

ZWISCHENBERICHT/ENDBERICHT

FFG Projektnummer	865067	eCall Antragsnummer	14029087
Kurztitel	INNOVATIVE BRICK 2	FörderungsnehmerIn	Technische Universität Wien
Bericht Nr.	01	Berichtszeitraum	07/18 - 06/19
Bericht erstellt von	Thomas Kiefer, Josef Füssl, Thomas Buchner, Raphael Suda, Andreas Jäger, Wolfgang Gaggl, Gottfried Früh		

Hinweise: Richtwert für den Umfang: 10-40 Seiten, als pdf im eCall hochladen!

1. Ziele und Ergebnisse

- ◆ Wurden die dem Förderungsvertrag zugrunde liegenden Ziele erreicht? Sind diese Ziele noch aktuell bzw. realistisch? (Achtung: Änderungen von Zielen erfordern eine Genehmigung durch die FFG)
- ◆ Vergleichen Sie die Ziele mit den erreichten Ergebnissen.
- ◆ Beschreiben Sie „Highlights“ und aufgetretene Probleme bei der Zielerreichung.

AP1: Projektmanagement

Eine gemeinsame Online-Projektdatenbank wurde für alle beteiligten Projektbeteiligten eingerichtet, um einen uneingeschränkten Zugang zu relevanten Daten gewährleisten zu können. In diese Datenbank werden zudem Protokolle aller zweimonatigen Besprechungen eingebracht, welche eine laufende Kosten- und Terminkontrolle beinhalten. Zudem werden darin alle bereits erfolgreich abgeschlossenen Zwischenschritte sowie die nächsten Projektziele festgehalten.

Zudem befindet sich eine erste Publikation im Rahmen dieses Projekts, welche die Beschreibung der Ergebnisse aus AP4 beinhaltet, in Vorbereitung auf die Einreichung.

AP2: Identifikations- und Verifikationsversuche Ziegelscherben

Die Etablierung der im Antrag formulierten "Virtual Ceramic Labs", welche eine Vorhersage des effektiven Materialverhaltens in Abhängigkeit des Produktionsprozesses, der chemischen Zusammensetzung sowie der Mikrostruktur des Ziegelscherbens ermöglichen sollen, bedingen eine vollständige Charakterisierung aller untersuchten Tone. Zu diesem Zweck wurden in einem ersten Schritt weitere Tone mit (verfeinerten) Methoden, wie sie bereits im Vorgängerprojekt "Innovative Brick" angewendet wurden, untersucht. Die weiteren Tone - Mergel, Löß, Kaolinit sowie Smektit - bilden zusammen mit den bereits untersuchten Tönen eine charakteristische Auswahl aller in der Ziegelproduktion des Konzerns Wienerberger genutzten Rohtone. Die im weiteren Verlauf des Projekts noch zu untersuchenden Tone mit zwei anorganischen Porenbildnern - Flugasche und Schlacke - sowie unterschiedlichen Brenntemperaturen, bilden dann die Grundlage einer vollständigen Charakterisierung des gebrannten Ziegelscherbens mit dem Ziel einer möglichst breiten Datenbasis zur Etablierung der "Virtual Ceramic Labs".

Zur Bestimmung des Porenraums werden hierbei μ -CT Messungen durchgeführt, wobei die Auflösung neuer Gerätschaften eine Identifikation bis zu einer Porengröße von 1,5 Voxeln zulässt, womit bereits ein Teil des Mesoporenraums erfasst werden kann. Damit liegen erstmals 3D-Informationen auf dieser Betrachtungsebene vor. Die Gesamtporosität wird zudem mittels Quecksilberporosimetrie und Xyloiwägung verifiziert, wobei eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse festgehalten werden kann. Zudem wurden die Ergebnisse der μ -CT Messungen erstmals für eine Bestimmung der Dichteverteilung über den Querschnitt des gebrannten Scherbens genutzt.

AP3: Mehrskalenmodell Ziegelscherben - Mikromechanik

Für die bereits erwähnte Etablierung so genannter "Virtual Ceramic Labs" auf Basis von Mehrskalenmodellen zur Bestimmung makroskopischer Materialeigenschaften konnte bereits im vorausgegangenen Projekt "Innovative Brick" mit der erfolgreichen Programmierung der Mehrskalenmodelle für die Homogenisierung der Wärmeleitfähigkeit sowie der Steifigkeit ein erster wichtiger Grundstock gelegt werden. Ein weiterer wichtiger Baustein - ein Mehrskalenmodell zur Berechnung der Festigkeit - fehlt noch. Nach Untersuchungen an der Bruchoberfläche von unter Zugspannung gerissenen Probekörpern liegt jedoch der Schluss na-

he, dass Spannungsspitzen rund um die Poren für das Versagen des Ziegelscherbens verantwortlich sind. Daher wurde in einem ersten Schritt eine analytische Bestimmung der Spannungen rund um ellipsoide Poren mittels Methoden der Kontinuums-Mikromechanik entwickelt, welche in weiterer Folge in Kombination mit Gleichungen der linearen Bruchmechanik eine Berechnung einer kritischen Bruchenergiedichte, spezifisch für die chemische Zusammensetzung und die Brenntemperatur jedes Tones, ermöglichen soll.

AP4: Numerisches Simulationstool Mauerwerk und Stochastik

Bei der Verwendung von Hochlochziegeln im Mauerwerksbau wird, auch aufgrund der gegebenen Planparallelität, hauptsächlich Dünnbettmörtel eingesetzt, aufgrund der Lochgeometrie der Ziegelsteine bildet dieser allerdings keine horizontal durchgehende Schicht mehr. Dadurch entstehen vertikale Fugen, welche insbesondere bei Strom- oder Wasseranschlüssen in den Außenwänden zu bauphysikalischen Problemen führen. Daher werden vereinzelt durch Glasfasergewebe verstärkte Mörtelfugen verwendet, um so vertikal durchgehende Fugen zu verhindern. Deren Auswirkung auf die vertikale Tragfähigkeit wurde bei einzelnen Versuchen der Firma Wienerberger nachgewiesen, und soll daher mittels eines numerischen Modells genauer untersucht werden. Die Modellierung des Mauerwerks erfolgt hier (wie im voran gegangenen Projekt "Innovative Brick") mittels einer Unit Cell, das orthotrope Verhalten des Ziegelscherbens wird mittels eines Interaktionskriteriums implementiert. Die numerische Simulation der Rissinitiierung sowie des Risswachstums wurde mittels XFEM umgesetzt. Die effektiven Eigenschaften der gewebeverstärkten Mörtelschicht werden mithilfe eines Homogenisierungsverfahrens berechnet. Eine Verifizierung der gewählten Modellierungsstrategie konnte schließlich durch Vergleich der Simulationsergebnisse mit Versuchen an Vollziegel Pfeilern erreicht werden.

Die Anwendung des Modells auf Hochlochziegel zeigte dabei einen deutlichen Einfluss von Gewebeschichten auf die vertikale Tragfähigkeit. So konnte für einen Volumenanteil des Gewebes in der Mörtelschicht von 6%, bei gleichzeitiger Berücksichtigung einer stochastischen Verteilung der Festigkeiten im Ziegel, eine mögliche Steigerung der Tragfähigkeit von 28,9% ermittelt werden. Berücksichtigt man den für die Zulassung wesentlichen Wert des 5%-Quantils, so ergibt sich sogar eine numerisch ermittelte Steigerung von 33,8%. Zudem war es möglich, die Effekte einer steiferen Mörtelschicht auf den Versagensmechanismus zu identifizieren: zum einen bewirkt diese eine Verteilung der in den Querstegen des Ziegels auftretenden Zugspannungen, zum anderen hat sie eine behindernde Wirkung auf das Risswachstum innerhalb eines Quersteiges. Zuletzt konnten mit dem gewählten Ansatz der stochastischen Verteilung der Festigkeiten innerhalb des Ziegels die aus Versuchen gewonnenen Standardabweichungen sowie die unteren und oberen Schranken der Tragfähigkeit gut abgeschätzt werden.

AP5: Verifikationsversuche Ziegel

Die Druck- und Zugfestigkeiten, Wärmeleitfähigkeiten und Rohdichten der Referenztone wurden gemessen, eine vollständige Aufarbeitung der Daten ist zum jetzigen Zeitpunkt jedoch noch nicht vorhanden, weshalb die entsprechenden Ergebnisse erst im nächsten Zwischenbericht vollständig dokumentiert werden.

AP6: Schnittstelle Produktion

Ein erstes Berechnungstool zur Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit und Steifigkeit wurde erstellt. Dabei kann der Prozentsatz der Volumenzugabe sowie der zu verwendende Porosierungswerkstoff bestimmt werden, zudem stehen zwei Brenntemperaturen für zwei Roh-tone unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung zur Auswahl. Das an den Projektpartner übergebene Programm ist damit ein erster Schritt in Richtung der "Virtual Ceramic Labs", welche im Laufe dieses Projektes weiter an die Anforderungen der Produktentwicklung angepasst werden sollen. Mit der Implementierung der Ergebnisse dieses Forschungsprojektes entsteht damit ein Simulationstool, welches für alle charakteristischen Töne, die in der Produktion genutzt werden, in Abhängigkeit von Brenntemperatur und Porenbildner zu erwartenden Materialeigenschaften zuverlässig bestimmen kann. Damit wird ein auf physikalischen Modellen basierendes Werkzeug zur Optimierung des Ziegels geschaffen.

2. Arbeitspakete und Meilensteine

2.1 Übersichtstabellen

- ◆ Erläuterung:
Die Tabellen sind analog zum Förderungsansuchen aufgebaut

Energieforschungsprogramm - 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Basistermin: Termin laut Förderungsansuchen bzw. laut Vertrag gültigem Projektplan
Akt. Planung: Termin laut zum Zeitpunkt der Berichtslegung gültiger Planung.

Tabelle 1: Arbeitspakete

AP Nr.	Arbeitspaket Bezeichnung	Fertigstellungsgrad	Basistermin		Aktuell		Erreichte Ergebnisse / Abweichungen
			Anf.	Ende	Anf.	Ende	
1	Projektmanagement	-	04/18	03/21	04/18	03/21	Gemeinsame Datenbank der Projektpartner für Zugriff auf alle projektrelevanten Daten eingerichtet. Regelmäßige Meetings mit umfangreicher Protokollierung aller abgeschlossenen sowie der nächsten Arbeitsschritte.
2	Identifikations- und Verifikationsversuche Ziegelscherben	25%	04/18	09/20	04/18	09/20	Vollständige Charakterisierung des Porenraums bei vier zusätzlichen Tonen abgeschlossen.
3	Mehrskalenmodell Ziegelscherben - Mikromechanik	40%	04/18	03/21	04/18	03/21	Analytische Bestimmung der Spannungsspitzen rund um Poren als Grundlage eines Mehrskalenmodells für die Homogenisierung der Festigkeit erfolgreich.
4	Numerisches Simulationstool Mauerwerk und Stochastik	30%	04/18	03/21	04/18	03/21	Implementierung stochastischer Konzepte in das Berechnungstool, Berücksichtigung einer gewebeverstärkten Mörtelschicht ebenfalls erfolgreich.
5	Verifikationsversuche Ziegel	40%	04/18	03/21	10/18	03/21	Druck- und Zugfestigkeiten sowie Wärmeleitfähigkeiten und Rohdichten an vier Referenztonen sind bestimmt.
6	Schnittstelle Produktion	20%	04/18	03/21	10/18	03/21	Erstes Berechnungstool zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit zweier Tone in Abhängigkeit zugegebener Porosierungsmittel und der Brenntemperatur programmiert.

Tabelle 2: Meilensteine

Meilenstein Nr.	Meilenstein Bezeichnung	Basistermin	Akt. Planung	Meilenstein erreicht am	Anmerkungen zu Abweichungen
1	Morphologie von Ziegelscherben mit anorganischen Porosierungsmitteln	03/19	12/19		Späterer Dienstantritt Dissertanten
2	Ergebnisse aus Nanoindentation	06/19	03/20		Späterer Dienstantritt Dissertanten
3	Mikroprobekörper mittels FIB	09/19	09/20		Priorisierung der anderen Meilensteine
4	Festigkeiten und Versagensmechanismen aus Mikroversuchen im Pikoindenter	06/20	06/20		
5	Definition der Betrachtungsebenen	09/19	09/19		
6	Homogenisierungskonzept für thermische Eigenschaften und Festigkeiten	09/20	09/20		
7	Simulationstool Mauerwerk	09/19	09/19		
8	Zufallsprozessmodell	06/20	06/20		
9	Schnittstellen Produktion	03/20	03/20		

2.2 Beschreibung der im Berichtszeitraum durchgeführten Arbeiten

- ◆ Beschreiben Sie die im Berichtszeitraum durchgeführten Arbeiten, strukturiert nach den Arbeitspaketen.
- ◆ Konnten die Arbeitsschritte und –pakete gemäß Plan erarbeitet werden? Gab es wesentliche Abweichungen?
- ◆ Die Beschreibung beinhaltet ebenso eine allfällige Änderung der angewandten Methodik (Achtung: Änderungen an der Methodik und wesentliche Änderungen im Arbeitsplan erfordern eine Genehmigung durch die FFG!).

AP1: Projektmanagement

Bei monatlichen Meetings aller Projektbeteiligten werden die laufenden Ergebnisse sowie die weiteren notwendigen Schritte diskutiert und in Protokollen festgehalten. Dadurch wird eine aktuelle Dokumentation über die anstehenden und erledigten Arbeitspakete gewährleistet. Zudem findet eine laufende Kostenkontrolle statt. Ergebnisse werden in Jour Fixe Präsentation sowie Fortschrittsberichten festgehalten und laufend dokumentiert, zudem sind die Ergebnisse Grundlage für Publikationen in international anerkannten Journalen. Eine erste Publikation, die numerische Simulation der Erhöhung der Tragfähigkeit durch eine gewebeverstärkte Mörtelschicht betreffend, befindet sich gerade in Vorbereitung auf die Einreichung.

Zudem wurde über die TU-eigene owncloud eine Online-Datenbank eingerichtet, in der alle Protokolle, Präsentation, Berichte, Messergebnisse und sonstige Daten der einzelnen Arbeitspakete strukturiert gespeichert werden, um allen Beteiligten jederzeit einen einfachen Zugriff auf projektrelevante Daten zu ermöglichen. Außerdem findet zwischen den Projektleitern eine laufende, informelle Koordination statt.

AP2: Identifikations- und Verifikationsversuche Ziegelscherben

1 Identifikationsversuche an Ziegelproben unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung

1.1 Die untersuchten Tone und deren chemische bzw. mineralogische Zusammensetzung

Zur Erweiterung und Verbesserung des im Zuge des Vorgängerprojekts Innovative Brick erarbeiteten Mehrskalens-Materialmodells für Ziegelscherben wurden die im Vorgängerprojekt begonnenen Identifikationsversuche fortgesetzt. Das Labor Hennersdorf stellte bislang extrudierte und bei 880°C gebrannte Probekörper (15 x 30 x 125 mm) vier unterschiedlicher Tone zur Verfügung. Die wesentlichen Ergebnisse der an diesen Proben durchgeführten Messungen werden in diesem Bericht beschrieben.

Die gegenständlichen Tone wurden in Tschechien, Ungarn und Deutschland abgebaut und stellen charakteristische Tone der in der Ziegelherstellung verwendeten Rohstoffe des Konzerns Wienerberger dar. Die chemische Zusammensetzung der gebrannten Tone wurde mithilfe von Röntgenfluoreszenzspektroskopie-Messungen ermittelt und ist in Tab. 1 zusammengestellt. Tab. 2 zeigt die mithilfe von Röntgendiffraktometrie ermittelte mineralogische Zusammensetzung.

Tab. 1: Mittels Röntgenfluoreszenzspektroskopie ermittelte chemische Zusammensetzungen der vier gebrannten Tone

Probe	Mergelton	Löss	Kaolinitischer Ton	Smektitreicher Ton
Kurzbezeichnung	MER	LOE	KAO	SME
Glühverlust	14,4	0,4	6,0	1,4
SiO ₂	41,0	68,0	66,0	54,0
Al ₂ O ₃	16,0	16,0	20,0	16,0
TiO ₂	0,7	1,0	1,3	0,8
Fe ₂ O ₃	6,4	6,1	2,8	7,4
CaO	12,0	1,0	0,8	11,0
MgO	3,5	1,5	0,6	3,2
K ₂ O	3,4	3,4	1,5	3,6
Na ₂ O	0,9	1,6	0,2	1,3
SO ₃	1,00	0,02	0,54	0,91
Summe	99,3	99,0	99,7	99,6

Tab. 2: Mittels Röntgendiffraktometrie ermittelte mineralogische Zusammensetzung der vier gebrannten Tone

Probe	Mergelton	Löss	Kaolinitischer Ton	Smektitreicher Ton
Kurzbezeichnung	MER	LOE	KAO	SME
Quarz SiO ₂	65,5	23,5	24,5	63,5
Hämatit Fe ₂ O ₃	1,5	1,5	1,5	-
Muskovit KAl ₂ [(OH,F) ₂ AlSi ₃ O ₁₀]	5,0	7,5	12,0	4,5
Pyroxen (Augit) (Ca,Mg,Fe,Ti,Al)(Si,Al) ₂ O ₆	-	8,0	5,5	-
Gehlenit Ca ₂ Al ^[4] [AlSiO ₇]	-	4,0	8,0	-
Anorthit Ca[Al ₂ Si ₂ O ₈]	8,0	22,0	13,5	-
Orthoklas K[AlSi ₃ O ₈]	2,5	5,5	7,0	1,5
Amorph	17,5	28,0	28,0	30,5
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0

Für die Zukunft ist geplant, das Probenet auf fünf Tone zu erweitern, wobei auch unterschiedliche Brenntemperaturen untersucht werden sollen. Des Weiteren werden in Zukunft auch Tone mit Zumischung von Flugasche bzw. Schlacke als Magerungs- und Porosierungsmittel untersucht.

1.2 Charakterisierung des Porenraumes – Mikro-Computertomografie

Aus den gebrannten Tonproben mit den Abmessungen 15 x 30 x 125 mm wurden kleinere, quaderförmige Probekörper mit den Abmessungen 6 x 4 x 15 mm herausgeschnitten, wobei die Kante mit der Länge 6 mm parallel zur Extrusionsrichtung ausgerichtet ist. Die Einführung eines rechtshändigen Koordinatensystems mit den Achsen X, Y und Z parallel zu den Kanten mit den Längen 6, 4 und 15 mm ermöglicht später eine genaue Beschreibung der Porenmorphologie. Die so hergestellten Probekörper wurden mit dem Mikro-Computertomographen μ CT 100 (SCANCO Medical AG, Schweiz), je zweimal, mit unterschiedlichen Einstellungen, gescannt. Der erste Scan erfolgte an einem Volumen von 6 x 4 x 0,5 mm (X x Y x Z) in der Mitte des Probekörpers mit Voxelgröße 1,2 x 1,2 x 1,2 μ m, 145 μ A Stromstärke und 55 kVp Spitzenspannung. Als Zweites wurde das gesamte Volumen des Probekörpers (6 x 4 x 15 mm) mit den gleichen Energieeinstel-

lungen wie bei der ersten Messung, jedoch mit Voxelgröße $6 \times 6 \times 6 \mu\text{m}$ gescannt. Die größeren Voxelabmessungen waren notwendig, um die Datenmenge auf eine praktikable Größe zu beschränken. Die dadurch erhaltenen strukturellen 3D-Informationen der Tonproben werden durch Grauwertbilder mit abschwächungsabhängigen Grauwerten innerhalb einer 16 bit Scala von 0 bis 32767 dargestellt. Diese Grauwerte repräsentieren die voxelspezifische Abschwächung der Röntgenstrahlen.

1.2.1 Ermittlung der Gesamtporosität

Um nun die Gesamtporosität aus den 3D-Grauwertbildern zu bestimmen wurde das adaptierte Vorgehen nach [Czenek2014], welches ebenfalls in [Kariem2018] verwendet wurde, auf die Bilder des ersten Scans angewandt. Die folgende Beschreibung ist nur ein grober Überblick über diese Methode, für weitere Details wird auf die bereits erwähnte Literatur verwiesen.

Das Verfahren basiert auf der Annahme, dass ein Voxel des gebrannten Tons nur aus zwei Phasen – Poren und dichter Tonmatrix – besteht. Zusätzlich zum untersuchten Material muss ein Zylinder aus reinem Aluminium, ebenfalls mit denselben Einstellungen, gescannt werden. Anhand der Ergebnisse dieses Scans wird die Kalibrierung des linearen Zusammenhangs zwischen Grauwert und Abschwächungskoeffizient μ vorgenommen. Somit kann zu jedem Grauwert ein voxelspezifischer Abschwächungskoeffizient μ_{FC} errechnet werden. Mithilfe der in Kap. 1 ersichtlichen Informationen über die chemische Zusammensetzung und der NIST-Datenbank [Hubbell1982, Seltzer1993, Hubbell2004] kann laut [Hubbell1977] auch ein Abschwächungskoeffizient μ^{NIST} der theoretisch dichten Tonmatrix ermittelt werden, wobei die Reindichte des Tons eingeht. Die Ermittlung der Reindichte wird in Kap. 0 beschrieben. Mit diesen Werten kann nun die Porosität ϕ jedes einzelnen Voxels mit folgender Formel ermittelt werden:

$$\phi = \frac{(\mu_{FC} - \mu^{NIST})}{(\mu_{Air} - \mu^{NIST})} \quad (1)$$

Wobei der Abschwächungskoeffizient der Luft μ_{Air} mithilfe des am häufigsten vorkommenden Grauwerts für Luft aus den 3D-Bildern ermittelt wurde.

Das Integral der Porosität ϕ über das gescannte Volumen ergibt nun das Gesamtporenvolumen V_{pores} zu:

$$V_{pores} = \int_{V_{sample}} \phi(x) dV \quad (2)$$

Die Gesamtporosität wird als Volumenanteil der Poren am gesamten gescannten Volumen ermittelt:

$$\phi_{CT} = \frac{V_{pores}}{V_{sample}} \quad (3)$$

1.2.2 Ermittlung von Meso- und Mikroporosität

In diesem Kapitel werden die Begriffe Meso- und Mikroporosität aus dem Vorgängerprojekt Innovative Brick übernommen, wobei durch die Auflösungsgrenze der Mikro-CT-Scans mit $1,2 \mu\text{m}$ Voxelgröße die Grenze zwischen Meso- und Mikroporen verschoben wird. Mesoporen sind in diesem Bericht jene Poren, welche eine charakteristische Abmessung von etwa $1,5 \mu\text{m}$ und mehr aufweisen. Mikroporen sind folglich alle Poren mit kleineren charakteristischen Abmessungen. Diese Grenze ergibt sich durch die Umrechnung eines Voxels (Würfel) in eine Kugel mit gleichem Volumen. Der Kugeldurchmesser misst dann etwa $1,5 \mu\text{m}$. Da bei der Herstellung der hier untersuchten Tone keine Porosierungsmittel verwendet wurden, gibt es keinen signifikanten Anteil an Makroporen. Darum wird in weiterer Folge nur auf den Meso- und Mikroporenraum eingegangen.

Eine Bildanalyse der 3D-Grauwertbilder der jeweils ersten Scans (Voxelgröße $1,2 \mu\text{m}$) mithilfe der Software ImageJ [Schneider2012] ermöglichte die Feststellung und Quantifizierung von Mesoporen. Hierbei wurde zuerst ein Median-3D-Filter angewandt, um Rauschen zu reduzieren. Im nächsten Schritt konnte das 3D-Grauwertbild mithilfe einer lokalen Phansalkar Threshold [Phansalkar2011] in ein Binärbild (Poren in schwarz) umgewandelt werden, siehe Abb. 1. Zur Analyse der somit erhaltenen 3D-Information der Poren, kam der sogenannte ImageJ 3D-Object Counter zum Einsatz. Dieser lieferte eine Vielzahl an Informationen über die erkannten Poren, wobei in diesem Bericht nur auf das Mesoporenvolumen V_{meso} eingegangen wird. Dieses Volumen kann als Summe der Volumina der einzelnen Poren berechnet werden, siehe Gl. 4.

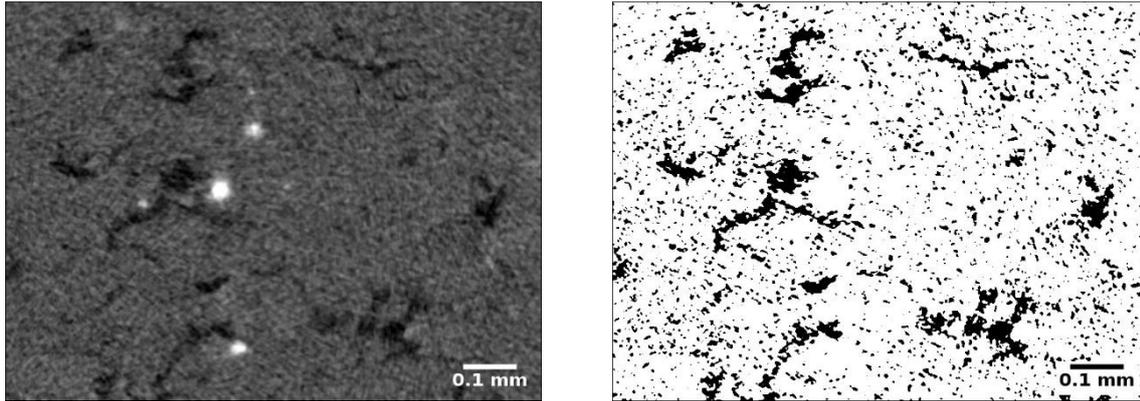


Abb. 1: Links: Grauwertbild aus der Mikro-CT-Messung; Rechts: Binärbild nach Filterung und anschließender Anwendung der Phansalkar Threshold [Phansalkar2011].

$$V_{meso} = \sum_{i=1}^n V_{meso,i} \quad (4)$$

Das Mesoporenvolumen V_{meso} wird durch das gescannte Volumen V_{sample} dividiert um die Mesoporosität ϕ_{meso} zu erhalten:

$$\phi_{meso} = \frac{V_{meso}}{V_{sample}} \quad (5)$$

Die Mikroporosität folgt dann aus:

$$\phi_{micro} = \phi_{CT} - \phi_{meso} \quad (6)$$

1.2.3 Porositätsverlauf über den Querschnitt

Die Daten des zweiten Mikro-CT-Scans (Voxelgröße 6 μm), wobei die gesamte Probe gescannt wurde, ermöglicht eine Darstellung des Porositätsverlaufs in Z-Richtung über den gesamten extrudierten Querschnitt der Tone. Hierzu wurde wiederum die in Kap. 1.2.1 beschriebene Methode angewandt. Jedes der 3D-Bilder wird in der Software ImageJ als Stapel aus 2D-Einzelbildern (Scheiben) mit der Voxelgröße als Dicke dargestellt. Als Eingangsgrauwert für die Berechnung wurde nun für jede Scheibe der mittlere Grauwert ermittelt und mit diesem eine mittlere Porosität. Diese mittlere Porosität je „Scheibe“ wurde in einem Diagramm über den Querschnitt aufgetragen, siehe Kap. 2. Bei der Berechnung der Gesamtporosität traten bei den Ergebnissen aus den zweiten Scans geringfügig niedrigere Werte auf, als bei jenen aus den ersten Scans. Die Differenzen sind auf die unterschiedlichen Auflösungen (Voxelgröße 1,2 μm bzw. 6 μm) zurückzuführen. Diese Abweichungen in den Porositätsverläufen konnten jedoch aufgrund der linearen Beziehung zwischen Grauwert und Porosität einfach durch Verschieben der Kurven angepasst werden.

1.3 Verifizierung mittels Quecksilberporosimetrie und Xylol-Wiegetests

1.3.1 Bestimmung von Porengrößenverteilung und Gesamtporosität mittels Quecksilberporosimetrie (QP)

An allen vier Tonen wurden Quecksilberporosimetrie-Versuche durchgeführt, um die mittels Mikro-CT ermittelten Daten zu verifizieren und eine Porengrößenverteilung der im Mikro-CT nicht mehr sichtbaren Mikroporen zu erhalten. Hierfür wurde mithilfe einer wassergekühlten Kernbohrmaschine aus jeder Tonprobe ein Zylinder mit Durchmesser 8 mm und Höhe 15 mm herausgebohrt und anschließend 24h bei 105°C getrocknet, um das beim Bohren in den Ton infiltrierte Kühlwasser zu entfernen.

Bei der Quecksilberporosimetrie wird die Messzelle mit einer zylindrischen Probe je Versuch beaufschlagt und anschließend mit Quecksilber gefüllt. Letzteres ist eine nichtbenetzende Flüssigkeit, welche ohne äußeren Druck nicht in die Poren der Probe infiltrierte. Nun wird die beaufschlagte und gefüllte Messzelle gewogen. Mithilfe des bekannten Gewichts der nur mit Quecksilber gefüllten Messzelle und der Dichte von

Quecksilber kann das Volumen des Probekörpers V_{sample} bestimmt werden. Anschließend wird der Druck in der Messzelle erhöht, um das Quecksilber in die Poren zu pressen. Dabei werden der Druck und das Volumen des in die Poren infiltrierten Quecksilbers, welches dem Porenvolumen entspricht, gemessen. Aus dem Druck lässt sich eine aktuell befüllte Porengröße und somit eine Porengrößenverteilung berechnen. Des Weiteren kann die Gesamtporosität wie folgt angegeben werden:

$$\phi_{Hg} = \frac{V_{pores}}{V_{sample}} \quad (7)$$

Für mehr Informationen zu theoretischem Hintergrund, Funktionsweise, Durchführung und Anwendungsgrenzen der Quecksilberporosimetrie siehe [Giesche2006].

1.3.2 Bestimmung von Gesamtporosität und Reindichte mittels Xylol-Wiegetests (XWT)

Zur näherungsweisen Berechnung der Reindichte der unterschiedlichen Tone und als weitere Verifizierungsmessung für die Gesamtporosität wurden Xylol-Wiegetest durchgeführt. Hierfür wurden ebenfalls zylindrische Proben (Durchmesser 12 mm, Höhe 15 mm) mittels wassergekühlter Kernbohrmaschine aus den ursprünglichen Probekörpern präpariert und analog zu den Proben für die Quecksilberporosimetrie getrocknet. Um nun die oben genannten Größen zu ermitteln, wurde das Archimedische Prinzip [Halliday2010] wie in [Kariem2018] angewandt.

Zuerst wurden die getrockneten Proben mithilfe einer Präzisionswaage (PGH403-S, Mettler-Toledo International Inc., Schweiz) gewogen (die Trockenmasse wird mit m_d bezeichnet), anschließend in mit Xylol gefüllte Probegläser gelegt. Nach 24h und 48h erfolgten die zweite und dritte Wiegung der bereits infiltrierten Proben. Das Gewicht der Proben änderte sich nach 24h nicht mehr, d.h. die Proben waren bereits nach 24h vollständig mit Xylol gesättigt (die Masse der gesättigten Proben wird mit m_{sat} bezeichnet). Des Weiteren wurde nach 48h das Gewicht der in Xylol eingetauchten Proben m_{sub} bestimmt. Der letzte notwendige Wert für die Berechnung von Reindichte und Porosität ist die bekannte Dichte von Xylol $\rho_{xyl} = 0.861g/cm^3$ bei 20°C. Gl. 8 zeigt die Ermittlung des Volumens des Tongerüsts V_{scaff} , d.h. das Volumen des Probekörpers ohne Poren.

$$V_{scaff} = V_{sample} - V_{pores} = \frac{(m_d - m_{sub})}{\rho_{xyl}} \quad (8)$$

Das Porenvolumen V_{pores} wird folgendermaßen berechnet:

$$V_{pores} = \frac{(m_{sat} - m_d)}{\rho_{xyl}} \quad (9)$$

Nun kann die Gesamtporosität ϕ_{xyl} als Verhältnis von Porenvolumen zu Probenvolumen ermittelt werden:

$$\phi_{xyl} = \frac{V_{pores}}{V_{sample}} \quad (10)$$

Abschließend wird die Reindichte aus der Trockenmasse m_d und dem Volumen des Tongerüsts V_{scaff} berechnet:

$$\rho_{clay} = \frac{m_d}{V_{scaff}} \quad (11)$$

2 Ergebnisse und Diskussion

2.1 Vergleich der mit unterschiedlichen Messmethoden ermittelten Porosität

In Abb.22 (links) ist ein Vergleich der Gesamtporosität der vier unterschiedlichen Tone dargestellt. Für jeden Ton gibt es drei Markierungen, welche die Ergebnisse aus den in den Kap. 1.2 und 1.3 beschriebenen Methoden darstellen. Es ist ersichtlich, dass die Ergebnisse der Xylol-Wiegetests durchwegs sehr gut mit den Resultaten der Quecksilberporosimetrie zusammenpassen. Bei dreien der vier Tone ist die Porosität aus den Mikro-CT-Messungen größer als die der anderen beiden Methoden. Dies deutet auf geschlossene Po-

ren hin, welche mit dem Mikro-CT gesehen werden, jedoch nicht mit der Quecksilberporosimetrie (QP) und den Xylol-Wiegetests (XWT). Nur für den Löss ergibt sich aus den Mikro-CT-Scans eine niedrigere Gesamtporosität als mit den anderen beiden Methoden. Im Löss kommen vereinzelt größere relativ dichte Körner – bis etwa 1 mm charakteristische Abmessung – vor. Da eines dieser Körner im gescannten Bereich liegt, könnte dies die Erklärung für die Unterschätzung der Gesamtporosität sein.

Abb.22 zeigt rechts einen Porositätsvergleich der Tone auf Meso- und Mikroebene, wobei die Porosität auf den entsprechenden Skalen laut Kap. 1.2.2 und 0 berechnet wurde. Der Ausgangswert für die Berechnung der Mikroporosität war hier allerdings nicht die Gesamtporosität aus den Mikro-CT-Scans, sondern jene aus den Xylol-Wiegetests. In dieser Abbildung sind große Unterschiede zwischen den Tönen ersichtlich. Nicht nur die Gesamtporosität, sondern auch die Mesoporosität unterscheiden sich stark. Des Weiteren ist erkennbar, dass die Mesoporosität nicht zwingend mit der Gesamtporosität zusammenhängt. Beispielsweise ist die Gesamtporosität im Löss niedriger als jene im Mergelton. Die Mesoporosität hingegen ist im Löss größer als im Mergelton.

Die Ergebnisse der Röntgenfluoreszenzspektroskopie (Tab. 1) lassen aufgrund des Gehalts an Calciumoxid (CaO) auf einen relativ hohen Anteil an Calciumcarbonat (CaCO_3) im Rohmaterial des Mergeltons und Smektitreichen Tons schließen. Calciumcarbonat zersetzt sich während dem Brennvorgang (laut [Cultrone2004] ab ca. 700 bis 870°C) zu Calciumoxid (CaO) und Kohlenstoffdioxid (CO_2). Das Entweichen des Kohlenstoffdioxids hat eine erhöhte Porosität zur Folge [Cultrone2004]. Durch diesen Effekt lässt sich die deutlich höhere Porosität im Mergelton im Gegensatz zu den anderen Tönen (Löss, Kaolinitischer Ton und Smektitreicher Ton) erklären. Beim Smektitreichen Ton steht der Erhöhung der Porosität durch die Zersetzung von CaCO_3 eine Porositätsverringerung durch Verglasung der Tonminerale gegenüber. Diese setzt ab etwa 600°C ein und ist bei ca. 850°C abgeschlossen [Grim1940, Furlong1967]. Die Entwicklung des Porenraumes mit zunehmender Verglasung der Tonminerale bei hohen Brenntemperaturen wurde von [Cultrone2004] und [Jordan2008] untersucht.

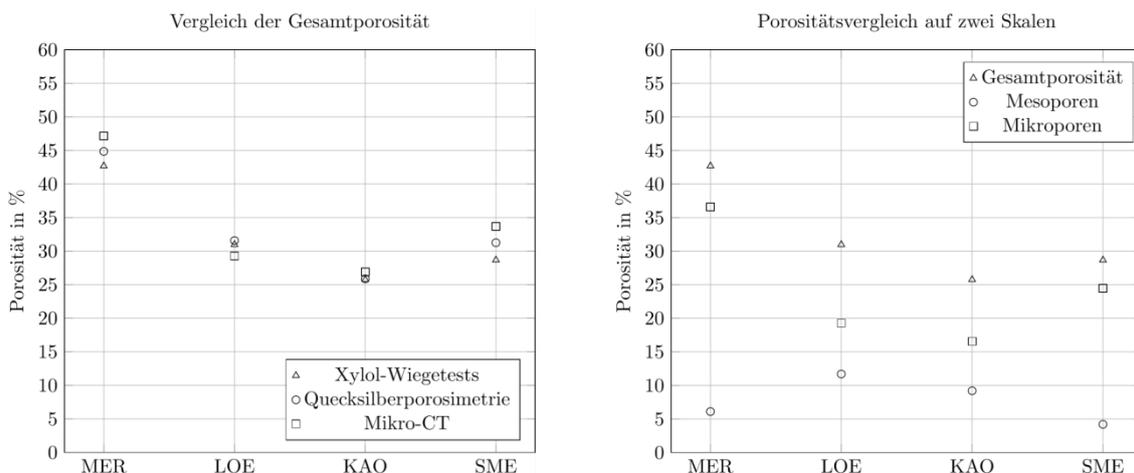


Abb. 2: Links: Vergleich der mit den drei unterschiedlichen Methoden ermittelten Gesamtporosität (Kap 1.2 und 1.3); Rechts: Gesamtporosität aus den Xylol-Wiegetests (Kap. 0), Meso- und Mikroporosität aus den Mikro-CT Versuchen (Kap. 1.2.2).

2.2 Ermittlung der Dichte über den Querschnitt

Da eine Bestimmung der Dichte des gebrannten Tones mittels μ -CT bei einer Voxelgröße von lediglich 1.5 μm über den gesamten Querschnitt aufgrund der dabei entstehenden Datenmenge nicht sinnvoll erscheint, wird für die unterschiedlichen Tone die Dichteverteilung über den gesamten Querschnitt bestimmt, um eventuelle Abweichungen zu erfassen. Zudem ist eine solche Bestimmung auch für die Diskussion der Ergebnisse von Mehrdickenmessungen zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit, sowie zur Quantifizierung einer möglichen Presshaut, wie sie beim Strangpressen entsteht, vonnöten.

Abb. 3 zeigt den laut Kap. 1.2.3 ermittelten Verlauf der Porosität über den Querschnitt jedes Tons. Die Messdaten sind blau dargestellt. Der rote Graph stellt eine quadratische Parabel zur Näherung des Verlaufes dar, die grüne Linie markiert die durchschnittliche Porosität bzw. Gesamtporosität. Alle Daten entstammen den Mikro-CT-Messungen.

In dieser Abbildung sind weitere gravierende Unterschiede der Tone erkennbar. Die Porositätsverläufe im Mergelton und Smektitreichen Ton sind konkav, d.h. die Porosität ist in der Mitte des Extrusionsquerschnitts

Energieforschungsprogramm - 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

höher als am Rand. Im Gegensatz dazu ist der Verlauf im Löss nahezu gleichbleibend und im Kaolinitischen Ton sogar leicht konvex. Da der Rohton bei der Herstellung homogen vermischt wird, sind diese Verläufe auf die Produktionsschritte Extrudieren und Brennen zurückzuführen.

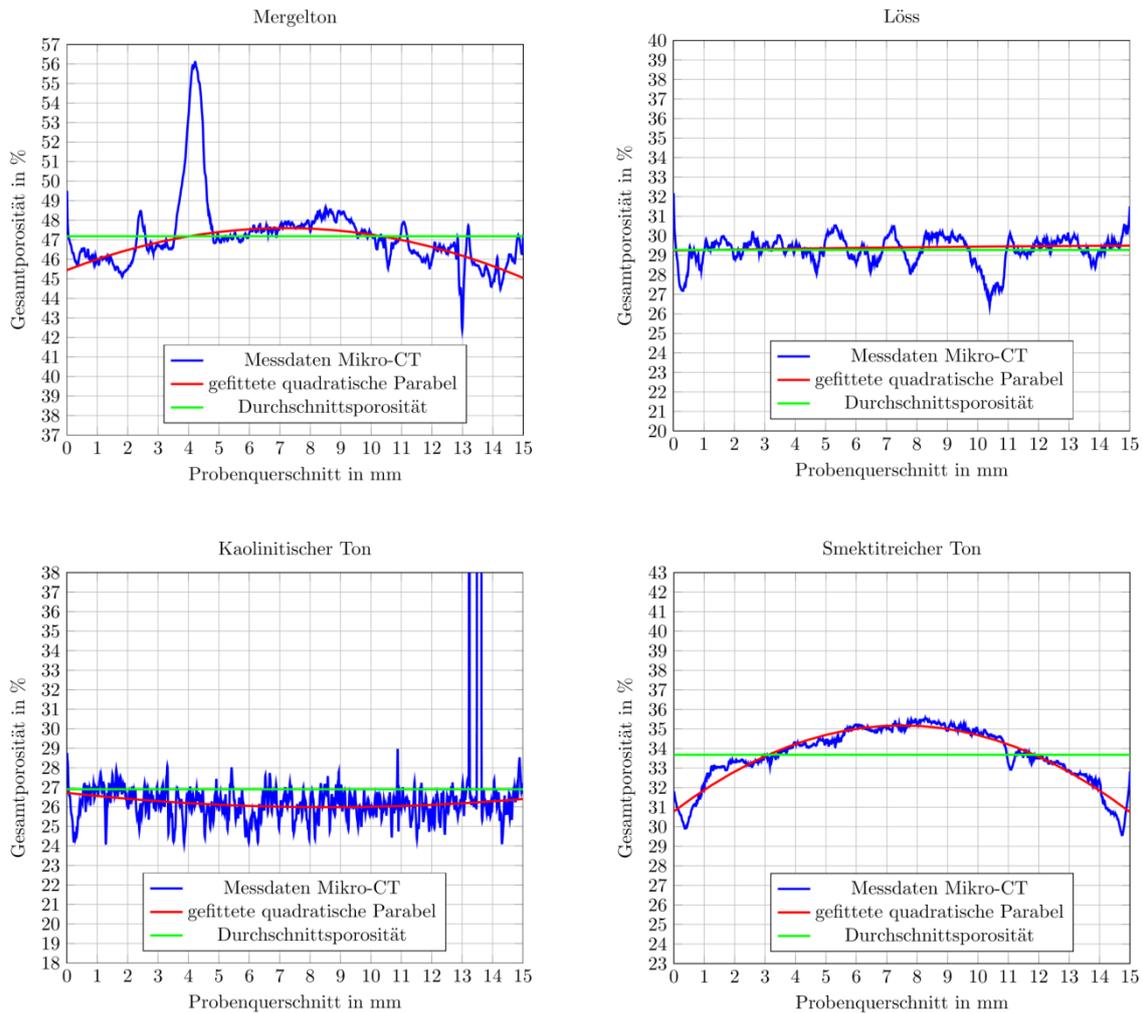


Abb. 3: Verläufe der mittels Mikro-CT ermittelten Porosität über den Querschnitt der vier untersuchten Tone.

Literaturverzeichnis

- [Cultrone2004] Cultrone, G., Sebastián, E., Elert, K., Torre, M., Cazalla, O., Rodriguez-Navarro, C., 2004. Influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks. *Journal of the European Ceramic Society* 24, 547-564, doi: 10.1016/S0955-2219(03)00249-8.
- [Czenek2014] Czenek, A., Blanchard, R., Dejaco, A., Sigurjónsson, Ó., Örlygsson, G., Gargiulo, P., Hellmich, C., 2014. Quantitative intravoxel analysis of microct-scanned resorbing ceramic biomaterials – perspectives for computer-aided biomaterial design. *Journal of Materials Research* 29, 2757-2772, doi: 10.1557/jmr.2014.326.
- [Furlong1967] Furlong, R., 1967. Electron diffraction and micrographic study of the high-temperature changes in illite and montmorillonite under continuous heating conditions. *Clay and Clay Minerals: Proceedings of the Fifteenth Conference, Pittsburgh, PA*. Pergamon Press.
- [Giesche2006] Giesche, H., 2006. Mercury porosimetry: A general (practical) overview. Part. Part. Syst. Charact. 23, 9-19, doi: 10.1002/ppsc.200601009.
- [Grim1940] Grim, R.E., Bradley, W.F., 1940. Investigation of the effect of heat on the clay minerals illite and montmorillonite. *Journal of the American Ceramic Society*, doi: 10.1111/j.1151-2916.1940.tb14263.x.
- [Halliday2010] Halliday, D., Resnick, R., Walker, J., 2010. *Fundamentals of Physics*. John Wiley & Sons.
- [Hubbell1977] Hubbell, J., 1977. *Photon mass attenuation and mass energy-absorption coefficients for H*,

- C, N, O, Ar, and seven mixtures from 0.1 keV to 20 MeV. Radiat. Res. 70, 58-81.
- [Hubbell1982] Hubbell, J., 1982. Photon mass attenuation and energy-absorption coefficients. Appl. Radiat. Isot. 33(11), 1269-1290.
- [Hubbell2004] Hubbell, J., Seltzer, S., 2004. Tables of X-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients from 1 keV to 20 MeV for elements z=1 to 92 and 48 additional substances of dosimetric interest.
URL <https://www.nist.gov/pml/x-ray-mass-attenuation-coefficients>. Accessed 7th Sept 2016.
- [Jordan2008] Jordan, M. M., Montero, M. A., Meseguer, S., Sanfeliu, T., 2008. Influence of firing temperature and mineralogical composition on bending strength and porosity of ceramic tile bodies. Applied Clay Science 42, 266-271, doi: 10.1016/j.clay.2008.01.005.
- [Kariem2018] Kariem, H., Hellmich, C., Kiefer, T., Jäger, A., Füssl, J., 2018. Micro-ct-based identification of double porosity in fired clay ceramics. Journal of Materials Science, doi: 10.1007/s10853-018-2281-9.
- [Phansalkar2011] Phansalkar, N., More, S., Sabale, A., Joshi, M., 2011. Adaptive local thresholding for detection of nuclei in diversity stained cytology images. International Conference in Communications and Signal Processing, 218-220, doi: 10.1109/ICCSP.2011.5739305.
- [Schneider2012] Schneider, C., Rasband, W., Eliceiri, K., Nih image to imagej: 25 years of image analysis. Nat Meth.
- [Seltzer1993] Seltzer, S., 1993. Calculation of photon mass energy-transfer and mass energy-absorption coefficients. Radiation Research 136, 147-170.

AP3: Mehrskalenmodell Ziegelscherben - Mikromechanik

1 Einleitung

Mit den bereits erfolgreich validierten Mehrskalenmodellen für die Homogenisierung der Wärmeleitfähigkeit sowie der Steifigkeit, welche im Zuge des Vorgängerprojektes "Innovative Brick" entwickelt wurden, liegen bereits umfangreiche Erkenntnisse über die Mikrostruktur vor. Diese sollen im aktuellen Projekt genutzt werden, um ein Mehrskalenmodell für den letzten noch fehlenden Baustein, die Festigkeit, zu entwickeln. Für diesen liegen bereits alle notwendigen Versuche zur Charakterisierung der Mikrostruktur sowie zur Verifikation des Mehrskalenmodells vor. Bei Untersuchungen zur Charakteristik der Bruchfläche mittels Rasterelektronenmikroskop (REM) zeigte sich dabei, dass Risse bei Zugversuchen durch die Poren gehen. So sind etwa bei REM-Aufnahmen an einer Probe mit einer Zugabe von 40% Sägespänen deutlich Blättchenförmige Oberflächen zu beobachten, wie sie für Sägespäne charakteristisch sind (siehe Abb. 4 und Abb. 5). Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die Risse durch Spannungsspitzen an den Rändern dieser Poren initiiert werden. Da ein Ansatz mittels „second-order moments“ [Königsberger2018, Pichler2011], wie er etwa in der Berechnung der Festigkeit von Beton verwendet wird, keine zufriedenstellenden Ergebnisse lieferte, wird in einem nächsten Schritt versucht, die Spannungen rund um die Poren analytisch zu bestimmen, und mittels linearer Bruchmechanik eine kritische Bruchenergiedichte zu ermitteln, welche eine charakteristische Größe für die Matrix eines Tones in Abhängigkeit dessen chemischer Zusammensetzung und Brenntemperatur darstellt.

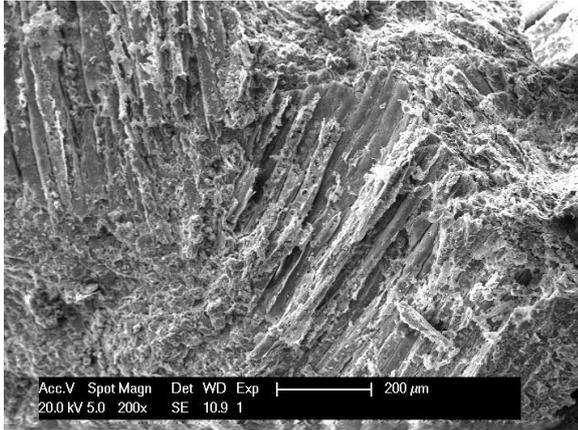


Abb. 4: REM Aufnahme der Rissoberfläche einer unter Zug beanspruchten Probe, die Rissfläche geht dabei durch die blättchenförmigen Poren

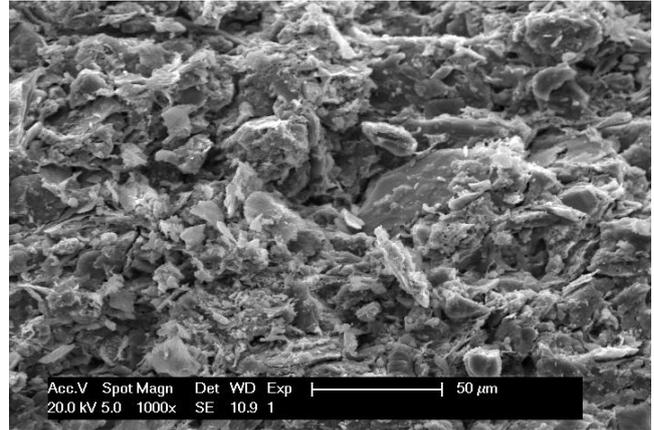


Abb. 5: Vergrößerte REM Aufnahme der Rissoberfläche auf Mesebene, die Rissfläche geht dabei durch die Matrix

1.1 Ermittlung der Spannungsspitzen rund um Porenräume

Um die Spannungen rund um die Poren bestimmen zu können, können die Gleichgewichtsbeziehungen, die Königsberger et al. [Königsberger2014] zur Bestimmung der Spannungen in der "interfacial transition zone" - der Grenzfläche zwischen Zementstein und Zugschlagstoff - herleitet, verwendet werden. Diese Gleichgewichtsbeziehungen können auch für die Grenzfläche rund um Poren eingesetzt werden, wenn von einem fiktiven, homogenen Verzerrungstensor $\underline{\varepsilon}_{pore}$ ausgegangen wird. Dieser kann mittels des Konzentrationsensors $\underline{\mathbb{A}}_{pore}$ berechnet werden (für dessen Herleitung sei auf den Endbericht des Vorgängerprojekts "Innovative Brick" verwiesen):

$$\underline{\varepsilon}_{pore} = \underline{\mathbb{A}}_{pore} \cdot \underline{\mathbf{E}}, \quad (1.1)$$

wobei $\underline{\mathbf{E}}$ den makroskopischen Verzerrungszustand bezeichnet. Da es sich vornehmlich um einen offenen Porenraum handelt, wird ein Porendruck hier nicht berücksichtigt. Da die Traktionsvektoren entlang der Grenzfläche konstant sein müssen, gilt:

$$\underline{T}_{pore}(\underline{n}, \underline{x}) = -\underline{T}_{ITZ}(-\underline{n}, \underline{x}) \quad \forall \underline{x} \in S_{ITZ}, \quad (1.2)$$

mit \underline{T}_{pore} als dem Traktionsvektor der Pore sowie \underline{T}_{ITZ} als dem Traktionsvektor der Grenzfläche S_{ITZ} . Der Normalenvektor in einem sphärischen Koordinatensystem kann angeschrieben werden zu:

$$\underline{n}(\theta, \phi) = \underline{e}_r(\theta, \phi) = \cos \phi \sin \theta \underline{e}_x + \sin \phi \sin \theta \underline{e}_y + \cos \theta \underline{e}_z, \quad (1.3)$$

mit den Raumwinkeln θ und ϕ , sowie den Einheitsvektoren $\underline{e}_x, \underline{e}_y, \underline{e}_z$ gemäß Abb. 6. Mit den Traktionsvektoren in Gl. (1.1) lautet die Gleichgewichtsbeziehungen für die Spannungen an der Grenzfläche:

$$\left[\underline{\sigma}_{pore}(\underline{x}) - \underline{\sigma}_{ITZ}(\underline{x}) \right] \cdot \underline{n}(\underline{x}) \quad \forall \underline{x} \in S_{ITZ}. \quad (1.4)$$

Kombination von Gl. (1.3) und Gl. (1.4) bedingt die folgenden Gleichgewichtszustände: die Normalspannungskomponente in radialer Richtung σ_{rr} wie auch die transversalen Komponenten am Übergang zwischen Pore und Grenzfläche müssen konstant sein. Daraus ergibt sich:

$$\begin{aligned} \sigma_{ITZ,rr}(\theta, \phi) &= \sigma_{pore,rr}(\theta, \phi) = 0 \\ \sigma_{ITZ,r\theta}(\theta, \phi) &= \sigma_{pore,r\theta}(\theta, \phi) = 0 \\ \sigma_{ITZ,r\phi}(\theta, \phi) &= \sigma_{pore,r\phi}(\theta, \phi) = 0. \end{aligned} \quad (1.5)$$

Die fiktiven Verzerrungen innerhalb der Pore $\underline{\varepsilon}_{pore}(\underline{x})$ sind dann über das Gleichgewicht der Verschiebungen,

$$\underline{u}_{pore}(\underline{x}) = \underline{u}_{ITZ}(\underline{x}) \quad \forall \underline{x} \in S_{ITZ}, \quad (1.6)$$

mit den Verzerrungen innerhalb der Grenzfläche verknüpft:

$$d\underline{x}_{ITZ}(\underline{x}) \cdot [\underline{\varepsilon}_{pore}(\underline{x}) - \underline{\varepsilon}_{ITZ}(\underline{x})] \cdot \overline{d\underline{x}}_{ITZ}(\underline{x}) = 0. \quad (1.7)$$

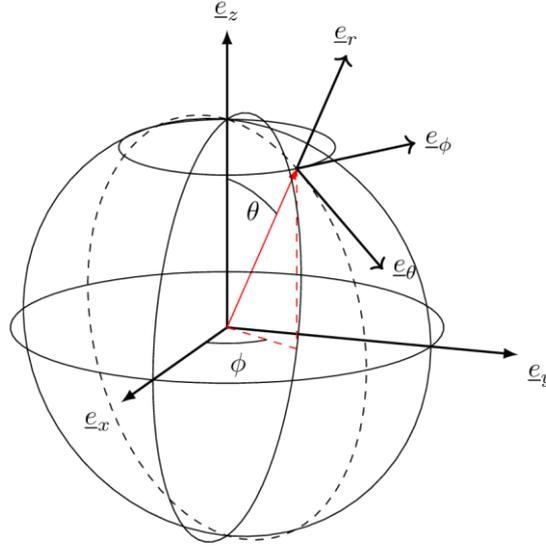


Abb. 6: Raumwinkel und Einheitsvektoren im sphärischen Koordinatensystem

Mit dem in Gl. (1.7) eingeführten Gleichgewicht der Verzerrungen kann dieses in sphärischen Koordinaten angeschrieben werden zu:

$$\begin{aligned} \underline{e}_\theta \cdot (\underline{\varepsilon}_{pore} - \underline{\varepsilon}_{ITZ}) \cdot \underline{e}_\theta &= 0 \\ \rightarrow \varepsilon_{ITZ,\theta\theta}(\theta, \phi) &= \varepsilon_{pore,\theta\theta}(\theta, \phi) \\ \underline{e}_\phi \cdot (\underline{\varepsilon}_{pore} - \underline{\varepsilon}_{ITZ}) \cdot \underline{e}_\phi &= 0 \\ \rightarrow \varepsilon_{ITZ,\phi\phi}(\theta, \phi) &= \varepsilon_{pore,\phi\phi}(\theta, \phi) \\ \underline{e}_\theta \cdot (\underline{\varepsilon}_{pore} - \underline{\varepsilon}_{ITZ}) \cdot \underline{e}_\phi &= 0 \\ \rightarrow \varepsilon_{ITZ,\theta\phi}(\theta, \phi) &= \varepsilon_{pore,\theta\phi}(\theta, \phi). \end{aligned} \quad (1.8)$$

Wobei die fiktiven Verzerrungen in der Pore mittels Transformation der kartesischen Komponenten in sphärische Koordinaten berechnet werden können:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{pore,rr} & \varepsilon_{pore,r\theta} & \varepsilon_{pore,r\phi} \\ \varepsilon_{pore,\theta r} & \varepsilon_{pore,\theta\theta} & \varepsilon_{pore,\theta\phi} \\ \varepsilon_{pore,\phi r} & \varepsilon_{pore,\phi\theta} & \varepsilon_{pore,\phi\phi} \end{pmatrix} = \mathbf{Q}_{rot}^T \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_{pore,xx} & \varepsilon_{pore,xy} & \varepsilon_{pore,xz} \\ \varepsilon_{pore,xy} & \varepsilon_{pore,yy} & \varepsilon_{pore,yz} \\ \varepsilon_{pore,xz} & \varepsilon_{pore,zy} & \varepsilon_{pore,zz} \end{pmatrix} \cdot \mathbf{Q}_{rot}. \quad (1.9)$$

Wobei der Rotationstensor \mathbf{Q}_{rot} gegeben ist zu:

$$\mathbf{Q}_{rot} = \begin{pmatrix} \cos \phi \sin \theta & \sin \phi \sin \theta & \cos \theta \\ \cos \phi \cos \theta & \sin \phi \cos \theta & -\sin \theta \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \end{pmatrix}. \quad (1.10)$$

Mit den drei bekannten Komponenten des Spannungstensors sowie den drei bekannten Komponenten des Verzerrungstensors kann dann die konstitutive Gleichung

$$\underline{\sigma}_{ITZ} = \underline{\mathbb{C}}_{ITZ} \cdot \underline{\varepsilon}_{ITZ}, \quad (1.11)$$

mit C_{ITZ} als dem Steifigkeitstensor der Matrix, gelöst werden. Dadurch kann die Spannung in jedem Punkt rund um die Pore ermittelt werden.

1.2 Spannungsspitzen rund um ellipsoide Poren - Verifikation

In einem nächsten Schritt werden zur Überprüfung der Berechnung die Ergebnisse mit einer kugelförmigen Pore in einem isotropen, unendlich ausgedehnten Medium unter Zugbelastung verglichen. Hierfür sind analytische und numerische Lösungen vorhanden [Davis2017].

- [Davis2017] T. Davis, D. Healy, A. Bubeck, R. Walker (2017). Stress concentrations around voids in three dimensions: The roots of failure, *Journal of Structural Geology*, Volume 102, Pages 193-207, ISSN 0191-8141, <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2017.07.013>.
- [Königsberger2014] Königsberger, M. , Pichler, B. and Hellmich, C. (2014), Micromechanics of ITZ-Aggregate Interaction in Concrete Part I: Stress Concentration. *J. Am. Ceram. Soc.*, 97: 535-542. doi:10.1111/jace.12591.
- [Königsberger2018] Markus Königsberger, Michal Hlobil, Brice Delsaute, Stéphanie Staquet, Christian Hellmich, Bernhard Pichler (2018). Hydrate failure in ITZ governs concrete strength: A micro-to-macro validated engineering mechanics model, *Cement and Concrete Research*, Volume 103, Pages 77-94, ISSN 0008-8846, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.10.002>.
- [Pichler2011] B. Pichler, C. Hellmich (2011). Upscaling quasi-brittle strength of cement paste and mortar: a multi-scale engineering mechanics model, *Cem. Concr. Res.*, 41, pp. 467-476.

AP4: Numerisches Simulationstool Mauerwerk und Stochastik

Der Einsatz von Dünnbettmörtel im Mauerwerksbau ermöglicht einen schnellen Baufortschritt. Maurer mischen das fertige Trockengemisch auf der Baustelle nur noch im richtigen Verhältnis mit Wasser und tragen den Mörtel mit einem sogenannten Mörtelschlitten in der richtigen Dicke auf. Planparallel geschliffene Ziegelsteine ermöglichen einfaches Verlegen ohne langes Ausrichten der Steine. Zusätzlich trägt die dünne Mörtelschicht nur sehr wenig Wasser in den Rohbau ein und führt damit zu kurzen Austrocknungszeiten. Nichtsdestotrotz tritt insbesondere bei Außenwänden folgendes bauphysikalische Problem auf: Der Dünnbettmörtel gewährleistet aufgrund seiner Konsistenz keine vollflächige Abdeckung der Hohlräume von Hochlochziegeln, wodurch senkrechte Schächte im Mauerwerk entstehen. Außenanschlüsse öffnen diese Schächte zur Außenluft; diese unerwünschten Leckagen führen zu wärme- und schalltechnischen Problemen. In Deutschland kommt deswegen das sogenannte V.Plus-System von Poroton zur Anwendung. Ein Glasfasergewebe im Mörtel garantiert eine durchgehende Lagerfuge (Abb. 1) und hat zudem einen positiven Einfluss auf die Tragfähigkeit im Erdbebenfall. Des Weiteren garantiert die durchgehende Fuge einen Witterungsschutz im Bauzustand, so dass die Mauerkrone nicht zusätzlich abgedeckt werden muss.

Der Steifigkeitsunterschied von Ziegel und Mörtel bewirkt bei rein vertikaler Belastung, höhere Querdehnungen im Mörtel als im Ziegel. Aufgrund dieser Querdehnungsunterschiede entstehen hohe Zugspannungen in den dünnen Querstegen bei Hochlochziegeln; genau dort versagt der Ziegel letztlich. Eine steifere Mörtelfuge könnte diese Querdehnungen behindern und dadurch die Vertikaltragfähigkeit von Hochlochziegeln steigern. Die Versteifung kann zum Beispiel in Form eines eingelegten Glasfasergewebes erfolgen, wie es bereits beim V.Plus-System für andere Zwecke zur Anwendung kommt.

Vor diesem Hintergrund wurde die mögliche Tragfähigkeitserhöhung von HLZ-Mauerwerk durch gewebebewehrte Lagerfugen, mithilfe computergestützter numerischer Simulationen untersucht. Kiefer et al. [Kiefer2017] entwickelten im Zuge des FFG-Projektes „Innovative Brick“ einen Ansatz zur numerischen Berechnung der Vertikaltragfähigkeit von Hochlochziegelmauerwerk. Dabei verwendeten sie eine Einheitszelle mit periodischen Randbedingungen und berücksichtigten das spröde Materialverhalten des Ziegelscherbens durch diskrete Rissmodellierung mit der Extended Finite Element Method (XFEM). Die so berechnete Tragfähigkeit der acht untersuchten Hochlochziegel stimmte dabei sehr gut mit Versuchsergebnissen der Firma Wienerberger überein. Die Erweiterung dieser Modellierungsstrategien ermöglicht einerseits die Berücksichtigung von faserverstärkten Lagerfugen, sowie andererseits die Ermittlung des Einflusses von material- und produktionsbedingten Festigkeitsschwankungen im Ziegel.



(a) Einbringen des Glasfasergewebes mit einer speziellen Mörtelwalze

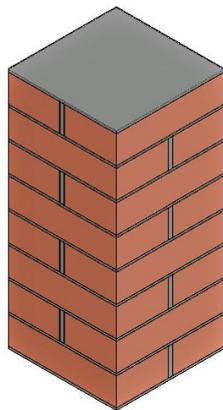


(b) Durchgehende Mörtelschicht durch das eingelegte Gewebe

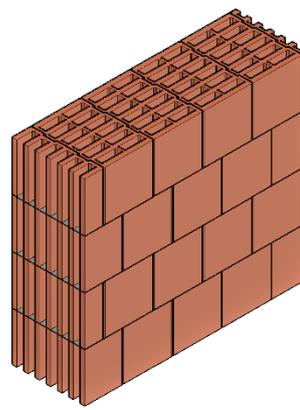
Abb. 7: V.Plus-System von Poroton zur Vermeidung bauphysikalischer Probleme, aus [Vplus]

2 Modellierungsstrategien

Die nachfolgend beschriebenen Modellierungsstrategien wurden an einem Vollziegelpfeiler mit faserverstärktem Mörtel (siehe Abb. 2a) verifiziert, für welchen Trinko [Trinko2019] umfangreiche Versuchsreihen durchführte. Die damit validierten numerischen Simulationstools kamen dann zur Prognose der Tragfähigkeitserhöhung von Hochlochziegelmauerwerk, durch Bewehrung der Lagerfugen, zum Einsatz (siehe Abb. 2b). Die Berechnung dieser Modelle erfolgte mithilfe der Finite Elemente Methode (FEM) im Computerprogramm Abaqus. Materialgesetze, die Interaktion zwischen Ziegel und Mörtel sowie das Grundkonzept der periodischen Randbedingungen waren in beiden Modellen identisch.



(a) Vollziegelpfeiler



(b) Hochlochziegelwand

Abb. 8: Darstellung der untersuchten Modelle

2.1 Materialmodelle für Ziegel, Mörtel und Glasfaser

2.1.1 Ziegel – Orthotropes Versagenskriterium und Rissmodellierung

Eine wesentliche Besonderheit stranggepresster Ziegel ist das ausgeprägt orthotrope Materialverhalten. Sowohl die elastischen Eigenschaften als auch die Festigkeiten variieren mit der Raumrichtung. Der Ursprung dieser Orthotropie liegt im Herstellungsprozess. Beim Strangpressen wird das Rohgemisch aus Ton, Wasser, Additiven und Porosierungsmitteln im Extruder durch ein Mundstück gepresst. Dabei richten sich die Tonminerale parallel zur Extrusionsrichtung aus, wie Bourret et al. [Bourret2015] zeigten. Es resultiert eine wesentlich höhere Druck- und Zugfestigkeit in Richtung des gepressten Stranges verglichen mit den beiden anderen Richtungen. Gerade bei komplexen Ziegelgeometrien mit dünnen Stegen ist diese Orthotropie stark ausgeprägt. Durch die Hohlräume des Ziegelsteines ergeben sich zwei Arten von Stegen.

Während die Längsstege in Längsrichtung der Wand ausgerichtet sind, stehen die Querstege normal zur Wandoberfläche (siehe Abb. 3).

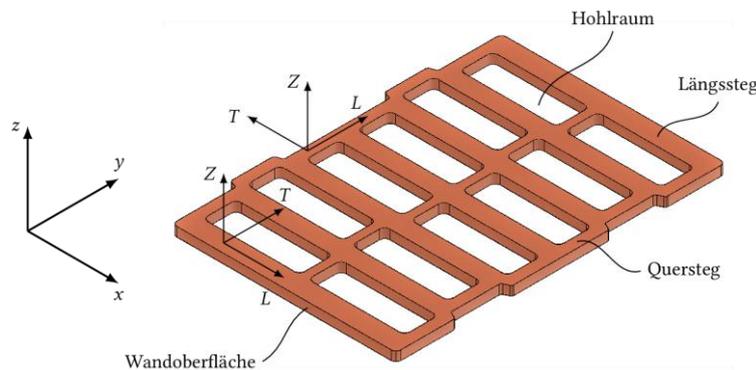


Abb. 9: Querschnittsteile eines Hochlochziegels und Koordinatensystem zur Beschreibung der Materialeigenschaften

Zur numerischen Modellierung von Rissen ist die Definition zweier Komponenten notwendig:

- 1) Ein Versagenskriterium $f(\sigma)$ definiert, ob unter einem gegebenen Spannungszustand $\sigma(\mathbf{x})$ die Festigkeit am betrachteten Punkt \mathbf{x} des Kontinuums Versagen anzeigt.
- 2) Ein Kriterium für die Rissfortpflanzung definiert die Duktilität des Materials und damit die Rissausbreitungsgeschwindigkeit.

2.1.1.1 Orthotropes Versagen mit dem Hoffman-Kriterium

Graubner und Richter [Graubner2007] untersuchten mehrere Versagenskriterien für Ziegel. Ihren Untersuchungen nach eignet sich das Kriterium von Hoffman [Hoffman1967] sehr gut zur Modellierung von Ziegelscherben. Das Hoffman-Kriterium benötigt alle sechs voneinander unabhängigen Komponenten des Spannungstensors σ als Eingangsgröße. Das Hoffman-Kriterium ist in Abaqus nicht direkt implementiert. Deswegen wurde das Kriterium als User Subroutine in Fortran programmiert.

2.1.1.2 Druckversagen durch Concrete Damaged Plasticity

Lubliner et al. [Lubliner1989] entwickelten 1989 das Concrete-Damaged-Plasticity-Kriterium für die Modellierung von bewehrtem Beton. Laut Graubner und Richter [Graubner2007] lassen sich die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen des Ziegelscherbens sowie die Entwicklung von Rissverläufen im Ziegel qualitativ recht gut anhand der Arbeitslinie von Beton beschreiben. Auch in Abaqus wird die Concrete Damaged Plasticity (CDP) für die Berechnung von keramischen Stoffen empfohlen [Abaqus2016]. Ist ein Punkt nur Druckspannungen unterworfen, tritt beim Hoffman-Kriterium kein Versagen ein. Deswegen wurde für Versagen im Druckbereich zusätzlich das CDP-Kriterium formuliert.

2.1.1.3 Berechnung diskreter Risse mithilfe der Extended Finite Element Method

Die Berücksichtigung von diskreten Rissen in der grundlegenden FEM gestaltet sich recht schwierig. An der Risspitze entstehen Singularitäten, welche eine Verfeinerung des FE-Netzes erfordern. Bei der Modellierung von fortschreitenden Rissen muss das FE-Netz deshalb laufend an die neue Rissgeometrie angepasst werden. Die 1999 von Belytschko und Black [Belytschko1999] vorgestellte XFEM ermöglicht die Modellierung von diskreten Rissen, ohne laufende Anpassung des FE-Netzes. Basierend auf der Partition of Unity Finite Element Method (PUFEM) nach Melenk und Babuška [Melenk1996] werden die Freiheitsgrade eines Elementes erweitert, um den Diskontinuitäten im Modell Rechnung zu tragen. Namensgebend für die PUFEM ist die Partition of Unity, also die Trennung des Elementes in mehrere Teilbereiche, auf welchen unterschiedliche Ansatzfunktionen gelten.

2.1.1.4 Rissfortschritt mittels Virtual Crack Closure Technique – VCCT

Gemäß Danzer et al. [Danzer2013] beschreibt die lineare Bruchmechanik das spröde Materialverhalten des Ziegelscherbens sehr gut. Für die Initiierung eines Risses kommt das zuvor beschriebene Hoffman-Kriterium zum Einsatz. Grundsätzlich erfolgt die Öffnung eines Risses auf eine der folgenden drei Arten (siehe auch Abb. 4):

- ◆ Mode I – Öffnung normal zur Rissoberfläche
- ◆ Mode II – Gleitung in Risslängsrichtung
- ◆ Mode III – Gleitung quer zur Risslängsrichtung

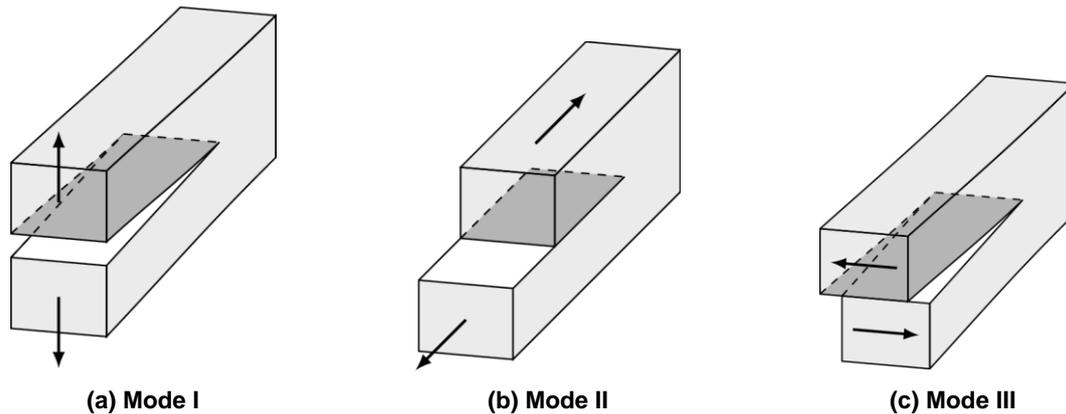


Abb. 10: Rissöffnungsarten, [Kuna2008] nachempfunden

Die lineare Bruchmechanik bildet die Grundlage für die Anwendung der Virtual Crack Closure Technique (VCCT). Die wesentliche Annahme dieser Methode besteht darin, dass die bei Öffnung eines Risses freigesetzte Verzerrungsenergie gleich der notwendigen Energie zum Schließen dieses Risses ist. Auf Basis dieser Annahme erfolgt die Berechnung der Energiefreisetzungsrate G . Sobald die Energiefreisetzungsrate die spezifische Bruchenergie überschreitet, wächst der Riss.

2.1.2 Mörtel – Isotropes, linear elastisches Materialmodell

Dünnbettmörtel hält in beiden Modellen die einzelnen Ziegelsteine zusammen. Im Allgemeinen bestehen diese Mörtel aus Zement, Kalk sowie Sand oder Quarzsandmehl. Aufgrund der Schichtdicken von wenigen Millimetern ist die maximale Korngröße auf etwa 1 mm begrenzt. Dünnbettmörtel verhält sich ähnlich wie unbewehrter Beton; Festigkeit und Elastizitätsmodul sind isotrop, der Mörtel verhält sich grundsätzlich linear elastisch und versagt spröde, ohne ausgeprägtes plastisches Verhalten. Während die Druckfestigkeiten verschiedener Dünnbettmörtel recht hoch ausfallen sind die Zugfestigkeiten vergleichsweise gering.

Die Modellierung des Mörtels erfolgte in beiden Modellen linear elastisch und isotrop. Es wird davon ausgegangen, dass Mörtelversagen nicht für die Tragfähigkeit der Modelle maßgebend ist. Folgende Argumente liegen dieser Annahme zugrunde:

- ◆ Die (ohnehin hohe) gemessene Druckfestigkeit des Mörtels nimmt im eingebauten Zustand durch das Saugverhalten des Ziegelsteins noch weiter zu. [Bierwirth1995], [Graubner2007]
- ◆ Beim Vollziegelpfeiler liegt im Mörtel ein triaxialer Druckspannungszustand vor. Die Druckfestigkeit wird dadurch noch weiter gesteigert. [Barbosa2007], [Bierwirth1995], [Hayen2004]
- ◆ Bei Mauerwerk aus Hochlochziegeln wirken Zugspannungen in jenen Bereichen der bewehrten Mörtelschicht, die nicht auf einem Längssteg liegen. Zusätzlich treten infolge Schwinden kleinere Risse auf. Diese Bereiche werden im Modell daher als gerissen angenommen; es wirkt hier lediglich das Glasfasergewebe.

2.1.3 Glasfaser im Verbund – Ermittlung effektiver Steifigkeiten durch Mehrskalenmodell

Die Bewehrung der Lagerfuge des Mauerwerks erfolgt durch ein Glasfasergewebe. Glasfasern weisen eine sehr hohe Steifigkeit sowie eine hohe Zugfestigkeit auf. Das Gewebe ist vollständig im Mörtel eingebettet und liegt mittig in der Fuge (siehe Abb. 5). Eine diskrete Modellierung der Glasfasern erscheint dabei nicht als sinnvoll; nicht nur die Modellierung der einzelnen Fasern wäre aufwendig, auch der numerische Berechnungsaufwand stiege dadurch stark an. Stattdessen werden die Fasern über ein verschmiertes Materialmodell berücksichtigt, die Berechnung der effektiven Materialparameter erfolgt über ein Mehrskalenmodell. Dafür sind lediglich die Steifigkeitstensoren \mathbb{C} der Materialien, die Volumenanteile der einzelnen Bestandteile an der Gesamtschicht sowie Kenntnisse über die Ausrichtung der Fasern erforderlich.

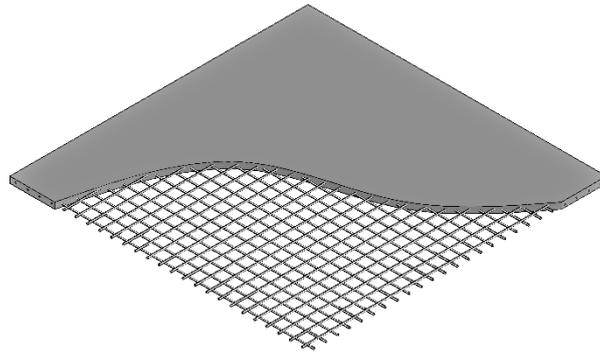


Abb. 11: Das Glasfasergewebe ist in die Mörtelschicht eingebettet.

Der bewehrte Mörtel stellt dabei die Makroebene (Index M) mit den effektiven Steifigkeiten dar. Durch Homogenisierung der Materialeigenschaften von Glasfasergewebe und Mörtel innerhalb eines repräsentativen Ausschnitts des Materials (Repräsentatives Volumen Element, kurz RVE) können diese effektiven Steifigkeiten berechnet werden. Das Glasfasergewebe, eingebettet in den Mörtel, stellt dabei im Sinne der Mehrskalenmodellierung sogenannte Inhomogenitäten auf der Mikroebene (Index μ) dar.

Eine wesentliche Voraussetzung für die sinnvolle Definition eines RVE ist die Trennbarkeit der Längenskalen. Sie besagt, dass die charakteristische Abmessung des RVE, l , einerseits größer als die charakteristische Abmessung der Inhomogenitäten, d , und andererseits wesentlich kleiner als die charakteristische Längenskala der Belastung, $\square l$, sein muss (siehe auch Abb. 6):

$$d \stackrel{\sim 2}{\ll} l \stackrel{\sim 5-10}{\ll} \mathcal{L}. \quad (1)$$

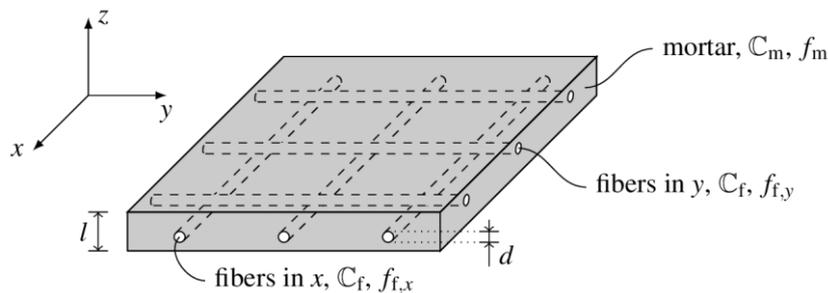


Abb. 12: Repräsentatives Volumenelement (RVE)

Berechnung der Volumenanteile aus dem Flächengewicht des Gewebes

Die Datenblätter der untersuchten Glasfasermatten beinhalten keine Angaben zum Durchmesser der Faserbündel, sehr wohl aber zum Flächengewicht m . Daraus lässt sich über die Dichte der Glasfasern, ρ_f , und die Dicke der Mörtelschicht, d_m , folgende Formel für den Volumenanteil herleiten:

$$f_f = \frac{m}{\rho_f \cdot d_m}. \quad (2)$$

f_f entspricht dem Volumenanteil des gesamten Gewebes. Zur Homogenisierung der Steifigkeit werden die Glasfasern in beiden orthogonalen Richtungen, als getrennte Phasen, berücksichtigt. Dementsprechend setzt sich f_f aus den beiden Anteilen $f_{f,x}$ und $f_{f,y}$ zusammen (siehe Abb. 6).

2.2 Verbundeigenschaften von Ziegel und Mörtel im Modell

Die Verbundeigenschaften von Ziegel und Mörtel spielen eine wesentliche Rolle in der Interaktion der beiden Materialien. Die Scherfestigkeit τ_u des Verbundes hängt dabei von den vorhandenen Normalspannungen in der Fuge ab. Van der Pluijm [Pluijm1999] beschreibt einen Zusammenhang auf Basis des Coulomb'schen Reibungsgesetzes:

$$\tau_u = c_0 - \tan(\varphi) \cdot \sigma_n. \quad (3)$$

mit der Anfangsscherfestigkeit c_0 , dem inneren Reibungswinkel φ und der Normalspannung in der Fuge, σ_n . Sofern die Scherspannungen in der Fuge ausreichend klein bleiben, bleibt der feste Verbund zwischen Zie-

gel und Mörtel demnach erhalten. Vor diesem Hintergrund wird der Verbund während der gesamten Berechnung als fest verbunden modelliert. Die Gültigkeit dieser starken Vereinfachung wurde durch laufende Beobachtung der Spannungen in der Fuge kontrolliert.

2.3 Modellierung als Einheitszelle durch periodische Randbedingungen

Mauerwerk ist (im Regelfall) ein periodisch zusammengesetztes Kontinuum. Ziegel und Mörtel ergeben ein sich ständig wiederholendes Muster. Um bei der numerischen Berechnung der Tragfähigkeit den Rechenaufwand minimal zu halten, ist es naheliegend, dieses periodische Schema zu nutzen. Die Modellierung als Einheitszelle mit periodischen Randbedingungen liefert genau das gewünschte Ergebnis. Der gewählte Ausschnitt der Struktur wird in Kombination mit speziellen Randbedingungen als periodisches, unendlich ausgedehntes Kontinuum berechnet.

Eine Wand aus Mauerwerk weist im Regelfall zweidimensionale Periodizität auf. Das gewählte Verbandschema wiederholt sich in Längsrichtung und mit der Höhe der Wand, in Dickenrichtung ist lediglich ein Mauerstein vorhanden. Im Falle eines Läuferverbandes mit einem Versatz von einer halben Steinlänge entsteht eine periodische, hexagonale Aneinanderreihung.

Unter Berücksichtigung dieser Periodizität ist es ausreichend, die mechanischen Eigenschaften lediglich auf einem kleinen Teil des Kontinuums, der sogenannten Einheitszelle, zu definieren. Im Allgemeinen herrscht im Mauerwerksbau allerdings kein perfekter Versatz um je einen Halbstein vor, weswegen der gewählte Ausschnitt größer zu wählen ist. Die Definition periodischer Randbedingungen erfordert zudem die Kopplung aller Elementsknoten auf den parallel zueinander liegenden Oberflächen der Einheitszelle, welche einer Periodizität unterliegen. Daher muss auch das FE-Netz auf den jeweils gegenüberliegenden Oberflächen ident sein. Diese Anforderungen münden in einer rechteckigen Einheitszelle mit orthogonalen Vektoren c_1 und c_2 (siehe Abb. 7).

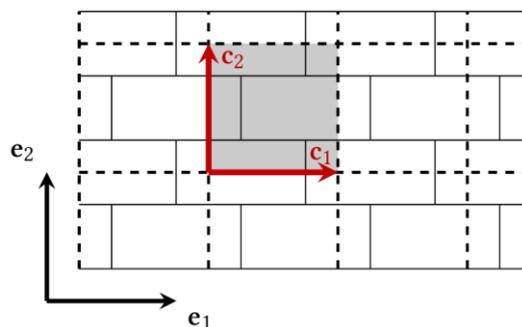


Abb. 13: Gewählte Einheitszelle

Die Einheitszellen müssen in Kombination mit den festgelegten Randbedingungen, sowohl im unverformten, als auch im verformten Zustand, ein geometrisch kompatibles Kontinuum ergeben. Ferner dürfen keine Sprünge oder Überlappungen zwischen benachbarten Zellen auftreten. Es gilt also Randbedingungen zu finden, welche alle für die zu untersuchenden Lastfälle relevanten Verformungsarten abbilden können.

Da lediglich periodische Randbedingungen vorliegen, müssen benachbarte Oberflächen (und damit gegenüberliegende Flächen einer Zelle) ident sein. Dies gilt sowohl für den unverformten als auch für den verformten Zustand. Jedem Punkt s_k ist also ein Punkt $s_k + c_k$ auf der gegenüberliegenden Oberfläche zugeordnet.

Der erste Schritt zur Implementierung periodischer Randbedingungen ist die Wahl einer geeigneten Einheitszelle. In beiden Modellen handelt es sich dabei um eine dreidimensionale, quaderförmige Zelle. Während der Vollziegelpfeiler lediglich in einer Richtung periodisch aufgebaut ist (siehe Abb. 8a), weist die untersuchte Hochlochziegelwand zweidimensionale Periodizität auf (siehe Abb. 8b).

Im zweiten Schritt wurden Verschiebungen der direkt gegenüberliegenden Elementsknoten durch lineare Gleichungen verknüpft. Zu guter Letzt erfolgte das Aufbringen der gewünschten Belastungssituation, durch Einprägen von Knotenverschiebungen in einzelnen Knoten.

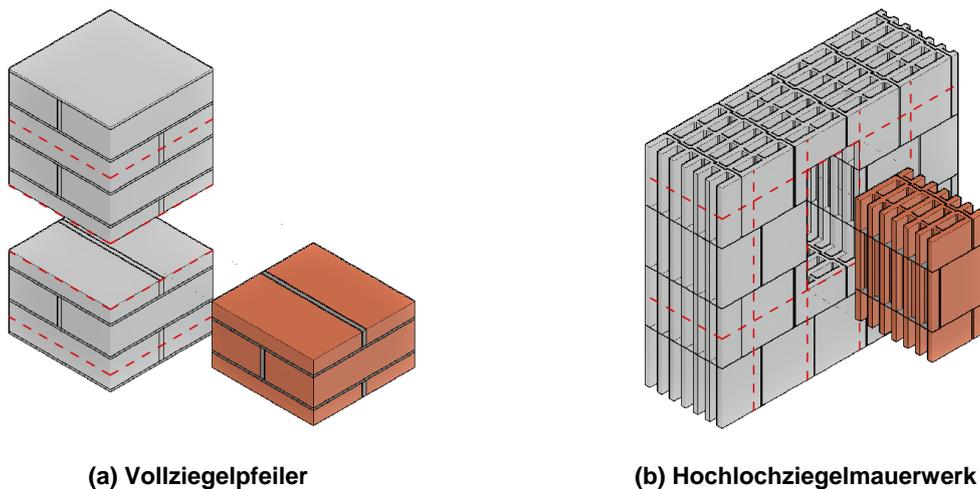


Abb. 14: Periodischer Ausschnitt aus den Modellen

2.4 Stochastische Zuweisung der Festigkeiten zu den Querstegen

Berechnungen mit homogenen Materialeigenschaften zeigten, dass, während ohne Bewehrung der erste Riss maßgebend für das Versagen maßgebend war, ab einem gewissen Bewehrungsgrad sich zusätzliche Risse bilden konnten, bevor die Tragfähigkeit erreicht wurde. Da Ziegel teilweise recht inhomogen sind – meist treten produktionsbedingt Risse auf – sollte der schwächste Steg Versagen auslösen. Unter Annahme, dass ein einzelner Quersteg wesentlich schwächer als alle anderen Teile des Ziegels sind und, dass für Versagen im bewehrten Fall zumindest ein zweiter Quersteg reißen muss würde die Tragfähigkeit durch eine Lagerfugenbewehrung noch wesentlich stärker erhöht werden. Deshalb wurde zusätzlich ein stochastischer Ansatz, zur Berücksichtigung unterschiedlicher Festigkeiten innerhalb eines Ziegels gewählt.

Auf Basis der gemessenen Festigkeiten von Kiefer et al. [Kiefer2017] wurden den Querstegen unter Annahme normalverteilter Materialparameter zufällig Festigkeiten zugewiesen und die kritische Bruchenergie entsprechend dieser Festigkeiten abgeändert.

3 Validierung der Modellierungsstrategien anhand von Versuchen an Vollziegeln

Trinko [Trinko2019] führte Versuche an Vollziegelpfeilern durch und untersuchte dabei die Auswirkung der Lagerfugenbewehrung auf die vertikale Tragfähigkeit der Pfeiler. Im Zuge der vorliegenden Arbeit erfolgte die Modellierung und Simulation der Versuche im FE-Programm Abaqus. Die Ergebnisse der numerischen Berechnung wurden anschließend mit den Versuchsergebnissen verglichen. Dieser Vergleich dient zur Validierung der zuvor beschriebenen Modellierungsstrategien.

3.1 Aufbau und Durchführung der Versuche

Die von Trinko [Trinko2019] untersuchten Pfeiler sind im Grundriss quadratisch und acht Ziegelscharen hoch. Jede Schar besteht aus zwei nebeneinanderliegenden Ziegelsteinen, die direkt darüber- und darunterliegenden Schichten sind um 90° gedreht. Ein Normalformat-Ziegel ist 25 cm lang, 12 cm breit und 6,5 cm hoch. Die Lagerfuge ist im Regelfall 1,2 cm dick. Trinko prüfte maßstäblich verkleinerte Pfeiler (siehe Abb. 11). Aus Normalformat-Ziegeln der Firma Wienerberger schnitt er im Maßstab 1:2,5 jeweils 9 kleinere Ziegeln heraus. Diese sind 10 cm lang, 4,8 cm breit und 2,6 cm hoch. Die Dicke der Lagerfugen beträgt im verkleinerten Pfeiler 2 mm. Dadurch sind die Prüfkörper nur noch 22,2 cm hoch. Als Mörtel verwendete Trinko den flexiblen Dünnbettkleber M21 Classic von Botament. Zur Verstärkung der horizontalen Fugen diente das alkalibeständige Textilglasgitter aus dem Sortiment von Baumit. Üblicherweise wird das Gewebe als Bewehrung von Fassadenputz verwendet.

Das Versuchsprogramm bestand aus vier Serien mit jeweils drei Prüfkörpern. Dabei unterschied sich jede Serie durch die Anzahl der bewehrten Lagerfugen. Für die Validierung der Modellierungsstrategien wurden nur die unbewehrte (Serie 1), sowie die voll bewehrte Serie (Serie 4) betrachtet.

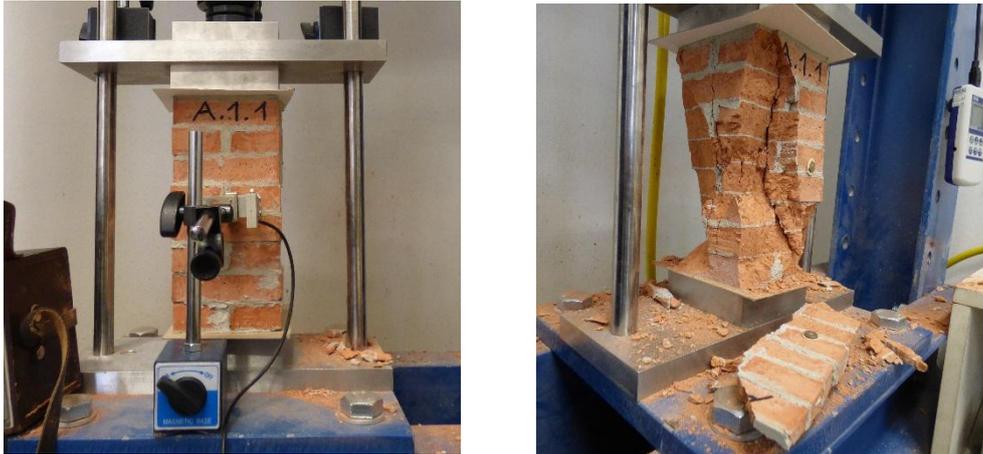


Abb. 15: Unbewehrter Versuchspfeiler vor und nach der Prüfung, aus [Trinko2019]

3.2 Numerische Modellierung

Zur Verringerung des Berechnungsaufwandes umfasst das numerische Modell nicht den gesamten Prüfkörper (siehe Abb. 8a). Der modellierte Ausschnitt ist zwei Ziegelscharen hoch und hat die zuvor beschriebenen Eigenschaften einer Einheitszelle. Die Schnittflächen sind parallel zur Lagerfuge und trennen die angeschnittenen Ziegel in halber Höhe. Kombiniert mit periodischen Randbedingungen bildet diese 5,6 cm hohe Einheitszelle einen unendlich hohen Pfeiler ab. Bei den Prüfkörpern beträgt das Verhältnis der Höhe zur Querschnittsbreite 2,2:1. Bis zur Pfeilermitte nimmt der Einfluss der Querdehnungsbehinderung deshalb sehr stark ab. In halber Pfeilerhöhe herrscht dann ein ähnlicher Spannungszustand wie in einem unendlich hohen Pfeiler unter Vertikalbelastung. Die Modellierung als Einheitszelle stellt daher eine gute Näherung dar.

3.2.1 Materialkenngrößen

Der Großteil der verwendeten Materialkenngrößen stammt aus den Versuchsergebnissen von Trinko [Trinko2019]. Zusätzlich wurden Ultraschalltests zur Bestimmung von Ziegel- und Mörtelsteifigkeiten durchgeführt.

3.2.1.1 Ziegel

Trinko [Trinko2019] bestimmte an den verwendeten Ziegeln den Elastizitätsmodul in Z-Richtung, E_{ZZ} . Die Bestimmung der übrigen Elastizitäts- und Schubmoduln des Ziegelscherbens erfolgte mittels Ultraschalltests (siehe Abb. 11). Es wurden für drei Probekörper je eine Messung pro Richtung durchgeführt, insgesamt also 6 Messungen.

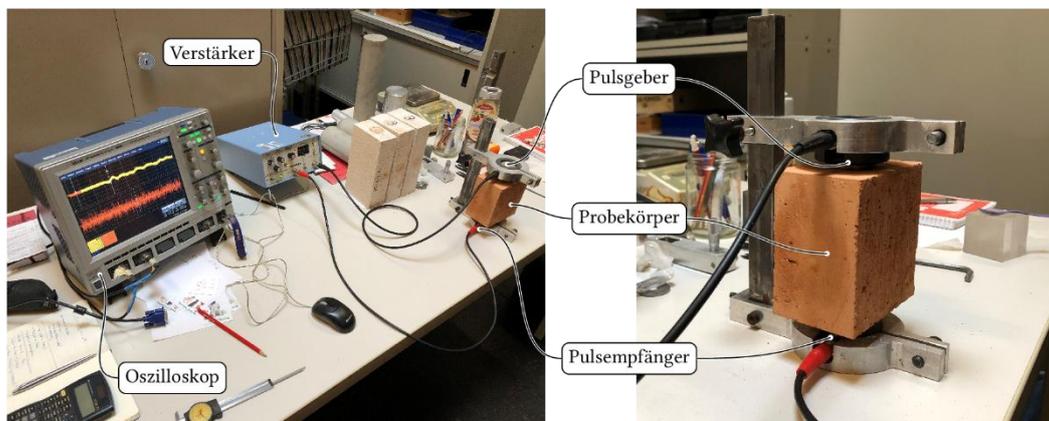


Abb. 16: Versuchsaufbau der Ultraschalltests

Für orthotropes Material sind neun Materialkonstanten zur vollständigen Beschreibung des Steifigkeitstensors erforderlich. Aus den Messergebnissen können allerdings nur sechs Parameter gewonnen werden. Abaqus fordert für die Materialbeschreibung die Eingabe der drei Elastizitätsmoduln E_{LL} , E_{TT} , E_{ZZ} , der drei Querdehnungszahlen ν_{LT} , ν_{LZ} , ν_{TZ} und der drei Schubmoduln G_{LZ} , G_{TZ} , G_{LT} . Die ersten beiden Schubmoduln

ergeben sich direkt als Komponenten $C_{ijij} = G_{ij}$. Der dritte Schubmodul G_{LT} errechnet sich danach mithilfe der Verhältnisse nach Kiefer et al. [Kiefer20017]. Auf Basis der Angaben nach Hannawald und Brameshuber [Hannawald2007] werden die Querdehnungszahlen mit $\nu_{LT} = \nu_{LZ} = \nu_{TZ} = \nu = 0,1$ angenommen.

Zusätzlich zu den Druckfestigkeiten $\sigma_{c,L}$, $\sigma_{c,T}$ und $\sigma_{c,Z}$ erfordert die Anwendung des Hoffman-Kriteriums die Zugfestigkeiten $\sigma_{t,L}$, $\sigma_{t,T}$ und $\sigma_{t,Z}$ sowie die Schubfestigkeiten $\sigma_{s,TZ}$, $\sigma_{s,ZL}$ und $\sigma_{s,LT}$. Kiefer et al. [Kiefer20017] geben Druck- und Zugfestigkeiten eines Ziegels für alle drei Richtungen L , T und Z an. Aus diesen Ergebnisse resultieren Verhältnisse der einzelnen Festigkeiten zur Druckfestigkeit in Z -Richtung. Unter Annahme, dass bei den von Trinko [Trinko2019] verwendeten Ziegelsteinen die Zugfestigkeiten zur Druckfestigkeit in Z -Richtung im gleichen Verhältnis stehen, wurden die Zugfestigkeiten berechnet. Graubner und Richter [Graubner2007] schlagen Grenzwerte der Schubfestigkeit in Abhängigkeit der Zug und Druckfestigkeiten vor. Die Schubfestigkeiten wurden als Mittelwerte dieser Grenzen angenommen.

3.2.1.2 Mörtel

Der verwendete Mörtel verhält sich linear elastisch und isotrop. Durch die weichere Mörtelschicht im Vergleich zum Ziegel entsteht unter vertikalem Druck im Mörtel ein triaxialer Druckspannungszustand. Die Druckfestigkeit des Mörtels steigt unter triaxialem Druck bis auf das Dreifache der uniaxialen Druckfestigkeit an. Die Mörteldruckfestigkeit erhielt Trinko [Trinko2019] aus Druckversuchen an Mörtelprismen. Diese beträgt 14,18 N/mm², bereits bei Verdopplung würde diese die Druckfestigkeit des Ziegels (21,38 N/mm²) übersteigen. Druckversagen des Mörtels ist für den Versagensmechanismus des Pfeilers darum nicht maßgebend. Es reicht also die Angabe von Elastizitätsmodul und Querdehnungszahl zur Modellierung aus.

Das Datenblatt der Firma Botament [Botament] beinhaltet keine Angaben zu elastischen Kenngrößen des Mörtels. Mittels Ultraschalltests erfolgte deshalb die Bestimmung des Elastizitätsmoduls und der Querdehnungszahl. Da es sich beim Mörtel um ein isotropes Material handelt, sind nur in einer Richtung Messungen notwendig. Zusätzlich sind für isotropes Material nur zwei Parameter zur vollständigen Bestimmung des Steifigkeitstensors erforderlich. Demnach reichen die aus den Ultraschalltests gewonnenen Parameter aus, um das elastische Materialverhalten des Mörtels abzubilden.

3.2.1.3 Gewebe und bewehrter Mörtel

Das Textilglasgitter von Baumit [Baumit] besteht aus einzelnen kunststoffummantelten Glasfasern. Die Fasern sind zu einem orthogonalen Netz mit einer Maschenweite von 4 mm verwebt. Das Produktdatenblatt von Baumit enthält keine Angaben zur Steifigkeit des Gewebes, sehr wohl aber zum Flächengewicht m . Laut Datenblatt wiegt das Gewebe 145 g/m². Daraus ergibt sich mithilfe Gleichung (1) der Volumenanteil im Mörtel zu

$$f_{f,x} = f_{f,y} = \frac{m}{2 \cdot \rho_f \cdot d_m} = \frac{0,0145 \text{ g/cm}^2}{2 \cdot 2,5 \text{ g/cm}^3 \cdot 0,2 \text{ cm}} = 1,45 \% \quad (4)$$

Damit sind alle Eingangsgrößen für die Berechnung der homogenisierten Steifigkeitseigenschaften des Mörtels vorhanden. Die homogenisierte Steifigkeit liegt dabei nur geringfügig über der Steifigkeit des Mörtels, was im geringen Volumenanteil des Gewebes begründet ist.

3.2.2 Periodische Randbedingungen

Die Einheitszelle des Vollziegel Pfeilers ist eindimensional periodisch in z -Richtung. Deshalb sind nur zwei Flächen aneinandergesetzt, die Flächen *Top* und *Bottom*. Alle übrigen Seiten der Zelle unterliegen keinen periodischen Randbedingungen. Die Bezeichnungen der Flächen, Kanten und Eckpunkte sind in Abb. 12a zugeordnet. Aufgrund der Symmetrien des Pfeilers erfahren bei rein vertikaler Belastung alle Eckpunkte der Fläche *Top* die gleiche vertikale Verschiebung. Die Definition der Verschiebungsdifferenz einer einzigen vertikalen Kante (z. B. $s_{\overline{w}}$) reicht damit aus, um eine rein vertikale Belastung auf die Einheitszelle aufzubringen.

Jeder Elementsknoten der Fläche *Top* ist über eine lineare Gleichung dieser Form mit einem Elementsknoten der Fläche *Bottom* verknüpft. Die Eckpunkte der Fläche *Bottom* sind allesamt in vertikaler Richtung fixiert (Abb. 12b). Zusätzlich werden einige Knoten in horizontaler Richtung fixiert:

- ◆ SWB ist in x - und y -Richtung fixiert,
- ◆ SEB ist in x -Richtung fixiert und
- ◆ NWB ist in y -Richtung fixiert.

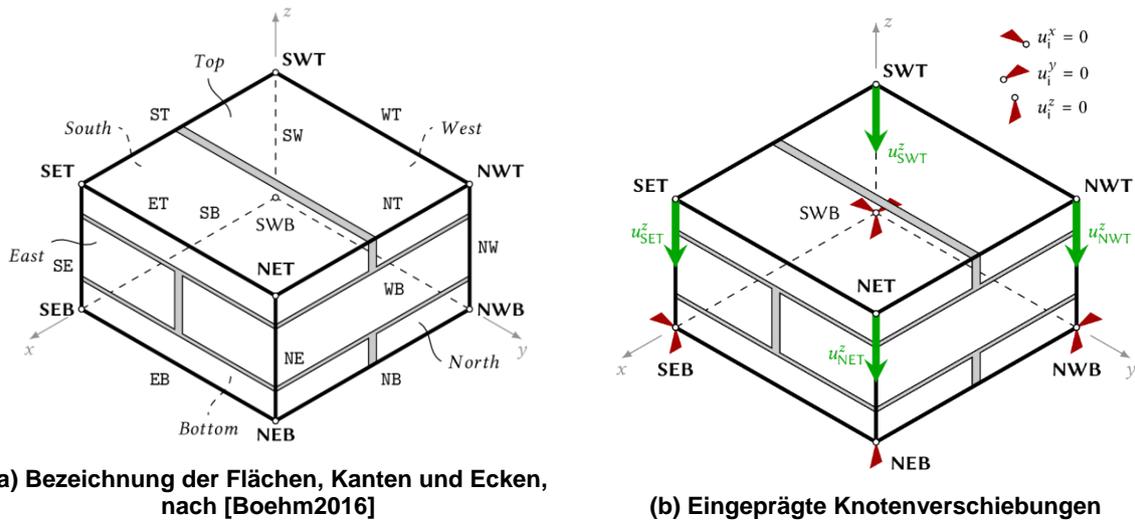


Abb. 17: Einheit zelle des Vollziegelpfeilers

Auf diese Weise kann sich die Einheit zelle horizontal ohne Behinderung verformen, während Starrkörperbewegungen nicht möglich sind. Die eingeprägte Verzerrung beträgt $\langle \epsilon_{zz} \rangle = 0,004$. Bei einer Höhe der Einheit zelle von 56 mm ergibt sich die aufgebraachte Verschiebung zu $u_z^{SWT} = 0,224$ mm.

3.2.3 FE-Netz

Die einfache Form der Modellbestandteile ermöglicht eine simple Diskretisierung, alle erzeugten C3D8-Elemente (dreidimensionale Kontinuums-elemente mit linearen Interpolationsfunktionen) sind quaderförmig. Die charakteristische Abmessung der Elemente wurde mit 3 mm gewählt, zusätzlich nimmt die Elementgröße zu den Lagerfugen hin ab. In der 2 mm dicken Lagerfuge liegen jeweils drei Elemente übereinander. Abb. 13 zeigt das FE-Netz des Vollziegelpfeilers.

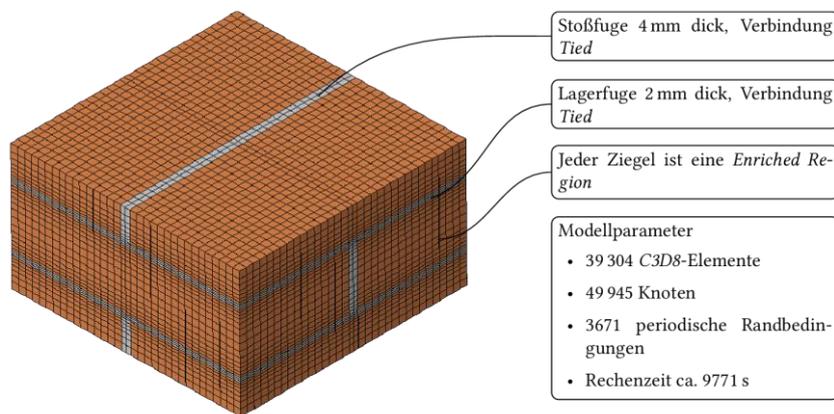


Abb. 18: FE-Netz des Vollziegelpfeilers

3.3 Ergebnisse

3.3.1 Versuchsergebnisse

Aus jedem Versuch erhielt Trinko [Trinko2019] eine Bruchlast F . Diese Bruchlasten bezog er auf die Querschnittsfläche des Pfeilers und erhielt dadurch Bruchspannungen. Die Ergebnisse der Serien 1 und 2 schwanken dabei recht stark. Anhand der Mittelwerte der einzelnen Serien lässt sich jedoch ein stetiger Anstieg der vertikalen Tragfähigkeit erkennen. Je mehr Lagerfugen bewehrt sind (je geringer also der Abstand zwischen zwei bewehrten Schichten ist), desto größer ist die Vertikaltragfähigkeit der Ziegelpfeiler. Dieser Anstieg beträgt zwischen den Fällen vollständig unbewehrt und vollständig bewehrt 15,38 %. Trinko beobachtete dabei einen wesentlichen Unterschied im Versagen der Pfeiler: während im unbewehrten Fall alle Probekörper unmittelbar nach dem Erstriss spröde zu Bruch gingen, konnte die Last bei den bewehrten Proben nach Erstriss noch weiter gesteigert werden. Das Gewebe überbrückte entstandene Risse und ver-

zögerte dadurch die Rissausbreitung. Eine Verstärkung der Fugen bewirkte demnach ein duktileres Nachrissverhalten der Pfeiler.

3.3.2 Berechnungsergebnisse

Für die Validierung der angewandten Modellierungsstrategien wurden lediglich der unbewehrte (Serie 1) und der vollständig bewehrte Pfeiler (Serie 4) herangezogen, da die Serien 2 und 3 mittels der Einheitszelle nicht realitätsnah abgebildet werden können. Beide Modelle unterliegen sehr ähnlichen Spannungszuständen, die Risse treten an den gleichen Stellen auf. Dennoch unterscheiden sich die Ergebnisse beider Systeme in einem wesentlichen Punkt: Während der unbewehrte Pfeiler unmittelbar nach Erstriss im Ziegel versagt, kann der bewehrte Pfeiler nach dem Erstriss noch weiter belastet werden. Die höhere Steifigkeit des bewehrten Mörtels reduziert die Öffnungsweite des Risses und verzögert den Rissfortschritt.

Die Spannungsverläufe und Rissbilder des bewehrten Pfeilers sind nahezu identisch zu jenen des unbewehrten Pfeilers. Risse treten im FE-Modell in den gleichen Elementen auf. Das Last-Verschiebungs-Diagramm in Abb. 14 veranschaulicht den Unterschied beider Modelle. Auf der Ordinate ist die aufgebrachte Verschiebung u_z^{SWT} , auf der Abszisse die Summe der vertikalen Reaktionskräfte in den Eckpunkten der Fläche *Bottom* aufgetragen. Die Last-Verschiebungs-Kurve des bewehrten Pfeilers ist etwas steiler als jene des unbewehrten Pfeilers. Bei gleicher Verschiebung ist die aufgebrachte Last im bewehrten Fall etwas größer; durch die steifere Mörtelfuge ergibt sich also ein etwas steiferes Gesamtsystem. Dadurch treten bei gleicher Verschiebung im bewehrten Pfeiler geringfügig kleinere Querspannungen auf – der Erstriss tritt daher bei einer geringfügig höheren Belastung auf. Nach Erreichen der Traglast ist in beiden Fällen ein starker Abfall der Kurve zu beobachten. Dieser Sprung tritt im unbewehrten Fall unmittelbar nach dem Erstriss auf. Durch den faserverstärkten Mörtel kann die Belastung selbst nach dem Erstriss noch weiter gesteigert werden. Dadurch treten, verglichen mit dem unbewehrten Modell, bei Erreichen der Traglast etwa 12 % größere Verformungen auf.

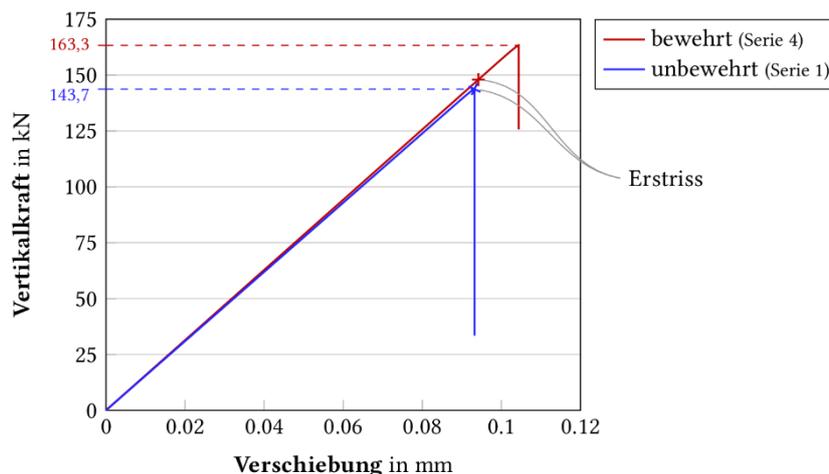


Abb. 19: Last-Verschiebungs-Diagramm der FE-Berechnungen am Vollziegelpfeiler

3.4 Vergleich und Zusammenfassung

Abb. 15 zeigt die Versuchsergebnisse der beiden Serien, statistisch ausgewertet als Boxplots. Die untere und obere horizontale Linie markieren dabei die Minimal- und Maximalwerte der Versuchsergebnisse. Die weiß gefüllte Box reicht vom 25 %-Quantil bis zum 75 %-Quantil; im Inneren der Box ist der Mittelwert durch eine horizontale Linie gekennzeichnet. Zusätzlich sind die Berechnungsergebnisse für beide Fälle eingetragen. Sowohl im unbewehrten, als auch im bewehrten Fall stimmen die Ergebnisse der FE-Berechnungen sehr gut mit den Versuchsergebnissen überein. Mit 14,37 N/mm² liegt die berechnete Bruchspannung im unbewehrten Fall geringfügig über dem Mittelwert der Versuchsergebnisse. Die Berechnung des bewehrten Pfeilers ergibt mit 16,33 N/mm² eine etwas höhere Bruchspannung als in den Versuchen und somit eine Steigerung der Tragfähigkeit um 13,64 % (im Vergleich: 15,38 % aus den Versuchen). Die gewählten Modellierungsstrategien bilden den Versagensmechanismus der Pfeiler demnach gut ab.

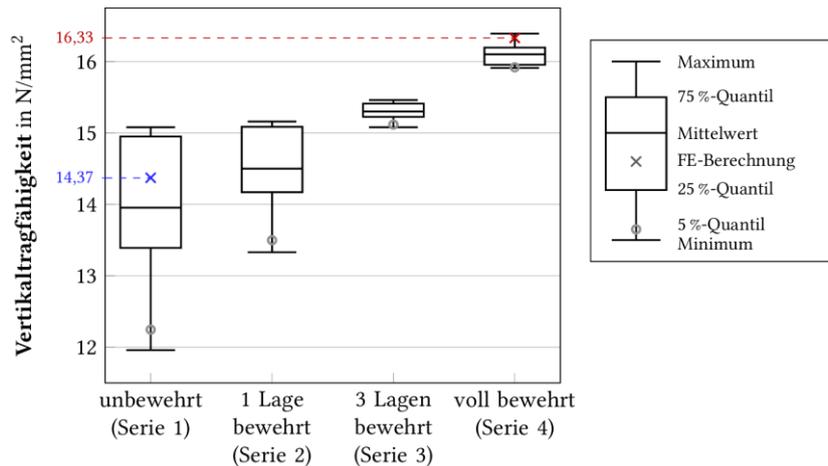


Abb. 20: Ergebnisse der Versuche sowie der FE-Berechnungen der Vollziegelpeiler

In den Versuchen zeigte sich neben der Tragfähigkeitserhöhung, dass die Streuung der Bruch-lasten einer Serie mit Erhöhung der Anzahl bewehrter Lagerfugen abnimmt. Die aktuell gültigen Normen zur Bemessung von Mauerwerk im Grenzzustand der Tragfähigkeit sehen zur Berechnung der Bemessungstraglast die Verwendung von 5 %-Quantilen der Festigkeiten vor, während in den FE-Berechnungen Mittelwerte der Eingangsgrößen zur Anwendung kamen. Mit sinkender Streuung sinkt auch der Abstand dieser Bemessungswerte zum jeweiligen Mittelwert. Vergleich der 5 %-Quantile der Versuchsergebnisse anstatt der Mittelwerte, ergibt daher eine noch höhere Traglaststeigerung von 30,0 %. In der Bemessung von Mauerwerk könnte eine Lagerfugenbewehrung demnach einen signifikanten Anstieg der Vertikaltragfähigkeit bewirken.

4 Erhöhung der Vertikaltragfähigkeit von Hochlochziegeln durch faserverstärkte Lagerfugen

Da die gewählten Modellierungsstrategien für den Vollziegelpeiler zu guten Ergebnissen führten, wurden diese analog auf Mauerwerk aus Hochlochziegeln angewandt. Zur Ermittlung eines Referenzzustandes bleibt die Lagerfuge dabei im ersten Schritt unbewehrt. Danach folgt die Berechnung mehrerer Modelle mit bewehrter Mörtelfuge. Der Volumenanteil des Gewebes – sozusagen der Bewehrungsgrad – steigt dabei von Modell zu Modell immer weiter an. Auf diese Weise ergibt sich ein Zusammenhang zwischen Bewehrungsgrad und Vertikaltragfähigkeit. Am Markt verfügbare Produkte, wie das im Vollziegelpeiler verwendete TextilglasGitter von Baumit oder das im deutschen V.Plus-System eingesetzte Gewebe, können dann recht einfach in diesen Zusammenhang eingeordnet werden.

4.1 Numerische Modellierung

Der untersuchte Hochlochziegel stammt aus dem Produktsortiment der Firma Wienerberger. Es handelt sich dabei um einen dämmstoffgefüllten Ziegel.

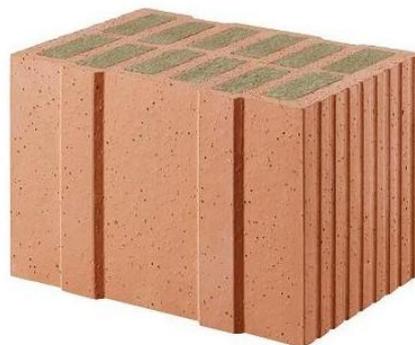


Abb. 21: Untersuchter Hochlochziegel

Die gewählte Einheitszelle umfasst einen Stein in der Breite und zwei Ziegelscharen in der Höhe. Um Kontakt zwischen zwei benachbarten Ziegeln auch im deformierten Zustand zu vermeiden, liegen diese im Modell nicht fugenlos nebeneinander. Bei den geringen Verformungen der Ziegelsteine reicht dafür eine Fuge von 1 mm Dicke aus. Die Einheitszelle ist demnach 249 mm breit, 500 mm hoch und zweidimensional periodisch.

4.1.1 Materialkenngrößen

Für Ziegelscherben und Mörtel geben Kiefer et al. [Kiefer20017] alle zur Modellierung erforderlichen Materialkenngrößen eines vergleichbaren Ziegels an. Die Eigenschaften des bewehrten Mörtels errechnen sich mithilfe eines Mehrskalensmodells.

4.1.1.1 Ziegel

Zur Beschreibung der orthotropen elastischen Eigenschaften der Ziegel sind die Elastizitätsmoduln E_{LL} , E_{TT} , E_{ZZ} , die Schubmoduln G_{TZ} , G_{ZL} , G_{LT} sowie die Querdehnungszahlen ν_{TZ} , ν_{ZL} , ν_{LT} erforderlich. Kiefer et al. [Kiefer20017] führen Versuchswerte des Elastizitätsmoduls in Extrusionsrichtung, E_{ZZ} , an. Auf deren Basis berechnen sie nach Hannawald und Brameshuber [Hannawald2007] und Bourret et al. [Bourret2015] die Elastizitätsmoduln E_{LL} und E_{TT} sowie die drei Schubmoduln. Für die Querdehnungszahlen sind keine Messergebnisse vorhanden. Hannawald und Brameshuber geben Querdehnungszahlen aus Versuchen an Hochlochziegeln an. Auf Basis dieser Ergebnisse wurden die Querdehnungszahlen in der Modellierung gewählt.

Für die Festigkeiten des Ziegelscherbens beziehen sich Kiefer et al. [Kiefer20017] auf mehrere Versuche. Eine umfangreiche Versuchsreihe zu Druck- und Zugfestigkeiten wurde für einen vergleichbaren Hochlochziegel durchgeführt. Die Schubfestigkeiten wurden als Mittelwert der beiden Grenzwerte nach Graubner und Richter [Graubner2007] berechnet.

4.1.1.2 Mörtel

Der verwendete Dünnbettmörtel verhält sich linear elastisch und isotrop. Druckversagen des Mörtels ist für den Versagensmechanismus des Mauerwerks nicht maßgebend. Deswegen reicht die Angabe von Elastizitätsmodul und Querdehnungszahl zur Modellierung aus. Zu den beiden Parametern liegen allerdings keine Versuchsergebnisse vor. Unter Berücksichtigung der Annahmen von Vekey [Vekey2010] sowie Sarhosis und Sheng [Sarhosis2014] wurden diese Kennwerte angenommen.

4.1.1.3 Gewebe und bewehrter Mörtel

Die bewehrte Mörtelschicht ist im Modell in zwei Bereiche unterteilt:

- ◆ die ungerissene Mörtelschicht auf den Längsstegen des Ziegels und
- ◆ die gerissene Mörtelschicht zwischen den Längsstegen – über Hohlräumen und Querstegen.

Für den ungerissenen Bereich erfolgt die Homogenisierung der Schicht analog zur Berechnung in Kapitel 3 auf Seite 42. Zwischen den Längsstegen treten im Mörtel Zugspannungen auf. Durch unvermeidbare Schwindrisse sinkt die Zugfestigkeit des Mörtels stark ab. In diesen Bereichen wirkt deshalb nur noch das Gewebe. Die Steifigkeit des Gewebes wird hier auf die Dicke der Mörtelschicht umgelegt.

Der Bewehrungsgrad der Mörtelschicht wurde im Laufe der Berechnungen von $f_{f,i} = 0,25\%$ bis 6 % erhöht. Die Schrittweite betrug dabei 0,25 %. Für jeden dieser 24 Schritte erfolgte die Homogenisierung der Mörtelschicht für beide oben beschriebenen Bereiche.

Das im deutschen V.Plus-System verwendete Glasfilamentgewebe BASIS SK 34/68 tex [Glasfaser] weist unterschiedliche Faserabstände in beiden Webrichtungen auf. Die Produktbezeichnung („34/68“) sowie die Höchstzugkräfte in der Zulassung (Kette: 450 N/50 mm, Schuss: 900 N/50 mm) lassen auf den doppelten Faserabstand der Kettenrichtung gegenüber der Schussrichtung schließen. In der Herstellung von gewebten Materialien werden zuerst die Längsfasern gespannt und dann die Querfasern eingewebt. Die Längsfasern definieren dabei die Schussrichtung, die später eingewebten Querfasern die Kettenrichtung. Das Gewebe weist demnach in Wanddickenrichtung eine engere Maschenweite auf. Dies führt zu höheren Steifigkeiten in Richtung der Querstege, also genau in jener Richtung, in welcher eine Versteifung gewünscht ist.

Das Flächengewicht beträgt gemäß der Zulassung 50 g/m². Daraus ergibt sich mithilfe Gleichung (1) der gesamte Bewehrungsgrad zu:

$$f_f = \frac{m}{\rho_f \cdot d_m} = \frac{0,0050 \text{ g/cm}^2}{2,5 \text{ g/cm}^3 \cdot 0,1 \text{ cm}} = 2\% \quad (5)$$

Auf einem quadratischen Ausschnitt des Gewebes befinden sich doppelt so viele in y-Richtung liegende als in x-Richtung liegende Fasern. Demnach beträgt das Verhältnis der Volumenanteile $f_{f,x} : f_{f,y} = 1:2$. Die beiden Anteile ergeben sich dann zu:

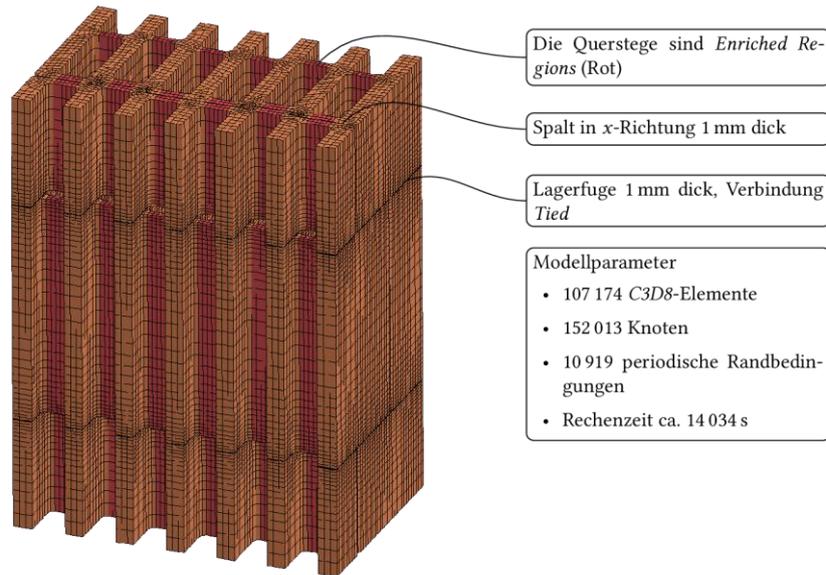


Abb. 23: FE-Netz des Hochlochziegelmauerwerks

4.2 Ergebnisse

Kiefer et al. [Kiefer20017] untersuchten die Vertikaltragfähigkeit verschiedener Hochlochziegel mit den hier angewandten Modellierungsstrategien. Sie erreichten dabei eine sehr gute Übereinstimmung mit Versuchsergebnissen der Firma Wienerberger. Einer dieser Ziegel weist ein ähnliches Lochbild zum hier verwendeten Produkt auf und hat zudem vergleichbare Materialeigenschaften. Der Ziegel ist mit 30 cm Wandstärke lediglich 6,5 cm dünner als der hier modellierte Ziegel. Die Ermittlung der Bruchspannung ermöglicht den Vergleich der Ergebnisse nach Kiefer et al. mit den Ergebnissen des unbewehrten Modells. Kiefer et al. berechneten eine Bruchspannung von 13,81 N/mm², bezogen auf die Nettofläche des Ziegels. Im Vergleich dazu liegt die Bruchspannung im gegenständlichen Modell bei 14,78 N/mm². Die Modellierung des unbewehrten Wandausschnitts scheint also realistische Resultate zu liefern.

4.3 Vergleich und Zusammenfassung

4.3.1 Berechnung mit homogenen Festigkeiten

Die Traglast des unbewehrten Systems beträgt 634,06 kN, bei einem Bewehrungsgrad von $f_{t,y} = 3\%$ nimmt sie bis auf 698,15 kN zu. Relativ zum unbewehrten Zustand bedeutet das einen Anstieg von 10,1%. Das Diagramm in Abb. 19 zeigt die Last-Verschiebungs-Beziehung dieser beiden Fälle. Auf der Ordinate ist die eingepreßte Verschiebung aufgetragen, die Abszisse bezeichnet die Summe der entstehenden Vertikalkräfte in den Masterknoten. Die Kurven weisen bis zum Erreichen der Traglast annähernd die gleiche Steigung auf. Beim unbewehrten Modell konnte der Solver nach dem Versagen des Systems noch ein Inkrement berechnen. Dadurch ergibt sich ein Abfall der Belastung am Ende der Datenreihe. Im bewehrten Modell entsteht der erste Riss erst bei einer Belastung von 672 kN. Die steifere Mörtelschicht bewirkt tatsächlich geringere Querspannung und verzögert dadurch den Erstriss. Bevor der erste Quersteg aufreißt, verhält sich das System linear elastisch. Demnach steigen die Querspannungen proportional zur Belastung an. Im unbewehrten Modell beträgt die Querspannung im zuerst gerissenen Steg 60,89% der über den Querschnitt gemittelten Vertikalspannung, bei $f_{t,y} = 3\%$ nur noch 57,42%. Zusätzlich kann die Belastung nach Erstriss noch weiter gesteigert werden, bis ein weiterer Quersteg aufreißt. Nach Erreichen der Traglast konnte kein weiterer Gleichgewichtszustand durch Verringern des Inkrements erreicht werden.

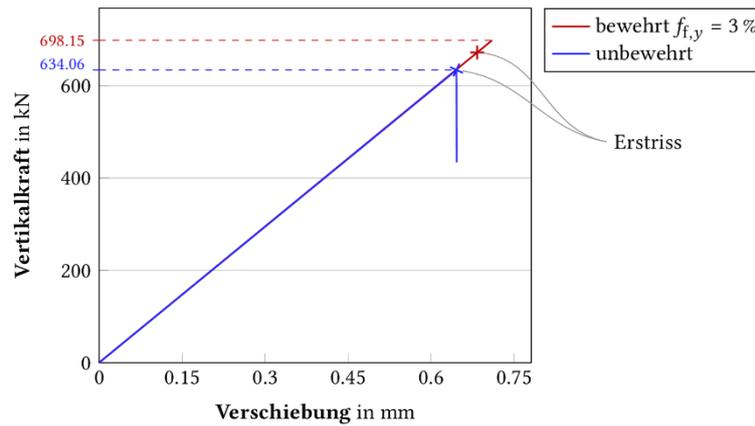


Abb. 24: Last-Verschiebungs-Kurve der FE-Berechnungen am HLZ-Mauerwerk

4.3.1.1 Vergleich der Spannungen – unbewehrt und bewehrt

Durch die steifere, bewehrte Mörtelfuge, treten in den beiden Modellen bei gleicher Verformung unterschiedliche Spannungszustände auf. Die Bewehrung bewirkt kleinere Querdehnungen im Mörtel und dadurch kleinere Zugspannungen in den Quersteinen. Ein Vergleich der beiden Spannungsbilder in Abb. 20 verdeutlicht genau diesen Effekt. Die Spannungen in T - und Z -Richtung sind hingegen in beiden Fällen nahezu identisch.

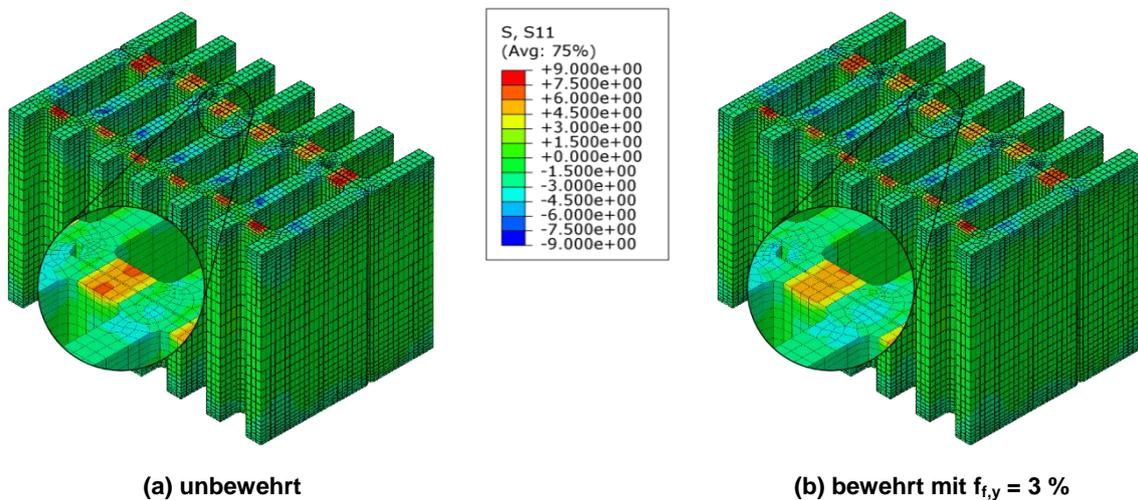


Abb. 25: Vergleich der Spannungen σ_{LL} bei gleicher eingepprägter Verschiebung $u_z = 0,646$ mm

4.3.1.2 Vergleich der Tragfähigkeit bei unterschiedlichem Bewehrungsgrad

Aus den Ergebnissen von insgesamt 25 Modellen entstand der in Abb. 21 dargestellte Zusammenhang zwischen Bewehrungsgrad und Vertikaltragfähigkeit. In Schritten von 0,25 % wurde der Bewehrungsgrad von 0 % bis 6 % gesteigert und die zugehörige mittlere Vertikalspannung bei Erreichen der Traglast (in Blau) aufgetragen. Zusätzlich stellt die rot gestrichelte Kurve die Nettospannung bei Auftreten des ersten Risses im jeweiligen Modell dar. Demzufolge steigt die Vertikalspannung bei Erstriss linear mit dem Bewehrungsgrad an. Diese Beobachtung untermauert die Vermutung, dass mit steigender Mörtelsteifigkeit die Querzugspannungen im Ziegel abnehmen und die Zugfestigkeit infolgedessen später überschritten wird. Nach Auftreten des ersten Risses ist bei steigendem Bewehrungsgrad ein abweichendes Verhalten des Mauerwerks zu beobachten. Bis zu $f_{t,y} = 1,75$ % versagt das Mauerwerk unmittelbar nach Reißen des ersten Quersteiges (Abb. 22a). Die Vertikaltragfähigkeit ist demnach mehr oder weniger gleich der Belastung bei Auftreten des ersten Risses. Ab einem Bewehrungsgrad von $f_{t,y} = 2$ % ergibt sich jedoch eine Differenz zwischen der Bruchspannung und der Erstrissspannung. Die ansteigende effektive Steifigkeit der Mörtelfuge behindert dabei eine weitere Öffnung des Risses. Bei genauerer Betrachtung des Rissbildes wird klar, dass die Belastung so lange steigen kann, bis ein weiterer Quersteg reißt. Dementsprechend sind beim Erreichen der Traglast zwei Stege gerissen (Abb. 22b). Die Differenz zwischen Vertikaltragfähigkeit und Erstrissspannung steigt danach immer weiter an. Ab einem Bewehrungsgrad von $f_{t,y} = 6$ % reißen vier Querstege auf (Abb. 22c). Die Verwendung einer gewebeverstärkten Mörtelschicht führt also nach dem Erstriss zu einer Umlagerung und dadurch gleichmäßigeren Verteilung der Querzugspannungen innerhalb des Ziegels.

Energieforschungsprogramm - 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

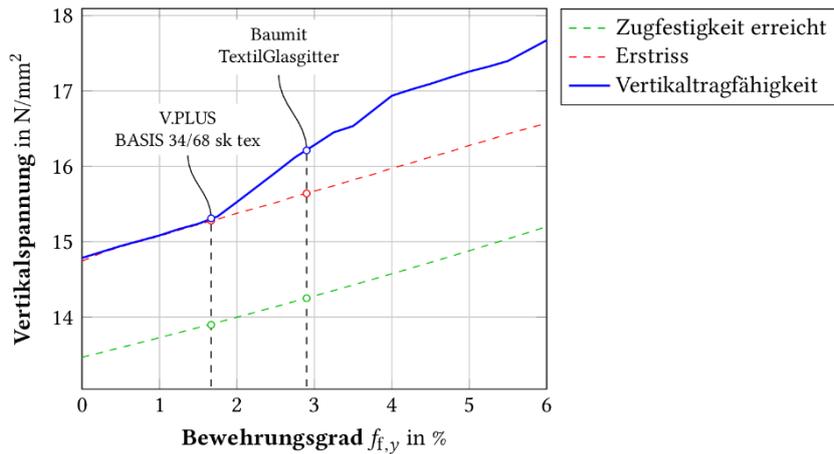


Abb. 26: Einfluss des Bewehrungsgrades auf die Tragfähigkeit

Die Tragfähigkeitserhöhung durch faserverstärkte Mörtelfugen setzt sich also aus zwei Mechanismen zusammen:

- ◆ die Verzögerung des Erstrisses durch die Abminderung der Quersugspannungen und
- ◆ das Zurückhalten des Rissfortschritts, da das Gewebe die Risse überbrückt.

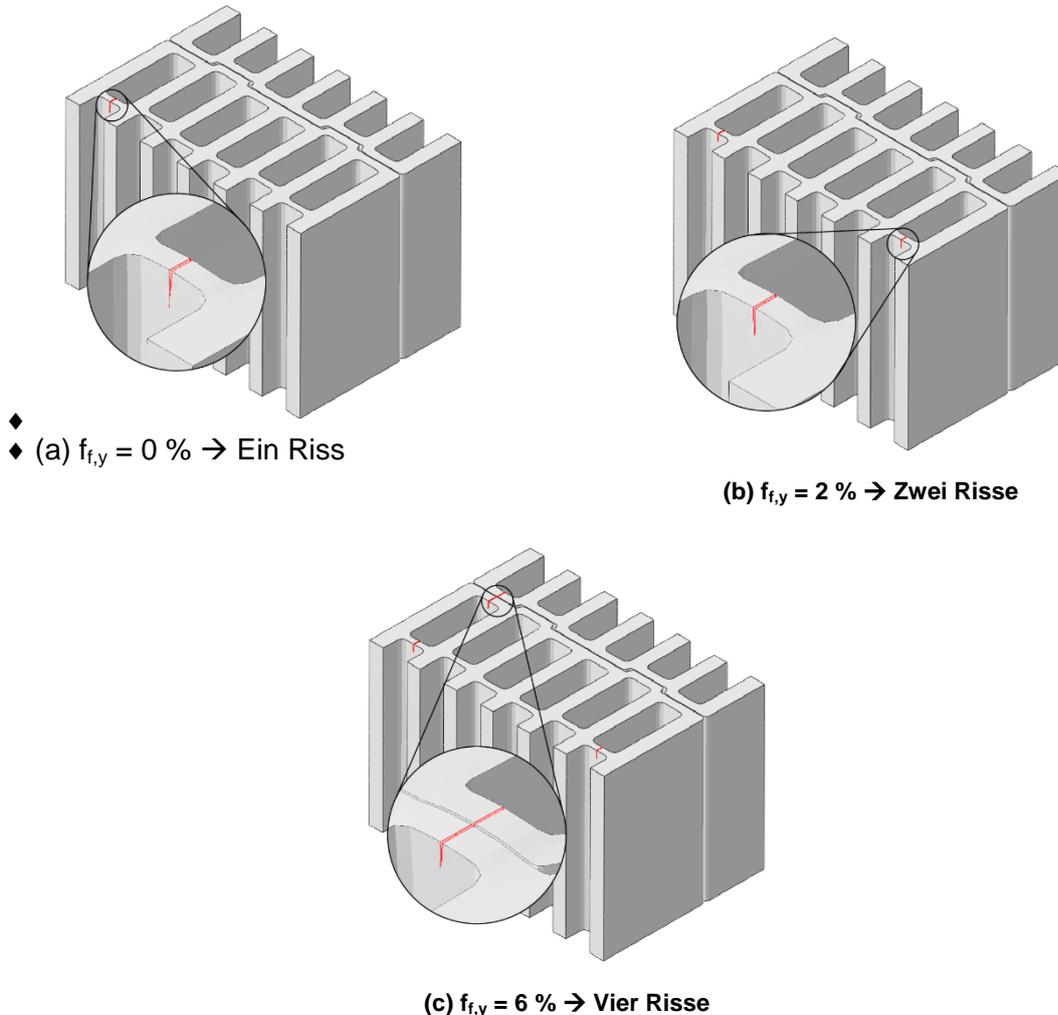


Abb. 27: Vergleich der Rissbilder bei unterschiedlichem Bewehrungsgrad $f_{t,y}$

Im deutschen V.Plus-System kommt das Gewebe BASIS 34/68 sk tex zum Einsatz. In der 1 mm dicken Mörtelfuge beträgt der Bewehrungsgrad $f_{t,y} = 1,667\%$. Nach dem Zusammenhang in Abb. 21 steigt die Vertikaltragfähigkeit in diesem Fall noch nicht über die Erstrissspannung an. Im Vergleich zum unbewehrten

Fall, ergibt sich eine Steigerung der Traglast um 3,5 %. Da gerade ab $f_{t,y} = 1,75\%$ ein starker Anstieg der Traglast auftritt, ist das Gewebe zufolge der numerischen Modellierungsergebnisse denkbar ungünstig situiert. Es ist zwar eine geringfügige Steigerung der Tragfähigkeit möglich, eine Vergrößerung des Bewehrungsgrades um lediglich 0,5 % bewirkt allerdings bereits eine Verdopplung dieser Steigerung.

Deutlich höher liegt der Bewehrungsgrad bei Verstärkung mit dem Textilglasgitter von Baunit, nämlich bei $f_{t,y} = 2,9\%$. Bereits die Erstrissspannung ist hier um 5,8 % höher als im unbewehrten Modell. Der Zuwachs durch die Verzögerung des Rissfortschritts beträgt zusätzlich 3,8 %. Gesamt ergibt sich also eine Steigerung der Vertikaltragfähigkeit von 9,6 %.

Mit einem Faserbündeldurchmesser von fast 0,4 mm ist das Textilglasgitter im Vergleich zur Mörtelfuge bereits recht dick. Im Durchmesser bestehen demnach keine Reserven für die Erhöhung des Bewehrungsgrades. Der Webabstand liegt bei 4 mm und könnte, zumindest in y -Richtung, noch weiter verkleinert werden. Eine Verringerung auf etwa 2 mm verdoppelt den Bewehrungsgrad auf $f_{t,y} = 5,8\%$. Die Tragfähigkeit könnte dann sogar um bis zu 19,5 % gesteigert werden. Der Faserabstand sollte dabei allerdings nicht zu klein werden. Ein zu feines Gewebe wirkt als Trennschicht innerhalb der Lagerfuge, die Vereinfachung als homogene, bewehrte Mörtelschicht ist dann nicht mehr gültig. Tab. 1 beinhaltet die Erstrissspannung, Tragfähigkeit sowie die zugehörige Steigerung für einige Werte des Bewehrungsgrades.

Tab. 3: Erstrissspannung, Tragfähigkeit und Steigerung bei unterschiedlichem Bewehrungsgrad und homogenen Festigkeiten

	Bewehrungsgrad $f_{t,y}$ in %						
	0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
Erstrissspannung in N/mm^2	14.74	15.07	15.38	15.67	15.97	16.28	16.57
Tragfähigkeit in N/mm^2	14.78	15.08	15.53	16.28	16.93	17.26	17.67
Steigerung Erstriss in %	–	2.0	4.0	6.0	8.0	10.1	12.1
Steigerung Tragfähigkeit in %	–	2.0	5.0	10.1	14.5	16.7	19.5

4.3.2 Berechnung mit stochastisch zugewiesenen Festigkeiten

Im ersten Ansatz konnte der Ort des ersten Risses vorhergesehen werden: aufgrund der homogenen Festigkeiten, reißt der Steg mit den größten Zugspannungen zuerst. Bei genauerer Betrachtung der Verteilung dieser horizontalen Zugspannungen, wird klar, dass diese in den äußersten Stegen am größten sind. Bei inhomogenen Festigkeitseigenschaften ist diese Vorhersage nicht mehr möglich. In den Berechnungen zeigte sich ein interessantes Phänomen: In Modellen, bei denen der erste Riss in einem der inneren Stege auftrat, konnte die Belastung auch ohne Bewehrung über den Erstriss hinaus gesteigert werden. In jedem der zehn Modelle wurde die Mauerwerksdruckfestigkeit erst erreicht, wenn zumindest einer der äußeren Querstege riss. Das Versagen des Mauerwerks beläuft sich daher auf den bereits bekannten Mechanismus bei Hochlochziegelmauerwerk: das Abplatzen der äußeren Längsstege.

Die zufällig generierten Modelle bestanden sowohl aus Quersteinen mit niedrigeren Festigkeiten als die Mittelwerte, als auch Stegen mit höheren Festigkeiten. Im Mittel lagen die Festigkeiten in etwa bei diesen Mittelwerten. Jedes dieser Modelle führte allerdings zu einer Mauerwerksdruckfestigkeit unterhalb der Ergebnisse mit homogenen Festigkeiten. Demnach haben die schwächeren Stege einen größeren Einfluss auf die Tragfähigkeit, als die stärkeren.

Die Steigerung der Tragfähigkeit bei stochastischer Zuweisung der Festigkeiten in Abhängigkeit des Bewehrungsgrades ist in Abb. 28 dargestellt. Bei Verdopplung des Bewehrungsgrades von 3 % auf 6 %, ergab sich bei jedem Modell in etwa eine Verdopplung der Steigerung. Daher veränderte sich auch die Standardabweichung der Steigerung in gleicher Weise. Die mittlere Steigerung der Mauerwerksdruckfestigkeit betrug beim höchsten berücksichtigten Bewehrungsgrad 28,87 %.

Obwohl die erreichten Mauerwerksdruckfestigkeiten in jedem Fall niedriger waren als bei homogenen Festigkeiten, ergab sich bei stochastisch zugewiesenen Festigkeiten eine um 9 % höhere Steigerung (siehe Tab. 4).

Abb. 29 zeigt die Gegenüberstellung der Mauerwerksdruckfestigkeiten von unbewehrten Versuchspfählen mit den FE-Berechnungen mit stochastisch zugewiesenen Festigkeiten. Während Kiefer et al. [Kiefer2017] bereits Mauerwerksdruckfestigkeiten innerhalb der Versuchsschwankungen erreichten, können mithilfe des stochastischen Ansatzes sogar diese Schwankungen recht gut abgebildet werden. Der Mittelwert der Berechnungen ist dabei in etwa gleich groß wie jener aus den Versuchen.

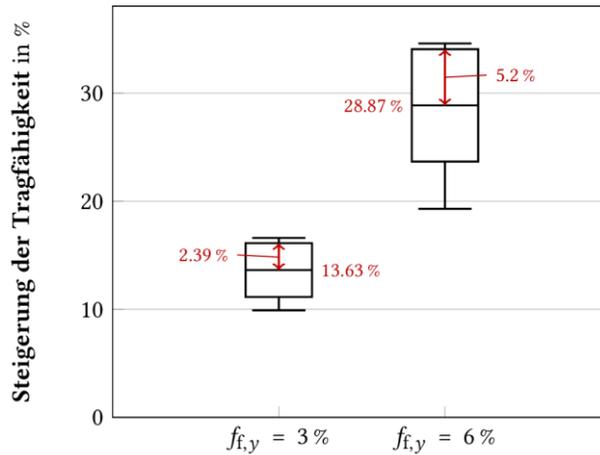


Abb. 28: Statistische Auswertung der Tragfähigkeitssteigerung bei stochastischer Festigkeitszuweisung

Tab. 4: Steigerung der Mauerwerksdruckfestigkeit bei Berücksichtigung unterschiedlicher Festigkeiten

	Bewehrungsgrad $f_{t,y}$ in %		
	0	3.0	6.0
Homogene Festigkeiten – Steigerung in %	-	10.1	19.5
Stochastische Zuweisung – Steigerung in %			
Mittelwert	-	13.63	28.87
5%-Quantil	-	15.28	33.81

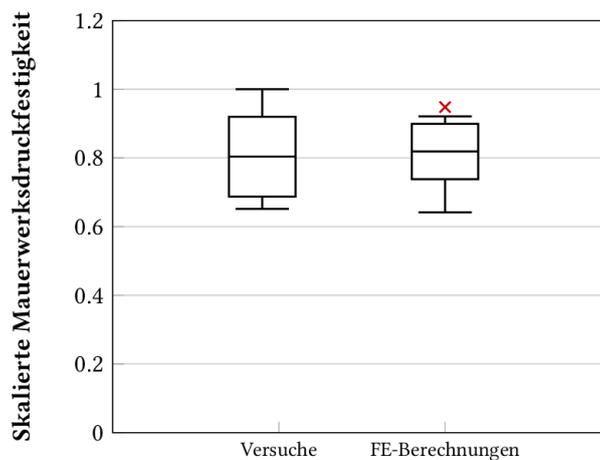


Abb. 29: Vergleich der Versuchsergebnisse unbewehrten HLZ-Mauerwerks mit den FE-Berechnungen

5 Einsatzmöglichkeiten von bewehrten Lagerfugen und zukünftige Forschungsthemen

Unter Vertikalbelastung entstehen aufgrund der unterschiedlichen Steifigkeiten von Ziegel und Mörtel Querspannungen im Ziegel. Trinko [Trinko2019] zeigte anhand von Versuchen an Vollziegelpeilern, dass eine Versteifung der Lagerfugen durch Glasfasergewebe eine deutliche Steigerung der Vertikaltragfähigkeit mit sich bringt. Bei Verwendung des TextilGlasgitter von Baunit stieg die Traglast in den Versuchen um 15,38 % an. Modellierung dieser Versuche mithilfe der zuvor beschriebenen Strategien im FE-Programm Abaqus ergibt eine Traglaststeigerung von 13,64 %. Um den komplexen Versagensmechanismen im Ziegel Rechnung zu tragen, die Orthotropie des Ziegels zu berücksichtigen und dabei gleichzeitig den numerischen Aufwand zu begrenzen wurden in dieser Arbeit die folgenden Modellierungsstrategien angewandt:

- ◆ Abbildung des Materialverhaltens über das orthotrope Interaktionskriterium nach Hoffman, verbunden mit einem Concrete-Damaged-Plasticity-Modell im Druckbereich,

- ◆ diskrete Modellierung von Rissen durch XFEM und VCCT,
- ◆ die Berechnung einer unendlich ausgedehnten Struktur durch eine Einheitszelle mit periodischen Randbedingungen und
- ◆ die Homogenisierung der Steifigkeiten des bewehrten Mörtels durch ein mikromechanisches Mehrskalenmodell.

Die Validierung dieser Modellierungsstrategien konnte dabei durch einen Vergleich der numerischen Ergebnisse mit Experimenten aus Vollziegelpfeilern erreicht werden. Die Anwendung derselben Strategien auf Hochlochziegelmauerwerk lieferte nach Berechnung des unbewehrten Referenzzustands einen Zusammenhang zwischen dem Bewehrungsgrad der Lagerfuge und der Tragfähigkeit des Mauerwerks. Dabei konnten zwei Effekte identifiziert werden, welche eine Steigerung der Vertikaltragfähigkeit des Mauerwerks bewirken:

- ◆ die Verzögerung des Erstrisses durch die Reduktion der Querspannungen in den Querstegen und
- ◆ die Verlangsamung des Risswachstums, da die bewehrte Mörtelschicht den Riss überbrückt.

Die Vertikaldruckspannung bei Auftreten des ersten Risses steigt den numerischen Ergebnissen zufolge proportional zur effektiven Steifigkeit der Mörtelschicht. Bei dem hier verwendeten Dünnbettmörtel ist bis zu einem Bewehrungsgrad von 1,75 % die Traglast unmittelbar nach Reißen des ersten Quersteiges erreicht. Eine höhere effektive Steifigkeit der Mörtelschicht dagegen ermöglicht eine Steigerung der Traglast über das Auftreten der ersten Risse hinaus; die Überbrückung des Risses durch das Gewebe und die damit verbundene Verzögerung des Rissfortschritts bewirkt ein duktileres Verhalten des Mauerwerks. Bei der Wahl eines geeigneten Gewebes ist es daher sinnvoll, einen Bewehrungsgrad über 1,75 % zu erreichen. Es wurden zwei erhältliche Gewebe in den Zusammenhang zwischen Bewehrungsgrad und Tragfähigkeit (Abb. 21) eingeordnet. Das im deutschen V.Plus-System verwendete Glasfilamentgewebe BASIS SK 34/68 tex ergibt in Kombination mit einer 1 mm dicken Mörtelfuge einen Bewehrungsgrad unterhalb dieses Grenzwertes, weshalb die Steigerung der Traglast mit 3,5 % relativ gering ausfällt. Deutlich höher ist der Anstieg bei Verwendung des von Trinko [Trinko2019] verwendeten Textilglasgitter, er beträgt hier 9,5 %. Durch Halbierung des Webabstandes, könnte die Traglast sogar um fast 20 % erhöht werden (siehe Tab. 1).

Die Versuche von Trinko [Trinko2019] ergaben zudem, dass die Streuung der erreichten Traglasten mit steigendem Bewehrungsgrad abnimmt. Das Vergleichen der 5 %-Quantile der Versuchsergebnisse anstatt der Mittelwerte, führt daher zu einer Tragfähigkeitssteigerung um 30,0 % (15,38 % bei Vergleich der Mittelwerte). Daher scheint es wahrscheinlich, dass auch beim Hochlochziegel ein ähnlicher Effekt auftreten könnte. Die Zugfestigkeit des Ziegelscherbens ist nicht im gesamten Ziegel gleich groß. Im unbewehrten Fall definiert daher der schwächste Quersteg die vertikale Tragfähigkeit des Mauerwerks. Liegt ausreichend Bewehrung in der Lagerfuge, kann die Belastung selbst nach Bildung eines Risses im schwächsten Steg weiter gesteigert werden. Bewehrte Lagerfugen könnten demnach dazu beitragen, den Einfluss von Stegen mit geringerer Zugfestigkeit auf die Vertikaltragfähigkeit des Mauerwerks zu reduzieren. Dadurch nimmt die Differenz zwischen Mittelwert und 5 %-Quantil der Tragfähigkeit mit steigendem Bewehrungsgrad ab. Der Anstieg der Vertikaltragfähigkeit würde dann deutlich größer ausfallen, als die berechneten Werte in Tab. 1.

Der zweite Ansatz mit stochastisch zugewiesenen Festigkeiten bestätigt diese Vermutung. Die Steigerung vergrößerte sich von 20 % auf knapp 34 %. Es zeigte sich, dass schwächere Querstege einen großen Einfluss auf die erreichbaren Tragfähigkeiten haben. Zusätzlich konnten durch diesen Ansatz im unbewehrten Fall die Schwankungen von Versuchsergebnissen gut abgebildet werden, während die Berechnung mit homogenen Festigkeiten den Mittelwert der Versuchsergebnisse etwas überschätzt.

Eine Erhöhung des 5 %-Quantils der Tragfähigkeit um knapp 34 % rein durch Bewehrung der Lagerfuge unterstreicht den erheblichen Einfluss der effektiven Steifigkeit der Mörtelschicht. Neben den zahlreichen anderen Vorteilen eines Glasfasergewebes und einer damit durchgehenden Mörtelschicht (Erhöhung der Duktilität, Witterungsschutz, unterbrochene Luftzirkulation) stellt die hier numerisch ermittelte Traglaststeigerung ein wesentliches Optimierungspotenzial dieser Methode im Mauerwerksbau dar. Der vorgestellte Ansatz liefert damit einen ersten wichtigen Beitrag zur Bewertung einer möglichen Steigerung der Traglast von Hochlochziegelmauerwerk unter Verwendung einer glasfaserverstärkten Mörtelschicht.

6 Literaturverzeichnis

- [Abaqus2016] Abaqus 2016 Online Documentation. Dassault Systèmes Simulia Corporation. 2015. url: <http://130.149.89.49:2080/v2016/index.html> (Zugriff am 03. 05. 2018).
- [Barbosa2007] C. S. Barbosa, P. B. Lourenço, G. Mohamad und J. B. Hanai. „Triaxial compression tests on bedding mortar samples looking at confinement effect analysis“. In: North American Masonry Conference. 2007, S. 992–1002. url: <http://hdl.handle.net/1822/9199>

- (Zugriff am 03. 06. 2018).
- [Belytschko1999] T. Belytschko und T. Black. „Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing“. In: *International journal for numerical methods in engineering* 45 (5) (1999), S. 601– 620. doi: 10.1002/(SICI)1097-0207(19990620)45:5<601::AID-NME598>3.0.CO;2-S.
- [Bierwirth1995] H. Bierwirth. „Dreiachsige Druckversuche an Mörtelproben aus Lagerfugen von Mauerwerk“. Diss. München: Technische Universität München, 1995.
- [Boehm2016] H. J. Böhm. „A short introduction to basic aspects of continuum micromechanics“. In: *ILSB-Arbeitsbericht* 2016 (2016). url: <https://www.ilsb.tuwien.ac.at/%20links/downloads/ilsbrep206.pdf> (Zugriff am 01. 07. 2018).
- [Bourret2015] J. Bourret, N. Tessier-Doyen, R. Guinebretiere, E. Joussein und D. Smith. „Anisotropy of thermal conductivity and elastic properties of extruded clay-based materials: Evolution with thermal treatment“. In: *Applied Clay Science* 116-117 (Nov. 2015), S. 150–157. doi: 10.1016/j.clay.2015.08.006.
- [Danzer2013] R. Danzer, T. Lube, R. Morrell und P. Supancic. „Mechanical Properties of Ceramics“. In: *Handbook of Advanced Ceramics*. Elsevier, 2013, S. 609–632. doi: 10.1016/b978-0-12-385469-8.00033-2.
- [Graubner2007] C.-A. Graubner und L. Richter. „Diskrete FE-Modellierung von Mauerwerk zur Bestimmung der Druckfestigkeit“. In: *Mauerwerk* 11 (6) (Dez. 2007), S. 342–348. doi: 10.1002/dama.200700354.
- [Hannawald2007] J. Hannawald und W. Brameshuber. „Ermittlung effektiver elastischer Eigenschaften von Hochlochziegeln mittels numerischer Simulation“. In: *Mauerwerk* 11 (6) (Dez. 2007), S. 330– 334. doi: 10.1002/dama.200700352.
- [Hayen2004] R. Hayen, K. Van Balen und D. Van Gemert. „The mechanical behaviour of mortars in triaxial compression“. In: *International Seminar on historical constructions*. Besucht am 21.10.2018. A.A. Balkema Publishers, 2004, S. 611–617. url: <https://bwk.kuleuven.be/mat/publications/internationalconference/2004-hayen-mechanicall-arch.pdf> (Zugriff am 21. 10. 2018).
- [Hoffman1967] O. Hoffman. „The Brittle Strength of Orthotropic Materials“. In: *Journal of Composite Materials* 1 (2) (Apr. 1967), S. 200–206. doi: 10.1177/002199836700100210.
- [Kiefer20017] T. Kiefer, H. Kariem, M. Lukacevic und J. Füssl. „The compressive strength of vertically perforated clay block masonry predicted by means of a unit-cell type numerical simulation tool taking discrete cracking into account“. In: *Construction and Building Materials* 150 (Sep. 2017), S. 24–34. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.201.
- [Kuna2008] M. Kuna. „Grundlagen der Bruchmechanik“. In: *Numerische Beanspruchungsanalyse von Rissen: Finite Elemente in der Bruchmechanik*. Vieweg+Teubner, 2008, S. 25–148. doi: 10.1007/978-3-8348-9285-0_3.
- [Lubliner1989] J. Lubliner, J. Oliver, S. Oller und E. Oñate. „A plastic-damage model for concrete“. In: *International Journal of Solids and Structures* 25 (3) (1989), S. 299–326. doi: 10.1016/0020-7683(89)90050-4.
- [Melenk1996] J. M. Melenk und I. Babuška. „The partition of unity finite element method: basic theory and applications“. In: *Computer methods in applied mechanics and engineering* 139 (1-4) (1996), S. 289–314. doi: 10.1016/S0045-7825(96)01087-0.
- [Pluijm1999] R. van der Pluijm. „Out-of-plane bending of masonry : behaviour and strength“. Proefschrift. Diss. Department of the Built Environment, Technische Universiteit Eindhoven, 1999. isbn: 90-6814-099-X. doi: 10.6100/IR528212.
- [Baumit] Produktdatenblatt Baumit TextilglasGitter. Baumit GmbH. url: https://www.baumit.at/pimd/AT/pdb/PDBL_TextilglasGitter.pdf (Zugriff am 10. 11. 2018).
- [Botament] Produktdatenblatt Botament M21 Classic. BOTAMENT Systembaustoffe GmbH & Co. KG. url: https://botament.com/fileadmin/user_upload/pdfs+buttons/technic_sheets/de/M_21_Classic_D_1602.pdf (Zugriff am 10.11.2018).
- [Sarhosis] V. Sarhosis und Y. Sheng. „Identification of material parameters for low bond strength

- sis2014] masonry“. In: Engineering Structures 60 (Feb. 2014), S. 100–110. doi: 10.1016/j.engstruct.2013.12.013.
- [Trinko2019] A. Trinko. „Experimentelle Untersuchung zur Bestimmung der Tragfähigkeitserhöhung von Mauerwerk durch Mörtelfugen mit Textilglasgitterverstärkung“. Diplomarbeit. Technische Universität Wien, 2019.
- [Vekey2010] B. de Vekey. „Ch. Masonry: Brickwork, blockwork and stonework“. In: Construction Materials: Their Nature and Behaviour, fourth ed. CRC Press, 2010, S. 247–304.
- [Vplus] Verarbeitung MZ-Ziegel VD-/V.Plus-System. Ziegelwerk Klosterbeuern. url: <https://www.zwk.de/verarbeitung-mz-ziegel-vd-vplus-system/> (Zugriff am 03.05.2018).
- [Wu1965] E. M. Wu und R. C. Reuter Jr. Crack Extension in fiberglass reinforced plastic. 1965. doi: 10.21236/ad0613576.
- [Glasfaser] Zulassung Z-17.1-1177: Glasfilamentgewebe BASIS SK 34/68 tex zur Verwendung in Mauerwerk aus bestimmten POROTON-Planhochlochziegeln. Deutsches Institut für Bautechnik, 2013. url: https://www.schlagmann.de/images/content/5_Service/Zulassungen/Z-17-1-1177--20180209.pdf (Zugriff am 28.11.2018).

AP5: Verifikationsversuche Ziegel

Die Druck- und Zugfestigkeiten, Wärmeleitfähigkeiten und Rohdichten der Referenztone wurden gemessen, eine vollständige Aufarbeitung der Daten ist zum jetzigen Zeitpunkt jedoch noch nicht vorhanden, weshalb die entsprechenden Ergebnisse erst im nächsten Zwischenbericht vollständig dokumentiert werden.

AP6: Schnittstelle Produktion

An der Schnittstelle zur Produktion sollen zu Ende dieses Projektes sogenannte "Virtual Ceramic Laboratories" stehen. Solche Simulationstools, die eine Produktentwicklung des Werkstoffes, basierend auf physikalischen Modellen, ermöglichen, erlauben eine gezieltere Optimierung hinsichtlich der Zugabe von Porosierungsmitteln oder der Brenntemperatur.

Ein erstes Berechnungstool, basierend auf den im Vorgängerprojekt "Innovative Brick" entwickelten Mehrskalensmodellen, wurde bereits an Wienerberger übergeben und wird zukünftig den Bedürfnissen entsprechend weiterentwickelt. Dieses Berechnungstool zur Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit und Steifigkeit berücksichtigt unterschiedliche Porosierungen (Porosierungsmittel und Volumensprozent der Zugabe), die chemische Zusammensetzung des Tons (derzeit stehen zwei zur Auswahl, mit den in diesem Projekt noch vollständig zu untersuchenden Tönen werden dann 7 charakteristische Roh-tone zur Auswahl stehen) und kann zudem zwei unterschiedliche Brenntemperaturen berücksichtigen.

In einem weiteren Schritt wird dieses Berechnungstool auch zur Erstellung von numerisch bestimmten Regressionsfunktionen auf Basis von Sensitivitätsanalysen genutzt werden, welche es dann erlauben, Echtzeitergebnisse in Abhängigkeit der gewünschten Mischungen zu erhalten, womit ein effektives und in Zukunft erweiterbares Prognosewerkzeug zur Verfügung steht.

2.3 Änderungen im weiteren Projektverlauf

- ◆ Gibt es Veränderungen? Welche Auswirkungen haben diese? Wie muss die Planung adaptiert werden?

Keine vorhanden.

3. Projektteam und Kooperation

- ◆ Gibt es wesentliche Veränderungen im Projektteam (interne Schlüsselmitarbeiter und Dritteileister)?
- ◆ Bei Konsortialprojekten: Beschreiben Sie die Zusammenarbeit im Konsortium.
- ◆ Gehen Sie auf Änderungen in der Arbeitsaufteilung ein. Gibt es Auswirkungen auf die Kosten- / Finanzierungsstruktur und die Zielsetzung?

Es werden laufend folgende Maßnahmen zur projektinternen Kommunikation gesetzt:

Interne Projekt Koordination/Kommunikation:

- ◆ Laufende informelle Koordination unter den Projektleitern über Projektfortschritt

Energieforschungsprogramm - 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

- ◆ Jour Fixe mit allen Projektmitarbeitern alle 1-2 Monate
- ◆ Dokumentation des Projektfortschritts durch Jour Fixe Präsentationen und Protokoll zum Jour Fixe sowie eine laufende Dokumentation der anstehenden und erledigten Arbeitspakete
- ◆ Erstellung von Berichten nach Abschluss von Meilensteinen oder Teilprojekten

WB interne Projektpräsentationen und Erfahrungsaustausch

Um die Projektergebnisse so rasch wie möglich operativ umsetzen zu können werden Projektergebnisse laufen Wienerberger intern kommuniziert und die Ergebnisse mit den Experten diskutiert.

IMWS interne Projektpräsentationen und Erfahrungsaustausch

Die wissenschaftliche Arbeit am IMWS ist durch ein hohes Maß an Interaktion zwischen allen Projektteilnehmern gekennzeichnet. Es finden mehrmals wöchentlich informelle Diskussionen zu wissenschaftlichen Methoden und den aktuellen Ergebnissen statt. Die Ausarbeitung internationaler Journalpublikationen ist in Arbeit und die wesentlichen Erkenntnisse werden auf internationalen Konferenzen präsentiert.

4. *nur Endbericht*: Wirtschaftliche und wissenschaftliche Verwertung

- ◆ Beschreiben Sie die bisherigen Verwertungs- und / bzw. Weiterverbreitungsaktivitäten. Ist eine Verwertung möglich?
- ◆ Listen Sie Publikationen, Dissertationen, Diplomarbeiten sowie etwaige Patentmeldungen, die aus dem Projekt entstanden sind, auf.
- ◆ Welche weiterführenden F&E-Aktivitäten sind geplant

5. Erläuterungen zu den Kosten

- ◆ Die Abrechnung ist als eigene Datei im Excel-Format hochzuladen. Die Verwendung der im eCall zur Verfügung gestellten Vorlage ist verpflichtend. Beachten Sie den Kostenleitfaden: www.ffg.at/kostenleitfaden bzw. Ausschreibungsdokumente
- ◆ Abweichungen vom Kostenplan sind an dieser Stelle zu beschreiben und zu begründen.
- ◆ Ist mit Änderungen am Kostenplan bis zum Projektende zu rechnen? Wenn ja, erläutern Sie diese. (Achtung: Größere Änderungen sind genehmigungspflichtig) (www.ffg.at/Kostenumschichtungen)

Da die Dissertanten Thomas Buchner und Raphael Suda erst mit 01.11.2018, respektive 01.02.2019 ihr Dienstverhältnis begründet haben wird in weiterer Folge um eine kostenneutrale Verlängerung des Projekts angesucht werden.

6. Projektspezifische Sonderbedingungen und Auflagen

- ◆ Gehen Sie auf projektspezifische Sonderbedingungen und Auflagen (laut §6 des Förderungsvertrags) ein, sofern diese im Förderungs- bzw. Werkvertrag vereinbart wurden.

Keine vorhanden.

7. Meldungspflichtige Ereignisse

Gibt es besondere Ereignisse rund um das geförderte Projekt, die der FFG mitzuteilen sind z.B.

- ◆ Änderungen der rechtlichen und wirtschaftlichen Einflussmöglichkeiten beim Förderungsnehmer
- ◆ Insolvenzverfahren
- ◆ Ereignissen, die die Durchführung der geförderten Leistung verzögern oder unmöglich machen
- ◆ Weitere Förderungen für dieses Projekt

Keine vorhanden.