

# VORWORT DES HERAUSGEBERS

Die vorliegende Dissertation von Herrn Dr. Duckheim reiht sich ein in mehrere Arbeiten, mit denen das grundlegende Gebrauchsverhalten des Betons – mechanische Eigenschaften und Dauerhaftigkeit – besser beschrieben werden. Es hängt wesentlich vom Feuchtegehalt ab. Diese Phänomene werden mit dem Begriff „hygrisches Verhalten“ erfasst. Ein wesentliches Beispiel ist das Schwinden und Quellen.

Der Gehalt an freiem Wasser sinkt mit der Hydratation und ändert sich mit den Umgebungsbedingungen. Anstehendes Wasser wird durch kapillares Saugen und Frost-Tau-Belastung aufgenommen. Mit sinkender Luftfeuchte trocknet der Beton. Die Restfeuchte, die sich bei einer Luftfeuchte unter 100 % einstellt, ist die hygroskopische Feuchte. Das Wasser ist dann ausschließlich in den submikroskopischen Gelporen des Zementsteins enthalten.

Das Gefüge des Zementsteins hat Partikel und Poren mit charakteristischen Dimensionen zwischen zwei und 100 Nanometern. Hier dominieren die Gesetze der Oberflächenphysik und -chemie, die zu einem Verhalten führen, welches sich signifikant vom makroskopischen unterscheidet. Auch die mechanischen Eigenschaften und die Dauerhaftigkeit hängen davon maßgeblich ab.

Abgesehen von der Hydratation ist jede Feuchteänderung mit einem makroskopischen Transportprozess verbunden. Wegen des dichten Gefüges von Beton sind die Transportzeiten extrem lang, so dass sich ein Gleichgewichtszustand aufgrund der makroskopischen Distanzen praktisch nicht einstellt. Folglich sind auch die damit gekoppelten mechanischen Eigenschaften instationär. Um sie korrekt zu modellieren, sind präzise Daten über die Verhältnisse unter Gleichgewichtsbedingungen eine wesentliche Voraussetzung. Wegen des Gefüges des Zementsteins müssen dabei die besonderen Gesetze der Oberflächenphysik beachtet werden.

Da sich quasi-stationäre Bedingungen nur einstellen, wenn die Transportlängen gering sind, muss man auf eine filigrane Probengeometrie zurückgreifen. Nur dann finden die Ausgleichsvorgänge in Zeiten statt, die sowohl überschaubare Messzeiten erlauben, als auch störende sekundäre Effekte, wie z. B. die Spannungsrelaxation bei einer Schwindverkürzung, vermeiden.

Solch kleine Proben erfordern nicht nur eine sorgfältige und ausgereifte Präparation, sondern in gleicher Weise eine ausgefeilte hochpräzise Messtechnik, die darüber hinaus über die immer noch langen Messzeiten von mehreren Monaten stabil bleiben muss. Diese Messtechnik schließt auch hohe Anforderungen an das umgebende Klima ein. Hier setzt die vorliegende Arbeit ein. Bei den Schwindmessungen baut sie auf der Dissertation von Herrn Dr. Alawieh auf. Seine Messmethodik wurde entscheidend verbessert, so dass die Schwindverformung nun in einem abgeschlossenen Klima berührungsfrei mit einem Laser gemessen wird. Die Präzision von  $\pm 20$  nm ist für derartige Messungen bisher unerreicht. Die Feuchteaufnahme wurde mit einer Magnetschwebewaage ebenfalls berührungsfrei und mit hoher Präzision von  $\pm 10$   $\mu$ g im abgeschlossenen Klima bestimmt. Diese Methode geht auf eigene Untersuchungen noch an der TU München und auf die Dissertation von Herrn Dr. Adolphs

zurück. Das Klima konnte mit einer speziellen Hightech-Apparatur erzeugt werden, die sowohl Temperatur und Taupunkt auf  $\pm 0,1$  K konstant hält, als auch eine Atmosphäre sicherstellt, die frei von Kohlendioxid ist.

Mit dem Zusammenspiel dieser Methoden hat Herr Dr. Duckheim einen Messaufbau realisiert, der Ergebnisse in bisher unerreichter Genauigkeit lieferte. Mit der ebenfalls ausgefeilten Probenpräparation wurde ein Durchbruch erzielt, der die Modellierung des hygri-schen Verhaltens von Zementstein und damit von Beton auf eine neue stabile Basis stellt. Die Desorptions-Adsorptions-Hysterese liegt nun für verschiedene Zemente und Wasserzementwerte vor. Insbesondere hat Herr Dr. Duckheim auch die gesamte erste Desorption erstmals mit solch hoher Genauigkeit ermittelt. Sie unterscheidet sich von allen folgenden Zyklen durch ein irreversibles Verhalten.

Die Ergebnisse hat Herr Dr. Duckheim durch Heliumpyknometrie-Messungen ergänzt. Damit ist es möglich, die tatsächliche Reindichte des Feststoff-Wasser-Systems zu messen. Denn auch leere Poren im Nanometerbereich werden mit Helium gefüllt und damit bei der Reindichtemessung ausgeschlossen. Kombiniert mit der Sorption lassen sich die Dichte des Porenwassers bei unterschiedlicher Luftfeuchte ebenso wie Dichteänderungen des Gels ermitteln. Die Ergebnisse bestätigen Untersuchungen von Dr. Liebrecht und Dr. Kruschwitz an unserem Institut. Schließlich zeigt die Messung der Schmelzenthalpie mit der DSC, wie auch in der Dissertation von Herrn Dr. Liebrecht, dass das Gelporenwasser andere physikalische Eigenschaften als das makroskopische Wasser hat.

Letztlich bestätigen und präzisieren die Ergebnisse von Herrn Dr. Duckheim auch die Vorstellungen des Münchner Modells. Hier wurde zwischen einem oberen Feuchtebereich, in dem das Porenwasser und der damit verbundene Spaltdruck dominiert und dem unteren Feuchtebereich, in dem die Oberflächenenergie die entscheidende Größe ist, unterschieden. Die Modellvorstellungen werden allerdings auch präzisiert. Denn es zeigt sich, dass die Änderung der Oberflächenenergie nicht zu einer Änderung der Oberflächenspannung führt, sondern zu einer Änderung der Oberflächenwechselwirkung und damit des Spaltdrucks in Poren, die kein Kondensat enthalten.

Herr Dr. Duckheim konnte auch zeigen, dass die Kapillarspannung bei den durchgeführten Präzisionsmessungen eine nachweisbare Rolle spielt. Sie ist aber gegenüber dem Spaltdruck (disjoining pressure) untergeordnet.

Die Arbeit ist eingebettet in fundamentale Ergebnisse der modernen Oberflächenphysik. Mit ihnen wird vor allem das entscheidende Phänomen des Spaltdrucks immer besser verstanden.

Insgesamt ist die Dissertation von Herrn Dr. Duckheim ein wesentlicher Meilenstein auf dem sehr mühseligen Weg, das Verhalten des nanoporösen Systems des Zementsteins besser zu verstehen und damit die Gebrauchseigenschaften zu verbessern.

Essen, Januar 2008

Max J. Setzer