

Mikromechanische Ansätze für die gebrauchungsverhaltensorientierte Optimierung zementhaltiger Werkstoffe – Beton ‘a la carte’

Roman Lackner, Christian Pichler, Klaus Meinhard und Matthias Zeiml
 Institut für Mechanik der Werkstoffe und Strukturen, Technische Universität Wien
 Karlsplatz 13/202, 1040 Wien, Österreich
 (Kontakt: Roman.Lackner@tuwien.ac.at)

Der breite Anwendungsbereich von Beton und die Möglichkeit seiner gezielten Optimierung durch einerseits Adaption der Zusammensetzung und andererseits die Auswahl geeigneter Bestandteile bzw. Zusatzmittel führten in den letzten Jahrzehnten zu Spezialbetonen für die unterschiedlichsten Anwendungen und die Entwicklung von Hochleistungs- und Ultrahochleistungsbetonen. Die mechanische Beschreibung einer derartigen Vielfalt von Betonen sowie die Bestimmung der Auswirkung von Degradationsprozessen im Beton z.B. zufolge Temperatureinwirkung und/oder chemischer Angriffe auf die mechanischen Eigenschaften kann weder im vollen Umfang experimentell erfasst noch makroskopisch beschrieben werden. Letzteres bezieht sich auf die Betrachtung von Beton als homogenen Werkstoff, der durch makroskopische Materialparameter wie E-Modul, Druckfestigkeit, etc. beschrieben wird. Um die Vielfalt an Betonen erfassen und in weiterer Folge Betonrezepturen zielgerichtet optimieren zu können, wurde im Rahmen eines Forschungsschwerpunkts am Institut für Mechanik der Werkstoffe und Strukturen (IMWS) ein Mehrskalenmodell für Beton entwickelt (siehe Abbildung 1). Zusätzlich zu der bereits erwähnten Makroebene zeichnet sich diese Modell durch die Einführung von drei weiteren Ebenen der Betrachtung (Ebene I bis III) aus.

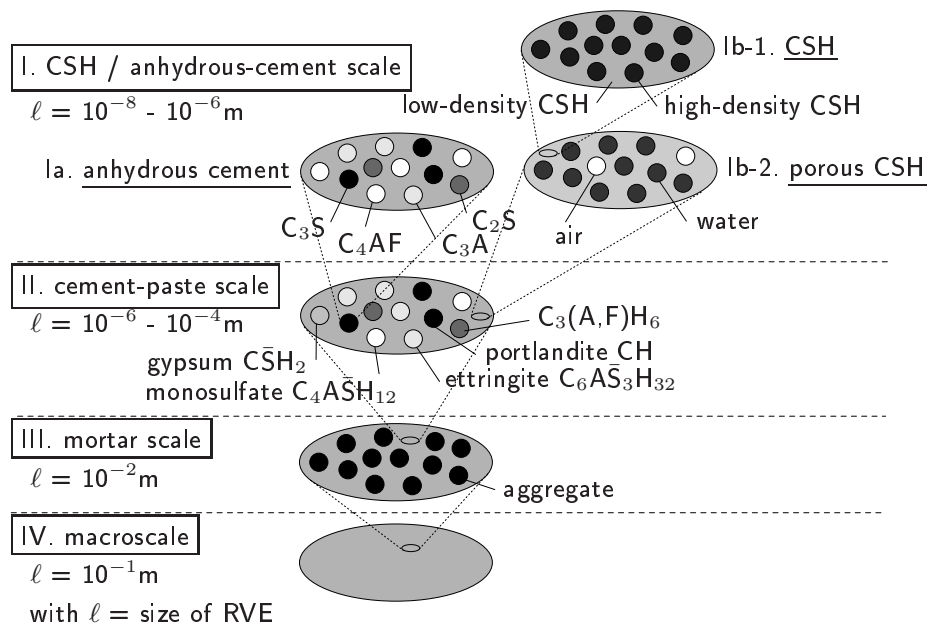


Abbildung 1: Mehrskalenmodell für zementhaltige Werkstoffe

Mittels des in Abbildung 1 dargestellten Mehrskalenmodells können makroskopische Materialparameter auf die Morphologie und die Eigenschaften von Materialphasen auf unteren Betrachtungsebenen bezogen werden. Ist dieser Bezug hergestellt, können etwaige Veränderungen des Materials zufolge thermischer, chemischer und/oder mechanischer Beanspruchung auf der entsprechenden Ebene der Betrachtung berücksichtigt und somit die Auswirkung derartiger Veränderungen auf die makroskopischen Eigenschaften bzw. das Strukturverhalten bestimmt werden. Im folgenden werden drei am IMWS durchgeführte Forschungsprojekte beschrieben, in denen das entwickelte Mehrskalenmodell zum Einsatz kommt.

Forschungsprojekt 1: Schwinden und Kriechen von Spritzbeton im jungen Alter

Kriechen und autogenes Schwinden (letzteres ist die Volumsabnahme in Abwesenheit äußerer Lasten und Massenaustausch) von jungem Spritzbeton sind Beispiele für makroskopisches Materialverhalten, das durch Volumsänderung der Materialphasen auf unteren Betrachtungsebenen und den daraus resultierenden Belastungszuständen in der Mikrostruktur verursacht wird. So ist das autogene Schwinden die makroskopische Antwort auf kapillare Phänomene auf der Betrachtungsebene Ib.2 (siehe Abbildung 1) und auf den Kristallisationsdruck, der bei der Bildung von Ettringit (Betrachtungsebene II) auftritt. Kriechen auf der Makroebene, auf der anderen Seite, wird durch das viskose Verhalten der Hydratationsprodukte verursacht. Während der Volumsanteil an kriechaktivem Material im Verlauf der Hydratation zunimmt, steigt die makroskopische Steifigkeit durch den sukzessiven Einbau von Wasser in die Hydratationsprodukte, wodurch die daraus resultierende Kriechaktivität mit fortschreitender Hydratation abnimmt. Das entwickelte Mehrskalenmodell zur Bestimmung der makroskopischen Kriecheigenschaften und der makroskopischen Schwindverzerrungen wurde in ein bereits bestehendes thermo-chemo-mechanisches Materialmodell für Spritzbeton implementiert. Die Anwendung dieses Materialmodells im Rahmen einer hybriden Berechnung einer Tunnelschale aus Spritzbeton ermöglicht die Bestimmung des Auslastungsgrades L für einen Messquerschnitt beim Lainzertunnel. Abbildung 2 zeigt die zeitliche Abwicklung (Vogelperspektive) des Auslastungsgrades in den ersten drei Tagen.

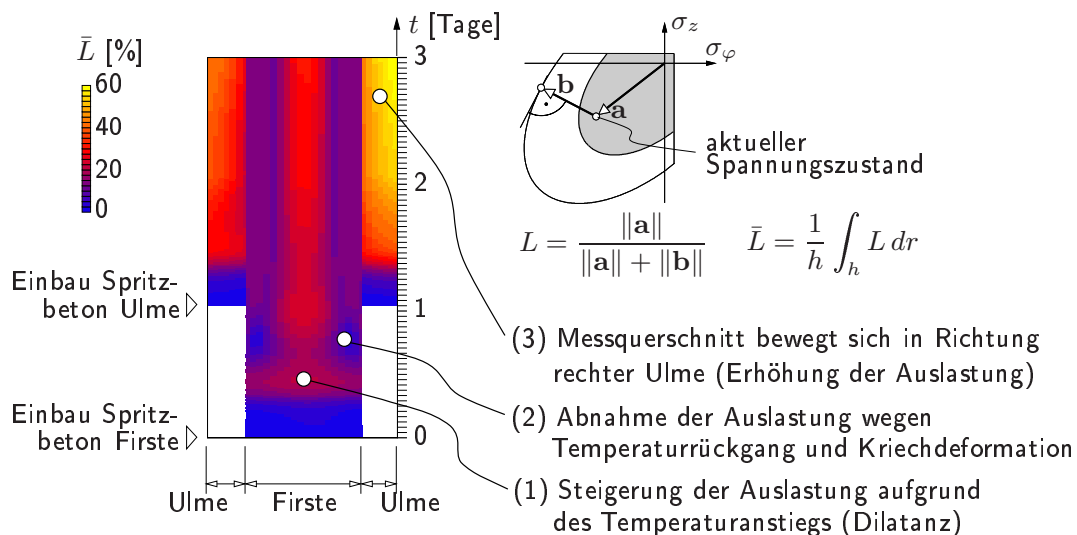


Abbildung 2: Zeitliche Entwicklung des Auslastungsgrades für einen Messquerschnitt im Zuge des Vortriebs des Lainzertunnels

Forschungsprojekt 2: Mehrphasen-Hydratationsmodell zur Beschreibung der Temperaturentwicklung in DSV-Säulen

Die Hydratation ist ein exothermer Prozess, der zu einer Erhöhung der Temperatur in Betonbauteilen führt. Im Rahmen einer Anwendung des in Abbildung 1 dargestellten Mehrskalenmodells wird diese Wärmeentwicklung für die Rückrechnung von Struktur- und Materialeigenschaften von Säulen, die mit dem Düsenstrahlverfahren (DSV) hergestellt wurden, ausgenutzt. Hierbei wird der Fehler zwischen der numerisch ermittelten Temperaturentwicklung im Zentrum der DSV-Säule und dem auf der Baustelle gemessenen Temperaturverlauf durch Variation von Zementgehalt und Säulendurchmesser minimiert. Die freigesetzte Hydratationswärme wird durch den Hydratationsfortschritt der einzelnen Klinkerphasen berechnet. Im Rahmen des vorgestellten Mehrskalenmodells wurde für jede der vier wesentlichen Klinkerphasen ein Kinetikgesetz (bestehend aus Auflösungsphase, Wachstumsphase und Diffusionsphase, siehe Abbildung 3) formuliert. Weiters werden im Rahmen dieses Forschungsprojektes diese Kinetikgesetze hinsichtlich der Berücksichtigung von Zumahlstoffen

wie z. B. Steinmehl und Hochofenschlacke erweitert. Die dafür erforderlichen Parameter wurden aus Kalorimeterversuche, die für verschiedene Zement/Zumahlstoff-Verhältnisse durchgeführt wurden, abgeleitet. Die Anwendung der vorgestellten Methode zur Bestimmung von Eigenschaften der DSV-Säule durch Nachrechnen der gemessenen Temperaturentwicklung ergab Abweichungen zwischen dem ermittelten Säulendurchmesser und den auf der Baustelle gemessenen Durchmesser von maximal 10-15 %.

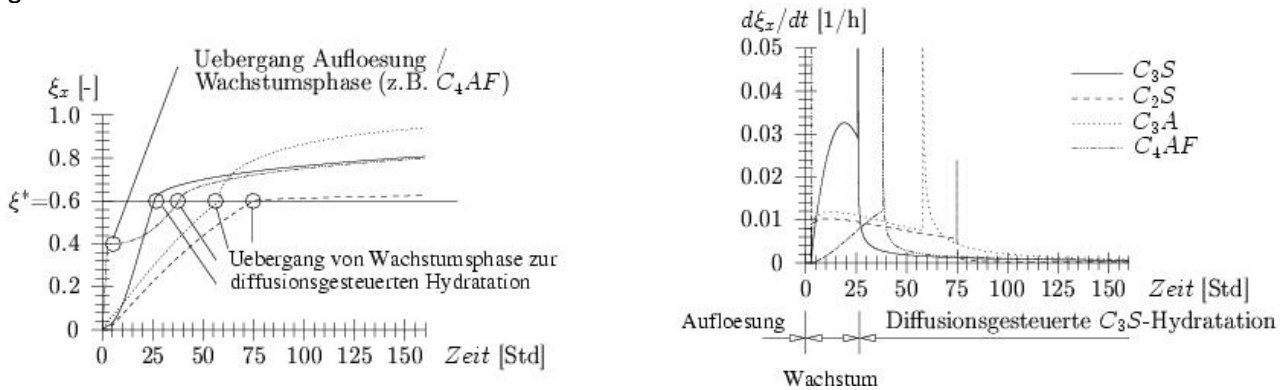


Abbildung 3: Mehrphasen-Hydratationsmodell für die vier Klinkerphasen (ξ beschreibt den Fortschritt der Hydratation mit $\xi=0$ am Beginn der Hydratation und $\xi=1$ bei vollständiger Hydratation)

Forschungsprojekt 3: Beton unter Feuerlast

Die Tragfähigkeit von Tunnel unter Feuerlast wird durch thermo-hydro-chemo-mechanische Prozesse im Beton beeinflusst, die zu einer Abnahme der mechanischen Eigenschaften des erhitzten Betons führen. Reicht die Permeabilität des erhitzten Betons nicht aus um den gebildeten Wasserdampf abzuführen, kann zusätzlich zur Abnahme der mechanischen Eigenschaften das Abplatzen von randnahen Betonschichten eine wesentliche Reduktion der Tragsicherheit verursachen. Für die Ermittlung der Temperaturabhängigkeit der Permeabilität von erhitztem Beton wurden Permeabilitätsversuche durchgeführt. Hierbei konnte einerseits ein steter Anstieg der Permeabilität mit steigender Temperaturbeanspruchung und andererseits ein abrupter Anstieg der Permeabilität im Bereich der Schmelztemperatur der Polypropylen-Fasern festgestellt werden. Um die gemessenen makroskopischen Werte für die Permeabilität modellmäßig zu erfassen, soll das in Abbildung 1 dargestellte Mehrskalenmodell in Richtung der Abschätzung von Transporteigenschaften erweitert werden. Der bis dato experimentell gefundene Zusammenhang zwischen Permeabilität und Temperatur wurde im Rahmen von gekoppelten Temperatur-Transport Simulationen berücksichtigt. Die so erhaltene Temperatureindringkurve wurde in ein Strukturmodell einer Tunnelinnenschale eingespielt (Abbildung 4(b)) und die Sicherheit feuerbelasteter Innenschalen gegen Kollaps ermittelt.

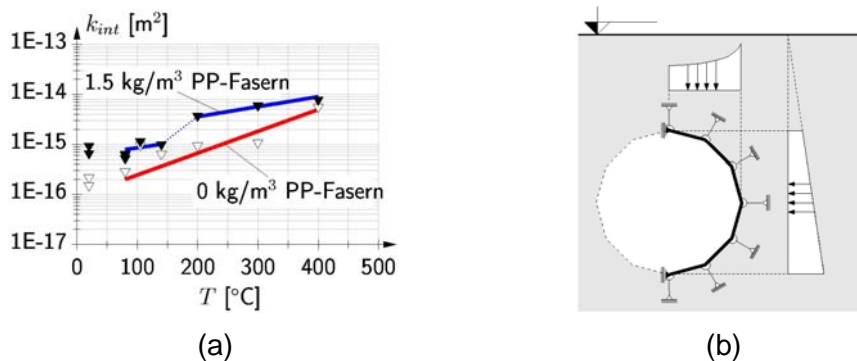


Abbildung 4: (a) Permeabilität von Beton mit und ohne Polypropylen (PP) Fasern und (b) Strukturmodell zur Analyse von Tunnelinnenschalen unter Feuerlast