

# Abstract

Being one of the oldest building materials in human history, clay block masonry remains widely used in modern construction. Over time, modern clay blocks have evolved to be more lightweight and offer better thermal insulation properties. As a result, vertical perforations were introduced to the blocks. Due to this intricate block geometry, the brittle and orthotropic behavior of fired clay, and the interaction between blocks through mortar or glued joints, describing the behavior of masonry through numerical models is a major challenge. Consequently, current clay block products and masonry design rules are largely based on empirical studies. Hence, this thesis presents finite-element-based unit cell models for simulating the complex behavior of clay block masonry structures and their potential application in optimizing clay block products.

Since lateral tensile stresses in the transversal webs are the main reason for the failure of vertically perforated clay block masonry under dominant vertical compression, reinforced bed joints are a promising approach to increase the compressive strength, without changing the block geometry. Using the eXtended Finite Element Method to model the fracture of fired clay and a multiscale homogenization approach to incorporate the effect of the reinforcement on the mortar joint, the impact of reinforced bed joints on the compressive strength of clay block masonry is investigated. The results indicate that the 5 %-quantile of the compressive strength can be increased by up to 33 %, with reinforced bed joints.

Among all the experiments required to obtain a specific level of material certification, fire tests are the most expensive and time-consuming. For this reason, a numerical model for predicting the fire resistance of clay block masonry has been developed. The aim is to provide a small-sized, yet detailed model, which is capable of predicting the performance of a masonry wall in a fire test and offering insights into the involved failure mechanisms. A novel energy-based spalling criterion allows for decoupling the spalling of the longitudinal webs from the vertical loading. Thus, a two-dimensional temperature-displacement finite element model is adequate, which reduces the computational effort significantly. The model is validated using novel experimental data.

As structural engineers increasingly rely on modern FE software for the design of entire structures, an understanding of the effective masonry strengths under various loading states becomes essential. Although failure surfaces for masonry can be found in the literature, the calibration of the necessary parameters often requires experiments with complex loading conditions. Hence, the unit cell model for the vertical compressive strength is extended by a failure model for the mortar joints and validated using experimental data from the literature. Applying this model to a simplified geometry, the peak stress states of masonry under 150 different loading conditions are investigated. In doing so, seven different failure mechanisms are identified and assigned to regions with similar loading conditions. Furthermore, the numerically obtained peak stress states are used to calibrate failure surfaces from the literature: the failure surface formulated by Ganz (1985) and the Rankine–Hill failure surface proposed by Lourenço (1996). Both failure surfaces show good agreement with the numerically obtained results. Nevertheless, qualitative differences compared to the Rankine–Hill failure surface under governing vertical tension and governing vertical compression are observed. Finally, a concept for calibrating the parameters of the Rankine–Hill surface is presented, using the developed numerical model as a substitute for experiments.

# Kurzfassung

Als einer der ältesten Baustoffe in der Geschichte der Menschheit wird Ziegelmauerwerk auch heute noch häufig verwendet. Im Laufe der Zeit wurden die Ziegel für moderne Ansprüche optimiert. Vertikale Löcher verbessern die Wärmedämmeigenschaften und reduzieren das Gewicht der Ziegel. Diese komplexe Ziegelgeometrie, das spröde und orthotrope Verhalten von gebranntem Ton sowie die Wechselwirkung zwischen Ziegel und Mörtel machen die numerische Modellierung von Ziegelmauerwerk zu einer großen Herausforderung. Deshalb beruhen die verfügbaren Ziegelprodukte und die Bemessungsregeln für Mauerwerk hauptsächlich auf empirischen Studien. In dieser Arbeit werden daher Finite-Elemente-basierte Einheitszellenmodelle zur Modellierung des komplexen Verhaltens von Hochlochziegelmauerwerk vorgestellt und zur Optimierung von Ziegelprodukten angewandt.

Da horizontale Zugspannungen in den Quersteinen die Hauptursache für das Versagen von Hochlochziegelmauerwerk unter Vertikaldruck sind, stellen bewehrte Lagerfugen einen vielversprechenden Ansatz zur Erhöhung der Druckfestigkeit dar, ohne die Geometrie der Ziegel zu verändern. Unter Verwendung von XFEM zur Modellierung des Ziegelversagens und eines Mehrskalens-Homogenisierungsansatzes zur Berücksichtigung der Bewehrung in der Mörtelfuge wird die Auswirkung von verstärkten Lagerfugen auf die Druckfestigkeit untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass das 5 %-Quantil der Druckfestigkeit durch bewehrte Lagerfugen um bis zu 33 % gesteigert werden kann.

Von allen Versuchen, die zur Erlangung einer Materialzertifizierung erforderlich sind, sind Brandversuche die teuersten und zeitaufwändigsten. Daher wird ein numerisches Modell zur Vorhersage der Feuerbeständigkeit von Ziegelmauerwerk entwickelt. Ein neuartiges energiebasiertes Abplatzkriterium erlaubt es, das Abplatzen der Längsstege von der vertikalen Belastung zu entkoppeln. Damit ist ein zweidimensionales FE-Modell ausreichend, was den Rechenaufwand erheblich reduziert, aber dennoch einen detaillierten Einblick in die Versagensmechanismen ermöglicht. Das Modell wird anhand neuer experimenteller Daten validiert.

Da Bauingenieure bei der Bemessung ganzer Bauwerke auf moderne FE-Software angewiesen sind, ist die Kenntnis von effektiven Mauerwerksfestigkeiten unter verschiedenen Belastungszuständen von großer Bedeutung. In der Literatur sind zwar Versagensflächen für Mauerwerk verfügbar, jedoch erfordert die Kalibrierung der notwendigen Parameter oft Experimente mit komplexen Randbedingungen. Daher wird das bereits entwickelte Einheitszellenmodell durch ein Versagensmodell für die Mörtelfugen erweitert und mit experimentellen Daten aus der Literatur validiert. Anhand einer vereinfachten Geometrie werden die Grenzspannungszustände von Mauerwerk unter 150 verschiedenen Lastfällen untersucht. Dabei werden sieben verschiedene Versagensmechanismen identifiziert und Regionen mit ähnlichen Belastungszuständen zugeordnet. Die numerisch ermittelten Grenzspannungszustände ermöglichen die Kalibrierung zweier Versagensflächen aus der Literatur: jene nach Ganz (1985) und die Rankine-Hill-Versagensfläche nach Lourenço (1996). Beide Versagensflächen stimmen gut mit den numerisch ermittelten Ergebnissen überein. Dennoch sind qualitative Unterschiede im Vergleich zur Rankine-Hill-Fläche bei überwiegend vertikalem Zug und überwiegend vertikalem Druck zu beobachten. Abschließend wird ein Konzept zur Kalibrierung der Parameter der Rankine-Hill-Fläche mithilfe des numerischen Modells vorgestellt.