

Fakultät Architektur und Gestaltung
Hochschule für Technik Stuttgart

**GESCHOSSDECKEN AUS LEHM –
STAMPFLEHMBÖGEN FÜR GESCHOSSDECKEN**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt
gefördert unter dem AZ 39560/01 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Prof. Dipl.-Ing. Martin Stumpf

September 2025

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
Bilder und Tabellen	2
Zusammenfassung	3
Kooperationspartner	3
Einleitung	4
Förderung durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt	5
Herstellung, Versatz und Montage der Bögen im Projekt KalZ	5
Optimierung der Herstellung in diesem Projekt GeLe	8
Konzeption der Bauteilversuche	14
Fazit der Bauteilversuche	17
Fazit	17
Literaturverzeichnis	18
Autoren	18

Bilder und Tabellen

1 Drehen eines Bogenelements mit dem Kipptisch im Projekt KalZ © wh-p Ingenieure	6
2 Transport des Bogens im Projekt KalZ © wh-p Ingenieure	7
3 Fertiges Mock-Up im Projekt KalZ © Arne Hartenburg	8
Abbildung 4 weiter entwickelte Schalung © LehmTonErde	9
5 Verdichtung mit schienengeführten Vibrations-Stampfer © LehmTonErde	10
6 Greifarm für den Drehvorgang © LehmTonErde	11
Abbildung 7 Drehvorgang des feuchten Bogens (ohne Zugstangen)	12
Abbildung 8 Erster gedrehter und noch feuchter Bogen	13
9 Zwischengelagerte Bögen für die Bauteilversuche	14
10 3D Modell des Versuchsaufbaus © Kooperationspartner	15
Abbildung 11 fertig gestellter Versuchstand	15
12 Versuchskonzept	16
13 halbseitige Last, vorzeitige Versagensankündigung	16

Zusammenfassung

Mit dem vorliegenden Forschungsprojekt konnte gezeigt werden, dass Bögen aus gestampftem Lehm seriell hergestellt werden können und mit Bauteilversuchen konnte die Tragfähigkeit der Bögen verifiziert werden. Die Lehmbögen werden als primär tragendes Bauteil als Geschossdecken eingebaut. Die grundsätzliche Machbarkeit wurde im vorangegangenen Projekt KalZ (gefördert durch die DBU) bereits erfolgreich gezeigt. Um sie nun in konkreten Bauvorhaben umsetzen zu können, muss die Produktion von Hand durch eine robotische Serienfertigung ersetzt werden. Die handwerkliche Herstellung der Bögen führt zu Baukosten, die nicht wirtschaftlich darstellbar sind. Eine serielle, robotische Fertigung ist zwingend erforderlich, um die Bögen wirtschaftlich attraktiv zu machen. Aktuell sind Stahlbetonflachdecken immer noch deutlich wirtschaftlicher als die von Hand gestampfte Decke aus Lehmbögen. In Bezug auf die CO₂ Bilanz ist die Decke aus Lehm offensichtlich deutlich überlegen, da sie aus einem reinen Naturprodukt basiert, welches auch naturbelassen bleibt und im Falle eines Rückbaus lediglich als „Erde“ zu bezeichnen ist. Mit dem vorliegenden Forschungsvorhaben konnten die Herstellkosten der Bögen erheblich optimiert werden – ebenso die Herstellzeit.

Neben der Optimierung der Produktion wurde auch die Tragfähigkeit der Bögen durch Bauteilversuche verifiziert. Im Nachgang zu den Versuchen werden aktuell die FE-Berechnungen mit den Versuchsergebnissen kalibriert. So können später auch andere Bogengeometrien statisch bemessen werden – validiert durch die Versuche.

Ein konkretes Projekt mit einer Bauherrschaft, die interessiert ist, die Bögen aus Lehm zu bauen gibt es bereits: das Besucherzentrum für das Schloss Charlottenburg.

Kooperationspartner

wh-p Ingenieure

Prof. Martin Stumpf

Düsseldorfer Str. 38

DE-10707 Berlin

Bez + Kock Architekten Generalplaner GmbH

Dipl.-Ing. Arch. Martin Bez

Königstr. 84

DE-70173 Stuttgart

Lehm Ton Erde Baukunst GmbH

Martin Rauch

Quadernstr. 7

AT-6824 Schlins

Einleitung

Aktuell werden Geschossdecken im Wohn- und Büro Neubau im Wesentlichen aus Stahlbeton als Flachdecke gebaut. Je nach Gebäudehöhe wird ca. 40%-50% des Betons in den Geschossdecken eingebaut, der Rest wird für die Aussteifung und die Gründung benötigt. Das CO₂ Äquivalent von Flachdecken beträgt ca. 120kgCO₂e je Quadratmeter Deckenfläche. Mit Holz-Beton-Hybrid-Decken kann der Wert halbiert werden auf ca. 65kgCO₂e/m². Reine Holz-Decken sind dann je nach Ansatz der Wiederverwertung noch besser, können aber die Anforderungen an die Bauphysik (Akustik und Brand) nicht ohne weitere Maßnahmen wie Schüttungen (als Ballast) und Brandschutzverkleidungen in der Fläche erfüllen. Mit der diesem Forschungsprojekt zu Grunde liegenden Deckenkonstruktion kann ein CO₂ Äquivalent von 35kgCO₂e/m² erreicht werden und gleichzeitig werden die Anforderungen an die Akustik zwischen den Geschossen und den Brandschutz erfüllt. Die CO₂ Bilanz könnte noch weiter verbessert werden, wenn die geplante Auflagerkonstruktion aus Stahl zu 100% aus wiederverwertetem Rohstoff mit regenerativer Energie hergestellt wird. Abgesehen von der bilanziellen Bewertung der Unterkonstruktion, ist der Lehm als flächiges Bauteil mit seiner Ökobilanz nicht zu überbieten.

Die Idee der Konstruktion wurde im Projekt mit dem Akronym KaLZ, AZ: 37794/01, „Kappendecke 2.0 – Lehm statt Ziegel“, gefördert durch die DBU hinsichtlich der grundsätzlichen Machbarkeit erforscht. Die Ergebnisse sind erfreulicherweise sehr gut und es hat sich nicht nur -wie erwartet- eine hohe Tragfähigkeit gezeigt, sondern vor allem eine hohe Robustheit.

Basis der Idee ist die Verwendung von naturbelassenem Lehm als dominierenden Baustoff für die tragende Struktur der Geschossdecke. Lehm kann Druckkräfte in geringem Maße (charakteristisch bis zu 4,5N/mm² übernehmen, Zugkräfte hingegen nicht. Es liegt also nahe gestampften Lehm als Bogen auszubilden, da im richtig konzipierten Bogen nur Druckkräfte auftreten, sofern alle Stützlinien im Querschnitt bleiben.

In Historie finden sich viele Geschossdecken aus Bogentragwerken, aus Ziegeln, Beton, Stahl und Ton, wie z.B. bei der preußischen Kappendecke. Das Tragverhalten der Kappendecke mit Bögen aus gestampftem Lehm, liniengelagert auf Holz- oder Stahlbalken wird im o.g. Projekt KaLZ detailliert beschrieben und an dieser Stelle nicht wiederholt.

Das vorliegende Projekt baut auf dem Projekt KaLZ direkt auf:

Das Projekt KaLZ hat die grundsätzliche Machbarkeit der tragenden Lehmbögen nachgewiesen. Insbesondere der grundsätzliche Herstellungsprozess konnte erforscht werden, wenn auch auf sehr handwerklichem Niveau. Die hohe Traglast und die Robustheit konnten ebenfalls mit einfachen, handwerklichen Mitteln gezeigt werden.

Beim Neubau des Besucherzentrums Schloss Charlottenburg sollen diese tragenden Decken aus gestampften Lehmbögen gebaut werden. Die Planung des Projekts befindet sich in der LP3, die Ausführung der Lehmbögen ist voraussichtlich 2026/2027 vorgesehen.

Um die Bögen realisieren zu können, muss u.a. eine serielle, maschinelle Fertigung möglich werden.

Das Stampfen und Drehen der 280 Bögen in Charlottenburg ist wirtschaftlich nicht in Handarbeit darstellbar.

Die Herstellkosten und Produktionsdauer konnte gemeinsam mit Architektur, Tragwerk und Lehmbauspezialisten im Rahmen dieses Projekts optimiert werden.

Förderung durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Die Idee der tragenden Lehmbögen wurde als Projektskizze bei der DBU eingereicht und mit einer Laufzeit von 18 Monaten gefördert. Gemeinsam mit den Tragwerksplanern von wh-p Ingenieure und der Hochschule für Technik in Stuttgart, wurde die Idee weiterentwickelt. Das Mock-Up wurde bei ERNE Holzbau in der Schweiz gebaut. Ein Bemessungstool auf Basis der Stützlinientheorie wurde entwickelt, verschiedene Herstellungs-verfahren der Bögen ausprobiert und optimiert, ein Belastungsversuch durchgeführt und zum Abschluss des Projekts wurde ein 1:1 Mock-Up mit zwei benachbarten Bogenfeldern gebaut.

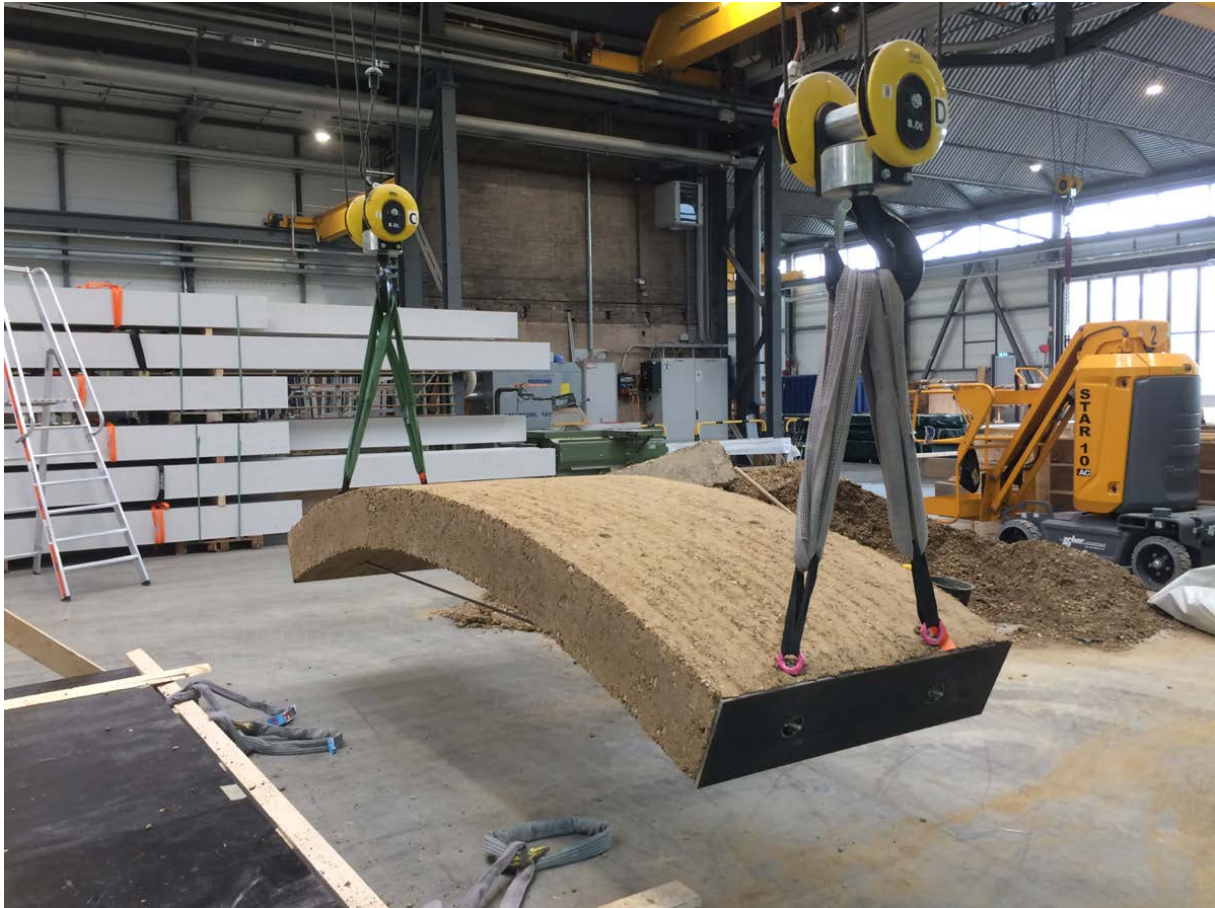
Mit dem vorliegenden Projekt GeLe konnte durch die Förderung durch die DBU die Fertigung optimiert werden, sowie die Tragfähigkeit der Bögen versuchsgestützt verifiziert werden.

Herstellung, Versatz und Montage der Bögen im Projekt KaLZ

Im vorangegangenen Projekt (KaLZ) wurden die Bögen unmittelbar auf einem Kipptisch von Hand gestampft und dann mittels eines Krans in der Werkhalle über die Kante gedreht. Die Bögen waren an den Auflagern mit Stahlblechen seitlich gehalten und über zwei Zugstangen verbunden. Im gedrehten Zustand hat das Eigengewicht Zugkräfte in den Zugstangen erzeugt und das gesamte Element war „Transport“-fähig.

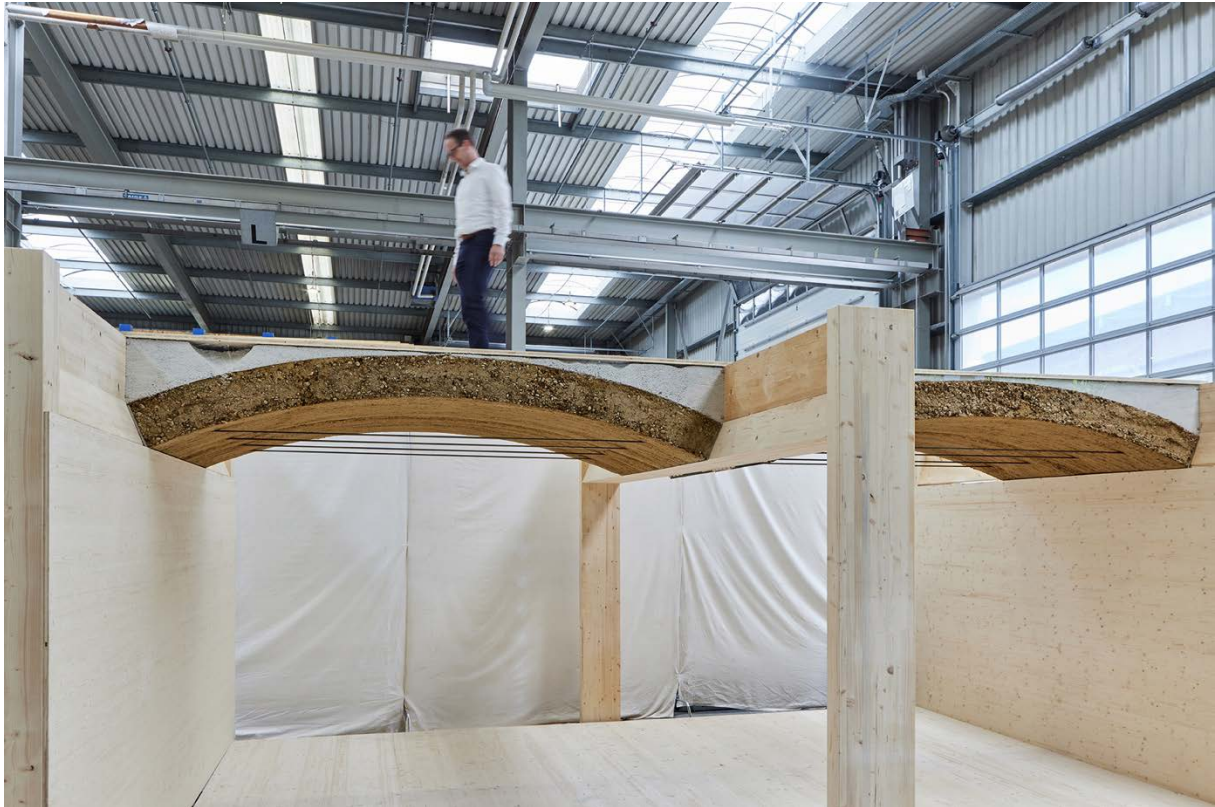


1 Drehen eines Bogenelements mit dem Kipptisch im Projekt KalZ © wh-p Ingenieure



2 Transport des Bogens im Projekt KalZ © wh-p Ingenieure

Der Kurzschluss der Kräfte aus dem Bogenschub im Transportzustand hat einerseits die Stabilität bzw. Robustheit des Elements erheblich verbessert, andererseits die Produktionsdauer- und Kosten erhöht. Die Bögen mussten ca. 6 Wochen trocknen und das im stehenden Zustand auf dem Kipptisch. In einer Serienproduktion hätten alle Bögen, die gleichzeitig produziert werden sollten jeweils einen Kipptisch benötigt oder zumindest eine Schalung. Hinzu kommen die Kosten für die Stahlstangen und seitlichen Bleche.



3 Fertiges Mock-Up im Projekt KalZ © Arne Hartenburg

Im Mock-Up sind die Zugstangen deutlich sichtbar. Sowohl die Zugstangen, als auch Stahleinbauteile verbleiben im eingebauten Zustand.

Die Idee in diesem Projekt (GeLe) war nun, eine Systemschalung herzustellen (in der Theorie mit unterschiedlichen Bogen-Durchmessern und -Längen) und den Bogen unmittelbar nach dem Stampfen im feuchten und damit kaum tragfähigen Zustand zu drehen und direkt einzubauen. Der Trocknungsvorgang soll im eingebauten Endzustand erfolgen. Die Verkürzung des Bogens infolge Trocknung (Schwinden) kann der Bogen problemlos aufnehmen. Der Stich nimmt um ca. 3cm ab. Da diese Abnahme bei der Bemessung bereits berücksichtigt wurde, ist die Tragfähigkeit nicht eingeschränkt.

Optimierung der Herstellung in diesem Projekt GeLe

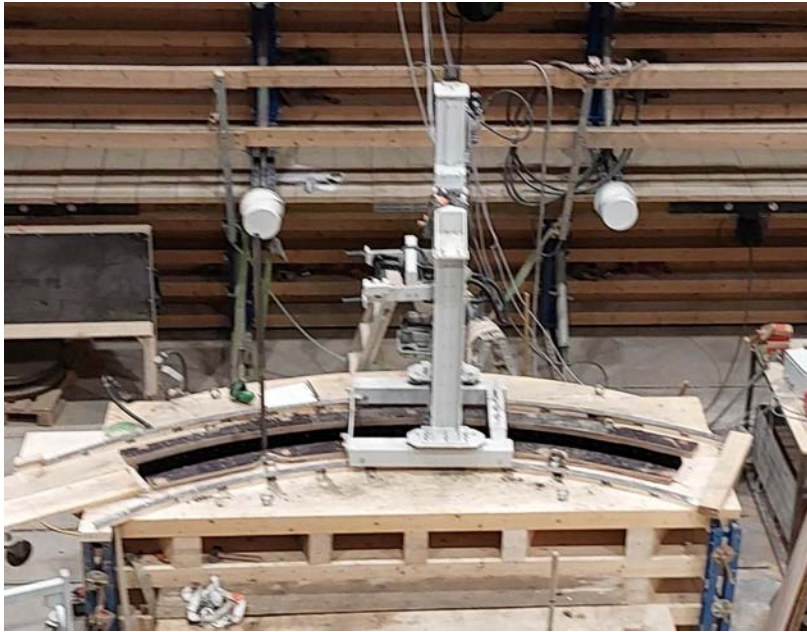
Zunächst wurde eine Schalung hergestellt. Die Erfahrungen aus dem Projekt KalZ waren hilfreich und konnten insbesondere bei der Auslegung der „Steifigkeit“ der Schalung in die Planung einfließen.



Abbildung 4 weiter entwickelte Schalung © LehmTonErde

Die weiter entwickelte Schalung wurde mit seitlichen Verstärkungen ausgestattet. So wurde sichergestellt, dass die Schalung auch während des Stampfens formtreu blieb und nicht infolge Verdichtungsdruck zur Seite auswich.

Im nächsten Schritt wurde ein Vibrationsstampfer in einem Rahmen montiert und seitlich über die Bogenform geführt.



5 Verdichtung mit schienengeführtem Vibrations-Stampfer © LehmTonErde

Der Bogen wird also wie beim Kalz wieder auf der Seite stehend hergestellt. Wie eine im Grundriss gekrümmte Wand.

Unmittelbar nach dem Stampfen wurden die Bögen gedreht.

Eigens für diesen Drehvorgang wurde ein „Greifer“ entwickelt, der den Bogen mit leichtem seitlichem Druck festhält und dann dreht. Der Greifarm wurde aus Stahl gefertigt.



6 Greifarm für den Drehvorgang © LehmTonErde

Nachdem die Vorspannkraft der seitlichen Halterung optimal eingestellt war, konnten die Bögen gedreht werden.



Abbildung 7 Drehvorgang des feuchten Bogens (ohne Zugstangen)



Abbildung 8 Erster gedrehter und noch feuchter Bogen

Nachdem sowohl die Schalung, als auch die Herstellung und vor allem der Drehvorgang im feuchten Zustand erfolgreich optimiert und getestet wurde, konnte die „Serienproduktion“ der Bögen für die Bauteilversuche anlaufen.

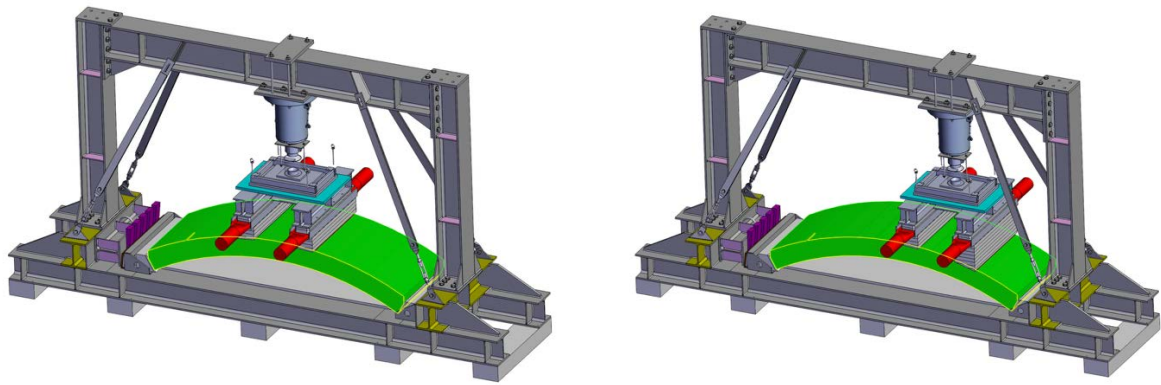


9 Zwischengelagerte Bögen für die Bauteilversuche

Für die Bauteilversuche müssen die Bögen ihren trockenen Endzustand erreichen. Später in konkreten Projekten erfolgt die Austrocknung direkt im Objekt. Dieser Trocknungsvorgang muss im Terminplan berücksichtigt werden, allerdings sind keine Lagerflächen mehr notwendig, da die Bögen direkt nach Montag in einer Feldfabrik eingebaut werden können. Im Projekt GeLe wurden die Bögen Anfang 2025 hergestellt. In der Zwischenzeit wurden die Bauteilversuche intensiv geplant, der Versuchsaufbau konzipiert und der Versuchsaufbau schließlich gebaut. Die Belastungsversuche wurden im März/April 2025 durchgeführt.

Konzeption und Durchführung der Bauteilversuche

Entsprechend dem Bemessungskonzept aus dem vorangegangenen Projekt KalZ müssen sowohl symmetrische als auch antimetrische oder halbseitige Laststellungen im Versuch nachgewiesen werden. Hohe lokale Einzellasten können von Bogentragwerken nur schlecht oder in geringem Umfang getragen werden. Ebenso sind halbseitige Lasten für Bogentragwerke ungünstig. Der Versuchsaufbau wurde so konzipiert, dass alle Lastszenarien mit nur einer Presse möglich waren. Die „Einzellast“ der Presse wurde entsprechend „flächig“ auf den Bogen aufgebracht. In der Abbildung ist die symmetrische und die antimetrische Belastungssituation dargestellt.



10 3D Modell des Versuchsaufbaus © Kooperationspartner

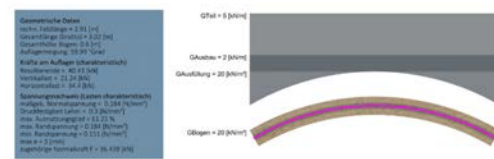


Abbildung 11 fertig gestellter Versuchstand

Im Versuchskonzept wurde seitens der Ingenieure die Anzahl der Versuche, die Lastszenarien und die erwartete Bruchlast vorgegeben. Dieses Dokument ist die Basis für die Versuche.

5 Symmetrische Prüfung

5.1 Theoretische Bemessungssituation



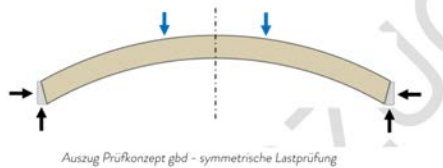
5.2 Vorgabe Prüfkonzept

6.1 Traglast

6.1.1 Symmetrische Belastung bis zum Versagen

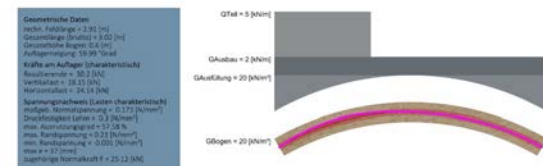
- 4-Punkt-Biegeversuche in Abhängigkeit des Wassergehaltes
- 4-Punkt-Biegeversuche nach Erreichen der Ausgleichsfeuchte
- 4-Punkt-Biegeversuche nach 1 Jahr Trocknung

2 Stk.
4 Stk.
2 Stk.



6 Asymmetrische Prüfung

6.1 Theoretische Bemessungssituation

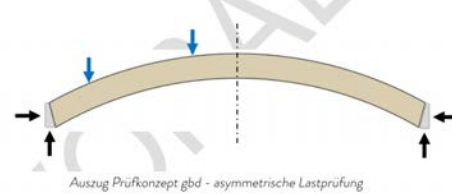


6.2 Vorgabe Prüfkonzept

6.2.1 Asymmetrische Belastung bis zum Versagen

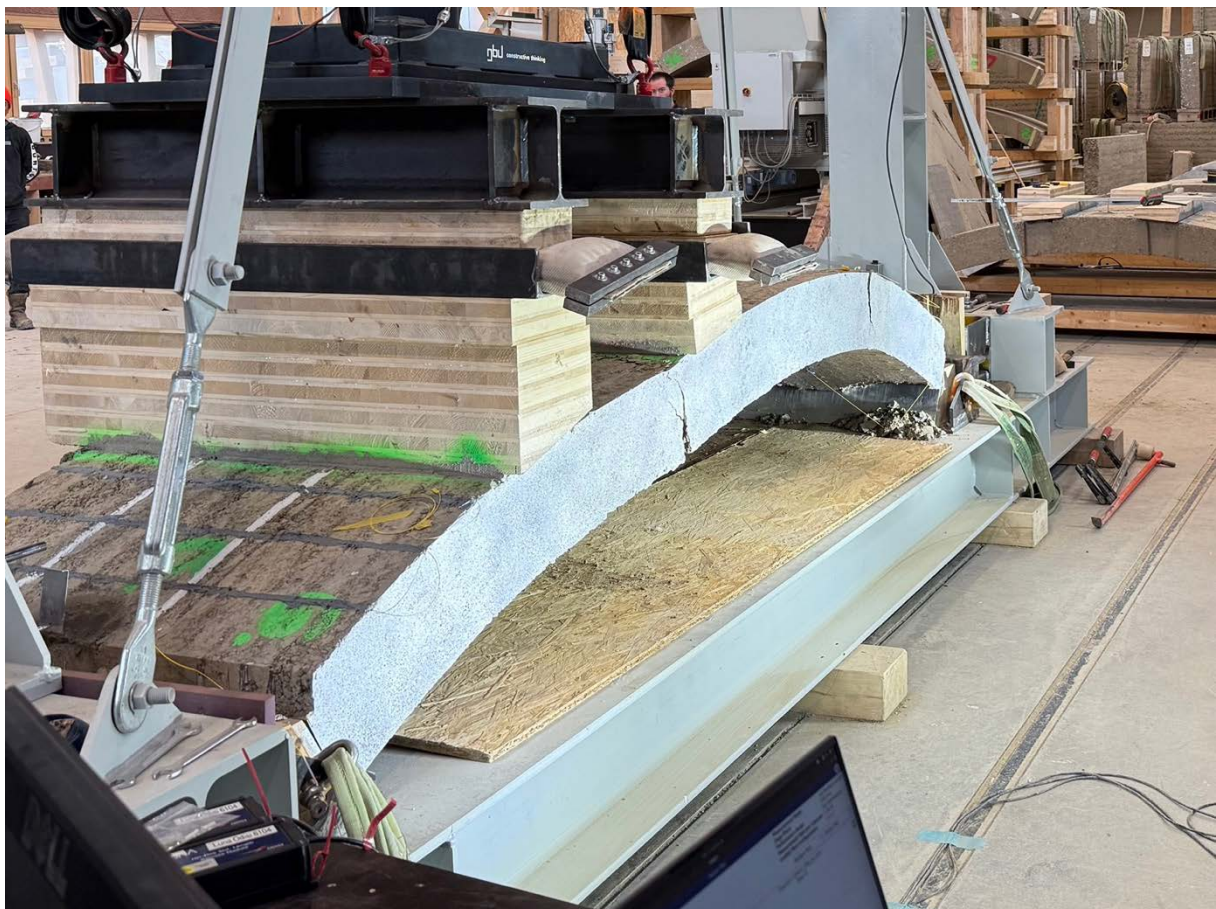
- 4-Punkt-Biegeversuche nach Erreichen der Ausgleichsfeuchte
- 4-Punkt-Biegeversuche nach 1 Jahr Trocknung

4 Stk.
2 Stk.



12 Versuchskonzept

Insgesamt wurden 11 Belastungsversuche durchgeführt, davon sechs symmetrische und fünf mit halbseitiger Last.

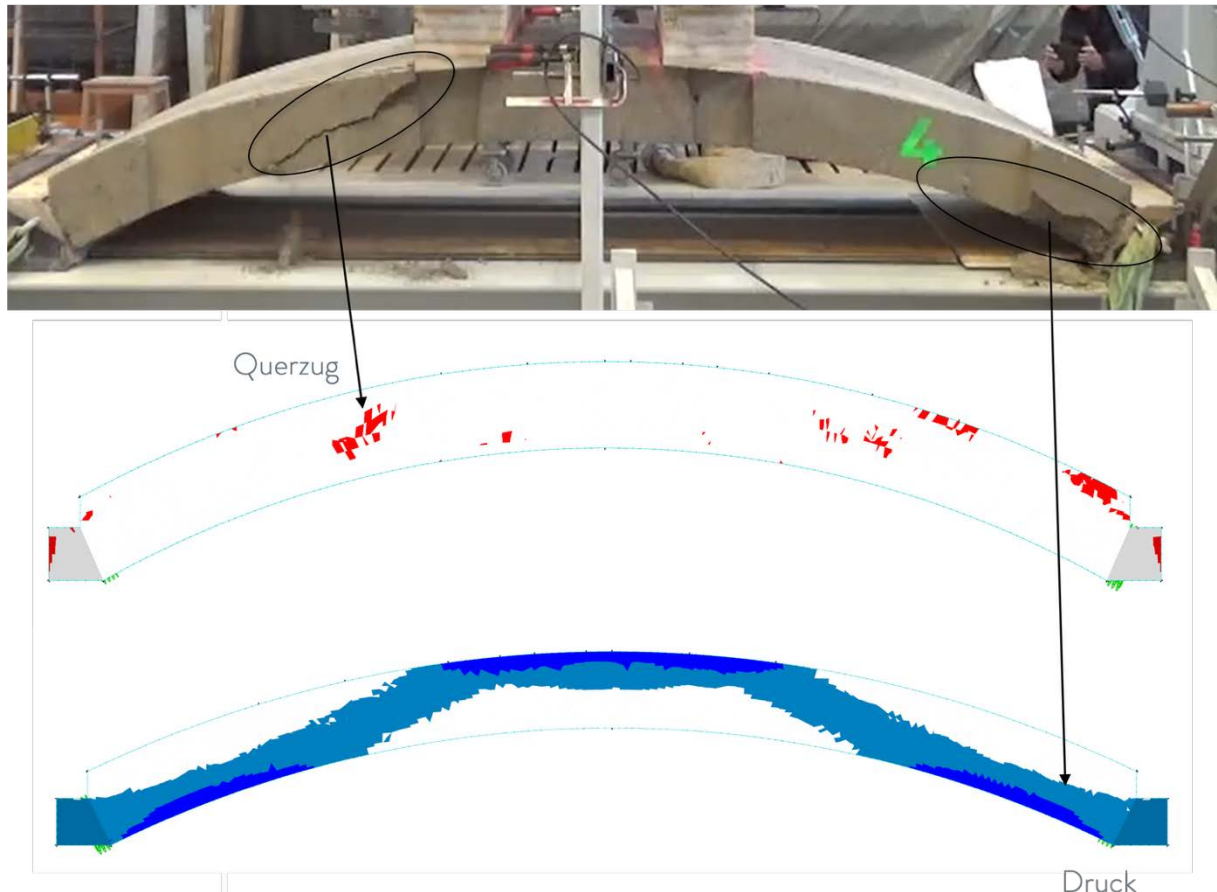


13 halbseitige Last, vorzeitige Versagensankündigung

Fazit der Bauteilversuche

Die Bruchlast lag bei den halbseitigen Belastungen bei max. 11t, bei der symmetrischen oder zentrischen Belastung bei max. 16t. Bezogen auf die Grundfläche von 3.10m x 1m haben die Bögen also bis zu ca. 5t je m² zusätzlich zum Eigengewicht getragen.

Auf Basis der Versuchsergebnisse erfolgt aktuell noch im Ingenieurbüro wh-p Ingenieure das Nachrechnen der Versuche und die Optimierung des FE-Modells



Ziel ist es, mit Hilfe der Versuchsergebnisse den aktuell im Lehm-bau oft verwendeten globalen Sicherheitsfaktor 7 zu reduzieren. Die Normung gibt dazu Möglichkeiten vor.

Auf dieser Basis soll ein Sicherheits- und Nachweiskonzept entwickelt werden für zukünftige Bögen.

Fazit und Ausblick

Im Rahmen des Projekts GeLe (gefördert durch die DBU) konnte der Produktionsprozess für tragende Bögen aus Stampflehm bezüglich der Kosten und der Herstelldauer erheblich optimiert werden.

Die Bauteilversuche haben sehr gute Ergebnisse, also eine sehr hohe Tragfähigkeit der Lehmbögen für halbseitige und zentrische Lasten gezeigt.

Die Versuchsergebnisse dienen dazu, die FE Berechnung zu kalibrieren. Mit dem FE-Modell werden die Versuche aktuell nachgerechnet und dabei alle Effekte (Rissbildung, Abplatzen von Lehm am Auflager) mit nachgebildet. Das kalibrierte Rechenmodell ist dann Basis für andere Lehmboegen-Formen.

Mit den beiden DBU-Projekten KalZ und GeLe konnte die Realisierbarkeit von tragenden Geschossdecken aus Lehmbögen weitestgehend gezeigt und auch bereits optimiert werden.

Als Ausblick fehlt für eine Realisierung in der Praxis nach Auffassung der Verfasser noch ein Brandversuch. Im Brandversuch muss gezeigt werden, dass die Geschossdecken aus Stampflehmbögen auch im Brandfall tragfähig sind und dass die Rauchdichtigkeit gewährleistet ist.

Literaturverzeichnis

-

Autoren

Stumpf, Martin, geb. 1973; 1994–2000 Studium konstruktiver Ingenieurbau Universität Dortmund; Geschäftsführender Gesellschafter bei wh-p Ingenieure Basel, Stuttgart, Berlin; seit 2020 Professor für Tragwerksentwurf an der Hochschule für Technik Stuttgart, Fakultät Architektur und Gestaltung

Ginter, Andreas, geb. 1987; 2008-2013 Studium Bauingenieurwesen HTWG Konstanz; Teamleiter bei wh-p Ingenieure Berlin