

Prognosemodell zur Dauerhaftigkeit des Stein-Mörtel-Verbundes in historischem Mauerwerk

Durability prognosis model of composite action between natural stone and joint mortar in historical masonry

Budelmann, Harald; Twelmeier, Heiko

Abstract

Until recently, the long-range prognosis of durability of newly joint historical masonry was just based on experience. It will be possible to prognose the suitability of different joint mortars with help of different models that characterize the bonding behaviour between natural stones and joint mortar.

1. Einleitung

Bei Neuverfugungen von historischem Mauerwerk entscheidet die Qualität des Verbundes zwischen Mörtel und Steinen über die Dauerhaftigkeit des Objektes. Sobald Risse im Verbund oder im Mörtel auftreten, kann Feuchtigkeit in das Mauerwerk eindringen und das Gefüge zerstören. Die Entscheidung, welche Mörtel in welchem Mauerwerk eingesetzt werden, fällt i.d.R. aufgrund von Erfahrungen. Inwieweit sich die ausgewählten Mörtel jedoch wirklich eignen, zeigt sich meist erst nach einigen Jahren am Bauwerk.

Zur qualitativen Abschätzung von Risswahrscheinlichkeiten wurde daher ein einfaches und praxistaugliches Ingenieurmodell auf der Grundlage einer Spannungsberechnung an der Mauerwerksoberfläche entwickelt. Für die Berechnung werden nur wenige Materialparameter benötigt, die Anwendung ist einfach.

Genauere Strukturanalysen sind mit einem kombinierten, komplexen Forschungsmodell möglich. Hierfür werden die Temperatur- und Feuchtetransporte mit einem FDM-Programm berechnet. Die ermittelten Temperatur- und Feuchtefelder werden über eine Schnittstelle an ein FEM-Programm übergeben, das zur Berechnung von Spannungen und Verformungen auf die Materialmodelle von Rots /4/, Lourenço /3/ und van Zijl /2/ zurückgreift.

2. Ingenieurmodell

Für die einfache Modellierung des Verbundverhaltens wird das „Ingenieurmodell zur Dauerhaftigkeit des Verbundsystems Naturstein/Mörtelfuge mit Bezug auf die Neuverfugung historischen Mauerwerks“ von Schmidt-Döhl und Rostásy /1/ angewendet. Das Ingenieurmodell

geht davon aus, dass die die Rissgefahr erzeugende Spannung durch eine ungleiche Verteilung von Temperatur und Feuchte über den Mauerwerksquerschnitt verursacht wird. Die thermischen und hygrischen Dehnungen an der Oberfläche werden durch das Mauerwerksinnere behindert. Die Grundstruktur besteht aus einer Spannungsberechnung an der Oberfläche unter der vereinfachenden Annahme eines vollständig gezwängten Stein-Mörtel-Verbundes und für die maximale Temperaturdifferenz:

$$\varepsilon_T + \varepsilon_S - \varepsilon_{el,pl} - \varepsilon_K = 0$$

mit ε_T = Temperaturdehnung, ε_S = Schwinddehnung, $\varepsilon_{el,pl}$ = elastische und plastische Dehnung und ε_K = Kriechdehnung

Unter vollem Zwang muss die Summe der einzelnen Dehnungsanteile an der Oberfläche Null ergeben. Die einzelnen Dehnungskomponenten werden für die Fälle Flankenrissbildung (Riss parallel zur Fugenlängsrichtung) und Mörtelrissbildung (Riss normal zur Fugenlängsrichtung) näher untersucht. Die daraus resultierenden Spannungsberechnungen bilden die Grundlage des Ingenieurmodells, welches in Form einer Microsoft Access®-Datenbank umgesetzt wurde.

Verschiedene Untersuchungsreihen haben gezeigt, dass mit diesem Modell, obwohl nur linear-elastisches Verformungsverhalten berücksichtigt wird, Versuchsergebnisse gut abgebildet werden können. Das Modell ist hinsichtlich seiner Genauigkeit begrenzt. Da es bisher deterministisch formuliert ist, kann es die großen Streuungen u. a. der Eigenschaften von Natursteinen nicht berücksichtigen. Zur Zeit wird an der Möglichkeit automatisierter Parameterstudien gearbeitet. Diese berücksichtigen auch die Streuungen in den Mörtel- und Steineigenschaften, soweit entsprechende Datensätze in der Datenbank eingepflegt sind. Darüber hinaus geht die Haftscherfestigkeit noch nicht in die Berechnung ein, der Bruchmodus II wird daher nicht berücksichtigt. Ferner bleiben chemische Degradationsprozesse und solche durch Frosteinwirkung, z.B. Veränderung der Mörtel-eigenschaften durch Verwitterung, im Modell noch unberücksichtigt.

3. Forschungsmodell

Zurzeit Es ist kein Modell verfügbar, das sowohl die Wärme- und Feuchtetransporte, als auch das komplexe Materialverhalten von Mauerwerk (Schwinden, Temperaturdehnung, Kriechen, Relaxieren, Versagensmechanismen) mit hoher Genauigkeit beschreibt. Ein Grund dafür ist die Komplexität der Abhängigkeiten des Materialverhaltens von Feuchtigkeit und Temperatur. Diese Abhängigkeiten führen zu gekoppelten Differentialgleichungen, deren Lösung mit der FEM bislang nicht zufrieden stellend gelöst ist (Van Zijl /1/).

Bis zum Zeitpunkt der Rissbildung können die hygrischen und thermischen Transportprozesse als unabhängig vom mechanischen Zustand des Systems aufgefasst werden. Daher wurde ein Modell entwickelt, welches die jeweils detaillierten Teilmodelle kombiniert (vgl. Bild 1).

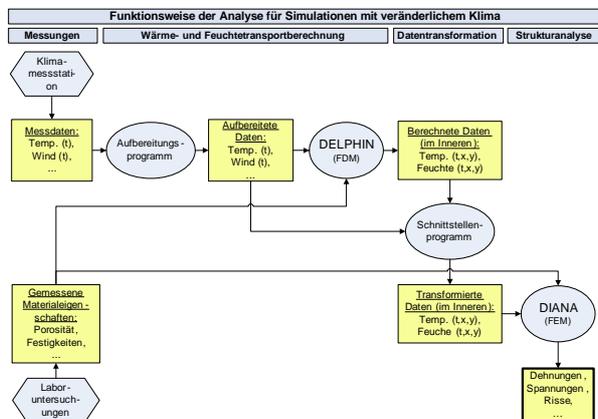


Bild 1: Verknüpfung der einzelnen Programme des Forschungsmodells

Die Transportprozesse werden mit DELPHIN®, einem Programm auf Basis der Finiten Differenzen Methode (FDM), berechnet. Die an einer beliebigen Klimastation gemessenen zeitabhängigen Daten werden mit Hilfe eines Zusatztools bearbeitet und an DELPHIN® übergeben. Die Transportberechnung erfolgt so unter realistischen Randbedingungen sowie unter Berücksichtigung von Sonneneinstrahlungs- und Schlagregeneffekten. Kopplungseffekte zwischen Wärme- und Feuchtetransporten werden ebenfalls berücksichtigt.

Die Strukturanalyse wird mit dem FEM-Programm DIANA® durchgeführt. Dabei wird auf die Materialmodelle von Rots /4/, Lourenço /3/ und Van Zijl /2/ zur Berechnung resultierender Verformungen, Spannungen und Rissbildung unter Berücksichtigung von viskosem und plastischem Materialverhalten zurückgegriffen.

Sowohl die Unterschiede in den Netzen der FDM und der FEM, als auch Formatanforderungen in den Dateien

bedingen eine Transformation der mit DELPHIN® ermittelten Temperatur- und Feuchtedaten in ein für das Programm DIANA® lesbares Format und dessen Elementierungsmethode der FEM. Dies wird durch ein Schnittstellenprogramm erreicht.

Bisher wurden mit diesem Modell Zweisteinkörper abgebildet. Hier erfolgte jedoch noch eine getrennte Simulation von Wärme- und Transportprozessen unter Ausnutzung der Symmetrie.

Die zu erwartende Rissbildung aufgrund starker Trocknung konnte gut abgebildet werden. Eine solche Ermittlung des zeitabhängigen Feuchteprofils ist für Versuchskörper dieser Größe durch Messungen derzeit nicht möglich. Weiterhin ermöglicht das Forschungsmodell beliebige Klimabedingungen zu simulieren. Bei einer Nutzung dieses Modells für probabilistische Analysen könnte theoretisch auch festgestellt werden, unter welchen Bedingungen besonders hohe Versagenswahrscheinlichkeiten für den Haftverbund auftreten.

4. Zusammenfassung

Durch umfangreiche und effektive Analysen mithilfe der entwickelten Modelle können im Vorfeld von Fugensanierungen aufwendige und teure Material- und Verbunduntersuchungen auf ein Minimum reduziert werden. Durch die quantitative Bestimmung der jeweilige Verformungs- und Spannungsanteile, Sensitivitätsstudien usw. wird eine genauere Erforschung der Rissursachen möglich. Weiterhin kann die Verteilung der Feuchte über den ganzen Querschnitt und die Zeit mit dem Forschungsmodell bestimmt werden.

Die Modellentwicklung- und verifikation beider Modelle wird noch fortgesetzt.

5. Literaturverzeichnis

- /1/ Schmidt-Döhl, F. & Rostäy, F.S.: Ingenieurmodell zur Dauerhaftigkeit des Verbundsystems Naturstein/Mörtelfuge mit Bezug auf die Neuverfugung historischen Mauerwerks“, Abschlussbericht 2000
- /2/ Van Zijl, G.: Computational Modelling of Masonry Creep and Shrinkage, Meineme BV, Delft 2000
- /3/ Lourenço, P.B.: “Computational strategies for masonry structures”, Dissertation, Delft University of Technology, Netherlands, 1996.
- /4/ Rots, J.G.: Structural Masonry: An Experimental / Numerical Basis for Practical Design Rules, Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1997.