Aktuelle Forschung zum lasttragenden Strohballenbau in Deutschland

Mechanische Untersuchungen im Forschungsprojekt LaStrohBau

Mechnical investigations in the LaStrohBau research project

Christopher Taube | Bauhaus-Universität Weimar

christopher.taube@uni-weimar.de | RG

Projektgruppe

30 JAHRE MPA life cycle material engineering.

Bauhaus-Universität Weimar

Modellierung und Simulation - Konstruktion

ZIEGELHOF ARCHITEKTUR

KEHO STROH IN FORM

Hof Herten

FASBA

Projektförderung

Freistaat Thüringen

ELER
FörderInitiative Ländliche Entwicklung in Thüringen
Europäischer Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raumes

Assoziierter Partner

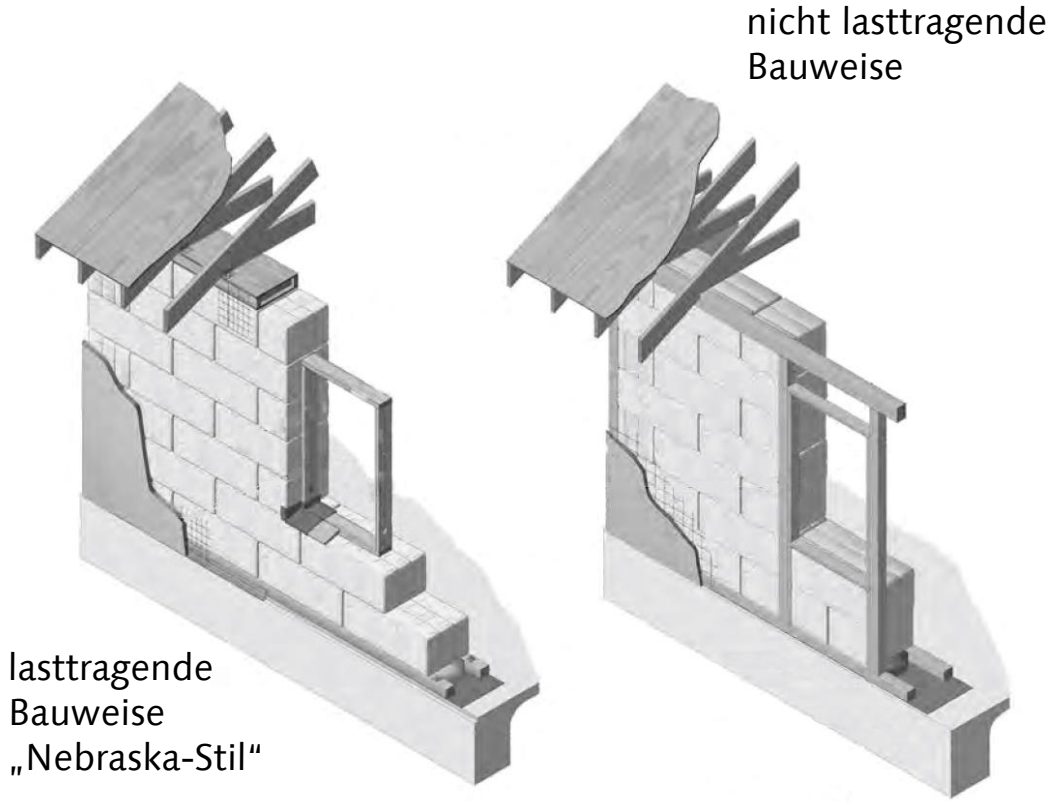
Freistaat Thüringen

Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum

Lasttragendes Bauen mit Strohballen

Load-bearing straw bale construction

- Einsatz hochverdichteter Quaderstrohballen im Wandverband zum vertikalen und horizontalen Lastabtrag
- kombinierter Dämm- und Konstruktionswerkstoff
- niedriger Primärenergieinhalt
- Speicherung von atmosphärischem CO_2
- schnelle Errichtung großer Wandflächen durch einfaches Aufschichten
- aufwendige Vorplanung und zeitkritischer Bauablauf (Witterungsanfälligkeit)

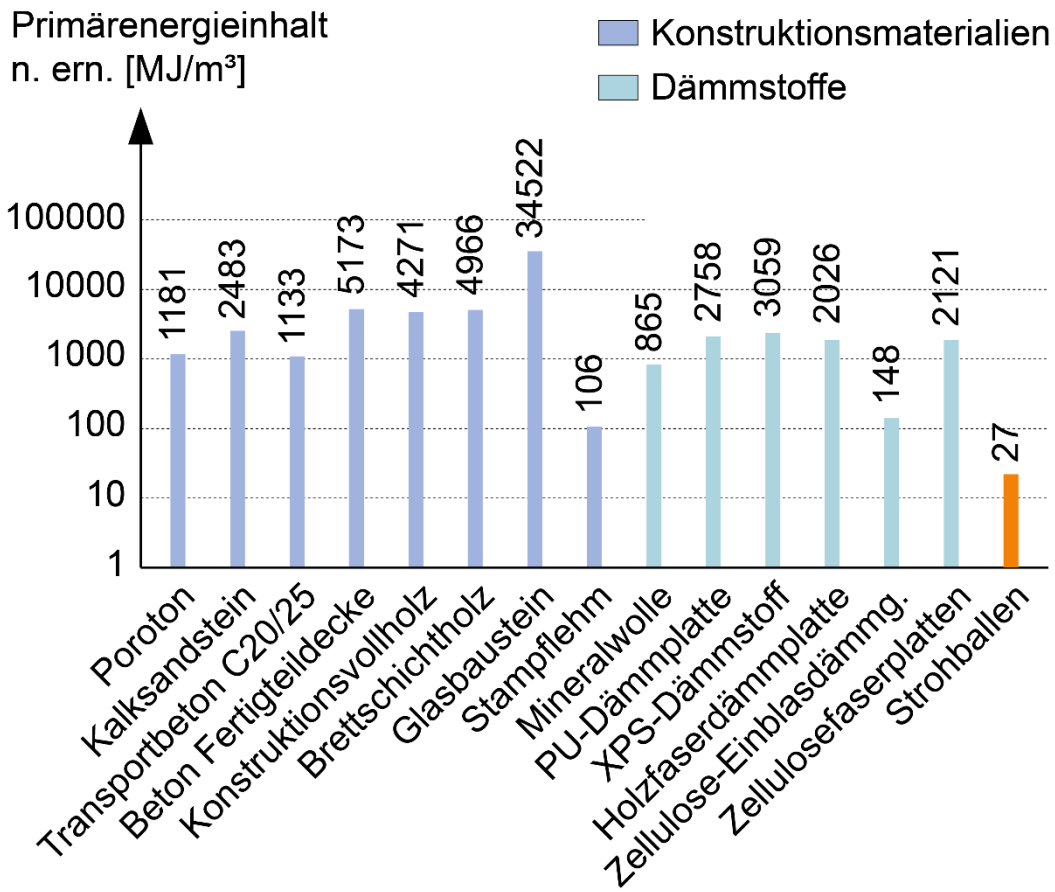


Bauweisen unter Verwendung von Strohballen als Dämm- und Konstruktionswerkstoff [ICC 2017]
Construction methods using straw bales as insulation and construction material [ICC 2017]

Lasttragendes Bauen mit Strohballen

Load-bearing straw bale construction

- Einsatz hochverdichteter Quaderstrohballen im Wandverband zum vertikalen und horizontalen Lastabtrag
- kombinierter Dämm- und Konstruktions-werkstoff
- niedriger Primärenergieeinhalt
- Speicherung von atmosphärischem CO_2
- schnelle Errichtung großer Wandflächen durch einfaches Aufschichten
- aufwendige Vorplanung und zeitkritischer Bauablauf (Witterungsanfälligkeit)



Primärenergiegehalt aus nicht erneuerbaren Energieträgern für verschiedene Konstruktions- und Dämmmaterialien nach [Schneider 2015]
Primary energy content from non-renewable energy sources for various construction and insulation materials according to [Schneider 2015]

Lasttragendes Bauen mit Strohballen

Load-bearing straw bale construction

- Einsatz hochverdichteter Quaderstrohballen im Wandverband zum vertikalen und horizontalen Lastabtrag
- kombinierter Dämm- und Konstruktionswerkstoff
- niedriger Primärenergieinhalt
- Speicherung von atmosphärischem CO_2
- schnelle Errichtung großer Wandflächen durch einfaches Aufschichten
- aufwendige Vorplanung und zeitkritischer Bauablauf (Witterungsanfälligkeit)

Aufbau eines Strohballen-Wandversuchs in der Versuchshalle der Bauhaus-Universität Weimar 2020
Setting up a straw bale wall experiment in the laboratory of the Bauhaus-Universität Weimar 2020

Zulassung im Einzelfall

Case-by-case permission

- keine allgemein bauaufsichtlich geregelte bzw. genormte Bauweise
- fehlende Auslegungskriterien und sichere Bemessungsansätze
- Zulassung im Einzelfall (ZiE) i.d.R. mit kosten- und zeitaufwendigen Gutachten und/oder Zulassungsversuchen
- hohe Einstiegshürden für Bauherr*innen und (Fach-)Planer*innen
- Strohbauweise besetzt – Stand jetzt – nur eine kleine Nische
- ZiE behindert Wirtschafltichkeit

Lasttragendes Strohballenhaus in Weimar/Ehringsdorf (oben) und zugehörige Versuche für die Zulassung im Einzelfall an der Bauhaus-Universität Weimar (unten) [MFPA 2017]
Load-bearing straw bale house in Weimar/Ehringsdorf (top) and associated case-by-case permission tests at the Bauhaus-Universität Weimar (bottom) [MFPA 2017]

Ziel der Forschungsarbeiten zum lasttragenden Strohballenbau

Aim of the research work on load-bearing straw bale construction

- langfristig: Norm
  → allgemeine Zulassung einer Bauweise, bauaufsichtlich anerkannte Regeln der Technik, (rechts-)sichere Grundlage für die (Fach-)Planung und Nachweisführung
- mittelfristig: Richtlinie
  → Vereinfachung/Beschleunigung von Zulassungsverfahren im Einzelfall durch Bereitstellung von Informationen, Planungsgrundsätzen, Materialeigenschaften, Berechnungsmodellen, fundierte Grundlage für die (Fach-)Planung und Nachweisführung

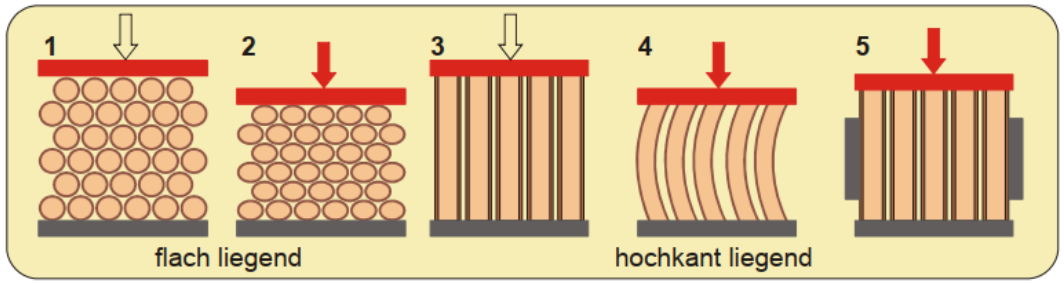
- stochastisch hinterlegte Aussagen zu mechanischen Materialeigenschaften
  → Sicherheitskonzept
- Materialmodelle (Kurzzeit- und Langzeittragverhalten)
- Modelle zur Abbildung der Balleninteraktion im Wandverband

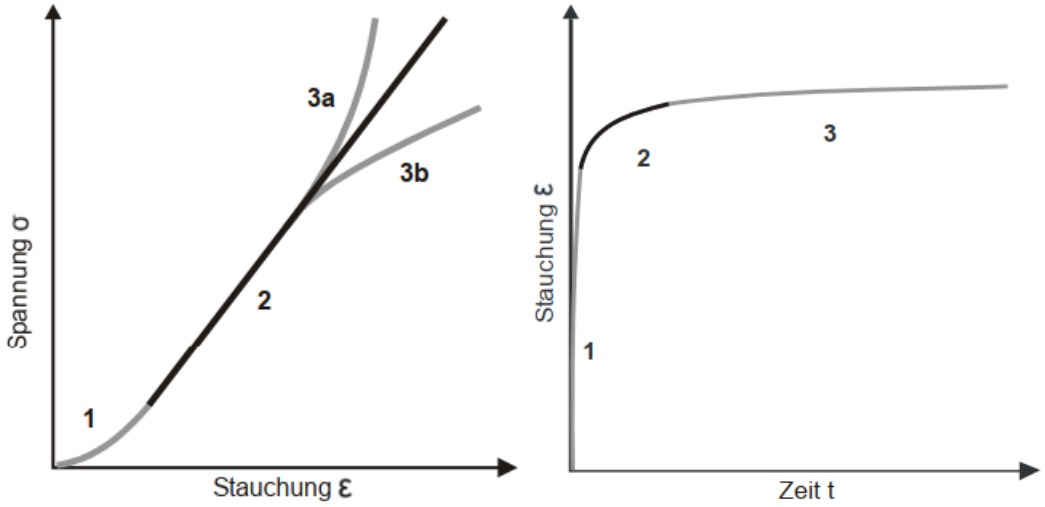
Vorangegangene Forschungsarbeiten

Previous Research Work

- Vielzahl an Kurzzeitversuchen, wenige Langzeitversuche an Einzelstrohballen
- wenige Kurzzeitversuche an Strohballenwänden unter vertikalen und horizontalen Lasten
- wenige Ansätze zur mathematischen Beschreibung des Tragverhaltens

- hauptsächlich Kleinballen
- große Variationen: Strohart, Ballengeometrien, Versuchsrandbedingungen, Lastregime, Versuchsdokumentation, erhobene Metadaten





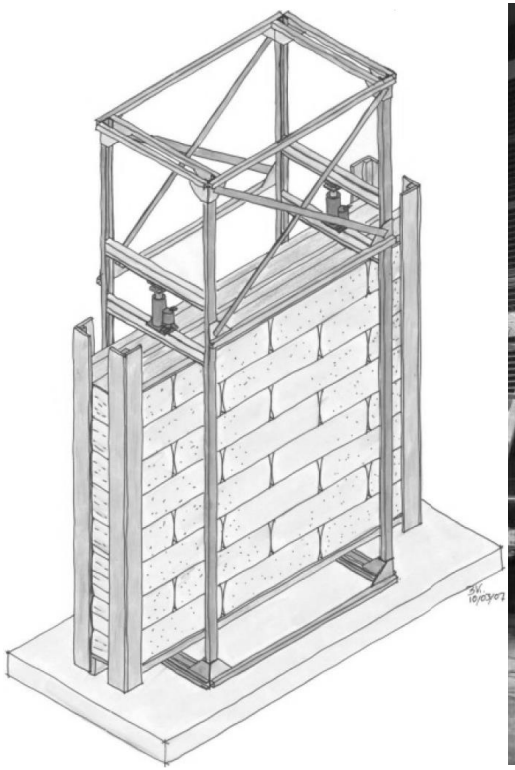
Durchführung und qualitative Auswertung experimenteller Kurz- und Langzeitdruckversuche [Krick 2008]
Implementation and qualitative evaluation of experimental short- and long-term pressure tests [Krick 2008]

Vorangegangene Forschungsarbeiten

Previous Research Work

- Vielzahl an Kurzzeitversuchen, wenige Langzeitversuche an Einzelstrohballen
- wenige Kurzzeitversuche an Strohballenwänden unter vertikalen und horizontalen Lasten
- wenige Ansätze zur mathematischen Beschreibung des Tragverhaltens

- hauptsächlich Kleinballen
- große Variationen: Strohart, Ballengeometrien, Versuchsrandbedingungen, Lastregime, Versuchsdokumentation, erhobene Metadaten



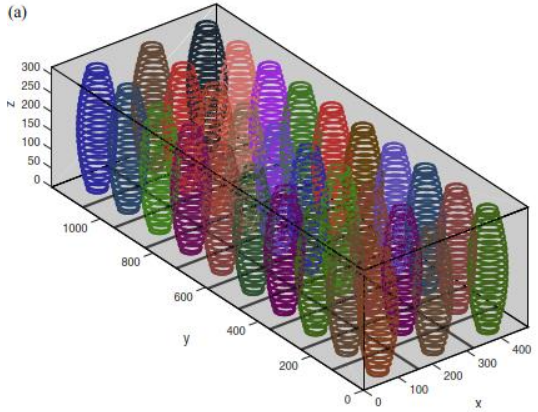
Kleinstrohballen-Wandversuche unter Vertikallasten [Krick 2008]
Small bale wall tests under vertical loads [Krick 2008]

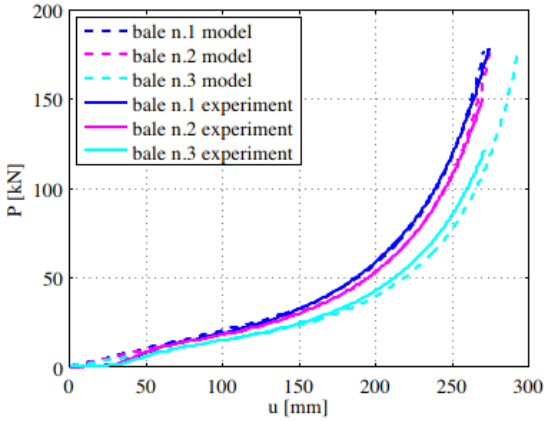
Vorangegangene Forschungsarbeiten

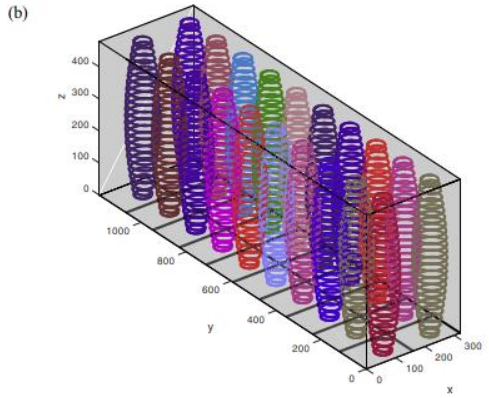
Previous Research Work

- Vielzahl an Kurzzeitversuchen, wenige Langzeitversuche an Einzelstrohballen
- wenige Kurzzeitversuche an Strohballenwänden unter vertikalen und horizontalen Lasten
- wenige Ansätze zur mathematischen Beschreibung des Tragverhaltens

- hauptsächlich Kleinballen
- große Variationen: Strohart, Ballengeometrien, Versuchsrandbedingungen, Lastregime, Versuchsdokumentation
  → kaum Vergleichbarkeit







Mathematische Beschreibung des vertikalen Tragverhaltens von Kleinstrohballen [Molari 2017, Maraldi 2018]
Mathematical formulation of the vertical load-bearing behaviour of small straw bales [Molari 2017, Maraldi 2018]

Ziele des Forschungsprojekts LaStrohBau

Goals of the LaStrohBau research project

Mechanische Untersuchungen

- Experimentelle Untersuchungen zum Kurz- und Langzeittragverhalten von Quaderstrohballen
- Erarbeitung von Materialmodellen
- Experimentelle und numerische Untersuchungen zum vertikalen und horizontalen Lastabtrag in Strohballen-wänden
- Ableitung von Anforderungen an die Ballenherstellung
- Empfehlungen für ein einheitliches mechanisches Prüfkonzept

Bauphysikalische Untersuchungen

- Experimentelle Ermittlung thermischer und feuchtetechnischer Materialparameter
- Experimentelle Untersuchungen zur hygrischen Konditionierung von Strohballen zur ermittlung bauphysikalischer Kennwerte
- Empfehlungen für ein einheitliches Prüfkonzept zur ermittlung thermischer Materialparameter

Errichtung eines Demonstratorbauwerks

Experimentelles Versuchsprogramm

Experimental test programme

- Ballenversuche zum Studium des Kurzzeittragverhaltens
  unter Variation der Rohdichte, der Lagerungsbedingungen, der Lastgeschichte

- Ballenversuche zum Studium des Langzeittragverhaltens
  unter Variation der Rohdichte, der Lagerungsbedingungen, der Lastgeschichte

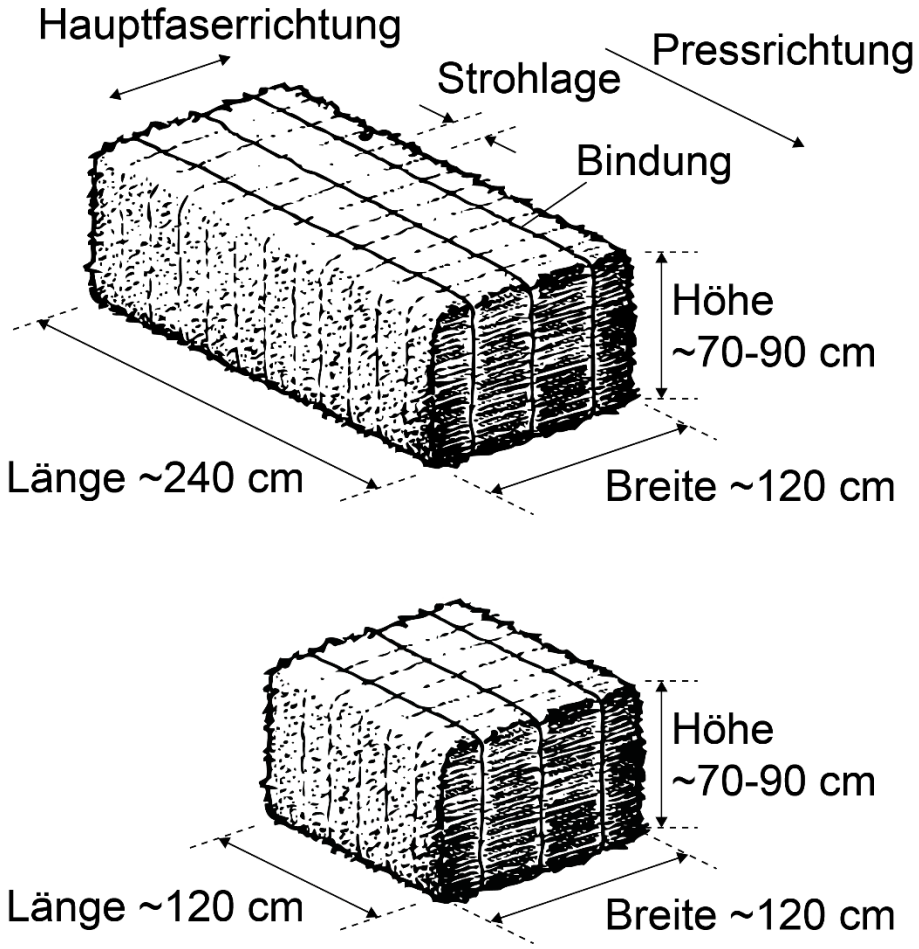
- Wandversuche zum Studium des vertikalen Lastabtrags (Kurz- und Langzeit)
  unter Variation der Lastgeschichte

- Wandversuche zum Studium des horizontalen Lastabtrags
  unter Variation der Lastgeschichte

Versuchskörper

Test specimen

- Strohart: Weizenstroh
- Standardgröße unpraktikabel, da unhandlich und schwierig gleichmäßig kontrolliert belastbar
- Versuchskörper entsprechen der halben Ballengröße
  Länge: ~ 120 cm
  Breite: ~ 120 cm
  Höhe: ~ 90 cm
  Dichte: ~ 140-200 kg/m³
- direkte Herstellung in gewünschter Länge auf dem Feld
- relativ große Maßtoleranzen (Berücksichtigung in Forschung und Praxis)

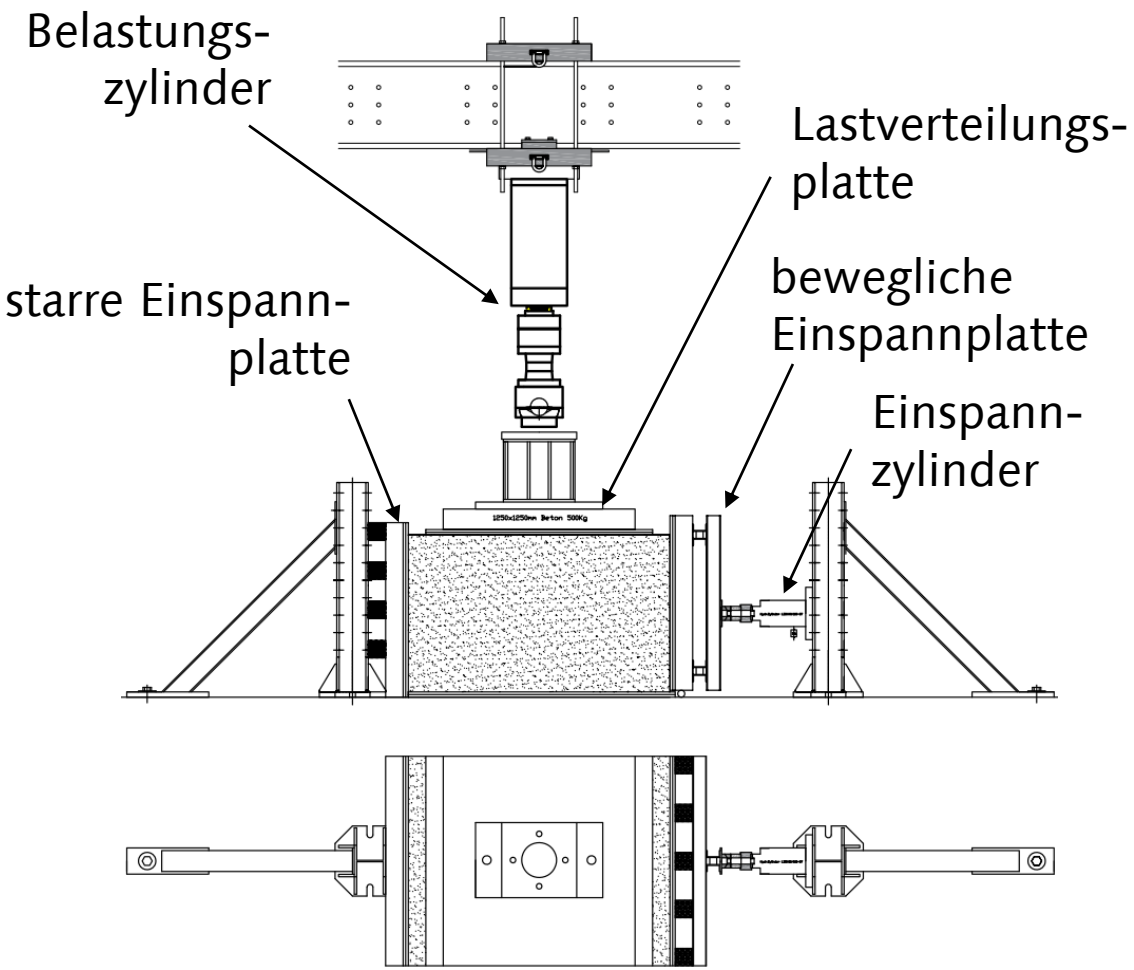


Standardballen nach [Ashour 2011] (oben) und Versuchsballen (unten)
Standard Bale according to [Ashour 2011] (top) and test specimen (bottom)

Versuchsaufbau

Test setting

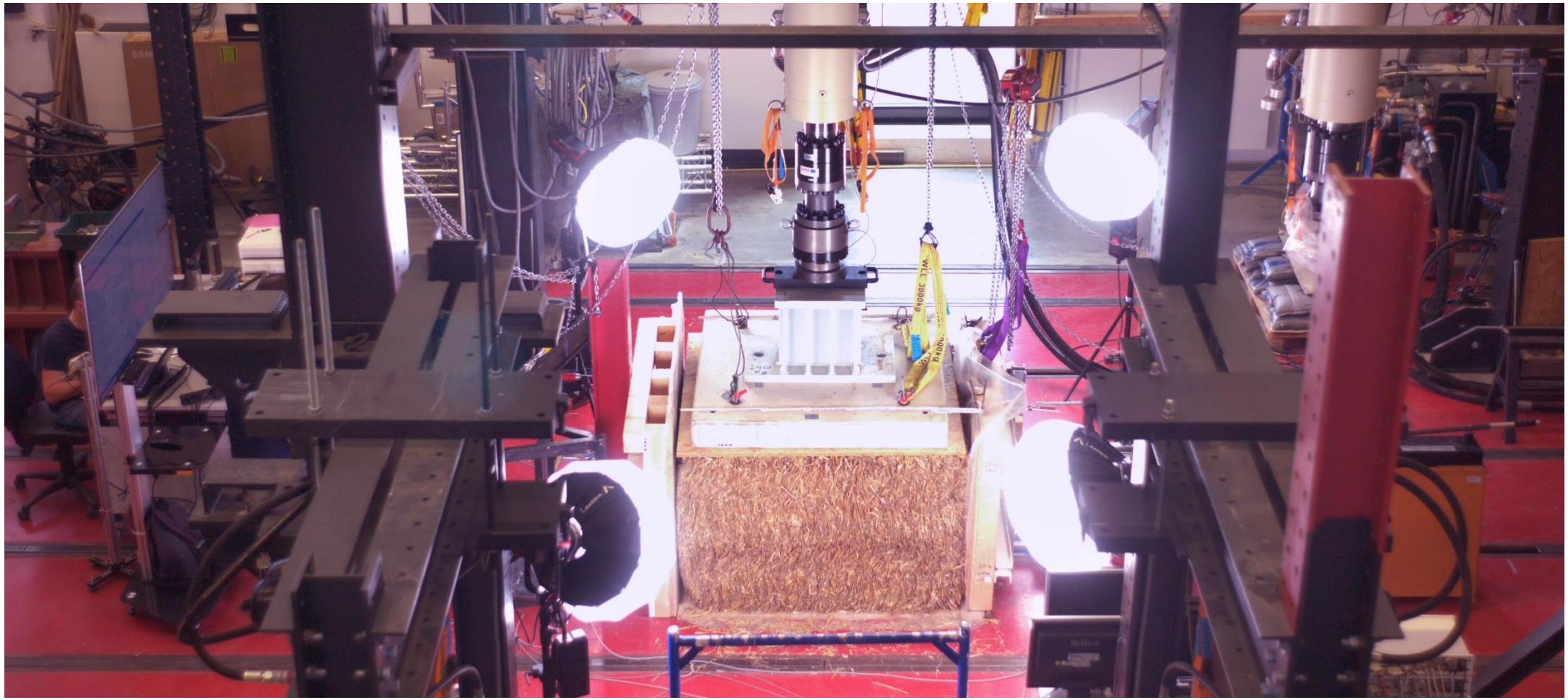
- Simulation des Einbauzustands im Wandverband
- Lagerung auf Holzplatte direkt auf dem Aufspannfeld
- seitliche Deformationsbehinderung durch eine statische und eine bewegliche ausgesteifte Holzplatte (für einige Versuche entfernt)
- reduzierte Reibung durch Kunststofffolien
- vertikale Belastung durch Servohydraulikzylinder
- Lastverteilung durch Stahlbetonplatte



Versuchsstand im Aufriss (oben) und Grundriss (unten) mit Darstellung der Lagerung und Belastungstechnik
Test setting in elevation (top) and layout (bottom) with representation of support conditions and loading technology

Versuchsaufbau

Test setting

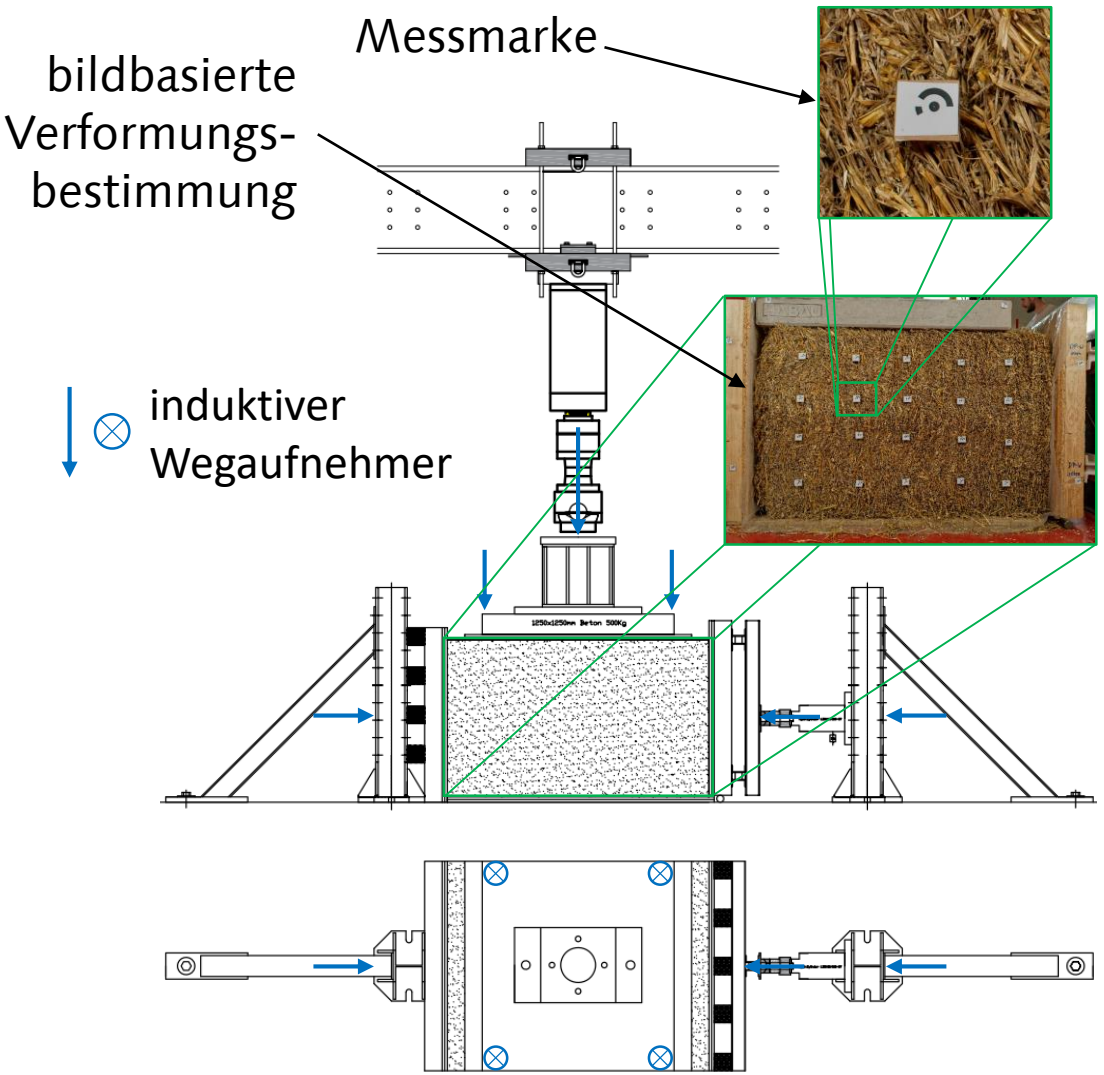


Versuchsstand in der Versuchstechnischen Einrichtung | Test setting in the laboratory

Messtechnik

Sensor technology

- Messung von Zylinderkraft und Zylinderweg am vertikalen und horizontalen Zylinder
- Wegmessung mit induktiven Wegaufnehmern an der Lastverteilungsplatte (Tastversuche)
- optische Wegmessung mithilfe von Messmarken an der Lastverteilungsplatte
- Optische Aufnahme der Ballendeformation mithilfe von Messmarken (Tastversuche)
- Optische Aufnahme der Ballendeformation mittels Optical-Flow-Algorithmen



Versuchsstand im Aufriss (oben) und Grundriss (unten) mit darstellung der Messstellen
Test setting in elevation (top) and layout (bottom) with representation of the measurement points

Versuchsdurchführung

Experimental procedure

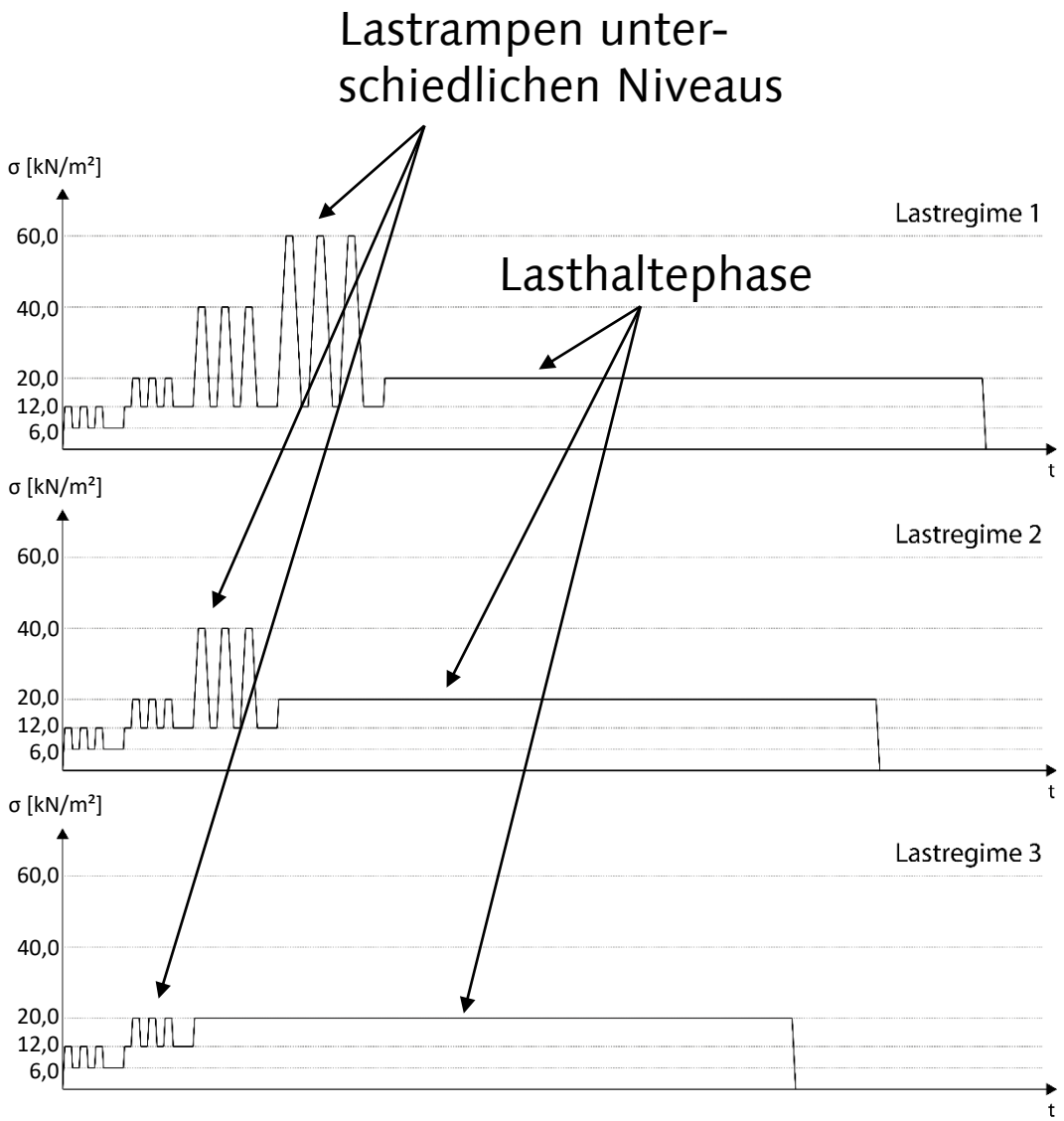
- rampenförmige Lastregime mit unterschiedlichen Höchstlastniveaus zum Studium des Be- und Entlastungsverhaltens

  Lastrampen: 20/40/60 kN/m²
  Lastgeschwindigkeit: 1,0 kN/m²/s
  Haltephasen: 20 s/60 s/30 min

  → Simulation von Extrembelastungen

- 30-minütige Lasthaltephase bei 20 kN/m² zum Versuchsende zum Studium des Kurzzeitkriechens

  → Simulation des Gebrauchslastbereichs



Lastregime mit unterschiedlichen Lastintensitäten (Gebrauchs- und Extremlasten)
Load regime with different load intensities (Serviceability and extreme loads)

Randbedingungsabhängige Last-Verformungsbeziehungen

Boundary-condition-dependent load-deformation relationship

- Druckversuche an seitlich eingespannten und seitlich nicht eingespannten Ballen
- Anfangsrohdichte konstant (140 kg/m³)
- Lastregime konstant (Maximalspannung: 60 kN/m²)

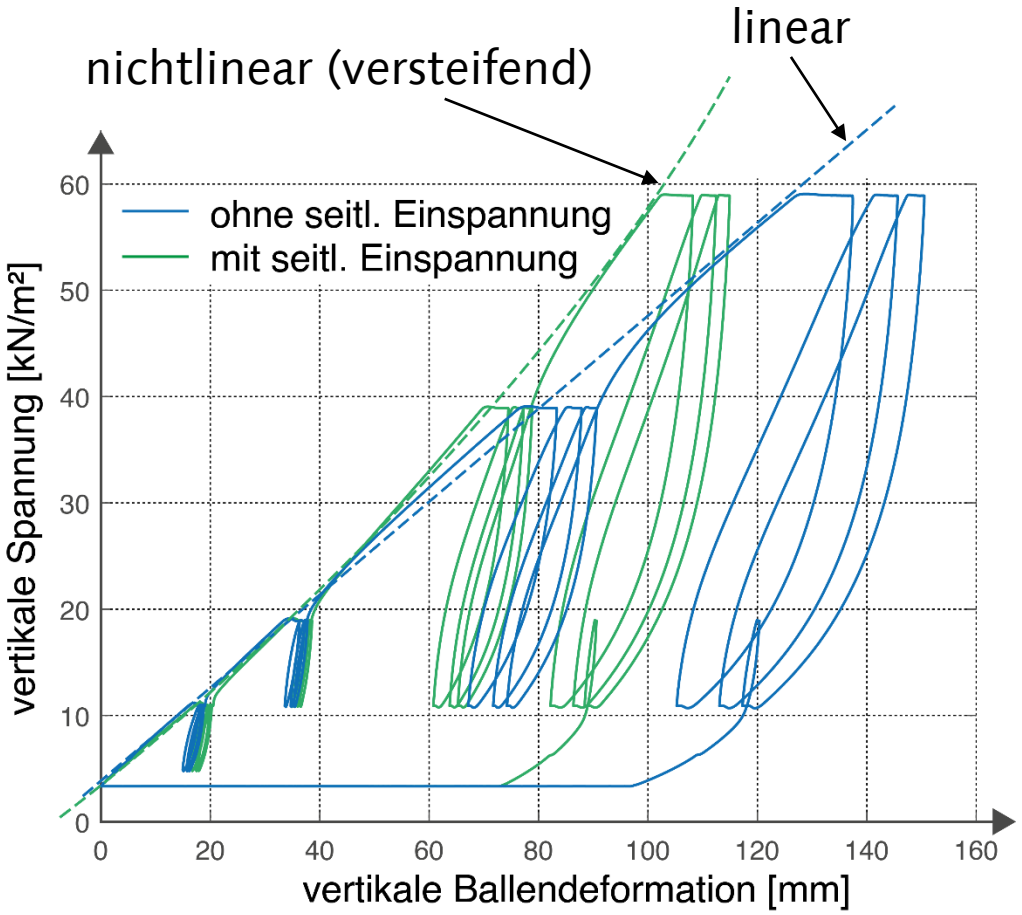
Strohballen der Anfangsrohdichte 140 kg/m³ im Druckversuch mit (links) und ohne (rechts) seitliche Deformationsbehinderung
Straw bale with initial density of 140 kg/m³ in compression test with (left) and without (right) lateral deformation constraints

Randbedingungsabhängige Last-Verformungsbeziehungen

Boundary-condition-dependent load-deformation relationship

- qualitatives Last-Verformungsverhalten unterschiedlich in hohen Lastbereichen
- annähernd lineares Verhalten nicht eingespannter Ballen
- versteifendes Verhalten eingespannter Ballen

  → Stabilisierung der Strohlagen durch Querdruck infolge verhinderter Querdehnung
  → Komprimierung des Ballens ohne seitl. Ausweichen



Last-Verformungsverhalten von vertikal belasteten Großballen mit und ohne seitliche Deformationsbehinderung
Load-deformation behaviour of vertically loaded big bales with and without lateral deformation restraint

Rohdichteabhängige Last-Verformungsbeziehungen

Density-dependent load-deformation relationship

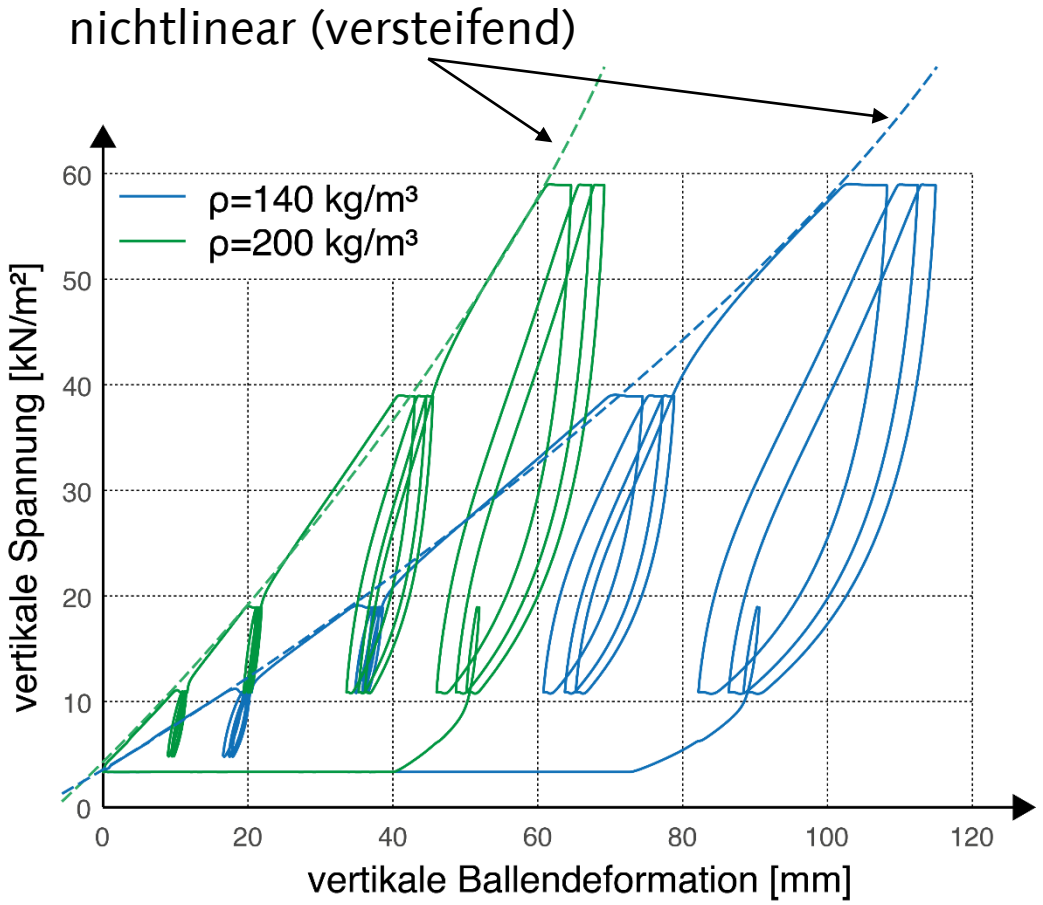
- Druckversuche an Ballen unterschiedlicher Anfangsrohdichte
- Randbedingungen konstant (seitlich Deformationsbehindert)
- Lastregime konstant (Maximalspannung: 60 kN/m²)

Strohballen der Anfangsrohdichten 140 kg/m³ (left) and 170 kg/m³ (rechts) im Druckversuch mit seitlicher Deformationsbehinderung
Straw bales of initial densities 140 kg/m³ (left) and 170 kg/m³ (right) in compression test with lateral deformation restraint

Rohdichteabhängige Last-Verformungsbeziehungen

Density-dependent load-deformation relationship

- qualitatives Last-Verformungsverhalten unabhängig von der Anfangsrohdichte (zunehmende Versteifung mit zunehmender Last)
- Ballensteifigkeit steigt signifikant mit steigender Anfangsrohdichte
- Kurzzeitverformungen betragen bei 200 kg/m³ noch ca. 60 % der Verformungen bei 140 kg/m³

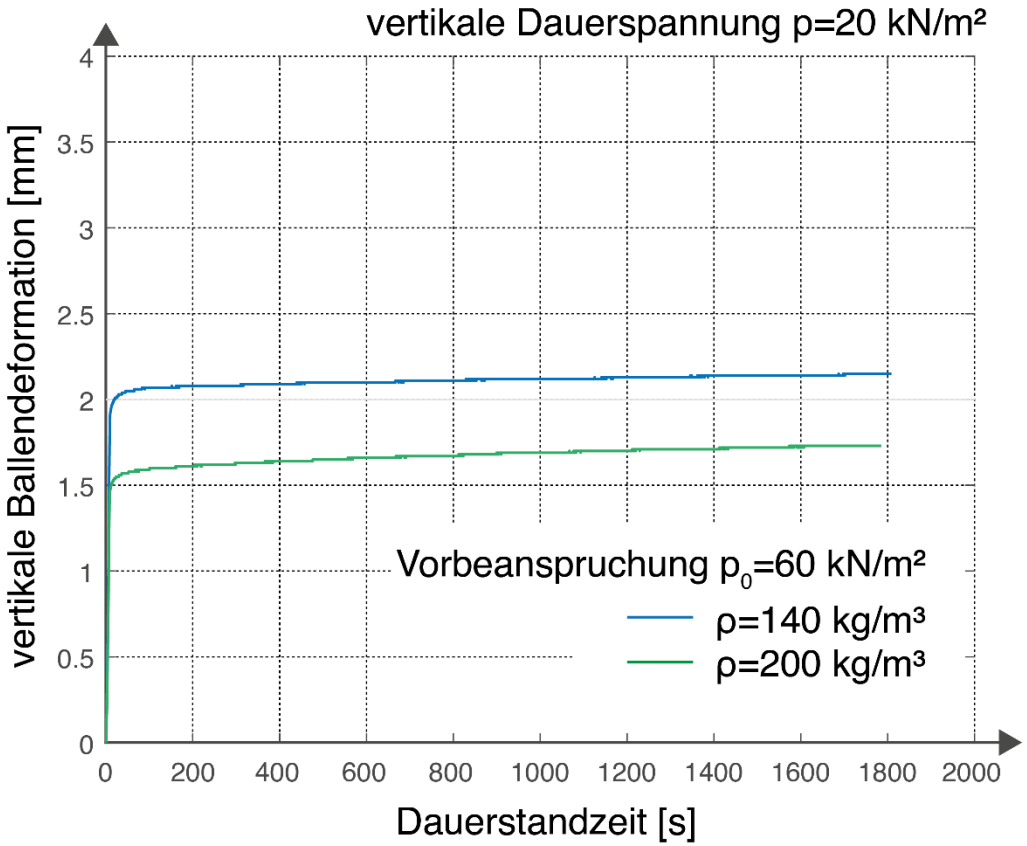


Last-Verformungsverhalten von vertikal belasteten Großballen unterschiedlicher Anfangsrohdichte
Load-deformation behaviour of vertically loaded big bales with different initial density

Rohdichteabhängiges Kurzzeit-Kriechverhalten

Density-dependent short-term creep behaviour

- einheitliche Vorbeanspruchung der Ballen mit Rampen bis jeweils 60 kN/m², anschließend Dauerspannung mit 20 kN/m² über 30 Minuten
- qualititatives Kriechverhalten unabhängig von der Rohdichte (stetig abnehmende Deformationszunahme über die Zeit)
- Kurzzeitkriechverformungen sinken signifikant mit steigender Anfangsrohdichte
- gut für prinzipielle Einschätzung, jedoch keine belastbaren Aussagen für tatsächliches Langzeitverhalten

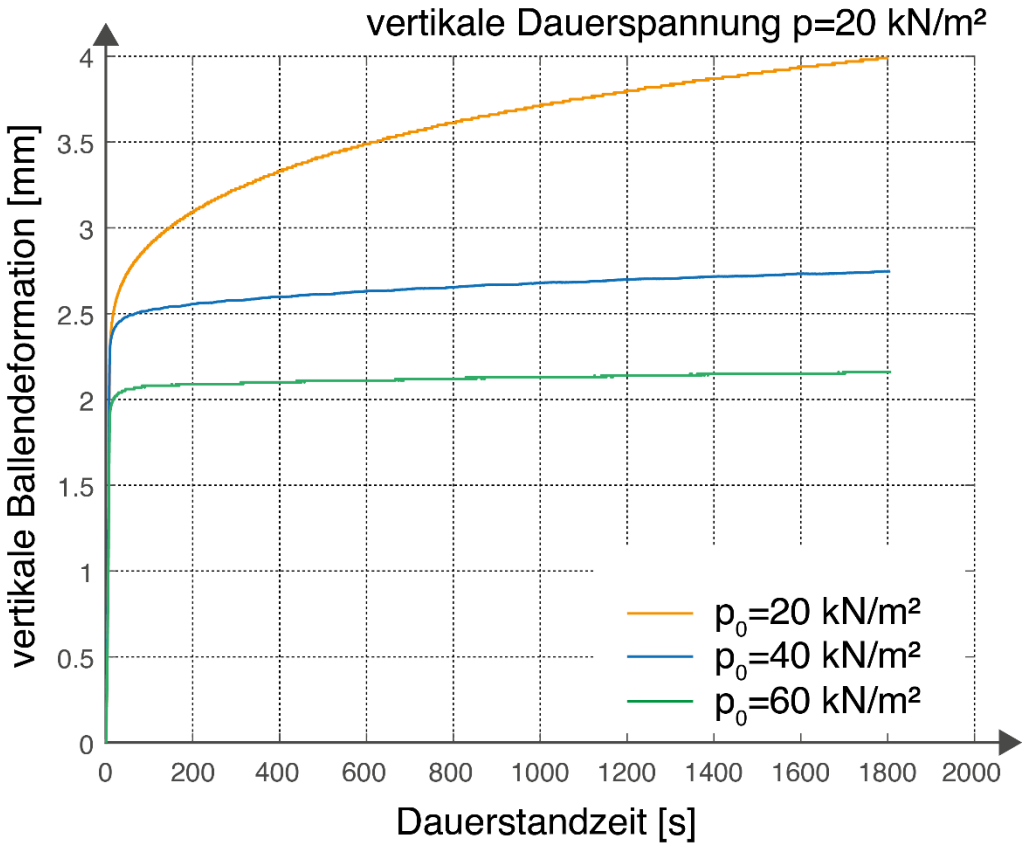


Kurzzeit-Kriechverhalten von vertikal belasteten Großballen unterschidlicher Anfangsrohdichte
Initial density-dependend short-term creep-behaviour of vertically loaded big bales

Lastgeschichtenabhängiges Kurzzeit-Kriechverhalten

Load-history-dependent short-term creep behaviour

- unterschiedliche Vorbeanspruchung der Ballen mit Rampen bis 20/40/60 kN/m², anschließend Dauerspannung mit 20 kN/m² über 30 Minuten
- qualititatives Kriechverhalten unabhängig von der Lastgeschichte (stetig abnehm-ende Deformationszunahme über die Zeit)
- Kurzzeitkriechverformungen sinken signifikant mit steigender Vorbeanspruchung
- gut für prinzipielle Einschätzung, jedoch keine belastbaren Aussagen für tatsächliches Langzeitverhalten

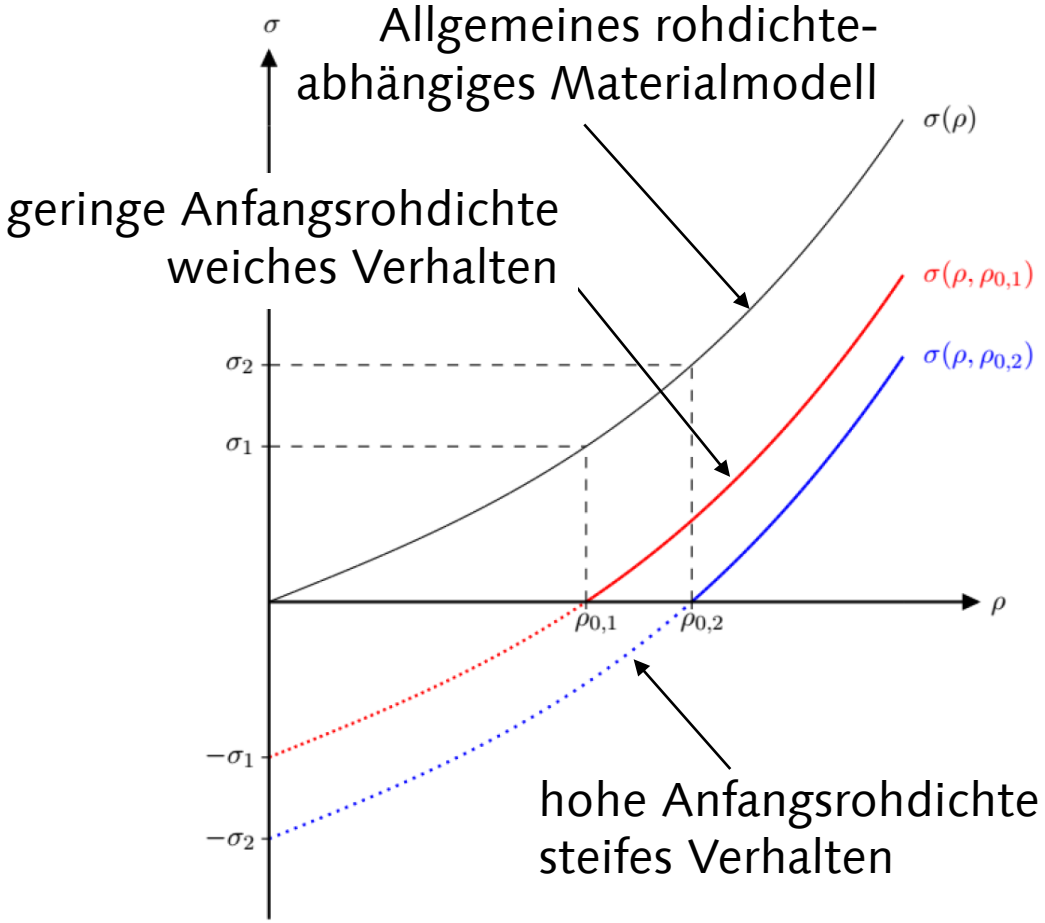


Kurzzeit-Kriechverhalten von vertikal belasteten Großballen in Abhängigkeit der Lastgeschichte
Load-history-dependend short-term creep-behaviour of vertically loaded big bales

Auswertung der Last-Rohdichteabhängigkeit

Evaluation of the load-density-dependency

- Ballensteifigkeit steigt sowohl mit zunehmender Last als auch mit zunehmender Anfangsrohdichte
- Kurzzeitkriechen verringert sich sowohl mit zunehmender Vorbeanspruchung als auch mit zunehmender Anfangsrohdichte
- Aufgrund der großen Verformungen besteht eine große Lastabhängigkeit der Rohdichte (Komprimierung des Ballens)
- Last-Verformungsbeziehungen genügen allein nicht, die Rohdichteabhängigkeit muss direkt mit einbezogen werden



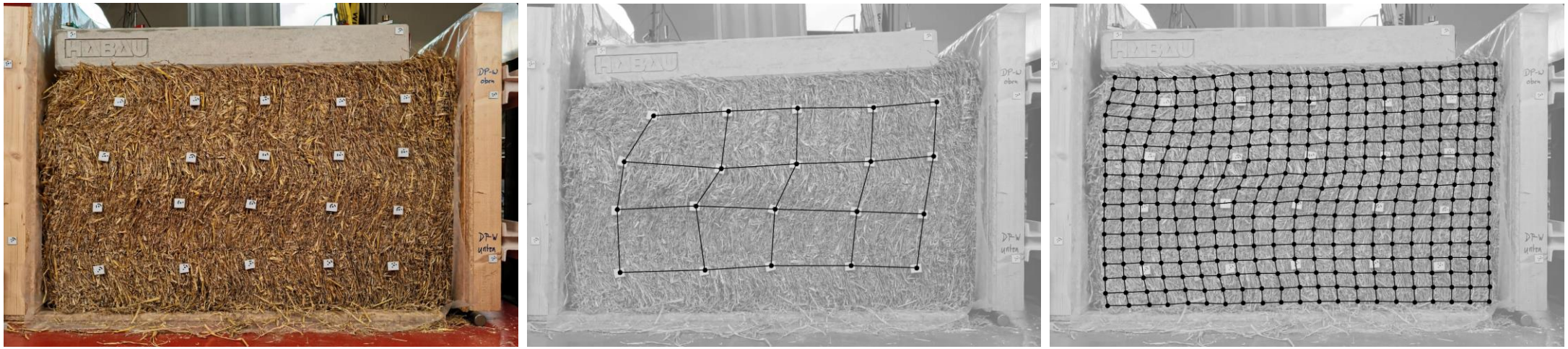
Rohdichteabhängiges Materialmodell für das Uniaxiale Tragverhalten von Großballen
Density-dependend material law for the uniaxial load-bearing behavior of big bales

Materialmodelle für das mehraxiale Strohballen-Tragverhalten

Material models for the multi-axial load-bearing-behaviour

- Strohballen verhalten sich unter Last ortotrop (nicht in allen Raumrichtungen identisch)
- genaue Auswertung der vertikalen und horizontalen Deformationen in belasteten Quaderstrohballen unter Nutzung optischer Messverfahren nötig

→ Ableitung von mehraxialen orthotropen Materialmodellen (u. a. Abbildung der Querdehnung unter Längsdruckspannungen)



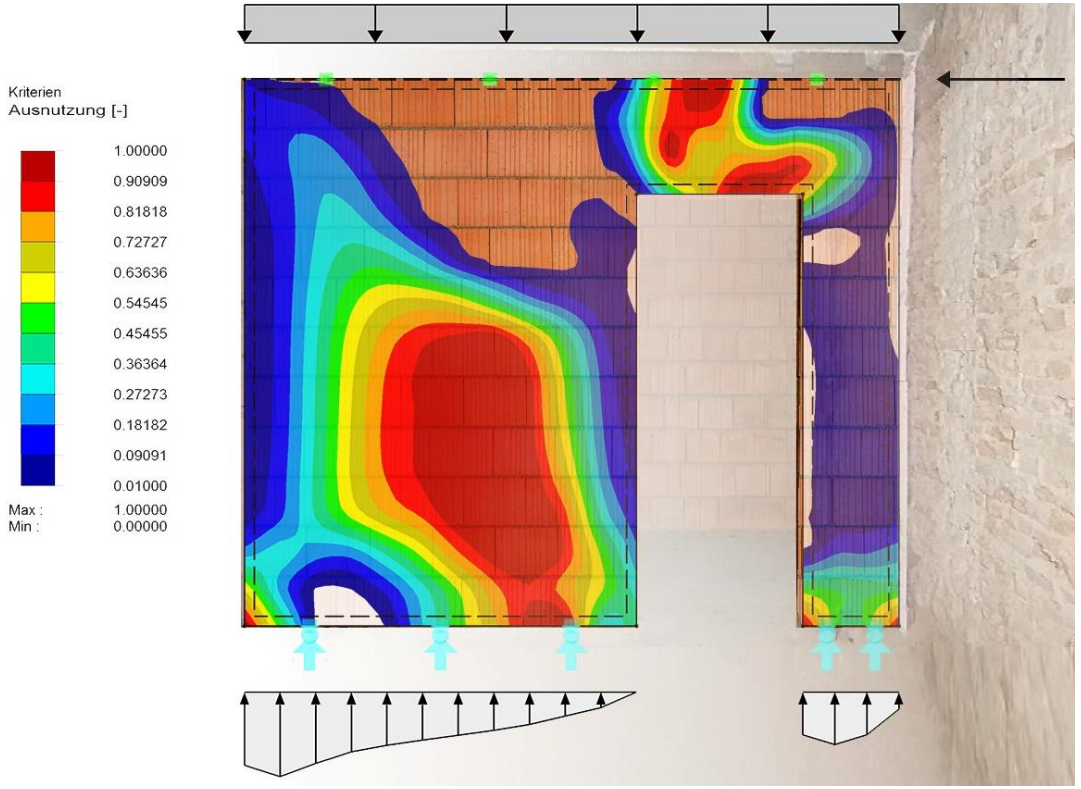
Deformation des asymmetrisch belasteten Testballens: Ausgangsbilder (links), mit Messmarken (Mitte) sowie mit Optical Flow ausgewertete Deformationen (rechts)

Deformation of an asymmetrically loaded trial specimen: Initial images (left), Deformations evaluatiated with measurement targets (middle) and with optical flow (right)

Simulation und Experiment zur Studie des Wandtragverhaltens

Simulation and experiment for the investigation of the wall load bearing behaviour

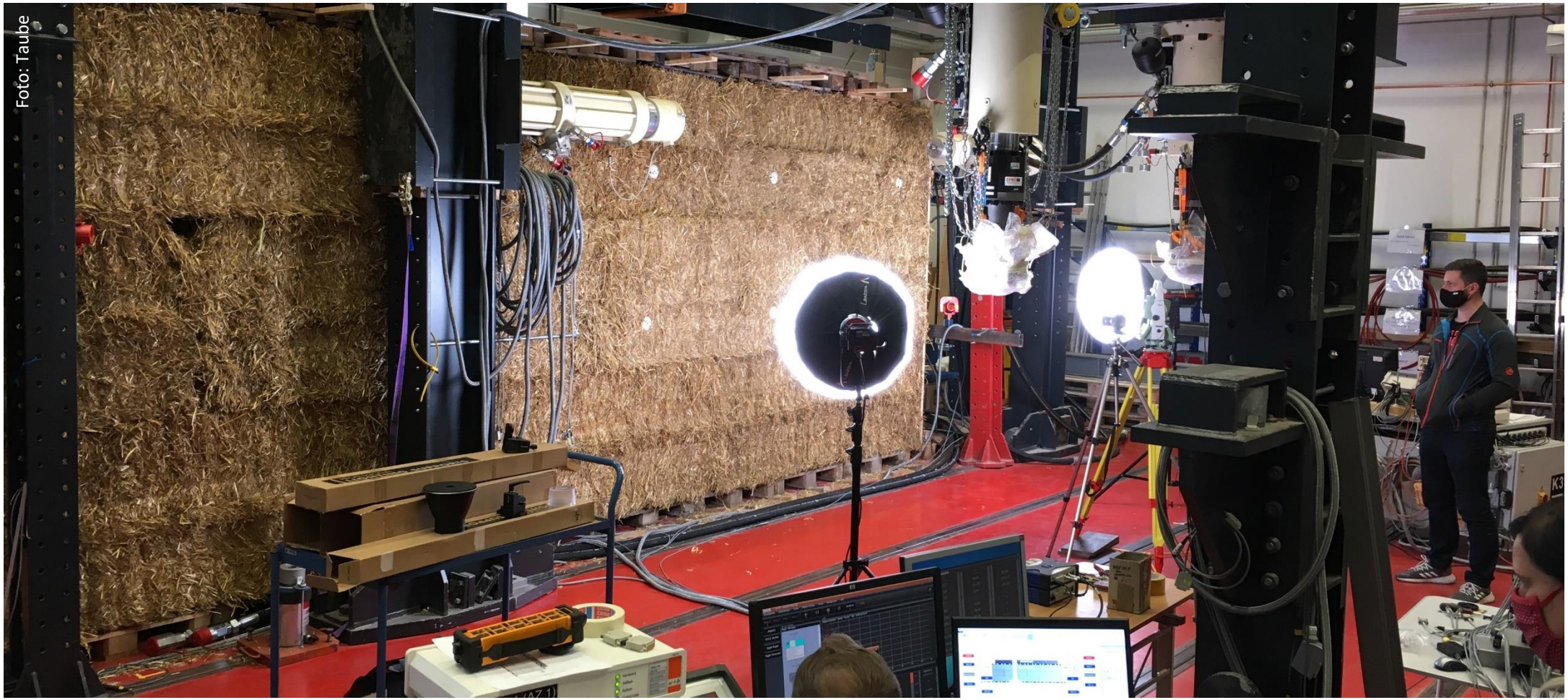
- numerische Modellbildung und Simulation des Wandtragverhaltens unter vertikaler und horizontaler Beanspruchung auf Grundlage der Materialmodelle aus den Einzelballenversuchen
- Validierung der numerischen Modellbildung anhand experimenteller Wandversuche
- Parameterstudien unter Variation der Wandgeometrie, der Dichteverteilung und der Lastszenarien
- Ableitung von Empfehlungen zur Auslegung von Strohballenwänden zum vertikalen und horizontalen Lastabtrag



Simulation des Wandtragverhaltens einer Porotonsteinwand [ITE 2022]
Simulation of the wall bearing behaviour of a porotone brick wall [ITE 2022]

Simulation und Experiment zur Studie des Wandtragverhaltens

Simulation and experiment for the investigation of the wall load bearing behaviour



Strohballenwand unter Horizontallasten in der Versuchstechnischen Einrichtung | Straw bale wall subjected to horizontal loads in the laboratory

Simulation und Experiment zur Studie des Wandtragverhaltens

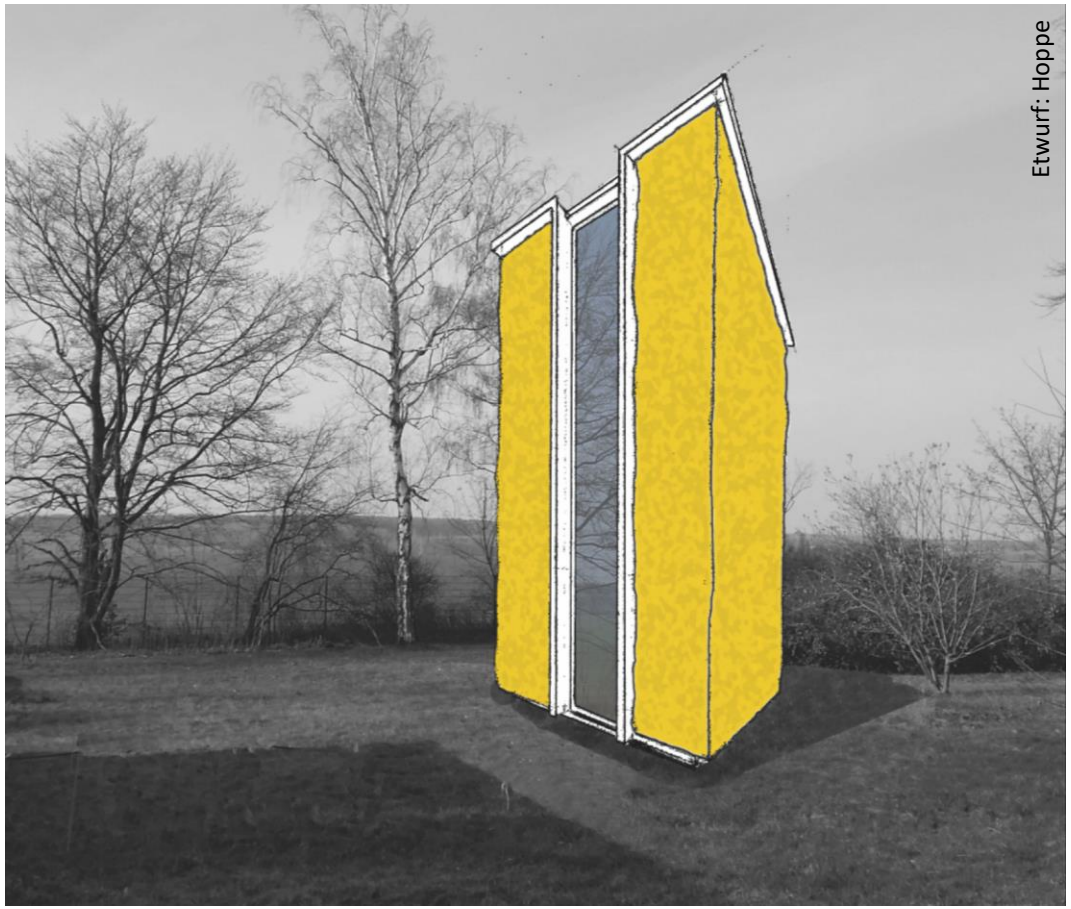
Simulation and experiment for the investigation of the wall load bearing behaviour

Strohballenwand unter Horizontallasten in der Versuchstechnischen Einrichtung | Straw bale wall subjected to horizontal loads in the laboratory

Errichtung und Überwachung eines Deomstratorbauwerks

Construction and monitoring of a deomstrator structure

- Planung und Errichtung eines Experimentalbaus in lasttragender Strohballenbauweise
- vollständige dokumentarische Begleitung beginnend mit dem Pressen des ersten Ballens
- Instrumentierung mit mechanischen und bauphysikalischen Sensorsystemen
  → Langzeit-Monitoring
- Deformationsaufnahme mittels photogrammetrischer Methoden
- Durchführung von Informationsveranstaltungen zum Thema des lasttragenden Strohballenbaus



Geplantes Demonstratorbauwerk in Weimar
Planned demonstrator building in Weimar

Quellen

References

[ICC 2017] International Code Council (2017). International Residential Code for One- and Two-family Dwellings 2018

[Schneider 2015] Schneider, P., Pfoh, S., Grimm, F. (2015). Leitfaden 01 – Ökologische Kenndaten – Baustoffe und Bauteile. Projektplattform Energie.

[MFPA 2017] Krüger, M., Fischer, A., Könke, C. (2017). Untersuchungen an quaderförmigen Strohballen. Prüfbericht Nr. B12.17.097.01.

[Krick 2008] Krick, B. (2008). Untersuchung von Strohballen und Strohballenkonstruktionen hinsichtlich ihrer Anwendung für ein energiesparendes Bauen unter besonderer Berücksichtigung der lasttragenden Bauweise. Dissertation, Universität Kassel.

[Molari 2017] Molari, L., Maraldi, M., Molari, G. (2017). Non-linear rheological model of straw bales behavior under compressive loads. Mechanics Research Communications 81, 32–37.

[Maraldi 2018] Maraldi, M., Molari, L., Molari, G., Regazzi, N. (2018). Time-dependent mechanical properties of straw bales for use in construction. Biosystems Engineering 172, 75–83.

[Ashour 2011] Ashour, T., Wu, W. (2011). Using Barley Straw as Building Material. In: Barley: Production, Cultivation and Uses. Nova Science Publishers.

[ITE 2022] ITE, TU Graz (2022). Forschungsprojekt DDMaS https://www.tugraz.at/fakultaeten/architektur/forschung/forschungsprojekte/ddmas-digitizing-the-design-of-masonry-structures/ (Stand: 09/2022)

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!