

Zukunft Bau

Kurzbericht

Titel

Lehmmauerwerk: Entwurfs- und Konstruktionsgrundsätze für eine Breitenanwendung im Wohnbau unter Berücksichtigung klimatischer Bedingungen gemäßigter Zonen am Beispielstandort Deutschland
 Az.: SWD-10.08.18.7-.15.31

Anlass / Ausgangslage

Basierend auf den Erkenntnissen historischer Lehmbauten sowie statischer Berechnungen und der Bauphysik stützen unsere Untersuchungen die Annahme, dass Mauerwerk mit modernen, großformatigen Lehmsteinen ein viel höheres Leistungspotenzial hat als derzeit angenommen. Dies gilt insbesondere für die Nachhaltigkeit. Die größte Sorge bis heute betrifft die Wasserempfindlichkeit dieses Baustoffs in Bezug auf die strukturelle Stabilität. Dem kann jedoch mit zuverlässigen, prophylaktischen Schutzmaßnahmen begegnet werden.

Gegenstand des Forschungsvorhabens

Materialprüfungen und Berechnungen zum Festigkeitsverhalten von Lehmmauerwerk

Im Folgenden werden wesentliche, für das Festigkeitsverhalten relevante Prüfungen vorgestellt, die die Abhängigkeit zwischen Festigkeitsverlust und Umgebungsfeuchte beinhalten. Die Einzelsteindruckfestigkeitsprüfung wurde nach DIN 18945 (2013) durchgeführt.

Druckfestigkeit ist abhängig von der relativen Luftfeuchtigkeit rH

In Abbildung 1 ist zu sehen, dass unabhängig vom Hersteller, der Blockgeometrie und der Zusammensetzung des Materials die Druckfestigkeit mit zunehmender Luftfeuchtigkeit (bei konstanter 23 ° C) abnimmt.

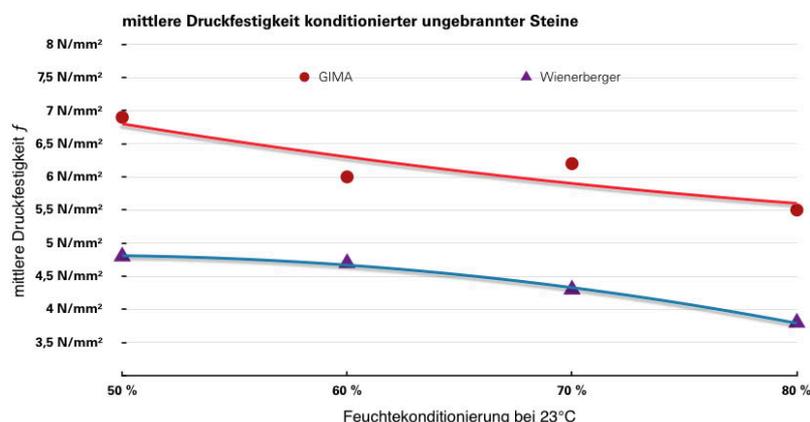


Abb. 1 Reduzierung der Druckfestigkeit mit zunehmender rH - Konditionierung

Interessanterweise gibt es jedoch eine annähernd konstante Reduktion. Die Reduzierung der Druckfestigkeit bei der Konditionierung von 80% rH für beide Blocktypen führt zu einem Druckfestigkeitsverlust von max. 20%. Für die Prüfcharge mit der Konditionierung von 60% rF wurde bei den GIMA-Prüfblöcken ein unerwarteter Festigkeitsverlust festgestellt, der bei den Wienerberger-Prüfsteinen nicht zu erkennen war. Wie sich im Laufe der Arbeiten herausgestellt hat, ist dies auf eine Vorschwächung der Steine zurückzuführen, nämlich einen mehr oder weniger starken aber durchgehenden längsmittigen Trocknungsrisse.

Lehmmauerwerk - Druckfestigkeitsprüfung

Insgesamt wurden vier Reihen aus mindestens drei Mauerwerksproben nach DIN EN 1052-1 (1998) geprüft. Für die Prüfkörper wurden zwei verschiedene Prüfkörper verwendet. Für die charakteristische Druckfestigkeit kann nach 10.2 der DIN EN 1052-1 bestimmt werden:

$$f_{k,GIMA} = \frac{f}{1.2} = 3.63 \text{ N/mm}^2 \quad (1)$$

$$f_{k,WB} = \frac{f}{1.2} = 2.36 \text{ N/mm}^2 \quad (2)$$

Elastizitätsmodul nach DIN EN 1996-1-1 (2013), siehe 3.7.2 (Absatz 1), oder DIN EN 1052-1 (4.2):

$$E = \frac{F_{i,max}}{(3 \cdot \varepsilon_i \cdot A_i)} \quad (3)$$

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta l}{\left(\frac{h_s}{3}\right)} \quad (4)$$

Messung des Elastizitätsmoduls für Mauerwerkskörper mit GIMA Prüfkörpern:
Prüfkörperreihe GIMA_3 bzw. GIMA_4: E = 1,500 N / mm² bzw. 1,900 N / mm²

Measurements elastic modulus for masonry bodies with Wienerberger test blocks:
Prüfkörperreihe WB_TM bzw. WB_Ps: E = 1,000 N / mm² bzw. 1,200 N / mm²

Für den Elastizitätsmodul ist zu beachten, dass bei Mauerwerksdruckprüfungen nach DIN EN 1052-1 mit verschiedenen Prüfkörpern ein vergleichbarer Wert in Bezug auf den Elastizitätsmodul bezogen auf den Faktorbereich resultiert:

$$E = 420 - 520 \cdot f_k$$

Aus den Werten der Lehmmauerwerksdruckfestigkeitsprüfungen mit den GIMA-Prüfkörpern kann der Grenzfaktor für die Tragfähigkeit nach EC6 (siehe DIN EN 1996-1-1, vgl. Meyer & Schlundt (2014)) berechnet und für weitere Prüfungen, hier eine 3m hohe Wand, verwendet werden.

$$N_{Ed} = N_{Rd} = \Phi \cdot t \cdot f_d \quad (5)$$

$\Phi \rightarrow$ Exzentrizität der aufgetragenen Last: für weitere Prüfungen: mittige Lasteinleitung
 $\Phi = 1$

$$t = 240 \text{ mm}$$

$e_i = 0 \geq 0,05 \cdot t$ wird nicht berücksichtigt

$$\text{Knicklänge } h_{ef} = \beta \cdot h = 0.75 \cdot 3.00 = 2.25 \text{ m}$$

Abminderungsfaktor:

$$\Phi_m = 1.14 \left(1 - 2 \frac{e_{mk}}{t} \right) - 0.024 \frac{h_{ef}}{t} \quad (6)$$

nach Nationalen Anhang NA zu DIN EN 1996-1-1 Anhang G

$$\Phi_m = 1.14 \cdot 1 - 0.024 \frac{2.25}{0.24} = 0.92$$

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_M} \quad (7)$$

Grenzzustand Tragfähigkeit des zu prüfenden Mauerwerks:

Dauerstandsfaktor $\zeta = 0.85$

Abminderungsfaktor $\Phi_m = 0.92$

$$N_{Ed} = 0.92 \cdot 0.85 \cdot 240 \text{ mm} \cdot 3.63 \text{ N/mm}^2 \cdot / 1.5 = 453 \text{ N/mm} = \mathbf{453 \text{ kN/m}}$$

Wird der Festigkeitsabfall durch permanent erhöhte max. erwartete Feuchtebedingungen berücksichtigt, ergibt sich der Grenzzustand der Tragfähigkeit:

80 % rH at 23 °C → 20 % Reduzierung der Druckfestigkeit

$$N_{Rd, 80\%rH} = 0.92 \cdot 0.85 \cdot 240 \text{ mm} \cdot (3.63 \text{ N/mm}^2 - 3.63 \text{ N/mm}^2 \cdot 20 \%) / 1.5 = 453 \text{ kN/m} \cdot 0.8$$

$$= \mathbf{362 \text{ kN/m}}$$

Brandprüfung - tragendes Lehmziegelmauerwerk

Es wurden zwei Brandversuche durchgeführt. Eine nicht tragende Lehmmauerwerkswand wurde nach DIN EN 1364-1 (2015) und eine tragende Wand nach DIN EN 1365-1 (2013) geprüft. Die nicht tragende Wand wurde mit dem Prüfziel EI 30 geprüft und erreichte die Klassifizierung EI 90 problemlos.

Die tragende Wand wurde mit $N_{Ed,fi} = N_{Rd} \cdot 0,7 = \mathbf{317 \text{ kN/m}}$, nach DIN EN 1996-1-2/NA (2013), vgl. auch Meyer & Schlundt (2014), belastet und mit dem Prüfziel REI-M 90 geprüft und erreichte nach mehr als 68 Minuten Belastung die Klassifizierung EI 60.

Es wurde eine Druckspannung von $1,32 \text{ N/mm}^2$ erreicht, die die zu prüfende Wand während des 68-minütigen Tests problemlos übersteht. Unter Ausschluss einer strukturellen Schwächung der Blöcke durch den Herstellungsprozess ist eine erfolgreiche Erreichung des Testziels bei einem erneuten Brandstresstest zu erwarten.

Technische Prüfungen - Konstruktion und Fertigung

Im Folgenden wird ein Einblick in weitere Forschungsergebnisse gegeben.

Baustelle / Aufbau Lehmziegelmauerwerk / Produktion von Fertigteilen

Auf der Baustelle kann mit den üblichen Verfahren Mauerwerk mit ungebrannten Blöcken errichtet werden. Der Auftrag von Ton-Dünnbettmörtel erfolgt mit einer Putzverlegemaschine und wird mit einem speziell entwickelten Glättschlitten auf die erforderliche Flachmörtelschichtdicke geglättet.

Gespräche mit Blocklayern auf der Baustelle des neuen Gymnasiums Zinsendorf in Herrnhut bestätigten, dass die nicht tragenden Lehm-mauerwerke mit modernem, großformatigem Lehm und Lehm-mörtel, wie üblich mit herkömmlichen Blöcken und Zementmörtel, gebaut wurden.

Mit modernem Lehmziegel-mauerwerk ist es möglich, im Werk vorgefertigte Elemente herzustellen, um den Vorfertigungsgrad zu erhöhen, z.B. um die Bauzeit zu minimieren:



Abb. 2 Hebeversuch Wandelement - Vermeidung von Spannungen im Mauerwerk Variante I: Hubtraverse - keine Querkkräfte auftretend



Abb. 3 Zusammenbau und Arretierung der einzelnen Elemente für den Rohbau des Modells

Konstruktion soll diffusionsoffen sein

Je nach Luftfeuchtigkeit nehmen ungebrannte Steine Wasser auf oder geben es wieder an die Umgebung ab. Um den Feuchtigkeitstransport von innen nach außen und die Langzeitstabilität gewährleisten zu können, sollte die Wandkonstruktion diffusionsoffen gestaltet sein.

Weitere durchgeführte Studien

Für das moderne Lehm-mauerwerk wurden weitere Versuche durchgeführt, die die Tragfähigkeit beeinflussen könnten. Zur Vervollständigung der Forschungsarbeiten sind hier weitere Erkenntnisse zu nennen:

Es wurde untersucht, ob und wie das moderne Lehm-mauerwerk kriecht. Es wurde festgestellt, dass das Lehm-mauerwerk in den ersten sechs Monaten weitgehend fertig gestellt wurde. Bei Vollbelastung des masonry ist mit einem vergleichsweise sehr geringen Kriechverhalten zu rechnen, was keinen Einfluss auf die Gesamtstruktur haben dürfte. Das Kriechverhalten wurde regelmäßig über mehr als sechs Monate an drei Prüfkörpern gemessen und anschließend mit einem Regressionsmodell nach Ross (1937) oder Kvitsel (2017) mit hoher Genauigkeit langfristig geschätzt.

Darüber hinaus wurde die Haftscherfestigkeit des verwendeten Lehm-mörtels nach DIN EN 1052-3 (2007) geprüft. Die DIN EN 1996-1-1-1 (2013) zeigt, dass die Scherfestigkeit von Mauerwerk unter Last zunimmt, insbesondere bei Präzisionsblock-mauerwerk.

Darüber hinaus wurde die Schlagregensicherheit der Außenwandkonstruktion mit Vorhangfassade mit verschiedenen Methoden auf Basis von Cziesielski & Maerker (1981) und DIN EN 13050 (2011) untersucht. Das Ergebnis zeigt, dass das Mauerwerk auch bei starkem und anhaltendem Schlagregen nicht nass wird, wenn die Anforderungen der bautechnischen Regeln erfüllt sind.

Mit dem Computerprogramm Delphin von IBK der TU-Dresden haben wir die bauphysikalischen Prozesse wesentlicher konstruktiver Verbindungen und Wandkonstruktionen simuliert. Um das Programm mit authentischen Daten zu versorgen, untersuchten wir vier Nasszellen (Bäder) von mehrköpfigen Haushalten unter realen Bedingungen ca. ein Jahr. Dies führte dazu, dass die maximale permanente relative Luftfeuchtigkeit von 70 % normalerweise nicht überschritten wird. Dieser Wert wurde als Ausgangswert für die Bauteilsimulation verwendet. Als Sicherheitswert ist eine Festigkeitsreduzierung von max. 20 % für die raumbegrenzenden Wände von Nasszellen aus tragendem Lehmziegelmauerwerk sind zu berücksichtigen.

Entwurfs- und Konstruktionsprinzipien

In der diesem Kurzbericht zugrunde liegenden Forschungsarbeit wurden auf der Grundlage der empirischen Ergebnisse und bauphysikalischen Bauteilsimulationen Planungsgrundlagen für die bauphysikalische Planung und Konstruktion abgeleitet. Die Entwurfs- und Konstruktionsanschlüsse wurden in einem Bauteilkatalog für alle wesentlichen Anschlussdetails eines Wohngebäudes dargestellt. In den folgenden Abschnitten werden die Planungsgrundlagen nur in den Planungsrichtlinien zusammengefasst und exemplarisch mit zwei Konstruktionsdetails dargestellt.

Hervorzuheben sind die Grundprinzipien, die die Prozesse von Design und Konstruktion charakterisieren:

1. Schadensvorbeugung

- Neubau: Entwurfs-, Planungs- und Ausführungszeitraum
- Nutzungsbegleitend: Sicherheits- und Wartungskonzept

2. Redundanz

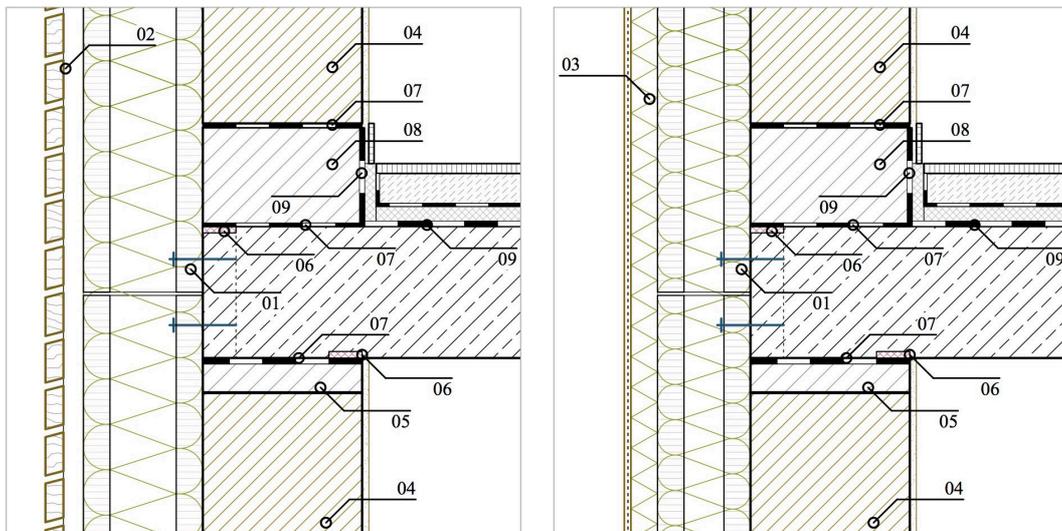
Die Prinzipien der Schadensverhütung dienen dazu, mögliche Schadensquellen bei der Planung und Errichtung einer umfassenden Planung zu reduzieren. Redundante Maßnahmen werden ergriffen, um Folgeschäden im Notfall, z.B. Materialversagen, zu vermeiden. Ein redundantes System übernimmt dann die Funktion eines möglicherweise beschädigten Systems. Dies gilt insbesondere für die Abdichtung im Dachbereich und für den Notfallschutz in Nassbereichen und Nasszellen. Ein Wartungskonzept ist unerlässlich.

Außenwandkonstruktion

Die Außenwandkonstruktion ist entscheidend für die Tragfähigkeit der Lehmmauerwerkskonstruktion. Um die Anreicherung von Feuchtigkeit im Mauerwerk zu verhindern und die Tragfähigkeit zu verringern, muss die Wandkonstruktion mit einer diffusionsoffenen Außenwanddämmung ausgeführt werden. Es können mindestens zwei Fassadentypen verwendet werden: das Wärmedämmverbundsystem (WDVS) und die Vorhangfassade (VH-F). Beide Fassadentypen werden aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt, insbesondere die Dämmung und die Fassadenunterkonstruktion. Beide Fassadentypen können von der Decke an der Decke befestigt werden, so dass eine Befestigung am Lehmmauerwerk nicht erforderlich ist. Die klebefreie Befestigung ermöglicht es auch, das Mauerwerk mit größtmöglicher Effizienz zu recyceln.

Typisch für den Deckenanschluss ist, dass das Mauerwerk mit einer ersten Schicht aus wasserfesten Steinen beginnt, die mindestens 5 cm über dem fertigen Boden endet. In Nasszellen und Nassbereichen ist die Rohdecke einschließlich der ersten Schicht aus wasserfesten Steinen vollständig abgedichtet. Die Zwischenabdichtung, die Horizontalsperren, verhindern das Eindringen von aufsteigendem Wasser in das Lehm-mauerwerk, insbesondere während der Bauphase. Die letzte Lage Steine auf dem Lehm-mauerwerk besteht ebenfalls aus wasserfestem Material, die beim Aufbringen einer Betondecke zusammen mit einer Abdichtung das tragende Mauerwerk vor Wasser schützen.

Um Kantenpressungen und damit mögliche lokale Beschädigungen der Lehm-bauweise zu vermeiden, werden Zentrierstreifen aus einem weichelastischen Material eingesetzt.



01 Unterkonstruktion Fassadenaufbau Doppelstegträger aus Holzwerkstoff von Decke zu Decke befestigt, 02 Vorhangfas-sade, 03 Wärmedämmverbundsystem, 04 tragendes Lehm-mauerwerk, 05 Schlussstein wasserfest, 06 Zentrierstreifen, 07 Horizontalsperre, 08 erste Lage wasserfester Stein, 09 Flächenabdichtung nur in Nasszellen notwendig – sonstige Wohn-räume werden ohne Flächenabdichtung hergestellt

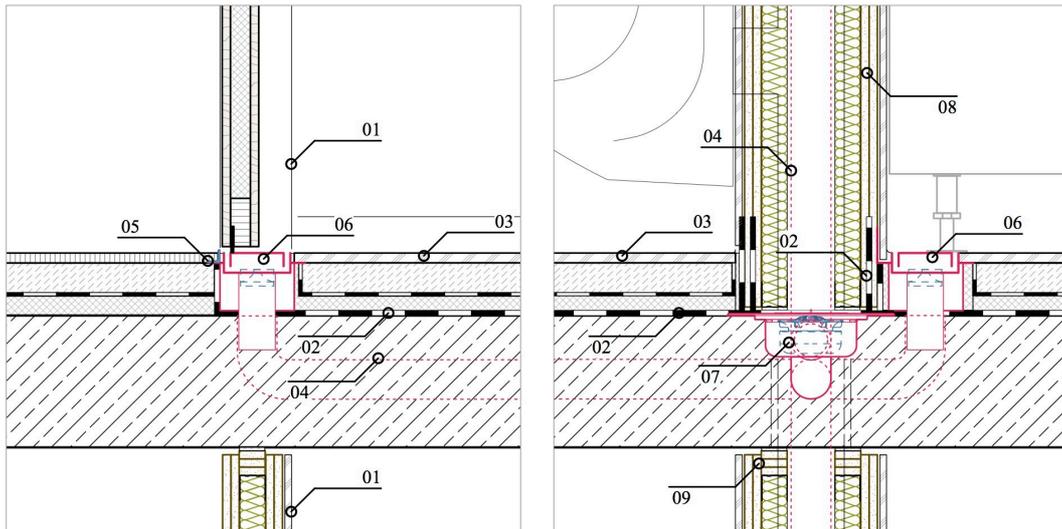
Abb. 4 wall construction CW-F

Abb. 5 wall construction ETICS

Konstruktive Notfallschutzmaßnahmen am Beispiel des Badezimmers

In Nasszellen und Nassbereichen leitet die Notdrainage im Schadensfall überschüs-siges Wasser kontrolliert ab. Das Lehm-mauerwerk wird so effektiv vor eventuellen Wasserschäden geschützt. Die sekundären Ablaufsysteme werden beispielsweise effektiv in die Türschwelle eingebaut.

Alle wasserführenden primären Rohrleitungen sind in einem separaten Schacht ver-legt, der aus einem wasserabweisenden Material besteht und zudem über ein inter-nes sekundäres Notablaufsystem verfügt. Darüber hinaus werden wasserführende Rohre durch Druckschaltersysteme und Durchflussbegrenzer überwacht.



01 nichttragende Innenwand (Lehmmauerwerk möglich, sofern kein Schacht integriert), 02 Flächenabdichtung, 03 Fußbodenaufbau, Estrich auf Trennlage und wasserfeste Trittschalldämmung, 04 redundantes Notentwässerungssystem, 05 Anlaufwinkel, 06 Einbau Entwässerungsrinne (DN50) mit Manschette, mit Geruchs- und Ungezieferschutz, 07 Entwässerungseinbautopf DN50 mit Silikonlippendichtung Geruchs- und Ungezieferschutz, 08 Schachtwand feuerbeständig - Trockenbausystemwand für Sanitär, 09 gleitender Deckenanschluss

Abb. 6 Bad Notentwässerung Türschwelle

Abb. 7 Wasserführende Schachtwand

Fazit

Selbst bei einer maximalen feuchtigkeitsbedingten Festigkeitsabnahme von 20% besteht für den Tragfähigkeitszustand der Tragfähigkeit noch eine Druckfestigkeit von $1,50 \text{ N/mm}^2$. Mit der Feuerwiderstandsfähigkeit von mehr als 60 Minuten, dass es möglich ist, mehrstöckige freistehende Wohnhäuser zu bauen. Dies zeigt, dass die Leistungsfähigkeit des modernen Lehmmauerwerks höher ist als derzeit angenommen, sofern die bei den Arbeiten entwickelten baulichen und technischen Sicherheitsprinzipien für modernes Lehmmauerwerk eingehalten werden.

Selbst bei einer maximalen feuchtigkeitsbedingten Festigkeitsabnahme von 20% besteht für den Tragfähigkeitszustand der Tragfähigkeit noch eine Druckfestigkeit von $1,50 \text{ N/mm}^2$. Mit der Feuerwiderstandsfähigkeit von mehr als 60 Minuten, dass es möglich ist, mehrstöckige freistehende Wohnhäuser zu bauen. Dies zeigt, dass die Leistungsfähigkeit des modernen Lehmmauerwerks höher ist als derzeit angenommen, sofern die bei den Arbeiten entwickelten baulichen und technischen Sicherheitsprinzipien für modernes Lehmmauerwerk eingehalten werden.

Für die Materialprüfungen wurden ungebrannte Rohlinge verwendet, die Zwischenprodukte aus der Ziegelindustrie sind und vom Hersteller aufgrund der geringen Chargengröße nicht weiterverarbeitet werden konnten. Diese zeigten noch verschiedene Schwächen in den Tests, z.B. nennenswerte Schwindrisse. Der Hersteller der Ziegel erklärt jedoch, dass er in der Lage ist, diese Mängel zu beseitigen und Lehmplansteine herzustellen. Die Ergebnisse der Forschung trotz der Mängel der verwendeten Steine deuten darauf hin, dass die Leistung a) konstanter in Bezug auf die Festigkeit der einzelnen Steine und b) höher in Bezug auf die Druckfestigkeit der fertigen Wände sein wird.

Eckdaten

Kurztitel: EGsL – Entwurfsgrundsätze Lehmmauerwerk

Forscher / Projektleitung:

TU Dresden, Professur Tragwerksplanung,
Prof. Dr.-Ing. Wolfram Jäger (Project Management)
Dipl.-Ing. Raik Hartmann

Projektpartner:

Jäger und Bothe Ingenieure GmbH
Haydnstr. 3
09119 Chemnitz

Jäger Ingenieure GmbH
Wichernstraße 12
01445 Radebeul

STERN ZÜRN ARCHITEKTEN
Holbeinstraße 16
CH-4051 Basel

Technische Universität Dresden
Fakultät Architektur
Lehrstuhl Wohnbauten
o. Prof. Carsten Lorenzen

Gesamtkosten: 129.380,- Euro

Anteil Bundeszuschuss: 129.380,- Euro

Projektlaufzeit: 24 Monate