

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

**T 3295**

T 3295

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2013

ISBN 978-3-8167-8951-2

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

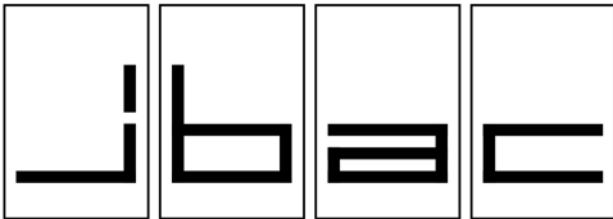
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

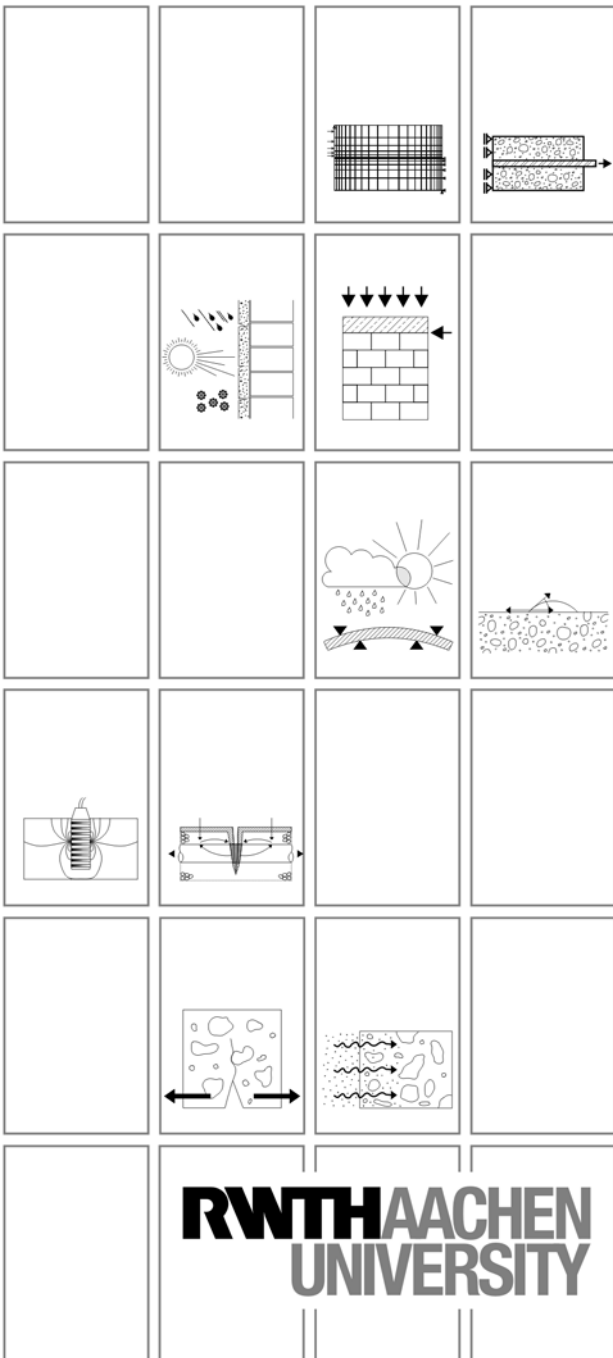
E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)



INSTITUT FÜR BAUFORSCHUNG AACHEN

FORSCHUNG · ENTWICKLUNG  
ÜBERWACHUNG  
PRÜFUNG · BERATUNG



## Forschungsbericht F 7074

Überprüfung der ansetzbaren  
Verbundspannungen für die  
Verankerung der Bewehrungs-  
stäbe in Mauerwerk nach  
DIN 1053-3 und DIN EN 1996-1-1

**RWTH**AACHEN  
UNIVERSITY

Sae/Fk/Sc

1. Ausfertigung

## THEMA

Überprüfung der ansetzbaren Verbund-  
spannungen für die Verankerung der  
Bewehrungsstäbe in Mauerwerk nach  
DIN 1053-3 und DIN EN 1996-1-1

- ABSCHLUSSBERICHT -

**Forschungsbericht Nr.**

F 7074

vom 23.03.2011

**Projektbearbeitung**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Brameshuber

Dipl.-Ing. D. Saenger

**Auftraggeber/Förderer**

Deutsches Institut für Bautechnik  
Kolonnenstr. 30 L  
10829 Berlin

**Vertragsdatum/Auftragsbestätigung** 18.02.2009

**Ihr Aktenzeichen**

ZP 52-5- 15.88- 1312/09

Dieser Bericht umfasst 179 Seiten, davon 101 Textseiten.

Soweit Versuchsmaterial nicht verbraucht ist, wird es nach 4 Wochen vernichtet. Eine längere Aufbewahrung bedarf einer schriftlichen Vereinbarung. Die auszugsweise Veröffentlichung dieses Berichtes, seine Verwendung für Werbezwecke sowie die inhaltliche Übernahme in Literaturdatenbanken bedürfen der Genehmigung des ibac.

<b><u>INHALTSVERZEICHNIS</u></b>		<b>Seite</b>
1	EINLEITUNG .....	1
2	STAND DER NORMUNG .....	4
2.1	Regelungen in DIN 1053-3 .....	4
2.2	Regelungen in der Entwurfsfassung von DIN 1053-3 .....	6
2.3	Regelungen in DIN EN 1996-1-1 (Eurocode 6).....	8
2.4	Regelungen in DIN 1045-1 .....	10
3	WISSENSSTAND ÜBER DEN VERBUND BEWEHRUNGSSTAHL – MÖRTEL/BETON IN BEWEHRTEM MAUERWERK .....	12
3.1	Allgemeines .....	12
3.2	Stand der Forschung .....	12
3.3	Gesetz des verschieblichen Verbundes.....	17
3.4	Einflüsse auf den Verbund.....	19
3.4.1	Allgemeines .....	19
3.4.2	Einfluss der verwendeten Mauersteinarten.....	19
3.4.3	Einfluss des Feuchtezustandes der Mauersteine.....	20
3.4.4	Einfluss der Mörtelfestigkeit und der Mörtelzusammensetzung .....	21
3.4.5	Einfluss der Qualität der Bauausführung .....	22
3.4.6	Einfluss der Bewehrungseigenschaften .....	23
3.4.7	Einfluss des Aufbringens einer Normalspannung .....	24
3.5	Ursprung der heute noch gültigen zulässigen Verbundspannungen .....	25
3.5.1	Allgemeines .....	25
3.5.2	Bemessungswerte der Verbundspannung in DIN 1045-1 .....	25
3.5.3	Zulässige Verbundspannungen in DIN 1053-3 .....	26
3.5.3.1	Allgemeines .....	26
3.5.3.2	Bewehrung in Lagerfugen.....	27
3.5.3.3	Bewehrung in Formsteinen .....	29

**Seite**

3.5.4	Bemessungswerte der Verbundspannungen in der Entwurfsfassung von DIN 1053-3 .....	31
3.5.4.1	Allgemeines .....	31
3.5.4.2	Bewehrung in Lagerfugen .....	31
3.5.4.3	Bewehrung in Formsteinen .....	34
4	ZUSAMMENSTELLUNG UND AUSWERTUNG DER LITERATUR ZUM VERBUND VON BEWEHRUNGSSTAHL IM MAUERWERK.....	35
4.1	Allgemeines .....	35
4.2	Erfasste Daten .....	36
4.3	Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung.....	38
4.3.1	Allgemeines .....	38
4.3.2	Prüfkörperherstellung.....	38
4.3.2.1	Bewehrung in Lagerfugen .....	38
4.3.2.2	Bewehrung in Formsteinen .....	39
4.3.3	Versuchsdurchführung .....	39
4.3.4	Versuchsauswertung .....	39
4.3.5	Versuchsergebnisse .....	41
4.3.5.1	Allgemeines .....	41
4.3.5.2	Bewehrung in Lagerfugen .....	42
4.3.5.3	Bewehrung in Formsteinen .....	46
4.4	Untersuchungen zum Verbund zwischen Bewehrung und Mörtel bzw. Beton .....	47
4.4.1	Prüfkörperherstellung.....	47
4.4.2	Versuchsdurchführung .....	48
4.4.3	Versuchsauswertung .....	48
4.4.4	Versuchsergebnisse .....	48

	<b>Seite</b>
5	EIGENE EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN..... 50
5.1	Allgemeines ..... 50
5.2	Versuchsprogramm..... 50
5.3	Verwendete Materialien und deren Eigenschaften..... 51
5.3.1	Mauersteine ..... 51
5.3.2	Mörtel..... 53
5.3.3	Beton ..... 54
5.3.4	Bewehrung..... 55
5.4	Untersuchungen zum Verbund zwischen Bewehrung und Mauermörtel bzw. Beton ..... 55
5.4.1	Allgemeines ..... 55
5.4.2	Prüfkörperherstellung..... 55
5.4.3	Versuchsdurchführung..... 56
5.4.4	Versuchsauswertung ..... 57
5.4.5	Versuchsergebnisse ..... 57
5.5	Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung..... 58
5.5.1	Allgemeines ..... 58
5.5.2	Prüfkörperherstellung..... 58
5.5.3	Versuchsdurchführung..... 59
5.5.4	Versuchsauswertung ..... 61
5.5.5	Versuchsergebnisse ..... 61
5.6	Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung..... 63
5.6.1	Allgemeines ..... 63
5.6.2	Bewehrungsführung in kleinen Aussparungen..... 64
5.6.2.1	Allgemeines ..... 64
5.6.2.2	Prüfkörperherstellung..... 64
5.6.2.3	Versuchsdurchführung..... 65
5.6.2.4	Versuchsauswertung ..... 67
5.6.2.5	Versuchsergebnisse ..... 67

	<b>Seite</b>
5.6.3	Bewehrungsführung in großen Aussparungen..... 69
5.6.3.1	Allgemeines ..... 69
5.6.3.2	Prüfkörperherstellung..... 70
5.6.3.3	Versuchsdurchführung..... 72
5.6.3.4	Versuchsauswertung ..... 72
5.6.3.5	Versuchsergebnisse ..... 72
6	AUSWERTUNG DER VERSUCHSDATEN AUS DER LITERATUR UND EIGENEN UNTERSUCHUNGEN ..... 75
6.1	Allgemeines ..... 75
6.2	Zusammenstellung der Versuchsdaten..... 75
6.3	Statistische Auswertung..... 78
6.3.1	Grundlagen ..... 78
6.3.2	Bestimmung des 5-%-Quantilwertes..... 80
6.4	Ableitung von charakteristischen Verbundfestigkeiten..... 82
7	VORSCHLAG FÜR CHARAKTERISTISCHE VERBUNDFESTIGKEITEN ... 84
7.1	Eigener Vorschlag..... 84
7.2	Vergleich mit den heute noch gültigen zulässigen Verbundspannungen ... 86
8	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK..... 88
9	LITERATUR ..... 93
	TABELLEN ..... A1-A34
	BILDER ..... B1-B44



## 1 EINLEITUNG

Bewehrtes Mauerwerk hat in Deutschland im Vergleich zu anderen europäischen Staaten (Schweiz, England, Italien und Belgien) derzeit noch einen geringen Marktanteil. Dennoch findet das bewehrte Mauerwerk immer mehr Anwendung deutschlandweit, veranlasst durch Nachweise zur Rissbreitenbeschränkung oder die fortschreitende Vorfertigung im Werk.

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 1053-3:1990-02 /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 1996-1-1:2006-01 (Eurocode 6) /X3/ geregelt.

Bei der Ausführung wird unterschieden, ob die Bewehrung in Lagerfugen, Formsteinen oder ummauerten Aussparungen eingebaut wird. Zum bewehrten Mauerwerk muss für Deutschland angemerkt werden, dass derzeit kein Hersteller bekannt ist, der Formsteine speziell für bewehrtes Mauerwerk anbietet. Sonderformen von Mauersteinen sind U-Schalen für Ringanker bzw. Ringbalken sowie Mauersteine mit vertikalen Kanälen für Mauertafeln nach DIN 1053-4-2009-12 /X11/.

In DIN 1053-3 /X1/ werden für den Nachweis der Verankerung der Bewehrung in bewehrtem Mauerwerk zulässige Grundwerte der Verbundspannungen angegeben. Dabei wird zwischen Bewehrung, die in Lagerfugen eingelegt und die in Formsteinen bzw. Aussparungen angeordnet wird, unterschieden. Die zulässigen Grundwerte der Verbundspannungen für eine Bewehrung in Formsteinen bzw. Aussparungen, die mit Mörtel bzw. Beton verfüllt werden, wurden in Anlehnung an DIN 1045:1988-07 /X5/ festgelegt. Diese wurden i. W. auf Grundlage von Ausziehversuchen, siehe hierzu u. a. die Arbeiten von Rehm in /1/, Noakowski und Martin in /2 und /3/, erarbeitet. Nach der von Zelger und Barlet in /4/ dargestellten und analog zum Beton nach den Gesetzen des verschieblichen Verbundes durchgeführten Auswertung der u. a. in /5/ beschriebenen Untersuchungen, können die für Beton gültigen Verbundspannungen auch auf die Bewehrung übertragen werden, die in Mörtel bzw. Beton in Formsteinen und Aussparungen eingebettet ist. Die zulässigen Verbundspannungen für die Bewehrung in den Lagerfugen in /X1/ basieren ebenfalls auf dem Vorschlag aus /4/. Diese betragen für Normalmörtel NM IIIa 50 % und für Normalmörtel NM III 33 % der für Bewehrung in Formsteinen bzw. Aussparungen angegebenen Werte.

Im aktuellen Normentwurf der DIN 1053-3 Entwurf 8 2008-(in Bearbeitung) /X2/ wurde ein Vorschlag erarbeitet, der höhere Verbundfestigkeiten für NM III in den Lagerfugen zulässt (vgl. Tabelle 2, Kapitel 2.2). Hiermit wird neueren Untersuchungsergebnissen von Meyer, Schubert und Schießl /6, 7, 8/ Rechnung getragen. Auf Grundlage dieser Untersuchungsergebnisse erscheint auch die Verwendung von NM IIa möglich. Eine Erhöhung des Sicherheitsniveaus wird für horizontale Bewehrung in Formsteinen durch Ansatz eines „mäßigen“ Verbundes analog zur Lagerfugenbewehrung vorgesehen. Diese Abminderung berücksichtigt eine ggf. schlechtere Verdichtung bei horizontaler Bewehrungslage in Formsteinen.

Es ist davon auszugehen, dass auch in Formsteinen bzw. Aussparungen bei vertikaler Bewehrungsführung durch den Einfluss des Wasserabsaugens des Steinmaterials, eine erhöhte Wasserzugabe für bessere Fließeigenschaften sowie schlechterer Verdichtungsmöglichkeiten die Festigkeit, wie auch die Verbundfestigkeit des Füllmörtels bzw. Füllbetons, geringer sind als in einer vergleichbaren „reinen“ Betonwand. Die in /4/ dargestellten Untersuchungen haben zwar zunächst gezeigt, dass die Verbundfestigkeit in Ziegel-Formsteinen deutlich höher ist als in der Lagerfuge, und die Werte von Beton ansetzbar sind. Die in /7/ beschriebenen wenigen Untersuchungen an Kalksand-Formsteinen haben jedoch ergeben, dass die Verbundfestigkeiten sogar deutlich unterhalb der Werte für Bewehrung in Lagerfugen liegen. Umfassende grundlegende Untersuchungsergebnisse hierüber liegen nicht vor.

Sonderregelungen gelten für Mauertafeln nach DIN 1053-4 /X11/, die nach Anlage B der DIN 1053-3 /X1/ als vertikal bewehrtes Mauerwerk berechnet und ausgeführt werden können. Nach Anlage B der DIN 1053-3 dürfen bei diesen Tafeln auch kleine Aussparungen mit Beton verfüllt werden, wobei sowohl für Normalmörtel als auch für Beton eine geschosshohe Verfüllung zugelassen wird. Auch hier ist zweifelhaft, dass ein ausreichender Verdichtungsgrad und eine entsprechende Festigkeit erreicht werden.

Der Ansatz der Bemessungswerte der Verbundspannungen aus DIN 1045 /X5/ für in Formsteinen und Aussparungen angeordnete Bewehrung ohne Differenzierung nach Querschnittsgeometrien und Steinarten ist daher nicht abgesichert und stellt ein erhebliches Sicherheitsrisiko dar.

Im Eurocode 6 /X3/ werden charakteristische Verbundfestigkeiten in Abhängigkeit der Mörtel- bzw. Betondruckfestigkeit angegeben. Regelungen durch ein Nationales Anwendungsdokument – mit Ausnahme des Teilsicherheitsbeiwertes – sind derzeit nicht vorgesehen. Die Werte für Füllbeton mit einem Betonquerschnitt größer als 150 mm oder einem Betonquerschnitt, der durch Mauersteine begrenzt ist, entsprechen dabei den Werten aus

DIN 1045-1:2001-07 /X6/. Einen Einfluss des Wasserabsaugens durch die Mauersteine auf die Verbundfestigkeit wird hierbei nicht berücksichtigt. Für Bewehrung in Mörtel oder Füllbeton (Betonquerschnitt kleiner als 150 mm), der nicht von Mauersteinen umschlossen ist, gelten niedrigere Werte. Für die Mörtelgruppen nach /X9/ ergeben sich deutlich höhere Verbundfestigkeiten im Vergleich zum Beton bei vergleichbarer Normdruckfestigkeit und im Vergleich zu DIN 1053-3. Ein günstiger Einfluss der Wasseraufnahme des angrenzenden Steinmaterials auf die Mörteldruckfestigkeit ist grundsätzlich möglich, kann aber nicht für alle Mauersteinarten unterstellt werden.

Es ist daher davon auszugehen, dass die Werte der Verbundfestigkeit von Bewehrung, die in von Mauersteinen umschlossenem Füllbeton eingebettet ist, gemäß /X1/ und /X3/, sowie auch die in /X3/ angegebene Verbundfestigkeit für Mauermörtel im Vergleich zu /X1/ zu hoch bzw. zumindest nicht für alle Mauersteinarten ansetzbar ist.

Es besteht daher, auch vor dem Hintergrund der zukünftigen Einführung des Eurocode 6 /X3/, großer Bedarf, diese Unsicherheiten zu beheben und die entsprechenden Erkenntnislücken zu schließen.

Ziel des Forschungsprojektes war es, die Verbundfestigkeiten nach DIN 1053-3 und nach Eurocode 6 im Vergleich zu den Werten nach DIN 1045-1 unter Berücksichtigung unterschiedlicher Randbedingungen zu überprüfen sowie anhand bisheriger und eigener experimentellen Untersuchungen geeignete Bemessungswerte für die Übertragung von Verbundspannungen in bewehrtem Mauerwerk vorzuschlagen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde zunächst eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt. Dabei wurden der gegenwärtige Erkenntnisstand bzgl. der Verbundspannungen und deren Einflussgrößen zusammengestellt. Hauptaugenmerk lag hierbei auf den Grundlagen für die Festlegung der Verbundspannungen in DIN 1045-1 und DIN 1053-3 bzw. Eurocode 6.

Die bisher vorhandenen Untersuchungsergebnisse zum Verbundverhalten in bewehrtem Mauerwerk wurden zusammengestellt und ausgewertet.

Im Rahmen der Überprüfung der Bemessungswerte der Verbundspannungen nach DIN 1053-3 und Eurocode 6 wurde ein umfangreiches Untersuchungsprogramm zu den Verbundeigenschaften von horizontal und vertikal angeordneter Bewehrung in bewehrtem Mauerwerk durchgeführt. Als Referenzversuche wurden Ausziehversuche zwischen Bewehrung und Mörtel bzw. Beton nach den Empfehlungen der RILEM /X12/ durchgeführt, um Anhaltswerte für das allgemeine Verbundverhalten, ohne Kontakt zu dem Steinmaterial, zu erhalten und mit dem in Mauerwerk zu vergleichen.

Die experimentellen Untersuchungen wurden nach den Gesetzen des verschieblichen Verbundes (für den Bruch- und den Gebrauchszustand) ausgewertet und mit den Literaturergebnissen verglichen und bewertet. Anhand einer statistischen Auswertung der Versuchsergebnisse und eines funktionalen Zusammenhangs, bei dem die Verbundspannungen in Abhängigkeit der Mörteldruckfestigkeit in der Lagerfuge bzw. in der Aussparung angegeben werden, wird ein Vorschlag für die charakteristischen Verbundfestigkeiten für die DIN 1053-3 bzw. den Eurocode 6 präsentiert.

## 2 STAND DER NORMUNG

### 2.1 Regelungen in DIN 1053-3

DIN 1053-3 /X1/ gilt für tragende Bauteile aus bewehrtem Mauerwerk, bei denen die Bewehrung statisch in Rechnung gestellt wird.

Nach DIN 1053-3 /X1/ sind die in den Bildern 1 und 2 dargestellten Arten der Bewehrungsführung bzw. daraus mögliche Kombinationen zulässig. Eine horizontale Bewehrung kann demnach in der Lagerfuge, in Formsteinen oder in trogförmigen Formsteinen geführt werden. Für die vertikale Bewehrung sind Formsteine mit Aussparungen oder ummauerte Aussparungen zulässig.

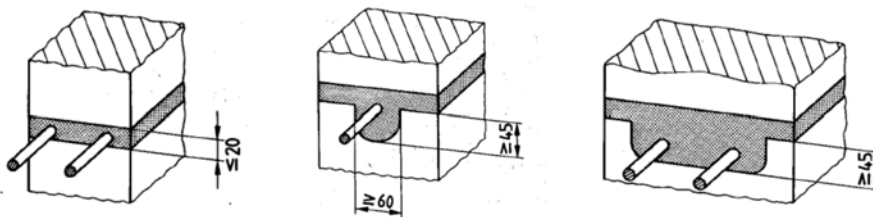


Bild 1: Horizontale Bewehrungsführung nach DIN 1053-3 /X1/

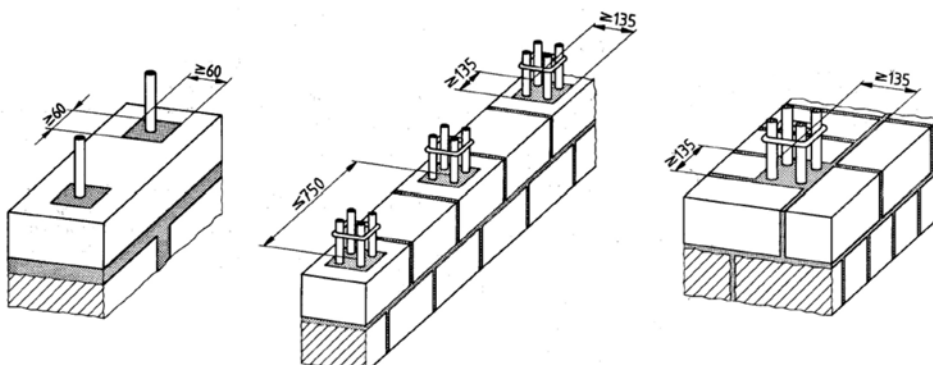


Bild 2: Vertikale Bewehrungsführung nach DIN 1053-3 /X1/

Die vertikale Bewehrung kann in Formsteinen oder in ummauerten Aussparungen eingelegt werden (s. Bild 2). Bei Formsteinen für stehende Bewehrung wird zwischen kleinen und großen Aussparungen unterschieden. Kleine Aussparungen müssen in jeder Richtung ein Mindestmaß von 60 mm, große Aussparungen in jeder Richtung ein Mindestmaß von 135 mm aufweisen. Die Mörteldeckung der Bewehrung muss allseitig mindestens das Zweifache des Stabdurchmessers betragen. Formsteine mit kleinen Aussparungen dürfen nur mit Mörtel der Gruppe III oder IIIa in jeder Steinlage verfüllt werden. Große Aussparungen zur Aufnahme einer vertikalen Bewehrung dürfen mit Mörtel der Gruppe III oder IIIa bzw. Beton verfüllt werden. Zum Verfüllen ist Beton mindestens der Festigkeitsklasse B15, d. h. C16/20 nach DIN 1045-1 /X6/, zu verwenden. Das Größtkorn darf 8 mm nicht überschreiten. Bei großen Aussparungen muss das Füllen der Aussparung mindestens nach jedem Meter Wandhöhe erfolgen.

Die horizontale Bewehrung kann in der Lagerfuge oder in Formsteinen verlegt werden. Die Fugen sind stets vollfugig zu vermörteln. Stoßfugen sind bei horizontaler Spannrichtung und Bewehrungsführung ebenfalls vollfugig auszuführen. Wird in die Lagerfuge horizontale Bewehrung eingelegt, dann darf die Fuge bis zu 20 mm dick sein. Als Richtmaß für die Fugendicke gilt der zweifache Stabdurchmesser. Der Normalmörtel muss mindestens der Mörtelgruppe III oder IIIa entsprechen.

Sowohl für horizontale als auch vertikale Bewehrung ist ein gerippter Betonstahl nach DIN 488-1 Entwurf 2006-11 /X15/ zu verwenden. In den Lagerfugen dürfen höchstens 8 mm dicke Stäbe oder Bewehrungselemente eingelegt werden, in Aussparungen jedoch bis zu einem Stabdurchmesser von 14 mm. Stäbe mit Durchmessern größer als 14 mm sind nur in betonverfüllten Aussparungen zulässig. Der Abstand zwischen Stahl- und Wandoberfläche muss mindestens 30 mm betragen. Eine ungeschützte Bewehrung darf in den Mauermörtel nur bei Bauteilen eingelegt werden, die einem dauernd trockenen Raumklima ausgesetzt sind.

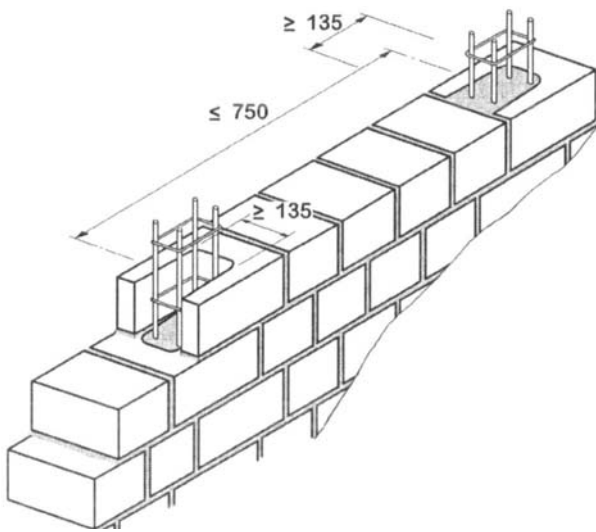
In DIN 1053-3 /X1/ werden für den Nachweis der Verankerung der Bewehrung in bewehrtem Mauerwerk zulässige Grundwerte der Verbundspannungen angegeben, siehe Tabelle 1. Dabei wird zwischen Bewehrung, die in Lagerfugen eingelegt und die in Formsteinen bzw. Aussparungen angeordnet wird, unterschieden. Angegeben sind Werte für NM III und NM IIIa. Eine Ausführung mit anderen Mörteln ist nicht zulässig. Die Bemessungswerte der Verbundfestigkeit in Tabelle 1 lassen sich daraus durch Multiplikation mit dem Sicherheitsbeiwert der Einwirkungen ableiten, wofür ein Durchschnittswert von 1,4 angenommen wird. Die charakteristische Verbundfestigkeit ergibt sich aus dem ermittelten Bemessungswert der Verbundfestigkeit multipliziert mit dem Sicherheitsbeiwert auf der Widerstandsseite von 1,5.

**Tabelle 1:** Zulässige Grundwerte der Verbundspannung nach DIN 1053-3 /X1/ sowie abgeleitete Bemessungswerte der Verbundfestigkeit und charakteristische Verbundfestigkeiten

Bewehrungsanordnung	Kenngröße	Mörtel				
		NM IIa	NM III	NM IIIa	-	-
		Beton				
		-	-	C16/20	C20/25	C25/30
		N/mm <sup>2</sup>				
1	2	3	4	5	6	7
In der Lagerfuge	zul. $\tau_0$	-	0,35	0,70	-	-
	$f_{bd}$		0,50	1,00		
	$f_{bk}$		0,75	1,50		
In Formsteinen und Aussparungen	zul. $\tau_0$	-	1,00	1,40	-	-
	$f_{bd}$		1,40	2,00		
	$f_{bk}$		2,10	3,00		

## 2.2 Regelungen in der Entwurfsfassung von DIN 1053-3

In der Entwurfsfassung von DIN 1053-3 /X2/ wird ebenfalls nach der Bewehrungsart in horizontale und vertikale Bewehrung unterschieden (s. Bilder 1 und 2). Bei vertikalen Kanälen für stehende Bewehrung wird auch zwischen kleinen und großen Aussparungen unterschieden. In der Entwurfsfassung von DIN 1053-3 ist eine neue Variante der vertikalen Bewehrungsführung in großen Aussparungen abgebildet, da nicht für alle Steinarten Formsteine mit großen Aussparungen hergestellt werden. Mit einer gegenläufigen Anordnung von U-Schalen ist es möglich einen vertikalen Kanal zu erzeugen, dessen Länge bzw. Breite größer als 135 mm ist (s. Bild 3).



**Bild 3:** Bewehrungsführung der vertikal angeordneten Bewehrung nach der Entwurfsfassung von DIN 1053-3 /X2/

Die horizontale Bewehrung kann in der Lagerfuge oder in Formsteinen verlegt werden. Der Normalmauermörtel muss mindestens der Gruppe IIa entsprechen.

Nach dem Entwurf von DIN 1053-3 sind die Aussparungen mit Füllbeton bzw. Füllmörtel zu verfüllen. Als Füllmörtel soll ein Normalmörtel der Gruppe IIa, III oder IIIa verwendet werden. Der Mörtel muss gut verarbeitbar sein und das dichte Umschließen der Bewehrung sicherstellen. Erfahrungsgemäß ist eine ausreichende Fließfähigkeit des Mörtels bei einem Ausbreitmaß von 210 bis 220 mm vorhanden. Um größere Ausbreitmaße zu erreichen, sind Fließmittel zu verwenden. Zum Verfüllen kann auch ein Leichtbeton mindestens der Festigkeitsklasse LC16/18 oder Normalbeton mindestens der Festigkeitsklasse C16/20 verwendet werden. Der Größtkorndurchmesser darf höchstens 16 mm betragen.

Analog zu DIN 1053-3 /X1/ ist ein gerippter Betonstabstahl BSt 500 nach DIN 488-1 /X15/ zu verwenden.

In der Entwurfsfassung werden die Bemessungswerte der Verbundspannung  $f_{bd}$  angegeben und nicht mehr die zulässigen Grundwerte, wie bei der DIN 1053-3 /X1/. Außerdem sind Normalmörtel der Mörtelgruppe IIa sowie Betone der Festigkeitsklassen C20/25 und C25/30 mit aufgenommen worden, und der Wert für NM III wurde leicht erhöht. Die Unterteilung der Bewehrungsanordnung für die Bemessungswerte hat sich ebenfalls geändert. Lagerfugenbewehrung und horizontale Bewehrung in Formsteinen wurden nun zusammengefasst. Weiterhin werden Werte für vertikale Bewehrung in Formsteinen und Aussparungen angegeben. In Tabelle 2 sind die jeweiligen Bemessungswerte zusammengefasst.

**Tabelle 2:** Bemessungswerte der Verbundfestigkeit und charakteristische Verbundfestigkeiten nach DIN 1053-3 (8. Entwurf 2008) /X2/

Bewehrungsanordnung	Kenngröße	Mörtel				
		NM IIa	NM III	NM IIIa	-	-
		Beton				
-	-	-	-	C16/20	C20/25	C25/30
N/mm <sup>2</sup>						
1	2	3	4	5	6	7
In der Lagerfuge und in Formsteinen	$f_{bd}$	0,55	0,70	1,00	1,15	1,35
	$f_{bk}$	0,80	1,10	1,50	1,70	2,00
Stehend in Formsteinen und Aussparungen	$f_{bd}$	1,10	1,40	2,00	2,30	2,70
	$f_{bk}$	1,70	2,10	3,00	3,40	4,10

### 2.3 Regelungen in DIN EN 1996-1-1 (Eurocode 6)

In DIN EN 1996-1-1 /X3/ wird die horizontale Lagerfugenbewehrung als Bewehrung, die in Mörtel bzw. Füllbeton eingebettet und nicht von Mauersteinen umschlossen ist, bezeichnet. Die vertikale Bewehrung in Formsteinen bzw. Aussparungen entspricht einer Bewehrung, die mit Füllbeton und von Mauersteinen umschlossen ist.

Eurocode 6 sieht als Füllmörtel ein Normalmörtel mit einer Druckfestigkeit von mindestens 4 N/mm<sup>2</sup> vor. Für bewehrtes Mauerwerk mit Lagerfugenbewehrung soll die Druckfestigkeit von Mauermörtel mindestens 2 N/mm<sup>2</sup> betragen. Prinzipiell dürfen auch Leicht- und Dünnbettmörtel in Verbindung mit Bewehrung als Mauermörtel verwendet werden. Der Verbund zwischen Mörtel und Mauerstein muss für die vorgesehene Verwendung ausreichend sein. Damit ein fester Verbund in den Lagerfugen zwischen Mörtel und dem Bewehrungsstahl erzielt werden kann, sollte die Mindestmörteldeckung, d. h. der Abstand zwischen dem Stahl und der Mauerwerkoberfläche, 15 mm betragen. Die Mörteldeckung in Lagerfugen ober- und unterhalb der Bewehrung sollte für Normal- und Leichtmörtel so groß sein, dass die Dicke der Fugen mindestens 5 mm größer als der Bewehrungsdurchmesser ist.

Die Festigkeitsklasse nach DIN EN 206-1:2001-07 /X13/ des Füllbetons sollte mindestens der Betonfestigkeitsklasse C12/15 entsprechen. Der Wassergehalt sollte so sein, dass die erforderliche Festigkeit erreicht wird und der Füllbeton eine angemessene Verarbeitbarkeit besitzt, d. h. dass eine vollständige Verfüllung der Hohlräume gewährleistet ist. Die Setzmaßklassen S3 bis S5 oder Ausbreitmaßklassen F4 bis F6 nach DIN EN 206-1 erfüllen in den meisten Fällen die gestellten Anforderungen. In Löchern, bei denen das kleinste Maß



weniger als 85 mm beträgt, sollten Betone der Setzmaßklassen S5 oder S6 verwendet werden. Beim Einsatz stark fließfähiger Betone sind Maßnahmen zur Reduzierung des daraus resultierenden großen Schwindmaßes vorzusehen. Das Größtkorn des Füllbetons sollte 20 mm nicht überschreiten. Für das Verfüllen von Hohlräumen mit einem kleinsten Maß von 100 mm oder bei einer Betonüberdeckung der Bewehrung von mindestens 25 mm sollte das Größtkorn nicht größer als 10 mm sein. Die Gesamtfläche der Hauptbewehrung sollte nicht größer als 4 % des Bruttoquerschnitts des Füllbetons oder -mörtels der Kanäle oder Taschen sein, wenn die Hauptbewehrung in Kanälen oder in Aussparungen von Hohlblocksteinen bzw. in schmalen gemauerten Taschen konzentriert ist.

Als Bewehrungsstahl kann Baustahl oder nichtrostender Stahl in glatter oder gerippter Form (besserer Verbund), der schweißgeeignet ist, verwendet werden. Der Bewehrungsstahl muss DIN EN 10080:2005-08 /X14/ entsprechen.

Gemäß Eurocode 6 /X3/ ist die charakteristische Verbundfestigkeit – entsprechend der europäischen Normungsphilosophie – zunächst grundsätzlich aus Mauerwerkversuchen zu bestimmen. Sie kann durch Auswertung von Versuchsergebnissen zum Verbundverhalten ermittelt werden. Liegen keine Ergebnisse vor, dürfen die Werte aus den Tabellen 4 und 5 entnommen werden. Die Werte für Füllbeton mit Betonquerschnitten mit Maßen größer als 150 mm oder Betonquerschnitten, die durch Mauersteine begrenzt sind, entsprechen dabei den Werten aus DIN 1045-1, siehe Tabelle 3. Ein Einfluss des Wasserabsaugens der Mauersteine auf die Verbundfestigkeit wird hierbei nicht berücksichtigt. Für Bewehrung in Mörtel oder Füllbeton, der nicht von Mauersteinen umschlossen ist, oder Bewehrung in Betonquerschnitten mit Maßen kleiner als 150 mm gelten niedrigere Werte, die in Tabelle 4 angegeben sind. Die charakteristische Verbundfestigkeit wird in Abhängigkeit der Mörtelgruppe bzw. der Betonfestigkeitsklasse angegeben. Für die Mörtel ergeben sich deutlich höhere Verbundfestigkeiten im Vergleich zu den Betonen mit vergleichbarer Normdruckfestigkeit und auch im Vergleich zu DIN 1053-3.

**Tabelle 3:** Charakteristische Verbundfestigkeit der Bewehrung in Füllbeton, umschlossen von Mauersteinen nach DIN EN 1996-1-1 /X3/

Bewehrung	Beton	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30
1	2	3	4	5	6
glatte Baustähle	N/mm <sup>2</sup>	1,3	1,5	1,6	1,8
gerippte Baustähle und nichtrostende Stähle		2,4	3,0	3,4	4,1

**Tabelle 4:** Charakteristische Verbundfestigkeit der Bewehrung in Mörtel oder Füllbeton, nicht von Mauersteinen umschlossen nach DIN EN 1996-1-1 /X3/

Bewehrung	Mörtel	M2-M4	M5-M9	M10-M14	M15-M19	M20
	Beton	-	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30
1	2	3	4	5	6	7
glatte Baustähle	N/mm <sup>2</sup>	0,5	0,7	1,2	1,4	1,4
gerippte Baustähle und nichtrostende Stähle		0,5	1,0	1,5	2,0	3,4

Die Bemessungswerte für gerippte Baustähle sind in Tabelle 5 zusammengefasst, sie errechnen sich aus den in der Norm angegebenen charakteristischen Werten dividiert durch den Sicherheitsfaktor auf der Widerstandsseite von 1,5.

**Tabelle 5:** Bemessungswerte der Verbundfestigkeit und charakteristische Verbundspannungen für gerippte Baustähle nach DIN EN 1996-1-1 /X3/

Bewehrungsanordnung	Kenngröße	Mörtel					
		M2-M4		M5-M9	M10-M14	M15-M19	M20
		NM II		NM IIa	NM III		NM IIIa
		Beton					
		4/5	8/10	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30
		N/mm <sup>2</sup>					
1	2	3	4	5	6	7	
in Mörtel oder Füllbeton, nicht von Mauersteinen umschlossen	$f_{bd}$	0,30	0,70	1,00	1,30	2,30	
	$f_{bk}$	0,50	1,00	1,50	2,00	3,40	
in Füllbeton, umschlossen von Mauersteinen	$f_{bd}$	-	1,60	2,00	2,30	2,70	
	$f_{bk}$		2,40	3,00	3,40	4,10	

## 2.4 Regelungen in DIN 1045-1

Umfangreiche Untersuchungen zum Verbund zwischen Beton und Bewehrung haben gezeigt, dass die maßgebenden Verbundspannungen vor allem von der Betonfestigkeit, der Oberflächenprofilierung des Bewehrungsstahls, der Lage der Bewehrung beim Betonieren sowie der Querpressung abhängt. Aufgrund dieser Erkenntnisse ergeben sich die zulässigen Verbundspannungen in DIN 1045-1 /X6/ nach folgender Gleichung:

$$f_{bd} = 2,25 \cdot \frac{f_{ctk,0,05}}{\gamma_c} \cdot \eta_1 \cdot \alpha_0 \quad (1)$$

mit:

$f_{ctk,0,05}$  5%-Quantil der charakteristischen Zugfestigkeit des Betons in Abhängigkeit der Druckfestigkeit  $f_{ck}$  (s. Tabelle 9 in DIN 1045-1)

$\gamma_c$  Teilsicherheitsbeiwert für den Beton nach DIN 1045-1 (Tabelle 2)

$\eta_1$  Beiwert für Leichtbeton nach DIN 1045-1 (Tabelle 10)  
 $\eta_1 = 1,0$  für Normalbeton

$\alpha_0$  Beiwert:  $\alpha_0 = 1,0$  bei guten Verbundbedingungen  
 $\alpha_0 = 0,7$  bei mäßigen Verbundbedingungen

Zusätzlich können die Bemessungswerte  $f_{bd}$  mit folgenden Faktoren multipliziert werden:

$\frac{1}{1 - 0,04 \cdot p} \leq 1,5$  bei mittlerem vorhandenem Querdruck  $p$  in  $[N/mm^2]$  rechtwinklig zur Bewehrungsebene

1,5 bei einer allseitig gesicherten Betondeckung der Bewehrung von  $\geq 10 d_s$

In Gleichung (1) wird die Einflussgröße für die Oberflächengestalt des Stahls mit dem Faktor 2,25 erfasst, bei glatten Bewehrungsstäben kann man hier näherungsweise 1,0 ansetzen. Aus dieser Formel ergeben sich die in Tabelle 6 angegebenen Bemessungswerte der Verbundspannung in DIN 1045-1 /X6/.

**Tabelle 6:** Bemessungswerte der Verbundspannung und charakteristische Verbundfestigkeiten aus DIN 1045-1 /X6/

Verbundspannung	Kennwerte	Beton			
		C12/15	C16/20	C20/25	C25/30
-	-	N/mm <sup>2</sup>			
1	2	3	4	5	6
bei mäßigen Verbundbedingungen	$f_{bd}$	1,10	1,40	1,60	1,90
	$f_{bk}$	1,70	2,10	2,40	2,90
bei guten Verbundbedingungen	$f_{bd}$	1,60	2,00	2,30	2,70
	$f_{bk}$	2,40	3,00	3,40	4,10

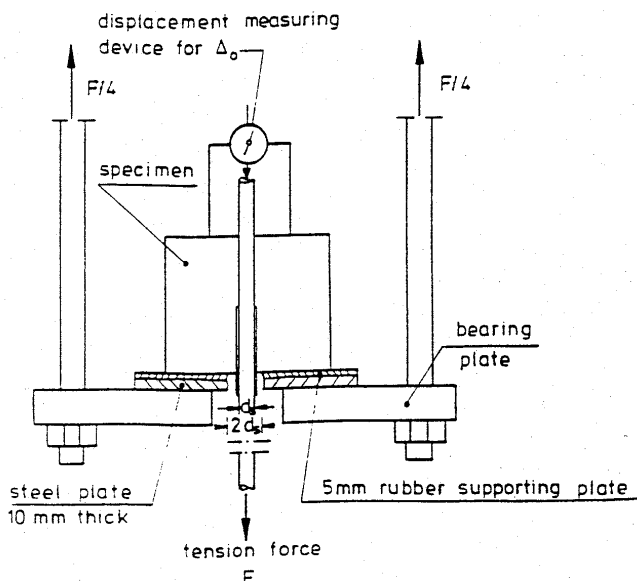
### **3 WISSENSSTAND ÜBER DEN VERBUND BEWEHRUNGSSTAHL – MÖRTEL/BETON IN BEWEHRTEM MAUERWERK**

#### **3.1 Allgemeines**

Im Folgenden werden der gegenwärtige Erkenntnisstand bzgl. der Verbundspannungen und deren Einflussgrößen dargestellt. Das Hauptaugenmerk liegt hierbei auf den Grundlagen für die Festlegung der Verbundspannungen in DIN 1053-3 /X1/ und DIN EN 1996-1-1 /X3/.

#### **3.2 Stand der Forschung**

Die grundlegenden Gesetzmäßigkeiten des Verbundes zwischen Beton und Stahlbewehrung wurden zuerst von Rehm /1/ und später von Martin und Noakowski /2/ durch umfangreiche Versuche und theoretische Überlegungen ermittelt und dargestellt. Es wurden Probekörper entwickelt, deren Lastabtragungsbedingungen den Verhältnissen in einem Stahlbetonbauteil weitgehend entsprechen. Dazu wurden Bewehrungsstäbe mittig in Betonwürfeln mit einer Kantenlänge von 10 und 20 cm einbetoniert. Die Stäbe wurden bis auf die vorgesehene Verbundlänge mit einer Fettschicht überzogen und in eine Zelluloidhülle gesteckt, aus der sie ohne messbaren Widerstand herausgleiten konnten. In den Versuchen wurde der Betonkörper fixiert und der Bewehrungsstab auf Zug belastet (siehe Bild 4). Die auftretenden Verschiebungen des Bewehrungsstabes gegenüber dem Beton wurden mit Messuhren ermittelt. Bei Versuchen u. a. in /1/, /2/ und /3/ wurde in mehreren Versuchsserien der Einfluss von Bewehrung, Betongüte, Sieblinie der Gesteinskörnung und Geometrie der Probekörper auf die Verbundfestigkeit untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass die wichtigsten Einflussfaktoren für den Verbund zwischen Bewehrung und Beton die Druckfestigkeit des Betons und die Oberfläche der Bewehrung sind. Auf Grundlage dieser Versuche wurden die zulässigen Grundwerte der Verbundspannungen in DIN 1045-1 /X6/ festgelegt.



**Bild 4:** Prüfverfahren nach RILEM /X12/

Da das Tragverhalten von bewehrtem Mauerwerk auf dem gleichen Prinzip beruht wie das von Stahlbeton, knüpfen die Verbundversuche von bewehrtem Mauerwerk sehr eng an die Erkenntnisse aus dem Stahlbetonbau an. Die wesentlichen Forschungen zum Thema Verbund zwischen Mauermörtel und Bewehrung wurden zuerst von Zelger und Barlet u. a. in /4/ und /5/ sowie später von Meyer, Schubert und Schießl in /6/, /7/ und /8/ durchgeführt. In den folgenden Abschnitten sind u. a. diese Untersuchungen zusammengestellt.

Im Zuge der Normung des bewehrten Mauerwerks in DIN 1053-3 /X1/ wurden von Zelger und Barlet /4/ Untersuchungen zum Verbundverhalten zwischen Mauermörtel und Bewehrung durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Versuche führten zur Festlegung von zulässigen Verbundspannungen zwischen Bewehrung und Mauermörtel in DIN 1053-3 /X1/.

In /4/ wurden an kleinen Mauerwerkprüfkörpern umfassende Grundlagenuntersuchungen zum Verbund zwischen Lagerfugenbewehrung und Mörtel mit den zu dieser Zeit wichtigsten Mörteln, Normalmörtel NM III und NM IIIa und unterschiedlichsten Mauersteinarten, i. W. Hochlochziegel und Kalksandsteine, durchgeführt. Bild 5 zeigt den Versuchsaufbau, der einen kleinen Abschnitt einer Mauerwerkwand darstellt und auf den Erkenntnissen aus den Ausziehversuchen aus dem Stahlbetonbau, i. W. die Empfehlungen der RILEM /X12/, beruht. Gegenüber dem in /X12/ beschriebenen Probekörper wurden Abänderungen vorgenommen. Die Bewehrung liegt nicht zentrisch, sondern ist im Abstand von 30 mm zur Wandaußenseite eingelegt. Die Einbettungslänge ist mit  $l_v = 10 \cdot d_s$  länger als im Stahlbeton üblich gewählt, um herstellungsbedingte, unvermeidbare Schwachstellen zu vermeiden. Die Verbundstrecke ist in die Mitte verlegt, um einen eventuellen Einfluss einer Stoßfuge im Be-



nung ergab ebenso wie eine höhere Mörtelfestigkeit auch eine deutliche Steigerung der Verbundkräfte.

Die Bewehrung im Mauerwerk, anders als im Beton, ist bei Verwendung in nicht ständig trockenem Raumklima nicht dauerhaft durch die Alkalität des Mörtels geschützt. Als Korrosionsschutzmaßnahmen kommen grundsätzlich Beschichtungen der Bewehrung (z. B. Verzinkung, Epoxidharz-Beschichtungen) in Frage.

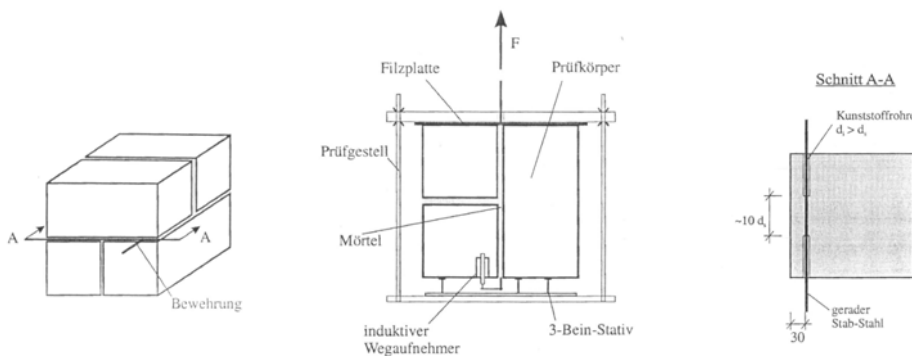
Schießl und Schwarzkopf /9/ untersuchten die Auswirkung einer Feuerverzinkung der Bewehrung als Korrosionsschutzmaßnahme auf den Verbund zwischen Bewehrung und Mörtel.

Als Grundlage für eine bauaufsichtliche Zulassung berichteten Schießl und Schmidt in /10/ über Versuche an duplexbeschichteten Bewehrungselementen (galvanische Verzinkung mit zusätzlicher Epoxidharzbeschichtung).

Die Untersuchungen von Mayrhofer /11/ wurden an beschichteter und unbeschichteter Bewehrung durchgeführt, mit einem variierenden Stabdurchmesser zwischen 4 und 8 mm. Alle Versuche wurden mit Normalmörtel IIa und verschiedenen Steinarten durchgeführt. Die Untersuchungen konnten keinen signifikanten Einfluss der verwendeten Steinart auf die Verbundeigenschaften aufzeigen. Es stellte sich heraus, dass die Verbundwerte der unbeschichteten oder galvanisierten Stäbe größer waren als bei denjenigen mit Duplexbeschichtung. Der Grund dafür war die kleinere bezogene Rippenfläche der Duplexbeschichtung. Mayrhofer fand heraus, dass der optimale Stabdurchmesser für die Lagerfugenbewehrung bei 6 mm liegt, da bei 8 mm der Stab keine vollständige Einbettung erhält und bei 4 mm die bezogene Rippenfläche auf Grund der Beschichtung zu klein ist.

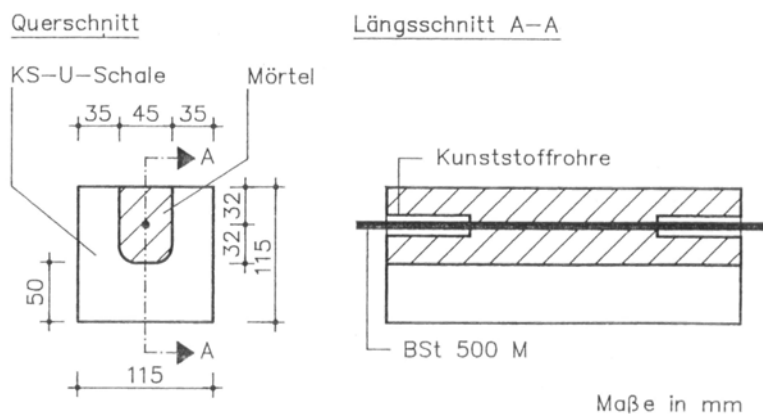
Meyer et al., vgl. /6, 7, 8/, führten Untersuchungen der Verbundeigenschaften zwischen Bewehrung und Mauermörtel durch. Der Versuchsaufbau von /4/ wurde hier übernommen, siehe Bild 6, die einzigen Unterschiede waren, dass, im Gegensatz zu den Versuchen von Zelger und Barlet, die Normalspannung nicht variiert wurde, und die Prüfvorrichtung vertikal aufgebaut war. Die Prüfkörper wurden lediglich für den Transport mit einer Einspannvorrichtung leicht vorgespannt ( $\beta_R \leq 0,01 \text{ N/mm}^2$ ), um Beschädigungen, insbesondere durch Haftscherversagen und Störungen des Verbundbereichs durch den Transport weitgehend auszuschließen.

Für einige Versuchsserien wurden Steine größerer Formate als 2 DF trocken in kleinere Stücke gesägt. Beim Erstellen der Prüfkörper wurde die ungesägte Seite für die Lagerfuge verwendet und die gesägten Seiten zeigten nach außen.



**Bild 6:** Schematische Darstellung des kleinen Vierstein-Mauerwerkprüfkörpers /6/

Es wurden zusätzlich einige Versuche mit Bewehrung in mit Normalmörtel verfüllten Formsteinen durchgeführt, siehe Bild 7. Bei den durchgeführten Versuchen wurden hauptsächlich Kalksandsteine verwendet. Nur wenige Serien wurden aus Hochlochziegeln oder Leichtbetonhohlblöcken hergestellt, da sie im Vergleich zu Ziegeln ungünstiger für den Verbund zwischen Bewehrung und Mörtel sind. Die verwendete Bewehrung war ein BSt 500M Stahl, der vor dem Einbau mit einer Epoxidharzbeschichtung versehen wurde. Der Bewehrungsdurchmesser betrug bei einem Großteil der Prüfungen 6 mm. Vereinzelt wurden auch Versuche mit den Durchmessern 4, 5, und 8 mm durchgeführt. Bei den meisten Versuchen wurde der Bewehrungsstab in eine 20 mm dicke Fuge eingelegt, an Probekörpern mit einer Fugendicke von 12 und 30 mm wurden nur wenige Tastversuche durchgeführt.



**Bild 7:** Schematische Darstellung des Formsteinprüfkörpers /6/

Die Ergebnisse dieser Versuche werden u. a. in /6/ ausgewertet und erläutert. Die neuen Erkenntnisse führten zu dem Vorschlag in der aktuellen Entwurfsfassung von DIN 1053-3 /X2/ höhere Verbundfestigkeiten für NM III in Lagerfugen zuzulassen. Auf Grundlage dieser Untersuchungsergebnisse erscheint auch die Verwendung von NM IIa möglich.



Die in /4/ dargestellten Untersuchungen haben gezeigt, dass die Verbundfestigkeit in Ziegel-Formsteinen deutlich höher ist als in der Lagerfuge, und die Werte von Beton ansetzbar sind. Die in /7/ beschriebenen wenigen Untersuchungen an KS-Formsteinen haben jedoch ergeben, dass die Verbundfestigkeiten sogar deutlich unterhalb der Werte für Bewehrung in Lagerfugen liegen.

Jung und Junge /16/ sind auf die allgemeine Frage des Tragmechanismus von Bewehrung in Aussparungen bzw. U-Schalen und die Wirkung der Bewehrung für das Gesamttragverhalten der Wände eingegangen. Außerdem stellten sie sich die Frage, ob der Vergusskanal, verfüllt mit Mörtel, wirklich fehlerstellenfrei ausgeführt werden kann. Für die Untersuchung war es wichtig eine Vergusstechnik zu verwenden, die eine allseitige Umschließung der Bewehrung sicherstellte. Die Bewehrung wurde in Lochkanälen (ca. 40 mm x 45 mm) in vertikaler Führung eingebracht und mit einem verdichtungswilligen Normalmörtel NM III bzw. NM IIIa verfüllt. Das Einfüllverfahren geschah auf zwei Arten: Erst Einfüllen des Mörtels, dann Einstellen der Bewehrung oder umgekehrt. Dem unterschiedlichen Saugverhalten der Steine hatte man versucht durch verschiedene Wassergehalte in den Mörteln und durch das Vornässen des Vergusskanals entgegen zu wirken. Die Ergebnisse belegten, dass mit der Bewehrung ein besseres Tragverhalten im Mauerwerk erreicht werden kann. Die beiden Einfüllverfahren zeigten keine Unterschiede in der Tragfähigkeit des Prüfkörpers. Jedoch wurde vorgeschlagen, besser zuerst zu verfüllen und dann den Stab einzusetzen. Mit diesem Verfahren wird laut /16/ eine bessere Zentrierung gewährleistet. Des Weiteren kann Zeit gespart werden, da man nicht um den Stab herum verfüllen muss.

### 3.3 Gesetz des verschieblichen Verbundes

Mit dem im Folgenden erläuterten Berechnungsverfahren ist es möglich, aus den im Versuch ermittelten Last-Verschiebungsbeziehungen den Verlauf der Verbund- und Stahlspannungen für beliebig lang eingebettete Stähle anzugeben. Damit können dann die erforderlichen Verankerungslängen für die Bewehrung in Mauermörtel ermittelt werden.

Die Änderung der gegenseitigen Verschiebung  $d\Delta$  zwischen Stahl und Mörtel auf der Länge  $dx$  kann durch die Differenz der Dehnungen von Stahl  $\varepsilon_s$  und Mörtel  $\varepsilon_m$  ausgedrückt werden:

$$\frac{d\Delta}{dx} = \varepsilon_s - \varepsilon_m \quad (2)$$

Rehm /1/ hat durch Ausziehversuche gezeigt, dass die Größe der Betondehnungen mindestens eine Größenordnung kleiner als die der Stahldehnungen und damit vernachlässigbar gering ist. Dies gilt nicht nur für Stahlbeton, sondern auch für bewehrtes Mauerwerk. Dadurch vereinfacht sich Gleichung (2) zu:

$$\frac{d\Delta}{dx} \approx \varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (3)$$

Die Änderung der Zugspannung im Stahl  $d\sigma_s$  ergibt sich aus der durch die Verbundwirkung über die Mantelfläche  $U$  eingeleiteten Spannung  $\tau_{vx}$

$$\frac{d\sigma_s}{dx} = \tau_{vx} \cdot \frac{U}{A_s} \quad (4)$$

Der Zusammenhang zwischen Verbundspannung und Verschiebung  $\tau_{vx} = f(\Delta)$  wird aus den Versuchsergebnissen abgeleitet.

Die Verbundspannung setzt sich aus der Haftverbundspannung  $\tau_{0,001}$  und einem erst durch die Verschiebung aktivierten Anteil  $\tau_{v(\Delta)}$  zusammen. Die Haftverbundspannung  $\tau_{0,001}$  wird als die Verbundspannung definiert, bei der die Verschiebung  $\Delta$  zwischen Stahl und Mörtel im Ausziehversuch 0,001 mm beträgt.

$$\tau_{vx} = \tau_{0,001} + \tau_{v(\Delta)} \quad (5)$$

Durch Einsetzen von Gleichung (3) in Gleichung (4) ergibt sich die Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes

$$\frac{d^2\Delta}{dx^2} = \frac{U}{A_s \cdot E_s} \cdot \tau_{vx} \quad (6)$$

Der Zusammenhang zwischen Verbundspannung  $\tau_{vx}$  und Schlupf  $\Delta$  kann mit dem Ansatz

$$\tau_{vx} = \tau_{0,001} + \frac{\Delta}{a + b \cdot \Delta} \quad (7)$$

sehr gut beschrieben werden. Durch Einsetzen von Gleichung (7) in Gleichung (6) erhält man die Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes

$$\frac{d^2\Delta}{dx^2} = \frac{U}{A_s \cdot E_s} \cdot \left( \tau_{0,001} + \frac{\Delta}{a + b \cdot \Delta} \right) \quad (8)$$

Eine analytische Lösung von Gleichung (8) ist nur unter speziellen Randbedingungen möglich. Aus diesem Grund wurde in /4/ eine iterative Lösung mit numerischen Methoden durchgeführt. Diese Lösungsmethode wurde auch für die Auswertung der hier durchgeführten Versuche gewählt (s. Kapitel 4.3.4 und 5.5.4).

### **3.4 Einflüsse auf den Verbund**

#### **3.4.1 Allgemeines**

In den folgenden Abschnitten werden die Einflüsse verschiedener Parameter auf die Qualität des Verbundes zwischen Mörtel bzw. Beton und Bewehrung zusammengetragen. Zu diesen Parametern zählen beim Stahlbeton insbesondere die Betonfestigkeit, die Oberflächenprofilierung der Betonstähle, die Lage des Betonstahls beim Betonieren sowie die Querpressung bzw. Behinderung der Querdehnung des Betons und Querkzugspannungen.

Im Mauerwerk ist die signifikanteste Einflussgröße die verwendete Steinart. Die Mörtel-druckfestigkeit wird neben der Mörtelzusammensetzung wesentlich von den feuchtetechnischen Eigenschaften der verwendeten Mauersteine sowie deren Feuchtegehalt beim Vermauern bestimmt. Weitere den Verbund beeinflussende Parameter sind u. a. die Qualität der Bauausführung und das Aufbringen einer Normalspannung.

Diese Erkenntnisse stammen im Wesentlichen aus den Untersuchungen, die im Abschnitt 3.1 zusammengestellt wurden.

#### **3.4.2 Einfluss der verwendeten Mauersteinarten**

Die Eigenschaften der verwendeten Mauersteine (kapillare Wasseraufnahme, Steifeuchte beim Vermauern, Porengrößenverteilung) haben einen wesentlichen Einfluss auf das Verbundverhalten des Stahles im Mörtel, wie die Untersuchungen u. a. von Barlet in /4/ belegen. Dies ist zum einen die Folge der unterschiedlichen Festigkeit des Mörtels in der Lagerfuge, bedingt durch das verschiedenartige Saugverhalten der Mauersteine, und zum anderen der unterschiedlichen Oberflächenrauheit der Mauersteine.

In /4/ führte Barlet Versuche mit unterschiedlichen Mauersteinarten durch. Die Verbundversuche führten bei gleicher Mörtelzusammensetzung für die verschiedenen Steinarten zu deutlichen Unterschieden in den Versuchsergebnissen. Bei Versuchen mit Hochlochziegeln wurden grundsätzlich höhere Verbundspannungen als bei allen anderen Mauersteinarten ermittelt. Die für diese Mauersteine ermittelten maximalen Verbundspannungen lagen etwa 50 % über den Ergebnissen für Kalksandsteine und Porenbetonsteine. Hochlochziegel haben kleinere und zahlreichere Löcher und zudem eine rauere Oberfläche als Kalksandsteine. Diese Rauheit wirkt als „Verzahnung“ und somit können größere Spannungen vom Mörtel auf den Stein übertragen werden.

Da es zum Zeitpunkt der Versuche von Barlet noch kein Prüfverfahren zur Bestimmung der Fugendruckfestigkeit gab und nur die Prismendruckfestigkeit des Mörtels nach DIN 18555-3:1982-09 /X7/ ermittelt wurde, konnten diese Versuchsergebnisse nicht mit der Fugendruckfestigkeit korreliert werden.

Meyer u. a. bestätigten durch ihre Versuche in /6/ und /7/, dass die Fugendruckfestigkeiten bei gleicher Mörtelzusammensetzung in Abhängigkeit der Steinart stark variieren können und dabei immer über der Normdruckfestigkeit liegen. Bei Versuchen mit NM IIa (Normdruckfestigkeit  $\beta_D = 3,4$  bis  $4,3$  N/mm<sup>2</sup>) betrug die Fugendruckfestigkeit zwischen  $6,8$  N/mm<sup>2</sup> (Leichtbetonhohlblock Hbl 4) und  $21,5$  N/mm<sup>2</sup> (Hochlochziegel HLz 12). Es ergab sich ein guter Zusammenhang zwischen der Mörteldruckfestigkeit im Mauerwerk und den Verbundeigenschaften. Lediglich bei Porenbetonsteinen waren die ermittelten Verbundspannungen, bezogen auf die Fugenmörtelfestigkeit, etwas geringer als bei den übrigen Steinen. Dies wird auf die geringere Haftscherfestigkeit zwischen Stein und Mörtel, die auch durch die Steineigenschaften beeinflusst wird, und eine daraus resultierende Längsrisssbildung zurückgeführt.

### **3.4.3 Einfluss des Feuchtezustandes der Mauersteine**

In /4/ wird darauf hingewiesen, dass der Feuchtezustand eines Mauersteines die Verbundspannungen maßgeblich beeinflussen kann.

Versuchsergebnisse in /4/ belegen, dass durch die Verwendung vorgehängter Steine häufig höhere Fugendruckfestigkeiten und Haftscherfestigkeiten erzielt werden. Aus diesem Grund untersuchte Meyer /6/ den Einfluss des Feuchtezustandes punktuell an Kalksandsteinen und Hochlochziegeln. Die höhere Steinfeuchte ( $h_m = 10$  M.-%) hatte jedoch im Vergleich zu lufttrocken vermauerten Steinen ( $h_m = 2,3$  M.-%) nur einen geringen Einfluss auf

die Fugendruckfestigkeit. Die ähnlichen Fugendruckfestigkeiten werden dadurch begründet, dass einerseits die lufttrockenen Steine dem Mörtel zu viel Wasser entziehen, um eine vollständige Hydratation zu ermöglichen, andererseits aber bei Verwendung der vorgehästeten Steine die im Mörtel vorhandene Wassermenge nicht vollständig bei der Hydratation verbraucht wird und somit zu einer erhöhten Porosität führt. Die maximal erreichbare Fugendruckfestigkeit liegt nach Überlegungen von Meyer vermutlich zwischen den beiden untersuchten Steinfeuchtegehalten.

### **3.4.4 Einfluss der Mörtelfestigkeit und der Mörtelzusammensetzung**

In /4/ wird gezeigt, dass die aufnehmbaren Verbundspannungen analog zum Stahlbeton annähernd linear von der Druckfestigkeit des Mörtels abhängig sind.

Die Zunahme der aufnehmbaren Verbundspannungen mit wachsender Mörteldruckfestigkeit ist auch aus den Versuchen von Schießl und Schwarzkopf /9/ abzulesen. Die Mörteldruckfestigkeit wiederum wird maßgeblich bestimmt durch die Mörtelzusammensetzung, insbesondere dem Wasser-Zement-Wert, der Art des Zusatzstoffs und der Art der Gesteinskörnung.

Martin führte in /3/ Versuche zum Einfluss der Sieblinie und der Gesteinskörnung auf den Verbund zwischen Beton und Bewehrung durch. Er stellte einen deutlichen Einfluss der Sieblinie auf den Verbund zwischen gerippten Stahlstäben und dem Beton fest. Mit zunehmendem Feinkorngehalt wird die Verbundqualität schlechter. Das wird auf die dichtere Lagerung von feinkornarmen Betonen zurückgeführt, die einen höheren Betonwiderstand ermöglicht. Diesen Zusammenhang untersuchten Meyer et al. u. a. in /7/ an Kalksandsteinen und Hochlochziegeln sowie drei Sieblinien eines Normalmörtels NM IIa. Die Mörtel wurden so zusammengesetzt, dass etwa gleiche Normdruckfestigkeiten nach DIN 18555-3 bei gleicher Konsistenz und gleichem Wasser-Bindemittelwert erwartet werden konnten. Die Ergebnisse haben allerdings gezeigt, dass der Einfluss der drei untersuchten Sieblinien auf die Verbundeigenschaften zwischen Bewehrung und Mörtel nicht signifikant ist.

Werkmörtel enthalten i. d. R. Zusatzmittel zur Verbesserung bestimmter Eigenschaften, z. B. der Haftscherfestigkeit, der Verarbeitbarkeit, des Frostwiderstandes. Einige dieser Zusatzmittel bewirken durch eine Erhöhung des Luftgehaltes des Frischmörtels eine Veränderung der Porenstruktur im Vergleich zu Mörteln ohne Zusatzmittel. Meyer untersuchte in /7/ den Einfluss einer Kombination von Verzögerer und Luftporenbildner (LP/VZ) auf die Verbundeigenschaften an zwei Versuchsserien. Die Versuchsergebnisse zeigten, dass die maß-

gebende Verbundspannung der Versuchsserie mit Zusatzmittel (Luftporengehalt = 21 Vol.-%) rd. 77 % der entsprechenden Verbundspannung der vergleichbaren Versuchsserie ohne Zusatzmittel (Luftporengehalt = 4,6 Vol.-%) beträgt. Außerdem ist eine Steigerung der Lastaufnahme im Bereich großer Verschiebungen auf Grund des höheren Luftgehaltes des Frisch- und vermutlich auch des Festmörtels nur in geringem Maße möglich ist.

### **3.4.5 Einfluss der Qualität der Bauausführung**

In DIN 1045-1 /X6/ wird je nach Lage der Stäbe in einen guten und mäßigen Verbund unterschieden. Nach dem Betonieren setzt sich der Beton ab. Liegt ein Stab zu weit oben, so entstehen Lunker und Poren direkt unterhalb des Stabes. Bei den unten liegenden Stäben ist der Verbund gut. Diese Unterscheidung wird meistens nur für annähernd horizontale Bewehrung gemacht.

In bewehrtem Mauerwerk hat die Ausführungsqualität, insbesondere bei der Lagerfugenbewehrung, eine entscheidende Bedeutung für die Verbundqualität zwischen Bewehrung und Mörtel. In /6/ wurde der Einfluss der Dicke der Lagerfuge und damit verschiedener Mörteldeckungen (zwischen 3 und 12 mm) untersucht. Ab einer Mörteldeckung von 7 mm stellte Meyer keine weitere signifikante Steigerung der Verbundspannung im Bereich der interessierenden Verschiebungen fest. Zusätzlich wurde die Auswirkung einer direkt auf der Steinlagerfläche aufliegenden Bewehrung im Vergleich zu mittig eingebetteter Bewehrung untersucht. Durch die Lage der Bewehrung direkt auf dem unteren Stein ergaben sich ungünstigere Fugenmörteleigenschaften in der Randzone sowie eine teilweise Verhinderung der mechanischen Verzahnung zwischen Bewehrung und Mörtel.

Durch eine Vergrößerung der Mörtelumhüllung ist mit einer Erhöhung der Verbundspannungen zu rechnen. Dies gilt ebenso für eine horizontale Bewehrungsführung in Formsteinen, wie die Versuche von Barlet in /4/ gezeigt haben. Der insgesamt größere Mörtelquerschnitt ermöglicht außerdem ein besseres Verdichten (Stochern mit der Kelle), wodurch der Verbund verbessert werden kann.

Einige Versuchsergebnisse von Meyer in /6/ lassen vermuten, dass die Verbundspannungen für Bewehrung in Formsteinen nach Verbundbereichen (kleine und große Aussparungen) differenziert werden müssen.

Eine abnehmende Mörteldeckung zur Wandoberfläche führt durch eine Sprenggrissbildung zu einer deutlichen Reduzierung der Verbundqualität. Die DIN 1053-3 /X1/ fordert daher eine Mörteldeckung von  $c \geq 30$  mm zur Wandoberfläche. Untersuchungen von Meyer /6/

bestätigen, dass eine verringerte Mörteldeckung ( $c = 10 \text{ mm}$ ) im Vergleich zu der normgerechten Mörteldeckung 35 % geringere maßgebende Verbundspannungen liefert.

### 3.4.6 Einfluss der Bewehrungseigenschaften

Die bezogene Rippenfläche  $f_R$  stellt eine wichtige Kenngröße für die Verbundqualität dar, da der Scherverbund erst durch diese aktiviert wird.

Rehm /1/ hat in seinen Untersuchungen einen linearen Zusammenhang zwischen der auf die Betondruckfestigkeit  $f_c$  bezogenen Verbundspannung bei einem Schlupf von 0,1 mm und der bezogenen Rippenfläche festgestellt.

In der Stahlbetonbauweise hat der Stabdurchmesser  $d_s$  eine untergeordnete Bedeutung, falls die bezogene Rippenfläche gleich bleibt. Im bewehrten Mauerwerk dagegen wird durch einen größeren Durchmesser und eine konstante Fugendicke eine geringere Deckung erreicht, somit wird die Verbundqualität schlechter. Die kleineren Durchmesser wirken durch das größere Verhältnis Umfang/Fläche günstiger.

Für das bewehrte Mauerwerk sind nach DIN 1053-3 /X1/ neben Bewehrungselementen nur gerippte Betonstähle einzusetzen. Da die Bewehrung im Mauerwerk, anders als im Beton, nicht dauerhaft durch die hohe Alkalität des Mörtels geschützt ist, muss bei Verwendung in nicht dauerhaft trockenem Raumklima ein zusätzlicher Korrosionsschutz aufgebracht werden. Als Korrosionsschutzmaßnahmen kommen grundsätzlich Beschichtungen der Bewehrung (z. B. Epoxidharz-Beschichtung, Verzinkung) in Frage.

Schießl und Schwarzkopf haben in /9/ Untersuchungen mit feuerverzinkten Stählen durchgeführt. Ihre Ergebnisse zeigten keinen signifikanten Einfluss der Verzinkung auf die Verbundqualität.

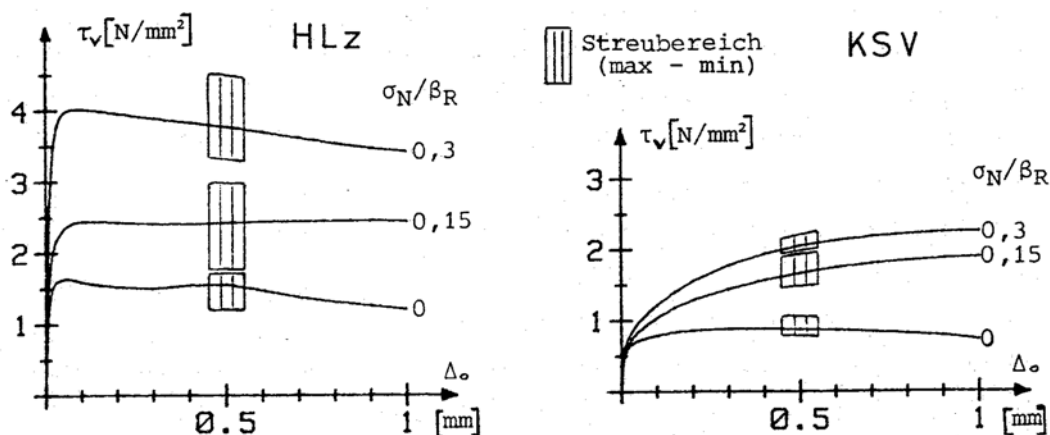
Die Verbundcharakteristika epoxidharzbeschichteter und unbeschichteter Bewehrung unterscheiden sich deutlich voneinander. Arbeiten von Meyer in /7/ belegen, dass die maßgebende Verbundspannung  $\tau_M$  der epoxidharzbeschichteten Stähle ca. 20 % geringer ist als für unbeschichtete Stähle. Aufgrund der größeren Mikrorauheit der unbeschichteten Stähle sind die Haftverbundspannungen  $\tau_{0,001}$  deutlich größer als bei beschichteten Stählen. Die weitere Lastaufnahme durch den Mörtel bei größeren Verschiebungen ist jedoch bei unbeschichteten Bewehrungsstählen, anders als bei beschichteten, nur noch gering.

Um einen ausreichenden Korrosionsschutz sicherzustellen, muss die Schichtdicke der Epoxidharzbeschichtung nach /X30/ einen Mindestwert von  $80 \mu\text{m}$  an den Rippenkanten und von

120  $\mu\text{m}$  zwischen den Rippen aufweisen. Der obere Grenzwert der Schichtdicke der Beschichtung von 300  $\mu\text{m}$  soll eine Beeinflussung der Verbundqualität durch eine zu starke Verringerung der bezogenen Rippenfläche ausschließen. Auf die Beeinflussung der Verbundqualität durch unterschiedliche Schichtdicken der Beschichtung wurde u. a. auch in /7/ eingegangen. Die Untersuchungen von Meyer et. al. belegen, dass der Einfluss der Dicke der Beschichtung auf die Verbundeigenschaften für einen Stabdurchmesser  $d_s = 6 \text{ mm}$  vernachlässigbar klein sind, während durch eine Erhöhung der Schichtdicke von 250  $\mu\text{m}$  auf 350  $\mu\text{m}$  und die damit verbundene Verringerung der bezogenen Rippenfläche die Verbundqualität der beschichteten Stähle  $d_s = 4 \text{ mm}$  negativ beeinflusst wird.

### 3.4.7 Einfluss des Aufbringens einer Normalspannung

In /4/ zeigte sich eine Erhöhung der aufnehmbaren Verbundspannungen durch das Aufbringen kleiner Normalspannungen  $\sigma_N$ . In Bild 8 sind für die Versuche mit Hochlochziegeln und Kalksandsteinen die aufnehmbaren Verbundspannungen in Abhängigkeit von der auf die Mauerwerkfestigkeit  $\beta_R$  bezogenen Spannung  $\sigma_N$  dargestellt.



**Bild 8:** Ausziehversuche mit Stabstahl  $\varnothing 8 \text{ mm}$  in Abhängigkeit vom Belastungsgrad  $\sigma_N/\beta_R$ . Gemittelte Versuchskurven für Hochlochziegel HLz 12 und Kalksandstein KSV 12 /4/

Aus Bild 8 ist abzulesen, dass das Aufbringen einer Normalspannung eine deutliche Steigerung der Verbundkräfte ergibt. Außerdem erkennt man, dass die Versuche mit Ziegeln eine größere Streuung innerhalb der Serie und einen spröderen Verhalten aufweisen als die mit Kalksandsteinen.



### **3.5 Ursprung der heute noch gültigen zulässigen Verbundspannungen**

#### **3.5.1 Allgemeines**

Die deutsche Norm für bewehrtes Mauerwerk DIN 1053-3 wurde im Februar 1990 eingeführt und ist immer noch gültig. Die Norm spiegelt den damaligen Kenntnisstand wieder. Die Bemessung basiert auf globalen Sicherheitsbeiwerten und somit auf zulässigen Spannungen und Festigkeiten. Für bewehrtes Mauerwerk wird bei der Bemessung vielfach auf die Stahlbetonnorm DIN 1045:1988-07 /X5/ verwiesen.

In der Neufassung der DIN 1053-3 wird das globale Sicherheitskonzept durch das semi-probabilistische Konzept unter Verwendung von Teilsicherheitsbeiwerten ersetzt. Zurzeit liegt der 8. Entwurf vor. In diesem Entwurf zur Neufassung von DIN 1053-3 sind Bemessungswerte der Verbundfestigkeit, die sich an den in der alten DIN 1053-3 genannten zulässigen Grundwerten der Verbundspannung orientieren, angegeben.

Die Bemessungswerte der Verbundspannungen sichern, dass am Anfang einer Kräfteinleitung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit die zulässigen Rissbreiten eingehalten werden, d. h. keine wesentlichen Verschiebungen zwischen Stahl und Mörtel bzw. Beton vorhanden sind, und im Grenzzustand der Tragfähigkeit ein ausreichender Sicherheitsabstand gegen das Versagen des Verbundes vorliegt.

#### **3.5.2 Bemessungswerte der Verbundspannung in DIN 1045-1**

Die Herkunft sowohl der zulässigen Verbundspannungen der DIN 1045 /X5/ als auch der Bemessungswerte der derzeit gültigen DIN 1045-1 /X6/ sind unzureichend dokumentiert.

Während in DIN 1045 /X5/ Grundwerte für die zulässigen Verbundspannungen in Abhängigkeit der Betonfestigkeitsklasse für den Verbundbereich I (guter Verbund) und II (mäßiger Verbund) tabellarisch angegeben sind, kann nach DIN 1045-1 der Bemessungswert der Verbundspannung  $f_{bd}$  aus dem 5 %-Fraktilwert der Betonzugfestigkeit gemäß Gleichung (1), Kapitel 2.4 ermittelt werden.

Lindorf ist in /22/ der Frage nach der Herkunft der zulässigen Verbundspannungen nachgegangen und hat festgestellt, dass für den Rechenwert der Verbundspannung vermutlich von folgendem Zusammenhang ausgegangen wurde.

$$\tau_b \approx \sqrt[3]{\beta_w^2} \quad (9)$$

Wie im Folgenden gezeigt wird, konnte Lindorf einen direkten Zusammenhang zwischen den Bemessungswerten der Verbundspannung nach DIN 1045-1 und der CEB-FIP Mustervorschrift RP 70 /23/ belegen.

In /23/ ist der Zusammenhang zwischen der Verbundspannung und der Betondruckfestigkeit wie folgt definiert:

$$\tau_{bd} = 0,4 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{f_{ck}}{\gamma_c}\right)^2} \quad (10)$$

Wird die Beziehung zwischen der Druck- und Zugfestigkeit des Betons nach DIN 1045-1

$$f_{ctk;0,05} = 0,7 \cdot f_{ctm} = 0,7 \cdot 0,30 \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2} = 0,21 \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2} \quad (11)$$

in Gleichung (10) eingefügt und einen Teilsicherheitsbeiwert von  $\gamma_c = 1,5$  angenommen, erhält man folgende Gleichung,

$$\tau_{bd} = 0,4 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{1}{1,5}\right)^2} \cdot \frac{1}{0,21} \cdot f_{ctk;0,05} = 2,23 \cdot f_{ctk;0,05} \approx 2,25 \cdot f_{ctk;0,05} \quad (12)$$

die mit Gleichung (1) identisch ist.

Für die alte DIN 1045 lässt sich nach Lindorf ebenfalls ein Zusammenhang zur CEB-FIP Mustervorschrift PR 70, auf den hier nicht weiter eingegangen wird, herstellen.

### 3.5.3 Zulässige Verbundspannungen in DIN 1053-3

#### 3.5.3.1 Allgemeines

Die zulässigen Verbundspannungen in DIN 1053-3 für eine Bewehrung in Formsteinen bzw. Aussparungen, die mit Mörtel bzw. Beton verfüllt werden, wurden in Anlehnung an DIN 1045 /X5/ festgelegt. Diese wurden i. W. auf Grundlage von Ausziehversuchen, siehe hierzu u. a. /1/, /2/ und /3/, erarbeitet. Nach der in /4/ dargestellten und analog zum Beton nach den Gesetzen des verschieblichen Verbundes durchgeführten Auswertung der u. a.

in /5/ beschriebenen Untersuchungen, können die für Beton gültigen Verbundspannungen auch auf Bewehrung übertragen werden, die in Mörtel bzw. Beton in Formsteinen und Aussparungen eingebettet ist. Die Werte für die Bewehrung in den Lagerfugen in /X1/ basieren ebenfalls auf dem Vorschlag aus /4/. Diese betragen für Normalmörtel NM IIIa 50 % und für Normalmörtel NM III 33 % der für Bewehrung in Formsteinen bzw. Aussparungen angegebenen Werte.

In Tabelle 1, siehe Abschnitt 2.1, sind die zulässigen Verbundspannungen für Bewehrung in Lagerfugen und Formsteinen nach DIN 1053-3 angegeben.

### 3.5.3.2 Bewehrung in Lagerfugen

In der Arbeit von Barlet /4/ wird auf Grundlage der Auswertung der durchgeführten Versuche und der Festlegung von Sicherheitsbeiwerten ein Vorschlag für die zulässigen Grundwerte der Verbundspannungen in bewehrtem Mauerwerk gegeben. Da, zumindest für den Fall der Bewehrungsführung in Lagerfugen, kaum Erfahrungen mit ausgeführten Bauwerken bestanden, wurden diese Werte sehr vorsichtig gewählt. In der deutschen Mauerwerknorm (DIN 1053-1:1:1974-11 /X33/) galt der Grundsatz, dass die Vorschriften einheitlich für alle Steinarten gelten sollten. Aus diesem Grund wurde als Referenz ein Kalksandstein herangezogen, da dieser die geringsten aufnehmbaren Verbundspannungen ergab.

Die in /4/ vorgeschlagenen zulässigen Grundwerte der Verbundspannung sind in Tabelle 7 dargestellt. Diese Werte werden in Abhängigkeit der auf die Mauerwerkdruckfestigkeit  $\beta_R$  bezogenen Auflast auf die Lagerfuge angegeben und sind in Tabelle 7 dargestellt. Es wird zwischen einer frei stehenden Wand mit  $\sigma_N \leq 0,01 \cdot \beta_R$  und einer unter zusätzlicher Last stehenden Wand mit  $\sigma_N \leq 0,03 \cdot \beta_R$  unterschieden.

Tabelle 7: Vorschlag für die zulässigen Grundwerte der Verbundspannung  $\tau_1$  in der Lagerfuge unterschieden nach Belastung /4/

Auflast	Mörtelgruppe	
	NM III	NM IIIa
-	N/mm <sup>2</sup>	
1	2	3
$\leq 0,01 \cdot \beta_R$	0,25 <sup>1)</sup>	0,70
$\geq 0,03 \cdot \beta_R$	0,45 <sup>1)</sup>	1,00

1) gilt nur bei Verwendung von Betonstahl BSt 420 S

In DIN 1053-3 fanden die von Barlet aus den Versuchen ohne Auflast abgeleiteten Vorschläge für die Grundwerte der zulässigen Verbundspannungen in leicht modifizierter Form Eingang.

Die zulässigen Verbundspannungen in /4/ wurden nach der folgenden Formel berechnet:

$$\tau_{zul} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot \beta_{D,M\ddot{o}} \quad (13)$$

mit:

- $\beta_{D,M\ddot{o}}$  Mörteldruckfestigkeit  $\beta_{D,M\ddot{o}} = 10 \text{ N/mm}^2$  für NM III und  
 $\beta_{D,M\ddot{o}} = 20 \text{ N/mm}^2$  für NM IIIa
- $k_1$  Sicherheitsbeiwert zur Berücksichtigung der Streuung der Versuchsergebnisse ( $k_1 = 0,8$ )
- $k_2$  Sicherheitsbeiwert zur Berücksichtigung einer Dauerbelastung ( $k_2 = 0,85$ )
- $k_3$  Zuordnung von aufnehmbarer Verbundspannung und Mörteldruckfestigkeit aus Tabelle 5.2 in /4/  
( $k_3 = 0,098$  bis  $k_3 = 0,123$ )
- $k_4$  Verhältniswert der zulässigen Verbundspannung zu den im Gebrauchszustand aufnehmbaren Verbundspannungen aus Tabelle 5.4 in /4/ ( $k_4 = 0,58$  bis  $k_4 = 1,00$ )

Die Konstante  $k_1$  berücksichtigt die Streuung der aufnehmbaren Verbundspannungen. Barlet schlägt in /4/ vor, die mittleren aufnehmbaren Verbundspannungen mit einem Faktor von 0,80, dem Schätzwert der 5%-Quantile der bezogenen aufnehmbaren Verbundspannung, zu multiplizieren.

Ausziehversuche werden i. d. R. als Kurzzeitversuche durchgeführt. Die Festlegung zulässiger Grundwerte der Verbundspannung erfordert aber die Berücksichtigung des Einflusses einer dauerhaften Belastung. Janovic führte in /12/ Versuche zum Verbundverhalten von Bewehrungsstäben in Beton unter Dauerbelastung durch. Er gibt an, dass häufig ein Verbundversagen beobachtet wurde, wenn die aufgebrachten Dauerlasten größer als etwa 85 % der maximalen Kurzzeitlast waren. Bei seinen Versuchen verwendete er Stäbe mit einem Stabdurchmesser von 20 mm. Aufgrund der im Verhältnis zum Querschnitt stärker wachsenden Mantelfläche wirkt sich das Verbundverhalten aber mit kleiner werdendem Durchmesser günstiger aus, so dass die von Janovic vorgesehene Abminderung von 85 % als Dauerstandfaktor in /4/ durch den Faktor  $k_2$  übernommen wurde.

Der Faktor  $k_3$  gibt das Verhältnis von der aufnehmbaren Verbundspannung  $\tau_m$  und der Mörtel-  
druckfestigkeit  $\beta_{D,M6}$  an. Dieses Verhältnis ist von der Auflast ( $\sigma_N \leq 0,01 \cdot \beta_R$  oder  $\sigma_N \leq 0,03 \beta_R$ )  
unter der die Versuche durchgeführt wurden (s. Kapitel 3.4.7) sowie der verwendeten Stahl-  
sorte (BSt 420 oder BSt 500) abhängig. Die Werte betragen zwischen 0,098 und 0,123.

Die Konstante  $k_4$  gibt das Verhältnis der zulässigen Verbundspannung zu der im Ge-  
brauchszustand aufnehmbaren an. Die zulässige Verbundspannung wird mit der folgen-  
den Formel berechnet:

$$\text{zul } \tau = \frac{0,9 \cdot \tau_{0,4}}{2,1} \quad (14)$$

mit:

$\tau_{0,4}$  durchschnittlich gemessene Verbundspannung bei einem Schlupf von 0,4 mm

zul  $\tau$  zulässiger Grundwert der Verbundspannung

Die Verbundspannung bei 0,4 mm Schlupf wird gewählt, da die meisten Spannungs-Schlupf-  
Kurven bei einem Schlupf von 0,4 mm einen annähernd horizontalen Verlauf erreichen. Der  
Faktor 0,9 berücksichtigt einen leichten Abfall der Kurve nach dem Maximum.

Barlet sieht einen zusätzlichen Abminderungsfaktor für die zulässigen Verbundspannun-  
gen vor, da i. d. R. bei der Herstellung von Probekörpern im Labor genauer und sorgfälti-  
ger gearbeitet wird als auf der Baustelle. Da der Abminderungsfaktor für solche Ungenau-  
igkeiten bei der Herstellung nicht zahlenmäßig zu erfassen ist, soll dieser Einfluss bei der  
Festlegung der zulässigen Verbundspannungen mit einem allgemeinen Sicherheitsfaktor  
abgedeckt werden. Neben den Konstanten  $k_1$  bis  $k_4$  führt Barlet in /4/ somit noch einen  
Sicherheitsfaktor von 1,66 zur Berücksichtigung von Ungenauigkeiten ein.

### 3.5.3.3 Bewehrung in Formsteinen

Der Verbund zwischen Stahl und Mörtel in großen Aussparungen entspricht laut Barlet dem  
Verbund bei Stahlbeton, da die Bewehrung allseitig gleichmäßig von Mörtel bzw. Beton  
umgeben ist. Die zulässigen Grundwerte der Verbundspannung sollen sich, entsprechend  
dem allgemeinen Konzept für die Bemessung von bewehrtem Mauerwerk, eng an die Vor-  
schriften des Stahlbetonbaus anlehnen.

Aus diesem Grund wurden in /4/ neben Versuchen an Mauerwerk auch Vergleichsversuche an Betonausziehkörpern ausgewertet, bei denen der Bewehrungsstab zentrisch stehend in einen Würfel einbetoniert wurde und gegen die Betonierichtung herausgezogen wurde. Die Versuche an Mauerwerk wurden mit Ziegel-Formsteinen durchgeführt, bei denen der Bewehrungsstab mit allseitig gleichem Abstand zur Außenfläche horizontal eingelegt wurde, so dass er gleichmäßig von Mörtel umgeben war. Bei der Gegenüberstellung der Ergebnisse zeigte sich zunächst, dass die mittleren Verbundspannungen bei den Ziegel-Formsteinen größer waren als bei den Betonwürfeln. Um aber die Ergebnisse wirklich vergleichen zu können, muss man von der Festigkeit des Mörtels bzw. Betons im Prüfkörper ausgehen, welche für Beton etwa der an separaten Würfeln festgestellten entspricht, für Mörtel dagegen nicht. Je nach Steinart ergibt sich eine höhere Mörteldruckfestigkeit in den Formsteinen. Bei den in /4/ durchgeführten Versuchen erhöhte sich die Mörteldruckfestigkeit um 40 %. Unter Berücksichtigung der erhöhten Festigkeit des Mörtels im Prüfkörper ergab sich ein linearer Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und aufnehmbarer Verbundspannung. Aus diesem Grund empfahl Barlet für die Einbettung in Formsteinen mit guter Näherung die Verbundspannungswerte für Stahlbeton anzusetzen.

Die Mörtelgruppe NM IIIa entspricht etwa der Betonfestigkeitsklasse B15, da für beide ein Mittelwert von 20 N/mm<sup>2</sup> beim Gütenachweis gefordert wird. Nach Barlets Empfehlung wurde der zulässige Grundwert der Verbundspannung für Beton der Festigkeitsklasse B15 (zul  $\tau_1 = 1,4$  N/mm<sup>2</sup>) aus DIN 1045 für den Normalmörtel NM IIIa vorgeschlagen und in DIN 1053-3 übernommen. Nach der neuen DIN 1045-1 entspricht ein Normalmörtel NM IIIa einer Betonfestigkeitsklasse C16/20.

Für die Mörtelgruppe NM III in Formsteinen lagen keine Versuche vor, aus denen die Gültigkeit der Analogie zum Stahlbeton wie für NM IIIa abgeleitet werden konnte. Der Anforderungswert für die Mörtelgruppe NM III ( $\beta_D = 10$  N/mm<sup>2</sup>) ist kleiner als die niedrigste für Stahlbeton vorgesehene Festigkeitsklasse. Daher enthielt DIN 1045 hierfür keinen vergleichbaren Grundwert der Verbundspannung. Der zulässige Grundwert der Verbundspannungen wurde für die Mörtelgruppe NM III mit Hilfe der folgenden Formel aus /4/ abgeleitet:

$$\text{zul } \tau_1 = 0,6 + 0,04 \cdot \beta_{ws} \quad (15)$$

mit:

$\beta_{ws}$  Serienfestigkeit des Betons

zul  $\tau_1$  zulässiger Grundwert der Verbundspannungen

Wird die Mindestfestigkeit des Mörtels für  $\beta_{ws}$  eingesetzt, ergibt sich für die Mörtelgruppe NM III zu  $\tau_1$  zu 1,0 N/mm<sup>2</sup>. Daher wurde auch für die Mörtelgruppe NM III der vom Stahlbeton abgeleitete Wert als zulässiger Grundwert von Barlet vorgeschlagen und fand in DIN 1053-3 Eingang.

### **3.5.4 Bemessungswerte der Verbundspannungen in der Entwurfsfassung von DIN 1053-3**

#### **3.5.4.1 Allgemeines**

In DIN 1053-3 /X1/ werden die Verbundfestigkeiten für horizontale Bewehrungsstäbe bei Einbettung in Mörtelgruppe NM III fast auf 33 %, bei Einbettung in Mörtelgruppe NM IIIa jedoch nur auf die Hälfte abgemindert. Im Vergleich zur DIN 1045-1 (vgl. dort Abschnitt 12.5 (2)), wo für mäßige Verbundbedingungen (allerdings mit meist besserer Verdichtung) nur eine Abminderung auf 70 % verlangt wird, enthält die Entwurfsfassung von DIN 1053-3 /X2/ eine Abminderung auf 50 %.

Die aktuelle Entwurfsfassung von DIN 1053-3 /X2/, siehe Tabelle 2, Kapitel 2.2, sieht vor höhere Verbundfestigkeiten für NM III in den Lagerfugen zuzulassen. Hiermit wird neueren Untersuchungsergebnissen, vgl. u. a. /6, 7, 8/, Rechnung getragen. Auf Grundlage dieser Untersuchungsergebnisse erscheint auch die Verwendung von NM IIa möglich. Eine Erhöhung des Sicherheitsniveaus wird für horizontale Bewehrung in Formsteinen durch Ansatz eines „mäßigen“ Verbundes analog zur Lagerfugenbewehrung vorgesehen. Diese Abminderung berücksichtigt eine ggf. schlechtere Verdichtung bei horizontaler Bewehrungslage in Formsteinen.

Im Unterschied zu DIN 1053-3 /X1/ werden in /X2/ auch Bemessungswerte der Verbundfestigkeit  $f_{bd}$  für die Betonfestigkeitsklassen C20/25 und C25/30 angegeben, die auf den Bemessungswerten der Verbundspannung in DIN 1045-1 /X6/ basieren.

#### **3.5.4.2 Bewehrung in Lagerfugen**

Die in der aktuellen Entwurfsfassung von DIN 1053-3 /X2/ vorgesehenen Verbundspannungen für horizontale Bewehrung in Lagerfugen für die Mörtelgruppen NM III und NM IIIa entsprechen den von Meyer in /6/ vorgeschlagenen Werten. Bei der Mörtelgruppe NM IIa wurde der von Meyer empfohlene Wert um 0,05 N/mm<sup>2</sup> erhöht. In Tabelle 8 sind die vorgeschlagenen Grundwerte der zulässigen Verbundspannung aufgeführt.

**Tabelle 8:** Vorschlag für Grundwerte der zulässigen Verbundspannung von epoxidharzbeschichteter Bewehrung in Lagerfugen aus /6/

Kenngröße	Mörtel		
	NM IIa	NM III	NM IIIa
-	N/mm <sup>2</sup>		
1	2	3	4
$\tau_M$	1,10	1,74	2,48
zul. $\tau_0 (= \tau_M/3,3)$	0,33	0,53	0,75
zul. $\tau_0$ (Vorschlag)	0,35	0,50	0,70
$f_{bd} (= \text{zul } \tau_0 \cdot 1,4)$	0,50	0,70	1,00
$f_{bk} (= f_{bd} \cdot 1,5)$	0,75	1,05	1,50

Die zulässigen Verbundspannungen wurden in /6/ nach folgenden Formeln berechnet:

$$\text{zul } \tau_1 = \frac{\tau_M}{\gamma_{G,LF}} \quad (16)$$

$$\tau_M = 0,38 \cdot \beta_{D,F(ibac)}^{0,66} \quad (17)$$

$$\gamma_{G,LF} = \gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot \gamma_3 \cdot \gamma_4 \quad (18)$$

mit:

$\tau_M$  mittlere maßgebende Verbundspannung aus den Versuchsserien

$\beta_{D,F(ibac)}$  Fugendruckfestigkeit

$\gamma_{G,LF}$  Gesamtsicherheitsbeiwert der Lagerfugenbewehrung ( $\gamma_{G,LF} = 3,3$ )

$\gamma_1$  Sicherheitsbeiwert zur Berücksichtigung der Streuung ( $\gamma_1 = 1,7$ )

$\gamma_2$  Sicherheitsbeiwert zur Berücksichtigung einer unvollständigen Einbettung der Bewehrung im Mörtel sowie der Fugendicke ( $\gamma_2 = 1,35$ )

$\gamma_3$  Sicherheitsbeiwert zur Berücksichtigung der bezogenen Rippenfläche ( $\gamma_3 = 1,2$ )

$\gamma_4$  Sicherheitsbeiwert zur Berücksichtigung von Dauerlasten ( $\gamma_4 = 1,2$ )



Die Bewertungsfunktion für den Zusammenhang zwischen der Fugendruckfestigkeit und der mittleren maßgebenden Verbundspannung, siehe Gleichung (17), wurde aus einer Regressionsberechnung mit den mittleren maßgebenden Verbundspannungen aus 31 Versuchsserien ermittelt. In diesem Zusammenhang wurden die Verbundspannungen analog den bekannten Zusammenhängen aus dem Stahlbeton (s. Kapitel 3.2.2) in der Form  $\beta_{D,F(ibac)}^{0,66}$  angegeben.

Der Gesamtsicherheitsbeiwert für die Lagerfugenbewehrung  $\gamma_{G,LF}$  ergibt sich als Produkt aus 4 unterschiedlichen Teilsicherheitsbeiwerten, die die Streuung der Versuchsergebnisse, die unvollständige Einbettung der Bewehrung sowie die Fugendicke, die bezogene Rippenfläche und den Einfluss von Dauerlasten berücksichtigen, zu  $\gamma_{G,LF} = 3,3$ .

Der Sicherheitsbeiwert  $\gamma_1$  berücksichtigt die Streuungen innerhalb der einzelnen Versuchsserien, da die maßgebenden Verbundspannungen aus den Mittelwerten der Versuchsergebnisse abgeleitet werden, sowie die Streuungen dieser Mittelwerte um die Regressionsfunktion. Meyer schlägt einen Sicherheitsbeiwert  $\gamma_1$  von 1,7 vor.

Die auf die Fugendruckfestigkeit bezogene maßgebende Verbundspannung  $\tau_M / \beta_{D,F(ibac)}^{0,66}$  ist für direkt auf der Lagerfläche eines Steins liegende Bewehrung um rund 35 % geringer als bei vollständiger Einbettung mit einer Mörteldeckung von  $c = 7$  mm. Ergebnisse aus Versuchen mit einer geringeren Fugendicke als 20 mm und somit einer geringeren Mörteldeckung zwischen Stein und Bewehrung liegen zwischen diesen Werten, weshalb der Sicherheitsbeiwert  $\gamma_2 = 1,35$  angesetzt wird.

Meyer stellt in /6/ fest, dass eine Abminderung der in den Versuchen ermittelten maßgebenden Verbundspannungen durch eine Berücksichtigung des Verhältniswertes zwischen Mindestwerten der bezogenen Rippenfläche und der im Versuch gemessenen Werten der Rippenfläche grundsätzlich nicht erforderlich ist, da bei der Auswertung seiner Versuche kein signifikanter Zusammenhang zwischen bezogener Rippenfläche (im Bereich von  $f_R = 0,022$  bis  $0,047$ ) und den Verbundeigenschaften aufgetreten ist. Da die Mehrzahl seiner Versuche jedoch mit einer bezogenen Rippenfläche von  $f_R = 0,047$  durchgeführt wurde und aus dem Stahlbetonbau ein näherungsweise linearer Zusammenhang zwischen den Verbundeigenschaften und der bezogenen Rippenfläche bekannt ist, führt er – um auf der sicheren Seite zu liegen – einen Sicherheitsbeiwert von  $\gamma_3 = 1,2$  ein. Dieser Wert ist das Verhältnis zwischen der bezogenen Rippenfläche aus den meisten Versuchen ( $f_R = 0,047$ ) und der Mindestanforderung für die bezogene Rippenfläche von  $f_R = 0,039$ .

Wie Barlet in /4/ benutzt auch Meyer in /6/ einen Beiwert zur Berücksichtigung des Einflusses von Dauerlasten. Ebenso wie Barlet beruft er sich auf Untersuchungen von Janovic /12/, in denen beobachtet werden konnte, dass die Langzeitfestigkeit etwa 85 % der Kurzzeitfestigkeit beträgt. Daher beträgt  $\gamma_4 = 1,2$  ( $\approx 1/0,85$ ).

In /7/ wird ein anderer Ansatz für die mittleren maßgebenden Verbundspannungen gewählt. Der Zusammenhang zwischen der Fugendruckfestigkeit und der mittleren gemessenen Verbundspannung wurde in /7/ zu

$$\tau_M = 0,43 \cdot \beta_{D,F(ibac)}^{0,60} \quad (19)$$

bestimmt.

Anders als in /6/ wird in /7/ ein zusätzlicher Sicherheitsbeiwert  $\gamma = 1,2$  für den Luftporengehalt des Mörtels eingeführt. Der Einfluss der bezogenen Rippenfläche  $f_R$  wird in /7/ nicht mehr betrachtet. Der Beiwert zur Berücksichtigung einer unvollständigen Einbettung der Bewehrung wird auf 1,6 festgelegt. Daraus ergibt sich ein Gesamtsicherheitsbeiwert für die Lagerfugenbewehrung von 3,92. Da die Einflussparameter jedoch sich nicht linear überlagern werden, wird der Gesamtsicherheitsbeiwert auf 3,0 festgelegt.

In /7/ wurden auch die in Tabelle 8 angegebenen Grundwerte der zulässigen Verbundspannung vorgeschlagen.

### 3.5.4.3 Bewehrung in Formsteinen

In der Entwurfsfassung von DIN 1053-3 /X2/ wurden die Werte für die Verbundspannung von stehender Bewehrung in Formsteinen und Aussparungen im Vergleich zur DIN 1053-3 /X1/ nicht geändert. Sie basieren im Wesentlichen auf den Werten für die ansetzbaren Verbundspannungen in DIN 1045-1 /X6/. Der Wert für NM IIa wurde nach unten linear extrapoliert.

Meyer vermutete in seinen Untersuchungen /7/, dass die derzeitig zulässigen Verbundspannungen in DIN 1053-3 /X1/ stark auf der unsicheren Seite liegen, da bei Versuchen zur Festlegung dieser Werte nur Ziegelformsteine verwendet wurden. Die Mörteldruckfestigkeit ist in Ziegelformsteinen im Vergleich zu geometrisch ähnlichen Kalksand-Formsteinen deutlich höher. Meyer führte einige Tastversuche zum Verbund zwischen Mörtel und Bewehrung in Kalksand-Formsteinen (U-Schalen) mit kleinen Aussparungen durch. Die wenigen Versuchserien belegen, dass die Angaben in DIN 1053-3 /X1/ dringend überprüft und ggf. nach Ver-

bundbereichen (kleine und große Aussparungen) unterschieden werden müssen. Die gemessenen Verbundspannungen waren z. T. auf Grund der fehlenden Verdichtungsmöglichkeit deutlich geringer als die Verbundspannungen in den Lagerfugen.

Auf der Grundlage der wenigen Versuchsergebnisse konnte Meyer in /7/ nur vorläufige zulässige Verbundspannungen für Bewehrung in Formsteinen vorschlagen. Als vorläufiger Gesamtsicherheitsbeiwert wurde  $\gamma_G = 2,0$  angesetzt, um die Streuung der Versuchsergebnisse und Dauerlasten zu berücksichtigen. Eine Berücksichtigung der Verarbeitung z. B. über die Definition von unterschiedlichen Verbundbereichen wäre aber laut Meyer erforderlich. Die von Meyer formulierten Vorschläge der Verbundspannungen sind in Tabelle 9 dargestellt.

**Tabelle 9:** Vorschlag für Grundwerte der zulässigen Verbundspannung von epoxidharzbeschichteter Bewehrung in Formsteinen aus /7/

Kenngröße	Mörtel		
	NM IIa	NM III	NM IIIa
-	N/mm <sup>2</sup>		
1	2	3	4
$\tau_M$	0,55	1,00	0,81
zul. $\tau_0 (= \tau_M/2,0)$	0,28	0,50	0,41
zul. $\tau_0$ (Vorschlag)	0,25	0,50	0,50
$f_{bd} (= \text{zul } \tau_0 \cdot 1,4)$	0,35	0,70	0,70
$f_{bk} (= f_{bd} \cdot 1,5)$	0,53	1,05	1,05

## 4 ZUSAMMENSTELLUNG UND AUSWERTUNG DER LITERATUR ZUM VERBUND VON BEWEHRUNGSSTAHL IM MAUERWERK

### 4.1 Allgemeines

Über den Verbund der Bewehrung in der Lagerfuge existieren zahlreiche Veröffentlichungen. Dagegen sind über den Verbund zwischen vertikal angeordneter Bewehrung und Mörtel nur wenige Angaben in der Literatur zu finden.

Die bisher durchgeführten Untersuchungen an Mauerwerkprüfkörpern wurden zunächst in einer Datenbank zusammengefasst. Auf Grundlage dieser Datenbank wurden die Versuchsdaten ausgewertet und die Ergebnisse der Ausziehversuche in Diagrammen dargestellt. Da-

bei wurden die wichtigsten Einflussgrößen, wie z. B. die Steinart und die Wahl des Mörtels mit oder ohne Einsatz von Zusatzmitteln, auf das Verbundverhalten unterschieden.

Als Referenz wurden Versuchsdaten von Ausziehversuchen an Mörtel- bzw. Betonwürfeln, ohne Kontakt zu dem Steinmaterial, nach RILEM /X12/, in einer zusätzlichen Datenbank erfasst und ausgewertet.

In Kapitel 6 werden die bisherigen Untersuchungsergebnisse aus der Literatur und denen aus den eigenen Untersuchungen, s. dazu Kapitel 5, gegenübergestellt sowie mit den Bemessungswerten der Verbundfestigkeiten aus /X1/, /X2/ und /X3/ verglichen.

## 4.2 Erfasste Daten

Alle wesentlichen Eigenschaftswerte von bisherigen Untersuchungen zum Verbundverhalten von Bewehrung im Mauerwerk wurden tabellarisch zusammengestellt. Die zugrunde gelegten Berichte sind in Tabelle A1 aufgeführt.

Erfasst wurden in der Datenbank u. a. folgende Informationen, unterteilt nach Mauerstein, Mauermörtel, Bewehrung und Mauerwerk:

- lfd. Nr. in der Datenbank, Berichtnr., Seriennr. im Bericht
- Mauerstein
  - Allgemeines, Normeigenschaften:  
Bezeichnung, Format, Lochanteil L, Maße (Länge l, Breite b, Höhe h),  
Rohdichte lufttrocken  $\rho_l$ , Trockenrohddichte  $\rho_d$ , kapillarer Wasseraufnahmekoeffizient  $\omega$ ,  
Steindruckfestigkeit  $\beta_{D,st}$ , Steindruckfestigkeitsklasse  $\beta_{N,st}$
  - Mauersteineigenschaften in Richtung Steinlänge:  
Druckfestigkeit, Zugfestigkeit
- Mauermörtel
  - Normeigenschaften:  
Mörtelart, Mörtelgruppe, Sieblinie, Zusatzmittel,
  - Frischmörtelkennwert:  
Luftgehalt L
  - Festmörtelkennwerte:  
Druckfestigkeit  $\beta_D$  zum Zeitpunkt der Prüfung,  
Druckfestigkeit des Mörtels in der Lagerfuge  $\beta_{D,F(ibac)}$

- Bewehrung
  - Bewehrungsart, Bewehrungsdurchmesser  $d_s$ , Bezogene Rippenfläche  $f_R$
  - Stahlsorte
  - Beschichtungsart, Beschichtungsdicke  $d_B$
- Mauerwerk
  - Prüfkörpermaße (Länge  $l$ , Breite  $b$ , Höhe  $h$ )
  - Feuchtegehalt der Mauersteine beim Vermauern  $h_m$
  - Lagerfugendicke  $d_F$
  - Mörteldeckung zum Prüfkörpertrand  $c_L$
  - Bewehrungslage (oben, unten)
  - Verankerungslänge im Gebrauchs- und Bruchzustand  $l_{v,s}$  und  $l_{v,u}$
  - Verbundspannungen im Gebrauchs- und Bruchzustand  $\tau_{m,s}$  und  $\tau_{m,u}$
  - maßgebende Verbundspannung  $\tau_M$  bzw.  $\tau_{M,alt}$
  - Prüfalter  $t$
  - Anzahl der Prüfserien  $n$

Die Datenbank enthält Versuchsdaten von Ausziehversuchen an Lagerfugenbewehrung und an horizontal angeordneter Bewehrung in Formsteinen. Ausziehversuche an vertikal in Formsteinen oder Aussparungen angeordneter Bewehrung wurden bisher nicht durchgeführt.

Eine Erläuterung der verwendeten Kurzzeichen enthält Tabelle A2.

Die für die weitere Auswertung maßgebenden Kenngrößen der Versuche zum Verbundverhalten von Bewehrungsstäben in Mauerwerk sind in Tabelle A3 zusammengefasst. Detaillierte Angaben sind der elektronischen Datenbank zu entnehmen.

Vergleichend zu den Ausziehversuchen an Mauerwerkprüfkörpern, bei denen der Stein einen großen Einfluss auf die Verbundspannung hat, wurden auch Ausziehversuche an Mörtel- bzw. Betonwürfeln in einer weiteren Datenbank erfasst und ausgewertet. In der Datenbank wurden der Verbundbereich, die Druckfestigkeit des Betons zum Zeitpunkt der Prüfung, die Art, der Durchmesser und die bezogene Rippenfläche der Bewehrung sowie die errechnete bezogene Verbundspannung aufgeführt.

Die wichtigsten Kennwerte der Versuche zum Verbund zwischen Bewehrung und Mörtel bzw. Beton, die auch bei der Erstellung der Diagramme aus der Datenbank berücksichtigt wurden, sind in Tabelle A4 aufgeführt.

## **4.3 Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung**

### **4.3.1 Allgemeines**

Im Folgenden werden der Versuchsaufbau und -ablauf der in den erfassten Berichten durchgeführten Ausziehversuche an Mauerwerkprüfkörpern beschrieben. Außerdem wird das Berechnungsverfahren zur Ermittlung der maßgebenden Verbundspannung erläutert und die maßgebenden Verbundspannungen in Abhängigkeit der Fugendruckfestigkeiten aller Versuchsdaten in Diagrammen dargestellt.

### **4.3.2 Prüfkörperherstellung**

#### **4.3.2.1 Bewehrung in Lagerfugen**

Um das Verbundverhalten zwischen Bewehrung und Mörtel in bewehrtem Mauerwerk zu untersuchen, wurden Ausziehversuche an kleinen Mauerwerkprüfkörpern nach /6/ durchgeführt, die einen Ausschnitt aus einer Mauerwerkswand repräsentieren, die wesentlichen Erkenntnisse des Stahlbetonbaus berücksichtigen und auf RILEM-Empfehlungen /X12/ basieren.

Die Untersuchungen wurden in Abhängigkeit des Steinformats an zwei unterschiedlichen Prüfkörpern durchgeführt. Für Steine des Formats 2 DF bestand er aus vier Mauersteinen (s. Bild 6), bei größeren Steinformaten wurde der Prüfkörper jeweils aus zwei bzw. vier ausgesägten Steinteilstücken hergestellt (s. Bild B1).

Die Herstellung der Vierstein-Mauerwerkprüfkörper erfolgte auf einem Abgleichtisch im Laborklima bei 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte. Auf die untere Steinlage wurde eine Mörtelschicht in halber Lagerfugendicke aufgebracht. In DIN 1053-3 /X1/ wird ein Richtwert für die Lagerfugendicke von  $2 \cdot d_s$  angegeben. In den Mörtel wurde dann der Bewehrungsstab mit einem Abstand von 30 mm zum Prüfkörpertrand eingebettet. Der Verbundbereich lag mittig, um den möglichen Einfluss der Stoßfuge zu berücksichtigen. Dafür wurden die Teile der Bewehrung außerhalb des Verbundbereiches mit Kunststoffhülsen umschlossen, welche mit elastischem Kitt abgedichtet wurden. Die Verbundlänge betrug  $10 d_s$  und ist damit doppelt so groß wie im Stahlbetonbau /X12/ üblich. Anschließend wurde die zweite Lage Mörtel aufgebracht und die oberen Steine aufgesetzt. Diese wurden bis auf die gewünschte Fugendicke angeklopft. Die Lagerfugendicke betrug zwischen 10 und 30 mm.

Mauersteine größerer Formate wurden trocken in Teilstücke gesägt, meist halbiert oder geviertelt und daraus gemäß Bild B1 ein Zweistein- bzw. ein Vierstein-Mauerwerkprüfkörper hergestellt. Bei der Herstellung dieser Prüfkörper wurde die ungesägte Seite für die Lagerfuge verwendet und, die gesägten Seiten zeigten nach außen.

#### 4.3.2.2 Bewehrung in Formsteinen

Zelger und Barlet führten in /5/ Versuche zur Festlegung der zulässigen Grundwerte in DIN 1053-3 /X1/ an Mauerziegeln durch. Bei den Untersuchungen an Lagerfugenbewehrung war schon aufgefallen, dass Kalksandsteine einen negativen Einfluss auf die aufnehmbaren Verbundspannungen haben. Deshalb wurden die Ausziehversuche an liegend betonierten Kalksandstein U-Schalen durchgeführt, um die ungünstigste Kombination aus Stein und Mörtel zu verwenden.

Bild 7, Kapitel 3.2 zeigt den schematischen Aufbau des Prüfkörpers. Die Bewehrung wurde mittig in den Formstein eingelegt. Analog zu den Untersuchungen an der Lagerfugenbewehrung wurden im Randbereich Kunststoffhülsen verwendet, um dort den Verbund zu verhindern.

#### 4.3.3 Versuchsdurchführung

Nach 14 Tagen wurden die Prüfkörper auf einem Dreibeinstativ in eine Universalprüfmaschine eingebaut und zwar so, dass die Zugrichtung der Maschine parallel zum Bewehrungsstab war. Um die Querspannung unter der Kopfplatte zu reduzieren wurde eine Filzplatte eingebaut. An der Unterseite des Prüfkörpers war ein induktiver Wegaufnehmer zur Aufzeichnung des Schlupfes zwischen Bewehrung und Mauerwerkprüfkörper befestigt. Die Versuche wurden weggeregelt mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 0,5 mm/min bis zu einem Schlupf von 2 mm durchgeführt, wobei die Höchstlast meist zwischen 30 und 90 sec erreicht wurde.

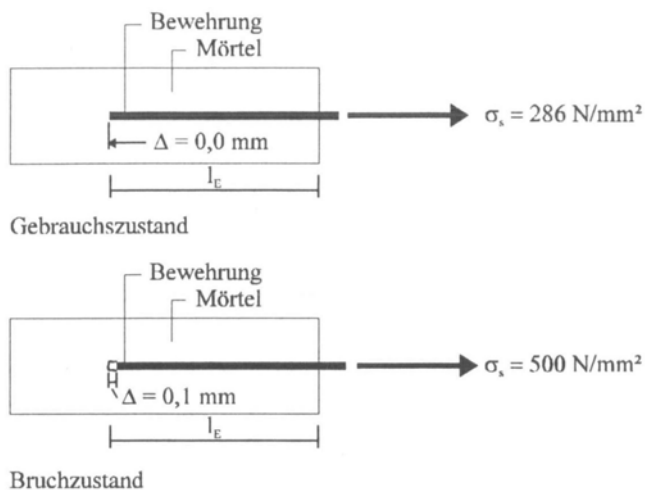
Nach Abschluss der Versuche wurde von jedem Prüfkörper, aus dem ungestörten Bereich der Lagerfuge, die Fugendruckfestigkeit nach dem ibac-Verfahren /15/ bestimmt.

Eine Versuchsserie bestand in der Regel aus 3 bis 5 Prüfkörpern.

#### 4.3.4 Versuchsauswertung

Mit dem in Abschnitt 3.3 beschriebenen Gesetz des verschieblichen Verbundes wurden durch numerische Integration die mittleren Verbundspannungen im Gebrauchs- und Bruchzustand bestimmt. Im Gebrauchs- und Bruchzustand wurde davon ausgegangen, dass am Verankerungsende noch keine Verschiebung  $\Delta = 0$  mm stattgefunden hat, da angenommen wurde, dass die Dehnungen von Bewehrung und Mörtel gleich Null sind. Die Stahlspannung im Bereich zwischen Einspannung und Probekörper wurde zu  $\sigma_s = 286$  N/mm<sup>2</sup> gesetzt. Im Bruch-

stand wurde die Verschiebung am Verankerungsende zu  $\Delta = 0,1$  mm und die Stahlspannung zu  $\sigma_s = 500$  N/mm<sup>2</sup> angesetzt. Bild 9 stellt die Randbedingungen der Berechnung der Verbundkennwerte dar.



**Bild 9:** Randbedingungen zur Berechnung der Verbundkennwerte /6/

Die mittlere über die Verankerungslänge ( $l_v = l_E$ ) aufnehmbare Verbundspannung  $\tau_m$  im Gebrauchs- bzw. Bruchzustand wird aus der folgenden Gleichgewichtsbedingung errechnet:

$$\sigma_s \cdot A_s = \tau_m \cdot l_v \cdot U \quad (20)$$

$$\tau_m = \frac{d_s \cdot \sigma_s}{4 \cdot l_v} \quad (21)$$

mit:

- $\sigma_s$  Stahlspannung im Gebrauchs- bzw. Bruchzustand
- $A_s$  Querschnittsfläche der Bewehrung
- $\tau_m$  mittlere Verbundspannung im Gebrauchs- bzw. Bruchzustand
- $l_v$  Verankerungslänge im Gebrauchs- bzw. Bruchzustand
- $U$  Umfang der Bewehrung
- $d_s$  Durchmesser der Bewehrung

Die Berechnung der maßgebenden mittleren Verbundspannung  $\tau_M$  erfolgte auf zwei unterschiedlichen Arten. Die ältere Berechnungsart wurde in den Berichten 1, 2, 11 und 12 (s. Tabelle A1) verwendet, die neuere wurde in allen anderen Berichten (3 bis 10 sowie 13 bis



16, Tabelle A1) und auch von Meyer in /6/ erläutert und angewendet. Im Folgenden werden beide Berechnungsverfahren vorgestellt, wobei das ältere Berechnungsverfahren zu etwas konservativeren Werte führt als das neuere.

Laut den Berichten 1, 2, 11 und 12 ist die maßgebende Verbundspannung  $\tau_{M,alt}$  definiert als Minimum der mittleren Verbundspannung im Gebrauchszustand  $\tau_{m,s}$  und der durch einen Sicherheitsbeiwert  $\gamma = 2,1$  dividierten mittleren Verbundspannung im Bruchzustand  $\tau_{m,u}$ :

$$\tau_{M,alt} = \min \left\{ \tau_{m,s}; \frac{\tau_{m,u}}{\gamma} \right\} \quad (22)$$

Laut Meyer /6/ und den übrigen Berichten (3 bis 10 sowie 13 bis 16) ergibt sich die maßgebende Verbundspannung  $\tau_M$  direkt aus der zuvor aufgeführten Gleichgewichtsbeziehung zu:

$$\tau_M = \frac{d_s \cdot \sigma_s}{4 \cdot l_{v,maßg.}} = \frac{d_s \cdot 286}{4 \cdot l_{v,maßg.}} \quad (23)$$

mit:

$$l_{v,maßg.} = \max \{ l_{v,s}; l_{v,u} \} \quad (24)$$

Die maßgebende Verankerungslänge  $l_{v,maßg.}$  ist die größere der beiden Verankerungslängen im Gebrauchs- ( $l_{v,s}$ ) bzw. Bruchzustand ( $l_{v,u}$ ).

## 4.3.5 Versuchsergebnisse

### 4.3.5.1 Allgemeines

Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse von bisherigen Untersuchungen zum Verbundverhalten im Mauerwerk in Diagrammen dargestellt und beschrieben.

Für die Berichte 1, 2, 11 und 12 waren die maßgebenden Verbundspannungen  $\tau_{M,alt}$  ursprünglich nach dem alten Berechnungsverfahren nach Gleichung (22) berechnet worden. Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurden die maßgebenden Verbundspannungen aller Versuche zusätzlich nach dem neuen Berechnungsverfahren nach Gleichung (23) ermittelt.

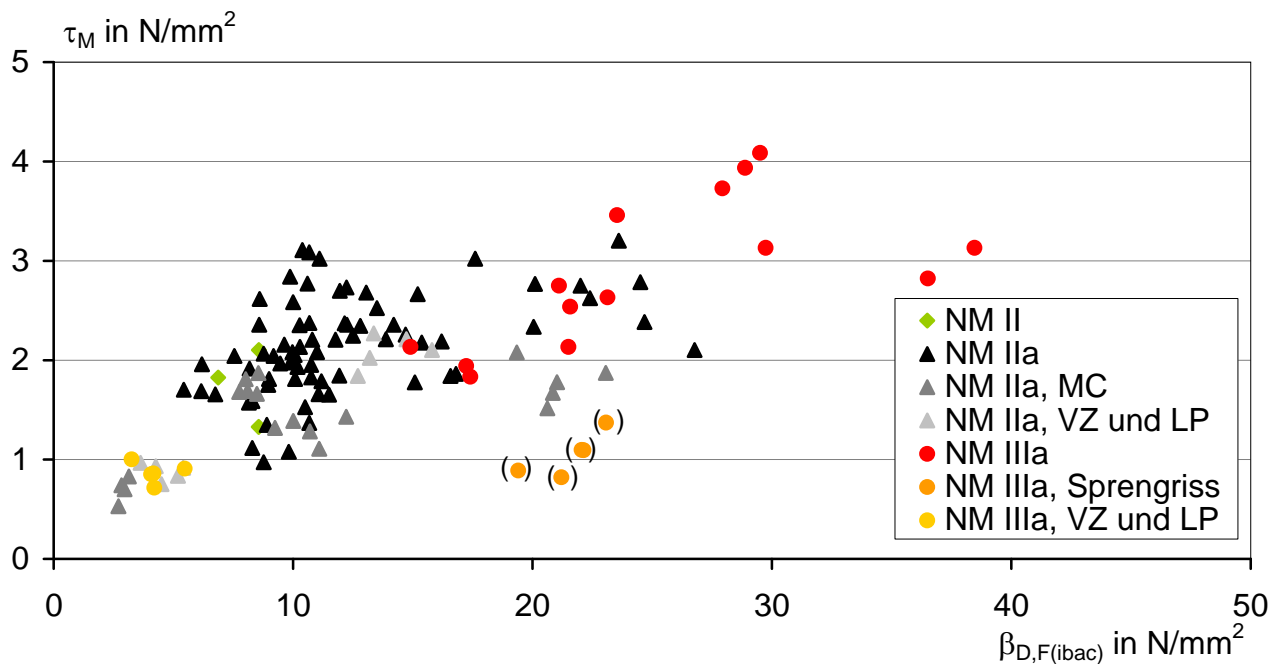
Ausgewertet wurden nur die Versuchsserien von Prüfkörpern, die aus Kalksandsteinen, Hochlochziegeln, Leichtbeton- und Porenbetonsteinen in Kombination mit Normalmörtel der Mörtelgruppen IIa, III und IIIa hergestellt waren. Diese Prüfkörper wurden hauptsächlich mit Stabstahlbewehrung BSt 500 M unterschiedlicher Durchmesser und in Einzelfällen mit Längsstäben aus Murforelementen bewehrt. Versuche an Prüfkörpern, die mit Leichtmörteln und Sonderbewehrungen hergestellt wurden, sind in dieser Auswertung nicht berücksichtigt.

#### 4.3.5.2 Bewehrung in Lagerfugen

In Bild 10 sind die Einzelwerte der maßgebenden Verbundspannungen  $\tau_M$  in Abhängigkeit der Fugendruckfestigkeit  $\beta_{D,F(ibac)}$  der Ausziehversuche an Lagerfugenbewehrung dargestellt.

Die Mauerwerkprüfkörper der in Bild 10 dargestellten Versuchsdaten wurden mit Normalmörteln der Mörtelgruppen II, IIa und IIIa, teilweise unter Verwendung von Zusatzmitteln (Verzögerer (VZ), Luftporenbildner (LP), Methylcellulose (MC)), sowie einer Stabstahlbewehrung BSt 500 M hergestellt. Die Sortierung der Versuchsreihen erfolgte nach der jeweiligen Mörtelgruppe und der Verwendung von Zusatzmitteln.

Aus Bild 10 wird deutlich, dass die Mörteldruckfestigkeit im Mauerwerk einen wesentlichen Einfluss auf die Verbundspannung hat. Die Mörteldruckfestigkeit wird, neben den feuchte-technischen Eigenschaften der verwendeten Mauersteine sowie deren Feuchtegehalt beim Vermauern, von der Mörtelzusammensetzung bestimmt. Dabei spielt der Einsatz von Zusatzmitteln eine große Rolle. Wie aus Bild 10 ersichtlich ist, erreichen die Versuchsserien mit Luftporenbildner und Verzögerer geringere Fugendruckfestigkeiten als die Versuchsserien ohne Zusatzmittel. Dies liegt daran, dass Zusatzmittel die Porenstruktur des Mörtels verändern, und der Mörtel meist einen höheren Luftgehalt hat. Deswegen kann im Bereich größerer Verschiebungen keine weitere Last aufgenommen werden, und der Mörtel versagt schneller. Bei vielen Versuchsserien wurde auch Methylcellulose zugegeben, wodurch das Wasserrückhaltevermögen des Mörtels verstärkt wird. Mit der Zugabe von Methylcellulose sollten höhere Fugendruckfestigkeiten und damit auch höhere Verbundspannungen erreicht werden, da dem Mörtel durch den Stein nicht so viel Wasser entzogen werden kann. Dies wird aus dem Diagramm allerdings nicht deutlich, denn die Versuchsserien mit Methylcellulose liegen in der jeweiligen Punktwolke eher im unteren Randbereich. In den ausgewerteten Berichten wird hierfür keine Erklärung gegeben, bzw. nicht weiter auf das Thema eingegangen.

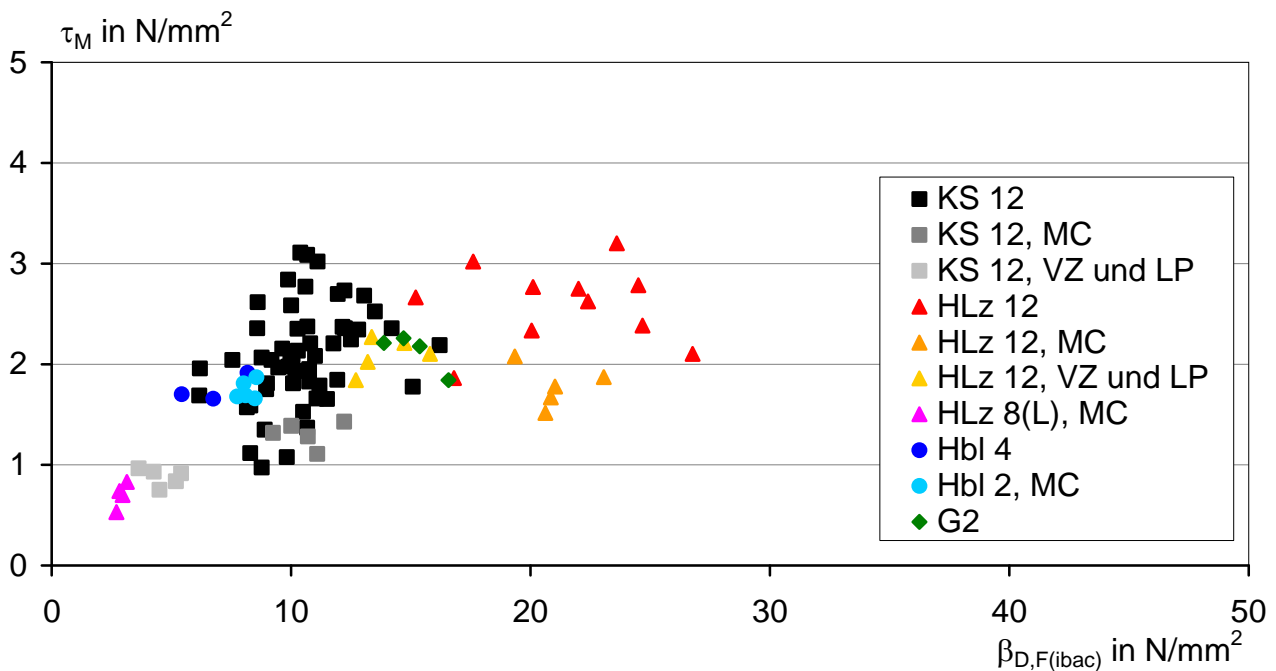


**Bild 10:** Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung in der Lagerfuge, maßgebende Verbundspannung  $\tau_M$  in Abhängigkeit der Fugendruckfestigkeit  $\beta_{D,F(ibac)}$ , Versuchsserien mit Stabstahlbewehrung, Einzelwerte

In Bild 10 ist kein nennenswerter Unterschied zwischen Normalmörtel NM II und NM Ila zu erkennen. Allerdings wurde auch nur eine Prüfserie mit NM II geprüft, was die Aussage stark einschränkt. Die Verbundspannungen der Prüfserien mit NM IIIa sind trotz der höheren Mörteldruckfestigkeit im Vergleich zum NM Ila bei ähnlicher Fugendruckfestigkeit kleiner, was laut Meyer und Schießl in /7/ und den Berichten 1 und 2 an den in den Versuchen aufgetretenen unterschiedlichen Versagensarten liegt. Beim Normalmörtel NM Ila trat Ausziehversagen, also ein Verbundversagen zwischen Bewehrung und Mörtel, auf. Beim NM IIIa kam es hingegen aufgrund der hohen Fugendruckfestigkeit bei gleichzeitiger geringer Haftscherfestigkeit zwischen Stein und Mörtel zu einer Sprenggrissbildung. Bei diesem aus dem Stahlbetonbau bekannten Versagensmechanismus kann es zu einer Bildung eines oder mehrerer zur Bewehrung parallel verlaufenden Längsrisse kommen. Das Verbundversagen tritt zwischen Mörtel und Stein auf.

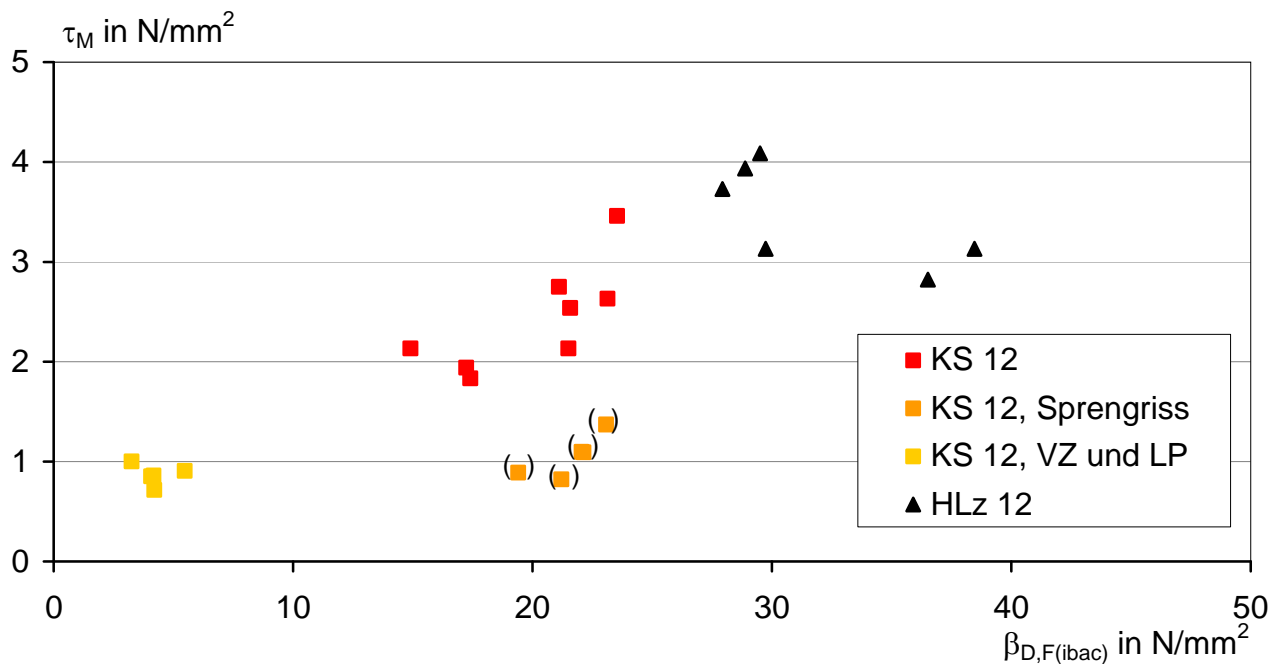
Die Mittelwerte und Streubereiche der Einzelwerte aller ausgewerteten Versuchsserien sind in Bild B2 abgebildet.

Da in DIN 1053-3 /X1/ keine zulässigen Grundwerte für Normalmörtel NM IIa angegeben waren, wurden die meisten Prüfserien mit dieser Mörtelgruppe durchgeführt, mit dem Ziel eine Zulassung zu erlangen. Im Gegensatz zu den Prüfserien mit Normalmörtel anderer Mörtelgruppen liefern die Versuchsdaten mit der Mörtelgruppe IIa aussagekräftige Ergebnisse und ermöglichen eine Unterscheidung nach Steinarten. Bild 11 zeigt die Einzelwerte dieser Versuchsserien. Es wurden mehrere Versuchsserien mit Kalksandsteinen (KS 12) getestet, da diese im Gegensatz zu Hochlochziegeln (HLz 8 und HLz 12) eine andere Wasseraufnahmekarakteristik aufweisen, was einen negativen Einfluss auf die aufnehmbaren Verbundspannungen haben kann. Aus Bild 11 wird ersichtlich, dass die Fugendruckfestigkeit der Prüfserien mit Kalksandsteinen geringer ist als die mit Hochlochziegeln und somit auch die aufnehmbare Verbundspannung der eingebetteten Bewehrung. Ähnliches gilt für die Prüfserien mit Hohlblöcken aus Leichtbeton (Hbl 2 und Hbl 4).



**Bild 11:** Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung in der Lagerfuge, maßgebende Verbundspannung  $\tau_M$  in Abhängigkeit der Fugendruckfestigkeit  $\beta_{D,F(ibac)}$ , Versuchsserien mit Stabstahlbewehrung und NM IIa, Einzelwerte

Bild 12 zeigt die Einzelwerte der Versuchsserien mit NM IIIa, sortiert nach Steinart. Auch hier ist zu erkennen, dass die Fugendruckfestigkeit der Versuchsserien mit Kalksandsteinen geringer ist als die mit Hochlochziegeln.



**Bild 12:** Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung in der Lagerfuge, maßgebende Verbundspannung  $\tau_M$  in Abhängigkeit der Fugendruckfestigkeit  $\beta_{D,F(ibac)}$ , Versuchsserien mit Stabstahlbewehrung und NM IIIa, Einzelwerte

In den Bildern B3 und B4 sind die Mittelwerte und Streubereiche der Einzelwerte der Versuchsserien mit NM IIa und NM IIIa dargestellt. Die einzelnen Steinarten werden durch unterschiedliche Symbole dargestellt.

In Bild B5 sind alle Ausziehversuche mit Stabstahl, differenziert nach der bezogenen Rippenfläche  $f_R$ , dargestellt. Die Verteilung der Versuchswerte lässt darauf schließen, dass nicht die bezogene Rippenfläche, sondern vermutlich andere Faktoren, wie z. B. Mörtelgruppe, Zusatzmittel und Steinart, einen deutlich größeren Einfluss auf die Verbundspannungen haben.

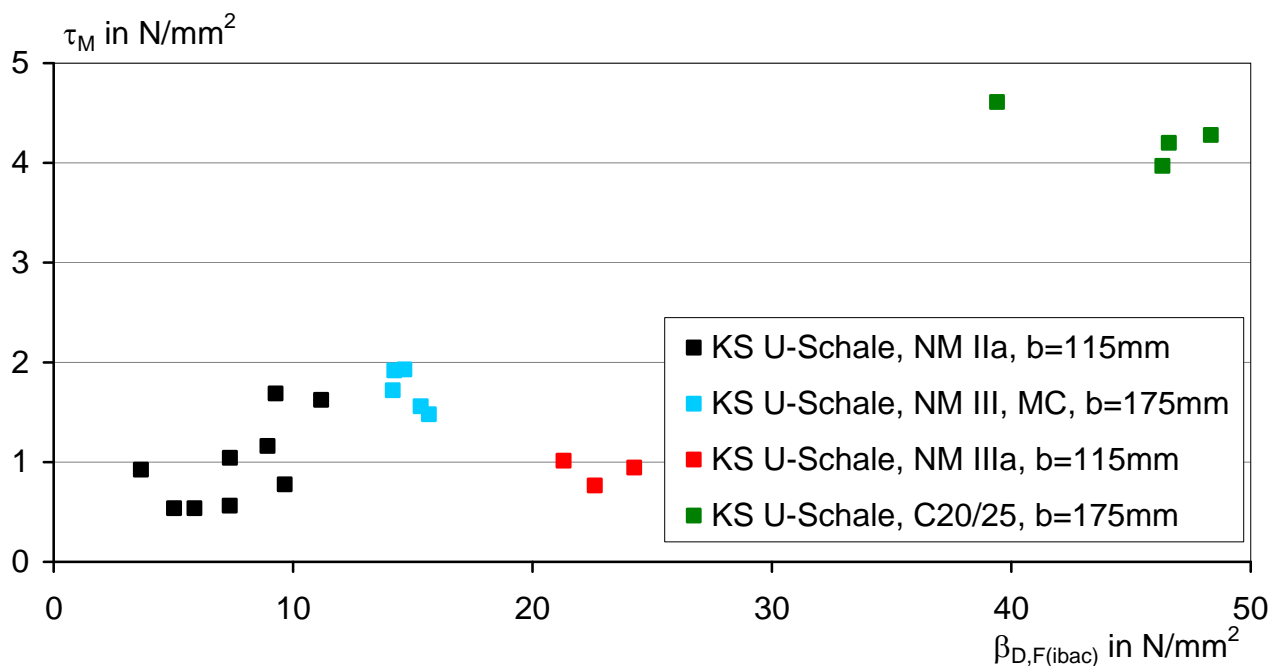
### 4.3.5.3 Bewehrung in Formsteinen

Neben Ausziehversuchen an Mauerwerksprüfkörpern mit Lagerfugenbewehrung wurden auch Versuche an horizontal eingelegter Bewehrung in Formsteinen durchgeführt.

In Bild 13 sind die Einzelwerte der maßgebenden Verbundspannung in Abhängigkeit von der Fugendruckfestigkeit aller Ausziehversuche mit horizontaler Bewehrung in U-Schalen aus Kalksandstein dargestellt. In Bild B6 sind die Mittelwerte dieser Versuchserien aufgetragen.

Es fällt auf, dass die Verbundspannungen der Versuche an Formsteinen, abgesehen von der Versuchsserie mit Beton, deutlich kleiner sind als die der Versuche an der Lagerfugenbewehrung. Meyer führt dies in Bericht 1 (Tabelle A1) darauf zurück, dass in den Formsteinen der Mörtel schlechter verdichtet wird als bei der Lagerfugenbewehrung, da dort durch das Anklopfen und Drücken der Steine eine gewisse Verdichtung erreicht wird. So ist der Verbund in den Formsteinen mit dem Verbundbereich II (mäßiger Verbund) in DIN 1045-1 /X6/ zu vergleichen. Außerdem treten aufgrund des hohen Wassergehaltes des Mörtels große Formänderungen des Mörtels durch Schwinden auf. In Nachversuchen in Bericht 1 gelang es, den Mörtel besser zu verdichten, wodurch die Druckfestigkeit des Mörtels anstieg (vgl. dazu die beiden Prüfserien mit NM IIa in Bild B6). Durch die Erhöhung der Mörteldruckfestigkeit konnte auch die Verbundspannung gesteigert werden.

Neben der Mörtelgruppe wurde in Bericht 3 auch die Breite der Formsteine variiert. Bei Verwendung von Formsteinen mit einer Breite von  $b = 175$  mm und Normalmörtel NM III wurden deutlich höhere maßgebende Verbundspannungen ermittelt als bei Verwendung von Formsteinen mit einer Breite von  $b = 115$  mm und Normalmörtel NM IIIa (s. Bild 13). In Bericht 3 wird vermutet, dass bei größerer Steinbreite eine bessere Verdichtung möglich ist. Damit können höhere Mörteldruckfestigkeiten und maßgebende Verbundspannungen erreicht werden. Allerdings wurden bisher zu wenige Versuchsserien mit unterschiedlichen Steinbreiten durchgeführt, um ein aussagekräftiges Ergebnis zu erreichen.



**Bild 13:** Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung in Formsteinen, maßgebende Verbundspannung  $\tau_M$  in Abhängigkeit der Fugendruckfestigkeit  $\beta_{D,F(ibac)}$ , Versuchsserien mit Stabstahlbewehrung in KS-U-Schalen, Einzelwerte

## 4.4 Untersuchungen zum Verbund zwischen Bewehrung und Mörtel bzw. Beton

### 4.4.1 Prüfkörperherstellung

Die Prüfkörper in den Berichten 17, 18 und 19 (s. Tabelle A1) wurden in Anlehnung an die von RILEM in /X12/ entwickelten Prüfkörper hergestellt. Bild B7 zeigt den schematischen Versuchsaufbau.

Die Kantenlänge der würfelförmigen Prüfkörper betrug, abweichend von /X12/ (hier wird eine Kantenlänge von mindestens 200 mm gefordert), 150 mm. Die Verbundlänge war jeweils  $5 \cdot d_s$ . Die Probekörper wurden liegend betoniert. Dabei wurde die Bewehrung mit einem Überdeckungsmaß von 30 mm eingebaut. Um die Unterschiede zwischen den in DIN 1045-1 /X5/ definierten Verbundbereichen I und II untersuchen zu können, wurde die Bewehrung entweder unten (Verbundbereich I, guter Verbund) oder oben (Verbundbereich II, mäßiger Verbund) eingelegt. Der Beton wurde nach den Angaben in /X12/ mit einem Zement CEM I 32,5 R hergestellt. Nach dem Einfüllen des Betons in die Schalung wurde dieser mit einem Innenrüttler verdichtet, der in allen vier Ecken eingetaucht wurde. Nach dem Ausschalen im Alter von 1 bis 3 Tagen wurden die Prüfkörper bis zur Prüfung bei 20 °C und 70 % rel. Luftfeuchte gelagert.

#### 4.4.2 Versuchsdurchführung

Die Ausziehversuche erfolgten, wenn der Beton eine Festigkeit von ungefähr 30 N/mm<sup>2</sup> erreicht hatte. Dies war nach 10 bis 16 Tagen der Fall. In /X12/ wird eine Festigkeit von 27 bis 33 N/mm<sup>2</sup> gefordert. Die Prüfung erfolgte mit einer elektronisch geregelten Universalprüfmaschine. Während der Prüfung wurden Ausziehungskraft und -weg kontinuierlich gemessen.

#### 4.4.3 Versuchsauswertung

Nach /X12/ kann aus den im Versuch ermittelten Ausziehungskräften die bezogene Verbundspannung wie folgt berechnet werden:

Die Ausziehungskraft wird auf die Verbundfläche des Stahls bezogen. Sowohl die Druckfestigkeit des Betons, als auch die bezogene Rippenfläche gehen proportional mit ein. Damit ergibt sich die bezogene Verbundspannung zu:

$$\tau = \frac{F}{A} \cdot \frac{f_{ck,cube}}{\beta_w} \cdot \frac{f_{R,soll}}{f_{R,ist}} \quad (25)$$

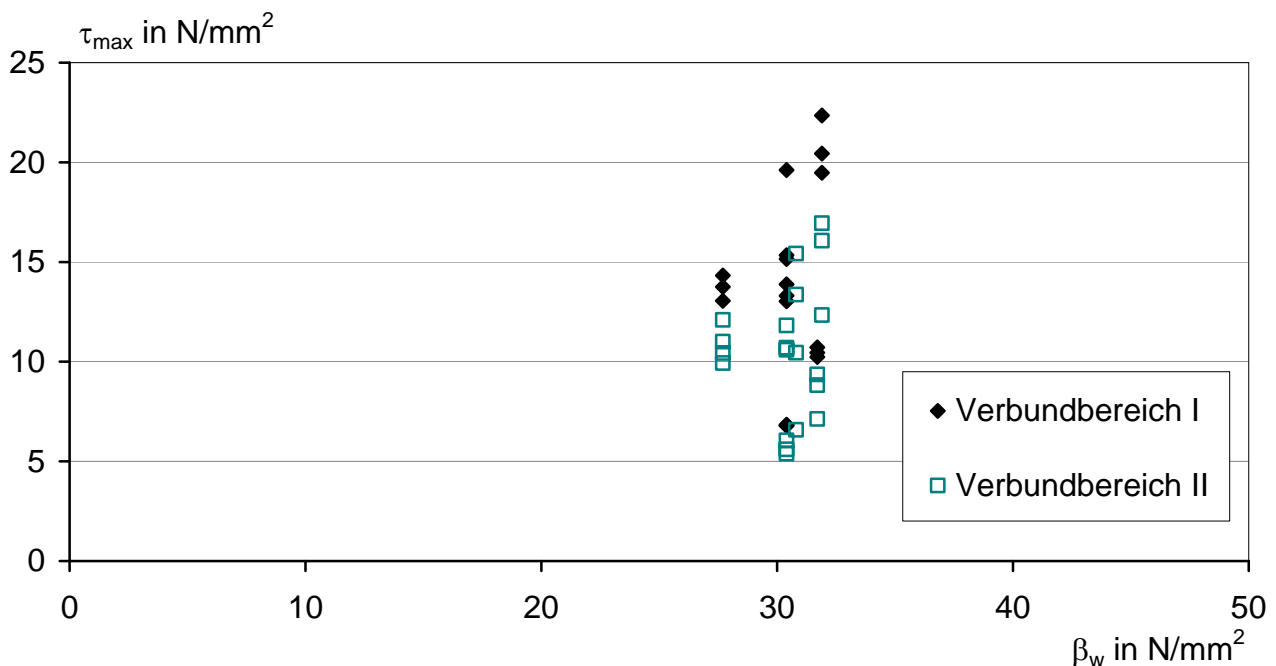
mit:

F	Ausziehungskraft in N
A	Verbundfläche in mm <sup>2</sup>
f <sub>ck,cube</sub>	charakteristische Würfeldruckfestigkeit des Betons nach 28 Tagen in N/mm <sup>2</sup> f <sub>ck,cube</sub> = 30 N/mm <sup>2</sup> für C25/30
β <sub>w</sub>	gemessene Würfeldruckfestigkeit in N/mm <sup>2</sup>
f <sub>R,soll</sub>	bezogenen Rippenfläche nach DIN 488
f <sub>R,ist</sub>	gemessene, bezogene Rippenfläche

#### 4.4.4 Versuchsergebnisse

In Bild 14 sind die Einzelwerte der maximalen Verbundspannung in Abhängigkeit der gemessenen Betondruckfestigkeit aller Ausziehversuche nach RILEM /X12/ dargestellt. Durch verschiedene Symbole wurde zwischen den Verbundbereichen I und II unterschieden. In Bild B8 sind die Mittelwerte aller ausgewerteten Versuchsserien abgebildet.





**Bild 14:** Untersuchungen zum Verbund zwischen Bewehrung und Beton nach /X12/, maximale bezogene Verbundspannung  $\tau_{\max}$  in Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit  $\beta_w$ , Versuchsserien mit Beton C25/30, Einzelwerte

Die Druckfestigkeit des Betons schwankt nicht so stark wie die Mörteldruckfestigkeit bei den Ausziehversuchen an Mauerwerksprüfkörpern, da immer der gleiche Beton verwendet wurde und die Betondruckfestigkeit gemäß /X12/ zwischen 27 und 33  $\text{N/mm}^2$  liegen sollte.

In Bild 14 ist auch zu sehen, dass, erwartungsgemäß, die Verbundspannungen bei gleicher Druckfestigkeit im Verbundbereich I größer sind als im Verbundbereich II. Außerdem fällt auf, dass die Werte der bezogenen Verbundspannung (s. Bild 14) insgesamt deutlich höher liegen als die der maßgebenden Verbundspannung bei Lagerfugenbewehrung (s. Bild 10) bzw. Bewehrung in Formsteinen (s. Bild 13). Selbst die Versuchsreihe mit Beton im Formstein (s. Bild 13) liegt unter den hier gemessenen Werten. Dies bestätigt, dass der Stein einen negativen Einfluss auf die Verbundeigenschaften von Bewehrung zu Mörtel bzw. Beton hat. Es kann aber auch kein direkter Vergleich gezogen werden, da die Bezugsgröße unterschiedlich ist: Zum einen die Betondruckfestigkeit und zum anderen die Fugendruckfestigkeit des Mörtels. Für einen exakten Vergleich müsste eine Beziehung zwischen diesen Größen hergestellt werden.

Eine Differenzierung der Versuchswerte nach dem verwendeten Stabdurchmesser oder der bezogenen Rippenfläche hat kein aussagekräftiges Ergebnis gebracht (s. Bilder B9 und B10).

Der Verbundbereich spielt beim Verbund zwischen Bewehrung und Mörtel bzw. Beton eine entscheidende Rolle, und die aufnehmbaren Verbundspannungen sind im Vergleich zu den Untersuchungen an horizontal eingebetteter Bewehrung, umgeben von Mauersteinen, deutlich größer.

## **5 EIGENE EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN**

### **5.1 Allgemeines**

In Kapitel 5 werden die im Rahmen von Laboruntersuchungen an in Lagerfugen eingebetteter Bewehrung sowie an Bewehrung in Formsteinen bzw. Aussparungen durchgeführten Ausziehversuche und deren Versuchsergebnisse dargestellt.

Die wesentlichen Einflussgrößen auf den Verbund zwischen Bewehrung und Mörtel in bewehrtem Mauerwerk wurden in einer Literatursichtung, siehe auch /18/ und Abschnitt 3.3, ermittelt. In den eigenen Untersuchungen zum Verbund wurde speziell auf die Einflüsse verschiedener Steinarten unter Berücksichtigung unterschiedlicher Querschnittsgeometrien (kleine und große Aussparungen), der Festigkeit des Mörtels bzw. Betons sowie des Bewehrungsdurchmessers eingegangen. Außerdem wurden die Einflüsse der unterschiedlichen Herstellarten (Art des Verfüllens, Verdichtung, Lage der Bewehrung) untersucht.

Weiterhin werden die durchgeführten Ausziehversuche zwischen Bewehrung und Mörtel bzw. Beton ohne Kontakt zum Steinmaterial in Anlehnung an RILEM /X12/ und deren Ergebnisse vorgestellt.

### **5.2 Versuchsprogramm**

Das Versuchsprogramm wurde auf Grundlage des bisherigen Erkenntnisstandes erarbeitet und ist in Tabelle 10 dargestellt. Die Mörtel-/Steinauswahl erfolgte auf Grundlage von Vorversuchen und Literaturergebnissen, siehe /19/, so dass der ungünstigste Fall in Bezug auf das Wasserabsaugen tatsächlich berücksichtigt werden konnte. Wegen der bei Kalksandsteinen zu erwartenden niedrigeren Druckfestigkeit des Verfüllmörtels in der Aussparung und der damit verbundenen niedrigeren Verbundfestigkeit der Bewehrung, sollten die Untersuchungen vorwiegend an Kalksandsteinen durchgeführt werden. Es wurden weiterhin in der jeweiligen Druckfestigkeitsklasse geringe Mörteldruckfestigkeiten angestrebt, um den ungünstigsten Fall abzudecken.

Tabelle 10: Versuchsprogramm

Mörtel/Beton	Stahl d <sub>s</sub>	Würfel nach /X12/	vertikal angeordnete Bewehrung in Aussparung			horizontal angeordnete Bewehrung in Lagerfuge
			klein (≥ 65 mm)	groß (≥ 135 mm)		
			h = 1,00 m	h = 1,25 m	h = 2,50 m	
-	mm	-	-	-	-	-
1	2	3	4	5	6	7
NM IIa (M5)	6	1	KS	-	-	KS <sup>1)</sup>
	14	1	KS und HLz	KS	KS	-
NM III (M10)	6	1	-	-	-	KS
	14	-	KS	-	-	-
NM IIIa (M20)	6	1	-	-	-	KS
	14	1	KS	KS	KS	-
Beton C25/30	6	1	-	-	-	-
	14	1	-	KS	KS	-

1) Punktuelle Untersuchungen auch mit Mauerziegeln, Porenbeton- und Leichtbetonsteinen

Bei den Untersuchungen wurde zwischen Bewehrung, die horizontal in Lagerfugen eingelegt und die vertikal in kleinen (≥ 65 mm) und großen (≥ 135 mm) Aussparungen angeordnet wurde, unterschieden. Es wurden jeweils die minimal zulässigen Querschnittsabmessungen geprüft. Als Referenzprüfungen wurden Untersuchungen ohne Kontakt zum Mauersteinmaterial nach /X12/ durchgeführt.

In Abstimmung mit der Bauaufsicht sollte das Verbundverhalten an vertikaler Bewehrungsführung in kleinen Aussparungen an brüstungshohen Mauerwerkprüfkörpern (1 m hoch), unter Beachtung der Ausführungsregeln in DIN 1053-3 /X1/, sowie an vertikaler Bewehrungsführung in großen Aussparungen an geschosshohen Mauerwerkswänden (2,5 m hoch) untersucht werden. Der Einfluss der Verfüllhöhe auf das Verbundverhalten und die auf Grund der Fallhöhe potentielle Entmischungsgefahr sollten hiermit berücksichtigen werden. Nähere Angaben sind den Abschnitten 5.6.2.1 und 5.6.3.1 zu entnehmen.

## 5.3 Verwendete Materialien und deren Eigenschaften

### 5.3.1 Mauersteine

Nach dem bisherigen Erkenntnisstand, siehe /14/, wirkt sich der Wasserentzug von Kalksandsteinen am ungünstigsten auf die Festigkeitsentwicklung des Mauermörtels aus. Aus

diesem Grund wurden als Mauersteine i. W. Kalksandsteine (KS) verwendet. Punktuell wurden Vergleichsversuche mit Mauerziegeln (HLz), Porenbetonsteinen (PP) und Leichtbetonsteinen (V) durchgeführt.

Der Einfluss von verschiedenen Steinarten auf die Verbundeigenschaften wurde für die Versuche an in Lagerfugen eingebetteter Bewehrung mit den folgenden vier Steinarten untersucht.

Kalksandstein	KS 20-2,0-2DF (l/b/h 240/115/113 mm)
Hochlochziegel	HLz 12-0,9-2DF (l/b/h 240/115/113 mm)
Porenbetonstein	PP 4-0,55 (l/b/h 625/115/250 mm)
Leichtbetonstein	V 4-1,0-2DF (l/b/h 240/115/113 mm)

Die verwendeten Mauersteine sind in den Bildern B11 bis B15 dargestellt.

Die vertikal angeordnete Bewehrung in Formsteinen mit kleinen Aussparungen sollte an Kalksandsteinen und Mauerziegeln untersucht werden. Allerdings werden Mauersteine mit kleinen Aussparungen ( $\geq 65$  mm) für bewehrtes Mauerwerk derzeit nicht hergestellt. Aus diesem Grund konnten die Untersuchungen an Mauerziegeln mit kleinen Aussparungen nicht durchgeführt werden. Für die Versuchserien mit Formsteinen aus Kalksandstein wurde folgender Mauerstein verwendet:

KS L-R(P)NT 20-1,2 4DF (l/b/h 248/115/248 mm)

Dieser Kalksandstein wird normalerweise für nicht tragende Wände eingesetzt und ist in Bild B16 abgebildet. Die Aussparung ist ca.  $62 \cdot 82$  mm<sup>2</sup> groß.

Für die Herstellung der Mauerwerkprüfkörper zur Verbunduntersuchung an vertikaler Bewehrungsführung in großen Aussparungen ( $\geq 135$  mm) waren im Versuchsprogramm nur Kalksandsteine vorgesehen. Auch für diese Untersuchungen waren keine passenden Formsteine verfügbar, so dass die folgenden Kalksandsteine zum Einsatz kamen:

Kalksandsteine	KS 20-2,0-1,2 8DF (l/b/h 248/240/238 mm)
Kalksandstein U-Schalen	KS-U 20-2,0-1,2-240 mm

Die verwendeten Kalksandsteine sind in den Bildern B17 und B18 dargestellt.

An jeweils sechs ganzen Mauersteinen wurden die Maße analog DIN EN 772-16:2005-05 /X23/ und die Rohdichte (lufttrocken) bestimmt. An jeweils drei dieser Prüfkörper wurden ferner die Ebenheit der Lagerflächen nach DIN EN 772-20:2005-05 /X24/ und die Planparallelität der Lagerflächen nach DIN EN 772-16 /X23/ bestimmt. Weiterhin wurden die Trockenroh-dichte nach DIN EN 772-13:2000-09 /X22/, die Druckfestigkeit nach DIN EN 772-1:2000-09 /X20/ und die Steinfeuchte beim Vermauern  $h_m$  ermittelt.

Der kapillare Wasseraufnahmekoeffizient  $A_w$  nach DIN EN ISO 15148:2003-03 /X25/ wurde an den Lagerflächen aller verwendeten Mauersteine, an jeweils drei Mauersteinen, ermittelt. Vor der Prüfung wurden die Mauersteine im Normalklima 20/65 bis zur Massekonstanz gelagert. Die Seitenflächen der Mauersteine wurden für die Prüfung wasser- und dampfdicht versiegelt.

An jeweils sechs der verwendeten Porenbeton- und Leichtbetonsteine wurde zusätzlich der kapillare Wasseraufnahmekoeffizient  $c_{w,s}$  sowie an sechs Hochlochziegeln die anfängliche Wasseraufnahme  $c_{wi,s}$  nach DIN EN 772-11:2004-06 /X21/ bestimmt.

Die Prüfergebnisse enthält Tabelle A5.

### 5.3.2 Mörtel

Als Mauermörtel wurden die nach der derzeitigen Entwurfsfassung der DIN 1053-3 /X2/ zulässigen Normalmörtel NM IIa (M5), NM III (M10) und NM IIIa (M20) untersucht.

Für die Untersuchungen wurden zwei handelsübliche Werk trockenmörtel der Mörtelgruppen IIa und III und ein laborgemischter Normalmörtel NM IIIa verwendet. Angestrebt wurde jeweils eine Druckfestigkeit, die in etwa den Mindestanforderungen der DIN V 18580 Vornorm 2007-03 /X9/ entsprach.

Die zuvor genannten Mörtel wurden sowohl zum Vermauern der Mauersteine (Mauermörtel) als auch zum Verfüllen der vertikalen Kanäle (Verfüllmörtel) verwendet. Das Mischen der Mauermörtel erfolgte nach Herstellerangaben im Zwangsmischer. Die Verfüllmörtel wurden wie die Mauermörtel gemischt, jedoch wurde die Wasserzugabe gegenüber der Herstellung der Mauermörtel erhöht, um eine ausreichende Fließfähigkeit zu erreichen.

An jeder zur Herstellung der Prüfkörper verwendeten Mörtelmischung wurden die Frisch- und Festmörtelkennwerte bestimmt. An den Frischmörteln wurde das Ausbreitmaß nach DIN EN 1015-3:2007-05 /X16/, der Luftgehalt nach DIN EN 1015-7:1998-12 /X18/ und die Rohdichte nach DIN EN 1015-6:2007-05 /X17/ bestimmt. Die Festmörtelkennwerte wurden nach DIN EN 1015-11:2007-05 /X19/ (Biegezug- und Druckfestigkeit) bestimmt. Die Prüfungen erfolgten, wenn die Mörteldruckfestigkeit der Mindestdruckfestigkeit nach /X9/ entsprach, i. d. R. im Alter von 14 Tagen. Punktuell wurde der Einfluss des w/z-Wertes und der Konsistenz des Füllmörtels überprüft.

Die Frisch- und Festmörtelkennwerte sind in den Tabelle A6 bis A9 aufgeführt. Die Mittelwerte der Druckfestigkeit lagen bis auf den Normalmörtel NM IIIa nahe an den jeweiligen Mindestanforderungen an die Druckfestigkeit in /X9/.

### **5.3.3 Beton**

Als Referenzbeton wurde ein Beton der Festigkeitsklasse C25/30 untersucht. Der Beton C25/30 wurde nach /X12/ im Labor hergestellt. Als Bindemittel wurde ein Zement CEM II/A-LL 42,5 N gewählt. Als Zuschlag wurde eine Sieblinie zwischen A16 und B16 mit einem Kleinstkorn von 0,1 mm und einem Größtkorn von 16 mm verwendet. Der Wasserzementwert betrug 0,63. Das Mischen erfolgte in einem Zwangsmischer. Zum Erreichen einer ausreichenden Fließfähigkeit wurde ein Fließmittel (Glenium 51) verwendet. Die Rezeptur des verwendeten Betons ist in Tabelle A7 angegeben.

Am Frischbeton wurde das Ausbreitmaß nach DIN EN 12350-5:2009-08 /X26/, die Rohdichte nach DIN EN 12350-6:2009-08 /X27/ und der Luftgehalt nach DIN EN 12350-7:2009-08 /X28/ ermittelt.

Die Würfeldruckfestigkeit wurde an Würfeln mit 150 mm Kantenlänge nach DIN EN 12390-3:2009-07 /X29/ zum Zeitpunkt der Verbunduntersuchungen bestimmt. Die Prüfungen erfolgten, wenn die Würfeldruckfestigkeit dem Anforderungswert nach /X12/ entsprach.

Die Frischbetonkennwerte sowie die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung sind in den Tabellen A6 und A9 angegeben.

### 5.3.4 Bewehrung

Als Bewehrung wurden Bewehrungsstähle nach DIN 488-1 /X15/ mit den Durchmessern 6 und 14 mm verwendet. Für den Bewehrungsdurchmesser  $d_s = 6$  mm wurde ein Betonstahl vom Ring B500A mit drei Rippenreihen und für den Bewehrungsdurchmesser  $d_s = 14$  mm ein Betonstabstahl B500B mit zwei Rippenreihen, davon eine alternierend, verwendet.

An den Bewehrungsstäben wurden die Zugfestigkeit  $R_m$ , die Streckgrenze  $R_e$  und die bezogene Rippenfläche  $f_R$  bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle A11 zusammengestellt.

## 5.4 Untersuchungen zum Verbund zwischen Bewehrung und Mauermörtel bzw. Beton

### 5.4.1 Allgemeines

Die Untersuchung der Verbundeigenschaften zwischen Bewehrung und Mauermörtel bzw. Beton ohne Kontakt zu dem Steinmaterial wurden in Anlehnung an die Empfehlungen in /X12/ durchgeführt. Untersucht wurden 7 Versuchsserien mit je 5 Ausziehversuchen pro Serie. Bei den Versuchsserien mit Normalmörtel der Mörtelgruppen IIa und IIIa sowie dem Referenzbeton C25/30 wurde der Bewehrungsdurchmesser zwischen 6 und 14 mm variiert. Bei der Versuchsserie mit NM III betrug der Bewehrungsdurchmesser 6 mm.

### 5.4.2 Prüfkörperherstellung

Die Bewehrungsstähle wurden in Anlehnung an /X12/ zentrisch stehend in eine Würfelform von 200 mm Kantenlänge eingebaut (s. Bild B22). Eine schematische Zeichnung des Prüfkörpers ist in Bild B23 dargestellt.

Die Verbundlänge für die Ausziehversuche betrug  $5 \cdot d_s$ . Die Verbundlänge wurde jeweils im oberen Bereich des Prüfkörpers angeordnet. Im unteren Bereich des Prüfkörpers wurde der Verbund durch Umhüllung des Stahls mit einem Kunststoffrohr unterbunden. Der Zwischenraum zwischen den Kunststoffrohren und der Bewehrung wurde mit einem elastischen Kitt abgedichtet, um das Eindringen von Mörtel bzw. Beton in den ummantelten Bereich zu vermeiden.

Nach dem Einfüllen in die Schalung wurde der Mörtel bzw. Beton mit einem Stab durch Stochern verdichtet. Die Einfüllseite wurde direkt danach abgestrichen. Die Prüfkörper wurden nach der Herstellung mit feuchten Tüchern und Folie abgedeckt und nach 3 Tagen ausgeschalt. Danach lagerten die Prüfkörper bis zur Prüfung im Labor im Normalklima 20/65.

Für die Prüfung wurde die Kopfseite, die bei den Ausziehversuchen an der unteren Stahlplatte der Prüfeinrichtung lag (s. auch Bild B22), mit Gips abgeglichen.

### 5.4.3 Versuchsdurchführung

Die Prüfungen erfolgten, wenn die Mörteldruckfestigkeit der Mindestdruckfestigkeit nach /X9/ entsprach bzw. in Anlehnung an /X12/, wenn die Würfeldruckfestigkeit vom Beton zwischen 27 und 33 N/mm<sup>2</sup> lag. Die geforderte Mindestdruckfestigkeit der Normalmörtel wurde in der Regel nach 14 Tagen erreicht, die geforderte Würfeldruckfestigkeit des Betons bereits nach 4 Tagen.

Im Versuch wurde der Bewehrungsstab entgegen der Betonierichtung gezogen, was dem günstigsten Fall hinsichtlich der Verbundqualität entspricht.

Die Prüfung erfolgte auf einer elektronisch geregelten Universalprüfmaschine. Die Vorgaben hinsichtlich der Versuchsdurchführung in /X12/ wurden eingehalten. Der Prüfkörper und der Versuchsaufbau sind in Bild 15 abgebildet.



Bild 15: Ausziehversuche an Würfeln nach /X12/; Prüfkörper und Prüfeinrichtung



Ausziehkraft und Ausziehweg wurden kontinuierlich gemessen und aufgezeichnet. Die Verformungsmessung erfolgte mit einem auf dem Prüfkörper befestigten induktiven Wegaufnehmer W 2, dessen Messfühler auf einem am unbelasteten Ende des Bewehrungsstabes angeklebten Aluminiumplättchen aufstand.

#### 5.4.4 Versuchsauswertung

Aus den im Versuch bestimmten Ausziehkraften wurden nach der folgenden Formel die Verbundspannungen  $\tau_v$  ermittelt:

$$\tau_v = \frac{F}{5\pi \cdot d_s^2} \quad (26)$$

mit:

F        Ausziehkraft in N  
d<sub>s</sub>      Bewehrungsdurchmesser in mm

#### 5.4.5 Versuchsergebnisse

Tabelle A6 enthält die statistische Auswertung der Druckfestigkeiten für die verschiedenen Mörtel und den Beton. Die Normalmörtel waren so gewählt, dass die Druckfestigkeit gemäß /X9/ nach 14 Tagen nahe den Mindestanforderungen für die jeweilige Festigkeitsklasse lag, mit Ausnahme vom NM IIIa (15,28 N/mm<sup>2</sup>), der die geforderte Druckfestigkeit von 20 N/mm<sup>2</sup> deutlich unterschritten hat. Die Würfeldruckfestigkeit vom Beton betrug zum Zeitpunkt der Ausziehversuche ca. 29 N/mm<sup>2</sup> und entsprach den Anforderungen nach /X12/.

Die Verbundspannungs-Schlupf-Kurven der Einzelversuche sind in den Bildern B24 bis B30 dargestellt.

In Bild B31 sind die gemittelten Verbundspannungs-Schlupf-Kurven der Versuchsserien mit Normalmörtel aufgetragen. Bild B32 zeigt die gemittelten Verbundspannungs-Schlupf-Kurven mit Normalmörtel im Vergleich zu denen mit Beton. Die Ergebnisse belegen, dass die Verbundkräfte mit wachsender Mörtel- bzw. Betondruckfestigkeit zunehmen. Mit steigendem Bewehrungsdurchmesser, und damit größerer bezogener Rippenfläche, ist es außerdem möglich rd. 20 % höhere Verbundspannungen beim Mörtel und 35 % höhere Verbundspannungen beim Beton zu erreichen.

In Tabelle A12 sind die wichtigsten Eigenschaftswerte aller Versuchsserien nach /X12/ zusammengestellt.

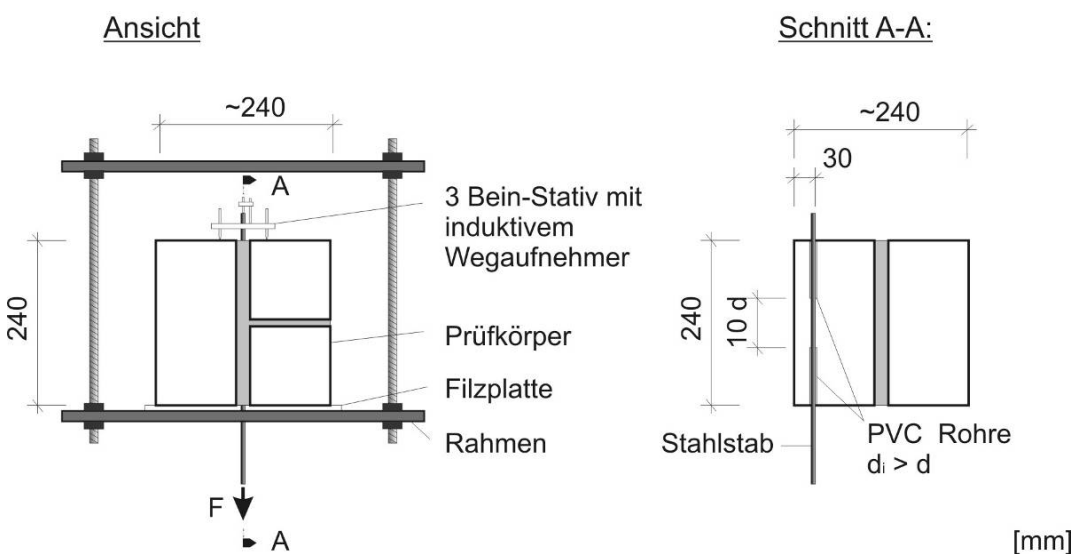
## 5.5 Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung

### 5.5.1 Allgemeines

Zur Untersuchung der Verbundeigenschaften an horizontal angeordneter Bewehrung wurden Ausziehversuche an kleinen Mauerwerkprüfkörpern durchgeführt. Die zu untersuchenden Versuchparameter sind im Versuchsprogramm, s. Tabelle 10, angegeben. Es wurden insgesamt 6 Versuchsserien mit je 6 Ausziehversuchen pro Serie geprüft. In den Versuchsserien 1 bis 4 wurde der Normalmörtel NM IIa in Kombination mit den vier Steinarten (Mauerziegel, Leichtbeton- und Porenbetonstein sowie Kalksandstein) untersucht. In den Versuchsserien 5 und 6 wurden zusätzlich die Normalmörtel NM III und NM IIIa in Kombination mit Kalksandstein getestet. Der Bewehrungsdurchmesser betrug 6 mm.

### 5.5.2 Prüfkörperherstellung

Für die Verbundversuche zwischen Lagerfugenbewehrung und Mauermörtel wurde ein Mauerwerkprüfkörper verwendet, der wesentliche Erkenntnisse von Verbundversuchen aus dem Stahlbetonbau berücksichtigt und auf RILEM-Empfehlungen basiert, s. Bild 16. Dieser Prüfkörper repräsentiert einen Ausschnitt aus einer Mauerwerkwand.



**Bild 16:** Schematische Darstellung der Prüfung an Lagerfugenbewehrung in Anlehnung an /X12/, Ausziehversuch, Prüfkörper und Prüfgestell

Zur Prüfkörperherstellung wurden jeweils 4 Mauersteine im 2DF Format bzw. auf dieses Format passend gesägt verwendet. Bei den aus gesägten Steinen hergestellten Prüfkörpern wurde darauf geachtet, dass die den Fugenmörtel tangierenden Seiten immer ungesägte Oberflächen waren. Die Kantenlänge der Prüfkörper betrug 240 mm. Die Lagerfuge wurde in zwei Arbeitsschritten vermörtelt (s. Bilder B33 und B34). Zunächst wurde eine etwa 12 mm dicke Mörtelschicht aufgetragen. Die Bewehrung wurde mit 30 mm Mörteldeckung zum Prüfkörperperrand eingelegt (s. Bild B35). Dies entspricht der erforderlichen Mindestüberdeckung nach DIN 1053-3 /X1/. Die Soll-Fugendicke wurde auf die nach /X1/ maximal zulässige Dicke von 20 mm eingestellt. Alle Prüfkörper wurden vollfugig vermauert.

Die Verbundlänge für die Ausziehversuche betrug für alle Versuchsserien  $10 \cdot d_s = 60$  mm. Diese Verbundlänge ist doppelt so groß wie die übliche Verbundlänge im Stahlbetonbau /X12/, um Einflüsse von Unregelmäßigkeiten bei der Vermörtelung in der Lagerfuge auszugleichen. Die Verbundlänge wurde jeweils mittig im Prüfkörper angeordnet. In den Randbereichen wurde der Verbund durch Umhüllung des Stahls mit einer Kunststoffhülse unterbunden. Der Zwischenraum zwischen den Kunststoffhülsen und der Bewehrung wurde mit einem elastischen Kitt abgedichtet, um das Eindringen von Mörtel in den ummantelten Bereich zu vermeiden.

Beim Vermauern wurde darauf geachtet, dass die Kopfseite, die bei den Ausziehversuchen an der unteren Stahlplatte der Prüfeinrichtung lag, weitestgehend eben hergestellt wurde. Der Bewehrungsstab wurde lotrecht zu dieser Kopffläche ausgerichtet.

Je Versuchsserie wurden 6 Prüfkörper hergestellt. Alle Prüfkörper wurden im Labor im Normalklima 20/65 hergestellt und dort bis zur Prüfung im Alter von ca. 14 Tagen gelagert.

### **5.5.3 Versuchsdurchführung**

Die im ibac konzipierte Prüfeinrichtung, s. Bild 17, ermöglicht die Prüfung an kleinen Mauerwerkprüfkörpern in einer Universalprüfmaschine. Die Verformungsmessung erfolgte mit einem auf dem Prüfkörper befestigten induktiven Wegaufnehmer W 2, dessen Messfühler auf einem am unbelasteten Ende des Bewehrungsstabes angeklebten Aluminiumplättchen aufstand.



**Bild 17:** Ausziehversuche an Lagerfugenbewehrung; Prüfkörper und Prüfeinrichtung

Die Versuche wurden ca. 14 Tage nach der Prüfkörperherstellung weggeregelt bis zu einem Schlupf, d. h. Verschiebungsweg am unbelasteten Stabende, von 2 mm durchgeführt. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug 0,5 mm/min. Die Höchstlast wurde in der Regel nach 30 bis 60 s erreicht. Die Last und die Verschiebung wurden kontinuierlich aufgezeichnet und von einem Rechner registriert.

Alle Versuchskörper wurden nach der Prüfung vorsichtig aufgeschlagen, um die Qualität der Einbettung der Bewehrung im Mörtel augenscheinlich zu beurteilen und zu bewerten. Das Freilegen des Verbundbereichs zeigte meistens einen vollständig eingebetteten Stab. Jedoch konnte auf Grund der geringen bezogenen Rippenfläche der verwendeten Bewehrungsstäbe ( $d_s = 6 \text{ mm}$ ) kein wirklicher Abdruck der Rippen in dem Mörtel festgestellt werden.

Aus jedem Prüfkörper wurden durch Trockensägen 6 Mörtelscheiben (Maße: 50 · 50 · Lagerfugendicke mm<sup>3</sup>) entnommen. An diesen Scheiben wurde die Fugendruckfestigkeit  $\beta_{D,F(ibac)}$  nach DIN 18555-9:1999-09 /X8/, Verfahren III ermittelt (s. Bilder B36 und B37). Dieses Verfahren wurde speziell für die Prüfung von Mauermörteln, die aus dem Mauerwerk entnommen werden, entwickelt (s. /15/).

### 5.5.4 Versuchsauswertung

Mit dem Regressionsansatz in Gleichung (7), Kapitel 3.3, wurden die gemessenen Verbundspannungs-Schlupfbeziehungen angenähert. Damit konnten zunächst die erforderlichen Verankerungslängen im Gebrauchs- und Bruchzustand für die Bewehrung in Mauer-  
mörtel nach dem in /21/ beschriebenen Algorithmus ermittelt werden. Für die Berechnungen wurden dabei die Randbedingungen aus Bild 9, Kapitel 4.3.4 angesetzt. Die maßgebenden Verbundspannungen  $\tau_M$  wurden anschließend, analog zu Meyer /6/, über die Gleichgewichtsbetrachtung in Gleichung (20) nach der neuen Berechnungsmethode, s. Gleichung (23), ermittelt.

### 5.5.5 Versuchsergebnisse

Die Verbundspannungs-Schlupf-Kurven der einzelnen Versuchsserien zur Untersuchung der Verbundeigenschaften an horizontal eingebetteter Bewehrung in Lagerfugen sind in den Bildern B38 bis B43 dargestellt. Aus dem Vergleich von Bild B38 mit Bild B41 ist abzulesen, dass die Versuche mit Hochlochziegeln eine z. T. deutlich größere Streuung innerhalb der Serie aufweisen als die mit Kalksandsteinen. Bei den Versuchsserien mit Kalksandsteinen wurde während der Versuche meistens ein Haftscherversagen zwischen Stein und Mörtel beobachtet, erkennbar an dem geringen Schlupf bei Versagen. An der Versagensstelle war meistens ein Längsriss entlang des Stabes sichtbar, s. Bild B44. Die Versuche mit NM IIIa ergaben die größten, die mit NM IIa die kleinsten Verbundkräfte. Auf Grund der geringen Mörtelfestigkeit des verwendeten NM IIIa unterschied sich das Verbundverhalten des NM IIIa nur minimal vom NM III. Die Streuung innerhalb der Versuche mit NM IIIa war größer als mit den anderen Mörtelgruppen, s. Bild B43.

In Tabelle A13 sind die Prüfergebnisse der Mörteldruckfestigkeit nach /X19/ sowie der Fugendruckfestigkeiten  $\beta_{D,F(ibac)}$  nach /X8/, Verfahren III (ibac-Verfahren), aufgeführt. In Bild B45 ist der Zusammenhang zwischen der Fugendruckfestigkeit und der Mörteldruckfestigkeit dargestellt. Durch die unterschiedlichen feuchtetechnischen Eigenschaften der verwendeten Mauersteine wird die Druckfestigkeit des Mörtels im Mauerwerk stark beeinflusst. Während die Mörteldruckfestigkeit des NM IIa im Mittel 5,05 N/mm<sup>2</sup> betrug, lagen die Fugendruckfestigkeiten zwischen 5,35 N/mm<sup>2</sup> (Porenbetonsteine) und 8,73 N/mm<sup>2</sup> (Hochlochziegel).

In Bild B46 ist der Zusammenhang zwischen der Fugendruckfestigkeit und dem kapillaren Wasseraufnahmekoeffizienten  $A_w$  dargestellt. Es ist ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Fugendruckfestigkeit und der kapillaren Wasseraufnahme für den Normalmörtel NM IIa erkennbar. Die unterschiedlichen  $A_w$ -Werte bewirken unterschiedliche w/z-Werte des Mörtels, was wiederum einen Einfluss auf die Druckfestigkeit hat.

In Bild B47 sind die für die unterschiedlichen Steinarten mittleren Verbundspannungs-Schlupfbeziehungen (NM IIa,  $\varnothing$  6 mm) dargestellt. Wie aus der Abbildung entnommen werden kann, liegen die mittleren Verbundspannungen bei Porenbeton- und Kalksandsteinen, bedingt durch die unterschiedliche Wasserabsaugcharakteristik, deutlich unter denjenigen bei Verwendung von Hochlochziegeln und Leichtbetonsteinen. Analog zu den Fugendruckfestigkeiten, wurden die größten Verbundspannungen mit Hochlochziegeln ( $2,12 \text{ N/mm}^2$ ) und Leichtbetonsteinen ( $1,61 \text{ N/mm}^2$ ) erreicht. Das schlechteste Verbundverhalten zeigten erwartungsgemäß die Versuchsserien mit Porenbeton- und Kalksandsteinen, die Mittelwerte der maximalen Verbundspannungen lagen unter  $1 \text{ N/mm}^2$ . Es ergab sich also ein enger Zusammenhang zwischen der Fugendruckfestigkeit und den Verbundeigenschaften.

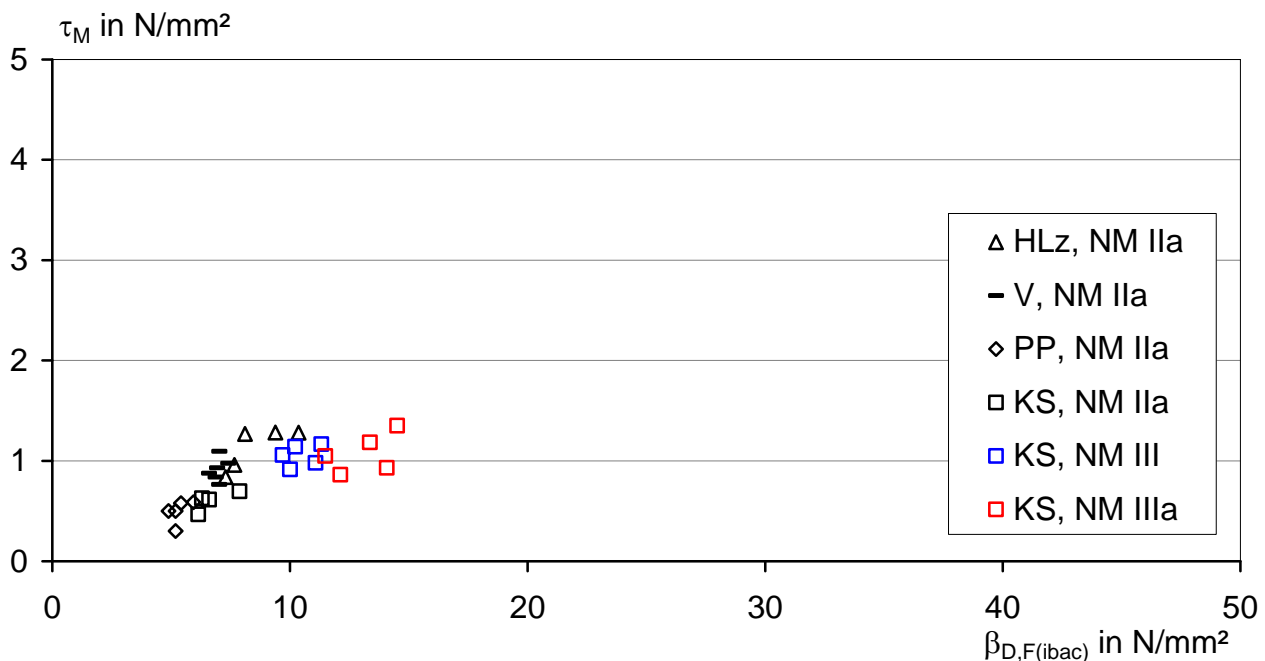
Der Einfluss der unterschiedlichen Mörtelfestigkeit wurde ausschließlich in Kombination mit Kalksandsteinen untersucht. Mit Ausnahme vom NM IIIa ( $\beta_D = 17,29 \text{ N/mm}^2$ ) wurde die angestrebte Mörteldruckfestigkeit nach ca. 14 Tagen, welche nahe bei der Mindestmörteldruckfestigkeit nach DIN V 18580 /X9/ liegen sollte, erreicht. Die Fugendruckfestigkeit im Mauerwerk war mit Ausnahme des NM IIIa ( $\beta_{D,F(ibac)} = 13,11 \text{ N/mm}^2$ ) erwartungsgemäß größer als die Normdruckfestigkeit (s. Bild B45). Der erhöhte Zementgehalt des NM IIIa bedingt auch einen höheren Wasseranspruch. Aus diesem Grund wirkt sich der Wasserentzug durch die Mauersteine gravierender aus als bei den anderen Mörtelgruppen.

Um die Zunahme der Verbundkräfte mit wachsender Mörtelfestigkeit zu verdeutlichen, sind in Bild B48 die mittleren Verbundspannungs-Schlupfbeziehungen für die verschiedenen Mörtelgruppen in Kombination mit Kalksandstein aufgetragen.

Die Tabellen A16 bis A21 enthalten die Mörteldruckfestigkeiten, die Fugendruckfestigkeiten sowie die aus den Verbundversuchen ermittelten Verankerungslängen im Gebrauchs- und Bruchzustand und die daraus resultierenden maßgebenden Verbundspannungen  $\tau_M$ . Die Schlupf-Werte  $\Delta$  am Verankerungsbeginn für den Gebrauchs- und den Bruchzustand sind ebenfalls in den o. g. Tabellen enthalten.

In Tabelle A22 sind die Mittelwerte der wichtigsten Eigenschaftswerte aller Versuchsserien mit Lagerfugenbewehrung zusammengestellt.

Zur Bewertung der verschiedenen Einflussgrößen wurde analog zu den Erkenntnissen aus dem Stahlbetonbau der Zusammenhang zwischen Verbundkennwerten und der Mörteldruckfestigkeit im Mauerwerk ermittelt. Bild 18 zeigt die maßgebenden Verbundspannungen  $\tau_M$  aller durchgeführten Versuche mit Lagerfugenbewehrung in Abhängigkeit von der Fugendruckfestigkeit  $\beta_{D,F(ibac)}$ . In Kapitel 6 werden diese Ergebnisse mit denen aus der Literatur verglichen und statistisch ausgewertet.



**Bild 18:** Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung in der Lagerfuge, maßgebende Verbundspannung  $\tau_M$  in Abhängigkeit der Fugendruckfestigkeit  $\beta_{D,F(ibac)}$ , alle Versuchsserien, Einzelwerte

## 5.6 Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung

### 5.6.1 Allgemeines

Zur Untersuchung der Verbundeigenschaften von vertikal angeordneter Bewehrung in Aussparungen bzw. Formsteinen wurden weitere Ausziehversuche an Mauerwerkprüfkörpern durchgeführt. Da die Querschnittsgeometrie der Mauersteine und die unterschiedlichen Herstellarten der Mauerwände auch Einfluss auf die aufnehmbaren Verbundspannungen haben können, wurden hier die beiden in DIN 1053-3 /X1/ beschriebenen vertikalen Bewehrungsführungen in kleinen und in großen Aussparungen untersucht. Außerdem wurden die Einflüsse der Verdichtung sowie eine mögliche Gefahr des Entmischens und der Absonderung von Anmachwasser des Verfüllmaterials (Verfüllen aus einer Höhe von 1,25 m bzw. 2,50 m) untersucht.

## **5.6.2 Bewehrungsführung in kleinen Aussparungen**

### **5.6.2.1 Allgemeines**

Für die Untersuchungen an in kleinen Aussparungen angeordneter Bewehrung wurden insgesamt 4 Versuchsserien mit je 4 Ausziehversuchen geprüft. Als Mauersteine wurden Kalksandsteine verwendet. Untersucht wurden die Normalmörtel NM IIa, NM III und NM IIIa. Der Bewehrungsdurchmesser betrug mit Ausnahme der Kombination mit NM IIa, bei der der Bewehrungsdurchmesser auch auf 6 mm variiert wurde, 14 mm.

Im Versuchsprogramm war ursprünglich auch eine Versuchsserie mit Mauerziegeln in Kombination mit NM IIa und einem Stabdurchmesser  $d_s = 14$  mm geplant, s. Tabelle 10. Die Tendenz bei der Herstellung von Verfüllziegeln geht allerdings in Richtung größerer Aussparungen ( $\geq 135$  mm). Aus diesem Grund konnten keine Ziegel-Formsteine mit kleinen Aussparungen ( $\geq 65$  mm) beschafft werden. Diese Versuchsserie wurde deshalb im Rahmen dieses Forschungsprojektes nicht mehr untersucht.

### **5.6.2.2 Prüfkörperherstellung**

Die Mauerwerk-Prüfkörper wurden in einer geschlossenen Prüfhalle bei ca. 25 °C und 45 % relativer Luftfeuchte aufgemauert. Die Höhe der Prüfkörper wurde auf 1,0 m festgelegt. Die Mauersteine wurden vor der Herstellung der Prüfkörper im Labor bei 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte bis zur Ausgleichsfeuchte vorgelagert.

Zur Herstellung der Verbundkörper wurden die Mauersteine auf aufgebockte Schalungsbretter gelegt, die in Mitte des Lochkanals mit einem Loch versehen waren, durch das die Bewehrung geführt werden konnte. Die Bewehrung wurde mittig und senkrecht in den Lochkanal eingesetzt. Die verbundfreien Längen wurden mit Kunststoffröhrchen und einer Dichtungsmasse vor dem Kontakt zum Mörtel bewahrt. Die Verbundlänge der Bewehrung im Mörtel wurde zu 300 mm ( $d_s = 6$  mm) bzw. 390 mm ( $d_s = 14$  mm) gewählt.

Eines der Ziele dieses Teils des Forschungsvorhabens war es, den Einfluss der Herstellart des Mauerwerkprüfkörpers auf die Verbundeigenschaften, unter Beachtung der Ausführungsregeln nach /X1/, zu untersuchen. Gemäß /X1/ sind kleine Aussparungen nach jeder Steinlage zu verfüllen. Aus diesem Grund wurden die Mauersteine lagenweise über die Bewehrung abgesetzt und mit Dünnbettmörtel vermauert. Der Verfüllmörtel wurde dann ebenfalls lagenweise direkt von Hand in die Aussparungen eingefüllt und anschließend durch leichtes Stochern mit einem Stab verdichtet, s. Bild B49. Insgesamt wurden 3 Abstandshalter, verteilt auf die Prüfkörperhöhe, eingesetzt.



Alle Prüfkörper wurden in einer Prüfhalle hergestellt und dort bis zur Prüfung im Alter von ca. 14 Tagen gelagert.

Bewehrt wurde jeweils nur eine der zwei Aussparungen der Prüfkörper, s. Bild B50. Die nicht bewehrte Aussparung wurde analog zu der bewehrten Aussparung verfüllt und verdichtet, um die Mörteldruckfestigkeit im Kanal  $\beta_{D,K}$  bestimmen zu können.

### **5.6.2.3 Versuchsdurchführung**

Die Durchführung der Ausziehversuche erfolgte ca. 14 Tage nach Prüfkörperherstellung. Die Prüfeinrichtung (s. auch Bild B50) wurde oben auf dem Verbundkörper montiert und an das freie Ende des Bewehrungsstabes angekoppelt.

Die Zugkraft wurde mit einer Kraftmessdose und der Schlupf am freien Ende des Stabes mit einem induktiven Wegaufnehmer gemessen. Die Verformungsmessung erfolgte mit einem auf dem Prüfkörper befestigten induktiven Wegaufnehmer W 2, dessen Messfühler auf einem am unbelasteten Ende des Bewehrungsstabes angeklebten Aluminiumplättchen aufstand (s. Bild 19).

Die Versuche wurden lastgeregelt bis zu einem Schlupf, d. h. Verschiebungsweg am unbelasteten Stabende, von 2 mm durchgeführt. Die Geschwindigkeit betrug 2 kN/min (NM IIa), 10 kN/min (NM III) bzw. 14 kN/min (NM IIIa). Die Last und die Verschiebung wurden kontinuierlich aufgezeichnet.



**Bild 19:** Prüfkörper und Prüfeinrichtung zur Bestimmung des Verbundverhaltens von vertikaler Bewehrung in Formsteinen mit kleinen Aussparungen

Nach Abschluss der Versuche wurden die Prüfkörper vorsichtig aufgeschlagen, um die Qualität der Einbettung der Bewehrung im Mörtel augenscheinlich zu beurteilen und zu bewerten, s. Bild B51.

Die Bestimmung der Mörteldruckfestigkeit im Kanal, entsprechend dem Verfahren III (ibac-Verfahren) in DIN 18555-9 /X8/, erfolgte parallel zu den Verbundversuchen am Verfüllmörtel der unbewehrten Aussparungen. Für das in /15/ beschriebene Verfahren sind Mörtelprüfkörper mit einem Durchmesser von 50 mm und einer Prüfkörperhöhe von 10 bis 15 mm vorgesehen, alternativ können auch quadratische Prüfkörper mit einer Kantenlänge von 50 mm verwendet werden.

Zur Herstellung der Prüfkörper für die Bestimmung der Mörteldruckfestigkeit im Kanal wurde der Festmörtelkörper einschließlich der angrenzenden Mauersteinwandungen der Aussparung aus dem Mauerstein gesägt. Anschließend wurden durch Schnitte senkrechte zur Verfüllrichtung rd. 20 mm dicke Mörtelscheiben aus dem Festmörtelkörper gesägt und die anhaftenden Mauersteinwandungen durch weitere Sägeschnitte entfernt. Das Flächenmaß des Mörtelprüfkörpers entsprach annähernd  $50 \cdot 50 \text{ mm}^2$ , analog der Mörtelprüfkörper zur Bestimmung der Fugendruckfestigkeit.

#### 5.6.2.4 Versuchsauswertung

Die Auswertung der Versuche erfolgte analog Abschnitt 5.5.4.

#### 5.6.2.5 Versuchsergebnisse

In Tabelle A14 sind die Prüfergebnisse der Mörteldruckfestigkeit nach DIN EN 1015-11 /X19/ sowie der Verfüllmörteldruckfestigkeit (Mörtel aus dem Lochkanal)  $\beta_{D,K}$  in Anlehnung an /X8/, Verfahren III (ibac-Verfahren), aufgeführt. In Bild B52 ist der Zusammenhang zwischen beiden Mörtelfestigkeiten dargestellt.

Die Mörteldruckfestigkeiten des NM IIa ( $\beta_D = 4,84 \text{ N/mm}^2$ ) und des NM III ( $\beta_D = 10,03 \text{ N/mm}^2$ ) im Alter von jeweils 17 bzw. 19 Tagen lagen nahe bei der angestrebten Mindestdruckfestigkeit nach /X9/. Die Mörteldruckfestigkeit des NM IIIa im Alter von 16 Tagen ( $\beta_D = 17,42 \text{ N/mm}^2$ ) war, wie bei der Lagerfugenbewehrung, niedriger als die Mindestanforderungen nach /X9/. Dies liegt vermutlich an der gemäß /X1/ geforderten Verfüllkonsistenz (Ausbreitmaß  $\geq 210 \text{ mm}$ ) des Mörtels, wodurch die erreichbare Festmörteldruckfestigkeit herabgesetzt wird.

Die Mörteldruckfestigkeit der Verfüllmörtel NM III ( $\beta_{D,K} = 7,19 \text{ N/mm}^2$ ) und NM IIa ( $\beta_{D,K} = 13,86 \text{ N/mm}^2$ ) war erwartungsgemäß größer als die entsprechende Prismendruckfestigkeit. Dagegen ergab sich beim NM IIIa ein kleinerer Wert der Mörteldruckfestigkeit im Verfüllkanal ( $\beta_{D,K} = 16,40 \text{ N/mm}^2$ ) als ohne Kontakt zum Steinmaterial (s. Bild B52). Dies liegt vermutlich daran, dass der laborgemischte NM IIIa deutlich mehr Zement als die anderen Mörtel enthält und somit einen größeren Wasseranspruch hat. Der Entzug von Wasser durch das umgebende Steinmaterial wirkt sich aus diesem Grunde stärker auf die Festigkeitsentwicklung des NM IIIa aus, als dies bei den anderen Mörtelgruppen der Fall ist.

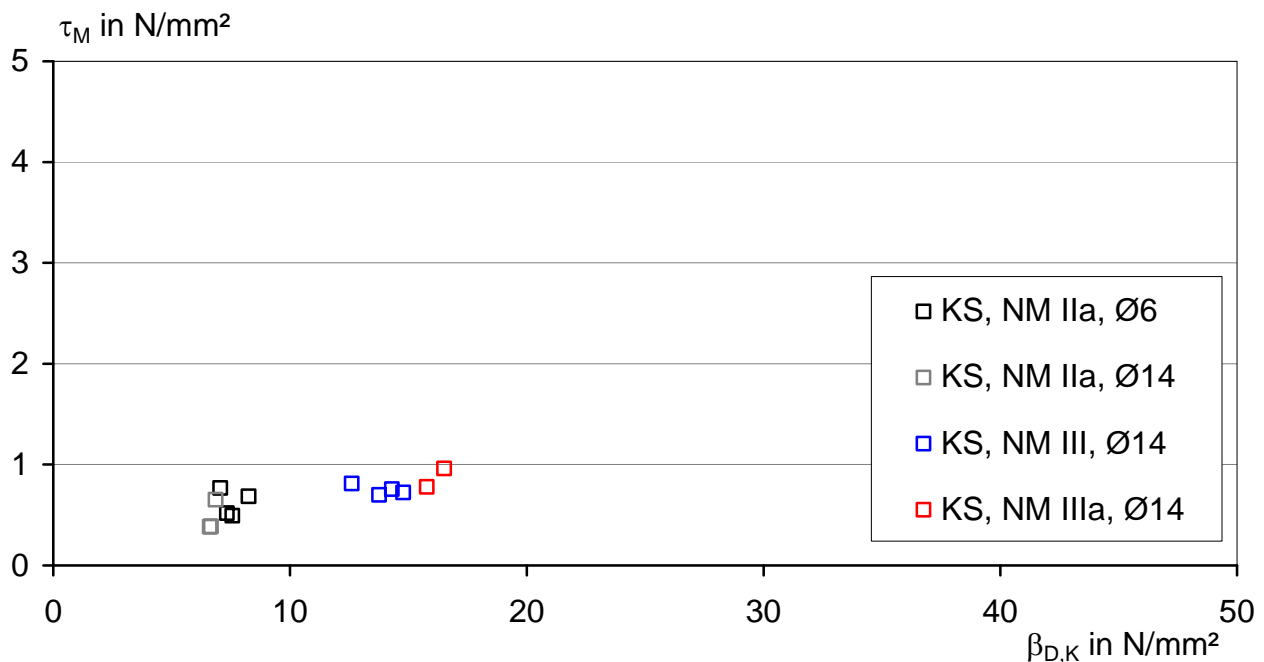
Die Tabellen A23 bis A26 enthalten außerdem die mit den Gesetzen des verschieblichen Verbundes ermittelten Kennwerte der einzelnen Versuchsserien. In Tabelle A27 sind die Mittelwerte der wichtigsten Eigenschaftswerte aller Versuchsserien mit vertikaler Bewehrungsführung in kleinen Aussparungen zusammengestellt.

Die Verbundspannungs-Schlupf-Kurven der durchgeführten Versuche an vertikal angeordneter Bewehrung in kleinen Aussparungen sind in den Bildern B53 bis B56 dargestellt. In Bild B57 sind die mittleren Verbundspannungs-Schlupfbeziehungen für die verschiedenen Mörtelgruppen in Kombination mit den zwei verwendeten Bewehrungsdurchmessern dargestellt. Die größten Verbundspannungen für  $d_s = 14 \text{ mm}$  wurden mit NM IIIa ( $\tau_M = 0,87 \text{ N/mm}^2$ ) erreicht, die kleinsten mit NM IIa ( $\tau_M = 0,49 \text{ N/mm}^2$ ).

Die Qualität des Verbundes der Bewehrung im Mörtel wurde anhand des hinterlassenen Mörtelabdruckes auf der Bewehrung beurteilt. Die Bewehrungsstäbe zeigten in einzelnen Fällen einen unvollständigen Mörtelabdruck im Verbundbereich, s. Bild B51. Solche Fehlstellen wurden beim 3. und 4. Versuchskörper der Versuchsserie mit NM IIIa und  $d_s = 14$  mm festgestellt, was die große Streuung der Ergebnisse dieser Versuchsserie erklärt (s. Bild B56). Bei der weiteren Auswertung der Versuchsergebnisse von NM IIIa wurden diese zwei Versuche nicht berücksichtigt.

Außer der Mörtelgruppe wurde punktuell auch der Bewehrungsdurchmesser bei der Kombination mit NM IIa variiert. Die Ergebnisse der Serie mit  $d_s = 14$  mm sind deutlich schlechter als die der Serie mit  $d_s = 6$  mm (s. Bilder B53 und B54). Dies ist vermutlich vor allem auf eine schlechtere Mörteldeckung zwischen Bewehrung und umgebendem Stein sowie auf eine höhere Beanspruchung der Kontaktzone Stein/Mörtel zurückzuführen. Zusätzlich wirkt sich der kleinere Stabdurchmesser durch das größere Verhältnis Umfang/Fläche günstiger aus.

Zur Beurteilung der unterschiedlichen Einflussgrößen wurde analog zu den Erkenntnissen aus dem Stahlbetonbau der Zusammenhang zwischen den Verbundkennwerten an vertikal angeordneter Bewehrung in kleinen Aussparungen und der Mörteldruckfestigkeit im Verfüllkanal  $\beta_{D,K}$  ermittelt. Bild 20 zeigt die maßgebenden Verbundspannungen  $\tau_M$  aller durchgeführten Versuche an vertikal angeordneter Bewehrung in kleinen Aussparungen in Abhängigkeit von der Mörteldruckfestigkeit im Kanal  $\beta_{D,K}$ . In Kapitel 6 werden diese Ergebnisse statistisch ausgewertet und mit denen von vertikal angeordneter Bewehrung in großen Aussparungen verglichen.



**Bild 20:** Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung in kleinen Aussparungen, maßgebende Verbundspannung  $\tau_M$  in Abhängigkeit der Mörteldruckfestigkeit im Verfüllkanal  $\beta_{D,K}$ , alle Versuchsserien, Einzelwerte

### 5.6.3 Bewehrungsführung in großen Aussparungen

#### 5.6.3.1 Allgemeines

Das Verbundverhalten von vertikalen Bewehrungsstäben in großen verfüllten Aussparungen wurde mit zwei unterschiedlichen Verfüllmörteln (NM IIa und NM IIIa) und einem Verfüllbeton (C25/30) untersucht. Für das umgebende Mauersteinmaterial wurden ausschließlich Kalksandsteine verwendet, da sich der Wasserentzug der Kalksandsteine mindernd auf die Festigkeitsentwicklung im Mauermörtel auswirkt und den ungünstigsten Fall für die Verbundeigenschaften darstellt. Der Bewehrungsdurchmesser ( $d_s = 14$  mm) wurde nicht variiert.

Gemäß Versuchsprogramm (s. Tabelle 10) sollten diese Verbunduntersuchungen vorwiegend an geschosshohen Mauerwerkswänden ( $h = 2,5$  m) durchgeführt werden. Durch diese Ausziehversuche sollte einerseits überprüft werden, ob das händische Verfüllen des geschosshohen Verfüllkanals bei gleichzeitiger Verdichtung des Mörtels durch Stochern ohne Hohlräume möglich ist. Andererseits sollte durch die Versuche untersucht werden, ob sich der Mörtel durch die Fallhöhe entmischen kann.

Damit bei den Ausziehversuchen die Streckgrenze des Stahls nicht erreicht wird und ein Haftverbundversagen zwischen Stein und Mörtel nicht eintritt, wurde die Verbundlänge der

Bewehrung im Mörtel auf 350 mm begrenzt. Aus diesem Grund wurde die Höhe der Mauerwerkswände zu 1,25 m gewählt. Das Einfüllen des Verfüllmörtels erfolgte zum einen direkt von Hand in die Aussparung und zum anderen, um die Verhältnisse beim Verfüllen geschosshoher Wände ( $h = 2,50$  m) abzubilden, mittels eines auf die Aussparung aufgesetzten, 1,25 m langen Kunststoffrohres.

Zusätzlich wurden weitere Verbunduntersuchungen, ebenfalls an 1,25 m hohen Mauerwerkswänden, durchgeführt, bei denen jedoch der Mörtel direkt von Hand in die Aussparung eingefüllt wurde. Das Ziel war es, den Verbund zwischen Bewehrung und Mörtel bzw. Beton unter Beachtung der Ausführungsregeln nach DIN 1053-3 /X1/, die das Verfüllen und Verdichten von großen Aussparungen nach jedem Meter Wandhöhe vorschreiben, zu untersuchen.

Insgesamt wurden 6 Versuchsserien mit jeweils 3 Wänden und 2 Aussparungen pro Wand untersucht. Bei 3 Versuchsserien wurde der Mörtel bzw. Beton direkt an der Wandoberkante von Hand verfüllt ( $h = 1,25$  m). Bei den anderen 3 Versuchsserien wurde der Mörtel bzw. Beton durch ein Aufsatzrohr eingefüllt ( $h = 2,50$  m).

### **5.6.3.2 Prüfkörperherstellung**

Die Mauerwerk-Prüfkörper wurden in einer geschlossenen Prüfhalle bei ca. 25 °C und 45 % relativer Luftfeuchte aufgemauert. Die Mauersteine wurden vor der Herstellung der Prüfkörper im Labor bei 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte bis zur Ausgleichsfeuchte vorgelagert. Die Soll-Dicke der Lagerfuge betrug 12 mm. Die Mauersteine wurden mit dem jeweiligen Mörtel vermauert, der auch für das Verfüllen der Aussparungen verwendet wurde. Die Stoßfugen wurden nicht vermörtelt.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt sind deutschland- und europaweit keine Kalksand-Formsteine mit großen Aussparungen ( $\geq 135$  mm) verfügbar. Aus diesem Grund wurden die vertikalen großen Aussparungen mit einer von Steinlage zu Steinlage gegenläufigen Anordnung von U-Schalen erzeugt, s. Bild B58. Diese Art der Herstellung ist in der Entwurfsfassung von DIN 1053-3 /X2/ geregelt (s. Bild 3).

Die Prüfwände wurden auf einer Behelfskonstruktion mit auf Lücke gesetzten Steinen errichtet, s. auch Bild B58. Die Lücken in der untersten Steinlage wurden so angeordnet, dass die zu verfüllenden Aussparungen frei blieben. Die Höhe aller Prüfwände wurde auf 1,25 m festgelegt, die Verfüllhöhe entsprach entweder 1,25 m oder 2,50 m, je nach Art der Verfüllung. Die Wandlänge betrug 1,25 m. Der Ablauf wurde so gewählt, dass zwischen

Fertigstellung der jeweiligen Prüfwand und dem Verfüllen der Aussparungen ein Zeitraum von etwa 2 Tagen lag.

Die Bewehrungsstäbe wurden in die Aussparungen eingesetzt und an der Unterseite der Prüfkörper in ein vorgebohrtes Schalungsbrett eingeführt. Anschließend wurde das Schalungsbrett unter der Prüfwand verkeilt, wodurch sichergestellt wurde, dass die Bohrung im Schalungsbrett mittig zum Querschnitt des Lochkanals war.

Nach dem Einbau der Bewehrungsstäbe wurden die Aussparungen verfüllt (s. Bild 21). Bei den Versuchsserien 1.1 bis 3.2 wurde der Mörtel direkt an der Wandoberkante in 1,25 m Höhe von Hand eingefüllt und anschließend durch leichtes Stochern mit einem Stab verdichtet (s. Bild B59). Bei der Prüfung der Versuchsserien 4.1 bis 6.2 wurde ein 1,25 m langes Kunststoffrohr auf den Lochkanal aufgesetzt und anschließend der Mörtel durch das Rohr von Hand eingefüllt (s. auch Bild B59). Eine zusätzliche Mörtelverdichtung erfolgte bei diesen Prüfkörpern durch Stochern mit einem Stab. Durch diese Art der Prüfkörperherstellung sollten die Verhältnisse beim Verfüllen geschosshoher Mauertafeln nachgestellt werden. Dieser Versuch diente auch zur Beurteilung der Gefahr des Entmischens und der Absonderung von Anmachwasser.

Insgesamt wurden 6 Versuchsserien mit je 6 Ausziehversuchen durchgeführt. Die minimale Mörteldeckung betrug 60 mm in jeder Richtung.



**Bild 21:** Prüfkörper zur Bestimmung des Verbundverhaltens an vertikaler Bewehrung in großen Aussparungen

### 5.6.3.3 Versuchsdurchführung

Die Durchführung der Ausziehversuche erfolgte ca. 14 Tage nach Prüfkörperherstellung. Die Prüfeinrichtung (s. Bild B60) wurde oben auf der Prüfwand montiert und an das freie Ende des Bewehrungsstabes angekoppelt.

Die Ausziehversuche wurden lastgeregelt durchgeführt. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug 8,5 kN/min (NM IIa), 15,4 kN/min (NM IIIa) bzw. 20,8 kN/min (C25/30), so dass die maximal rechnerische Ausziehkraft nach rd. 2 min erreicht wurde.

Neben der Last wurde auch die Verschiebung am unbelasteten Ende des Bewehrungsstabes (Schlupf  $\Delta$ ) gemessen. Die Messung des Schlupfs  $\Delta$  erfolgte mit einem auf der Prüfwand befestigten induktiven Wegaufnehmer W2, dessen Messfühler auf einem am unbelasteten Ende des Bewehrungsstabes angeklebten Aluminiumplättchen aufstand. Sowohl die Last als auch der Schlupf wurden kontinuierlich aufgezeichnet.

Die Belastung wurde bis zum Erreichen einer Stahlspannung von 500 N/mm<sup>2</sup> (rechnerische Zugfestigkeit) bzw. bis zum Erreichen der Höchstlast und/oder eines Schlupfes von 2,0 mm gesteigert. Aus Sicherheitsgründen wurden die Bewehrungsstäbe nicht bis zum Erreichen der Zugfestigkeit belastet.

Zusätzlich wurde die Mörtelfestigkeit im Kanal, analog zu den Untersuchungen an Mauerwerkprüfkörpern mit kleinen Aussparungen, s. Kapitel 5.6.2.3, bestimmt.

### 5.6.3.4 Versuchsauswertung

Aus den Last-Schlupf-Kurven wurden die Verankerungslängen  $l_v$  für den Gebrauchs- und Bruchzustand mit den Gesetzen des verschieblichen Verbundes, analog zu Kapitel 5.5.4, berechnet. Die maßgebende mittlere Verbundspannung  $\tau_M$  wurde dann mit der maßgebenden Verankerungslänge  $l_{v, \text{maßg.}}$  nach Gleichung (19) ermittelt.

### 5.6.3.5 Versuchsergebnisse

Die Prüfergebnisse der Mörteldruckfestigkeit nach DIN EN 1015-11 /X19/ sowie der Verfüllmörteldruckfestigkeit (Mörtel aus dem Lochkanal)  $\beta_{D,K}$  in Anlehnung an DIN 18555-9 /X8/, Verfahren III (ibac-Verfahren), sind in den Tabellen A15 ( $h = 1,25$  m) und A17 ( $h = 2,5$  m) aufgeführt. Der Zusammenhang zwischen der Mörteldruckfestigkeit und der Verfüllmörteldruckfestigkeiten der unterschiedlichen Mörtelgruppen und Verfüllarten ist in Bild B61 dargestellt.



Die Mörteldruckfestigkeiten des NM IIa ( $\beta_D = 4,68 \text{ N/mm}^2$ ) und des NM IIIa ( $\beta_D = 18,18 \text{ N/mm}^2$ ) lagen knapp unterhalb der angestrebten Mindestdruckfestigkeit nach /X9/. Die Druckfestigkeiten des Verfüllmörtels aus den Aussparungen waren erwartungsgemäß größer als die Mörteldruckfestigkeiten. Im Gegensatz zu den Untersuchungen an Bewehrungsstäben in kleinen Aussparungen, spielte das umgebende Steinmaterial aufgrund der größeren Mörteldeckung eine geringere Rolle. Die bei den unterschiedlichen Verfüllarten (Verfüllen des Mörtels von Hand direkt an der Wandoberkante,  $h = 1,25 \text{ m}$  bzw. Einfüllen des Mörtels durch einen Aufsatzrohr,  $h = 2,50 \text{ m}$ ) ermittelten Druckfestigkeiten des Verfüllmörtels unterschieden sich nur geringfügig.

In den Tabellen A28 und A30 ( $h = 1,25\text{m}$ ) sowie in den Tabellen A29 und A31 ( $h = 2,50\text{m}$ ) sind außer den Mörteldruckfestigkeiten nach /X19/ und den Verfüllmörteldruckfestigkeiten auch noch die aus den Verbundversuchen ermittelten Verankerungslängen im Gebrauchs- und Bruchzustand sowie die maßgebende Verbundspannung  $\tau_M$  angegeben. Die Schlupfwerte  $\Delta$  am Verankerungsbeginn für den Gebrauchs- und den Bruchzustand sind ebenfalls in den o. g. Tabellen enthalten.

Die Verbundspannungs-Schlupf-Kurven der durchgeführten Versuche an vertikal angeordneter Bewehrung in großen Aussparungen mit Normalmörtel der Mörtelgruppen IIa und IIIa sind in den Bildern B62 und B64 ( $h = 1,25 \text{ m}$ ) sowie in den Bildern B63 und B65 ( $h = 2,5 \text{ m}$ ) dargestellt. In Bild B66 sind die mittleren Verbundspannungs-Schlupfbeziehungen für die verschiedenen Mörtelgruppen und Verfüllarten aufgetragen.

Die Verfüllart beeinflusst die aufnehmbaren Verbundspannungen erheblich. Bei großen Aussparungen, verfüllt aus einer Höhe von  $1,25 \text{ m}$ , wurden höhere Verbundspannungen gemessen als bei kleinen Aussparungen, die von Steinlage zu Steinlage verfüllt wurden. Eine maßgebliche Steigerung der aufnehmbaren Verbundspannungen wurde beim Verfüllen von geschosshohen Wänden, aus einer Höhe von  $2,50 \text{ m}$ , erreicht. Die maximal aufnehmbaren Verbundspannungen bei einer Verfüllhöhe von  $2,50 \text{ m}$  betragen für NM IIa  $\tau_M = 0,77 \text{ N/mm}^2$  und somit rd. 30 % mehr als bei der Verfüllung aus einer Höhe von  $1,25$  ( $\tau_M = 0,54 \text{ N/mm}^2$ ). Bei NM IIIa stieg die aufnehmbare Verbundspannung um 40 % von  $1,14 \text{ N/mm}^2$  ( $h = 1,25 \text{ m}$ ) auf  $1,92 \text{ N/mm}^2$  ( $h = 2,50 \text{ m}$ ).

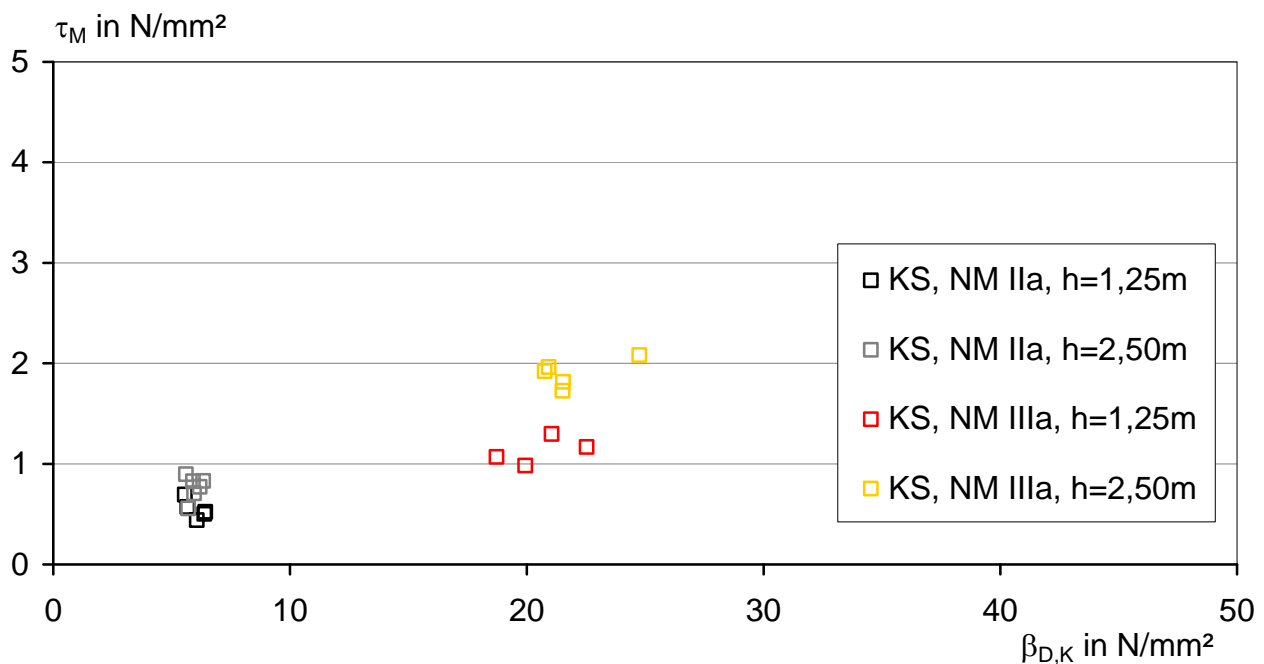
Bei den Versuchsserien mit dem Verfüllbeton C25/30 wurden die Versuche nach Erreichen der rechnerischen Stahlzugspannung ( $500 \text{ N/mm}^2 \approx 77 \text{ kN}$  für  $d_s = 14 \text{ mm}$  und B500B) abgebrochen. Die dabei vorherrschende Verbundspannung betrug ca.  $4,5 \text{ N/mm}^2$ . Bis zum Versuchsabbruch wurde bei keinem der Prüfkörper ein Schlupf am unbelasteten Ende gemessen. Auf eine grafische Darstellung der Versuchsergebnisse wird daher verzichtet. Nach Beendigung des Versuchs zeigten sich in den oberen beiden Steinreihen der Prüfwand vereinzelt Risse in den Mauersteinen, s. Bild B67. Diese Risse können auf die Lasteinleitung durch die Prüfeinrichtung zurückgeführt werden.

Bei allen Prüfkörpern wurden nach dem Auftrennen sehr gut verfüllte Aussparungen vorgefunden. Bei den Prüfkörpern, die direkt an der Wandoberkante mit Mörtel von Hand verfüllt wurden, haben sich kleine Risse um den Bewehrungsstab gebildet. Da aber die Mörteldeckung groß genug war, haben sich keine Längsrisse gebildet. Bei den großen Aussparungen, die über ein Aufsatzrohr mit Mörtel verfüllt wurden, wurden keine Fehlstellen festgestellt. Im Verbundbereich zwischen Beton und Bewehrung haben sich auch keine Fehlstellen oder Risse gebildet, s. Bild B68.

Ein Entmischen des Mörtels wurde bei keinem der verwendeten Verfüllmörtel festgestellt. Lediglich bei dem Beton C25/30 zeigte sich während des Verfüllens eine geringfügige Absonderung von Anmachwasser.

In Tabelle A32 sind die Mittelwerte der wichtigsten Eigenschaftswerte der Versuchsserien mit vertikaler Bewehrungsführung in großen Aussparungen verfüllt mit Mörtel zusammengestellt.

In Bild 22 ist der Zusammenhang zwischen der maßgebenden Verbundspannung und der Mörteldruckfestigkeit im Verfüllkanal für die Versuchsserien mit NM IIa und NM IIIa dargestellt. In Kapitel 6 wird näher auf diese Versuchsergebnisse eingegangen. Dort befindet sich auch ein Vergleich mit den Versuchsergebnissen aus den Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung in kleinen Aussparungen.



**Bild 22:** Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung in großen Aussparungen, Einfüllen des Mörtels direkt an der Wandoberkante ( $h = 1,25\text{ m}$ ) bzw. durch ein Aufsatzrohr ( $h = 2,50\text{ m}$ ); maßgebende Verbundspannung  $\tau_M$  in Abhängigkeit der Mörteldruckfestigkeit im Verfüllkanal  $\beta_{D,K}$ , alle Versuchsserien, Einzelwerte

## 6 AUSWERTUNG DER VERSUCHSDATEN AUS DER LITERATUR UND EIGENEN UNTERSUCHUNGEN

### 6.1 Allgemeines

Auf Basis der gewonnenen Versuchsdaten aus eigenen und bereits vorhandenen Untersuchungen sollen im Zuge der Überarbeitung der DIN 1053-3 und der zukünftigen Einführung des Eurocodes 6 charakteristische Verbundfestigkeiten abgeleitet werden.

Im Folgenden werden die aus den erfassten Versuchsdaten rechnerisch ermittelten Kennwerte und die zu deren Berechnung verwendeten Ansätze näher erläutert.

### 6.2 Zusammenstellung der Versuchsdaten

Für die Auswertung der gewonnenen Versuchsdaten wurden zunächst die maßgebenden Verbundspannungen  $\tau_M$  in Abhängigkeit der Fugendruckfestigkeit  $\beta_{D,F(ibac)}$  bzw. der Mörteldruckfestigkeit im Verfüllkanal  $\beta_{D,K}$  in Diagrammen, getrennt nach der Bewehrungsanord-

nung, zusammengestellt. Wie man aus den Bildern B69 bis B75 erkennen kann, besteht ein trotz der großen Streuungen deutlicher Zusammenhang zwischen diesen beiden Kenngrößen. In Kapitel 6.3 wird auf die Bestimmung der Bewertungsfunktionen für den Zusammenhang der Verbundspannung und der Druckfestigkeit des Mörtels im Mauerwerk, getrennt nach der Bewehrungsanordnung und ggf. der Steinart, eingegangen.

In den Bildern B69 und B70 sind die Mittelwerte und die Einzelwerte aller Versuchsdaten an horizontal in Lagerfugen angeordneter Bewehrung zusammengefasst. Durch die unterschiedlichen feuchtetechnischen Eigenschaften der verwendeten Mauersteine werden sowohl die Druckfestigkeit des Mörtels im Mauerwerk als auch die Verbundfestigkeit stark beeinflusst. Die Mauerwerkprüfkörper der Versuchsserien mit Hochlochziegeln sind in den Diagrammen rot gekennzeichnet. Aufgrund der häufig höheren Fugendruckfestigkeit ergeben sich auch höhere Verbundspannungen.

Bild B71 zeigt den Vergleich der maßgebenden Verbundspannungen der Versuchsserien mit Kalksandsteinen aus eigenen und der Literatur entnommenen Untersuchungen an horizontal in Lagerfugen angeordneter Bewehrung. In Bild B72 werden die Versuchsdaten der Versuchsserien mit Hochlochziegeln dargestellt. Die unterschiedlichen Farben kennzeichnen die verschiedenen Mörtelgruppen und Zusatzmittel. Beide Bilder verdeutlichen, dass die gemessenen Verbundspannungen aus eigenen Untersuchungen, gekennzeichnet mit offenen Symbolen, niedriger sind als die aus der Literatur entnommenen. Allerdings sind nicht nur die Verbundspannungen kleiner sondern auch die Fugendruckfestigkeiten. Die Begründung hierfür liegt hauptsächlich in der für die eigenen Untersuchungen verwendeten Mörtel, die die Mindestanforderungen an die Druckfestigkeit nach /X9/ nur knapp erfüllt haben, um die angestrebten, schlechtesten Verbundeigenschaften für die jeweilige Mörtelgruppe zu ermitteln. Aus der Literatur lässt sich entnehmen, dass die Mörteldruckfestigkeiten der dort verwendeten Mörtel über den Mindestanforderungen lagen.

Ein anderer Unterschied zwischen den eigenen Untersuchungen und den Literaturwerten besteht darin, dass bei letzteren den Mörteln Zusatzmittel zur Verbesserung bestimmter Eigenschaften zugegeben wurden, welche die Verbundqualität negativ beeinflussen können (s. Kapitel 4.3.5.2). Wie aus den Bildern B71 und B72 ersichtlich, erreichen die Versuchsserien mit Verzögerer und Luftporenbildner sowohl geringere Fugendruckfestigkeiten als auch geringere Verbundspannungen als die Versuchsserien ohne diese Zusatzmittel.

Weiterhin wurden in den aus der Literatur entnommenen Untersuchungen epoxidharzbeschichtete Bewehrungsstähle verwendet, die zu geringeren maßgebenden Verbundspannungen führen können als unbeschichtete Stähle. Die Versuchsdaten aus den eige-

nen Untersuchungen liegen dennoch unter den Werten aus der Literatur, weil die Mörtelzusammensetzung und die damit erreichbare Mörteldruckfestigkeit die maßgebende Verbundspannung stärker als die Beschichtung der Bewehrung beeinflussen kann.

Die wenigen Versuchsdaten an horizontal eingelegter Bewehrung in Kalksandstein-Formsteinen, die aus der Literatur entnommen werden konnten, sind in Bild B73 dargestellt. Wie aus Bild B73 ersichtlich, hängt die Verbundspannung von der Steinbreite und der damit erzielten Verbundqualität ab. Wird eine mäßige Verbundqualität erreicht, wie dies beispielsweise bei einer geringen Steinbreite ( $b = 115 \text{ mm}$ ) der Fall ist, liegen die Verbundspannungen deutlich unter denen von in Lagerfugen eingebetteter Bewehrung.

Aus der Literatur konnten keine Versuchsdaten mit vertikal angeordneter Bewehrung in Formsteinen bzw. Aussparungen gewonnen werden. In den Bildern B74 und B75 sind lediglich die Versuchsdaten aus den eigenen Untersuchungen an vertikal in kleinen bzw. in großen Aussparungen aus Kalksandsteinen angeordneter Bewehrung enthalten. Diese Verbundspannungen liegen unter denen an in Lagerfugen eingebetteter Bewehrung und entsprechen denen an horizontal angeordneter Bewehrung in Formsteinen mit mäßigem Verbund.

Die Verfüllart beeinflusst die Verbundqualität und damit die aufnehmbaren Verbundspannungen. Aus dem Vergleich der Bilder B73 und B74 erkennt man, dass bei großen Aussparungen verfüllt aus einer Höhe von 1,25 m höhere Verbundspannungen erreicht werden als bei kleinen Aussparungen, die von Steinlage zu Steinlage verfüllt wurden. Eine maßgebliche Steigerung der aufnehmbaren Verbundspannungen wurde beim Verfüllen von geschosshohen Wänden, aus einer Höhe von 2,50 m, aufgrund der Fallenergie erreicht.

Ein größerer Bewehrungsdurchmesser ( $\varnothing 14 \text{ mm}$ ) und eine daraus resultierende größere bezogene Rippenfläche führen aufgrund einer schlechteren Mörteldeckung zwischen Bewehrung und umgebenden Stein zu kleineren Verbundspannungen, wie aus Bild B74 ersichtlich ist.

In den heute noch gültigen Normen wird die Verbundfestigkeit in Abhängigkeit der Mörtelgruppe angegeben. Da durch die unterschiedlichen feuchtetechnischen Eigenschaften der verwendeten Mauersteine die Mörteldruckfestigkeit im Mauerwerk stark beeinflusst wird, soll an dieser Stelle auch der Zusammenhang zwischen der Prismendruckfestigkeit und der Mörteldruckfestigkeit im Mauerwerk überprüft werden. In den Bildern B76 bis B78 ist dieser Zusammenhang, getrennt für die unterschiedlichen Bewehrungsführungen, dargestellt.

DIN 1053-1:1996-11 /X32/ verlangt für Mauermörtel die Prüfung der Fugendruckfestigkeit und verweist für die Anforderungswerte auf Werte, die nur rund 70 % der Prismendruckfestigkeit betragen müssen. In /14/ wird folgender Zusammenhang zwischen der Fugendruckfestigkeit nach dem ibac-Verfahren und der Prismendruckfestigkeit angegeben:

$$\beta_{D,F(ibac)} = 1,0 \cdot \beta_D \quad (27)$$

In den Bildern B76 und B77 ist die Fugendruckfestigkeit in Abhängigkeit der Mörteldruckfestigkeit sowohl für aus Lagerfugen als auch aus Formsteinen entnommenem Mörtel dargestellt. Alle ermittelten Fugendruckfestigkeiten, abgesehen von den Versuchsserien bei denen Zusatzmittel (VZ und LP) verwendet wurden, betragen im Mittel mehr als 70 % der Prismendruckfestigkeit und liegen damit über dem in /X32/ geforderten Wert. Bei einigen Mauerwerkprüfkörpern aus Kalksandsteinen und NM IIIa lag die Fugendruckfestigkeit nach dem ibac-Verfahren unter der Prismendruckfestigkeit. Die Verwendung von Hochlochziegeln führte zu mindestens 30 % höheren Druckfestigkeiten in der Lagerfuge als ohne Kontakt zum Steinmaterial.

Bild B78 zeigt den Zusammenhang zwischen der Prismendruckfestigkeit und der Mörteldruckfestigkeit von aus dem Verfüllkanal für vertikal angeordnete Bewehrung entnommenen Mörteln. Es fällt hier auch auf, dass die Mörteldruckfestigkeit im Verfüllkanal der Versuche mit NM IIIa kleiner ist als die Prismendruckfestigkeit. Im Gegensatz zu den Untersuchungen an Bewehrungsstäben in großen Aussparungen, spielte das umgebende Steinmaterial aufgrund der kleineren Mörteldeckung eine größere Rolle.

Aus den Bildern B76 bis B78 wird ersichtlich, dass die Mörteldruckfestigkeit im Mauerwerk, auf der sicheren Seite liegend, gleich der Prismendruckfestigkeit angesetzt werden darf. Je höher die Mörtelgruppe (NM IIIa), desto größer kann die Beeinflussung der Druckfestigkeit im Mauerwerk durch die unterschiedlichen feuchtetechnischen Eigenschaften der verwendeten Mauersteine sein. Eine Zuordnung der Verbundspannungen zu der Mörtelgruppe ist prinzipiell möglich. Für eine genauere Abschätzung der Verbundspannung sollte als Bezugsgröße die Druckfestigkeit im Mauerwerk gewählt werden.

## **6.3 Statistische Auswertung**

### **6.3.1 Grundlagen**

Nachfolgend werden die Grundlagen der statistischen Auswertung /24, 25/ dargelegt.

Zur Ermittlung von Nennwerten, die über Quantilwerte bestimmt werden, müssen einige statistische Merkmale, wie die Grundgesamtheit, das p-Quantil (z. B. 5 %), das Konfidenzniveau  $P=1-\alpha$  mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha$  (z. B.  $P=0,90$ ), der Anteilsbereich (z. B. einseitig nach oben begrenzter Quantilbereich), der Verteilungstyp (z. B. Normalverteilung oder logarithmische Normalverteilung) sowie die Standardabweichung (z. B. unbekannt, aus den Messwerten zu berechnen oder bekannt) definiert werden.

Bei der Bauteilprüfung kann die zu definierende Grundgesamtheit im Allgemeinen nicht als bekannt vorausgesetzt werden. Daher muss von der Stichprobe auf die Grundgesamtheit geschlossen werden. Der Mittelwert  $\mu_x$  und die Standardabweichung  $\sigma_x$  müssen also geschätzt werden. Für die Güte der Schätzung spielt der Stichprobenumfang  $n$  eine große Rolle.

Gesucht wird das p-Quantil der Grundgesamtheit. Zur Verfügung steht aber nur die Stichprobe, so dass das p-Quantil keine feste Größe ist, sondern auch eine Zufallsvariable, die mit der Wahrscheinlichkeit  $P=1-\alpha$  nicht unterschritten wird. Je größer das Konfidenzniveau  $P=1-\alpha$  gewählt wird, desto größer ist das Intervall, in dem die Schätzwerte liegen können und desto weiter verschiebt sich die untere Grenze (5%-Quantil) hin zu kleineren Werten.

Aus den vorliegenden Messergebnissen ist auch der Verteilungstyp geeignet zu wählen. Bei der Beschreibung von Materialeigenschaften werden vor allem die Normalverteilung und die logarithmische Normalverteilung angesetzt. Sofern der Ansatz der Normalverteilung zu negativen Werten für eine Materialeigenschaft führt, wird die logarithmische Normalverteilung angewandt. Die logarithmische Normalverteilung ist auch bei großen Variationskoeffizienten einsetzbar. Für die Bestimmung eines Quantilwertes muss zunächst eine geeignete Verteilungsfunktion gefunden werden, die die Messergebnisse wiedergibt. Je nach Verteilungsfunktion ergeben sich unterschiedliche charakteristische Werte.

Bei Normalverteilung lässt sich das p-Quantil nach /24/ wie folgt berechnen:

$$x_p \leq \bar{x} - k \cdot s_x \quad (28)$$

mit:

- $x_p$  Schätzwert für das p-Quantil
- $\bar{x}$  geschätzter Erwartungswert (Mittelwert)
- $s_x$  geschätzte Standardabweichung
- $k$  Faktor, der von dem p-Quantil, dem Konfidenzniveau  $P$ , dem Anteilsbereich, dem Verteilungstyp, der Standardabweichung und der Anzahl der Messergebnisse abhängt. Dieser Faktor kann aus Zahlentafeln in /X31/ abgelesen werden.

Die Anwendung der logarithmischen Normalverteilung ist sinnvoll bei niedrigen Werten und bei großer Standardabweichung, wie z. B. bei niedrigen, stark streuenden Festigkeiten.

Bei bekannten  $\sigma_x$  und  $\mu_x$  gilt nach /25/:

$$\mu_y = \ln\left(\frac{\mu_{0x}}{\sqrt{1+v_x^2}}\right) \quad (29)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\ln(1+v_x^2)} \quad (30)$$

mit:

$$v_x = \frac{\sigma}{\mu_{0x}} \quad (31)$$

$$\mu_{0x} = \bar{x} - k_1 \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (32)$$

Bei gegebenen  $\bar{x}$  und  $s_x$  der Stichprobe lassen sich  $\mu_y$  und  $\sigma_y$  schätzen.

Das p-Quantil ergibt sich nach /25/ zu:

$$x_p \leq e^{\mu_y - k_1 \cdot \sigma_y} \quad (33)$$

Für den praktischen Gebrauch wird in /24/ die Wahl der Verteilungsfunktion in Abhängigkeit vom Variationskoeffizienten  $v_x$  in folgender Weise empfohlen:

$$v_x = \frac{s_x}{\bar{x}} \leq 0,20 \quad \text{Normalverteilung} \quad (34)$$

$$v_x = \frac{s_x}{\bar{x}} > 0,20 \quad \text{logarithmische Normalverteilung} \quad (35)$$

### 6.3.2 Bestimmung des 5%-Quantilwertes

Das besondere Problem der statistischen Auswertung der Versuchsdaten besteht darin, dass die Verbundfestigkeit von bewehrtem Mauerwerk von mehreren Parametern abhängt.



In der Regel wurden 5 Versuche mit gleichen Ausgangsstoffen geprüft. Diese Zahl ist zu gering, als dass eine statistische Auswertung der einzelnen Versuchsserien sinnvoll wäre. In der Auswertung wurden deshalb mehrere Versuchsserien mit der gleichen Steinart und Mörtelgruppe zusammengefasst. Es erfolgte zusätzlich eine Differenzierung nach Zusatzmitteln, da diese die Ergebnisse maßgeblich beeinflussen können.

Da in DIN 1053-3 /X1/ keine zulässigen Grundwerte für Normalmörtel NM IIa angegeben sind, wurden die meisten Versuchsserien an Lagerfugenbewehrung mit dieser Mörtelgruppe durchgeführt, mit dem Hintergrund eine Zulassung zu erlangen. Aus diesem Grund lagen die meisten Werte für die Kombination KS/NM IIa ohne Zusatzmittel vor. Für diese Kombination kann nach Tabelle F.1 in /X31/ von einer Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha = 5\%$  (Konfidenzniveau  $P = 0,95$ ) ausgegangen werden. Für alle anderen Kombinationen mit jeweils einem Stichprobenumfang kleiner als 14 können für die 5%-Quantilwerte keine Konfidenzniveaus höher als 0,50 angegeben werden. Zur Gewährleistung einer Vergleichbarkeit wurde jedoch unabhängig vom Stichprobenumfang für die Bestimmung des 5%-Quantilwertes der jeweiligen Stein-Mörtel Kombinationen das Konfidenzniveau einheitlich zu 0,90 bzw. 0,95 gewählt. Aus dem 5%-Quantil, dem gewählten Konfidenzniveau, der Anzahl der Versuchsergebnisse und dem Anteilsbereich (einseitig nach unten begrenzter Quantilbereich) wurden anschließend die k-Faktoren aus Tabelle D.3 bzw. D.4 in /X31/ abgelesen. Für das Konfidenzintervall 0,95 lagen die Quantilwerte stets unter denen für 0,90, d. h., dass die untere Grenze (5%-Quantil) sich zu kleineren Werten hin verschob.

Als Verteilungsfunktion wurden einerseits die Normalverteilung und andererseits die logarithmische Normalverteilung zugrunde gelegt und die Übereinstimmung mit den Versuchsdaten überprüft. Außerdem wurde das Kriterium nach Gl. (34) bzw. Gl. (35) überprüft. In den meisten Fällen lagen die Variationskoeffizienten unter 0,20, so dass eine Normalverteilung als Verteilungsfunktion maßgebend wurde. In den Tabellen A33 bis A36 sind die 5%-Quantilwerte der Verbundspannungen dargestellt. Die Werte in Klammern sind lediglich zum Vergleich angegeben, da für die zugrunde liegende Serie von Versuchswerten das Kriterium Gleichung (34) bzw. Gleichung (35) für die betreffende Verteilung nicht erfüllt ist.

Tabelle A33 enthält die aus der statistischen Auswertung resultierenden 5%-Quantilwerte für horizontal angeordnete Bewehrung in Lagerfugen. In Tabelle A34 sind 5%-Quantilwerte für eine horizontal angeordnete Bewehrung in Formsteinen angegeben.

In den Tabellen A35 und A36 sind die 5%-Quantilwerte der Versuchsserien mit vertikaler Bewehrungsführung in kleinen bzw. in großen Aussparungen, verfüllt mit Mörteln, zusammengestellt. Für die Versuchsserien mit vertikaler Bewehrungsführung in kleinen Aussparungen waren die Mittelwerte klein und die Einzelwerte streuten stark, so dass die Anwendung der logarithmischen Normalverteilung sinnvoll wurde.

## 6.4 Ableitung von charakteristischen Verbundfestigkeiten

Die Auswertung vorhandener Daten erfolgte im ersten Schritt über die Berechnung der Mittelwerte der Versuchsserien, getrennt nach Bewehrungsanordnung, Steinart, Mörtelgruppe und Zusatzmittel. Die 5-%-Quantilwerte wurden anschließend analog einer üblichen Methode im Mauerwerk durch Multiplikation der Mittelwerte mit einem konstanten Faktor 0,70 ermittelt. Tabelle A37 enthält die Ergebnisse für horizontal in Lagerfugen und in Formsteinen angeordnete Bewehrung. In Tabelle A38 sind die Werte für vertikal in Aussparungen angeordnete Bewehrung aufgeführt. Es ergaben sich meist höhere Werte als aus der statistischen Auswertung.

Da aber ein direkter Zusammenhang zwischen der Verbundfestigkeit und der Mörteldruckfestigkeit im Mauerwerk existiert, wie in Kapitel 6.1 gezeigt, liegt es nahe, die Verbundfestigkeit über die Mörteldruckfestigkeit im Mauerwerk zu beschreiben.

Meyer hat in /6/ folgenden Zusammenhang zwischen der Verbundfestigkeit und der Fugendruckfestigkeit festgestellt:

$$\tau_M = a \cdot \beta_{D,F(ibac)}^b \quad (36)$$

Analog zu /6/ wurde der Koeffizient b entsprechend dem bekannten Zusammenhang aus dem Stahlbeton (s. Gleichung (9), Kapitel 3.5.2) zu 0,66 festgelegt:

$$\tau_M = a \cdot \beta_{D,F(ibac)}^{0,66} \quad (37)$$

Unter Bezug auf die Versuchswerte wurden Regressionsrechnungen für die Beschreibung des Zusammenhangs zwischen der Verbundfestigkeit und der Fugendruckfestigkeit durchgeführt, um den Koeffizienten a des verwendeten nichtlinearen Ansatzes durch Minimierung der Fehlerquadratsumme zu bestimmen.

Für die Regressionsrechnung der Versuchsdaten an in Lagerfugen eingebetteter Bewehrung ergibt sich unter Berücksichtigung aller Versuchsdaten (eigene Untersuchungen und aus Literatur entnommene Versuchswerte) folgender funktionaler Zusammenhang zwischen der Verbundfestigkeit und der Fugendruckfestigkeit (s. Bild B70):

$$\tau_{M,Lagerfuge} = 0,35 \cdot \beta_{D,F(ibac)}^{0,66} \quad (38)$$

Um zur entsprechenden Funktion für die 5%-Quantilwerte zu gelangen, wurde der konstante Faktor in Gleichung (38) solange variiert, bis nur 5 % der Einzelwerte unterhalb der Kurve lagen (vgl. Bild B70). Unter Berücksichtigung aller Versuchsdaten ergibt sich für Lagerfugenbewehrung die folgende 5%-Quantilgleichung:

$$f_{\text{bk,Lagerfuge}} = 0,17 \cdot \beta_{D,F(\text{ibac})}^{0,66} \quad (39)$$

Für die Versuchsergebnisse mit Hochlochziegeln erhält man für Lagerfugenbewehrung folgende Bewertungsgleichung (s. Bild B72):

$$f_{\text{bk,Lagerfuge}} = 0,22 \cdot \beta_{D,F(\text{ibac})}^{0,66} \quad (40)$$

Analog dazu wurde die 5%-Quantilgleichung an horizontal angeordneter Bewehrung in Formsteinen ermittelt. Es ergab sich für die ungünstigste Steinkombination (KS) folgender Zusammenhang (vgl. Bild B73):

$$f_{\text{bk,Formsteine}} = 0,11 \cdot \beta_{D,F(\text{ibac})}^{0,66} \quad (41)$$

Für die Bestimmung der charakteristischen Verbundfestigkeiten nach den Gleichungen (39) bzw. (41) wurden für die Fugendruckfestigkeiten die Mindestdruckfestigkeiten der zugehörigen Mörtelgruppen nach /X9/ eingesetzt. Tabelle A39 enthält die charakteristischen Verbundfestigkeiten für horizontal angeordnete Bewehrung in Lagerfugen und in Formsteinen.

Für die ungünstigste Steinkombination (KS) ergibt sich für eine vertikale Bewehrungsführung folgende 5%-Quantilgleichung (s. Bild B75):

$$f_{\text{bk,vertikaleBew.}} = 0,13 \cdot \beta_{D,K}^{0,66} \quad (42)$$

Die Auswertung der Versuchsdaten von vertikal angeordneter Bewehrung in kleinen Aussparungen (s. Bild B74) führt ebenfalls zu Gleichung (41).

In Tabelle A40 sind die für die vertikale Bewehrungsführung resultierenden charakteristischen Verbundfestigkeiten in Abhängigkeit der Mörtelgruppe angegeben.

## 7 VORSCHLAG FÜR CHARAKTERISTISCHE VERBUNDFESTIGKEITEN

### 7.1 Eigener Vorschlag

Die DIN 1053-3 /X1/ beruhte auf dem globalen Sicherheitskonzept (Verfahren mit zulässigen Spannungen). Das im Eurocode 6 verankerte Sicherheitskonzept beruht – im Gegensatz zum deterministischen Sicherheitskonzept mit einem globalen Sicherheitsbeiwert – auf der Nachweisführung mit so genannten Teilsicherheitsbeiwerten. Diese Sicherheitsfaktoren werden verwendet, um das Versagensrisiko einer Tragstruktur, mit den für die Berechnung verbundenen Modellannahmen, so niedrig wie möglich zu halten.

Im Rahmen der Überarbeitung der DIN 1053-3 /X1/ und vor dem Hintergrund der zukünftigen Einführung des Eurocodes 6 /X3/ werden auf Basis von aus der Literatur entnommenen sowie aus eigenen experimentellen Untersuchungen gewonnenen Versuchsdaten nachfolgend charakteristische Verbundfestigkeiten in bewehrtem Mauerwerk vorgeschlagen.

Es lagen nicht genügend Versuchsdaten pro Bewehrungsanordnung/Mörtel-Kombination vor, um anhand einer statistischen Auswertung charakteristische Verbundspannungen (5-%-Quantilwerte) mit einem hohen Konfidenzniveau ( $P = 1 - \alpha > 0,50$ ) zu ermitteln.

Da, analog zum Stahlbeton, ein direkter Zusammenhang zwischen der Verbundfestigkeit von Bewehrungsstahl in bewehrtem Mauerwerk und der Mörteldruckfestigkeit im Mauerwerk ( $\beta_{D,F(ibac)}$  bzw.  $\beta_{D,K}$ ) existiert, konnten, unter Bezug auf die Versuchswerte, Regressionsrechnungen für die Beschreibung dieses Zusammenhangs, getrennt nach der Bewehrungsanordnung, durchgeführt werden. Aus den resultierenden 5-%-Quantilgleichungen (vgl. Kapitel 6.4) wurden charakteristische Verbundfestigkeiten getrennt nach Mörtelgruppen durch Einsetzen der Mindestdruckfestigkeiten (5 N/mm<sup>2</sup> für NM IIa, 10 N/mm<sup>2</sup> für NM III und 20 N/mm<sup>2</sup> für NM IIIa), analog der bis heute noch gültigen Normen /X1/ und /X3/, abgeleitet. Diese Zuordnung nach Mörtelgruppen setzt voraus, dass die Mörteldruckfestigkeit im Mauerwerk mindestens so groß ist wie die Mindestdruckfestigkeit nach DIN V 18580 Vornorm 2007-03 /X9/.

Die abgeleiteten charakteristischen Verbundfestigkeitswerte sind in Tabelle 11 zusammengefasst. Sie entsprechen den nachfolgend definierten Randbedingungen und gelten für die ungünstigste Stein-Mörtel Kombination: Die Werte werden nach Bewehrungsanordnung und Verbundqualität unterteilt, da die Versuchsergebnisse bestätigt haben, dass die Verbundspannung von der Querschnittsgeometrie des Verfüllkanals, der Verfüllungsart und der damit erzielten Verbundqualität abhängt. In den Formsteinen bzw. Aussparungen wird der

Mörtel schlechter verdichtet als bei der Lagerfugenbewehrung, da dort durch das Anklopfen und Drücken der Steine eine gewisse Verdichtung erreicht wird. So ist der Verbund in den Formsteinen mit dem Verbundbereich II (mäßiger Verbund) in DIN 1045-1 /X6/ zu vergleichen. Bedingt durch die Querschnittsgeometrie der Aussparungen können negative Einflussfaktoren, wie das Wasserabsaugen vom Mauerstein, verstärkt sowie die erreichbare Qualität der Verdichtung beeinflusst werden.

**Tabelle 11:** Vorschlag für die charakteristischen Verbundfestigkeiten

Bewehrungsanordnung	Mörtel		
	NM IIa	NM III	NM IIIa
-	N/mm <sup>2</sup>		
1	2	3	4
in der Lagerfuge und in Formsteinen	bei mäßigen Verbundbedingungen		
	0,30	0,50	0,80
	bei guten Verbundbedingungen		
	0,50 <sup>1)</sup>	0,75 <sup>1)</sup>	1,20 <sup>1)</sup>
stehend in Formsteinen und Aussparungen	bei mäßigen Verbundbedingungen		
	0,30	0,50	0,80
	bei guten Verbundbedingungen		
	0,35	0,60	0,90

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

Anhand der Versuchsdaten wird allgemein deutlich, dass die Werte von Hochlochziegeln deutlich über denen von Kalksandsteinen liegen. Es wird daher angeregt, weitere Untersuchungen durchzuführen, um die Bemessungswerte der Verbundfestigkeiten noch nach der Steinart zu differenzieren.

Außerdem sollten weitere Untersuchungen über die Wirkung des Einsatzes von Zusatzmitteln in Mörteln erfolgen, da die Untersuchungen aus der Literatur belegt haben, dass durch Zusatzmittel (VZ und LP) kleinere Mörteldruckfestigkeiten im Mauerwerk erreicht werden als die Normdruckfestigkeiten, und die Verbundeigenschaften damit negativ beeinflusst werden können.

Für eine genauere Bestimmung der ansetzbaren Verbundspannungen wird empfohlen die Mörteldruckfestigkeit in der Lagerfuge bzw. im Verfüllkanal zu bestimmen und diese als Bezugsgröße in den Gleichungen (39), (41) bzw. (42) einzusetzen.

Für bewehrtes Mauerwerk mit Verfüllbeton konnten aufgrund nicht ausreichender Versuchsdaten keine eigenen, charakteristischen Verbundfestigkeitswerte vorgeschlagen werden. Der nahe liegende Ansatz bei einem Verfüllbeton die gleiche Verbundfestigkeit anzusetzen wie bei einem Mörtel der gleichen Druckfestigkeit widerspricht den Vorgaben in /X3/ (vgl. Tabelle 3.6). Eine adäquate Festlegung der Verbundfestigkeiten erfordert die systematische Untersuchung des Einflusses der Mauersteine auf die Betondruckfestigkeitsentwicklung und den Zusammenhang zwischen der Betondruckfestigkeit und der aufnehmbaren Verbundspannung.

## **7.2 Vergleich mit den heute noch gültigen zulässigen Verbundspannungen**

In den Bildern B79 bis B84 sind die Versuchswerte, getrennt nach der Art der Bewehrungsführung, zusammen mit den charakteristischen Verbundfestigkeiten nach DIN 1053-3 /X1/, der Entwurfsfassung von DIN 1053-3 /X2/ und Eurocode 6 /X3/ dargestellt. Ferner sind die in Tabelle 11, Kapitel 7.1 vorgeschlagenen charakteristischen Verbundfestigkeiten aufgetragen.

Für den Vergleich der Versuchsdaten mit den zulässigen Grundwerten der Verbundspannung aus DIN 1053-3 /X1/ bzw. den Bemessungswerten der Verbundspannung aus der Entwurfsfassung der DIN 1053-3 /X2/ und den vorgeschlagenen Verbundfestigkeiten wurden die zulässigen Verbundspannungswerte auch in charakteristische Verbundfestigkeiten  $f_{bk}$  umgerechnet (s. Tabelle 1, Kapitel 2.1).

Eurocode 6 /X3/ gibt charakteristische Verbundfestigkeiten für Füllbeton, unterteilt nach der Größe der Aussparung, und für Mörtel an, die mit zunehmender Beton- bzw. Mörtel-druckfestigkeit größere Werte annehmen. Die für einen Mörtel einer bestimmten Festigkeitsklasse angegebene charakteristische Verbundfestigkeit entspricht dabei aber, anders als in der Entwurfsfassung der DIN 1053-3, nicht derjenigen eines Betons mit gleicher Druckfestigkeit (vgl. dazu Tabelle 5 mit Tabelle 2, Kapitel 2). Beispielsweise wird für den Normalmörtel NM IIIa (M20) und den Beton C25/30 die gleiche Verbundfestigkeit angegeben, obwohl die Druckfestigkeit des NM IIIa der eines Betons C16/20 entspricht. Die eigenen Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass bei Verwendung eines C25/30 als Verfüllbeton ( $\tau \geq 4,5 \text{ N/mm}^2$ ) deutliche höhere Verbundspannungen erreicht werden können, als bei einem Mörtel NM IIIa ( $\tau < 2,0 \text{ N/mm}^2$ ). Generell liegen die im Eurocode 6 enthaltenen Werte für Normalmörtel im Vergleich mit den Versuchsdaten weit auf der

unsicheren Seite. Es besteht daher dringlicher Bedarf die in den Tabellen 3.5 und 3.6 in /X3/ angegebenen charakteristischen Verbundfestigkeiten zu überprüfen.

Wie aus den Bildern B79 und B80 ersichtlich, liegen nach den eigenen Untersuchungen bei in Lagerfugen eingebetteter Bewehrung die charakteristischen Verbundfestigkeiten für Normalmörtel NM IIa nach /X2/ und /X3/ auf der unsicheren Seite, wenn nicht nach Steinart unterschieden wird. Für die jeweils ungünstigste Stein/Mörtel-Kombination wurde der charakteristische Wert für NM III nach /X2/ und /X3/ unterschritten. Die Ergebnisse für NM IIIa liegen deutlich unter den Werten in /X1/ und /X3/. Dies bestätigt die Ergebnisse in /6/ und /7/, wo ebenfalls eine deutlich geringere Zunahme der aufnehmbaren Verbundspannungen bei höheren Mörteldruckfestigkeiten festgestellt als ursprünglich bei den Festlegungen der zulässigen Grundwerte der Verbundspannungen in /X1/ angenommen wurde.

Wie bereits in Kapitel 2.2 erläutert, hat sich gegenüber der DIN 1053-3 /X1/ die Einteilung der Bewehrung in der Entwurfsfassung von DIN 1053-3 /X2/ geändert. Es wird nicht mehr rein nach Lagerfugenbewehrung und Bewehrung in Formsteinen unterschieden, sondern, nach der Anordnung der Bewehrung, in horizontal (in Lagerfugen und in Formsteinen) und vertikal (in Formsteinen und Aussparungen) differenziert. Diese Einteilung wird im Eurocode 6 ähnlich durchgeführt, nur anders bezeichnet. Die Bemessungswerte für die Lagerfugenbewehrung waren schon in DIN 1053-3 geringer als die für Bewehrung in Formsteinen. Versuche haben allerdings gezeigt, dass die horizontale Bewehrung in Formsteinen nicht die in DIN 1053-3 enthaltenen Werte für Bewehrung in Formsteinen erreichen kann, sondern maximal die für die Lagerfugenbewehrung. So wurden die zulässigen Grundwerte der Verbundspannung für eine horizontale Bewehrung in Formsteinen indirekt gesenkt, indem sie in eine andere Kategorie in /X2/ eingeordnet wurden.

Die Versuchsergebnisse der Verbundkennwerte für eine Bewehrung in Formsteinen in den Bildern B81 und B82 belegen, dass die Verbundspannungen geringer sind als für Bewehrung in Lagerfugen. Dies ist auf den Einfluss des Steinmaterials, eine erhöhte Wasserzugabe für bessere Fließeigenschaften sowie schlechtere Verdichtungsmöglichkeiten zurückzuführen. Die charakteristischen Werte nach /X1/ liegen weitestgehend auf der unsicheren Seite, die nach /X3/ werden dagegen nur geringfügig unterschritten. Die Werte nach /X2/, abgesehen von den Versuchswerten für NM III, werden auch unterschritten.

Bei der vertikalen Bewehrungsführung liegen die Versuchswerte aller Normalmörtel deutlich unter den Anforderungen der DIN 1053-3 und des Eurocodes 6, vgl. Bilder B83 und B84.

## 8 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Rahmen der Überarbeitung der DIN 1053-3 /X1/ und vor dem Hintergrund der zukünftigen Einführung des Eurocodes 6 /X3/ waren die Verbundfestigkeiten, im Vergleich zu den Werten nach DIN 1045-1 /X6/, unter Berücksichtigung verschiedener Einflussfaktoren zu überprüfen. Es war davon auszugehen, dass die Werte der Verbundfestigkeit gemäß /X1/ und /X3/ zu hoch bzw. nicht für alle Mauersteinarten ansetzbar sind. 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 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 Mauermörtel 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 zum Steinmaterial nach RILEM /X12/ 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 Druckfestigkeit nach 28 Tagen gleich der Normdruckfestigkeit der jeweiligen Mörtelgruppe nach DIN V 18580 Vornorm 2007-03 /X9/ entsprach. Als Referenzbeton wurde ein C25/30 nach /X12/ 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 /X1/, zu untersuchen. Gemäß /X1/ sind kleine Aussparungen nach jeder Steinlage, große Aussparungen je Meter Wandhöhe zu verfüllen und zu verdichten. Sonderregelungen gelten für Mauertafeln nach DIN 1053-4 /X11/, bei denen eine geschosshohe Verfüllung auch für kleine Aussparungen zugelassen wird. Aus diesem Grund wurde zusätzlich eine geschosshohe Verfüllung ( $h = 2,50$  m) untersucht. Damit sollte überprüft wer-



den, 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  $\tau_M$  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 /X1/, in der Entwurfsfassung der DIN 1053-3 /X2/ und im Eurocode /X3/ 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 /X9/. Bei Verwendung von Zusatzmitteln (vor allem Verzögerer und Luftporenbilder), die zur Verbesserung bestimmter Mörtel­eigenschaften eingesetzt werden, wurden geringere Fugendruck- und Verbundfestigkeiten erreicht. Ferner wurde mit steigender Mörteldruckfestigkeit eine deutlich geringere Zunahme der aufnehmbaren Verbundspannungen festgestellt als dies bei der Festlegung der zulässigen Grundwerte der Verbundspannungen in /X1/ 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 ( $d_s = 6 \text{ mm}$ ) im Vergleich zu größeren ( $d_s = 14 \text{ mm}$ ) rd. 20 % größer ist. 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, führt ein größerer Bewehrungsdurchmesser und eine daraus resultierende größere bezogene Rippenfläche in Untersuchungen ohne Kontakt zum Steinmaterial zu größeren Verbundspannungen.

Die Verfüllung und Verdichtung des Mörtels nach jeder Steinlage, gemäß den Ausführungsregeln nach /X1/, 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 betrugen 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 Stab 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 /X11/ 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 im Eurocode 6 konnte nicht bestätigt werden. Die Versuchsergebnisse mit Verfüllbeton C25/30 belegen vielmehr die nach der Entwurfsfassung der DIN 1053-3 /X2/ 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 und Querschnittsgeometrien auf die Verbundeigenschaften untersucht werden.

Für zukünftige Verbunduntersuchungen bei vertikaler Bewehrungsführung wäre es sinnvoll, einen Prüfkörper zu verwenden, der, analog dem Prüfkörper für Untersuchungen zwischen Bewehrung und Lagerfugenmörtel, wesentliche Erkenntnisse von Verbunduntersuchungen aus dem Stahlbetonbau berücksichtigt und auf Empfehlungen von RILEM /X12/ basiert. Die Prüfkörperhöhe sollte jedoch kleiner gewählt werden. Die Begründung hierfür liegt darin, dass für die Ermittlung der Verbundkräfte zwischen Bewehrung und Mörtel bzw. Beton die Verbundlänge begrenzt werden muss, so dass die rechnerische Streckgrenze des Stahls nicht erreicht wird, und ein Verbundversagen vorliegt. Anstatt 1 m hohe Prüfkörper sollten einzelne Formsteine mit vertikalen Verfüllkanälen verwendet werden. Dies hätte den Vorteil, dass der Versuchsaufwand minimiert würde und ein direkter Vergleich zwischen den Versuchsergebnissen von horizontaler und vertikaler Bewehrungsführung möglich wäre. Die Verbundlänge der Bewehrung im Mörtel bzw. Beton würde, analog zu den bisherigen Ausziehversuchen mit Lagerfugenbewehrung, zu  $10 \cdot d_s$  gewählt.

Die zusammengestellten Versuchsdaten wurden einerseits statistisch ausgewertet, andererseits wurden Regressionsrechnungen für den Zusammenhang zwischen der Verbundspannung und der Fugendruckfestigkeit  $\beta_{D,F(ibac)}$  bzw. der Mörteldruckfestigkeit im Verfüllkanal  $\beta_{D,K}$  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 /X9/ anstelle der Fugendruckfestigkeit  $\beta_{D,F(ibac)}$  bzw. der Mörteldruckfestigkeit im Verfüllkanal  $\beta_{D,K}$  angesetzt.

In Tabelle 11, Kapitel 7.1 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. Für einen guten Verbund einer horizontal angeordneten Bewehrung in Lagerfugen werden die charakteristischen Werte für alle Mörtelgruppen rd. 35 % höher festgelegt. Für eine vertikale Bewehrungsführung in großen Aussparungen werden im Falle eines guten Verbundes die Werte für alle Mörtelgruppen rd. 15 % höher angesetzt.

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 Mörteldruckfestigkeit im Mauerwerk die Mindestdruckfestigkeit nach /X9/ 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 /X9/. Es wäre daher sinnvoll, anstelle der Normdruckfestigkeit die Mörteldruckfestigkeit im Mauerwerk ( $\beta_{D,F(ibac)}$  bzw.  $\beta_{D,K}$ ) 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 Steine.

## 9 LITERATUR

- /1/ Rehm, G.: Über die Grundlagen des Verbundes zwischen Stahl und Beton. Berlin : Ernst & Sohn. - In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (1961), Nr. 138
- /2/ Martin, H. ; Noakowski, P.: Verbundverhalten von Betonstählen Untersuchung auf der Grundlage von Ausziehversuchen. Berlin : Ernst & Sohn. - In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (1980), Nr. 319
- /3/ Martin, H.: Zusammenhang zwischen Oberflächenbeschaffenheit, Verbund und Sprengwirkung von Bewehrungsstählen unter Kurzzeitbelastung. Berlin : Ernst & Sohn. - In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (1973), Nr. 228
- /4/ Barlet, U.: Verbund zwischen Stahl und Mörtel im bewehrten Mauerwerk. München, Technische Universität, Diss., 1989
- /5/ Zelger, C. ; Barlet, U.: Bestimmung zulässiger Rechenwerte der Verbundspannung in bewehrtem Mauerwerk. Teile I und II. München : Materialprüfungsamt für das Bauwesen, 1984
- /6/ Meyer, U.: Zur Rißbreitenbeschränkung durch Lagerfugenbewehrung in Mauerwerkbauteilen. In: Schriftenreihe Aachener Beiträge zur Bauforschung, Institut für Bauforschung der RWTH Aachen (1996), Nr. 6, Diss.
- /7/ Meyer, U. ; Schießl, P. ; Schubert, P.: Bewehrtes Mauerwerk - Verbund zwischen Bewehrung und Mörtel, zulässige Grundwerte der Verbundspannung, Beschränkung der Rissbreiten. Berlin : Ernst & Sohn. - In: Mauerwerk-Kalender 19 (1994), S. 685-714
- /8/ Meyer, U. ; Schießl, P. ; Schubert, P.: Eurocode 6 – Mauerwerksbau - Bewehrtes Mauerwerk, Untersuchungen zu Materialeigenschaften, Tragfähigkeit und Bemessung. Aachen : Institut für Bauforschung, 1992. - Forschungsbericht Nr. F 325 = In: Kurzberichte aus der Bauforschung 34 (1993), Nr. 6, S. 351-359
- /9/ Schießl, P. ; Schwarzkopf, U.: Verbundverhalten von feuerverzinkten Betonrippenstählen in Mauerwerk. In: Betonwerk und Fertigteil-Technik 51 (1985), Nr. 11, S. 735-740
- /10/ Schießl, P. ; Schmidt, St.: Versuche zur Zulassung von beschichteter Bewehrung (Bewehrungselemente) für bewehrtes Mauerwerk. Aachen: Institut für Bauforschung, 1990. - Prüfbericht Nr. A 1806 Teil 1 und Teil 3
- /11/ Mayrhofer, C.: Dynamisches Verhalten von Sonderkonstruktionen zur nachträglichen Ertüchtigung vorhandener Bausubstanz "Bewehrte Mauerwerkswände". Freiburg i.Br. : Fraunhofer Institut für Kurzezeitdynamik, Ernst-Mach-Institut 1989. – Forschungsbericht Nr. E 13/90; B17 -810 705, EDV Nr. 226 122 (556 092)
- /12/ Janovic, K.: Verbundverhalten von Bewehrungsstählen unter Dauerbelastung in Normal- und Leichtbeton. Berlin : Ernst & Sohn. - In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (1986), Nr. 367, S. 6-43
- /13/ Ernst, M.: Untersuchungen zum Tragverhalten von bewehrtem Mauerwerk aus Hochlochziegeln. Düsseldorf : VDI-Verlag, 1997. - In: Fortschritt-Berichte VDI: Reihe 4, Bauingenieurwesen (1997), Nr.137, zugl. Darmstadt, Techn. Hochsch., Diss.

- /14/ Riechers, H.-J.: Ein neues Modell zur Beschreibung der Festigkeitsentwicklung von Mauermörtel in der Fuge. In: Schriftenreihe Aachener Beiträge zur Bauforschung, Institut für Bauforschung der RWTH Aachen (2000), Nr. 10, Diss.
- /15/ Schubert, P. ; Schmidt, St.: Bestimmung der Druckfestigkeit des Mörtels im Mauerwerk. Aachen : Institut für Bauforschung, 1990. - Forschungsbericht Nr. F 304
- /16/ Jung, E. ; Junge, K.: Auswirkung von Formsteinen in bewehrtem Mauerwerk. Essen : Institut für Ziegelforschung Essen e.V., 1986. - Forschungsbericht
- /17/ Klump, J.: Verbundspannungen für bewehrtes Mauerwerk. Aachen, Technische Hochschule, Fachbereich 3, Institut für Bauforschung, Studienarbeit, 2001. – (unveröffentlicht)
- /18/ Remmen, C: Bewehrtes Mauerwerk - Zusammenstellung des gegenwärtigen nationalen und internationalen Kenntnisstandes bzgl. zulässiger Verbundspannungen, deren Grundlagen und Prüfverfahren. RWTH Aachen University, Fachbereich 3, Institut für Bauforschung, Übungsarbeit, 2010. – (unveröffentlicht)
- /19/ Otte, F.: Zusammenstellung und Auswertung der vorliegenden Untersuchungsergebnisse von Ausziehversuchen zum Verbundverhalten von Bewehrungsstäben im Mauerwerk. RWTH Aachen University, Fachbereich 3, Institut für Bauforschung, Übungsarbeit, 2010. – (unveröffentlicht)
- /20/ Jedig, W.: Überprüfung der ansetzbaren Verbundspannungen für die Verankerung der Bewehrungsstäbe in Mauerwerk nach DIN 1053-3 und DIN EN 1996-1-1. RWTH Aachen University, Fachbereich 3, Institut für Bauforschung, Diplomarbeit, 2010. – (unveröffentlicht)
- /21/ Brauer, N.: Verbund zwischen Mauermörtel und Bewehrung im bewehrtem Mauerwerk. Aachen, Technische Hochschule, Fachbereich 3, Institut für Bauforschung, Diplomarbeit, 1991. – (unveröffentlicht)
- /22/ Lindorf, A.: Woher kommen die Bemessungswerte der Verbundspannung? In: Beton- und Stahlbetonbau 105 (2010), Nr. 1, S. 53-59
- /23/ European Committee for Concrete Fédération Internationale de la Précontrainte ; Cement and Concrete Association: Recommandations internationales pour le calcul et l'exécution des ouvrages en béton. 1. Principes et recommandations. Paris : Comité Européen du Béton. - In: Bulletin d'information Comité Européen du Béton Fédération Internationale de la Précontrainte (1970), Nr. 72
- /24/ Fischer, L.: Bestimmung des 5%-Quantils im Zuge der Bauwerksprüfung : Bezugnahme auf DIN-Normen und Eurocodes. In: Bautechnik 72 (1995), Nr. 11, S. 712-722
- /25/ Schäper, M.: Zur Anwendung der logarithmischen Normalverteilung in der Materialprüfung. Missverständliche Normaussagen ergeben fehlerhafte Nachweise. In: Bautechnik 87 (2010), Nr. 9, S. 541-549

## NORMEN

- /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 1996-1-1:2006-01 Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten; Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk
- /X4/ DIN EN 1996-1-1 Berichtigung 1 2009-11 Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten; Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk Berichtigung zu DIN EN 1996-1-1:2006-01
- /X5/ DIN 1045:1988-07 Beton und Stahlbeton: Bemessung und Ausführung
- /X6/ DIN 1045-1:2001-07 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton: Teil 1: Bemessung und Ausführung
- /X7/ DIN 18555-3:1982-09 Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln; Teil 3: Festmörtel, Bestimmung der Biegezugfestigkeit, Druckfestigkeit und Rohdichte
- /X8/ DIN 18555-9:1999-09 Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln; Teil 9: Festmörtel, Bestimmung der Fugendruckfestigkeit
- /X9/ DIN V 18580 Vornorm 2007-03 Mauermörtel mit besonderen Eigenschaften
- /X10/ DIN V 20000-412 Vornorm 2004-03 Anwendung von Bauprodukten in Bauwerken; Teil 412: Regeln für die Verwendung von Mauermörtel nach DIN EN 998-2:2003-09
- /X11/ DIN 1053-4:2009-12 Mauerwerk; Teil 4: Fertigbauteile
- /X12/ Comite Euro-International du Beton ; CEB ; RILEM ; FIP: RILEM/CEB/FIP Recommendations on Reinforcement Steel for Reinforced Concrete. Revides 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
- /X13/ DIN EN 206-1:2001-07 Beton; Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität
- /X14/ DIN EN 10080:2005-08 Stahl für die Bewehrung von Beton; Teil 1: Schweißgeeigneter Betonstahl - Allgemeines
- /X15/ DIN 488-1 Entwurf 2006-11 Betonstahl; Teil 1: Sorten, Eigenschaften, Kennzeichen
- /X16/ DIN 1015-3:2007-05 Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk; Teil 3: Bestimmung der Konsistenz von Frischmörtel (mit Ausbreittisch) (enthält Änderung A1:2004)

- /X17/ DIN 1015-6:2007-05 Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk; Teil 6: Bestimmung der Rohdichte von Frischmörtel
- /X18/ DIN 1015-7:1998-12 Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk; Teil 7: Bestimmung des Luftgehaltes von Frischmörtel
- /X19/ DIN 1015-11:2007-05 Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk; Teil 11: Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit von Festmörtel
- /X20/ DIN EN 772-1:2000-09 Prüfverfahren für Mauersteine: Teil 1: Bestimmung der Druckfestigkeit
- /X21/ DIN EN 772-11:2004-06 Prüfverfahren für Mauersteine: Teil 11: Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme von Mauersteinen aus Beton, Porenbetonsteinen, Betonwerksteinen und Natursteinen sowie der anfänglichen Wasseraufnahme von Mauerziegeln (enthält Änderung A1:2004)
- /X22/ DIN EN 772-13:2000-09 Prüfverfahren für Mauersteine: Teil 13: Bestimmung der Netto- und Brutto-Trockenrohichte von Mauersteinen (außer Natursteinen)
- /X23/ DIN EN 772-16:2005-05 Prüfverfahren für Mauersteine: Teil 16: Bestimmung der Maße
- /X24/ DIN EN 772-20:2005-05 Prüfverfahren für Mauersteine: Teil 20: Bestimmung der Ebenheit von Mauersteinen
- /X25/ DIN EN ISO 15148:2003-03 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen
- /X26/ DIN EN 12350-5:2009-08 Prüfung von Frischbeton; Teil 5: Ausbreitmaß
- /X27/ DIN EN 12350-6:2009-08 Prüfung von Frischbeton; Teil 5: Frischbetonrohichte
- /X28/ DIN EN 12350-7:2009-08 Prüfung von Frischbeton; Teil 5: Luftgehalt
- /X29/ DIN EN 12390-3:2009-07 Prüfung von Festbeton; Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern
- /X30/ Richtlinie für Prüfungen an Betonstählen mit Epoxidharz-Beschichtungen. Berlin : Institut für Bautechnik, Januar 1990
- /X31/ DIN ISO 16269-6:2009-10 Statistische Auswertung von Daten; Teil 6: Ermittlung von statistischen Anteilsbereichen (ISO 16269-6:2005)
- /X32/ DIN 1053-1: 1996-11 Mauerwerk; Teil 1: Berechnung und Ausführung
- /X33/ DIN 1053-1: 1974-11 Mauerwerk; Blatt 1: Berechnung und Ausführung



Tabelle A1: Ausgewertete Berichte

Lfd.-Nr.	Thema
1	2
1	Schießl, P. ; Schubert, P. ; Meyer, U. ; Eurocode Nr. 6: Eurocode 6 – Mauerwerksbau – Bewehrtes Mauerwerk, Untersuchungen zu Materialeigenschaften, Tragfähigkeit und Bemessung. Aachen : Institut für Bauforschung, 1992. – Forschungsbericht Nr. F 325
2	Schießl, P. ; Schubert, P. ; Meyer, U.: Rissesicherung und Rissbreitenbeschränkung durch konstruktive Lagerfugenbewehrung in Mauerwerkbauteilen. Aachen : Institut für Bauforschung, 1994. – Forschungsbericht Nr. F 418
3	Schubert, P. ; Meyer, U.: Biegezug- und Zugtragfähigkeit von unbewehrtem und bewehrtem Kalksandstein-Mauerwerk. Aachen : Institut für Bauforschung, 1995. – Forschungsbericht Nr. F 417
4	Schubert, P. ; Meyer, U.: Biegezug- und Zugtragfähigkeit von unbewehrtem und bewehrtem Leichtmauerwerk aus Naturbimsbetonsteinen. Aachen : Institut für Bauforschung, 1995. – Forschungsbericht Nr. F 421
5	Schubert, P. ; Meyer, U.: Verbund zwischen Lagerfugenbewehrung (horizontaler Transportbewehrung) und Leichtmörtel in Mauertafeln aus Hochlochziegeln. Aachen : Institut für Bauforschung, 1995. – Forschungsbericht Nr. F 493
6	Schubert, P. ; Meyer, U.: Rissbreitenbeschränkung in Porenbeton-Plansteinmauerwerk durch konstruktive Lagerfugenbewehrung mit Glasfasergittergewebe und Bewehrungsregeln für Murfor-Flachbewehrung. Aachen : Institut für Bauforschung, 1994. – Forschungsbericht Nr. F 448
7	Schubert, P. ; Meyer, U.: Biegezugtragfähigkeit von bewehrtem und unbewehrtem Mauerwerk aus Hochlochziegeln. Aachen : Institut für Bauforschung, 1996. – Forschungsbericht Nr. F 427
8	Schubert, P. ; Krechting, A.: Untersuchungen zur Anwendung von Mittelbettmörtel für Mauerwerk aus Leichtbetonsteinen mit Naturbims. Aachen : Institut für Bauforschung, 2000. – Forschungsbericht Nr. F 596
9	Schubert, P. ; Caballero Gonzalez, A.: Verbundversuche an Lagerfugenbewehrung in Leichtbetonmauerwerk. Aachen : Institut für Bauforschung, 2000. – Forschungsbericht Nr. F 666
10	Schubert, P. ; Schmidt, U.: Optimierter Einsatz von konstruktiver Bewehrung in Mauerwerk zur Vermeidung von Rissen. Aachen : Institut für Bauforschung, 2002. – Forschungsbericht Nr. F 683/2

Tabelle A1: Fortsetzung

Lfd.-Nr.	Thema
1	2
11	Schubert, P. ; Meyer, U.: Verbund zwischen Lagerfugenbewehrung und Leichtmörtel in HLz-Mauerwerk. Aachen : Institut für Bauforschung, 1993. – Prüfbericht Nr. A 2633
12	Schubert, P. ; Meyer, U.: Untersuchungen zur konstruktiven Rissicherheit in Mauerwerk aus Leichtbetonsteinen. Aachen : Institut für Bauforschung, 1994. – Prüfbericht Nr. A 2601
13	Schubert, P. ; Caballero Gonzalez, A. ; Meyer, U.: Zulassungsversuche für ELMCO-Ripp-Mauerwerk. Aachen : Institut für Bauforschung, 1996. – Prüfbericht Nr. A 2884
14	Schubert, P. ; Caballero Gonzalez, A.: Zulassungsversuche für Sturzbewehrung. Aachen : Institut für Bauforschung, 1996. – Prüfbericht Nr. A 3074
15	Schubert, P. ; Krechting, A.: Verbundversuche mit HLz und LM 21. Aachen : Institut für Bauforschung, 1996. – Prüfbericht Nr. A 3108
16	Schubert, P. ; Meyer, U.: Verbund zwischen Bewehrung und Leichtmörtel in vorgefertigten Mauertafeln. Aachen : Institut für Bauforschung, 1994. – Prüfbericht Nr. A 2815
17	Weber, W.J. ; Leißner, J.: Ausziehversuche an Betonstabstahl KR mit 6 parallelen Rippenreihen. Aachen : Institut für Bauforschung, 1995. – Prüfbericht Nr. A 2900
18	Weber, W.J. ; Leißner, J.: Ausziehversuche an Betonstabstahl BST 500 KR und BST 500 M mit Sonderrippung. Aachen : Institut für Bauforschung, 1995. – Prüfbericht Nr. A 2937
19	Weber, W.J. ; Leißner, J.: Ausziehversuche an Betonstabstahl BST 500 KR mit 4 Schrägrippenreihen. Aachen : Institut für Bauforschung, 1996. – Prüfbericht Nr. A 3040/2

Tabelle A2: Kurzzeichentabelle

Kurzzeichen	Einheit	Bedeutung
1	2	3
$\alpha$	-	Irrtumswahrscheinlichkeit
$\beta_D$ bzw. $\beta_{D,M\ddot{o}}$	N/mm <sup>2</sup>	Mörteldruckfestigkeit
$\beta_{D,F(ibac)}$		Fugendruckfestigkeit nach /15/
$\beta_{D,K}$		Mörteldruckfestigkeit im Verfüllkanal in Anlehnung an /15/
$\beta_{D,st}$		Steindruckfestigkeit
$\beta_{N,st}$		Steindruckfestigkeitsklasse
$\beta_w$ bzw. $\beta_{w,s}$		Würfeldruckfestigkeit (Beton)
$\beta_R$		Mauerwerkfestigkeit
$\varepsilon_m$		mm/m
$\varepsilon_s$	Stahldéhnung	
$\gamma$	-	Sicherheitsbeiwert
$\Delta$	mm	Verschiebung zwischen Stahl und Beton bzw. Mörtel (Schlupf)
$\Delta_a$		Schlupf am aktiven Ende
$\mu_x$	-	Mittelwert
$\rho_D$	kg/m <sup>3</sup>	Trockenrohddichte
$\rho_{fr}$		Frismörtelrohddichte
$\sigma_s$	N/mm <sup>2</sup>	Stahlspannung
$\sigma_{s,s}$		Stahlspannung im Gebrauchszustand
$\sigma_{s,u}$		Stahlspannung im Bruchzustand
$\sigma_N$		Normalspannung
$\sigma_x$	-	Standardabweichung
$\tau_M$	N/mm <sup>2</sup>	Maßgebende Verbundspannung
$\tau_{M,alt}$		Maßgebende Verbundspannung nach dem alten Berechnungsverfahren nach Gleichung (18)
$\tau_{M,5\%}$		5-% Quantilwert der Verbundspannung
$\tau_{m,s}$		Mittlere Verbundspannung im Gebrauchszustand
$\tau_{m,u}$		Mittlere Verbundspannung im Bruchzustand
$\tau_{V(\Delta)}$		durch Verschiebung aktivierte Verbundspannung
$\tau_{vx}$		Verbundspannung (über die Mantelfläche eingeleitete Spannung)
$\tau$		Bezogene Verbundspannung nach /X12/
$\tau_{max}$		Maximalwert der Verbundspannung
$\tau_0$		Grundwert der Verbundspannung
$\tau_{1R}$		Rechenwert der Verbundspannung mit einem Schlupf von 0,1 mm
$\tau_{0,001}$		Haftverbundspannung bei $\Delta = 0,001$ mm

Tabelle A2: Fortsetzung (1)

Kurzzeichen	Einheit	Bedeutung
1	2	3
A	mm <sup>2</sup>	Fläche, Querschnitt, Verbundfläche
A <sub>s</sub>		Querschnittsfläche der Bewehrung
a	mm	Ausbreitmaß des Frischmörtels
A <sub>w</sub> bzw. ω	g/(m <sup>2</sup> ·s <sup>0,5</sup> )	Kapillarer Wasseraufnahmekoeffizient /X25/
b	mm	Breite
c <sub>L</sub>		Mörteldeckung zum Prüfkörpertrand
c <sub>w,s</sub>	g/(m <sup>2</sup> ·s <sup>0,5</sup> )	Kapillarer Wasseraufnahmekoeffizient nach /X21/
c <sub>wi,s</sub>		Anfängliche Wasseraufnahme nach /X21/
d <sub>B</sub>	mm	Dicke der Beschichtung der Bewehrung
d <sub>F</sub>		Dicke der Lagerfuge
d <sub>s</sub> bzw. Ø		Bewehrungsdurchmesser
dx		infinitesimal kleine Weglänge
DM	-	Dünnbettmörtel
DF		Dünnformat
f <sub>bd</sub>	N/mm <sup>2</sup>	Bemessungswert der Verbundfestigkeit
f <sub>bk</sub>		charakteristische Verbundfestigkeit
f <sub>c</sub>		Betondruckfestigkeit
f <sub>ck,cube</sub>		charakteristische Würfeldruckfestigkeit des Betons nach 28 Tagen
f <sub>R</sub>	-	Bezogene Rippenfläche der Bewehrung
f <sub>R,soll</sub>		Bezogene Rippenfläche nach DIN 488
f <sub>R,ist</sub>		Gemessene bezogene Rippenfläche
E <sub>s</sub>	N/mm <sup>2</sup>	E-Modul des Stahls
EC	-	Eurocode
F	kN	Ausziehungskraft
G bzw. GP	-	Gasbetonstein (Porenbetonstein)
h	mm	Höhe
h <sub>m</sub>	M.-%	Feuchtegehalt beim Vermauern
HLz	-	Hochlochziegel
Hbl		Leichtbeton-Hohlblockstein
HLz		Hochlochziegel
k		Faktor aus Zahlentafeln in /X31/
KS		Kalksandstein
KS L		Kalksand-Lochstein

Tabelle A2: Fortsetzung (2)

Kurzzeichen	Einheit	Bedeutung	
1	2	3	
l	mm	Länge	
$l_v$		Verbundlänge	
$l_{v,maßg}$		Maßgebende Verankerungslänge	
$l_{v,s}$		Verankerungslänge im Gebrauchszustand	
$l_{v,u}$		Verankerungslänge im Bruchzustand	
L	Vol.-%	Luftgehalt des Frischmörtels	
LP	-	Luftporenbildner	
min		Kleinster Einzelwert	
max		Größter Einzelwert	
MC		Methylcellulose	
MZ		Mauerziegel	
n		Prüfkörperanzahl	
n. b.		nicht bestimmt	
NF		Normalformat	
NM		Normalmörtel	
p		Quantil	
$P = 1-\alpha$		Konfidenzniveau	
PB, PP		Porenbetonstein, Porenbeton-Planstein	
$R_e$		N/mm <sup>2</sup>	Stahlspannung an der Streckgrenze
$R_m$			Zugfestigkeit des Stahls
s bzw. $s_x$	-	geschätzte Standardabweichung	
t	d	Alter	
U	mm	Mantelfläche (Umfang der Bewehrung)	
v bzw. $v_x$	-	Variationskoeffizient	
V		Leichtbeton-Vollstein	
Vbl		Leichtbeton-Vollblock	
VZ		Verzögerer	
$x_p$		Schätzwert für das Quantil	
$\bar{x}$		geschätzter Mittelwert	

**Tabelle A3:** Auswertung von Untersuchungen zum Verbundverhalten von Bewehrung in Mauerwerk  
Zusammenfassung der in der Datenbank enthaltenen Versuchsreihen (Mittelwerte)

Lfd. Nr.	Prüfserie Bericht	Verbundwerte		Mauerstein		Mörtel		Bewehrung				
		n	$\tau_M$	$\beta_{D,F(bac)}$	Steinart	Format	Art	$\beta_b$	Zusatzmittel	Art	$d_s$	$f_R$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
		-		N/mm <sup>2</sup>	-	-	-	N/mm <sup>2</sup>	-	-	mm	-
	A101	3	2,17	10,09	KS 12	2 DF	NM IIa	3,4	-	BSt 500 M	6	0,047
	A101N	3	2,46	14,25	KS 12	2 DF	NM IIa	4,7	-	BSt 500 M	6	0,047
	A102	3	3,37	-	HLZ 12	2 DF	NM IIa	3,5	-	BSt 500 M	6	0,047
	A103	3	3,01	10,31	KS 12	2 DF	NM IIa	3,9	-	BSt 500 M	6	-
	A104	3	2,15	9,47	KS 12	2 DF	NM IIa	4,0	-	BSt 500 M	6	0,040
	A105	3	2,32	13,2	KS 12	2 DF	NM IIa	4,8	-	BSt 500 M	6	0,047
	A106	3	2,91	23,4	HLZ 12	2 DF	NM IIa	4,6	-	BSt 500 M	6	0,047
	A107	3	1,90	8,56	KS 12	2 DF	NM IIa	5,1	-	BSt 500 M	6	0,047
	A107N	3	1,87	7,27	KS 12	2 DF	NM IIa	3,5	-	BSt 500 M	6	0,047
	A108	3	2,82	17,6	HLZ 12	2 DF	NM IIa	4,8	-	BSt 500 M	6	0,047
	A109	3	2,33	18,93	HLZ 12	2 DF	NM IIa	4,2	-	BSt 500 M	8	0,064
	A109N	3	2,37	24,62	HLZ 12	2 DF	NM IIa	3,5	-	BSt 500 M	8	0,064
	A110	3	1,81	10,85	KS 12	2 DF	NM IIa	4,5	-	BSt 500 M	6	0,064
	A110N	3	1,98	12,31	KS 12	2 DF	NM IIa	3,5	-	BSt 500 M	6	0,064
	A111	5	0,9	22,72	KS-U-Schale	b=115	NM IIIa	16,4	-	BSt 500 M	6	0,047
	A112	5	2,7	22,17	KS 12	2 DF	NM IIIa	20,6	-	BSt 500 M	6	0,047
	A113	3	1,73	9,93	KS 12	2 DF	NM IIa	4,1	-	BSt 500 M	6	0,047
	A114	3	2,39	9,5	KS 12	2 DF	NM IIa	4,1	-	BSt 500 M	6	0,062
	A115	3	1,87	9,41	KS 12	2 DF	NM IIa	4,1	-	BSt 500 M	6	0,047
	A116	3	1,75	8,00	KS 12	2 DF	NM IIa	2,3	-	BSt 500 M	6	0,047
	A117	3	1,76	6,79	Hbl 4	16 DF	NM IIa	3,7	-	BSt 500 M	6	0,047
	A118	3	1,53	14,30	Hbl 4	16 DF	LM 36	6,8	-	BSt 500 M	6	0,047
	A119	3	1,46	9,24	KS 12	2 DF	NM IIa	4,9	-	BSt 500 M	6	0,047
	A120	3	1,34	9,03	KS 12	2 DF	NM IIa	4,5	-	BSt 500 M	6	0,047

Tabelle A3: Fortsetzung

Lfd. Nr.	Prüfserie Bericht	Verbundwerte			Mauerstein		Mörtel		Bewehrung			
		n	$\tau_M$	$\beta_{D,F(\text{ibat})}$ N/mm <sup>2</sup>	Steinart	Format	Art	$\beta_b$ N/mm <sup>2</sup>	Zusatzmittel	Art	$d_s$ mm	$f_k$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	A121	5	1,75	11,10	KS 12	2 DF	NM IIa	3,8	-	BSst 500 M	4	0,019
	A122	5	2,32	10,44	KS 12	2 DF	NM IIa	3,8	-	BSst 500 M	5	0,038
	A123	5	0,72	5,85	KS-U-Schale	b=115	NM IIa	4,5	-	BSst 500 M	6	0,047
	A123N	5	1,31	11,18	KS-U-Schale	b=115	NM IIa	4,3	-	BSst 500 M	6	0,047
	A124	5	1,39	19,58	G 2	2 DF	LM 36	12,2	-	BSst 500 M	6	0,047
	A125	3	3,35	34,28	HLz 12	2 DF	NM IIIa	20,8	-	BSst 500 M	6	0,062
	A125N	3	3,60	28,85	HLz 12	2 DF	NM IIIa	16,6	-	BSst 500 M	6	0,062
	A126N	3	1,97	16,51	KS 12	2 DF	NM IIIa	16,6	-	BSst 500 M	6	0,062
	A127	3	1,39	16,43	HLz 8	2 DF	LM 36	8,9	-	BSst 500 M	8	0,064
	A128	3	0,95	10,46	HLz 8	2 DF	LM 36	7,9	-	BSst 500 M	8	0,064
	A129	5	1,31	10,65	KS 12	2 DF	NM IIa	5,1	MC	BSst 500 M	4	0,019
	A130	5	1,78	20,98	HLz 12	2 DF	NM IIa	5,1	MC	BSst 500 M	5	0,038
	A131	5	2,12	15,13	G 2	2 DF	NM IIa	4,3	-	BSst 500 M	6	0,047
	A132	5	2,64	11,94	KS 12	2 DF	NM IIa	4,2	-	BSst 500 M	6	0,047
	A133	5	0,88	4,6	KS 12	2 DF	NM IIa	8,5	VZ / LP	BSst 500 M	6	0,047
	A134	5	2,09	13,96	HLz 12	2 DF	NM IIa	9,1	VZ / LP	BSst 500 M	6	0,047
	A202	5	1,96	9,32	Vbl 2	8 DF	NM IIa	5,2	MC	Längsstab Mufor	5	0,022
	A203	5	2,28	11,60	MZ 28	NF	NM IIa	5,2	MC	Längsstab Mufor	5	0,022
	A204	5	0,98	6,85	KS 12	5 DF	NM IIa	5,4	MC	Längsstab Mufor	5	0,022
	A205	5	1,05	21,57	KS 12	2 DF	NM IIIa	20,1	-	BSst 500 M	8	0,064
	A233	5	0,87	4,28	KS 12	2 DF	NM IIIa	8,3	VZ / LP	BSst 500 M	8	0,064
	A206	5	-	-	GP 2	16 DF	DM	19,0	-	Längsstab Mufor	-	-
	A207	5	-	-	GP 2	16 DF	DM	19,0	-	Knoten Mufor	-	-
3	A1	5	0,98	6,85	KS L	5 DF	NM IIa	5,4	MC	Längsstab Mufor	5	0,038
	A2	5	1,31	7,26	KS 20	5 DF	NM IIa	5,0	MC	Längsstab Mufor	5	0,038

Tabelle A3: Fortsetzung

Lfd. Nr.	Prüfserie Bericht	Verbundwerte		Mauerstein		Mörtel		Bewehrung				
		n	$\tau_M$	$\beta_{D,F(\text{ibac})}$	Steinart	Format	Art	$\beta_D$	Zusatzmittel	Art	$d_s$	$f_R$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
3	A3	5	0,88	8,45	KS 20	5 DF	NM IIa	5,0	MC	Längsstab Mufor	5	0,038
	A4	5	0,86	5,85	KS-U-Schale	b=115	NM IIa	4,5	-	BSst 500 M	6	0,032
	A5	5	1,31	9,76	KS-U-Schale	b=115	NM IIa	4,3	-	BSst 500 M	6	0,032
	A6	5	1,72	14,80	KS-U-Schale	b=175	NM III	15,6	MC	BSst 500 M	6	0,032
	A7	5	0,9	22,72	KS-U-Schale	b=115	NM IIIa	16,4	-	BSst 500 M	6	0,032
	A8	5	4,27	45,16	KS-U-Schale	b=175	C20/25	31,7	-	BSst 500 M	6	0,032
	A1	3	1,75	6,79	Hbl 4	16 DF	NM IIa	3,7	-	BSst 500 M	6	0,032
	A2	3	1,53	14,30	Hbl 4	16 DF	LM 36	6,8	-	BSst 500 M	6	0,032
4	A3	5	1,98	9,32	Vbl 2	8 DF	NM IIa	5,2	MC	Längsstab Mufor	5	0,022
	A4	5	1,75	8,27	Hbl 2	10 DF	NM IIa	4,2	MC	BSst 500 M	8	0,064
	A5	4	0,79	8,10	Hbl 2	10 DF	LM 21	6,6	-	Längsstab Mufor	5	0,022
	A6	4	1,11	9,70	Hbl 2	10 DF	LM 36	6,5	-	Längsstab Mufor	5	0,022
	A1	4	0,2	2,51	HLz 12	-	LM 21	2,6	-	BSst 500 M	6	-
	A2	4	0,41	2,86	HLz 8	-	LM 21	2,6	-	BSst 500 M	6	-
	A3	4	0,32	2,89	HLz 12	-	LM 21	2,6	-	BSst 500 M	6	-
	A4	4	0,47	5,51	HLz 8	-	LM 21	4,3	-	BSst 500 M	6	-
5	A5	4	0,78	6,44	HLz 8	-	LM 21	8,5	-	BSst 500 M	6	-
	A6	4	1,44	11,90	HLz 8	-	LM 36	10,3	-	BSst 500 M	6	-
	A7	4	0,7	2,91	HLz 8	-	NM IIa	1,7	MC	BSst 500 M	6	-
	1	5	-	-	GP 2	-	DM	19,0	-	Flachelement Mufor	-	-
	2	5	-	-	GP 2	-	DM	19,0	-	Flachelement Mufor	-	-
	A1	4	0,9	10,90	HLz 12	12 DF	LM 36	10,9	-	BSst 500 M	6	n.b.
	A2	4	1,71	10,00	HLz 12	12 DF	LM 36	10,9	-	BSst 500 M	6	0,047
	A3	4	1,71	11,70	HLz 12	12 DF	LM 36	10,9	-	BSst 500 M	6	0,047
7	A4	4	1,00	16,93	HLz 12	10 DF	LM 36	13,0	-	BSst 500 M	8	0,064



Tabelle A3: Fortsetzung

Lfd. Nr.	Prüfserie Bericht	Verbundwerte			Mauerstein			Mörtel			Bewehrung		
		n	$\tau_M$	$\beta_{D,F(\text{ibat})}$ N/mm <sup>2</sup>	Steinart	Format	Art	$\beta_b$ N/mm <sup>2</sup>	Zusatzmittel	Art	ds mm	$f_k$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
	A5	4	1,17	18,09	HLz 12	10 DF	LM 36	13,0	-	BSSt 500 M	8	0,064	
	A6	4	0,77	17,85	HLz 12	10 DF	LM 36	13,0	-	BSSt 500 M	8	0,064	
7	A7	4	0,95	10,20	HLz 12	12 DF	LM 36	8,6	-	BSSt 500 M	6	0,047	
	A8	4	0,93	10,20	HLz 12	12 DF	LM 36	9,2	-	BSSt 500 M	6	0,047	
	A9	4	0,78	6,44	HLz 8	16 DF	LM 21	8,5	-	BSSt 500 M	6	n.b.	
	111	5	0,71	5,14	Vbl 2	20 DF	LM 21	5,5	-	BSSt 500 M	6	0,045	
	112	5	0,77	5,5	Vbl 2	20 DF	LM 21	5,5	-	BSSt 500 M	6	0,045	
8	121	5	1,7	14,03	Vbl 2	20 DF	MM	14,2	-	BSSt 500 M	6	0,045	
	231	5	1,45	13,04	V 2	8 DF	NM IIa	10,6	-	BSSt 500 M	6	0,045	
	232	5	1,23	15,53	V 2	8 DF	NM IIa	10,6	-	BSSt 500 M	6	0,045	
	211	5	1,28	12,43	Vbl 2	-	LM 21	9,5	-	BSSt 500 M	6	0,045	
9	212	5	0,72	7,70	Vbl 2	-	LM 21	5,3	-	BSSt 500 M	6	0,045	
	361	5	0,98	9,47	Vbl 2	-	LM 36	9,9	-	BSSt 500 M	6	0,045	
10	1	3	1,63	12,58	Vbl S-W	10 DF	LM 21	9,2	-	BSSt 500 S	8	-	
	2	3	1,51	10,92	KS 12	2 DF	NM IIa	11,0	-	BSSt 500 S	8	-	
	1	3	1,07	17,89	HLz 12	12 DF	LM 36	17,1	-	Längsstab Mufor	5	0,022	
	2	3	1,46	13,52	HLz 12	12 DF	LM 36	16,1	-	Längsstab Mufor	5	0,022	
	3	3	1,48	12,55	HLz 12	12 DF	LM 36	17,1	-	Längsstab Mufor	5	0,038	
	4	3	2,29	16,03	HLz 12	12 DF	LM 36	16,1	-	Längsstab Mufor	5	0,038	
	5	4	0,99	11,35	HLz 12	12 DF	LM 36	15,3	-	BSSt 500 M	5	0,062	
	6	4	1,23	11,83	HLz 12	12 DF	LM 36	15,3	-	BSSt 500 M	6	0,062	
	7	4	0,54	4,65	HLz 12	12 DF	LM 21	5,1	-	Längsstab Mufor	5	0,038	
	8	4	0,75	5,71	HLz 12	12 DF	LM 21	5,1	-	Längsstab Mufor	5	0,038	
	9	4	2,17	12,18	HLz 12	12 DF	NM IIa	5,4	-	Längsstab Mufor	5	0,038	
	10	4	0,59	4,91	HLz 12	12 DF	NM IIa	5,2	-	Längsstab Mufor	5	0,038	

Tabelle A3: Fortsetzung

Lfd. Nr.	Prüfserie Bericht	Verbundwerte		Mauerstein		Mörtel		Bewehrung				
		n	$\tau_M$	$\beta_{D,F(ibac)}$	Steinart	Format	Art	$\beta_b$	Zusatzmittel	Art	$d_s$	$f_R$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
12	-	5	1,96	9,32	Vbl 2	8 DF	NM IIa	5,2	-	Längsstab Mufor	5	0,022
	A1	5	2,83	6,66	KS 12	2 DF	NM IIa	5,2	-	Knoten Elcom	-	-
	A2	5	1,96	5,71	KS 12	2 DF	NM IIa	5,2	-	Stab Elcom	-	-
13	A3	8	4,4	8,25	KS 12	2 DF	NM IIa	5,1	-	Knoten Elcom	-	-
	A4	5	0,67	8,18	KS 12	NF	NM IIa	3,6	-	Stab Elcom	-	-
	A5	5	3,21	8,02	KS 12	NF	NM IIa	3,6	-	Knoten Elcom	-	-
14	I	5	0,33	8,02	KS 12	2 DF	NM IIa	4,6	-	Moso-Lochband	-	-
	f	3	-	8,08	KS 12	2 DF	NM IIa	4,6	-	Moso-Lochband	-	-
15	I	5	0,71	8,28	HLz 8	12 DF	LM 21	7,4	-	Längsstab Mufor	5	-
	II	5	0,93	7,88	HLz 8	12 DF	LM 21	7,4	-	BSt 500 M	5	0,038
16	1	5	-	4,20	HLz 8	-	LM 36	4,0	-	BSt 500 M	6	-

**Tabelle A4:** Auswertung von Ausziehversuchen nach RILEM /X12/  
Zusammenfassung der in der Datenbank enthaltenen Versuchsserien  
(Mittelwerte)

Lfd.-Nr.	Prüf- serie	Verbundwerte					Bewehrung		
		n	$\tau_{\max}$	$\beta_w$	Verbund- bereich		Art	$d_s$	$f_R$
					I	II			
-	-	-	N/mm <sup>2</sup>		-	-	-	mm	-
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
17	1	3	10,47	31,7	x		BST 500 KR	6	0,054
	2	3	8,44	31,7		x	BST 500 KR	6	0,054
	3	3	20,76	31,9	x		BST 500 KR	12	0,063
	4	3	15,12	31,9		x	BST 500 KR	12	0,063
18	1	3	16,70	30,4	x		BST 500 KM	5	0,039
	2	4	11,46	30,8		x	BST 500 KM	5	0,039
	3	3	13,71	27,7	x		BST 500 KR	10	0,059
	4	4	10,87	27,7		x	BST 500 KR	10	0,059
19	1	3	6,81	30,4	x		BST 500 KR	6	0,090
	2	3	5,68	30,4		x	BST 500 KR	6	0,090
	3	3	13,41	30,4	x		BST 500 KR	12	0,050
	4	3	11,04	30,4		x	BST 500 KR	12	0,050

- I guter Verbundbereich  
II mäßiger Verbundbereich

Tabelle A5: Mauersteine

Maße, Trockenrohdichte, Feuchtegehalt beim Vermauern, Druckfestigkeit und Wasseraufnahmekoeffizient

Mauersteine	Format	Maße			$\rho_d$	$h_m$	$\beta_{N,st}$	$\beta_{D,st}$	$A_w$	$C_{w,s}$
		Länge	Breite	Höhe						
-	-	mm			kg/m <sup>3</sup>	M.-%	N/mm <sup>2</sup>		g/(m <sup>2</sup> ·s <sup>0,5</sup> )	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
HLz	2DF	241	112	114	861	0,0	12	16,9	195	290
KS	2DF	240	114	113	1847	3,2	20	31,0	56	-
	8DF	249	239	238	1798	3,0		29,2	69	-
	U 240	239	239	241	1179	1,6		12,5	111	-
	4DF	248	115	248	1160	5,4		17,8	35	-
V	2DF	239	112	113	549	38,9	4	4,4	36	722
PP	-	624	115	249	1179	1,6	4	3,9	78	973

**Tabelle A6:** Mauermörtel bzw. Beton  
 Untersuchungen zum Verbund zwischen Bewehrung und Mörtel  
 bzw. Beton nach RILEM /X12/  
 Frisch- bzw. Festmörtelkennwerte

Mörtel bzw. Beton	Statistischer Kennwert	a	L	$\rho_{fr}$	$\beta_{BZ}$	$\beta_D$
-	-	mm	Vol.-%	kg/m <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	
1	2	3	4	5	6	7
NM IIa	$\bar{x}$	215	19,5	1,88	3,0	5,0
	s				0,1	0,1
	v				0,0	0,0
	min	-	-	-	2,9	4,9
	max				3,0	5,3
	n	1	1	1	3	6
NM III	$\bar{x}$	221	16,5	1,98	4,8	10,1
	s	2,1	1,4	0,0	0,1	0,2
	v	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
	min	219	15,5	1,97	4,5	9,6
	max	222	17,5	1,99	4,9	10,5
	n	2	2	2	6	12
NM IIIa	$\bar{x}$	213	20,0	1,87	6,1	15,3
	s				0,2	0,6
	v				0,0	0,0
	min	-	-	-	6,0	14,4
	max				6,4	15,9
	n	1	1	1	3	6
C20/25	$\bar{x}$	555	2,0	2,31		28,9
	s					0,2
	v					0,0
	min	-	-	-	-	28,6
	max					29,1
	n	1	1	1		3

Tabelle A7: Mauermörtel  
 Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung  
 in der Lagerfuge  
 Frisch- und Festmörtelkennwerte

Mörtel	Statistischer Kennwert	a	L	$\rho_{fr}$	$\beta_{BZ}$	$\beta_D$
-	-	mm	Vol.-%	kg/m <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	
1	2	3	4	5	6	7
NM IIa	$\bar{x}$	179	25,3	1,77	2,7	5,1
	s	2,1	0,4	0,0	0,2	0,2
	v	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
	min	177	25,0	1,76	2,4	4,7
	max	180	25,5	1,78	3,0	5,3
	n	2	2	2	6	12
NM III	$\bar{x}$	213	18,0	1,98	4,0	9,6
	s				0,2	0,5
	v				0,0	0,1
	min	-	-	-	3,9	8,6
	max				4,2	10,0
	n	1	1	1	3	6
NM IIIa	$\bar{x}$	182	22,0	1,88	7,3	17,3
	s				0,1	0,7
	v				0,0	0,0
	min	-	-	-	7,2	16,2
	max				7,5	18,0
	n	1	1	1	3	6

Tabelle A8: Mauermörtel  
 Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung  
 in kleinen Aussparungen  
 Frisch- und Festmörtelkennwerte

Mörtel	Statistischer Kennwert	a	L	$\rho_{fr}$	$\beta_{BZ}$	$\beta_D$
-	-	mm	Vol.-%	kg/m <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	
1	2	3	4	5	6	7
NM IIa	$\bar{x}$	214	21,5	1,83	2,8	4,8
	s				0,0	0,2
	v				0,0	0,0
	min	-	-	-	2,8	4,5
	max				2,9	4,9
	n	1	1	1	3	6
NM III	$\bar{x}$	218	17,0	1,93	8,1	10,0
	s				5,6	0,4
	v				0,7	0,0
	min	-	-	-	4,8	9,6
	max				14,6	10,5
	n	1	1	1	3	6
NM IIIa	$\bar{x}$	215	18,0	1,94	6,6	17,4
	s				0,1	0,6
	v				0,0	0,0
	min	-	-	-	6,4	16,5
	max				6,7	18,0
	n	1	1	1	3	6

**Tabelle A9:** Mauermörtel bzw. Beton  
 Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung  
 in großen Aussparungen  
 Frisch- und Festmörtelkennwerte

Mörtel bzw. Beton	Statistischer Kennwert	a	L	$\rho_{fr}$	$\beta_{BZ}$	$\beta_D$
-	-	mm	Vol.-%	kg/m <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	
1	2	3	4	5	6	7
NM IIa	$\bar{x}$	211	23,9	1,79	2,8	4,7
	s	2,9	1,3	0,0	0,1	0,2
	v	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	min	209	22,5	1,76	2,6	4,3
	max	215	25,5	1,82	2,9	5,0
	n	4	4	4	12	24
NM IIIa	$\bar{x}$	217	18,3	1,96	6,8	18,2
	s	2,5	0,8	0,0	0,4	1,2
	v	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1
	min	214	17,5	1,94	6,2	16,4
	max	219	19,0	1,97	7,5	20,1
	n	3	3	3	9	18
C20/25	$\bar{x}$	520	2,2	2,34	-	30,2
	s	0,0	0,1	0,0		2,1
	v	0,0	0,0	0,0		0,1
	min	520	2,2	2,32		26,9
	max	520	2,3	2,36		32,8
	n	3	3	3		9



**Tabelle A10:** Mischungszusammensetzung  
des Betons C25/30 in  
Anlehnung an RILEM /X12/

Korngruppe	Einwaage
-	kg
1	2
0 - 0,25	0,0
0,06-0,180	0,0
0,1-0,5	10,1
0,5-1,0	48,0
1,0 - 2,0	25,3
2,0 - 4,0	20,2
4,0 - 8,0	75,8
8,0 - 16,0	73,3
16,0 - 32,0	0,0
Summe	252,8
Stoff	Gehalt
-	kg/m <sup>3</sup>
1	2
CEM II/A-LL 42,5 N	250,0
Wasser	160,0
Gesteinskörnung	1944,5
Glenium 51	-
I(Luft)	-
Summe	2355

Tabelle A11: Bewehrung  
Streckgrenze, Zugfestigkeit und bezogene Rippenfläche

Stahl	Ø	R <sub>e</sub>	R <sub>m</sub>	f <sub>R</sub>
-	mm	N/mm <sup>2</sup>		-
B500 A	6	585	635	0,046
B500 B	14	560	650	0,085

Tabelle A12: Bewehrung in Mörtel- bzw. Betonwürfeln  
Untersuchungen zum Verbund zwischen Bewehrung und Mörtel  
bzw. Beton nach RILEM /X12/  
Verbundkennwerte

Mörtel bzw. Beton	d <sub>s</sub>	t	β <sub>D</sub>	τ <sub>max</sub>				τ <sub>1R</sub>
				n	min	max	$\bar{x}$	
-	mm	d	N/mm <sup>2</sup>	-	N/mm <sup>2</sup>			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
NM IIa	6	18	5,04	5	1,28	1,81	1,56	1,36
	14			5	1,84	2,13	1,96	1,56
NM III	14	14	10,10	4	2,91	3,94	3,33	2,88
NM IIIa	6	14	15,28	5	2,84	3,30	3,09	2,65
	14			5	3,39	4,27	3,95	2,90
C25/30	6	4	28,85	5	7,03	15,26	11,24	8,88
	14			5	14,67	25,20	17,42	9,91

**Tabelle A13: Mauermörtel**  
 Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung in der Lagerfuge  
 Normdruckfestigkeit und Fugendruckfestigkeit

Mörtel	$\beta_b$										$\beta_{D,F(ibac)}$															
	$\beta_b$					KS					V					HLZ					PP					
	Alter d	n	$\bar{x}$	min N/mm <sup>2</sup>	max	n	$\bar{x}$	min N/mm <sup>2</sup>	max	n	$\bar{x}$	min N/mm <sup>2</sup>	max	n	$\bar{x}$	min N/mm <sup>2</sup>	max	n	$\bar{x}$	min N/mm <sup>2</sup>	max	n	$\bar{x}$	min N/mm <sup>2</sup>	max	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	-	-	-	-	-
NM IIa	16/19	12	5,05	4,70	5,26	20	6,99	5,45	8,34	24	6,97	5,92	8,13	24	8,73	6,06	11,22	24	5,35	4,27	6,21	-	-	-	-	-
NM III	18	6	9,57	8,58	9,97	20	10,46	8,53	13,59																	
NM IIIa	20	6	17,29	16,18	18,01	20	13,11	10,81	15,06																	

**Tabelle A14: Mauermörtel**  
 Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung in kleinen Aussparungen  
 Versuchsserien mit Kalksandsteinen  
 Normdruckfestigkeit und Mörteldruckfestigkeit im Verfüllkanal

Mörtel	$\beta_b$					$\beta_{D,K}$							
	Alter d	n	$\bar{x}$	min N/mm <sup>2</sup>	max	n	$\bar{x}$	min N/mm <sup>2</sup>	max	n	$\bar{x}$	min N/mm <sup>2</sup>	max
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	-	-	-
NM IIa	19	6	4,84	4,52	4,93	28	7,19	5,95	8,88				
NM III	17	6	10,03	9,58	10,54	16	13,86	12,03	15,32				
NM IIIa	16	6	17,42	16,51	18,01	15	16,40	13,07	17,70				

**Tabelle A15:** Mauermörtel  
 Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung in großen Aussparungen  
 Versuchsserien mit Kalksandsteinen  
 Normdruckfestigkeit und Mörteldruckfestigkeit im Verfüllkanal

Mörtel	$\beta_b$						$\beta_{b,k}$						$\beta_{b,k}$					
	$h = 1,25 \text{ m}$			$h = 2,50 \text{ m}$			$h = 1,25 \text{ m}$			$h = 2,50 \text{ m}$			$h = 1,25 \text{ m}$			$h = 2,50 \text{ m}$		
	Alter	n	$\bar{x}$	min	max	n	$\bar{x}$	min	max	n	$\bar{x}$	min	max	n	$\bar{x}$	min	max	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	-	-	-	-	
NM IIa	14	24	4,68	4,31	5,01	24	6,11	5,17	6,92	24	5,94	4,47	7,03	24	21,17	16,12	27,10	
NM IIIa	17	18	18,18	16,44	20,05	24	19,67	14,87	23,40	24	30,88	28,11	33,66	1	32,04	32,04	32,04	
C 20/25	4	9	30,17	26,87	32,80	2	30,88	28,11	33,66	1	32,04	32,04	32,04	1	32,04	32,04	32,04	

**Tabelle A16:** Mauerwerk

Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung in der Lagerfuge  
Versuchsserie mit Hochlochziegeln und Normalmörtel NM IIa,  
Bewehrungsdurchmesser  $d_s = 6 \text{ mm}$

Versuch	$\beta_D$	$\beta_{D,F(ibac)}$	Gebrauchszustand		Bruchzustand		$\tau_M$
			$l_{v,s}$	$\Delta a$	$l_{v,u}$	$\Delta a$	
-	N/mm <sup>2</sup>		mm				N/mm <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8
1	5,1	10,4	265	0,1670	335	0,4813	1,28
2		7,7	313	0,2009	447	0,6274	0,96
3		9,6	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
4		7,3	266	0,1767	511	0,5975	0,84
5		9,4	259	0,1613	325	0,4766	1,28
6		8,1	395	0,2419	495	0,6351	1,27
Mittelwert	5,1	8,73	300	0,1896	423	0,5636	1,13

n. b. nicht bestimmt

**Tabelle A17:** Mauerwerk

Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung in der Lagerfuge  
Versuchsserie mit Leichtbetonsteinen und Normalmörtel NM IIa,  
Bewehrungsdurchmesser  $d_s = 6 \text{ mm}$

Versuch	$\beta_D$	$\beta_{D,F(ibac)}$	Gebrauchszustand		Bruchzustand		$\tau_M$
			$l_{v,s}$	$\Delta a$	$l_{v,u}$	$\Delta a$	
-	N/mm <sup>2</sup>		mm				N/mm <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8
1	5,1	7,0	347	0,2299	563	0,7745	0,76
2		7,4	294	0,1869	440	0,6172	0,98
3		6,6	340	0,1109	489	0,6879	0,88
4		6,9	327	0,2150	511	0,7255	0,84
5		6,9	333	0,2034	462	0,6505	0,93
6		7,0	301	0,1794	393	0,5660	1,10
Mittelwert	5,1	7,0	324	0,1876	476	0,6703	0,91

**Tabelle A18: Mauerwerk**

Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung in der Lagerfuge  
Versuchsserie mit Porenbetonsteinen und Normalmörtel NM IIa,  
Bewehrungsdurchmesser  $d_s = 6 \text{ mm}$

Versuch	$\beta_D$	$\beta_{D,F(ibac)}$	Gebrauchszustand		Bruchzustand		$\tau_M$
			$l_{v,s}$	$\Delta a$	$l_{v,u}$	$\Delta a$	
-	N/mm <sup>2</sup>		mm				N/mm <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8
1	5,1	4,9	628	0,3682	853	1,1252	0,50
2		n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
3		5,2	535	0,3573	855	1,1341	0,50
4		5,9	571	0,3570	776	0,9761	0,59
5		5,4	910	0,5468	1178	1,2930	0,58
6		5,2	435	0,2839	680	0,9257	0,30
Mittelwert	5,1	5,4	616	0,3826	868	1,0908	0,49

n. b. nicht bestimmt

**Tabelle A19: Mauerwerk**

Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung in der Lagerfuge  
Versuchsserie mit Kalksandsteinen und Normalmörtel NM IIa,  
Bewehrungsdurchmesser  $d_s = 6 \text{ mm}$

Versuch	$\beta_D$	$\beta_{D,F(ibac)}$	Gebrauchszustand		Bruchzustand		$\tau_M$
			$l_{v,s}$	$\Delta a$	$l_{v,u}$	$\Delta a$	
-	N/mm <sup>2</sup>		mm				N/mm <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8
1	5,1	6,3	523	0,3066	684	0,8805	0,63
2		6,1	610	0,3829	914	1,2005	0,47
3		6,6	537	0,3067	699	0,9133	0,61
4		7,9	438	0,2639	615	0,8373	0,70
Mittelwert	5,1	7,3	527	0,2924	728	0,9579	0,60

Tabelle A20: Mauerwerk

Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung in der Lagerfuge  
 Versuchsserie mit Kalksandsteinen und Normalmörtel NM III,  
 Bewehrungsdurchmesser  $d_s = 6 \text{ mm}$

Versuch	$\beta_D$	$\beta_{D,F(ibac)}$	Gebrauchszustand		Bruchzustand		$\tau_M$
			$l_{v,s}$	$\Delta a$	$l_{v,u}$	$\Delta a$	
-	N/mm <sup>2</sup>		mm				N/mm <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8
1	9,6	9,7	302	0,1839	405	0,5789	1,06
2		11,1	323	0,1933	438	0,6145	0,98
3		10,2	257	0,1653	376	0,5448	1,14
4		10,0	343	0,2034	469	0,6522	0,91
5		11,3	277	0,1678	368	0,5321	1,17
Mittelwert	9,6	10,5	300	0,1827	411	0,5845	1,05

Tabelle A21: Mauerwerk

Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung in der Lagerfuge  
 Versuchsserie mit Kalksandsteinen und Normalmörtel NM IIIa,  
 Bewehrungsdurchmesser  $d_s = 6 \text{ mm}$

Versuch	$\beta_D$	$\beta_{D,F(ibac)}$	Gebrauchszustand		Bruchzustand		$\tau_M$
			$l_{v,s}$	$\Delta a$	$l_{v,u}$	$\Delta a$	
-	N/mm <sup>2</sup>		mm				N/mm <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8
1	17,3	14,1	384	0,2127	462	0,6452	0,93
2		14,5	306	0,1992	484	0,6851	1,35
3		13,4	290	0,1710	362	0,5232	1,19
4		11,5	336	0,2018	410	0,5670	1,05
5		12,1	369	0,2299	497	0,6693	0,86
Mittelwert	17,3	13,1	331	0,1938	410	0,5802	1,07

Tabelle A22: Mauerwerk

Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung in der Lagerfuge  
 Bewehrungsdurchmesser  $d_s = 6$  mm  
 Mittelwerte

Versuchsserie		$\beta_D$	$\beta_{D,F(ibac)}$	$l_{v,maßg}$	$\tau_M$
Mauerstein	Mörtel				
-	-	N/mm <sup>2</sup>		mm	N/mm <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6
HLz	NM IIa	5,1	8,7	423	1,13
V			7,0	476	0,91
PP			5,4	868	0,49
KS			7,0	728	0,60
	NM III	9,6	10,5	411	1,05
	NM IIIa	17,3	13,1	410	1,07

Tabelle A23: Mauerwerk

Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung  
 in kleinen Aussparungen  
 Versuchsserie mit Kalksandsteinen und Normalmörtel NM IIa,  
 Bewehrungsdurchmesser  $d_s = 6$  mm

Versuch	$\beta_D$	$\beta_{D,K}$	Gebrauchszustand		Bruchzustand		$\tau_M$
			$l_{v,s}$	$\Delta a$	$l_{v,u}$	$\Delta a$	
-	N/mm <sup>2</sup>		mm				N/mm <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8
1	4,8	7,3	689	0,3487	723	0,8809	0,52
2		7,1	543	0,2886	650	0,8558	0,77
3		7,6	730	0,3735	750	0,9254	0,49
4		8,3	598	0,3207	714	0,9120	0,69
Mittelwert	4,8	7,6	640	0,3329	709	0,8935	0,61



Tabelle A24: Mauerwerk

Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung  
in kleinen Aussparungen  
Versuchsserie mit Kalksandsteinen und Normalmörtel NM IIa,  
Bewehrungsdurchmesser  $d_s = 14$  mm

Versuch	$\beta_D$	$\beta_{D,K}$	Gebrauchszustand		Bruchzustand		$\tau_M$
			$l_{v,s}$	$\Delta a$	$l_{v,u}$	$\Delta a$	
-	N/mm <sup>2</sup>		mm				N/mm <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8
1	4,8	6,9	1351	0,6750	1531	1,7610	0,65
2		6,7	2466	1,2095	2613	2,5810	0,39
3		6,6	2643	1,1670	2624	2,6410	0,38
Mittelwert	4,8	6,7	2153	1,0172	2256	2,3277	0,49

Tabelle A25: Mauerwerk

Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung  
in kleinen Aussparungen  
Versuchsserie mit Kalksandsteinen und Normalmörtel NM III,  
Bewehrungsdurchmesser  $d_s = 14$  mm

Versuch	$\beta_D$	$\beta_{D,K}$	Gebrauchszustand		Bruchzustand		$\tau_M$
			$l_{v,s}$	$\Delta a$	$l_{v,u}$	$\Delta a$	
-	N/mm <sup>2</sup>		mm				N/mm <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8
1	10,0	12,6	1202	0,5780	1227	1,2635	0,81
2		14,3	1316	0,6162	1322	1,3170	0,76
3		14,8	1612	0,6754	1380	1,3783	0,72
4		13,8	1412	0,6595	1431	1,3148	0,70
Mittelwert	10,0	13,9	1386	0,6323	1340	1,3184	0,76

Tabelle A26: Mauerwerk

Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung  
in kleinen Aussparungen  
Versuchsserie mit Kalksandsteinen und Normalmörtel NM IIIa,  
Bewehrungsdurchmesser  $d_s = 14$  m

Versuch	$\beta_D$	$\beta_{D,K}$	Gebrauchszustand		Bruchzustand		$\tau_M$
			$l_{v,s}$	$\Delta a$	$l_{v,u}$	$\Delta a$	
-	N/mm <sup>2</sup>		mm				N/mm <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8
1	17,4	16,5	1029	0,4945	1038	1,0708	0,96
2		15,8	1249	0,6121	1282	1,2136	0,78
3		16,6	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
4		16,8	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
Mittelwert	17,4	16,4	1139	0,5533	1160	1,1422	0,87

n. b. nicht bestimmt

Tabelle A27: Mauerwerk

Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung  
in kleinen Aussparungen  
Mittelwerte

Versuchsserie			$\beta_D$	$\beta_{D,K}$	$l_{v,maßg}$	$\tau_M$
Mauerstein	Mörtel	$d_s$				
-	-	mm	N/mm <sup>2</sup>		mm	N/mm <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7
KS	NM IIa	6	4,8	7,6	709	0,61
	NM IIa	14		6,7	2256	0,49
	NM III	14	10,0	13,9	1386	0,76
	NM IIIa	14	17,4	16,4	1160	0,87

**Tabelle A28: Mauerwerk**

Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung in großen Aussparungen, verfüllt direkt an der Wandoberkante ( $h = 1,25 \text{ m}$ )  
 Versuchsserie mit Kalksandsteinen und Normalmörtel NM IIa,  
 Bewehrungsdurchmesser  $d_s = 14 \text{ mm}$

Versuch	$\beta_D$	$\beta_{D,K}$	Gebrauchszustand		Bruchzustand		$\tau_M$
			$l_{v,s}$	$\Delta a$	$l_{v,u}$	$\Delta a$	
-	N/mm <sup>2</sup>		mm				N/mm <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8
1-1	4,7	6,6	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
1-2		6,1	1756	0,9950	2275	2,4450	0,44
2-1		5,7	1317	0,7751	1751	2,0350	0,57
2-2		6,4	1554	0,8610	1898	2,1571	0,52
3-1		5,6	1159	0,6347	1436	1,6686	0,69
3-2		6,4	1394	0,8430	1996	2,2402	0,50
Mittelwert	4,7	6,1	1436	0,8218	1871	2,0500	0,54

n. b. nicht bestimmt

**Tabelle A29: Mauerwerk**

Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung in großen Aussparungen, verfüllt durch ein aufgesetztes Kunststoffrohr ( $h = 2,50 \text{ m}$ )  
 Versuchsserie mit Kalksandsteinen und Normalmörtel NM IIa,  
 Bewehrungsdurchmesser  $d_s = 14 \text{ mm}$

Versuch	$\beta_D$	$\beta_{D,K}$	Gebrauchszustand		Bruchzustand		$\tau_M$
			$l_{v,s}$	$\Delta a$	$l_{v,u}$	$\Delta a$	
-	N/mm <sup>2</sup>		mm				N/mm <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8
4-1	4,7	5,7	1323	0,7841	1806	2,1151	0,56
4-2		6,0	1009	0,6162	1414	1,7302	0,71
5-1		6,3	842	0,5133	1208	1,4955	0,83
5-2		6,2	909	0,5505	1297	1,5670	0,77
6-1		5,6	820	0,5021	1116	1,4238	0,90
6-2		5,9	858	0,5283	1214	1,5038	0,83
Mittelwert	4,7	5,9	981	0,5932	1368	1,6663	0,77

**Tabelle A30: Mauerwerk**

Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung in großen Aussparungen, verfüllt direkt an der Wandoberkante ( $h = 1,25 \text{ m}$ )  
Versuchsserie mit Kalksandsteinen und Normalmörtel NM IIIa,  
Bewehrungsdurchmesser  $d_s = 14 \text{ mm}$

Versuch	$\beta_D$	$\beta_{D,K}$	Gebrauchszustand		Bruchzustand		$\tau_M$
			$l_{v,s}$	$\Delta a$	$l_{v,u}$	$\Delta a$	
-	N/mm <sup>2</sup>		mm				N/mm <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8
1-1	18,2	22,5	728	0,4047	860	1,0402	1,17
1-2		18,7	692	0,4207	938	1,1470	1,07
2-1		19,9	927	0,4740	1018	1,2071	0,98
2-2		21,1	699	0,3606	770	0,9730	1,30
3-1		19,9	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
3-2		16,0	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
Mittelwert	18,2	19,7	762	0,4150	897	1,0918	1,14

n. b. nicht bestimmt

**Tabelle A31: Mauerwerk**

Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung in großen Aussparungen, verfüllt durch ein aufgesetztes Kunststoffrohr ( $h = 2,50 \text{ m}$ )  
Versuchsserie mit Kalksandstein und Normalmörtel NM IIIa,  
Bewehrungsdurchmesser  $d_s = 14 \text{ mm}$

Versuch	$\beta_D$	$\beta_{D,K}$	Gebrauchszustand		Bruchzustand		$\tau_M$
			$l_{v,s}$	$\Delta a$	$l_{v,u}$	$\Delta a$	
-	N/mm <sup>2</sup>		mm				N/mm <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8
4-1	18,2	21,5	509	0,2688	552	0,7223	1,82
4-2		21,5	587	0,2907	581	0,7540	1,73
5-1		24,8	402	0,2288	481	0,6543	2,08
5-2		20,9	440	0,2472	511	0,6974	1,96
6-1		20,8	443	0,2469	521	0,7008	1,92
6-2		17,5	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
Mittelwert	18,2	21,2	476	0,2565	529	0,7058	1,92

n. b. nicht bestimmt

Tabelle A32: Mauerwerk  
 Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung  
 in großen Aussparungen  
 Mittelwerte

Versuchsserie			$\beta_D$	$\beta_{D,K}$	$l_{v,maßg}$	$\tau_M$
Mauerstein	Mörtel	Höhe				
-	-	m	N/mm <sup>2</sup>		mm	N/mm <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7
KS	NM IIa	1,25	4,7	6,1	1871	0,54
	NM IIa	2,50		5,9	1368	0,77
	NM IIIa	1,25	18,2	19,7	897	1,14
	NM IIIa	2,50		21,2	529	1,92

Tabelle A33: Mauerwerk

Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung in der Lagerfuge  
 Versuchsserien aus bisherigen und eigenen Untersuchungen  
 Statistische Auswertung, 5%-Quantilwerte der Verbundspannung

Stein	Mörtel	Zusatz- mittel	Normalverteilung						Logarithmische Normalverteilung					
			Literatur			Eigene Werte			Literatur			Eigene Werte		
			n	1- $\alpha$ =0,90	1- $\alpha$ =0,95	n	1- $\alpha$ =0,90	1- $\alpha$ =0,95	n	1- $\alpha$ =0,90	1- $\alpha$ =0,95	n	1- $\alpha$ =0,90	1- $\alpha$ =0,95
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
			-	(1,16)	(1,11)	4	0,22	0,10	56	1,33	1,30	4	(0,40)	(0,38)
KS	NM IIa	MC	5	0,88	0,78	-	-	-	5	(1,04)	(1,02)	-	-	-
		VZ und LP	5	0,62	0,59	-	-	-	5	(0,70)	(0,68)	-	-	-
	NM III	-	-	-	-	5	0,69	0,61	-	-	-	5	(0,83)	(0,81)
	NM IIIa	-	8	(0,96)	(0,73)	5	0,41	0,25	8	1,43	1,37	5	(0,68)	(0,65)
		VZ und LP	5	0,52	0,43	-	-	-	5	(0,65)	(0,63)	-	-	-
HLZ	NM IIa	-	15	1,63	1,52	5	0,41	0,23	15	(1,89)	(1,84)	5	(0,70)	(0,66)
		MC	5	1,06	0,89	-	-	-	5	(1,34)	(1,30)	-	-	-
	NM IIIa	VZ und LP	5	1,52	1,38	-	-	-	5	(1,73)	(1,70)	-	-	-
		-	6	1,89	1,57	-	-	-	6	(2,44)	(2,36)	-	-	-

(...) nach dem Kriterium Gl. (35), dass die log. Normalverteilung nur für  $v > 0,2$  angewendet wird nicht maßgebend

**Tabelle A34: Mauerwerk**

Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung in Formsteinen  
 Versuchsserien aus bisherigen Untersuchungen  
 Statistische Auswertung, 5%-Quantilwerte der Verbundspannung

Mörtel	Zusatz- mittel	n	Normalverteilung		Log. Normalverteilung	
			1- $\alpha$ =0,90	1- $\alpha$ =0,95	1- $\alpha$ =0,90	1- $\alpha$ =0,95
			$\tau_{M, 5\%}$			
			N/mm <sup>2</sup>			
1	2	3	4	5	6	7
NM IIa	-	9	(-0,19)	(-0,36)	0,30	0,26
NM III	MC	5	1,03	0,86	(1,29)	(1,26)
NM IIIa	-	5	0,57	0,49	(0,69)	(0,68)
C20/25	-	4	3,22	2,90	(3,67)	(3,63)

(...) nach dem Kriterium Gleichung (35), dass die log. Normalverteilung nur für  $v > 0,2$  angewendet wird, nicht maßgebend

**Tabelle A35: Mauerwerk**

Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung  
 in kleinen Aussparungen  
 Versuchsserien aus eigenen Untersuchungen  
 Statistische Auswertung, 5%-Quantilwerte der Verbundspannung

Mörtel	$d_s$	n	Normalverteilung		Log. Normalverteilung	
			1- $\alpha$ =0,90	1- $\alpha$ =0,95	1- $\alpha$ =0,90	1- $\alpha$ =0,95
			$\tau_{M, 5\%}$			
			N/mm <sup>2</sup>			
1	2	3	4	5	6	7
NM IIa	6	4	(0,09)	(-0,07)	0,34	0,32
		3	(-0,35)	(-0,71)	0,17	0,14
NM III	14	4	0,56	0,50	(0,64)	(0,63)
NM IIIa		2	(-0,82)	(-2,51)	0,56	0,53

(...) nach dem Kriterium Gleichung (35), dass die log. Normalverteilung nur für  $v > 0,2$  angewendet wird, nicht maßgebend

**Tabelle A36: Mauerwerk**

Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung  
in großen Aussparungen  
Versuchsserien aus eigenen Untersuchungen  
Statistische Auswertung, 5%-Quantilwerte der Verbundspannung

Mörtel	h	n	Normalverteilung		Log. Normalverteilung	
			1- $\alpha$ =0,90	1- $\alpha$ =0,95	1- $\alpha$ =0,90	1- $\alpha$ =0,95
			$\tau_{M, 5\%}$			
-	m	-	N/mm <sup>2</sup>			
1	2	3	4	5	6	7
NM IIa	1,25	5	0,22	0,15	(0,35)	(0,34)
	2,50	6	0,39	0,32	(0,52)	(0,51)
NM IIIa	1,25	4	0,59	0,43	(0,84)	(0,81)
	2,50	5	1,44	1,33	(1,61)	(1,59)

(...) nach dem Kriterium Gleichung (35), dass die log. Normalverteilung nur für  $v > 0,2$  angewendet wird, nicht maßgebend

**Tabelle A37: Mauerwerk**

Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung  
Versuchsserien aus Literatur und eigenen Untersuchungen  
Vereinfachte Auswertung, 5%-Quantilwerte der Verbundspannung

Stein	Mörtel	Zusatzmittel	Bewehrungsanordnung					
			in den Lagerfugen			in Formsteinen		
			$\tau_{M, 5\%} = \tau_{M, 0,7}$					
			Literatur		Eigene Werte		Literatur	
			n	$\tau_{M, 5\%}$	n	$\tau_{M, 5\%}$	n	$\tau_{M, 5\%}$
-	-	-	N/mm <sup>2</sup>	-	N/mm <sup>2</sup>	-	N/mm <sup>2</sup>	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
KS	NM IIa	-	56	1,46	4	0,42	9	0,69
		MC	5	0,91	-	-	-	-
		VZ und LP	5	0,62	-	-	-	-
	NM III	-	-	-	5	0,74	-	-
		MC	-	-	-	-	5	1,21
	NM IIIa	-	8	1,70	5	0,75	5	0,63
		VZ und LP	5	0,61	-	-	-	-
C20/25	-	-	-	-	-	4	2,99	
HLz	NM IIa	-	15	1,93	5	0,79	-	-
		MC	5	1,25	-	-	-	-
	NM IIa	VZ und LP	5	1,46	-	-	-	-
	NM IIIa	-	6	2,43	-	-	-	-



Tabelle A38: Mauerwerk

Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung  
 Versuchsserien aus eigenen Untersuchungen  
 Vereinfachte Auswertung, 5%-Quantilwerte der Verbundspannung

Mörtel	Bewehrungsanordnung					
	in kleinen Aussparungen			in großen Aussparungen		
	n	d <sub>s</sub>	τ <sub>M, 5 %</sub>	n	h	τ <sub>M, 5 %</sub>
-	-	mm	N/mm <sup>2</sup>	-	m	N/mm <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7
NM IIa	4	6	0,43	5	1,25	0,40
	3	14	0,33	6	2,50	0,54
NM III	4		0,52	-	-	-
NM IIIa	2		0,61	4	1,25	0,79
	-	-	-	5	2,50	1,33

Tabelle A39: Mauerwerk

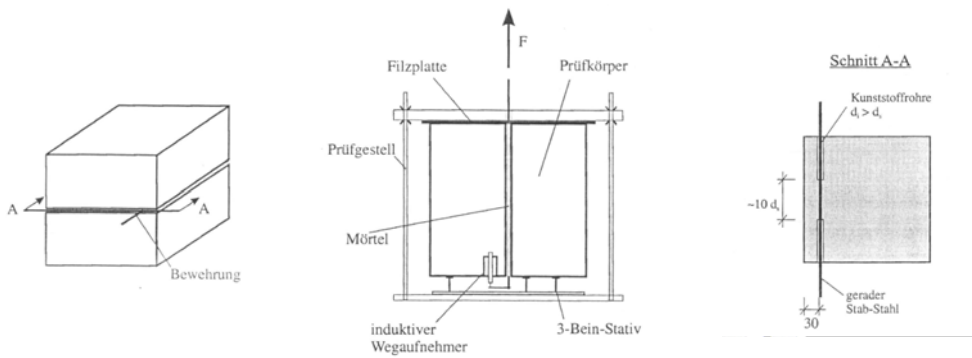
Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung  
 Versuchsserien aus Literatur und eigenen Untersuchungen  
 Funktionaler Zusammenhang analog zu /6/  
 5%-Quantilwerte der Verbundspannung

Mörtel	Bewehrungsanordnung		
	in den Lagerfugen		in Formsteinen
	KS	HLz	KS
	$\tau_{M, 5 \%} = 0,17 \cdot \beta_{D,F}^{0,66}$	$\tau_{M, 5 \%} = 0,22 \cdot \beta_{D,F}^{0,66}$	$\tau_{M, 5 \%} = 0,11 \cdot \beta_{D,F}^{0,66}$
-	N/mm <sup>2</sup>		
1	2	3	4
NM IIa	0,49	0,64	0,32
NM III	0,78	1,01	0,50
NM IIIa	1,23	1,59	0,79

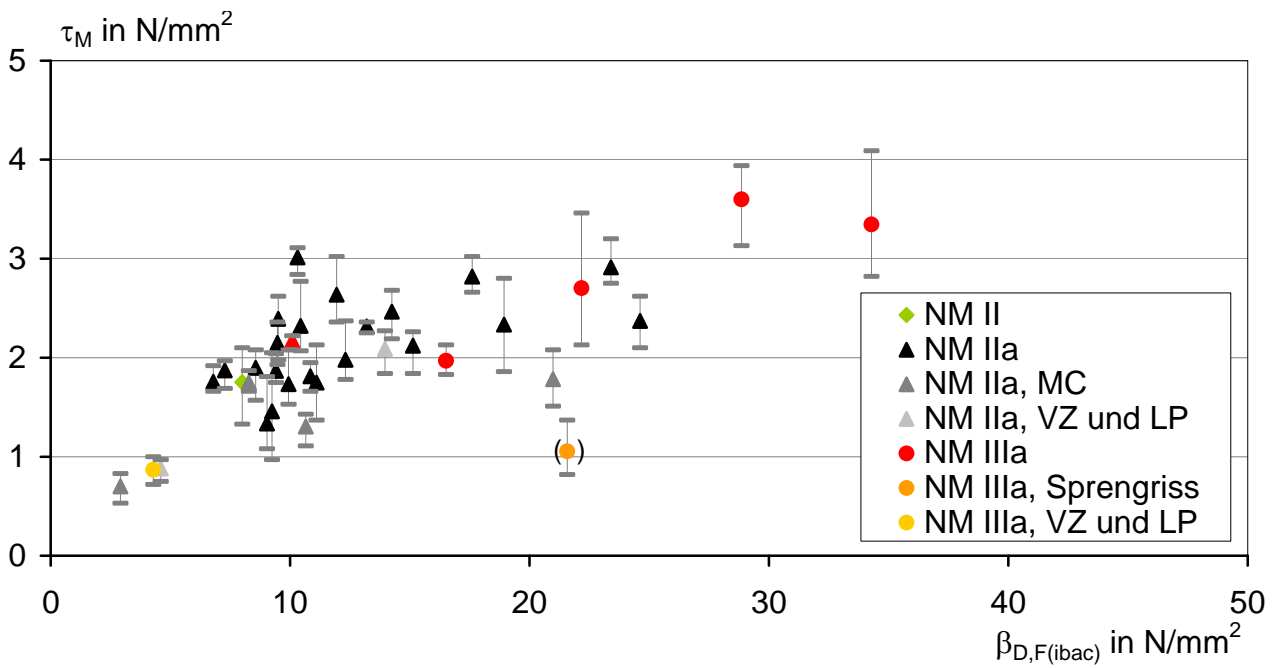
Tabelle A40: Mauerwerk

Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung  
 Versuchsserien aus eigenen Untersuchungen, Mittelwerte  
 Funktionaler Zusammenhang analog zu /6/  
 5-%-Quantilwerte der Verbundspannung

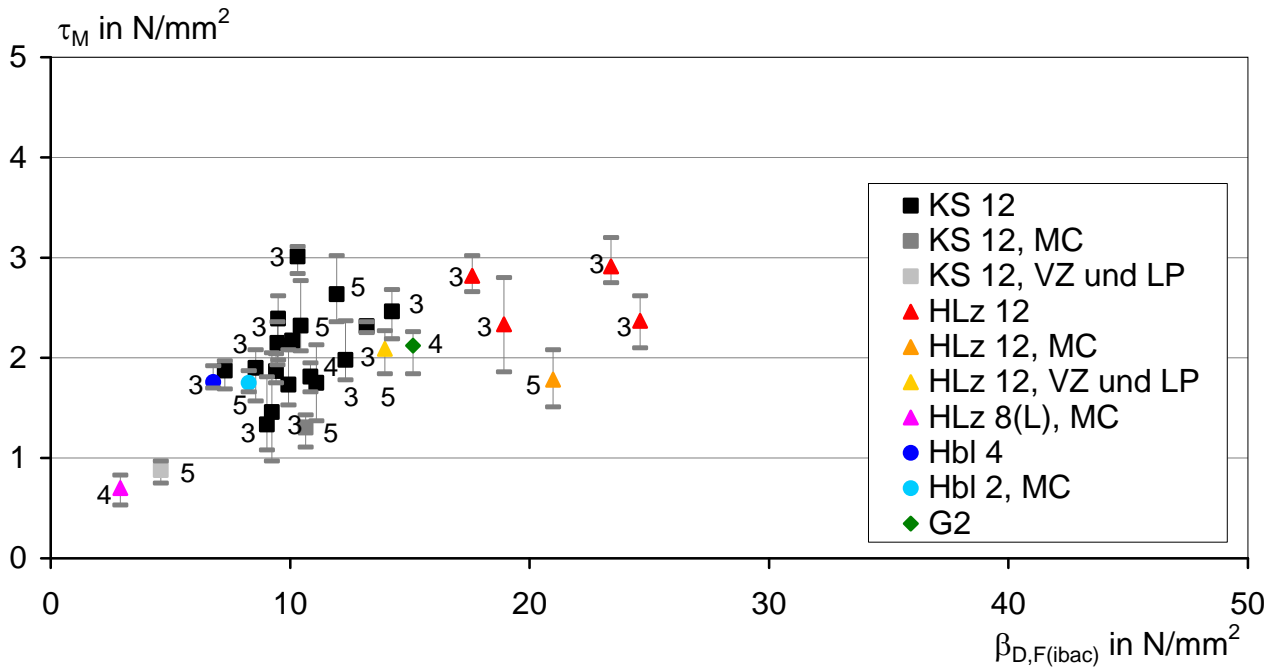
Mörtel	Bewehrungsanordnung		
	in kleinen Aussparungen	in großen Aussparungen	
		h = 1,25 m	h = 2,50 m
-	$\tau_{M, 5\%} = 0,11 \cdot \beta_{D,K}^{0,66}$	$\tau_{M, 5\%} = 0,13 \cdot \beta_{D,K}^{0,66}$	$\tau_{M, 5\%} = 0,17 \cdot \beta_{D,K}^{0,66}$
-	N/mm <sup>2</sup>		
1	2	3	4
NM IIa	0,32	0,38	0,49
NM III	0,50	0,59	0,78
NM IIIa	0,79	0,94	1,23



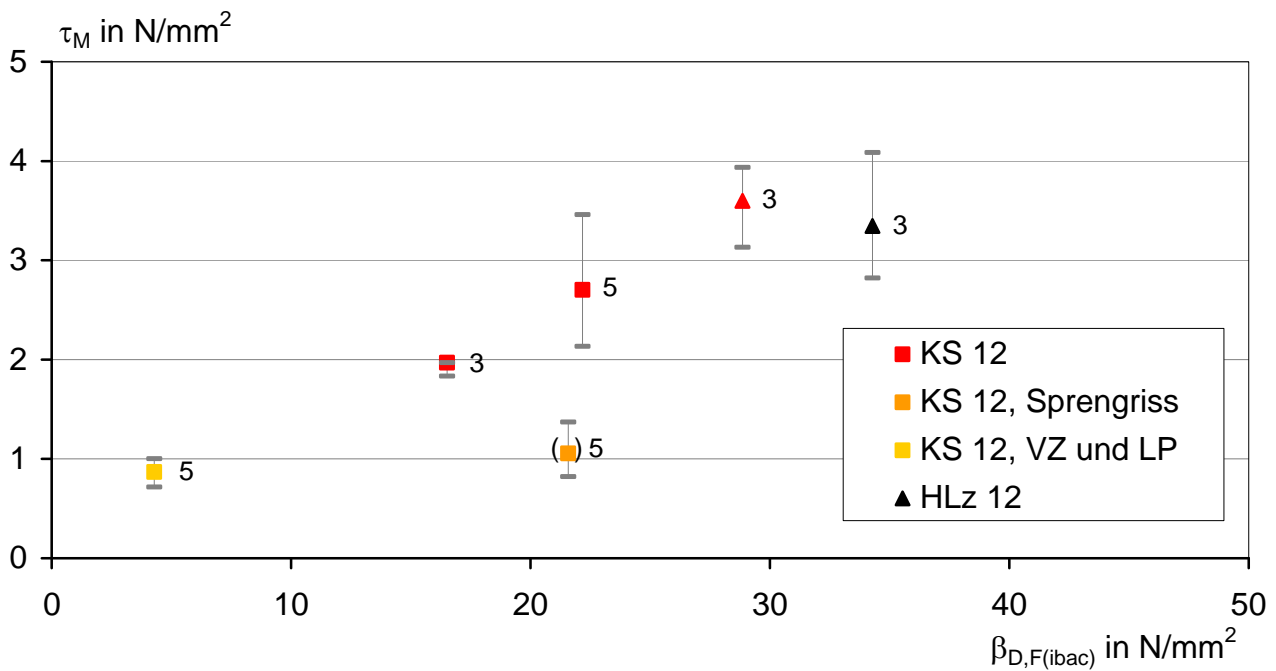
**Bild B1:** Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung in der Lagerfuge  
 Prüfkörper und Versuchsaufbau (schematische Darstellung nach Bericht 8)



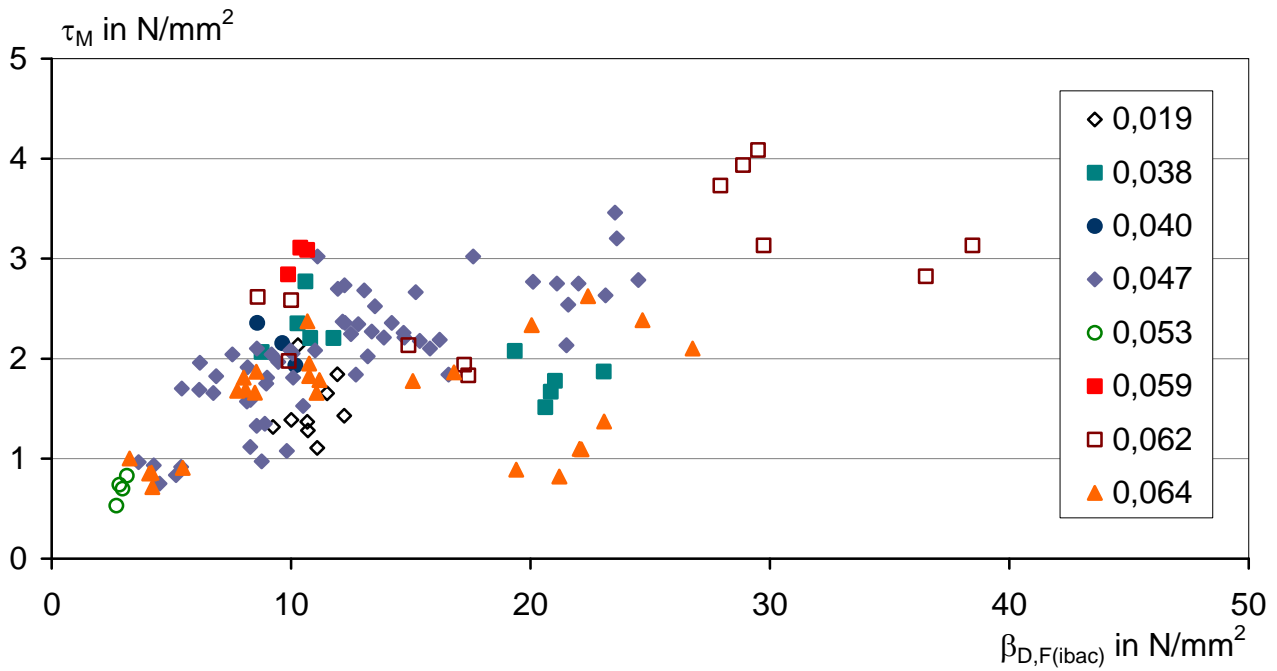
**Bild B2:** Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung in der Lagerfuge, maßgebende Verbundspannung  $\tau_M$  in Abhängigkeit der Fugendruckfestigkeit  $\beta_{D,F(ibac)}$ , Differenzierung nach Mörtelart, Mittelwerte und Streubereich der Einzelwerte



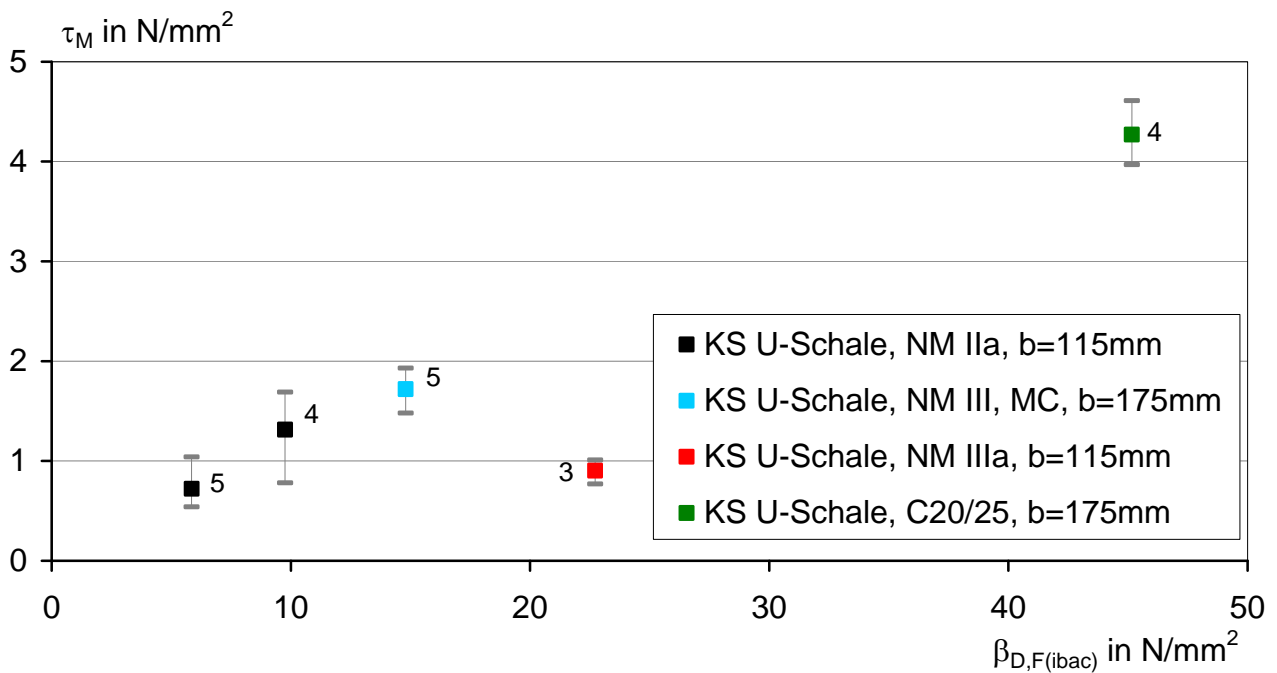
**Bild B3:** Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung in der Lagerfuge, maßgebende Verbundspannung  $\tau_M$  in Abhängigkeit der Fugendruckfestigkeit  $\beta_{D,F(ibac)}$ , Versuchsserien mit NM IIa, Differenzierung nach Steinart Mittelwerte, Streubereich der Einzelwerte und Prüfkörperanzahl



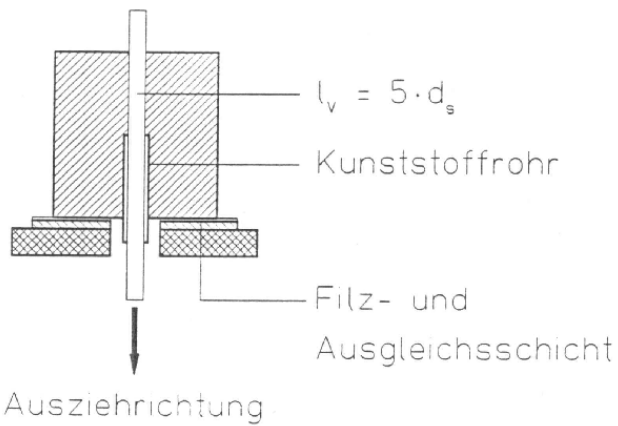
**Bild B4:** Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung in der Lagerfuge, maßgebende Verbundspannung  $\tau_M$  in Abhängigkeit der Fugendruckfestigkeit  $\beta_{D,F(ibac)}$ , Versuchsserien mit NM IIIa, Differenzierung nach Steinart Mittelwerte, Streubereich der Einzelwerte und Prüfkörperanzahl



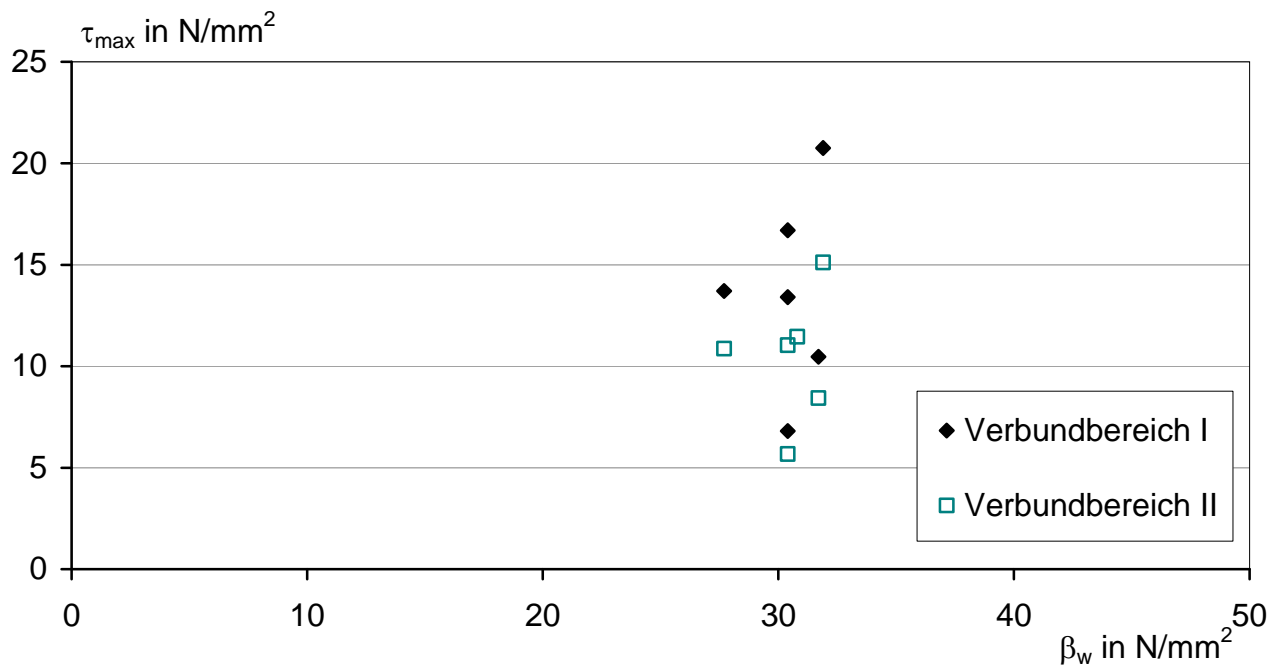
**Bild B5:** Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung in der Lagerfuge, maßgebende Verbundspannung  $\tau_M$  in Abhängigkeit der Fugendruckfestigkeit  $\beta_{D,F(ibac)}$ , Differenzierung nach der bezogenen Rippenfläche  $f_R$ , Einzelwerte



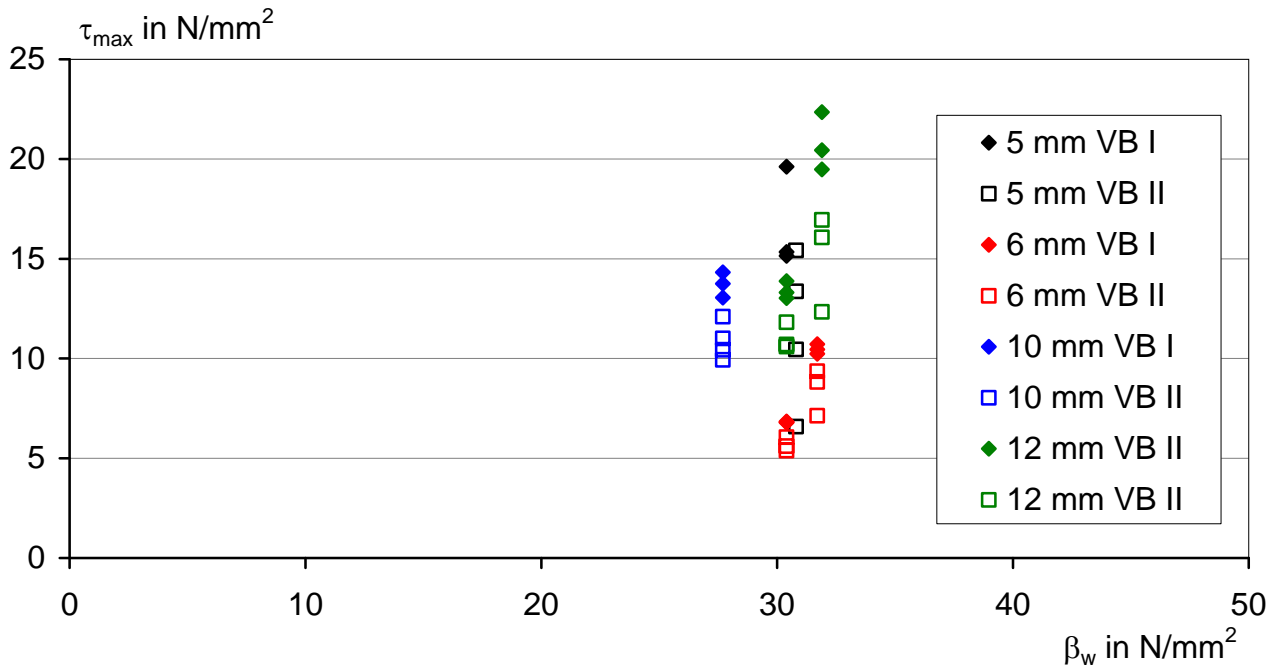
**Bild B6:** Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung in der Lagerfuge, maßgebende Verbundspannung  $\tau_M$  in Abhängigkeit der Fugendruckfestigkeit  $\beta_{D,F(ibac)}$ , Versuchsserien mit KS-U-Schalen, Differenzierung nach Mörtelart, Mittelwerte, Streubereich der Einzelwerte und Prüfkörperanzahl



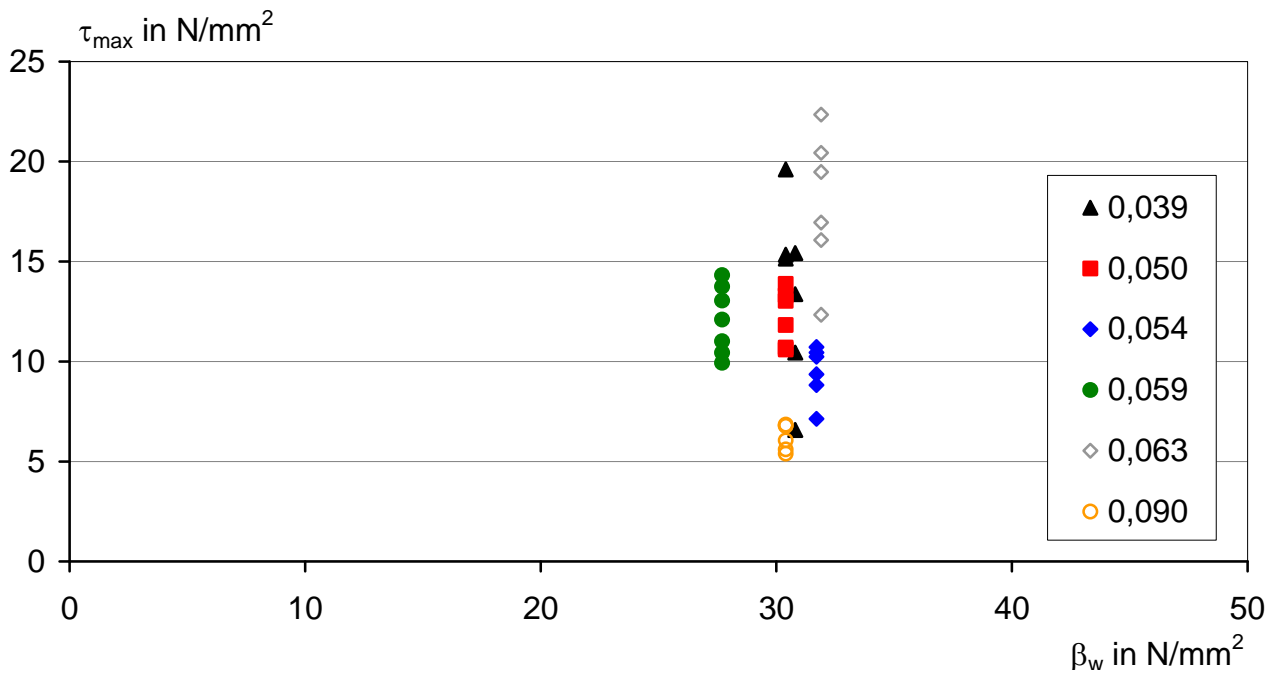
**Bild B7:** Untersuchungen zum Verbund zwischen Bewehrung und Mörtel bzw. Beton nach /X12/, Prüfkörper und Versuchsaufbau (schematische Darstellung)



**Bild B8:** Untersuchungen zum Verbund zwischen Bewehrung und Beton nach /X12/, maximale bezogene Verbundspannung  $\tau_{max}$  in Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit  $\beta_w$ , Versuchsserien mit C25/30, Differenzierung nach Verbundbereich, Mittelwerte



**Bild B9:** Untersuchungen zum Verbund zwischen Bewehrung und Beton nach /X12/, maximale bezogene Verbundspannung  $\tau_{max}$  in Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit  $\beta_w$ , Versuchsserien mit C25/30, Differenzierung nach Bewehrungsdurchmesser und Verbundbereich, Einzelwerte



**Bild B10:** Untersuchungen zum Verbund zwischen Bewehrung und Beton nach /X12/, maximale bezogene Verbundspannung  $\tau_{max}$  in Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit  $\beta_w$ , Versuchsserien mit C25/30, Differenzierung nach der bezogenen Rippenfläche  $f_R$ , Einzelwerte



Bild B11: Kalksandstein KS 20-2,0 2DF (l/b/h 240/115/113 mm)

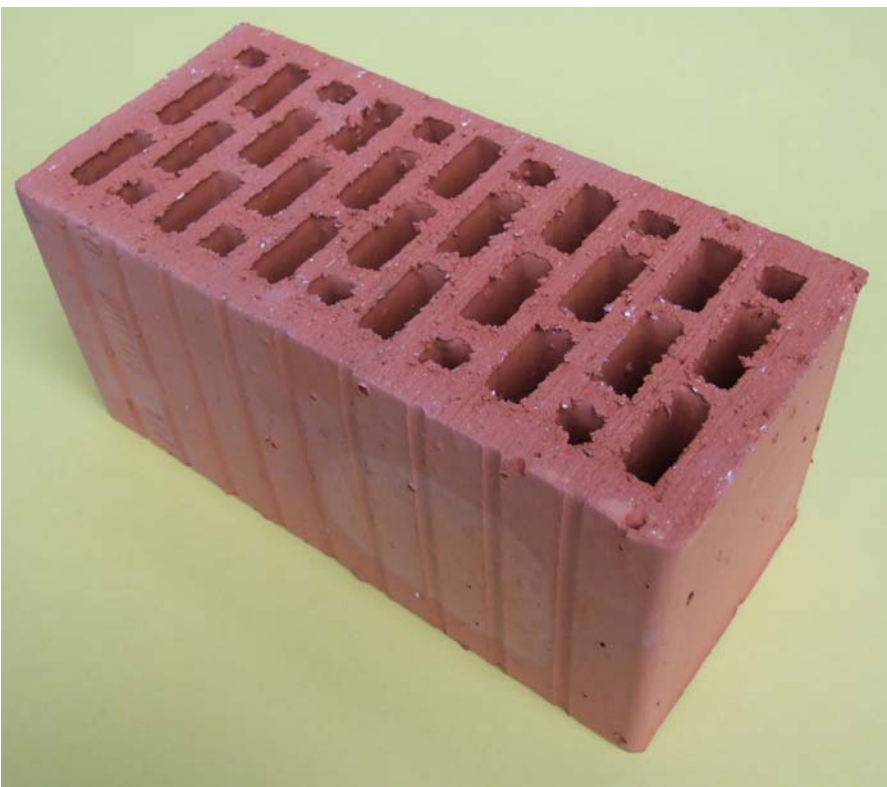
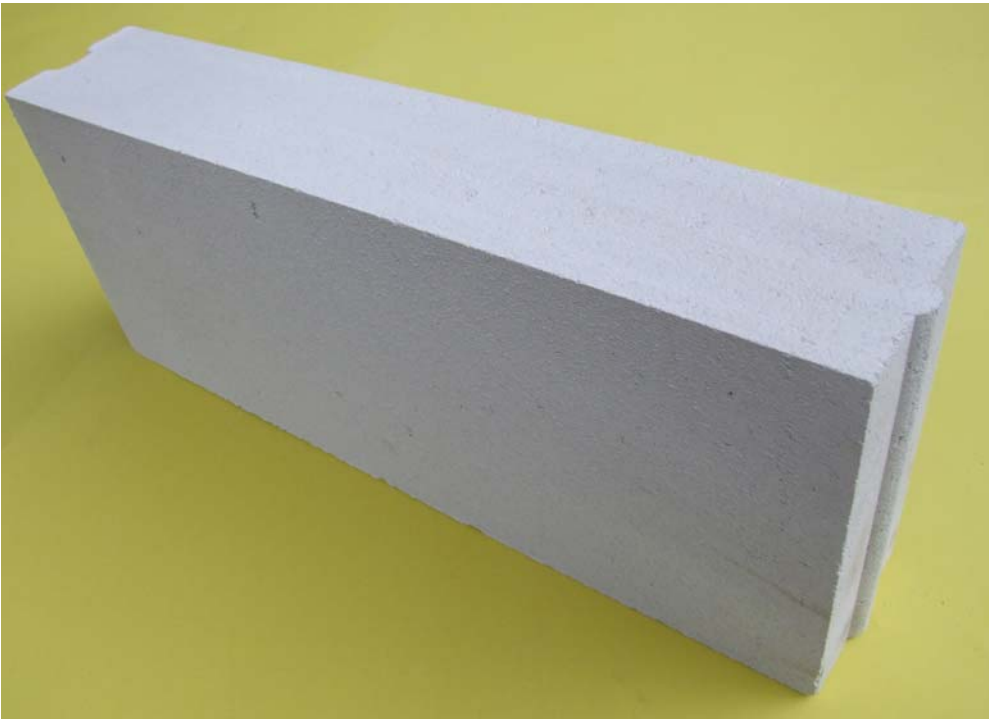


Bild B12: Hochlochziegel HLz 12-0,9 2DF (l/b/h 240/115/113 mm)





**Bild B13:** Porenbeton-Planstein PP 4-0,55 (l/b/h 625/115/250 mm)



**Bild B14:** Teilstück (Format 2DF) aus Porenbeton-Planstein  
PP 4-0,55 (l/b/h 240/115/113 mm)



Bild B15: Leichtbetonstein V 4-1,0 2DF (l/b/h 240/115/113 mm)



Bild B16: Kalksandstein KS L-R(P)NT 20-1,2 4DF  
(l/b/h 248/115/248 mm)



Bild B17: Kalksandstein KS 20-2,0-1,2 8DF  
(l/b/h 248/240/238 mm)



Bild B18: Kalksandstein U-Schale KS-U 20-2,0-1,2-240



Bild B19: Betonstahl in Ringen B500 A mit drei Rippenreihen,  $d_s = 6$  mm



Bild B20: Betonstabstahl B500 B mit zwei Rippenreihen, davon eine alternierend,  $d_s = 14$  mm

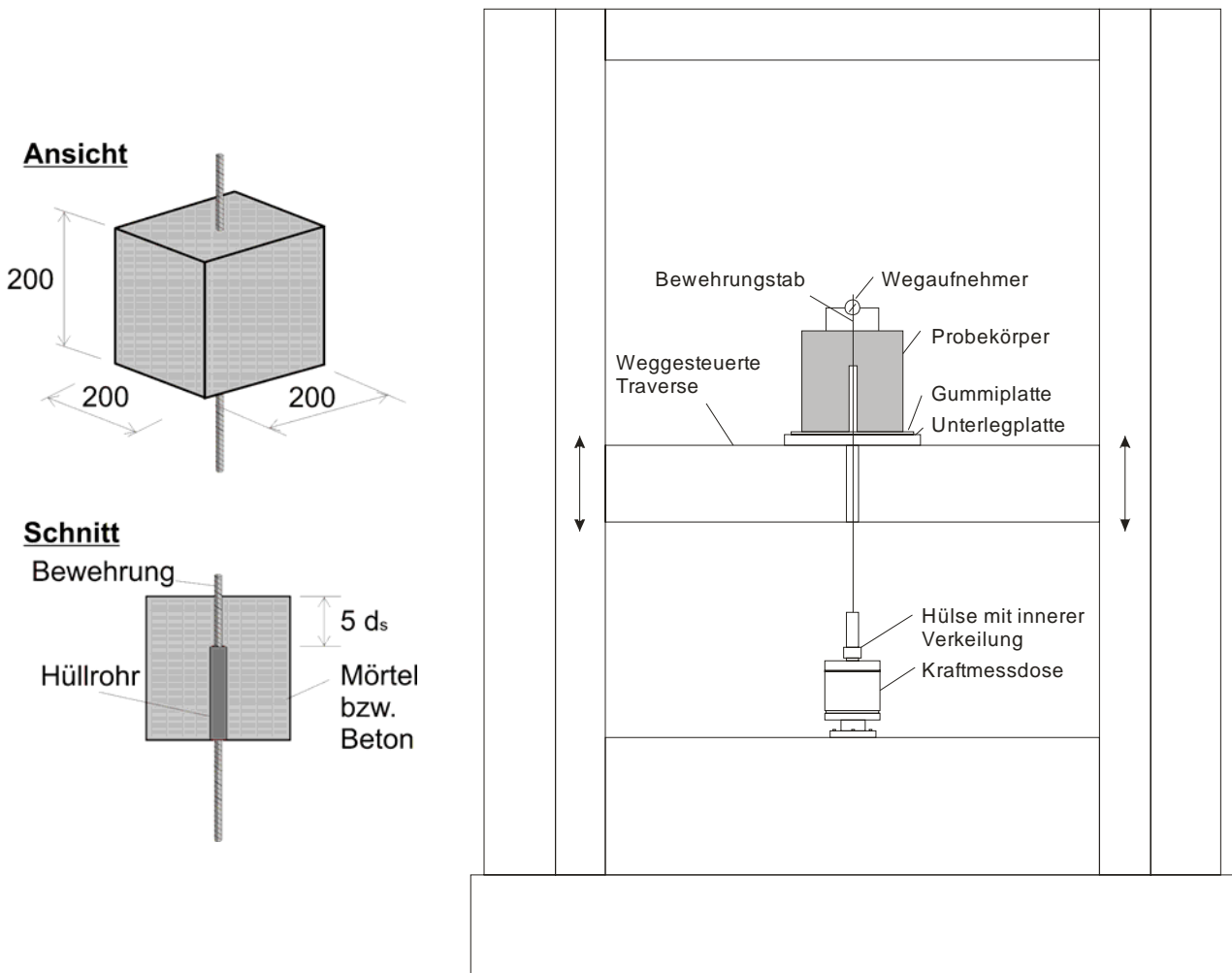


Bild B21: Bewehrung mit Kunststoffrohrumhüllung für Ausziehversuche nach RILEM /X12/

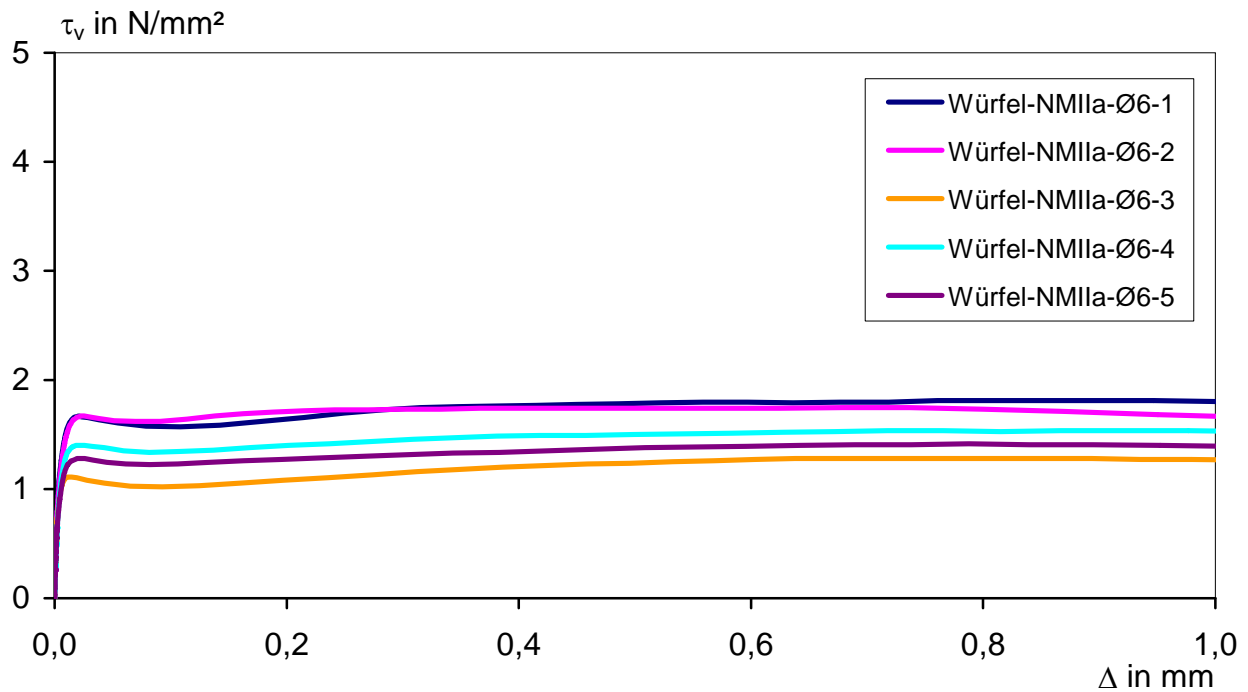




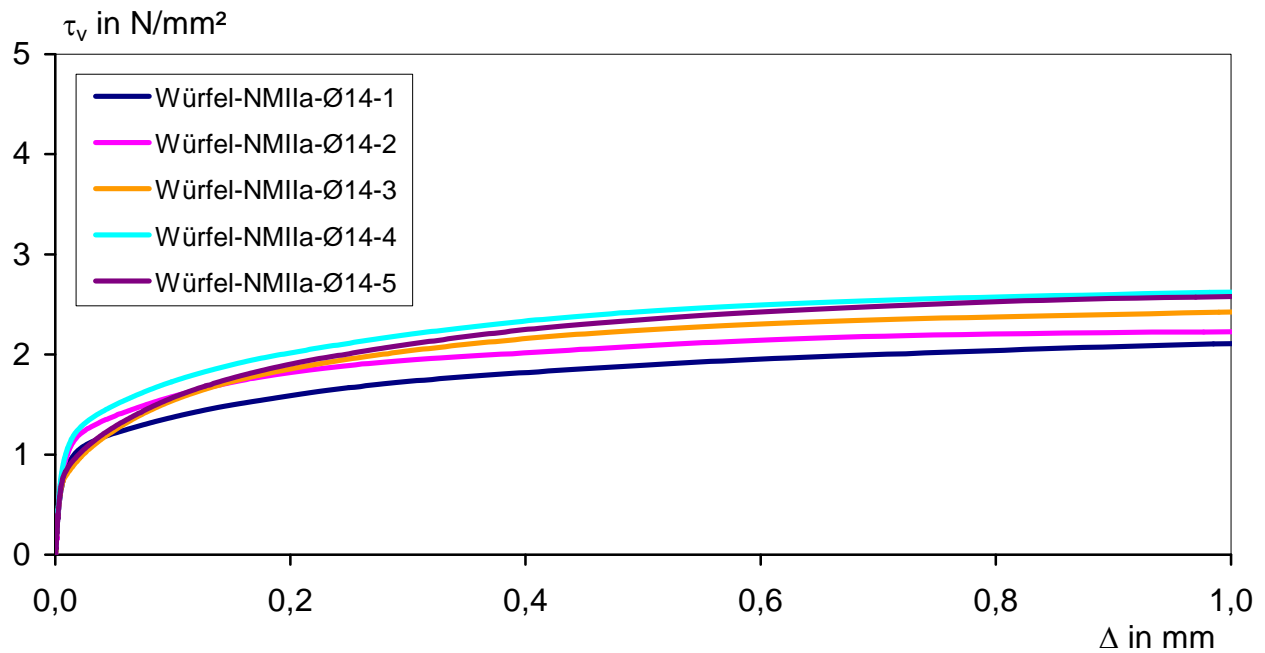
**Bild B22:** Untersuchungen zum Verbund zwischen Bewehrung und Mörtel bzw. Beton nach /X12/, Herstellung der Prüfkörper



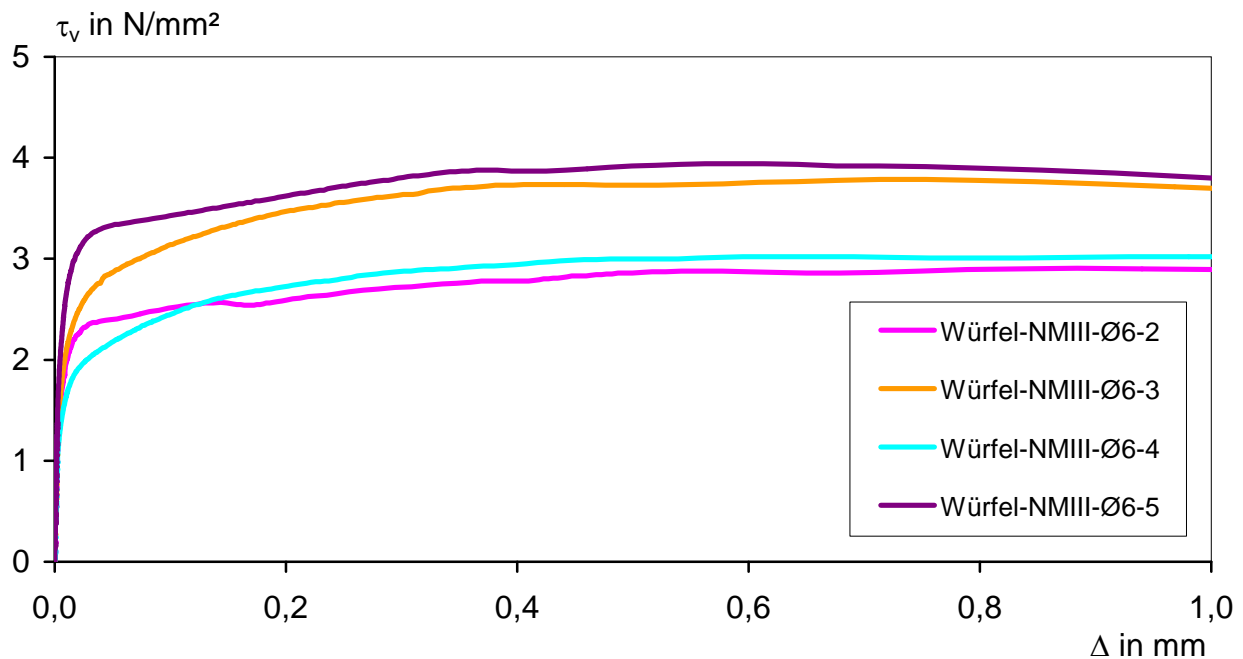
**Bild B23:** Untersuchungen zum Verbund zwischen Bewehrung und Mörtel bzw. Beton nach /X12/, Prüfkörper und Versuchsaufbau (schematische Darstellung)



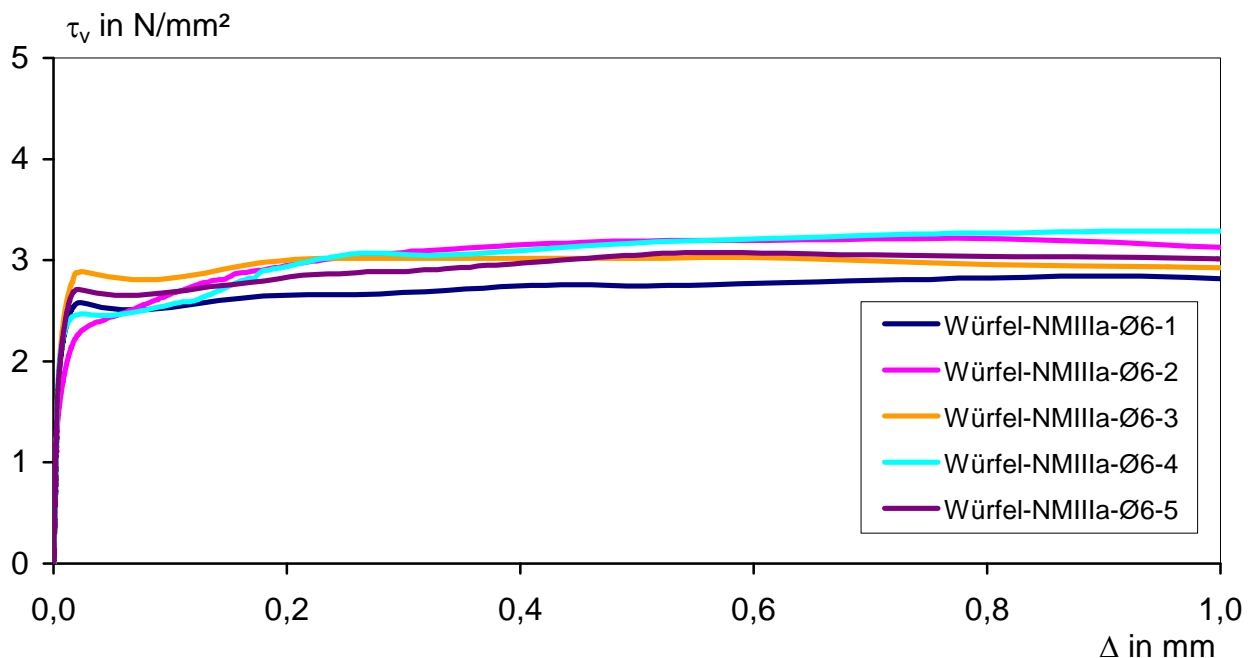
**Bild B24:** Untersuchungen zum Verbund zwischen Bewehrung und Mörtel bzw. Beton nach /X12/, Zusammenhang zwischen Verbundspannung  $\tau_v$  und Schlupf  $\Delta$ , Versuchsserie mit NM IIa und  $d_s = 6$  mm



**Bild B25:** Untersuchungen zum Verbund zwischen Bewehrung und Mörtel bzw. Beton nach /X12/, Zusammenhang zwischen Verbundspannung  $\tau_v$  und Schlupf  $\Delta$ , Versuchsserie mit NM IIa und  $d_s = 14$  mm

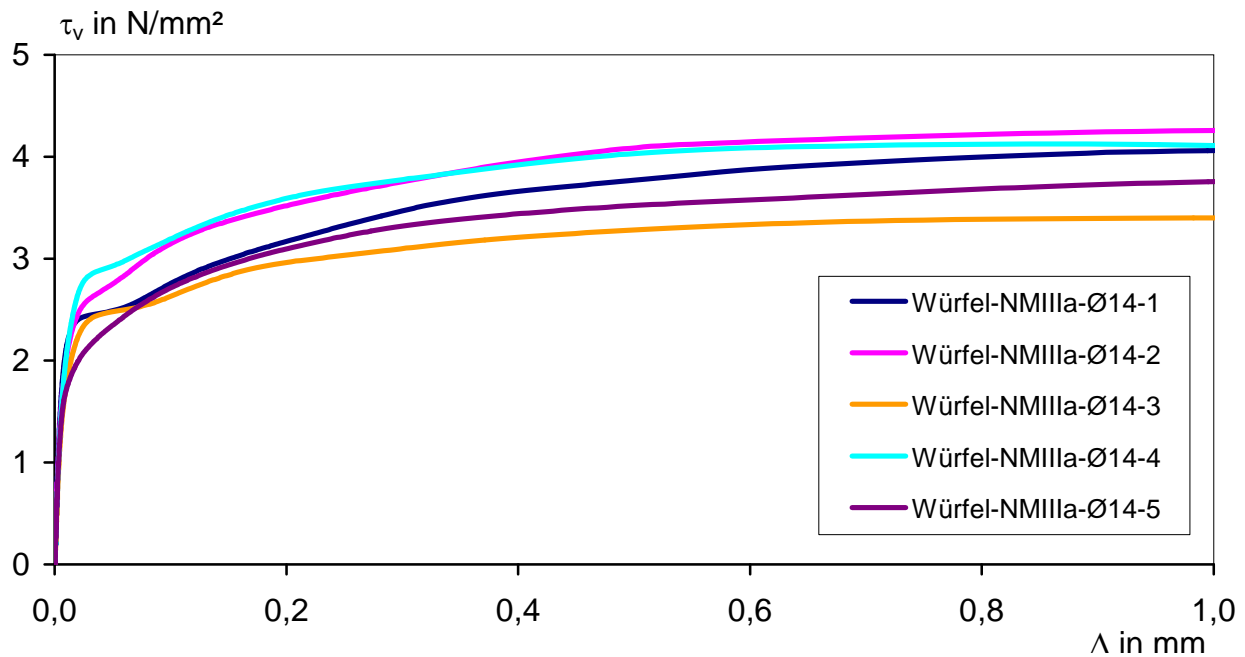


**Bild B26:** Untersuchungen zum Verbund zwischen Bewehrung und Mörtel bzw. Beton nach /X12/, Zusammenhang zwischen Verbundspannung  $\tau_v$  und Schlupf  $\Delta$ , Versuchsserie mit NM III und  $d_s = 6$  mm

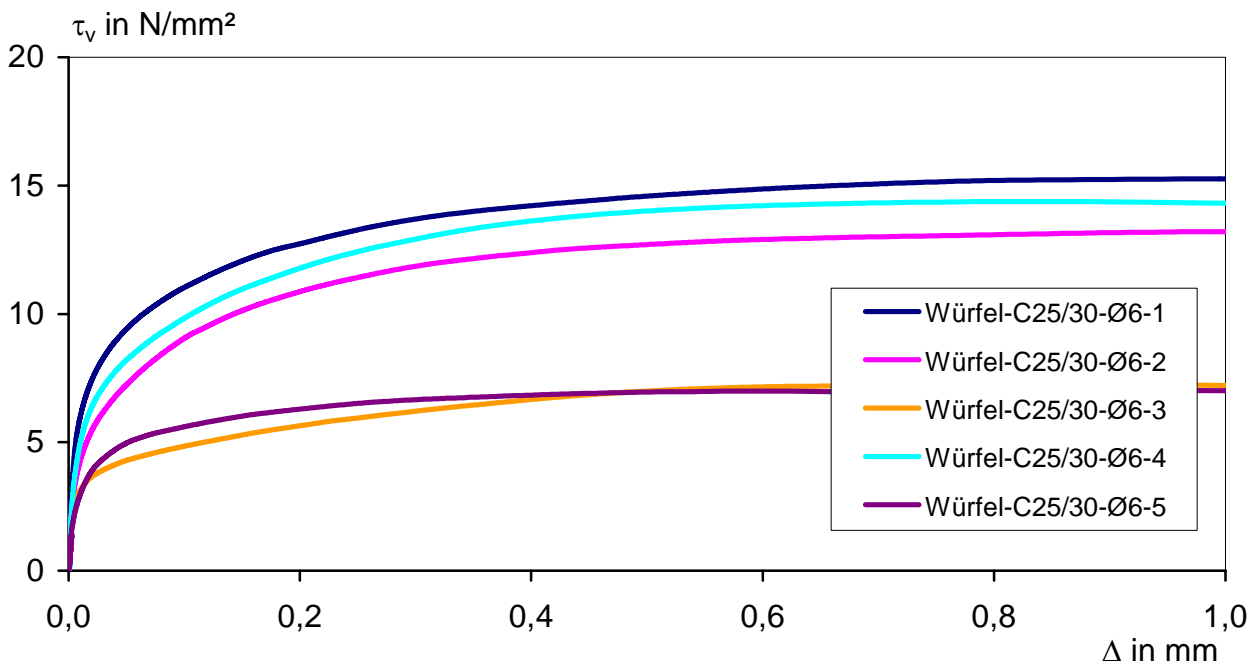


**Bild B27:** Untersuchungen zum Verbund zwischen Bewehrung und Mörtel bzw. Beton nach /X12/, Zusammenhang zwischen Verbundspannung  $\tau_v$  und Schlupf  $\Delta$ , Versuchsserie mit NM IIIa und  $d_s = 6$  mm

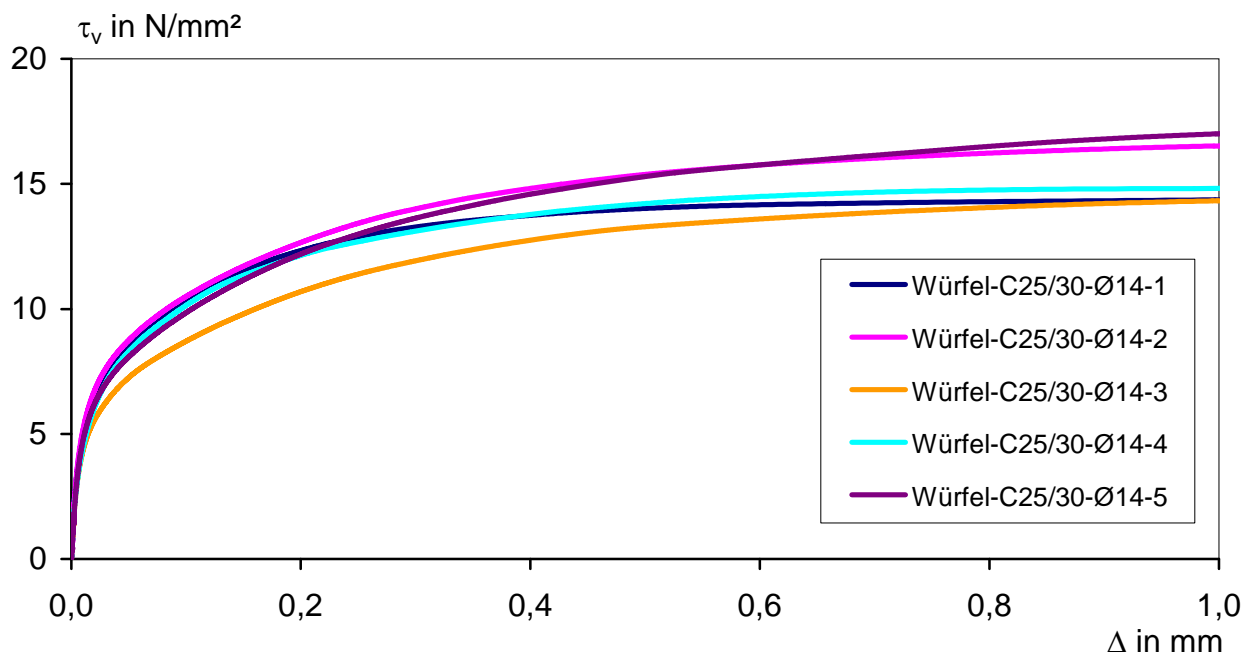




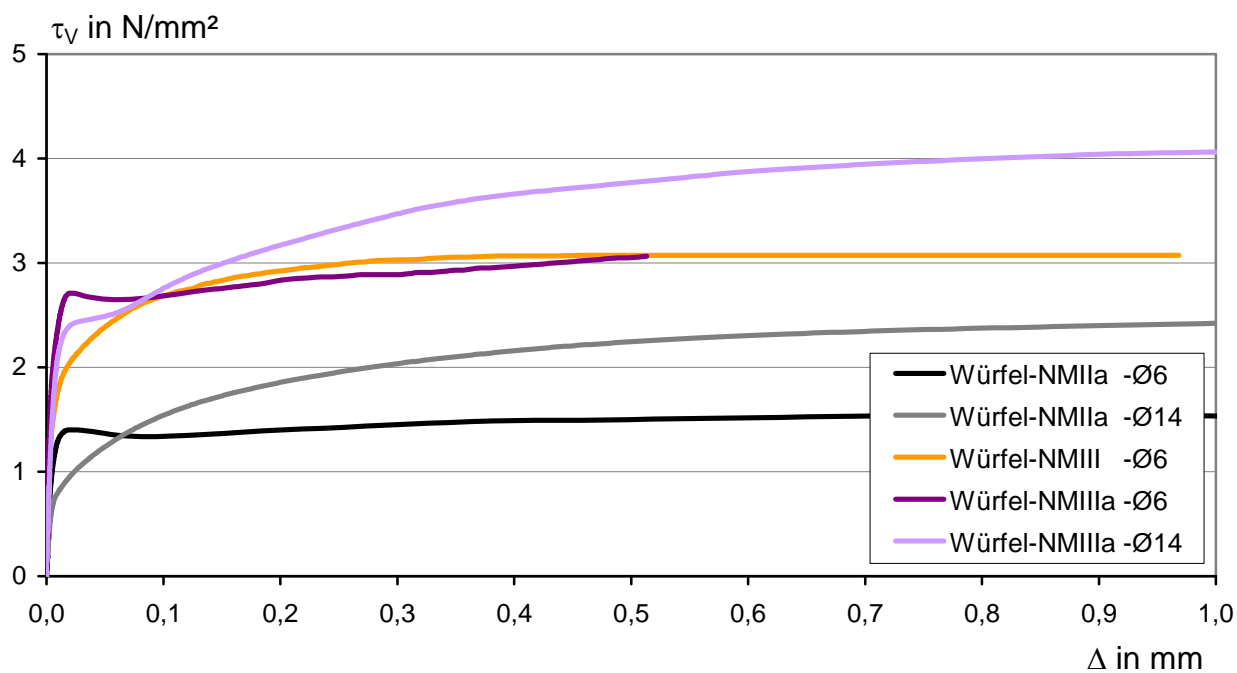
**Bild B28:** Untersuchungen zum Verbund zwischen Bewehrung und Mörtel bzw. Beton nach /X12/, Zusammenhang zwischen Verbundspannung  $\tau_v$  und Schlupf  $\Delta$ , Versuchsserie mit NM IIIa und  $d_s = 14$  mm



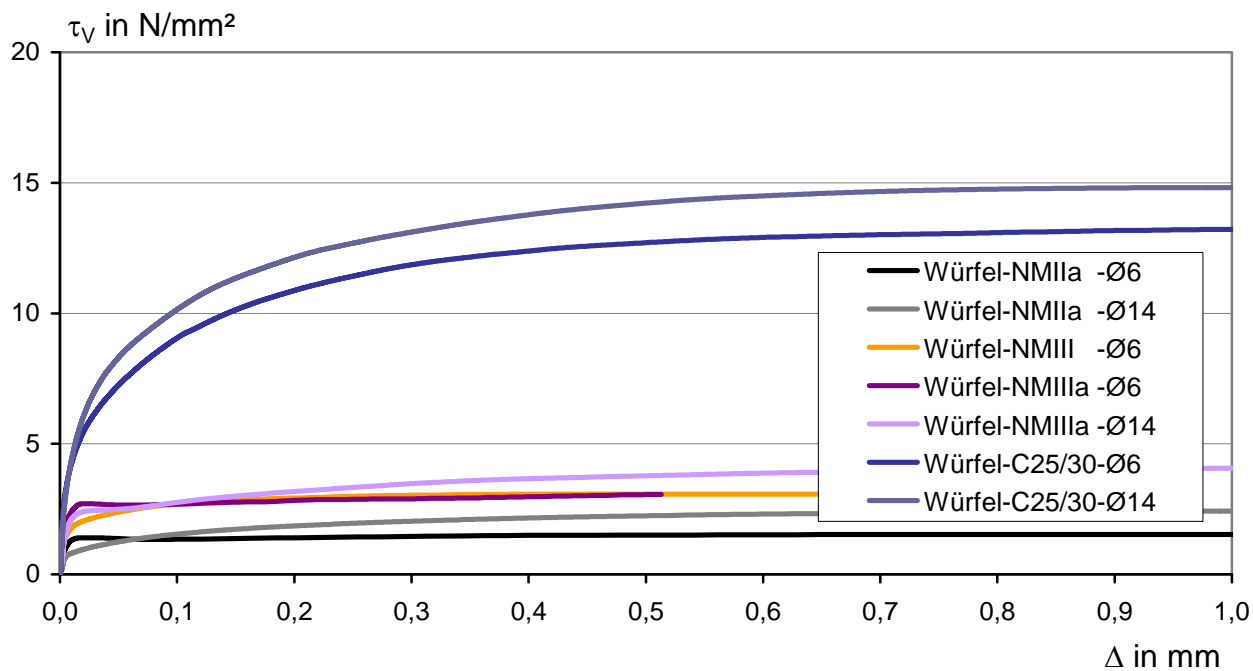
**Bild B29:** Untersuchungen zum Verbund zwischen Bewehrung und Mörtel bzw. Beton nach /X12/, Zusammenhang zwischen Verbundspannung  $\tau_v$  und Schlupf  $\Delta$ , Versuchsserie mit C25/30 und  $d_s = 6$  mm



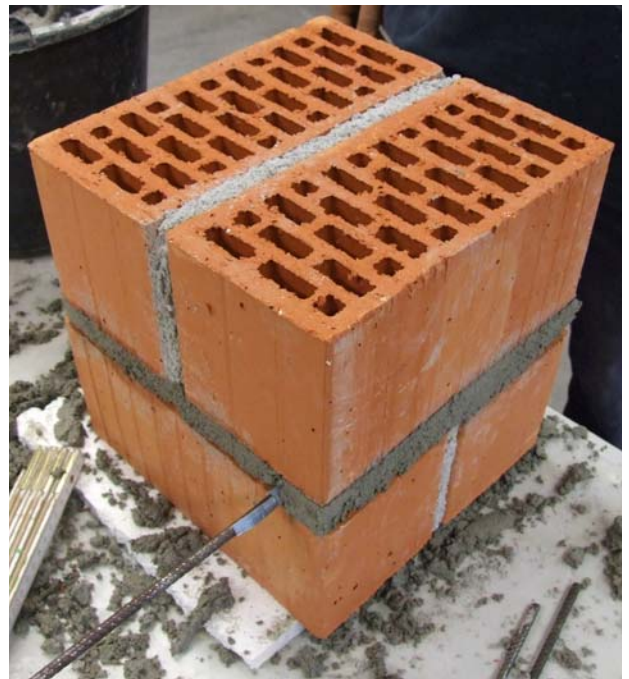
**Bild B30:** Untersuchungen zum Verbund zwischen Bewehrung und Mörtel bzw. Beton nach /X12/, Zusammenhang zwischen Verbundspannung  $\tau_v$  und Schlupf  $\Delta$ , Versuchsserie mit C25/30 und  $d_s = 14$  mm



**Bild B31:** Untersuchungen zum Verbund zwischen Bewehrung und Mörtel bzw. Beton nach /X12/, gemittelte Verbundspannung ( $\tau_v$ ) – Schlupf( $\Delta$ ) – Kurven, Versuchsserien mit Normalmörtel; Mittelwerte



**Bild B32:** Untersuchungen zum Verbund zwischen Bewehrung und Mörtel bzw. Beton nach /X12/, gemittelte Verbundspannung ( $\tau_v$ ) – Schlupf( $\Delta$ ) – Kurven, Mittelwerte



**Bild B33:** Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung in der Lagerfuge, Herstellung des Mauerwerkprüfkörpers aus Hochlochziegeln

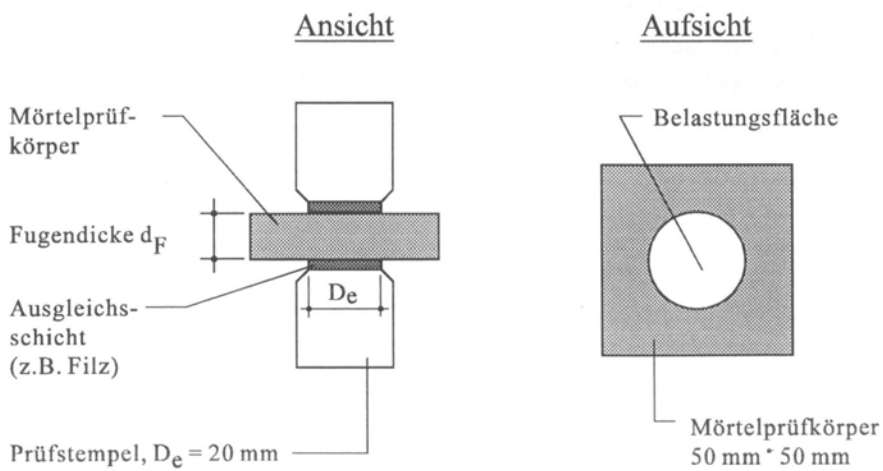




**Bild B34:** Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung in der Lagerfuge, Herstellung des Mauerwerkprüfkörpers aus Kalksandsteinen



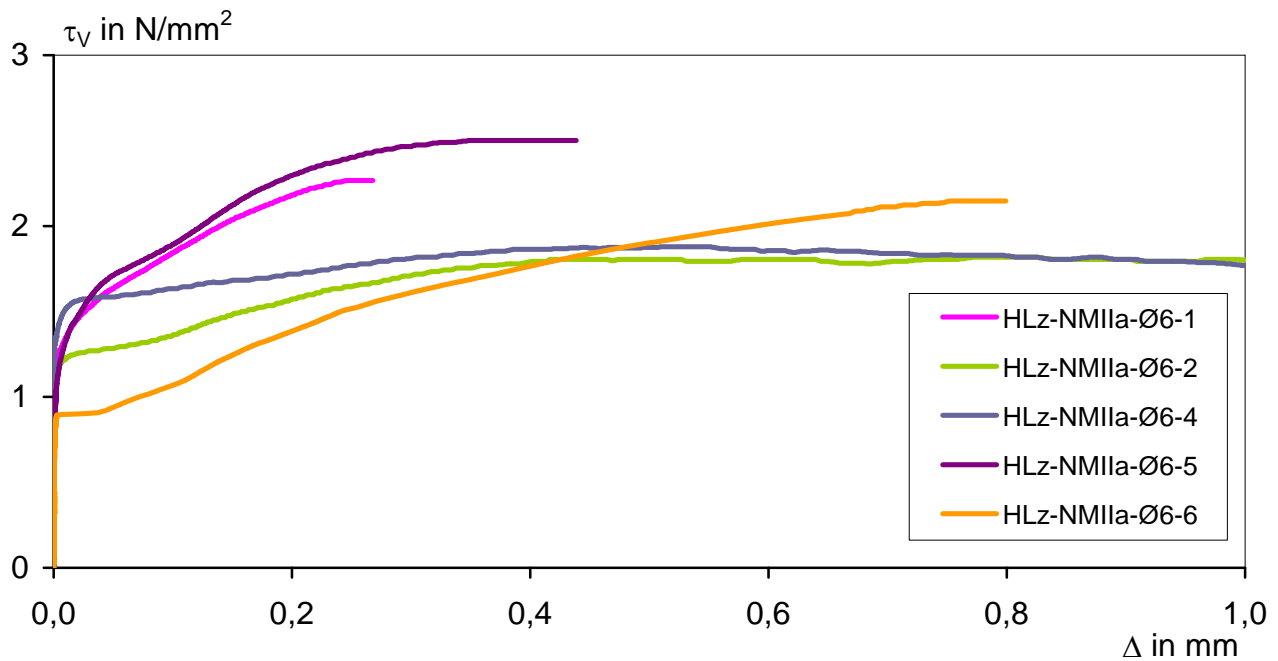
**Bild B35:** Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung in der Lagerfuge, Mauerwerkprüfkörper aus Leichtbeton- (links) und Porenbetonsteinen (rechts)



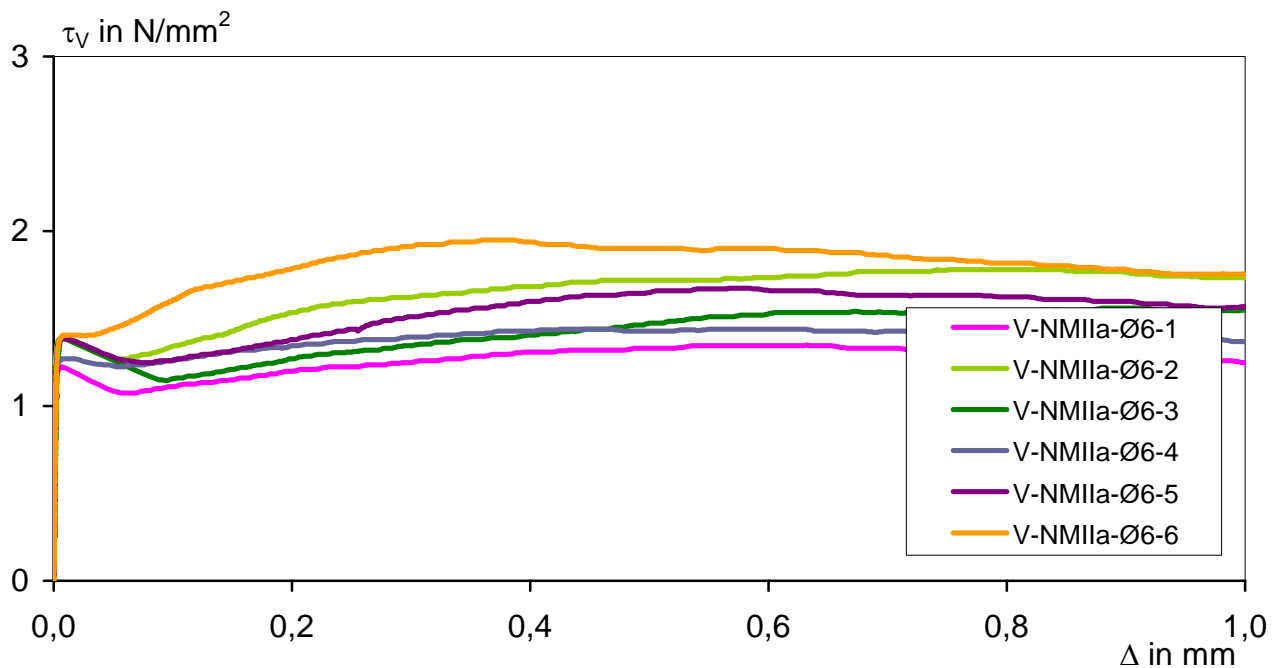
**Bild B36:** Prüfung der Fugendruckfestigkeit an aus der Lagerfuge entnommenen Mörtelscheiben nach /15/, Prüfkörper und Versuchsaufbau (schematische Darstellung)



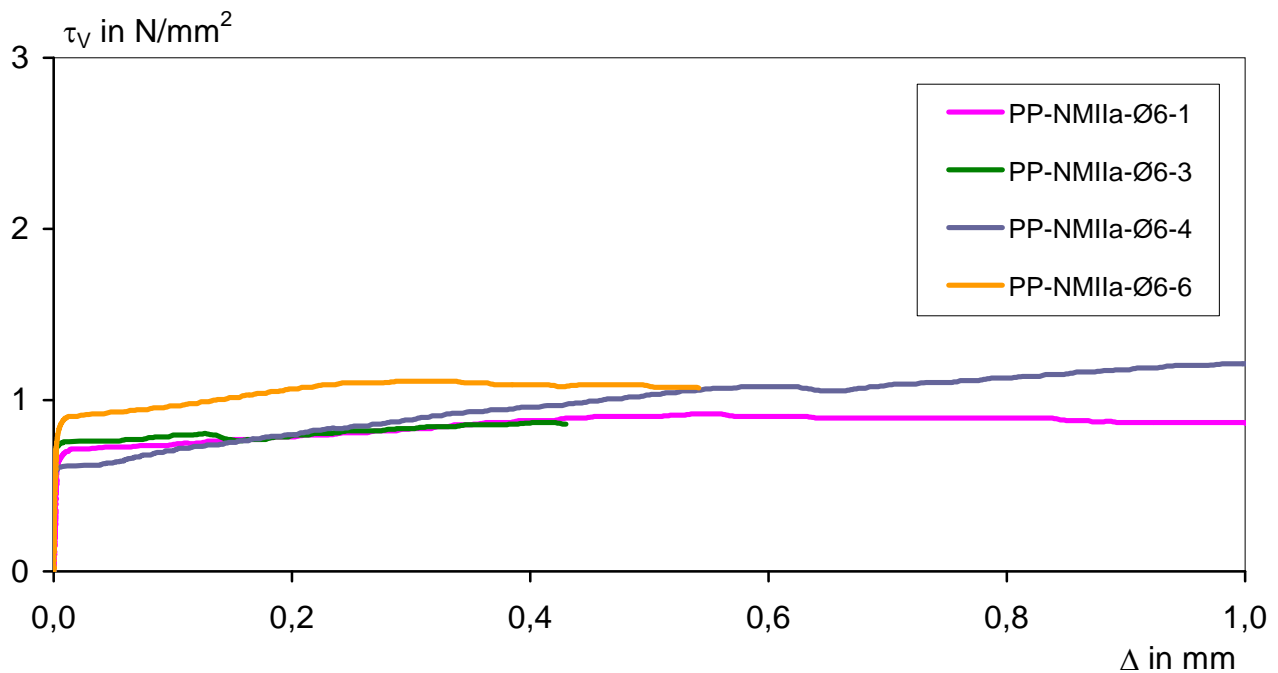
**Bild B37:** Prüfung der Fugendruckfestigkeit an aus der Lagerfuge entnommenen Mörtelscheiben nach /15/



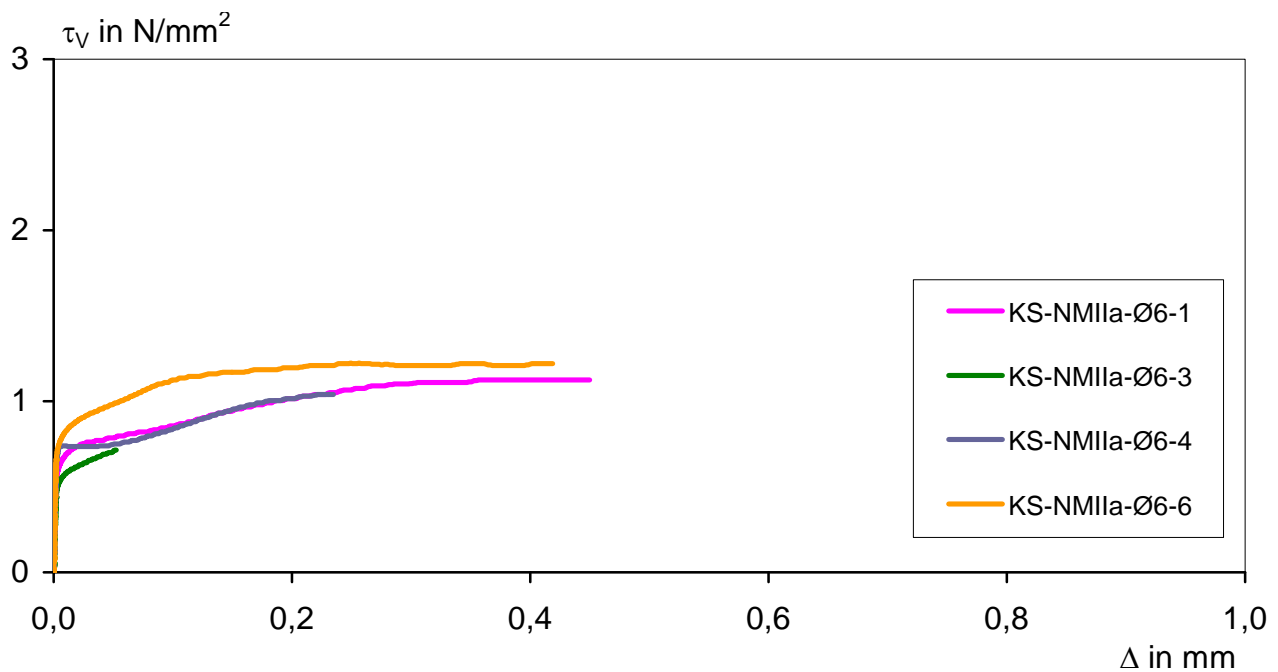
**Bild B38:** Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung in der Lagerfuge, Zusammenhang zwischen Verbundspannung  $\tau_v$  und Schlupf  $\Delta$ , Versuchsserie mit Hochlochziegeln und Normalmörtel NM IIa, Bewehrungsdurchmesser  $d_s = 6$  mm



**Bild B39:** Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung in der Lagerfuge, Zusammenhang zwischen Verbundspannung  $\tau_v$  und Schlupf  $\Delta$ , Versuchsserie mit Leichtbetonsteinen und Normalmörtel NM IIa, Bewehrungsdurchmesser  $d_s = 6$  mm

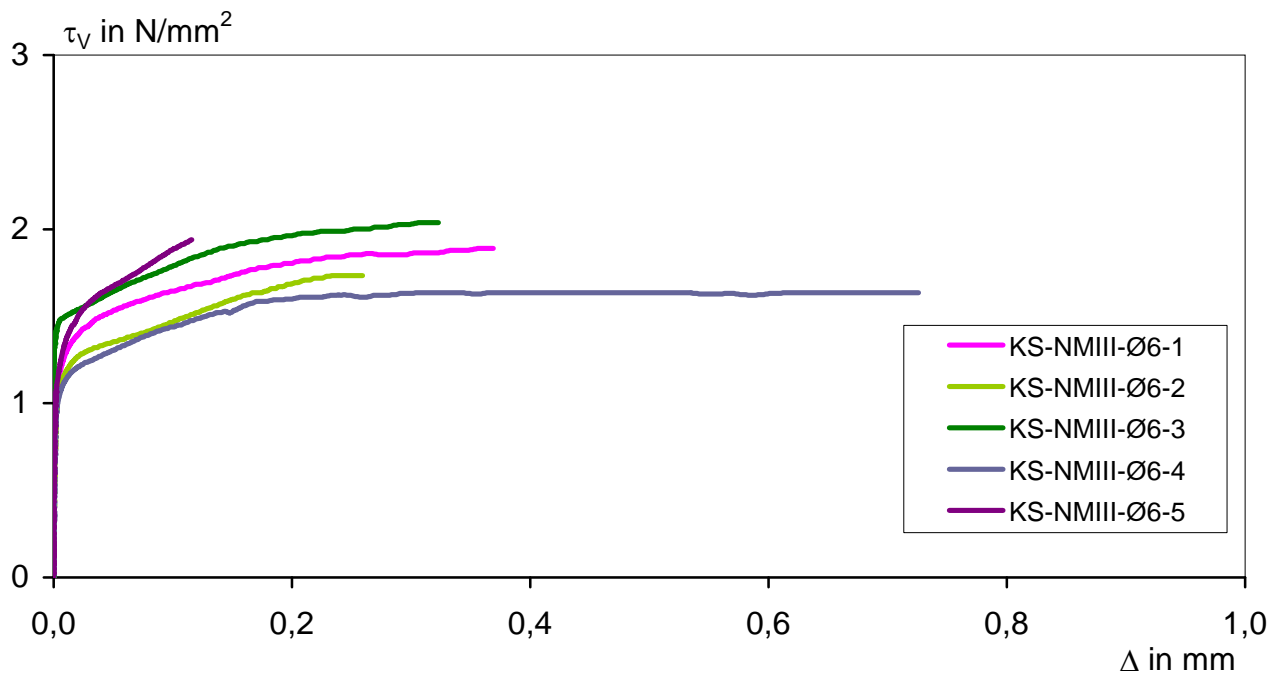


**Bild B40:** Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung in der Lagerfuge, Zusammenhang zwischen Verbundspannung  $\tau_V$  und Schlupf  $\Delta$ , Versuchsserie mit Porenbetonsteinen und Normalmörtel NM IIa, Bewehrungsdurchmesser  $d_s = 6 \text{ mm}$

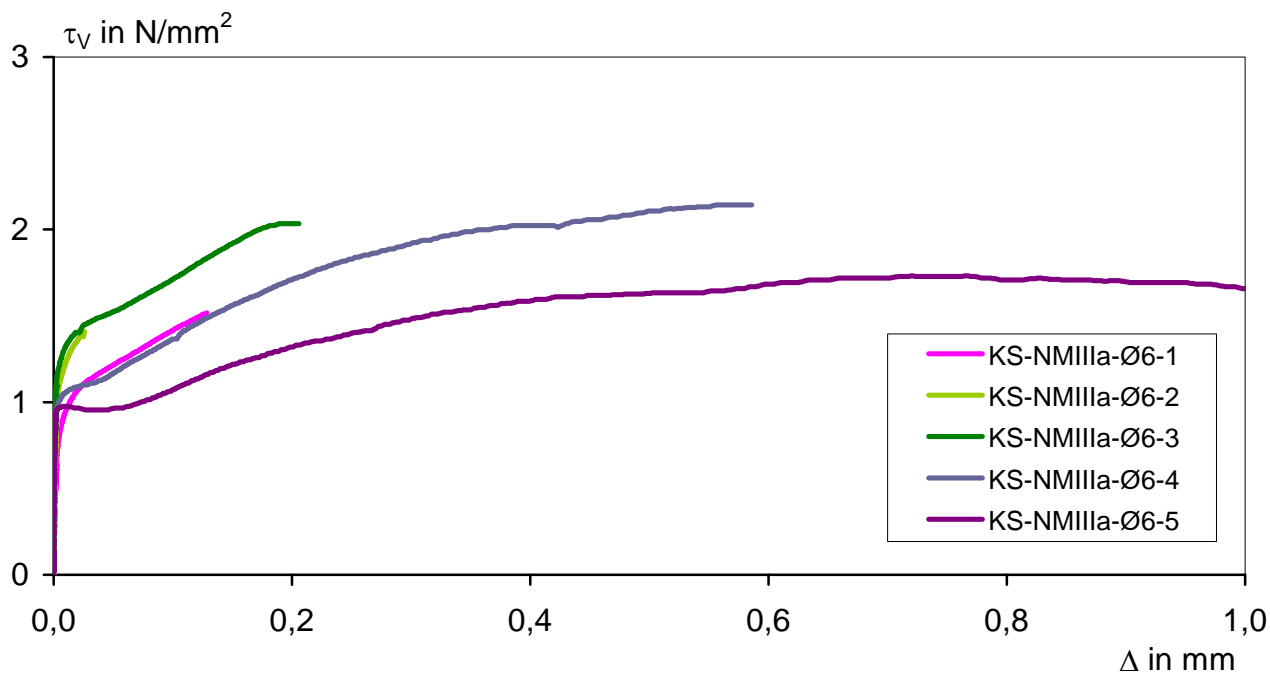


**Bild B41:** Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung in der Lagerfuge, Zusammenhang zwischen Verbundspannung  $\tau_V$  und Schlupf  $\Delta$ , Versuchsserie mit Kalksandsteinen und Normalmörtel NM IIa, Bewehrungsdurchmesser  $d_s = 6 \text{ mm}$





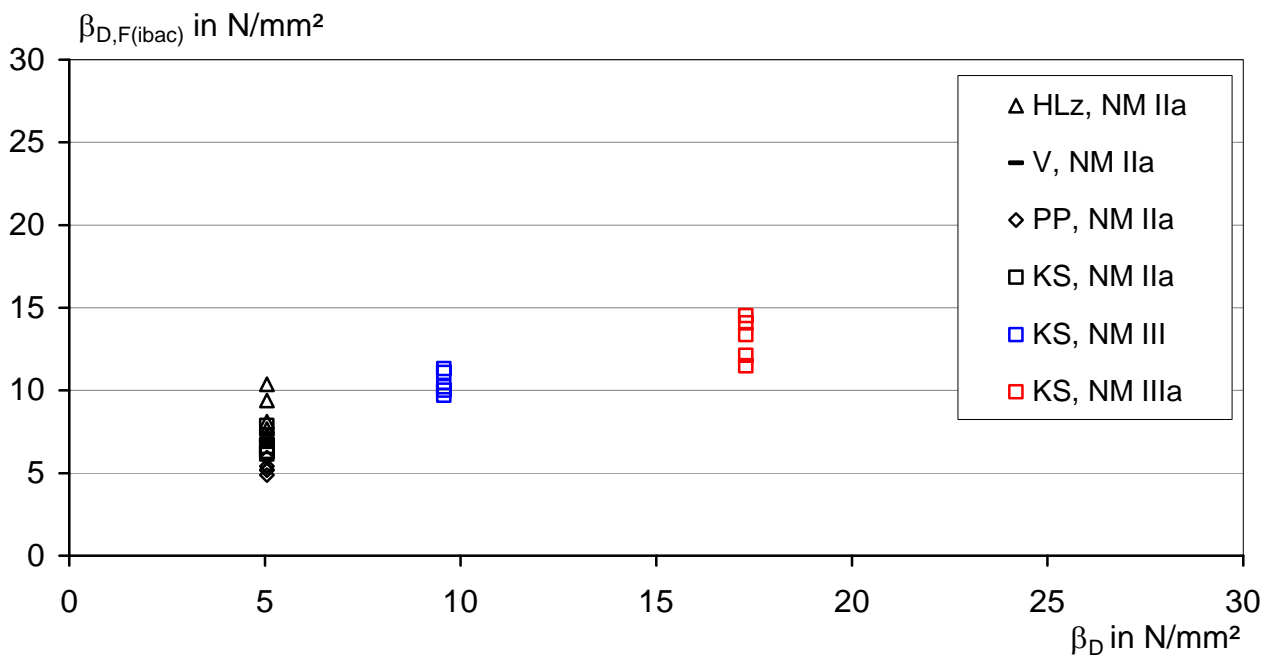
**Bild B42:** Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung in der Lagerfuge, Zusammenhang zwischen Verbundspannung  $\tau_V$  und Schlupf  $\Delta$ , Versuchsserie mit Kalksandsteinen und Normalmörtel NM III, Bewehrungsdurchmesser  $d_s = 6$  mm



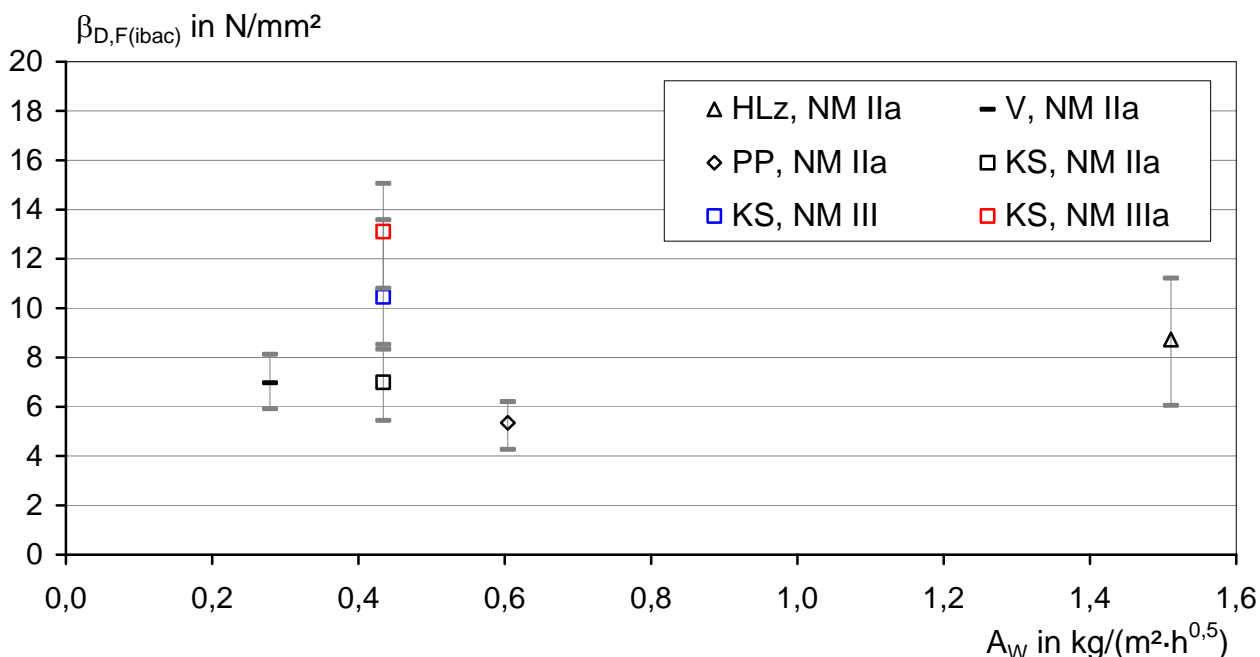
**Bild B43:** Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung in der Lagerfuge, Zusammenhang zwischen Verbundspannung  $\tau_V$  und Schlupf  $\Delta$ , Versuchsserie mit Kalksandsteinen und Normalmörtel NM IIIa, Bewehrungsdurchmesser  $d_s = 6$  mm



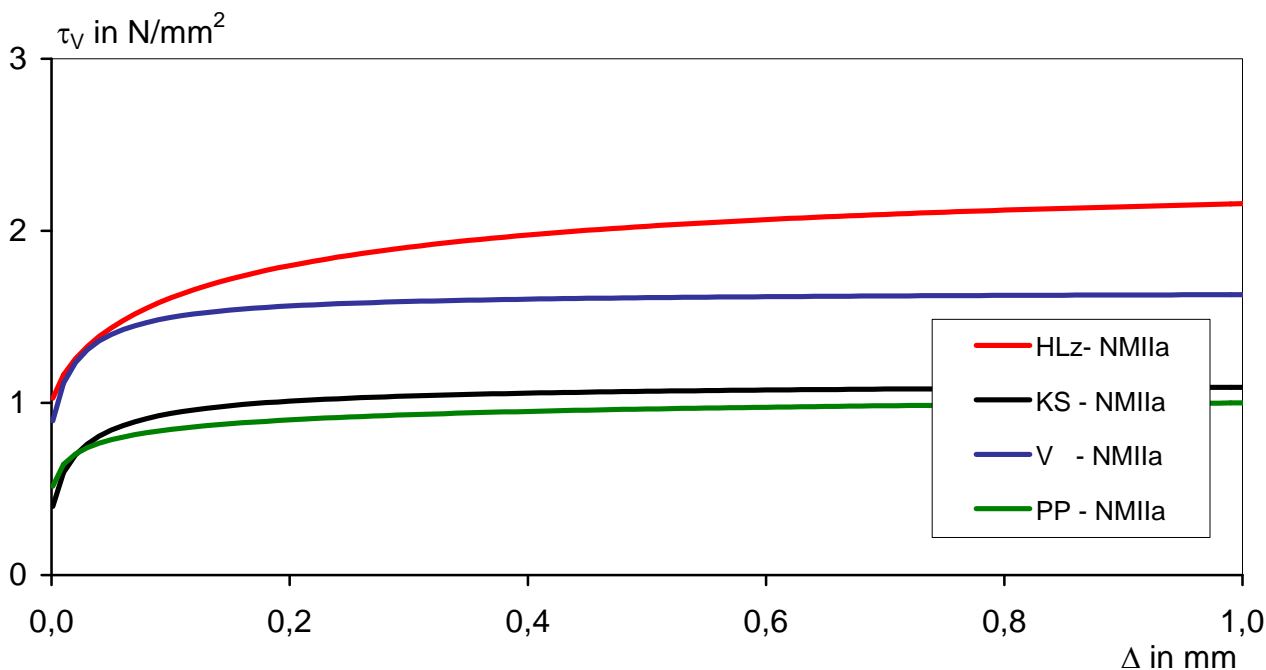
**Bild B44:** Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung in der Lagerfuge, Mörtel aus der Lagerfuge mit Ausbildung von Längsrissen entlang des Stabes



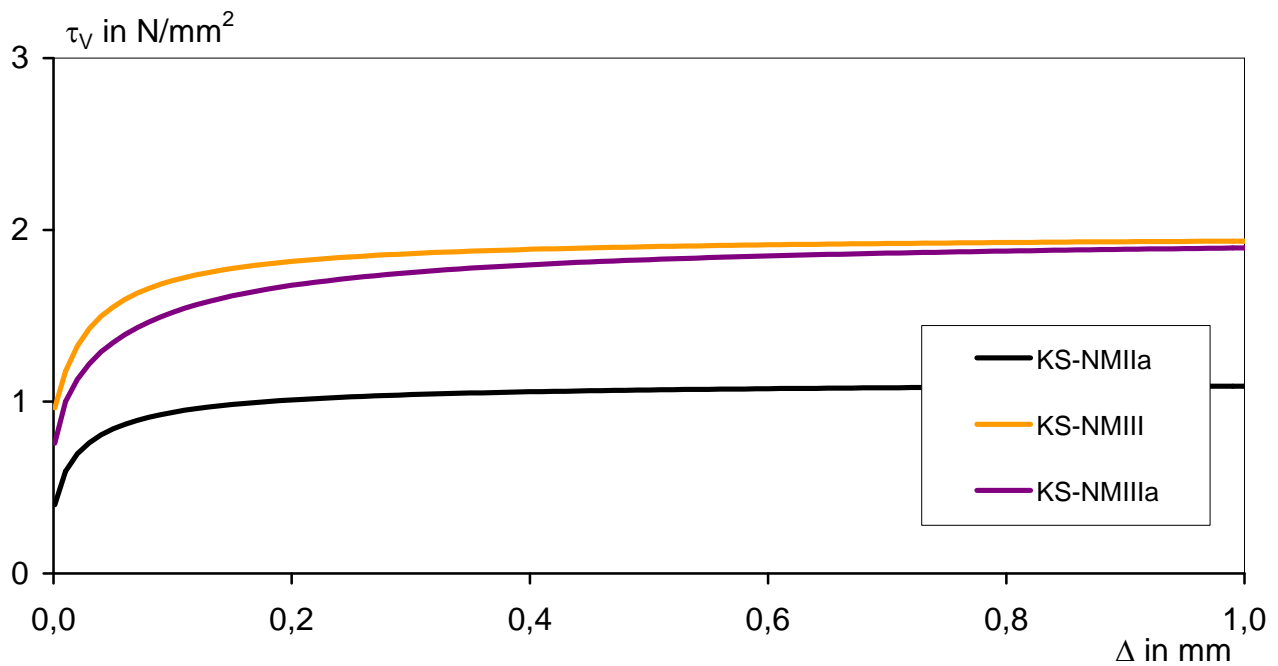
**Bild B45:** Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung in der Lagerfuge, Zusammenhang zwischen der Fugendruckfestigkeit  $\beta_{D,F(ibac)}$  und der Mörteldruckfestigkeit  $\beta_D$ , alle Versuchsserien, Einzelwerte



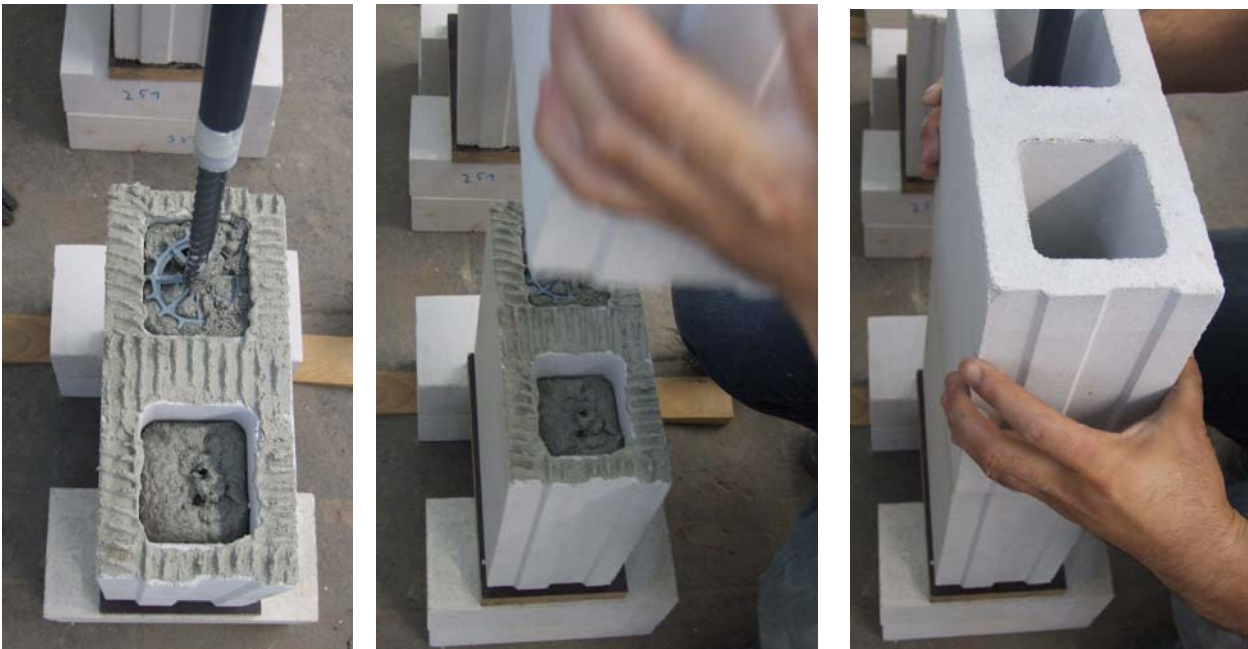
**Bild B46:** Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung in der Lagerfuge, Zusammenhang zwischen der Fugendruckfestigkeit  $\beta_{D,F(ibac)}$  und dem kapillaren Wasseraufnahmekoeffizienten  $A_W$  der Mauersteine, Mittelwerte und Streubereich der Einzelwerte



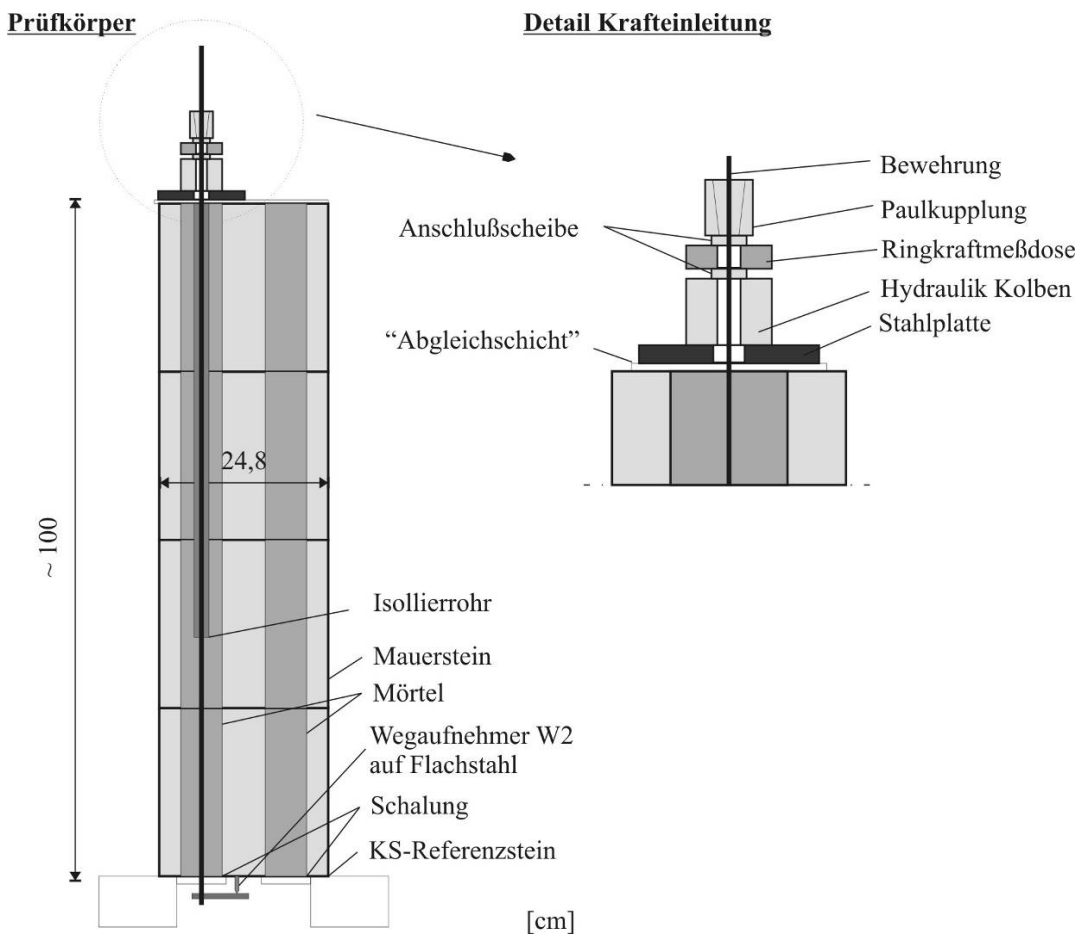
**Bild B47:** Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung in der Lagerfuge, mittlere Verbundspannung( $\tau_V$ )–Schlupf( $\Delta$ )–Kurven, Differenzierung nach Steinart, Versuchsserien mit Normalmörtel NM IIa, Bewehrungsdurchmesser  $d_s = 6$  mm



**Bild B48:** Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung in der Lagerfuge, mittlere Verbundspannung( $\tau_v$ )–Schlupf( $\Delta$ )–Kurven, Differenzierung nach Mörtelgruppe, Versuchsserien mit Kalksandsteinen, Bewehrungsdurchmesser  $d_s = 6$  mm



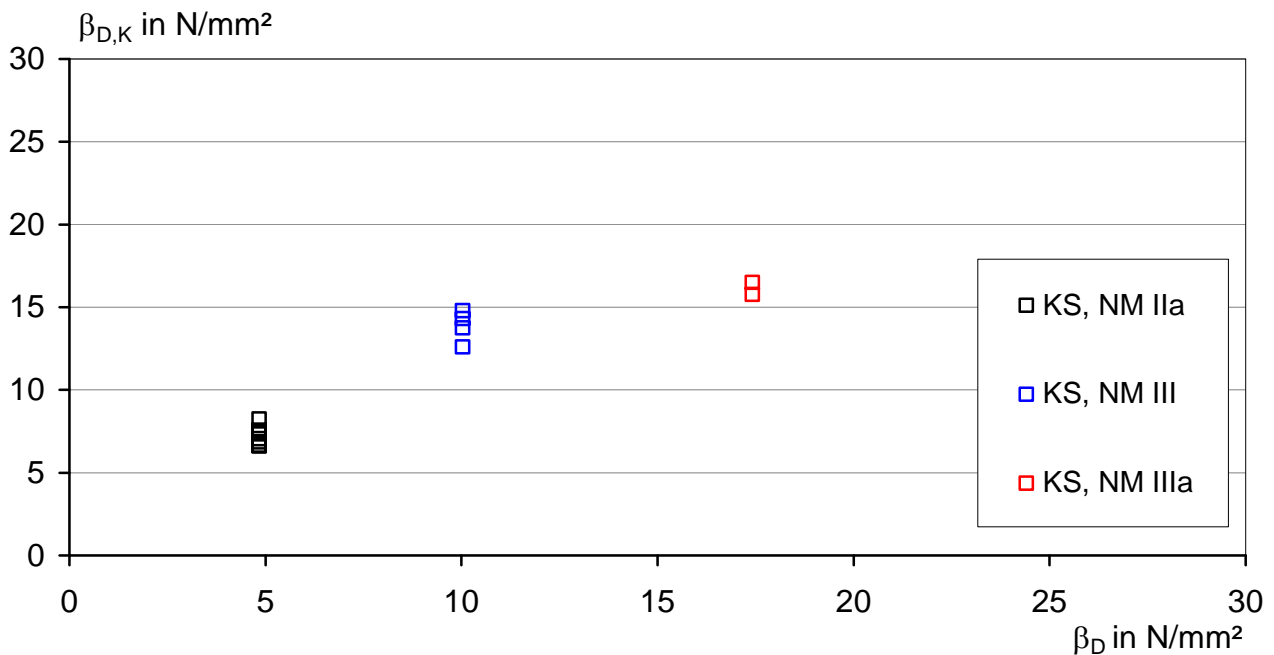
**Bild B49:** Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung in kleinen Aussparungen, Herstellung der Prüfkörper



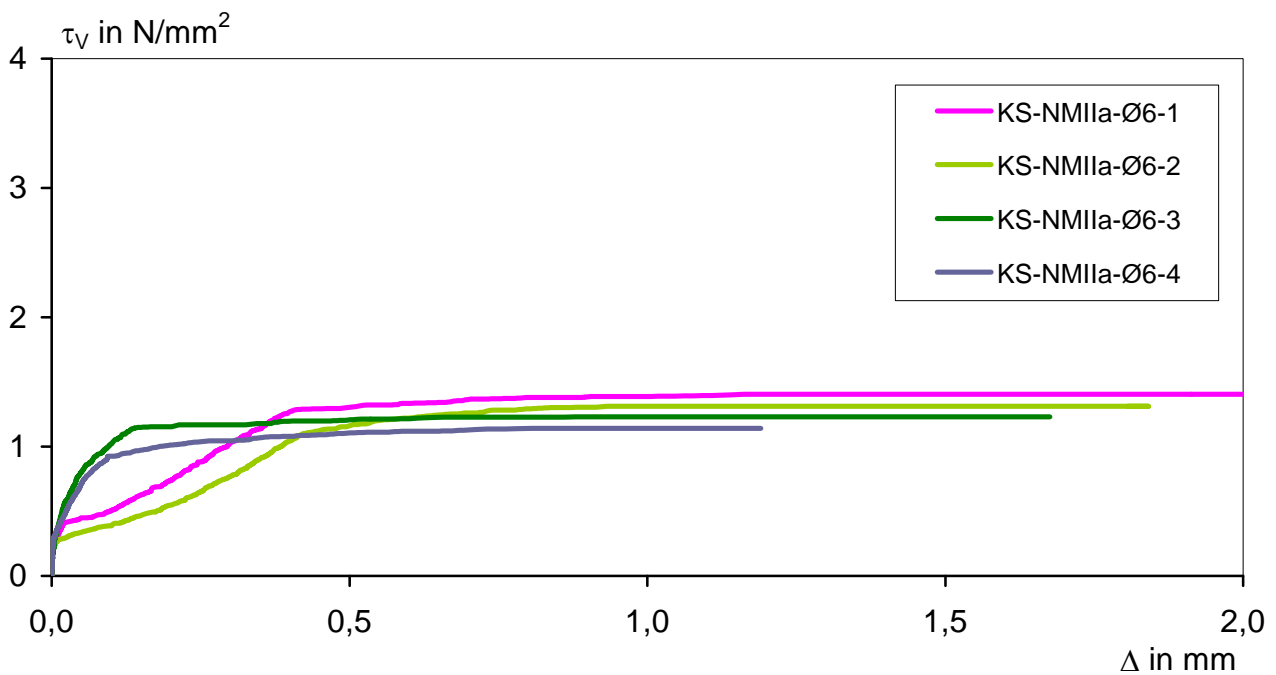
**Bild B50:** Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung in kleinen Aussparungen, Prüfkörper und Versuchsaufbau (schematische Darstellung)



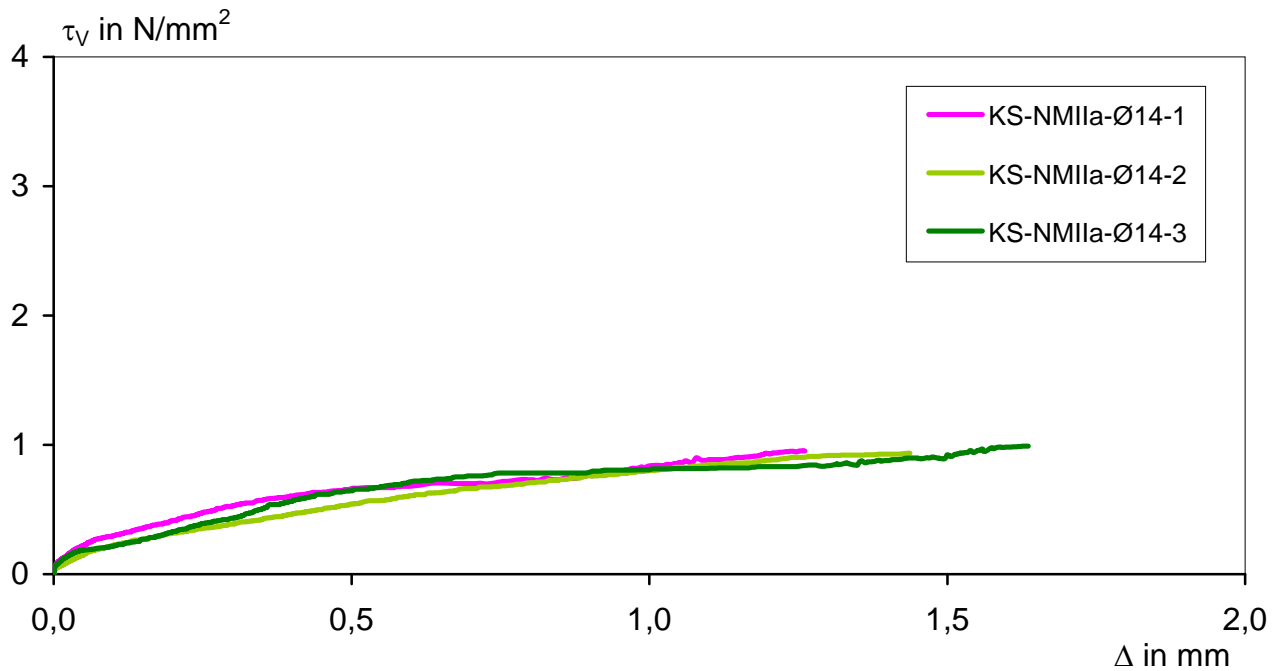
**Bild B51:** Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung in kleinen Aussparungen, Fehlstellen im Verbundbereich infolge unzureichender Verdichtung im Verfüllkanal, Betonstabstahl B500 B, Bewehrungsdurchmesser  $d_s = 14$  mm



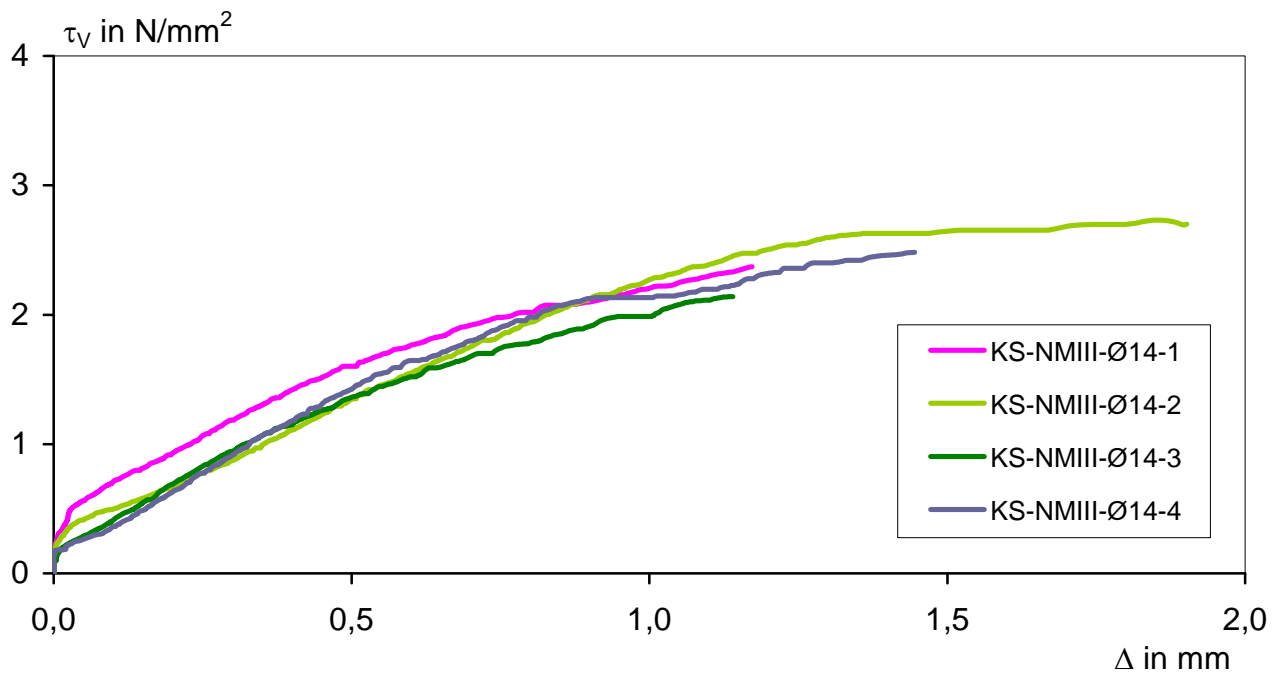
**Bild B52:** Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung in kleinen Aussparungen, Zusammenhang zwischen der Mörteldruckfestigkeit im Verfüllkanal  $\beta_{D,K}$  und der Mörteldruckfestigkeit  $\beta_D$ , alle Versuchsserien, Einzelwerte



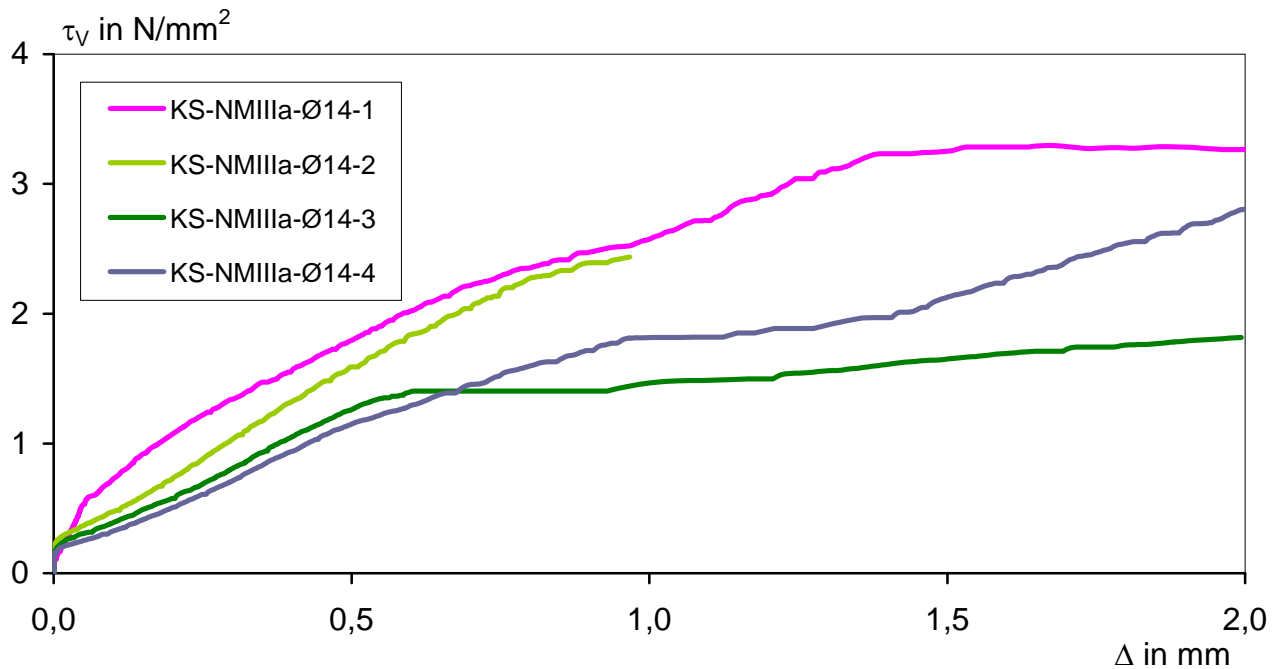
**Bild B53:** Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung in kleinen Aussparungen, Zusammenhang zwischen Verbundspannung  $\tau_V$  und Schlupf  $\Delta$ , Versuchsserie mit Kalksandsteinen und Normalmörtel NM IIa, Bewehrungsdurchmesser  $d_s = 6$  mm



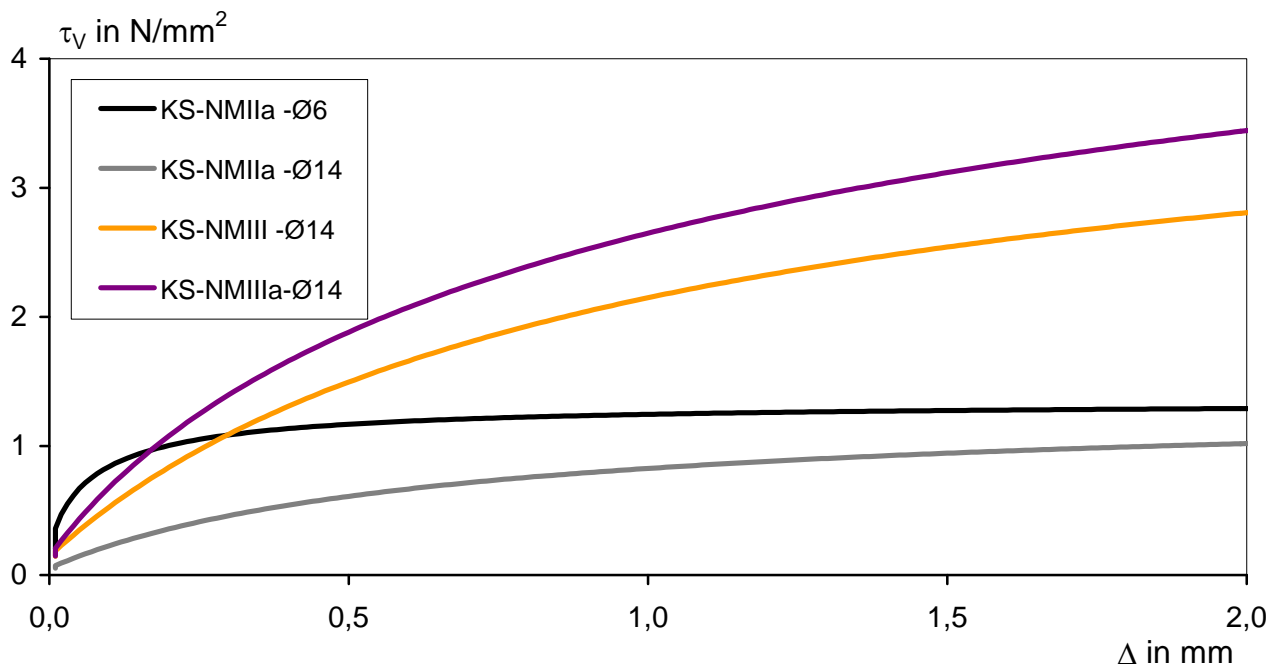
**Bild B54:** Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung in kleinen Aussparungen, Zusammenhang zwischen Verbundspannung  $\tau_V$  und Schlupf  $\Delta$ , Versuchsserie mit Kalksandsteinen und Normalmörtel NM IIa, Bewehrungsdurchmesser  $d_s = 14$  mm



**Bild B55:** Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung in kleinen Aussparungen, Zusammenhang zwischen Verbundspannung  $\tau_V$  und Schlupf  $\Delta$ , Versuchsserie mit Kalksandsteinen und Normalmörtel NM III, Bewehrungsdurchmesser  $d_s = 14$  mm



**Bild B56:** Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung in kleinen Aussparungen, Zusammenhang zwischen Verbundspannung  $\tau_v$  und Schlupf  $\Delta$  Versuchsserie mit Kalksandsteinen und Normalmörtel NM IIIa, Bewehrungsdurchmesser  $d_s = 14$  mm



**Bild B57:** Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung in kleinen Aussparungen, mittlere Verbundspannung( $\tau_v$ )–Schlupf( $\Delta$ )–Kurven

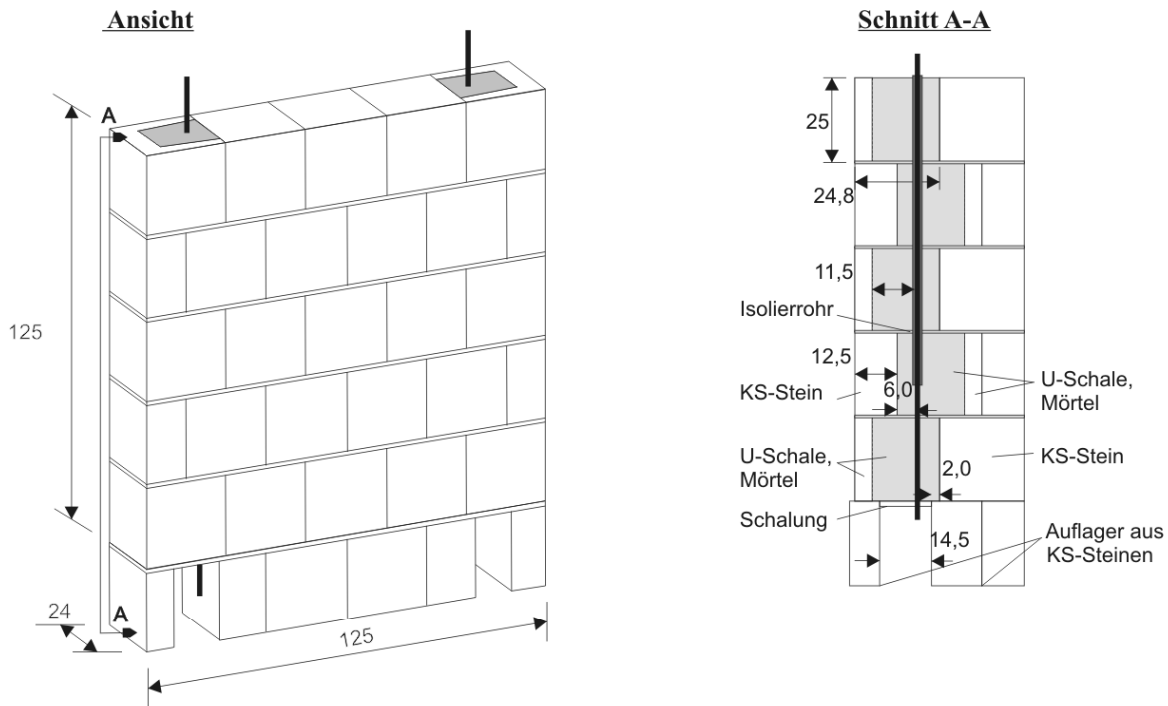




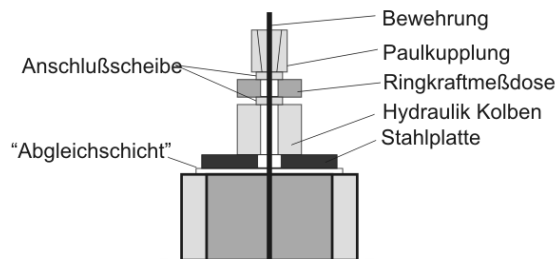
**Bild B58:** Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung in großen Aussparungen, Herstellung der Prüfwände mit gegenläufiger Anordnung der U-Schalen



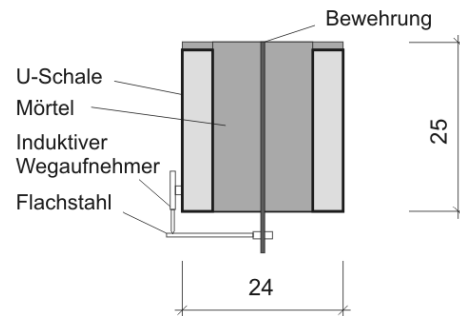
**Bild 59:** Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung in großen Aussparungen, Einfüllen des Mörtels direkt an der Wandoberkante (links) bzw. durch ein 1,25 m langes Aufsatzrohr (rechts)



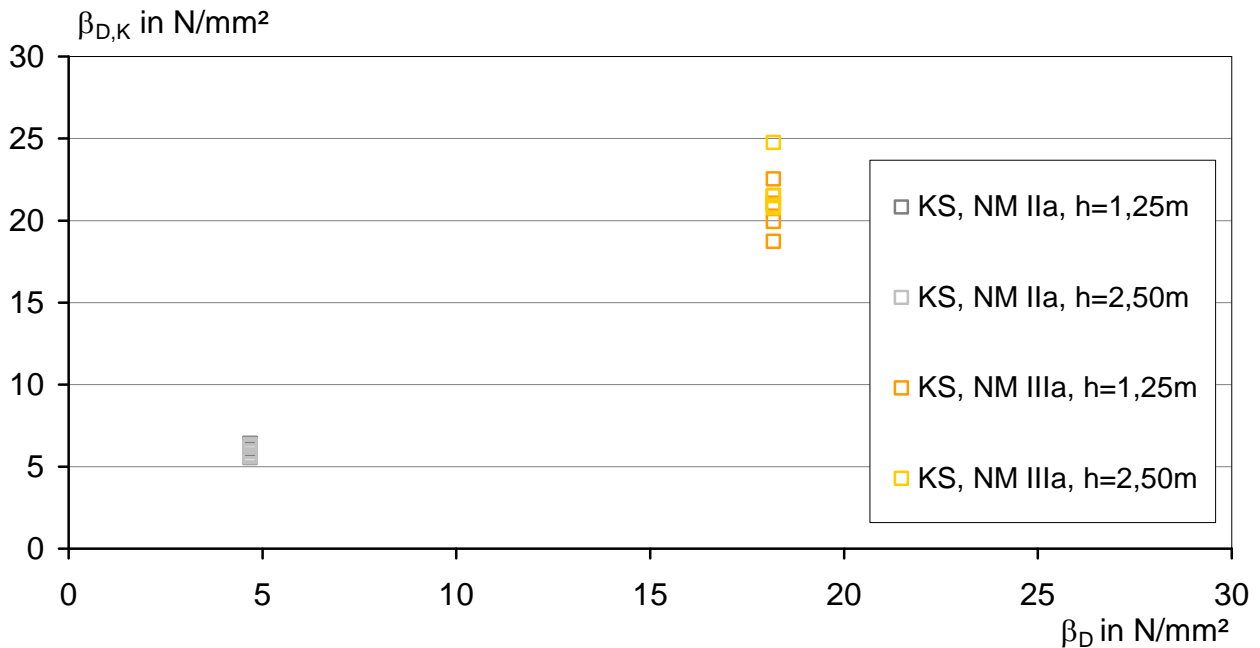
**Detail Krafteinleitung**



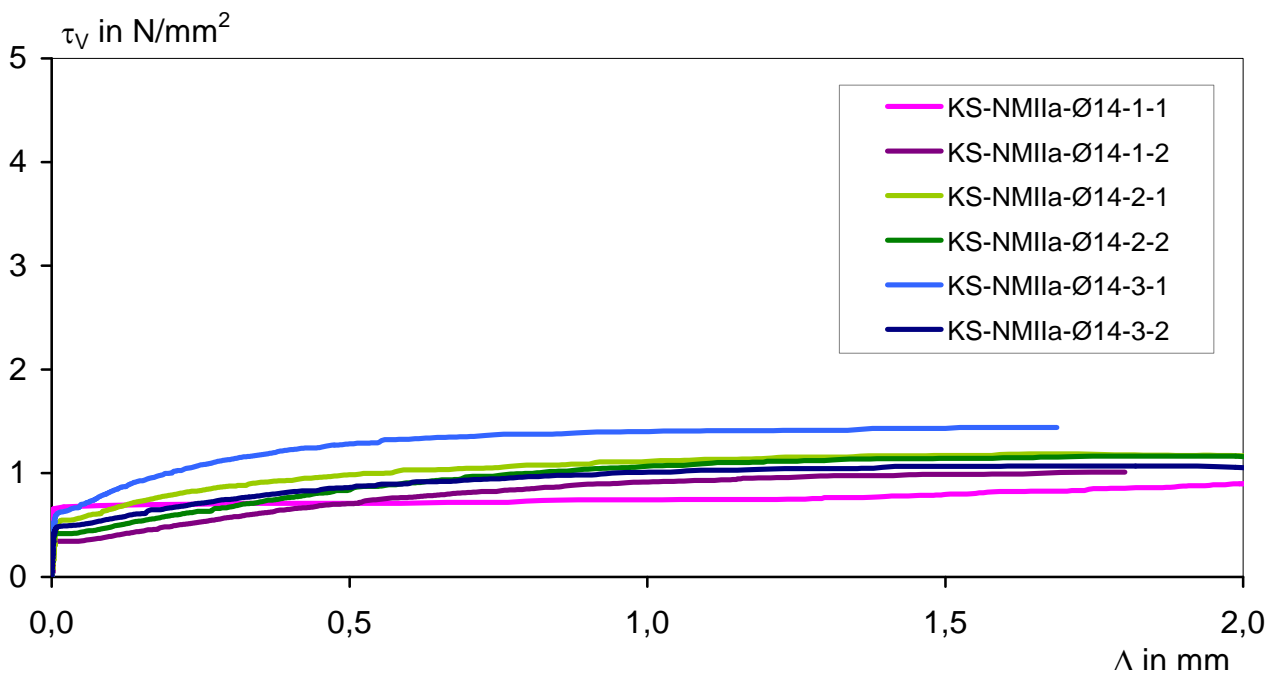
**Detail Fußpunkt**



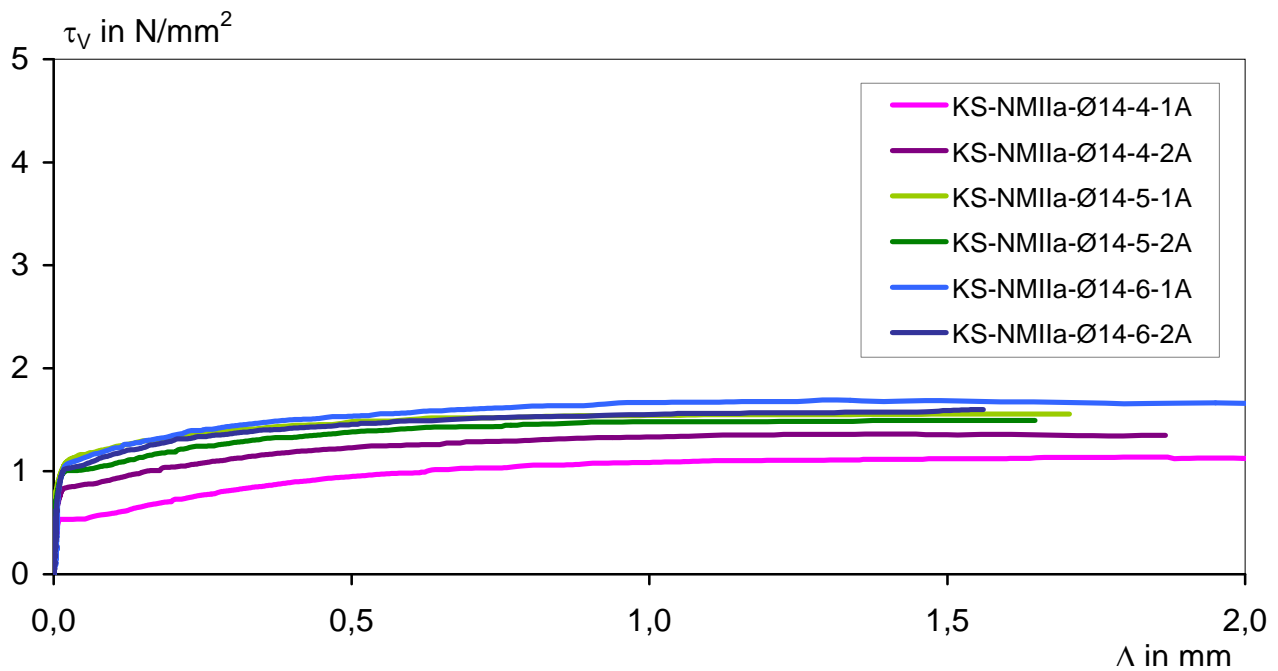
**Bild B60:** Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung in großen Aussparungen Prüfkörper und Versuchsaufbau (schematische Darstellung)



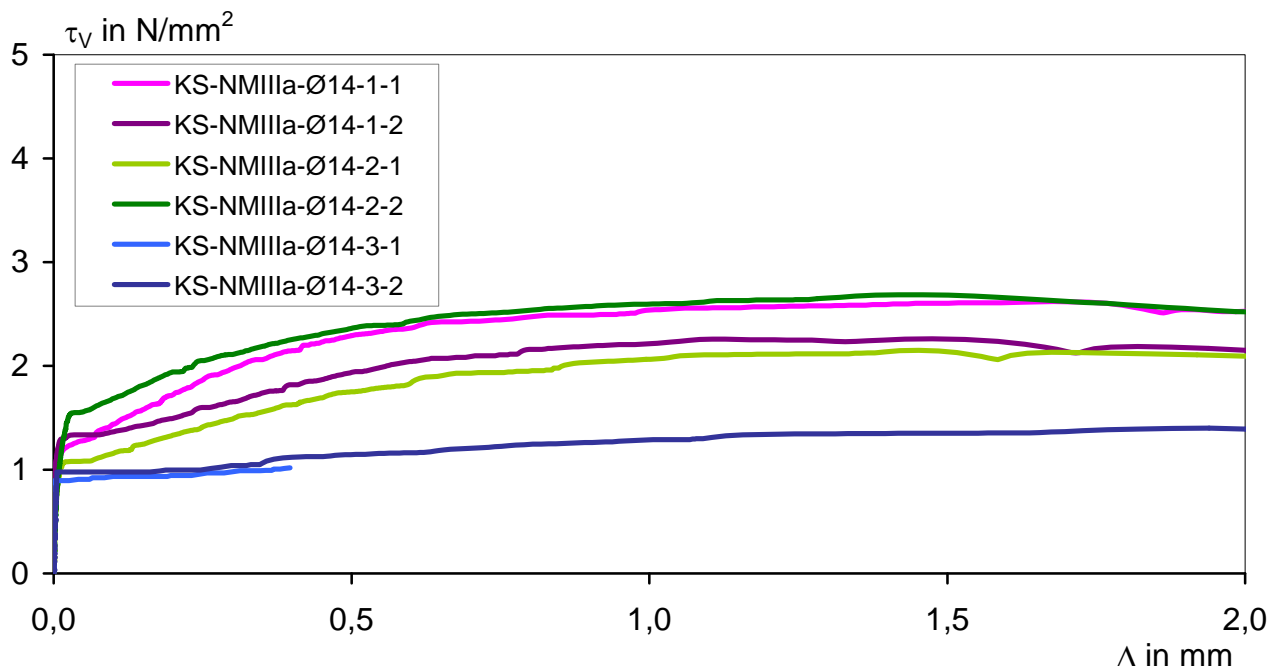
**Bild B61:** Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung in großen Aussparungen, Zusammenhang zwischen der Mörteldruckfestigkeit im Verfüllkanal  $\beta_{D,K}$  und der Mörteldruckfestigkeit  $\beta_D$ , alle Versuchsserien, Einzelwerte



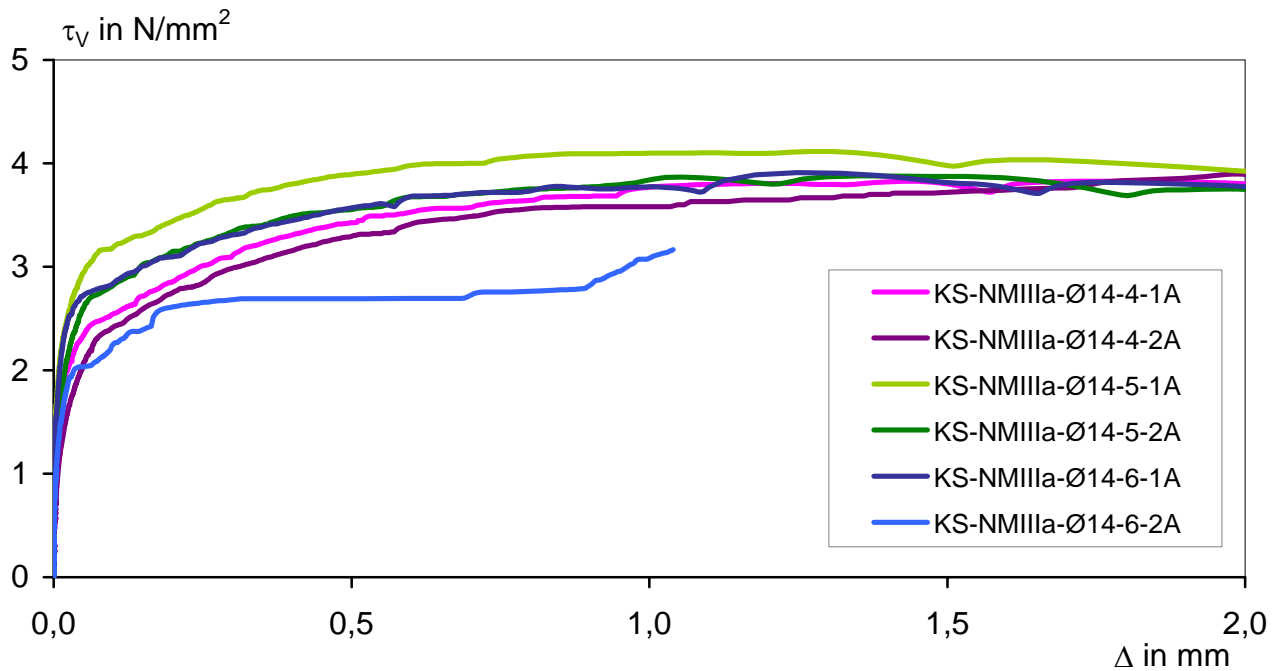
**Bild B62:** Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung in großen Aussparungen, Einfüllen des Mörtels direkt an der Wandoberkante ( $h = 1,25 \text{ m}$ ), Zusammenhang zwischen Verbundspannung  $\tau_v$  und Schlupf  $\Delta$ , Versuchsserie mit Kalksandsteinen, NM IIa und  $d_s = 14 \text{ mm}$



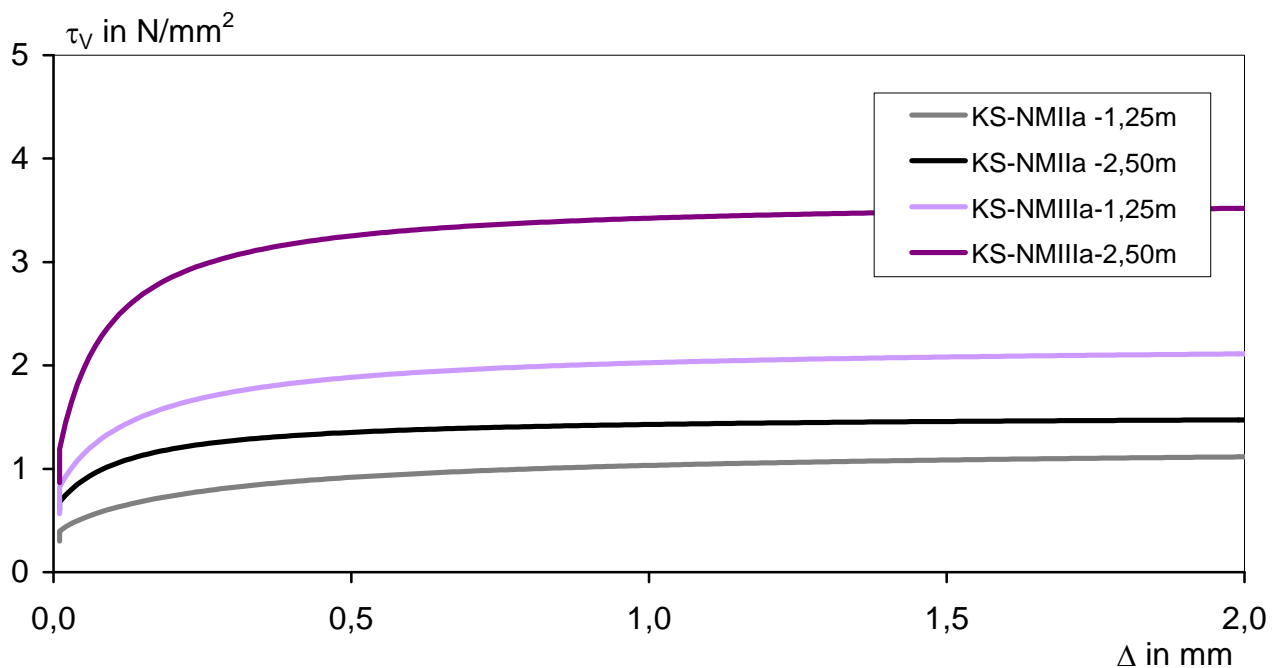
**Bild B63:** Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung in großen Aussparungen, Einfüllen des Mörtels durch ein Aufsatzrohr ( $h = 2,50$  m), Zusammenhang zwischen Verbundspannung  $\tau_v$  und Schlupf  $\Delta$ , Versuchsserie mit Kalksandsteinen, NM IIa und  $d_s = 14$  mm



**Bild B64:** Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung in großen Aussparungen, Einfüllen des Mörtels direkt an der Wandoberkante ( $h = 1,25$  m), Zusammenhang zwischen Verbundspannung  $\tau_v$  und Schlupf  $\Delta$ , Versuchsserie mit Kalksandstein, NM IIIa und  $d_s = 14$  mm



**Bild B65:** Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung in großen Aussparungen, Einfüllen des Mörtels durch ein Aufsatzrohr ( $h = 2,50$  m), Zusammenhang zwischen Verbundspannung  $\tau_v$  und Schlupf  $\Delta$  Versuchsserie mit Kalksandsteinen, NM IIIa und  $d_s = 14$  mm



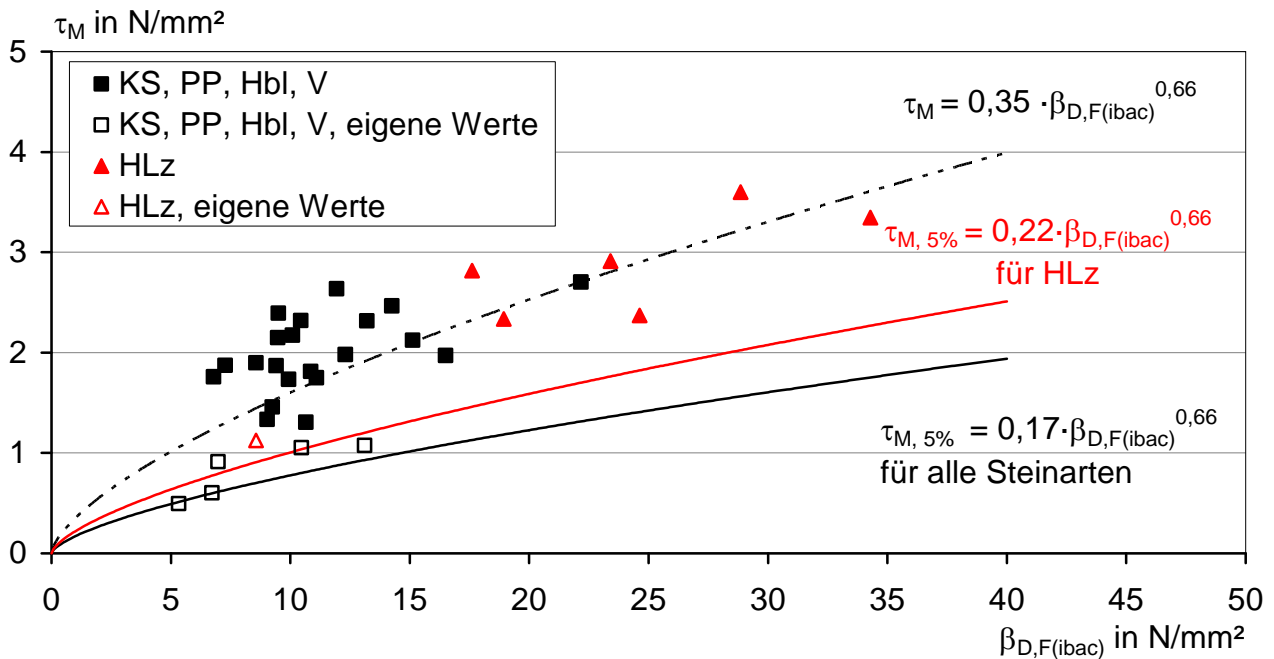
**Bild B66:** Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung in großen Aussparungen, Einfüllen des Mörtels direkt an der Wandoberkante ( $h = 1,25$  m) bzw. durch ein Aufsatzrohr ( $h = 2,50$  m), mittlere Verbundspannung( $\tau_v$ )–Schlupf( $\Delta$ )–Kurven



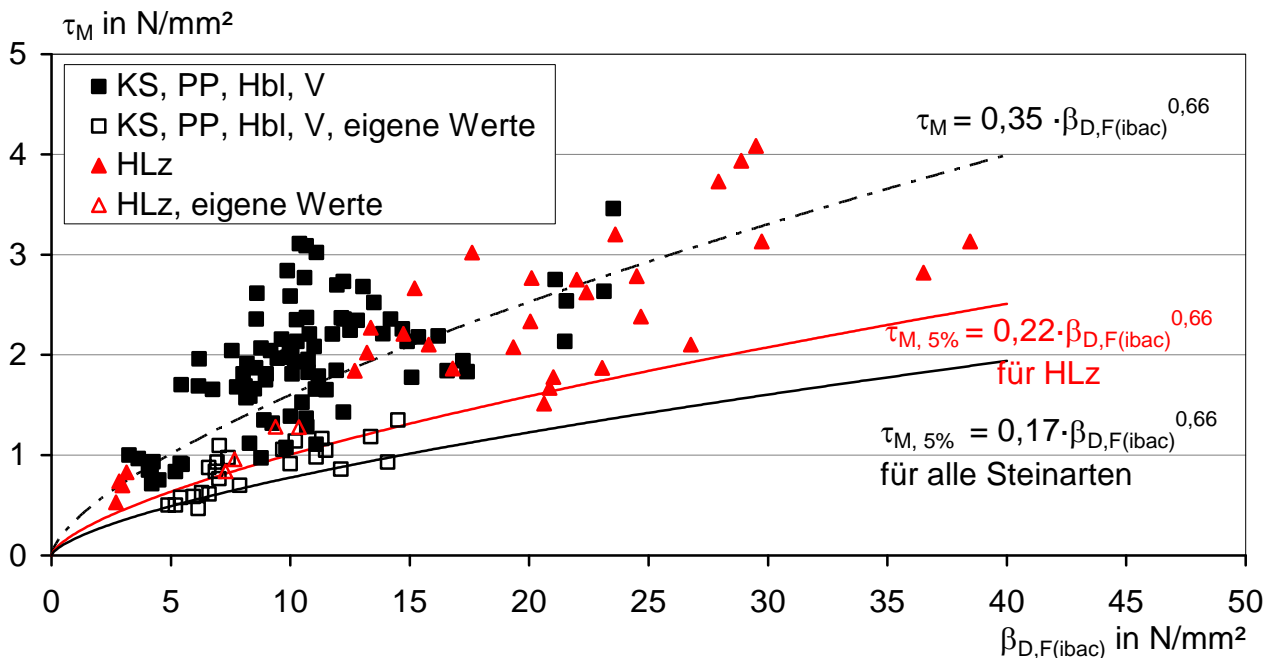
**Bild B67:** Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung in großen Aussparungen, Versagensbild der Versuchsserie mit Kalksandsteinen und Beton C25/30, Bewehrungsdurchmesser  $d_s = 14$  mm



**Bild B68:** Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung in großen Aussparungen, Verbundbereich zwischen Beton C25/30 und Bewehrung, Bewehrungsdurchmesser  $d_s = 14$  mm

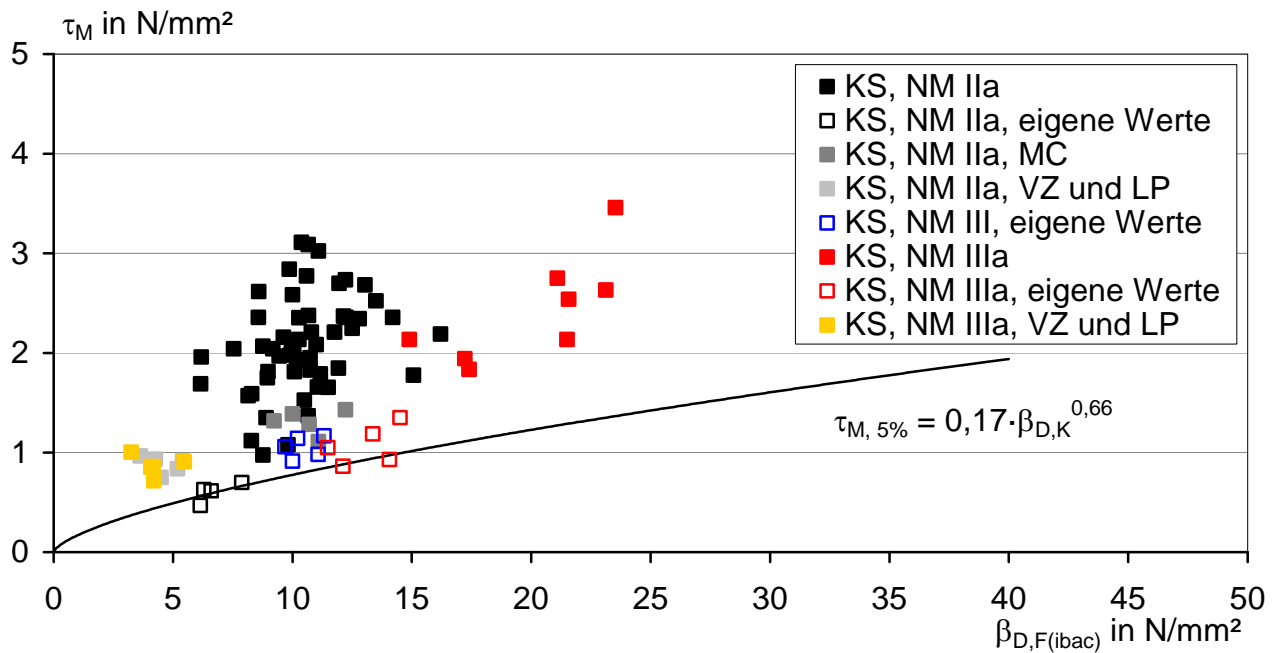


**Bild B69:** Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung in der Lagerfuge, maßgebende Verbundspannung  $\tau_M$  in Abhängigkeit der Fugendruckfestigkeit  $\beta_{D,F(ibac)}$ , Versuchsserien aus Literatur und eigene Untersuchungen, Mittelwerte, funktionaler Zusammenhang analog /6/

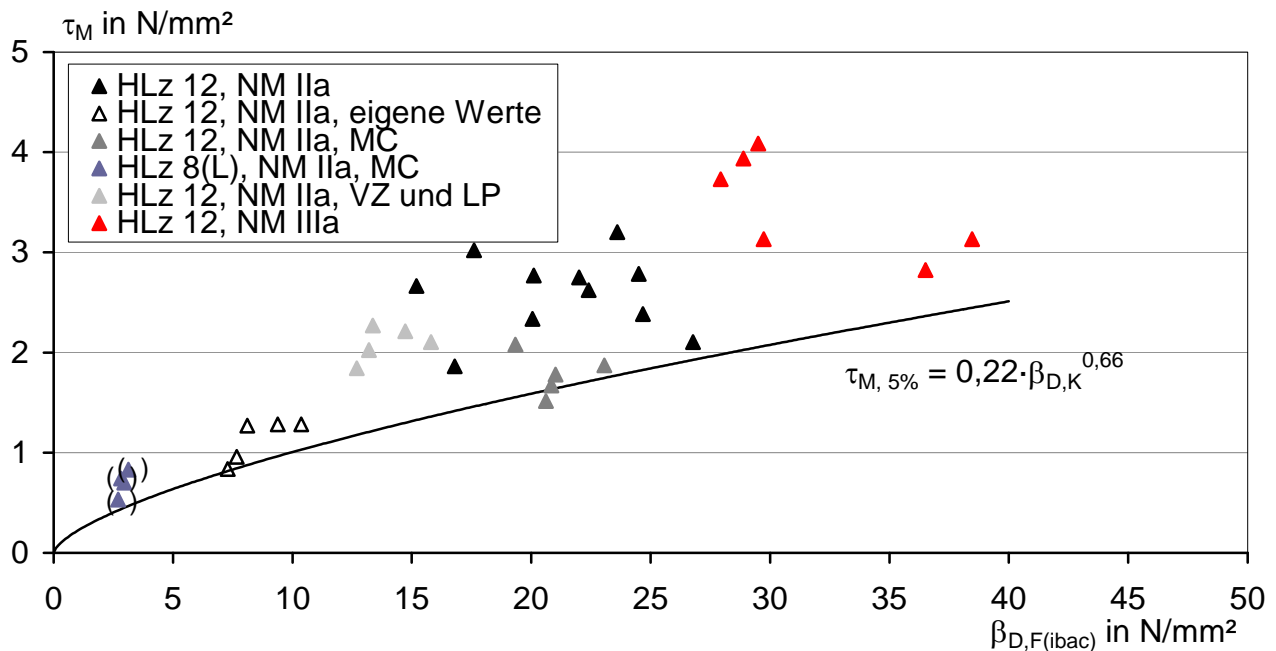


**Bild B70:** Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung in der Lagerfuge, maßgebende Verbundspannung  $\tau_M$  in Abhängigkeit der Fugendruckfestigkeit  $\beta_{D,F(ibac)}$ , Versuchsserien aus Literatur und eigene Untersuchungen, Einzelwerte, funktionaler Zusammenhang analog /6/



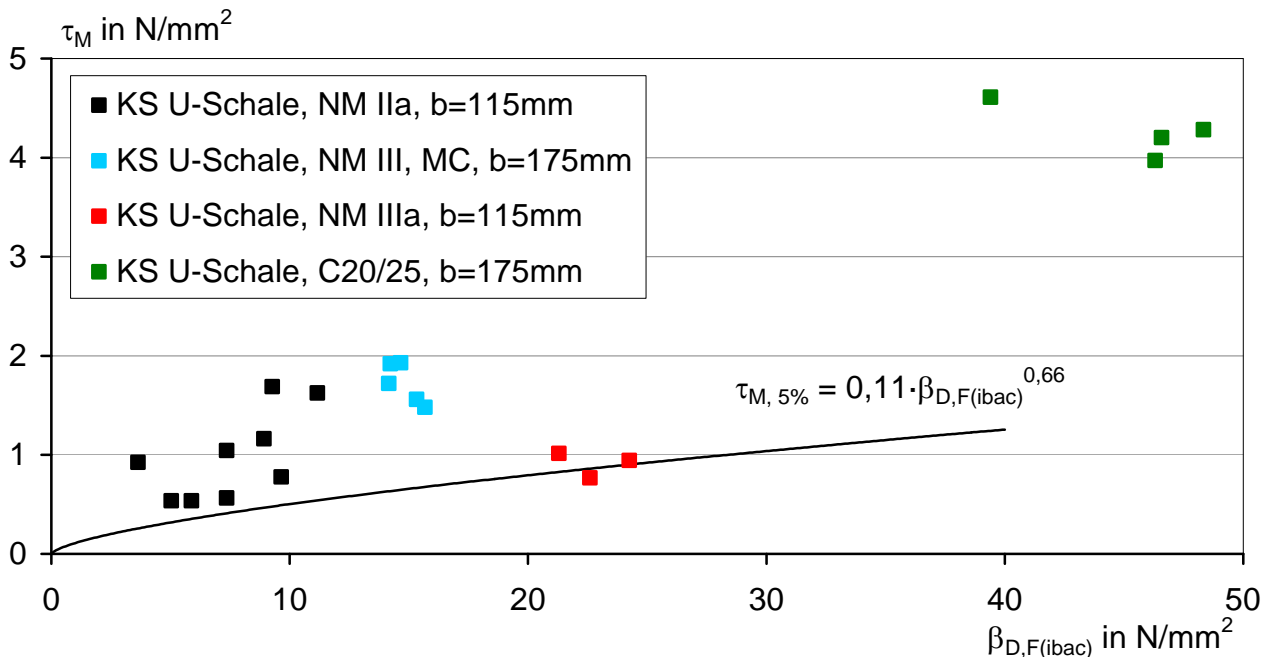


**Bild B71:** Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung in der Lagerfuge, maßgebende Verbundspannung  $\tau_M$  in Abhängigkeit der Fugendruckfestigkeit  $\beta_{D,F(ibac)}$ , Versuchsserien aus Literatur und eigene Untersuchungen, Einzelwerte, funktionaler Zusammenhang analog /6/

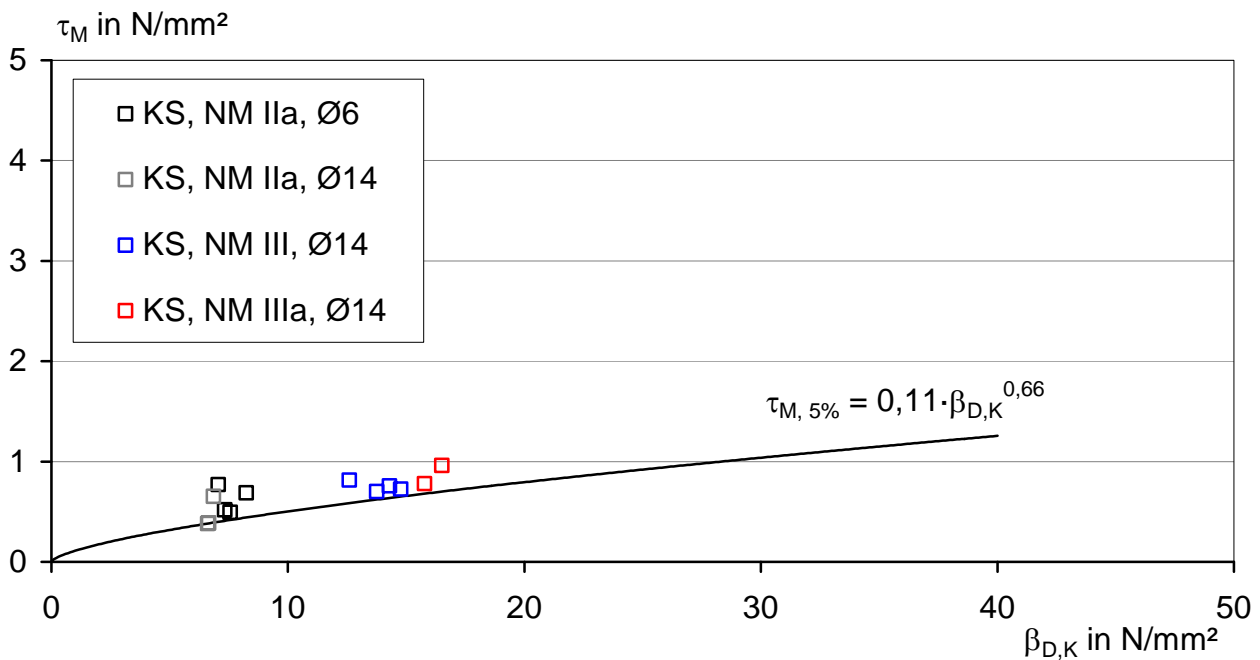


**Bild B72:** Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung in der Lagerfuge, maßgebende Verbundspannung  $\tau_M$  in Abhängigkeit der Fugendruckfestigkeit  $\beta_{D,F(ibac)}$ , Versuchsserien aus Literatur und eigene Untersuchungen, Einzelwerte, funktionaler Zusammenhang analog /6/

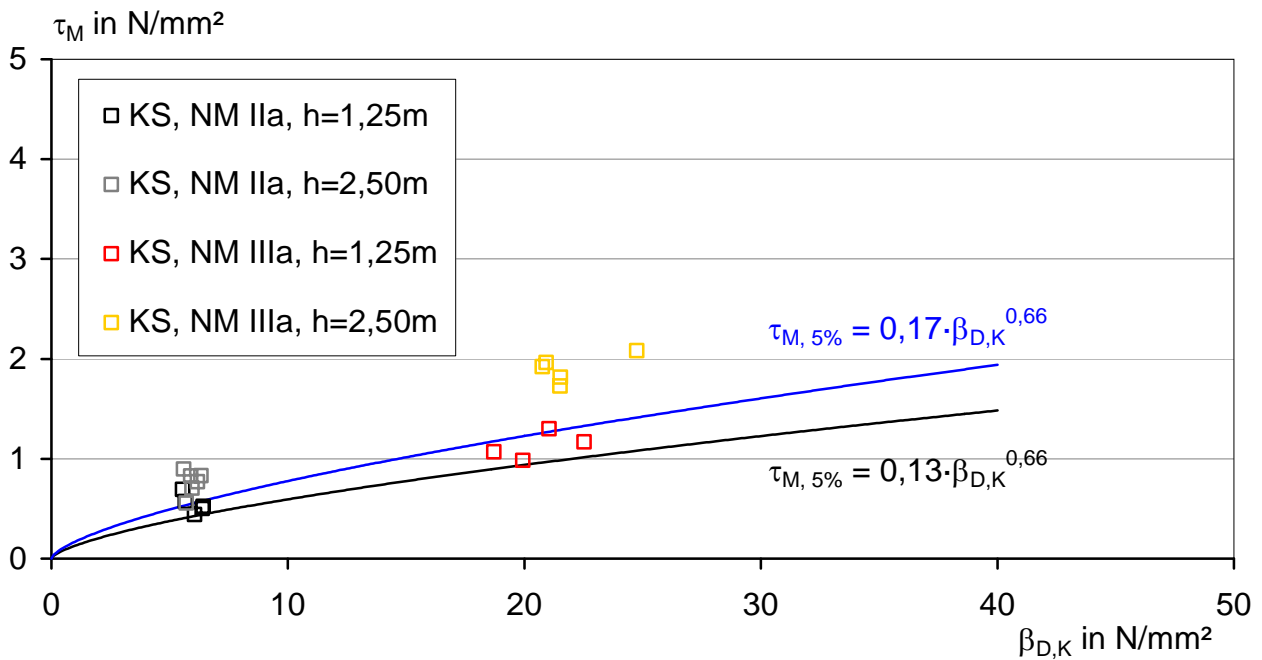




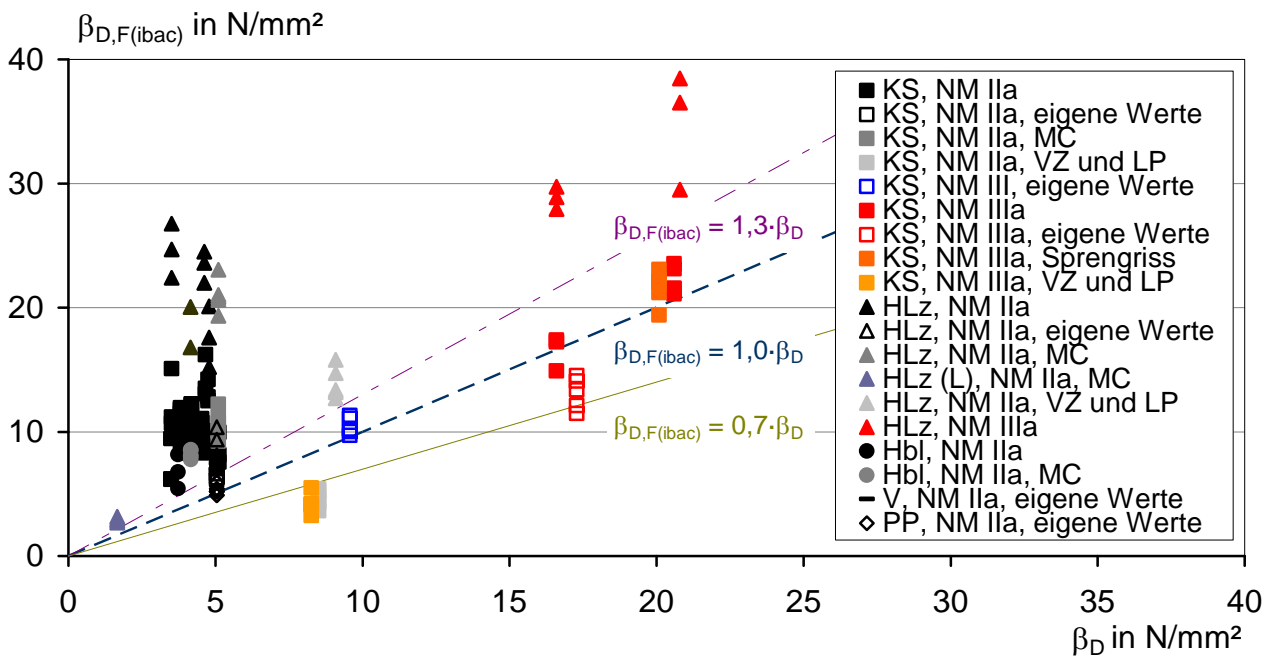
**Bild B73:** Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung in Formsteinen, maßgebende Verbundspannung  $\tau_M$  in Abhängigkeit der Fugendruckfestigkeit  $\beta_{D,F(ibac)}$ , Versuchsserien aus Literatur, Einzelwerte, funktionaler Zusammenhang analog /6/



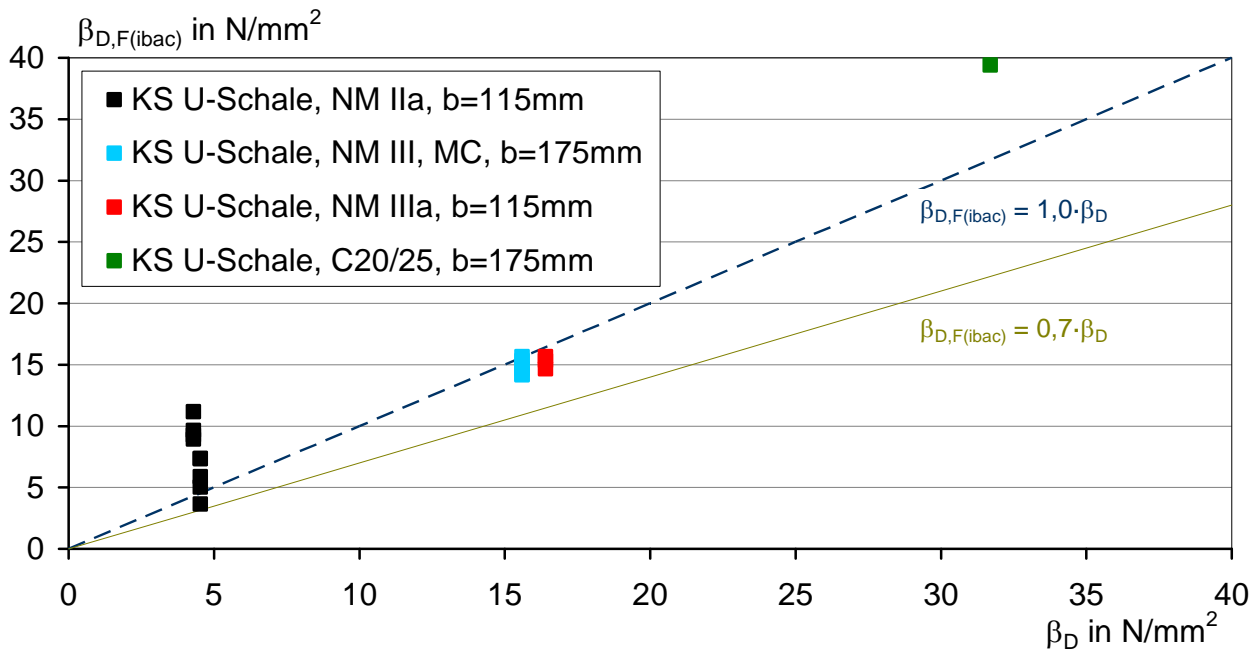
**Bild B74:** Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung in kleinen Aussparungen, maßgebende Verbundspannung  $\tau_M$  in Abhängigkeit der Mörteldruckfestigkeit im Verfüllkanal  $\beta_{D,K}$ , Versuchsserien aus eigenen Untersuchungen, Einzelwerte, funktionaler Zusammenhang analog /6/



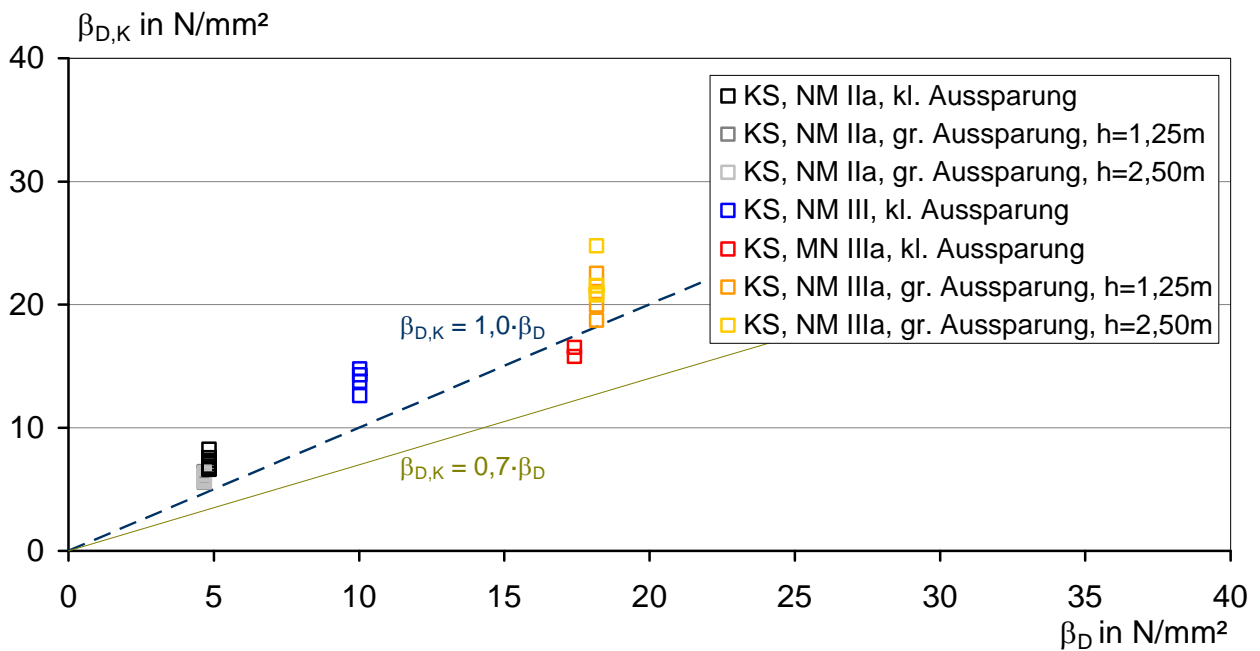
**Bild B75:** Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung in großen Aussparungen, maßgebende Verbundspannung  $\tau_M$  in Abhängigkeit der Mörteldruckfestigkeit im Verfüllkanal  $\beta_{D,K}$ , Versuchsserien aus eigenen Untersuchungen, Einzelwerte, funktionaler Zusammenhang analog /6/



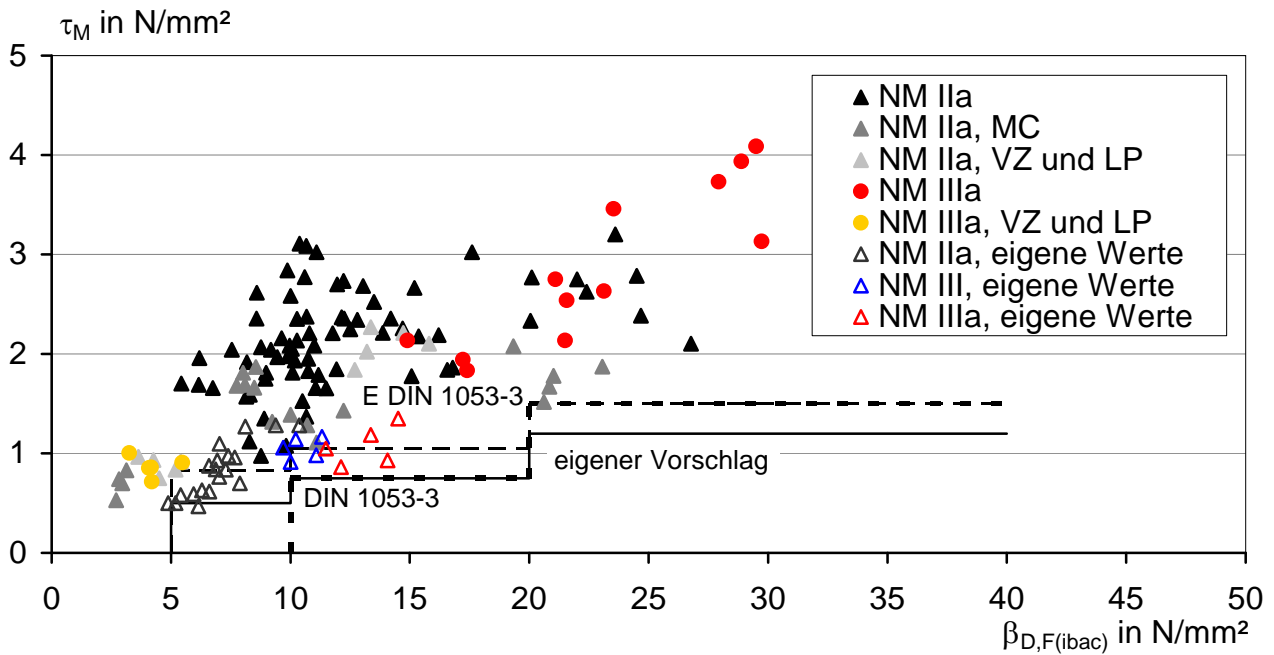
**Bild B76:** Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung in der Lagerfuge, Fugendruckfestigkeit  $\beta_{D,F(ibac)}$  in Abhängigkeit der Mörteldruckfestigkeit  $\beta_D$ , Versuchsserien aus Literatur und eigene Untersuchungen, Einzelwerte



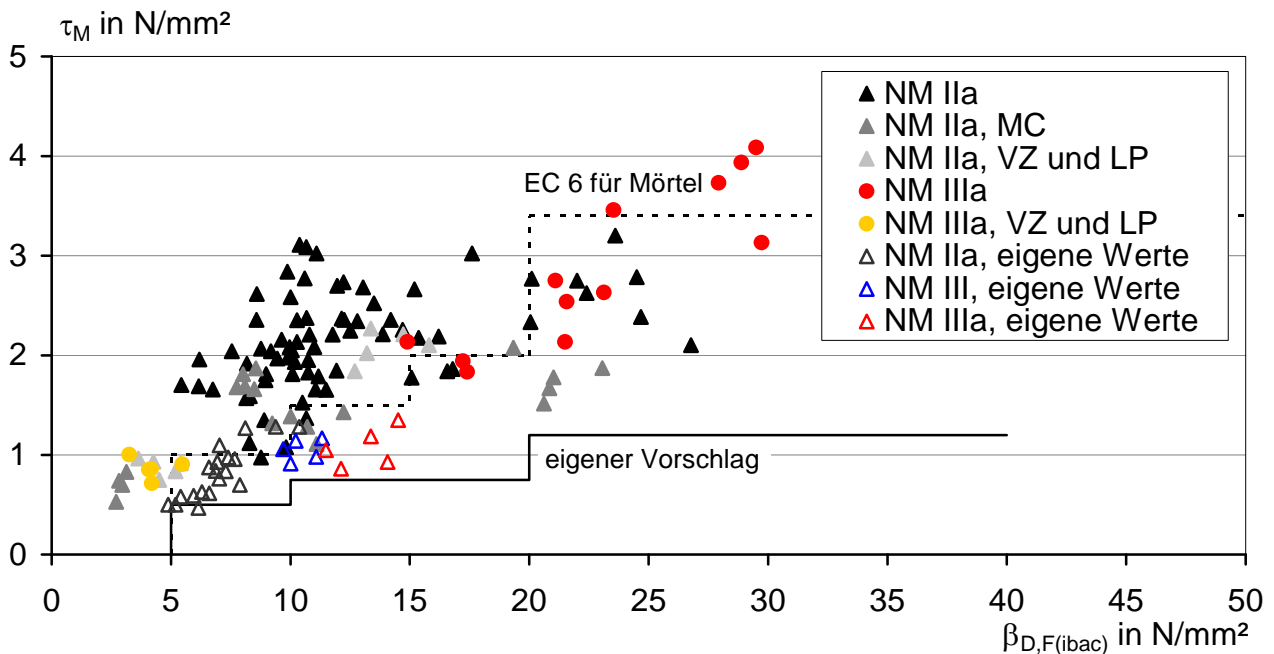
**Bild B77:** Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung in Formsteinen, Fugendruckfestigkeit  $\beta_{D,F(ibac)}$  in Abhängigkeit der Mörteldruckfestigkeit  $\beta_D$ , Versuchsserien aus Literatur und eigene Untersuchungen, Einzelwerte



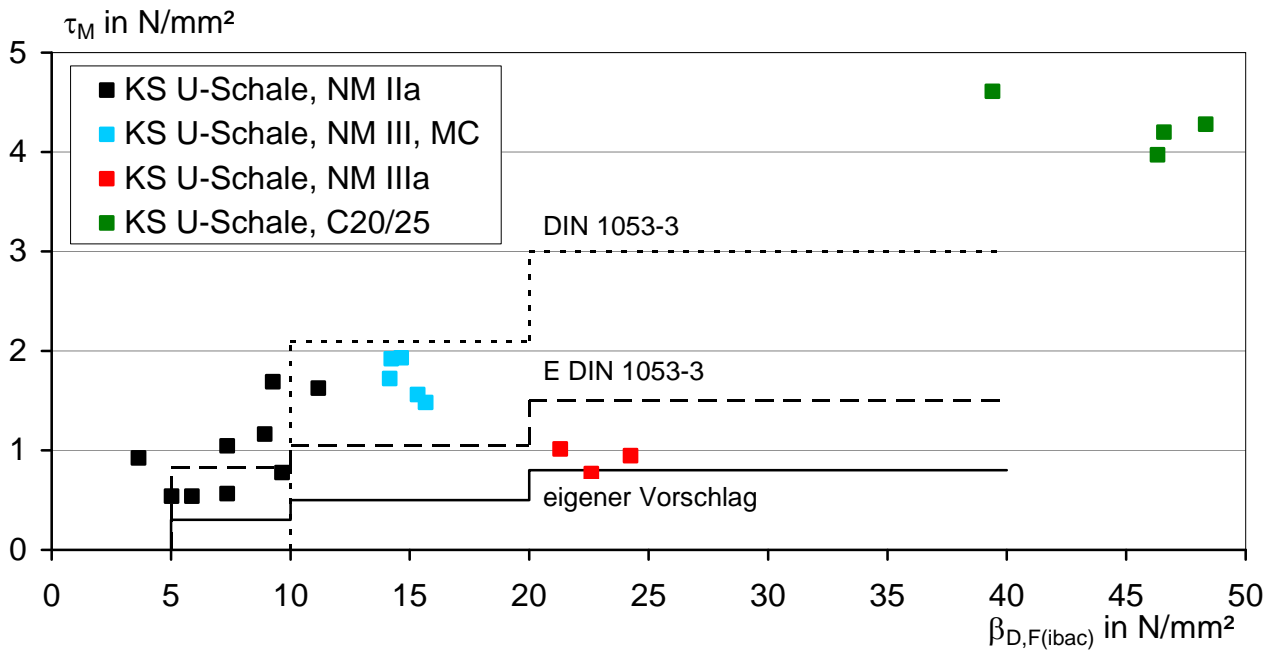
**Bild B78:** Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung in Aussparungen, Mörteldruckfestigkeit im Verfüllkanal  $\beta_{D,K}$  in Abhängigkeit der Mörteldruckfestigkeit  $\beta_D$ , Versuchsserien aus eigenen Untersuchungen, Einzelwerte



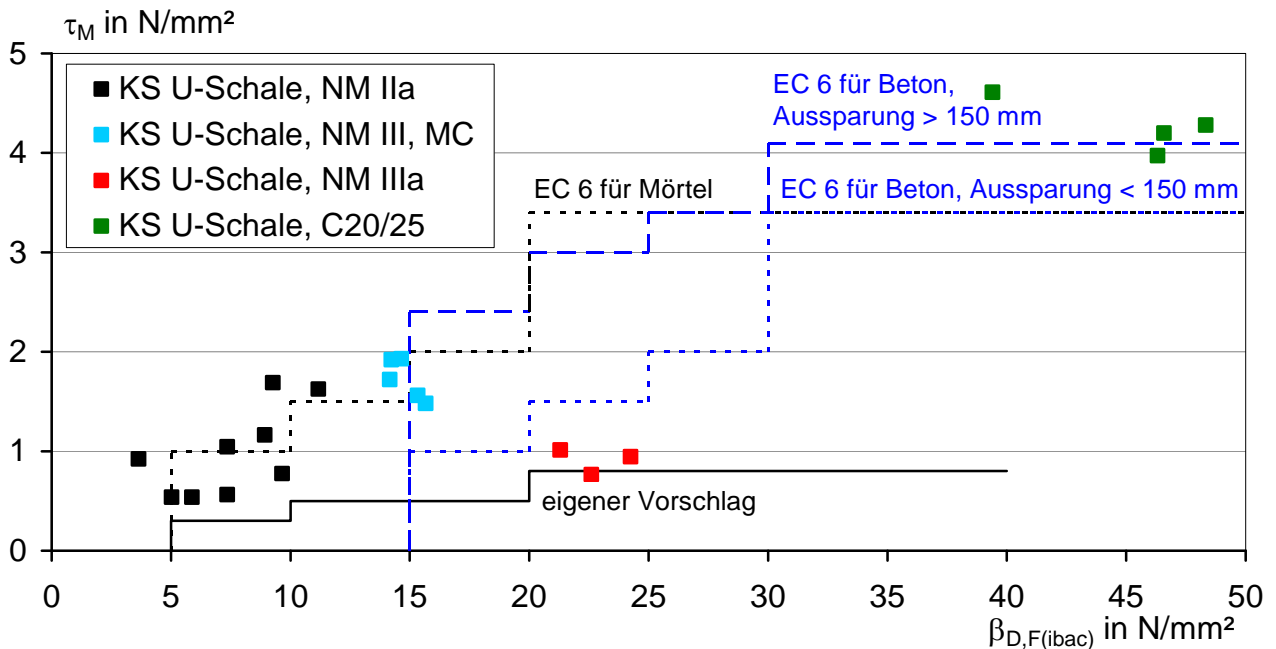
**Bild B79:** Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung in der Lagerfuge, maßgebende Verbundspannung  $\tau_M$  in Abhängigkeit der Fugendruckfestigkeit  $\beta_{D,F(ibac)}$ , Versuchsserien aus Literatur und eigene Untersuchungen, Einzelwerte, Vergleich der Versuchsergebnisse mit /X1/ und /X2/



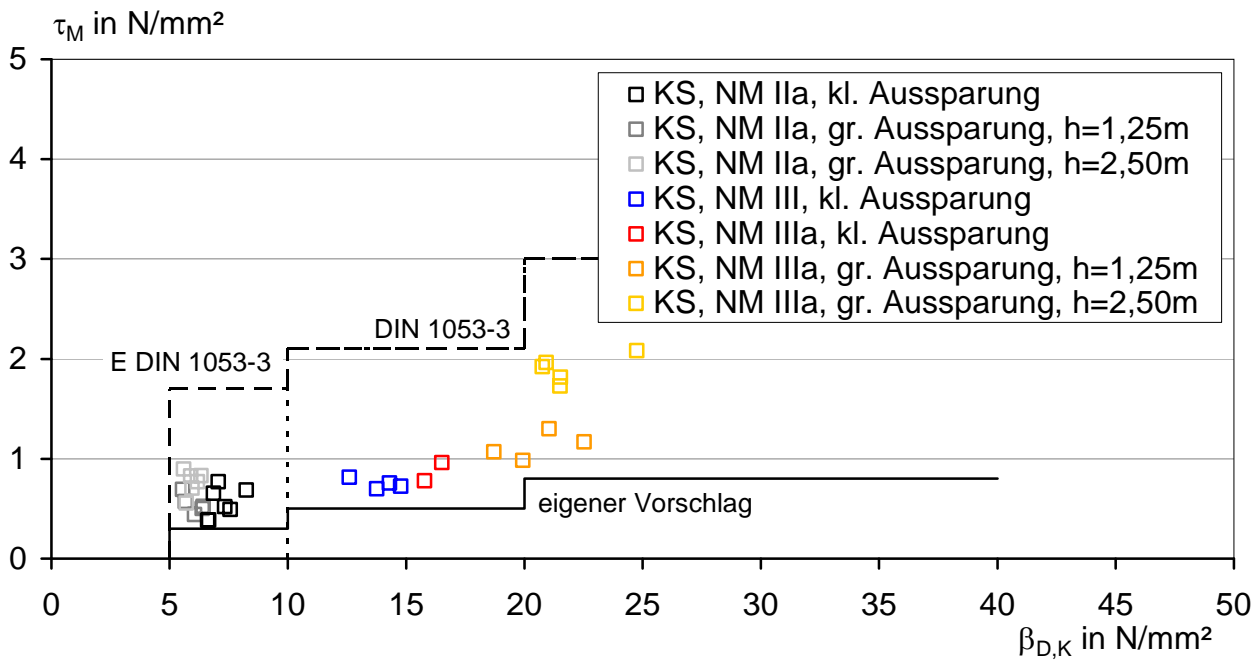
**Bild B80:** Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung in der Lagerfuge, maßgebende Verbundspannung  $\tau_M$  in Abhängigkeit der Fugendruckfestigkeit  $\beta_{D,F(ibac)}$ , Versuchsserien aus Literatur und eigene Untersuchungen, Einzelwerte, Vergleich der Versuchsergebnisse mit /X3/



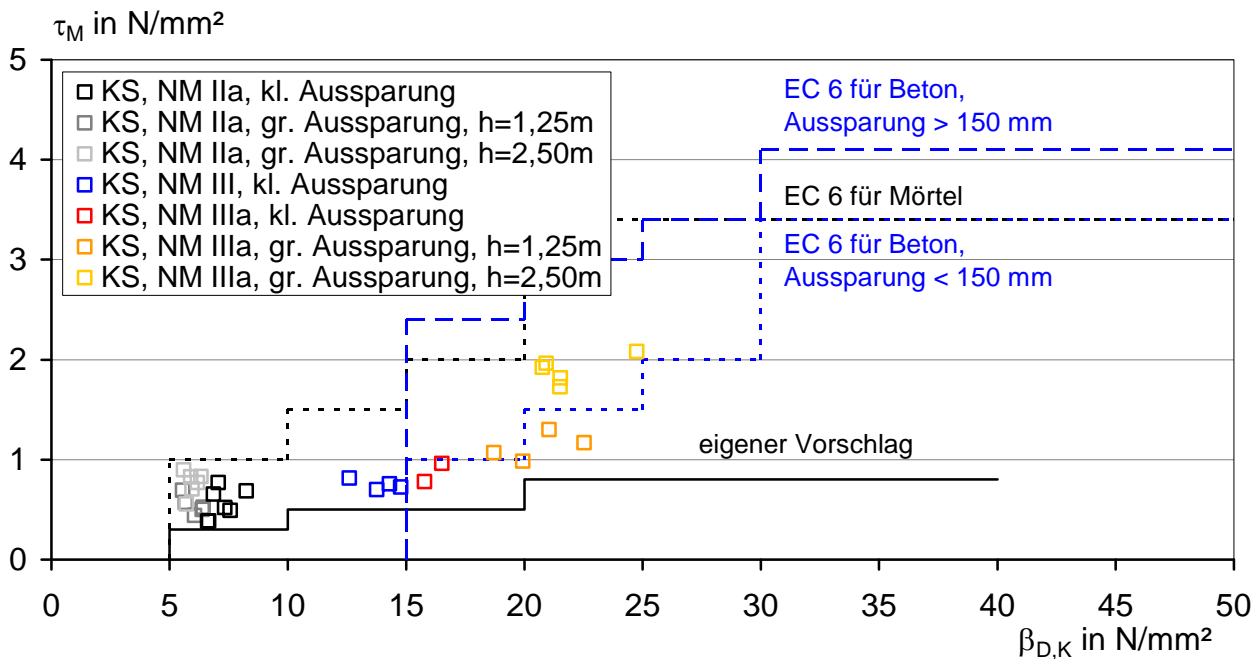
**Bild B81:** Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung in Formsteinen, maßgebende Verbundspannung  $\tau_M$  in Abhängigkeit der Fugendruckfestigkeit  $\beta_{D,F(ibac)}$ , Versuchsserien aus Literatur, Einzelwerte, Vergleich der Versuchsergebnisse mit /X1/ und /X2/



**Bild B82:** Untersuchungen an horizontal angeordneter Bewehrung in Formsteinen, maßgebende Verbundspannung  $\tau_M$  in Abhängigkeit der Fugendruckfestigkeit  $\beta_{D,F(ibac)}$ , Versuchsserien aus Literatur, Einzelwerte, Vergleich der Versuchsergebnisse mit /X3/



**Bild B83:** Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung, maßgebende Verbundspannung  $\tau_M$  in Abhängigkeit der Mörteldruckfestigkeit im Verfüllkanal  $\beta_{D,K}$ , Versuchsserien aus eigenen Untersuchungen, Einzelwerte, Vergleich der Versuchsergebnisse mit /X1/ und /X2/



**Bild B84:** Untersuchungen an vertikal angeordneter Bewehrung, maßgebende Verbundspannung  $\tau_M$  in Abhängigkeit der Mörteldruckfestigkeit im Verfüllkanal  $\beta_{D,K}$ , Versuchsserien aus eigenen Untersuchungen, Einzelwerte, Vergleich der Versuchsergebnisse mit /X3/