

## KURZBERICHT

**F 940**

### **Rationellere Herstellung von zweischaligem Mauerwerk durch Linienverankerung von Vormauerschalen**

Prof. Dr.-Ing W. Brameshuber  
Dipl.-Ing. U. Schmidt

Prof. Dr.-Ing C.-A. Graubner  
Dipl.-Ing. L. Richter

**Aktenzeichen: Z6 – 10.07.03 – 05.09 / II 13 – 80 01 05 9**

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung gefördert.  
Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

## 1 ZIEL DER FORSCHUNGSAUFGABE

Die zweischalige Wand mit Wärmedämmung ist als Außenmauerwerk eine seit langem bewährte Wandkonstruktion, mit der alle wesentlichen Anforderungen - Tragfähigkeit, Wärme-, Schall- und Witterungsschutz – optimal erfüllt werden können. Die Verbindung der Vormauerschale mit der tragenden Innenschale erfolgt in der Regel durch die flächenhafte Anordnung von Drahtankern. Diese Bauweise ist in DIN 1053-1 geregelt. Durch eine linienhafte Verankerung, beispielsweise geschossweise, können technische und wirtschaftliche Vorteile erzielt werden. Die linienhafte Verankerung ist nach DIN 1053-1 grundsätzlich zulässig, Bemessungs- und Ausführungsregeln unter Bezug auf die relevanten Baustoffeigenschaften – i. W. die Biegezugfestigkeit der Vormauerschale fehlen bislang. Wäre dies der Fall, könnten der Bauvorgang für diese bewährte Außenwandkonstruktion deutlich rationalisiert sowie eine höhere Ausführungssicherheit erreicht werden.

Ziel des Forschungsvorhabens ist daher die Erarbeitung der wesentlichen Grundlagen für eine rationellere Ausführung von zweischaligem Mauerwerk durch linienhafte Verankerung.

## 2 DURCHFÜHRUNG DER FORSCHUNGSAUFGABE

Zunächst wurden in einer Literaturrecherche grundsätzlich mögliche Traglastmodelle und Berechnungsverfahren für die zweiachsige Biegebeanspruchung der Verblendschalen zusammengestellt. Es folgt eine vergleichende Betrachtung und Bewertung der Verfahren untereinander. Die Literaturrecherche wurde bezüglich Konstruktions- und Ausführungsempfehlungen von linienhaften Vormauerschalen ergänzt.

Die vorliegenden Untersuchungsberichte zur Mauerwerk-Biegezugfestigkeit, der wesentlichen Baustoffkenngröße bei biegebeanspruchtem Mauerwerk, wurden zusammengestellt. Die Untersuchungsergebnisse wurden in Bezug auf die Überprüfung von Zusammenhängen zwischen der Mauerwerk-Biegezugfestigkeit und ersatzweise bestimmbar Baustoffkenngrößen ausgewertet. Es wurden charakteristische Biegezugfestigkeitswerte parallel und senkrecht zu den Lagerfugen angegeben. Die Biegesteifigkeit der Wände wurde näherungsweise anhand von angegebenen Last-Durchbiegungskurven bestimmt. Ferner wurde die Literatur bezüglich Untersuchungen mit zweiachsialer Beanspruchung, d. h. Biegebeanspruchung bei gleichzeitiger Normalkraftbeanspruchung, gesichtet.

Auf Grundlage der Ergebnisse der Literaturrecherche wurde ein Versuchsprogramm erarbeitet. Es wurden zunächst umfangreiche Untersuchungen an den verwendeten Baustoffen durchgeführt. Dies erfolgte zum einen im Hinblick darauf, die Biegezugversuche an Mauerwerkswänden auf Grundlage der wesentlichen Baustoffeigenschaften zutreffend beschreiben zu können, zum anderen jedoch auch vor dem Hintergrund, dass zur genaueren Analyse des Tragverhaltens der Mauerwerkswände Finite-Elemente-Simulationen ggf. erforderlich werden. Mit Hilfe der durchgeführten Untersuchungen können die vollständigen Stoffgesetze der Mauersteine und des Verbundes unter Scher- und Zugbeanspruchung, die auch das Nachbruchverhalten

beschreiben, ermittelt werden. Für die Nutzung der Systemtragfähigkeit sind diese von wesentlicher Bedeutung. Ferner soll mit Ersatzprüfverfahren der Nachweis entsprechender Biegezugfestigkeitswerte für das Mauerwerk erfolgen. Anschließend wurden Biegezugversuche parallel und senkrecht zu den Lagerfugen (insgesamt 9 Versuchsserien mit jeweils 3 Prüfkörpern) an Verblendmauerwerk aus Vollziegeln und Hochlochziegeln durchgeführt. Dabei wurde aufgrund fehlender Erkenntnisse insbesondere der Einfluss des Überbindemaßes auf die Biegezugfestigkeit des Verblendmauerwerks untersucht. Zur Bestimmung der Biegesteifigkeit der Mauerwerkswände und Beschreibung der Versagensmechanismen im Mauerwerk wurden umfangreiche Verformungsmessungen durchgeführt.

Die Literaturrecherche und Bewertung der verschiedenen Bemessungsmodelle hat gezeigt, dass aufgrund fehlender Erkenntnisse zum Systemtragverhalten der Verblendschalen die Bestimmung der Tragfähigkeit anhand eines horizontalen Durchlaufträgers erfolgen sollte. Dabei kann eine Erhöhung der Tragfähigkeit durch eine plastostatische Schnittgrößenermittlung erfolgen. Hierfür muss die Größe des plastischen Biegemomentes infolge Reibung bekannt sein. Zur Beschreibung des auflastabhängigen Tragverhaltens nach Überschreiten der Biegezugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen wurden Vierpunkt-Biegeversuche unter axialer Auflast senkrecht zu den Lagerfugen sowie Torsionsversuche bei gleichzeitiger Normalkraftbeanspruchung durchgeführt.

### **3 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE**

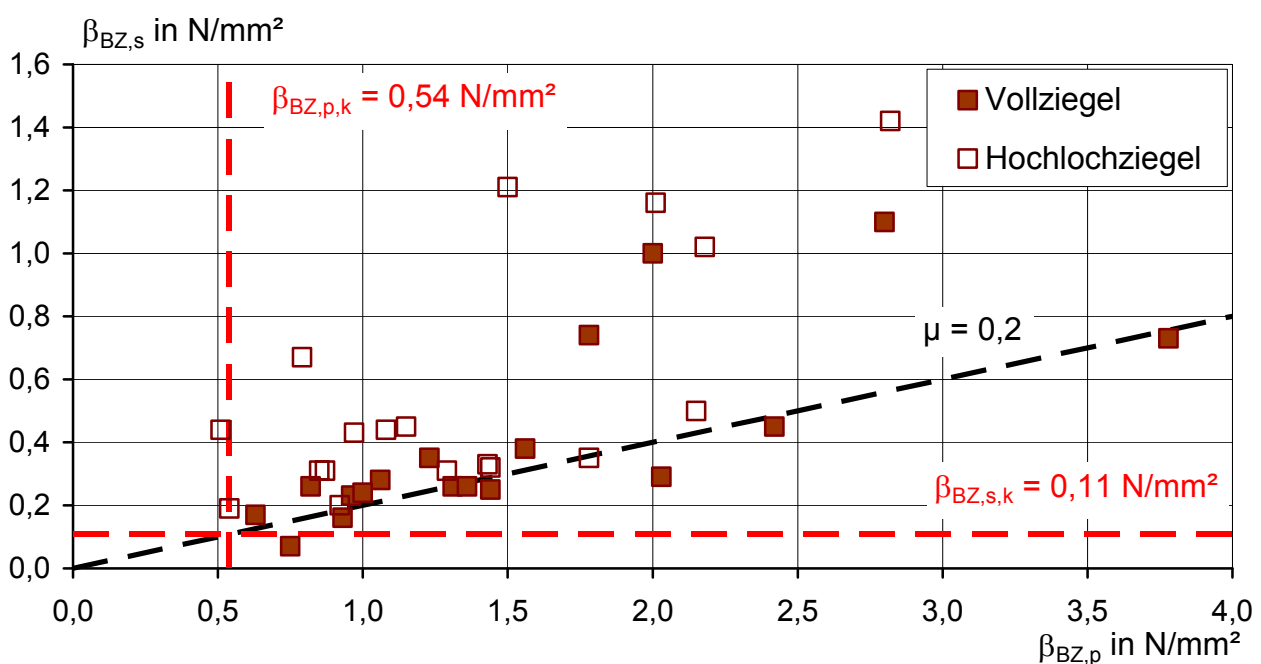
#### **3.1 Ergebnisse der Literaturrecherche**

Auf Grundlage der Literaturrecherche wurden zunächst mögliche Berechnungsmodelle für die Bemessung von zweiachsig gespannten Verblendschalen zusammengestellt und bewertet. Es wurde ein Berechnungsverfahren auf Grundlage der Kanadischen Mauerwerknorm für die Anwendung modifiziert. Die besondere Lagerung der Vorsatzschale, mit in den Mörtel eingebundenen Ankern, kann im Grenzzustand der Tragfähigkeit zu einem Verlust der horizontalen Halterung führen, so dass die vorgestellten Berechnungsmodelle nur bedingt empfohlen werden können. Vorzuziehen ist daher die Bestimmung der Tragfähigkeit eines horizontalen Durchlaufträgers. Die Herleitung eines entsprechenden Bemessungsmodells konnte im Rahmen dieser Forschungsarbeit nicht erfolgen. Erste durchgeführte Arbeiten hierzu an der TU Darmstadt haben gezeigt, dass zur Beschreibung des Tragverhaltens bei einer spaltenweise Verankerung die Kenntnis des plastischen Materialverhaltens nach Überschreiten der Biegezugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen und reinem Reibungsverhalten bei Fugenversagen erforderlich ist, um die Tragfähigkeitserhöhung durch die plastostatische Schnittgrößenermittlung nutzen zu können. Die weitere Literaturrecherche bezüglich Konstruktions- und Ausführungsempfehlungen beschränkt sich auf einige, insbesondere aus der Schweiz stammende Konstruktionsregeln bzw. Regellösungen für einen statischen Nachweis.

Auf Grundlage der Auswertung früherer Biegezugversuche parallel und senkrecht zu den Lagerfugen - in Bild 1 ist die Biegezugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen in Abhängigkeit von der Biegezugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen dargestellt - erscheint

der Ansatz einer charakteristischen Biegezugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen von  $0,54 \text{ N/mm}^2$  und senkrecht zu den Lagerfugen von  $0,11 \text{ N/mm}^2$  vertretbar.

Dabei ist anzumerken, dass der heutigen Sicherheitsphilosophie folgend die versuchsmäßig bestimmten Biegezugfestigkeitswerte von Mauerwerk auf jeweilige Mindestwerte der Haftscherfestigkeit, der Steinzugfestigkeit und Haftzugfestigkeit umgerechnet werden müssten. Dies setzt jedoch zutreffende Rechenansätze voraus, die derzeit noch nicht verfügbar sind. Es wird an dieser Stelle ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die charakteristischen Biegezugfestigkeitswerte aus Versuchen abgeleitet wurden, bei denen die Verbundfestigkeit deutlich über den Anforderungswerten nach DIN V 18580 mit dem Kalksand-Referenzstein liegen. Bei Ansatz der o. g. charakteristischen Biegezugfestigkeitswerte in der Bemessung muss sichergestellt werden, dass diese Werte bei den verwendeten Mauerstein-Mauermörtelkombinationen erreicht werden. Der Orthotropiefaktor (Verhältniswert der Biegezugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen zur Biegezugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen) beträgt für die o. g. charakteristischen Werte dann  $\mu = \beta_{\text{BZ},s,k} / \beta_{\text{BZ},p,k} = 0,2$ .



**Bild 1:** Biegezugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen in Abhängigkeit der Biegezugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen

Ein Zusammenhang zwischen der Mauerwerkbiegezugfestigkeit und ersatzweise bestimmbarer Kenngrößen konnte auf Grundlage der ausgewerteten Datenbank nur für die Mauerwerk-Biegezugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen und die Biegehaftzugfestigkeit von Mauerwerkpfeilern abgeleitet werden. Durch die Auswertung von Last-Verformungskurven konnten Anhaltswerte für die Biegesteifigkeit der Verblendschalen bei vertikaler und horizontaler Spannrichtung ermittelt werden. Untersuchungen zum

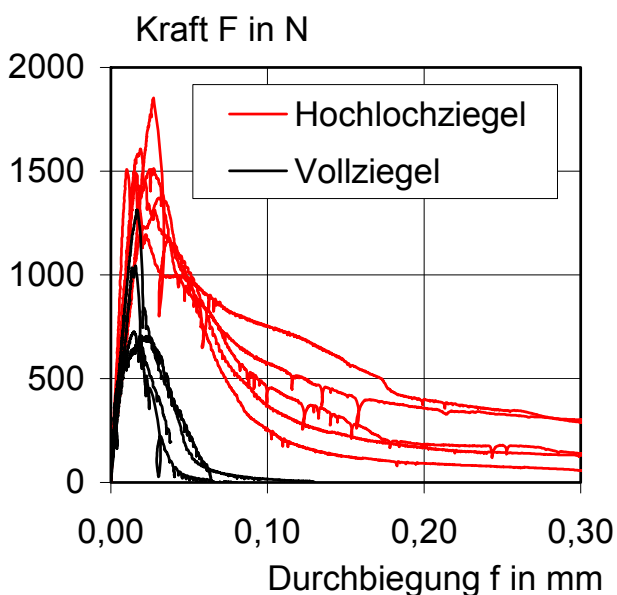
Biegetragverhalten parallel zu den Lagerfugen bei gleichzeitiger Normalkraftbeanspruchung – insbesondere zur Beschreibung des Reibungsverhaltens – liegen nur in sehr begrenztem Umfang vor. Das Versuchsprogramm wurde insbesondere vor dem Hintergrund der Bedeutung dieses Materialverhaltens und der fehlenden Erkenntnisse hierzu erarbeitet.

### 3.2 Experimentelle Untersuchungsergebnisse

#### Biegebeanspruchung senkrecht zu den Lagerfugen

Auf Grundlage der vorliegenden Untersuchungsergebnisse erscheint die Bestimmung der Biegehaftzugfestigkeit als Ersatzprüfverfahren für die Bestimmung der Mauerwerk-Biegezugfestigkeit senkrecht zur Lagerfuge grundsätzlich geeignet. Die Auswertung der Datenbank hat einen Verhältniswert von Mauerwerk- zu Pfeilerbiegezugfestigkeit von  $\beta_{BZ,mw,s}/\beta_{BHZ} = 0,76$  ergeben. Die Untersuchungen mit dem Bond-Wrench-Verfahren zeigten eine sehr große Streuung. Das Prüfverfahren ist daher nicht als Ersatzprüfverfahren für die Biegezugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen geeignet. Die Verwendung dieses Prüfverfahrens erscheint jedoch zur Qualitätskontrolle nach Bestimmung eines materialspezifischen Verhältniswertes bei Nachweis der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse bzw. zur groben Abschätzung der Biegezugfestigkeit grundsätzlich möglich.

In Bild 2 ist exemplarisch ein Vergleich der vollständig bestimmten Last-Durchbiegungskurven von Pfeilern aus Loch- und Vollziegeln dargestellt. Der deutlich langsamere Lastabfall bei den Lochziegeln ist auf die Verzahnung der Mörteldorne zurückzuführen.

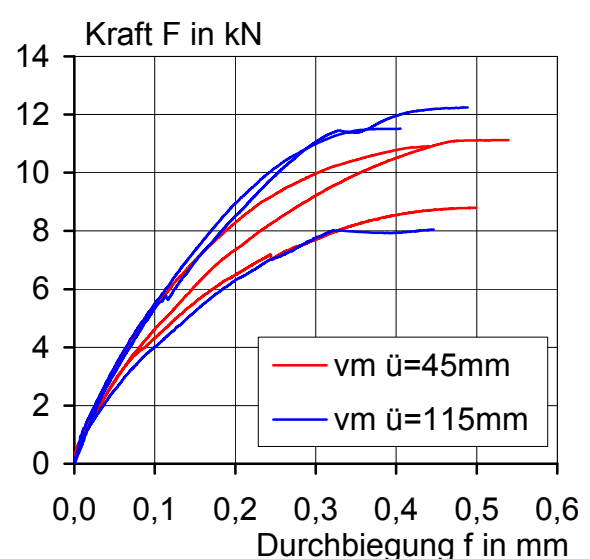
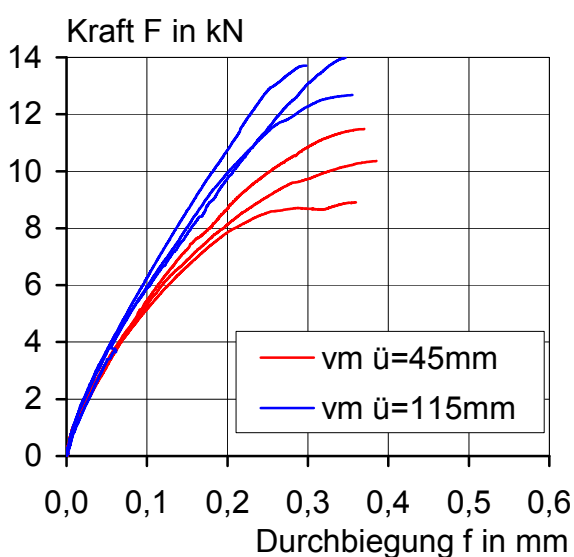


**Bild 2:** Biegehaftzugversuche an Pfeilern;  
Last-Durchbiegungskurven von Hoch-  
lochziegeln H2 und Vollziegeln W2  
mit Normalmörtel

### Biegebeanspruchung parallel zu den Lagerfugen

In Bild 3 sind die Last-Durchbiegungskurven von Mauerwerkswänden aus Vollziegeln und Hochlochziegeln in Kombination mit einem Normalmörtel jeweils mit halbsteinigem und nach DIN 1053-1 minimal zulässigem Überbindemaß von 45 mm dargestellt. Die Reduzierung des Überbindemaßes auf das Mindestmaß nach DIN 1053 führt zu maximal rd. 25 % niedrigeren Biegezugfestigkeitswerten (Verhältniswert rd. 1,3). Damit ist der Einfluss des Überbindemaßes auf die Biegezugfestigkeit wesentlich geringer als nach den Bemessungsgleichungen in DIN 1053-1, in denen das Überbindemaß linear berücksichtigt wird. Demnach beträgt der Verhältniswert der Biegezugfestigkeiten von halbsteinigem zu minimal zulässigem Überbindemaß rd. 2,5. Unabhängig von der Stoßfugenausführung und dem Überbindemaß zeigen die Wände aus Hochlochziegeln einen ausgeprägten nichtlinearen Kurvenverlauf mit größeren Durchbiegungen bei Erreichen der Maximallast. Dies ist vermutlich auf den sich günstig auswirkenden Verzahnungseffekt der Mörteldorne zurückzuführen.

Die kleinere Biegesteifigkeit der Wände aus Hochlochziegeln ist auf den höheren E-Modul der Vollsteine zurückzuführen. Das Überbindemaß hat nahezu keinen Einfluss auf die Biegesteifigkeit. Eine plötzliche, signifikante Änderung der Steifigkeit (Steigung), die auf ein Versagen des Haftverbundes in den Stoßfugen hinweist – wie in der Literatur teilweise erwähnt – war bei den hier durchgeführten Untersuchungen nicht zu beobachten.



**Bild 3:** Kraft-Durchbiegungs-Linien (mittlere Mittendurchbiegung)  
Vollziegel W2 (links) und Hochlochziegel H2 (rechts) mit Normalmörtel  
Prüfung der Biegezugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen

Es wurde versucht, einen Zusammenhang zwischen Mauerwerkbiegezugfestigkeit und der Haftscherfestigkeit bzw. Torsionshaftscherfestigkeit herzuleiten. Der auf Grundlage der hier durchgeführten Versuche ermittelte Zusammenhang zeigte für frühere Untersuchungen teilweise große Unterschiede zwischen experimentell und rechnerisch bestimmten Werten. Dies ist u. a. auf die große Streuung bei den Materialeigenschaften insbesondere des Verbundes zurückzuführen. Grundsätzlich erscheint das Prüfverfahren zur Bestimmung der Torsionshaftscherfestigkeit jedoch als Ersatzprüfverfahren zur Ermittlung der Mauerwerkbiegezugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen geeignet.

### Einfluss einer Normalkraftbeanspruchung

Eine Normalkraftbeanspruchung senkrecht zur Lagerfuge führt im Fall von Fugenversagen zu einer Steigerung der Biegezugfestigkeit sowie zu einem plastischen Biegemoment infolge Gleitreibung, welches das Nachbruchverhalten charakterisiert. Zur Ermittlung des Auflasteinflusses auf das Tragverhalten wurden Torsionsversuche und Biegezugversuche parallel zur Lagerfuge bei gleichzeitiger Normalkraftbeanspruchung an Vollziegeln W2 und Hochlochziegeln H2 mit einem Normalmörtel durchgeführt.

In Bild 4 sind vergleichend die Ergebnisse der Torsionsversuche an Voll- und Lochziegeln für 3 unterschiedliche Auflaststufen dargestellt. Sowohl der Zusammenhang zwischen Auflast und maximalem Torsionsmoment als auch zwischen Auflast und Restmoment (Gleitreibung) konnte zutreffend durch quadratische Parabelansätze beschrieben werden. Die ermittelten Gleitreibungskoeffizienten sind auflastabhängig, wobei die Werte für Hochlochziegel (Wertebereich 1,15...1,60) aufgrund der Verzahnungseffekte größer sind als bei den Vollziegeln (Wertebereich 1,01...1,25).

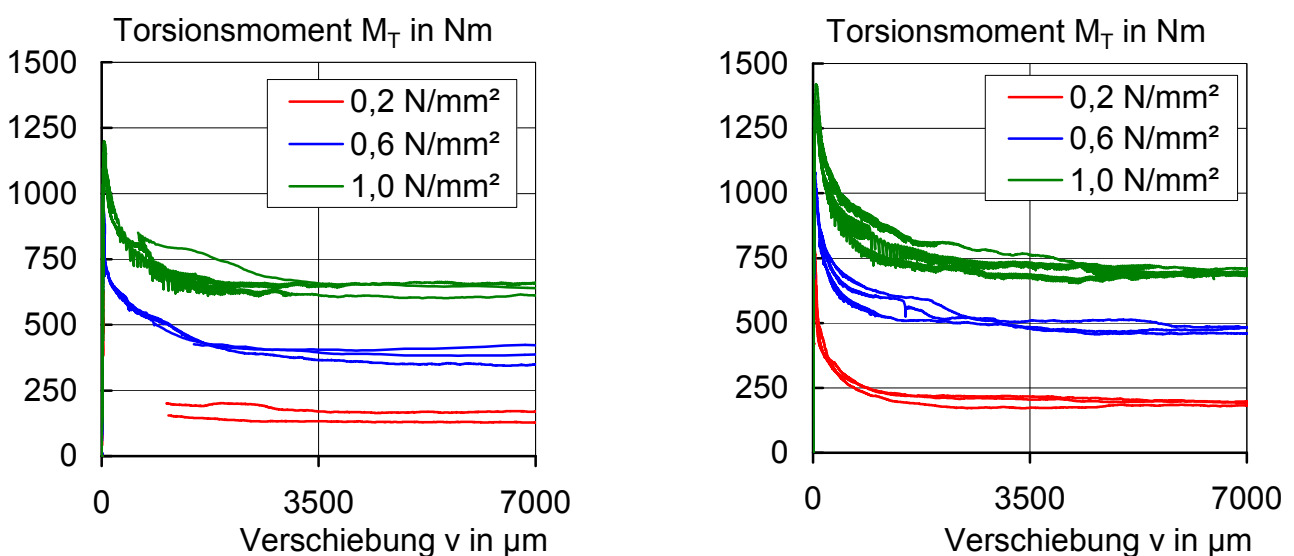
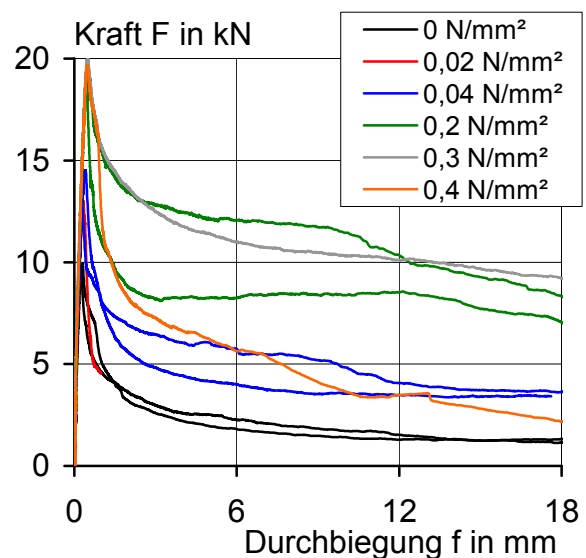


Bild 4: Torsionsmoment-Verschiebungslinien, Vollziegel W2 (links) und Hochlochziegel H2 (rechts) mit Normalmörtel bei verschiedenen Auflaststufen



In Bild 5 links ist der Versuchsaufbau zur Bestimmung des Biegetragverhaltens von Mauerwerkswänden bei gleichzeitiger Normalkraftbeanspruchung dargestellt. Die an Mauerwerk aus Vollsteinen bei unterschiedlichen Auflaststufen bestimmten Last-Durchbiegungskurven zeigt Bild 5 rechts. Für die untersuchten Mauerstein-Mauermörtelkombinationen konnten Zusammenhänge zwischen den Torsionsversuchen und den Biegezugversuchen bezüglich der maximalen Traglast und des Reibungsverhaltens aufgezeigt werden.

Mit steigender Normalspannung nimmt die Biegezugfestigkeit zunächst zu. Bei den Vollsteinen ist bei einer Normalspannung von rd.  $\sigma \geq 0,2 \text{ N/mm}^2$  und bei den Lochsteinen ab  $\sigma \geq 0,04 \text{ N/mm}^2$  keine nennenswerte Festigkeitssteigerung mehr zu beobachten, da zunehmend Misch- bzw. Steinversagen aufgetreten ist. Aufgrund des Steinversagens ist auch in Bild 5 rechts bei höherer Normalspannung (hier  $\sigma = 0,4 \text{ N/mm}^2$ ) ein steilerer Lastabfall sowie eine geringere Restreibung im Vergleich zu den Wänden mit niedriger Auflast zu erkennen. So kann eine höhere Verbundfestigkeit, auch bedingt durch den auflastabhängigen Reibungsanteil infolge einer höheren Auflast, zwar zunächst zu einer höheren Biegezugfestigkeit führen, durch das geringere Restmoment infolge Misch- bzw. Steinversagen kann sich diese jedoch ungünstig auf die Gesamttragfähigkeit bei einer spaltenweise Verankerung auswirken.



**Bild 5:** Versuchseinrichtung zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen mit Auflast (links) und Kraft-Durchbiegungs-Linien (mittlere Mittendurchbiegung) der Mauerwerkswände aus Vollziegeln W2 mit Normalmörtel bei verschiedenen Auflaststufen

#### 4 SCHLUSSFOLGERUNG

Zusammenfassend liefern die durchgeführten Untersuchungen wesentliche Erkenntnisse über das Biegetragverhalten von Verblendmauerwerk, die für die Herleitung eines



zutreffenden Bemessungsmodels, das die Systemtragfähigkeit des Mauerwerks ausnutzt, jedoch nicht überschätzt, erforderlich sind. Weiterer Forschungsbedarf besteht in der Herleitung eines entsprechenden Bemessungsmodels. Erste durchgeführte Arbeiten hierzu an der TU Darmstadt haben gezeigt, dass eine spaltenweise Verankerung zielführend erscheint. Insbesondere fehlen jedoch noch Kenntnisse zum Tragverhalten der Anker und deren Auswirkung auf die Ermittlung der Systemtragfähigkeit bei ein- und zweiachsig lastabtragenden Verblendschalen. Weitere ungelöste Probleme bestehen in der konstruktiven Ausführung, z. B. in der Fixierung der Wärmedämmung in der Hohl-schicht. Auch Hilfsmittel zur Bemessung des Hintermauerwerks für die linienhafte Beanspruchung durch die Ankerreihen wären für die praktische Anwendung unterstützend. Weiterer Forschungsbedarf besteht ferner in der Absicherung bzw. der Herleitung von Zusammenhängen zwischen Biegezugfestigkeit und ersatzweise bestimm-baren Baustoffkenngrößen.