

Innosuisse Flagship (2024-2029) Regeneratives Bauen «Think Earth»



Innosuisse Flagship (2024-2029) Regeneratives Bauen «Think Earth»



- **Lehm als industriellen Baustoff entwickeln**
- **Mechanische Eigenschaften des Baustoffes Lehm ermitteln**
- **Automatisierung und Fertigteilbauweise im Lehmbau**



- **Optimierung Recycling und Wiederverwendungsrate von Holz**
- **Auf- und Abbau von Tragkonstruktion**



- **Holz-Lehm-Hybridbau entwickeln**
 - => **thermische Masse des Lehms nutzen**
 - => **Raumbildung und Raumkonditionierung durch Lehm**
 - => **Einsparung von Gebäudetechnik**

Systemische Innovation durch:

- Interdisziplinarität
- In allen Bereichen der Wertschöpfungskette Bau tätig



HSLU Hochschule Luzern

OST Ostschweizer Fachhochschule

Bauingenieurwesen

Empa Material Science and Technology

ETH zürich

Schweizerische Eidgenossenschaft Confédération suisse Confederazione Svizzera Confederaziun svizra

Innosuisse Schweizerische Agentur für Innovationsförderung



Teilprojekt 1: Erdbasierte Baustoffe >



Teilprojekt 2: Zusatzstoffe zur Schwindreduzierung >



Teilprojekt 6: Digitale IDs für regenerative Materialien >



Teilprojekt 3: Produktion und Trocknung Gussblechfertigteile >



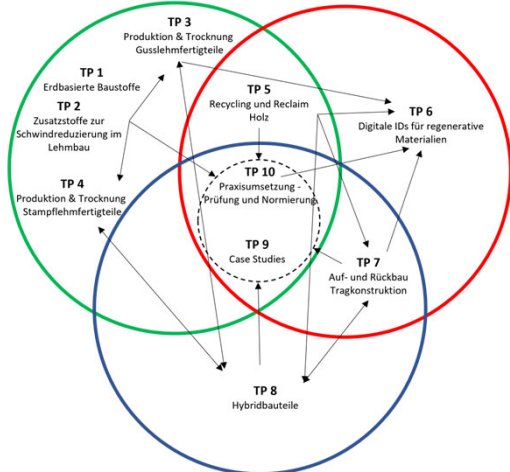
Teilprojekt 4: Produktion und Trocknung Stampflechfertigteile >

Erkundung, Gewinnung, Klassifizierung

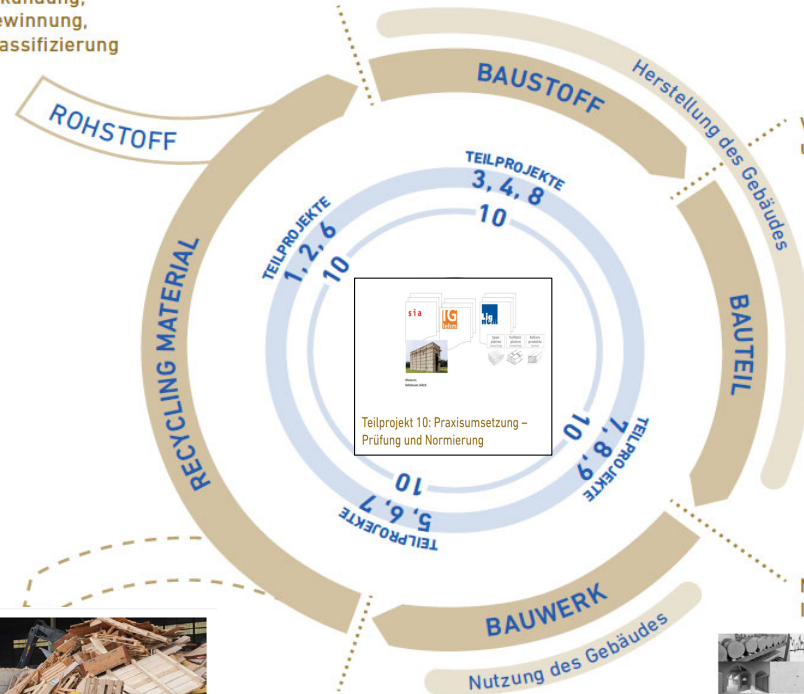
Aufbereitung, Formgebung, Trocknung

Verarbeitung und Fertigung

Materialien/Prozesse Zirkularität & Re-use

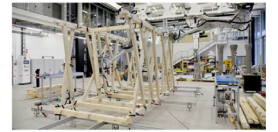


Energie/Ingenieurbau/Architektur



Teilprojekt 5: Recycling und Wiederverwendung von Holz >

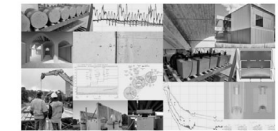
Gebäude-Abbruch Recycling



Teilprojekt 7: Auf- und Rückbau Tragkonstruktion >



Teilprojekt 8: Hybridbauteile >



Teilprojekt 9: Case Studies >

Nutzung und Instandhaltung

TP1

Erdbasierte Baustoffe

Ausgangslage

In der Schweiz werden jährlich rund 28 Mio. m³ an tonhaltigem Aushub und Filterkuchen kostenintensiv auf Deponien entsorgt. Das TP1 zielt darauf ab, diese Materialien in klimafreundliche, recyclefähige Lehmabbaustoffe zu verwandeln.

Zentrale Aspekte im TP1 sind die Entwicklung von Prozessen zur industriellen Herstellung von Lehmabbaumischungen und die Gewährleistung verlässlicher Materialeigenschaften (Kurzzeit- und Langzeitpräzision Baustoffproduktion), die Ermittlung ihrer mechanischen Eigenschaften (Festigkeit, Schwind- und Kriechverhalten, Massstabeffekt), deren Beeinflussung durch Zusätze sowie der Nachweis der Zirkularität dieser erdbasierten Baustoffe.

Ziele/Milestones Antrag

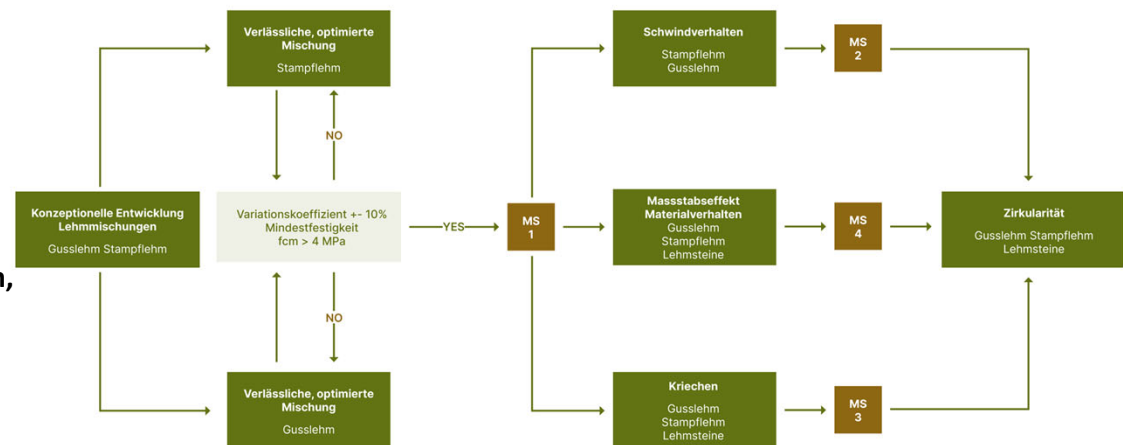
MS1: Nachweis SM mit Druckfestigkeit $f_{cm} > 4 \text{ MPa}$, bei einer Streuung von $< \pm 10\%$

MS2: Schwindmass und dessen Einflussparameter

MS3: Kriechmass und dessen Einflussparameter

MS4: Massstabeffekt und Materialverhalten (Gusslehm, Stampflehm, Lehmsteinmauerwerk)

Partner TP1



Forschungsplan TP1

Strategische Eingrenzung:
Ortlichkeit, Verfügbarkeit, Wirtschaftlichkeit

Aushub

Feldprüfung (Baugrube)

- Erkenntnisse daraus:**
- Hinweise auf die Homogenität des Baugrunds
 - Hinweise auf die Sieblinie und die Bindigkeit
 - Hinweise auf die Eignung für Lehmabstoffe

Filterkuchen

Feldprüfung (Kieswaschanlage)

- Erkenntnisse daraus:**
- Beurteilung des Flockungsmittels

Vorprüfungen am Rohmaterial

(trocken) Siebanalyse

- Erkenntnisse daraus:**
- Verhältnis Grob- und Feinfraktion (< 1 mm)
 - Korngrößenverteilung

Grobfraktion
(Korndurchmesser > 1 mm)

Atterberg (Konsistenzgrenzen: Fliess- und Ausrollgrenze)

- Erkenntnisse daraus:**
- Hinweis auf die Bindigkeit und den Anteil an (quellfähigen) Tonmineralien
 - ML (Silt; Low Plasticity) eher geeignet

Mörtelprisma (Ausbreitmass und Druckfestigkeit)

- Erkenntnisse daraus:**
- Hinweis auf die zu erreichende Druckfestigkeit der Mischung
 - Hohe Festigkeit bei guter Verarbeitbarkeit (hohes Ausbreitmass) ist anzustreben

Feinfraktion
(Korndurchmesser < 1 mm)

Atterberg (Konsistenzgrenzen: Fliess- und Ausrollgrenze)

- Erkenntnisse daraus:**
- Hinweis auf die Bindigkeit und den Anteil an (quellfähigen) Tonmineralien
 - ML (Silt; Low Plasticity) eher geeignet

Mörtelprisma (Ausbreitmass und Druckfestigkeit)

- Erkenntnisse daraus:**
- Hinweis auf die zu erreichende Druckfestigkeit der Mischung
 - Hohe Festigkeit bei guter Verarbeitbarkeit (hohes Ausbreitmass) ist anzustreben

Stampflehm

Proctortest

- Erkenntnisse daraus:**
- Wassergehalt für die optimale Verdichtung

Mischung erstellen

- Ergänzung der Sieblinie
- Wasserbeigabe
- Homogenisieren / Mischen

Gusslehm

Frisch- und Festigkeitsprüfungen an der kompletten Lehmmischung

Würfelpfung (Ausbreitmass, Mischwassergehalt, Trockenrohdichte, Druckfestigkeit und Nachweis der Ausgleichsfeuchte)

-> Optional

Zylinder (E-Modul und Druckfestigkeit)

- Erkenntnisse daraus:**
- Performance

- Weiter zu beachten:**
- Würfelgrößen 20x20x20 cm
 - Verdichtungsenergie
 - Schichthöhe

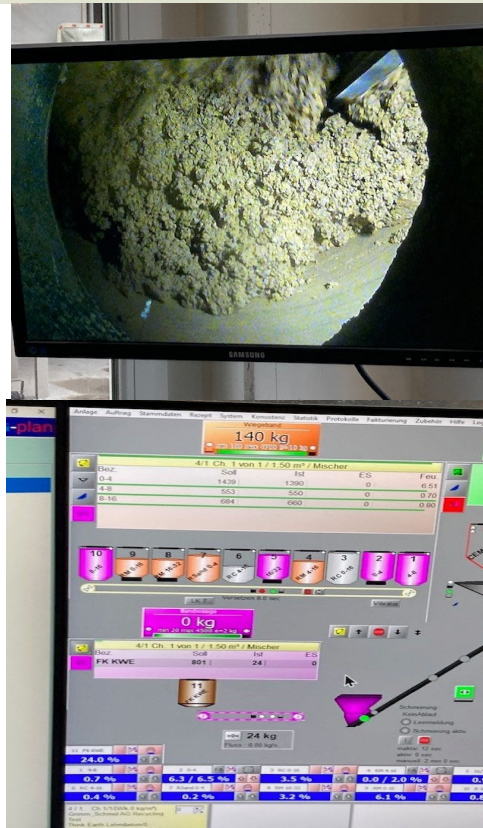
- Weiter zu beachten:**
- Würfelgrößen 15x15x15 cm
 - Zusatzmittel (Verflüssiger)

Prozesse zur Entwicklung von Baulehmmischungen für Gusslehm und Stampflehm auf Basis von Aushub und Filterkuchen

TP1

Erdbasierte Baustoffe

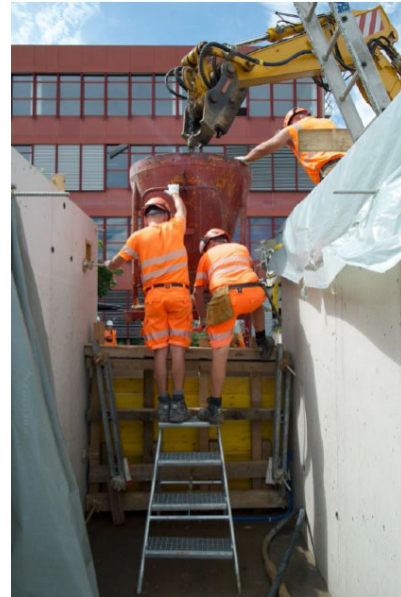
Einblicke/Herstellung Gusslehm Mischung



TP1

Erdbasierte Baustoffe

Einblicke/Herstellung Gusslehmischung



TP1

Erdbasierte Baustoffe

Einblick/Baulehmmischungen nach Eigenschaften

Steckbrief Guslehm-mischungen

Bezeichnung:

Standardmischung: Illnau Aushub gewaschen (Filterkuchen) - optimiert [ILG]

Korngrößenverteilung		Rezept für 1 m ³ bezogen auf das Trockengewicht	
Grösstkorn	φ 16 mm		
Bezeichnung:			
> 64 mm	0.0 M%		kg
32-64 mm	0.0 M%		kg
16-32 mm	0.0 M%		kg
Betonkies	8-16 mm	20.8 M%	438 kg
Betonkies	4-8 mm	17.2 M%	362 kg
Mischsand	0-4 mm	41.7 M%	880 kg
Filterkuchen ILG aus TP1	< 0.063 mm	20.4 M%	430 kg
Total:		100 M%	2110 [kg/m ³] Trockenrohichte
Mischwassergehalt	ca.	7.0 M%	160 kg Wasser
Zusatzmittel	Oxacrete® Care 2.0		12.9 kg

Feinanteil

Filterkuchen ILG aus TP1

Atterberg Konsistenzgrenzen:	Flie遡grenze	Ausrollgrenze	Plastizitätsindex I _p = W _L - W _P [-] #WERT!
	W _L [%]	W _P [%]	
	-	-	

Mörtelprismen:

Rezept für 3 Prismen (ca. 2.0kg)

CEN-Normsand	0-4 mm	67.3 M%	1350 g	
Filterkuchen ILG aus TP1	< 0.063 mm	22.9 M%	459 g	
Mischwassergehalt		9.8 M%	197 g	Wasser
Total:		100 M%	2006 g	
Zusatzmittel	Oxacrete® Care 2.0		6.9 g	

Resultate (an Mörtelprismen):	Ausbreitmass	Druckfestigkeit	Biegezugfestigkeit
	[cm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
	13.3	6.4	-
XRD-Analyse:			
Prüfende Institution:			
Sika	Clay-Particle:		
	Illite [Ill]	4.6	
	Smectite [Smc]	traces	
	Chlorite [Chl]	6.6	
	Total Clay [M%]	11.2	
			Total Non-Clay [M%] 88.6

Standardmischung: [Standard_opt.ILG]

Erhaltene Mittelwerte (Richtwerte der Mischung):

Maximales angestrebtes Ausbreitmass:	40 cm
Würfeldruckfestigkeit	2,3 N/mm²
Minimales angestrebtes Ausbreitmass:	30 cm
Würfeldruckfestigkeit	folgt... N/mm²

Bemerkungen:

Es kann Probleme in der Verarbeitbarkeit geben ("Ansteifen" der Mischung). **Mischsand mit Recyclinganteil ist möglichst zu vermeiden.**

Elastizitätsmodul - N/mm²

Langzeitverhalten:

Schwindmass (für max. Ausbreitmass): - %

Schwindmass (für min. Ausbreitmass): - %

Kriechzahl bei Belastungszeitpunkt:

Probenalter 40 Tage -

Probenalter 60 Tage -

Trocknungskurve:

-

Steckbrief Stampflehm-mischungen

Bezeichnung:

Basismischung: Illnau Aushub homogenisiert, ergänzt [ILH_ergänzt]

Korngrößenverteilung		Rezept für 1 m ³ bezogen auf das Trockengewicht	
Grösstkorn	φ 32 mm		
Bezeichnung:			
Basismischung: Basismischung, Herkunfts:			
Aushub: Illnau homogenisiert (ILH)	var.	71.0 M%	1633 kg
Bezeichnung:			
> 64 mm	0.0 M%		kg
32-64 mm	0.0 M%		kg
Kibag: RC Rundkies	16-32 mm	3.0 M%	69 kg
Kibag: RC Rundkies	8-16 mm	16.0 M%	368 kg
Kibag: Splitt	4-8 mm	10.0 M%	230 kg
	0-4 mm	0.0 M%	kg
Filterkuchen: -	< 0.063 mm	0.0 M%	kg
Total:		100.0 M%	2300 [kg/m ³] Trockenrohichte
Mischwassergehalt		5.1 M%	124 kg Wasser
Fasern	Typ: -		kg

Untersuchungen am Feinanteil

Aushub: Illnau homogenisiert (ILH) Abschnitt ausfüllen: **Ja**

Atterberg Konsistenzgrenzen:	Flie遡grenze	Ausrollgrenze	Plastizitätsindex I _p = W _L - W _P [-]	p _{sw} Klassifizierung
	W _L [%]	W _P [%]		
	18.7	15.1	3.6	ML

Mörtelprismen:

Rezept für 3 Prismen (ca. 2.0kg)

CEN-Normsand	0-4 mm	60.7 M%	1246 g	
Aushub: Illnau homogenisiert (ILH)	< 2 mm	31.2 M%	641 g	
Mischwassergehalt		8.1 M%	167 g	Wasser
Total:		100 M%	2054 g	

Resultate (an Mörtelprismen):	Ausbreitmass	Druckfestigkeit	Biegezugfestigkeit
	[cm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
	14.0	5.8	-
XRD-Analyse:			
Prüfende Institution:			
ETH Clay Lab	Clay-Particle:		
	Illite [Ill]	3.1	
	Smectite [Smc]	2.1	
	Chlorite [Chl]	2.1	
	Total Clay [M%]	7.3	
			Total Non-Clay [M%] 92.3

Basismischung: [Basis_ILH_ergänzt]

Erhaltene Mittelwerte (Richtwerte der Mischung):

Stampflehmwürfel 200x200x200 [mm], ca. Stiefhöhe: 10 cm ca. Fallhöhe: 7cm

Maximales angestrebtes Verdichtmass: - cm

Würfeldruckfestigkeit **4,9 N/mm²**

Minimales angestrebtes Verdichtmass: - cm

Würfeldruckfestigkeit **- N/mm²**

Bemerkungen:

Die Qualitätskontrolle zur Verarbeitbarkeit der Mischung (mangle zum Ausbreitmass bei Gusslehm), könnte das Verdichtmass sein und ist noch zu entwickeln.

Elastizitätsmodul - N/mm²

Langzeitverhalten:

Schwindmass (für max. Verdichtmass): - %

Schwindmass (für min. Verdichtmass): - %

Kriechzahl bei Belastungszeitpunkt:

Probenalter 40 Tage -

Probenalter 60 Tage -

Trocknungskurve:

-

Steckbrief Baulehmmischungen beinhaltet: Rezept, Anmachwassergehalt, Feinanteil (Tonanteil und Tonart) sowie mechanische Eigenschaften

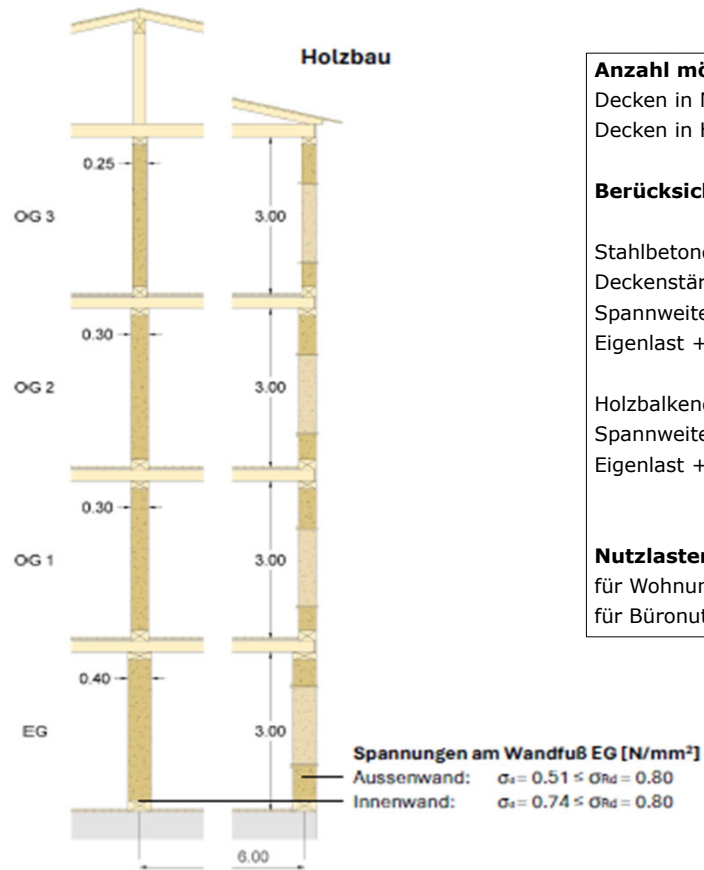
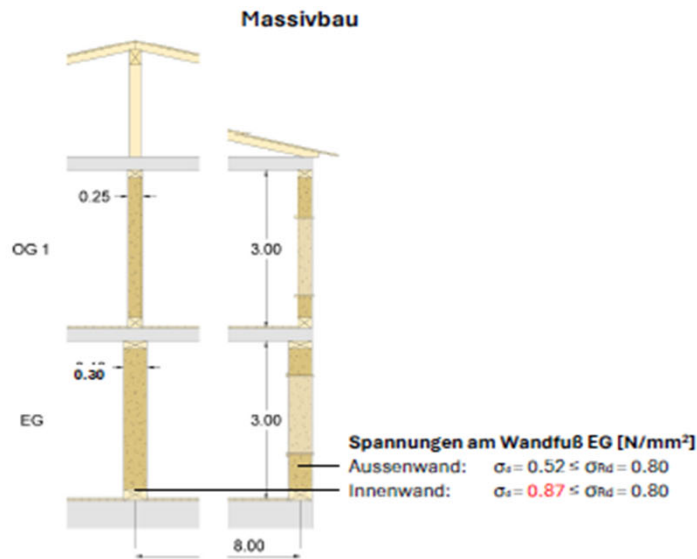
Potential Gusslehm

Zulässige Spannung

$$\sigma_{Rd} = 0.8 \cdot f_{ck} / \gamma_m = 0.80 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{ck} = 2.0 \text{ N/mm}^2$$

$$\gamma_m = 2.0$$



Anzahl mögliche Geschosse

Decken in Massivbauweise: 2 Geschosse

Decken in Holzbauweise: 4 Geschosse

Berücksichtigte Parameter

Stahlbetondecke als Flachdecke

Deckenstärke: 0.24m

Spannweite: 8.0 m

Eigenlast + Auflast Betondecke: (6.0+1.5) kN/m²

Holzbalkendecke

Spannweite: 6.0 m

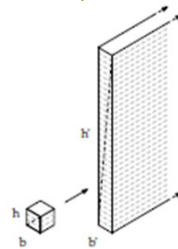
Eigenlast + Auflast Betondecke: (1.8+1.5) kN/m²

Nutzlasten:

für Wohnungsnutzung: 2.0 kN/m²

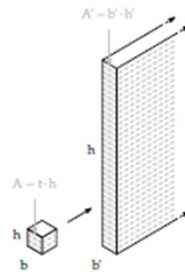
für Büronutzung: 3.0 kN/m²

Definition Formbeiwert (Schlankheit)



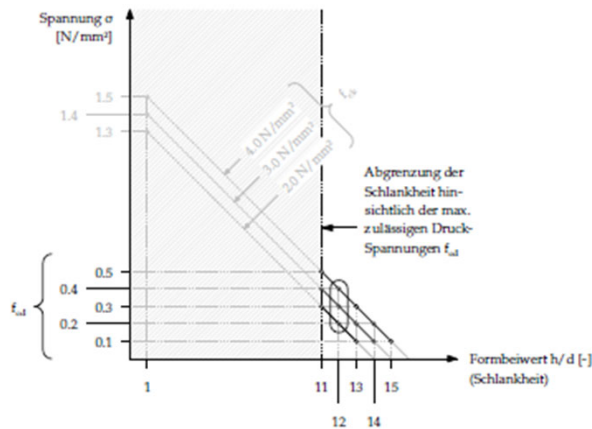
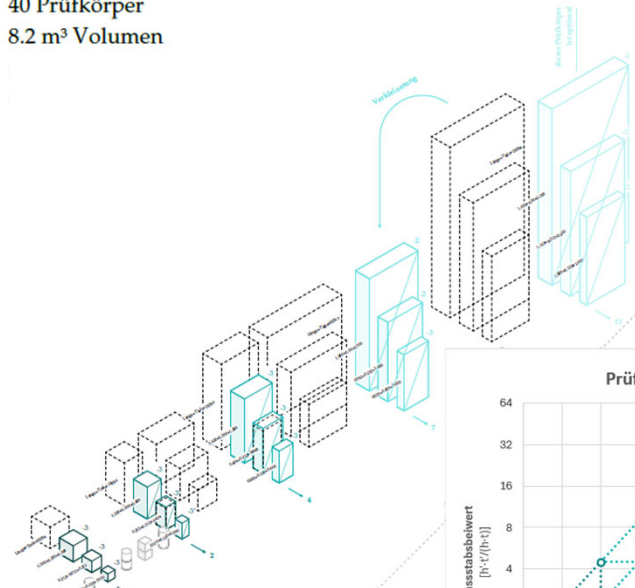
$$\lambda = \frac{h}{b}$$

Definition Masstabsbeiwert F_m



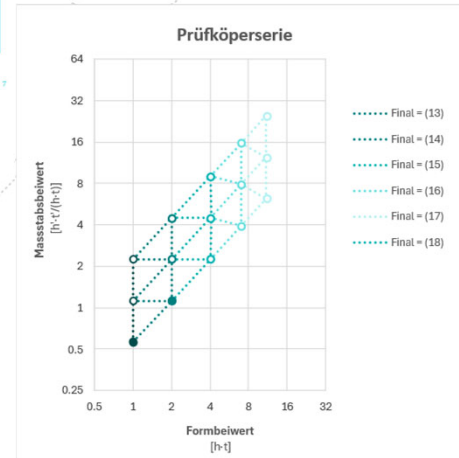
$$F_m = \frac{b' * h'}{b * h} = \frac{A'}{A}$$

40 Prüfkörper
8.2 m³ Volumen



Abgrenzung der Schlankheit hinsichtlich der max. zulässigen Druckspannungen f_{td}

Darstellung der normativen Schlankheitsreduktion der Würfeldruckfestigkeit gemäss den Angaben der DIN 18954 (Tafel 4) „Ausführung von Lehmbauten“, 1956

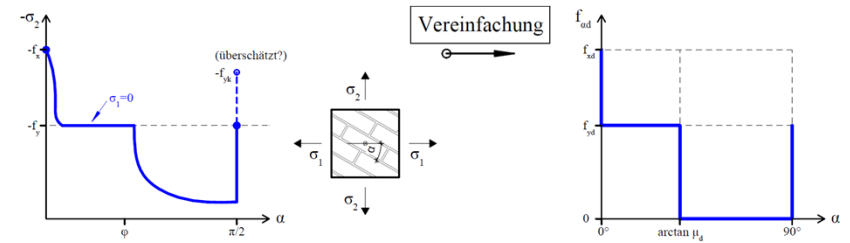
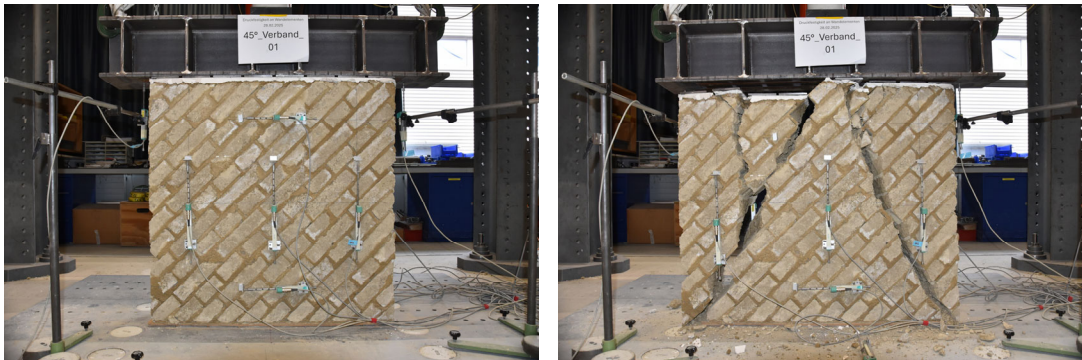


Darstellung der Gusslehmprüfkörper zur Ermittlung des Einflusses der Form (Schlankheit und Masstab) auf die Festigkeit des Materials im Vergleich zum Prüfwürfel (0.15x0.15x0.15m³)

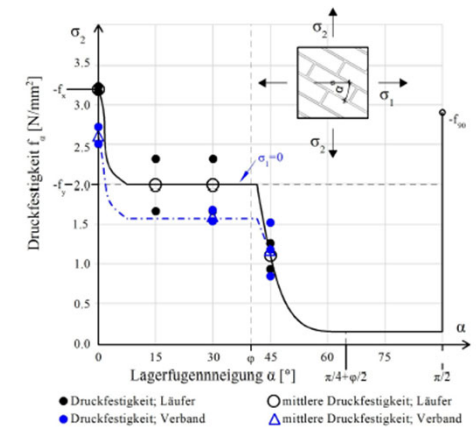
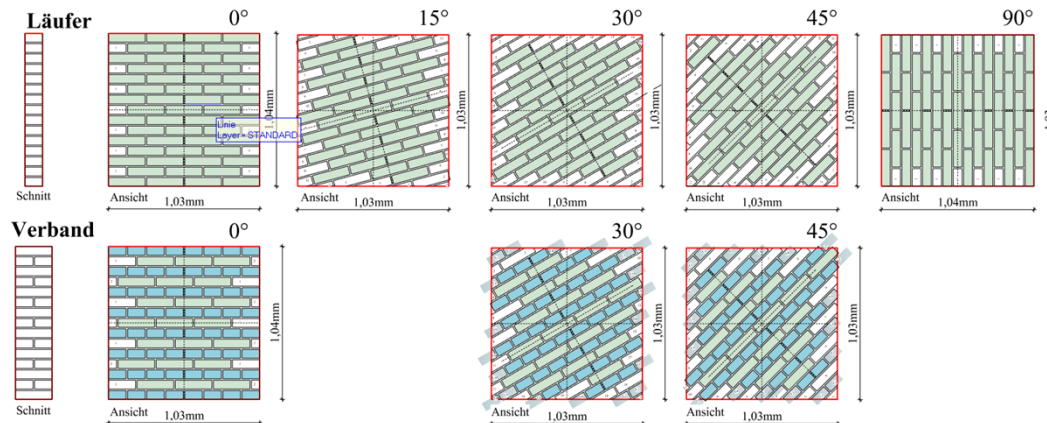
TP1

Erdbasierte Baustoffe

Einblick/Verhalten und Bruchbedingungen Lehmsteinmauerwerk



Bruchbedingung in der SIA 266 Mauerwerk



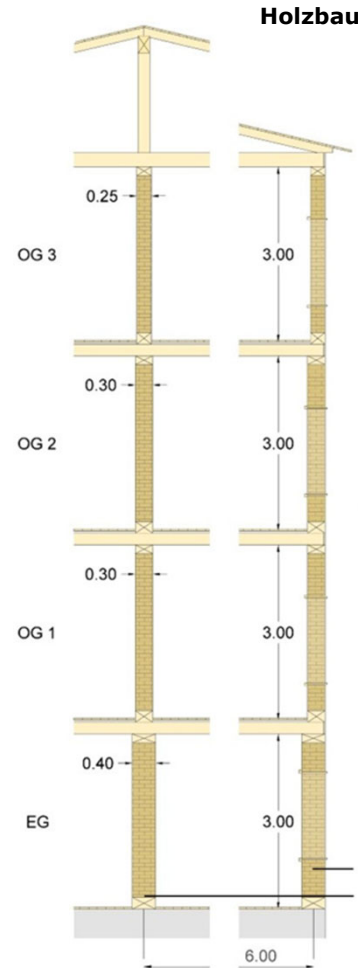
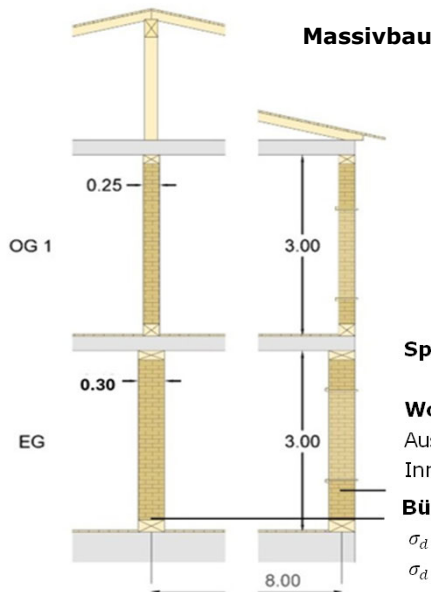
Ergebnisse der Bruchversuche Lehmsteinmauerwerk

Potenzial Lehmsteine – vertikal tragend

Zulässige Spannung:

$$\sigma_{Rd} = M_1 \cdot \nu \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_m}$$

$$\sigma_{Rd} = 0.8 \cdot 0.85 \cdot \frac{2.7 \frac{N}{mm^2}}{2} = 0.91 \frac{N}{mm^2}$$



Anzahl mögliche Geschosse

Decken in Massivbauweise: 2 Geschosse
 Decken in Holzbauweise: 4 Geschosse

Berücksichtigte Parameter

Stahlbetondecke als Flachdecke
 Deckenstärke: 0.24m
 Spannweite: 8.0 m
 Eigenlast + Auflast Betondecke: (6.0+1.5) kN/m²

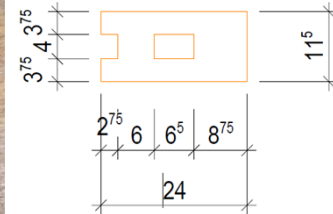
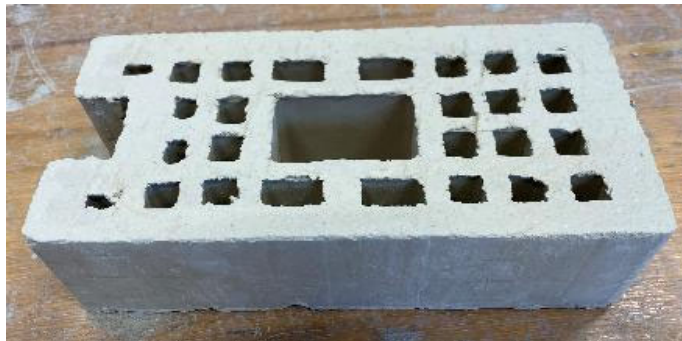
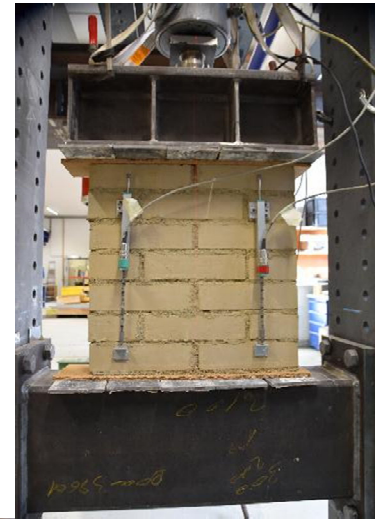
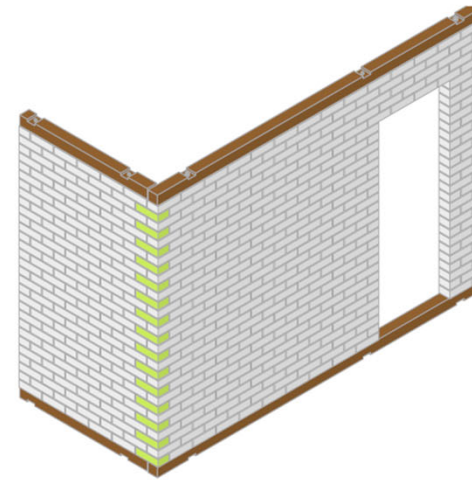
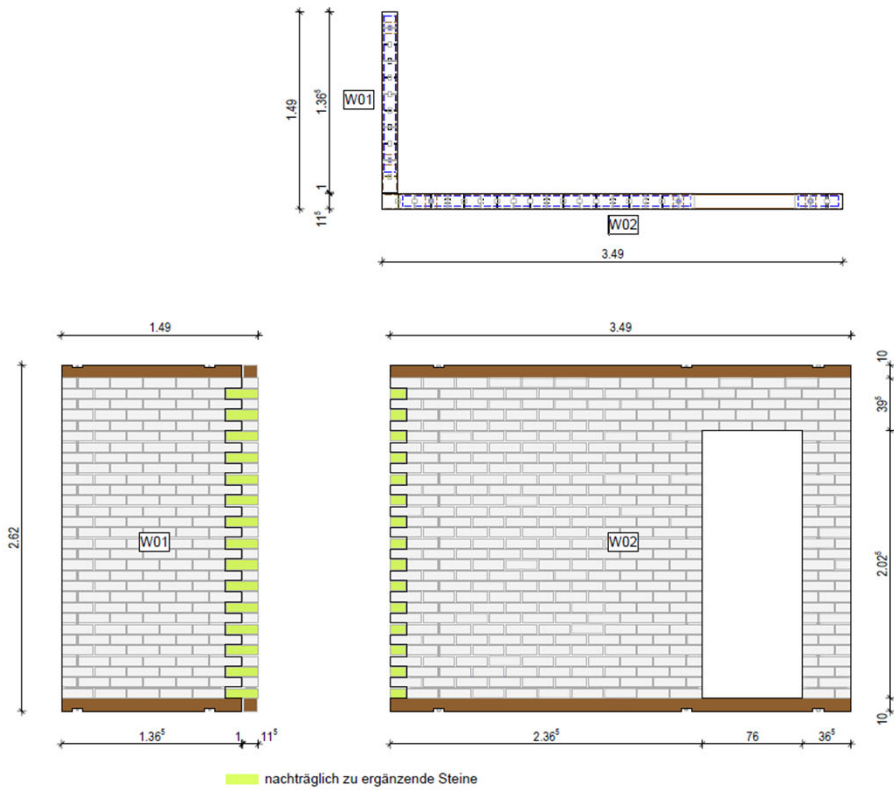
Holzbalkendecke
 Spannweite: 6.0 m
 Eigenlast + Auflast Betondecke: (1.8+1.5) kN/m²

Nutzlasten:

für Wohnnutzung: 2.0 kN/m²
 für Büronutzung: 3.0 kN/m²

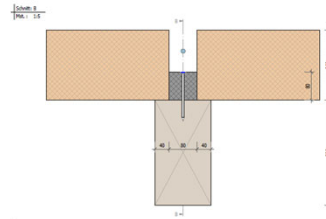
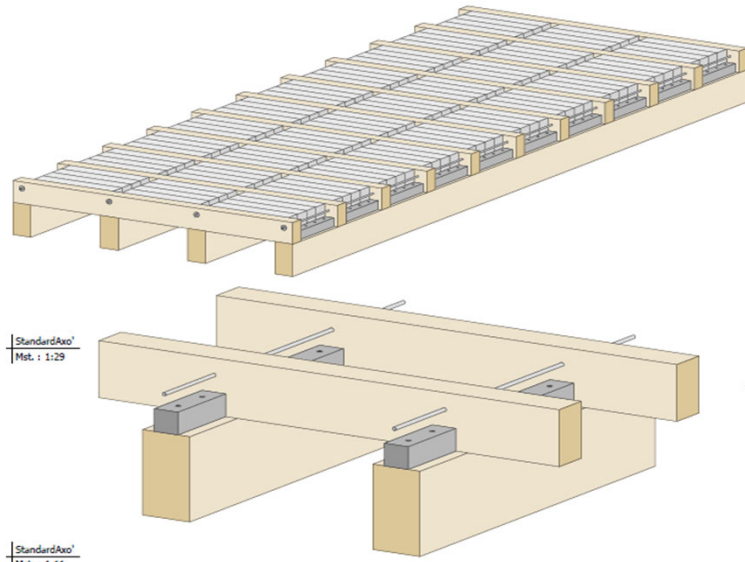


Lehmsteinfertigteile für nicht tragende Innenwände

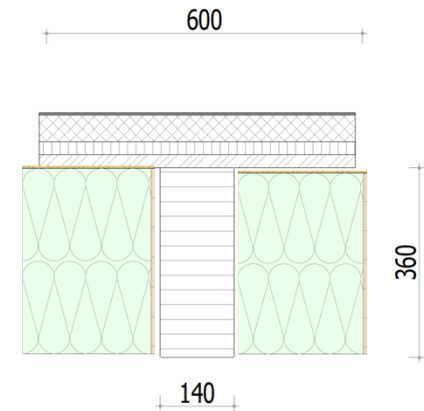




TP8 Holz-Lehm-Verbunddecke



Referenz Holzdecke



Systemdefinition

Spannweite	$L = 6.5 \text{ m}$
Balkenabstand	$e = 600 \text{ mm}$
Balkenhöhe	$b_H = 360 \text{ mm}$
Balkenbreite	$b_R = 140 \text{ mm}$
Holzverbrauch	$V_{\text{Holz}} = 0.084 \text{ m}^3/\text{m}^2$

Einwirkungen

Auflasten:	1.8 kN/m^2
Nutzlastkategorie:	C1 3 kN/m^2

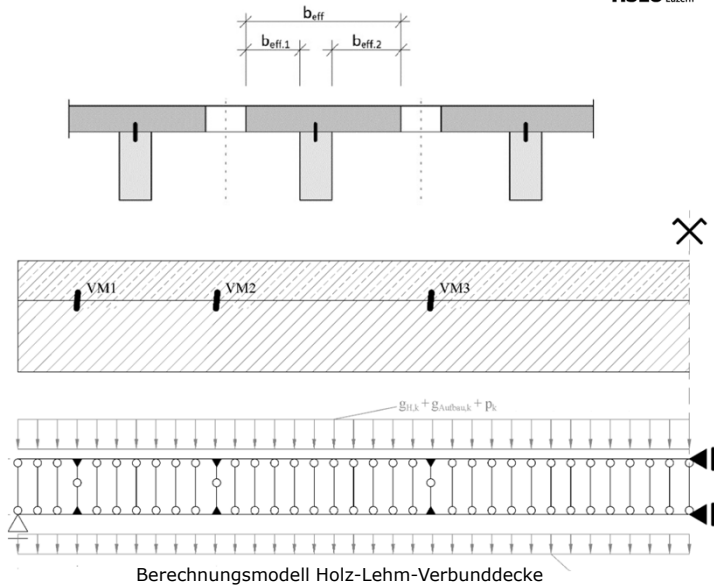
Ziele

Holz-Lehm-Verbunddecke, in der Lehm tragend eingesetzt wird
Geringerer Holzverbrauch als reine Holzdecke bei gleicher Durchbiegung

Vorteile

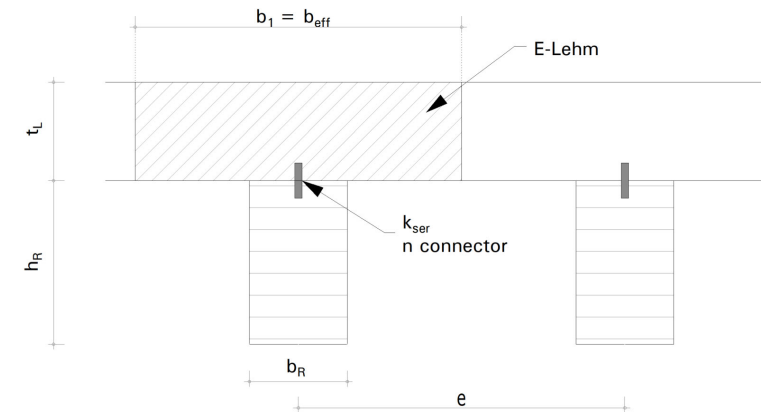
Thermische Masse in Decke (von unten frei)
Positiver Einfluss auf Innenraumklima durch hygrothermische Eigenschaften des Lehms

Parameterstudie



Variable Eingabeparameter

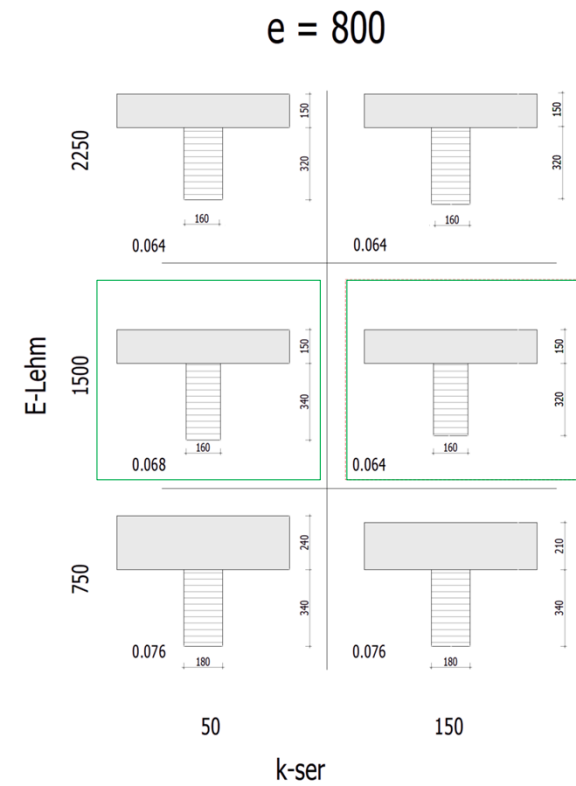
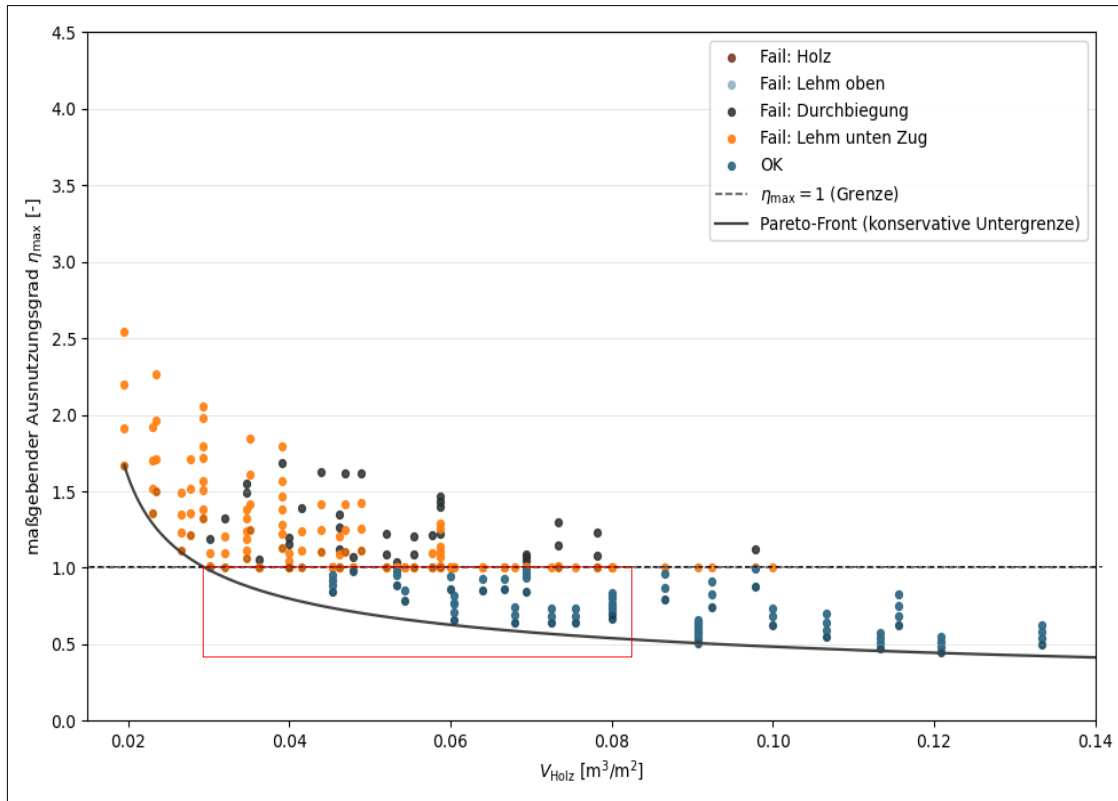
- Variation:
- t_L Lehm-schichtdicke
 - e Rippenabstand
 - h_R Rippenhöhe
 - b_R Rippenbreite
 - k_{ser} Verbindungssteifigkeit
 - n Anzahl Verbinder
 - E-Lehm E-Modul Lehm



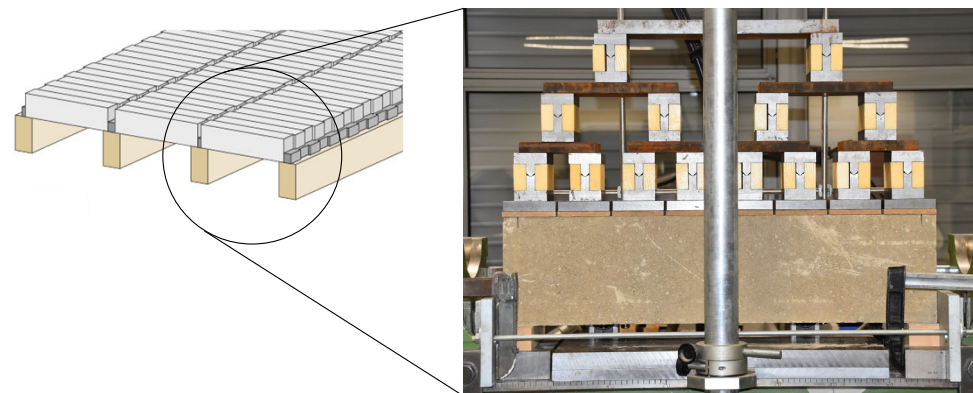
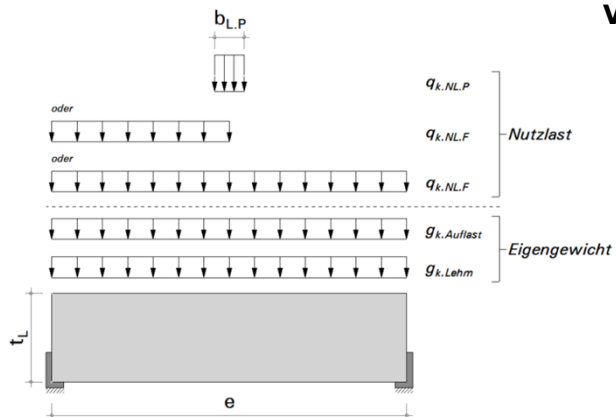
Fixierte Eingabeparameter

	Parameter	Fix Wert	
Materialeigenschaften Holz	L	6.5	[m]
Spannweite	$g_{k,1}$	$(V_H * \rho_H + V_B * \rho_B) / L$	[kN/m]
Nutzlast	$g_{k,2}$	1.8	[kN/m ²]
Rohdichte Lehm	$q_{k,1}$	3.0	[kN/m ²]
Max. zul. Spannung Lehm	ρ -Lehm	22.0	[kN/m ³]

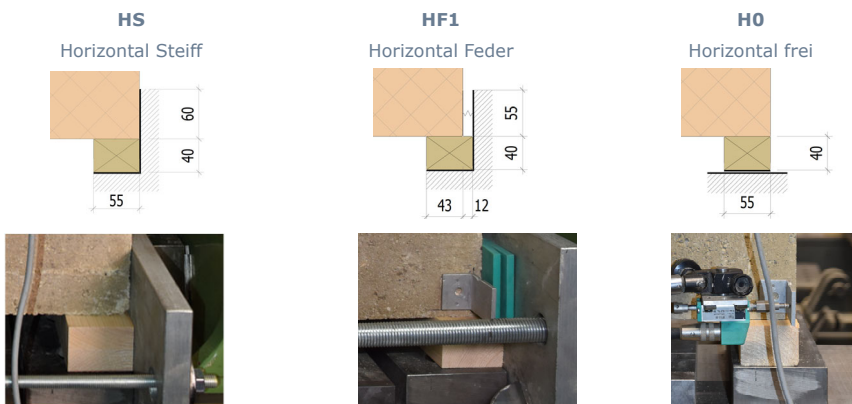
Parameter	Min		Max	
h_R	180	320	460	[mm]
b_R	100	160	240	[mm]
t_L	80	150	250	[mm]
$e = b_1 \approx b_{eff}$	200	800	1200	[mm]
K_{ser}	10	150	250	[kN/mm]
n Verbinder	5	10	20	[Stk.]
E-Lehm	300	1500	2500	[N/mm ²]



Versuche zur Quertragfähigkeit der Lehmkörper



Auflagerausbildung in Varianten



TERRAPAD S/M/L/XL

Verwendung

Für Innenwände und Auskleidungen oder tragende Wände

Formate

Abmessungen (Länge x Breite x Höhe)

Format S : 80 x 10 x 15 [cm]

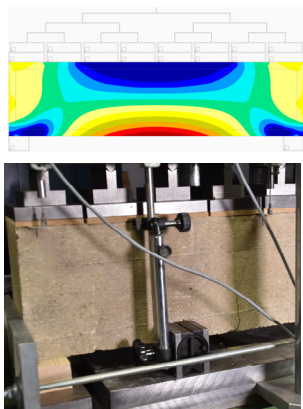
Format M : 80 x 20 x 15 [cm]

Format L : 80 x 25 x 15 [cm]

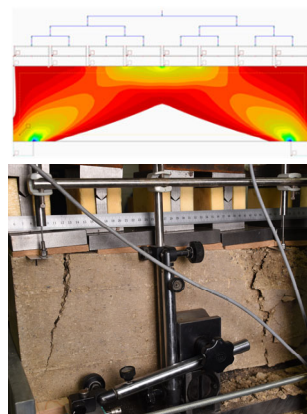
Format XL : 80 x 30 x 15 [cm]

Bruchverhalten - Linienlasten

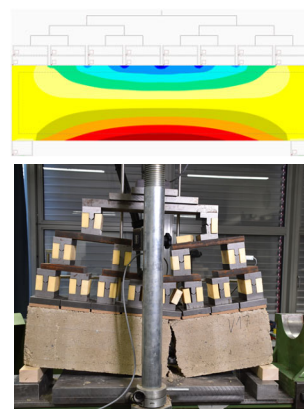
Primärer Biegebruch



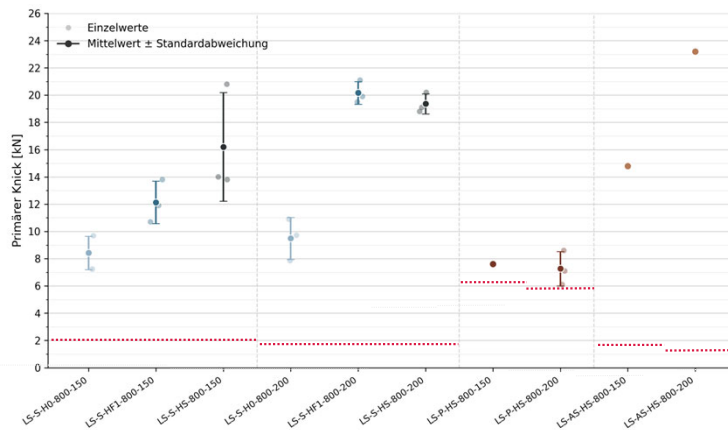
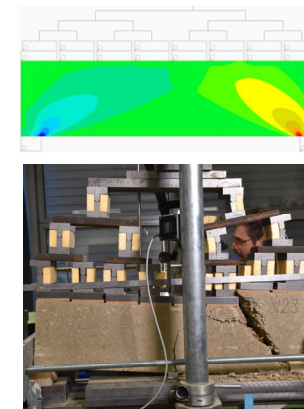
Druckversagen Druckzone Bogen



Biegebruch H0



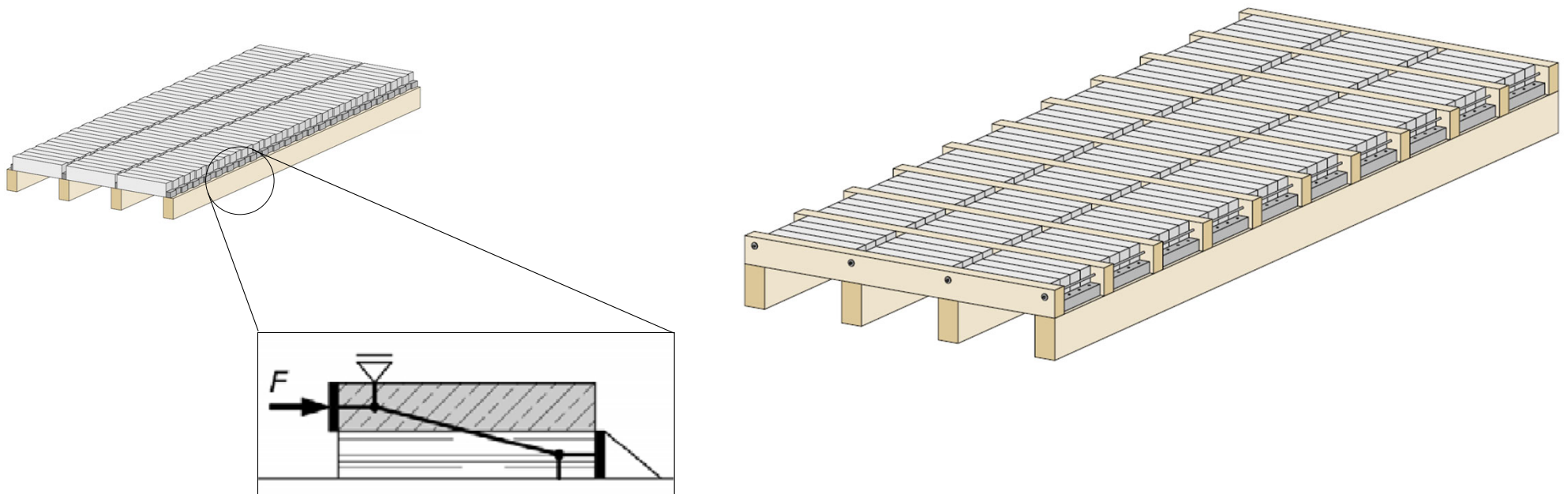
Schubversagen AS



..... Design Lastniveau
entsprechende
Punktlast bei :
Eigengewicht
+ Auflast (1.8 kN/m²)

+ Nutzlast (3.0 kN/m²)
oder
+ Punktlast (5.0 kN)

Ausblick Holz-Lehm-Verbunddecke



Ausblick Untersuchungen zur Steifigkeit des Schubverbunds durch Push-Out Versuche

Vielen Dank für Ihr Interesse

