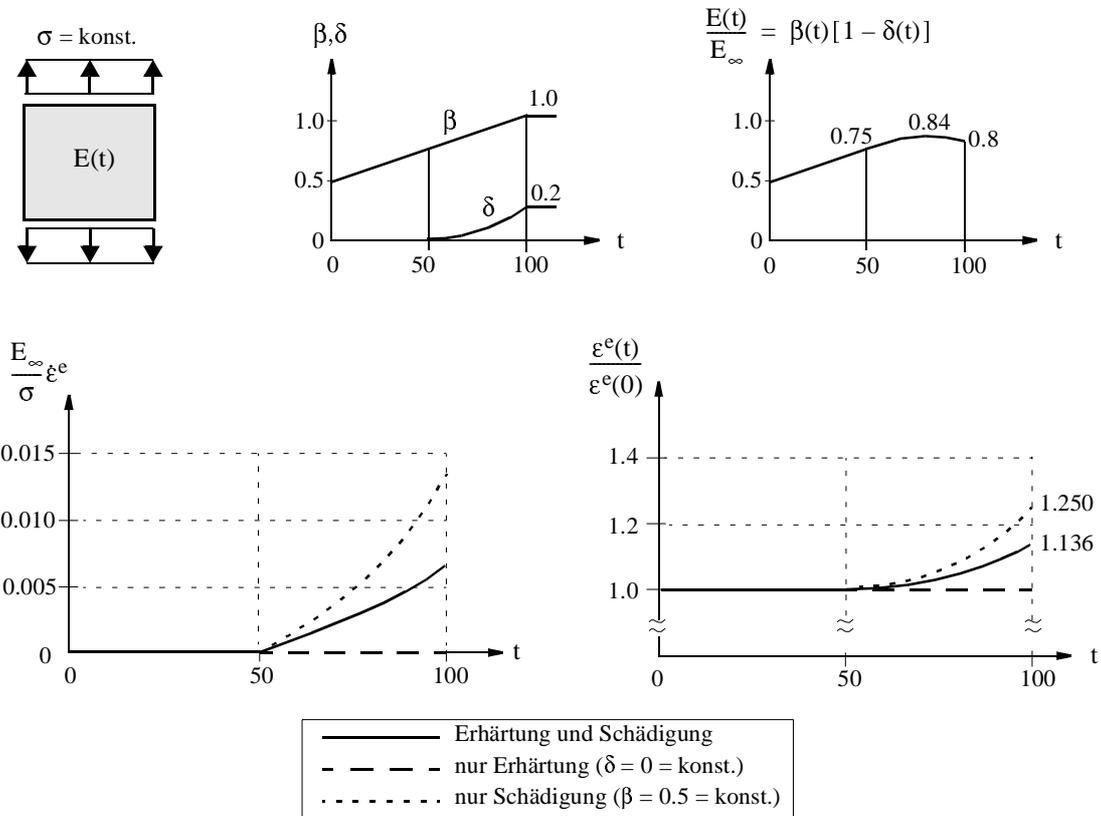


Abb. 4: Beispiel zum elastischen Verhalten bei Erhärtung mit gleichzeitiger Schädigung

Bei Bauteilen unter frühem Temperaturzwang ist eine Berücksichtigung des viskoelastischen Werkstoffverhaltens notwendig, da der Abbau der Zwangsspannungen durch Relaxation bei jungem Beton besonders ausgeprägt ist. Für den Fall der reinen Erhärtung, der für die nachfolgenden Berechnungen vorausgesetzt wird, ergibt sich folgendes Stoffgesetz für die Dehnungsraten:<sup>1</sup>

$$\dot{\epsilon}^e(t) = \mathbf{D}(t)\dot{\sigma}(t) \quad , \quad \epsilon^\varphi(t) = \int_0^t \dot{\varphi}(t, \tau)\mathbf{D}(\tau)\dot{\sigma}(\tau)d\tau + \mathbf{D}(t)\varphi(t, t)\dot{\sigma}(t) \quad \text{mit} \quad \mathbf{D}(t) = \mathbf{E}(t)^{-1} \quad (6)$$

## 5 RISSMODELLE

Auf die Modellierung des spröden Versagens von Beton auf Zug wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen, da im Prinzip die bekannten Modelle auch für hydratisierenden Beton angewandt werden können. Zur Beurteilung der Rißbreite sowie deren Verlauf über den Querschnitt haben sich diskrete Rißmodelle bewährt. Dazu wird an einer ausgesuchten Stelle und in Richtung des erwarteten Risses im FE-Netz ein sogenanntes *Interface*-Element eingebaut, welches nach Errei-

1. Der letzte Term in Gleichung (6) verschwindet in der differentiellen Betrachtungsweise wegen  $\varphi(t, t) = 0$ , ist aber in einem inkrementellen Algorithmus von Null verschieden.

chen der Zugfestigkeit entfestigt (*Tension-Softening*). Sind Ort und Richtung des zu untersuchen- den Risses zunächst nicht bekannt, so kann vorab eine Analyse mit einem verschmierten Rißmo- dell erfolgen. Ebenso kann das restliche Tragwerk außerhalb des Bereichs des diskreten Risses mit einem verschmierten Rißmodell beschrieben werden.

Eine Besonderheit bei der Berechnung erhärtender Betonbauteile ist die Abhängigkeit der Bruchenergie vom Hydratationsgrad. Bei der Anwendung von verschmierten Rißmodellen ist die Maschenweite von Scheibenelementen abhängig von Steifigkeit, Zugfestigkeit und Bruchenergie begrenzt [5]. Mit dem Ansatz für die zeitliche Entwicklung der Bruchenergie nach Gleichung (3) kann gezeigt werden, daß in jedem Fall der erhärtete Beton ( $\alpha = 1$ ) für die maximal zulässige Elementmaschenweite maßgebend ist, welche in der Größenordnung von 80 bis 150 cm liegt.

Um eine normenkonforme Grundlage für die Bemessung der Mindestbewehrung zu gewähr- leisten, wurde bereits in [9] ein Konzept vorgestellt, mit dem die Bewehrung in einem diskreten Riß entsprechend den Rißformeln nach Schießl, die auch DIN 1045-1 und EC2 zugrunde liegen, modelliert werden kann. Dieses Verfahren wurde bei den nachfolgend beschriebenen Berechnun- gen angewandt.

## 6 ANWENDUNG BEI DER MINDESTBEWEHRUNG VON TUNNELINNENSCHALEN

Um zu Aussagen über die zur Rißbreitenbeschränkung erforderliche Mindestbewehrung bei den Münchner U-Bahntunnels zu gelangen, wurden umfangreiche FE-Berechnungen angestellt. Untersucht wurde unter anderem der Einfluß der Bewehrungsmenge auf den Verlauf der Risse in der Innenschale (Abb. 5). Es konnte gezeigt werden, daß Risse, welche in Ringrichtung verlau- fen, Trennrisse darstellen, während Risse parallel zur Tunnelängsachse in der Außenschale enden. Zusammen mit einem umfangreichen Meßprogramm an ausgeführten Tunnels wurde eine Regelung für die Mindestbewehrung der Innenschalen in den Münchner U-Bahntunnels festge- legt, welche seit einiger Zeit erfolgreich angewendet wird [9].

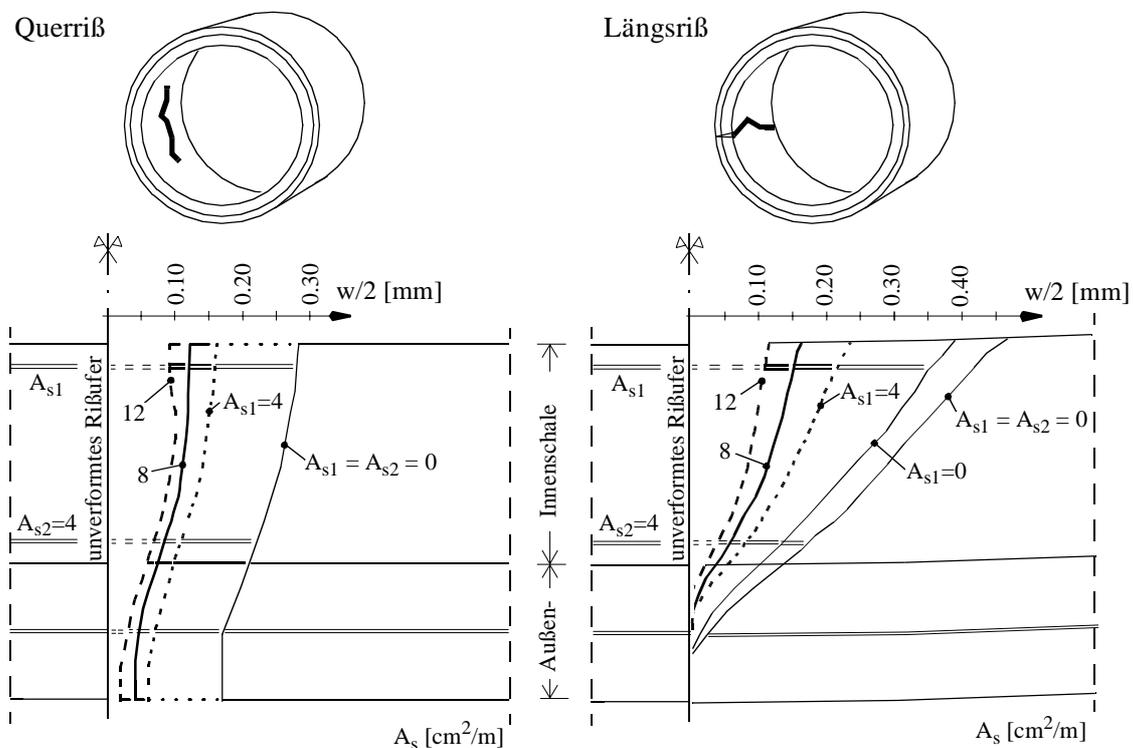


Abb. 5: Rißuferverschiebungen von Tunneln in Abhängigkeit der Bewehrungsmenge

## 7 ANWENDUNG BEI DER MINDESTBEWEHRUNG WEISSER WANNEN

Ein weiteres typisches Beispiel für zwangbeanspruchten jungen Beton sind 'Weiße Wannen'. Ebenso wie bei den bereits erwähnten Tunnelinnenschalen können mit einer FE-Berechnung günstig wirkende Einflüsse auf die Rißbreitenentwicklung berücksichtigt werden, die bei einer Bemessung nach Norm nicht erfaßt werden. Ein Ergebnis unserer Untersuchungen war die Tatsache, daß eine Reduzierung der Rißbreite in gewissen Grenzen sehr effektiv durch Bewehrung erfolgen kann. Genügt die damit erzielbare Rißbreite noch nicht den Erfordernissen, so sind weitere Bewehrungszulagen relativ ineffektiv. Wirkungsvoller und wirtschaftlicher ist eine Kombination mit betontechnologischen Maßnahmen, welche z.B. die Rißursache in Form der Hydratationswärme mindern (Abb. 6).

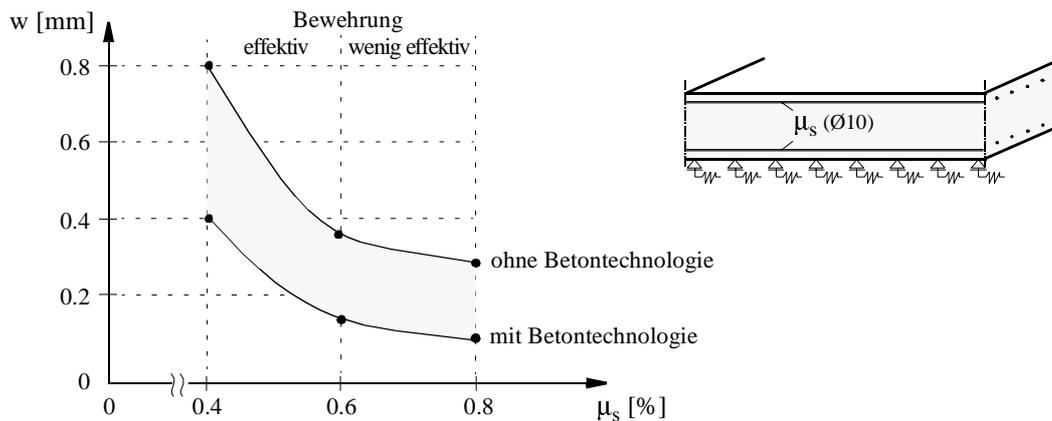


Abb. 6: Effektivität von Bewehrungszulagen zur Rißbreitenbeschränkung bei Bodenplatten

## LITERATUR

- [1] Bažant, Z. P. & Prasannan, S. 1989. Solidification Theory for Concrete Creep. I: Formulation. II: Verification and Application. *Journ. of Eng. Mech.*, Vol. 115, 8/1989, S. 1691-1725.
- [2] Emborg, M. 1990. *Thermal stresses in concrete structures at early ages*. Doctoral Thesis 1989:73D, Div. of Struct. Eng., Luleå Univ. of Technology.
- [3] Gutsch, A.-W. 1998. *Stoffeigenschaften jungen Betons – Versuche und Modelle*. Dissertation am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig.
- [4] Hamfler, H. 1988. *Berechnung von Temperatur-, Feuchte- und Verschiebungsfeldern in erhärtenden Betonbauteilen nach der Methode der finiten Elemente*. DAFStb Heft 395, Berlin: Beuth-Verlag.
- [5] Hofstetter, G. & Mang, H. A. 1995. *Computational Mechanics of Reinforced Concrete Structures*. Braunschweig-Wiesbaden: Vieweg-Verlag.
- [6] Huckfeldt, J. 1993. *Thermomechanik hydratisierenden Betons - Theorie, Numerik und Anwendung*. Dissertation am Institut für Statik der TU Braunschweig.
- [7] Laube, M. 1990. *Werkstoffmodell zur Berechnung von Temperaturspannungen in massigen Betonbauteilen im jungen Alter*. Dissertation TU Braunschweig.
- [8] Onken, P. & Rostásy, F. 1995. *Wirksame Betonzugfestigkeit im Bauwerk bei früh einsetzendem Temperaturzwang*. DAFStb Heft 449, Berlin: Beuth-Verlag.
- [9] Schikora, K & Eierle, B. 1997. Zur Beschränkung der Rißbreiten bei Tunnelinnenschalen aus wasserundurchlässigem Beton. *Bauingenieur* 72/4: S. 185-191.
- [10] Springenschmidt, R. (Ed.) 1998. *Prevention of Thermal Cracking in Concrete at Early Ages – State of the Art Report*. London: E & FN Spon.