

# Weiterführende Untersuchungen zur Beschreibung des Materialverhaltens von Beton in der Brandabkühlphase (DFG GZ: ZE 1053/3-1)

Further investigations on the material behavior of concrete in cooling phase

Lyzwa, Jan; Zehfuß, Jochen

## Abstract

The application of natural fire models is included in DIN EN 1992-1-2 as an alternative to the common ISO 834 standard fire for fire safety design. When determining the temperature-time curves, the load-bearing capacity of the building components and structures has to be ensured throughout the entire fire duration due to possible failure of the components in the cooling phase because of a delayed heating or high tensile forces. In the research project "Theoretical and experimental investigations to expand the calculation bases of different concretes under natural fire stress" funded by the German Research Foundation (DFG), extensive investigation on the material behavior of concretes in the cooling phase after high temperature stress were conducted. In order to answer remaining questions the DFG is funding the further investigations.

## 1. Einführung

Für die brandschutztechnische Bemessung ist in der aktuellen Normengeneration der Eurocodes neben der Normbeanspruchung – der Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) – die Anwendung von Naturbrandmodellen zugelassen. Im Vergleich zur ETK können die Temperaturen natürlicher Brände die ETK zwar kurzzeitig übersteigen, sie fallen aber nach dem Aufzehren eines Großteils der Brandlasten wieder ab, während die ETK stetig ansteigt (Bild 1).

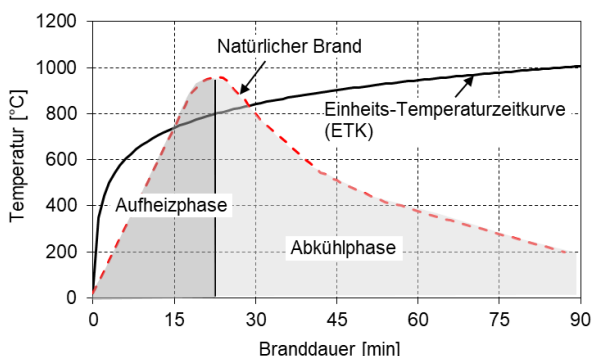


Bild 1 Verlauf eines natürlichen Brandes im Vergleich zur ETK

Insofern kann eine Bemessung mit Naturbrandmodellen wirtschaftliche Vorteile liefern. Bei Anwendung des Naturbrandverfahrens muss die Tragfähigkeit der Bauteile und Tragwerke grundsätzlich über die gesamte Branddauer, einschließlich der Abkühlphase, nachgewiesen werden, da ein Versagen aufgrund einer verzögerten Erwärmung oder zu hoher Zugkräfte im Beton während der Abkühlphase eintreten kann. Aufgrund der thermischen Trägheit von Beton kühlen in der Brandabkühlphase die äußeren Querschnittsbereiche ab, während sich der Kern zunächst weiter durchwärmt (Bild 2).

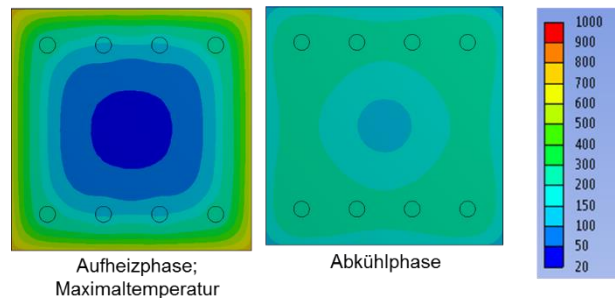


Bild 2 Thermische Querschnittsanalyse einer Stahlbetonstütze bei einem Naturbrand

Im Rahmen des DFG-Forschungsvorhabens „Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Erweiterung der Berechnungsgrundlagen unterschiedlicher Betone bei Naturbrandbeanspruchung“, (GZ: ZE 1053/1-1) [1], konnten neue Erkenntnisse zum thermischen und thermo-mechanischen Materialverhalten von Betonen (Normalbeton CC, hochfester Beton HPC und ultra-hochfester Beton UHPC) in der Abkühlphase von Bränden gewonnen werden.

Das Folgeforschungsvorhaben hat zum Ziel, experimentelle Untersuchungen zur thermischen Leitfähigkeit und zum Spannungs-Dehnungsverhalten von Normalbeton (CC) und hochfestem Beton (HPC) während der Abkühlphase durchzuführen und in konstitutive Materialgesetze für einen allgemeinen Bemessungsansatz umzusetzen.

## 2. Eigene Vorarbeiten

Die experimentelle Ermittlung der temperaturabhängigen thermischen Leitfähigkeit von Beton unter Hochtemperaturbeanspruchung gestaltete sich komplex. Ein mögliches Verfahren zur Bestimmung der thermischen Leitfähigkeit stellt die sogenannte TPS-Methode (Transient Plane Source) dar. Versuchsreihen am iBMB unter Anwendung der TPS-Methode zeigten große Streuungen der thermischen Leitfähigkeit sowie deutliche Abweichungen zu den in DIN EN 1992 2-1-2 [2] angegebenen Materialkennwerten für die Aufheizphase. Auch in [3] wird eine große Streuung der Messergebnisse zur Bestimmung der thermischen Leitfähigkeit des inhomogenen Materials Beton bei erhöhten Temperaturen unter Anwendung der TPS-Methode festgestellt. In den Untersuchungen von [1] wurde als Alternative ein vom NIST (USA) entwickeltes Verfahren - das Slug-Kalorimeter - zur Bestimmung der thermischen Leitfähigkeit angewendet. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Streuungen der thermischen Leitfähigkeit bei Anwendung des Slug-Kalorimeters deutlich geringer ausfallen. Zudem konnte gezeigt werden, dass die thermische Leitfähigkeit nicht reversibel ist. Nachteilig bei diesem Verfahren ist jedoch, dass bei Annahme einer konstanten Aufheiz- bzw. Abkühlrate bei Temperaturen < 200 °C und im Übergangsbereich der Aufheizphase zur Abkühlphase die thermische Leitfähigkeit nicht abgebildet werden kann. Die bisher vorliegenden Erkenntnisse bzgl. des Verlaufs der thermischen Leitfähigkeit in der Abkühlphase sind noch mit Unsicherheiten behaftet. Numerische Simulationen in [1] haben gezeigt, dass die thermische Leitfähigkeit bei der Untersuchung der Temperaturverteilungen im Betonquerschnitt dominierend ist.

Das Materialmodell zur Beschreibung der Spannungs-Dehnungsbeziehungen von einachsig gedrücktem Beton bei erhöhten Temperaturen wird in [2] durch Gleichung (1) beschrieben.

$$\sigma = \frac{3\varepsilon f_{c,\theta}}{\varepsilon_{c1,\theta} \left( 2 + \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1,\theta}} \right)^3 \right)} \quad \text{Gl. (1)}$$

Hierbei ist  $f_{c,\theta}$  die temperaturabhängige Druckfestigkeit und  $\varepsilon_{c1,\theta}$  die zu  $f_{c,\theta}$  zugehörige Dehnung. Die Dehnung  $\varepsilon$  enthält alle mechanischen Dehn- sowie Kriechanteile. Diese Parameter sollen für die Abkühlphase aus Heißdruckversuchen abgeleitet werden. Zusammenfassend haben die Versuche in [1] gezeigt, dass sich die Spannungs-Dehnungsbeziehungen zwischen der Aufheiz- und Abkühlphase bis zu einer Maximaltemperatur von 500 °C kaum unterscheiden. Zudem zeigen die Ergebnisse, dass der Verlauf der Spannungs-Dehnungsbeziehungen wäh-

rend der Abkühlphase maßgeblich von der maximal erreichten Temperatur (der Schädigung) abhängt und die Festigkeit während der Abkühlphase weiter abnimmt. Für Temperaturen von mehr als 500 °C sind die vorliegenden Ergebnisse noch lückenhaft. Da der Temperaturbereich von ca. 500 °C bis 700 °C für Betonbauteile bemessungsrelevant ist, sind für diesen Bereich weitere Untersuchungen erforderlich, um einen allgemeinen Bemessungsansatz zu formulieren.

## 3. Aktueller Stand im Forschungsprojekt

Zur Ermittlung der thermischen und thermo-mechanischen Materialkennwerte in der Brandabkühlphase werden derzeit die konzipierten Probekörper betoniert.

Zur Absicherung der Messergebnisse des Slug-Kalorimeters werden kombinierte experimentell-numerische Parameterstudien durchgeführt. Hierzu sollen unbelastete Stützenstummel ( $\varnothing$  30 cm) mit einer Vielzahl an Thermoelementen in unterschiedlichen Querschnittstiefen hergestellt und thermisch beansprucht werden, um Rückrechnungen zu ermöglichen. Anhand der gemessenen Temperaturen werden die experimentell bestimmten Verläufe der thermischen Leitfähigkeit validiert und ggf. optimiert.

Zur Bestimmung der Spannungs-Dehnungsbeziehungen sollen Betonzylinder mit einem Durchmesser von 80 mm und einer Länge von ca. 240 mm untersucht werden.

Für die Anwendung von numerischen Simulationen werden die aus den Kleinversuchen abgeleiteten thermischen und thermo-mechanischen Materialkennwerte verwendet. Die Materialkennwerte sollen in Anlehnung an [1] in Großversuchen an realmaßstäblichen Bauteilen validiert werden. Die Versuchsstützen werden beidseitig stumpf gelagert und zentrisch mit einer Normalkraft belastet, der Ausnutzungsgrad beträgt  $\mu = 0,5$ . Um hinsichtlich der Erwärmung einen homogenen Temperaturgradienten zu erzeugen, werden Rundquerschnitte mit einem Durchmesser  $d = 30$  cm und einer Länge  $l = 3,7$  m vorgesehen. Die Forschungsergebnisse sollen 2023 vorliegen.

## 4. Literatur

- /1/ Zehfuß, J.; Lyzwa, J.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Erweiterung der Berechnungsgrundlagen unterschiedlicher Betone bei Naturbrandbeanspruchung. DFG-Forschungsvorhaben GZ: ZE1053/1-1, Abschlussbericht, 2019.
- /2/ EN 1992-1-2, Eurocode 2 – Design of Concrete Structures. Part 1-2: General Rules –Structural Fire Design, CEN, Brussels, 2004.
- /3/ Adl-Zarrabi, B.; Boström, L.; Wickström, U.: Using the TPS method for determining the thermal properties of concrete and wood at elevated temperature. Fire and Materials, Vol. 30, p. 359–369, 2006.