

Dehnungsfugenanordnung und Rissicherheit bei Außenschalen zweischaliger Sichtmauerwerkswände

Das Problem ein- und mehrseitig verformungsbehindert gelagerter Verblendschalen hinsichtlich temperatur- und hygrysch bedingter Zwangsspannungen wurde bereits im Rahmen des Schwerpunktprogrammes „Bauphysik der Außenwände“ bearbeitet (siehe [Franke, Deckelmann, Stehr, 1999]). Nach der experimentellen Untersuchung der Beanspruchungs- und Verformungszustände des Mauerwerkes und deren numerischer Simulation bestand das Ziel der hier dokumentierten Arbeiten in der Ableitung eines Bemessungsvorschlages für die Anordnung vertikaler Dehnungsfugen.

Zunächst sind verschiedene ergänzende experimentelle Untersuchungen vorgenommen worden. Dazu gehörten Kriechversuche an bei Belastung knapp zwei Jahre alten Zugprobekörpern. Bei einer Versuchsdauer von ca. einem Jahr konnten die in Abhängigkeit der Zeit ermittelten Kriechzahlen mit einem einfach logarithmischen Ansatz approximiert werden. Als Endkriechmaß ergab sich wie bereits bei den in [Franke, Deckelmann, Stehr, 1999] beschriebenen Kriechversuchen ein mittlerer Wert von 3,6, wobei jedoch das höhere Belastungsalter offensichtlich zu einer sich zeitlich wesentlich langsamer entwickelnden Kriechneigung führt.

Auch die für eine zweite Serie von Zugversuchen verwendeten Zugprobekörper wiesen ein höheres Belastungsalter als diejenigen der ersten Serie auf. Grundsätzlich ergab sich ein vergleichbares Versagensverhalten, E-Modul $E_{Z,mw,33}$ und die maximale Zugbeanspruchbarkeit $\beta_{Z,mw}$ fielen jedoch um 21 bzw. 52% höher aus.

Eine Überprüfung der rechnerisch aus der ersten Serie von Zugversuchen bestimmten mittleren Haftscherfestigkeit β_{HS} erfolgte durch Haftscherversuche an 2-Stein-Körpern in Anlehnung an DIN 18555, Teil 5. Es wurden Körper ohne und mit eingelegter besandeter Bitumenpappe getestet. Herstellung, Nachbehandlung und Belastungsalter waren auf die Zugprobekörper der ersten Serie abgestimmt. Als mittlere Haftscherfestigkeit wurde ein Wert $\beta_{HS} = 0,35 \text{ MN/m}^2$ (ohne Bitumenpappe) ermittelt, welcher in guter Übereinstimmung mit dem numerisch bestimmten steht. Bei Einbringen der Bitumenpappe wird immer noch eine Festigkeit von $\beta_{HS} = 0,19 \text{ MN/m}^2$ erreicht.

Die großformatigen Wandprobekörper wurden dazu genutzt, den neben Gleiten in den Lagerfugen für Zugversagen von Mauerwerk charakteristischen Fall des Steinzugversagens experimentell zu untersuchen. Dazu sind die bereits durch Schubversagen geschädigten Probekörper durch eine Last von 100 kN senkrecht zu den Lagerfugen überdrückt worden. Das erneute Aufbringen einer Zugverformung durch Dehnung des Fundamentes (zum Versuchsprinzip siehe auch [Franke, Deckelmann, Stehr, 1999]) führte zum Aufreißen von Steinen in den unteren Schichten in Wandmitte. Die zugehörigen Fundamentdehnungen fielen dabei sehr unterschiedlich aus, was auf Brennrisse zurückgeführt wird, welche den tragenden Steinquerschnitt verschieden stark einschnürten.

Die beschriebenen Versuche an großformatigen Wandprobekörpern wurden mit Hilfe des bereits aus [Franke, Deckelmann, Stehr, 1999] bekannten Modelles nach der Finiten-Elemente-Methode abgebildet. Dieses wurde dahingehend modifiziert, daß den Steinen neben ideal elastisch – plastischem Materialverhalten bei Zugbeanspruchung parallel zu den Lagerfugen eine endliche Bruchenergie $G_{f,st}^I$ zugewiesen werden kann. Das Schubverhalten der Lagerfugen betreffend wurden elastische Verformung und Steuerung des Versagens getrennten Elementen zugeordnet. Alternativ wurde eine Formulierung über ein selbst definiertes Element geprüft. Bei der Berücksichtigung elastoplastischer Effekte wird grundsätzlich zwischen Zug- und Druckkriechen unterschieden, es besteht die Möglichkeit, auch Kriechverformungen senkrecht zur Lagerfuge in die Berechnung mit einzubeziehen.

Nach verschiedenen Genauigkeitsbetrachtungen hinsichtlich des Einflusses von Fehler-toleranz, Elementgröße sowie Lastschrittweite, welche nur für den stark nichtlinearen Wandendbereich Abweichungen bei den Berechnungsergebnissen ergaben, wurde auch die alternative Formulierung der Lagerfugen überprüft. Gegenüber dem bisher verwendeten Modell waren nur geringere Unterschiede der Berechnungsergebnisse zu verzeichnen. Allerdings war die Konvergenz der Rechengänge erheblich schlechter, weshalb auf eine weitere Verwendung verzichtet wurde.

Die Simulation der Versuche an großformatigen Wandprobekörpern, vorgenommen mit den bereits aus [Franke, Deckelmann, Stehr, 1999] bekannten Werkstoffkennwerten, machte deutlich, daß das Belasten der geschädigten Lagerfugen mit einer senkrecht wirkenden Beanspruchung offensichtlich zu einer sehr wirksamen mechanischen Verzahnung führt, welche im Modell durch einen erhöhten Reibbeiwert μ für die

betroffenen Fugen erfaßt wird. Dieser bestimmte sich über die Nachrechnung von Versuchen mit unterschiedlich hoher Auflast in Abhängigkeit des Auftretens von Schlupf in den geschädigten Lagerfugen. Es zeigte sich desweiteren, daß die aus Steinzugversuchen ermittelte Zugfestigkeit der Steine z. T. herabgesetzt werden mußte, um die jeweiligen Rißschäden zutreffend abbilden zu können, was ein weiteres Indiz für Vorschädigungen durch Brennrisse darstellt. Im Mittel kann von einer Reduktion um 30% ausgegangen werden.

Der quantitative Vergleich zwischen Experiment und numerischer Simulation erbrachte eine gute Übereinstimmung, insbesondere bei der Abbildung des Verformungszustandes über die Wandhöhe. Einschränkend ist anzumerken, daß die Bereitstellung einer endlichen Bruchenergie der Steine zu erheblichen Konvergenzproblemen führte, weshalb das Verhalten der Wandscheiben nach Eintreten des ersten Steinrisses nur näherungsweise erfaßt werden konnte.

Die Untersuchung von Verblendmauerwerk im Hinblick auf seine Rißsicherheit erfordert zunächst die Definition maßgebender Versagenszustände. Für Mauerwerk, dessen Schädigung infolge Gleitens der Lagerfugen eintritt, wird von einem Versagen ausgegangen, sobald eine Aufweitung der Stoßfugen von mehr als 0,2 mm festzustellen ist. Da Steinzugrisse bereits im Stadium eines Haarrisses zu erheblichen Einschränkungen beim optischen Eindruck der Fassade führen können, wird der Versagenszustand in diesem Fall über Erreichen der Steinzugfestigkeit über die Höhe eines Steines festgelegt.

Für die numerischen Untersuchungen bei unterschiedlichen konstruktiven Randparametern sind zwei Mauerwerkarten mit schubrißempfindlichen Lagerfugen (Typ 1, in Anlehnung an das Versuchsmauerwerk) bzw. zugrißempfindlichen Steinen (Typ 2, aus Literaturdaten) herangezogen worden. Variationen wurden hinsichtlich Abmessungen, Öffnungen, Behinderungsgrad, Werkstoffparameter, Berücksichtigung von Relaxation und Schwinden sowie statistischer Streuung der Werkstoffparameter vorgenommen.

Für Mauerwerk vom Typ 1 machten erste Berechnungen sehr schnell deutlich, daß aufgrund starker verformungsbedingter Nichtlinearitäten am Wandende mit entsprechenden, auf der sicheren Seite liegenden Vereinfachungen gearbeitet werden mußte, um zuverlässige Aussagen zum Eintritt des Versagens zu erhalten. Für geschlossene Wandscheiben beider Mauerwerkarten ergab sich eine Abhängigkeit der

Kontraktion beim Versagen vornehmlich von der Wandlänge. Während die unterschiedliche Ausprägung des behindernden Fundamentes gegenüber der Annahme völliger Dehnstarrheit nahezu keine Unterschiede bezüglich der Rißsicherheit nach sich zog, stieg diese erwartungsgemäß bei Definition des Wandfußpunktes in Anlehnung an DIN 1053, charakterisiert durch die experimentell ermittelten Werkstoffkennwerte, erheblich an. Berechnungen mit Berücksichtigung elastoplastischer Effekte zeigten, daß auf den Ansatz von Tageszyklen der Temperatur verzichtet werden konnte. Auch die zeitlich abhängige Lastgeschichte, d. h. Annahme von mittleren oder extremalen Tagestemperaturen der Fassade sowie gleichzeitigen Schwindens, war in Bezug auf die Kontraktion beim Versagen des Mauerwerkes nur von untergeordneter Bedeutung, genauso wie Kriechen senkrecht zur Lagerfuge. Interessanterweise stellte sich der Relaxationseinfluß für Mauerwerk vom Typ 1 als vernachlässigbar heraus, während sich für Mauerwerk vom Typ 2 erhebliche Erhöhungen der jeweiligen maximal aufzubringenden Verformungseinwirkungen einstellten.

Durch eine statistische Streuung der Materialparameter wurden die Kontraktionen beim Versagen im Mittel abgesenkt, für Typ 1 eher im Bereich kürzerer Wände, für Typ 2 durchgängig bei allen Wandlängen.

Das Einfügen einzelner, in Wandmitte angeordneter Wandöffnungen verlagert bei langen Wänden vom Typ 1 den Versagensort vom Wandende hin zur Brüstung. Trotzdem ist nur im Falle der DIN-Lagerung mit einer Verringerung der Rißsicherheit der 1-geschossigen Wand gegenüber dem Fall ohne Öffnung zu rechnen. Mauerwerk vom Typ 2 zeigt sich diesbezüglich wesentlich empfindlicher. Hier üben die Ecken der Fensteröffnung offenbar eine so hohe Kerbwirkung aus, daß das Versagen noch früher, als es bei einer durchgängigen Brüstung gleicher Abmessungen der Fall sein würde, eintritt. Dies gilt auch bei Berücksichtigung elastoplastischer Effekte.

Fensterbänder, sich nahezu über die gesamte Wandlänge erstreckend, führen zu einer starken Schubentlastung des Wandendes aufgrund der geringeren Schubsteifigkeit der Wandscheibe. Dadurch liegen im Fall des Mauerwerkes vom Typ 1 die Kontraktionen beim Versagen durchweg über den Werten der entsprechenden Bauteile ohne Öffnung. Auch bei Mauerwerk vom Typ 2 ist gegenüber den mittigen Einzelfenstern ein günstigeres Verhalten festzustellen, trotzdem bringt die Reduzierung des tragenden Querschnittes immer noch eine erhebliche Verringerung der Rißsicherheit gegenüber dem Fall ohne Öffnungen.

Zur Klärung der Frage, ob es an Gebäudeecken notwendig ist, vertikale Dehnungsfugen anzuordnen, ist zunächst ein linear elastisches, dreidimensionales FE-Modell eines 1 m hohen, um die Ecke geführten Verblendstreifens inklusive der notwendigen Maueranker erstellt worden. In Abhängigkeit unterschiedlicher Längen der behinderten und der behindernden Wand, zweier Schalenabstände, verschiedener Ankerdurchmesser sowie zweier Lagerungsvarianten der behindernden Querwand wurde für beide Mauerwerkarten eine äquivalente Federsteifigkeit zur Beschreibung der seitlichen Verformungsbehinderung im nichtlinearen, ebenen Versagensmodell berechnet. Es zeigte sich, daß der Behinderungsgrad bei in Längsrichtung frei verformbarer Querwand nahezu unabhängig von der Querwandlänge ist. Bei einer Lagerung der Querwand in Richtung der Lagerfugen führen vor allem längere Querwände zu einer erheblichen Vergrößerung der äquivalenten Federsteifigkeit. Beachtenswert sind desweiteren die erheblichen Biegebeanspruchungen, welche sich aufgrund der Verkrümmung der Verblendschale an der Gebäudeecke im Mauerwerk ergeben.

Die im Anschluß am ebenen Modell durchgeführten Berechnungen zur Rißsicherheit zeigten sehr schnell, daß der Einfluß der zusätzlichen Verformungsbehinderung für beide Typen von Mauerwerk als eher gering zu bewerten ist. Lediglich bei kurzen Wänden und gelagerter Querwand sind größere Reduktionen der Kontraktion beim Versagen festzustellen. Ungeklärt bleiben mußte die Frage, inwieweit Verkrümmungen der Schale zu einer Schädigung unmittelbar an den Gebäudeecken führen können. Diesbezüglich ist vor allem mit Biegezugrissen bei zugrißempfindlichem Mauerwerk zu rechnen.

Die Ergebnisse wurden aufbereitet, wobei für geschlossene Wandscheiben aus Mauerwerk des Types 1 ein Zusammenhang zwischen der Summe der linear ermittelten Schubkraft am Wandfußpunkt und der numerisch ermittelten Kontraktion beim Versagen in Abhängigkeit der Wandlänge hergestellt werden konnte. Eine Abschätzung der maximal aufzubringenden Verformungseinwirkung für geschlossene Wandscheiben aus Mauerwerk vom Typ 2 über die Höhe der linear ermittelten Zugspannung am Wandfußpunkt liegt dagegen stark auf der sicheren Seite. Für eine Zusammenfassung der Simulationsergebnisse wurden jeweils die Längen 1- und 2-geschossiger Wände bestimmt, für die eine Abkühlung um 30 K verbunden mit einer maximalen Schwindverkürzung von 0,095 mm/m gerade noch unbedenklich ist.

Aus der Zusammenstellung dieser Wandlängen wurden jeweils vier maßgebende Grenzwerte herausgezogen, deren Verhalten gegenüber leicht veränderten Werkstoffkennwerten abschließend untersucht worden ist. Während bei schubrißempfindlichem Mauerwerk interessanterweise eine Erhöhung der Haftscherfestigkeit durch Verlagerung des entstehenden Treppenrisse zu einer Verschlechterung der Rißsicherheit führt, wirkt sich eine Veränderung der Steinzugfestigkeit erwartungsgemäß positiv auf die Rißsicherheit aus. Eine Gegenüberstellung mit entsprechend ermittelten Werten der rißfreien Wandlänge nach Schubert für geschlossene Wandscheiben zeigt, daß sich nach den eigenen Berechnungen bei schubrißempfindlichen Mauerwerk mit einer Überbindelänge von 115 mm größere maximale Wandlängen ergeben, bei zugrißempfindlichen Steinen ist diesbezüglich eine Abhängigkeit von der Festigkeit erkennbar.

Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen ermöglichen damit eine nach Versagensart des Mauerwerkes differenzierte Aussage zum notwendigen Abstand vertikaler Dehnungsfugen. Dabei sind die tabellierten Werte maximaler Wandlängen als Abschätzung zu verstehen, da weitere Parameterstudien eine weitergehende Absicherung erbringen müssen. Insbesondere die Erkenntnisse hinsichtlich schubrißgefährdeten Mauerwerkes sind wichtig, da gerade im norddeutschen Raum die Verwendung hochfester, d. h. kaum zugrißanfälliger Klinker für Verblendfassaden sehr verbreitet ist.

Ausblickend sei angemerkt, daß weitergehende Untersuchungen sich mit der für schubrißempfindliches Mauerwerk maßgebenden Frage der Lage der Treppenrisse befassen sollten, insbesondere mit den in dieser Forschungsarbeit vorgenommenen diesbezüglichen Vereinfachungen, welche z. T. zur Unterschätzung der Rißsicherheit der Verblendschale führen.

Mit Bezug auf steinzugrißgefährdetes Mauerwerk bedarf es zusätzlicher Forschungstätigkeit zum Zugkriechverhalten von Mauerwerk.

Desweiteren sind Berechnungen mit weitreichenderen Variationen der Werkstoffparameter vorzunehmen, um einen möglichst großen Bereich für Verblendschalen verwendeter Mauerwerksorten abzudecken. Hierbei ist auf mögliche Vereinfachungen zur Reduzierung der Anzahl notwendiger Berechnungen zu achten. Gleichzeitig ist der günstige Einfluß von Kunststoff-Folien bei DIN-Lagerung in Betracht zu ziehen.

Zur detaillierten Klärung der Problematik des an Gebäudeecken im Verband hergestellten Mauerwerkes sind schließlich Betrachtungen an einem dreidimensionalen Versagensmodell notwendig.

| | |
|-------------------------------|---|
| <i>Forschungsbericht:</i> | <i>abgeschlossen November 2001, 105 Seiten, Kopie € 30,- inkl. MwSt. zuzüglich Versandkosten</i> |
| <i>Bezug bei:</i> | <i>Fraunhofer IRB Verlag, Nobelstraße 12, D-70569 Stuttgart, Tel: (0711)970-2500, Fax: (0711)970-2508, E-mail: irb@irb.fhg.de</i> |
| <i>Bestellnummer:</i> | <i>T 2974</i> |
| <i>Auftraggeber/Förderer:</i> | <i>Deutsche Forschungsgemeinschaft -DFG-, Bonn</i> |
| <i>Ausführende Stelle:</i> | <i>TU Hamburg-Harburg, Arbeitsbereich 3-09 Bauphysik und Werkstoffe im Bauwesen</i> |