

Als massige Bauteile aus Beton bezeichnet man im Allgemeinen Bauteile, deren kleinste Abmessung mehr als 0,80 m beträgt. Für Bemessung, Konstruktion, Betontechnik und Ausführung gelten grundsätzlich die Normen DIN 1045 und DIN EN 206-1.

Der Kern massiger Bauteile aus Beton erhärtet im jungen Alter praktisch unter nahezu adiabatischen Bedingungen, also fast ohne Wärmeaustausch, da die im Bauteilquerschnitt entstehende Hydratationswärme deutlich den möglichen Abfluss der Hydratationswärme über die Bauteiloberfläche übersteigt. Die damit verbundenen Volumenänderungen können äußeren und inneren Zwang erzeugen, der wiederum zu unkontrollierten Rissen führen kann.

Um unter diesen Randbedingungen die Gebrauchstauglichkeit und die Dauerhaftigkeit dieser Betonbauteile sicherzustellen, sind besondere Maßnahmen zu ergreifen. Die DAfStb-Richtlinie „Massige Bauteile aus Beton“ [1] lässt für diese Maßnahmen Abweichungen und Ergänzungen zu den Normen DIN 1045 und DIN EN 206-1 zu.

Tafel 1: Erforderliche Zementmenge und spezifische Hydratationswärme für eine adiabatische Temperaturerhöhung von 1 K

Zementmenge [kg/m ³]	240	300	350	400
Hydratationswärme [kJ/kg]	9,8	7,8	6,7	5,9

1 Betontemperaturen und Zwang

1.1 Hydratationswärme und Bauteiltemperaturen

Bei der Erhärtung von Beton wird Hydratationswärme frei. Solange die in einer Zeiteinheit freigesetzte Hydratationswärme größer ist als die über die Oberfläche des Bauteils abfließende Wärme, erhöht sich die mittlere Bauteiltemperatur.

Ohne Berücksichtigung des Wärmeabflusses entwickelt sich bis zum Zeitpunkt t durch entstehende Hydratationswärme eine adiabatische Temperaturerhöhung $\Delta T_H(t)$ gemäß Gleichung.

$$\Delta T_H(t) = \frac{z \cdot \Delta Q_H(t)}{c \cdot \rho} \quad (1)$$

mit z = Zementmenge im Beton [kg/m³]
 $\Delta Q_H(t)$ = Hydratationswärme zum Zeitpunkt t [kJ/kg]
 c = spezifische Wärme des Betons [kJ/(kg·K)]
 ρ = Rohdichte des Betons [kg/m³]

Wenn man für einen Normalbeton eine Rohdichte von 2350 kg/m³ und eine spezifische Wärme von 1 kJ/(kg·K) annimmt, erhöht sich im adiabatischen Fall die Bauteiltemperatur um jeweils 1 K, wenn sich bei den in Tafel 1 aufgelisteten Zementmengen die entsprechenden Hydratationswärmen entwickeln.

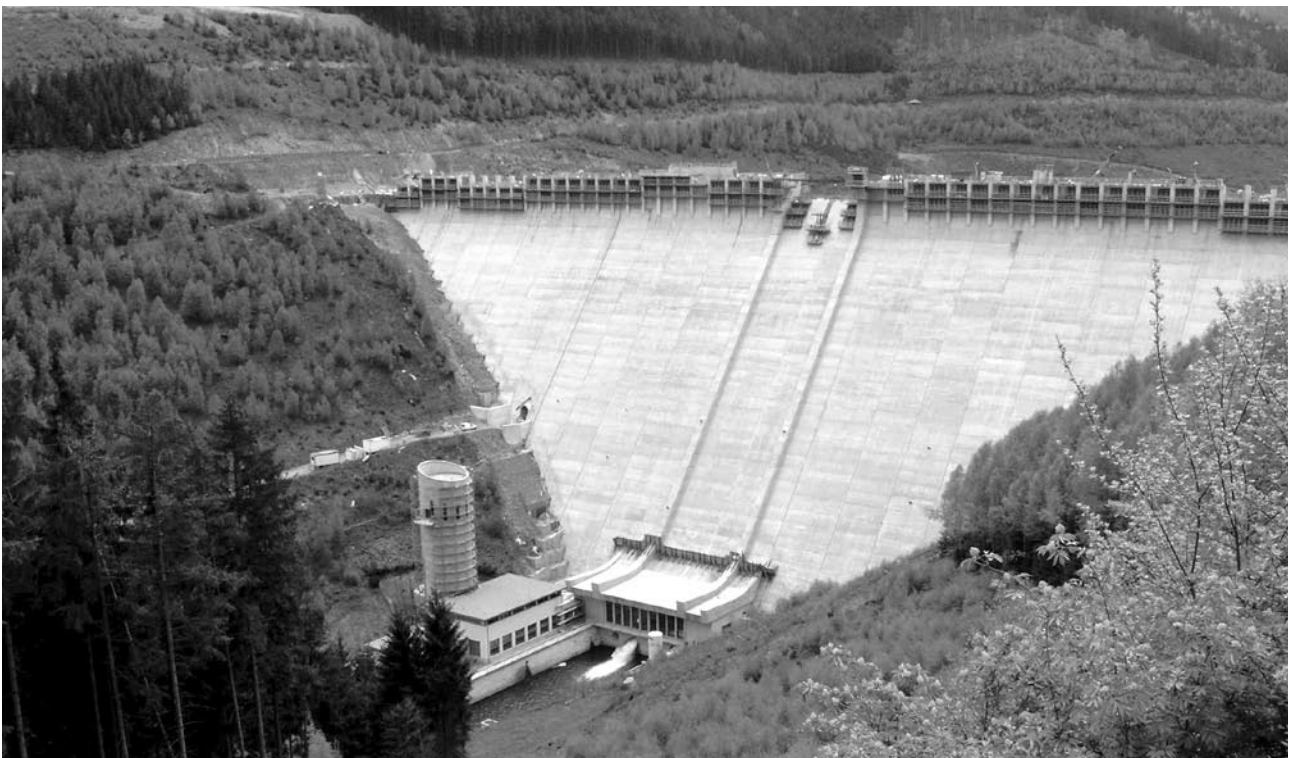


Bild 1: Talsperre Leibis-Lichte im fortgeschrittenen Bauzustand

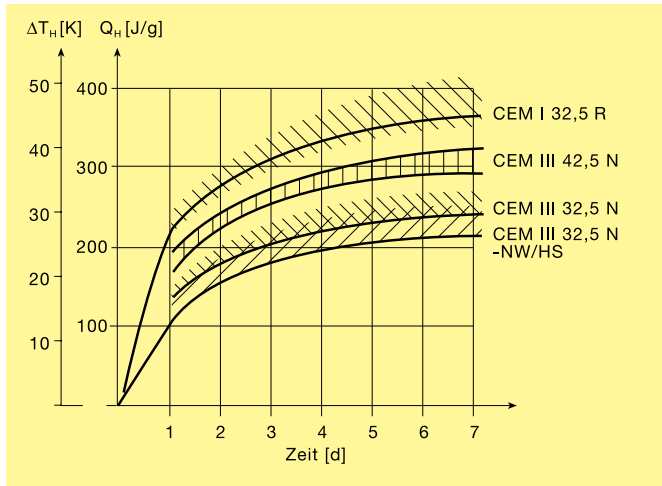


Bild 2: Hydratationswärme verschiedener Zementarten unter adiabatischen Bedingungen (Temperaturänderungen bezogen auf $z = 300 \text{ kg/m}^3$)

Die im Bild 2 dargestellten Hydratationswärmern Q_H verschiedener Zementarten wurden unter adiabatischen Bedingungen gemessen. Die auf der Ordinate ebenfalls angegebenen Temperaturänderungen ΔT_H sind für Normalbeton mit 300 kg/m^3 unter adiabatischen Bedingungen näherungsweise zu erwarten.

Für die Berechnung des anfänglichen Temperaturverlaufs im Bauwerk nach Gleichung 1 sind die bis zum jeweiligen Zeitpunkt gemessenen Werte für die Hydratationswärme anzusetzen. Die adiabatisch bestimmten Werte für die Hydratationswärme liegen über den unter konstanter Temperatur (isotherm bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$) ermittelten Werten nach Tafel 2. Für Zemente mit hoher Anfangsfestigkeit beträgt nach 7 Tagen die unter isothermen Bedingungen ermittelte Hydratationswärme ca. 90 % der adiabatisch bestimmten Wärme. Für Hochofenzement mit niedriger Hydratationswärme liegt das Verhältnis bei etwa 75 % [2].

Nahezu adiabatische Bedingungen stellen sich im Kernbereich von Betonbauteilen mit großen Abmessungen ein. In der Regel läuft die Wärmefreisetzung teiladiabatisch ab.

Sollten keine experimentellen Angaben über die Wärmeentwicklung zur Verfügung stehen und berücksichtigt man zudem die Richtwerte für die Hydratationswärme der Zemente nach Tafel 2, lassen sich für den adiabatischen Fall die maximal zu erwartenden Erhöhungen der Bauteiltemperaturen während der Hydratation schnell überschlägig ermitteln.

Verwendet man z. B. in einem Beton 240 kg/m^3 CEM III/B 32,5 N, so sind im Kern eines massigen Bauteils bei $15 \text{ }^\circ\text{C}$ Frischbetontemperatur nach dem ersten Tag etwa zwischen 6 K und 18 K Temperaturerhöhung zu erwarten.

Tafel 2: Richtwerte für die Hydratationswärme deutscher Zemente bestimmt mit dem Lösungskalorimeter nach DIN EN 196-8

Zementfestigkeitsklasse	Hydratationswärme nach Tagen [kJ/kg]			
	1	3	7	28
32,5 N	60...175	125...250	150...300	200...375
32,5 R/42,5 N	125...200	200...335	275...375	300...425
42,5 R/52,5 N/52,5 R	200...275	300...350	325...375	375...425

Ausschlaggebend für die Erhöhung der Bauteiltemperatur während der Hydratation sind nach Gleichung (1) die Zementmenge und die spezifische Hydratationswärme. Die spezifische Hydratationswärme wird wesentlich durch die Zementart und die Frischbetontemperatur bestimmt. Je höher die Frischbetontemperatur ist, umso höher wird die in der Zeiteinheit freigesetzte Hydratationswärme. Erhöht sich unter Normalbedingungen (Frischbetontemperatur von ca. $15 \text{ }^\circ\text{C}$) die Frischbetontemperatur um 1 K, so entspricht die damit nach drei Tagen zusätzlich freigesetzte Hydratationswärme etwa einer Zementmenge von 6 kg/m^3 bis 14 kg/m^3 .

1.2 Temperaturverlauf im Bauteil

Übersteigt die Bauteiltemperatur die Umgebungstemperatur, fließt die Wärme entsprechend den Gesetzmäßigkeiten der Wärmeleitung in die Umgebung ab. Solange die in einer Zeiteinheit entstehende Hydratationswärme größer ist als die gleichzeitig abfließende Wärmemenge, steigt die Bauteilmitteltemperatur. Wird die abfließende Wärmemenge größer, sinkt die Bauteilmitteltemperatur.

Die Bauteilmitteltemperatur lässt sich in Zeitschritten nach Gleichung (2) berechnen [3].

$$T_{b,i+1} = (T_{b,i} - T_{L,i}) \cdot \exp(-m \cdot \Delta t_i) + T_{L,i+1} + \Delta T_{H,i} \quad (2)$$

mit $T_{b,i+1}$ = Bauteiltemperatur am Ende des Zeitschrittes Δt_i
 $T_{b,i}$ = Bauteiltemperatur am Anfang des Zeitschrittes Δt_i
 $T_{L,i}$ = Lufttemperatur am Anfang des Zeitschrittes Δt_i
 $T_{L,i+1}$ = Lufttemperatur am Ende des Zeitschrittes Δt_i
 $\Delta T_{H,i}$ = im Zeitschritt Δt_i freigesetzte Hydratationswärme
 m = Abkühlungsbeiwert [$1/h$]

$$m = \frac{U \cdot A}{c \cdot \rho \cdot V} \quad (3)$$

mit U = Wärmedurchgangskoeffizient [$\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K})$]
 A = Oberfläche des Bauteils [m^2]
 c = spezifische Wärme des Betons [$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]
 ρ = Rohdichte des Betons [kg/m^3]
 V = Volumen des Bauteils [m^3]

Liegt die Mitteltemperatur des Bauteils vor, kann die Temperaturdifferenz zwischen Kern und Rand des Bauteils mit Hilfe der Biot-Zahl Bi

$$Bi = \frac{U \cdot d}{2 \cdot \lambda} \quad (4)$$

mit d = Dicke des Bauteils [m]
 λ = Wärmeleitfähigkeit des Betons [$\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{K})$]

abgeschätzt werden.

Kern- und Randtemperatur eines Bauteils verhalten sich entsprechend Gleichung (5)

$$\frac{T_K - T_R}{T_K - T_L} = \frac{Bi}{Bi + 2} \quad (5)$$

mit T_K = Temperatur im Kern des Bauteils
 T_R = Temperatur am Rand des Bauteils
 T_L = Lufttemperatur

Die Genauigkeit der Temperaturabschätzung wird insbesondere durch die exakte Erfassung der Hydratationswärme $\Delta T_{H,i}$ und des Abkühlungsbeiwerts m bestimmt. Die Entwicklung der Hydratationswärme eines Zements lässt sich über das jeweilige Lieferwerk erfahren oder durch Näherung ermitteln.

Der Abkühlungsbeiwert m wird wesentlich durch den Wärmeübergangskoeffizienten U bestimmt und kann in Abhängigkeit von der Dämmung der Bauteiloberfläche und der dort auftretenden Windgeschwindigkeit aus Bild 3 entnommen werden.

Die in Betonbauteilen im jungen Alter auftretenden Temperaturen werden hinsichtlich Temperaturverlauf und Temperaturhöhe damit vor allem durch die Zementart, die Zementmenge, die Schalung, die Bauteilgeometrie, die Frischbetontemperatur und die Lufttemperatur beeinflusst. Einen Überblick über die Auswirkungen dieser Parameter auf die Temperaturentwicklung (Mitteltemperatur) einer Wand zeigt Bild 4.

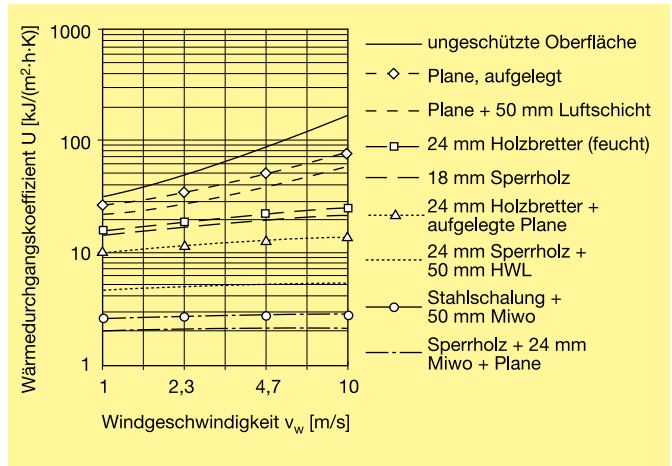


Bild 3: Wärmeübergang und Wärmedurchgangskoeffizienten U in Abhängigkeit von der Dämmung der Bauteiloberfläche und der Windgeschwindigkeit

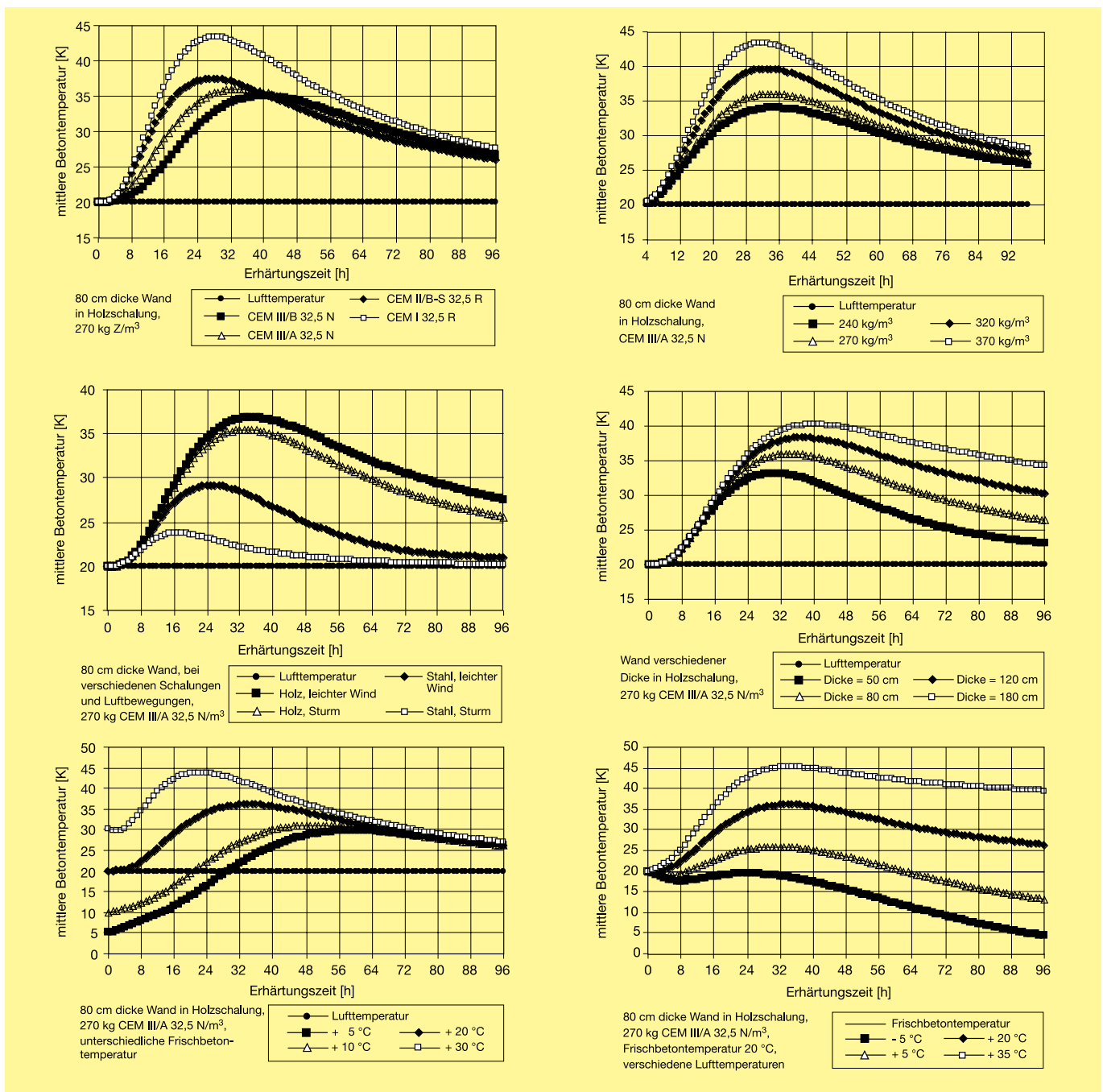


Bild 4: Auswirkungen der Variationen von maßgebenden Parametern auf die Temperaturhöhe und den Temperaturverlauf in massigen Betonbauteilen

1.3 Entwicklung der mechanischen Eigenschaften im jungen Beton

Bei der Tragwerksplanung von Betonbauwerken wird im Allgemeinen davon ausgegangen, dass die der Bemessung zu Grunde liegenden Werte des Betons innerhalb von 28 Tagen erreicht werden. Dies hängt allerdings im Wesentlichen von der Betonzusammensetzung und von den Erhärtingsbedingungen ab.

Für massige Bauteile aus Beton lässt die Richtlinie es jedoch zu, den Nachweis für die Entwicklung der mechanischen Eigenschaften auch zu späteren Zeiträumen als 28 Tage zu führen. Dafür ist es günstig, den Zement und die Zusammensetzung des Betons im Hinblick auf eine möglichst niedrige Hydratationswärmeentwicklung und damit geringe Festigkeitsentwicklung auszuwählen und die mechanischen Eigenschaften erst in einem Prüfalter von 56 oder gar 91 Tagen nachzuweisen.

Unabhängig vom Prüfalter entwickeln sich die Druckfestigkeit, die zentrische Zugfestigkeit und der Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Zeit auch bei höherem Prüfalter exponentiell. Treten Bauteiltemperaturen auf, die deutlich von 20 °C abweichen – und das ist der Regelfall –, kann die Entwicklung der Eigenschaften des Betons über Reifefunktionen abgeschätzt werden.

Zudem ist zu beachten, dass sich der relative statische E-Modul in den ersten Tagen schneller entwickelt als die relative Zug- und Druckfestigkeit.

Zugbruchdehnung

Die Zugbruchdehnung von jungem Beton durchläuft im Kurzzeitversuch in der Anfangsphase ein Minimum von 0,04‰ und erreicht nach 3 Tagen etwa 0,1‰ (siehe auch Bild 5). Bei Langzeitversuchen ist die Zugbruchdehnung durch das vergleichsweise hohe Kriechvermögen des jungen Betons etwas größer.

Kriechverformung und Spannungsrelaxation

Wird Festbeton belastet, nehmen die durch Spannungen verursachten Verformungen durch Kriechen kontinuierlich zu. Auf der anderen Seite bauen sich durch Verformungen erzeugte Spannungen durch Relaxation teilweise wieder ab.

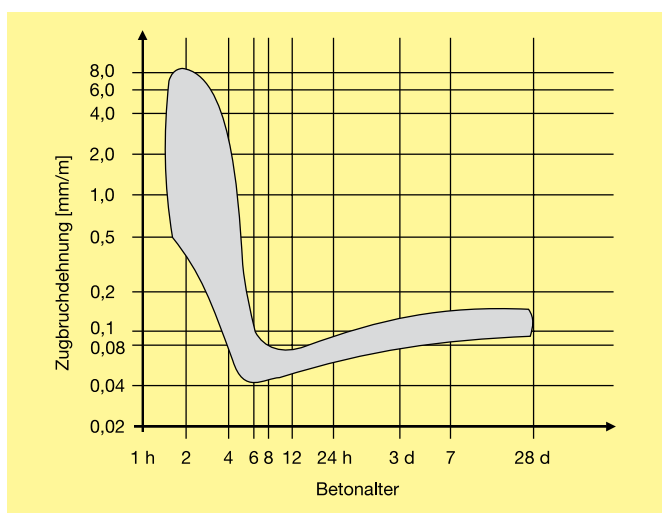


Bild 5: Kurzzeitbruchdehnung von jungem Beton im zentrischen Kurzzeit-Zugversuch

Im jungen Beton können sich durch Spannungen verursachte Verformungen und durch Verformungen verursachte Spannungen praktisch vollständig wieder abbauen. Je jünger der Beton, umso schneller erfolgt der Abbau.

Während der Erhärtung eines Betons nehmen demzufolge Kriechen und Relaxation zunehmend ab. Kriechen und Relaxation sind zwar für Festbeton hinreichend untersucht, für jungen Beton liegen aber nur wenige Messungen vor. Kriechen und Relaxation können für jungen Beton heute qualitativ und quantitativ lediglich grob beschrieben werden.

1.4 Zwang und Rissgefährdung

Werden lastunabhängige Volumenänderungen im jungen Massenbeton behindert, können dadurch bedingte Zugspannungen die aktuellen Zugfestigkeiten überschreiten und zu Rissen führen. Um Risse im jungen Beton zu vermeiden, sind

- die Behinderungen der Volumenänderungen weitestgehend zu verringern,
- die lastunabhängigen Volumenänderungen zu reduzieren und
- die Entwicklung der zentrischen Zugfestigkeit zu beschleunigen.

Äußerer Zwang

Lastunabhängiger äußerer Zwang entsteht bei jungen massigen Bauteilen im Wesentlichen durch abfließende Hydratationswärme, wenn die damit verbundenen Volumenänderungen behindert werden. Die entscheidende Einflussgröße ist die Behinderung der Verformung (z. B. fest eingespannter Baukörper, Wand auf Bodenplatte, Wand auf Fundament, Bodenplatte auf Unterlage), die nur in seltenen Fällen 100 % beträgt. Im Allgemeinen ist die Behinderung deutlich geringer (z. B. bei Wand auf Fundament etwa 50 %). Ein Trennriss entsteht im Allgemeinen dann, wenn die behinderte Dehnung 0,1‰ bis 0,14‰ beträgt.

Die Entstehung von Rissen aus äußerem Zwang in einem jungen Bauteil ist ein sehr komplexer Vorgang, da die Entwicklung des Zwangs und der mechanischen Eigenschaften des Betons gleichzeitig nebeneinander, allerdings i. d. R. mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten ablaufen. Gut veranschaulicht werden diese komplexen Vorgänge mittels eines Reißrahmenversuchs, bei dem eine vollständig verformungsbehinderte Wand simuliert wird (siehe auch Bild 6).

Wenn Dehnungen vollständig behindert werden, führen Temperaturdifferenzen von ca. 10 K und mehr zu Rissen im Beton. Beträgt die Verformungsbehinderungen 50 % bis 90 %, und davon geht man heute bei äußerem Zwang allgemein aus, entstehen zwangsläufig erste Risse bei Temperaturdifferenzen von mehr als 12 K bis 20 K.

Innerer Zwang

Innerer Zwang durch abfließende Hydratationswärme entsteht durch die Temperaturdifferenz zwischen dem Kern und dem Rand eines Betonbauteils sowie durch Trocknungsschwinden an der Bauteiloberfläche. Je größer die in der Zeiteinheit abfließende Wärme ist, desto größer ist die Temperaturdifferenz. Die Verformungsbehinderung ist im Falle des inneren Zwangs immer 100 %.

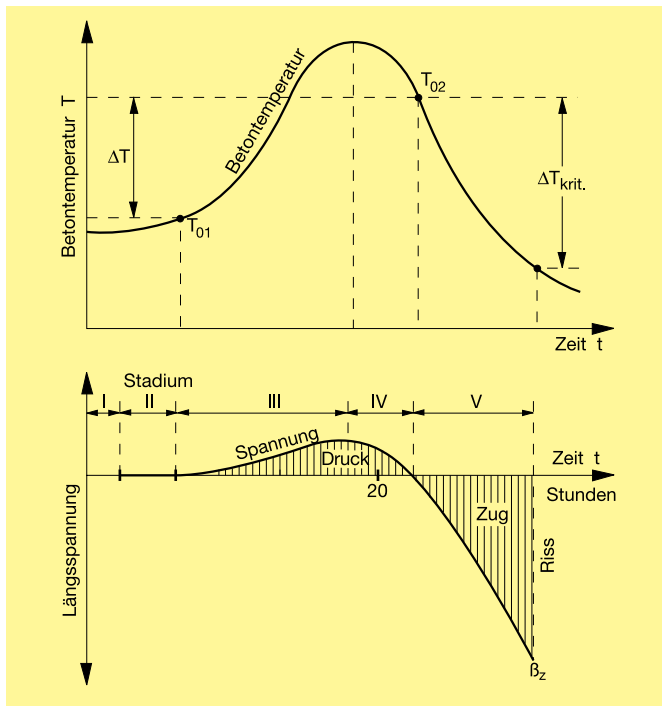


Bild 6: Temperatur- und Spannungsverlauf im jungen Beton bei vollständiger Verformungsbehinderung (ca. 50 cm dicke Wand auf Bodenplatte)

Treten keine Änderungen der Umgebungsbedingungen (z. B. durch Entschalen) auf, treten die größten Temperaturdifferenzen zwischen Kern- und Randzone bei maximaler Bauteiltemperatur auf. Die sich aus den Temperaturdifferenzen zwischen Kern- und Randzone ergebenden Verformungen und Spannungen bauen sich aber bis zum Erreichen der maximalen Bauteiltemperatur durch Relaxation teilweise wieder ab. Das heißt, man muss zwischen einer messbaren und einer Zwang verursachenden (wirksamen) Temperaturdifferenz zwischen Kern- und Randzone unterscheiden.

Zugspannungen und Schalenrisse an der Oberfläche entstehen insbesondere bei frühzeitigem Entschalen und plötzlicher Abkühlung (z. B. Gewitterregen, Kaltluft einbruch) bzw. bei Herstellungsfehlern (z. B. mangelnde Nachbehandlung im frühen Alter).

■ 2 Betontechnische Maßnahmen zur Begrenzung der Rissgefährdung

2.1 Zementauswahl

Für Massenbeton sollten Zemente der Festigkeitsklassen 22,5, 32,5 oder 42,5 verwendet werden. Besonders geeignet sind Zemente mit niedriger Hydrationswärmeentwicklung, die in 7 Tagen maximal 270 J/g Hydrationswärme freisetzen (Bezeichnungszusatz „LH“) oder Zemente mit sehr niedriger Hydrationswärmeentwicklung, die in 7 Tagen maximal 220 J/g Hydrationswärme freisetzen (Bezeichnungszusatz „VLH“). Diese Anforderung erfüllen u. a. viele Hochofenzemente (CEM III), für die umfangreiche Erfahrungswerte bei der Verwendung in Massenbeton vorliegen. Hauptbestandteile sind Portlandzementklinker (5 % bis 64 %) und Hüttensand (36 % bis 95 %).

Je weniger Portlandzementklinker der Zement enthält, um so geringer ist neben der Wärmeentwicklung aus Hydratation auch die Frühfestigkeit. Die Ausschallfristen und die erforderliche Nachbehandlungsdauer sind dementsprechend zu ver-

längern. Wird ein zügiger Baufortschritt angestrebt, kann die Verwendung eines CEM III/B 42,5 N (LH) zweckmäßig sein. Dieser Zement verbindet eine gute Frühfestigkeit mit einer noch günstigen Hydrationswärmeentwicklung.

In allen Fällen sind bei der Auswahl der Zemente für massive Bauteile aus Beton entsprechend der Expositionsklassen die Tabellen F3.1 bis F3.3 der DIN 1045-2 zu berücksichtigen.

2.2 Zementmenge

Je geringer die Zementmenge eines Betons ist, desto geringer wird die Hydrationswärme. Ein geringer Zementgehalt lässt sich durch eine Anpassung der Betonzusammensetzung erzielen, insbesondere durch eine Optimierung der Sieblinie (Zusammensetzung der Gesteinskörnung) und einen begrenzten Ersatz von Zement durch Flugasche.

Durch eine Optimierung der Sieblinie lässt sich bei unverändertem Zementgehalt eine höhere Festigkeit und ein dichtes Gefüge des Betons erreichen oder bei etwa gleicher Festigkeit und Gefügedichtigkeit der Zementgehalt entsprechend senken. Es sollte das bei der jeweiligen Bewehrungsdichte maximal mögliche Größtkorn gewählt werden. Hilfreich sind möglichst differenzierte Korngruppen, die eine Gesamtsieblinie nahe der Idealkurve zulassen. Zusätzlich können feine Quarzsande und Kalksteinmehle eingesetzt werden, um die Dichtigkeit des Gefüges zu erhöhen.

Durch den teilweisen Ersatz von Zement durch Flugasche wird die Hydrationswärmeentwicklung im Beton verringert bzw. auch verzögert. Da Hydrationswärme- und Festigkeitsentwicklung im Beton miteinander korrelieren, sollte bei einem teilweisen Ersatz von Zement durch Flugasche der Festigkeitsnachweis statt nach 28 Tagen erst nach 56 Tagen oder 91 Tagen erbracht werden.

Bei der Festlegung der Zementmengen sind die Mindestzementgehalte gemäß den Tabellen F.2.1 und F.2.2 der Richtlinie „Massige Bauteile aus Beton“ [1] zu beachten. Aus beiden Tabellen können auch die Anforderungen an den Wasserzementwert in Abhängigkeit von den Expositionsklassen entnommen werden.

2.3 Frischbetontemperatur

Da steigende Frischbetontemperaturen die sich in der Zeiteinheit entwickelnde Hydrationswärme deutlich erhöhen, gilt für Massenbeton: Je geringer die Frischbetontemperatur, um so niedriger ist das Temperaturmaximum im Beton. Empfehlenswert sind weniger als 20 °C. Eine niedrige Frischbetontemperatur wirkt sich zudem auch günstig auf die Verarbeitbarkeit, die Wirksamkeit von Zusatzmitteln und die Endfestigkeit aus. Die Anforderungen an die Mindestbetontemperatur bei Frostgefahr sind zu beachten.

Besonders bei hohen Außentemperaturen lassen sich niedrige Frischbetontemperaturen oft nur durch aufwändige Kühlmaßnahmen erreichen. Eine Berücksichtigung dieser zusätzlichen Leistungen schon bei der Ausschreibung ist sinnvoll [4].

Einfach und effektiv sind das Kühlen des Anmachwassers und das schattige Lagern der Gesteinskörnungen. Unter Ausnutzung der Verdunstungskälte können größere Gesteinskörnungen durch das Besprühen mit Wasser gekühlt werden. Senkt man

die Temperatur der Gesteinskörnungen um 10 K, verringert sich die Frischbetontemperatur um etwa 7 K, und senkt man die Temperatur des Anmachwassers um 10 K, verringert sich die Frischbetontemperatur um ca. 2 K, wenn die Temperaturen der jeweilig anderen Betonbestandteile konstant bleiben.

Deutlich aufwändiger, aber sehr wirksam ist die Kühlung des Betons mit Scherbeneis (als Ersatz für das Anmachwasser, wirtschaftlich allerdings erst bei sehr großen Betonmengen von mehr als 100000 m³ [1]) oder Flüssigstickstoff.

Günstig sind außerdem kurze Misch- und Transportzeiten und helle Mischfahrzeuge, die wenig Sonnenstrahlung absorbieren.

Ausführlichere Informationen zur Erzielung einer niedrigen Frischbetontemperatur enthalten z. B. [5], [6], [7] und [8].

2.4 Nachbehandlung

Auch für massive Bauteile gelten die Festlegungen bezüglich der Nachbehandlungsdauer gemäß DIN 1045-3. Für die Nachbehandlungsdauer ist die Festigkeitsentwicklung des Betons maßgebend, die durch das Verhältnis der Druckfestigkeiten nach 2 Tagen und zum Zeitpunkt des Druckfestigkeitsnachweises (28 Tage, 56 Tage oder 91 Tage) beschrieben wird.

Grundsätzlich sollten sowohl die maximale Bauteiltemperatur als auch die wirksame Temperaturdifferenz an der Bauteiloberfläche soweit wie möglich begrenzt werden. Liegt die minimale Bauteilabmessung deutlich über 0,80 m, ist eine nahezu adiabatische Temperaturentwicklung im Bauteilkern kaum zu vermeiden, zumal die Begrenzung der wirksamen Temperaturdifferenz an der Bauteiloberfläche (Folien, wärmedämmende Matten u. Ä.) den gesamten Wärmeabfluss über die Bauteiloberfläche behindert. In diesen Fällen hilft nur eine Wärmeableitung durch eine Rohrkühlung weiter.

Werden wärmedämmende Matten zur Begrenzung der wirksamen Temperaturdifferenz an der Bauteiloberfläche benutzt, ist zu beachten, dass diese Matten in der Phase der Abkühlung gestaffelt abgenommen werden, um einen plötzlichen Temperaturschock im schon erhärteten Bauteil zu vermeiden.

■ 3 Konstruktive Maßnahmen zur Begrenzung der Rissbreiten

3.1 Steuerung der Rissentstehung

Wirksame Maßnahmen zur Vermeidung von Rissen bestehen in der Begrenzung des äußeren und inneren Zwangs (siehe auch 2.4). Eine ausführliche Darstellung des Stands der Technik ist in [9] bis [12] enthalten.

3.2 Rissbreitenbegrenzung

Auch bei massigen Bauteilen sind die Rissbreiten zu begrenzen, um gebrauchstaugliche und dauerhafte Bauwerke zu erhalten. Nach DIN 1045-1, Abschnitt 11.2.2 ist zur Aufnahme von Zwangseinwirkungen und Eigenspannungen eine Rissbreitenbegrenzende Bewehrung anzuordnen. Die Bewehrungsbemessung erfolgt dabei für diejenige Schnittgrößenkombination, die zur Erstrissbildung führt.

Bei wasserundurchlässigen massigen Bauteilen sind die Anforderungen der WU-Richtlinie [11] zu beachten.



Bild 7: Betoneinbau in das Fundament für den Hochofen 2 der Thyssen Stahl AG in Duisburg-Schwelegern (aus [13])

Während bei Bauteilen üblicher Abmessungen bei der Rissbreitenbegrenzung häufig auf vereinfachte Rechenverfahren zurückgegriffen wird, sind bei massigen Bauteilen genauere Berechnungen für wirtschaftlich sinnvolle Bewehrungsgehalte zu empfehlen. Dabei sollten insbesondere die Randbedingungen sehr genau berücksichtigt werden, nämlich

- Art und Größe der Verformungsbehinderung,
- genaue Wärmefreisetzungsrate des Betons,
- zeitliche und räumliche Temperaturentwicklung während der Erwärmungs- und der Abkühlphase sowie
- zeitnahe Materialkennwerte des Betons (Zugfestigkeit, E-Modul, Kriechen, Relaxation, Schwinden, Temperaturdehnzahl).

Können z. B. der Zeitpunkt der Erstrissbildung und die dann wirksame Zugfestigkeit nachgewiesen werden, kann diese Zugfestigkeit für die Bemessung der Rissbreiten begrenzenden Bewehrung zugrunde gelegt werden (siehe auch [12]).

Es ist sicherzustellen, dass die Annahmen der Berechnung mit den Eigenschaften der verwendeten Ausgangsstoffe und des Betons sowie mit den Bedingungen auf der Baustelle übereinstimmen.

3.3 Mindestbewehrung

Im Sicherheitskonzept von DIN 1045-1 ist im Grenzzustand der Tragfähigkeit eine Vorankündigung des Versagens durch duktile Bauteilverformung vorgesehen. Dies wird durch Anordnung einer Mindestbewehrung nach DIN 1045-1, Abschnitt 13.1.1 erfüllt.

Da bei massigen Gründungsbauteilen und dicken erddruckbelasteten Wänden aus Stahlbeton ein duktiler Bauteilverhalten auch durch Umlagerung der Bodenpressung bzw. des Erd-drucks sichergestellt werden kann, kann in diesen Fällen auch auf die Mindestbewehrung verzichtet werden. Voraussetzung ist, dass zur Beurteilung der Baugrundeigenschaften ein Baugrundgutachten vorliegt. Bei wasserdruckbelasteten Bauteilen darf auf eine Mindestbewehrung nicht verzichtet werden.



Bild 8: Betoneinbau im Bereich des Oberbaus der Doppelschleuse Hohenwarthe (aus [14])

Aus konstruktiven Gründen wird bei Stahlbetonbauteilen mindestens eine kreuzweise Bewehrung von 0,06 %, bei wasserundurchlässigen Bauteilen von 0,10 % des Betonquerschnitts empfohlen.

■ 4 Besonderheiten bei der Herstellung, Ausführung und Nachbehandlung

4.1 Gleichmäßigkeit der Ausgangsstoffe

Die Eigenschaften der Ausgangsstoffe können produktionsbedingt schwanken. Diese Schwankungen sind insbesondere bei länger andauernden Baumaßnahmen zu berücksichtigen.

4.2 Schalungsdruck

Bei ungünstigen Randbedingungen (geringe Frischbetontemperatur, höherer Zusatzstoffgehalt, längere Verzögerungszeiten, weichere Konsistenzen) kann der Frischbetondruck deutlich höher sein, als in DIN 18218 ausgewiesen. Vor Beginn der Betonierarbeiten sollten deshalb Erfahrungswerte berücksichtigt werden. Auf der sicheren Seite liegt man allerdings bei Annahme des vollen hydrostatischen Drucks.

4.3 Einbringen und Verdichten

Der Einbau mehrerer aufeinander folgender Betonierlagen sollte frisch in frisch erfolgen. Beim Einbringen der jeweils nächsten Betonierlage muss der darunter liegende Beton noch verdichtbar sein, damit ein „Vernadeln“ der Betonierlagen durch Eintauchen der Innenrüttler in die darunter liegende Schicht möglich ist. Gegebenfalls muss der Beton angemessen verzögert werden.

■ 5 Qualitätssicherung

5.1 Qualitätssicherungsplan

Im Vorfeld der Herstellung massiger Bauteile muss nach der Richtlinie „Massige Bauteile aus Beton“ [1] ein Qualitätssicherungsplan aufgestellt werden. In diesem Plan sind alle qualitätsrelevanten Maßnahmen sowie die Verantwortlichkeiten bei der Betonherstellung und der Ausführung zu regeln und zu dokumentieren.



Bild 9: Schleuse Hohenwarthe im Bauzustand (aus [14])



Bild 10: Blick in die Nordkammer der Doppelschleuse Hohenwarthe, Kammerwandhöhe 24,45 m (aus [14])

Der Umfang des Plans kann in Abhängigkeit vom jeweiligen Bauteil unterschiedlich sein. Je nach Einzelfall können folgende Punkte relevant sein:

- Bei der Betonherstellung und Anlieferung:
 - Koordinierung der Liefer- und Ersatzwerke,
 - Disposition für die Ausgangsstoffe,
 - Organisation und Prüfung der Silobelegung,
 - Überwachungskonzept der Mischanlage,
 - Betonabruf, Anlieferung des Betons,
 - Disposition und Einweisung der Lieferfahrzeuge,
 - Dosierung eventuell erforderlicher Fließmittel auf der Baustelle,
 - Dokumentation.

- Bei der Ausführung:
 - Freigabe einzelner Teilgewerke (Schalung, Bewehrung, Fugenabdichtung usw.),
 - Betonierkonzept (Betonarten, Betonierfolge, Förderung, Einbau),
 - Betonieranweisung für die einzelnen Betonierabschnitte,
 - Überwachungskonzept der Baustelle (Annahme, zusätzliche Frisch- und Festbetonprüfungen, Temperaturverlauf im Bauteil usw.),
 - Nachbehandlungskonzept, Steuerung des Wärmeflusses,
 - Dokumentation.

Außerdem ist das Vorgehen bei Abweichungen von den Sollvorgaben unter Angabe der notwendigen Maßnahmen festzulegen.

5.2 Konformitätsbewertung

Für die Klassifizierung nach Druckfestigkeitsklassen darf die charakteristische Festigkeit von Zylindern mit 150 mm Durchmesser und 300 mm Länge bzw. die charakteristische Festigkeit von Würfeln mit 150 mm Kantenlänge nach 28 oder 56 oder 91 Tagen verwendet werden.

Für die Konformitätskontrolle für die Druckfestigkeit nach DIN EN 206-1 ist bei stetiger Herstellung täglich je angefangene 600 m³ ein Probekörper herzustellen.

Neben den Festlegungen für Beton nach Eigenschaften gemäß DIN EN 206-1 sollten die maximale Frischbetontemperatur und die zulässige Wärmeentwicklung festgelegt werden.

5.3 Überwachung

Für die Überwachung bei der Herstellung von massigen Bauteilen gilt DIN 1045-3. Für die Prüfung der Druckfestigkeit für Beton nach Eigenschaften bei Verwendung von Transportbeton kann im Einvernehmen mit der zuständigen anerkannten Überwachungsstelle für Betone der Überwachungsklasse 2 der Umfang der Proben auf eine Probe je 200 m³, jedoch mindestens 3 Proben je Beton und Betoniertag festgelegt werden.

6 Literatur

- [1] Richtlinie Massige Bauteile aus Beton, Hrsg.: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, März 2005
- [2] Zement-Taschenbuch 2002, Hrsg.: Verein Deutscher Zementwerke, Verlag Bau+Technik, Düsseldorf 2002
- [3] Röhling, S.; Eifert, H.; Kaden, R.: Betonbau – Planung und Ausführung, Verlag Bauwesen, Berlin 2000
- [4] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau (ZTV-W) für Wasserbauwerke aus Beton und Stahlbeton (Leistungsbereich 215), Ausgabe 2004, Hrsg.: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abt. Eisenbahnen, Wasserstraßen
- [5] Merkblatt Rissbreitenbegrenzung für frühen Zwang in massiven Wasserbauwerken. Hrsg.: Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe 2004
- [6] Rostasy, F.S.; Henning, W.: Zwang und Rissbildung in Wänden auf Fundamenten. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 407, 1990
- [7] Curbach, M.; Tue, N.; Eckfeldt, L.; Speck, K.: Zum Nachweis der Rissbreitenbegrenzung gemäß DIN 1045-1. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 525, 2003
- [8] Rostasy, F.S.; Krauß, M.: Frühe Risse in massigen Betonbauteilen – Ingenieurmodelle für die Planung von Gegenmaßnahmen. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 520, 2001
- [9] Rostasy, F.S.; Krauß, M.; Budelmann, H.: Planungswerkzeuge zur Kontrolle der frühen Rissbildung in massigen Betonbauteilen, Teile 1 bis 7, Bautechnik 79 (2002)
- [10] Sachstandsbericht Beschränkung von Temperaturrissen im Beton, Hrsg.: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V., Berlin, Oktober 1996
- [11] Richtlinie Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton (WU-Richtlinie), Hrsg.: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, November 2003
- [12] Röhling, S.: Zwangsspannungen infolge Hydratationswärme. Verlag Bau+Technik, Düsseldorf 2005
- [13] Kottkamp, K.; Lehmann, K.: Beton mit niedriger Wärmeentwicklung für große Fundamente, Beton-Informationen 32 (1992) H. 6, S. 71-76
- [14] Weisner, A.: Betonanforderungen und Betontechnologie beim Neubau der Doppelschleuse Hohenwarthe am Wasserstraßenkreuz Magdeburg, Beton-Informationen 43 (2003) H. 1, S. 3-17

Beratung und Information zu allen Fragen der Betonanwendung

Regionale Ansprechpartner	www.beton.org
BetonMarketing Nord GmbH Hannoversche Straße 21, 31319 Sehnde-Höver, Tel.: 05132 8796-0, Fax: 05132 8796-15, hannover@betonmarketing.de	
BetonMarketing Ost GmbH Teltower Damm 155, 14167 Berlin-Zehlendorf, Tel.: 030 3087778-0, Fax: 030 3087778-8, mailbox@bmo-berlin.de	
BetonMarketing Süd GmbH Gerhard-Koch-Straße 2+4, 73760 Ostfildern, Tel.: 0711 32732-200, Fax: 0711 32732-202, info@betonmarketing.de Büro München: Rosenheimer Straße 145 g, 81671 München, Tel.: 089 450984-0, Fax: 089 450984-45, muenchen@betonmarketing.de Büro Wiesbaden: Friedrich-Bergius-Straße 7, 65203 Wiesbaden, Tel.: 0611 261066, Fax: 0611 261068, wiesbaden@betonmarketing.de	
BetonMarketing West GmbH Annastraße 3, 59269 Beckum, Tel.: 02521 8730-0, Fax: 02521 8730-29, bmwest@betonmarketing.de	
Herausgeber: Verein Deutscher Zementwerke e.V., Tannenstraße 2, 40476 Düsseldorf	www.vdz-online.de
Verfasser: Dr.-Ing. Helmut Eifert, BDZ, Dr.-Ing. Karsten Rendchen, BetonMarketing Nord GmbH	