DOI: 10.1002/dama.201500644

Prefabricated masonry panel system with two-component polyurethane adhesive

Vorgefertigte Mauertafeln mit Zweikomponenten-Polyurethanklebstoff

Building with factory-prefabricated masonry panels made of clay units meanwhile has become a long-established, field-proven construction method. The advantages are shorter construction time for shell constructions, lower construction costs and uniform level of quality as well as high dimensional accuracy of the masonry panels and a production that is independent of weather influences. An innovation in the field of prefabricated masonry is the dry bonding method for prefabricated masonry panels made of clay units whereby, instead of a conventional thin layer mortar, a two-component polyurethane adhesive (2C-PUR) is applied by machine to the flat ground surface of the clay unit.

In mid 2013, the Institute of Building Materials Research (ibac) in Aachen was commissioned by Redbloc Deutschland GmbH to carry out tests on masonry prefabricated with 2C-PUR adhesive, to establish the necessary basis for obtaining a general technical approval (abZ) for masonry panels built according to the Redbloc system and thereby lay the foundations for using this new construction method in Germany.

This article shall firstly give a survey of the test programme for the approval procedure agreed with the German building authority, Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), and present the key results obtained from the tests carried out in Aachen. Furthermore the individual steps from planning via production in the prefabrication plant right through to transport and assembling of the masonry panels at the building site will be presented, taking the example of the first prefabrication factory of Redbloc Elemente GmbH opened at Plattling in Germany in the meantime.

1 Introduction

Building with factory-prefabricated masonry panels made of clay units meanwhile has become a long-established, field-proven construction method which, as a consequence of the growing cost pressure on building sites, is now being used not only in the construction of detached, semi-detached and terrace houses but also increasingly for larger residential complexes as well as commercial and industrial buildings. The advantages of construction with prefabricated elements are many and various. Besides shorter construction times for shell constructions and related lower construction costs resulting from efficient prefabrication of the masonry panels, one also ought to mention the uniform quality and high dimensional accuracy of masonry panels achieved by automated production that is independent of manual skills and weather influences.

Das Bauen mit werksmäßig vorgefertigten Mauertafeln aus Ziegeln ist eine inzwischen langjährig in der Praxis bewährte Bauart. Vorteile sind kürzere Rohbauzeiten, niedrigere Baukosten sowie gleichmäßiges Qualitätsniveau und hohe Maßgenauigkeit der Mauertafeln und die von Witterungseinflüssen unabhängige Produktion. Eine Neuerung im Bereich des vorgefertigten Mauerwerks stellt das Trockenklebeverfahren für Ziegelfertigteilwände dar, bei dem anstelle eines herkömmlichen Dünnbettmörtels ein Zweikomponenten-Polyurethanklebstoff (2K-PUR) maschinell auf die plangeschliffene Ziegeloberfläche aufgetragen wird. Mitte des Jahres 2013 wurde das Institut für Bauforschung Aachen (ibac) von der Redbloc Deutschland GmbH mit Untersuchungen an mit 2K-PUR-Klebstoff vorgefertigtem Mauerwerk beauftragt, um die nötigen Grundlagen für die Erlangung einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ) für Mauertafeln nach dem Redbloc-System und damit die Voraussetzungen für eine Anwendung dieser neuen Bauart in Deutschland zu schaffen. Der vorliegende Beitrag soll zunächst einen Überblick über das für das Zulassungsverfahren mit dem Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) abgestimmte Versuchsprogramm geben und die im Rahmen der Bearbeitung des Projektes in Aachen erzielten wesentlichen Untersuchungsergebnisse vorstellen. Weiterhin werden die einzelnen Schritte von der Planung über die Produktion im Fertigteilwerk bis hin zum Transport und zur Montage der Mauertafeln auf der Baustelle anhand der ersten zwischenzeitlich in Deutschland eröffneten Fertigteilfabrik der Redbloc Elemente GmbH in Plattling beispielhaft vorgestellt.

1 Einleitung

Das Bauen mit werksmäßig vorgefertigten Mauertafeln aus Ziegeln ist eine inzwischen langjährig in der Praxis bewährte Bauart, die infolge des wachsenden Kostendrucks auf den Baustellen mittlerweile nicht nur im Einfamilien-, Doppel- und Reihenhausbau, sondern immer häufiger sowohl für größere Wohnanlagen als auch im Gewerbe- und Industriebau eingesetzt wird. Die Vorteile der Elementbauweise sind dabei vielfältig. Neben den infolge der rationellen Vorfertigung der Mauertafeln kürzeren Rohbauzeiten und damit verbunden niedrigeren Baukosten sind hier u. a. auch das gleichmäßige Qualitätsniveau und die hohe Maßgenauigkeit der Mauertafeln zu nennen, die durch die automatisierte, von handwerklicher Geschicklichkeit und Witterungseinflüssen unabhängige Produktion erreicht werden.

Bei den in der Vergangenheit verwendeten Herstellungstechniken wurden die Mauertafeln im Fertigteilwerk

With the manufacturing techniques used in the past, masonry panels were prefabricated in the factory like conventional masonry on a building site, standing upright with masonry units in comination with mineral masonry mortar, by the use of semi- or fully automated factory. An innovation in the field of prefabricated masonry is the patented dry bonding method for prefabricated masonry walls made of clay units developed collaboratively between an American technology group and the Austrian-based firm of Redbloc, whereby, instead of a conventional thin layer mortar, a two-component polyurethane adhesive (2C-PUR) is applied by machine to the flat ground surface of the clay unit. Overall construction time is further shortened significantly by the dry bonding method and the innovative sawing technology, since no moisture is added during the production of the masonry panels and thus lengthy drying out phases can be dispensed with.

In mid 2013, the Institute of Building Materials Research (ibac) in Aachen was commissioned by Redbloc Deutschland GmbH to carry out tests on masonry prefabricated with 2C-PUR adhesive, to establish the necessary basis for obtaining a general technical approval (abZ) for masonry panels built according to the Redbloc system and thereby lay the foundations for using this new construction method in Germany.

2 Tests for suitability

2.1 Test programme for the approval procedure

The test programme comprised tests on masonry units, composite test specimens and masonry walls. First of all, the basic standard properties of the high precision hollow clay units chosen for the approval procedure (see section 2.2.1) were determined. In the second step, tests were carried out on small test specimens to determine the bonding behaviour under shear and tensile load as well as the strength development and durability of the 2C-PUR adhesive (see section 2.3). In the final step, tests were conducted on masonry walls to determine the flexural, compressive and shear load bearing behaviour (see section 2.4).

As a rule, reference test specimens were also made and tested with a customary thin layer mortar in order to better classify and assess the results of the test specimens bonded with 2C-PUR adhesive. Owing to the very elaborate wall tests under the unified test procedure of the DIBt, only tests on masonry with 2C-PUR adhesive were carried out when investigating solely the shear behaviour.

2.2 Applied materials and material characteristics 2.2.1 Masonry units

For the majority of the tests, the following high precision hollow clay units stipulated in the general technical approvals were used:

- High precision hollow clay units
 (PHLz 6-0.65-248×365×249) acc. to Z-17.1-890 [1]
- High precision hollow clay units
 (PHLz 6-0.60-248×365×249) acc. to Z-17.1-1057 [2]
- High precision hollow clay units
 (PHLz 12-0.9-372×240×249) acc. to Z-17.1-715 [3]

wie konventionelles Baustellenmauerwerk aufrecht stehend aus Mauersteinen in Kombination mit mineralischen Mauermörteln im Verband durch den Einsatz von halboder vollautomatisierten Fertigungsanlagen vorgefertigt. Eine Neuerung im Bereich des vorgefertigten Mauerwerks stellt das von der in Österreich ansässigen Firma redbloc in Zusammenarbeit mit einem amerikanischen Technologiekonzern entwickelte, patentierte Trockenklebeverfahren für Ziegelfertigteilwände dar, bei dem anstelle eines herkömmlichen Dünnbettmörtels ein Zweikomponenten-Polyurethanklebstoff (2K-PUR) maschinell auf die plangeschliffene Ziegeloberfläche aufgetragen wird. Durch das Trockenklebeverfahren und eine neuartige Sägetechnik verkürzt sich die Gesamtbauzeit nochmals deutlich, da bei der Herstellung der Mauertafeln keine Feuchtigkeit zugeführt wird und so längere Austrocknungsphasen entfallen können.

Mitte des Jahres 2013 wurde das Institut für Bauforschung Aachen (ibac) von der Redbloc Deutschland GmbH mit Untersuchungen an mit 2K-PUR-Klebstoff vorgefertigtem Mauerwerk beauftragt, um die nötigen Grundlagen für die Erlangung einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ) für Mauertafeln nach dem Redbloc-System und damit die Voraussetzungen für eine Anwendung dieser neuen Bauart in Deutschland zu schaffen.

2 Untersuchungen zur Eignung

2.1 Versuchsprogramm für das Zulassungsverfahren

Das Versuchsprogramm umfasste Untersuchungen an Mauersteinen, an Verbundprüfkörpern und an Wandprüfkörpern. Als Eingangsprüfung wurden zunächst die wesentlichen Normeigenschaften der für das Zulassungsverfahren ausgewählten Planhochlochziegel bestimmt (s. Abschn. 2.2.1). Im zweiten Schritt erfolgten Untersuchungen an Kleinprüfkörpern zur Bestimmung des Verbundverhaltens unter Scher- und Zugbeanspruchung sowie der Festigkeitsentwicklung und der Dauerhaftigkeit des 2K-PUR-Klebstoffs (s. Abschn. 2.3). Im letzten Schritt wurden Untersuchungen an Wandprüfkörpern durchgeführt, um die Biege-, Druck- und Schubtragfähigkeit des Mauerwerks zu bestimmen (s. Abschn. 2.4).

In der Regel wurden auch Referenzprüfkörper mit einem handelsüblichen Dünnbettmörtel hergestellt und geprüft, um die Ergebnisse der mit 2K-PUR-Klebstoff verklebten Prüfkörper besser einordnen und beurteilen zu können. Lediglich bei der Untersuchung des Schubtragverhaltens wurden aufgrund der sehr aufwändigen Wandversuche nach dem vereinheitlichten Prüfverfahren des DIBt lediglich Versuche mit verklebtem Mauerwerk durchgeführt.

2.2 Verwendete Materialien und deren Eigenschaften 2.2.1 Mauersteine

Für den überwiegenden Teil der Untersuchungen wurden die folgenden, in allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen geregelten Planhochlochziegel verwendet:

- PHLz 6-0,65-248×365×249 (12DF) nach Z-17.1-890 [1]
- PHLz 6-0,60-248×365×249 (12DF) nach Z-17.1-1057 [2]
- PHLz 12-0,9-372×240×249 (12DF) nach Z-17.1-715 [3]

Mit der ersten Steinart (Hochlochziegel nach [1]) wurde das vollständige Versuchsprogramm durchgeführt. An den







Fig. 1. Hollow clay units Bild 1. Hochlochziegel

The complete test programme was carried out using the first unit type (hollow clay units acc. to [1]). The tests carried out on the remaining two unit types (hollow clay units acc. to [2] and [3]) were less extensive in their scope. The hollow clay units used are shown in Figure 1.

In addition, the calcium silicate reference unit KS 12-2,0-NF (without perforation or handle opening) was used to investigate the strength development and durability of the 2C-PUR adhesive that is normally used and considered as unfavourable for evidence of shear bond strength according to DIN V 18580 [4].

First of all, the dimensions according to DIN EN 772-16 [5] as well as the gross dry density according to DIN EN 772-13 [6] were determined on the clay units selected for the approval procedure. The percentage of voids of the masonry units was determined according to DIN EN 772-9 [7]. The requirements on perforation geometry and web thickness were also checked for compliance with the relevant general technical approvals. On the test specimens for determining the unit compressive strength, also the flatness of the bed faces according to DIN EN 772-20 [8] and plane parallelism of the bed faces were measured according to DIN EN 772-16 [5]. The compressive strength of the masonry units was tested in an air dry state according to DIN EN 772-1 [9].

With regard to dimensions, density and strength class, the clay units corresponded to the properties stated in the manufacturer's short term.

2.2.2 Adhesive

The two-component polyurethane adhesive used is a reactive PUR adhesive consisting of an adhesive component and a hardener component. The adhesive component and hardener are pumped from separate storage tanks into a work vessel, where they are then warmed up to a temperature of around 35 °C and fed via dosing units to a mixing head. The reaction mixture is discharged from the mixing head and reacts on the bed joint area of the masonry units.

2.2.3 Masonry mortar

A customary thin layer mortar for use with high precision hollow clay units was provided for production of the referübrigen beiden Steinarten (Hochlochziegel nach [2] und [3]) erfolgten nur noch Untersuchungen mit einem reduzierten Umfang. Die verwendeten Hochlochziegel sind in Bild 1 dargestellt.

Weiterhin kamen im Rahmen der Untersuchungen zur Festigkeitsentwicklung und zur Dauerhaftigkeit des 2K-PUR-Klebstoffs auch der beim Nachweis der Verbundfestigkeit nach DIN V 18580 [4] üblicherweise verwendete und hierfür als ungünstig angesehene Kalksand-Referenzstein KS 12-2,0-NF (ohne Lochung bzw. Grifföffnung) zum Einsatz.

An den für das Zulassungsverfahren ausgewählten Ziegeln wurden zunächst die Maße nach DIN EN 772-16 [5] sowie die Trockenrohdichte nach DIN EN 772-13 [6] bestimmt. Die Bestimmung des Lochanteils der Ziegel erfolgte nach DIN EN 772-9 [7]. Zusätzlich wurden die Anforderungen an die Lochgeometrie sowie die Stegdicken nach den jeweiligen allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen überprüft. An den Prüfkörpern zur Bestimmung der Druckfestigkeit wurden die Ebenheit nach DIN EN 772-20 [8] und die Planparallelität nach DIN EN 772-16 [5] bestimmt. Die Prüfung der Steindruckfestigkeit erfolgte im lufttrockenen Zustand nach DIN EN 772-1 [9].

Die untersuchten Ziegel entsprachen hinsichtlich der Maße sowie der Rohdichte- und Festigkeitsklasse den vom Hersteller in der Kurzbezeichnung der Mauersteine angegebenen Eigenschaften.

2.2.2 Klebstoff

Bei dem verwendeten Zweikomponenten-Polyurethanklebstoff handelt es sich um einen reaktiven PUR-Klebstoff, der aus einer Klebstoffkomponente und einer Härterkomponente im Fertigteilwerk hergestellt wird. Die Klebstoffkomponente und der Härter werden aus separaten Lagertanks in Arbeitsbehälter gepumpt, dort auf eine Temperatur von etwa 35 °C erwärmt und über Dosieraggregate dem Mischkopf zugeleitet. Die Reaktionsmischung wird aus dem Mischkopf ausgetragen und reagiert auf der Lagerfugenfläche der Mauerziegel aus.

2.2.3 Mauermörtel

Für die Herstellung der Referenzprüfkörper war ein handelsüblicher Dünnbettmörtel für die Verwendung mit Planence test specimens. The fresh and hardened mortar characteristics were determined on each of the mortar mixes used for the reference series. The fresh mortar mix was tested according to DIN EN 1015-6 [10]. The hardened mortar characteristics were determined according to DIN EN 1015-10 [11] (dry density) and DIN EN 1015-11 [12] (flexural tensile strength and compressive strength).

The compressive strength of the thin layer mortar used met the requirement of DIN V 18580 [4] on thin layer mortar of class M10 according to DIN EN 998-2 [13] (mean value $\beta_{D,mo} \ge 10$ N/mm²).

2.3 Tests on small test specimens

2.3.1 Initial shear strength without load perpendicular to the bed joint according to DIN EN 1052-3

To determine the bonding properties under shear load, shear tests were carried out according to DIN EN 1052-3 [14] without load perpendicular to the bed joint. For this purpose, initially test series with air dry and slightly wet hollow clay units according to [1] were manufactured using 2C-PUR adhesive at a prefabrication plant in the Netherlands. Further test specimens with air dry hollow clay units according to [2] and [3] were bonded using 2C-PUR adhesive at prefabrication plants in Belgium and in Austria. In parallel, one reference series with each of the aforementioned unit types in combination with thin layer mortar was prepared in the laboratory of ibac.

Prior to the preparation of the three-unit test specimens, the units were first cut in half by dry sawing. Then, the tongue on one face of each masonry unit was cut off also by dry sawing. The half masonry units prepared in this way were then transported to the relevant prefabrication plant. In the prefabrication plant, the lower half masonry units were set manually onto a base carrier of the production line. The 2C-PUR adhesive components brought to the right temperature in work vessels were then fed via dosing units to the mixing head, which then applied the reaction mixture to the bed joint area. After this, the middle units of the subsequent three-unit test specimens were placed, aligned and pressed in firmly by a few blows with a rubber hammer. Next, the 2C-PUR adhesive was applied via the mixing system to the next bed joint area and the upper half masonry units were placed, aligned and pressed

The separate steps in the production of the three-unit test specimens in the prefabrication plant are illustrated in Figure 2.

Along with the wall test specimens, the three-unit test specimens were transported on a special low loader to ibac in Aachen at a later time. Before testing the three-unit test specimens, the bearing surfaces of both outer half masonry units and the load application surface of the middle half masonry unit were equalised with cement mortar. The prepared test specimens were stored in the laboratory at around 20 °C and 65 % relative humidity until testing. A conventional mason's trowel was used to apply the thin layer mortar when manufacturing the reference series. The remaining procedure corresponds largely to what was described earlier.

The test setup and measuring point arrangement are illustrated schematically in Figure 3. In the test facility, the

hochlochziegeln vorgesehen. An jeder zur Herstellung der Vergleichsserien verwendeten Mörtelmischung wurden die Frisch- und Festmörtelkennwerte bestimmt. Die Prüfung der Frischmörtelrohdichte erfolgte nach DIN EN 1015-6 [10]. Die Festmörteleigenschaften wurden nach DIN EN 1015-10 [11] (Trockenrohdichte) und DIN EN 1015-11 [12] (Biegezug- und Druckfestigkeit) bestimmt.

Die Druckfestigkeit des verwendeten Dünnbettmörtels entsprach nach DIN V 18580 [4] der Anforderung an einen Dünnbettmörtel der Mörtelklasse M10 nach DIN EN 998-2 [13] (Mittelwert $\beta_{D,m\ddot{o}} \geq 10$ N/mm²).

2.3 Untersuchungen an Kleinprüfkörpern2.3.1 Haftscherfestigkeit ohne Auflast nach DIN EN 1052-3

Zur Bestimmung der Verbundeigenschaften unter Scherbeanspruchung wurden Haftscherversuche nach DIN EN 1052-3 [14] ohne Auflast senkrecht zur Lagerfuge durchgeführt. Hierfür wurden zunächst Versuchsserien mit lufttrockenen und feuchten Hochlochziegeln nach [1] in Kombination mit dem 2K-PUR-Klebstoff in einem Fertigteilwerk in den Niederlanden hergestellt. Weitere Versuchsserien wurden bei einem gesonderten Termin mit lufttrockenen Hochlochziegeln nach [2] und [3] in Kombination mit dem 2K-PUR-Klebstoff in Fertigteilwerken in Belgien und Österreich verklebt. Parallel dazu wurde jeweils eine Referenzserie mit den zuvor genannten Steinarten in Kombination mit Dünnbettmörtel im Labor des ibac hergestellt.

Vor der Herstellung der 3-Steinkörper wurden die Ziegel zunächst durch Trockensägen halbiert. Anschließend erfolgte das Entfernen der Feder an jeweils einer Stirnseite der Mauersteine durch Trockensägen. Die so vorbereiteten Steinhälften wurden dann zum jeweiligen Fertigteilwerk transportiert. Im Fertigteilwerk wurden die unteren Steinhälften händisch auf einen Grundträger der Produktionsanlage gesetzt. Anschließend wurden die in Arbeitsbehältern vortemperierten Komponenten des 2K-PUR-Klebstoffs über Dosieraggregate dem Mischkopf zugeleitet und die Reaktionsmischung über diesen auf die Lagerfugenfläche aufgebracht. Danach wurden die mittleren Steine der späteren 3-Steinkörper aufgesetzt, ausgerichtet und mit einigen Schlägen mit einem Gummihammer festgedrückt. Anschließend wurde der 2K-PUR-Klebstoff über die Mischanlage auf die nächste Lagerfugenfläche aufgebracht und die oberen Steinhälften aufgesetzt, ausgerichtet und mit dem Gummihammer festgedrückt.

Die einzelnen Schritte bei der Herstellung der 3-Stein-Prüfkörper im Fertigteilwerk sind in Bild 2 dargestellt.

Die 3-Steinkörper wurden zu einem späteren Zeitpunkt zusammen mit den Wandprüfkörpern mit einem Spezialtieflader zum ibac nach Aachen transportiert. Vor der Prüfung der 3-Steinkörper wurden die Auflagerflächen der beiden äußeren Steinhälften und die Lasteinleitungsfläche der mittleren Steinhälfte mit Zementmörtel abgeglichen. Die vorbereiteten Prüfkörper wurden bis zur Prüfung im Labor bei rd. 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte gelagert. Bei der Herstellung der Referenzserie mit Dünnbettmörtel erfolgte der Mörtelauftrag mit einer herkömmlichen Maurerkelle. Die übrige Vorgehensweise entspricht weitestgehend der zuvor beschriebenen.

In Bild 3 sind der Versuchsaufbau und die Messstellenanordnung schematisch dargestellt. Bei der Versuchsein-









Fig. 2. Shear strength tests according to DIN EN 1052-3, manufacturing of test specimen Bild 2. Haftscherversuche ohne Auflast nach DIN EN 1052-3, Herstellung der Prüfkörper

lower load platens are supported on a horizontally moveable roller bearing and a sliding-tilting bearing. The test specimens were placed onto the lower load platens and the shear load was applied to the middle unit of the test specimen via an upper load platen and rollers. The load was applied in a force-controlled way. The rate of loading was chosen such that the maximum loads were reached after about 60 to 90 seconds. During the test of two series, the deformations in the joints were measured in loading direction with two inductive displacement transducers W1 placed on each side of the test specimen in the middle of the overlap length, to allow a comparison of the deformability in the joint between test specimens with 2C-PUR adhesive and those with thin layer mortar.

In Figure 4 the ascertained deformations in loading direction for the test series with air dry hollow clay units according to [1] in combination with 2C-PUR adhesive (series U9-tr-PU) and thin layer mortar (series U9-tr-DM) are shown as mean values of the measuring points of a joint.

A survey of the test results is illustrated in Figure 5. Shown are the mean values of the initial shear strength f_{vo} between the masonry units listed in section 2.2.1 and 2C-PUR adhesive and thin layer mortar respectively, as well as the scattering of the single tests.

On the basis of the comparison tests with the units according to [1] it is evident that the values of the initial shear strength in combination with thin layer mortar are significantly higher than those of the test specimens with 2C-PUR adhesive. However at this point it should be mentioned that, after manufacturing in the prefabrication plant, in deviation from DIN EN 1052-3 [14] the test specimens were not preloaded with a uniformly distributed compressive load. The application of a preload, as it actually occurs in masonry due to the dead load of the upper

richtung sind die unteren Lasteinleitungsplatten auf einem horizontal verschieblichen Rollenlager und einem Gleit-Kipplager gelagert. Die Prüfkörper wurden auf die unteren Lasteinleitungsplatten gelegt und die Scherbelastung am mittleren Mauerstein des Prüfkörpers über eine obere Lasteinleitungsplatte und Rollen aufgebracht. Die Belastung erfolgte kraftgeregelt. Die Belastungsgeschwindigkeit wurde dabei so gewählt, dass die Höchstlasten nach ca. 60 bis 90 s erreicht wurden. Während der Prüfung wurden bei zwei Versuchsserien die Verformungen in den Fugen in Richtung der Belastung mit jeweils zwei induktiven Wegaufnehmern W1 auf beiden Seiten der Prüfkörper in der Mitte der Überbindelänge gemessen, um einen Vergleich der Verformbarkeit in der Fuge zwischen Prüfkörpern mit 2K-PUR-Klebstoff bzw. mit Dünnbettmörtel zu ermöglichen.

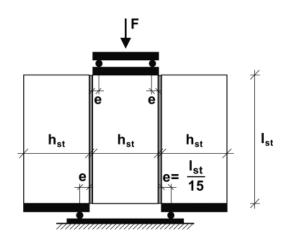


Fig. 3. Shear strength tests according to DIN EN 1052-3, test specimen and test setup Bild 3. Haftscherversuche ohne Auflast nach DIN EN 1052-3, Prüfkörper und Versuchsaufbau

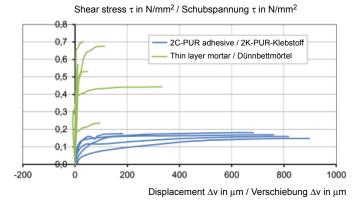


Fig. 4. Shear strength tests according to DIN EN 1052-3, shear stress-displacement curves Bild 4. Haftscherversuche ohne Auflast nach DIN EN 1052-3, Schubspannungs-Verschiebungslinien

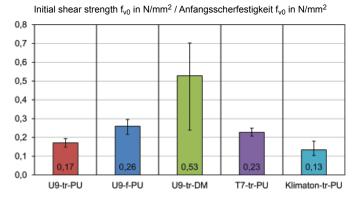


Fig. 5. Shear strength tests according to DIN EN 1052-3, test results (mean values and range of dispersion)
Bild 5. Haftscherversuche ohne Auflast nach DIN EN 1052-3,
Ergebnisse (Mittelwerte und Streubereiche)

unit layers, has a positive effect on the bonding properties especially for walls with 2C-PUR adhesive. In subsequent tests it was possible to show that higher bonding strength values can be obtained by applying a slight preload after manufacturing of the three-unit test specimens with 2C-PUR adhesive (Figure 6).

Thus, the required value of the bond strength according to DIN V 18580 [4], that a thin layer mortar in accordance with DIN EN 998-2 [13] has to fulfil when tested according to DIN EN 1052-3 [14] ($f_{vok} \ge 0.20 \text{ N/mm}^2$), was clearly observed both in the test series with 2C-PUR adhesive and in the reference series with thin layer mortar.

2.3.2 Shear strength with load perpendicular to the shear joint according to DIN EN 1052-3

To determine the frictional behaviour, additional shear tests were carried out in accordance with the European test procedure (DIN EN 1052-3 [14]) with three different loading stages perpendicular to the shear joint ($\sigma_H = 0.1 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_H = 0.3 \text{ N/mm}^2$ and $\sigma_H = 0.5 \text{ N/mm}^2$). To this end, a test series of air dry hollow clay units according to [1] was manufactured using 2C-PUR adhesive at the prefabrication plant in the Netherlands. As a reference, a further test series was manufactured at ibac with the same units in combination with thin layer mortar. The proce-

Initial shear strength f_{v0} in N/mm² / Anfangsscherfestigkeit f_{v0} in N/mm²

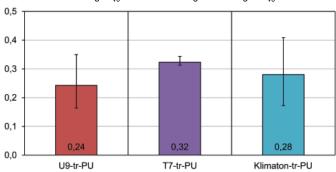


Fig. 6. Shear strength tests according to DIN EN 1052-3 (post-test), test results (mean values and range of dispersion) Bild 6. Haftscherversuche ohne Auflast nach DIN EN 1052-3 (Nachversuche), Ergebnisse (Mittelwerte und Streubereiche)

In Bild 4 sind die bei den Versuchsserien mit lufttrockenen Hochlochziegeln nach [1] in Kombination mit 2K-PUR-Klebstoff (Serie U9-tr-PU) bzw. Dünnbettmörtel (Serie U9-tr-DM) in Richtung der Belastung bestimmten Verformungen als Mittelwerte der Messstellen einer Fuge dargestellt.

Eine Übersicht der Untersuchungsergebnisse ist in Bild 5 dargestellt. Gezeigt sind die Mittelwerte der Anfangsscherfestigkeit f_{vo} zwischen den in Abschnitt 2.2.1 aufgeführten Mauersteinen und 2K-PUR-Klebstoff bzw. Dünnbettmörtel sowie die Streubreite der einzelnen Versuche.

Es zeigt sich anhand der Vergleichsversuche mit dem Ziegel nach [1], dass die Werte der Anfangsscherfestigkeit in Kombination mit Dünnbettmörtel deutlich höher sind als die der Prüfkörper mit dem 2K-PUR-Klebstoff. Allerdings muss an dieser Stelle erwähnt werden, dass die Prüfkörper nach der Herstellung im Fertigteilwerk abweichend von DIN EN 1052-3 [14] nicht mit einer gleichmäßig verteilten Drucklast vorbelastet wurden. Das Aufbringen einer Vorlast, wie sie im Mauerwerk durch das Eigengewicht der oberen Steinlagen in der Realität auftritt, wirkt sich insbesondere bei Wänden mit 2K-PUR-Klebstoff positiv auf die Verbundeigenschaften aus. In Nachversuchen konnte nachgewiesen werden, dass durch das Aufbringen einer geringen Vorlast nach der Herstellung der 3-Steinkörper mit 2K-PUR-Klebstoff höhere Verbundfestigkeitswerte erreicht werden (Bild 6).

Somit wurde der Anforderungswert an die Verbundfestigkeit nach DIN V 18580 [4], den ein Dünnbettmörtel gemäß DIN EN 998-2 [13] bei Prüfung nach DIN EN 1052-3 [14] zu erfüllen hat ($f_{\rm vok} \ge 0,20~{\rm N/mm^2}$), sowohl bei den Versuchsserien mit 2K-PUR-Klebstoff als auch bei der Referenzserie mit Dünnbettmörtel deutlich eingehalten.

2.3.2 Scherfestigkeit mit Auflast nach DIN EN 1052-3

Zur Bestimmung des Reibungsverhaltens wurden zusätzlich Scherversuche nach dem europäischen Prüfverfahren (DIN EN 1052-3 [14]) mit drei unterschiedlichen Auflaststufen ($\sigma_H = 0.1 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_H = 0.3 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma_H = 0.5 \text{ N/mm}^2$) senkrecht zur Scherfuge durchgeführt. Hierfür wurde eine Versuchsserie mit lufttrockenen Hochlochziegeln nach [1] in Kombination mit dem 2K-PUR-Klebstoff im Fertigteilwerk in den Niederlanden hergestellt. Als Referenz wurde eine zusätzliche Versuchsserie mit den



Fig. 7. Shear strength tests according to DIN EN 1052-3, test specimen and test setup Bild 7. Scherversuche mit Auflast nach DIN EN 1052-3, Prüfkörper und Versuchsaufbau

dure for manufacturing the three-unit test specimen corresponded to that described in section 2.3.1.

Figure 7 shows the test setup and measuring point arrangement for determining the deformation in the joint. In the test facility, the lower load platens are supported on a horizontally moveable roller bearing and a sliding-tilting bearing. The test specimens were placed onto the lower load platens and then loaded with a constant stress applied via a horizontal piston and two vertical load platens. The shear load was applied at the middle unit of the test specimen via an upper load platen and roller bearings (a horizontally moveable roller bearing and a sliding-tilting bearing). The load was applied in a deformation-controlled way at constant crosshead speed. During the test, the deformations were measured in the joints in shear loading direction with two inductive displacement transducers W1 placed on each side of the test specimen in the middle of the overlap length (cf. section 2.3.1).

Figure 8 shows the maximum shear stresses as a function of the horizontal loading σ_H of the test specimens with 2C-PUR adhesive. The initial adhesive shear strength determined by linear regression and extrapolation analogous to DIN EN 1052-3 [14] is 0.22 N/mm² (the tests without loading were disregarded here). At 0.21 N/mm² the mean value of all tests without load perpendicular to the shear joint corresponds almost to this value. The friction coefficient (static friction) in the tests with 2C-PUR adhesive comes out at 0.45.

For comparison, Figure 9 shows the results of the test series with thin layer mortar. Here the extrapolated initial adhesive shear strength according to [14] is 0.37 N/mm². At 0.53 N/mm², the mean value of the tests without load perpendicular to the shear joint is significantly higher than this value. The friction coefficient yielded by the regressions is 0.79.

2.3.3 Tensile bond strength

To determine the bonding properties under tensile load, centric tensile bond tests were carried out on two-unit test

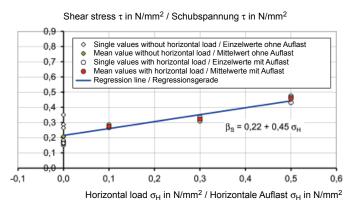


Fig. 8. Shear strength tests according to DIN EN 1052-3, hollow clay units/two-component polyurethane adhesive, maximum shear stress depending on the horizontal load Bild 8. Scherversuche mit Auflast nach DIN EN 1052-3, Hochlochziegel/2K-PUR-Klebstoff, maximale Schubspannung in Abhängigkeit der horizontalen Auflast

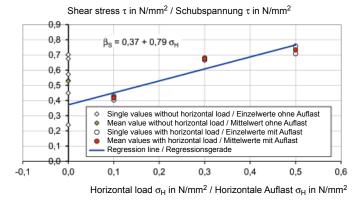


Fig. 9. Shear strength tests according to DIN EN 1052-3, hollow clay units/thin layer mortar, maximum shear stress depending on the horizontal load Bild 9. Scherversuche mit Auflast nach DIN EN 1052-3, Hochlochziegel/Dünnbettmörtel, maximale Schubspannung in Abhängigkeit der horizontalen Auflast

gleichen Ziegeln in Kombination mit Dünnbettmörtel im Labor des ibac hergestellt. Die Vorgehensweise bei der Herstellung der 3-Steinkörper entsprach der in Abschnitt 2.3.1 beschriebenen.

In Bild 7 sind der Versuchsaufbau und die Messstellenanordnung zur Bestimmung der Verformungen in der Fuge dargestellt. Bei der Versuchseinrichtung sind die unteren Lasteinleitungsplatten auf einem horizontal verschieblichen Rollenlager und einem Gleit-Kipplager gelagert. Die Prüfkörper wurden auf die unteren Lasteinleitungsplatten gelegt und anschließend mit einer konstanten Spannung, die über einen horizontalen Kolben und zwei vertikale Lasteinleitungsplatten aufgebracht wurde, belastet. Die Scherbelastung wurde am mittleren Mauerstein des Prüfkörpers über eine obere Lasteinleitungsplatte und Rollenlager (ein horizontal verschiebliches Rollenlager und ein Gleit-Kipplager) aufgebracht. Die Belastung erfolgte verformungsgeregelt mit konstanter Traversengeschwindigkeit. Während der Prüfung wurden die Verformungen in den Fugen in Richtung der Scherbelastung mit jeweils zwei induktiven Wegaufnehmern W1 auf beiden Seiten der Prüfkörper in der Mitte der Überbindelänge gemessen (vgl. Abschn. 2.3.1).



Fig. 10. Tensile bond tests, test specimen and test setup Bild 10. Zentrische Haftzugversuche an 2-Stein-Prüfkörpern, Prüfkörper und Versuchsaufbau

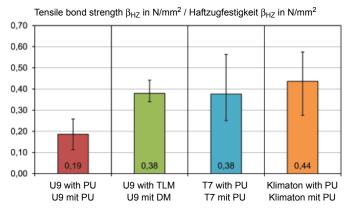


Fig. 11. Tensile bond tests, test results (mean values and range of dispersion)

Bild 11. Zentrische Haftzugversuche an 2-Stein-Prüfkörpern, Ergebnisse (Mittelwerte und Streubereiche)

specimens with 2C-PUR adhesive and thin layer mortar respectively. A total of four test series were manufactured for this. The manufacturing of the test specimens was carried out with hollow clay units according to [1], [2] and [3] using 2C-PUR adhesive at prefabrication plants in the Netherlands and Belgium respectively. The procedure for manufacturing the two-unit test specimens in the prefabrication plant was as described in section 2.3.1. In addition, as a reference, a further test series was manufactured in the laboratory of ibac with hollow clay units according to [1] using thin layer mortar.

The chosen setup for carrying out the tests is shown in Figure 10.

A survey of the test results is shown in Figure 11 with the mean values of the adhesive tensile strength with 2C-PUR adhesive and thin layer mortar respectively as well as the scattering of the single tests.

The mean value of the tensile bond strength for the test specimens manufactured with 2C-PUR adhesive was between $\beta_{HZ}=0.19~N/mm^2$ and $\beta_{HZ}=0.44~N/mm^2$. The comparison tests on the test specimens manufactured with thin layer mortar yielded a mean value of $\beta_{HZ}=0.38~N/mm^2$. A required value on the tensile bond strength between ma-

Bild 8 zeigt die maximalen Schubspannungen in Abhängigkeit der horizontalen Auflast $\sigma_{\rm H}$ der Prüfkörper mit 2K-PUR-Klebstoff. Die analog zu DIN EN 1052-3 [14] durch lineare Regression und Extrapolation bestimmte Anfangshaftscherfestigkeit – die Versuche ohne Auflast wurden hierbei nicht berücksichtigt – beträgt 0,22 N/mm². Der Mittelwert aller Versuche ohne Auflast entspricht mit 0,21 N/mm² nahezu diesem Wert. Der Reibungskoeffizient (Haftreibung) ergibt sich bei den Versuchen mit 2K-PUR-Klebstoff zu 0,45.

In Bild 9 sind zum Vergleich die Ergebnisse der Versuchsserie mit Dünnbettmörtel dargestellt. Die nach [14] extrapolierte Anfangshaftscherfestigkeit beträgt hier 0,37 N/mm². Der Mittelwert der Versuche ohne Auflast ist mit 0,53 N/mm² deutlich höher als dieser Wert. Der Reibungskoeffizient ergibt sich aus den Regressionen zu 0,79.

2.3.3 Haftzugfestigkeit

Zur Bestimmung der Verbundeigenschaften unter Zugbeanspruchung wurden zentrische Haftzugversuche an mit 2K-PUR-Klebstoff bzw. mit Dünnbettmörtel vermörtelten 2-Steinkörpern durchgeführt. Hierfür wurden insgesamt vier Versuchsserien hergestellt. Die Herstellung erfolgte mit Hochlochziegeln nach [1], [2] und [3] in Kombination mit dem 2K-PUR-Klebstoff im Fertigteilwerk in den Niederlanden bzw. in Belgien. Die Vorgehensweise bei der Herstellung der 2-Steinkörper im Fertigteilwerk entsprach der in Abschnitt 2.3.1 beschriebenen. Zusätzlich wurde als Referenz eine weitere Versuchsserie mit Hochlochziegeln nach [1] in Kombination mit Dünnbettmörtel im Labor des ibac hergestellt.

Der für die Versuchsdurchführung gewählte Versuchsaufbau ist in Bild 10 dargestellt.

Eine Übersicht der Untersuchungsergebnisse zeigt Bild 11 mit den Mittelwerten der Haftzugfestigkeit mit 2K-PUR-Klebstoff bzw. mit Dünnbettmörtel sowie den Streubreiten der einzelnen Versuche.

Der Mittelwert der Haftzugfestigkeit der mit 2K-PUR-Klebstoff hergestellten Prüfkörper betrug zwischen β_{HZ} = 0,19 N/mm² und β_{HZ} = 0,44 N/mm². Die Vergleichsversuche an den mit dem Dünnbettmörtel hergestellten Prüfkörpern ergaben einen Mittelwert β_{HZ} = 0,38 N/mm². Ein Anforderungswert an die Haftzugfestigkeit zwischen Mauerstein und Mauermörtel existiert nicht, da es sich um keinen genormten Versuch handelt. Die Biegezugfestigkeit rechtwinklig zur Lagerfuge ist als Anforderungswert im Nationalen Anhang zum Eurocode 6 [15] zu 0,2 N/mm² festgelegt. Dieser Wert wird gemäß den vorliegenden Untersuchungen mit einer Ausnahme deutlich überschritten.

2.3.4 Festigkeitsentwicklung des 2K-PUR-Klebstoffs (Haftscherfestigkeit nach DIN 18555-5)

Um ein geeignetes Mindestprüfalter für die Untersuchungen festlegen zu können, wurde die Festigkeitsentwicklung des 2K-PUR-Klebstoffs mithilfe von Haftscherversuchen nach DIN 18555-5 [16] bestimmt. Die Untersuchungen erfolgten mit dem beim Nachweis der Verbundfestigkeit nach DIN V 18580 [4] verwendeten und hierfür als ungünstig angesehenen Kalksand-Referenzstein in Kombination mit dem 2K-PUR-Klebstoff. Insgesamt wurden hierfür drei Versuchsserien im Fertigteilwerk in Belgien hergestellt.

sonry unit and masonry mortar does not exist since the test concerned is not standardised. In the National Annex to Eurocode 6 [15], the flexural tensile strength perpendicular to the bed joint is defined as a required value of 0.2 N/mm². With one exception this value is clearly exceeded according to the present tests.

2.3.4 Strength development of the 2C-PUR adhesive (adhesive shear strength according to DIN 18555-5)

In order to define an appropriate minimum testing age for the tests, the strength development of the 2C-PUR adhesive was determined in shear bond tests according to DIN 18555-5 [16]. The tests were carried out with the calcium silicate reference unit (in combination with 2C-PUR adhesive) as used in, and considered as unfavourable for, evidence of shear bond strength in accordance with DIN V 18580 [4]. A total of three test series were manufactured for this at the prefabrication plant in Belgium.

Prior to the manufacturing of the test specimens at the prefabrication plant, the calcium silicate reference units were preconditioned at ibac to a moisture content of 4.0 % by mass by immersion in a water basin, and were then packed air-tight for a duration of at least two weeks in plastic bags in order to ensure a uniform distribution of moisture over the cross section of the unit. On the day of manufacturing, the conditioned units were transported to the prefabrication plant, removed from their plastic bags and in turn were placed onto a base carrier of the production line. Before the adhesive was applied, the bearing faces of the units were thoroughly swept with a hand brush to remove any loose pieces and dust layers. The application of the 2C-PUR adhesive was carried out in the same way as in the manufacturing of the rest of the composite test specimens (see section 2.3.1).

The test specimens were delivered to ibac roughly 24 hours after manufacturing and the 1 day strength values of the first test series were determined immediately after delivery. The remaining two test series were tested at an age of 2 days and 7 days.

Figure 12 shows a two-unit test specimen built into the testing device used. The load was applied in a force-controlled way at a rate such that fracture occurred after about 60 to 90 seconds.

A survey of the test results is illustrated in Figure 13. Shown are the mean values of test series as well as the scattering of the single tests.

The tests have shown that the 2C-PUR adhesive is already fully cured after one day. Both series of tests, which were carried out at ages of 2 days and 7 days, yielded no further increase in bond strength. Since no significant differences in strength were to be observed between the separate test ages, an age as young as possible was generally chosen for testing in order to keep the overall duration of tests to be carried out as short as possible.

2.3.5 Durability

To assess the long-term behaviour of the adhesive, various tests have already been carried out within the framework of [17]. In detail these were test series on ageing resistance, alternating climate resistance, hydrolysis resistance of the adhesive components as well as endurance tests on the

Vor der Herstellung der Prüfkörper im Fertigteilwerk wurden die Kalksand-Referenzsteine im ibac durch Eintauchen in ein Wasserbecken auf einen Feuchtegehalt von 4,0 M.-% vorkonditioniert und anschließend für eine Dauer von mindestens zwei Wochen luftdicht in Kunststoffbeuteln verpackt, um eine gleichmäßige Feuchteverteilung über den Steinquerschnitt gewährleisten zu können. Am Tag der Herstellung wurden die konditionierten Steine zum Fertigteilwerk transportiert, dort aus den Kunststoffbeuteln entnommen und auf einen Grundträger der Produktionsanlage hintereinander gelegt. Vor dem Auftrag des Klebstoffs wurden die Lagerflächen der Steine gründlich mit einem Handfeger abgekehrt, um lose Teile und Staubschichten zu entfernen. Der Auftrag des 2K-PUR-Klebstoffs erfolgte analog zur Herstellung der übrigen Verbundprüfkörper (s. Abschn. 2.3.1).

Ungefähr 24 Stunden nach der Herstellung wurden die Prüfkörper zum ibac geliefert und unmittelbar nach Anlieferung die 1d-Festigkeitswerte der ersten Versuchsserie bestimmt. Die übrigen beiden Versuchsserien wurden im Alter von 2d und 7d geprüft.

Bild 12 zeigt einen in die verwendete Prüfeinrichtung eingebauten 2-Stein-Prüfkörper. Die Belastung erfolgte kraftgeregelt, die Belastungsgeschwindigkeit wurde so eingestellt, dass der Bruch nach rd. 60 bis 90 s eintrat.



Fig. 12. Shear strength tests according to DIN 18555-5, test specimen and test setup Bild 12. Haftscherversuche nach DIN 18555-5, Prüfkörper und Versuchsaufbau

Shear bond strength $\beta_{HS,DIN}$ in N/mm² / Haftscherfestigkeit $\beta_{HS,DIN}$ in N/mm²

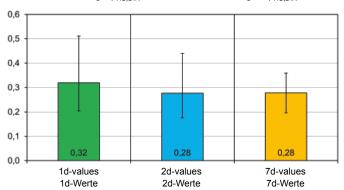


Fig. 13. Shear strength tests according to DIN 18555-5, test results (mean values and range of dispersion) Bild 13. Haftscherversuche an 2-Stein-Prüfkörpern nach DIN 18555-5, Ergebnisse (Mittelwerte und Streubereiche)



Fig. 14. Tensile bond tests, test specimen and test setup Bild 14. Zentrische Haftzugversuche an Zylindern, Prüfkörper und Versuchsaufbau

Tensile bond strength β_{HZ} in N/mm² / Haftzugfestigkeit β_{HZ} in N/mm²

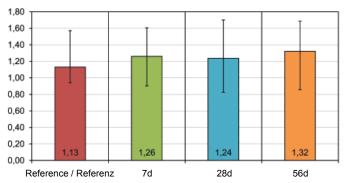


Fig. 15. Tensile bond tests, test results (mean values and range of dispersion)

Bild 15. Zentrische Haftzugversuche an Zylindern, Ergebnisse (Mittelwerte und Streubereiche)

flexural tensile strength perpendicular to the bed joint. Independent of this, additional tests described below were carried out at ibac as part of the approval procedure to check the durability of the 2C-PUR adhesive.

For this, a total of four test series each comprising five two-unit test specimens according to DIN 18555-5 [16] were manufactured at a prefabrication plant in Austria. Cylinders with a diameter of about 50 mm were then bored out of the two-unit test specimens in direction of the unitheight, on which centric tensile bond tests were carried out after accelerated ageing in a climatic chamber at 50 °C and 80 % relative humidity. Steel stamps were bonded to the load introduction surfaces of the cylinders with the two-component adhesive Akepox at least 24 hours prior to carrying out the tensile bond tests. The connection to the testing machine was done articulated. The chosen setup for carrying out the tests is shown in Figure 14. The load was applied in a displacement-controlled way.

A survey of the test results is illustrated in Figure 15. Shown are the mean values of test series as well as the scattering of the single tests.

As shown in Figure 15, the tests were able to show that the accelerated ageing has no negative influence on the level of the tensile bond strength values.

Eine Übersicht der Untersuchungsergebnisse enthält Bild 13. Gezeigt sind die Mittelwerte der Versuchsserien sowie die Streubreite der einzelnen Versuche.

Die Versuche haben gezeigt, dass der 2K-PUR-Klebstoff bereits nach einem Tag vollständig ausgehärtet ist. Die beiden Versuchsserien, die im Alter von 2d und 7d geprüft wurden, haben keine weitere Steigerung der Verbundfestigkeit ergeben. Da zwischen den einzelnen Prüfaltern keine deutlichen Festigkeitsunterschiede zu beobachten waren, wurde als Prüfalter in der Regel ein möglichst junges Alter gewählt, um die Gesamtdauer der durchzuführenden Untersuchungen möglichst gering zu halten.

2.3.5 Dauerhaftigkeit

Zur Einschätzung des Langzeitverhaltens des Klebstoffs wurden im Rahmen von [17] bereits diverse Untersuchungen durchgeführt. Im Einzelnen waren dies Versuchsreihen zur Alterungsbeständigkeit, Wechselklimabeständigkeit und zur Hydrolysebeständigkeit des Klebstoffs sowie Dauerstandversuche zur Biegezugfestigkeit senkrecht zur Lagerfuge. Unabhängig davon wurden im Rahmen des Zulassungverfahrens zusätzliche Untersuchungen zur Überprüfung der Dauerhaftigkeit des 2K-PUR-Klebstoffs am ibac durchgeführt, die nachfolgend beschrieben werden.

Hierfür wurden insgesamt vier Versuchsserien à jeweils fünf 2-Steinkörper nach DIN 18555-5 [16] in einem Fertigteilwerk in Österreich hergestellt. Anschließend wurden aus den 2-Steinkörpern Zylinder mit einem Durchmesser von ca. 50 mm in Richtung Steinhöhe ausgebohrt, an denen nach einer beschleunigten Alterung in einer Klimakammer bei 50 °C und 80 % relativer Luftfeuchte zentrische Haftzugversuche durchgeführt wurden. Mindestens 24 h vor Durchführung der Haftzugversuche wurden auf die Lasteinleitungsflächen der Zylinder Stahlstempel mit dem Zweikomponenten-Kleber Akepox geklebt. Der Anschluss an die Prüfmaschine erfolgte gelenkig. Der für die Versuchsdurchführung gewählte Versuchsaufbau ist in Bild 14 dargestellt. Die Belastung erfolgte weggeregelt.

Eine Übersicht der Untersuchungsergebnisse ist in Bild 15 dargestellt. Gezeigt sind die Mittelwerte der Haftzugfestigkeit sowie die Streubreite der einzelnen Versuche.

Wie in Bild 15 zu erkennen, konnte durch die Versuche kein negativer Einfluss der beschleunigten Alterung auf die Höhe der Haftzugfestigkeitswerte gezeigt werden.

2.4 Untersuchungen an Wandprüfkörpern 2.4.1 Allgemeines

Die Festigkeitseigenschaften des Mauerwerks wurden in Großversuchen an Wandprüfkörpern bestimmt, da diese in jedem Fall für die Angabe von charakteristischen Festigkeitswerten (Druck, Biegung, Schub) in der angestrebten bauaufsichtlichen Zulassung benötigt werden.

Zunächst wurden Druckversuche an geschosshohen Mauerwerkwänden nach DIN EN 1052-1 [18] mit den in Abschnitt 2.2.1 aufgeführten Hochlochziegeln in Kombination mit 2K-PUR-Klebstoff und mit Dünnbettmörtel durchgeführt. Zusätzlich wurde bei der ersten Steinart [1] eine Versuchsserie als Trockenmauerwerk hergestellt. Die Herstellung der Wände mit 2K-PUR-Klebstoff erfolgte im

2.4 Tests on wall specimens 2.4.1 General

The strength properties of masonry were determined in large-scale tests on wall specimens, since these are needed in any case to specify characteristic strength values (compressive strenght, flexural strength and shear strength) in the technical approval sought.

Initially, compressive tests were carried out on storey-high masonry walls according to DIN EN 1052-1 [18] with the hollow clay units listed in section 2.2.1 in combination with 2C-PUR adhesive and with thin layer mortar. In addition, a test series was manufactured as dry masonry with the first unit type [1]. The manufacturing of the walls with 2C-PUR adhesive took place at the prefabrication plant. The test specimens with thin layer mortar and the dry masonry mentioned earlier were manufactured at ibac. The masonry compressive tests are described in more detail in section 2.4.2.

The load-bearing capacity of the masonry under flexural load was determined by flexural tests parallel and perpendicular to the bed joint on small walls in accordance with DIN EN 1052-2 [19]. Solely the first type of unit [1] was used in this instance. The tests on the flexural load bearing capacity are explained in section 2.4.3.

Furthermore, tests on the shear load bearing behaviour were required in order to create the necessary basis for specifying the characteristic values of shear strength. To this end, two storey-high masonry walls (2.50 m long and high) of hollow clay units according to [1] were manufactured in combination with the 2C-PUR adhesive at the prefabrication plant and then transported to Aachen, where they were tested according to the unified test procedure of the DIBt with a low and a high load. The shear tests are described in detail in section 2.4.4.

Fertigteilwerk. Die Prüfkörper mit Dünnbettmörtel und die zuvor erwähnten trocken aufgemauerten Wände wurden am ibac hergestellt. Die Untersuchungen zur Drucktragfähigkeit sind in Abschnitt 2.4.2 näher beschrieben.

Die Tragfähigkeit des Mauerwerks unter Biegebeanspruchung wurde mithilfe von Biegezugversuchen parallel und senkrecht zur Lagerfuge an kleinen Wänden in Anlehnung an DIN EN 1052-2 [19] bestimmt. Hierbei kam ausschließlich die erste Steinart [1] zum Einsatz. Die Untersuchungen zur Biegetragfähigkeit sind in Abschnitt 2.4.3 erläutert.

Weiterhin waren Untersuchungen zum Schubtragverhalten gefordert, um die für eine Festlegung von charakteristischen Werten der Schubfestigkeit erforderliche Grundlage zu schaffen. Hierfür wurden zwei geschosshohe, 2,50 m lange und hohe Mauerwerkwände mit Hochlochziegeln nach [1] in Kombination mit dem 2K-PUR-Klebstoff im Fertigteilwerk hergestellt, anschließend nach Aachen transportiert und dort nach dem vereinheitlichten Prüfverfahren des DIBt mit geringer und mit hoher Auflast geprüft. Die Untersuchungen zur Schubtragfähigkeit sind in Abschnitt 2.4.4 detailliert beschrieben.

2.4.2 Mauerwerkdruckfestigkeit

Zur Bestimmung der Spannungs-Dehnungslinien unter Druckbeanspruchung wurden Druckversuche an geschosshohen Mauerwerkwänden nach DIN EN 1052-1 [18] durchgeführt. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die verschiedenen Versuchsserien zur Bestimmung der Spannungs-Dehnungslinien unter Druckbeanspruchung.

Die einzelnen Schritte bei der Herstellung der geschosshohen Mauerwerkwände mit 2K-PUR-Klebstoff im Fertigteilwerk sind beispielhaft in Bild 16 dargestellt.

Table 1. Masonry compressive strength tests according to DIN EN 1052-1, test series Tabelle 1. Zentrische Druckversuche an Wänden nach DIN EN 1052-1, Versuchsserien

Series no. / Serie Nr.	Masonry unit / Mauerstein	Execution of bed joints / Ausführung der Lagerfugen			Remarks / Bemerkungen	
		PU ²⁾	TLM ³⁾	DM ⁴⁾		
1		×			Manufacturing in the Netherlands /	
2	Hollow clay unit acc. to [1] /	×1)			Herstellung in den Niederlanden	
3	Ziegel nach [1]		×		Manufacturing at ibac /	
4	-			×	Herstellung im ibac	
5	Hollow clay unit acc. to [2] /	×			Manufacturing in Austria / Herstellung in Österreich	
6	Ziegel nach [2]		×		Manufacturing at ibac / Herstellung im ibac	
7	Hollow clay unit acc. to [3] /	×			Manufacturing in Belgium / Herstellung in Belgien	
8	Ziegel nach [3]		×		Manufacturing at ibac / Herstellung im ibac	

with factory-drilled vertical holes for the transport system / mit im Werk eingebrachten vertikalen Bohrungen für das Transportsystem
 2C-PUR adhesive / 2K-PUR-Klebstoff,
 Thin layer mortar / Dünnbettmörtel,
 Dry masonry / Trockenmauerwerk

2.4.2 Masonry compressive strength

To determine the stress-strain curves under compressive load, compressive tests were carried out on storey-high masonry walls according to DIN EN 1052-1 [18]. Table 1 gives a survey of the different test series for determining the stress-strain curves under compressive load.

The single steps in the manufacturing of storey-high masonry walls with 2C-PUR adhesive at the prefabrication plant are shown as an example in Figure 16.

A few days after manufacturing, the wall test specimens were transported to ibac on special low loaders, where finally the masonry compressive strength was determined according to DIN EN 1052-1 [18]. Two vertical measurement sections of around 750 mm in length were placed on each side of the test specimens to determine the stress-strain curves in the compression test. Before testing the masonry compressive strength, a thin layer of cement mortar was first applied manually to the upper side of the test specimens to prevent moisture being sucked out of the gypsum adjustment layer too quickly. After the cement mortar has cured, the actual adjustment of the load introduction surfaces with gypsum is done in the test machine.

Einige Tage nach der Herstellung wurden die Wandprüfkörper auf speziellen Tiefladern zum ibac transportiert, wo schließlich die Druckfestigkeit der Wände nach DIN EN 1052-1 [18] bestimmt wurde. An den Wandprüfkörpern wurden auf den Seitenflächen je zwei vertikale Messstrecken von rd. 750 mm Messlänge zur Bestimmung der Spannungs-Dehnungslinien im Druckversuch angebracht. Vor der Prüfung der Mauerwerkdruckfestigkeit wurde die Oberseite der Wandprüfkörper zunächst händisch mit einer dünnen Schicht Zementmörtel versehen, um ein zu schnelles Absaugen des Wassers aus der Gips-Abgleichschicht zu verhindern. Nach dem Erhärten des Zementmörtels erfolgte das eigentliche Abgleichen der Lasteinleitungsflächen mit Gips in der Prüfmaschine. Die abgeglichenen Wandprüfkörper wurden in einem Alter von mindestens 7 Tagen in die Prüfeinrichtung eingebaut und die Vertikallast zentrisch aufgebracht. Bild 17 zeigt beispielhaft einen in die Druck-Prüfmaschine eingebauten Wandprüfkörper.

Die Druckversuche wurden grundsätzlich kraftgeregelt durchgeführt. Die Mauerwerkwände wurden mit einer konstanten Geschwindigkeit belastet, so dass die Höchstlast nach ca. 5 Minuten erreicht wurde. An den













Fig. 16. Masonry compressive strength tests according to DIN EN 1052-1, manufacturing of test walls Bild 16. Zentrische Druckversuche an Wänden nach DIN EN 1052-1, Herstellung der Wandprüfkörper

At an age of at least 7 days, the adjusted test specimens were installed in the testing device and the vertical load was applied centrically. Figure 17 shows an example of a wall test specimen installed in the testing machine.

The compressive tests were generally carried out in a force-controlled manner. The masonry walls were loaded at a constant rate so that the maximum load was achieved after approximately 5 minutes. The stress-strain curves were determined on each of the masonry walls until the maximum load was reached. The longitudinal deformations were measured with inductive displacement transducers W10. The deformations, the piston travel and the applied load were continuously recorded with a measuring computer.

The results of the compressive tests on the storey-high masonry walls according to DIN EN 1052-1 [18] are summarised in Table 2.

The test series show that there is no major difference in the compressive strength between dry- and PUR adhesive masonry (series 1, 2 and 4) and in comparison thin layer mortar masonry achieves 50–70 % higher values (series 3 and 6). Solely for the internal wall clay unit according to [3] a factor of 1.16 arises (TLM/PUR). This can be attributed to greater sensitivity of the relatively robust unit to stress peaks, which thin layer mortar is able to even out.

2.4.3 Masonry flexural tensile strength

The flexural tensile strength parallel and perpendicular to the bed joint was determined on small masonry walls in dependence on DIN EN 1052-2 [19]. For both test directions, three test specimens each of the first unit type (hollow clay unit according to [1]) in combination with 2C-PUR adhesive and thin layer mortar respectively, were manufac-



Fig. 17. Masonry compressive strength tests according to DIN EN 1052-1, test specimen and test setup Bild 17. Zentrische Druckversuche an Wänden nach DIN EN 1052-1, Prüfkörper und Versuchsaufbau

Prüfkörpern wurden jeweils die Spannungs-Dehnungslinien bis zur Bruchlast ermittelt. Die Längsverformungen wurden mit induktiven Wegaufnehmern W10 gemessen. Die Verformungen, der Kolbenweg und die aufgebrachte Last wurden mit einem Messrechner kontinuierlich registriert.

Die Untersuchungsergebnisse der Druckversuche an den geschosshohen Mauerwerkwänden nach DIN EN 1052-1 [18] enthält Tabelle 2.

Die Versuchsserien zeigen, dass zwischen Trockenund PUR-Mauerwerk kein großer Unterschied in der

Table 2. Masonry compressive strength tests according to DIN EN 1052-1, test results (mean values) Tabelle 2. Zentrische Druckversuche an Wänden nach DIN EN 1052-1, Ergebnisse (Mittelwerte)

Series no. / Serie Nr.	Description / Beschreibung	f _{mean} / β _{D,mw}	ε _{l,33} / ε _{l,33,mw}	ε _{l,66,mw}	$\begin{array}{c c} \epsilon_{l,u/} \\ \epsilon_{l,u,mw} \end{array}$	E _{c,33} / E _{D,33}
		N/mm ²		mm/m		N/mm ²
1	Hollow clay unit acc. to [1] with 2C-PUR / Hochlochziegel nach [1] mit 2K-PUR	2.3	0.53	0.89	1.28	1426
2	Hollow clay unit acc. to [1] with 2C-PUR ¹⁾ / Hochlochziegel nach [1] mit 2K-PUR ¹⁾	2.4	0.44	0.82	0.87	1779
3	Hollow clay unit acc. to [1] with TLM / Hochlochziegel nach [1] mit DM	3.7	0.33	0.71	1.24	3654
4	Hollow clay unit acc. to [1] dry ²⁾ / Hochlochziegel nach [1] trocken ²⁾	2.2	0.55	0.86	1.20	1318
5	Hollow clay unit acc. to [2] with 2C-PUR / Hochlochziegel nach [2] mit 2K-PUR	2.6	0.46	1.00	1.47	1848
6	Hollow clay unit acc. to [2] with TLM / Hochlochziegel nach [2] mit DM	4.5	0.41	0.88	1.51	3681
7	Hollow clay unit acc. to [3] with 2C-PUR / Hochlochziegel nach [3] mit 2K-PUR	6.8	0.67	1.14	1.65	3378
8	Hollow clay unit acc. to [3] with TLM / Hochlochziegel nach [3] mit DM	7.9	0.39	1.28	2.19	6782

¹⁾ with factory-drilled vertical holes for the transport system and fabric insert in the lowest bed joint / mit im Werk eingebrachten vertikalen Bohrungen für das Transportsystem und Gewebeeinlage in der untersten Lagerfuge

2) Dry masonry / Trockenmauerwerk

tured and tested. The wall specimens bonded with 2C-PUR adhesive were manufactured in the client's production hall in the Netherlands. The reference wall specimens with thin layer mortar were manufactured at the Institute of Building Materials Research in Aachen (ibac).

The test specimens for determining the flexural tensile strength parallel to the bed joint were manufactured with an overlap dimension $o = 0.4 \times h = 100$ mm (where h = unit height). With the test specimens for determining the flexural tensile strength perpendicular to the bed joint, the overlap dimension was $o = 0.5 \times l = 122.5$ mm (where l = unit length).

The wall specimens and test setup used for determining the flexural tensile strength for both loading directions are shown by way of example in Figures 18 and 19. The dimensions of the test specimens were chosen for both test directions such that adequate flexural slenderness of the walls (flexural tensile strength parallel to the bed joint: $\lambda = l_S/d = 5.2$ and flexural tensile strength perpendicular to the bed joint: $\lambda = 6.2$) was guaranteed.

The masonry specimens were loaded in a deformation-controlled way via the piston travel. The loading rate was chosen such that the maximum load was reached after Druckfestigkeit besteht (Serien 1, 2 und 4) und Dünnbettmauerwerk im Vergleich um 50 bis 70 % (Serien 3 und 6) höhere Werte erreicht. Lediglich für den Innenwandziegel nach [3] ergibt sich ein Faktor von 1,16 (DM/PUR). Zurückzuführen ist dies auf eine größere Unempfindlichkeit des relativ robusten Ziegels gegen Spannungsspitzen, die vom Dünnbettmörtel ausgeglichen werden.

2.4.3 Biegezugfestigkeit

Die Biegezugfestigkeit parallel und senkrecht zur Lagerfuge wurde an kleinen Mauerwerkwänden in Anlehnung an DIN EN 1052-2 [19] bestimmt. Für beide Prüfrichtungen wurden jeweils drei Prüfkörper mit der ersten Steinart (Hochlochziegel nach [1]) in Kombination mit dem 2K-PUR-Klebstoff und drei Prüfkörper mit den gleichen Steinen in Kombination mit Dünnbettmörtel hergestellt und geprüft. Die Herstellung der Biegezugwände mit 2K-PUR-Klebstoff erfolgte in der Produktionshalle des Auftraggebers in den Niederlanden. Die Referenzwände mit Dünnbettmörtel wurden am Institut für Bauforschung Aachen (ibac) hergestellt.







Fig. 18. Flexural tests parallel to the bed joint on small masonry walls according to DIN EN 1052-2, test specimen and test setup

Bild 18. Biegezugversuche parallel zur Lagerfuge an Wänden nach DIN EN 1052-2, Prüfkörper und Versuchsaufbau

Fig. 19. Flexural tests perpendicular to the bed joint on masonry walls according to DIN EN 1052-2, test specimen and test setup

Bild 19. Biegezugversuche senkrecht zur Lagerfuge an Wänden nach DIN EN 1052-2, Prüfkörper und Versuchsaufbau

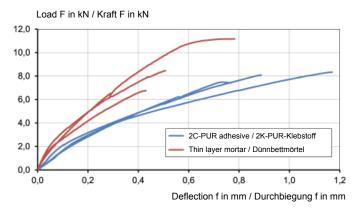


Fig. 20. Flexural tests parallel to the bed joint according to DIN EN 1052-2, load-deflection curves Bild 20. Biegezugversuche parallel zur Lagerfuge nach DIN EN 1052-2, Last-Durchbiegungskurven

about 10 to 15 minutes. During the tests, the central wall deflection at the top and bottom edge (testing of flexural tensile strength parallel to the bed joint) and lateral edges respectively (testing of flexural tensile strength perpendicular to the bed joint) was measured by inductive displacement transducers W10. Here, the bench marks of the measuring device were mounted onto the wall so that a correction of the global displacement of the wall has not to be considered at the evaluation.

The results of the flexural tests parallel to the bed joint are summarised in Table 3. The associated load deflection curves are shown in Figure 20.

The mean value of the flexural tensile strength parallel to the bed joint for the test series manufactured with 2C-PUR adhesive was $f_{mean,pa,PU} = 0.09 \ N/mm^2$. The reference series with conventional thin layer mortar achieved a mean value of $f_{mean,pa,TLM} = 0.10 \ N/mm^2$.

Without exception, the failure of the test walls bonded both with 2C-PUR adhesive and with thin layer mortar occurred in the unit region, whereby a distinction must be drawn between two different types of failure. With the walls bonded with 2C-PUR adhesive, a compressive failure occurred in the support region of two of the three walls tested due to the filigree perforation pattern of the hollow clay unit used. The failure of the other test specimens (wall 2 with PU and walls 1 to 3 with thin layer mortar) was due to the unit's flexural tensile strength being exceeded. For this reason, the stated mean value f_{mean,pa,PU} = 0.09 N/mm² for the series with 2C-PUR adhesive is to be viewed as a bottom value. For the loading parallel to the bed joint, the

Die Prüfkörper zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit parallel zur Lagerfuge wurden mit einem Überbindemaß von ü = $0.4 \times h = 100$ mm (h Steinhöhe) hergestellt. Bei den Wandprüfkörpern für die Bestimmung der Biegezugfestigkeit senkrecht zur Lagerfuge betrug das Überbindemaß ü = $0.5 \times l = 122.5$ mm (l Steinlänge).

Die Wandprüfkörper und der verwendete Versuchsaufbau zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit sind für beide Beanspruchungsrichtungen in den Bildern 18 und 19 beispielhaft dargestellt. Die Prüfkörperabmessungen wurden für beide Prüfrichtungen so gewählt, dass eine ausreichende Biegeschlankheit der Wände (Biegezugfestigkeit parallel zur Lagerfuge: $\lambda = l_{\rm S}/d = 5,2$ bzw. Biegezugfestigkeit rechtwinklig zur Lagerfuge: $\lambda = 6,2$) gewährleistet war.

Die Belastung erfolgte verformungsgeregelt über den Kolbenvorschub. Die Belastungsgeschwindigkeit wurde dabei so eingestellt, dass die Maximallast nach rd. 10 bis 15 min erreicht wurde. Während der Versuchsdurchführung wurde die Wandmittendurchbiegung am oberen und unteren Rand (Prüfung der Biegezugfestigkeit parallel zur Lagerfuge) bzw. an den seitlichen Rändern (Prüfung der Biegezugfestigkeit senkrecht zur Lagerfuge) mit induktiven Wegaufnehmern W10 gemessen. Dabei wurden die Fixpunkte der Messvorrichtung an den Wandprüfkörpern angebracht, so dass bei der Auswertung keine Korrektur der Globalverschiebung der Wand erfolgen muss.

Die Untersuchungsergebnisse der Biegezugversuche parallel zur Lagerfuge sind Tabelle 3 zusammengefasst. Die zugehörigen Last-Durchbiegungslinien sind in Bild 20 dargestellt.

Der Mittelwert der Biegezugfestigkeit parallel zur Lagerfuge der mit 2K-PUR-Klebstoff hergestellten Versuchsserie betrug $\beta_{BZ,p}=0.09~N/mm^2.$ Die Referenzserie mit dem herkömmlichen Dünnbettmörtel erreichte einen Mittelwert $\beta_{BZ,p}=0.10~N/mm^2.$

Das Versagen der Prüfkörper erfolgte sowohl bei den Wänden mit 2K-PUR-Klebstoff als auch bei den Wänden mit Dünnbettmörtel ausnahmslos im Steinbereich, wobei hier unter-schieden werden muss zwischen zwei unterschiedlichen Versagensarten. Bei den Wänden mit 2K-PUR-Klebstoff kam es bei zwei der drei untersuchten Wände infolge des filigranen Lochbildes des verwendeten Hochlochziegels zu einem Druckversagen im Auflagerbereich. Das Versagen der übrigen Prüfkörper (Wand 2 mit PU und Wände 1 bis 3 mit Dünnbettmörtel) erfolgte durch Überschreiten der Steinbiegezugfestigkeit. Aus diesem Grunde ist der bei der Serie mit 2K-PUR-Klebstoff angegebene Mittelwert $\beta_{BZ,p} = 0,09 \text{ N/mm}^2$ als unterer Wert an-

Table 3. Flexural tests parallel to the bed joint according to DIN EN 1052-2, test results (mean values) Tabelle 3. Biegezugversuche parallel zur Lagerfuge nach DIN EN 1052-2, Ergebnisse (Mittelwerte)

Series no. /	Description /	F _{max}	$f_{mean,pa}$ / $\beta_{BZ,p}$	$\mathbf{f}^{1)}$
Serie Nr.	Beschreibung	kN	N/mm ²	mm
1	Hollow clay unit acc. to [1] with 2C-PUR adhesive / Ziegel nach [1] mit 2K-PUR-Klebstoff	8.0	0.09	0.94
2	Hollow clay unit acc. to [1] with thin-bed mortar / Ziegel nach [1] mit Dünnbettmörtel	8.8	0.10	0.57

¹⁾ Deflection at F_{max} / Durchbiegung bei F_{max}

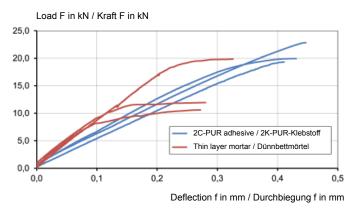


Fig. 21. Flexural tests perpendicular to the bed joint according to DIN EN 1052-2, load-deflection curves Bild 21. Biegezugversuche senkrecht zur Lagerfuge nach DIN EN 1052-2, Last-Durchbiegungskurven

test walls bonded with 2C-PUR adhesive thus yielded flexural tensile strength values comparable to the reference series.

From figures 5 and 6 we obtain an adhesive shear strength of approximately 0.2 N/mm². Taking into account a test specimen's influence on the actual value of adhesive shear strength of 2 [20], we would get a flexural tensile strength of 0.16 N/mm² if the overlap dimension is 0.4. The influence of thickness [21] can be neglected for the unit material, which means that, in view of the fact that the head joints are unmortared, there is a good correspondence between the experimental flexural tensile strength and that computed from the adhesive shear strength.

The results of the flexural tests perpendicular to the bed joint are shown in Table 4. The determined load deflection curves are shown in Figure 21.

The mean value of the flexural tensile strength perpendicular to the bed joint for the test series manufactured with 2C-PUR adhesive was $f_{mean,pe,PU}=0.24\ N/mm^2.$ For loading perpendicular to the bed joint, the reference series with conventional thin layer mortar achieved a lower mean value ($f_{mean,pe,TLM}=0.16\ N/mm^2$). The required value of Eurocode EC 6/NA [15] is fulfilled.

The test walls bonded both with 2C-PUR adhesive and with thin layer mortar failed chiefly due to exceeding the bond strength (flexural tensile bond strength) between the unit and 2C-PUR adhesive and thin layer mortar respectively. Only in one case – as previously in flexural tests parallel to the bed joint – a compressive failure of the hollow clay unit did occur at the upper support.

zusehen. Für die Beanspruchung parallel zur Lagerfuge ergaben somit die Wandprüfkörper mit dem 2K-PUR-Klebstoff gleichwertige Biegezugfestigkeitswerte im Vergleich zu der Referenzserie.

Aus den Bildern 5 und 6 ergibt sich eine Haftscherfestigkeit von ca. 0,2 N/mm². Unter Berücksichtigung eines Prüfkörpereinflusses auf den tatsächlichen Wert der Haftscherfestigkeit von 2 [20] ergäbe sich bei einem Überbindemaß von 0,4 eine Biegezugfestigkeit von 0,16 N/mm². Der Dickeneinfluss [21] kann für das Steinmaterial vernachlässigt werden, so dass unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die Stoßfugen unvermörtelt sind, eine gute Übereinstimmung zwischen aus der Haftscherfestigkeit berechneten und der experimentellen Biegezugfestigkeit besteht.

Die Untersuchungsergebnisse der Biegezugversuche senkrecht zur Lagerfuge sind in Tabelle 4 enthalten. Die bestimmten Last-Durchbiegungslinien sind in Bild 21 dargestellt.

Der Mittelwert der Biegezugfestigkeit senkrecht zur Lagerfuge betrug bei der mit 2K-PUR-Klebstoff hergestellten Versuchsserie $\beta_{BZ,s}=0,24$ N/mm². Die Referenzserie mit dem herkömmlichen Dünnbettmörtel erzielte bei der Beanspruchung senkrecht zur Lagerfuge einen niedrigeren Mittelwert ($\beta_{BZ,s}=0,16$ N/mm²). Der Anforderungswert des EC 6/NA [15] wird erfüllt.

Das Versagen der Prüfkörper erfolgte bei den Wänden mit 2K-PUR-Klebstoff und auch bei den Wänden mit Dünnbettmörtel überwiegend durch Überschreiten der Verbundfestigkeit (Biegehaftzugfestigkeit) zwischen Stein und 2K-PUR-Klebstoff bzw. Dünnbettmörtel. Nur in einem Fall kam es – wie auch schon bei den Biegezugversuchen parallel zur Lagerfuge – zu einem Druckversagen der Hochlochziegel am oberen Auflager.

Die experimentell ermittelte Biegezugfestigkeit senkrecht zur Lagerfuge stimmt sehr gut mit der Haftzugfestigkeit gemäß Bild 11 überein, einen gewissen Dickeneinfluss vorausgesetzt.

2.4.4 Schubfestigkeit

Die Untersuchung des Schubtragverhaltens erfolgte an geschosshohen, 2,50 m langen Wandprüfkörpern aus Hochlochziegeln nach [1] in Kombination mit dem 2K-Polyurethan-Klebstoff nach dem vereinheitlichten Prüfverfahren des DIBt, um die für eine Festlegung von charakteristischen Werten der Schubfestigkeit erforderliche Grundlage zu schaffen. Die Schubprüfung wurde unter einer konstanten, vertikalen Auflast von $\sigma_v = 0.1 \cdot \sigma_0 = 0.035 \text{ N/mm}^2$

Table 4. Flexural tests perpendicular to the bed joint according to DIN EN 1052-2, test results (mean values) Tabelle 4. Biegezugversuche senkrecht zur Lagerfuge nach DIN EN 1052-2, Ergebnisse (Mittelwerte)

Series no. /	Description /	F_{max}	f _{mean,pe} / β _{BZ,s}	$\mathbf{f}^{1)}$
Serie Nr.	Beschreibung	kN	N/mm ²	mm
1	Hollow clay unit acc. to [1] with 2C-PUR adhesive / Ziegel nach [1] mit 2K-PUR-Klebstoff	20.7	0.24	0.43
2	Hollow clay unit acc. to [1] with thin-bed mortar / Ziegel nach [1] mit Dünnbettmörtel	14.1	0.16	0.29

¹⁾ Deflection at F_{max} / Durchbiegung bei F_{max}

The experimentally determined flexural tensile strength perpendicular to the bed joint matches the adhesive tensile strength shown in Figure 11 very well, subject to some influence by thickness.

2.4.4 Masonry shear strength

The shear strength behaviour was tested according to the unified test procedure of the DIBt on storey-high, 2.50 m long wall specimens made of hollow clay units according to [1] bonded with 2C-PUR adhesive, in order to create the necessary basis for specifying the characteristic values of shear strength. The shear test was carried out under a constant, vertical load of $\sigma_v = 0.1 \cdot \sigma_0 = 0.035 \ N/mm^2$ (wall 1) and $\sigma_v = 1.2 \cdot \sigma_0 = 0.420 \ N/mm^2$ (wall 2). Owing to the considerable effort in manufacturing, preparing and testing the shear walls, only a single test specimen was manufactured and tested for each stage of loading. Previous tests have shown that the scattering of these tests is usually relatively low.

The test specimens for the shear tests were manufactured at the prefabrication plant in Austria. Since tensile failure of the units in the load introduction corners could not be ruled out, the corner units were filled with polyure-thane to strengthen before the wall was manufactured and positioned accordingly during the manufacturing process. The overlap dimension was $0.5 \cdot l$, as is also envisaged as per plans in the manufacturing of the prefabricated walls. After manufacturing, water-jet saws were used to cut the walls to the required length of around 2500 mm. The walls were then transported to ibac.

In Aachen the prefabricated masonry walls were placed into a layer of epoxy resin mortar on a reinforced concrete ground beam aligned beforehand on the floor. After the layer of epoxy resin had cured, the wall specimens were lifted onto the lower part of the testing device and aligned. Full-surface transmission of force was ensured by a thin levelling layer of gypsum between the ground beam and lower steel plate. A thin levelling layer of gypsum was also applied to the top side of the head beam and the upper steel girder was fitted with locked steel rollers. The cut surfaces on the front faces of the wall specimens were first cleaned and primed with the epoxy resin mix and sanded down. Owing to the filigree perforation structure and tongue and groove system, all of the openings and recesses on the front faces also had to be closed off with epoxy resin mortar, so that the epoxy resin mix did not fill and stiffen the shear wall when the lateral beam was attached. The lateral reinforced concrete beams were placed onto steel angle-pieces that had been mounted onto the sides of the ground beam beforehand. Diagonal and horizontal threaded rods secured to the third points of the lateral beams were used to secure and align the latter to the head beam and against one another. The gaps between the lateral beams and brickwork were sealed at the vertical edges and at the bottom edge with a PU-based sealing compound.

After the sealing compound had cured and up until the end of the shear test, the walls were loaded with the predefined constant load perpendicular to the bed joints. The gaps between the lateral beams and brickwork were then grouted with thickened epoxy resin. Prior to the test, (Wand 1) bzw. $\sigma_v = 1,2 \cdot \sigma_0 = 0,420 \text{ N/mm}^2$ (Wand 2) durchgeführt. Aufgrund des hohen Aufwandes bei der Herstellung, Vorbereitung und Prüfung der Schubwände wurde für jede Auflaststufe jeweils nur ein Prüfkörper hergestellt und geprüft. Bisherige Untersuchungen haben gezeigt, dass der Streubereich dieser Versuche i. d. R. verhältnismäßig gering ist.

Die Herstellung der Prüfkörper für die Schubversuche erfolgte im Fertigteilwerk in Österreich. Da Steinzugversagen in den Lasteinleitungsecken nicht auszuschließen war, wurden die Ecksteine im Vorfeld der Wandherstellung zur Verstärkung mit Polyurethan verfüllt und während des Herstellvorgangs entsprechend positioniert. Das Überbindemaß betrug 0,5 · l, wie dies auch planmäßig bei der Erstellung der Fertigteilwände vorgesehen ist. Nach der Herstellung wurden die Wände mittels Wasserstrahlsägen auf die erforderliche Länge von rd. 2500 mm zugeschnitten. Anschließend erfolgte der Transport der Wände zum ibac.

In Aachen wurden die Fertigteilwände in eine Schicht Epoxidharzmörtel auf die vorab auf dem Hallenboden ausgerichteten Stahlbeton-Grundbalken aufgesetzt. Nach Erhärten der Epoxidharzschicht wurden die Wände auf den unteren Teil der Prüfeinrichtung gehoben und ausgerichtet. Die vollflächige Kraftübertragung wurde durch eine dünne Ausgleichsschicht aus Gips zwischen Grundbalken und unterer Stahlplatte gewährleistet. Auf die Oberseite des Kopfbalkens wurde ebenfalls eine dünne Ausgleichsschicht aus Gips aufgetragen und der obere Stahlträger mit gesicherten Stahlrollen aufgelegt. Die Schnittflächen an den Stirnseiten der Mauerwerkprüfkörper wurden zunächst gesäubert und mit dem Epoxidharzgemisch grundiert und abgesandet. Aufgrund der filigranen Lochstruktur und des Nut-Feder-Systems mussten alle Öffnungen bzw. Vertiefungen auf den Stirnseitenflächen ebenfalls mit dem Epoxidharzmörtel geschlossen werden, damit nicht beim Anbringen der Seitenbalken das Epoxidharzgemisch die Schubwand verfüllt und aussteift. Die seitlichen Stahlbetonbalken wurden auf Stahlwinkel aufgesetzt, die zuvor seitlich an die Grundbalken montiert worden waren. Mit Hilfe diagonaler und horizontaler Gewindestangen, die an den Drittelspunkten der Seitenbalken befestigt waren, wurden die Seitenbalken an dem Kopfbalken und gegeneinander gesichert und ausgerichtet. Die Fugen zwischen den Seitenbalken und dem Mauerwerk wurden an den vertikalen Rändern sowie am unteren Rand mit einer Dichtungsmasse auf PU-Basis abgedichtet.

Die Wände wurden nach dem Aushärten der Dichtungsmasse bis zum Abschluss der Schubprüfung mit der zuvor festgelegten, konstanten Auflast senkrecht zu den Lagerfugen bis zum Ende der Schubprüfung belastet. Die Fugen zwischen Seitenbalken und Mauerwerk wurden dann mit angedicktem Epoxidharz vergossen. Vor der Prüfung wurden die Gewindestangen zur Ausrichtung der Seitenbalken gelöst und die Schubbelastungseinrichtung angebracht. Anschließend wurde die Sicherung der Rollenlager entfernt. Die diagonalen Gewindestangen der Lasteinleitungsvorrichtung sind nach der Montage leicht vorgespannt. Bei der Prüfung wurde eine geringe Vorlast (rd. 2 bis 5 kN) mit dem Lasteinleitungskolben aufgebracht und die zur Montage der Versuchseinrichtung angezogenen Muttern gelöst.

the threaded rods for alignment of the lateral beams were released and the shear loading device was attached. Next, the roller bearing lock was removed. The diagonal threaded rods of the load introduction device are gently pre-tensioned after installation. In the test, a slight preload (around 2 to 5 kN) was applied by the load introduction piston and the nuts tightened to install the testing device were released.

Figure 22 shows a test wall after attachment of the shear loading device.

The shear load was continually increased until fracture. Inductive displacement transducers were used to record deformation measurements in the unit and joint regions and in the direction of the main compressive and tensile stresses in the masonry on both sides of the test specimens.

The tests yielded the highest loads (F_{max}) and maximum shear stresses (τ_{max}) shown in Table 5.

The crack pattern after reaching the maximum load is shown for both shear tests in Figure 23. Wall 1 with the lowest load $\sigma_v=0.1\cdot\sigma_0=0.035~N/mm^2$ shows essentially joint failure. With wall 2 $(\sigma_v=1.2\cdot\sigma_0=0.420~N/mm^2)$ the cracks ran mainly in the masonry below an angle of around 30° referred to the lateral beam on the load introduction side. This angle deviates slightly from the direction of the main stresses, which with $tan(2\phi_0)=2\tau/\sigma_y$ is $\phi_0=21^\circ$ at fracture, which may be attributed to the anisotropy of the stone.

According to Figure 8, the adhesive shear strength in accordance with DIN EN 1052-3 [14] is around 0.25 N/mm² with a very low applied load. If one considers that a value of 0.5 N/mm² [20] would therefore ensue for the actual adhesive shear strength, then a substantial difference is apparent even if one were to make a reduction to one half for unmortared head joints. This would result in a theoretical shear strength of 0.25 N/mm². The measured shear strength is therefore less than one half. Differences are also to be found in observed inadequacy of the test procedure [22] at joint failure, and elsewhere.

Table 5. Shear tests according to the DIBt test method, test results

Tabelle 5. Schubversuche nach dem vereinheitlichten Prüfverfahren des DIBt, Ergebnisse

Wall specimen no. /	$\sigma_{\rm v}$	F _{max}	$\tau_{ m max}$
wand	N/mm ²	kN	N/mm ²
1	0.035	155.7	0.121
2	0.420	245.6	0.190

Bild 22 zeigt einen Wandprüfkörper nach Anbringen der Schubbelastungseinrichtung.

Die Schubbelastung wurde bis zum Bruch kontinuierlich gesteigert. An beiden Seiten der Prüfkörper wurden Verformungsmessungen im Stein- und Fugenbereich und in Richtung der Hauptdruck- und Hauptzugspannungen im Mauerwerk mit induktiven Wegaufnehmern durchgeführt.

In den Versuchen ergaben sich die in Tabelle 5 dargestellten Höchstlasten F_{max} bzw. maximalen Schubspannungen τ_{max} .

Das Rissbild nach Erreichen der Bruchlast ist für beide Schubversuche in Bild 23 dargestellt. Wand 1 mit der niedrigen Auflast $\sigma_v=0,1\cdot\sigma_0=0,035~N/mm^2$ zeigt im Wesentlichen Fugenversagen. Bei Wand 2 ($\sigma_v=1,2\cdot\sigma_0=0,420~N/mm^2$) verliefen die Risse hauptsächlich im Steinbereich unter einem Winkel von rd. 30° bezogen auf den Seitenbalken auf der Lasteinleitungsseite. Dieser Winkel weicht von der Richtung der Hauptspannungen, die mit $\tan(2\phi_0)=2\tau/\sigma_y$ im Bruchzustand $\phi_0=21^\circ$ beträgt, geringfügig ab, was auf die Anisotropie der Steine zurückzuführen sein dürfte.

Die Haftscherfestigkeit nach DIN EN 1052-3 [14] beträgt gemäß Bild 8 etwa 0,25 N/mm² bei sehr geringer Auflast. Berücksichtigt man, dass für die tatsächliche Haftscherfestigkeit sich somit ein Wert von 0,5 N/mm² ergeben würde [20], so zeigt sich ein erheblicher Unterschied, selbst



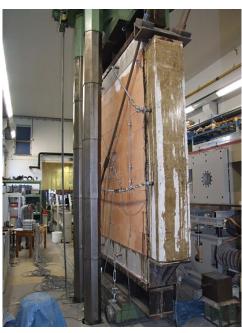


Fig. 22. Shear tests according to the DIBt test method, test specimen and test setup Bild 22. Schubversuche nach dem vereinheitlichten Prüfverfahren des DIBt, Prüfkörper und Versuchsaufbau

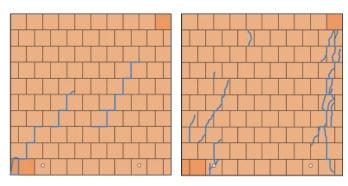


Fig. 23. Shear tests according to the DIBt test method, crack pattern (left: test specimen 1; right: test specimen 2) Bild 23. Schubversuche nach dem vereinheitlichten Prüfverfahren des DIBt, Rissbild (links: Wand 1; rechts: Wand 2)

3 The Redbloc system (prefabricated masonry panel system) 3.1 General/History

The Redbloc system technology was developed by clay unit manufacturer Pichler in Wels (Austria) through many years' collaboration with an American technology company. This technology based on a globally unique dry gluing process has already been used successfully for around ten years in Austria, Russia, Belgium and the Netherlands.

Recently, the first prefabrication plant in Germany was completed by Redbloc Elemente GmbH, a subsidiary of Penzkofer Bau GmbH based in Plattling, in which prefabricated masonry panels can be produced in future by a fully automated process using the patented Redbloc technology.

The single steps in the automated production of the prefabricated masonry panels are presented below by reference to the newly opened Redbloc production plant in Plattling, by way of example.

3.2 Planning the prefabricated masonry panels/ Preparing the technical data

The production of the masonry panels is planned and realised entirely in accordance with the customer's wishes. Existing architectural plans in all common file formats can be taken over easily and converted for the fully automated

wenn man eine Abminderung bei unvermörtelter Stoßfuge auf die Hälfte vornehmen würde. So ergäbe sich eine theoretische Schubfestigkeit von 0,25 N/mm². Die gemessene Schubfestigkeit beträgt damit weniger als die Hälfte. Unterschiede sind u. a. auch in der bei Fugenversagen beobachteten Unzulänglichkeit des Prüfverfahrens zu suchen [22].

3 Das Elemente-Ziegelfertigteilsystem

3.1 Allgemeines/Geschichte

Die Redbloc Fertigteilsystemtechnologie wurde von dem Ziegelhersteller Pichler aus Wels in mehrjähriger Zusammenarbeit mit einem amerikanischen Technologiekonzern entwickelt. Diese auf einem weltweit einmaligen Trockenklebeverfahren basierende Technik wird bereits seit etwa 10 Jahren erfolgreich in Österreich, Russland, Belgien und den Niederlanden eingesetzt.

Vor kurzem wurde nun das erste Fertigteilwerk in Deutschland von der Redbloc Elemente GmbH, einer Tochterfirma der Penzkofer Bau GmbH mit Sitz in Plattling, fertiggestellt, in dem zukünftig vollautomatisiert Ziegelfertigteilwände mit der patentierten Redbloc-Technolgie hergestellt werden können.

Nachfolgend werden die einzelnen Schritte bei der automatisierten Produktion der Ziegelfertigteile anhand der neu eröffneten Redbloc Fertigungsanlage in Plattling beispielhaft vorgestellt.

3.2 Planung der Fertigteile/Aufbereitung der technischen

Die Produktion der Mauertafeln wird individuell nach den Vorstellungen des Kunden geplant und umgesetzt. Bestehende Architektenpläne können dabei in allen gängigen Dateiformaten problemlos übernommen und für den vollautomatisierten Herstellungsprozess umgewandelt werden. Hierfür werden die Baupläne zunächst in einer Elementierungssoftware eingelesen (Bild 24) und daraus die für das Bauvorhaben benötigten Fertigteile berechnet.

Über eine Datenschnittstelle erfolgt die Übergabe der Element-Abmessungen an die Produktionsanlage inklusive wesentlicher Detailinformationen wie z. B. Lage des Ele-

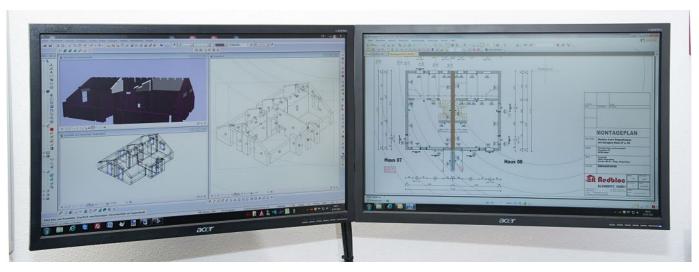


Fig. 24. Elementing software Bild 24. Elementierungssoftware



Fig. 25. Computer-operated arrangement of the units Bild 25. Anordnung der Steine mittels Mauerberechnungssoftware

manufacturing process. In this case the construction plans are first read into the elementing software (Figure 24) and the prefabricated parts required for the building project are calculated.

The dimensions of the masonry panels are transferred to the production plant via a data interface, including essential details such as the position of the masonry panel in the structure, openings and type of unit to be used. Masonry calculation software developed specifically for Redbloc Elemente GmbH validates the transferred data and, with the aid of a materials database, determines the division and arrangement of the respective units within the prefabricated masonry panels. When doing so, it aims for optimal usage of units with minimal cutting (Figure 25).

3.3 Production

On the basis of the calculated data of the panels, the clay units are supplied via two robots to the fully automated production line. One robot takes the units from the pallet with a gripper and loads the production line (Figure 26). A second robot loads the saw and feeds the cut pieces to the production line.

The masonry units are placed onto the production line in accordance with the calculation. Once all of the units for a layer are complete except the last one, they are aligned and the length of the masonry panel is measured. Based on the actual value measured, the difference from the predements im Bauwerk, Aussparungen oder zu verwendender Steintyp. Eine speziell für die Redbloc-Elemente GmbH entwickelte Mauerberechnungssoftware überprüft die übergebenen Daten und ermittelt unter Zuhilfenahme einer Baustoffdatenbank die Aufteilung und Anordnung der jeweiligen Steine innerhalb der Fertigteilwände und berücksichtigt dabei einen optimalen Steinverbauch bei minimalem Verschnitt (Bild 25).

3.3 Produktion

Auf Basis der berechneten Daten der Elemente werden die Mauerziegel mittels zweier Roboter der vollautomatischen Fertigungsstraße zugeführt. Ein Roboter entnimmt mit einem Greifer die Steine von der Palette und beschickt die Fertigungslinie (Bild 26). Ein weiterer Roboter beschickt die Säge und führt die Schnittstücke der Fertigungsstraße

Die Steine werden gemäß Berechnung auf der Fertigungsstraße aufgelegt. Nachdem alle Steine einer Lage mit Ausnahme des letzten Steins komplett sind, werden sie ausgerichtet und die Länge des Wandelements vermessen. Basierend auf dem gemessenen Ist-Wert wird mit dem letzten zuzuschneidenden Stein, dem sogenannten "Pass-Stein", die Differenz zum vorgegebenen exakten Wandmaß ausgeglichen. Der Pass-Stein wird im weiteren Verlauf so in die Wand eingefügt, dass die gesägte Seite nicht sichtbar ist und das Wandelement grundsätzlich über die gesamte Elementhöhe mit gleichmäßig maßgenauer Nutund Federanordnung abschließt. Weiterhin erfolgt auf der Fertigungsstraße das trockene Bohren der für das Transportsystem erforderlichen Lochungen. Die Software berechnet dabei den genauen Schwerpunkt eines jeden Fertigteils, um ein späteres problemloses Heben mit dem Kran zu gewährleisten. Anschließend werden die Oberflächen der Mauersteine gründlich mit einer automatischen Rollenbürste abgekehrt, um lose Teile und Staubschichten zu entfernen.

Am Ende der Fertigungsstraße werden die Steinlagen erneut ausgerichtet und durch einen Lagengreifer auf die Fertigungspalette gesetzt. An den von der Software unter Berücksichtigung der Vorgaben in der Zulassung berechneten Positionen werden die für Transport und Montage erforderlichen Bewehrungsstreifen aus Kohlenstoff-Faserbändern auf die Oberflächen der Mauersteine gelegt, ge-





Fig. 26. Unloading the pallet by robot Bild 26. Entstapelung der Steinpaletten mit dem Roboter

fined exact wall size is balanced out by the last unit to be cut, the fitting unit. The fitting unit is subsequently inserted in the masonry wall in such a way that the sawn side cannot be seen and the masonry panel closes essentially over the entire element height with a uniform exact size tongue and groove arrangement. The dry drilling of the holes required for the transport system is also done on the production line. For this, the software calculates the exact centre of gravity of each prefabricated part so that subsequent lifting by crane proceeds without any problems. After this the surfaces of the units are thoroughly swept over with an automatic roller brush to remove loose parts and layers of dust.

At the end of the production line, the unit layers are aligned again and placed onto the production pallet by a layer gripper. At the positions calculated by the software and taking account of the stipulations in the approval, the required carbon fibre reinforcing strips for transport and assembly are laid onto the surfaces of the units, tensioned and cropped. After each layer of units is laid, the patented two-component polyurethane adhesive is applied with millimetre precision (Figure 27), the spray head is cleaned automatically and the next layer of units is set down by the layer gripper (Figure 28).

The masonry panels are manufactured basically in the same order that they are put into place at the construction site. Since the adhesive has a very short curing time, the manufactured masonry panels can be moved immediately to the next section of the plant, the sawing centre.

In the sawing centre, precision cuts computed by the masonry calculation software are made to the panels with the aid of diamond wire saw technology (Figure 29). Since this technology has the major advantage of allowing totally dry sawing, no moisture is transferred to the panels, which in turn has a positive effect on construction time. Moreover, contamination of masonry panels that can occur with the otherwise often used wet sawing methods does not arise.

In the final step of production, if required, the masonry walls are fully equipped with special components such as lintels and roller shutter or blind boxes. The panels are ready to be transported as early as one hour after their manufacturing. Automated production makes it possible to manufacture up to $400~\text{m}^2$ of masonry panelsin the prefabrication plant within an eight-hour shift and consign this for transportation to the construction site.

3.4 Transportation of the prefabricated masonry panels to the construction site

The prefabricated masonry panels are transported in conformance with DIN 1053-4 [23] with unmortared, re-usable anchor rods and supporting bolts. The bearer units of bottom unit layer contain a horizontal hole in the axis of the vertically drilled channels to accommodate the supporting bolts. The bottom unit layer is also secured by a factory applied stretch foil before offloading in the prefabrication plant. The finished masonry panels fitted with anchor rods are lifted standing upright in transport containers by the plant crane, and are transported on schedule to the construction site 'just in time' by special transportation vehicles, in the present case by so-called inloaders. The transport containers are filled in accordance with the details in the assembly plan, which ensures that the elements

spannt und abgeschnitten. Nach jeder gesetzten Steinlage wird der patentierte 2K-Polyurethan-Klebstoff millimetergenau aufgetragen (Bild 27), der Sprühkopf automatisch gereinigt und die nächste Steinlage mit dem Lagengreifer aufgesetzt (Bild 28).

Die Wandelemente werden grundsätzlich in der Reihenfolge hergestellt, in der sie auch auf der Baustelle versetzt werden. Durch die sehr kurze Aushärtezeit des Klebstoffs können die fertigen Wandelemente sofort in den nachfolgenden Anlagenteil, dem Sägezentrum, umgesetzt werden.

Im Sägezentrum werden an den Elementen die von der Berechnungssoftware berechneten Schnitte präzise mithilfe einer neuen Diamant-Seilsägetechnik ausgeführt (Bild 29). Der große Vorteil dieses Sägeverfahrens besteht darin, dass vollkommen trocken gesägt werden kann und so keine Feuchtigkeit in die Elemente eingetragen wird, was sich wiederum positiv auf die Bauzeit auswirkt. Zudem entfallen die bei den sonst oft verwendeten Nass-Sägeverfahren auftretenden Verunreinigungen der Wandelemente.

Im letzten Produktionsschritt werden die Elemente – falls gefordert – komplett mit Sonderbauteilen wie z. B. Stürzen, Rolläden- und Jalousiekästen ausgestattet. Bereits



Fig. 27. Application of the two-component polyurethane adhesive

Bild 27. Auftrag des 2K-Polyurethan-Klebstoffs



Fig. 28. Masoning the next unit layer by grabber Bild 28. Aufsetzen der nächsten Steinlage mit dem Lagengreifer





Fig. 29. Diamond wire saw technology Bild 29. Diamant-Seilsägetechnik

always arrive at the construction site in the same order as they are needed (Figure 30).

Figure 31 shows the inloader being loaded and the transport container being dispatched.

3.5 Assembly of the prefabricated masonry panels at the construction site

Once the wall building lines, doorways and element joints have been marked by chalk lines on the foundation slab at the construction site, the individual masonry panels can be offloaded and moved into position by the mobile or site crane. The masonry panels are offloaded and positioned as per the details in the accompanying assembly plan. When doing so, the masonry panels are carefully set in a full-area bed of mortar (usually general purpose masonry mortar of mortar group IIa when no greater strength is demanded for structural reasons) with compensation platelets (Figure 32) to balance out dimensional tolerances that may occur due to ceiling irregularities. Each masonry panel is then aligned plumb and secured by at least two previously prepared inclined supports (Figure 33). The inclined supports are fixed to the wall by hexagon bolts and into the ground plate by impact dowels. Only after both supports have been secured the suspension device is released and removed from the masonry panel.

The separate masonry panels are joined together by butt joints. The gaps that arise between the panels are sealed up inside and outside with PU foam on site. Any PU eine Stunde nach Fertigstellung ist die Transportfähigkeit der Elemente sichergestellt. Durch die automatisierte Produktion ist es möglich, innerhalb einer Schicht von acht Stunden bis zu 400 m² Wandelemente im Fertigteilwerk herzustellen, zu verladen und zur Baustelle zu transportieren.

3.4 Transport der Fertigteile zur Baustelle

Der Transport der Fertigteile erfolgt in Anlehnung an DIN 1053-4 [23] mit unvermörtelten, wieder verwendbaren Ankerstäben und Tragbolzen. Die Tragziegel der untersten Steinlage enthalten in der Achse der vertikal gebohrten Kanäle eine horizontale Bohrung zur Aufnahme der Tragbolzen. Die unterste Steinlage wird zusätzlich vor dem Verladen im Fertigteilwerk mit einer werkseitig applizierten Stretchfolie gesichert. Die fertigen und mit Ankerstäben ausgestattenen Wandelemente werden mit dem Anlagenkran aufrecht stehend in Transportcontainer gehoben und entsprechend dem Terminplan mit Spezialtransportfahrzeugen, im vorliegenden Fall mit sogenannten Innenladern, "just in time" zur Baustelle gebracht. Das Bestücken der Transportcontainer erfolgt dabei nach den Angaben im Montageplan, wodurch immer gewährleistet ist, dass die Elemente in der Reihenfolge auf der Baustelle eintreffen, in der sie auch benötigt werden (Bild 30).

In Bild 31 ist das Beladen des Innenladers und der Abtransport des Transportcontainers dargestellt.





Fig. 30. Loading of the container Bild 30. Bestücken der Transportcontainer





Fig. 31. Loading of the inloader and wall panel delivery Bild 31. Beladen des Innenladers und Abtransport der Wandelemente

foam that protrudes after curing is cut off. In addition, a 20 cm wide fabric is applied over the vertical assembly gaps on the inside of the wall.

4 Summary

The necessary basis for obtaining a general technical approval has been established by carrying out the tests described in this article. PU-bonded masonry is not standardised and hence, under German building regulations, cannot be used. Besides the effects of the adhesive on the mechanical properties, the long-term stability was also to be assessed. Overall, the tests have shown that altered load-bearing capacities are to be specified in comparison to thin layer mortar; in the present case lower values for compressive load bearing capacity, while for flexural load bearing capacity even higher values in some cases.

The production of prefabricated masonry panels is a very interesting variant in the manufacture of wall modules because, apart from weather independence with the mode of construction presented here, manufacturing tolerances are also significantly reduced due to an unusually high degree of mechanisation. Overall, the entire manufacturing process comes across as well thought-out and produces top-quality products. The rate of production is extremely high, a 6 m long \times 3 m high masonry wall taking around 30 minutes to manufacture. The method presented here is therefore a major advance in the area of industrial manufacture of prefabricated masonry.

The granting of a general technical approval (abZ) for the Redbloc system is expected with beginning of 2015.

References – Literatur

- [1] General technical approval no. Z-17.1-890: Object of approval: Masonry of POROTON plane-ground hollow clay units -T9/-T10/-T11 "DR 34" in a thin mortar-bed technique. Applicant: Wienerberger GmbH, Oldenburger Allee 26, 30659 Hannover; Schlagmann Baustoffwerke GmbH &Co. KG, Ziegeleistraße 1, 84367 Zeilarn. Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik, DIBt, 2012 Approval number: Z-17.1-890 (05.12); Duration of validity: 31. March 2016.
- [2] General technical approval no. Z-17.1-1057: Object of approval: Masonry of POROTON plane-ground hollow clay units with integrated insulation designated as POROTON-





Fig. 32. Unloading of the wall panels in a mortar bed Bild 32. Absetzen der Elemente in ein Mörtelbett





Fig. 33. Justification and temporary supporting of the wall panels

Bild 33. Ausrichtung und Sicherung der Elemente

3.5 Montage der Fertigteile auf der Baustelle

Nachdem auf der Baustelle die Wandfluchten, Türöffnungen und Elementstöße mittels Schlagschnur auf der Bodenplatte gekennzeichnet wurden, können die einzelnen

- T7-MD-plane-ground clay units in a thin mortar-bed technique. Applicant: Schlagmann Baustoffwerke GmbH &Co. KG, Ziegeleistraße 1, 84367 Zeilarn; Wienerberger GmbH, Oldenburger Allee 26, 30659 Hannover. Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik, DIBt, 2011 Approval number: Z-17.1-1057 (04.11); Duration of validity: 28. April 2016.
- [3] General technical approval no. Z-17.1-715: Object of approval: Masonry of klimaton plane-ground hollow clay units with interlocking butt joints in a thin mortar-bed technique. Applicant: Klimaton ZIEGEL Interessengemeinschaft e.V., Ziegeleistraße 10, 95145 Oberkotzau. Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik, DIBt, 2010 Approval number: Z-17.1-715 (09.10); Duration of validity: 21. September 2015.
- [4] DIN V 18580:2007-03 Special masonry mortar.
- [5] DIN EN 772-16:2011-07 Methods of test for masonry units Part 16: Determination of dimensions.
- [6] DIN EN 772-13:2000-09 Methods of test for masonry units Part 13: Determination of net and gross dry density of masonry units (except for natural stone).
- [7] DIN EN 772-9:2005-05 Methods of test for masonry units Part 9: Determination of void and net volume and percentage of voids of clay and calcium silicate masonry units by filling with sand
- [8] DIN EN 772-20:2005-05 Methods of test for masonry units Part 20: Determination of flatness of faces of masonry units.
- [9] DIN EN 772-1:2011-07 Methods of test for masonry units Part 1: Determination of compressive strength.
- [10] DIN EN 1015-6:2007-05 Methods of test for mortar for masonry Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar.
- [11] DIN EN 1015-10:2007-05 Methods of test for mortar for masonry – Part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar.
- [12] DIN EN 1015-11:2007-05 Methods of test for mortar for masonry Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar.
- [13] DIN EN 998-2:2010-12 Specification for mortar for masonry Part 2: Masonry mortar.
- [14] DIN EN 1052-3:2007-06 Methods of test for masonry Part 3: Determination of initial shear strength (adhesive shear strength).
- [15] DIN EN 1996-1-1/NA:2012-05 National Annex Nationally determined parameters Eurocode 6: Design and rating of masonry structures Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures.
- [16] DIN 18555-5:1986-03 Testing of mortars containing mineral binders; hardened mortars; determination of bond shear strength of masonry mortars.
- [17] *Sparowitz, L, Schlöglmann, K. H.*: Plane-ground block masonry with two-component polyurethane adhesives. Graz: Zivilingenieurbüro Sparowitz, 2008. Private appraisal.
- [18] DIN EN 1052-1:1998-12 Methods of test for masonry Part 1: Determination of compressive strength.
- [19] DIN EN 1052-2:1999-10 Methods of test for masonry Part 2: Determination of the bending tensile strength .
- [20] *Brameshuber, W., Graubohm, M., Schmidt, U.*: Strength properties of masonry. Part 4: Shear strength. In: Mauerwerk-Kalender 31 (2006), S. 193–225. Berlin: Ernst & Sohn.
- [21] Schmidt, U., Jäger, W., Brameshuber, W., Bakeer, T.: The bending strength of masonry/Biegezugfestigkeit von Mauerwerk. Mauerwerk 19 (2015), H. 1, S. 27–39.
- [22] Schmidt, U., Beer, I., Brameshuber, W.: Tests on the Load Bearing Behaviour of Masonry Shear Walls. Calgary: Department of Civil Engineering, 2005. In: Proceedings of the 10th Canadian Masonry Symposium, Banff, Alberta, Canada, June 8–12, 2005, (Lissel, S.; Benz, C.; Hagel, M.; Yuen, C.; Shrive, N. (Ed)), pp. 704–713.
- [23] DIN 1053-4:2013-04 Masonry Part 4: Prefabricated masonry compound units.

Wandelemente mittels Mobil- oder Baustellenkran abgeladen und versetzt werden. Das Abladen und Positionieren der Wandelemente erfolgt gemäß den Angaben im mitgelieferten Montageplan. Dabei werden die Wandelemente vorsichtig in ein vollflächiges Mörtelbett (üblicherweise Normalmauermörtel der Mörtelgruppe IIa, wenn aus statischen Gründen keine höhere Festigkeit gefordert wird) mit Ausgleichsplättchen gesetzt (Bild 32), um Maßtoleranzen auszugleichen, die infolge von Unebenheiten der Decke auftreten können. Jedes Wandelement wird anschließend mit mindestens zwei zuvor vorbereiteten Schrägstützen lotrecht ausgerichtet und gesichert (Bild 33). Die Schrägstützen werden mit Sechskantschrauben an der Wand und mit Schlagdübeln in der Bodenplatte fixiert. Erst nachdem beide Stützen befestigt wurden, wird die Aufhängevorrichtung gelöst und aus dem Element entfernt.

Die Verbindung der einzelnen Wandelemente erfolgt durch stumpfen Stoß. Die entstehenden Fugen zwischen den Elementen werden bauseits an der Innen- und Außenseite mit PU-Schaum versiegelt. Gegebenenfalls überstehende Reste des PU-Schaums werden nach der Aushärtung abgeschnitten. Zusätzlich wird an der Innenseite der Wände ein 20 cm breites Gewebe über die vertikalen Montagefugen aufgespachtelt.

4 Zusammenfassung

Mit den in diesem Beitrag beschriebenen Untersuchungen wurden die notwendigen Grundlagen für die Erlangung einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung geschaffen. PU-verklebtes Mauerwerk ist nicht genormt und kann daher gemäß deutschem Bauordnungsrecht nicht verwendet werden. Neben den Einflüssen des Klebers auf die mechanischen Eigenschaften war zusätzlich die Langzeitbeständigkeit zu beurteilen. Insgesamt haben die Untersuchungen gezeigt, dass im Vergleich zum Dünnbettmörtel veränderte Tragfähigkeiten anzusetzen sind; im vorliegenden Fall bei den Drucktragfähigkeiten geringere Werte, bei den Biegetragfähigkeiten sogar in Einzelfällen höhere Werte.

Die Produktion von Mauerwerkfertigteilen ist eine sehr interessante Variante der Herstellung von Wandbauteilen, da neben der Witterungsunabhängigkeit bei der hier vorgestellten Bauweise infolge des ungewöhnlich hohen Mechanisierungsgrades auch die Toleranzen der Herstellung deutlich reduziert werden. Insgesamt wirkt der vollständige Herstellprozess sehr gut durchdacht und die Qualitäten sind hochwertig. Die Produktionsgeschwindigkeit ist mit ca. 30 Minuten für eine 6 m lange und 3 m hohe Wand extrem hoch. Die hier vorgestellte Methode ist damit ein großer Fortschritt im Bereich der industriellen Fertigung von Fertigbauteilen.

Mit der Erteilung einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ) für das Redbloc-System ist Anfang des Jahres 2015 zu rechnen.

Authors - Autoren:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Brameshuber Dipl.-Ing. Markus Graubohm Institute of Building Materials Research (ibac) RWTH Aachen University Chair of Building Materials Schinkelstraße 3, 52062 Aachen