

Lehmbau 2.0: Lehmbau der Zukunft – Handwerkskunst nach ingenieurwissenschaftlichen Ansätzen

Berichte aus Energie- und Umweltforschung 13/2026

Wien, 2026

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:

Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur,
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination: Abteilung III/3 - Energie und Umwelttechnologien

Leitung: DI (FH) Isabella Warisch

Kontakt zur Mission „Klimaneutrale Stadt“: DIⁱⁿ (FH) Katrin Bolovich

Kontakt zu „Technologien und Innovationen für die klimaneutrale Stadt“: DIⁱⁿ (FH) Isabella Warisch

Autorinnen und Autoren:

Dipl.-Ing. Bc. Ing. Iveta Wayd, Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Andreas Trummer, Dipl.-Ing. Ingo Candussi BSc. (Institut für Tragwerksentwurf, Technische Universität Graz)

Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr.techn. Bernhard Freytag, Dipl.-Ing. Dr.techn. Christoph Derler BSc. (Labor für Konstruktiven Ingenieurbau, Technische Universität Graz)

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Werner Lienhart, Dipl.-Ing. Andrea Agreiter BSc. (Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, Technische Universität Graz)

Graz, 2026. Stand: Jänner 2026

Ein Projektbericht gefördert im Rahmen von



Rückmeldungen:

Ihre Überlegungen zu vorliegender Publikation übermitteln Sie bitte an iii3@bmimi.gv.at.

Rechtlicher Hinweis

Dieser Ergebnisbericht wurde von die/der Projektnehmer:in erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit, Aktualität sowie die barrierefreie Gestaltung der Inhalte übernimmt das Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI) keine Haftung.

Mit der Übermittlung der Projektbeschreibung bestätigt die/der Projektnehmer:in ausdrücklich, über sämtliche für die Nutzung erforderlichen Rechte – insbesondere Urheberrechte, Leistungsschutzrechte sowie etwaige Persönlichkeitsrechte abgebildeter Personen – am bereitgestellten Bildmaterial zu verfügen.

Die/der Projektnehmer:in räumt dem BMIMI ein unentgeltliches, nicht ausschließliches, zeitlich und örtlich unbeschränktes sowie unwiderrufliches Nutzungsrecht ein, das übermittelte Bildmaterial in allen derzeit bekannten sowie künftig bekannt werdenden Nutzungsarten für Zwecke der Berichterstattung, Dokumentation und Öffentlichkeitsarbeit im Zusammenhang mit der geförderten Maßnahme zu verwenden, insbesondere zur Veröffentlichung in Printmedien, digitalen Medien, Präsentationen und sozialen Netzwerken.

Für den Fall, dass Dritte Ansprüche wegen einer Verletzung von Rechten am übermittelten Bildmaterial gegen das BMIMI geltend machen, verpflichtet sich die/der Projektnehmer:in, das BMIMI vollständig schad- und klaglos zu halten. Dies umfasst insbesondere auch die Kosten einer angemessenen rechtlichen Vertretung sowie etwaige gerichtliche und außergerichtliche Aufwendungen.

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem FTI-Schwerpunkt „Klimaneutrale Stadt“ des Bundesministeriums für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI) und Klima- und Energiefonds (KLIEN). Im Rahmen dieses Schwerpunkts werden Forschung, Entwicklung und Demonstration von Technologien und Innovationen gefördert, mit dem Ziel, einen essentiellen Beitrag zur Erreichung der Klimaneutralität in Gebäuden, Quartieren und Städten zu liefern. Gleichzeitig wird dazu beigetragen, die Lebens- und Aufenthaltsqualität sowie die wirtschaftliche Standortattraktivität in Österreich zu erhöhen. Hierfür sind die Forschungsprojekte angehalten, einen gesamtheitlichen Ansatz zu verfolgen und im Sinne einer integrierten Planung – wie auch der Berücksichtigung aller relevanten Bereiche wie Energieerzeugung, -speicherung und -verteilung, Berücksichtigung von gebauter Infrastruktur, Mobilität und Digitalisierung – angewandte und bedarfsorientierte Fragestellungen zu adressieren.

Um die Wirkung des FTI-Schwerpunkts „Klimaneutrale Stadt“ zu erhöhen, ist die Verfügbarkeit und Verbreitung von Projektergebnissen ein elementarer Baustein. Durch Begleitmaßnahmen zu den Projekten – wie Kommunikation und Stakeholdermanagement – wird es ermöglicht, dass Projektergebnisse skaliert, multipliziert und „Von der Forschung in die Umsetzung“ begleitet werden. Daher werden alle Projekte nach dem Open Access Prinzip in der Schriftenreihe des BMIMI über die Plattform [nachhaltigwirtschaften.at](https://www.nachhaltigwirtschaften.at) frei zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und Anwender:innen eine interessante Lektüre.

Inhalt

Vorbemerkung	4
1 Kurzfassung	7
2 Abstract	10
3 Projektinhalt	13
3.1 Vorgangsweise und Methoden	13
3.2 Lehm als Baustoff	13
3.3 Stampflehmabauweise	14
3.4 Verteilte faseroptische Sensorik (DFOS)	15
3.5 Applikation der DFOS auf Stampflehmprüfkörpern	15
3.5.1 Vorgangsweise	15
3.5.2 Tests zum Verbundverhalten	16
3.6 Erkenntnisse zu mechanischen Eigenschaften von Stampflehm	18
3.6.1 Herstellung Prüfkörper	18
3.6.2 Materialkennwerte: Druckfestigkeit, E-Modul und Trocknungsschwindmaß	19
3.7 Anwendungen im Bauteilmaßstab – Stampflehm Kappendecke	20
3.7.1 Herstellung, Lagerung, Belastungskonzept	20
3.7.2 Messaufbau und Messeinrichtung	20
3.8 Vergleichsrechnung mit numerischem Modell am Beispiel einer Lehmkappendecke	23
4 Ergebnisse	24
4.1 Ergebnisse zur Eignung von DFOS im Stampflehm	24
4.1.1 Auswahl der Sensorkabel	24
4.1.2 Klebstoffe und Verbundverhalten	24
4.1.3 Vergleich der eingestampften und aufgeklebten DFOS mit Kalibrierungsmessungen ...	26
4.2 Erkenntnisse zu mechanischen Eigenschaften von Stampflehm	30
4.2.1 Verdichtungsart	30
4.2.2 Druckfestigkeit	32
4.2.3 E-Modul	33
4.2.4 Trocknungsschwindmaß	34
4.3 Mechanische Versuche an einer Stampflehmkappendecke	35
4.3.1 Ergebnisse der Verformungsmessungen	35
4.3.2 Vergleichsrechnung mit numerischem Modell	40
4.3.3 Langzeitbeobachtung	43
4.4 Beitrag zur klimaneutralen Stadt	45
5 Schlussfolgerungen	46
5.1 Erkenntnisse für das Projektteam	46
5.2 Weiterführende Arbeit	46
5.3 Zielgruppe	47
5.4 Hemmnisse	47
5.5 Verbreitungspotential	48

6 Ausblick und Empfehlungen	49
6.1 Weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeit	49
6.2 Potenzial für Demonstrationsvorhaben.....	49
Tabellenverzeichnis	51
Abbildungsverzeichnis	52
Literaturverzeichnis	54

1 Kurzfassung

Motivation und Forschungsfrage

Die konsequente Senkung der CO₂-Emissionen im Bausektor ist eine der drängenden Herausforderungen unserer Zeit. Lehmbauweisen, wie Stampflehm und Lehmziegel, können aufgrund ihrer vergleichbar geringen Emissionen in der Herstellung einen Beitrag zu dieser Senkung leisten. Eingesetzt als lastabtragende Wandbildner sind sie als Alternative zu mineralischen Baustoffen wie Beton und gebrannten Ziegel auch masserelevant. Speziell Stampflehmbauweisen, also die lagenweise in eine Schalung eingebrachte und mechanisch verdichtete Mischung aus Lehm und Zuschlagstoffen (Kies), erlauben die Herstellung von monolithischen Wandelementen vor Ort oder die Herstellung von großformatigen Fertigteilen. Die Kenntnisse über das mechanische Verhalten, besonders über das mechanische Langzeitverhalten (Schwinden und Kriechen) dieser Bauweise sind lückenhaft und hemmen daher die Integration in gängige Planungsprozesse. Dieses Forschungsprojekt fragt nach der Eignung von faseroptischer Sensorik zur Verformungsmessung von Stampflehmteilen für zukünftige Langzeitbeobachtungen.

Ausgangssituation

Lehm zeichnet sich durch seine einfache Verarbeitung, lokale Verfügbarkeit und die Bereitstellung eines hervorragenden Raumklimas aus. Seine äußerst günstige Energie- und Umweltbilanz (ÖKO-BAUDAT nach EN 15804+A2) macht ihn zu einer vielversprechenden Alternative in der Bauindustrie. Die Nutzung von Lehm als Baumaterial ist nicht nur ökologisch, sondern auch ökonomisch sinnvoll: Lehm kann aus Aushubmaterial gewonnen werden, das nicht deponiert werden muss, wodurch die Kreislaufwirtschaft wesentlich gestärkt wird. Ohne den Einsatz von Zusatzstoffen wie Kalk oder Zement ist Lehm vollständig wiederverwertbar und ermöglicht damit eine nachhaltige, ressourcenschonende Bauweise.

Derzeit wird Lehm im Bauwesen jedoch nur vereinzelt angewendet. Es fehlt an etablierten Bemessungs- und Berechnungsgrundlagen für lastabtragende Lehmbauten. Bestehende Bauwerke beruhen vorwiegend auf empirischen Erfahrungen des Handwerks, weniger auf ingenieurwissenschaftlichen Ansätzen. Das Tragverhalten hängt in hohem Maße von der Feuchteverteilung, Verdichtung und den klimatischen Randbedingungen ab. Die wesentliche Wissenslücke betrifft die Abhängigkeit der Formänderungseigenschaften über die Zeit– insbesondere des Schwind- und Kriechverhaltens des Lehms. Dies erschwert den Einsatz des Baustoffs erheblich.

Inhalte und Zielsetzung

Vor diesem Hintergrund adressiert die Sondierung die zentrale Frage, ob verteilte faseroptische Sensorik (Distributed Fiber Optic Sensing, DFOS) als zerstörungsfreies, kontinuierliches Messverfahren geeignet ist, um das Formänderungsverhalten von Stampflehmwänden unter Feuchtigkeits- und Temperaturschwankungen sowie unter Auflasten über längere Zeiträume zu erfassen und so eine Grundlage für die Langzeitüberwachung realer, lastabtragender Bauteile zu schaffen.

Für eine fundierte ingenieurmäßige Modellbildung fehlen umfassende Datensätze zum Formänderungsverhalten. Faseroptische Messverfahren bieten hierfür ein vielversprechendes Potenzial, ihre Anwendung im Stampflehm ist bisher nicht erprobt.

Methodische Vorgehensweise

Durch verteilte faseroptische Messverfahren kann eine lückenlose Erfassung von Formänderungen mit hoher Auflösung entlang der gesamten Faserlänge realisiert werden. Auf diese Weise lassen sich lokale Veränderungen und kleinste Deformationen im Mikrometerbereich, wie Rissbildungen, frühzeitig erkennen [1]. Aufgrund ihrer geringen Abmessungen und ihres niedrigen Gewichts beeinflussen die Sensorfasern oder -kabel das Trag- und Verformungsverhalten des Prüfkörpers bzw. Bauteils nicht und eignen sich daher ideal für zerstörungsfreie Messanwendungen. Bisher wurden faseroptische Sensoren vor allem in Betonbauteilen [2], auf Stahloberflächen [3] oder im Bereich der Ingenieurgeodäsie [4] angewandt.

Das Projekt umfasst (i) experimentelle Prüfserien an Stampflehmprüfkörpern in unterschiedlichen Größen, Dabei wurden zur Ermittlung von Materialkennwerten (Druckfestigkeit, E-Modul, Biegezugfestigkeit, Trocknungsschwindmass) und zur Verformungsmessung Kleinproben getestet (ii) Zentral wird geprüft, ob sich das Messverfahren mit DFOS für die Erfassung des lastabhängigen Materialverhaltens (Kriechen) eignet und ob es (iii) für In-situ-Messungen an bauteilgroßen, lastabtragenden Stampflehmelementen tauglich ist.

Die faseroptischen Sensorkabel wurden sowohl eingestampft als auch in eine Nut auf die Oberfläche der Prüfkörper aufgebracht. Besonderer Fokus wurde auf den Verbund zwischen Sensorkabel, Kleber und Stampflehm gelegt. Die Messergebnisse wurden mittels konventioneller Referenzmethoden (Setzdehnungsaufnehmer, digitale 3D-Bildkorrelation) überprüft und validiert.

Der theoretische Projektteil integriert die experimentell gewonnenen Kennwerte in ein numerisches Modell mittels Finite-Elemente-Methode (FEM), um das Trag- und Verformungsverhalten von Stampflehmelementen unter statischer Belastung realitätsnah abzubilden.

Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die experimentellen Untersuchungen zeigen, dass das Messverfahren mit faseroptischer Sensorik grundsätzlich für die Erfassung von Formänderungen in Stampflehm geeignet ist. Sowohl eingestampfte als auch aufgeklebte Sensoren lieferten reproduzierbare Messdaten. Die mit DFOS gemessenen Dehnungen korrelierten gut mit den Referenzmessungen. Die experimentellen Ergebnisse zeigten, dass der Klebstoff, der auf Prüfkörperoberfläche aufgeklebten Sensorkabel, entscheidend für die Qualität der Messung ist. Weitere Ergebnisse zeigten jedoch, dass der Verbund zwischen eingestampften Sensorkabeln und Stampflehm bislang nicht ausreichend ist, um eine zuverlässige Dehnungsmessung zu gewährleisten.

Das numerische Modell bildete den Belastungsversuch einer Lehmkappendecke realitätsnah ab und zeigte, dass experimentell bestimmte Materialparameter effektiv in die Modellierung überführt werden können.

Zukünftige Forschung soll die Eignung von faseroptischer Sensorik für großmaßstäbliche Prüfungen und In-situ-Messungen im Stampflehm vertieft untersuchen, um langfristige Einflüsse von Feuchtigkeits- und Temperaturschwankungen (Schwinden) sowie mechanischer Beanspruchungen durch Auflasten (Kriechen) zerstörungsfrei und kontinuierlich zu erfassen.

Die erzielten Ergebnisse sollen als Grundlage für ein Folgeprojekt dienen, das auf die Erarbeitung praxisorientierter Bemessungsvorschriften für lastabtragende Stampflehmwände im Einklang mit dem semiprobabilistischen Sicherheitskonzept gemäß Eurocode abzielt.

2 Abstract

Motivation and research question

The consistent reduction of CO₂ emissions in the construction sector is one of the most pressing challenges of our time. Earthen construction methods such as rammed earth and clay masonry can contribute to this reduction due to their comparatively low emissions during production. When used as load-bearing wall elements, in terms of mass they represent a relevant alternative to conventional mineral construction materials such as concrete and fired clay bricks. Rammed earth structures, characterized by the layer-wise placement and mechanical compaction of a mixture of clay and aggregates (gravel) within formwork, enables the construction of monolithic wall elements either directly on site or as large-format prefabricated components. However, knowledge of the mechanical behaviour of rammed earth, especially its long-term mechanical behaviour (shrinkage and creep), remains limited. This knowledge gap significantly hinders its integration into standard engineering design and planning processes. This research project therefore investigates the suitability of fiber optic sensing for deformation measurement in rammed earth elements, with a view toward future long-term monitoring applications.

Initial situation

Clay is characterized by easy workability, local availability, and the ability to provide an excellent indoor climate. Its highly favourable energy and environmental balance (ÖKOBAUDAT according to EN 15804+A2) makes it a promising alternative for the construction industry. The use of clay as a building material is not only ecologically but also economically advantageous: clay can be sourced from excavation material that would otherwise require disposal, thereby significantly strengthening circular economy concepts. Without the addition of binders such as lime or cement, clay remains fully recyclable and enables a sustainable, resource-efficient construction method.

Despite these advantages, earthen construction is currently only used sporadically. Established design and calculation frameworks for load-bearing earthen structures are largely lacking. Existing buildings are predominantly based on empirical craftsmanship rather than engineering-based approaches. Structural behaviour is strongly influenced by moisture distribution, degree of compaction, and climatic boundary conditions. A key knowledge gap concerns the time-dependent deformation behaviour, particularly shrinkage and creep, which substantially limits the broader application of the material.

Project contents and objectives

Against this background, this research project addresses the central question of whether distributed fiber optic sensing (DFOS) is suitable as a non-destructive, continuous measurement method for capturing the deformation behaviour of rammed earth walls under moisture and temperature variations as well as mechanical loading. The aim is to establish a basis for long-term monitoring of real, load-bearing structural elements.

For robust engineering-based modelling, comprehensive datasets on time-dependent deformation behaviour are still missing. Distributed fiber optic sensing offers considerable potential in this regard; however, its application in rammed earth structures has not yet been systematically investigated.

Methodological procedure

Distributed fiber optic sensing enables continuous, high-resolution monitoring of deformations along the entire sensor length. This allows the early detection of local changes and very small deformations in the micrometer range, such as crack initiation [1]. Due to their small dimensions and low weight, sensor fibers and cables do not influence the material properties of the specimen and are therefore well suited for non-destructive measurement applications. To date, fiber optic sensors have mainly been applied in concrete structures [2], on steel surfaces [3], and in engineering geodesy [4].

The project comprises (i) experimental test series on rammed earth specimens of different sizes, including small-scale specimens to determine material parameters (compressive strength, elastic modulus, flexural tensile strength, drying shrinkage); (ii) an assessment of whether DFOS is suitable for capturing load-dependent material behaviour (creep); and (iii) an evaluation of its applicability for in-situ measurements on full-scale, load-bearing rammed earth components.

Fiber optic sensor cables were installed both by embedding them during compaction and by bonding them into grooves on the specimen surface. Particular focus was placed on the bond between the sensor cable, adhesive, and rammed earth. Measurement results were validated using conventional reference methods (displacement transducers and digital 3D image correlation).

The theoretical part of the project integrates the experimentally obtained material parameters into a finite element (FE) model to realistically simulate the load-bearing and deformation behaviour of rammed earth elements under static loading.

Results and conclusions

The experimental investigations demonstrate that fiber optic sensing is generally suitable for capturing deformation behaviour in rammed earth. Both embedded and surface-bonded sensors provided reproducible measurement data. The strains measured with DFOS correlated well with the reference measurements. The results further indicate that the adhesive used for surface-bonded sensor cables is critical for measurement quality. At the same time, the bond between embedded sensor cables and rammed earth was found to be insufficiently reliable to ensure accurate strain measurements.

The numerical model realistically simulated the load test of a rammed earth vault and confirmed that experimentally derived material parameters can be effectively transferred into numerical simulations.

Future research should further investigate the applicability of fiber optic sensing for large-scale tests and in-situ measurements in rammed earth structures, particularly to enable continuous, non-destructive monitoring of long-term effects caused by moisture and temperature variations (shrinkage) as well as sustained mechanical loading (creep).

The results obtained in this study form the basis for a follow-up project aimed at developing a practice-oriented design guideline for load-bearing rammed earth walls, which is based on the semi-probabilistic safety concept of the Eurocode.

3 Projekinhalt

3.1 Vorgangsweise und Methoden

Das Sondierungsprojekt Lehm bau 2.0 fokussiert auf die Untersuchung der Eignung von Messmethoden auf Basis von faseroptischen Sensoren zur Erfassung von Formänderungen von Stampflehm-bauelementen. Dieses Verhalten äußert sich insbesondere in zeitabhängigen Dehnungs- und Kriechvorgängen (Schwinden und Kriechen).

Das Unternehmen Lehm Ton Erde Baukunst GmbH (LTE) als Leitbetrieb für Stampflehm bauweisen unterstützte das Projekt. LTE fertigt Stampflehm wandelemente in einer Fertigteileproduktionshalle mit automatisierten Fertigungsmethoden. LTE ermöglichte erstmalig das Einbringen von faseroptischen Sensoren unter Produktionsbedingungen und darauffolgende werkseitige Tests. Die untersuchte Lehmmischung wurde von LTE zur Verfügung gestellt und nicht verändert. So konnten Ergebnisse der mechanischen Tests mit Ergebnissen von laufenden werksseitigen Prüfungen von LTE abgeglichen werden.

Folgende Punkte wurden im Rahmen des Projekts bearbeitet:

- Applikation von verteilter faseroptischer Sensorik (DFOS) auf Stampflehmelementen
- Experimentelle mechanische Laborversuche und Erfassen von Formänderungen mit DFOS und alternativen Messaufnehmern
- Anwendung im Bauteilmaßstab an einer Stampflehm-Kappendecke (Bogentragwerk)
- Vergleichsrechnung mit numerischem Modell am Beispiel einer Lehmkappendecke

3.2 Lehm als Baustoff

Lehm als Baustoff wird weltweit genutzt und hat eine jahrhundertelange baukulturelle Entwicklung erfahren. Der Baustoff ist regional verfügbar und kann mit geringem Energieeinsatz, zu lastabtragenden Bauelementen, in erster Linie Wänden, verarbeitet werden. In Europa wurde dieser Baustoff weitgehend durch alternative mineralische Bauprodukte wie gebrannte Ziegel und Beton verdrängt.

Die aktuellen Bemühungen zur Dekarbonisierung des Bauenschaffens zielen auch auf den Einsatz von in der Herstellung emissionsarmen Baustoffen ab. Hier kommen Bauelemente aus getrocknetem Lehm ins Spiel. Das verstärkte Interesse und die Nachfrage führten zur Schaffung einer Norm für Lehmziegelbauweisen (DIN 18940) und Leuchtturmprojekte, die das Potential des Baustoffs hervorheben. Bodenaushub macht einen großen Teil des Abfallaufkommens aus, das dem Bauschaffen zugeordnet wird. Große Teile dieses Bodenaushubs könnten als Rohstoff für Bauelemente aus Lehm

genutzt werden. Es liegt nahe, den Schluss zu ziehen, dass der vermehrte Einsatz von Lehm als Baustoff, zur Reduktion dieses Abfallaufkommens beitragen kann.

Ein Aspekt, der den verbreiteten Einsatz des Baustoffes hemmt, ist die lückenhafte Kenntnis über das mechanische Verhalten des Baustoffes und damit die Grundlage zur modernen Modellierung in Entwurfs- und Planungsprozessen auf vergleichbarem Niveau wie z.B. bei der Beton- und Ziegelbauweise.

3.3 Stampflehmbauweise

Die Stampflehmbauweise ist durch ein schichtweises Einbringen von einem Gemisch aus Lehm und Kies in Formen (Schalungen) und mechanisches Verdichten durch dynamisches Stampfen charakterisiert. Diese Bauweise kann sowohl auf der Baustelle als auch im speziellen Fall von LTE als großformatige Fertigteile vorgefertigt und dann auf der Baustelle versetzt werden. In erster Linie werden die Bauelemente zur Herstellung von Wänden genutzt.

Vertiefte Kenntnisse über die mechanischen Eigenschaften sind Grundlage für den sicheren und dauerhaften Einsatz der Bauelemente. Dies wird durch laufende werkseitige Qualitätsüberwachung (zerstörende Tests an Kleinproben) sichergestellt. Diese Daten liefern auch die Grundlage für die ingenieurmäßigen Nachweis der Tragfähigkeit dieser Bauteile.

Der aktuelle Stand der Forschung zu Materialkennwerten von Stampflehm umfasst die Prüfverfahren und Klassifizierung der Druckfestigkeit [4], Biegezugfestigkeit sowie Scherfestigkeit [5], Wärmedehnung, Elastizitätsmodul und Sekantenmodul [6], Dichte, Sieblinie und Kornform [7], Kohäsion, Reibungswinkel, Dilatanzwinkel [8], die Querdehnzahl/Poissonzahl sowie Feuchtigkeitsgehalt.

Das Trocknungsschwinden ist die Verringerung des Volumens durch Verdunsten des physikalisch gebundenen Wassers und hat zusammen mit dem Kriechen den entscheidenden Einfluss auf das Trag- und Verformungsverhalten von Baukonstruktionen. Das Trocknungsschwindmaß von Lehm- baustoffen wird in Analogie zur Prüfung für Baulehme nach DIN 18952-2 mit Prüfkörper nach DIN EN 1015-2 und Lehm- bau Regeln [7] ermittelt, wo die Formänderung in einer Richtung des Prüfkörpers geprüft wird.

Kriechen ist eine zeitabhängige Verformungszunahme des Materials unter einer konstanten Spannung. Zum Kriechmaß und der Bestimmung der Kriechverformung werden in den bestehenden Lehm- bau-Regeln keine Vorgaben gemacht. Das Einschätzen des Kriechverhaltens wurde in der Dissertation [9] auf kleinen Prüfkörper durchgeführt.

3.4 Verteilte faseroptische Sensorik (DFOS)

Durch den Einsatz von DFOS wurde in diesem Projekt versucht, die Formänderung an lastabtragenden Stampflehmelementen zu messen und die Genauigkeit der Messergebnisse mit Referenzmessungen durch Setzdehnungsaufnehmer oder digitaler 3D-Bildkorrelation zu überprüfen.

Faseroptische Messverfahren basieren auf Lichtwellenleitern und werden u.a. zur Überwachung von Bauwerken genutzt. Bei verteilten faseroptischen Sensoren (DFOS – distributed fiber optic sensing) wird Licht in herkömmliche Glasfasern eingekoppelt und das durch natürliche Rückstreuung entstehende Signal analysiert, siehe z.B. Döring et al., 2016. Je nach betrachtetem physikalischem Effekt (Rayleigh-, Raman- oder Brillouinrückstreuung) ist eine verteilte Temperaturmessung (DTS – distributed temperature sensing) oder eine verteilte Dehnungsmessung (DSS – distributed strain sensing) möglich. Vorteil der verteilten Sensoren ist, dass die Information entlang der gesamten Faserstrecke erfasst werden kann. Damit ist z.B. die Detektion von Rissen möglich. Weiters besitzen faseroptische Messverfahren eine sehr hohe Präzision und können bereits Deformationen von wenigen Mikrometern erfassen. Die Sensorfasern bzw. Kabel besitzen geringes Gewicht und verändern daher die Eigenschaften des Prüfkörpers nicht, weshalb diese Sensoren sehr gut für die zerstörungsfreie Überwachung geeignet sind. Bisher wurden faseroptische Sensoren vor allem in Betonkörper eingebettet oder auf Stahloberflächen appliziert. Erstmals werden im Rahmen dieses Projekts Glasfasern in Stampflehmelemente eingebettet. Der Wahl der geeigneten Sensorkabel z.B. tight buffer (TB) Fasern, fiber in metal tube (FiMT) kommt daher eine entscheidende Rolle zu.

3.5 Applikation der DFOS auf Stampflehmprüfkörpern

3.5.1 Vorgangsweise

Die Eignung der DFOS im Stampflehm wurde hinsichtlich ihrer mechanischen Robustheit und Signalstabilität überprüft. Dabei kamen ein OFDR (optical frequency domain reflectometry) Interrogator zum Einsatz, der eine hochauflösende, kontinuierliche Erfassung der Dehnungsverteilung ermöglicht. Die Messergebnisse wurden einer Referenzdehnungsmessung gegenübergestellt. Die Referenzmessungen erfolgten mittels Setzdehnungsaufnehmern (DD1) und digitaler Bildkorrelation (DIC).

Im Rahmen von Einbau- bzw. Applikationsversuchen wurden zwei verschiedene Sensortypen untersucht, siehe auch Abbildung 1:

- Tight Buffer (TB) LWL-Kabel (Farbe gelb)
- BRUsens DSS 2.8 mm V1 (Farbe blau)

Der Verbund zwischen Sensorkabel und Stampflehm ist entscheidend für die zuverlässige Übertragung der Verformung vom Stampflehm auf das Sensorkabel.

Es wurden Sensorkabel

- Im Herstellungsprozess eingestampft
- Auf die Lehmoberfläche aufgeklebt
- In eine eingeschnittene Nut eingeklebt

Es wurden sechs unterschiedliche Klebstoffe

- Lehmschlicker
- Modellgips
- Gusskeramik
- Flexkleber
- Fliesenkleber und
- Ankerkleber

getestet. Es wurde ein Klebstoff identifiziert, der gut verarbeitbar ist, eine ausreichende Haftung gewährleistet und die Lehmeigenschaften entlang der Messstrecke zutreffend abbilden kann, also nicht zu steif ist. Die Untersuchungen zum Verbundverhalten erfolgten in zwei Schritten:

- Verbundverhalten während seiner Aushärtung
- Verbundverhalten während der Belastungsprüfung.

3.5.2 Tests zum Verbundverhalten

Für die Untersuchung des Verbunds während des Aushärtens der Klebstoffe wurden im Prüfkörper fünf Nuten (Tiefe 5 mm) in die Oberfläche geschnitten, in die jeweils ein TB-Sensorkabel mit drei unterschiedlichen Klebstoffen eingeklebt wurde:

- Lehmschlicker (Stampflehmischung Fraktion 0/1)
- Modellgips
- Gusskeramik (Keraquick)

Das Aushärten der Klebstoffe wurde über mehr als 24 Stunden kontinuierlich mittels DFOS überwacht.

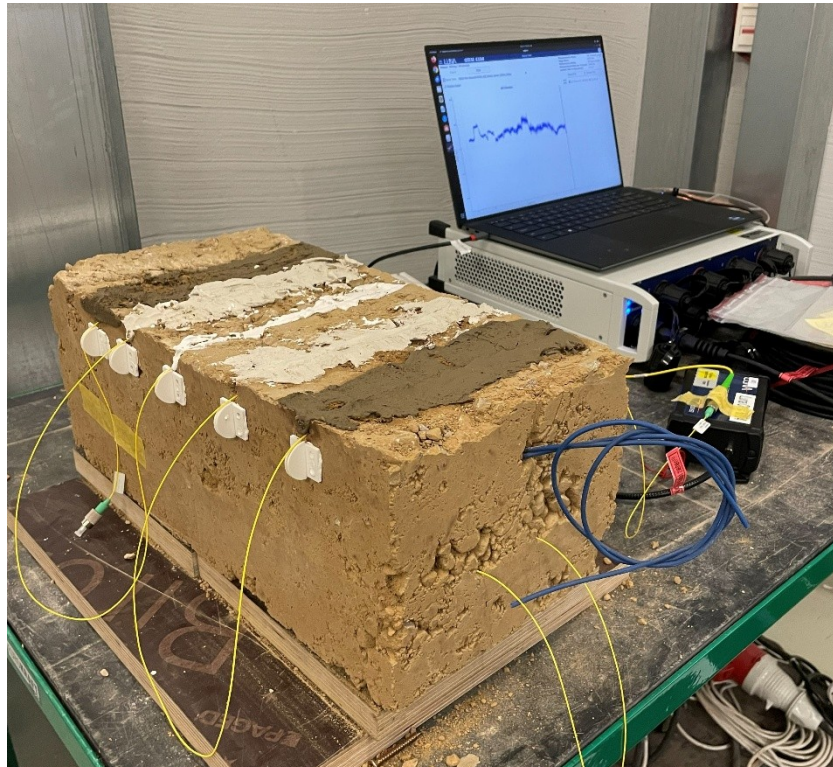


Abbildung 1: Untersuchung der Klebstoffe während der Aushärtung (von oben: Lehmschlicker, Modellgips, Gusskeramik, Modellgips und Lehmschlicker)

Für eine weitere Untersuchung der Eignung der Klebstoffe wurden im Prüfkörper acht vertikale Nuten (Tiefe 5 mm) eingeschnitten und vier TB-Sensorkabel mit unterschiedlichen Klebstoffen aufgeklebt:

- Flexkleber Soudal Fixall Flex Hybrid Polymer (weiter nur Flexkleber, Farbe Weiß)
- Fliesenkleber Cimsec (weiter nur Fliesenkleber, Farbe Grau)
- Gusskeramik Keraquick (weiter nur Gusskeramik, Farbe Weiß)
- Ankerkleber Soudal (weiter nur Ankerkleber, Farbe Grau)

Der Prüfkörper wurde einer einaxialen Druckbelastung ausgesetzt. Die Stauchung des Prüfkörpers wurde parallel zur Belastungsrichtung mit vier aufgeklebten Sensorkabel (DFOS) gemessen und diese mit vier Setzdehnungsaufnehmer (HBM DD1 mit einem Referenzmessbereich von 100 mm) referenziert. Die Kraft-Dehnungs-Diagramme der Sensorkabel und der Setzdehnungsaufnehmer wurden verglichen.



Abbildung 2: Druckversuch am Prüfkörper V1 mit vier unterschiedlichen Klebstoffen von Sensor-kabeln (von links: Flexkleber, Fliesenkleber; Gusskeramik und Ankerkleber)

3.6 Erkenntnisse zu mechanischen Eigenschaften von Stampflehm

3.6.1 Herstellung Prüfkörper

Die Herstellung der Prüfkörper (mit Ausnahme der Proctor-Versuche) erfolgte durch Verdichtung mit einem handgeführten pneumatischen Stampfhammer mit einer Schichtstärke von 3 cm. Diese Methode entspricht dem üblichen Herstellungsprozess von Stampflehmteilen und gewährleistet eine realitätsnahe Repräsentation des Verdichtungszustands im Labor. Nach der Herstellung wurden sämtliche Prüfkörper in einer Klimakammer bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte gelagert und bis zum konstanten Massengewicht konditioniert, um eine einheitliche Ausgangsfeuchte sicherzustellen.



Abbildung 3: Herstellung der Prüfkörper mit pneumatischem Stampfhammer

3.6.2 Materialkennwerte: Druckfestigkeit, E-Modul und Trocknungsschwindmaß

Die Ermittlung der Materialkennwerte des Stampflehms bildete eine wichtige Grundlage für die Planung und Auslegung der Versuche zur Dehnungsmessung mit DFOS, sowie für das numerische Modell. Die Ermittlung der Materialkennwerte erfolgte mittels Kleinversuchen in Anlehnung an entsprechende Prüfnormen für Beton bzw. in Anlehnung an die Lehmbau-Regeln [7]. Es wurden zentrale mechanische Kennwerte wie Druckfestigkeit (Würfel- und Zylinderdruckfestigkeit), Elastizitätsmodul (E-Modul) und das Trocknungsschwindmaß bestimmt.

Die Ermittlung der Druckfestigkeit erfolgte an Würfeln (20x20x20 cm) und Zylinder ($\varnothing 15/30$ cm), des E-moduls an Zylinder ($\varnothing 15/30$ cm) und jene des Trocknungsschwindmaßes an prismatischen Prüfkörpern (60x10x5 cm).

3.7 Anwendungen im Bauteilmaßstab – Stampflehm Kappendecke

Zur Bewertung der Eignung faseroptischer Sensorik (DFOS) für die Erfassung des Trag- und Verformungsverhaltens von großformatigen Stampflehmteilen wurden weitere Dehnungsmessungen an Lehmkappendecken aus Stampflehm durchgeführt. Im Zuge einer projektübergreifenden Synergie ergab sich eine enge Zusammenarbeit zwischen der TU Graz, Lehm Ton Erde Baukunst GmbH (LTE), und wh-p GmbH Beratende Ingenieure und Bez+Kock Architekten Generalplaner GmbH, im Rahmen eines durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Forschungsprojekts zur Tragfähigkeit von Lehmkappendecken. Im Werk von LTE in Schlins (Vorarlberg) wurde ein maßstäbliches 1:1-Modell einer Lehmkappendecke aus Stampflehm hergestellt und einer zerstörenden Belastungsprüfung unterzogen. Die TU Graz verlegte ihr Labormessequipment – einschließlich der DFOS und Referenzmessungen – vor Ort in die Werkhalle von LTE, um die Belastungsprüfungen messtechnisch zu begleiten.

3.7.1 Herstellung, Lagerung, Belastungskonzept

Die Lehmkappendecke wurde in einer robusten Schalung in liegender Position lagenweise gestampft. Die durchschnittliche Schichtstärke betrug etwa 6,5 cm. Während der Herstellung wurden drei Lagen faseroptischer Sensorkabel zwischen definierten Stampfschichten eingelegt. Unmittelbar nach der Herstellung wurde die Lehmkappendecke ausgeschalt und in die finale Einbaulage umgedreht.

Für die Belastungsprüfung wurde mittels Einbauelementen (Kombination von Elastomermatten und Holzblöcken) die horizontalen Auflagersteifigkeiten an die realen Verhältnisse im späteren Bauwerk angepasst. Dadurch wurde bei einer Prüfkraft von 65 kN eine horizontale Auflagerverschiebung von 3,5 mm erzielt.

Die Belastungsprüfung erfolgte als quasi-statischer 4-Punkt-Biegeversuch. Die Last wurde über zwei linienförmige Lasteinleitungsflächen über die volle Breite der Lehmkappendecke eingeleitet.

3.7.2 Messaufbau und Messeinrichtung

Zur Untersuchung des Verformungsverhaltens kamen vier parallele Messsysteme zum Einsatz:

- Faseroptische Sensorik (DFOS)
- Setzdehnungsaufnehmer (HBM DD1)
- Digitale 3D-Bildkorrelation (DIC)
- Wegmessung mittels Seilpotentiometern bzw. induktiven Wegaufnehmern (durchgeführt von gbd Lab ZT GmbH).

Die DFOS ermöglichte eine hochauflösende Dehnungsmessung entlang der gesamten Sensorkabel-
länge und wurde durch DD1-Aufnehmer mit Referenzmesslängen von 100 mm bzw. 380 mm vali-
diert. Die DIC diente der flächenhaften Erfassung des Dehnungsfeldes an der Stirnfläche sowie der
Analyse von Rissbildung, Bruchmechanismen und Verformungen am Bogenscheitel und den Aufla-
gern. Die Wegmessungen erfassten die Durchbiegung im Bogenstich und die seitlichen Auflagerver-
schiebungen. Die Kraftmessung erfolgte über eine HBM-Druckkraftmessdose (6CB, 2 MN).

Die Dehnungsmessung mit DFOS erfolgte sowohl mit eingestampften als auch mit aufgeklebten Sen-
sorkabeln. Eingestampfte Sensorkabel des Typs BRUsens DSS 2.8 mm V1 wurden während der Her-
stellung der Lehmkappendecke zwischen zwei Stampfschichten eingebettet; der Verbund zwischen
Sensorkabel und Stampflehm wurde dabei durch Einbauelemente entlang der Kabellänge verbes-
sert.

Aufgeklebte Sensorkabel wurden nach vollständiger Austrocknung und vor der Belastungsprüfung
appliziert. Hierzu wurden TB-Sensorkabel in eine 5 mm tiefe Nut eingelegt und mit Flexkleber (Sou-
dal FixAll) verklebt.

Während der Belastungsprüfung wurden von der TU Graz folgende Messgrößen kontinuierlich er-
fasst:

- Dehnungen an Ober- und Unterseite (DFOS und DD1)
- Durchbiegung im Bogenstich und entlang der Bogenachse (DIC)
- Querdehnungen (DIC)
- Rissbildung und lokales Bruchverhalten (DIC)
- Verformungen der Auflagerbereiche (Verschiebung und Rotation, DIC)

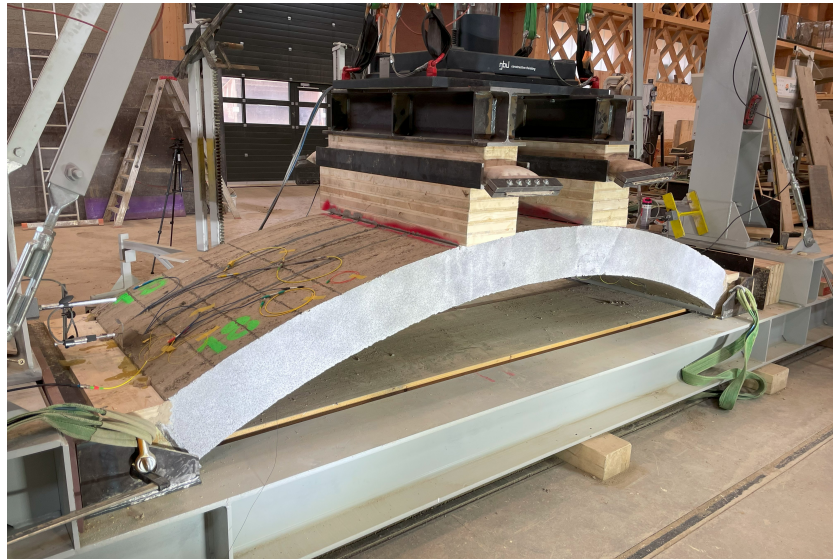


Abbildung 4: Prüfeinrichtung während der Belastungsprüfung in der Werkshalle von LTE, Schlins

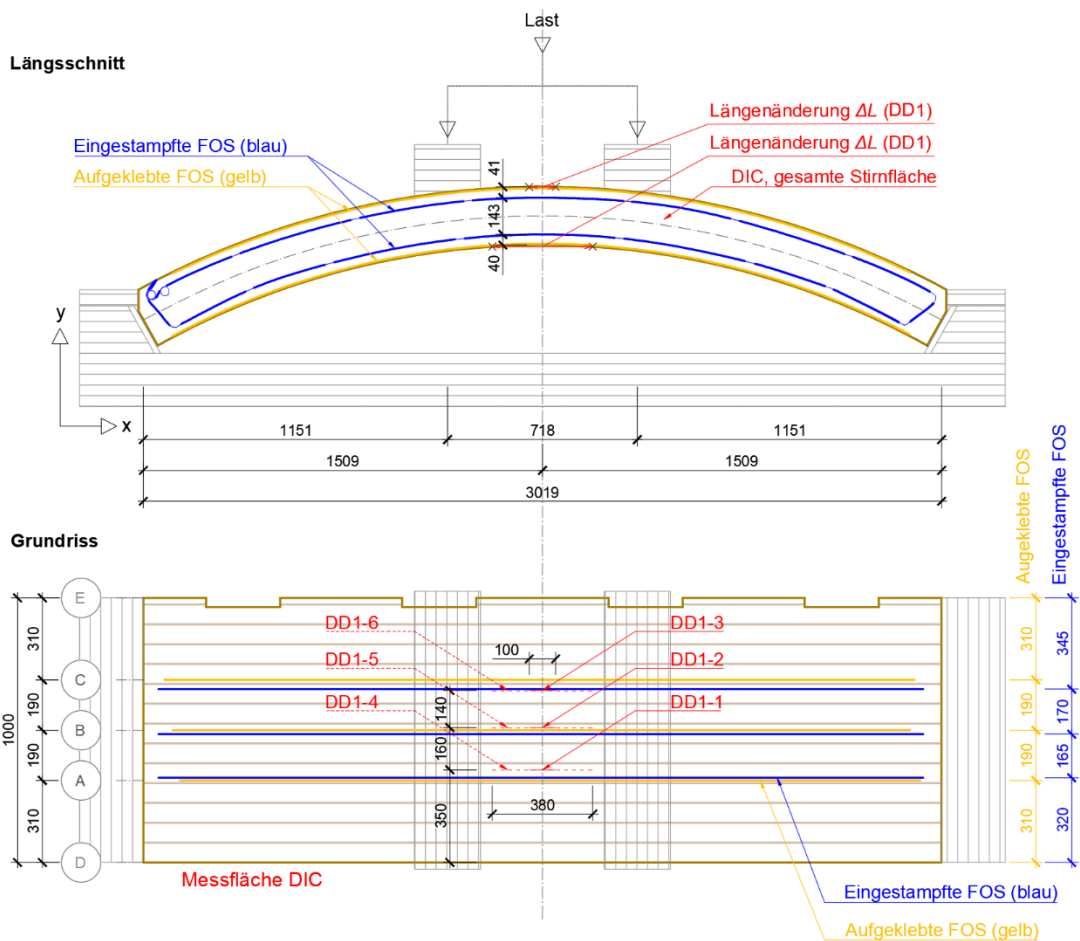


Abbildung 5: Detaillierung der Messsensoren an der Lehmkappendecke

3.8 Vergleichsrechnung mit numerischem Modell am Beispiel einer Lehmkappendecke

Das numerische Modell mittels FEM dient grundsätzlich dazu, das komplexe Materialverhalten von Stampflehm – einschließlich Nichtlinearitäten, Schwindverhalten und lastabhängigen Formänderungen – realitätsnah erfassen zu können und das Versagen eines Stampflehmtragwerks unter definierten Lasten abzubilden. Durch die Gegenüberstellung von experimentellen Messdaten und numerischem Modell kann zudem überprüft werden, in welchem Ausmaß ermittelte Materialkennwerte und das Versagensverhalten des Stampflehms konsistent in einem FEM-Modell abgebildet werden können.

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde das Trag- und Verformungsverhalten einer untersuchten Lehmkappendecke mittels numerischem Finite-Element-Modell (FEM) als Flächenmodell nachgebildet. Die numerische Analyse wurde mit der Software RFEM 6 der Firma Dlubal durchgeführt.

Bei der Modellierung der Lehmkappendecke wurden experimentell ermittelte Materialkennwerte gemäß Tabelle 1 herangezogen. Die Geometrie der Lehmkappendecke wurde entsprechend den tatsächlichen Abmessungen modelliert, einschließlich der durch Trocknungsschwinden entstandenen Formabweichungen. Die Lagerungsbedingungen wurden nachgebildet – die im Versuch gemessene Rotation und Verschiebung der Auflager wurde als Auflagersteifigkeit modelliert. Das Materialmodell basiert auf dem orthotropen Ansatz mit dem Rankine-Hill-Versagenskriterium, das sich für spröde, zugschwache und druckbelastete Mauerwerksmaterialien eignet und ein realitätsnahes Abbilden des nichtlinearen Materialverhaltens ermöglicht. Die Laststufen wurden anhand der im Belastungsversuch aufgebrauchten statischen Belastungen bis zum Bruch definiert.

Tabelle 1: Materialkennwerte im numerischen Modell

Materialkennwert	Wert
Spezifisches Gewicht	2190 kg/m ³
Elastizitätsmodul $E_x = E_y$	1335 N/mm ²
Schubmodul G_{xy}	450 N/mm ²
Druckfestigkeit $f_{c,x} = f_{c,y}$	2,12 N/mm ²
Grenzzugfestigkeit $f_{t,x} = f_{t,y}$	0,01 N/mm ²

4 Ergebnisse

4.1 Ergebnisse zur Eignung von DFOS im Stampflehm

4.1.1 Auswahl der Sensorkabel

Zur Bewertung der Eignung faseroptischer Sensorkabel für den Einbau in Stampflehm wurden zunächst Dehnungsmessungen während des aktiven Stampfvorgangs durchgeführt. Dabei zeigten sich deutliche Unterschiede im Verhalten der beiden untersuchten Sensorkabeltypen.

Das TB-Sensorkabel verlor bereits während des Stampfvorgangs vollständig das Messsignal. Dies ist auf extreme lokale Beanspruchungen und daraus resultierende Mantelschädigungen zurückzuführen. Ohne zusätzliche bauliche Schutzmaßnahmen ist dieser Kabeltyp für das Einstampfen nicht geeignet.

Das BRUsens DSS 2.8 mm V1 konnte hingegen während des Stampfvorgangs störungsfrei ausgelesen werden. Die robuste EPR-Schutzschicht (Ethylene Propylene Rubber) gewährleistete die mechanische Unversehrtheit des Kabels, sodass sich dieser Kabeltyp prinzipiell für den eingestampften Einbau in Stampflehm als geeignet erwies.

4.1.2 Klebstoffe und Verbundverhalten

Die untersuchten Klebstoffe zeigten deutliche Unterschiede im Verbundverhalten zwischen Sensorkabel und Stampflehm. Bei Lehmschlicker traten nach dem Austrocknen ausgeprägte Risse in den Fugen auf, zudem konnte kein Verbund zwischen Sensorkabel und Stampflehm hergestellt werden. Lehmschlicker erwies sich somit als nicht geeignet. Modellgips zeigte zwar keine sichtbaren Risse, jedoch war der Verbund zum Sensorkabel unzureichend, was sich durch das Durchschlüpfen des Sensorkabels bemerkbar machte. Gips wurde daher ebenfalls als ungeeignet eingestuft.

Die Gusskeramik (Keraquick) zeigte hingegen ein deutlich besseres Verhalten. Die Fugenfüllung wies keine sichtbaren Risse auf, und der Verbund zwischen Sensorkabel und Gusskeramik war stabil und durchgehend vorhanden. Damit konnte Gusskeramik als geeigneter Klebstoff für die nachträgliche Applikation von DFOS identifiziert werden.

Zur weiterführenden Evaluierung der Klebstoffe wurde ein Prüfkörper einer einaxialen Druckprüfung (Abbildung 2) unterzogen. Dabei wurden die mittels DFOS ermittelten Kraft-Dehnungs-Diagramme mit Referenzmessungen durch Setzdehnungsaufnehmer (HBM DD1) verglichen. Je näher die mit DFOS gemessene Kraft-Dehnungs-Kurve an der Referenzmessung der DD1 lag, desto besser

wurde das Verbundverhalten zwischen Stampflehm, Klebstoff und Sensorkabel bewertet. Die Auswertung erfolgte in zwei Laststufen. In der ersten Laststufe wurde ein zyklischer Belastungstest bis etwa 40 % der erwarteten Bruchlast durchgeführt. In der zweiten Laststufe wurden die Prüfkörper bis zum Bruch belastet.

Die Messergebnisse zeigten, dass sowohl der Fliesenkleber als auch die Gusskeramik die beste Übereinstimmung zwischen den Kraft-Dehnungs-Diagrammen der DFOS und den Referenzmessungen mit DD1 aufwiesen, sowohl im Bereich der zyklischen Belastung (Abbildung 6) als auch beim Bruch (Abbildung 7). Beide Klebstoffe ermöglichten einen stabilen Verbund und eine nahezu verzögerungsfreie Übertragung der mechanischen Dehnungen vom Stampflehm auf das Sensorkabel und wurden daher als geeignete Verklebungsarten identifiziert.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass das Verbundverhalten der Sensorkabel maßgeblich vom verwendeten Klebstoff abhängt und dass die Auswahl des Klebstoffs entscheidend für Qualität und Zuverlässigkeit der Dehnungsmessung mit DFOS ist. In weiteren Untersuchungen wurden der Flexkleber und die Gusskeramik eingesetzt.

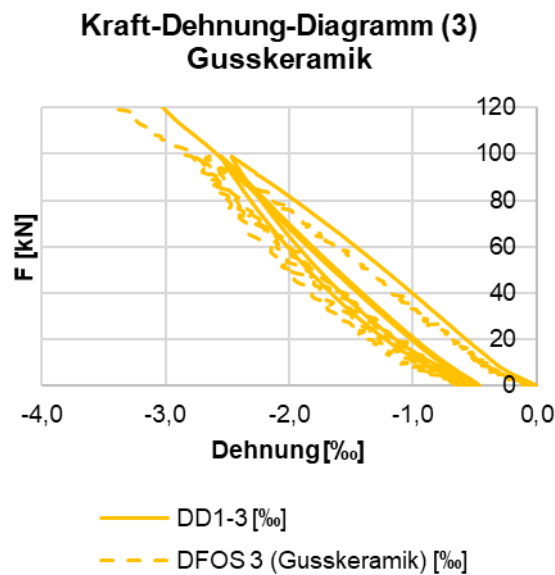


Abbildung 6: Kraft-Dehnungs-Diagramm von DFOS 3 (Gusskeramik) und Referenzmessung mit DD1-3 im Bereich der zyklischen Belastung

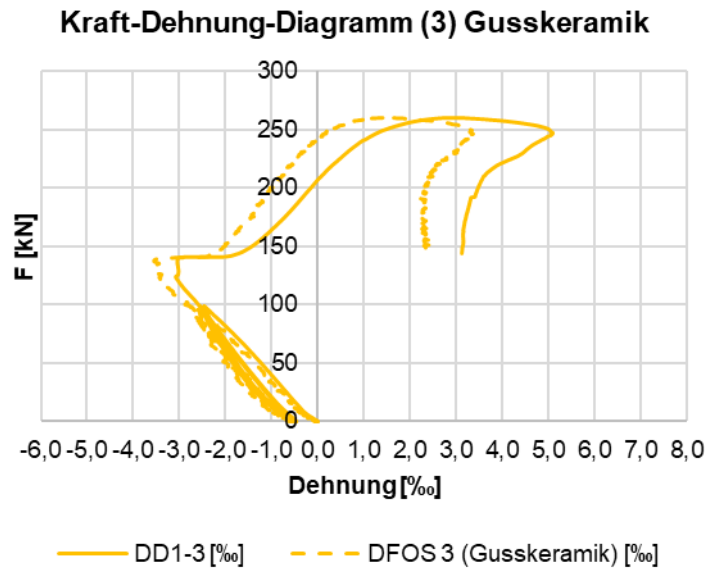


Abbildung 7: Kraft-Dehnungs-Diagramm von DFOS 3 (Gusskeramik), Referenzmessung mit DD1-3

4.1.3 Vergleich der eingestampften und aufgeklebten DFOS mit Kalibrierungsmessungen

Zur Evaluierung der Dehnungsmessung mit aufgeklebten und eingestampften DFOS am Stampflehm wurde ein Prüfkörper einer einaxialen Druckprüfung unterzogen, und die mittels DFOS und DD1 ermittelten Kraft-Dehnungs-Diagramme wurden gegenübergestellt (Abbildung 8). Je näher die mit DFOS gemessene Kraft-Dehnungs-Kurve an der Referenzmessung der DD1 lag, desto besser wurde das Verbundverhalten zwischen Stampflehm, Klebstoff und Sensorkabel bewertet. Die Auswertung der Messergebnisse erfolgte in zwei Laststufen. In der ersten Laststufe wurde ein zyklischer Belastungstest bis etwa 40 % der erwarteten Bruchlast durchgeführt. In der zweiten Laststufe wurden die Prüfkörper bis zum Bruch belastet.

Die eingestampften Sensorkabel zeigten insgesamt deutliche Abweichungen gegenüber den Referenzmessungen. Sowohl der Verlauf der Kraft-Dehnungs-Kurven als auch die Absolutwerte wichen teilweise erheblich von den mit DD1 gemessenen Werten ab, siehe Abbildung 9 und Abbildung 10.

Als Ursachen hierfür wurden identifiziert:

- Signalverschmierung infolge ungleichmäßigen Verbunds oder Mantelreibung,
- räumliche Distanz zwischen Sensorkabel und Setzdehnungsaufnehmer DD1,
- lokale Schädigungen des Sensorkabels infolge des Stampfvorgangs.

Diese Faktoren führten zu unpräzisen und teilweise abgebrochenen Dehnungsmessungen. Eingestampfte Sensorkabel sind daher für präzise Dehnungsmessungen im Stampflehm nur eingeschränkt geeignet, und eine Kalibrierung über parallele Referenzmessungen ist zwingend erforderlich.

Die aufgeklebten Sensorkabel zeigten hingegen sowohl in vertikaler Richtung (parallel zur Belastung) als auch in horizontaler Richtung (senkrecht zur Belastung) eine gute Übereinstimmung der mit DFOS gemessenen Kraft-Dehnungs-Kurven mit den Referenzmessungen der DD1. Abbildung 11 und Abbildung 12 zeigen die Kraft-Dehnungs-Diagramme der aufgeklebten Sensorkabel mit Verbund aus Gusskeramik bzw. Flexkleber im Vergleich zu DD1-1. Die Verklebung mit Flexkleber und Gusskeramik erwies sich dabei als ausreichend steif und gleichzeitig verformungsverträglich, sodass der Verbund zwischen Sensorkabel und Stampflehm über den gesamten Belastungsverlauf stabil blieb. Stauchungen und Dehnungen konnten mit DFOS in hoher Übereinstimmung mit den Referenzmessungen erfasst werden.



Abbildung 8: Druckversuch vom Prüfkörper D1 mit aufgeklebten (Farbe gelb) und eingestampften (Farbe blau) Sensorkabeln

Kraft-Dehnungs-Diagramm: eingestampfte Sensorkabel in vertikaler Richtung bei zyklischer Belastung (DD1-6 und DFOS (Eingestampft), Nordseite)

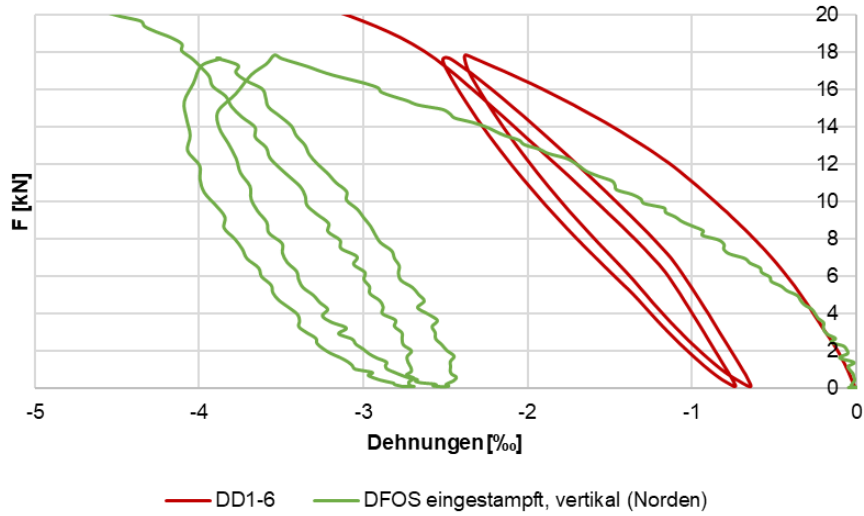


Abbildung 9: Kraft-Dehnungs-Diagramm eingestampfter Sensorkabel und DD1-6 in vertikaler Richtung im Bereich der zyklischen Belastung, Nordseite

Kraft-Dehnungs-Diagramm: eingestampfte Sensorkabel in vertikaler Richtung (DD1-6 und DFOS (Eingestampft), Nordseite)

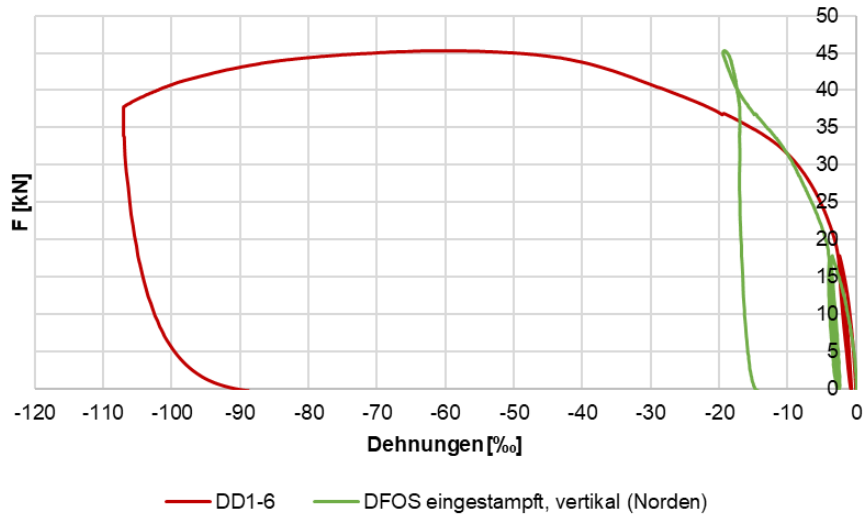


Abbildung 10: Kraft-Dehnungs-Diagramm eingestampfter Sensorkabel und DD1-6 in vertikaler Richtung, Nordseite

**Kraft-Dehnungs-Diagramm: vertikal aufgeklebte
Sensorkabel
(DD1-1 und DFOS (Gusskeramik und Flexkleber), Nordseite)**

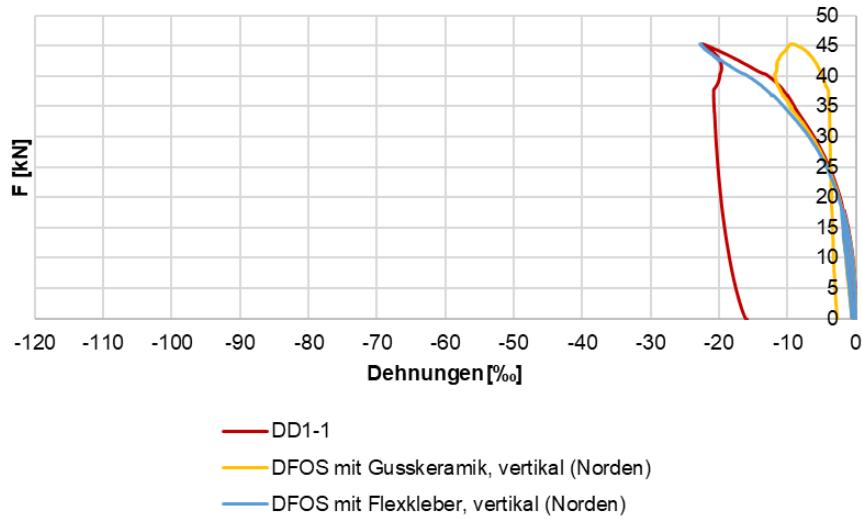


Abbildung 11: Kraft-Dehnungs-Diagramm aufgeklebten Sensorkabel (Verbund mit Gusskeramik und Flexkleber) und DD1-1 in vertikaler Richtung, Nordseite

**Kraft-Dehnungs-Diagramm: vertikal aufgeklebte
Sensorkabel bei zyklischer Belastung
(DD1-1 und DFOS (Gusskeramik und Flexkleber), Nordseite)**

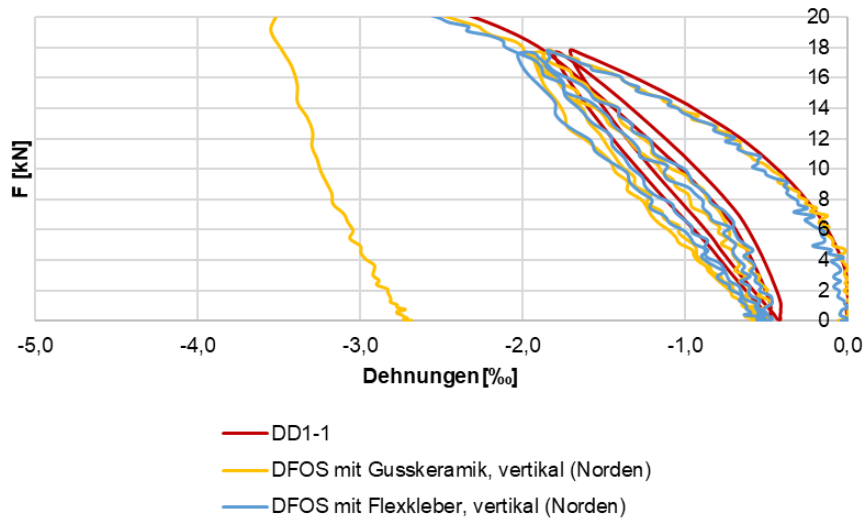


Abbildung 12: Kraft-Dehnungs-Diagramm aufgeklebten Sensorkabel (Verbund mit Gusskeramik und Flexkleber) und DD1-1 in vertikaler Richtung im Bereich der zyklischen Belastung, Nordseite

4.2 Erkenntnisse zu mechanischen Eigenschaften von Stampflehm

4.2.1 Verdichtungsart

Der Proctor-Versuch untersuchte den Zusammenhang zwischen Feuchtegehalt, Verdichtungsenergie und Rohdichte des Stampflehms. In diesem Versuch wurden Prüfkörper mit zwei Verfahren hergestellt: mit Proctorhammer und hydraulischer Presse (Prüfmaschine Beta 1000). Dabei wurden drei Stufen hinsichtlich der Verdichtungsenergie erzielt: $0,59 \text{ MJ/m}^3$, $2,65 \text{ MJ/m}^3$, und $> 4 \text{ MJ/m}^3$. Die Übersicht der Verfahren und Verdichtungsenergien sind in Tabelle 2 veranschaulicht.

Tabelle 2: Übersicht der Verfahren des Proctor-Versuchs

Herstellungsverfahren	Verdichtungsenergie
Proctorhammer	$0,59 \text{ MJ/m}^3$ (Standard Proctor)
Proctorhammer	$2,65 \text{ MJ/m}^3$ (Modifizierter Proctor)
Hydraulische Presse	$> 4 \text{ MJ/m}^3$

Die Ergebnisse in Abbildung 13 zeigen, dass bei geringer Verdichtungsenergie höhere Wassergehalte erforderlich sind, um eine ausreichende Verdichtung zu erzielen, was mit längeren Trocknungszeiten verbunden ist. Mit zunehmender Verdichtungsenergie können hingegen hohe Rohdichten auch bei niedrigeren Wassergehalten erreicht werden, wodurch die Abhängigkeit der Rohdichte von der Wasserzugabe abnimmt.

Die Druckfestigkeit steigt grundsätzlich mit zunehmender Rohdichte, siehe Abbildung 15. Bei mittlerer Verdichtungsenergie wurde die maximale Druckfestigkeit bei einem Wassergehalt unterhalb jenes der maximalen Rohdichte erreicht. Insgesamt bestätigen die Ergebnisse in Abbildung 14, dass höhere Verdichtungsenergien und niedrigere Wassergehalte zu höheren Festigkeiten führen.

Zusammenfassend deuten die Ergebnisse darauf hin, dass niedrigere Wassergehalte im Stampflehm kürzere Trocknungszeiten, höhere Festigkeiten und potenziell ein reduziertes Schwind- und Kriechverhalten begünstigen, da ein dichteres, wasserärmeres Korngefüge geringere volumetrische und zeitabhängige Umlagerungen zulässt.

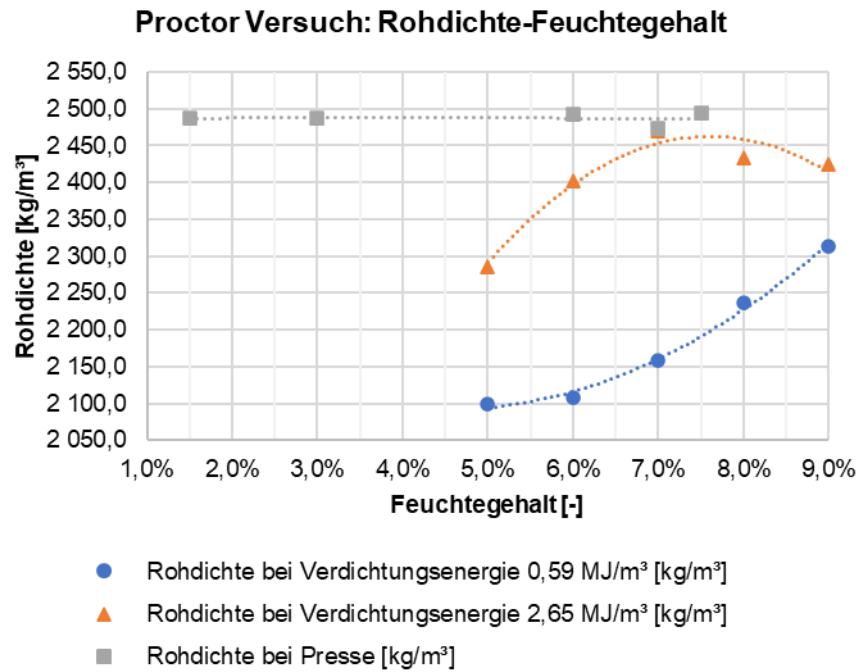


Abbildung 13: Rohdichte in Abhängigkeit von Verdichtungsenergie und Wassergehalt

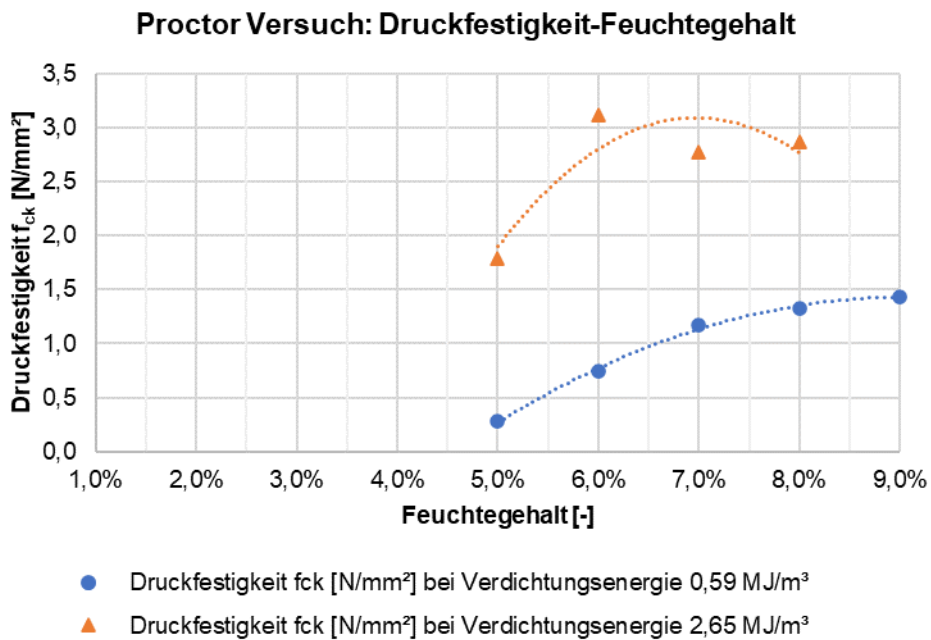


Abbildung 14: Zylinderdruckfestigkeit in Abhängigkeit von Verdichtungsenergie und Wassergehalt

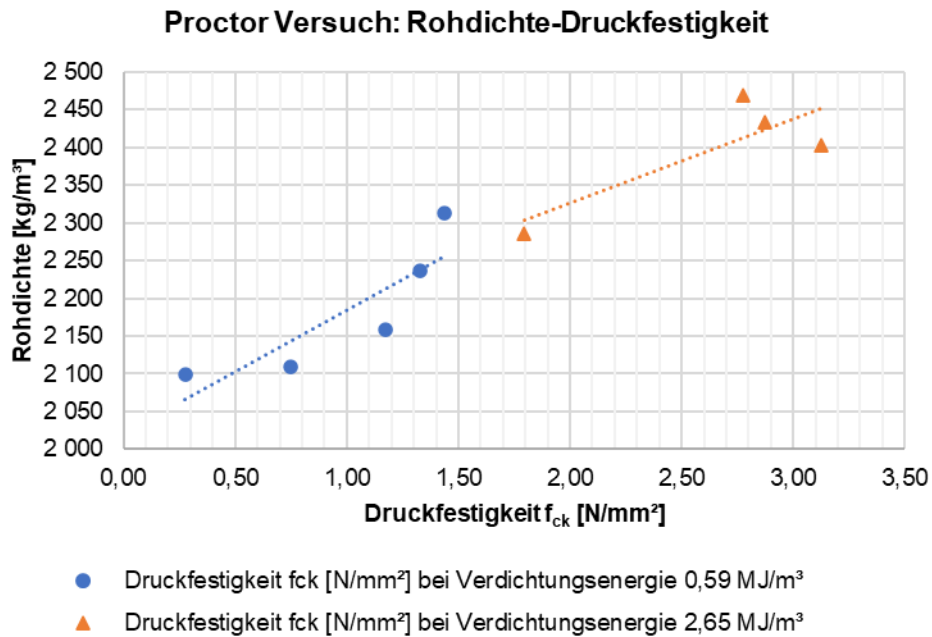


Abbildung 15: Zylinderdruckfestigkeit in Abhängigkeit von Rohdichte

4.2.2 Druckfestigkeit

Im Rahmen der Untersuchung wurde die Würfeldruckfestigkeit von fünf Stampflehmprüfkörpern (WL200-1 bis WL200-5, 20x20x20 cm) unter axialer Druckbeanspruchung mit einer weggesteuerten Belastungsgeschwindigkeit von 0,40 mm/min bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 präsentiert.

Tabelle 3: Übersicht der Spannungen sowie Dehnungen (laut Kolbenweg) bei der Bruchlast

Prüfkörper-Nr.	Spannung bei Bruchlast $\sigma_{c,w}$ [N/mm ²]	Gesamtdehnung bei Bruchlast ϵ [-]
WL200-1	3,18	1,94%
WL200-2	3,17	3,00%
WL200-3	3,30	2,72%
WL200-4	3,23	2,57%
WL200-5	3,18	2,69%
Mittelwert	3,21	2,54%
Standardabweichung	0,06	0,18%
Variationskoeffizient	0,02	0,07

4.2.3 E-Modul

Der Elastizitätsmodul wurde an fünf zylindrischen Stampflehmprüfkörpern (ZLB1–ZLB5) mittels zyklischer, einaxialer Druckprüfung bestimmt. Die Auswertung erfolgte wie im Betonbau, nach Verfahren B gemäß der ÖNORM EN 12390-13:2021, wobei abweichend von der Norm zehn Belastungszyklen durchgeführt wurden. Der Elastizitätsmodul wurde im 2., 3. und 10. Belastungszyklus ausgewertet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 und Tabelle 5 präsentiert.

Die Prüfkörper wurden unter axialer Druckbeanspruchung mit einer weggesteuerten Belastungsgeschwindigkeit von 0,40 mm/min zyklisch belastet; die obere und untere Prüfspannung wurde in jedem Zyklus jeweils 60 Sekunden konstant gehalten.

Aufgrund einer schiefen Aufstandsfläche wurde ZLB3 wegen unzuverlässiger Krafteinleitung aus der Auswertung ausgeschlossen. ZLB5 zeigte einen deutlich höheren, nicht repräsentativen Elastizitätsmodul und wurde ebenfalls nicht berücksichtigt. Für die Bestimmung des mittleren Elastizitätsmoduls wurden daher die Prüfkörper ZLB1, ZLB2 und ZLB4 herangezogen; die statistische Auswertung ist in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Statistische Auswertung der Elastizitätsmodule im zweiten, dritten und zehnten Belastungszyklus

Prüfkörper-Nr.	$E_{c,s,2}$ [N/mm ²]	$E_{c,s,3}$ [N/mm ²]	$E_{c,s,10}$ [N/mm ²]
ZLB1	1016	1149	1267
ZLB2	1091	1193	1366
ZLB4	1056	1189	1373
Mittelwert	1054	1177	1335
Standardabweichung	38	24	60
Variationskoeffizient	3,56%	2,06%	4,46%

Tabelle 5: Statistische Auswertung der Zylinderdruckfestigkeit

Prüfkörper-Nr.	Spannung bei Bruchlast $\sigma_{c,z}$ [N/mm ²]
ZLB1	2,16
ZLB2	2,17
ZLB4	2,06
Mittelwert	2,13
Standardabweichung	0,06
Variationskoeffizient	2,71 %

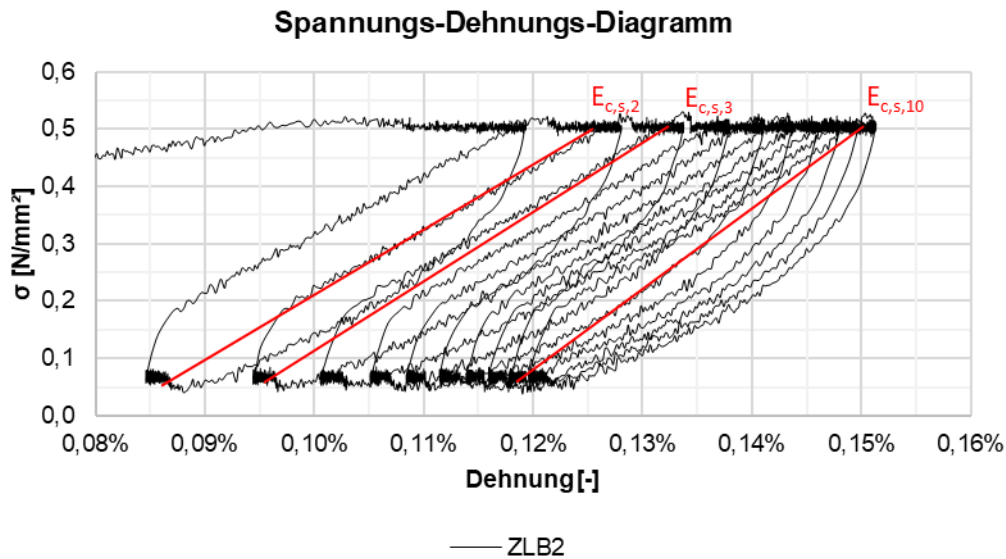


Abbildung 16: Spannungs-Dehnungs-Diagramme von ZLB2 während zyklischer Belastung

4.2.4 Trocknungsschwindmass

Die Bestimmung des Schwindmaßes erfolgte an Prüfkörper SM1, SM2 und SM3 (60x10x5 cm). Der Feuchtigkeitsgehalt der Stampflehmischung betrug zum Zeitpunkt der Herstellung der Prüfkörper 7,16 %, bezogen auf die trockene Masse [9].

Auf der flachen Seite des Prüfkörpers werden im Abstand von 500 mm (L_0) zwei Messmarken eingritz. Die Prüfkörper wurden auf eine mit einer dünnen Folie verlegten Platte gelegt und anschließend in der Klimakammer bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte gelagert. Nach 28 Tagen wurde den Abstand zwischen den zwei Messmarken (L_1) abgelesen. Der abgelesene Wert nach der Trocknung, bezogen auf die Ausgangslänge 500 mm, ist das Schwindmaß ϵ .

Tabelle 6: Auswertung des Trocknungsschwindmaßes

Prüfkörper	Abstand bei der Herstellung L_0 [mm]	Abstand nach 28 Tagen L_1 [mm]	Schwindmaß ϵ [-]
SM1	500	497,9	0,42%
SM2	500	498,0	0,40%
SM3	500	498,1	0,38%
Mittelwert			0,40%
Standardabweichung			0,02%
Variationskoeffizient			5,00%



Abbildung 17: Prüfkörper mit Messmarke im Detail

4.3 Mechanische Versuche an einer Stampflehmkappendecke

4.3.1 Ergebnisse der Verformungsmessungen

Die Lehmkappendecke wurde mittels symmetrischen 4-Punkt-Biegeversuch bis zum Bruch belastet. Während des Belastungsversuchs wurden folgende Größen kontinuierlich aufgezeichnet:

- Dehnungen an Ober- und Unterseite (DFOS, DD1)
- Durchbiegung im Bogenstich und entlang der Bogenachse (DIC, Wegaufnehmer)
- Querdehnungen, Rotationen und Verschiebungen an den Auflagern (DIC)
- Rissbildung und Bruchverhalten (DIC)

In der folgenden Auswertung wird der Fokus ausschließlich auf die Dehnungsmessung entlang der Bogenachse gelegt, wobei die Messergebnisse exemplarisch an einer repräsentativen Messposition in der Bauteilmitte dargestellt werden. Hierzu werden die Positionen der Setzdehnungsaufnehmer DD1-2 (Oberseite) und DD1-5 (Unterseite) herangezogen.

Die Kraft-Dehnungs-Diagramme zeigen den Mittelwert der Dehnungen aus DD1-, DFOS- und DIC-Messungen im Messbereich der Setzdehnungsaufnehmer. Die Referenzmesslänge betrug 100 mm auf der Oberseite (DD1-2) und 380 mm auf der Unterseite (DD1-5) der Lehmkappendecke; die Ergebnisse sind in Abbildung 18 und Abbildung 19 dargestellt.

Ergänzend dazu veranschaulichen die Wasserfalldiagramme die mit DFOS gemessenen Dehnungen entlang der gesamten Sensorkabellänge über die Dauer der Belastungsprüfung. Dabei ist die Länge

des faseroptischen Sensors auf der vertikalen Achse und die Belastungszeit auf der horizontalen Achse abgetragen. Markiert sind jene Bereiche des Sensors, die in direktem Kontakt mit der Lehm-kappendecke stehen (Ober- und Unterseite).

Abbildung 20 zeigt exemplarisch die mit der eingestampften DFOS (Channel 2) gemessenen Dehnungen im Bereich der Messpositionen DD1-2 und DD1-5 in Abhängigkeit von Zeit und Sensorposition zum Zeitpunkt einer Prüfkraft von 65 kN.

Abbildung 21 stellt analog dazu die Dehnungen der aufgeklebten DFOS (Channel 4) im Bereich von DD1-2 und DD1-5 in Abhängigkeit von Zeit und Sensorposition ebenfalls zum Zeitpunkt einer Prüfkraft von 65 kN dar.

Abbildung 22 zeigt exemplarisch die Dehnungsverläufe an den Positionen DD1-2 (Oberseite) und DD1-5 (Unterseite). Dargestellt sind die Referenzmessungen mit DD1 (rot) sowie die mit DFOS erfassten Dehnungen der aufgeklebten Sensorkabel (gelb) und der eingestampften Sensorkabel (blau) über die Bauteildicke der Lehmkappendecke.

Die Dehnungsmessungen mit DFOS an der Stampflehmkappendecke zeigten eine gute Übereinstimmung mit den Referenzmessungen. Sowohl die mit aufgeklebten als auch eingestampften DFOS erfassten Dehnungen stimmten im Verlauf als auch in den Absolutwerten gut mit den Messungen der Setzdehnungsaufnehmer (DD1) und der digitalen Bildkorrelation (DIC) überein.

Kraft-Dehnungs-Diagramm: Dehnungsmessung an der Oberseite der Lehmkappendecke mit DD1, DIC und FOS

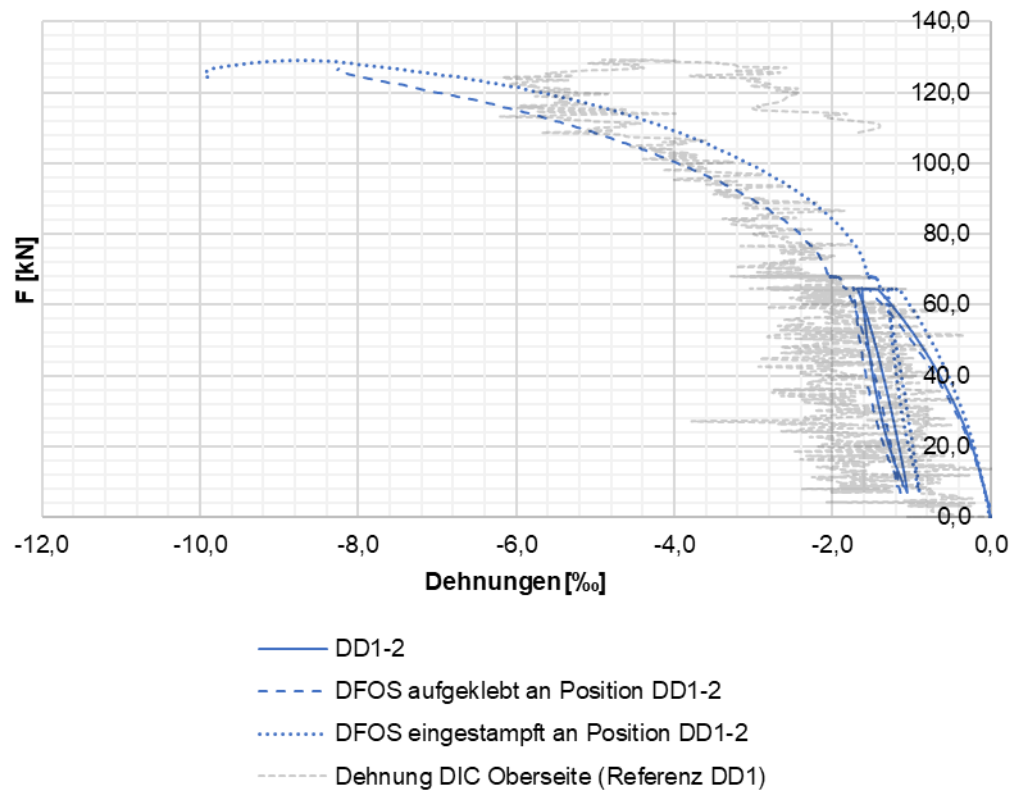


Abbildung 18: Kraft-Dehnungs-Diagramm: Dehnungsmessung an der Oberseite der Lehmkappendecke mit DD1, DIC und DFOS

Kraft-Dehnungs-Diagramm: Dehnungsmessung an der Unterseite der Lehmkappendecke mit DD1, DIC und FOS

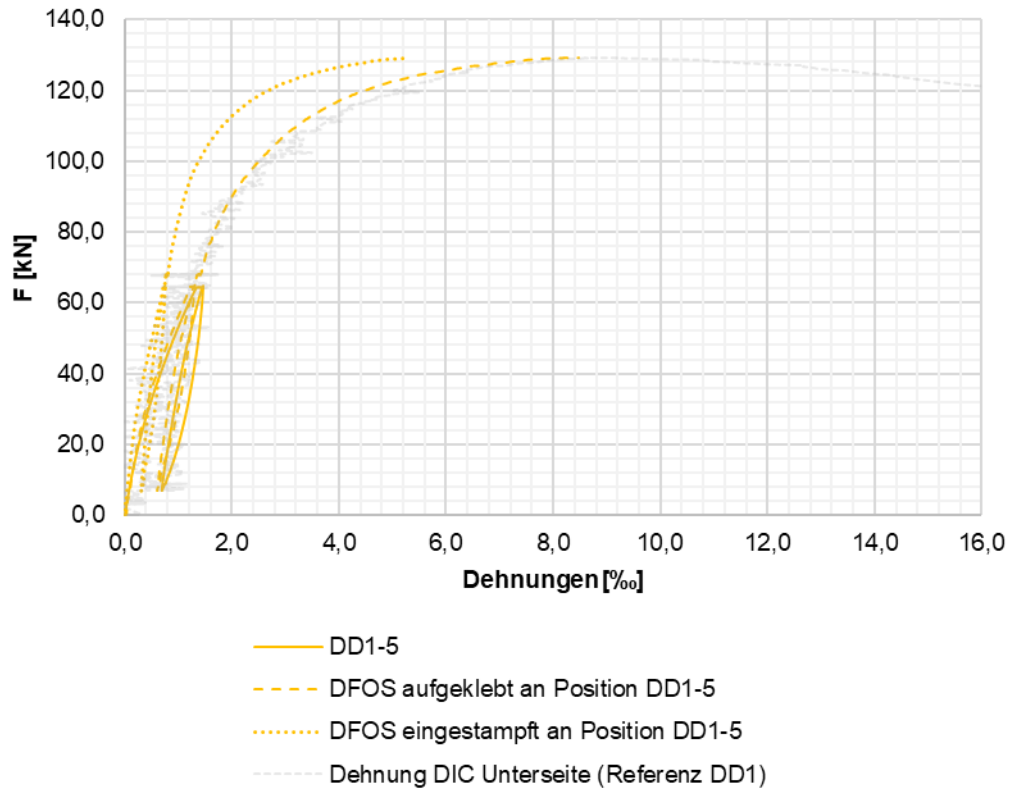


Abbildung 19: Kraft-Dehnungs-Diagramm: Dehnungsmessung an der Unterseite der Lehmkappendecke mit DD1, DIC und DFOS

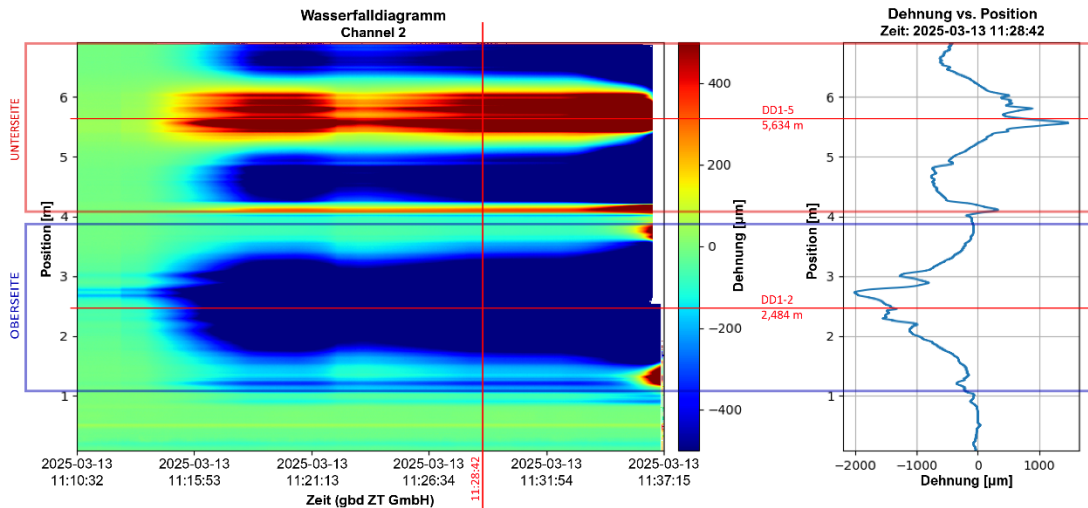


Abbildung 20: Dehnungen entlang des Channels 2 (eingestampfte DFOS im Bereich von DD1-2 und DD1-5) in Abhängigkeit von Zeit und Position. Rechts: Dehnung entlang des Channels 2 zum Zeitpunkt 11:28:42 (992 s nach dem Beginn der Belastungsprüfung, entspricht der Belastung 65 kN)

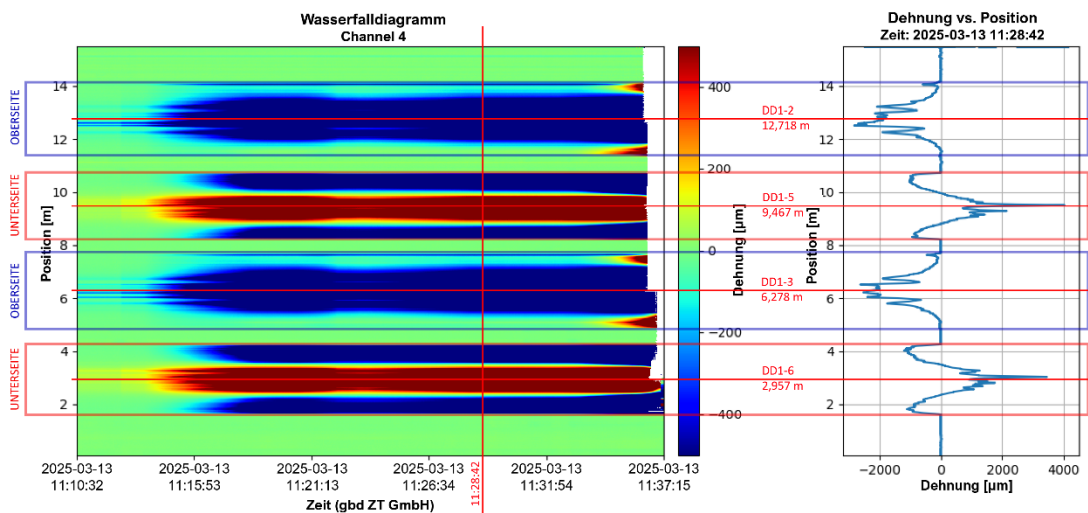


Abbildung 21: Dehnungen entlang des Channels 4 (aufgeklebte DFOS im Bereich von DD1-2, DD1-3, DD1-5 und DD1-6) in Abhängigkeit von Zeit und Position. Rechts: Dehnung entlang des Channels 4 zum Zeitpunkt 11:28:42 (992 s nach dem Beginn der Belastungsprüfung, entspricht der Belastung 65 kN)

FOS an der Position DD1-2 und DD1-5

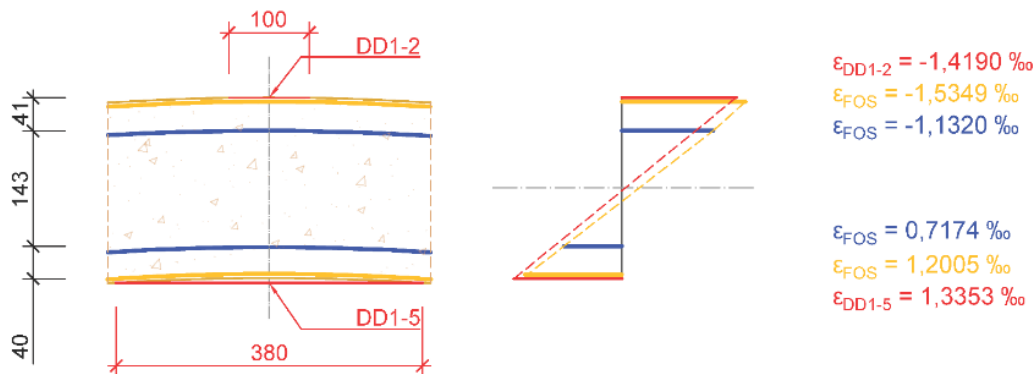


Abbildung 22: Messergebnisse der DD1 (rot) und DFOS (aufgeklebt: gelb und eingestampft: blau) der Dehnungen an der Position von DD1-2 und DD1-5; links: Ausschnitt im Bogenstich, rechts: gemessene Dehnungsverteilung über die Bogendicke

4.3.2 Vergleichsrechnung mit numerischem Modell

In Tabelle 7 werden die Ergebnisse aus dem numerischen Modell den experimentell ermittelten Ergebnissen einer Lehmkappendecke gegenübergestellt. Dabei wurden insbesondere Bruchlast, vertikale Verformungen und der Dehnungsverlauf analysiert. Materialkennwerte wurden gemäß Tabelle 1 herangezogen.

Die beobachteten Unterschiede zwischen FE-Modell und Experiment lassen sich durch mehrere Faktoren erklären:

- Geometrische Abweichungen: Die tatsächlich ausgeführte Geometrie der Lehmkappendecke unterscheidet sich z.B. aufgrund von Trocknungsschwinden leicht vom idealisierten FEM-Modell.
- Lagerungsbedingungen im Versuch: Die realen Auflagerbedingungen erlaubten Rotationen und Verschiebungen, die im numerischen Modell nur näherungsweise abgebildet werden konnten.
- Interne Spannungsumlagerungen: Vor dem Beginn sowie während des Belastungsversuchs kam es zu Rissbildung, was in diesem FEM-Modell nicht abgebildet werden konnte.

Diese Abweichungen unterstreichen die Notwendigkeit einer weiteren Kalibrierung des Materialmodells, einer präziseren Abbildung der Lagerungsbedingungen, sowie der Untersuchung des maßstabsabhängigen Materialverhaltens im Stampflehmabau. Die Erkenntnisse bilden die Grundlage für die Weiterentwicklung eines realitätsnahen numerischen Modells im geplanten Folgeprojekt.

Tabelle 7: Vergleich der experimentell und numerisch ermittelten Ergebnisse

	Experimentell ermittelt	Numerisch ermittelt	Numerisch/ Experimentell
Bruchlast	129 kN	156 kN	120,9 %
Vertikale Verformung im Bogenstich bei 65 kN	8,9 mm	7,4 mm	83,1 %
Vertikale Verformung im Bogenstich bei Bruchlast	30 mm	23,5 mm	78,3 %
Dehnung auf der Oberseite bei 65 kN	- 1,35 ‰	- 1,25 ‰	92,6 %
Dehnung auf der Unterseite bei 65 kN	1,41 ‰	1,16 ‰	82,3 %

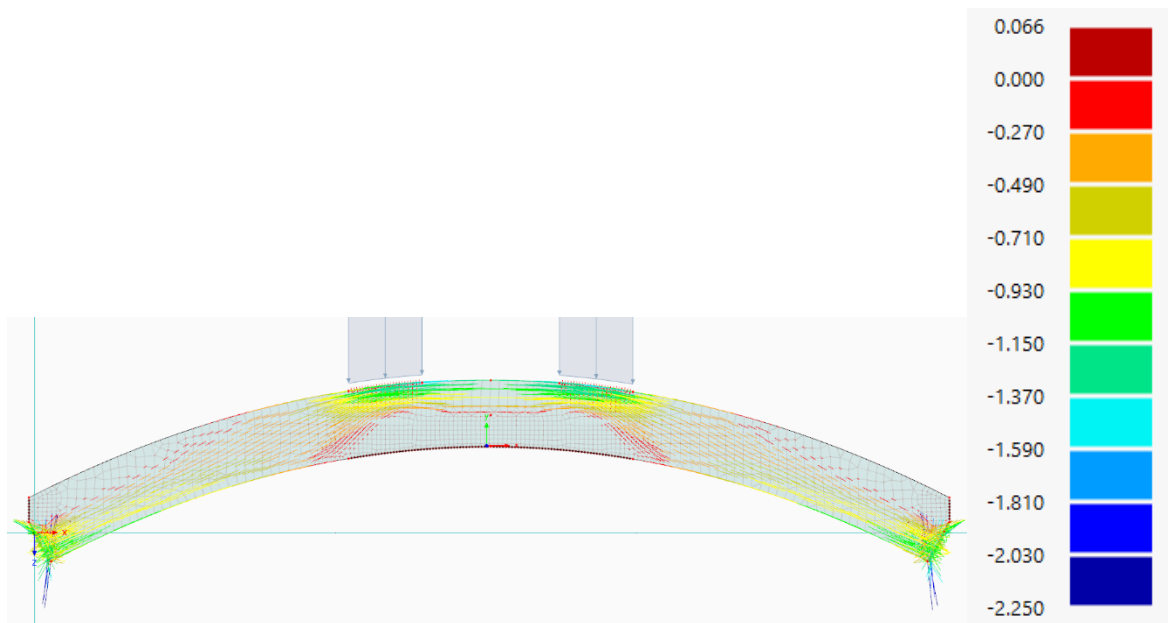


Abbildung 23: Verlauf der Hauptspannungen bei bei 65 kN aus numerischem Modell [N/mm²]

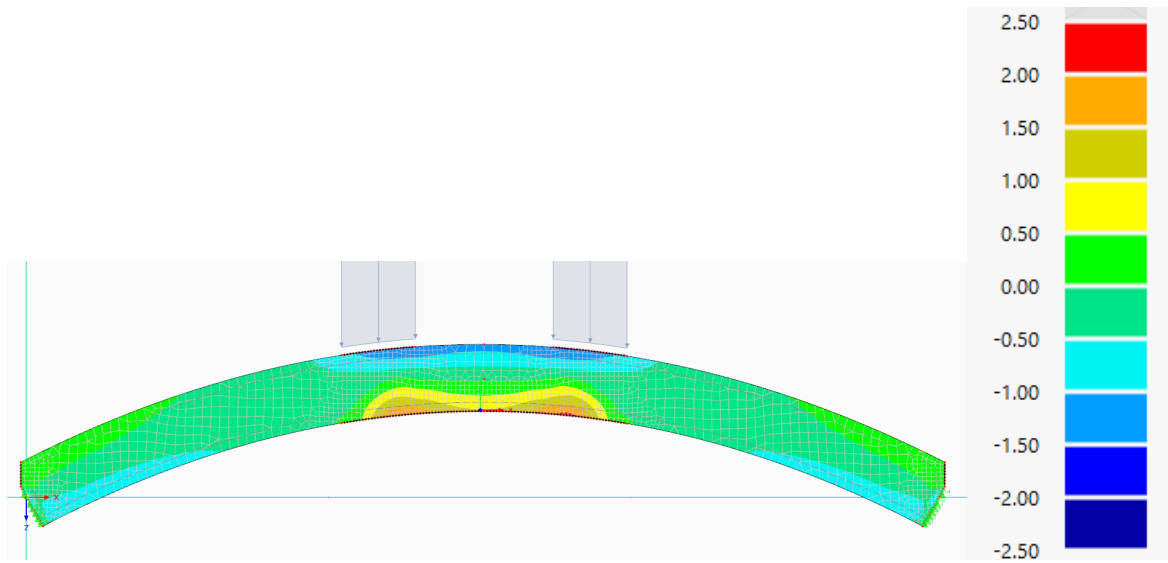


Abbildung 24: Verlauf der Hauptgesamtdehnungen bei 65 kN aus numerischem Modell [%]

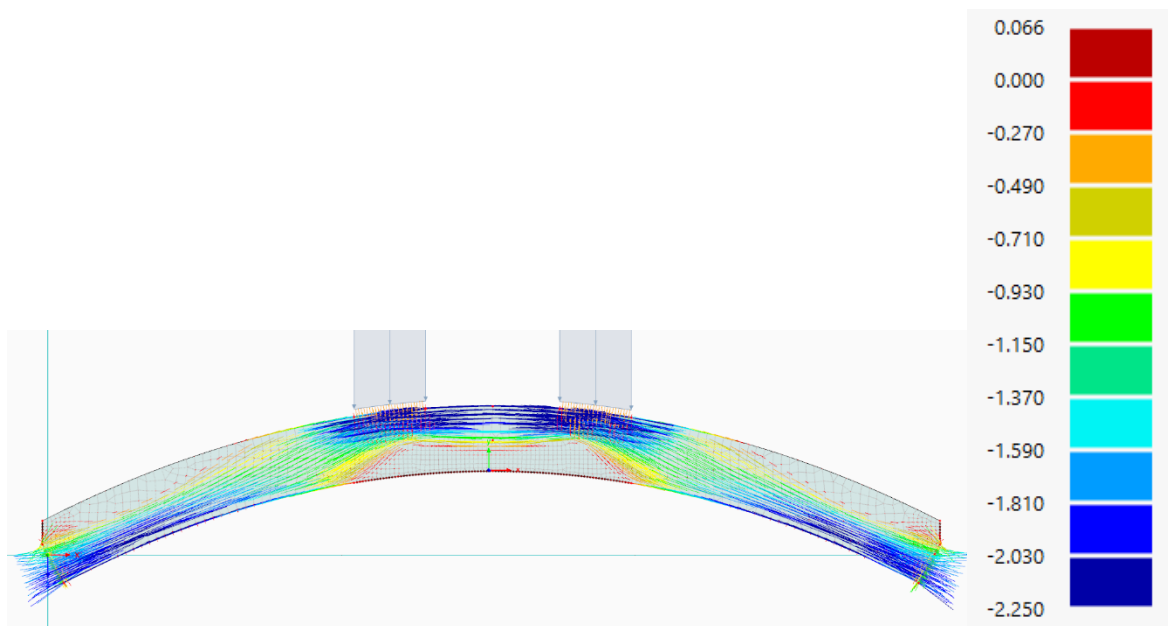


Abbildung 25: Verlauf der Hauptspannungen bei Bruchlast 156 kN aus numerischem Modell [N/mm²]

4.3.3 Langzeitbeobachtung

In weiterer Folge wurde eine Langzeitverformungsmessung einer Lehmkappendecke aus Stampflehm im Labor der TU Graz durchgeführt, um das Kriechverhalten zu untersuchen. Die Belastung erfolgte flächig mittels Ballasts von 733 kg/m^2 , insg. 2200 kg (mittels 88 Säcken zu je 25 kg Gewicht). Da die Langzeitverformungsmessung zum Zeitpunkt der Abgabe des Berichts noch nicht abgeschlossen ist, werden hier nur die vorläufigen Ergebnisse präsentiert.

Die vertikale Verformungsmessung erfolgt punktuell mithilfe von sieben Wegaufnehmern. Zusätzlich wurde eine Dehnungsmessung entlang der Bogenachse mithilfe von vier Setzdehnungsaufnehmer durchgeführt. Da diese Dehnungsmessung nur zum Zeitpunkt der Applikation der Belastung durchgeführt worden ist, werden die Messergebnisse aus Sicht der Langzeitverformung als nicht relevant eingestuft und sind nicht ein Teil dieses Berichtes. In Abbildung 27 ist die Messanordnung dargestellt.

Die Ergebnisse der Verformungsmessungen sind in Abbildung 28 dargestellt. Nach 109 Tagen beträgt die Zunahme der vertikalen Relativverformung des Bogenscheitels gegenüber den Auflagerepunkten der Lehmkappendecke 1,55 mm. Nach 183 Tagen seit dem Belastungsbeginn ist die Tendenz der vertikalen Verformung steigend.



Abbildung 26: Belastung der Lehmkappendecke

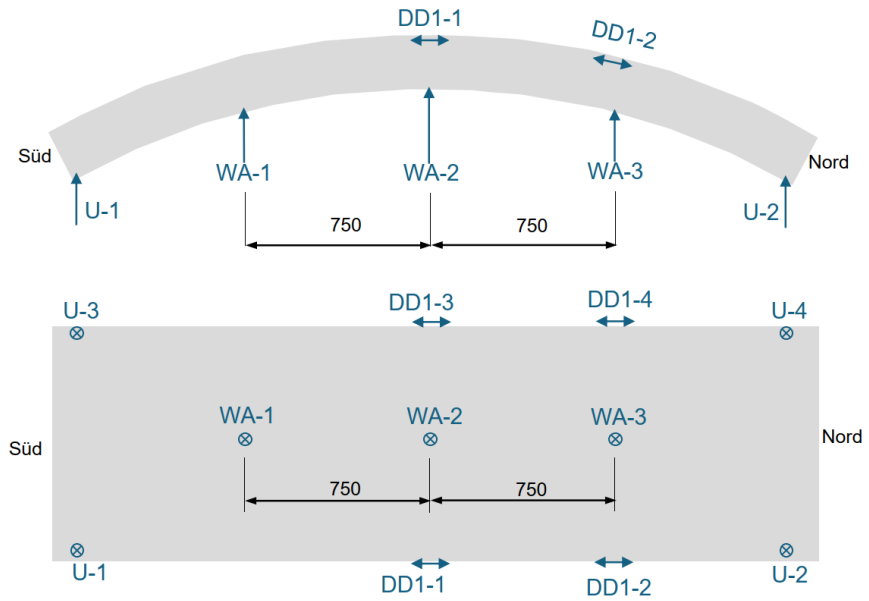


Abbildung 27: Messanordnung im Grundriss: Verformungsmessungen an Lehmkappendecke

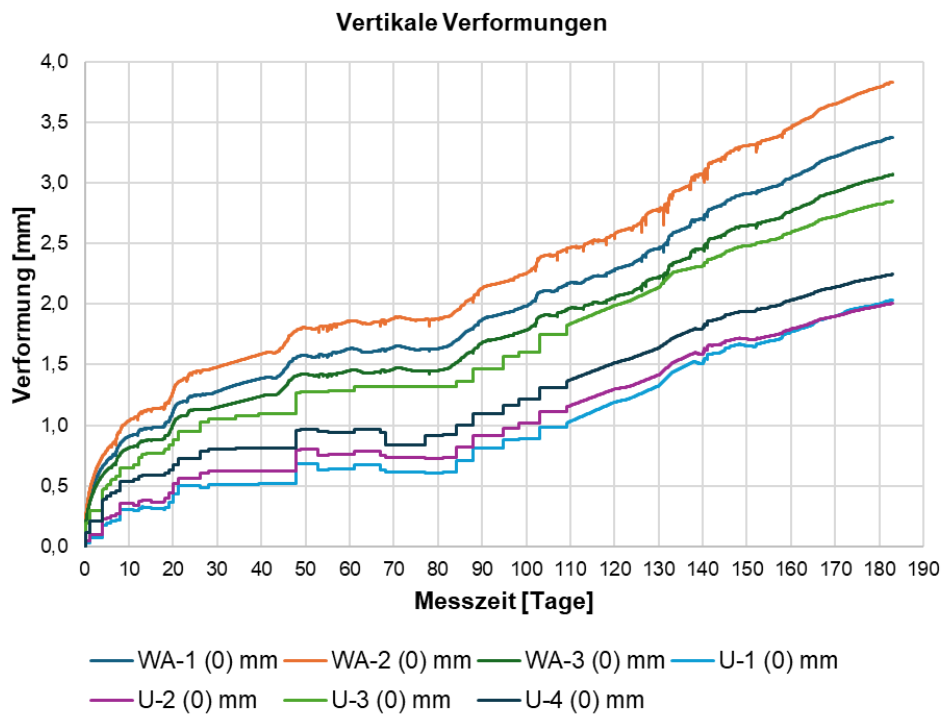


Abbildung 28: Vorläufige Messergebnisse der vertikalen Verformungen

4.4 Beitrag zur klimaneutralen Stadt

Dieses Projekt liefert wertvolle Beiträge zur Mission der klimaneutralen Stadt. Stampflehmbau als energieeffiziente mineralische Bauweise ohne emissionsintensive Bindemittel zeigt seine Potentiale bei Leuchtturmprojekten, für die es Zulassungen im Einzelfall bedarf. Die Projektergebnisse zeigen an einer Vielzahl an mechanischen Untersuchungen unterschiedlichsten Maßstabs die Eignung von Glasfasermesssystemen zur Ermittlung von Formänderungen in Stampflehmbauteilen. Diese Arbeit legt die Basis für zukünftige vertiefte Kenntnis über mechanische Eigenschaften und damit zur sicheren Verbreitung der Bauweise für den Einsatz in einer ressourceneffizienten Stadt. Der zählbare Effekt lässt sich aber nur durch eine flächendeckende Verbreitung der Technologie erreichen. Dazu bedarf es zukünftig abgesicherter Planungstools und ein dichteres Netzwerk an Baufirmen, die diese Technologie auch umsetzen können.

Im größeren Zusammenhang kann Stampflehm, dessen Kornverteilung vergleichbar mit Beton ist, auch Druck von den Baustoffdeponien nehmen, die durch Bodenaushub stark belastet sind. Wenn „jede“ Baustoffdeponie Produzent und Anbieter von Stampflehmelementen wäre, dann würde dies auch das Thema der Logistik und der regionalen Verfügbarkeit adressieren.

5 Schlussfolgerungen

5.1 Erkenntnisse für das Projektteam

Der Einsatz von verteilter faseroptischer Sensorik (DFOS) zur Verformungsmessung von Stampflehmbauteilen konnte das erste Mal erprobt werden. Dazu wurden zwei Arten der Applikation untersucht: (i) der Einbau im Lehmquerschnitt durch Einstampfen im Produktionsprozess und (ii) das Einkleben in oberflächennahe Nuten.

Untersuchungen zum Druckverhalten, E-Modul und zeitabhängigen Verformungsprozessen (Schwinden, Kriechen) bestätigten und ergänzten Erkenntnisse zum mechanischen und feuchteabhängigen Materialverhalten von Stampflehm. Speziell der Zusammenhang zwischen Verdichtungsenergie, Feuchtigkeit und Druckfestigkeit im Fertigungsprozess führt zu Fragestellungen über die Herstellung von Prüfkörpern aber auch Bauteilen.

Eine weitere Erkenntnis wurde bei der Herstellung von Probekörpern gewonnen. Die Zeit von der Probenherstellung bis zum möglichen Test beträgt rd. 7 Wochen und damit signifikant mehr als zB. bei Beton. Das macht das Optimieren von Lehmmischungen sehr zeitaufwendig und beeinflusst damit Planungs- und Entscheidungsprozesse. Grundsätzlich ist die Datenlage für Stampflehm aufgrund des bisher überschaubaren Einsatzes und damit verbundener Forschung beschränkt.

Im Rahmen einer nichtlinearen numerischen FEM-Analyse auf Basis eines adaptierten Materialmodells (Rankine-Hill) konnte das Projektteam die Ergebnisse der mechanischen Versuche an der Lehmkappendecke bestätigen.

Schließlich hat die Sondierung zu einer vertieften Kooperation mit Lehm Ton Erde Baukunst GmbH und der gbd ZT GmbH, die an der Umsetzung der Tests an dem Lehmkappengewölbe beteiligt waren, geführt.

5.2 Weiterführende Arbeit

Geplant sind Publikationen in wissenschaftlichen Journalen sowie Konferenzbeiträge. Die ersten Ergebnisse wurden bereits im März 2025 beim Earth Builder Summit in Biberach vorgestellt und stießen auf großes Interesse in der Lehmbaugemeinschaft.

Die Ergebnisse des Projekts werden in einem Dissertationsvorhaben weiter vertieft. Eine laufende Masterarbeit an der TU Graz untersucht aktuell die Scherbeanspruchung anhand mechanischer Versuche an zylindrischen Probekörpern.

Aufbauend auf dieser Sondierung ist ein weiterführendes kooperatives Forschungsprojekt mit oben genannten Partnern in Planung. Durch diese gebündelte Expertise in der Stampflehmbauweise sollen durch verbesserte ingenieurmäßige Kenntnisse Hürden im Planungsprozess reduziert werden. Es adressiert die Optimierung von Material („Rezeptlehm“ vergleichbar mit Rezeptbeton) und Herstellungstechnik, die Verifizierung praxisnaher Konstruktions- und Bemessungsansätze auch in Abstimmung mit anderen Baustoffen wie Holz, Stahl und Beton. Ziel ist es, Grundlagen für ein zukünftiges Regelwerk für Stampflehmanwendungen zu schaffen.

5.3 Zielgruppe

Das Projekt wendet sich an die wissenschaftliche Community, Planer:innen und ausführende Betriebe. Wissenschaftliche Community: Die Ergebnisse liefern experimentelle und numerische Daten zum mechanischen und feuchteabhängigen Verhalten von Stampflehm. Sie sind wertvoll für Materialforschung, Baustoffkunde und Strukturmechanik. Ingenieur- und Planungsbüros: Architekt:innen und Tragwerksplaner:innen erhalten Grundlagen zum Gebäudeentwurf, Materialparametern, Schwind- und Kriechverhalten sowie zur FEM-basierten Modellierung. Damit können Stampflehm-bauteile künftig fundierter und in Folge auch optimierter geplant werden. Bauindustrie und Fertigteilhersteller: Unternehmen wie Lehm Ton Erde Baukunst GmbH können von den Erkenntnissen zur Qualitätssicherung durch den Einbau von faseroptischen Sensorkabeln profitieren.

5.4 Hemmnisse

Das Projekt legt die Grundlage für den Einsatz von DFOS im Stampflehmbau. Der angedachte Einsatz zielt auf Bauprojekten und den Einsatz zur Beobachtung des Langzeitverhaltens. Wobei es technisch keine Hemmnisse gibt. Wenn sich zukünftig Bauherren bereit erklären ihre Projekte „monitoren“ zu lassen, ist das einerseits eine Qualitätssicherungsmaßnahme und andererseits ein hoch einzuschätzender Erkenntnisgewinn. Wie so oft bleibt die Frage nach der Integration dieser Erkenntnisse in die Planungspraxis. Da die Stampflehmcommunity sowohl in der Forschung als auch in der Praxis überschaubar groß ist, ist speziell veröffentlichtes Wissen leicht zu verbreiten. Generell hemmt das Fehlen von Richtlinien und Planungshilfen die Verbreitung der Technologie. Auch die eingeschränkte Verfügbarkeit von Stampflehmbauelementen (Markt und Logistik) erschwert die verstärkte Verbreitung.

5.5 Verbreitungspotential

Kurzfristig werden die Ergebnisse im wissenschaftlichen Bereich durch Veröffentlichungen im Rahmen von Abschlussarbeiten und wissenschaftlichen Artikeln verbreitet. Die LTE GmbH als Leitbetrieb kommt einer regen Vortragstätigkeit und Weiterbildungstätigkeit nach, die auch die wissenschaftliche Zusammenarbeit einfließen lässt. Die Einbindung in die akademische Lehre erfolgt an der TU Graz auch in Abstimmung mit dem Research Center for Sustainable Construction (GCSC) und über das Netzwerk von LTE gemeinsam mit dem Earthub der Universität Lichtenstein. Zukünftig werden die Ergebnisse im Idealfall in Richtlinien und Standards integriert von beratenden Architekt:innen und Ingenieur:innen genutzt, die dadurch zur Verbreitung der Technologie maßstäblich beitragen. Zuletzt wird eine Durchdringung des Markts, ausgehend vom Leitbetrieb LTE, durch ein erhöhtes Angebot, sprich mehr regional verteilte Betriebe, und weiterführende Innovationen in der Automatisierung der Produktionsprozesse möglich werden.

6 Ausblick und Empfehlungen

6.1 Weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeit

Die Ergebnisse der Sondierung zeigen, dass das Verformungsverhalten von Stampflehm weiter untersucht werden muss. Besonders das zeitabhängige Verhalten, Schwinden und Kriechen, sowie der Einfluss der Feuchtigkeit müssen detaillierter quantifiziert werden. Hierzu sind längerfristige experimentelle Untersuchungen notwendig, die das Verformungsverhalten sowohl an Kleinproben als auch an großformatigen Bauteilen untersuchen. Speziell für großformatige Versuche an Bauwerken sind DFOS geeignet. Dazu sollte auch die faseroptische Sensorik (DFOS) für die Verformungs- und Dehnungsmessung noch weiter optimiert werden.

- Optimierung des Verbunds zwischen Sensorkabel und Stampflehm,
- die Entwicklung verbesserter Einbau- und Verklebungsverfahren,
- die Langzeitstabilität der Messung mit DFOS.

Ergänzend wird empfohlen, die theoretischen Materialmodelle, die auf den einachsigen Materialkennwerten basieren, für die Anwendung der FE-Modelle weiterzuentwickeln und diese Modelle so zu kalibrieren, sodass sie feuchteabhängige und zeitabhängige Verformungen realitätsnah abbilden können. Die Herstellung der Probekörper hat Aufschluss über verschiedene Verdichtungsverfahren gegeben. Neben dem automatisierten und pneumatischen Stampfen hat Pressen vielversprechende Ergebnisse gezeigt. Bei alternativen Herstellungsverfahren ist neben dem Material Lehm auch die Beanspruchung der Schalung und das Potential Einbauteile -z.B. Verstärkungen - zu integrieren, zu berücksichtigen.

6.2 Potenzial für Demonstrationsvorhaben

Ein historisches Bauwerk aus Stampflehm von 1820 (<https://www.kuladig.de/Objektansicht/KLD-306522>) zeigt, dass fünf Geschoße aus Lehm machbar und dauerhaft sind. Soll zukünftig das Potential von Stampflehm für ressourceneffiziente Bauweisen auch masserelevant genutzt werden, muss unter anderem der Nachweis konform mit den europäischen Regelwerkstandards für den Einsatz für mehrgeschoßige Bauwerke erbracht werden. Die Sondierung zeigt Potenzial für ein nachfolgendes Demonstrationsprojekt, das Stampflehmkonstruktionen im realen Maßstab an einem Gebäude oder Bauteil erprobt. Ein solches Projekt würde die Brücke zwischen Laborforschung und industrieller Anwendung schlagen. Verformungsmessungen an mehrgeschoßigen Bauwerken über längere Zeiträume liefern wiederum wertvolle Daten, die das Verhalten des Baustoffs Lehm zunehmend besser abbilden.

Demonstrationsvorhaben bieten damit die Chancen zur Erprobung von DFOS als Monitoringtool für Schwinden, Kriechen, Rissbildung und Belastungsumlagerungen in situ und die Validierung der Produktionsprozesse (Materialrezepturen, Verdichtung, Fertigteilproduktion). Als Herausforderung ist die Materialvariabilität und damit die notwendige Anpassung von Materialkennwerten zu nennen. Diese Untersuchungen zur Feuchteabhängigkeit und Trocknungsprozesse sind zeitlich anspruchsvoll, sind aber zur Qualitätssicherung im Rahmen abgestimmter Herstellungs-, Prüf- und Messverfahren notwendig. Als Risiken bei DFOS Messverfahren der Verbund von Messkabel und Lehm über längere Zeit zu sehen. Auch sind Maßstabsfaktoren zwischen Laborversuch und in-situ Messungen noch nicht bekannt.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Materialkennwerte im numerischen Modell.....	23
Tabelle 2: Übersicht der Verfahren des Proctor-Versuchs.....	30
Tabelle 3: Übersicht der Spannungen sowie Dehnungen (laut Kolbenweg) bei der Bruchlast	32
Tabelle 4: Statistische Auswertung der Elastizitätsmodule im zweiten, dritten und zehnten Belastungszyklus.....	33
Tabelle 5: Statistische Auswertung der Zylinderdruckfestigkeit.....	33
Tabelle 6: Auswertung des Trocknungsschwindmaßes	34
Tabelle 7: Vergleich der experimentell und numerisch ermittelten Ergebnisse.....	41

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Untersuchung der Klebstoffe während der Aushärtung (von oben: Lehmschlicker, Modellgips, Gusskeramik, Modellgips und Lehmschlicker)	17
Abbildung 2: Druckversuch vom Prüfkörper V1 mit vier unterschiedlichen Klebstoffen von Sensorkabeln (von links: Flexkleber, Fliesenkleber; Gusskeramik und Ankerkleber)	18
Abbildung 3: Herstellung der Prüfkörper mit pneumatischem Stampfhammer	19
Abbildung 4: Prüfeinrichtung während der Belastungsprüfung in der Werkshalle von LTE, Schlins	22
Abbildung 5: Detaillage der Messsensoren an der Lehmkappendecke	22
Abbildung 6: Kraft-Dehnungs-Diagramm von DFOS 3 (Gusskeramik) und Referenzmessung mit DD1-3 im Bereich der zyklischen Belastung	25
Abbildung 7: Kraft-Dehnungs-Diagramm von DFOS 3 (Gusskeramik), Referenzmessung mit DD1-3	26
Abbildung 8: Druckversuch vom Prüfkörper D1 mit aufgeklebten (Farbe gelb) und eingestampften (Farbe blau) Sensorkabeln.....	27
Abbildung 9: Kraft-Dehnungs-Diagramm eingestampfter Sensorkabel und DD1-6 in vertikaler Richtung im Bereich der zyklischen Belastung, Nordseite	28
Abbildung 10: Kraft-Dehnungs-Diagramm eingestampfter Sensorkabel und DD1-6 in vertikaler Richtung, Nordseite.....	28
Abbildung 11: Kraft-Dehnungs-Diagramm aufgeklebten Sensorkabel (Verbund mit Gusskeramik und Flexkleber) und DD1-1 in vertikaler Richtung, Nordseite	29
Abbildung 12: Kraft-Dehnungs-Diagramm aufgeklebten Sensorkabel (Verbund mit Gusskeramik und Flexkleber) und DD1-1 in vertikaler Richtung im Bereich der zyklischen Belastung, Nordseite	29
Abbildung 13: Rohdichte in Abhängigkeit von Verdichtungsenergie und Wassergehalt	31
Abbildung 14: Zylinderdruckfestigkeit in Abhängigkeit von Verdichtungsenergie und Wassergehalt	31
Abbildung 15: Zylinderdruckfestigkeit in Abhängigkeit von Rohdichte	32
Abbildung 16: Spannungs-Dehnungs-Diagramme von ZLB2 während zyklischer Belastung	34
Abbildung 17: Prüfkörper mit Messmarke im Detail	35
Abbildung 18: Kraft-Dehnungs-Diagramm: Dehnungsmessung an der Oberseite der Lehmkappendecke mit DD1, DIC und DFOS.....	37
Abbildung 19: Kraft-Dehnungs-Diagramm: Dehnungsmessung an der Unterseite der Lehmkappendecke mit DD1, DIC und DFOS.....	38
Abbildung 20: Dehnungen entlang des Channels 2 (eingestampfte DFOS im Bereich von DD1-2 und DD1-5) in Abhängigkeit von Zeit und Position. Rechts: Dehnung entlang des Channels 2 zum Zeitpunkt 11:28:42 (992 s nach dem Beginn der Belastungsprüfung, entspricht der Belastung 65 kN)	39
Abbildung 21: Dehnungen entlang des Channels 4 (aufgeklebte DFOS im Bereich von DD1-2, DD1-3, DD1-5 und DD1-6 in Abhängigkeit von Zeit und Position. Rechts: Dehnung entlang des Channels 4 zum Zeitpunkt 11:28:42 (992 s nach dem Beginn der Belastungsprüfung, entspricht der Belastung 65 kN)	39

Abbildung 22: Messergebnisse der DD1 (rot) und DFOS (aufgeklebt: gelb und eingestampft: blau) der Dehnungen an der Position von DD1-2 und DD1-5; links: Ausschnitt im Bogenstich, rechts: gemessene Dehnungsverteilung über die Bogendicke	40
Abbildung 23: Verlauf der Hauptspannungen bei bei 65 kN aus numerischem Modell [N/mm ²]....	41
Abbildung 24: Verlauf der Hauptgesamtdehnungen bei 65 kN aus numerischem Modell [%].....	42
Abbildung 25: Verlauf der Hauptspannungen bei Bruchlast 156 kN aus numerischem Modell [N/mm ²].....	42
Abbildung 26: Belastung der Lehmkappendecke.....	43
Abbildung 27: Messanordnung im Grundriss: Verformungsmessungen an Lehmkappendecke.....	44
Abbildung 28: Vorläufige Messergebnisse der vertikalen Verformungen	44

Literaturverzeichnis

- [1] v. W. F. a. R. R. W. Schwarz Hrsg, „Ingenieur geodäsie,“ 2018. [Online]. Available: <http://www.springer.com/>.
- [2] V. Boroz, A. Vorwagner, D. Prammer und W. Lienhart, „Application of Embedded Distributed Fiber Optic Sensors on a Highway Bridge as a Support for Bridge Inspections,“ *14th Central Euro-pean Congress on Concrete Engineering*, p. 268–276, 2024.
- [3] W. Lienhart, T. Moser und L. Strasser, „Large scale monitoring of a highway bridge with remote sensing and distributed fiber optic techniques during load tests,“ *11th European Workshop on Structural Health Monitoring*, 2024.
- [4] A. Koutous und E. Hilali, „Compression stress-strain curve of rammed earth: Measuring and modelling,“ *Moderner Lehm-bau 2002*, 2002.
- [5] V. Maniatidis, P. Walker, B. Swaney, C. Harris, C. Williams, D. Sheppard, G. Pearson, J. Renwick, J. Brewis, K. Cheng, F. Chalmers, M. Lovell, M. Waters, F. Westmoreland, I. West, M. H. Roberts, S. Cox, S. Farley, N. Barnes und T. ... Hewitt, „A Review of Rammed Earth Construction for DTi Partners inInnovation Project “Developing Rammed Earth for UK Housing.”,“ 2003.
- [6] L. Miccoli, D. V. Oliveira, R. A. Silva, U. Müller und L. Schueremans, „ Static behaviour of rammed earth: experimental testing and finite element modelling,“ *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, Bd. 48(10), Nr. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0411-7>, p. 3443–3456, 2015.
- [7] F. Volhard und U. Röhlen, *Lehm-bau Regeln Begriffe – Baustoffe – Bauteile.*, Springer Vieweg Verlag, 2009.
- [8] L. Miccoli, D. V. Oliveira, R. A. Silva, U. Müller und L. Schueremans, „Static behaviour of rammed earth: experimental testing and finite element modelling,“ *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, Bd. 48 (10), Nr. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0411-7>, pp. 3443-3456, 2015.
- [9] C. Janson, *Materialforschung Stampflehm-Ein Beitrag zur Weiterentwicklung des Baustoffes Stampflehm*, 2013.

- [10] W. Lienhart, F. Buchmayer, F. Klug und C. M. Monsberger, „Distributed fibre-optic sensing applications at the Semmering Base Tunnel, Austria,“ *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Smart Infrastructure and Construction*, p. 148–159, 2019.
- [11] O. Winckler, Bauen mit Erde: Herstellungsspezifische und zusammensetzungsabhängige Einflüsse auf die Druckfestigkeit von Stampflehm, 2020.

Kontakt:

Projektleitung:

Andreas Trummer, Iveta Wayd

Institut für Tragwerksentwurf

Technische Universität Graz

Technikerstraße 4/IV, 8010 Graz

Email: tragwerksentwurf@tugraz.at

Projektpartner:innen:

Labor für Konstruktiven Ingenieurbau

Technische Universität Graz

Inffeldgasse 24, 8010 Graz

Email: lki@tugraz.at

Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme

Technische Universität Graz

Steyrergasse 30/II, 8010 Graz

Email: office.igms@tugraz.at

