

F 7074**Überprüfung der ansetzbaren Verbundspannungen für die Verankerung der Bewehrungsstäbe in Mauerwerk nach DIN 1053-3 und DIN EN 1996-1-1**

Aktenzeichen des Forschungsprojektes: ZP 52-5-15.88-1312/09

ZUSAMMENFASSUNG

Die Bewehrung im Mauerwerk kann zur Lastabtragung (statisch in Rechnung gestellte Bewehrung) oder aber als so genannte konstruktive Bewehrung zur Beschränkung von Rissbreiten eingesetzt werden. Tragende Bauteile aus bewehrtem Mauerwerk sind in DIN 1053-3 /X1/ geregelt. Für die Bemessung konstruktiver Bewehrung zur Rissbreitenbeschränkung gibt es in Deutschland derzeit kein Regelwerk. Auf europäischer Ebene ist die Bemessung von Mauerwerk, auch die von bewehrtem Mauerwerk mit statisch in Rechnung gestellter und konstruktiver Bewehrung, in DIN EN 1996-1-1 (Eurocode 6) /X3/ geregelt. Mit Ausnahme des Teilsicherheitsbeiwertes ($\gamma_M = 10$) sind im Nationalen Anhang des Eurocode 6 /X4/ keine Regelungen von bewehrtem Mauerwerk enthalten. Im nationalen bzw. europäischen Regelwerk werden für den Nachweis der Verankerung der Bewehrung im Mauerwerk zulässige Grundwerte der Verbundspannungen bzw. charakteristische Verbundfestigkeiten in Abhängigkeit der Mörtel- bzw. Betondruckfestigkeitsklasse angegeben. Dabei wird zwischen Bewehrung, die in Lagerfugen eingelegt und die in Formsteinen bzw. Aussparungen angeordnet wird, unterschieden.

Es war davon auszugehen, dass die Werte der Verbundfestigkeit gemäß DIN 1053-3 und Eurocode 6 zu hoch bzw. nicht für alle Mauersteinarten ansetzbar sind. Im Rahmen der Überarbeitung der DIN 1053-3 und vor dem Hintergrund der zukünftigen Einführung des Eurocode 6 sollten daher die Verbundfestigkeiten, im Vergleich zu den Werten nach DIN 1045-1 /X5/, unter Berücksichtigung verschiedener Einflussfaktoren überprüft werden. Ziel des vorliegenden Forschungsvorhabens war es, anhand aus der Literatur entnommener und eigener experimenteller Untersuchungen neue, auf der sicheren Seite liegende, charakteristische Werte für die Übertragung von Verbundspannungen in bewehrtem Mauerwerk vorzuschlagen. Dazu wurde zunächst eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt. Hauptaugenmerk lag hierbei auf den Grundlagen für die Festlegung der Verbundspannungen in den verschiedenen Normen. Die aus der Literatur gewonnenen Untersuchungsergebnisse zum Verbundverhalten in bewehrtem Mauerwerk wurden zusammengestellt und ausgewertet. Über den Verbund zwischen Bewehrung und Mörtel in der Lagerfuge existieren zahlreiche Veröffentlichungen. Dagegen lassen sich über den Verbund der Bewehrung in Formsteinen und Aussparungen nur wenige Angaben aus der Literatur gewinnen.

In einem umfangreichen Versuchsprogramm wurden die Verbundeigenschaften zwischen Bewehrung und Mauerwerk sowohl bei horizontal eingelegter Bewehrung in Lagerfugen als auch bei vertikal angeordneter Bewehrung in Aussparungen in Ausziehversuchen untersucht. Als Referenzuntersuchungen wurden auch Untersuchungen ohne Kontakt des Mörtels zum Steinmaterial nach RILEM /X8/ durchgeführt, um Anhaltswerte für das allgemeine Verbundverhalten zu erhalten und

mit dem in Mauerwerk zu vergleichen. Die verwendeten Normalmörtel der Mörtelgruppen IIa, III und IIIa wurden so gewählt, dass die Mörteldruckfestigkeit nach 28 Tagen der Normdruckfestigkeit der jeweiligen Mörtelgruppe nach DIN V 18580 /X6/ entsprach. Als Referenzbeton wurde ein C25/30 nach /X8/ verwendet. Als Mauersteine wurden vorrangig Kalksandsteine herangezogen, da sie laut Angaben in der Literatur die geringsten aufnehmbaren Verbundspannungen ergeben. Der Bewehrungsdurchmesser wurde zwischen 6 und 14 mm variiert.

Eines der Ziele der experimentellen Untersuchungen war es auch, den Einfluss der Herstellart des Mauerwerkprüfkörpers auf die Verbundeigenschaften, unter Beachtung der Ausführungsregeln nach DIN 1053-3, zu untersuchen. Gemäß dieser Norm sind kleine Aussparungen nach jeder Steinlage, große Aussparungen je Meter Wandhöhe zu verfüllen und zu verdichten. Sonderregelungen gelten für Mauertafeln nach DIN 1053-4 /X7/, bei denen eine geschosshohe Verfüllung auch für kleine Aussparungen zugelassen wird. Aus diesem Grund wurde zusätzlich eine geschosshohe Verfüllung ($h = 2,50 \text{ m}$) untersucht. Damit sollte überprüft werden, ob ein ausreichender Verdichtungsgrad und eine entsprechende Festigkeit erreicht werden können. Außerdem sollte untersucht werden, ob durch die große Fallhöhe eine Entmischung des Mörtels auftreten kann.

Mit der Theorie des verschieblichen Verbundes wurden aus den gemessenen Verbundspannungs-Schlupfbeziehungen die erforderlichen Verankerungslängen der Bewehrung für den Gebrauchs- und den Bruchzustand und die zugehörigen maßgebenden mittleren Verbundspannungen berechnet.

Die Versuche an in Lagerfugen eingebetteter Bewehrung belegen, dass die Steinart einen maßgebenden Einfluss auf den Verbund zwischen dem Bewehrungsstahl und dem Mörtel der Lagerfuge ausübt. Das unterschiedliche Saugverhalten der Steine während des Erhärtungsvorganges bewirkt auch eine unterschiedliche Festigkeit des Mörtels. Die Versuche mit Mauerwerkprüfkörpern aus Hochlochziegeln und Leichtbetonsteinen erreichten fast 50 % höhere Verbundspannungswerte als die aus Kalksand- und Porenbetonsteinen. Die ermittelten Verbundspannungen der Mauerwerkprüfkörper aus Kalksandsteinen sind stets kleiner als die in DIN 1053-3, in der Entwurfsfassung der DIN 1053-3 /X2/ und im Eurocode 6 angegebenen Werte.

Die Versuchsergebnisse aus eigenen Untersuchungen von Lagerfugenbewehrung lagen unter denen aus der Literatur. Dies liegt grundsätzlich daran, dass in den aus der Literatur entnommenen Untersuchungen Normalmörtel gewählt wurden, die höhere Mörteldruckfestigkeiten erreicht haben, als die für die eigenen Untersuchungen angestrebte Mindestdruckfestigkeit nach /X6/. Abgesehen davon, werden den Literaturergebnissen zufolge bei Verwendung von Zusatzmitteln (vor allem Verzögerer und Luftporenbilder), die zur Verbesserung bestimmter Mörtel­eigenschaften eingesetzt werden, geringere Fugendruck- und Verbundfestigkeiten erreicht. Generell wurde mit steigender Mörteldruckfestigkeit eine deutlich geringere Zunahme der aufnehmbaren Verbundspannungen festgestellt als dies bei der Festlegung der zulässigen Grundwerte der Verbundspannungen in DIN 1053-3 angenommen wurde.

Für die Verbundwerte in Formsteinen stehen nur wenige Versuchsergebnisse aus der Literatur zur Verfügung. Die Verbundspannungen liegen dabei stets unter denen für Bewehrung in Lagerfugen.

Dies ist auf den Einfluss des Steinmaterials, eine erhöhte Wasserzugabe für bessere Fließeigenschaften sowie schlechtere Verdichtungsmöglichkeiten, vor allem bei geringer Steinbreite, zurückzuführen. Die Versuchsergebnisse belegen, dass die charakteristischen Verbundfestigkeiten für horizontal angeordnete Bewehrung in Formsteinen in DIN 1053-3 und Eurocode 6 zu hoch angesetzt sind und deshalb dringend überarbeitet werden müssen.

Vor allem bei vertikaler Bewehrungsführung liegen alle Versuchsdaten mit Normalmörtel deutlich unter den charakteristischen Verbundfestigkeiten in /X1/, /X2/ und /X3/. Bedingt durch die Querschnittsgeometrie und die schlechtere Verdichtungsmöglichkeit, sind die ermittelten Verbundspannungen bei in kleinen Aussparungen angeordneter Bewehrung geringer als bei in großen Aussparungen angeordneter Bewehrung.

Bei vertikaler Bewehrungsführung in kleinen Aussparungen zeigen die Versuchsergebnisse, dass die aufnehmbare Verbundspannung für kleinere Bewehrungsdurchmesser ($d_s = 6 \text{ mm}$) rd. 20 % größer ist als für größere ($d_s = 14 \text{ mm}$). Dies ist auf eine schlechtere Mörteldeckung zwischen Bewehrung und umgebenden Stein zurückzuführen. Zusätzlich wirkt sich der kleinere Durchmesser durch das größere Verhältnis Umfang/Fläche günstiger aus. Im Gegensatz zum Verbundverhalten im Mauerwerk, führen ein größerer Bewehrungsdurchmesser und eine daraus resultierende größere bezogene Rippenfläche in Untersuchungen ohne Kontakt des Mörtels zum Steinmaterial zu größeren Verbundspannungen.

Die Verfüllung und Verdichtung des Mörtels nach jeder Steinlage, gemäß den Ausführungsregeln nach DIN 1053-3 führt dazu, dass durch die Zentrierung der Bewehrung nach jeder Steinlage der Bewehrungsstahl bewegt wird, und somit der Verbund zum bereits angesteiften Mörtel im unteren Teil des Prüfkörpers gestört wird. Dadurch wurden geringere Verbundspannungen gemessen. Durch das Verfüllen großer Aussparungen aus einer Fallhöhe von 1,25 m Höhe wurden 10 % (NM IIa) bis 20 % (NM IIIa) größere Verbundspannungen gemessen als bei kleinen Aussparungen, die von Steinlage zu Steinlage verfüllt wurden. Eine höhere Wirkung der Verdichtung hat sich beim Verfüllen von geschosshohen Wänden mit einer Fallhöhe von 2,50 m gezeigt. Die maximal aufnehmbaren Verbundspannungen betragen bei einer geschosshohen Verfüllhöhe für NM IIa 30 % und für NM IIIa 40 % mehr als bei 1,25 m Verfüllhöhe. Dies liegt vermutlich an der aufgrund der größeren Fallhöhe höheren Verdichtungsenergie, so dass der Bewehrungsstab besser vom Mörtel umhüllt wurde.

Ein Entmischen des Mörtels (bei $h = 2,50 \text{ m}$) konnte bei keinem der verwendeten Verfüllmörtel festgestellt werden. Es besteht daher keine Gefahr, Aussparungen gemäß Sonderregelungen nach DIN 1053-4 geschosshoch zu verfüllen, vielmehr ergibt sich ein besserer Verdichtungsgrad bei gleicher Mörteldruckfestigkeit. Eine Absonderung von Wasser wurde nur bei Beton als Verfüllmaterial festgestellt. Dies liegt daran, dass der hier verwendete Beton nicht als Verfüllbeton erprobt war.

Ein äquivalentes Verbundverhalten von Mauerwerk verfüllt mit NM IIIa bzw. C25/30, wie im Eurocode 6 angenommen, konnte nicht bestätigt werden. Die Versuchsergebnisse mit Verfüllbeton C25/30 belegen vielmehr die nach der Entwurfsfassung der DIN 1053-3 höher ansetzbaren Verbundspannungen für C25/30 im Vergleich zu NM IIIa. Das umgebende Mauersteinmaterial

reduzierte, anders als beim Mörtel, nicht die Verbundkräfte zwischen Bewehrung und Beton. Bei diesen Versuchsserien war der Verbund so stark, dass die Streckgrenze vom Stahl erreicht wurde.

Die derzeit vorliegenden Versuchsergebnisse bei vertikal angeordneter Bewehrung in Aussparungen sind jedoch noch nicht ausreichend abgesichert. Hier besteht noch ein erheblicher Forschungsbedarf. Dabei müssen insbesondere die Einflüsse unterschiedlicher Steinarten, Querschnittsgeometrien und Herstellart auf die Verbundeigenschaften untersucht werden.

Die zusammengestellten Versuchsdaten wurden einerseits statistisch ausgewertet, andererseits wurden Regressionsrechnungen für den Zusammenhang zwischen der Verbundspannung und der Fugendruckfestigkeit bzw. der Mörteldruckfestigkeit im Verfüllkanal durchgeführt. Zur Ableitung charakteristischer Verbundfestigkeitswerte wurden ungeachtet der eigentlich nicht ausreichenden Anzahl von Versuchswerten die 5%-Quantilgleichungen der Einzelwerte der Datenbasis, getrennt nach horizontaler und vertikaler Bewehrungsführung, herangezogen und für die jeweilige Mörtelgruppe die Mindestdruckfestigkeit nach /X6/ anstelle der Fugendruckfestigkeit bzw. der Mörteldruckfestigkeit im Verfüllkanal angesetzt.

In Tabelle 1 sind die abgeleiteten charakteristischen Verbundfestigkeiten in bewehrtem Mauerwerk in Abhängigkeit der Mörtelgruppe, Bewehrungsanordnung und Verbundqualität zusammengefasst. Auf einen eigenen Vorschlag von charakteristischen Verbundfestigkeiten für bewehrtes Mauerwerk, verfüllt mit Beton, wurde aufgrund ungenügender Versuchsdaten verzichtet. Aufgrund der starken Beeinflussung durch die Querschnittsgeometrie, die Verfüllungsart und den Verdichtungsgrad von Mörtel in Formsteinen und Aussparungen, werden sowohl für eine horizontale als auch für eine vertikale Bewehrungsanordnung charakteristische Werte für einen „guten“ und einen „mäßigen“ Verbund vorgeschlagen. Die charakteristischen Verbundfestigkeiten für den mäßigen Verbund sind für beide Bewehrungsanordnungen gleich.

Tabelle 1: Vorschlag für die charakteristischen Verbundfestigkeiten

Bewehrungsanordnung	Verbundqualität	Mörtel		
		NM IIa	NM III	NM IIIa
-	-	N/mm ²		
1	2	3	4	5
horizontal in der Lagerfuge und in Formsteinen	mäßig	0,30	0,50	0,80
	gut	0,50 ¹⁾	0,75 ¹⁾	1,20 ¹⁾
stehend in Formsteinen bzw. Aussparungen	mäßig	0,30	0,50	0,80
	gut	0,35	0,60	0,90

1) Für Mauerziegel kann dieser Wert um 30 % erhöht werden

Die Mörteldruckfestigkeit im Mauerwerk wird durch die unterschiedlichen feuchtetechnischen Eigenschaften der verwendeten Mauersteine beeinflusst. Bei der Zuordnung der Verbundspannungen nach Mörtelgruppen wird unabhängig von der Steinart angenommen, dass die Mörtel-

druckfestigkeit im Mauerwerk die Mindestdruckfestigkeit nach /X6/ erreicht. Aus den Versuchsdaten wird ersichtlich, dass dies bei Verwendung von Zusatzmitteln (Verzögerer und Luftporenbilder) nicht unbedingt gegeben ist. Eine erhöhte Wasserzugabe, um bessere Fließeigenschaften des Mörtels im Verfüllkanal zu erzielen, führt meist auch zu geringeren Mörteldruckfestigkeiten im Mauerwerk als die angenommene Mindestdruckfestigkeit nach /X6/. Es wäre daher sinnvoll, anstelle der Normdruckfestigkeit die Mörteldruckfestigkeit im Mauerwerk als Bezugsgröße für die Angabe von charakteristischen Verbundfestigkeiten heranzuziehen. Dazu müsste die Norm für bewehrtes Mauerwerk für Mauermörtel die Prüfung der Fugendruckfestigkeit bzw. der Mörteldruckfestigkeit im Verfüllkanal vorschreiben. Ferner bleibt noch zu klären, inwiefern die Betondruckfestigkeit und die aufnehmbaren Verbundspannungen von den unterschiedlichen Saugcharakteristika der Mauersteine beeinflusst werden.

Um die unterschiedlichen Baustoffeigenschaften besser ausnutzen zu können, wäre es auch sinnvoll, nach Steinarten differenzierte, charakteristische Verbundfestigkeiten anzugeben. Auch hier besteht noch weitergehender Forschungsbedarf zur gesicherten Festlegung dieser differenzierten Werte. Eine wesentliche Voraussetzung hierbei ist die Überprüfung der Einflüsse der Feuchte beim Vermauern, der Porosität und der kapillaren Wasseraufnahme der Mauersteine.

Literatur

- /X1/ DIN 1053-3:1990-02 Mauerwerk; Teil 3: Bewehrtes Mauerwerk: Berechnung und Ausführung
- /X2/ DIN 1053-3 Entwurf 8 2008-(in Bearbeitung) Mauerwerk; Bewehrtes Mauerwerk: Berechnung und Ausführung
- /X3/ DIN EN 1996-1-1:2010-12 Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten; Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk
- /X4/ DIN EN 1996-1-1/NA:2012-05 Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk
- /X5/ DIN 1045-1:2001-07 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton: Teil 1: Bemessung und Ausführung
- /X6/ DIN V 18580 Vornorm 2007-03 Mauermörtel mit besonderen Eigenschaften
- /X7/ DIN 1053-4:2009-12 Mauerwerk; Teil 4: Fertigbauteile
- /X8/ Comite Euro-International du Beton; CEB; RILEM; FIP: RILEM/CEB/FIP Recommendations on Reinforcement Steel for Reinforced Concrete. Revises Edition of: RC 6: Bond Test for Reinforcement steel: 2. Pull-Out-Test. (Rev.Ed., May'83) Final Draft of: Measuring the Rib Pattern of Re-Bars (May 1983) In: CEB-News (1983), Nr. 73