A students' challenge for the estimation of the maximum compressive load of masonry prisms

Citation for published version (APA):

Ramos, L. F., Lourenço, P. B., Vermeltfoort, A. T., & Moreira, S. (2016). A students' challenge for the estimation of the maximum compressive load of masonry prisms: Studentenwettbewerb zur Ermittlung der maximalen Druckfestigkeit von Mauerwerksprismen. *Mauerwerk*, 20(5), 352–363. <https://doi.org/10.1002/dama.201600707>

DOI:

[10.1002/dama.201600707](https://doi.org/10.1002/dama.201600707)

Document status and date:

Published: 01/01/2016

Document Version:

Typeset version in publisher's lay-out, without final page, issue and volume numbers

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

A students' challenge for the estimation of the maximum compressive load of masonry prisms

Studentenwettbewerb zur Ermittlung der maximalen Druckfestigkeit von Mauerwerksprismen

The paper presents the “IMC Students’ Challenge” competition held in 2014, during the 9th International Masonry Conference, in Guimarães. The objective of the competition was to predict the maximum compressive load of two masonry prisms built of solid bricks, and of hollow blocks, with mortar joints. To increase the complexity of the problem, all prisms were tested under eccentric load. The students, who enthusiastically participated in the final laboratory tests, presented different approaches to estimate the maximum eccentric compressive force on masonry prisms. The challenge was a great experience, not only for students and conference participants, but also for sponsors and organizers.

Keywords: masonry prisms; students’ challenge; eccentric loading; masonry compressive strength; mortar; masonry units; bricks; concrete blocks

1 Introduction

All over the world, student competitions are a common tool to encourage young people to deal with necessary subjects. These competitions challenge students to learn more about solving real problems. The brief included tests on various masonry structures and materials. Starting with arch-like structures and simple masonry walls, to complex architectural shapes of brick work the students were playing with materials properties. Several examples can be found in the literature [1].

The present paper presents the “IMC Students’ Challenge” which was an initiative of the Organizing Committee of the 9th International Masonry Conference, held in Guimarães, Portugal, July 7–9, 2014. The competition was sponsored by EuLA – the European Lime Association. The objective of this competition was to predict the maximum compressive load of two types of masonry prisms built from two different types of units: solid clay bricks (SCB) and hollow concrete blocks (HCB).

2 Rules for the competition

2.1 Objective

The objective of the competition was to predict the maximum compressive load of two masonry prisms built of solid bricks, and hollow blocks, with mortar joints. The load was applied eccentrically to increase the complexity

Dieser Artikel beschreibt den IMC Students’ Challenge Wettbewerb, der 2014 während der 9. Internationalen Mauerwerks-Konferenz in Guimarães abgehalten wurde. Das Ziel dieses Wettbewerbs war die Vorhersage der maximalen Druckfestigkeit zweier Mauerwerksprismen, die aus Vollziegeln und aus Betonhohlblöcken mit Mörtelfugen hergestellt waren. Um die Komplexität der Aufgabenstellung zu erhöhen, wurden alle Prismen unter exzentrischer Belastung geprüft. Die Studenten, die sich begeistert an den endgültigen Laborprüfungen beteiligten, präsentierten unterschiedliche Ansätze, um die maximale exzentrische Druckkraft auf Mauerwerksprismen zu bestimmen. Der Wettbewerb war eine großartige Erfahrung, für Studenten und Konferenzteilnehmer genauso, wie für Sponsoren und Organisatoren.

Stichworte: Mauerwerkprismen; Studentenwettbewerb; exzentrische Belastung; Druckfestigkeit von Mauerwerk; Mörtel; Mauersteine; Ziegel; Betonblöcke

1 Einführung

Studentenwettbewerbe sind auf der ganzen Welt ein beliebtes Mittel, um junge Menschen dazu zu bringen, sich mit notwendigen Themen auseinanderzusetzen. Sie bieten den Studenten reale Bedingungen zur Problemlösung. Die Aufgabenstellung beinhaltete die Prüfung unterschiedlicher Mauerwerkskonstruktionen und Baustoffe. Angefangen von bogenartigen Tragwerken und einfachen Ziegelmäuren, bis hin zu komplexen architektonischen Formen aus Mauerwerk, lud die Aufgabe dazu ein, Materialeigenschaften zu erproben. Die Literatur bietet hierfür einige Beispiele [1].

Dieser Artikel beschreibt die IMC Students’ Challenge, die auf Initiative des Organisationskomitees der 9. International Masonry Conference vom 7.–9. Juli 2014 in Guimarães, Portugal, veranstaltet wurde. Träger des Wettbewerbs war EuLA – die European Lime Association. Das Ziel dieses Wettbewerbs war die Vorhersage der maximalen Druckfestigkeit zweier Mauerwerksprismen, die aus unterschiedlichen Steinen hergestellt waren: einmal aus Vollziegeln und einmal aus Betonhohlblöcken.

2 Wettbewerbsregeln

2.1 Zielsetzung

Gegenstand dieses Wettbewerbs war die Vorhersage der maximalen Druckfestigkeit zweier Mauerwerksprismen,

Fig. 1. Geometry of specimens with eccentric load application; a) concrete hollow prisms (front and lateral view), b) brick prisms (front and lateral view)

Bild 1. Geometrie der Prüfkörper unter exzentrischer Belastung; a) Betonhohlblock-Prismen (Vorder- und Seitenansicht), b) Ziegel-Prismen (Vorder- und Seitenansicht)

of the problem and the challenge itself. The prisms were built in the Structural Lab of the University of Minho 240 days before the 9th IMC conference. They were then tested during the conference.

The challenge was based on team work. Each team was composed of no more than three students enrolled in a MSc or PhD program. All members of a given team had to be from the same institution, and students could not participate in more than one team. Each team was supervised by a member of the teaching staff of their institution, who confirmed that the students complied with the rules of the competition. They also supported the team by giving some guidance for a successful result.

During the IMC Students' Competition the team members could take part in the lab tests.

2.2 Data for the students

Before the competition, the participants were provided with a detailed description of the geometry of the prisms, the bricks and blocks, the mortar, and the testing conditions. The given information also included all selected material properties and the 33 mm offset for the load eccentricity. Fig. 1 shows the geometry of the prisms with 10 mm mortar joint thickness.

The eccentric compressive tests were carried out 240 days after the specimens' construction. Prior to test on the masonry prisms, several tests had been conducted on the masonry components, according to the schedule presented in Table 1. The tests were conducted 14 and 28 days after the specimens' construction in the structural lab at the University of Minho, and the teams were informed about the test results no later than three days afterwards. Each test was documented in a short report, including the force-displacement diagrams.

2.3 Deliverables and evaluation criteria

Each team was obliged to submit a report on the predicted response. These reports had to include a description of the adopted hypotheses, the applied methods, as well as the cal-

die aus Vollziegeln und aus Betonhohlblöcken mit Mörtelfugen hergestellt waren. Um die Komplexität der Aufgabenstellung und des Wettbewerbs zu erhöhen, wurden die Prismen unter exzentrischer Belastung geprüft. Die Prismen wurden 240 Tage vor der 9. IMC Konferenz im Labor der Universität Minho hergestellt, bevor die Prüfung dann während der Konferenz stattfand.

Der Wettbewerb erforderte Teamarbeit. Die einzelnen Gruppen bestanden aus maximal drei Studenten, die in einem Master- oder Doktorandenprogramm eingeschrieben waren. Alle Teilnehmer einer Gruppe mussten vom gleichen Institut stammen und konnten jeweils nur in einer Gruppe mitarbeiten. Jede Gruppe bekam Unterstützung durch einen Betreuer des Instituts, der sicherstellte, dass die Studenten die Wettbewerbsregeln einhielten. Um den Wettbewerb erfolgreich abzuschließen, arbeiteten sie unter Anleitung der Betreuer.

Während des IMC-Studentenwettbewerbs konnten die Gruppenmitglieder an den Laborprüfungen teilnehmen.

2.2 Spezifikationen für die Studierenden

Vor dem Wettbewerb erhielten die Teilnehmer eine detaillierte Beschreibung der Prismengeometrie, der Ziegel und der Blöcke sowie des Mörtels und der Prüfbedingungen. Die Vorgaben beinhalteten außerdem die gewählten Materialeigenschaften und die Angabe, dass der Versatz für die exzentrische Belastung 33 mm betragen sollte. Bild 1 zeigt die Geometrie der Prismen mit 10 mm Mörtelfugen.

Die exzentrische Prüfung der Druckfestigkeit wurde 240 Tage nach der Herstellung der Prüfkörper durchgeführt. Vor der Prüfung der Mauerwerksprismen wurden mehrere Prüfungen nach dem Prüfplan Tabelle 1 an Steinen und Mörtel durchgeführt. Die Prüfungen fanden jeweils 14 und 28 Tage nach Herstellung der Prüfkörper im Testlabor der Minho Universität statt. Die Prüfergebnisse wurden den Gruppen spätestens drei Tage danach mitgeteilt. Jede Prüfung wurde in einem kurzen Bericht dokumentiert und mit Kraft-Verschiebungs-Diagrammen ergänzt.

Table 1. Testing schedule for all materials and specimens (European standards used)

Tabelle 1. Prüfplan für alle Baustoffe und Prüfkörper (nach europäischem Standard)

Materials or specimens / Baustoffe oder Prüfkörper	Type of Test / Prüfungsart	Testing schedule / Prüfplan			
		0 days / Tage	14 days / Tage	28 days / Tage	240 days / Tage
Mortar / Mörtel	Density / Dichte	Specimens construction / Prüfkörperherstellung	3 specimens / Prüfkörper	3 specimens / Prüfkörper	–
	Compressive strength / Druckfestigkeit		3 specimens / Prüfkörper	3 specimens / Prüfkörper	–
	Flexural strength / Biegezugfestigkeit		3 specimens / Prüfkörper	3 specimens / Prüfkörper	–
Masonry units / Mauersteine	Density / Dichte	Specimens preparation / Prüfkörpervorbereitung	3 specimens per masonry unit type / Prüfkörper pro Mauerwerkskörper-Typ	–	–
	Compressive strength / Druckfestigkeit		3 specimens per masonry unit type / Prüfkörper pro Mauerwerkskörper-Typ	–	–
	Flexural strength / Biegezugfestigkeit		3 specimens per masonry unit type / Prüfkörper pro Mauerwerkskörper-Typ	–	–
Masonry prisms / Mauerwerkprismen	Eccentric compression test / Exzentrische Druckprüfung	Specimens' construction / Prüfkörperherstellung	–	–	3 specimens for each type of masonry units / Prüfkörper für jeden Mauersteintyp

culations and the estimated values of the maximum compressive force. The reports were then evaluated on the basis of the applied principles and the theoretical background that support the response predictions, as well as on the innovative character of the analysis, the students' creativity and the theoretical soundness of their work. Students were asked to prepare their reports in a formal and scientific style.

The evaluation focused on two main aspects:

- Criterion A related to the objective quantification of the estimated maximum load obtained through the two specimens. 20 points were the best score, based on the average of the two predictions: $20 \times [1 - \text{abs}(1 - \text{Estimated Force/Experimental Force})]$, rounded up to integral numbers;
- Criterion B related to the Scientific Committee's evaluation of the report 20 points were the best score, rounded up to integral numbers.

The final grade is given by Eq.(1):

$$\text{Final Grade} = 2 \times \text{Grade of Criterion A} + 1 \times \text{Grade of Criterion B} \quad (1)$$

In case of equal scores, the grade in Criterion B ranks the teams.

3 Experimental tests

3.1 Construction of the specimens

As mentioned earlier, two types of prisms were built: a) hollow concrete block masonry and b) solid clay brick ma-

2.3 Arbeitsergebnisse und Beurteilungskriterien

Jede Gruppe musste einen Bericht über die vorhergesagte Reaktion einreichen. In den Berichten sollten die angenommene Hypothese, die angewandten Methoden, die Berechnungen und die angenommenen Maximalwerte der Druckkraft aufgeführt sein. Diese Berichte wurden dann auf der Grundlage der angewandten Prinzipien und des theoretischen Hintergrunds, der die vorhergesagte Reaktion stützt, sowie des Innovationswerts der Untersuchung und des kreativen Ansatzes bewertet. Die Studenten wurden aufgefordert, ihren Bericht nach formalen und wissenschaftlichen Gesichtspunkten zu verfassen.

Die Auswertung konzentrierte sich auf zwei Hauptaspekte:

- Kriterium A bezieht sich auf die objektive Quantifizierung der durch die zwei Prüfkörper erhaltenen Maximallastbemessung. Die maximale Punktzahl von 20 Punkten basiert auf dem Durchschnitt der folgenden zwei Aussagen: $20 \times [1 - \text{abs}(1 - \text{bemessene Kraft/experimentelle Kraft})]$, zu ganzen Zahlen aufgerundet;
- Kriterium B bezieht sich auf die Auswertung des Berichts durch den wissenschaftlichen Ausschuss. Die maximale Punktzahl beträgt 20 Punkte, zu ganzen Zahlen aufgerundet.

Die endgültige Punktzahl ergibt sich durch die Gl. (1):

$$\text{Endgültige Punktzahl} = 2 \times \text{Punktzahl Kriterium A} + 1 \times \text{Punktzahl Kriterium B} \quad (1)$$

Fig. 2. Construction of the specimens; a) concrete hollow prisms, b) brick prisms, c) and d) final configuration of the specimens

Bild 2. Herstellung der Prüfkörper; a) Betonhohlblock-Prismen, b) Ziegel-Prismen, c) und d) endgültiger Aufbau der Prüfkörper

sonry (see Fig. 1). The mortar has a volumetric ratio of 1:1:6 (cement – lime – sand), all materials complied with European norms (CEM II/B-L 32,5N; CL 90-S; natural sand).

The selected masonry units contained a minimum number of imperfections. The technique used to build the specimens allowed the adaptation of the thickness of the mortar joints, as shown in Fig. 2a and 2b. Three specimens of each type were built and cured at a temperature of $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ and a relative humidity of $60\% \pm 5\%$. The final configurations of both types of specimens are presented in Fig. 2c and 2d.

The mortar used for the masonry specimens was sampled and stored according to EN 1015-11 [2]. After removing the mould, the mortar specimens were kept under the same conditions as the masonry specimens. The eccentric compressive tests on masonry prisms were carried out 240 days after the specimens' construction.

3.2 Flexural and compressive strength of mortar samples

Three prisms ($160\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$) were tested on flexural strength after 14 and 28 days, as presented in Fig. 3a. Consequently, six half prisms were tested on compressive strength, as shown in Fig. 3b. General requirements of EN 1015-11 [2] on the determination of flexural and compressive strengths were met, with the exception of the loading method. Both tests were conducted under displacement control, in order to provide force-displacement curves to describe the post-peak behaviour (see Fig. 3c to f for flexural strength and compressive strength).

Bei Punktegleichstand ist die Punktzahl des Kriteriums B ausschlaggebend.

3 Experimentelle Prüfungen

3.1 Herstellung der Prüfkörper

Wie bereits erwähnt wurden zwei Typen von Prüfkörpern hergestellt: a) Mauerwerk aus Betonhohlblocksteinen und b) Mauerwerk aus Vollziegeln (siehe Bild 1). Der Mörtel hat ein Volumenverhältnis von 1:1:6 (Zement – Kalk – Sand), alle Baustoffe entsprechen den europäischen Normen (CEM II/B-L 32,5N; CL 90-S; Sand).

Die ausgewählten Ziegel enthielten eine minimale Anzahl an Unregelmäßigkeiten. Wie in Bild 2a und 2b zu sehen ist, wurde bei der Herstellung der Prüfkörper eine Technik angewandt, bei der die Mörtelfugendicke entsprechend angepasst werden kann. Pro Typ wurden drei Prüfkörper hergestellt und bei einer Temperatur von $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ und einer relativen Luftfeuchtigkeit von $60\% \pm 5\%$ ausgehärtet. Der endgültige Aufbau beider Prüfkörper-Typen ist in Bild 2c und 2d zu sehen.

Der Mörtel für die Mauerwerkprüfkörper wurde nach EN 1015-11 [2] hergestellt und gelagert. Nach dem Ausschalen wurden die Mörtelprüfkörper unter gleichen Bedingungen gelagert wie die Mauerwerksprüfkörper. Die exzentrische Druckfestigkeitsprüfung wurde 240 Tage nach der Herstellung der Prüfkörper durchgeführt.

3.2 Biege- und Druckfestigkeit der Mörtelproben

Drei Prismen ($160\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$) wurden nach 14 und 28 Tagen auf Biegezugfestigkeit geprüft, siehe Bild 3a. Folglich wurden sechs halbe Prismen auf Druckfestigkeit geprüft, siehe Bild 3b. Allgemeine Vorgaben der EN 1015-11 [2] zur Bestimmung der Biege- und Druckfestigkeit wurden mit Ausnahme der Belastungsart eingehalten. Beide Prüfungen wurden mithilfe einer Kraft-Wege-Überwachung durchgeführt, um Kurven zur Beschreibung und Abbildung des Nachbruchverhaltens zu ermöglichen (s. Bild 3c bis f für Biege- und Druckfestigkeit).

Die Biege- und Druckfestigkeitswerte aller Prüfkörper nach 14 und 28 Tagen sind in Tabelle 2 und Tabelle 3 dargestellt. CoV steht für den Variationskoeffizient. Aufgrund von Problemen mit dem Differentialtransformator (LVDT) konnte für MS.C1 keine eindeutige Kraft-Weg-Kurve aufgenommen werden. Prüfkörper MS.C12 erwies sich als

Table 2. Flexural strength of mortar at 14 and 28 days
Tabelle 2. Biegezugfestigkeit Mörtel nach 14 und 28 Tagen

	14 days / Tage			28 days / Tage	
	F [kN]	f_{xm} [MPa]		F [kN]	f_{xm} [MPa]
MS.F1	1.23	2.9	MS.F4	1.46	3.4
MS.F2	1.27	3.0	MS.F5	1.58	3.7
MS.F3	1.21	2.8	MS.F6	1.56	3.6
Average / Durchschnitt	1.2	2.9	Average / Durchschnitt	1.5	3.6
CoV (%)	2.0	2.0	CoV (%)	3.2	3.2

Fig. 3. Mortar tests; a) flexural test setup, b) compressive test setup, c) and e) force-displacement curves regarding the flexural behaviour at 14 days and 28 days, respectively, d) and f) force-displacement curves regarding compression behaviour at 14 days and 28 days, respectively

Bild 3. Mörtelprüfungen; a) Versuchsanordnung für Biegefestigkeitsprüfung, b) Versuchsanordnung für Druckfestigkeitsprüfung, c) und e) Kraft-Verschiebungs-Kurve bezüglich des Biegeverhaltens nach 14, bzw. 28 Tagen, d) und f) Kraft-Verschiebungs-Kurve bezüglich des Druckverhaltens nach 14, bzw. 28 Tagen

Flexural and compressive strength values of all specimens after 14 and 28 days are presented in Table 2 and Table 3, respectively. CoV indicates the coefficient of variation. It was not possible to obtain a proper force-displacement curve of MS.C1, due to a problem with the Linear Variable Differential Transformer (LVDT). Specimen MS.C12 proved to be an outlier, its results are therefore not provided.

3.3 Flexural and compressive strength of masonry units

The tests were conducted under displacement control, in order to provide force-displacement curves including post-peak behaviour. The masonry units were kept under the same curing conditions as the masonry specimens to be tested, which were at $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ room temperature and $60\% \pm 5\%$ relative humidity.

Ausreißer, die entsprechenden Resultate sind deshalb nicht angegeben.

3.3 Biege- und Druckfestigkeit der Mauersteine

Die Prüfungen wurden mithilfe einer Kraft-Weg-Überwachung durchgeführt, um Kurven zur Beschreibung und Abbildung des Nachbruchverhaltens zu ermöglichen. Die Steine durchliefen den selben Aushärteprozess wie die Mauerwerksprüfkörper, welcher bei $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ Raumtemperatur und $60\% \pm 5\%$ relativer Luftfeuchte stattfand.

3.3.1 Vollziegel (Solid clay bricks, SCB)

Fünf Vollziegel wurden auf Biegefestigkeit und weitere fünf auf Druckfestigkeit geprüft (s. Bild 4a und b). Allge-

Table 3. Compressive strength of mortar at 14 and 28 days
Tabelle 3. Druckfestigkeit Mörtel nach 14 und 28 Tagen

	14 days / Tage			28 days / Tage	
	F [kN]	f_m [MPa]		F [kN]	f_m [MPa]
MS.C1	11.39	7.12	MS.C7	11.20	7.00
MS.C2	12.00	7.50	MS.C8	11.16	6.98
MS.C3	12.76	7.98	MS.C9	10.61	6.63
MS.C4	11.61	7.26	MS.C10	11.18	6.98
MS.C5	12.42	7.76	MS.C11	11.69	7.31
MS.C6	12.73	7.96	MS.C12	–	–
Average / Durchschnitt	12.2	7.6	Average / Durchschnitt	11.2	7.0
CoV (%)	4.4	4.4	CoV (%)	3.1	3.1

3.3.1 Solid clay bricks (SCB)

Five solid clay bricks were tested on flexural strength and another five on compressive strength (see Fig. 4a and b). General requirements of ASTM C67 – 13a [3] were met to conduct the tests, and to calculate the flexural strength. Flexural failure was obtained without notching the bricks, and consequently the failure plane was not always at mid-span. The average distance from the midspan to the plan of failure was 4 mm for the specimen SCB.F1, and 20 mm for the two remaining valid tests, SCB.F2 and SCB.F4. The

meine Vorgaben in ASTM C67 – 13a [3] wurden bei der Durchführung der Prüfung und zur Berechnung der Biegefestigkeit eingehalten. Das Versagen unter Biegebelastung wurde ohne Einkerbung der Ziegel festgestellt, dementsprechend befand sich die Bruchebene nicht immer in Feldmitte. Der durchschnittliche Abstand von Feldmitte zur Bruchebene betrug 4 mm beim Prüfkörper SCB.F1 und 20 mm bei den zwei verbleibenden gültigen Prüfungen SCB.F2 und SCB.F4. Der Abstand zwischen den Auflagern betrug 174 mm. Bild 4c zeigt die Kraft-Verschiebungs-Kurven der Druckfestigkeitsprüfung an den SCB Prüfkörpern.

Bei den Druckfestigkeitsprüfungen wurden ASTM C67 – 13a [4] und EN 772-1 [3] berücksichtigt. Die Blöcke wurden auf ihrer Gesamtlänge geprüft, um die Prüfmethode für die HCB-Prüfkörper beizubehalten. Die durchschnittliche Bruttofläche der oberen und unteren Auflagerflächen betrug 20 000 mm². Bild 4d zeigt die Spannungs-Dehnungs-Kurve für die Druckfestigkeitsprüfung, die an SCB-Prüfkörpern durchgeführt wurde. Die Biege- und Druckfestigkeitswerte aller Prüfkörper sind mit den entsprechenden Variationskoeffizienten (CoV) in Tabelle 4 dargestellt.

3.3.2 Betonhohlblöcke (Hollow concrete blocks, HCB)

Fünf Betonhohlblöcke (HCB) wurden auf Biegefestigkeit und weitere fünf auf Druckfestigkeit geprüft (s. Bild 5a und b). Allgemeine Vorgaben in ASTM C67 – 13a [4] wurden bei der Durchführung der Prüfung und zur Berechnung der Biegefestigkeit eingehalten. Um das Versagen unter

Fig. 4. Tests on SCB specimens; a) flexural test setup, b) compressive test setup, c) force-displacement curves of flexure tests, d) stress-strain curves of compression tests

Bild 4. Prüfungen an SCB-Prüfkörpern; a) Versuchsanordnung für Biegefestigkeitsprüfung, b) Versuchsanordnung für Druckfestigkeitsprüfung, c) Kraft-Verschiebungs-Kurven der Biegeprüfung, d) Spannungs-Dehnungs-Kurve der Druckprüfung

distance between the supports was 174 mm. Fig. 4c shows the force-displacement curves of the flexural tests on the SCB specimens.

For the compression tests, both ASTM C67 – 13a [4] and EN 772-1 [3] were taken into consideration. Full length blocks were tested, to be consistent with the method adopted for the HCB specimens. The average gross area of the upper and lower bearing surfaces was 20 000 mm². Fig. 4d shows the stress-strain curves for the compression tests conducted on SCB specimens. Flexural and compressive strength values, with respective Coefficients of Variation (CoV) of all specimens are presented in Table 4.

3.3.2 Hollow concrete blocks (HCB)

Five hollow concrete blocks (HCB) were tested on flexural strength and another five on compressive strength (see Fig. 5a and b). General requirements of ASTM C67 – 13a [4] were met to conduct the tests and to calculate the flexural strength. In order to obtain flexural failure, the specimens were carefully notched by dry sawing [2] along the width of the block at midspan. The notches were on average 3 mm wide and the blocks had an unnotched depth of approximately 79 mm. The distance between the supports was 174 mm. Fig. 5c show the force-displacement curves of the flexural tests of the HCB specimens.

For the compression tests, both ASTM C67 – 13a [4] and EN 772-1 [3] were taken into consideration. Full length blocks were tested to prevent damage caused by sawing. The average gross area of the upper and lower bearing surfaces was 9 400 mm². Figure 5d shows the

Table 4. Maximum force and flexural strength for all SCB specimens

Tabelle 4. Maximalkraft und Biegezugfestigkeit aller SCB-Prüfkörper ((Zahlenwerte müssen noch ergänzt werden))

	Flexure tests / Biegefestig- keitsprüfun- gen			Compression tests / Druck- festigkeitsprü- fungen	
	F [kN]	f_{xb} [MPa]		F [kN]	f_b [MPa]
SCB.F1			SCB.C1		
SCB.F2			SCB.C2		
SCB.F3			SCB.C3		
SCB.F4			SCB.C4		
SCB.F5			SCB.C5		
Average / Durchschnitt					
CoV / Varia- tionskoeffi- zient v (%)					

Biegebelastung zu bestimmen, wurden die Prüfkörper sorgfältig mit einer Säge über die Breite des Blockes in Feldmitte eingekerbt [2]. Die Einkerbungen hatten eine durchschnittliche Breite von 3 mm, die Restdicke der Blöcke betrug somit 79 mm. Der Abstand zwischen den Auflagern betrug 174 mm. Bild 5c zeigt die Kraft-Verschiebungs-Kurven der Biegefestigkeitsprüfung an den HCB-Prüfkörpern.

Fig. 5. Tests on HCB specimens; a) flexural test setup, b) compressive test setup, c) force-displacement curves of flexure tests, d) stress-strain curves of compression tests

Bild 5. Prüfungen an HCB-Prüfkörpern; a) Versuchsanordnung für Biegefestigkeitsprüfung, b) Versuchsanordnung für Druckfestigkeitsprüfung, c) Kraft-Verschiebungs-Kurven der Biegeprüfung, d) Spannungs-Dehnungs-Kurve der Druckprüfung

Table 5. Maximum force and flexural strength for all HCB specimens

Tabelle 5. Maximalkraft und Biegezugfestigkeit aller HCB-Prüfkörper

	Flexure tests / Biegefestigkeitsprüfungen			Compression tests / Druckfestigkeitsprüfungen	
	F [kN]	f_{xb} [MPa]		F [kN]	f_b [MPa]
HCB.F1	–	–	HCB.C1	–	–
HCB.F2	3.55	5.76	HCB.C2	294.4	31.3
HCB.F3	4.30	6.96	HCB.C3	368.1	39.2
HCB.F4	4.15	6.59	HCB.C4	337.6	35.9
HCB.F5	4.21	6.87	HCB.C5	344.7	36.7
Average / Durchschnitt	4.1	6.5		336.2	35.8
CoV / Variationskoeffizient v (%)	7.3	7.2		7.9	7.9

stress-strain curves for the compression tests carried out on HCB specimens. Flexural and compressive strength values, with respective CoV of all specimens are presented in Table 5. Specimens HCB.F1 and HCB.C1 proved to be outliers. Hence, their results were excluded.

3.4 Eccentric load test of prisms

During the 9th IMC conference the tests of SCB and HCB prisms were carried out under eccentric load by means of a force-controlled test machine. Fig. 6 shows the set-up in the lab with the students present during testing and Table 6 presents the maximum force value obtained from each specimen, as well as the average values and CoV.

4 Students' estimations

Thirteen student-teams from all over the world participated in the competition. They submitted their reports

Bei den Druckfestigkeitsprüfungen wurden ASTM C67 – 13a [4] und EN 772-1 [3] berücksichtigt. Die Blöcke wurden auf ihre Gesamtlänge geprüft, um Beschädigungen durch das Sägen auszuschließen. Die durchschnittliche Bruttofläche der oberen und unteren Auflagerflächen betrug 9400 mm². Bild 5d zeigt die Spannungs-Dehnungs-Kurve für die Druckfestigkeitsprüfung, die an HCB-Prüfkörpern durchgeführt wurde. Die Biege- und Druckfestigkeitswerte aller Prüfkörper sind mit den entsprechenden Variationskoeffizienten (CoV) in Tabelle 5 dargestellt. Prüfkörper HCB.F1 und HCB.C1 erwiesen sich als Ausreißer. Diese Ergebnisse sind daher nicht aufgeführt.

3.4 Exzentrische Belastung der Prismen

Während der 9. IMC-Konferenz wurde das Tragverhalten von SCB- und HCB-Prismen durch Aufbringen einer geregelten Kraft an der Prüfmaschine unter exzentrischer Belastung geprüft. Bild 6 zeigt die Versuchsanordnung im Labor mit den Studenten während der Prüfung. In Tabelle 6 werden die Maximalkräfte der einzelnen Prüfkörper sowie die durchschnittlichen Werte und die Variationskoeffizienten dargestellt.

Table 6. Maximum force of the eccentric load test on the masonry specimens

Tabelle 6. Maximalkraft der exzentrischen Belastungsprüfung an Mauerwerksprismen

	Solid clay bricks / Vollziegel		Hollow concrete blocks / Betonhohlblöcke
	F [kN]		F [kN]
SCB1	126.67	HCB1	48.27
SCB2	125.26	HCB2	52.04
SCB3	123.15	HCB3	47.36
Average / Durchschnitt	125.0		52.0
CoV / Variationskoeffizient v (%)	1.2		3.9

(a)

(b)

Fig. 6. Tests on SCB masonry prisms; a) overview of the ambient in the lab, b) eccentric compressive test with the failure of one prisms

Bild 6. Prüfungen an SCB-Mauerwerksprismen; a) Übersicht der Laboreinrichtung, b) exzentrische Druckfestigkeitsprüfung mit Versagen eines Prismas

Fig. 7. Estimation of the maximum compressive force by the students (dot line is the average estimation and straight line is the average result); a) solid clay brick specimens, b) hollow concrete blocks

Bild 7. Abschätzung der maximalen Druckkraft durch die Studenten (gepunktete Linie zeigt die durchschnittliche Schätzung, die durchgezogene Linie das durchschnittliche Ergebnis) a) Vollziegel-Prüfkörper, b) Betonhohlblöcke

prior to the 9th IMC conference, which were then assessed by the steering committee. As a comparison, the student's estimates on both types of specimens are presented in Fig. 7. Students tended to overestimate the maximum compressive force. The average value of the estimates equals 137 kN (CoV equals 36%) for the solid clay bricks, and 83 kN (CoV equals 39%) for the hollow concrete blocks. The maximum deviation from the experimental value was observed on the hollow concrete blocks (error equals 31 kN), due to the complexity of test. The geometry of the blocks was found to be the main reason for the difference.

The overall quality of the reports was very good. Some groups adopted design rules and linear calculations combined with literature formulas and analogous tests [5] to [11]. Others conducted experimental tests with similar ma-

4 Abschätzung der Studenten

Dreizehn Studententeams aus der ganzen Welt nahmen am Wettbewerb teil. Sie reichten ihre Berichte vor der 9. IMC-Konferenz ein, die dann von der Jury geprüft wurden. Zum Vergleich sind die Bewertungen der Studenten für beide Prüfkörper-Typen in Bild 7 dargestellt. Die Studenten neigten dazu, die maximalen Druckkräfte zu hoch zu bemessen. Der durchschnittliche Wert der Schätzung liegt bei 137 kN (der CoV beträgt 36%) für Vollziegel, und bei 83 kN (CoV beträgt 39%) für Betonhohlblöcke. Die maximale Abweichung von den experimentell bestimmten Werten wurde bei den Betonhohlblöcken festgestellt (der Fehler liegt bei 31 kN), wegen der Komplexität der Tests. Die Blockgeometrie wurde als Hauptgrund für den Unterschied identifiziert.

Table 7. Final rank of the students challenge
Tabelle 7. Rangliste des Studentenwettbewerbs

Rank / Rang	Team name / Gruppenname	Criterion A / Kriterium A	Criterion A / Kriterium B	Final Grade / Endgültige Punktzahl
1	UCD URBAN MODELLING GROUP	18	15	51
2	POLIMI	17	13	47
3	UNIVERSITY OF CALGARY	14	15	43
4	UNIVPM	15	13	43
5	ROMA-TRE	14	14	42
6	INGEO PESCARA	14	13	41
7	CTU FCE PRAGUE	11	15	37
8	QUT MASONRY GROUP	12	12	36
9	TEAM M.A.N.	10	14	34
10	UPC	7	16	30
11	THE BRICKIES	2	14	18
12	BELGICA WALL	2	13	17
13	POLITEHNICA TIMIȘOARA	1	8	10

(a)

(b)

(c)

(d)

Fig. 8. Students proposals and analysis; a) experimental analysis of the The Brickies Team, b) numerical model of the PoliMi Team, c) damage analysis of the CTU FCE Team, d) semi-random finite element analysis methodology used by the UCD Urban Modelling Group

Bild 8. Vorschläge und Analysen der Studenten; a) experimentelle Analyse des Brickies-Teams, b) numerisches Modell des PoliMi-Teams, c) Schadensanalyse des CTU FCE Teams, d) Semi-Random Finite-Elemente-Analysenmethodik, verwendet vom Team UCD Urban Modelling Group

terials, and numerical advanced simulations with nonlinear rules for the materials properties [12] to [21]. One of the groups used a semi-random finite element analysis approach to estimate the maximum forces (see Fig. 8d). The final scores are presented in Table 7.

5 Conclusions

The “IMC Students’ Challenge” competition held during the 9th International Masonry Conference in Guimarães, in 2014, was a successful initiative that involved thirteen student-teams of the international masonry community. The complexity of the problem to be solved was high and the students were encouraged to use a scientific approach.

The teams opted for different approaches to estimate the maximum eccentric compressive force on masonry prisms. On average, the teams overestimated the maximum capacity of the two types of prisms, but some teams presented results which were close to the experimental outcome. The students enthusiastically participated in the final laboratory tests. It was a great experience for students, conference participants, sponsors and organizers alike.

For the future, the authors encourage the masonry community to support and organize similar challenges for the benefit of the technical and scientific community, as these challenges are an excellent way to promote masonry materials.

Acknowledgments

The authors would like to express their gratitude to EuLA – European Lime Association for sponsoring the competition and to the members of the Scientific Committee responsible for grading the reports, namely *Adrian Page*, *Robert Drysdale*, *Frederik Verhelst* and *Dirk Martens*.

References – Literatur

- [1] *Vermeltfoort, Ad. T.*: Masonry Design projects and education. Proceedings of the 4th International Colloquium on Structural Morphology, August 17-19, Delft, pp. 72–80, 2000.
- [2] EN 1015-11:1999 Methods of test for mortar for masonry. Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. 1999.
- [3] EN 772-1 Methods of test for masonry units – Part 1: Determination of compressive strength. 2002.
- [4] ASTM C67 – 13a, 2013 Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, DOI: 10.1520/C0067, www.astm.org.
- [5] *Tassios, T. P.*: Meccanica delle murature. Liguri Editore, 1988, in italian.
- [6] *Hilsdorf, H. K.*: Investigation into the failure mechanism of brick masonry loaded in axial compression. In: Designing, Engineering & Construction with Masonry Products, F.B. Johnson ed., Gulf Publishing, Houston, Texas, 1969.
- [7] *Paulay, T., Priestley, M. J. N.*: Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore. John Wiley & Sons, 1992.
- [8] *Hicks, Tyler G.*: Civil engineering formulas. New York, Chicago, San Francisco... McGraw-Hill, 2010.
- [9] EN 1996-1-1:2005+A1:2012: Eurocode 6 – Design of masonry structures – Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures. November 2012.
- [10] *Brencich, A., de Felice, G.*: Brickwork under eccentric compression: Experimental results and macroscopic models. Construction and Building Materials 23 (2009) pp. 1935–1946.
- [11] *Brencich, A., Corradi, C., Gambarotta, L.*: Eccentrically loaded brickwork: Theoretical and experimental results. Engineering Structures 30 (2008) pp. 3629–3643.
- [12] *de Felice, G., De Santis, S.*: Experimental and numerical response of arch bridge historic masonry under eccentric loading. International Journal of Architectural Heritage 4 (2010) pp. 115–137.
- [13] *Francis, A., Horman, C., Jerrems, L.*: The effect of joint thickness and other factors on the compressive strength of

Im Allgemeinen war die Qualität der Berichte sehr gut. Manche Gruppen hielten sich an Gestaltungsrichtlinien und lineare Berechnungen in Kombination mit Formeln aus der Literatur und entsprechende Prüfungen [5] bis [11]. Andere führten experimentelle Prüfungen an ähnlichen Baustoffen durch und setzten fortgeschrittene numerische Rechenverfahren mit Simulationen zur Bestimmung von Materialeigenschaften ein [12] bis [21]. Eine Gruppe entschied sich für den Ansatz einer halbrandomisierten Finite-Elemente-Analyse, um die Maximalkräfte zu bestimmen (s. Bild 8d). Die endgültigen Ergebnisse sind in Tabelle 7 dargestellt.

5 Schlussfolgerungen

Der „IMC Students’ Challenge“-Wettbewerb, der 2014 während der 9. Internationalen Mauerwerks-Konferenz in Guimarães veranstaltet wurde, war eine erfolgreiche Initiative, an der dreizehn Studenten-Gruppen der internationalen Mauerwerks-Community teilnahmen. Die Problemstellung war komplex und die Studenten wurden motiviert, eine wissenschaftliche Arbeit abzuliefern.

Sie präsentierten dabei unterschiedliche Ansätze, um die maximale exzentrische Druckkraft auf Mauerwerksprismen zu bestimmen. Im Schnitt überschätzten die Gruppen die maximale Druckkraft der beiden Prismen-Typen, wobei einige Gruppen Ergebnisse präsentierten, die sehr nahe an den experimentellen Ergebnissen lagen. Die Studenten beteiligten sich begeistert an den endgültigen Laborprüfungen. Für Studenten und Konferenzteilnehmer war der Wettbewerb ebenso eine großartige Erfahrung, wie für Sponsoren und Organisatoren.

Für die Zukunft möchten die Autoren die Mauerwerks-Community anregen, weitere Wettbewerbe zum Vorteil der technischen und wissenschaftlichen Gemeinschaft zu unterstützen und zu organisieren, da diese Wettbewerbe ein großartiges Mittel sind, Mauerwerkskonstruktionen voranzubringen.

Danksagung

Die Autoren möchten sich bei EuLA – European Lime Association für die Unterstützung des Wettbewerbs, und bei den Mitgliedern des wissenschaftlichen Ausschusses: *Adrian Page*, *Robert Drysdale*, *Frederik Verhelst* und *Dirk Martens* für die Bewertung der Berichte bedanken.

- brickwork. In: Proceedings of the 2nd International Brick and Block Masonry Conference, 1971, pp. 31–37.
- [14] *Hilsdorf, H. K.*: Investigation into the failure mechanism of brick masonry loaded in axial compression. Designing, Engineering and Constructing with Masonry Products. Houston Tex., 1969, pp. 34–41.
- [15] *Sarhat, S. R., Sherwood, E. G.*: The prediction of compressive strength of ungrouted hollow concrete block masonry. Constr. Build. Mater. 58 (2014), May, pp. 111–121.
- [16] *Mohamad, G., Lourenço, P. B., Roman, H. R.*: Mechanics of hollow concrete block masonry prisms under compression: Review and prospects. Cem. Concr. Compos. 29 (2007), no. 3, pp. 181–192.
- [17] *Venkatarama Reddy, B. V., Lal, R., Nanjunda Rao, K. S.*: Influence of Joint Thickness and Mortar-Block Elastic Properties on the Strength and Stresses Developed in Soil-Cement Block Masonry. J. Mater. Civ. Eng. 21 (2009), no. 10, pp. 535–542.
- [18] *Milani, G., Lourenço, P. B., Tralli, A.*: Homogenised limit analysis of masonry walls, Part I: Failure surfaces. Comput. Struct. 84 (2006), no. 3–4, Jan., pp. 166–180.
- [19] *Berto, R., Saetta, L., Scotta, A., Vitaliani, R., Berto, L., Saetta, A., Scotta, R., Vitaliani, R.*: Failure mechanism of masonry prism loaded in axial compression: computational aspects. Mater. Struct. 38 (2005), no. 276, Jan., pp. 249–256.
- [20] *Lourenço, P. B., Pina-Henriques, J. L.*: Validation of analytical and continuum numerical methods for estimating the compressive strength of masonry. Comput. Struct. 84 (2006), no. 29–30, Nov., pp. 1977–1989.
- [21] *Adam, J. M., Brencich, A., Hughes, T. G., Jefferson, T.*: Micromodelling of eccentrically loaded brickwork: Study of masonry wallettes. Eng. Struct. 32 (2010), no. 5, May, pp. 1244–1251.

Authors – Autoren:

Dr.-Ing. Luís F. Ramos
 ISISE – University of Minho
 Campus de Azurém, Guimarães Portugal
 lramos@civil.uminho.pt

Dr.-Ing. Paulo B. Lourenço
 ISISE – University of Minho
 Campus de Azurém, Guimarães Portugal
 pbl@civil.uminho.pt

Dr.-Ing. Ad. T. Vermeltfoort
 Eindhoven University of Technology
 The Netherlands
 a.t.vermeltfoort@tue.nl

Dr.-Ing. Susana Moreira
 Engineering & Heritage – Pontificia Universidad Católica del Perú – PUCP
 su.moreira.pt@gmail.com

correspondence author: Dr.-Ing. Luís F. Ramos