



Manfred Rübner

Silke Scheerer · Ulrich van Stipriaan (Herausgeber)

Festschrift
zu Ehren von
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h.
Manfred Curbach

Dresden, 28. September 2016

Impressum

Herausgeber	Silke Scheerer, Ulrich van Stipriaan	
Redaktion	Silke Scheerer	
Autorenfotos	<i>Fotostudio Jünger</i>	<i>S. 124 oben</i>
	<i>Edvard Krikourian</i>	<i>S. 124 unten rechts</i>
	<i>Kirsten J. Lassig</i>	<i>S. 12</i>
	<i>Bertram Lubiger</i>	<i>S. 192</i>
	<i>Juri Paulischkis</i>	<i>S. 104</i>
	<i>A. T. Schaefer, Stuttgart</i>	<i>S. 62</i>
	<i>Sylke Scholz, Dresden</i>	<i>S. 256</i>
	<i>Ulrich van Stipriaan</i>	<i>S. 80, 90, 104, 124 Mitte rechts, 146, 150, 152, 160, 216, 228, 234 Mitte links und unten links/rechts, 292, 320</i>
	<i>Nic Vermeulen</i>	<i>S. 280</i>
	<i>Irina Westermann</i>	<i>S. 42 oben</i>
	<i>Von Autoren zur Verfügung gestellt: S. 16, 24, 42 unten, 124 (2x), 178, 234 (3x)</i>	
Layout, Satz	Ulrich van Stipriaan	
Titelbild	Ulrich van Stipriaan	
Korrektur	Birgit Beckmann, Angela Heller	
Druck	addprint AG, Bannewitz	

Redaktionsschluss für dieses Buch war der 28. August 2016.

Inhalt

<i>Silke Scheerer, Ulrich van Stipriaan und Wolfgang Leiberg</i> Zum Geleit	8
Teil I – Texte zum Kolloquium	11
<i>Hans Müller-Steinhagen</i> Grußwort	12
<i>Harald Budelmann</i> Laudatio	16
<i>Konrad Bergmeister</i> Weniger ist manchmal mehr – ein Beitrag zur Mindestbewehrung	24
<i>Harald S. Müller und Michael Haist</i> Opus Caementitium Optimum – Der nachhaltige Beton des 21. Jahrhunderts	42
<i>Werner Sobek</i> Über die Gestaltung der Bauteilinnenräume	62
Teil II – Weitere Beiträge	79
<i>Thomas Bösche</i> Mehr Mut im Ingenieurbau.....	80
<i>Harald Budelmann und Sven Lehmborg</i> Von der Küchenarbeitsplatte zum leichten Tragwerk – Was kann ultrahochfester faserverstärkter Feinkornbeton?	90

<i>Luna Manolia Daga und Udo Wiens</i>	
Mehr als nur schwarze Buchstaben auf weißem Papier – Ein Essay	104
<i>Ulrich Häußler-Combe</i>	
Aspekte der Modellierung von Stahlbetontragwerken	108
<i>Josef Hegger, Norbert Will, Rostislav Chudoba, Alexander Scholzen und Jan Bielak</i>	
Bemessungsmodelle für Bauteile aus Textilbeton	124
<i>Frank Jesse</i>	
Über die Länge der Leine	146
<i>Peter Mark</i>	
Mit Leichtigkeit	150
<i>Steffen Marx</i>	
Gute Lehre im Konstruktiven Ingenieurbau	152
<i>Viktor Mechtcherine</i>	
Hochduktiler Beton – eine Konkurrenz zu Textilbeton?	160
<i>Karl Morgen</i>	
Deutschlands größte Kamera	178
<i>Peter Offermann</i>	
Wie alles begann	188
<i>Dirk Proske</i>	
Ist die Energiewende ein technischer Hype?	192
<i>Mike Schlaich</i>	
Die Hommage als Quelle der Inspiration	216

<i>Jürgen Schnell</i>	
Fashion Statement	228
<i>Mario Smarslik, Christoph Kämper, Patrick Forman, Tobias Stallmann, Peter Mark und Jürgen Schnell</i>	
Topologische Optimierung von Betonstrukturen	234
<i>Jürgen Stritzke</i>	
Leipziger Großmarkthalle – ein „Historisches Wahrzeichen der Ingenieurbaukunst in Deutschland“	256
<i>Luc Taerwe</i>	
Self-anchored suspension bridges with prestressed concrete deck: historic examples	280
Teil III – Institut für Massivbau	291
<i>Silke Scheerer (Text) · Ulrich van Stipriaan (Fotos)</i>	
Massivbau an der TU Dresden gestern und heute	292
<i>Angela Schmidt</i>	
Die eingeschlichenen Fehler	320
<i>Manfred Curbach</i>	
Habilitation / Promotionen	326
<i>Ulrich van Stipriaan (Fotos)</i>	
Institut für Massivbau Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter	330

Teil I
Texte zum Kolloquium



Konrad Bergmeister

Weniger ist manchmal mehr – ein Beitrag zur Mindestbewehrung

O. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.
phil. Dr. techn. Dr.-Ing. E.h.
Konrad Bergmeister MSc.
Ph.D.

Professor am Institut für
Konstruktiven Ingenieurbau
(IKI), Universität für Boden-
kultur Wien
und u. a. Schriftleiter der Zeit-
schrift Beton- und Stahlbeton-
bau sowie Mitherausgeber
des Betonkalenders



1 Eine kritische Reflexion

Eine kritische Reflexion über die Mindestbewehrung am Beispiel von massiven Tragelementen aus Konstruktionsbeton wird in dieser Publikation angestellt. Grenzwerte wie die Mindestbewehrung werden in den Normen deshalb angeführt, um diskrete größere Risse, ein sprödes Versagen oder um einen Wechsel von Versagensmechanismen zu vermeiden.

„Wenn wir robust konstruieren, braucht es keine Mindestbewehrung“ (siehe dazu auch Polónyi [1] und Pukte et al. [2]) – mit dieser These soll am Beispiel der Wildbachsperrn gezeigt werden, dass durch die geeignete Materialwahl und eine gute konstruktive Durchbildung massive Bauteile auch

mit weniger oder ohne Mindestbewehrung ausgeführt werden können, Bergmeister et al. [3].

Zuerst betrachten wir die verschiedenen Ebenen, um die Voraussetzungen dieser These zu erarbeiten:

Systemebene: Optimierung der statischen Systeme und/oder Optimierung der Geometrie und der Randbedingungen durch Berücksichtigung der zweiachsigen Wirkung der Platten von Wildbachsperrn unter der Wirkung von Talflanken sowie der Auflagerung in eingeschütteten Bereichen mittels Bewertung der Bettung.

Betontechnologische Ebene: Reduktion der Hydratationswärme und damit der Rissbildung durch betontechnologische Maßnahmen (Zusatzstoffe, Wahl puzzolanischer Zemente, Nachbehandlung etc.).

Bewehrungsebene: Konstruktive Optimierung unbewehrter Querschnitte oder gering bewehrter Bauteile bzw. Bauteilbereiche, die geringer beansprucht werden. Ziel ist es, einen von der Querschnittshöhe entkoppelten Ansatz der Mindestbewehrung zu entwickeln. Auch könnten Bewehrungsstähle oder Faserverbundwerkstoffe mit höherer Festigkeit eingesetzt werden, wodurch die Anzahl der Bewehrungslagen verringert und die Betonierbarkeit des Bauteils verbessert würde.

2 Konstruktionen von Wildbachsperrern

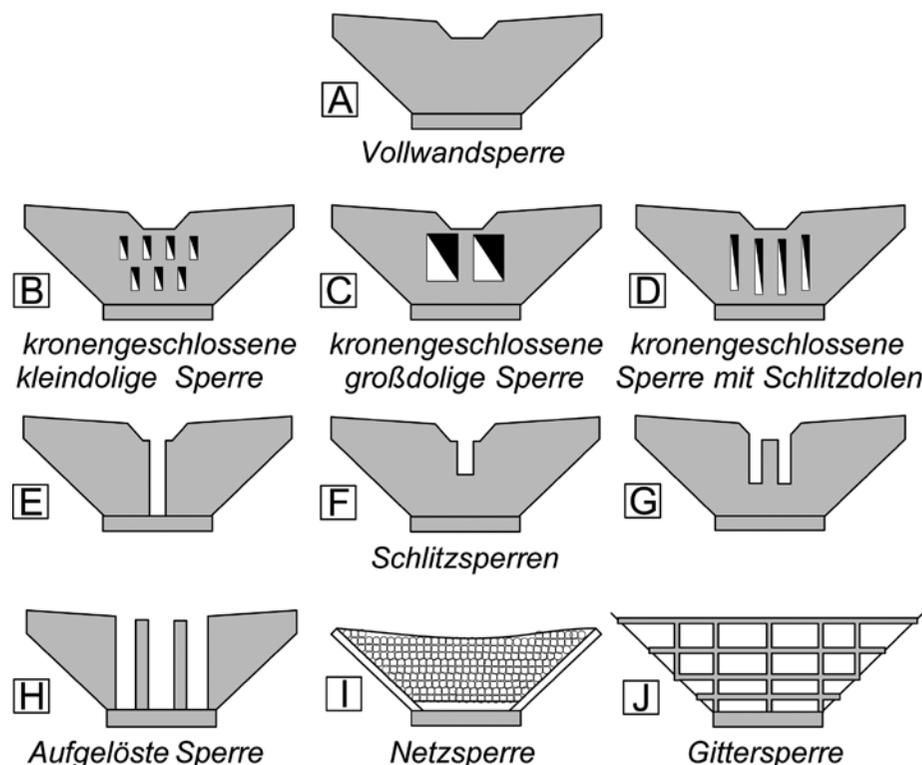
2.1 Einführung und Klassifizierung von Wildbachsperrertypen

Der Schutz vor Naturgefahren wird in Einklang mit integralen Maßnahmen im Einzugsgebiet vorwiegend durch permanente technische Schutzkonstruktionen, wie Wildbachsperrern im Falle von Muren oder Lawinen, gewährleistet. Der Großteil der heute errichteten Wildbachsperrern wird in Stahlbetonbauweise mit massiven (dicken) Querschnitten ausgeführt. Die Bemessungsvorgaben hinsichtlich Mindestbewehrung wurden in den aktuellen eurocodenahen Normen primär für übliche Querschnitte mit geringeren Querschnittshöhen entwickelt. Für massive Bauteile, wie diese bei Wildbachsperrern zum Einsatz kommen, ist die Abschätzung der Zwangsbeanspruchungen und der daraus resultierenden Mindestbewehrung zur Verhinderung der Rissbildung umstritten, vgl. Bödefeld et al. [4]. Der in der EN 1992-1-1 [5] entwickelte Ansatz der

Biegemindestbewehrung wurde nicht für massive Bauteile entwickelt. Durch numerische Simulationen, In-situ-Beobachtungen und experimentelle Materialuntersuchungen wurde daher ein alternativer Vorschlag ausgearbeitet.

In Österreich wurden eigene Normen für die Planung, Bemessung und konstruktive Durchbildung von Wildbachsperrern, die ONR 24800 [6], ONR 24801 [7] und ONR 24802 [8], entwickelt.

*Bild 1
Beispiele für Typen von Wildbachsperrern nach Konstruktionsart, nach ONR 24800 [6]*



2.2 Modellierung der Tragstruktur

Schutzkonstruktionen können gerade im Gebirge eine mehrfache Funktion erfüllen. Im Winter gewähren sie einen Schutz gegen Lawinen, im Sommer dienen sie als Murenschutz. Bei solchen Mehrzwecksperrern kommen verschiedene Lastfallkombinationen zum Tragen, Schäfer/Hilber [9]:

- leere Sperre mit Murenanprall,
- leere Sperre mit Lawinenanprall,
- teilgefüllte konsolidierte Sperre mit Lawinenanprall im oberen Bereich.

Vielfach wird der Murdruck mit dem 1,2- bis 1,8-fachen Wasserdruck dreiecksförmig angesetzt. Lawinenbelastungen werden als gleichförmige Belastung bis 100 kN/m^2 angesetzt.



*Bild 2
Ausgeführtes Beispiel
und 3D-Modell einer
Geschiebedosiersperre
(Foto und Grafik:
Emanuel Strieder)*

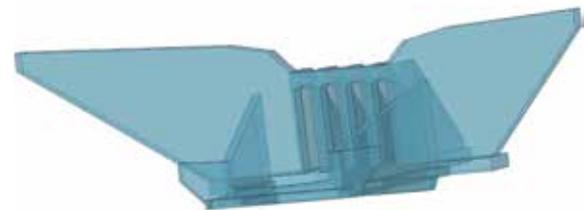
Die Sperren werden größtenteils freistehend berechnet. Seitliche Einspannungen in Felsbereiche werden infolge der meist ungleichmäßigen Felssituationen auf den beiden Talseiten fast nie berücksichtigt. Aus diesem Grund kommen auch Bogensperren nur selten zum Einsatz.

Bei mehrdimensionalen Berechnungen werden berg- und talseitige Zuschüttungen berücksichtigt; bergseitige als aktive Lasten und talseitige als Federsteifigkeiten mittels Bettungszahlen.

3 Einflussfaktoren zur Rissbildung

3.1 Physikalische Grundlagen

Die Frührisse im jungen Beton entstehen primär durch die Wärmeentwicklung während der Hydratation. Die zeitabhängige Entwicklung der mechanischen Materialparameter, der Wärmefreisetzung und der daraus resultierenden Spannung wurde im Rahmen eines Forschungsprojektes mit nichtlinearen FE-Berechnungen an Wildbachsperrern ermittelt, Bergmeister et al. [3].



Während des durch die Hydratation hervorgerufenen Anstiegs der Betontemperatur entwickeln sich die Materialparameter E-Modul, Zugfestigkeit, Druckfestigkeit, Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität etc. Sobald die Zugspannungen im Bauteil die Zugfestigkeit überschreiten, kommt es zur Rissbildung. Ob und wann die Rissbildung eintritt, ist von der zeitlichen Entwicklung der einzelnen Parameter abhängig. Üblicherweise wird die Entwicklung der Materialparameter durch Laborversuche bestimmt und für das Rechenmodell in Form von Entwicklungsfunktionen beschrieben. Die derzeit gängigsten Ansätze zur Beschreibung der Entwicklung der Materialparameter sind das Braunschweiger Stoffmodell (Rostásy/Krauß [10], Rostásy et al. [11]), das skandinavische Stoffmodell [12] und das im MC 90 [13] verankerte Stoffmodell.

Neben den Festigkeiten verändert sich auch die Querdehnzahl, welche vor dem Erstarren des Betons 0,5 ist. Zu Beginn der Erhärtung nimmt die Querdehnzahl rasch auf ca. 0,1 ab und steigt dann allmählich wieder bis zum Endwert von 0,2, Schutter/Kovler [14].

Der Hydratationsgrad ist das Verhältnis der zum Zeitpunkt t freigesetzten Hydratationswärme zur maximal freisetzbaren Hydratationswärme, wie in Gleichung (1) ersichtlich.

$$\alpha(T(t)) = \frac{Q(T(t))}{Q_{\text{pot}}} \quad (1)$$

Mit:

$\alpha(T(t))$ Hydratationsgrad zum Zeitpunkt t

$Q(T(t))$ Zum Zeitpunkt t freigesetzte Hydratationswärmeenergie

Q_{pot} Maximal freisetzbare Hydratationswärme

Sowohl der Widerstand als auch die Zwangseinwirkung ändern sich zeitlich, wodurch die Nachweise zu den maßgeblichen Zeitpunkten zu führen sind. Aus diesem Grund sollten zumindest die Fälle früher und später Zwang bei der Bemessung getrennt betrachtet werden, siehe Meier [15].

Die effektive Betonzugfestigkeit $f_{\text{ct,eff}}$ darf nach derzeitigem Stand der EN 1992-1-1 [5] (und auch nach der davon abgeleiteten ONR 24802:2011 [8]) pauschal mit 50 % der mittleren Zugfestigkeit nach 28 Tagen angenommen werden, wenn die Rissbildung in der frühen Erhärtungsphase des Betons erwartet wird. Der Zeitpunkt der Erstrissbildung wird dabei meist in den ersten 5 Tagen angenommen (sog. früher Zwang). Für die derzeit üblicherweise verwendeten Zementklassen weisen Betone nach 5 Tagen jedoch ca. 75 % der 28-Tage-Zugfestigkeit auf. Empfehlungen für die Annahme von effektiven Betonzugfestigkeiten finden sich im Heft 555 des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton [16].

Für späten Zwang, wenn also Risse nach dem Abfließen der Hydratationswärme auftreten, soll rechnerisch der Mittelwert der 28-Tage-Betonzug-

festigkeit ohne Abminderung, jedoch mit mindestens 3 N/mm² angesetzt werden.

Zur Ermittlung der Rissbreite bei Stahlbeton zum Zeitpunkt des Temperaturlausgleichs ist die effektive Zugfestigkeit nicht erforderlich, da die Rissbreite nicht vom Risszeitpunkt, sondern von der Spannung in der Bewehrung zum Zeitpunkt des Temperaturlausgleichs abhängt, Bödefeld [17].

Einen erheblichen Einfluss auf die Temperaturentwicklung haben die thermischen Randbedingungen, da die Reaktionsgeschwindigkeit der Hydratation von der Temperatur abhängt. Bei niedrigen Temperaturen läuft die Hydratation langsamer ab, wodurch auch die Temperaturdifferenz im Querschnitt geringer ist. Die Hydratation des Zements ist ein exothermer Prozess, d. h. es wird thermische Energie (J/g) freigesetzt. Die dabei entstehenden örtlich und zeitlich variablen Temperaturfelder führen in Betonbauteilen zu lastunabhängigen Dehnungen.

Die Geschwindigkeit der Reaktion kann allgemein durch die Arrhenius-Gleichung bestimmt werden:

$$k(T) = e^{\frac{E_A}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273-T} \right)} \quad (2)$$

Mit:

E_A Aktivierungsenergie
 R Gaskonstante
 T Temperatur

Die Aktivierungsenergie wird unter 20 °C temperaturabhängig verringert. Der Grundwert der Aktivierungsenergie ist abhängig von der Zementart. Einige Werte für die Aktivierungsenergie sind in Tabelle 1 dargestellt.

Das Wärmefreisetzungspotenzial eines Betons ist abhängig von der Zementart und dem Zementgehalt. Es ist über Laborversuche oder entsprechend der Herstellerangaben abschätzbar. In Bild 3 ist die Hydrationswärmeentwicklung für verschiedene Zemente dargestellt.

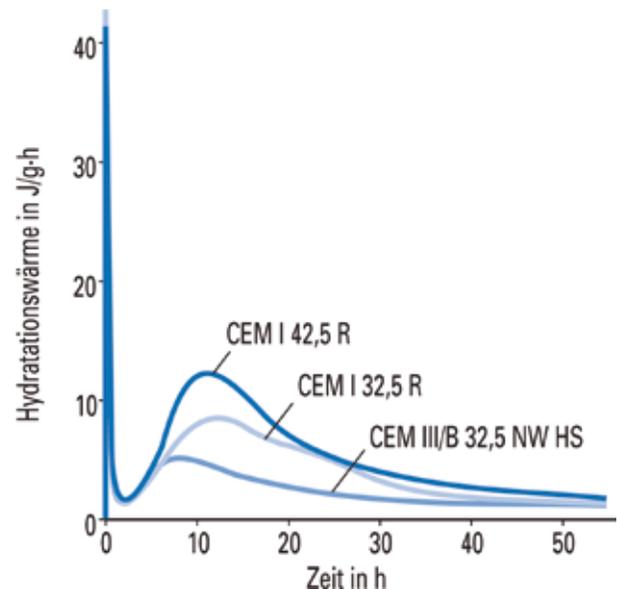


Bild 3 Hydrationswärmeentwicklung unterschiedlicher Zemente, aus [18]

Zementart	Aktivierungsenergie in [kJ/mol]
CEM I	33,50 [19]
CEM III/A	36,83 [19]
CEM III/A (mit 50–64 % Klinkergehalt)	41,03 [19]
CEM III/A (mit 35–49 % Klinkergehalt)	45,23 [19]
CEM IV/A 32,5 N/SR	28,49 [20]

*Tabelle 1
Aktivierungsenergie
verschiedener Zement-
arten, nach Röhling [19]
und García et al. [20]*

3.2 Temperaturen des Frischbetons

Die Frischbetontemperatur beeinflusst die Hydratation und damit die Entwicklung der Temperatur sowie der mechanischen Eigenschaften entscheidend. Durch eine geringere Frischbetontemperatur kann die Rissbildung vermindert werden.

Ist die Verformung eingeschränkt, was beispielsweise bei einer Wand, die auf einem bereits vorhandenen Fundament oder zwischen bereits betonierten Abschnitten errichtet wird, der Fall ist, kann sich diese temperaturabhängige Verformung nur unvollständig einstellen. Die dadurch auftretenden Zwangsspannungen werden als äußerer Zwang bezeichnet.

Die Temperaturentwicklung ist somit entscheidend für Dehnung, Spannung und Rissbildung im jungen Beton. Die unter einer definierten Prozesstemperatur freigesetzte Wärme ist abhängig von der verwendeten Betonzusammensetzung, wobei Zementgehalt und Zementart eine entscheidende

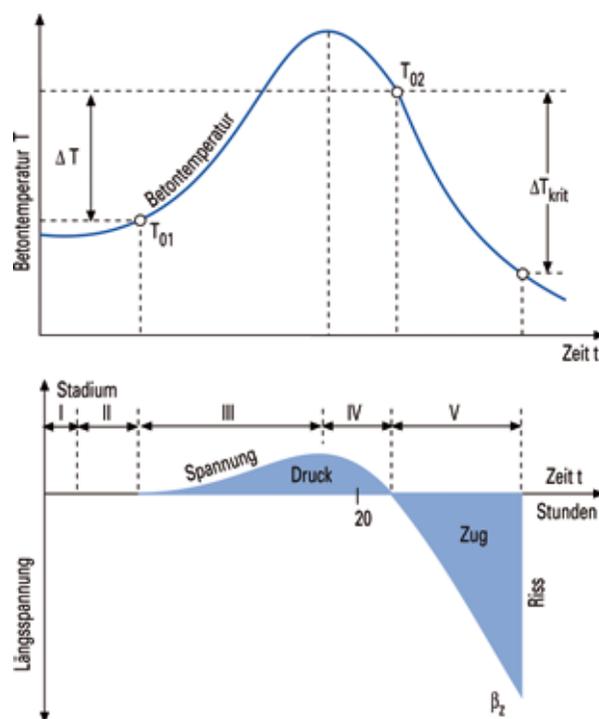
Rolle spielen. Niedrige Umgebungs- und Frischbetontemperaturen führen zu geringeren Temperaturdifferenzen und folglich zu niedrigeren Spannungen, Röhling [19], Nietner [12].

Im Herbst 2013 wurden in Südtirol an im Bau befindlichen Wildbachsperrn Temperaturmessungen im erhärtenden Beton (Stadium III) durchgeführt [3]. Dazu wurden in Bauteilmitte und am Bauteilrand auf Höhe der Bewehrungslage Temperatursensoren eingebaut. Die Fundamentdicke sowie die Wanddicke betragen 1,5 m. Die maximal gemessene Betontemperatur in der Querschnittsmitte der Wand betrug 50,7 °C. Gegenüber der Außentemperatur betrug die maximale Temperaturerhöhung in der Querschnittsmitte 31,3 °C, [3].

3.3 Temperaturberechnungen

Die Berechnungen wurden mit dem Softwarepaket Abaqus 6.13-4 durchgeführt [3]. Die Berechnung ist eine Zeitverlaufsberechnung, bei der die Wärmeenergiefreisetzung und daraus folgende Tem-

Bild 4
Schematische Darstellung von Temperaturverlauf und Zwangsspannungen in jungem Beton bei behinderter Temperaturverformung, aus [18]



peratur-, Material-, Dehnungs-, Spannungs- und Rissindexentwicklung in Zeitschritten erfolgt. Als Gesamtdauer für die Berechnung wurden 28 Tage gewählt.

Die Wärmeenergiefreisetzung und die Materialentwicklung wurden über FORTRAN-User-Subroutinen implementiert. Als Elemente wurden dreidimensionale lineare Solid-Continuum-Elemente mit 8 Knoten-, 3 Verschiebungs- und einem Temperaturfreiheitsgrad verwendet.

3.3.1 Materialmodelle, Entwicklungsfunktionen

Die zeitliche Entwicklung der Materialparameter Druckfestigkeit, Zugfestigkeit, E-Modul und Wärmeenergiefreisetzungsrates wurde für bestimmte Zeitpunkte durch Laboranalysen bestimmt [3]. Für die FE-Berechnung muss der Materialwert zu jedem Zeitpunkt definiert sein; daher wurde eine Funktion mittels Regressionsanalyse an die Messwerte angepasst, mit der die Materialkennwerte zu jedem Zeitpunkt beschrieben werden konnten.

Im Modell wurde die durch chemische Prozesse beim Abbinden freigesetzte Hydratationswärme physikalisch als freigesetzte Wärmeenergie bezogen auf die Zementmasse modelliert. Am Beton wurde der Temperaturanstieg gemessen. Der Zusammenhang zwischen der gemessenen Temperatur und der freigesetzten Wärmeenergie je kg Zement wurde über die Wärmekapazität und die Dichte des Betons sowie den Zementgehalt im Beton hergestellt.

Anders als bei den Festigkeits-, Bruchenergie- und E-Modul-Proben kann die Temperatur bei den adiabatischen Temperaturmessungen nicht konstant mit annähernd 20 °C angenommen und die temperaturbedingte Reaktionsgeschwindigkeit nicht vernachlässigt werden; daher wurde die Entwicklung der Wärmefreisetzung auf die effektive Zeit bezogen.

$$y(t_{\text{eff}}) = y_{\infty} \cdot e^{-\left(\frac{\tau_e}{\tau_{\text{eff}}}\right)^{\alpha}} \quad (3)$$

Mit:

$y(t_{\text{eff}})$ Materialparameter als Funktion der effektiven Zeit

t_{eff} Effektive Zeit

$y_{\infty}, \tau_e, \alpha$ Über Regressionsanalyse bestimmte Parameter

Einige auf Basis der adiabatischen Temperaturmessungen am Beton ermittelten Wärmeenergiefreisetzungskurven sind in den Bildern 5 bis 7 dargestellt.

Als Entscheidungsparameter für den Rissentwicklungsprozess bietet sich der von Nietner [21] vorgeschlagene Rissindex an. Der Rissindex ist das Verhältnis der zeitabhängigen Betonspannungen zu den zeitabhängigen Betonfestigkeiten. Zur Vermeidung von Trennrissen müssen im allgemeinen Werte für den zulässigen Rissindex von 0,65–0,70 eingehalten werden, Eierle/Schikora [22], Rostásy/Krauß [10].

Wenn der zulässige Rissindex vom berechneten zeitabhängigen Rissindex überschritten wird, kann davon ausgegangen werden, dass eine risseverteilende Bewehrung erforderlich ist. Diese ist grundsätzlich nach EN 1992-1-1 [5] zu ermitteln. Bei Berücksichtigung von Versuchsdaten und entsprechenden Randbedingungen kann davon beispiels-

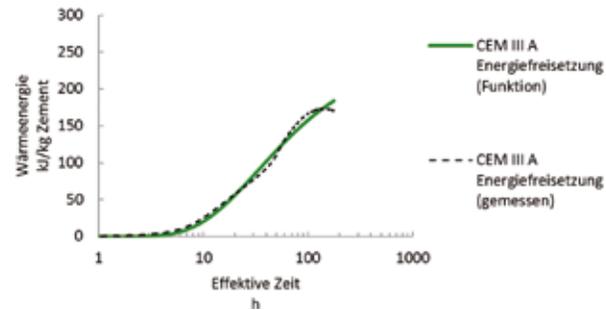


Bild 5
Energiefreisetzung
CEM III A
(Grafik: Strieder), [3]

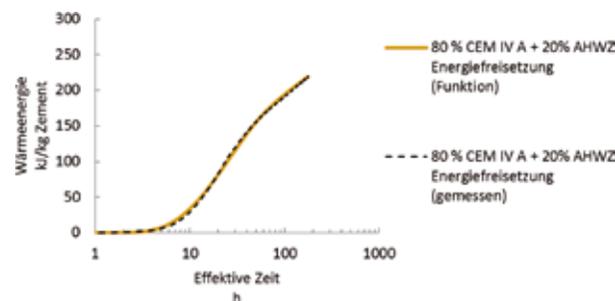


Bild 6
Energiefreisetzung
CEM IV A + aufbereitete, hydraulisch wirksame Zusatzstoffe (AHWZ)
(Grafik: Strieder), [3]

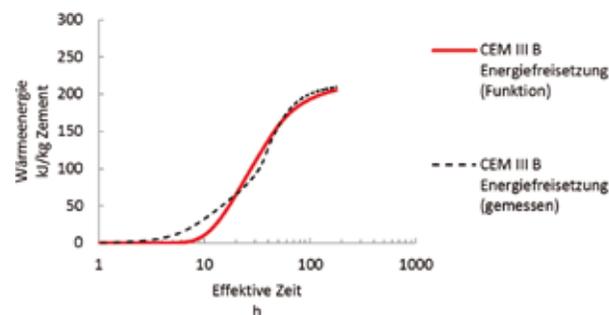


Bild 7
Energiefreisetzung
CEM III B
(Grafik: Strieder), [3]

weise wie für Wasserbauwerke in Deutschland [23] abgewichen werden.

$$I_{cr}(t) = \frac{\sigma_b(t)}{f_{ctm}(t)} \leq I_{cr,zul}$$

Mit:

$I_{cr,zul}$ Zulässiger Rissindex

$I_{cr}(t)$ Zeitabhängiger Rissindex

$f_{ctm}(t)$ Zeitabhängige mittlere zentrische Betonzugfestigkeit

$\sigma_b(t)$ Zeitabhängige Betonspannungen

3.3.2 Ergebnisse der FE-Berechnungen

Damit die Auswirkungen der Temperaturentwicklung an massiven Tragelementen von Wildbach-

(4) sperren erfasst werden können, wurden Parameterstudien für unterschiedliche Bindemittel, für verschiedene Zuschläge, für gängige Geometrien mit variablen Fundamenthöhen von 1,0 m bis 2,0 m und für unterschiedliche Frischbetontemperaturen und Ausschalzeiten durchgeführt [3]. Die meisten Ergebnisse wurden für bestimmte Referenzpunkte in der Mitte des Sperrenkörpers im Bauteilkern und in der Tiefe der Betondeckung dargestellt. Da die Rissbegrenzung für die Dauerhaftigkeit der Bewehrung erforderlich ist, wird der definierte Rissindex in der Tiefe der Betondeckung berechnet. Vereinfachend wird keine Spannungumlagerung durch den entstehenden Riss angenommen und die Spannung im Zustand I zur Ermittlung des Rissindex verwendet.

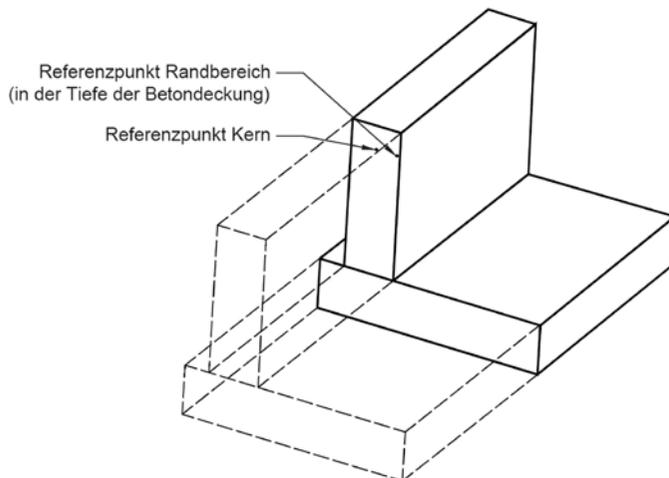


Bild 8 Lage der Referenzpunkte
(Grafik: Strieder), [3]

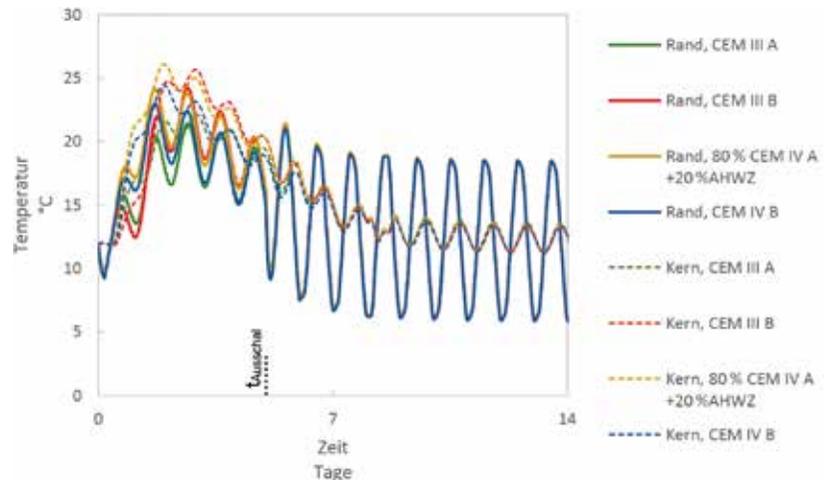


Bild 9 Temperaturentwicklung (Bauteilrand und Kern) in Abhängigkeit des Bindemittels
(Grafik: Strieder), [3]

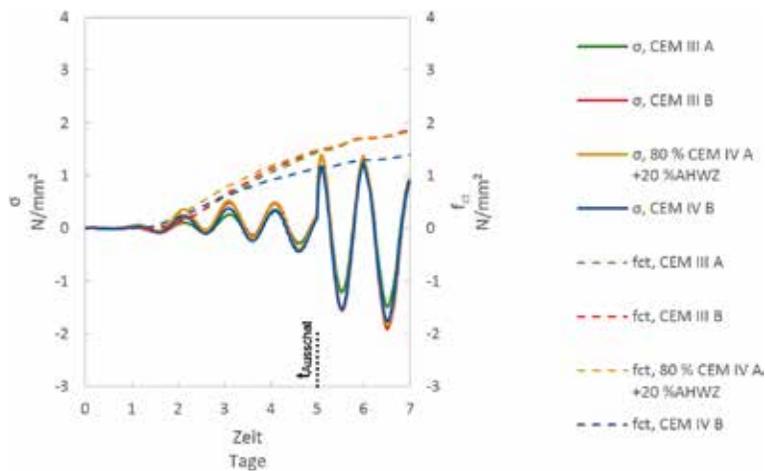


Bild 10 Spannung und Festigkeit (Bauteilrand) in Abhängigkeit des Bindemittels (Grafik: Strieder), [3]

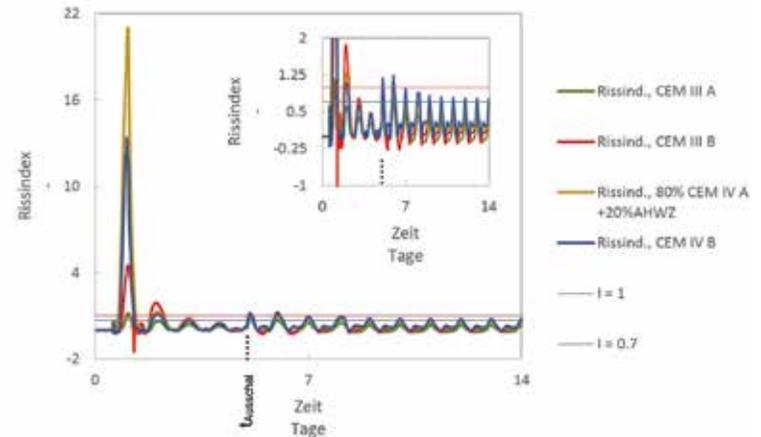


Bild 11 Rissindex (Bauteilrand) in Abhängigkeit des Bindemittels (Grafik: Strieder), [3]

In Bild 9 ist der errechnete Temperaturverlauf für die unterschiedlichen Bindemittel für die in Bild 8 dargestellten Referenzpunkte abgebildet. Ab dem Ausschaltzeitpunkt (5. Tag) verlaufen die Temperaturen ähnlich. Bild 10 zeigt die errechneten Spannungs- und Festigkeitsentwicklungen der Bindemittelarten. In Bild 11 ist der Rissindex dargestellt. Die CEM-III-Bindemittel haben demnach sowohl in der Phase der Wärmeenergiefreisetzung als auch in der Abkühlphase eine geringere Wahrscheinlichkeit zur Rissbildung als die CEM-IV-Bindemittel.

Geänderte Umgebungsbedingungen und Geometrien können auch dazu führen, dass die gerin-

ge Zugfestigkeit stärkere Auswirkungen hat als die Wärmeleitfähigkeit. Daher ist eine gute Nachbehandlung für den Beton wichtig, damit die Zugfestigkeit sich entwickeln kann.

Für Querschnitte mit großer Querschnittsdicke sind eine geringe Frischbetontemperatur und eine längere Ausschaltzeit empfehlenswert, da während der langsamer ablaufenden Wärmefreisetzung mehr Wärme abfließen kann.

Wird frühzeitig ausgeschalt, so kommt es zu erheblichen Temperaturgradienten zwischen Kern und Rand und damit zu Spannungen, die weit über der noch geringen Zugfestigkeit liegen (siehe Bild 12).

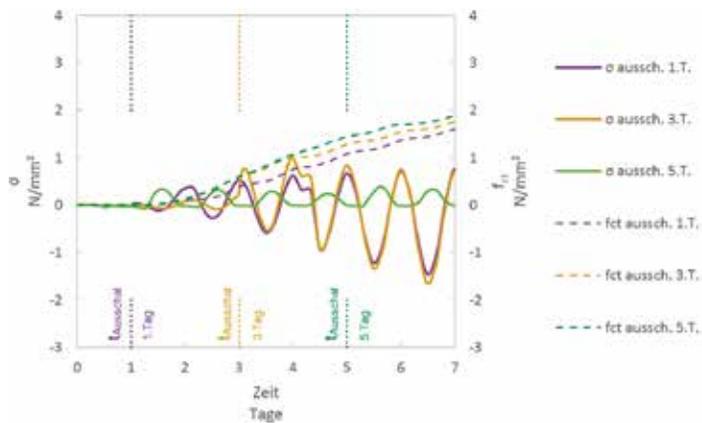


Bild 12 Spannung und Festigkeit (Bauteilrand) in Abhängigkeit vom Ausschalzeitpunkt (Grafik: Strieder), [3]

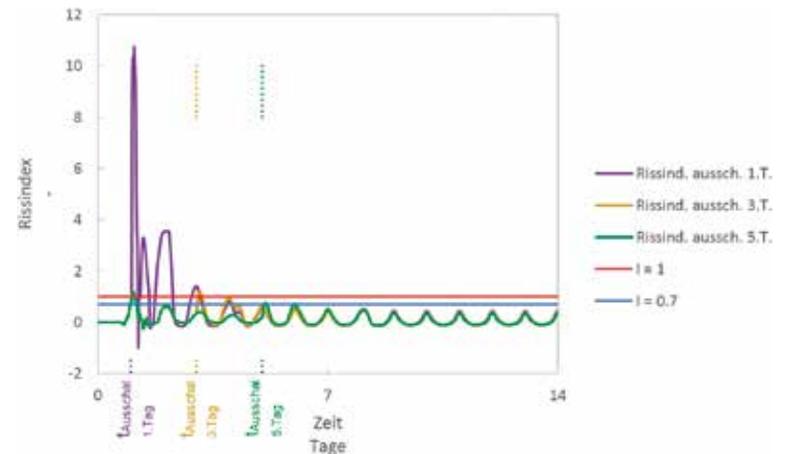


Bild 13 Rissindex in Abhängigkeit vom Ausschalzeitpunkt (Grafik: Strieder), [3]

Einen geringeren, aber dennoch feststellbaren Einfluss hat die geänderte Temperatur auf die Entwicklung der Festigkeit des Materials. Wird früher ausgeschalt, bleibt die Festigkeit im kritischen Randbereich geringer als bei einem entsprechend späteren Ausschalzeitpunkt, siehe Bild 13.

3.3.3 Folgerungen aus der Simulation [3]

- ❑ Bei Verwendung des Bindemittels CEM III A 32,5 N kommt es mit den untersuchten Betonvarianten zur geringsten Rissbildung infolge Hydratationswärme.
- ❑ Auch der Zuschlag beeinflusst die Rissbildung durch dessen Wärmeleitfähigkeit.

- ❑ Mit Zunahme der Bauteildicke nimmt die Gefahr der Rissbildung zu. Bei dicken Bauteilen ist die Begrenzung der Frischbetontemperatur sinnvoll, um den maximalen Temperaturanstieg zu begrenzen.
- ❑ Bei kalten Umgebungstemperaturen ist von der Verwendung von Zementen mit langsamer Wärmeenergiefreisetzung abzuraten, da der Verlauf der Hydratation bei tiefen Temperaturen schwer abzuschätzen ist (Frostgefahr).
- ❑ Bei Außentemperaturen über 30 °C und unter 5 °C sollten andere Zementtypen als CEM III A 32,5 N bzw. Festigkeitsklassen (32,5; 42,5 bzw. R, N, L, oder LH) oder geänderte Zementmengen verwendet werden.

- Ein spätes Ausschalen des Bauteils trägt erheblich zur Verringerung der Rissbildung bei. Ausschulfristen von 5 Tagen und mehr sind empfehlenswert. Auf alle Fälle muss auf eine gute Nachbehandlung geachtet werden.

4 Konzepte zur Mindestbewehrung

Zusammenfassend werden zuerst die Ansätze zur Ermittlung der Mindestbewehrung nach den Normen, Regelwerken und Richtlinien – hier EN 1992-1-1 von 2011 [5], ONR 24802:2011 [8] und BAW-MFZ [23] – vergleichend dargestellt. Dann werden auf der Grundlage dieser Untersuchungen spezifisch für Plattentragwerke von Wildbachsperrern Vorschläge für eine reduzierte (Mindest-)Bewehrung gemacht.

4.1 Mindestbewehrung für den Grenzzustand der Tragfähigkeit

4.1.1 Beton mit Mindestbewehrung

In der EN 1992-1-1:2011 bzw. in den meisten nationalen Betonbaunormen wird die Mindestbewehrung von biegebeanspruchten Bauteilen proportional zur Querschnittsdicke angesetzt.

4.1.2 Gering bewehrter Beton

Der in der ONR 24802:2011 angegebene Ansatz lässt eine Reduktion der Mindestbiegebewehrung zu (in der EN 1992-1-1 nicht vorgesehen), wenn die-

se die im Grenzzustand der Tragfähigkeit erforderliche Bewehrung überschreitet. Dieses Konzept ist gültig für Bauteile, in denen der Gehalt an Biegezugmindestbewehrung in 50 % des Bauteils über dem im Grenzzustand der Tragfähigkeit erforderlichen Bewehrungsgehalt liegt.

4.1.3 Unbewehrter Beton

Es gibt in der EN 1992-1-1 und in der ONR 24802 die Möglichkeit, Bauteile unter Einhaltung bestimmter Kriterien unbewehrt auszuführen.

4.2 Mindestbewehrung für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit sind die Spannungen zu begrenzen, die Rissbreiten zu kontrollieren und die Verformungen zu begrenzen.

4.2.1 Begrenzung der Spannungen

Die Begrenzung der Zugspannungen im Stahl sowie der Druckspannungen im Beton ist im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit laut EN 1992-1-1 erforderlich. Meist wird die Begrenzung der Spannungen bei Bauteilquerschnitten von Wildbachsperrern im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit nicht maßgebend, da die Auslastung der Querschnitte relativ gering ist. Daher ist eine Mindestbewehrung zur Spannungsbegrenzung üblicherweise nicht erforderlich.

4.2.2 Begrenzung der Rissbreiten infolge Lasteinwirkung

Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ist die Rissbreite zu begrenzen, um den Korrosionsschutz und somit die Dauerhaftigkeit der Bauteile zu gewährleisten.

Die maximal zulässigen Rissbreiten für Stahlbetonbauteile ohne Anforderung an die Wasserdurchlässigkeit sind in den verschiedenen nationalen Normen ähnlich geregelt und werden auch in der Bemessungspraxis so angewandt:

- ❑ EN 1992-1-1:
0,3 bzw. 0,4 mm
abhängig von Exposition, Einwirkungskombination und Bewehrung
- ❑ ONR 24802:
0,3 bzw. 0,4 mm (gem. EN 1992-1-1)
0,25 mm für wasserdichte Bauwerke (gem. ZTV-W LB 215 [24])

4.2.3 Begrenzung der Rissbreiten infolge Zwang

Bei massiven Betonbauteilen spielt die Rissbreitenbegrenzung bedingt durch Hydratationswärme meist eine entscheidende Rolle. Die in EN 1992-1-1 von 2011 und in vielen nationalen Normen festgelegten Ansätze zur rissbreitenbegrenzenden Min-

destbewehrung weisen wie die Ansätze zur Biegemindestbewehrung einen zur Querschnittsdicke proportionalen Bewehrungsgehalt auf.

Ein Unterschreiten der zur Rissbreitenbegrenzung erforderlichen Bewehrung ist nach der Norm EN 1992-1-1:2011, Abschnitt 7.3.2 (2) zulässig, sofern eine genauere Berechnung durchgeführt wird.

Eine solche Berechnung ist beispielsweise eine instationäre Temperaturfeldberechnung mit nachgeschalteter oder gekoppelter Spannungsermittlung. Diese Verfahren werden derzeit bedingt durch den hohen Rechenaufwand für Großprojekte oder für wissenschaftliche Arbeiten angewandt.

In Bödefeld [17] wird ein speziell für Massenbeton entwickeltes Verfahren aufgezeigt, das die Möglichkeit einer genaueren Ermittlung der Mindestbewehrung infolge Zwang bietet, ohne dass dazu instationäre Temperaturfeldberechnungen erforderlich sind.

Schlicke [25] hat den Ansatz aus Bödefeld [17] erweitert, um auch viskoelastisches Materialverhalten zu berücksichtigen. Als Grundlage für die Ermittlung der Kriechparameter wird dazu der in der EN 1992-1-1 angeführte Ansatz herangezogen.

4.2.4 Begrenzung der Verformungen

Aufgrund der meist massiven Querschnitte und der geringen Anforderungen an die zulässige Ver-

formung ist üblicherweise der Nachweis der Verformungsbegrenzung nicht relevant.

5 Folgerungen für weniger bewehrte massive Bauteile

Massive Bauelemente können auch mit geringeren als die erforderliche Mindestbewehrung sowie auch unbewehrt ausgeführt werden. Dazu müssen betontechnologische, einbautechnische und konstruktive Bedingungen berücksichtigt werden.

Als Optimierung der Mindestbewehrung bei massiven Bauteilen kann der Ansatz nach ONR 24802 [8] – empfohlen auch für Wildbachsperren – angewandt werden. Dabei kann die erforderliche Mindestbewehrung mit dem Faktor K nach ONR 24802 abgemindert werden.

$$K = \sqrt{\frac{A_{s,GZT}}{A_{s,min}}} \quad (5)$$

$$A'_{s,min} = \sqrt{\frac{A_{s,GZT}}{A_{s,min}}} \cdot A_{s,min}$$

Mit:

K	Abminderungsfaktor
$A_{s,GZT}$	Erforderliche Bewehrung im Grenzzustand der Tragfähigkeit
$A_{s,min}$	Mindestbewehrung nach EN 1992-1-1
$A'_{s,min}$	Abgeminderte Mindestbewehrung ONR 24802

Bei der Abstufung der Mindestbewehrung auf geringere als die in der EN 1992-1-1 oder in nationalen Normen angegebene Bewehrungsmengen sollten folgende Grundsätze eingehalten werden [3]:

- Die Bewehrungsreduktion soll je Sprung 50 % nicht überschreiten, um einen abrupten Übergang von einem hoch bewehrten Stahlbetonbauteilbereich zu einem gering bewehrten Bauteilbereich zu vermeiden.
- Die Abstufungssprünge der Bewehrung sollen in einem Bereich von mindestens 100 cm oder $1 \cdot d$ (St. Venantscher Bereich) und maximal 150 cm oder $2 \cdot d$ erfolgen.

- Als unterer Grenzwert für die abgeminderte Mindestbewehrung sollte der Ansatz in Bild 14 (Gegenüberstellung mit der Mindestbewehrung entsprechend des Ansatz nach EN 1992-1-1) eingehalten werden; diese Mindestbewehrung wurde in der ONR 24802 und in ZTV-W LB 215 [24] für Bauteile von Wasserbauten als Bewehrung an allen Außenflächen vorgeschlagen.

Das Einsparungs- und Optimierungspotential liegt sowohl in den Bereichen der abgeminderten

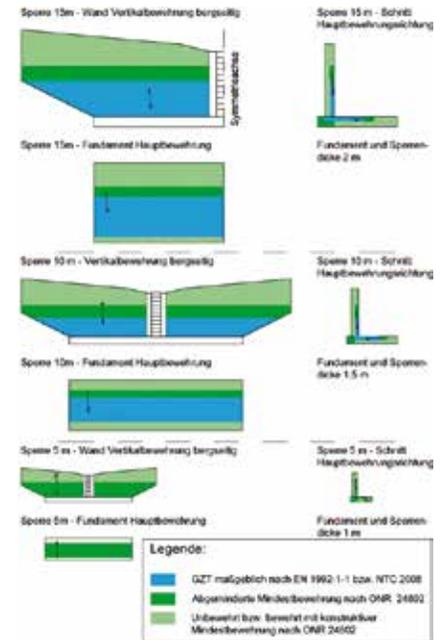


Bild 14 Bewehrung in Hauptbiegerichtung der Bauteile nach ONR 24802 [8] (Wildbachsperrenkonzept), ermittelt am 2D-Modell (Grafik: Strieder), [3]

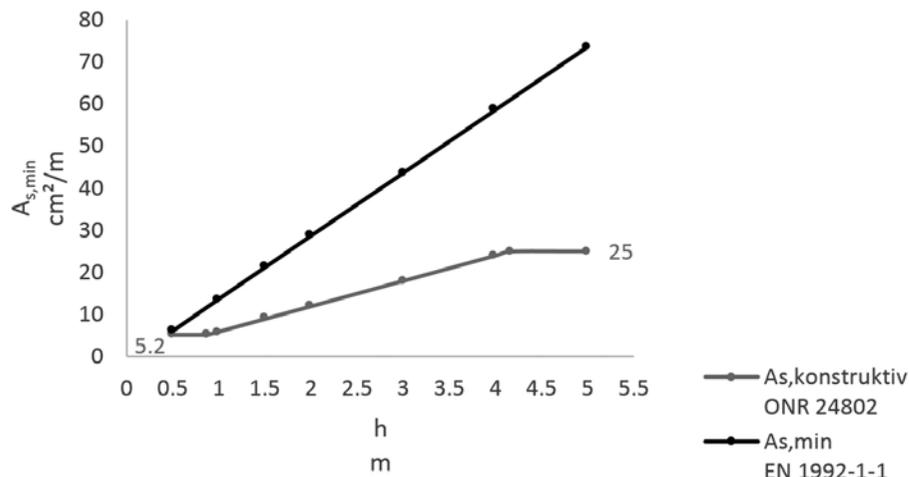


Bild 15 Konstruktive Mindestbewehrung nach EN 1992-1-1 und ONR 24802

(Grafik: Strieder), [3]

Mindestbewehrung als auch in den unbewehrt bzw. konstruktiv bewehrt ausgeführten Bereichen.

Wie die Ergebnisse der FE-Berechnungen [3] auch gezeigt haben, ist bei optimierten Betonen und Geometrien für gut abschätzbare thermische Umgebungsbedingungen durchaus ein Rissindex realistisch, bei dem gänzlich auf die rissbreitenbegrenzende Bewehrung verzichtet werden kann. Bedingt durch die Vielzahl an Einflussgrößen kann jedoch keine allgemeingültige Aussage getroffen werden. Mit betontechnologischen Maßnahmen, mit begleitender FE-Berechnung und guten konstruktiven Lösungen kann mit weniger Bewehrung sicher mehr erreicht werden!

Literatur

- [1] Polónyi, S.: Zuviel Stahl im Beton? Beton- und Stahlbetonbau 109 (2014) 628–636
- [2] Pukte, T; Bergmeister, K.; Mark, P.: Wirtschaftliches Konstruieren und Bewehren. In: Bergmeister, K.; Wörner, J.-D.; Fingerloos, F. (Hrsg.): Betonkalender 2016, Vol. 1, Berlin: Ernst & Sohn, 2016, 695–739
- [3] Bergmeister, K.; Hilber, R.; Strieder, E.: Verringerung der Kosten von Stahlbeton-Schutzbauwerken im Wasserbau. Endbericht des Forschungsprojektes Nr. 875-15-012, Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Universität für Bodenkultur Wien, 2016, 1–170
- [4] Bödefeld, J.; Ehmann, R.; Schlicke, D.; Tue, N. V.: Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreiten in Stahlbetonbauteilen infolge des Hydratationsprozesses – Teil 1: Risskraft-basierter Nachweis nach DIN EN 1992-1-1. Beton- Stahlbetonbau 107 (2012) 1, 32–37
- [5] EN 1992-1-1:2011-01: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau
- [6] ONR 24800:2009-03: Schutzbauwerke der Wildbachverbauung – Begriffe und ihre Definitionen sowie Klassifizierung
- [7] ONR 24801:2013-08: Schutzbauwerke der Wildbachverbauung – Statische und dynamische Einwirkungen

- [8] ONR 24802:2011-03: Schutzbauwerke der Wildbachverbauung – Projektierung, Bemessung und konstruktive Durchbildung
- [9] Schäfer, J.; Hilber, R.: Bemessung von Sperrenbauwerken in Italien (Südtirol). In: Stand der Technik im Naturgefahreningenieurwesen – Tagungsband zur Fachtagung an der Universität für Bodenkultur Wien am 23.–25.4.2014, 49–50
- [10] Rostásy, F. S.; Krauß, M.: Frühe Risse in massigen Betonbauteilen – Ingenieurmodelle für die Planung von Gegenmaßnahmen. In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb, Hrsg.): Schriftenreihe des DAfStb, Heft 520, Berlin: Beuth, 2001
- [11] Rostásy, F. S.; Krauß, M.; Budelmann, H.: Planungswerkzeug zur Kontrolle der frühen Rißbildung in massigen Betonbauteilen – Teil 3: Eigenschaften und Stoffmodelle jungen Betons. Bautechnik 79 (2002) 9, 641–647
- [12] Spange, H.; Pedersen, E. S.: HETEK – Control of Early Age Cracking of Concrete – Main Report. Report as part of The Danish Road Directorate’s Research Programme HETEK, Report No. 118, 1997
- [13] CEB-FIP Model Code 90. 1993
- [14] De Schutter, G.; Kovler, K.: Short term mechanical properties. In: Bentur, A. (Ed.): Early Age Cracking in Cementitious Systems – Report of RILEM Technical Committee 181-EAS – Early age shrinkage induced stresses and cracking in cementitious systems, 2003, 111–120
- [15] Meier, A.: Der späte Zwang als unterschätzter – aber maßgebender – Lastfall für die Bemessung – Teil 2: Hinweise für Tragwerksplaner. Beton- und Stahlbetonbau 110 (2015) 3, 179–190
- [16] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton DAfStb (Hrsg.): Erläuterungen zur DAfStb-Richtlinie wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton. In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton DAfStb (Hrsg.): Schriftenreihe des DAfStb, Heft 555, Berlin: Beuth, 2006
- [17] Bödefeld, J.: Rissmechanik in dicken Stahlbetonbauteilen bei abfließender Hydratationswärme. In: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW, Hrsg.): Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Nr. 92, Karlsruhe, 2010
- [18] VDZ Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hrsg.): Zement Taschenbuch 2002. 50. Ausg., Düsseldorf: Bau+Technik, 2002
- [19] Röhling, S.: Zwangsspannungen infolge Hydratationswärme. 2. überarb. Aufl., Düsseldorf: Bau + Technik, 2009
- [20] García, A.; Castro-Fresno, D.; Polanco, J. A.: Evolution of penetration resistance in fresh concrete. Cement and Concrete Research 38 (2008) 5, 649–659
- [21] Nietner, L.: Thermisch bedingte Risse. In: Müller, H. S.; Nolting, U.; Haist, M. (Hrsg.): Beherrschung von Rissen in Beton – Tagungsband zum 7. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, 23.3.2010 am Karlsruher

- Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe: KIT Scientific Publ., 2010, 23–32
- [22] Eierle, B.; Schikora, K.: Zwang und Rissbildung infolge Hydratationswärme – Grundlagen, Berechnungsmodelle und Tragverhalten. In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb, Hrsg.): Schriftenreihe des DAfStb, Heft 512, Berlin: Beuth, 2000
- [23] BAW – Bundesanstalt für Wasserbau (Hrsg.): Rissbreitenbegrenzung für frühen Zwang in massiven Wasserbauwerken (MFZ). BAW-Merkblatt, Karlsruhe, 2011
- [24] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau (ZTV-W) für Wasserbauwerke aus Beton und Stahlbeton (Leistungsbereich 215) – ZTV-W LB 215. Bonn, 2012
- [25] Schlicke, D.: Mindestbewehrung für zwangbeanspruchten Beton, Festlegung unter Berücksichtigung der erhärtungsbedingten Spannungsgeschichte und der Bauteilgeometrie. Diss., TU Graz, 2014, erschienen in: Tue, N. V. (Hrsg.): Monographic Series TU Graz – Schriftenreihe des Instituts für Betonbau SIB, Vol. 4, Graz: Verlag der TU Graz, 2014

Mehr als ein großartiger Mensch und Wissenschaftler – Manfred Curbach

Der Wissenschaftler und Lehrer: Eine wesentliche Voraussetzung für das Umsetzen von Wissen ist Mut und Willen. Darin liegt auch ein enormes Innovationspotential. Man könnte sich auf den Erfinder der Dampflokomotive Stephenson berufen, der vor 200 Jahren sagte: „Ich weiß nicht, wie ich etwas lösen kann, aber ich weiß, dass ich es lösen will!“

Manfred glaubt immer an eine Lösung und gibt den MitarbeiterInnen das Gefühl, die Ziele sicher zu erreichen. Er hat ein großes Fachwissen, vernetztes Denken, eine kulturelle Verwurzelung mit einer großen Wertschätzung für die historischen Leistungen unserer Vorfahren und Lehrmeister und ist stets auf der Suche nach Neuem.



Der Mensch und Freund: Außergewöhnliche Menschen haben eine außergewöhnliche Sensibilität und Intelligenz; Manfred hat neben diesen Eigenschaften noch eine außergewöhnliche Menschenfreundlichkeit!

Manfred ist ein reflektiver Mensch mit einer großen Begabung zum Zuhören. Kommunikation heißt für ihn nicht reden, sondern zuhören, überlegen, denken – und dann reden.

*„Die Schwingungen der Gedankenkräfte sind die feinsten und folglich die mächtigsten, die es gibt!“
(Charles Haanel)*

Manfred hat eine tiefe emotionale Wärme mit feinen Gedankenkräften und eine große Demut – danke für Deine Freundschaft!

*Ad multos annos
Konrad Bergmeister*

*Konrad Bergmeister,
Manfred Curbach.
Dresdner Brücken-
bausymposium 2013*

*(Foto:
Ulrich van Stipriaan)*