

Entwicklung eines optischen Verfahrens zur Bestimmung der Leimschichtdicke offenporiger Betone

Wissenschaftlicher Kurzbericht Nr. 66 (2022)

Nicolai Klein, Thomas Kränkel

Arbeitsgruppe 2: Betontechnologie

1 Einleitung

Offenporiger Beton besteht in der Regel aus einem Gesteinskörnungs-Haufwerk als Monokorngruppe ohne oder mit einer lediglich geringen Menge an Feinanteilen, welches mit einer Mindermenge von Zementleim fest verbunden wird. Auf diese Art entsteht ein verbundenes Porennetzwerk, welches sich positiv auf die Entwässerungs- und Schallemissionseigenschaften, wie es bspw. im Betonstraßenbau benötigt wird, auswirkt. Für eine ausreichende akustische und entwässernde Wirkung des Porennetzwerks wird jedoch ein zugänglicher Porenanteil von wenigstens 15 % des Gesamtvolumens angestrebt, woraus sich entsprechende Problematiken für die Festigkeit (sinkende Festigkeit mit steigendem Porenanteil) des Materials ergeben. Auftretende Lasten müssen durch die mit Zementstein ausgebildeten Kontaktpunkte zwischen den Gesteinskörnern von einem Korn zum nächsten weitergeleitet werden. Die geringe Anzahl und Fläche der Kontaktpunkte stellt dabei den Schwachpunkt im Gesamtsystem zur Lastübertragung dar. Während die Anzahl der Kontaktpunkte hauptsächlich durch die Gesteinskörnungseigenschaften (i. A. Geometrie und Größe) festgelegt wird, ist die Kontaktfläche maßgeblich von der Dicke der sich um die Gesteinskörnung legenden Leimschicht abhängig. Je größer dabei die Dicke der Leimschicht ist, desto mehr Kontaktfläche steht in den Kontaktpunkten zwischen den Gesteinskörnern zur Lastübertragung zur Verfügung. Die Leimschichtdicke lässt sich durch die Rauheit der Gesteinskörnung und das dem Beton zugegebene Zementleimvolumen steuern. Dabei sind die rheologischen Eigenschaften des Zementleims zur Verhinderung einer Leimsedimentation (Absinken des frischen Leims und damit inhomogene Leimverteilung in vertikaler Richtung der Probe) zu berücksichtigen.

Ziel des entwickelten Prüfverfahren ist es, die Leimschichtdicke von offenporigen Betonen zu quantifizieren. Dies ermöglicht zukünftig, a) die Größe der Kontaktflächen zur Lastübertragung abzuschätzen, b) zu detektieren ob eine Leimsedimentation vorliegt, und c) systematische Analysen durchzuführen, um die Zusammenhänge zwischen der angestrebten Maximierung der

Leimschichtdicke in Abhängigkeit der Gesteinskörnungseigenschaften, der zugegebenen Leimmenge sowie der Rheologie des Zementleims zu verifizieren.

2 Verfahrensentwicklung

Das Prüfverfahren basiert auf einer optischen Unterscheidung zwischen dem Zementstein, der Gesteinskörnung und den Poren im erhärteten Beton. Dazu wurden zunächst hochauflösende großflächige Bildaufnahmen des Betons mit Hilfe eines Flachbettscanners erzeugt.

Für die Bestimmung der mittleren Leimschichtdicke ($\overline{d_{LS}}$, vgl. Formel 1) mussten aus der Bilddatei die Flächenanteile des Zementsteins (A_{ZS}), sowie der Gesamtumfang der Gesteinskörnung (U_{GK}) ermittelt werden.

$$\overline{d_{LS}} = \frac{A_{ZS}}{U_{GK}} [\mu\text{m}] \quad (1)$$

Zur Entwicklung und Validierung des Prüfverfahrens wurden Proben mit unterschiedlichen Gesteinskörnungen und Leimanteilen hergestellt. So konnte die Leimschichtdicke gezielt variiert werden. Um einen möglichst hohen optischen Kontrast zwischen der Gesteinskörnung und dem Zementstein zu erreichen, wurden dem Zementleim rotbraune Pigmente (FeO_2) beigemischt. Der Prüfungsablauf unterteilt sich in folgende Bereiche:

1. Probenpräparation

Die Proben werden nach ausreichender Erhärtungsdauer entweder horizontal (Detektion der Leimschichtdicke auf der jeweiligen Probenhöhe) oder vertikal (Beurteilung ob Leimsedimentation aufgetreten ist), nass in Scheiben gesägt und die Sägeflächen in einem zweistufigen Prozess geschliffen, um die anschließende weitere optische Auswertung zu erleichtern (vgl. Abb. 1).



Abbildung 1: Probenpräparation durch nasses Sägen (links) und anschließendes Schleifen (rechts)

2. Steigerung von Porenkontrast mit anschließender Bildaufnahme

Um auch die Poren mit einem guten Kontrast von den Feststoffen unterscheiden zu können, werden diese mit einem sehr feinen weißen Kalksteinmehl aufgefüllt. Die präparierten Proben werden mit einem Abstandhalter definierter Dicke mit einer Auflösung von 3000 dpi (entspricht einer Bildpunktgröße von ca. $8,5 \mu\text{m}$) gescannt und das Scannergebnis als Rohbild im verlustfreien Format (*.tif) gespeichert (vgl. Abb. 3).

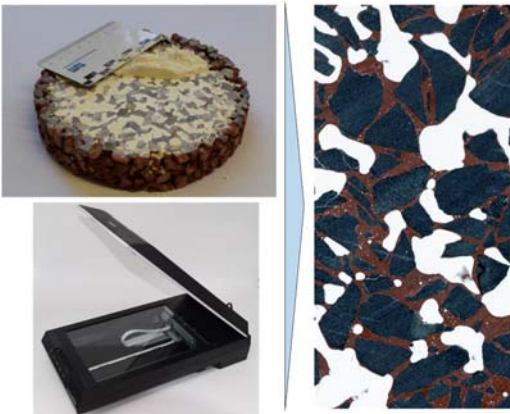


Abbildung 3: Scanbereite Probe mit zugehörigem Rohbild

3. Farbzerlegung und Bestimmung der Flächenanteile

Das Rohbild wird in ein eigens in Python programmiertes Auswertetool geladen und über Farbgrenzwerte im HSV-Farbraum in die Bestandteile Materialbestandteile Leim (A_{zs} in μm^2), Gesteinskörnung und Poren zerlegt (vgl. Abb. 4). Ggf. auftretende kleine, fehlerhaft erkannte Bildpunkt-Cluster werden in den sie umgebenden Bestandteil eingegliedert. Dabei werden auch Poren im Zementstein mit mehreren μm Durchmesser als Zementstein klassifiziert.

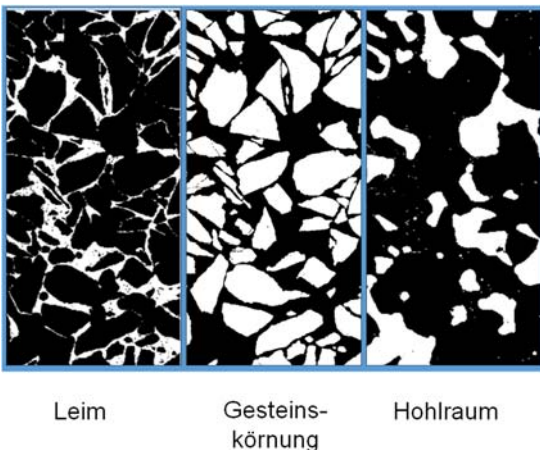


Abbildung 4: In seine Materialbestandteile Leim, Gesteinskörnung und Hohlraum (Pore) zerlegtes Rohbild

4. Kantendetektion der Gesteinskörnung

Im letzten Schritt werden über das Python-Auswertetool alle Kanten der Gesteinskörnung (U_{GK} in μm) anhand des in 3. gefilterten Gesteinskörnungsbildes detektiert und die Leimschichtdicke \bar{d}_{LS} aus Formel (1) berechnet.

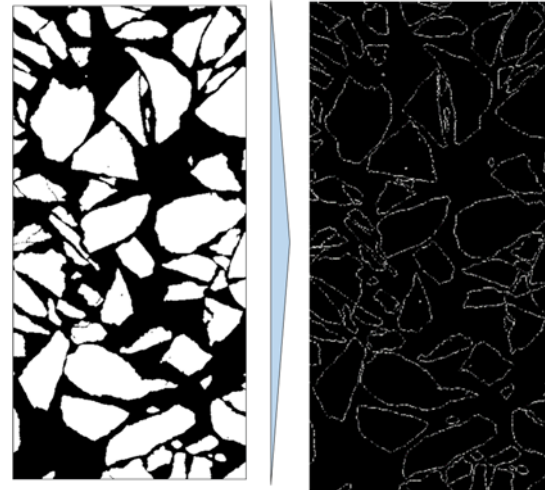


Abbildung 5: Aus dem Gesteinskörnungsbild gewonnenes Kantenbild

Neben der hier beschriebenen Leimschichtdicke liefert das entwickelte optische Verfahren ebenso Aussagen über den Gesteinskörnungs- und Porenanteil sowie deren Verteilung in den observierten Schnittflächen. Dies kann später bspw. genutzt werden, um die Verdichtbarkeit des Betons sowie die Gleichmäßigkeit des erreichten Verdichtungsergebnisses zu beurteilen, was sich wiederum auf die Dauerhaftigkeit des Betons auswirkt.

3 Fazit

Das hier beschriebene neuartige Prüfverfahren ermöglicht es, mit einfachen laborüblichen Werkzeugen und mittlerem Zeitaufwand (primär zur Probenpräparation) die Leimschichtdicke von offenporigen Betonen zu ermitteln. Die Leimschichtdicke wirkt sich dabei direkt auf die Festigkeit und Dauerhaftigkeit der offenporigen Betone aus. Die Möglichkeit ihrer gezielten Quantifizierung erlaubt es somit zukünftig, systematische Untersuchungen zur Maximierung der Leimschichtdicke, und damit zur Steigerung von Festigkeit und Dauerhaftigkeit daraus hergestellter Betone, durchzuführen. Dabei wird der Untersuchungserfolg (Dicke der Leimschicht) nicht anhand von Ersatzkenngrößen (z.B. Festigkeit) ermittelt, sondern direkt gemessen. Dies erlaubt die Rückführung der Materialperformance auf die fundamentale, gezielt variierte Kenngröße (z.B. Geometrie der Gesteinskörnung, Rheologie des Zementleims). So kann künftig die Performance offenporigen Betons gezielter optimiert werden.