

Abschlussbericht

Kimm GmbH & Co. KG

Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar

Industrielle Fertigung von großformatigen Lehmsteinen für nachhaltige und wirtschaftliche Gebäude

Aktenzeichen: 38358/01-25
Projektlaufzeit: 04/2023-10/2025
Berichtszeitraum: 04/2023-10/2025
Autor*innen: Susanne Fröhlich
Christoph Liebrich
Stefan Kimm-Friedenberg,
Claudia Zauke
Sabine Schmidt
Christin Andratschke
Ort und Datum: Wabern, 22.12.2025

Projektkonsortium

Gefördert durch



gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Inhaltsverzeichnis

I. Zusammenfassung	10
II. Einleitung.....	12
III. Prozessbeschreibung.....	14
IV. Methodik	22
IV 1 Auswahlkriterien für geeignete Lehmvorkommen	22
IV 2 Baustoffcharakterisierung	22
IV 2.1 Geotechnische Untersuchungsmethoden	22
IV 2.2 Handversuche nach Lehmbau-Regeln.....	23
IV 2.3 Adaptierte, weiterentwickelte Untersuchungsmethoden.....	23
IV 3 Untersuchungen am Lehmstein	24
IV 3.1 Normative Prüfverfahren nach DIN 18945	24
IV 3.2 Bauphysikalische Untersuchungen.....	27
IV 3.3 Neuentwickelte Prüfverfahren.....	31
IV 4 Lehmdünnbettmörtel.....	36
IV 5 Untersuchungen in der Produktion.....	37
IV 6 Untersuchungen am Mauerwerk.....	39
V. Projektergebnisse	41
V 1 Material.....	41
V 1.1 Lehmvorkommen.....	41
V 1.2 Baustoffcharakterisierung	41
V 1.3 Lehmmodifikation	47
V 1.4 Lehmmischungen nach Rezept.....	53
V 1.5 Materialmodell	61
V 1.6 Bauphysikalische Untersuchungen	62
V 1.7 Neuentwickelte Prüfverfahren.....	66
V 2 Produktion	71
V 2.1 Einflüsse in der Materialaufbereitung	71
V 2.2 Einflüsse im Formgebungsprozess	72
V 2.3 Trocknung	76
V 2.4 Paketierung und Lagerung.....	82

V 3	Qualitätskontrolle und Qualitätssicherung	84
V 3.1	Weitergehende Prüfmethode für die QS	87
V 4	Bauablauf	87
V 4.1	Hebetechnik	87
V 4.2	Mauerwerkstechnik	89
V 4.3	Dünnbettmörtel	89
V 4.4	Errichtung des Mauerwerks	89
V 5	Mauerwerkseigenschaften	93
V 5.1	Mauerwerksfestigkeit	93
V 6	Ökobilanzierung	95
V 6.1	Produktdaten und Prozessbeschreibung	95
V 6.2	Ergebnisse Ökobilanz	96
VI.	Projektdissemination zum Zeitpunkt des Abschlussberichtes	99
VII.	Fazit	101
VIII.	Literaturverzeichnis	103

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kalksandsteinpresse	14
Abbildung 2: Produktionsschritte bei der Herstellung von formgepressten Lehmsteinen.....	14
Abbildung 3: Sekundärlehme im Kiestagebau. Schichtung: Mutterboden, Lößlehme, Geschiebelehme, Sand-Kiesschichten.....	15
Abbildung 4: Siebung grob – Absiebung Rohlehm auf Lehm grob	16
Abbildung 5: Lehm grob ausgebreitet zur Trocknung.....	16
Abbildung 6: Siebung fein - Siebung Lehm grob zu Lehm mittel bzw. Lehm fein je nach Materialfeuchte	17
Abbildung 7: Lehm fein nach der Aufbereitung.....	17
Abbildung 8: Horizontalrisse infolge zu feuchten Produktionslehmes.....	18
Abbildung 9: Entmischung - Produktionslehm zu trocken.....	18
Abbildung 10: Gefüllter Formkasten mit Produktionslehm.....	19
Abbildung 11: Pressvorgang	19
Abbildung 12: Lehmsteine nach Pressvorgang – hier Format 4DF (240)	19
Abbildung 13: Stapeln der Lehmsteine auf Härtewagen - hier Format 6DF (175).....	19
Abbildung 14: Aussortierung fehlerhafter Steine	20
Abbildung 15: Einfahrt der Steine in den Autoklaven zur Trocknung. Die Steine trocknen durch Abwärme der benachbarten Autoklaven, die Deckel bleiben geöffnet.....	20
Abbildung 16: Paketierung - Umsetzen der Steine von Härtewagen auf Europaletten	21
Abbildung 17: Prüfumfang Erstprüfungen an im Werk hergestellten Lehmsteinen	25
Abbildung 18: Messung zur Bestimmung der Ausgleichsfeuchte unter Berücksichtigung des Massekonstanz-Kriteriums nach Norm und tatsächlicher Massekonstanz	26
Abbildung 19: Messung des Trocknungsverlaufes an einer Charge Lehmsteine des 8 DF-Formates (248 x 240 x 248) mm	26
Abbildung 20: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus (links) und in das Plattengerät eingebauter Prüfkörper mit Thermoelementen (rechts)	27
Abbildung 21: Mit Paraffin abgedichteter Probekörper	29
Abbildung 22: Einteilung der Wasserdampfadsorptionsklassen nach DIN 18948 [21]	29
Abbildung 23: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit.....	30
Abbildung 24: Herstellung der Prüfkörper – links: Vorverdichtung auf dem Rütteltisch, mittig: Verdichtung in der hydraulischen Presse, rechts: gepresster Lehmsteinprüfkörper	32

Abbildung 25: Herstellung der Prüfkörper – links: Vorverdichtung auf dem Rütteltisch, mittig: Verdichtung in der hydraulischen Presse, rechts: gepresste Lehmsteinprüfkörper.....	32
Abbildung 26: Herstellungsschritte der Prüfkörper mit der Kniehebelpresse unter Verwendung des Metall-Einsatzes (A); Befüllung des Formkastens mit Lehm (B) und gepresster Lehmstein (C)	33
Abbildung 27: Ausgebrochene Prüffläche am Lehmstein und Lehmreste an der Schablone (A); Prüfkörper nach ausreichend Befeuchtung mit Wasser (B); Holzeinsatz (C) zur Herstellung von Prüfkörpern mit Noppen (D)	33
Abbildung 28: Auf den Probekörper aufgesetztes Haftzugprüfgerät	34
Abbildung 29: Pfefferkorn-Prüfgerät (Schema).....	35
Abbildung 30: Versuchsaufbau Ultraschalllaufzeitmessung	36
Abbildung 31: Versuchsaufbau Hammer-Schlag-Verfahren	36
Abbildung 32: Versuchsaufbau Resonanzanalyse	36
Abbildung 33: Versuchsaufbau Rückprallhammer.....	36
Abbildung 34: Lehrbaustelle ASK Kassel - Wände errichtet mit Plan-Lehmsteinen in 16DF-Format und Lehmdünnbettmörtel.....	39
Abbildung 35: Entwurf Musterhaus aus formgepressten Plan-Lehmsteinen.....	40
Abbildung 36: Region Hessen – Tonmineralverteilung.....	43
Abbildung 37: Regionen Niedersachsen, Thüringen, Sachsen-Anhalt und NRW – Tonmineralverteilung	44
Abbildung 38: Tonfraktionen aus der Gewinnung – Tonmineralverteilung.....	45
Abbildung 39: Standort Wabern und Produktionslehme – Tonmineralverteilung	45
Abbildung 40: Lehm aus Lagerstätte.....	46
Abbildung 41: Bindekraftcharakterisierung von frischgepressten Lehmsteinen	47
Abbildung 42: Darstellung Kornverteilungsbereich mit optimalen Materialeigenschaften (Quelle: Janson, Abb. 77)	48
Abbildung 43: Variation der Rohlehme.....	48
Abbildung 44: Optimierung Größtkorn; Absiebung auf Größtkorn 16mm.....	49
Abbildung 45: Produktionslehme ohne Zugabe von Lößlehm	49
Abbildung 46: Nachsiebung des Lehm grob auf Lehm fein mit einem 8er Harfensieb	50
Abbildung 47: Die unteren Kurven zeigen grob abgesiebte Lehme, die Mittleren Lehme nach Feinsiebung (Größtkorn 11mm), die oberen beiden Kurven, den Feinkornbereich mit Lößlehm	51
Abbildung 48: Druckfestigkeitsentwicklung 6DF (175).....	52

Abbildung 49: Druckfestigkeitsentwicklung 6DF (175) von optimierter Mischung	52
Abbildung 50: Rohdichteentwicklung über 3 Monate.....	52
Abbildung 51: Rohdichteentwicklung von optimierter Mischung über 3 Monate	52
Abbildung 52: Zusammenhang Druckfestigkeit und Rohdichte	52
Abbildung 53: Festigkeit 8DF-Format $f_{cm}=2,6 \text{ N/mm}^2$; Produktionslehm auf 24mm abgesiebt	53
Abbildung 54: Festigkeit 8DF-Format $f_{cm}=3,0 \text{ N/mm}^2$, Produktionslehm auf 18mm abgesiebt	53
Abbildung 55: Festigkeit 8DF-Format $f_{cm}=4,3 \text{ N/mm}^2$; Produktionslehm auf 11 mm abgesiebt und mit Lößlehm angereichert	53
Abbildung 56: Untere beiden Sieblinien ohne Lößlehm. Abgesiebt auf 11 mm. Helle Kurve abgesiebt auf 4 mm.	54
Abbildung 57: Erhöhung der Druckfestigkeit durch Beimischung von Lößlehm in den Lehm (abgesiebt auch 18mm).....	54
Abbildung 58: Versuchsreihen 1 bis 14 – Zusammensetzung der Lehmmischungen	56
Abbildung 59: Versuchsreihen 4 bis 9 – Sieblinien.....	57
Abbildung 60: Versuchsreihen I bis VII – Zusammensetzung der Lehmmischungen.....	58
Abbildung 61: Versuchsreihen I bis VII – Sieblinien	59
Abbildung 62: Festigkeiten Lehmmischung mit variablem Anteil an rezyklierter Gesteinskörnung aus Kalksandstein	60
Abbildung 63: Vergleich Druckfestigkeit nach 4 Wochen von Lehmsteinen im 6DF-Format ohne und mit RC-Gesteinskörnung	61
Abbildung 64: Sieblinien von Lehmsteinen mit optimalen Eigenschaften bezüglich Druckfestigkeit und Anwendungsklasse.....	62
Abbildung 65: Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Probenmitteltemperatur.....	63
Abbildung 66: Wasserdampfadsorption des Lehmsteins über einen Zeitraum von 24h.....	63
Abbildung 67: Adsorptionskurven von Wasserdampf verschiedener Baustoffe	64
Abbildung 68: Zeitabhängige Massenänderung des Prüfkörpers 1 durch Wasserdampfaufnahme.....	65
Abbildung 69: Bruchbilder an Prüfkörper mit Ringnut (A) und mit Noppen (B)	66
Abbildung 70: Abhängigkeit des Pfefferkorn-Wertes (Plastizität) von der Materialfeuchte (8 DF-Mischung).....	67
Abbildung 71: Abhängigkeit des Pfefferkorn-Wertes (Plastizität) von der Materialfeuchte (10 DF-Mischung).....	68

Abbildung 72: Zeitliche Entwicklung der dynamischen E-Moduln aus Ultraschalllaufzeitmessung und Hammer-Schlag-Verfahren	69
Abbildung 73: Zeitliche Entwicklung des mittleren dynamischen E-Moduln (Ultraschalllaufzeitmessung) und der mittleren Steindruckfestigkeit.....	69
Abbildung 74: Messpunkte am Stein, Rückprallhammer	70
Abbildung 75: Zeitliche Entwicklung der Rückprallhammer-Werte und der Steindruckfestigkeit	70
Abbildung 76: Prinzipskizze Kalksandsteinwerk (Quelle. Bundesverband Kalksandsteinindustrie).....	73
Abbildung 77: Prinzipskizze Trommeltrockner (Quelle: Fa. Allgaier)	76
Abbildung 78: Lehm-trocknungsversuche im Technikum Fa. Allgaier.....	77
Abbildung 79: Labor-Trommeltrockner an der MFPA	77
Abbildung 80: Trocknungsversuche MFPA – Massenströme und Aufheizgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Trommeldrehzahl und der Masse des Aufgabegutes	77
Abbildung 81: Trocknungsversuche MFPA – Trocknungsverläufe in Abhängigkeit von der Trommeldrehzahl und der Feuchte des Aufgabegutes.....	78
Abbildung 82: Vergleich Trocknung Lehmstein 10DF mit und ohne Ventilator	78
Abbildung 83: Stapelung Halbsteine - hier 2DF - in Lagen und Reihen	79
Abbildung 84: Stapelung Vollsteine in 3 Lagen - hier 10 DF – Versuch Variation Stapelbild - Spalt auch in Querrichtung.....	79
Abbildung 85: Druckfestigkeit bei Trocknung Lehmsteine mit und ohne Ventilator.....	80
Abbildung 86: Festigkeitsentwicklung Lehmsteine 10DF unterschiedlicher Produktionschargen	80
Abbildung 87: Leistungsmikrowellenanlage mit Luftkonditionierung und Sensorik an der MFPA	81
Abbildung 88: Ungünstige Verpackung	82
Abbildung 89: Trocknungsverlauf kleinformatige Steine	83
Abbildung 90: Trocknungsverlauf großformatige Steine	83
Abbildung 91: Trocknungsversuche Lehmsteine in Folie	83
Abbildung 92: Verpackung der Lehmsteine mit diffusionsoffenen Hauben	83
Abbildung 93: Qualitätssicherung Gewinnung und Aufbereitung.....	84
Abbildung 94: Qualitätssicherung Produktion.....	85
Abbildung 95: Technische Zeichnung formgepresste Plan-Lehmsteine mit Nut- und Feder-System und modifiziertem Dornloch, dargestellte Formate 4 und 8DF	88

Abbildung 96: Modifiziertes Formwerkzeug mit langen Dornen für Steinhöhe 248mm	88
Abbildung 97: Versetzzange: Modell Lissmac VSG 840 Vario-Steingreifer mit Vario-Wechselbacken B30 Porenbetonsteine	88
Abbildung 98: Auftrag des Lehmdünnbettmörtels mit einem Mörtelschlitten.....	89
Abbildung 99: Anordnung von Kimmschicht und horizontaler Sperrschichten unter Lehmsteinmauerwerk.....	90
Abbildung 100: Ausführung Lehmsteinmauerwerk, unten zwei Kimmschichten mit zwei horizontalen Sperren. Oben: Ringbalken als Fenstersturz, Ausführung in Ortbeton auf KS-Halbstein.....	92
Abbildung 101: Untergrund Ortbetonringbalken: Mineralische Sperrschicht direkt auf Lehmsteinmauerwerk zum Schutz vor Erweichen des Lehmsteinmauerwerks.....	92
Abbildung 102: Witterungsschutz während der Bauausführung. Die Wände sind vollflächig vor Niederschlag zu schützen.....	93
Abbildung 103: RILEM -Körper nach Herstellung, Format 8DF	94
Abbildung 104: RILEM-Körper nach Prüfung, Versagensbild	94
Abbildung 105: Stoff- und Energieflüsse der Lehmsteinherstellung mit Systemgrenzen (basierend auf den Daten ermittelt von der Firma Kimm)	98

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Prüfmethode nach DIN 18945 [2]	24
Tabelle 2: Ergänzende Prüfmethode für Plan-Lehmsteine	25
Tabelle 3: Methode zur Feuchtemessung im Rohlehm	37
Tabelle 4: Prüfverfahren für die Qualitätskontrolle in der Aufbereitung und Produktion	38
Tabelle 5: Probenbuch – Rohlehme aus verschiedenen Lagerstätten.....	41
Tabelle 6: Probenbuch - Tone.....	42
Tabelle 7: Probenbuch - Produktionslehm	42
Tabelle 8: Probenbuch - Lehmstein	43
Tabelle 9: 1. Versuchsreihe – Zusammensetzung der Lehmmischungen.....	55
Tabelle 10: 1. Versuchsreihen I bis VII – Zusammensetzung der Lehmmischungen.....	58
Tabelle 11: Anwendbarkeit mgl. Zusatzstoffe für die Verwendung in Produktionslehm für das Formpressverfahren.....	60
Tabelle 12: Zielzusammensetzung der Produktionslehme für die Herstellung von Lehmsteinen im Formpressverfahren.....	61
Tabelle 13: Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsmessung des Lehmsteins nach dem Zweiplattenverfahren	62
Tabelle 14: Ergebnisse der Wasserdampfdiffusion	65
Tabelle 15: Haftzugfestigkeiten der Probekörper mit Ringnut (R) und mit Noppen (N).....	66
Tabelle 16: Versuchsplan zerstörungsfreie Untersuchungen a) bis c) und e).....	68
Tabelle 17: Aufbereitung von Lehm – Einflussfaktoren und Steuerungsmöglichkeiten	71
Tabelle 18: Varianten zur Lehmsteinproduktion auf bestehender KS-Anlage.....	74
Tabelle 19: Mögliche Schadensbilder an Lehmsteinen und Ursachen	75
Tabelle 20: Prüfungen in den verschiedenen QS-Stufen.....	86
Tabelle 21: Zielgrößen in der Produktion formgepresster Lehmsteine	87
Tabelle 22: Übersicht des Untersuchungsrahmens der Ökobilanz für die Lehmsteinherstellung	95
Tabelle 23: Betrachtete Prozessschritte für die Herstellung von Lehmsteinen in der Ökobilanz	96
Tabelle 24: Umweltindikatoren bezogen auf 1 to Lehmstein	97

I. Zusammenfassung

Im Forschungs- und Entwicklungsprojekt „Conclay-Lehmsteine“ wurde die industrielle Fertigung von großformatigen Lehmsteinen für nachhaltige und wirtschaftliche Gebäude untersucht und weiterentwickelt. Ausgangspunkt war die im Jahr 2023 veröffentlichte Bemessungsnorm DIN 18940, mit der tragendes Lehmsteinmauerwerk erstmals als Regelbauweise anerkannt wurde. Ziel des Projektes war es, formgepresste Plan-Lehmsteine in Industriequalität zu entwickeln, die wirtschaftlich herstellbar sind, den normativen Anforderungen genügen und eine effiziente Bauweise ermöglichen.

Im Fokus stand das Formpressverfahren auf bestehenden Kalksandsteinpressen, mit dem Lehmsteine bis zu Formaten von 16 DF gefertigt werden können. Die Untersuchungen zeigten, dass mit geeigneten rein mineralischen Lehmmischungen und optimierten Prozessparametern Druckfestigkeitsklassen von 3 bis 5 und ein ausreichender Feuchtwiderstand der Anwendungsklassen AK Ia bis II erreicht werden können, womit die Steine für tragende Anwendungen geeignet sind. Entscheidend hierfür sind gut korngestufte Lehmmischungen mit hohem Sand- und Kiesanteil, die Schwindverformungen minimieren und eine hohe Formstabilität gewährleisten. Als besonders geeignet erwiesen sich Sekundärlehme aus Kiestagebauen, wodurch zugleich ein ressourcenschonender Ansatz verfolgt wird.

Ein wesentlicher Projektbestandteil war die Entwicklung eines abgestimmten Aufbereitungs- und Produktionsprozesses. Dieser umfasst die gezielte Gewinnung und Vormischung der Lehme, mehrstufige Sieb- und Trocknungsprozesse sowie die präzise Einstellung der Produktionsfeuchte. Die Untersuchungen machten deutlich, dass bereits geringe Abweichungen der Feuchte oder der Korngrößenverteilung zu Qualitätsmängeln wie Rissbildung oder Entmischungen führen können. Entsprechend wurde ein umfassendes Qualitätskontroll- und -sicherungskonzept entwickelt, das klassische Prüfungen nach DIN 18945 mit ergänzenden, teilweise zerstörungsfreien Messmethoden kombiniert.

Neben den material- und prozesstechnischen Aspekten wurde auch die Verarbeitung der großformatigen Lehmsteine auf der Baustelle untersucht. Aufgrund des hohen Eigengewichts erfolgt das Versetzen analog zu Kalksandsteinen mit Hebewerkzeugen. Durch die Entwicklung maßhaltiger Plan-Lehmsteine und die Verwendung von Lehmdünnbettmörtel konnte eine rationelle Bauweise mit hohem Baufortschritt realisiert werden. Praxiserprobungen auf Baustellen bestätigten die grundsätzliche Umsetzbarkeit und lieferten wertvolle Rückmeldungen zur Steingeometrie und zur Mörtelrezeptur.

Eine Ökobilanz auf Basis realer Produktionsdaten zeigte zudem deutliche ökologische Vorteile gegenüber konventionellen Mauerwerkssteinen, insbesondere durch den geringen Energieeinsatz, den Verzicht auf Brennprozesse und die Nutzung regionaler, sekundärer Rohstoffe.

Insgesamt belegt das Projekt, dass die industrielle Herstellung großformatiger, formgepresster Lehmsteine technisch, normativ und wirtschaftlich realisierbar ist. Die erarbeiteten Prozess- und Qualitätsstandards schaffen die Grundlage für eine Übertragbarkeit auf weitere

Produktionsstandorte und leisten einen wesentlichen Beitrag zur Etablierung des Lehmbaus als nachhaltige Alternative im modernen Mauerwerksbau.

II. Einleitung

Durch die im Jahr 2023 veröffentlichte Bemessungsnorm DIN 18940 [1] zur Konstruktion, Bemessung und Ausführung von tragendem Lehmsteinmauerwerk ist das konstruktive und lasttragende Bauen mit Lehmsteinen zu einer anerkannten Regelbauweise im Mauerwerksbau geworden. Im Werk hergestellte Lehmsteine sind bereits seit dem Jahr 2013 genormt durch die DIN 18945 [2]. In ihr werden u. a. Anforderungen an lasttragende Lehmsteine bis zu einem Steinformat von 12 DF definiert. Zu Projektbeginn waren lasttragende Lehmsteine im Markt kaum verfügbar. Vorhandene Lehmsteine wurden vorwiegend im Bereich der Instandsetzung in Formaten bis 3DF eingesetzt, z. B. als nichttragende Steine für Ausfachungen oder nichttragende Innenwände, im Neubaubereich spielten Lehmsteine bisher keine nennenswerte Rolle.

Mit Erscheinen der Bemessungsnorm ist die Nachfrage nach diesen nachhaltigen Bauprodukten bereits merklich gestiegen. Mit den bisher kleinformatigen Lehmsteinen kann jedoch die Nachfrage nicht bedient werden, auch ist die Baumweise mit Handformaten bis 3DF im Dickbettmörtelverfahren zu zeit- und kostenintensiv. Wirtschaftlichere Bauweisen sind deshalb zu finden und geeignete Lehmsteinprodukte zu entwickeln. In der Lehmsteinnorm DIN 18945 [2] werden die Steine nach ihrer Herstellungsmethode unterschieden, es gibt formgeschlagene, stranggepresste und formgepresste Lehmsteine. Für die ersten beiden Herstellungsmethoden liegen schon hinreichende Erfahrungen vor, insbesondere für stranggepresste Lehmsteine, die aus der Ziegelindustrie stammen und die industriell hergestellt werden

Das formgepresste Lehmsteine auch im Industriemaßstab herstellbar sind, z. B. auf einer Pflastersteinmaschine oder einer Kalksandsteinpresse, wurde in Pilotversuchen in 2022 durch die Firma Kimm aufgezeigt.

Hier setzt dieses Forschungsvorhaben an:

Insbesondere die Verwendung einer Kalksandsteinpresse ermöglicht sogar die Herstellung von Plan-Lehmsteinen in Formaten bis 16 DF. Erste Versuchsergebnisse haben gezeigt, dass die Steine sehr gute Festigkeiten im Bereich von 3-5 N/mm² aufweisen und damit für tragende Bauteile gemäß der neuen Bemessungsnorm gut geeignet sind. Um diese Herstellungsweise voranzubringen und eine gleichmäßige hohe Qualität gewährleisten zu können, müssen verschiedene Randparameter von der Gewinnung und Aufbereitung der Lehme, über die Herstellung und Lagerung der Lehmsteine, bis zur Verarbeitung auf der Baustelle beachtet werden. Zusammen mit dem Kooperationspartner MFPA Weimar sollten die wesentlichen Einflussgrößen auf der Stoff- wie auf der Produktionsseite ermittelt, Anforderungen an Ausgangsstoffe und Lehmgemische definiert und Produktionsabläufe optimiert werden. Bei der Verarbeitung von Lehmen ist die Qualitätskontrolle in den verschiedenen Produktionsschritten essenziell um Steine in hoher und gleichmäßiger Güte zu produzieren. Neben den bekannten Prüfmethode nach Norm sollte auch ein messtechnisch gestütztes Kontrollsystem angewandt werden. Zusammenfassend sollte ein Qualitätssicherungskonzept für die industriell hergestellten formgepressten Lehmsteine entwickelt werden, dass eine Fertigung von Lehmsteinen auch in anderen Werken sicher ermöglichen soll.

Die großformatigen Lehmsteine müssen aufgrund ihres hohen Eigengewichtes auf der Baustelle wie Kalksandsteine mit Versetzgeräten vermauert werden. Darüber hinaus wurde in dem Projekt die Vermauerung der Steine mit Lehmdünnbettmörtel forciert, um eine vergleichbare Verarbeitung der Lehmsteine zu anderen Mauerwerksteinen zu ermöglichen und so den Baufortschritt zu optimieren und zu beschleunigen. Zusammen mit anerkannten Projektpartner aus der Industrie wie auch durch Einbindung von regionalen Baufirmen in das Projekt sollte dabei der Lehmstein unter Baustellenbedingungen erprobt werden. Die Erkenntnisse sollten wiederum in die Weiterentwicklung der Steingeometrie und der Anpassung der Lehmdünnbettmörtelrezeptur mit einfließen. Das Aufzeigen der Nachhaltigkeit des neuen und innovativen Herstellungsverfahrens von formgepressten Lehmsteinen sollte in einer Ökobilanz aufgezeigt werden. Hierfür wurden die konkreten Daten aus der Produktion zu Grunde gelegt, so dass eine auf formgepresste Lehmsteine angepasste Umweltprodukt-Deklaration erstellt werden kann.

Noch weitgehend unbekannt ist die Herstellung von formgepressten Lehmsteinen im Industriemaßstab. Bisher werden formgepresste Lehmsteine entweder mit einer mobilen Handpresse oder mit Kleinstpressen hergestellt, die auf wenige kleine Formate begrenzt sind. Zusätzlich werden diese Steine meist auch noch mit Kalk oder Zement stabilisiert, um eine ausreichende Festigkeit zu erhalten. Die Herstellungsweise hat Manufakturcharakter und ist in dieser Form nicht wirtschaftlich. Einen Überblick zu den bisher bekannten Methoden und den Herstellungsmöglichkeiten von Lehmsteinen im Industriemaßstab sind in der Diplom-Thesis von Straub [3] erläutert.

III. Prozessbeschreibung

Für die Herstellung der Plan-Lehmsteine wird das Formpressverfahren aus der Kalksandsteinfertigung angewandt. Kernstück dieses Verfahrens ist eine vollautomatisch arbeitende Presse, in der das Lehmgemisch zu einem Steinrohling mit Pressdrücken von 120 bis 180 bar geformt wird.

Durch eine iterative Steuerung des Pressdruckes und des Füllgrades können Plan-Lehmsteine mit einer maximalen Höhenabweichung von ± 1 mm hergestellt werden. Damit die frisch gepressten Lehmsteine während der anschließenden Trocknung nicht schwinden, muss der zu verwendende Produktionslehm ganz bestimmte Eigenschaften aufweisen (siehe *Kapt. V 1*). Um dies zu erreichen ist ein aufwendiger Aufbereitungsprozess mit einhergehender Qualitätskontrolle notwendig, der in *Kapt. V 3* näher beschrieben wird.

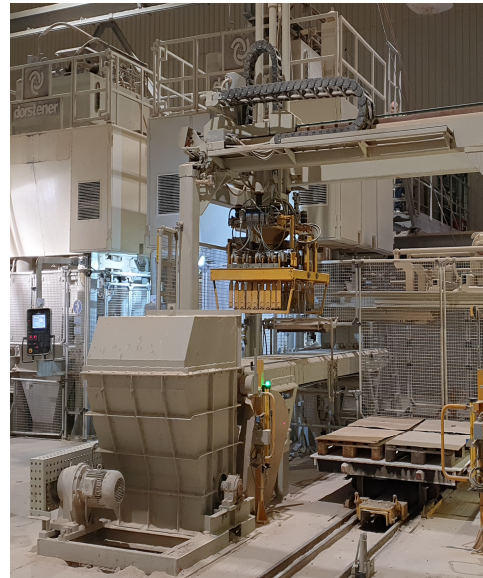


Abbildung 1: Kalksandsteinpresse

Die verschiedenen Produktionsschritte sind in *Abbildung 2* dargestellt.



Abbildung 2: Produktionsschritte bei der Herstellung von formgepressten Lehmsteinen

Für das angewandte Formpressverfahren werden magere, gut korngestufte Lehmmischungen verwendet. Die hohen Kies- und Sandanteile im Lehmgemisch sorgen nach dem Pressverfahren für die notwendige Stabilität der Mischung und verhindern Schwindverformung durch das Ineinandergreifen der verschiedenen Sand- und Kieskörner. Das dabei verwendete Ausgangsmaterial zeigt Ähnlichkeit zu bekannten Stampflehmmischungen.

Aufgrund des breiten Kornbandes von Ton bis in den Kiesbereich sind besonders Geschiebelehme und Verwitterungslehme ggfs. auch noch Aue- und Gehängelehme geeignet. Idealerweise werden **Sekundärlehme** verwendet die, z. B. als Abraum in Kiestagebauen oder als Baustellenaushub anfallen (*Abbildung 3*).

Die Lehme liegen in der Gewinnung/ Baugrube zumeist in Schichten unterschiedlicher Mächtigkeit vor. Die einzelnen Schichten sind selten homogen und unterscheiden sich

bezüglich ihrer Bindigkeit und Korngrößenverteilung. Bei der Aufbereitung ist deshalb auf ein sorgsames Abbaggern der Lehmschichten zu achten. Zu unterscheiden sind dabei Lößlehme und Geschiebelehme. Für die Stabilität der formgepressten Lehmsteine sind vor allem die Geschiebelehme entscheidend, die über einen hohen Anteil an kiesigen Bestandteilen verfügen. Sie werden im Weiteren als **Rohlehme** bezeichnet. Die darüber befindlichen Lößlehmschichten sind in ihrer Korngrößenstruktur sehr fein. Die bestehen vorwiegend aus Sand, Schluff und Ton.



Abbildung 3: Sekundärlehme im Kiestagebau. Schichtung: Mutterboden, Lößlehme, Geschiebelehme, Sand-Kiesschichten

Für die Produktion muss der Lehm bestimmte Materialeigenschaften aufweisen. Wichtige Parameter sind dabei die Korngrößenverteilung, das Größtkorn, die Materialfeuchte, der Tonanteil sowie die Art des Tones. Für die Aufbereitung des Rohlehms hin zum Produktionslehm stehen verschiedene Methoden zur Verfügung: Brechen, Sieben, Trocknen und Mischen. Welche Aufbereitungsmethoden angewandt werden können

hängt maßgeblich von der Materialfeuchte und dem Tongehalt des Lehmes ab.

Bereits bei der Gewinnung ist ein erstes Vormischen der Rohlehme für die weitere Verarbeitung sinnvoll. Durch gezieltes Abbaggern der Vorkommen werden feine und grobe Lehmschichten miteinander vorvermischt. Fettige Lehme und reine Tonschichten sind für das Formpressverfahren ungeeignet und müssen separiert werden, ebenfalls dürfen keine Lehmschichten mit organischen Anteilen verwendet werden. Mittels eines Vorsiebes werden große Tonbrocken und Findlinge im ersten Schritt herausgesiebt. Dieser **Rohlehm < 200 mm** weist meist noch sehr viel steiniges Material auf. Durch gezielte Anreicherung mit feineren Lößlehm und gezieltes Aufsichten in Mieten wird das Material weiter homogenisiert.

Je nach Homogenität des Ausgangsmaterial kann an dieser Stelle die Verwendung einer Misch- und/oder Brechtechnik sinnvoll sein. Insbesondere, wenn in dem **Rohlehm < 200 mm** sehr viel feste Lehmbrocken vorhanden sind, die sich beim Abbaggern nur schwerlich zerkleinern lassen, oder Sekundärlehme aus Steinfeldproduktionen beigemischt werden. Enthält der **Rohlehm < 200 mm** nur wenige Brocken und ist die Feuchte des Materials unter 10 M.-% kann auch dieser direkt gesiebt werden (**Siebung grob**) ohne zusätzlichen Brechvorgang.

Wenn der Rohlehm direkt gewonnen und gesiebt wird, kann meist auf eine Brechtechnik verzichtet werden. Im Laufe des Projektes wurde auch eine neue Siebmaschine in der Gewinnung getestet, die es ermöglicht auch sehr feuchtes Material zu sieben (siehe *Abbildung 4*). In dem Siebprozess wurden die großen Lehmbrocken herausgesiebt und gleichzeitig der Rohlehm auf ein Größtkorn von ca. 32 mm abgesiebt. Ergebnis war ein **Lehm grob**, mit einer Feuchte zwischen 10-15 M.-%.



Abbildung 4: Siebung grob – Absiebung Rohlehm auf Lehm grob



Abbildung 5: Lehm grob ausgebreitet zur Trocknung

Nach der **Siebung grob** wird der Lehm durch flächige Ausbreitung auf eine Feuchte < 10 M.-% getrocknet (*Abbildung 5*). Ziel ist es, die Feuchte so weit wie möglich zu reduzieren, um im nächsten Siebprozess eine optimale Ausbeute zu erzielen. Die Feuchte des Siebgutes ist entscheidend für die Auswahl der Siebe. Sehr feuchtes Material (ca. 9-11 M.-%) z. B. kann nur mit großen Maschenweiten von >24 mm gesiebt werden, da sich ansonsten die Siebeläge zusetzen. Mit sinkender Materialfeuchte kann auch die

Maschenweite reduziert werden (siehe *Kapt. V 1.3*).

Nach der ersten Trocknung wird der **Lehm grob** über eine Siebmaschine mit zwei Siebdecks gesiebt. Vor der Siebung wird der **Lehm grob** je nach Korngrößenverteilung auch nochmal mit Lößlehm angereichert, um ihn im unteren Kornbereich anzupassen. Das Lehmgemisch wird dann in einen zweiten Siebprozess auf ein Größtkorn von 11-16 mm abgesiebt zu einem **Lehm mittel**.

Anschließend erfolgt je nach Erfordernis eine weitere Trocknungsphase und ein weiterer Siebprozess mit dem Ziel einen **Lehm fein** mit einem Größtkorn von 8-11 mm zu erhalten. Für die Feinsiebung werden Harfensiebe verwendet. Sollte der **Lehm fein** in einer Halde länger zwischengelagert (**Lagern**) und nicht gleich der Presse zugeführt werden, ist darauf zu achten, dass die Oberfläche der Halde nicht weiter abtrocknen kann um oberflächige Entmischung im Haufwerk zu vermeiden.

Die **Siebung fein** erfolgt entweder separat in der Aufbereitung oder integriert in den Produktionsprozess im Kalksandsteinwerk.

Als herausfordernd bei der Aufbereitung hat sich die Trocknung des Lehmes in den verschiedenen Schritten herausgestellt. Je nach Jahreszeit und Witterung kann die Trocknung der Lehme zwischen wenigen Tagen und mehreren Wochen dauern. Die Art der Trocknung des **Lehm mittel** hängt von der Ausgangsfeuchte, der Materialmenge, den vorhandenen Lagerkapazitäten sowie den Umgebungsbedingungen an den Lagerorten ab. Bei ungünstigen Witterungsverhältnissen (Niederschlag, niedrige Temperaturen und/oder hohe relative Luftfeuchte) trocknet der Lehm gar nicht oder nur sehr langsam. Es kann daher sinnvoll sein eine technische Trocknung in diesem Prozessschritt einzusetzen. In dem Forschungsprojekt wurde im Technikumsmaßstab daher der Einsatz eines Trommeltrockners getestet. Die Ergebnisse sind in *Kapt. V 2.3* dargestellt.



Abbildung 6: Siebung fein - Siebung Lehm grob zu Lehm mittel bzw. Lehm fein je nach Materialfeuchte



Abbildung 7: Lehm fein nach der Aufbereitung

Eine reine Lufttrocknung des Lehmes bei unbeständiger Wetterlage ist nur unter einem geschützten Dach möglich, wofür entsprechend überdachte Lagerflächen zur Verfügung stehen müssen. Hierfür muss der **Lehm mittel** in einer Schichtstärke von ca. 30-50 cm ausgebreitet werden und nach Ende der Trocknung wieder auf Mieten umgelagert werden. Da die Lufttrocknung auch mit einem großen Maschineneinsatz verbunden ist, ist zu untersuchen, ob die technische Trocknung ökobilanziell nicht

sogar günstiger ist. Für eine industrielle Fertigung muss die Trocknung jedenfalls möglichst unabhängig von der Witterung sein, um einen kontinuierlichen Produktionsprozess zu ermöglichen.

Formgebung

Das Gemisch **Lehm fein** wird nach der Aufbereitung über Förderbänder dem Formgebungsprozess in der bestehenden Kalksandsteinanlage (siehe *Kapt. V 2.2*) zugeführt. Während des **Transportes**, z. B. mit Förderbändern ist auf eine ausreichende Mindestfeuchte zu achten, um Entmischungen an den Übergabepunkten zu vermeiden.

Die Kalksandsteinanlage beinhaltet einen Intensiv-**Mischer**, in welchem das Lehmgemisch **Lehm fein** nochmal kurz aufgemischt, und nach Bedarf auf die richtige Produktionsfeuchte mittels Zugabewasser eingestellt werden kann und so zum **Produktionslehm** konfektioniert wird. Größere Feuchteanpassungen sind in diesem Schritt nicht möglich, da die Tonminerale im Lehm Zeit zur Wassereinbindung benötigen. Die Korrekturmöglichkeiten liegen hier im Bereich kleiner 1 M.-%. Das Zugabewasser ist dabei gleichmäßig verteilt auf die Oberfläche des gesamten Mischgutes zuzugeben, idealerweise als feiner Sprühnebel während des finalen Mischvorganges. Dies ist wichtig, um u.a. Verklumpungen im Mischgut zu vermeiden. Auch besteht beim Mischen die Möglichkeit die Korngrößenverteilung nochmal durch Zugabe von Sand oder RC-Material (siehe *Kapt. V 1.4*) anzupassen.

Die richtige Korngrößenverteilung ist maßgeblich für die Herstellung von Plan-Lehmsteinen im Formpressverfahren. Vergleichbar zu den Fuller-Parabeln für Beton müssen die Lehm-mischungen gleichmäßig abgestuft sein (*Kapt. V 1.3*), um eine optimale Verdichtbarkeit zu erzielen. Im Gefüge stehen die Kieskörner in direkten Kontakt zueinander. Dies führt zu einer hohen Stabilität der Steine nach dem Pressvorgang und verhindert Schwindverformungen während der Trocknung. Neben der Sieblinie ist der Feuchtegehalt beim Pressvorgang wie auch schon in den vorigen Prozessschritten entscheidend.



Abbildung 8: Horizontalschliff infolge zu feuchten Produktionslehmes
Abbildung 9: Entmischung - Produktionslehm zu trocken

Bei zu feuchten **Produktionslehm**-Mischungen können die Adhäsionskräfte zwischen Lehmstein und Stempel beim Entformen zu groß sein, so dass es zu Horizontalrissen im Lehmsteingefüge kommen kann (*Abbildung 8*). Eine zu trockene Mischung wiederum lässt sich nicht vollständig verdichten und hat zudem eine verstärkte Neigung zu Entmischungen bei der Befüllung des Formkastens. Dies ist u.a. erkennbar durch Kiesnester bevorzugt auf einer Steinseite (*Abbildung 9*).



Abbildung 10: Gefüllter Formkasten mit Produktionslehm mit Abbildung 11: Pressvorgang

Bei der Formgebung wird der **Produktionslehm** mittels eines Füllkastens in den Formkasten gegeben (Abbildung 10). Die Unterseite des Formkastentisches ist variabel in der Höhe einstellbar. Nach Befüllung der Form wird in einem Presshub von oben und unten ein Druck von 120- 180 bar je nach Formatgröße auf den **Produktionslehm** aufgebracht.

Unmittelbar nach dem Pressvorgang fährt der Unterstempel nach oben und drückt die fertigen Steine aus der Form (Abbildung 12). Diese werden dann aus dem Pressbereich mit Greifern herausgehoben und direkt auf Trocknungswagen gestapelt (Abbildung 13).



Abbildung 12: Lehmsteine nach Pressvorgang – hier Format 4DF (240) mit Abbildung 13: Stapeln der Lehmsteine auf Härtewagen - hier Format 6DF (175)

Für den maschinellen Pressvorgang wird der Maschinensteuerung die zu erzielende Steinhöhe, sowie der Mindestpressdruck vorgegeben. Durch Steuerung des Befüllvorganges (Höhe des Unterstempels beim Einfüllen) nähert sich die Maschine iterativ der Zielvorgabe. Durch diesen Prozess ist es überhaupt erst möglich, Lehmsteine als Plan-Lehmsteine herzustellen. In jedem Pressvorgang werden zwischen 2 (bei 16 DF) und 8 Steine (bei 2 DF) gleichzeitig hergestellt. Wird die zu erzielende Mindesthöhe nicht erreicht oder ist der Pressdruck zu niedrig, werden die Steine des Presshubes direkt aussortiert, mechanisch zerkleinert, und als

Lehmgemisch in der Anlage wieder zurückgeführt und dann anteilig der Mischung **Lehm fein** nach dem Mischer wieder zugegeben.

Direkt nach dem Formgebungsprozess und vor der Überführung auf den sogenannten Härtewagen (Transportwagen aus der Kalksandsteinproduktion) werden die Steine visuell begutachtet. Weisen die Steine z.B. Inhomogenitäten oder Kiesnester auf bzw. sind andere Beschädigungen erkennbar, werden die Steine aussortiert (*Abbildung 14*).



Um diesen Prozessschritt zu verbessern, wurde in dem Forschungsvorhaben durch die MFPA Weimar auch die Anwendung eines optosensorischen Verfahrens im Labormaßstab (siehe *Kapt. V 3*) erprobt.

Abbildung 14: Aussortierung fehlerhafter Steine

Trocknung

Nach dem Formgebungsprozess werden die **Lehmsteine, feucht** auf Härtewagen in drei und mehr Lagen gestapelt und in den offenen Autoklaven der Kalksandsteinproduktion mit der verbliebenen Rest- und Abwärme teilgetrocknet (*Abbildung 15*). Je nach Umgebungsbedingung verbleiben die **Lehmsteine, feucht** in den bis zu 30 m langen Röhren wenige Tage bis mehrere Wochen. Für die Trocknung wird dafür die Abwärme aus der bestehenden Kalksandsteinproduktion verwendet. Unter Produktionsbedingungen (Kalksandstein) herrschen in der Halle mit den Autoklaven Temperaturen von über 30°C, so dass ausreichend (Ab-)Wärme für die Trocknung der **Lehmsteine, feucht** vorhanden ist.



Abbildung 15: Einfahrt der Steine in den Autoklaven zur Trocknung. Die Steine trocknen durch Abwärme der benachbarten Autoklaven, die Deckel bleiben geöffnet.

Um diesen Prozess zu beschleunigen wurde in dem Projekt nach Möglichkeiten gesucht, wie dieser Prozess in einer bestehenden Kalksandsteinanlage beschleunigt werden kann. Idealerweise sind die **Lehmsteine, feucht** einzeln zu stapeln und erst nach vollständiger Trocknung wieder in Pakete zusammenzuführen. Verschiedene Stapelvarianten wurden getestet und die Luftströmung in den Autoklaven geändert. Auch theoretische Überlegung zur Integrierung einer Trocknungsanlage in den bestehenden Produktionsprozess wurden diskutiert (*Kapt. V 2.3*).

In dem Projekt wurde auch der Ansatz einer Teiltrocknung verfolgt: Die **Lehmsteine, feucht** müssen nur soweit heruntergetrocknet (ca. 4 M.-%), bis die Regelungsparameter den

normativen Anforderungen an die Druckfestigkeit und die Anwendbarkeit erfüllen. Die Resttrocknung der **Lehmsteine, teiltrocken** kann dann bauseits erfolgen. Wie Ergebnisse von Versuchsreihen gezeigt haben, trocknen **Lehmsteine, feucht**, die bei 23°C und 50 % rel. Luftfeuchte einzeln gelagert werden vor allem in den ersten zwei Wochen nach Produktion am stärksten. Dies ist verbunden mit der Entwicklung einer sehr guten Lehmstein-Frühdruckfestigkeit. Danach schreitet der Trocknungsprozess wie auch die Festigkeitszunahme in Abhängigkeit vom jeweiligen Steinformat nur sehr langsam voran bis sich eine Ausgleichsfeuchte am Endprodukt von unter 2 M.-% einstellt (*Kapt. V 2.3*).

Paketierung und Lagerung

Wenn die **Lehmsteine, teiltrocken** die nach Norm geforderte Druckfestigkeit erreicht haben, werden sie von den Trockenwagen genommen und der **Paketierung** zugeführt (*Abbildung 16*). Hier werden sie in drei (Steinhöhe 24,8 cm) bzw. sieben Lagen (Steinhöhe 12,3 cm) automatisch auf Europaletten gestapelt, mit Kantenschutz aus Hartpappe versehen und mit Transportbändern umreift. Im Projekt wurden verschiedene Verpackungsvarianten für die Lehmsteine untersucht, mit dem Ziel die Steine optimal vor Witterung zu schützen, ein weiteres Abtrocknen der Steine zu ermöglichen und Transportschäden möglichst zu verhindern. Insbesondere die untere Steinlage stellte sich in dem Projekt als kritisch heraus (*Kapt. V 2.4*).

Die Prüfungen nach DIN 18945 [2] werden dann an den **Lehmsteinen, trocken** im Zuge der Qualitätskontrolle durchgeführt. Diese umfassen neben den Druckfestigkeitsprüfungen auch Untersuchungen zur Eingruppierung in die Anwendungsklassen. Wie die Ergebnisse des Forschungsprojektes bislang schon gezeigt haben, verhalten sich formgepresste Lehmsteine anders als stranggepresste oder formgeschlagene Lehmsteine. Eine Unterscheidung nach Herstellungsart der Steine wird zukünftig in den jeweiligen Normen Berücksichtigung finden müssen.



Abbildung 16: Paketierung - Umsetzen der Steine von Härtewagen auf Europaletten

IV. Methodik

IV 1 Auswahlkriterien für geeignete Lehmvorkommen

Bei den Vorort-Begehungen waren die Kriterien für die Auswahl, ob es sich um Geschiebelehm und/oder Lößlehm handelte und ob die Bindigkeit hinreichend für die Verwendung formgepresster Lehmsteine ist. Zusätzlich konnte ein erster Eindruck hinsichtlich der Mächtigkeit (Schichtstärke) der Vorkommen und deren Homogenität innerhalb der Schichten gewonnen werden. An allen begangenen Lagerstätten wurden erste Proben genommen und im folgenden ausgesuchte Charakterisierungsmethoden daran durchgeführt.

IV 2 Baustoffcharakterisierung

IV 2.1 Geotechnische Untersuchungsmethoden

Mit Hilfe von geotechnischen Untersuchungsmethoden lassen sich die Eigenschaften eines Bodens untersuchen, um in der Regel dessen Eignung für ein Bauvorhaben zu bestimmen. Aus einigen dieser Eigenschaften, wie Bindekraft, Plastizität, Korngrößenverteilung und Mineralogie können auch Aussagen zur Beurteilung der Eignung für die Herstellung von Lehmbauprodukten abgeleitet werden. Mit folgenden Untersuchungsmethoden lassen sich die voran genannten Eigenschaften untersuchen:

- Trocken(roh)dichte ρ_d [3] bei 105 °C | 20°C/65%rLF | 23°C/50%rLF
- Reindichte ρ_s mittels Pyknometer-Verfahren [5]
- Reindichte ρ_F mittels Helium-Pyknometer [6]
- Kombinierte Sieb- und Schlämmanalyse [7]
- Kapillares Wasseraufnahmevermögen w_b [8]
- Wassergehalt w_N bei Normsteife [9]
- Wassergehalt w_{opt} nach Proctor (Verdichtungskurve) [10]
- Bestimmung der Bindekraft B [11]
- Bestimmung des Wassergehaltes w_L an der Fließgrenze [12]
- Bestimmung des Wassergehaltes w_P an der Ausrollgrenze [12]
- Bestimmung des Wassergehaltes w_S an der Schrumpfgrenze [13]
- Plastizitätszahl I_P [12]
- Aktivitätszahl I_A [12]
- Lineares Schwindmaß $\epsilon_{f,l}$ [11]
- Freischwellwert F_S [11]
- Quellpotential h' (mit Oedometer) [11]
- GV (1.000°C)
- HCl unlöslich
- Oxide (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Na_2O , K_2O , CaO , MgO , CaCO_3 , SO_3 , CO_2)
- Organik (TOC)
- pH-Wert
- Wasserlösliche Salze (Sulfate, Chloride, Nitrate)
- Mineralogische Zusammensetzung (Nichttonminerale, Tonminerale)

Die Durchführung all dieser Untersuchungsmethoden an jeder Lehmprobe ist mit einem erheblichen personellen und zeitlichen Aufwand verbunden. Insbesondere im Rahmen eines

Screenings hinsichtlich geeigneter Lagerstätten ist ein solcher Aufwand nicht umsetzbar. Es wurde daher untersucht, welche geotechnischen Eigenschaften für ein erstes Lagerstätten-Screening unumgänglich sind.

IV 2.2 Handversuche nach Lehmbau-Regeln

Die Lehmbau Regeln geben eine Reihe von einfachen Eingangsprüfungen vor, mit denen Gruben- bzw. Baulehm bezüglich seiner Eignung für die Herstellung von Lehmbauprodukten untersucht werden kann. Diese sogenannten Handprüfungen sind:

- Visuelle Prüfung der Kornzusammensetzung [14]
- Sedimentationstest [14]
- Kugelformprobe [14]
- Kugelfallprobe [14]
- Schneideversuch [14],[15]
- Trockenfestigkeitsversuch [15]
- Reibeversuch [14],[15]
- Riechversuch [14],[15]
- Bestimmung der Farbe
- Bestimmung des Kalkgehaltes [14],[15]

Einige dieser Prüfungen können bereits bei Begehung einer Lagerstätte vor Ort durchgeführt werden und lassen eine erste Einschätzung zur prinzipiellen Eignung zu. Jedoch ist in diesem Zusammenhang ein gewisser Erfahrungsschatz zwingend Voraussetzung. Es wurde auch hier untersucht, welche Handprüfungen für ein erstes Lagerstätten-Screening tauglich sind.

IV 2.3 Adaptierte, weiterentwickelte Untersuchungsmethoden

Bereits der Umfang möglicher Untersuchungsmethoden zeigt auf, dass für ein Lagerstätten-Screening praktikablere und personenunabhängigere Untersuchungsmethoden notwendig sind. Insbesondere für das Screening vor Ort ist es wichtig, eine erste relevante Auswahl an Proben herauszufiltern, die dann im Labor weiter charakterisiert werden können. Für die Herstellung von formgepressten Lehmsteinen muss daher Rücksicht auf deren Zusammensetzung (z.B. Korngrößenverteilung, Bindekraft, Mineralogie) genommen werden. Diese unterscheidet sich wesentlich von der Zusammensetzung von z.B. stranggepressten Lehmsteinen oder einem Lehmputzmörtel. Es wurde daher in ersten Schritten untersucht, ob mit einer mobilen Lehmstein-Kniehebelpresse eine erste Einschätzung zur Eignung von Gruben- bzw. Baulehm gemacht werden kann. Mit einer mobilen Lehmstein-Kniehebelpresse können vor Ort frisch entnommenen Proben, ggfs. unter Zugabe von Wasser, zu einem NF-Steinformat gepresst werden. An der Steinstabilität beim Formaustrag und einer visuellen sowie haptischen Prüfung kann eine orientierende Eignung des beprobten Grubenlehmes erfolgen. Wenn der gewonnene Stein geeignet scheint, kann an diesem nach Trocknung bereits eine orientierende Untersuchung der Druckfestigkeit erfolgen.

IV 3 Untersuchungen am Lehmstein

IV 3.1 Normative Prüfverfahren nach DIN 18945

Die in diesem Forschungsprojekt entwickelten Lehmsteine haben als normative Grundlage die aktuelle Fassung der DIN 18945, Ausgabe März 2024 [2]. Diese bildet den anerkannten Stand der Technik ab. Für tragendes Lehmsteinmauerwerk nach DIN 18940, Ausgabe Juni 2023 [1] dürfen nur nach DIN 18945 deklarierte Lehmsteine verwendet werden.

In der DIN 18945 werden sowohl die Anforderungen an Lehmsteine als auch die jeweiligen Prüfungen umfänglich beschrieben. Alle im Forschungsprojekt entwickelten Lehmsteine sollen den Anforderungen an Lehmsteine nach DIN 18945 entsprechend und als solche deklarierbar sein.

Tabelle 1: Prüfmethode(n) nach DIN 18945 [2]

Anforderungen nach DIN 18945	Prüfverfahren /-methode(n)
Form	Form, Lochung, Stege und Maße nach DIN 18945
Lochung und Stege	
Maße	
Formate	
Gehalt an bauschädlichen Salzen	geeignete Prüfmethode (i.d.R. nasschemisch)
Steinrohichte	Steinrohichte / Stoffrohichte nach DIN 18945
Druckfestigkeit	Druckfestigkeit nach DIN 18945
Verhalten unter Feuchte- und Frosteinwirkung	<ul style="list-style-type: none"> • Tauchprüfung • Kontaktprüfung • Saugprüfung • Frostprüfung • alle nach DIN 18945
Wasserdampfdiffusionswiderstand	<ul style="list-style-type: none"> • DIN EN ISO 12572 [16] • Einstufung nach Lehmbau Regeln [14]
Wärmeleitfähigkeit	Einstufung nach DIN 4108-4
Brandverhalten	Brandverhalten / Baustoffklasse nach DIN 18945
Wasserdampfadsorption	Wasserdampfadsorption nach DIN 18945
Natürliche Radionuklidaktivität und Aktivitätskonzentrationsindex /	Natürliche Radionuklidaktivität und Aktivitätskonzentrationsindex / nach DIN 18945

Sowohl die Lehmsteinnorm DIN 18945 als auch die Lehmsteinmauerwerksnorm DIN 18940 sehen keine Verwendung von sogenannten Plansteinen als Mauerwerksteine vor. Plansteine sind Mauersteine mit hoher Maßgenauigkeit, die sich durch präzise (ebene) und parallele

Auflagerflächen auszeichnen. Diese Plansteine können mittels Dünnbettmörtel im Mauerwerksverband versetzt werden. Die aktuelle Lehmsteinentwicklung zielt genau in diese Richtung, da damit eine effektivere und dem aktuellen Baugeschehen entsprechende Bauweise mit Plan-Lehmsteinen Rechnung getragen werden kann. Die im Folgenden aufgeführten Anforderungen an Plan-Lehmsteine ergänzen daher die nach DIN 18945 aufgeführten Anforderungen für Lehmsteine.

Mit den Ergebnissen zu den voranstehenden Anforderungen kann im Rahmen einer sogenannten Erstprüfung (entspricht vollständigem Prüfungsumfang) eine Einordnung und Deklaration nach DIN 18945 erfolgen.

Tabelle 2: Ergänzende Prüfmethode(n) für Plan-Lehmsteine

Neue Anforderungen für Plan-Lehmsteine	Prüfverfahren / -methode(n)
Ebenheit	Ebenheit nach DIN EN 772-20 [18]
Planparallelität	Planparallelität nach DIN EN 772-16 [19]

Es wurden an mehr als 10 im Werk hergestellten Steinsorten die Erstprüfungen bzw. daraus ausgewählte Prüfverfahren vorgenommen. Darüber hinaus wurden an 21 Versuchsserien eines Formates mit unterschiedlichen Zusammensetzungen (Rezepturenentwicklungen) ausgewählte Prüfverfahren angewendet.

Prüfbericht Nr.	Prüfbericht Datum	Produktionsdatum	Format	Abmessungen [mm]	Anwendungs-klasse	Tauchprüfung [Ma-%]	Kontaktp-rüfung [°]	Saugprüfung [°]	Rohdichte [kg/m³]	Rohdichte-klasse	Druckfestigkeit [N/mm²]	Druckfestigkeits-klasse	Wasserdampfdiffusion	Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]	Baustoff-klasse	Statischer E-Modul [N/mm²]	23R _a [Bq/kg]	23Th [Bq/kg]	40K [Bq/kg]	Aktivitätskonzentrations-index
17.22.366.01	24.10.2022	04.07.2022	2 DF	240x115x113	AK II	12	AK II	AK II	2.107	2,2	3,8	3	5/10	1,3	A1	947	15	22	289	0,26
17.23.048.01	27.11.2023	19.12.2022	6 DF	248x175x248	AK II	5	AK II	AK II	2.136	2,2	3,9	3	5/10	1,3	A1		15	22	289	0,26
17.23.048.02	27.11.2023	19.12.2022	10 DF	248x300x248	AK II	9	AK II	AK II	2.115	2,2	4,5	3	5/10	1,3	A1		15	22	289	0,26
17.24.160.08	19.12.2023	28.05.2023	10 DF	248x365x113	AK III	21	AK II	AK II	2.074	2,2	2,4	nicht tragend	5/10	1,2	A1					
17.24.160.01	17.02.2025	01.01.2024	8 DF	248x240x248	AK III	26	AK II	AK II	1.832	2,0	2,4	nicht tragend	5/10	1,0	A1					
17.24.160.02	13.06.2024	01.01.2024	16 DF	497x240x249	AK III	14	AK II	AK II	2.156	2,2	4,9	3	5/10	1,3	A1					
17.24.160.03	02.04.2025	01.05.2024	2 DF	240x115x113	AK II	19	AK II	AK II	2.127	2,2	5,5	4	5/10	1,3	A1					
17.24.160.04	18.09.2024	06.05.2024	8 DF	248x240x248	AK II	6	AK II	AK II	2.092	2,2	4,1	3	5/10	1,2	A1					
17.24.160.07	23.04.2025	04.09.2024	10 DF	248x300x247	AK II	13	AK II	AK II	2.112	2,2	5,2	4	5/10	1,3	A1					
17.24.160.09	25.03.2025	29.10.2024	8 DF	248x240x248	AK II	3	AK II	AK II	2.141	2,2	5,9	4	5/10	1,3	A1					
17.24.160.10	26.06.2025	01.10.2024	12 DF - Plan	248x365x247	AK II	0	AK II	AK II	2.054	2,2	7,9	6	5/10	1,2	A1					
17.24.160.11	26.06.2025	01.05.2024	2 DF	240x115x113	AK II	11	AK II	AK II	2.175	2,2	7,0	5	5/10	1,3	A1					
17.24.160.12	01.09.2025	28.05.2025	4 DF - Plan	248x115x248	AK III	-	AK II	-	1.972	2,0	2,1	nicht tragend	5/10	1,1	A1					
17.24.160.13	02.06.2025	02.06.2025	6 DF - Plan	248x175x248	AK II	10	AK II	AK II	2.072	2,2	4,7	3	5/10	1,2	A1					
17.24.160.14	28.10.2024			248x115x123	AK II	5	AK II	AK II	2.057	2,2	5,6	4	5/10	1,2	A1					

Abbildung 17: Prüfumfang Erstprüfungen an im Werk hergestellten Lehmsteinen

Durch den sehr großen Umfang an Prüfungen konnten Ablaufroutinen entwickelt, steinformat-spezifisches Handling erprobt und Grenzen bei einigen Prüfmethode(n) aufgezeigt werden.

Eine Reihe von Prüfverfahren, wie z.B. die Bestimmung der Steinrohddichte, der Druckfestigkeit sowie die Prüfverfahren zum Verhalten unter Feuchte- und Frosteinwirkung bedingen vor dem Beginn der eigentlichen Prüfung eine Konditionierung der zu untersuchenden Lehmsteine bei 23 °C und 50 % relativer Luftfeuchte (rLF) bis zur Massekonstanz. Im Rahmen einer werks-eigenen Produktionskontrolle sind Temperaturabweichungen von ± 5 °C und relative Luft-feuchteabweichungen von ± 15 % zulässig. Die Massekonstanz (Konditionierung) der Lehm-steine gilt als erreicht, wenn die Ergebnisse von zwei aufeinander folgenden Wägungen im Abstand von 24 Stunden höchstens 0,2 % der Masse bezogen auf den kleineren Wert voneinander abweichen. Bei großformatigen, massiven Lehmsteinen (> 6DF) wurde doku-mentiert, dass das normative Kriterium – Massekonstanz, $\Delta m_{1 Tag} \leq 0,2 M.-%$ nach 24 Stunden – bereits nach 7 Tagen erreicht wurde, sich die tatsächliche Massekonstanz jedoch erst nach 14 Tagen einstellte (Abbildung 18).

Insbesondere bei großformatigen Lehmsteinen mit einem deutlich kleineren Oberflächen-Volumen-Verhältnis als kleinformatigere Lehmsteine verlangsamt sich der Trocknungsverlauf bzw. die Trocknungsgeschwindigkeit erheblich. Dies führt dazu, dass das 24-Stunden-Massekonstanz-Kriterium aufgrund des langsameren Trocknungsprozesses zwar schnell erreicht wird, sich die tatsächliche Massekonstanz im gesamten Stein noch nicht eingestellt hat.

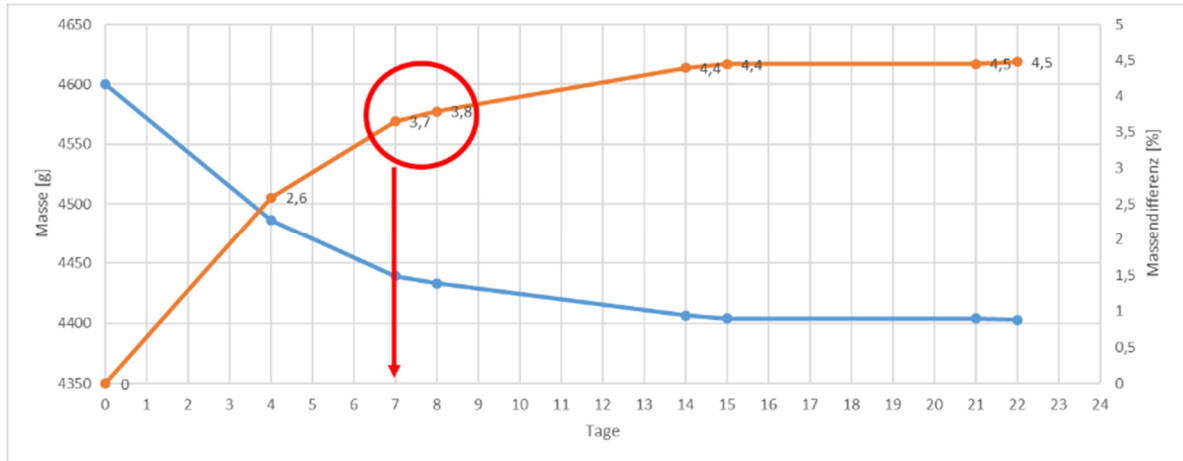


Abbildung 18: Messung zur Bestimmung der Ausgleichsfeuchte unter Berücksichtigung des Massekonstanz-Kriteriums nach Norm und tatsächlicher Massekonstanz

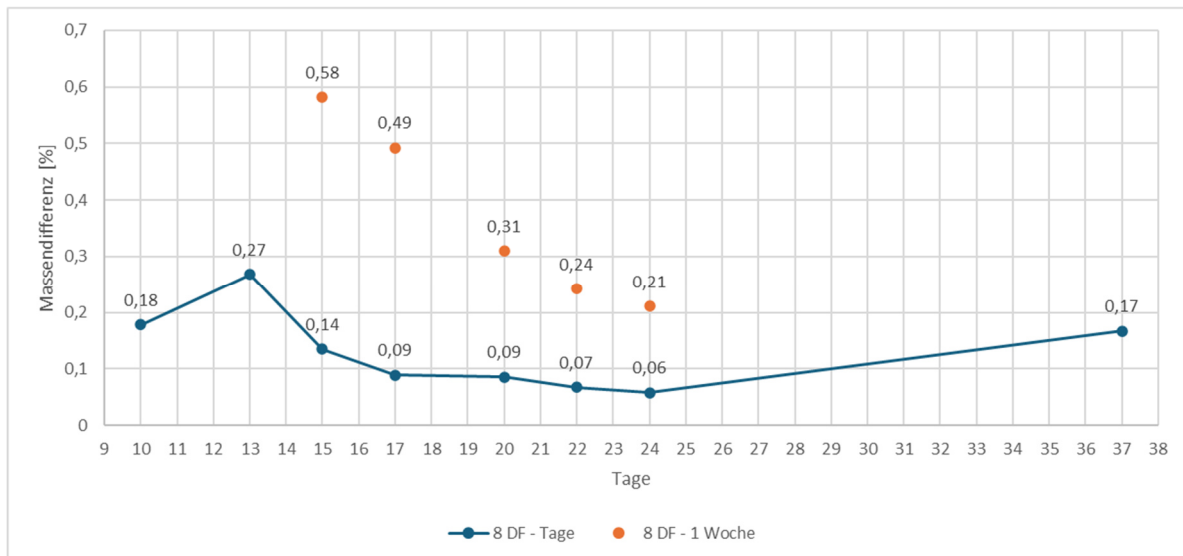


Abbildung 19: Messung des Trocknungsverlaufes an einer Charge Lehmsteine des 8 DF-Formates (248 x 240 x 248) mm

Wie in *Abbildung 19* zu sehen ist, wurde die Messung des Trocknungsverlaufes an einer Charge Lehmsteine des 8 DF-Formates (248 x 240 x 248mm) über einen Zeitraum von 37 Tagen untersucht. Die Konditionierung der Lehmsteine bei 23 °C / 50 % rLF nach DIN 18945, z.B. Abschnitt 9.5 wird mit der erforderlichen Massekonstanz ($\Delta m \leq 0,2$ M.-%, hier 48 h statt 24 h) nach 15 Tagen mit $\Delta m = 0,14$ M.-% erreicht. Werden die Massendifferenzen auf einen Zeitraum zwischen Wägungen statt auf 24 h (hier 48 h) auf jeweils 7 Tage (1 Woche) bezogen betrachtet, ist festzustellen, dass nach 15 Tagen Konditionierung die Massendifferenz

$\Delta m_{1 \text{ Woche}} = 0,58 \text{ M.-%}$ beträgt und deutlich über dem normativen Massekonstanz-Kriterium ($\Delta m_{1 \text{ Tag}} \leq 0,2 \text{ M.-%}$) liegt. Dieses wird erst nach 24 Tagen erreicht.

Vor diesem Hintergrund wurde das $\leq 0,2 \text{ M.-%}$ -Kriterium auf einen 7 Tage-Abstand (1 Woche) erweitert. Damit konnte eine einheitliche Konditionierung aller untersuchten Lehmstein-Chargen für die weiteren Laborprüfungen sichergestellt werden.

IV 3.2 Bauphysikalische Untersuchungen

Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit (λ), gehört zu den zentralen thermischen Eigenschaften von Lehmbaustoffen und beschreibt die Fähigkeit eines Materials, Wärmeenergie zu leiten. Sie gibt an, welche Wärmemenge in einer Sekunde durch eine 1 m^2 große Fläche eines 1 m dicken Materials transportiert wird, wenn zwischen den beiden Oberflächen ein Temperaturunterschied von 1 K besteht. Zu den maßgeblichen Faktoren, die sie beeinflussen, gehört die Rohdichte, der Feuchtegehalt und die Temperatur. So nimmt die Wärmeleitfähigkeit mit zunehmender Rohdichte zu. Dies lässt sich durch den Porenanteil im Material erklären. Luftgefüllte Hohlräume wirken als thermische Barrieren, da Luft mit einer Wärmeleitfähigkeit von nur $0,025 \text{ W/mK}$ ein sehr schlechter Wärmeleiter ist. Je dichter ein Baustoff ist, desto weniger Poren enthält er – und damit auch weniger isolierende Lufteinschlüsse. Wasser hingegen hat eine deutlich höhere Wärmeleitfähigkeit als Luft, sodass mit zunehmender Feuchte der Baustoff insgesamt besser Wärme leitet. Daher weisen tragende Baustoffe, die aufgrund statischer Anforderungen eine hohe Rohdichte haben, in der Regel nur mäßige Dämmeigenschaften auf.

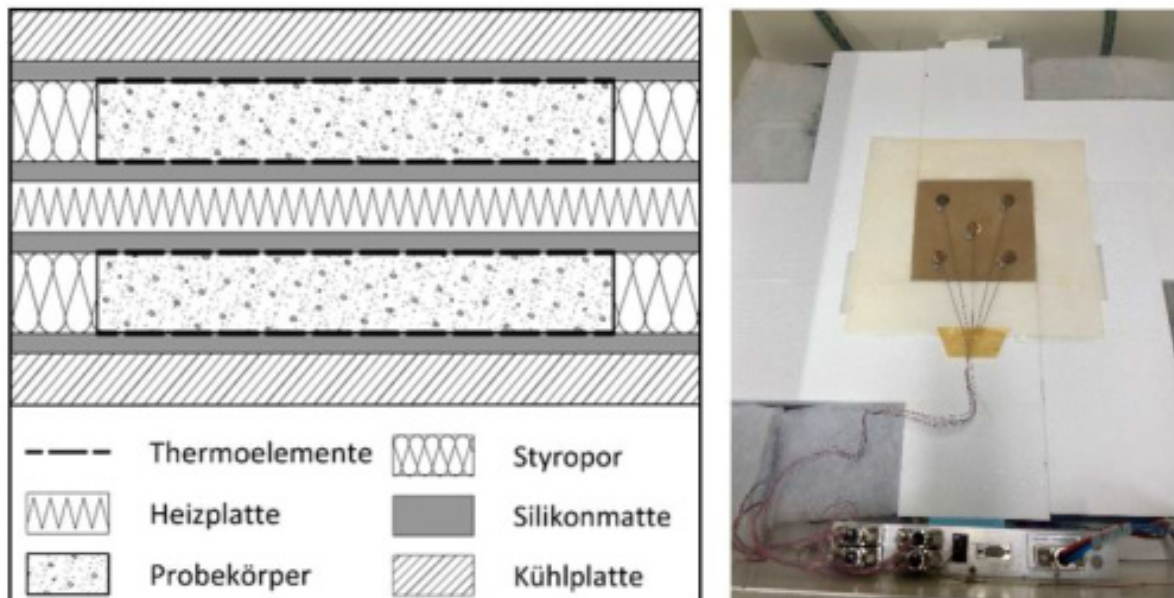


Abbildung 20: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus (links) und in das Plattengerät eingebauter Prüfkörper mit Thermoelementen (rechts)

Die Wärmeleitfähigkeit wurde gemäß DIN EN 12664 [20] im Zweiplattenverfahren an den selbstgepressten Lehmplatten bestimmt. Dabei wurden zwei Probekörper jeweils zwischen

einer Heiz- und einer Kühlplatte platziert. Der Temperaturunterschied zwischen den Platten erzeugt einen konstanten und gleichmäßigen Wärmestrom, der durch die Probekörper fließt. Aus diesem Wärmestrom lässt sich die Wärmeleitfähigkeit ableiten. Um sicherzustellen, dass der Wärmestrom ausschließlich durch die Prüfkörper und ohne seitliche Wärmeverluste fließt, wurden die Probekörper thermisch isoliert. Hierfür kam eine Kombination aus Styropor und wärmedämmendem Vlies zum Einsatz. Die Prüfkörper, welche zuvor mit der hydraulischen Presse hergestellt wurden, wurden vor dem Einbau in das Gerät bei 23 °C und 50 % relativer Luftfeuchtigkeit über einen Zeitraum von 28 Tagen konditioniert. Zur Messung der Temperaturdifferenz zwischen der Ober- und Unterseite der Proben wurden Thermoelemente an beiden Seiten des Probekörpers angebracht. Die Heizleistung der Heizplatte wurde so eingestellt, dass sich zwischen der Ober- und Unterseite der Proben eine Temperaturdifferenz von etwa 10,5 K einstellte. Der Messvorgang erstreckte sich über insgesamt 45 h. Dabei wurden die Messungen bei mittleren Temperaturen der Probekörper von 10 °C, 20 °C und 30 °C, jeweils über einen Zeitraum von 15 h durchgeführt. Die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit erfolgte anhand des konstanten Wärmestroms Φ , der Dicke d und der Fläche A des Probekörpers sowie der Temperaturdifferenz zwischen der Ober- und Unterseite der Probe nach *Gleichung (1)* in 30-Minuten-Intervallen. Die Werte wurden gemittelt, sodass der Lambda-Wert für eine mittlere Temperatur der Probe von 10 °C, 20 °C und 30 °C angegeben wurde. Der Wärmestrom entspricht dabei der Heizleistung, die der Heizplatte zugeführt werden musste.

Die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit (λ) ergibt sich aus:

$$\lambda = \frac{\Phi \cdot d}{A \cdot (T_1 - T_2)} \quad (1)$$

Dabei ist

λ Wärmeleitfähigkeit [W/mK]

Φ mittlere Leistungszufuhr zum Messausschnitt der Heizplatte [W]

d mittlere Dicke des Probekörpers [m]

A Messfläche [m²] (Im Zweiplattengerät ist die Messfläche mit dem Faktor 2 zu multiplizieren)

T_1 mittlere Temperatur der heißen Seite des Probekörpers [K]

T_2 mittlere Temperatur der kalten Seite des Probekörpers [K]

Wasserdampfadsorption

Die Wasserdampfadsorption beschreibt die Fähigkeit eines Materials, Wassermoleküle aus der Umgebungsluft aufzunehmen und an seiner Oberfläche zu binden. Dieser Prozess spielt eine zentrale Rolle für das hygrische Verhalten von Baustoffen und beeinflusst maßgeblich das Raumklima sowie den Feuchtehaushalt eines Gebäudes. Besonders Lehmstoffe sind für ihre hohe Sorptionsfähigkeit bekannt und tragen zur Regulierung der Luftfeuchtigkeit bei. Grundsätzlich erfolgt die Feuchtespeicherung von Lehmstoffen durch verschiedene Mechanismen. Bei Anstieg der relativen Luftfeuchtigkeit kommt es zu einem Partialdruckunterschied, der als treibende Kraft für die Diffusion von Wasserdampf in den Porenraum des Lehmstoffs verantwortlich ist. Wasserdampf diffundiert dabei immer vom Ort des höheren

Dampfteildrucks zum Ort des niedrigeren, bis ein Gleichgewichtszustand erreicht ist. Die Wassermoleküle werden durch die adsorptive Anlagerung an die Oberflächen der Kapillaren gebunden. Entscheidend hierfür sind Mikroporen mit einem Durchmesser von $\leq 0,1 \mu\text{m}$, in denen durch van-der-Waals-Kräfte die Wassermoleküle an den Porenwänden des Lehm- baustoffs gebunden werden. Steigt die relative Luftfeuchtigkeit weiter an, kommt es zur Kapillarkondensation. Dabei tritt noch vor Erreichen des Sättigungsdampfdrucks die Kondensation von Wasserdampf auf. Dieser Prozess erfolgt bis zu einer relativen Luftfeuchtigkeit von 95 % hauptsächlich in Poren mit Radien zwischen 2 – 50 nm. Zusätzlich zu diesen Prozessen können Wassermoleküle durch die isomorphe Substitution von Kationen in den Zwischenschichten von Dreischichttonmineralen gebunden werden. Die Adsorptionskapazität wird demnach insbesondere von der Porenstruktur und der mineralogischen Zusammensetzung des Materials bestimmt.

Die Bestimmung der Adsorption erfolgte ebenfalls an den drei selbstgepressten Lehmplatten nach DIN 18945. Dafür wurden die Probekörper zunächst auf eine Glasplatte gelegt und an den Seiten mit Paraffin abgedichtet (Abbildung 18), um sicherzustellen, dass die Sorption nur über eine freie Oberfläche des Prüfkörpers erfolgt. Nachdem die Fläche der unversiegelten Seite, sowie die Masse der Probekörper bestimmt wurde, wurden die Proben in einen Klimaschrank gelegt. Dieser wurde bei gleichbleibender Temperatur 23 °C von 50 % auf 80 % rLF angehoben. Nach 1 h, 3 h, 6 h, 12 h und 24 h erfolgten die Messungen der Massenzunahme mithilfe einer Waage. Die Zunahme der Masse entspricht der Wasseraufnahme und ist auf eine Fläche von einem Quadratmeter hochzurechnen. Aus den Werten der drei Prüfkörper wurde der Mittelwert gebildet. Zur vergleichenden Einordnung erfolgte die Einstufung in die Wasserdampfadsorptionsklasse nach DIN 18948 [21]



Abbildung 21: Mit Paraffin abgedichteter Probekörper

	1	2	3	4	5	6
	Wasserdampf-adsorptionsklasse	Wasserdampfadsorption nach A.2.2 nach				
		0,5 Stunde g/m ²	1 Stunde g/m ²	3 Stunden g/m ²	6 Stunden g/m ²	12 Stunden g/m ²
1	WS I	≥ 3,5	≥ 7,0	≥ 13,5	≥ 20,0	≥ 35,0
2	WS II	≥ 5,0	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 30,0	≥ 47,5
3	WS III	≥ 6,5	≥ 13,0	≥ 26,5	≥ 40,0	≥ 60,0

Abbildung 22: Einteilung der Wasserdampfadsorptionsklassen nach DIN 18948 [21]

Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl

Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (μ) ist eine zentrale Kenngröße im Bereich des Feuchteschutzes bei der Planung und Umsetzung von Bauvorhaben. Sie gibt an, um welchen

Faktor ein Baustoff den Wasserdampftransport stärker hemmt als eine gleich dicke Luftschicht. Bei einem Dampfdruckunterschied zwischen der Raumluft und den Poren eines Bauteils bewegt sich der Wasserdampf in Richtung des niedrigeren Drucks, bis ein Gleichgewicht erreicht ist. In beheizten Räumen entsteht typischerweise ein Dampfdruckgefälle von innen nach außen, wodurch Wasserdampf durch das Bauteil diffundiert. Wie stark dieser Prozess gehemmt wird, hängt vom jeweiligen μ -Wert des Materials ab. In Verbindung mit der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl wird häufig auch der s_d -Wert verwendet. Dieser beschreibt die äquivalente Luftschichtdicke und gibt an, welche Dicke einer Luftschicht denselben Diffusionswiderstand aufweisen würde wie das betrachtete Material mit der Schichtdicke d . Ruhende Luft besitzt einen μ -Wert von 1. Der s_d -Wert ermöglicht somit den Vergleich verschiedener Bauteilschichten mit unterschiedlichen Dicken. Der μ -Wert eines Materials wird maßgeblich durch dessen Rohdichte und Porenstruktur bestimmt. Ein hoher μ -Wert zeigt an, dass das Material den Wasserdampftransport stark hemmt.

Der Wasserdampfdiffusionswiderstand wurde entsprechend DIN EN ISO 12572 [16] im Trockenverfahren durchgeführt. Dazu wurden die zylindrischen Probekörper zunächst mit Paraffin an den Seiten abgedichtet um eine gut definierte und reproduzierbare Prüffläche zu erhalten. Anschließend wurden die Proben in ein Prüfgerät aus Glas eingebaut und die Ränder ebenfalls mit Paraffin dampfdicht versiegelt. Damit wurde sichergestellt, dass ausschließlich der Widerstand des Materials gegenüber der Dampfdiffusion gemessen wird. Das Prüfgerät ist so konstruiert, dass es unten mit einem Trockenmittel (Calciumchlorid) befüllt werden kann, während der Probekörper darüber positioniert wird. Der Luftraum zwischen Trockenmittel und Probekörper beträgt 10 mm. Nach der Referenzwägung wurden die abgedichteten Proben in einen Klimaschrank bei 23 °C und 50 % relativer Luftfeuchtigkeit gestellt und in Abständen von 1 bis 4 Tagen gewogen. Die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit im Klimaschrank wurden kontinuierlich überwacht, ebenso wie der barometrische Druck. Die Wägungen der Prüfgeräte wurden so lange wiederholt, bis die Masseänderungen je Zeiteinheit für jeden Probekörper in fünf aufeinanderfolgenden Messungen innerhalb von ± 5 % des Mittelwerts konstant blieben. Aufgrund des unterschiedlichen Wasserdampfteildrucks zwischen dem Prüfgefäß und dem Klimaschrank entsteht ein Dampfdiffusionsstrom durch den Probekörper.

Während die Feuchtigkeit durch den Probekörper in Richtung des Trockenmittels diffundiert, kommt es zu einer Masseänderung des Prüfaufbaus. Aus der Bestimmung der Masseänderung in bestimmten Zeitabständen lässt sich die Wasserdampfdiffusionsstromdichte ermitteln. Hierzu wird eine Regressionsgerade zwischen der Masse und der Zeit aufgestellt, aus deren Steigung die Diffusionsstromdichte (G) ermittelt wird, welche wiederum in die Berechnung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (μ) nach DIN EN ISO 12572 [16] einfließt.



Abbildung 23: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit

IV 3.3 Neuentwickelte Prüfverfahren

Bindekraftuntersuchung mittels Lehmstein-Kniehebelpresse

Im Rahmen des Projektes wurde untersucht, inwieweit eine vereinfachte Vorort-Bestimmung Aussagen zur Eignung von Grubenlehm in den jeweiligen Lagerstätten als Ausgangsmaterial für Produktionslehm für die Lehmsteinherstellung mittels Formpressen mit Hilfe Lehmstein-Kniehebelpresse zulässt. Dazu wurde eine aus den 1980er Jahren stammende transportable Kniehebel-Lehmsteinpresse (siehe *Abbildung 26*) verwendet. Die Presse ist für Steine im Normalformat (NF) (240 x 115 x 70 mm) und einem Pressdruck von ca. 2 N/mm² ausgelegt. Die Herstellung eines Steines umfasst die Arbeitsschritte:

- a) Entnahme des Grubenlehm – wenn notwendig ggfs. vor Ort Absieben des Oberkorns (8-11 Körnung) und Nachfeuchten
- b) Einfüllen des Grubenlehms in den Formkasten
- c) Schließen des Formkastens
- d) Pressen durch Hebeldruck
- e) Aushub des Pressrohlings durch Umlegen des Hebels

Nach dem Aushub des so aus Grubenlehm hergestellten Lehmsteines können erste visuell-qualitative Aussagen zur Pressbarkeit, Bindekraft und Homogenität des Materials getroffen werden.

Prüfkörperherstellung

Für die voran und nachfolgend beschriebenen Charakterisierungsmethoden war es notwendig, für die jeweilige Methode die geeigneten Prüfkörper zu generieren. Üblicherweise werden dazu aus den jeweiligen Bauprodukte die Prüfkörper durch (Nass-)Sägen, (Nass-)Bohren und (Nass-)Schleifen gewonnen. Lehmsteine nass zu bearbeiten ist nicht möglich. Hinzu kommt erschwerend, dass die grobe Gesteinskörnung im Zusammenhang mit der geringer Gefügefestigkeit beim Sägen oder Bohren immer zu Ausbrüchen und damit zu undefinierten Prüfflächen führt. Daher mussten die Prüfkörper eigens aus dem Produktionslehm so hergestellt werden, dass sie zum Einem die Anforderungen an die Probengeometrie der jeweiligen Charakterisierungsmethode erfüllen und Andererseits in Zusammensetzung und Rohdichte dem industriell hergestellten Lehmstein entsprechen.

Prüfkörper für Wärmeleitfähigkeit und Wasserdampfadsorption

Für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit und der Wasserdampfadsorption wurden Prüfkörper mit den Abmessungen 200 x 200 x 40 mm benötigt. Diese Maße sind von den jeweiligen Prüfgeräten und den entsprechenden DIN-Normen vorgegeben. Für die Herstellung der Prüfkörper wurde die erdfeuchte Lehmmischung in eine entsprechende Form gefüllt und anschließend unter Einsatz einer hydraulischen Presse mit einer Presskraft von 5 N/min bis zur Erreichung der Zielhöhe von 40 mm verdichtet. Zuvor wurde der Aufbau auf einem Rütteltisch gestellt, um die Körner vorab zu verdichten und eine gleichmäßige Verteilung des Materials in der Form zu gewährleisten. Damit die Proben nach der Verdichtung leicht aus der Form entnommen werden konnten, wurde zwischen Form und Lehmmischung Backpapier

eingelegt. Zur Sicherstellung einer gleichmäßigen Presskraft wurden drei Siebdruckplatten mit einer Dicke von jeweils 20 mm übereinander in die Form eingelegt. Um die gleiche Rohdichte wie bei den werksseitig hergestellten Steinen zu erzielen, wurde die benötigte Menge der Lehmischung aus der Zielrohichte und dem Volumen des Prüfkörpers berechnet. Die werksseitige Rohdichte ist bekannt und beträgt 2.127 kg/m^3 .



Abbildung 24: Herstellung der Prüfkörper – links: Vorverdichtung auf dem Rütteltisch, mittig: Verdichtung in der hydraulischen Presse, rechts: gepresster Lehmsteinprüfkörper

Prüfkörper für Wasserdampfdiffusionswiderstand

Die Prüfkörper für den Wasserdampfdiffusionswiderstand wurden analog zu dem voran. beschriebenen Verfahren hergestellt, wobei lediglich eine andere Form verwendet wurde.

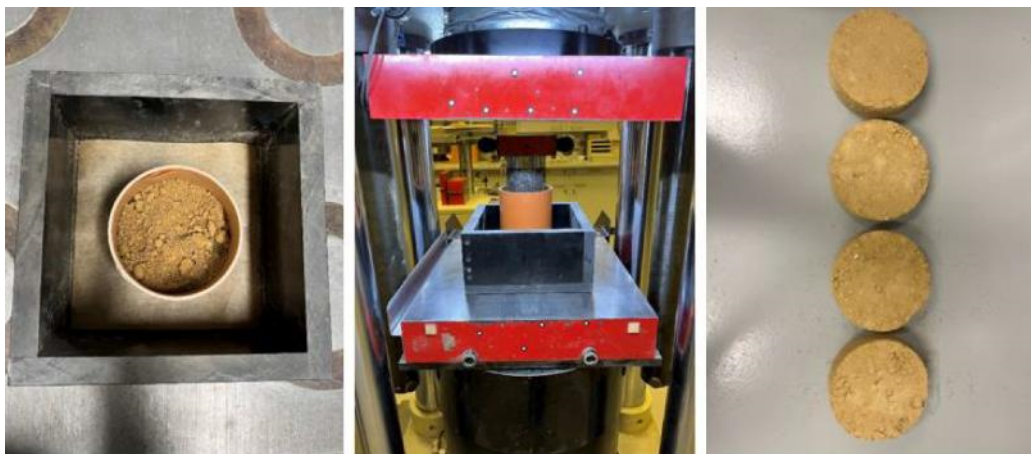


Abbildung 25: Herstellung der Prüfkörper – links: Vorverdichtung auf dem Rütteltisch, mittig: Verdichtung in der hydraulischen Presse, rechts: gepresste Lehmsteinprüfkörper

Die Ermittlung des Wasserdampfdiffusionswiderstands erfolgt an zylindrischen Prüfkörpern mit einem Durchmesser von 105 mm. Für die Herstellung von Probekörpern mit diesen Maßen wurde daher ein Kanalgrundrohr (KG Rohr DN 110) mit einem Innendurchmesser von 104 mm als Form verwendet. Das Rohr wurde ebenfalls mit Backpapier innen verkleidet und der Lehm mithilfe der hydraulischen Presse verdichtet. Für die Zielrohichte betrug die benötigte Menge der erdfeuchten Lehmischung 0,56 Kilogramm. Es wurden insgesamt vier Probekörper gepresst, welche anschließend samt Form bei $23 \text{ }^\circ\text{C}$ und 50 % rLF im Klimaschrank gelagert wurden. Durch das Zusammenziehen der Proben während des Trocknungsprozesses konnten diese nach Erreichen der Massekonstanz problemlos aus der Form entnommen werden.

Prüfkörper für Haftzugfestigkeit

Die Prüfkörper für die Haftzugfestigkeitsprüfung wurden mit einer Lehmsteinpresse hergestellt, die für die Pressung von Lehmsteinen im Format 240 x 120 x 85 mm ausgelegt ist. Zur Bestimmung der Haftzugfestigkeitswerte im späteren Abreißversuch nach DIN EN 1015-12 [22] wird in der Regel mittels Kernbohrung eine definierte Prüffläche in das zu untersuchende Material gebohrt. Da dies aufgrund der groben Gesteinsanteile in der Lehmmischung nicht möglich war, wurde ein Metalleinsatz für die Kniehebelpresse angefertigt; dieser ermöglichte es, die erforderlichen Ringnuten (Innendurchmesser = 50 mm) während des Pressvorgangs in den Lehmstein zu drücken. Zur Herstellung der Prüfkörper wurde der Metalleinsatz zunächst in den Formkasten der Kniehebelpresse eingelegt und anschließend die passende Menge der erdfeuchten Lehmmischung eingefüllt (*Abbildung 26*).



Abbildung 26: Herstellungsschritte der Prüfkörper mit der Kniehebelpresse unter Verwendung des Metall-Einsatzes (A); Befüllung des Formkastens mit Lehm (B) und gepresster Lehmstein (C)

Die benötigte Materialmenge von 5,21 kg wurde ebenfalls auf Basis des Endformats des gepressten Steins sowie der Zielrohichte berechnet. Um die Adhäsionskräfte zwischen dem Metalleinsatz und dem Lehm zu verringern und damit das Herausbrechen von Lehm beim Entfernen der Schablone zu verhindern, wurde sowohl Öl als auch Backpapier als Trennschicht verwendet. Dennoch ließ sich die Schablone oft nicht sauber von dem Lehmstein entfernen.



Abbildung 27: Ausgebrochene Prüffläche am Lehmstein und Lehmreste an der Schablone (A); Prüfkörper nach ausreichend Befeuchtung mit Wasser (B); Holzeinsatz (C) zur Herstellung von Prüfkörpern mit Noppen (D)

Am effektivsten war es, das Material um die Ringnut herum, mit einer Wassersprühflasche zu befeuchten. Damit ließ sich die Schablone am besten zerstörungsfrei von dem Lehmstein lösen. Dennoch wurde ein weiterer Einsatz aus Holz für die Presse angefertigt, um zu prüfen, ob die Herstellung der Prüfkörper dadurch erleichtert wird. Hierfür wurden in eine Holzplatte zwei Löcher mit einem Durchmesser von 50 mm gebohrt. Der Holzeinsatz wurde zudem mit Klebeband abgeklebt, um die Haftung beim Entfernen der Schablone nach dem Pressvorgang zu verringern. Mit diesem Holzeinsatz ließen sich Prüfkörper herstellen, welche auf der Oberseite zylindrische Noppen aufwiesen.

Beide Methoden waren in Summe nicht ganz zufriedenstellend, da es beim Ablösen der Schablonen immer wieder zu Ausbrüchen an den Kanten der ringförmigen Prüfflächen kam. Aus diesem Grund wurden zum Ende des Projektes noch erste Versuche mit Schablonen aus Teflon durchgeführt. Die Anhaftungen konnten damit vermieden werden, lediglich die Lochgeometrie der Schablone benötigt noch eine Anfasung, um beim Abziehen der Schablone die empfindlichen Kanten nicht zu schädigen. Insgesamt wurden jedoch 7 Prüfkörper mit der Ringnut (Metallschablone) und 6 Prüfkörper mit Noppen (Holzschablone) auf der Oberseite hergestellt. Die Probekörper wurden anschließend im Klimaschrank bei 23 °C und 50 % rLF bis zu Massekonstanz gelagert.

Haftzugprüfung an Lehmsteinen

Die Haftzugfestigkeit ist ein Kennwert zur Charakterisierung von mechanischen Gefüge-Eigenschaften. Sie gibt Aufschluss über den inneren Zusammenhalt (Kohäsion) des Materials. Mit der Haftzugfestigkeitsprüfung wird die maximale Zugkraft ermittelt, welche erforderlich ist, um einen Kohäsionsbruch im Material zu erzeugen. Die Festigkeit von Lehmsteinen wird dabei von mehreren Faktoren beeinflusst. Faktoren sind die Kornverteilung in Abhängigkeit von der Aufbereitung des Produktionslehms und dem Maß der Verdichtung, sowie die Bindekraft in Abhängigkeit von der Art und dem Anteil der enthaltenen Tonminerale als auch dem Ausgleichsfeuchtegehalt des Lehmsteines.



Abbildung 28: Auf den Probekörper aufgesetztes Haftzugprüfgerät

Die Haftzugfestigkeit der Lehmsteine wurde durch den Abreißversuch gemäß DIN EN 1015-12 [22] bestimmt. Dazu wurden die Stahlabzugstempel mittels Epoxidharzkleber mittig auf die Prüfflächen geklebt und überschüssiger, ausgequollener Klebstoff an den Rändern der Stempel entfernt. Um eine vollständige Aushärtung des Klebers zu gewährleisten, wurden die Proben für einen Zeitraum von 24 Stunden gelagert. Mit einer Prüfmaschine erfolgte anschließend der senkrechte Abzug der Stahlabzugstempel zur Oberfläche, bei einer konstanten Belastungsgeschwindigkeit von 20,5 bis 25,0 N/mm²s, bis zum Bruch. Die Werte der Haftzugfestigkeit (f_u) errechnen sich mit:

$$f_u = \frac{F_u}{A} \quad (2)$$

mit

f_u Haftzugfestigkeit [N/mm²]

F_u Bruchlast [N]

A Prüffläche des Prüfkörpers [mm²]

Plastizität/Bindekraft Produktionslehm: Pfefferkorn

Im Laufe des Projektes und insbesondere bei den Lehmstein-Produktions-Kampagnen im Werk wurde die Pressbarkeit des Produktionslehmes als ein maßgebliches Kriterium

ausgemacht. Neben einem für das Pressformgeben geeignetem Kornband mit geringem Überkornanteil und einer hinreichenden Homogenisierung in Zwangsmischaggregaten ist die Konsistenz bzw. Plastizität des Lehm-Wassergemisches die entscheidende Eigenschaft für einen erfolgreichen Pressvorgang (Verdichtung und Auswurf). Die Plastizität ist eine Eigenschaft des Materials, die es ermöglicht, dass bei Krafteinwirkung eine ausreichend bruchfreie Verformung des Materials eintritt und die bei Kraftentfernung in ihrer Form bestehen bleibt. Beeinflusst wird die Plastizität bei Lehmgemischen in Abwesenheit von organischen Substanzen oder Additiven durch die mineralogische Zusammensetzung, dem Kornband und maßgeblich durch den vorhandenen Anteil an Wasser im Lehmgemisch. Da genormte Prüfverfahren für Lehmgemische insbesondere mit einem breiten Kornband, fehlen, wurde untersucht, ob sich zur Einstellung der notwendigen Feuchte des Produktionslehmes die Methode nach Pfefferkorn angewendet werden kann.

Diese Methode wird vielfach für die Bildsamkeit keramischer Massen, insbesondere in der Ziegelindustrie, angewendet. Dabei ist die Stauchung des Probekörpers in Abhängigkeit vom jeweiligen Wassergehalt ein Maß für die Konsistenz bzw. Plastizität der untersuchten Masse. In der Regel wird daher der Wassergehalt keramische Massen auf einen vorher festgelegten Pfefferkorn-Wert eingestellt. Im Projekt wurde untersucht welcher Pfefferkorn-Wert sich bei definiert eingestellten Wassergehalten im Produktionslehm einstellt, ob sich im besten Fall eine lineare Korrelation ergibt und wie reproduzierbar die Methode ist. Um die Lehm-Zylinder für die Prüfung herstellen zu können, mussten aufgrund des breiten Kornbandes die Mischungen zunächst auf ein Größtkorn von 4 mm abgesiebt werden. Anschließend wurden die Mischungen auf Wassergehalte zwischen 5, 6, 7, 8, 9 und 10 M.-% eingestellt. Der Bereich zwischen 7 und 9 M.-% ist dabei der für die Lehmsteinproduktion relevante Bereich. Ziel der Untersuchungen war es, ob eine Korrelation zwischen eingestellter (Produktions-)Feuchte und ermittelten Pfefferkorn-Wert nachweisbar ist.

Zerstörungsfreie Untersuchungen

Wie schon in den vorherigen Abschnitten beschrieben, wurden Untersuchungsmethoden gesucht, um im laufenden Produktionsprozess möglichst schnell und einfach Aussagen zur Qualität, der zu erwartenden Festigkeit und ggfs. dem Restfeuchtegehalt der in Produktion bzw. Trocknungsphase befindlichen Lehmsteine zu erhalten. Hierzu wurden vergleichende Untersuchungen an definiert aufgefuehteten Lehmsteinen mit den zerstörungsfreien Messverfahren

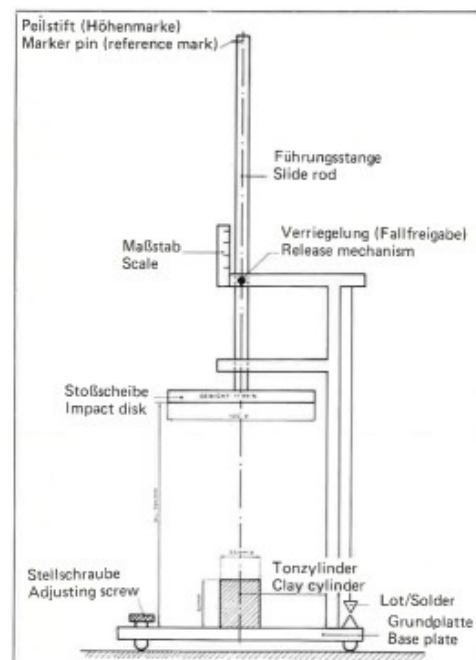


Abbildung 29: Pfefferkorn-Prüfgerät (Schema)

- a) Ultraschalllaufzeitmessung (dyn. E-Modul)
- b) Hammer-Schlag-Verfahren (dyn. E-Modul)
- c) Resonanzanalyse (Kugelfalltest) (dyn. E-Modul)
- d) Rückprallhammer (indirekter dyn. E-Modul)

in der anschließenden Trocknungsphase durchgeführt und hinsichtlich ihrer Eignung und Aussagekraft bewertet. Alle damit ermittelten Kennwerte stehen in Abhängigkeit von Rohdichte, Homogenität und Feuchte des Materials.



Abbildung 30: Versuchsaufbau
Ultraschalllaufzeitmessung



Abbildung 31: Versuchsaufbau Hammer-Schlag-
Verfahren



Abbildung 32: Versuchsaufbau Resonanzanalyse



Abbildung 33: Versuchsaufbau Rückprallhammer

IV 4 Lehdünnbettmörtel

Lehmsteine werden nach aktueller Normung mit Lehmmauermörtel nach DIN 18946 [23] vermauert. Da die formgepressten Lehmsteine eine sehr hohe Maßhaltigkeit aufweisen, wird aus wirtschaftlichen Gründen eine Vermauerung mit Lehdünnbettmörtel präferiert. Zu Projektbeginn standen jedoch noch keine Dünnbettmörtel aus Lehm zur Verfügung. Im Rahmen des Projektes wurde von dem Projektpartner ein Lehdünnbettmörtel passend zu den entwickelten Plan-Lehmsteinen entwickelt. Der Lehdünnbettmörtel sollte dabei folgende Eigenschaften aufweisen:

- Zugelassene Ausgangsstoffe nach DIN 18946 [23]
- Gute Applizierbarkeit mit Mörtelschlitten

- Ausreichende Verarbeitungsdauer
- Auf die geplante Fugenstärke von 2 mm abgestimmtes Stützkorn
- Druckfestigkeit > 2,5 N/mm²
- Haftscherfestigkeit > 0,4 N/mm²
- Schwindverhalten < 4 %

Die Anpassung des Lehmdünnbettmörtels erfolgte in dem Projekt in Abstimmung mit dem Projektpartner, es wurden verschiedene Applizierungsersuche durchgeführt und der Mörtel auf die Erfordernisse angepasst (siehe *Kapt. V 4.3*). Abschließend wurde der Mörtel in Anlehnung an DIN 18946 [23] geprüft und die Ergebnisse beim DIBt für eine allgemeine Zulassung eingereicht. Vom DIBt wurde bescheinigt, dass der Mörtel die Eigenschaften analog zu Mörtel nach DIN 18946 aufweist und in Verbindung mit Plan-Lehmsteinen verwendet werden darf. Geplant ist das Lehmdünnbettmörtel in der nächsten Überarbeitung der DIN 18946 mit in die Norm aufgenommen wird. Auch wurde vom Projektpartner der Lehmdünnbettmörtel weiter entwickelt hin zu einem Lehmmörtelpad. Dieses Produkt wurde auf BAU 2025 in München präsentiert und zum Patent angemeldet.

IV 5 Untersuchungen in der Produktion

Die Feuchte und Korngrößenverteilung des Lehm sind die entscheidenden Faktoren in den verschiedenen Prozessschritten von der Aufbereitung über die Formgebung bis zur Trocknung des Endproduktes. Sie haben entscheidenden Einfluss auf die Homogenität des Materials in der Produktionskette. Für die Messung der Feuchte des Lehm wurden daher verschiedene Varianten geprüft zur Sicherstellung einer ausreichenden Qualitätskontrolle in den verschiedenen Prozessschritten, Die Methoden unterscheiden sich bezüglich der Aussagekraft und Durchführbarkeit.

Tabelle 3: Methoden zur Feuchtemessung im Rohlehm

Methode	Vorteil	Nachteil	Bewertung
Trocknung im Wärmeschrank bei 105°C	Messung der absoluten Feuchte im Lehm	<ul style="list-style-type: none"> • Lehm danach nicht mehr für andere Versuche verwendbar • Dauer der Versuchsdurchführung 	<ul style="list-style-type: none"> • Nur im Labor durchführbar, Ergebnis nach ca. 24h
Trocknung im Darrgerät	Messung der absoluten Feuchte, Darstellung der Trocknungskurve über die Zeit, Messwert nach ca. 30min	<ul style="list-style-type: none"> • Kosten für Gerät • Gerät nicht transportabel 	Werte sehr genau vergleichbar zu Trocknung im Wärmeschrank
Messsonde (IMKO)	Messung direkt im Haufwerk möglich mit spezieller Messsonde. Gut geeignet zur Feuchteverteilung in einem Haufwerk.	<ul style="list-style-type: none"> • Ergebniswerte streuen, in Abhängigkeit von dem Verdichtungsgrad der Probe. Kalibrierung vor Messung notwendig. • Messgenauigkeit nur in bestimmten Bereich gegeben. 	<ul style="list-style-type: none"> • Eignung für schnelle Kontrolle in der Aufbereitung. • Erfahrung mit der Messsonde notwendig für reproduzierbare Werte

Die Feuchtemessungen erfolgen in den verschiedenen Aufbereitungsschritten, in dem Formgebungsprozess sowie anschließend in der Trocknungsphase der Lehmsteine. Weitere wichtige Prüfverfahren, die Bestandteil der Qualitätskontrolle sind aber nicht Teil der DIN 18945, sind in *Tabelle 4* aufgeführt.

Tabelle 4: Prüfverfahren für die Qualitätskontrolle in der Aufbereitung und Produktion

Nr.	Parameter	Verfahren
P1	Bindigkeit	Handversuche
P2	Tonminerale	XRD
P3	Korngrößenverteilung	Partikelgrößenanalyse
P4	Messung der Feuchte	Imko-Messsonde
		Wärmeschrank
		Pfefferkorn
P5	Visuelle Kontrolle	Sichtprüfung
P6	Kontrolle Maschineneinstellung	Protokollierung Maschinendaten
P7	Überprüfung Pressdruck	Visuell, Maschinendaten erfassen
P8	Rohdichte	DIN 18945 [2]
P9	Maße	DIN 18945 [2] oder optosensorisch
P10	Ebenheit	DIN EN 772-20 [18]
P11	Planparallelität	DIN EN 772-16 [19]
P12	Oberflächenqualität	Visuell oder optosensorisch
P13	Trocknungsverlauf	Schmidt-Hammer
		Ultraschalllaufzeit
P14	Druckfestigkeit	DIN 18945 [2]
P15	Anwendungsklasse	DIN 18945 [2]

IV 6 Untersuchungen am Mauerwerk

In dem Forschungsprojekt lag ein Schwerpunkt auf der bauseitigen Verarbeitung der Plan-Lehmsteine mit Lehmdünnbettmörtel. Da für diese Bauweise vor Projektbeginn keinerlei Erfahrungen vorlag, sollten in dem Projekt verschiedene Wände errichtet werden und entsprechende Bauabläufe protokolliert, sowie Arbeitszeitrichtwerte erfasst werden.



Abbildung 34: Lehrbaustelle ASK Kassel - Wände errichtet mit Plan-Lehmsteinen in 16DF-Format und Lehmdünnbettmörtel

Durch Kooperationen mit verschiedenen Lehrbaustellen und Hochschulen war es innerhalb der Projektlaufzeit möglich verschiedene Musterwände zu errichten. Sie dienten als Grundlage für die Erstellung einer Verarbeitungsrichtlinie [25].

Darüber hinaus konnte noch in 2023 die Markteinführung der formgepressten Lehmsteine realisiert werden. Um ausreichende Kenntnisse über diese neue Bauweise zu erlangen, beschloss die Firma Kimm in 2024 ein Musterhaus aus den tragenden Plan-Lehmsteinen auf dem Werksgelände zu errichten. Mit dem Bauvorhaben sollten wichtige Erkenntnisse zum Umgang mit den Plan-Lehmsteinen unter Praxisbedingungen gesammelt werden. Auch das Zusammenspiel mit anderen Baustoffen, der Ausbildung von konstruktiven Details und die Rückbaubarkeit des Gebäudes waren Fragestellungen, die bei der Planung beachtet wurden. Bei dem Gebäude handelt es sich um ein zweigeschossiges Gebäude der GK 1, das nach der neu eingeführten Bemessungsnorm DIN 18940 bemessen wurde. Das Bauvorhaben wurde gutachterlich begleitet von Prof. Ziegert (ZRS Ingenieure, Berlin). Der Rohbau wurde im Herbst 2024 errichtet, das Gebäude wird ab Frühjahr 2026 als Anschauungsobjekt für Interessierte zugänglich sein.

Während der Projektlaufzeit wurden auch weitere Bauvorhaben begonnen bzw. geplant (*Abbildung 35*). Ein wichtiger Punkt war dabei immer, ob eine Zulassung im Einzelfall für das Bauvorhaben notwendig ist. Da Plan-Lehmsteinmauerwerk verarbeitet mit Lehmdünnbettmörtel bisher nicht in die DIN 18940 implementiert ist, wurde sich entschlossen Ende 2023 eine allgemeine Bauartengenehmigung beim DIBt zu beantragen. Diese wurde nun zum Ende der Projektlaufzeit im November 2025 erteilt [26], so das Plan-Lehmsteinmauerwerk mit Lehmdünnbettmörtel jetzt eine anerkannte Bauweise ist.

Da noch zu wenige Erkenntnisse zum Verhalten der formgepressten Lehmsteine im Mauerwerk vorliegen, wurden die bemessungsrelevanten Größen, d.h. die Mauerwerksfestigkeit f_k in der Bauartengenehmigung gegenüber der DIN 18940 um 10% abgemindert.

Gegen Ende der Projektlaufzeit ergab sich noch die Möglichkeit im Zuge des Projektes Wandversuche durchführen zu lassen. Geprüft wurden Wände in 24er und 36,5er Wandstärke an der MPA Hannover. Die Ergebnisse sollen in die Überarbeitung der Bauartengenehmigung mit einfließen und werden dem Normungsausschuss für eine zukünftige Erweiterung der DIN 18940 auf Plan-Lehmsteinmauerwerk zur Verfügung gestellt. Zum Zeitpunkt der Erstellung des Projektberichtes lagen die Versuchsergebnisse noch nicht vollständig vor. Die Ergebnisse werden im Nachgang zum Projekt veröffentlicht.



Abbildung 35: Entwurf Musterhaus aus formgepressten Plan-Lehmsteinen

V. Projektergebnisse

V 1 Material

V 1.1 Lehmvorkommen

Die Auswahl hinsichtlich geeigneter Lehmvorkommen erfolgte unter der Maßgabe verfügbarer und in Betrieb befindlicher Lagerstätten. Neben den betriebseigenen Lagerstätten der Firma KIMM am Standort Wabern-Udenborn wurden auch im Umfeld befindliche Lagerstätten anderer Firmen begangen und beprobt. Des Weiteren erfolgten Begehungen von Lagerstätten in den Regionen Braunschweig (Niedersachsen), Bielefeld/Herford (Nordrhein-Westfalen), Weißenfels (Sachsen-Anhalt) und Erfurt (Thüringen). Alle diese Lagerstätten werden aktuell ausschließlich zur Gewinnung von Sanden und Kiesen genutzt. Die dort jeweils anstehenden Lehmvorkommen sind über den Sand- und Kiesvorkommen anstehender Abraum, der abgetragen, umgelagert und deponiert wird.

V 1.2 Baustoffcharakterisierung

Die Tonmineralogie wurde an 14 ausgewählten Lehmproben untersucht. Diese Lehmproben können hinsichtlich ihrer Herkunft zunächst wie folgt eingeteilt werden:

- a) direkt aus einer Lagerstätte entnommen – 10 Proben
- b) Tonfraktion – 2 Proben
- c) Produktionslehm – 1 Probe
- d) Lehmstein – 1 Probe

Zu a) direkt aus einer Lagerstätte entnommen – 10 Proben:

Die hinsichtlich ihrer Tonmineralogie *direkt aus einer Lagerstätte entnommenen* 10 Lehmproben entstammen aus 5 verschiedenen Regionen in Deutschland.

Tabelle 5: Probenbuch – Rohlehme aus verschiedenen Lagerstätten

Probennummer	Region	Ort der Probenahme	Material
70152-004	Hessen Schwalm-Eder-Kreis Eder-Ems-Schwalm	Forstweg, 34587 Felsberg	Lehm (zentral), Standort Felsberg
70152-008		Waberner Straße 39, 34590 Wabern- Udenborn	Lößlehm (untere Schicht), ca. 3m mächtig
70152-009			Lößlehm (obere Schicht)+Lößkindl, ca. 2m mächtig
70152-011		An der Kalbsburg, Werk Fritzlar- Kalbsburg, 34560 Fritzlar	Löß(lehm), ca. 6m mächtig

Probennummer	Region	Ort der Probenahme	Material
70152-012	Niedersachsen Landkreis Peine Aue	Straße zum Kalksandsteinwerk, 38176 Wendeburg	Lößlehm, 3m-Schicht
70152-015	Thüringen	Schwerstedter Str. 59, 99955 Kutzleben	Lößlehm
70152-016	Unstrut-Hainich-Kreis Unstrut		Lößlehm, tonig
70152-019	Sachsen-Anhalt Burgenlandkreis Saale	Happberg, 06667 Weißenfels / OT Tagewerben	Lehm, kiesig
70152-020	Nordrhein-Westfalen Stadt Bielefeld/Jöllenberg Beckendorfer Mühlenbach	Bargholzstraße, 33739 Bielefeld - Tongrube Jöllenberg-Häger	Übergangsléhm, tonig
70152-022	Nordrhein-Westfalen Landkreis Herford Lambach	Hausheider Str., 32051 Herford, Tongrube & Bodendeponie Herford	Übergangsléhm, tonig

Zu b) Tonfraktion – 2 Proben:

Die beiden Proben *Tonfraktion* wurden beide im Tagebau am Hauptstandort der Fa. KIMM in Wabern-Udenborn entnommen.

Tabelle 6: Probenbuch - Tone

Probennummer	Region	Ort der Probenahme	Material
70152-010	Hessen Schwalm-Eder-Kreis	Waberner Straße 39, 34590 Wabern- Udenborn	Ton dunkel, aus Kieswäsche
70152-023	Eder-Ems-Schwalm		aus Tonlinsen im Abbau (gräulich)

Zu c) Produktionslehm – 1 Probe:

Die Probe *Produktionslehm* wurde am Hauptstandort der Fa. KIMM in Wabern-Udenborn nach der Aufbereitung im Oktober 2024 entnommen.

Tabelle 7: Probenbuch - Produktionslehm

Probennummer	Region	Ort der Probenahme	Material
70152-014	Hessen Schwalm-Eder-Kreis Eder-Ems-Schwalm	Waberner Straße 39, 34590 Wabern- Udenborn	Produktionslehm Udenborn Oktober 2024, < 11,2 mm (Harfensieb)

Zu d) Lehmstein – 1 Probe:

Die Probe *Lehmstein* wurde aus einer Charge 2 DF-Lehmsteinen aus dem Produktionszeitraum Mai 2024 entnommen.

Tabelle 8: Probenbuch - Lehmstein

Probennummer	Region	Ort der Probenahme	Material
70152-024	Hessen Schwalm-Eder-Kreis Eder-Ems-Schwalm	Labor MFPA	2DF Lehmstein (2 mm Absiebung) Produktionslehm 05.2024

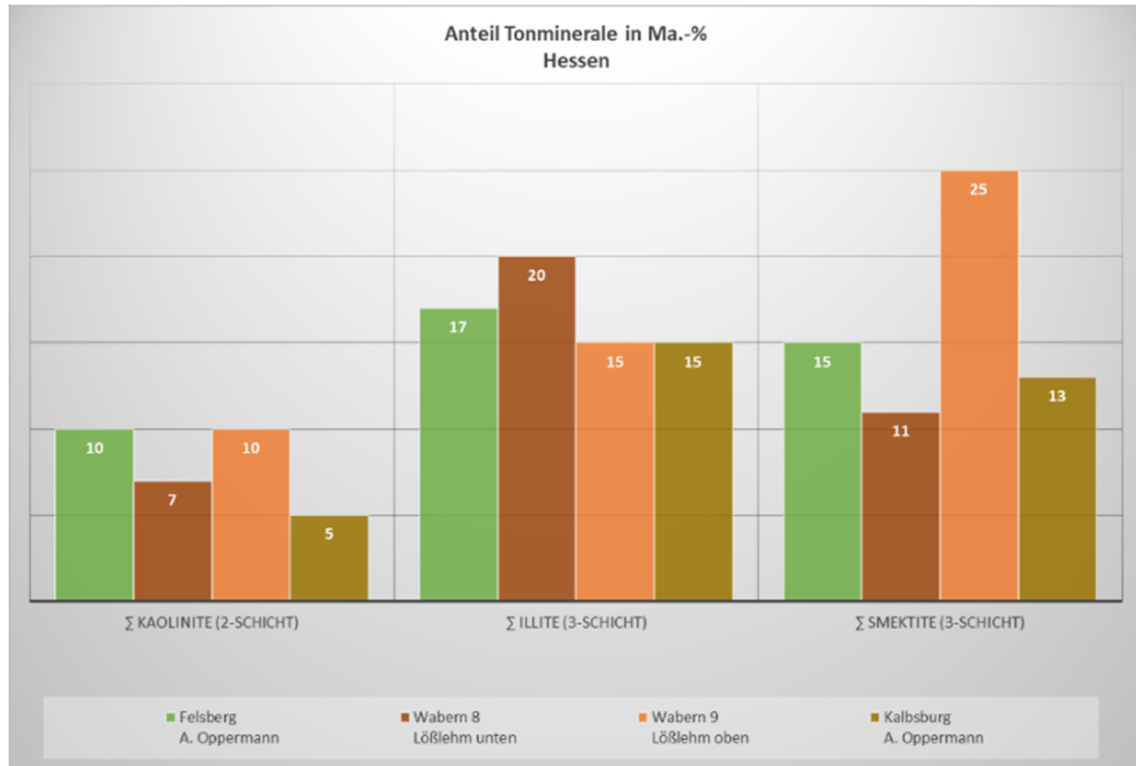


Abbildung 36: Region Hessen – Tonmineralverteilung

Die Tonmineralverteilungen der Grubenlehme aus den Lagerstätten in Hessen rund um den Hauptstandort der Fa. KIMM zeigen eine vergleichbare Tonmineralik (Abbildung 36). Eine Besonderheit zeigt die Probe Wabern 9, die einen deutlich höheren Smektit-Gehalt als alle anderen Proben aufweist. Diese 3-Schichtminerale tragen wesentlich zur Bindekraft bei und hier zeigt sich, im Vergleich zur wenige Meter tieferliegenden Lößlehmsschicht (Probe Wabern 8) am gleichen Standort, wie unterschiedlich die Anteile der Tonminerale in ein und derselben Lagerstätte sein können. Dies gilt es bei den Erkundungen von potenziellen Lagerstätten immer zu beachten. Prinzipiell kann festgestellt werden, dass die regionalen Vorkommen hinsichtlich ihrer Tonmineralzusammensetzung für die Herstellung von formgepressten Lehmsteinen geeignet scheinen.

Der überregionale Blick auf die beprobten Grubenlehme zeigt ein erwartungsgemäß differenzierteres Bild (Abbildung 37). Der Grubenlehm vom KS-Werk Wendeburg Radmacher (Niedersachsen) weist einen sehr (zu) niedrigen Gehalt an wirksamen Tonmineralen auf.

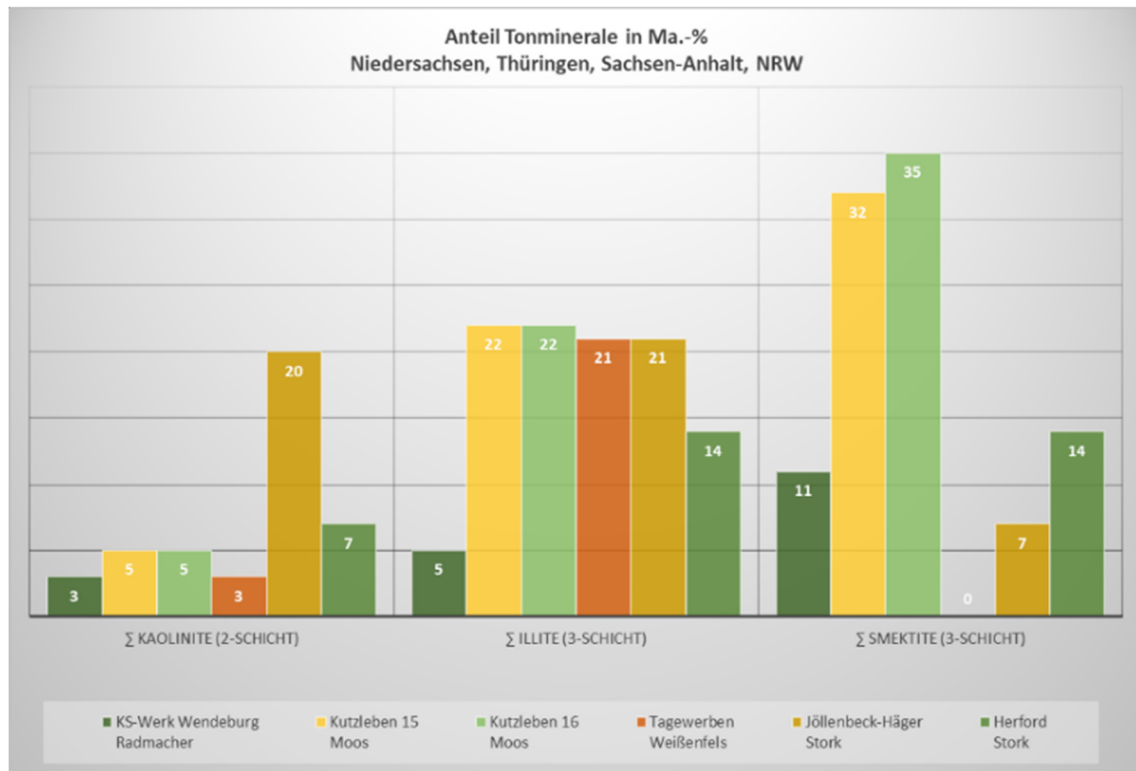


Abbildung 37: Regionen Niedersachsen, Thüringen, Sachsen-Anhalt und NRW – Tonmineralverteilung

Die Grubenlehmen aus der Lagerstätte Kutzleben (Thüringen) mit ihren hohen Illit- und Smektit-Gehalten lassen auf eine große Bindekraft schlussfolgern. In der Lößlehmprobe aus der Lagerstätte Tagewerben (Sachsen-Anhalt) konnten keine Smektite nachgewiesen werden, was auf geringe Bindekräfte schließen lässt. Die Probe aus Jöllenbeck-Häger (Nordrhein-Westfalen) zeigte mittlere Anteile an Kaoliniten und Illiten auf, jedoch geringe Smektit-Gehalte. Ganz anders bei der regional naheliegenden Probe aus Herford (Nordrhein-Westfalen). Hier sind mittlere Illit- und Smektit-Gehalte bestimmt wurden, was auf eine Eignung schließen lässt.

Interessant ist die Tonmineralverteilung in den Tonfraktionen, die direkt aus dem Prozess der Kieswäsche am Standort Wabern anfällt im Vergleich zu der einer separierten Tonlinse aus dem Lößlehmabbau am selben Standort (*Abbildung 38*). In der Tonlinse konnte kein Smektit nachgewiesen werden, während die Tonfraktion aus der Kieswäsche geeignet scheint, um als Substitut für den Produktionslehm eingesetzt werden zu können.

Die gesammelten Erfahrungen bei der Rezepturentwicklung veranschaulicht das folgende Diagramm vom Standort Wabern (*Abbildung 39*), welches die Tonmineralverteilungen der Grubenlehmen mit den zum Einsatz gekommenen Produktionslehm abbildet. Während der Produktionslehm aus Mai 2024 in seiner Zusammensetzung noch der mäßig geeigneten unteren Lößlehmschicht entspricht, konnte im Produktionslehm aus Oktober 2024 durch Verwendung von Lößlehm aus der oberen Schicht der Smektit-Gehalt deutlich angehoben werden. Die daraus hergestellten Lehmsteine wiesen in den Erstprüfungen die bisher höchsten Festigkeiten auf. Weiterhin wurde an den aus diesem Produktionslehm hergestellten Lehmsteinen ein deutlich verbesserter Feuchtwiderstand ermittelt. Trotz oder gerade wegen des erhöhten Anteiles an quellfähigen Tonmineralen (Smektiten) in der Rezeptur?

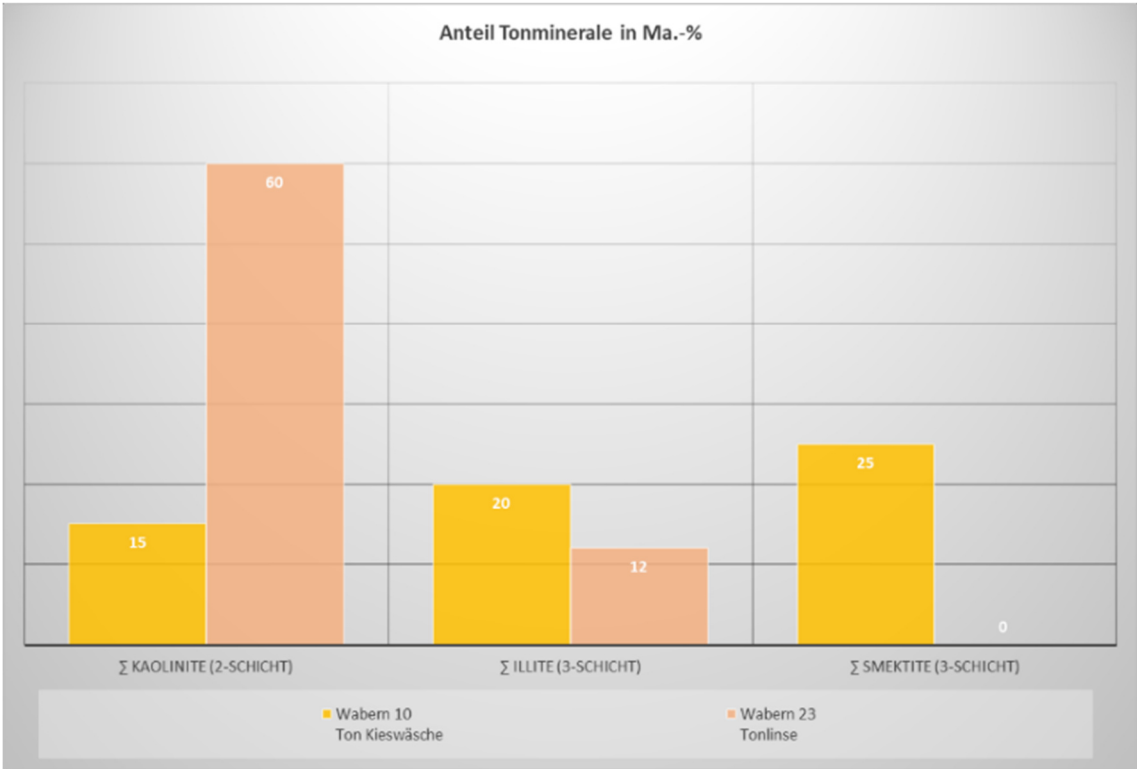


Abbildung 38: Tonfraktionen aus der Gewinnung – Tonmineralverteilung

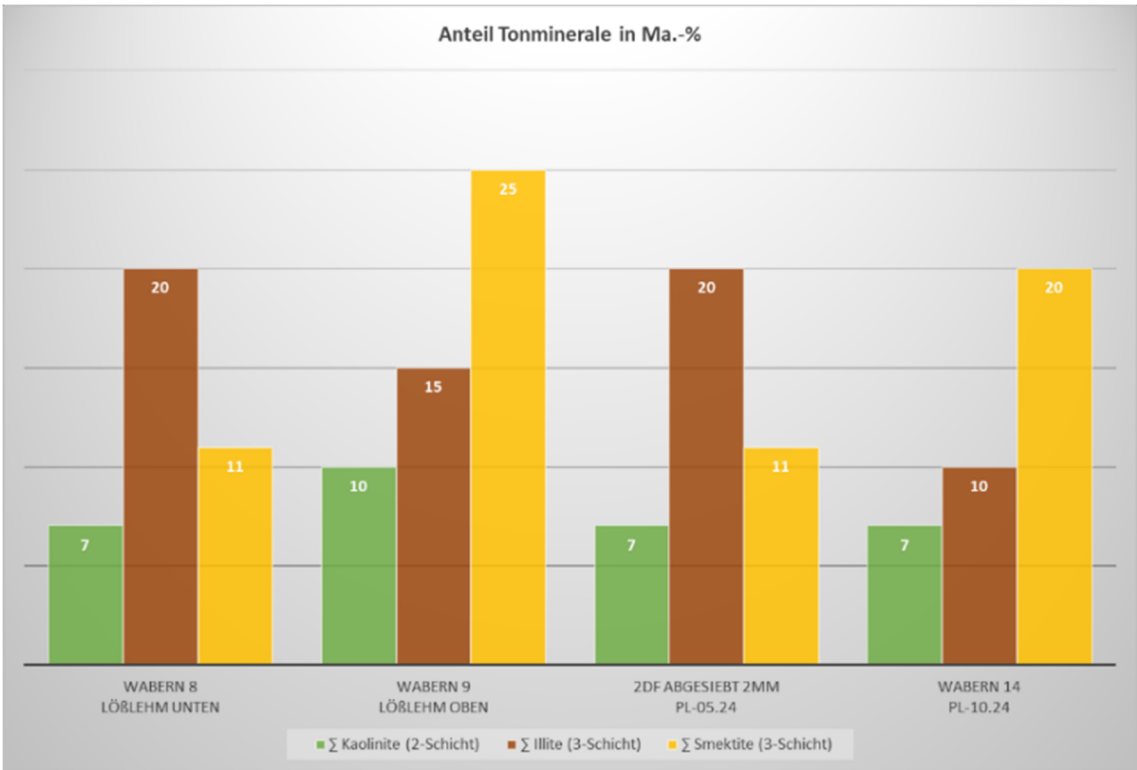


Abbildung 39: Standort Wabern und Produktionslehme – Tonmineralverteilung

Bindekraftuntersuchung mittels Lehmstein-Kniehebelpresse

An drei in einer Lagerstätte genommenen Lehmproben (Grubenlehm)

- a) Lößlehm (70152-17)
- b) Lehm sandig (70152-18)
- c) Lehm kiesig (70152-19)

erfolgte zunächst eine visuelle Charakterisierung hinsichtlich der Zusammensetzung. Die Proben mit kiesigen Anteilen bzw. Tonagglomeraten / Tonlinsen wurden für die Bindekraftuntersuchungen mittels Lehmstein-Kniehebelpresse zunächst das Überkorn $\geq 11,2$ mm (Größtkorn Produktion) abgesiebt.

Lößlehm (70152-17)	Lehm sandig (70152-18)	Lehm kiesig (70152-19)
Homogene Zusammensetzung	Tonagglomerate / Tonlinsen	Kies $\geq 11,2$ mm
-		

Abbildung 40: Lehm aus Lagerstätte

Die Probe Lößlehm (70152-17) wurde durch Zugabe von Wasser in eine erdfeuchte Konsistenz überführt. Anschließend erfolgte die Füllung des Formkastens der Lehmstein-Kniehebelpresse mit den jeweiligen Proben, die Verdichtung und anschließendem Aushub des gepressten Lehmsteines. Der so erhaltende Lehmstein wurde visuell und haptisch charakterisiert als auch gewogen.

Als Kriterium für die Bindekraft wurde insbesondere das Handling mit Lehmstein nach der Pressung gewertet:

- Lässt sich der Lehmstein zerstörungsfrei aus der Lehmsteinpresse heben?
- Kommt es zum Abbruch von Kanten?
- Zerbricht der Lehmstein bei einem Fall aus ca. 50 mm Höhe auf den flachen Boden?

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Methode der Bindekraftuntersuchung mittels Kniehebel-Lehmsteinpresse in den durchgeführten Versuchsreihen ihr Potential aufgezeigt hat. Weiterführend sind noch weitere systematische Versuchsreihen durchzuführen und die folgenden Fragestellungen zu bearbeiten:

- Quantifizierung des Füllgrades und Pressdruckes (ggfs. Weiterentwicklung zu einer hydraulischen Presse)

- Erarbeitung einer Verfahrensanweisung zur Durchführung inkl. Protokoll
- Aufbau einer mobil einsetzbaren Geräteeinheit aus Lehmsteinpresse, Siebeinheiten, Waage, Mischer, Zubehör und Dokumentation
- Konkretisierung und Definition der Bindekraftkriterien


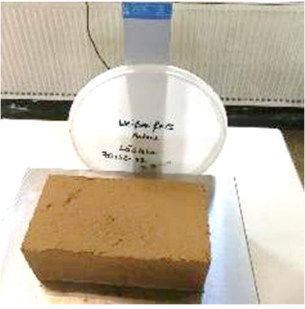



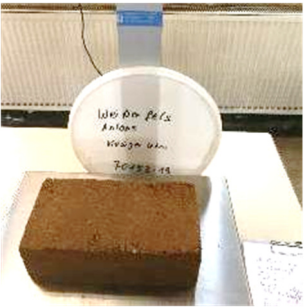
<p>Lößlehm (70152-17)</p>			<p>nicht abgesiebt Zugabe von 500 g Wasser auf 8.500 g Probe Bindekraft: mittel</p>
<p>Lehm sandig (70152-18)</p>			<p>Tonagglomerate / Tonlinsen ≥ 11,2 mm abgesiebt Bindekraft: keine/kaum</p>
<p>Lehm kiesig (70152-19)</p>			<p>Kies ≥ 11,2 mm ≥ 11,2 mm abgesiebt Bindekraft: gut</p>

Abbildung 41: Bindekraftcharakterisierung von frischgepressten Lehmsteinen

V 1.3 Lehmmodifikation

Optimierung der Korngrößenverteilung

Eine gut abgestufte Korngrößenverteilung ist für formgepresste Lehmsteine entscheidend um Trocknungsschwindverformungen möglichst zu verhindern. Die Gesteinskörner stehen in der Matrix ähnlich wie in erdfeuchten Betonen in direktem Kontakt zueinander. Die Zwischenräume werden durch die Matrix bestehend aus Sand, Schluff und den Tonbestandteilen als Bindemittel gefüllt.

Da zu Projektbeginn keinerlei Erfahrungen zu einer optimalen Korngrößenverteilung für formgepresste Lehmsteine vorlagen, wurde sich zunächst an den Erkenntnissen aus dem Stampflehm Bereich orientiert. Janson [27] entwickelte in ihrer Dissertation Regelsieblinien für Stampflehm vergleichbar zu den Fuller-Kurven für Beton. In ihrem Modell (siehe *Abbildung 42*) beschreibt sie einen Bereich, der sich als ideal bezüglich der Materialeigenschaften für Stampflehm herauskristallisiert hat (gestrichelter Bereich). Außerdem wird in dem Modell nur der Korngrößenbereich oberhalb der 0,25mm als relevant erachtet. Der Durchgang sollte idealerweise in dem Bereich zwischen 20 und 30 M.-% betragen.

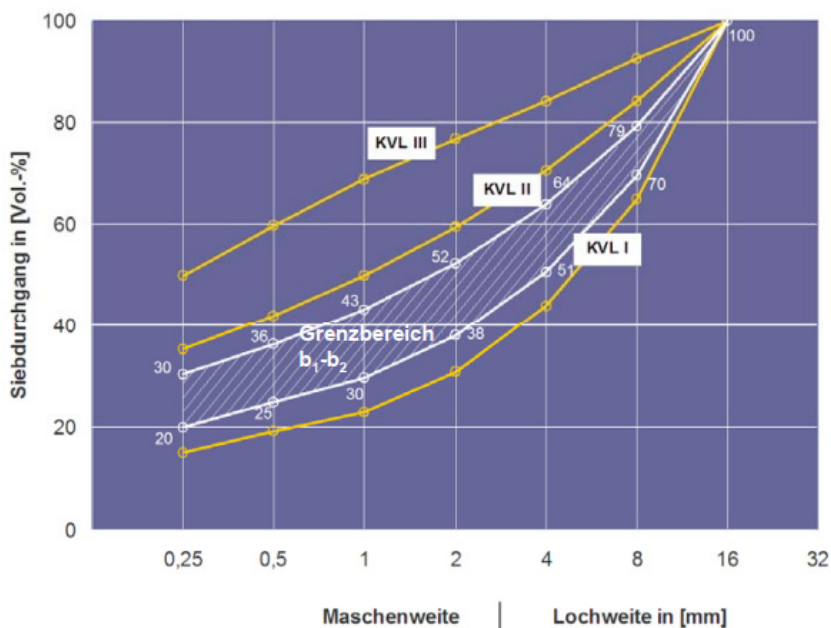


Abbildung 42: Darstellung Kornverteilungsbereich mit optimalen Materialeigenschaften (Quelle: Janson, Abb. 77)

bereich, der sich als ideal bezüglich der Materialeigenschaften für Stampflehm herauskristallisiert hat (gestrichelter Bereich). Außerdem wird in dem Modell nur der Korngrößenbereich oberhalb der 0,25mm als relevant erachtet. Der Durchgang sollte idealerweise in dem Bereich zwischen 20 und 30 M.-% betragen.

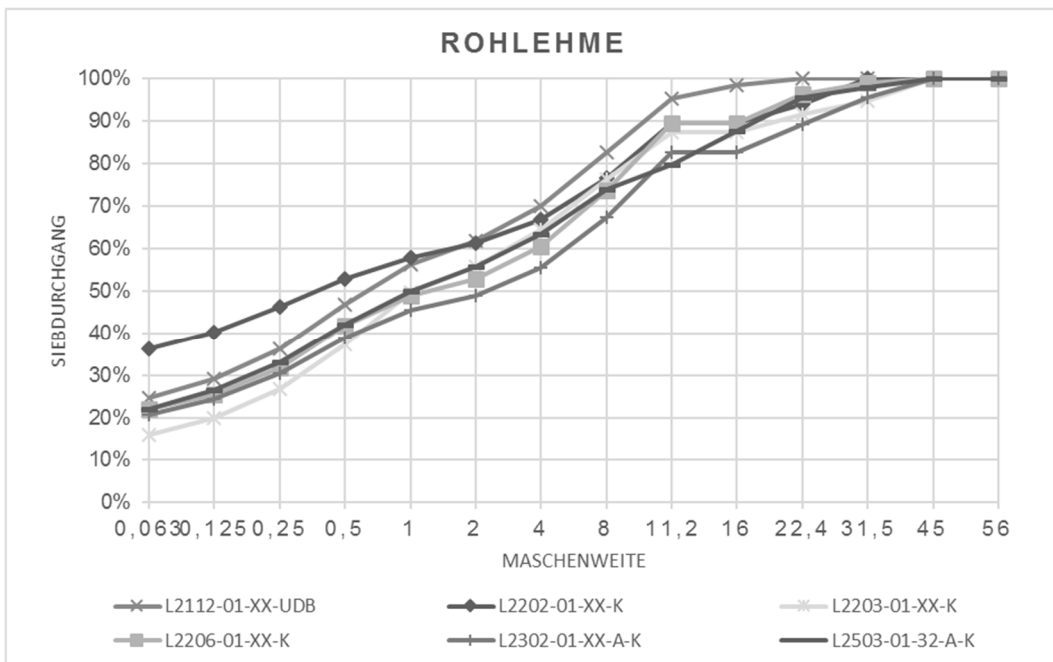


Abbildung 43: Variation der Rohlehme

In den ersten Produktionen wurde versucht den Produktionslehm möglichst auf diesen Bereich abzusieben. Die Rohlehme (*Abbildung 43*) wiesen bereits in dem unteren Korngrößenbereich entsprechend dem Modell einen guten Feinanteil auf, so dass vor allem durch Siebung das

Größtkorn auf 16 mm zu begrenzen war. Ziel war eine Sieblinie 0/16 mit einem Durchgang von ca. 35 M.-% durch das 0,25 mm- Sieb zu erhalten (siehe *Abbildung 44*).

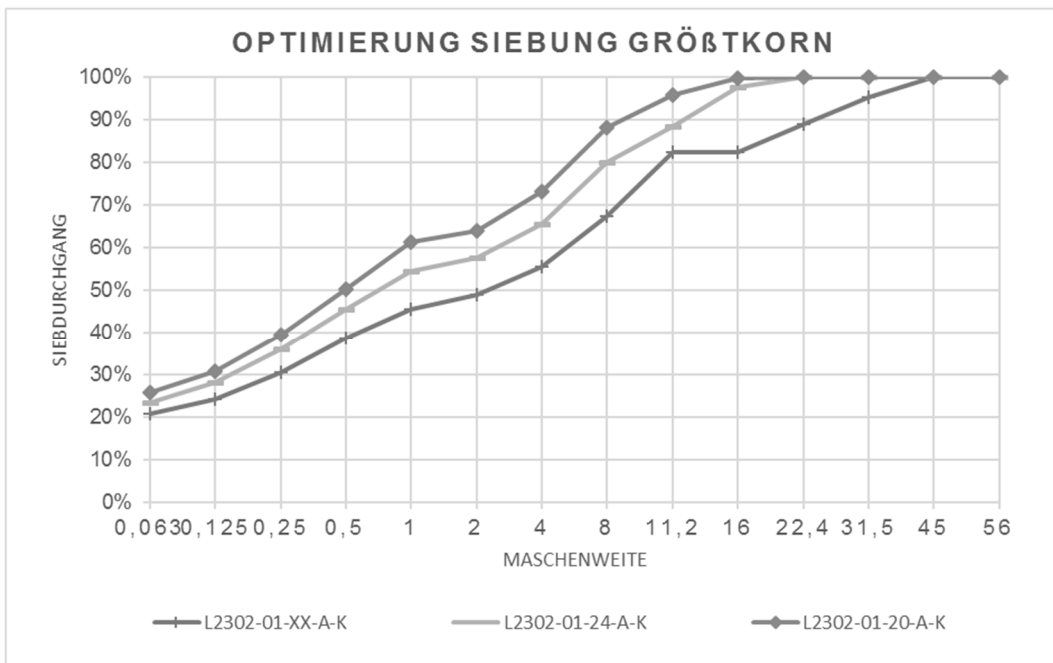


Abbildung 44: Optimierung Größtkorn; Absiebung auf Größtkorn 16mm

Für die Siebung wurden je nach Feuchtigkeit des Materials verschiedenen Siebgrößen verwendet. Die Maschenweite lag zwischen 18 und 24 mm. Die Produktionslehme über den Zeitraum 2022-Frühjahr 2024 (*Abbildung 45*) zeigten eine vergleichbare Kurvencharakteristik.

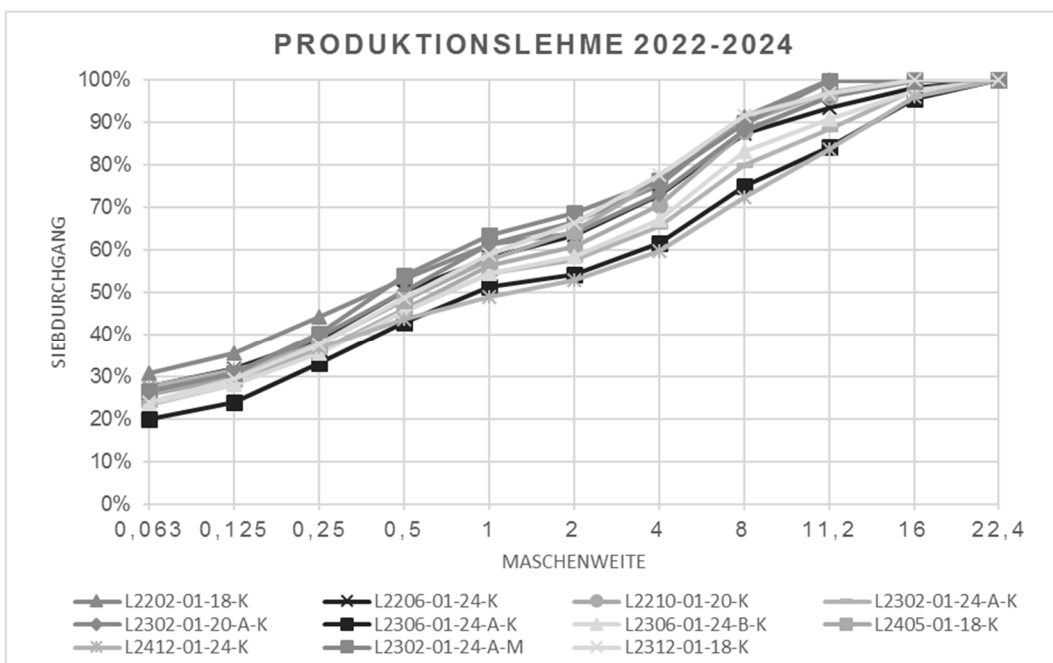


Abbildung 45: Produktionslehme ohne Zugabe von Lößlehm

Wurde zu Beginn noch mit eine sehr groben Maschenweite zwischen 24 und 32 mm gesiebt, wurde versucht im Laufe des Projektes die Lehme immer feiner zu sieben. Hintergrund waren

die beobachteten Kiesnester am fertigen Lehmstein und die Qualitätsschwankungen in der Produktion. Nach dem Besuch eines Lehmsteinherstellers in Frankreich wurde Versuche durchgeführt zur Reduzierung des Größtkorns und Erhöhung des Feinanteils im Produktionslehme. Ziel war eine möglichst geschlossene Oberflächenmatrix.

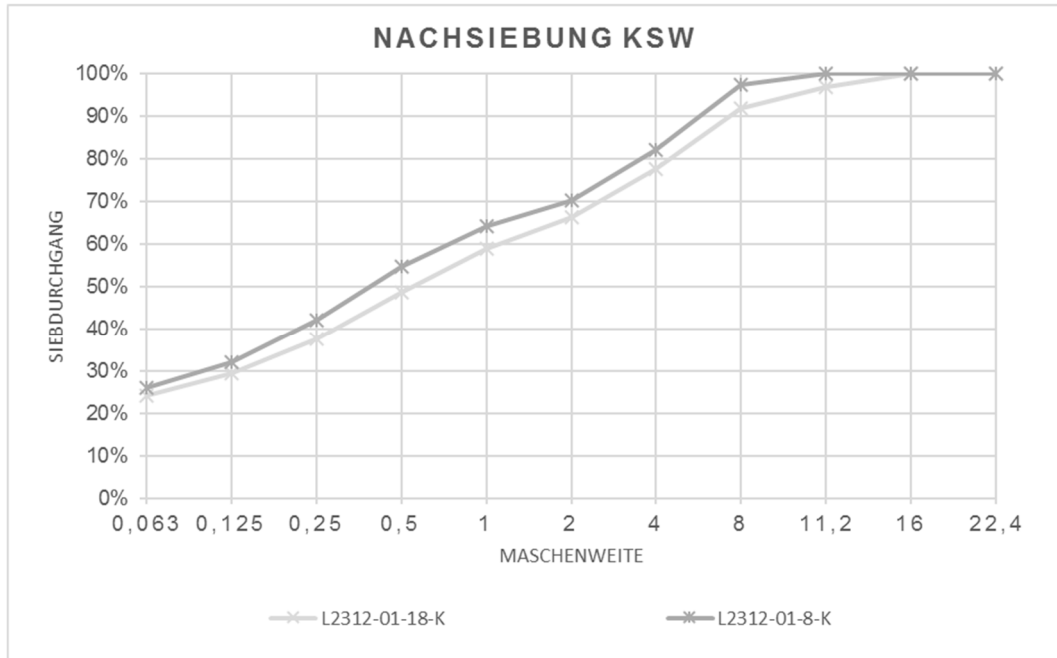


Abbildung 46: Nachsiebung des Lehm grob auf Lehm fein mit einem 8er Harfensieb

Zwischenzeitlich wurde auch die Produktionsvariante auf Variante 1 (siehe V 2.2) geändert um einen Mischprozess und ein zweite Absiebung noch vor der Produktion zu ermöglichen. In der KS-Anlage ist eine Siebprozess integriert. Der Produktionslehm wurde dort nochmals mit einem 8er Harfensieb auf ein Größtkorn von 11 mm abgesiebt. Der fertige Produktionslehm entsprach einer Sieblinie 0/11 mit einem Durchgang von 35-45 M.-% im Bereich kleiner 0,25 mm. Durch diese Optimierung konnte bereits eine signifikante Verbesserung der Steinqualitäten erzielt werden.

Eine weitere Optimierung resultierte aus den Ergebnissen, die an der Kalksandstein-Laborpressen durchgeführt wurden. Zur Verbesserung der Oberflächenmatrix wurde den bisherigen Produktionslehm ca. 20 M.-% feiner Lößlehm beigemengt. Dies führte zu einer Reduzierung der inneren Hohlräume in der Lehmsteinmatrix durch die Sand- und Schlufffraktionen, weniger erkennbarer Kiesnester an der Oberfläche, eine Erhöhung der Festigkeiten und eine deutliche Reduzierung der Qualitätsschwankungen, wie beispielhaft an den Steinen im 8DF-Format zu erkennen ist.

Die Anpassung der Korngrößenverteilung im Feinkornbereich ist nachfolgend dargestellt. Die Festigkeiten der Steine, die mit diesem feinen Produktionslehm hergestellt wurden, zeigten durchweg sehr gute Festigkeiten. Mit den Steinen im 12DF-Format wurde sogar die höchste Druckfestigkeitsklasse 6 erreicht.

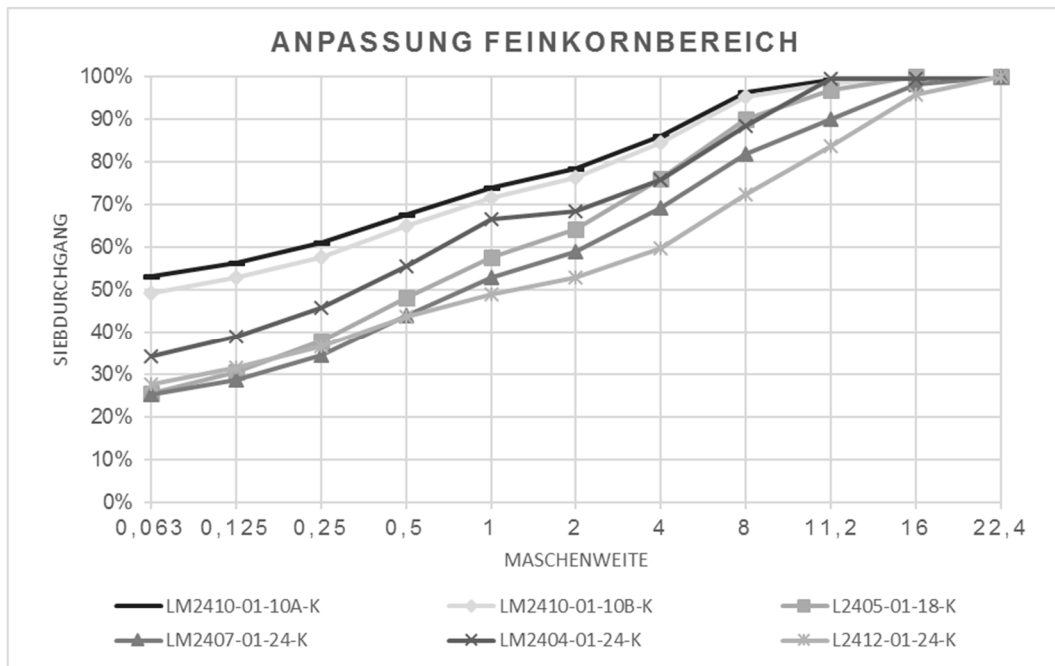


Abbildung 47: Die unteren Kurven zeigen grob abgesiebte Lehme, die Mittleren Lehme nach Feinsiebung (Größtkorn 11mm), die oberen beiden Kurven, den Feinkornbereich mit Lößlehm

Optimierung der Steindruckfestigkeit

Durch die Optimierung der Korngrößenverteilung konnte schrittweise auch die Druckfestigkeit der Lehmsteine verbessert und die Qualitätsschwankungen reduziert werden. In den nachfolgenden Grafiken ist die Festigkeitsentwicklung der Steine im 6DF-Format (248 x 175 x 248 mm) dargestellt. Bei den Prüfwerten handelt es sich um die Druckfestigkeit ohne Berücksichtigung des Formfaktors. Die Streuungen resultieren im Wesentlichen aus den Schwankungen in den Materialfeuchten zum Zeitpunkt der Prüfung. Erkennbar ist, dass mit zunehmendem Alter diese Streuungen in den Festigkeiten abnehmen, was auf das Erzielen der Ausgleichfeuchte hindeutet. Weiterhin ist zu erkennen, dass die Festigkeiten der Steine von 2025 deutlich größer sind als die von 2022. Dies ist im Wesentlichen auf die Optimierung der Korngrößenverteilung zurückzuführen. Die Steine von 2022 wurden noch mit einem sehr großen Anteil an grober Gesteinskörnung hergestellt, das Größtkorn betrug seinerzeit 24 mm, während bei der Produktion von 2025 das Größtkorn lediglich 11 mm betrug. Dies spiegelt sich auch wieder in den Rohdichten. Durch die Erhöhung des Feinkornanteils und der Reduzierung des Anteils an grober Gesteinskörnung sank die Steinrohrichte zwischen den beiden Produktionen von ca. 2,17 kg/dm³ auf ca. 2,10 kg/dm³ ab. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass aus der Rohdichte des Lehmsteines nicht direkt die Druckfestigkeit abgeleitet werden kann.

Besonders anschaulich wird dies bei Betrachtung der gesamten Produktionen der letzten drei Jahren von den 2 DF-Steinen. In *Abbildung 52* sind die Einzelwerte von Prüfkörpern, die nach Erreichen der Ausgleichfeuchte geprüft wurden, dargestellt.

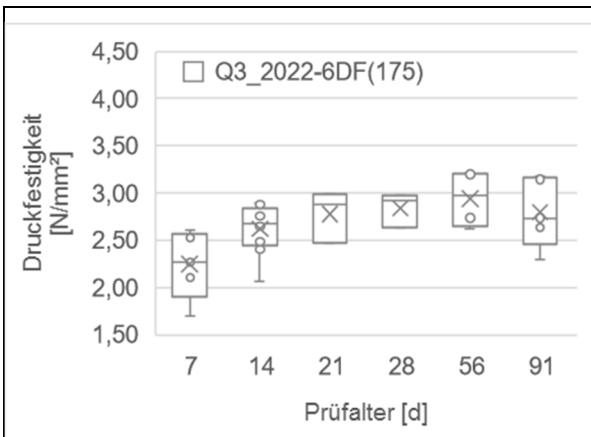


Abbildung 48: Druckfestigkeitsentwicklung 6DF (175)

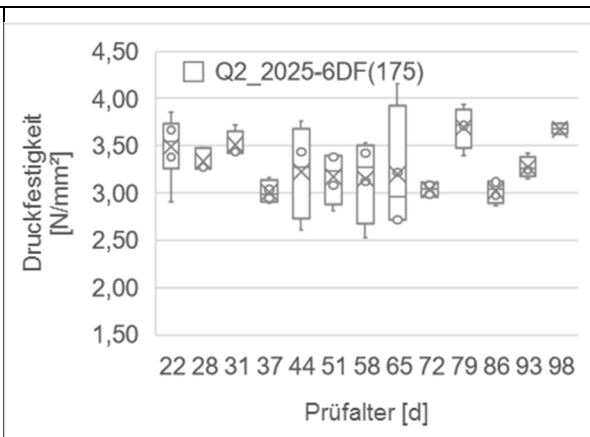


Abbildung 49: Druckfestigeitsentwicklung 6DF (175) von optimierter Mischung

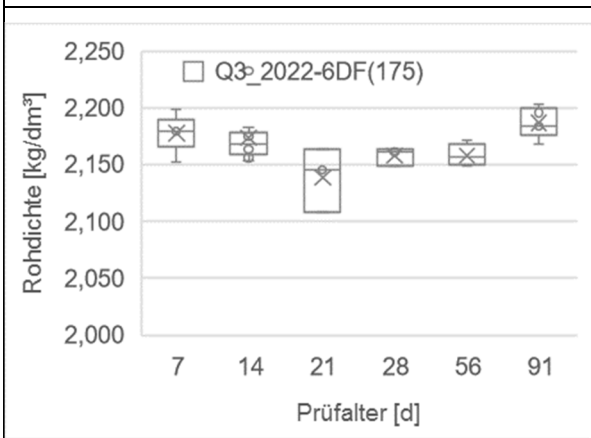


Abbildung 50: Rohdichteentwicklung über 3 Monate

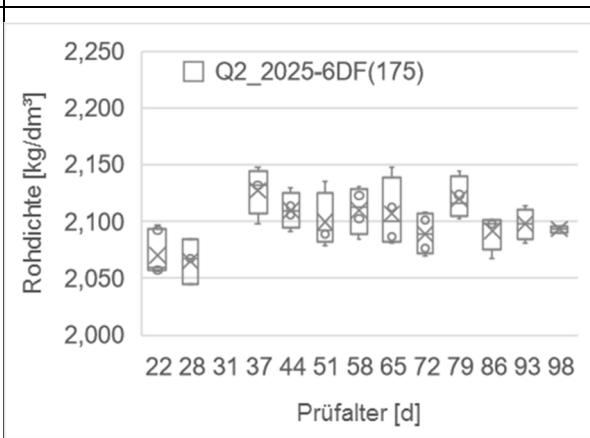


Abbildung 51: Rohdichteentwicklung von optimierter Mischung über 3 Monate

Betrachtet man die einzelnen Produktionen separat kann man einen Zusammenhang zwischen der Rohdichte und der Druckfestigkeit erkennen. Die Rohdichte hängt im Wesentlichen von der Materialzusammensetzung ab: In 2022 und 2023 wurden noch deutlich grobkörnigere Lehmischungen verwendet, weshalb die Rohdichten auch höher ausfallen. Weiterhin ist erkennbar, dass mit zunehmender Optimierung der Lehmzusammensetzung die Rohdichten abfallen aber die Festigkeiten steigen. Auch ist eine Verdichtung der Einzelmesswerte zu erkennen (siehe Kurve Q3_2025). Die Regressions-

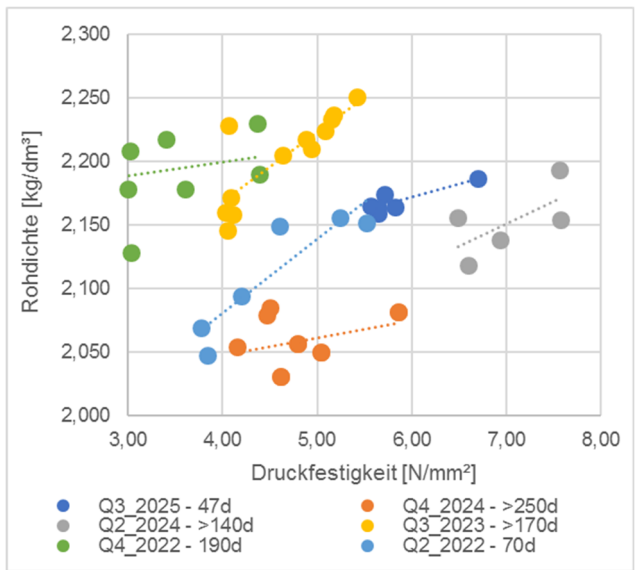


Abbildung 52: Zusammenhang Druckfestigkeit und Rohdichte

geraden geben einen Hinweis darauf, wie gleichmäßig die Produktion war. Eine geringes Steigungsmaß deutet auf eine gleichmäßige Verdichtung hin. Die Kurven von Q4_2024 und Q3_2025 weisen eine vergleichbare Steigung auf, verwendet wurden Lehme mit vergleichbaren Sieblinien. Die Unterschiede sind im Wesentlichen auf unterschiedliche Pressdrücke bei den Produktionen zurückzuführen. Bei konstanter Materialzusammensetzung kann dieser Zusammenhang ein wichtige Kenngröße zur Bewertung der Qualitätsschwankungen innerhalb einer Charge sein.

Die Verbesserung der Materialgüte über die Projektlaufzeit ist auch sehr deutlich am Beispiel der 8DF-Steine erkennbar. In 2023 und Frühjahr 2024 wurden die Lehmsteine ohne eine Anreicherung mit Lößlehm hergestellt. Durch die Verbesserung der Feinkornmatrix im 4. Quartal 2024 konnte die Druckfestigkeit in *Abbildung 55* erhöht und die Streuungen reduziert werden.

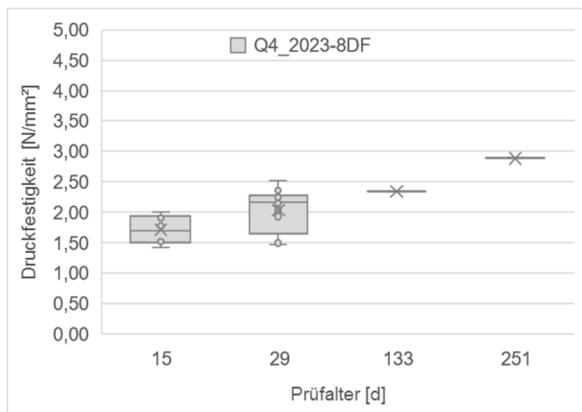


Abbildung 53: Festigkeit 8DF-Format $f_{cm}=2,6 \text{ N/mm}^2$; Produktionslehm auf 24mm abgesiebt

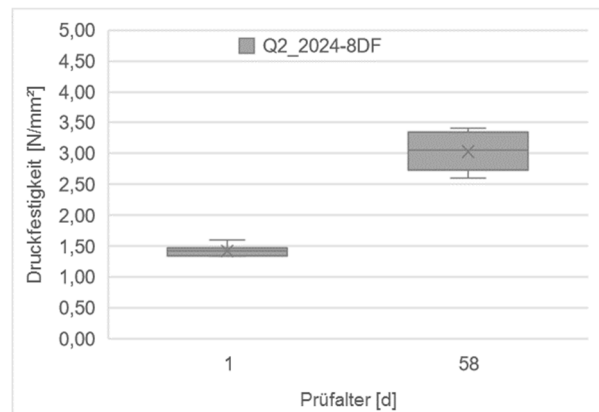


Abbildung 54: Festigkeit 8DF-Format $f_{cm}=3,0 \text{ N/mm}^2$, Produktionslehm auf 18mm abgesiebt

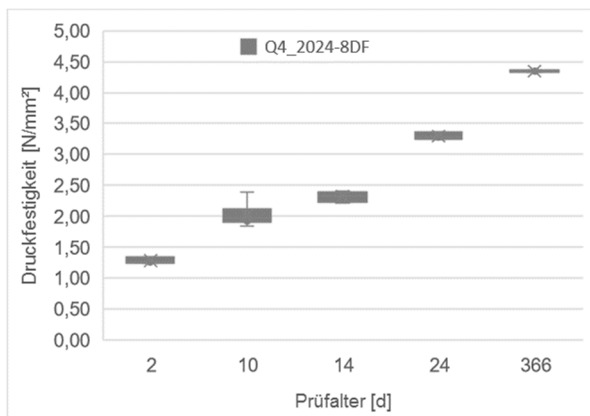


Abbildung 55: Festigkeit 8DF-Format $f_{cm}=4,3 \text{ N/mm}^2$; Produktionslehm auf 11mm abgesiebt und mit Lößlehm angereichert

V 1.4 Lehmischungen nach Rezept

Labor-,Tastversuche

Neben der Verbesserung der Oberflächenstruktur und Homogenität der Lehmsteine wurde insbesondere in dem Projekt nach Möglichkeiten gesucht, die Druckfestigkeit der Lehmsteine

weiter zu steigern, sowie die Kantenstabilität zu verbessern. In sogenannten Tastversuchen wurden im Labor einzelne Lehmsteine unter einer Prüfpresse hergestellt. Für die Versuche wurden auf 11 mm abgeseibte Lehme verwendet. Die Sieblinien entsprach der Korngrößenverteilung der Produktionslehme, die mit dem 8er Harfensieb im Werk abgeseibt wurden (Abbildung 56).

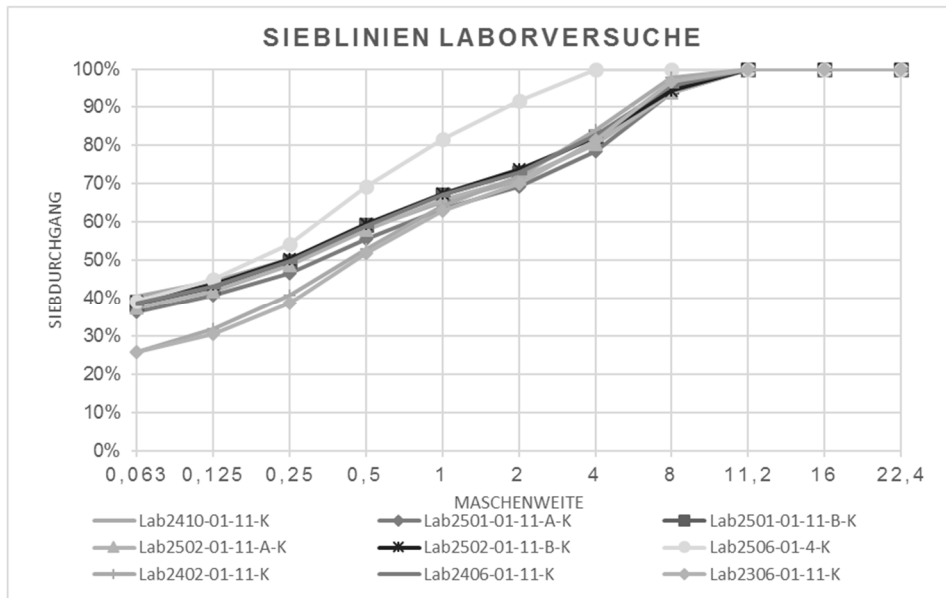


Abbildung 56: Untere beiden Sieblinien ohne Löblehm. Abgeseibt auf 11 mm. Helle Kurve abgeseibt auf 4 mm.

Die „Tastversuche“ (Bsp. Abbildung 57) dienten zum einen der Qualitätskontrolle der aktuellen Produktionslehme, des Weiteren wurden verschiedene Mischungsvarianten getestet, die je nach Ergebnis, dann auf der KS-Laborpresse bzw. im Werk getestet wurden.

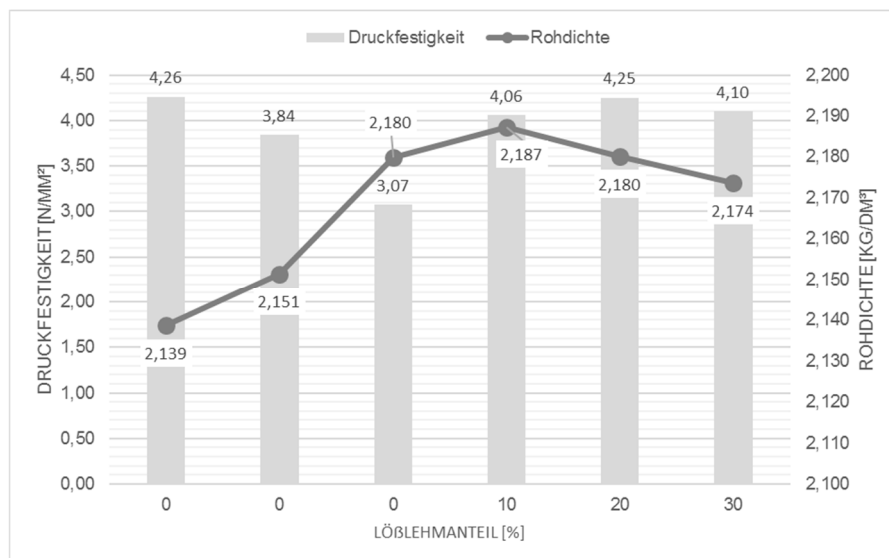


Abbildung 57: Erhöhung der Druckfestigkeit durch Beimischung von Löblehm in den Lehm (abgeseibt auch 18mm)

Wie in den vorgenannten Kapiteln festgestellt wurde, muss der Lehm für die Herstellung von formgepressten Lehmsteinen bestimmte Eigenschaften aufweisen. Insbesondere die

Korngrößenverteilung ist entscheidend für eine gute Verformungsstabilität der Steine. Da grobkörniger Lehm nicht immer vorhanden ist, wurde in dem Projekt auch nach Möglichkeiten gesucht, wie man einen Produktionslehm gezielt nachbauen kann durch die Kombination mit anderen Ausgangsstoffe bzw. ob man den derzeitigen verwendeten Lehm durch Zugabe z. B. von Rezykliertes-Gesteinskörnungen verbessern kann. Da in der Aufbereitung fast 50 % aus dem Rohlehm herausgesiebt werden und der Lehm aktuell auch noch über weite Strecken transportiert werden muss, war die Überlegung einen Produktionslehm aus lokalen Tonen bzw. Lößlehm herzustellen und die notwendige Gesteinskörnung erst am Produktionsstandort beizumischen.

Im Hinblick auf die Kantenstabilität der Lehmsteine wurde auch noch eine anderer Optimierungsansatz verfolgt. Der bisher verwendete Produktionslehm weist einen hohen Anteil an rundkörniger natürlicher“ Gesteinskörnung auf. Durch Zugabe von splittigem Material sollte die Stabilität der Steine verbessert werden. Verwendet wurde RC- Gesteinskörnung aus Kalksandsteinen und aus Beton in der Körnung 0/8. Auch wurde die Verwendung von Tonmehlen, Ziegelmehlen, Hanffasern und Bentonit zur Verbesserung der Materialeigenschaften untersucht. Beim Aufbereiten der Kiese und Sande in der Kiesanlage werden tonige und schluffige Bestandteile sowie Feinsand herausgewaschen, die Verwendung dieses Ton-Sand-Schlammes genannt „Terrafluid“ wurde auch in Versuchen getestet.

Versuchsreihe an einer Labor-Kalksandsteinpresse

In dem Projekt wurden zwei größere Versuchsreihen an einer Kalksandsteinlaborpresse durchgeführt. In dem Versuchsprogramm sollten verschiedene Mischungskombinationen gestellt. Hergestellt wurden Lehmstein-im NF-Format.

Folgende Fragestellungen sollten in der ersten Versuchsreihe untersucht werden:

- Welchen Einfluss hat die Feuchte auf die Festigkeit? (1-3)
- Wie muss die optimale Korngrößenverteilung aussehen? (4-9)
- Können Lehme aus verschiedenen Ausgangsstoffen nachgebaut werden? (10-11)
- Wie sind die Dauerhaftigkeitseigenschaften? (alle)
- Welchen Einfluss hat der Pressdruck auf die Druckfestigkeit? (alle)

Tabelle 9: 1. Versuchsreihe – Zusammensetzung der Lehmmischungen

Mischung	Ausgangs-feuchte [M.-%]	Lehm 0/16 mm [M.-%]	Lehm 0/11,2mm [M.-%]	Lößlehm [M.-%]	Füllkies 0/16mm [M.-%]	Mauersand 0/4mm [M.-%]	Sand 0/1mm [M.-%]	Tonmehl [M.-%]
1	5,8	100						
2	6,5	100						
3	7,0	100						
4	6,3		100					
5	6,9	90		10				

Mischung	Ausgangs- feuchte [M.-%]	Lehm 0/16 mm [M.-%]	Lehm 0/11,2mm [M.-%]	Lößlehm [M.-%]	Füllkies 0/16mm [M.-%]	Mauersand 0/4mm [M.-%]	Sand 0/1mm [M.-%]	Tonmehl [M.-%]
6	8,5	80		20				
7	8,2	80		10			10	
8	8,8	70		20			10	
9	7,8		90	10				
10	8,0			20	64	16		
11	7,9			20	70		10	
12	7,8			20	70		10	1
13	7,6			20	80			
14	7,9			20	80			1

Die Mischungen 1 bis 9 setzten sich aus Siebfraktionen „natürlich gewachsener“ Grubenlehme zusammen. Mit Siebfraktionen unterschiedlicher Herkunft, wie z.B. Mauersand und Füllkies, wurde in den Mischungen 10 bis 14 versucht die „Ideal-Sieblinie“ nachzustellen. Die Mischungen 1 bis 3 unterschieden sich nur in den eingestellten Feuchtegehalten 5,8-6,5-7,0 M.-% des Ausgangsmaterials „Lehm 0/16 mm“.

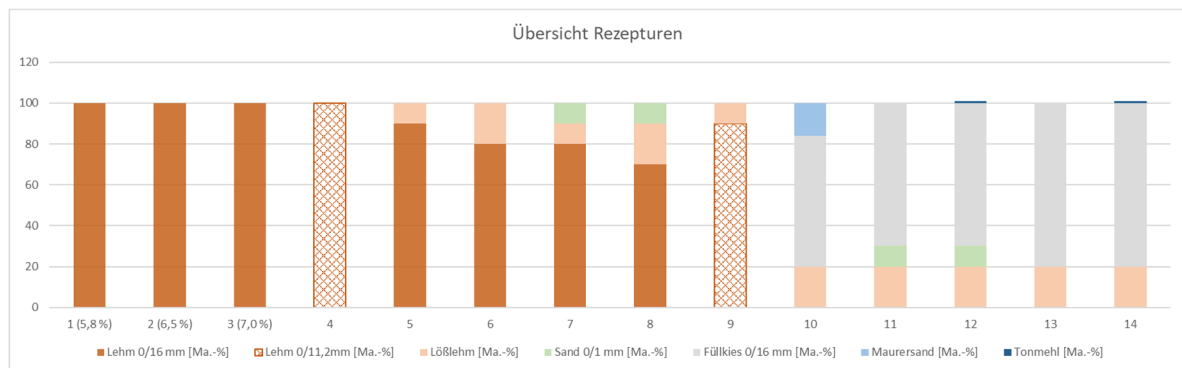


Abbildung 58: Versuchsreihen 1 bis 14 – Zusammensetzung der Lehmmischungen

Über die Materialeinwaage und damit den Füllgrad des Formkastens in der Labor-Kalksandsteinpresse wurde ein Pressdruck von 180 ± 20 bar ($\approx 18 \pm 2$ N/mm²) angestrebt. Dies entspricht ungefähr dem Doppelten, des Pressdruckes in der industriellen Sandsteinpresse (ca. 10 N/mm²). Mit Materialeinwaagen von ca. 4,65 kg und dem NF-Steinformat (240x115x71) mm wurden Rohdichten von $2,20 \pm 0,02$ kg/dm³ erreicht. Dies entspricht der Zielrohrichteklasse von 2,2.

Beim Pressen der „künstlichen“ Mischungen 10 bis 14 konnte kein ausreichender Verbund in der Gefügematrix hergestellt werden, so dass die frisch gepressten Steine nach dem Aushub aus dem Formkasten bereits laminierten. Es stellt sich daher weiter die Herausforderung, den Aufbau und die damit verbundenen Wechselwirkungen in der Gefügematrix in einem natürlich

gewachsenen Lehm zu verstehen. Erst dann kann es möglich sein, diesen aus Ausgangsstoffen unterschiedlicher Herkunft „nachzubauen“.

Der Einfluss des Feuchtegehaltes des Ausgangsmaterials auf die Druckfestigkeit und -entwicklung über die Zeit wurden an den Mischungen 1 bis 3 untersucht. Die Mischung mit der geringsten Materialfeuchte (Mischung 1 mit 5,8 M.-%) erzielte die höchsten mittleren Steindruckfestigkeiten $f_{1,St,m} = 14,0 \pm 1,2 \text{ N/mm}^2$. Mit zunehmender Feuchte nahm die mittlere Steindruckfestigkeit ab $\rightarrow f_{2,St,m} = 13,4 \pm 0,9 \text{ N/mm}^2 - f_{3,St,m} = 12,9 \pm 0,8 \text{ N/mm}^2$. Bei den Mischungen 2 und 3 konnte über den Trocknungsverlauf aufgrund der etwas höheren Feuchtegehalte eine Zunahme der Steindruckfestigkeit festgestellt werden. Darüber hinaus konnte bei allen Mischungen eine Abhängigkeit der ermittelten Steindruckfestigkeiten vom mittleren Pressdruck detektiert werden.

Die aus mehreren abgeseibten, natürlichen Fraktionen zusammengesetzten Mischungen 4 bis 9 mit eingestellten Feuchtegehalten zwischen 6,5 und 8,5 M.-% zeigten ein gutes Druckfestigkeitsniveau von $12 \pm 2 \text{ N/mm}^2$. Hervorzuheben ist jedoch der hohe Feuchtwiderstand der die Einordnung dieser Mischungen in die höchsten Anwendungsklassen AK Ia bzw. AK Ib zulässt.

Anhand der Sieblinien konnte festgestellt werden, dass bei diesen Mischungen (5 bis 9) die Tonfraktion ($\leq 0,002 \text{ mm}$) und im Schlämmkornbereich $0,002 - 0,063 \text{ mm}$ durch die Zugabe von Lößlehm im Vergleich zur Mischung 4 herabgesetzt wurden sind. Im Sandkornbereich $0,063 - 2 \text{ mm}$ dafür ergänzt wurden. Die damit einhergehende bessere Packungsdichte im Zusammenhang mit hohen Pressdrücken, kann als Möglichkeit für den damit erzielten hohen Feuchtwiderstand betrachtet werden.

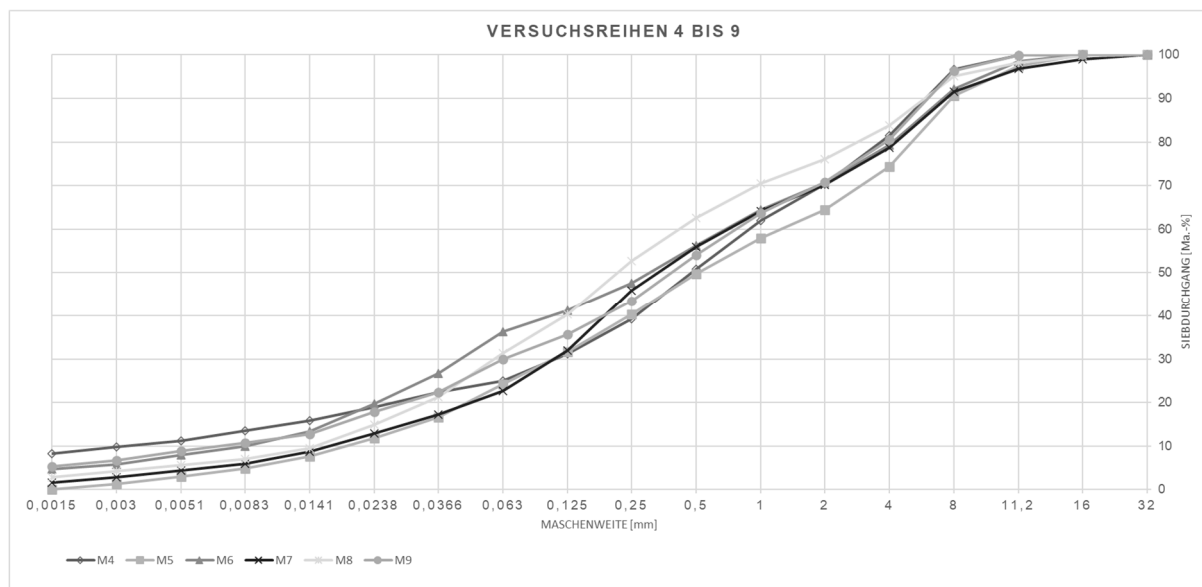


Abbildung 59: Versuchsreihen 4 bis 9 – Sieblinien

In einer zweiten Versuchsreihe wurden Dauerhaftigkeitsfragestellungen bearbeitet:

- Welchen Einfluss haben Recycling-Substitute? (II-III)
- Welchen Einfluss hat die Zugabe von Tonmehl?
- Welchen Einfluss haben organische Fasern?
- Welcher Einfluss ergibt sich durch eine mechanische Vorbehandlung?

Tabelle 10: 1. Versuchsreihen I bis VII – Zusammensetzung der Lehmmischungen

Mischung	Grundmischung (GM) [M.-%]	Kalksandsteinbruch [M.-%]	RC-Beton 0/8 mm [M.-%]	Tonmehl [M.-%]	Hanfaser [M.-%]	GM 0/4 mm gebr. [M.-%]
I	100					
II	87	13				
III	87		13			
IV	96	°		4		
V	98		°		2	
VI	°		°			100
VII	43,5	6,5	°			50

Die verwendete Grundmischung wurde einem Produktionslehm entnommen. Die an der Labor-Kalksandsteinpresse damit erzielten Referenzergebnisse – Feuchtwiderstand und Druckfestigkeiten – waren deckungsgleich mit den Ergebnissen von Erstprüfungen aus daraus hergestellten Lehmsteinen und zeigten eine sehr geringe Streubreite. Lediglich die Steindruckfestigkeiten waren entsprechend der größeren Pressdrücke an der Laborpresse höher.

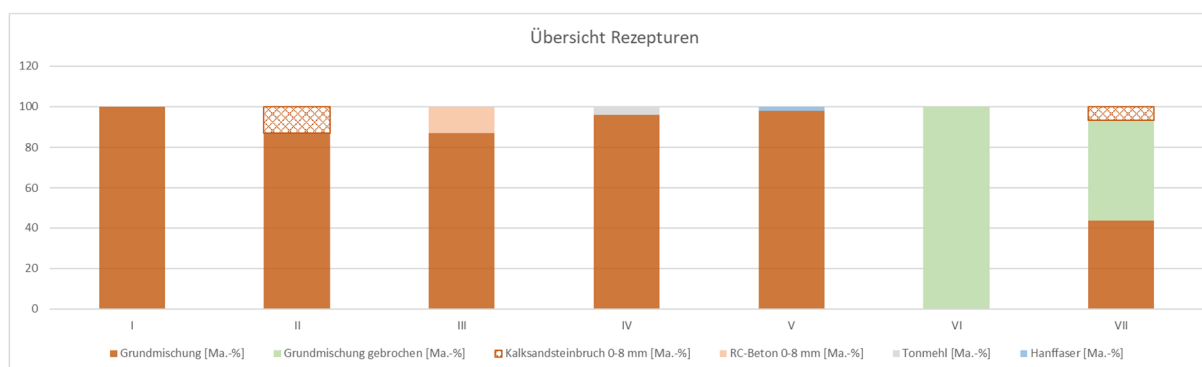


Abbildung 60: Versuchsreihen I bis VII – Zusammensetzung der Lehmmischungen

Die Substitute mit Recyclingmaterial aus der Kalksandstein- bzw. Betonproduktion in der Grundmischung war hinsichtlich des passenden Feuchtegehaltes zunächst eine Herausforderung. Die Grundmischungen mit Kalksandsteinbruch (II) und Hanfaser (V) zeigten einen sehr hohen Feuchtwiderstand. Die Grundmischungen mit RC-Beton (III) und Tonmehl (IV) wiesen den gleichen Feuchtwiderstand auf wie die Grundmischung. Mit der im

Backenbrechen mechanisch vorbehandelten Grundmischung (VI) sollte eine bessere Verzahnung im Steingefüge erreicht werden. Eine Verbesserung des Feuchtwiderstandes konnte jedoch nicht erzielt werden.

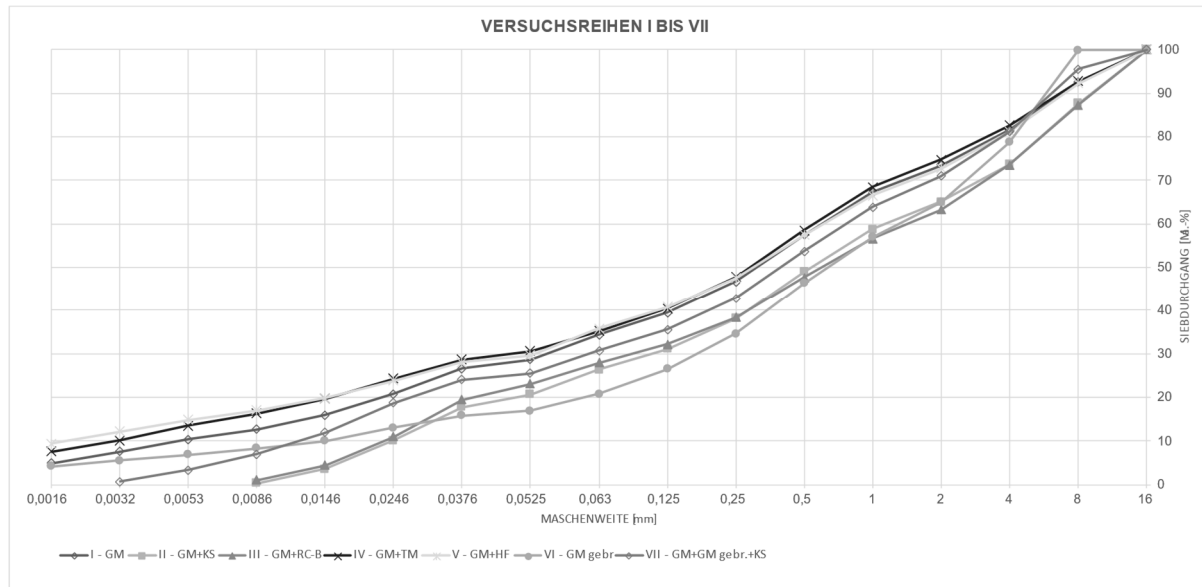


Abbildung 61: Versuchsreihen I bis VII – Sieblinien

Die dargestellten Sieblinien weisen die anvisierten Effekte nach. So konnte bei Mischung IV durch Zugabe von Tonmehl zur Grundmischung I der Tonanteil leicht gehoben werden. Warum dies auch bei der Zugabe von Hanffaser der Fall ist, muss wahrscheinlich der Grundstreuung des Ausgangsmaterials zugerechnet werden. Durch die Zugaben von Kalksandsteinbruch und RC-Beton der Körnung 0/8 konnten bei den kombinierten Sieb- und Schlämmanalysen der Mischungen II und III keine Anteile im Ton- und unteren Schlämmbereich ($\leq 0,009$ mm) bestimmt werden. Hier besteht die Möglichkeit, dass der bei den Produktionsversuchen festgestellte Effekt der Feuchteregulierung zu nasser Produktionslehme durch Recyclingmaterial (RC), auch zur physikalischen Bindung feinsten Partikel in dem porigen RC-Gefüge führt. Dadurch können diese Partikelgrößen nicht mehr in der Schlämmanalyse detektiert werden. Verringert werden sollte dieser Effekt durch eine verminderte Zugabe von RC-Bruch (siehe Sieblinie VII).

Eignung verschiedener Zusatzstoffe

In Tabelle 11 sind die in den Versuchsreihen getesteten Zusatzstoffe aufgeführt und deren Eignung für formgepresste Lehmsteine.

Insbesondere die Zugabe von RC-Gesteinskörnung aus gebrochenen Kalksandsteinen in der Körnung 0/8 hat sich in den Versuchen (Labor und Produktion) durch Erhöhung der Kantenstabilität und des Feuchtwiderstandes als sehr positiv gezeigt (siehe *Abbildung 62*). Die gebrochene Gesteinskörnung eignet sich ebenfalls zur Feuchtigkeitsregulierung in der losen Mischung, falls der Produktionslehm einen zu hohen Wassergehalt für das Formpressen aufweist.

Tabelle 11: Anwendbarkeit mgl. Zusatzstoffe für die Verwendung in Produktionslehm für das Formpressverfahren

Material	Eignung	Maximale Menge im Lehmgemisch	Bewirkte Veränderung im Lehmgemisch
Lößlehme	Ja	abhängig von Korngrößenverteilung des Rohlehm, (siehe Materialmodell)	Verbesserung Sieblinie im Sandkorn- und Schluffbereich, Erhöhung Festigkeit durch Gefügeoptimierung in Verbindung mit höherem Pressdruck
Tonmehl	Ja	bis 3 M.-%	Verbesserung Bindigkeit
Terrafluid	Keine Aussage mgl.	Keine Aussage mgl.	Mehr Versuche notwendig, noch keine Verbesserung erkennbar.
Bentonit		bis 1 M.-%	
Hanffasern		bis 2 M.-%	
Ziegelmehl		bis 3 M.-%	
RC-Gesteinskörnung aus KS-Bruch	ja	bis 20 M.-%	Kein neg. Einfluss auf Festigkeit, mehr Kantenstabilität, zur Feuchtereduktion bei zu feuchtem Produktionslehm geeignet
RC-Gesteinskörnung aus Beton-Bruch	ja	Bis 15 M.-%	Kein neg. Einfluss auf Festigkeit, mehr Kantenstabilität

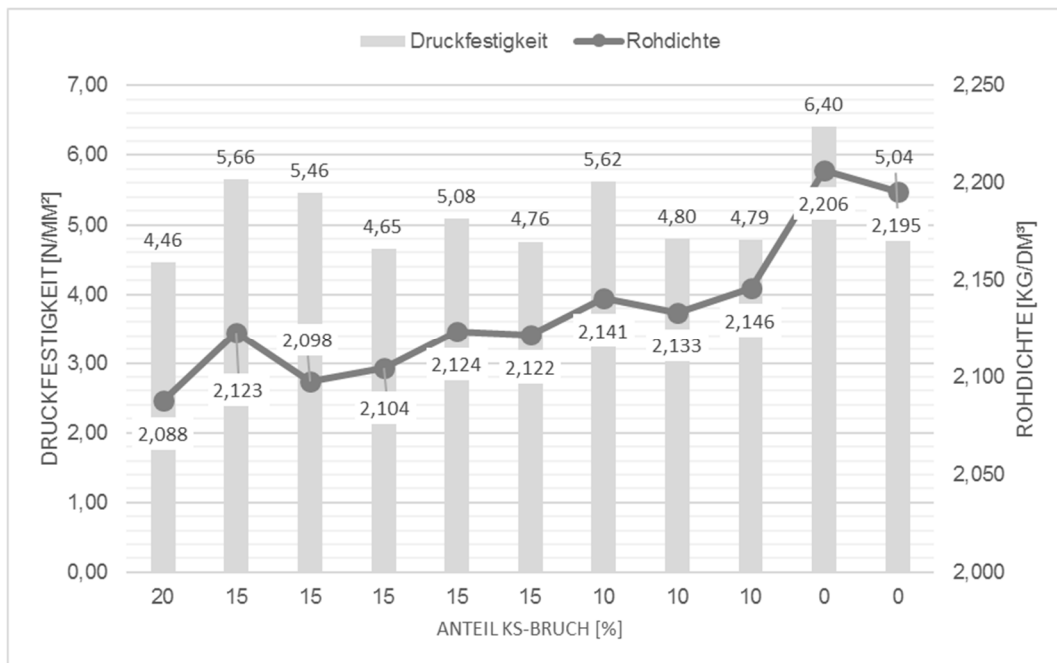


Abbildung 62: Festigkeiten Lehmischung mit variablem Anteil an rezyklierter Gesteinskörnung aus Kalksandstein

Basierend auf den Erkenntnissen aus den Versuchen an der Laborpresse, wurden im Werk auch Steinen mit gebrochener Gesteinskörnung aus Kalksandstein und Beton hergestellt. Der zugegebene Anteil zum Lehm betrug vor der Siebung fein ca. 20 M.-%, so dass der Anteil im Produktionslehm bzw. Lehmstein bei ca. 15 M.-% lag. Hergestellt wurden Steine im Format 6 DF. Wie in *Abbildung 63* zu erkennen hat insbesondere die Zugabe von gebrochener RC-Gesteinskörnung aus KS-Bruch großes Potential zur Optimierung der Steindruckfestigkeit Sies korreliert mit den Erkenntnissen aus den Tastversuchen im Labor.

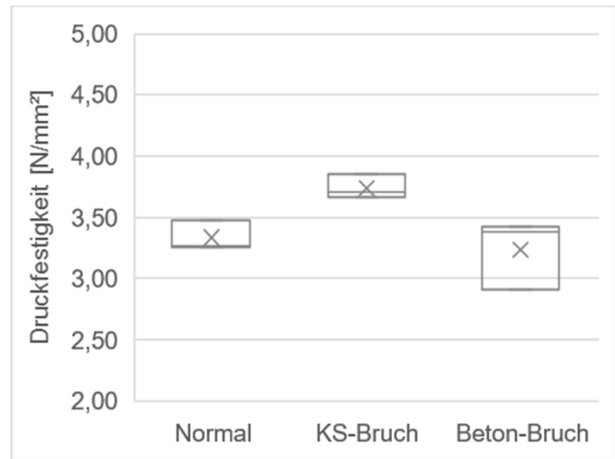


Abbildung 63: Vergleich Druckfestigkeit nach 4 Wochen von Lehmsteinen im 6DF-Format ohne und mit RC-Gesteinskörnung

V 1.5 Materialmodell

Wie in Kapitel V 1.3 beschrieben wurde der Lehm schrittweise im Größtkornbereich und anschließend im Feinkornbereich optimiert. Mit der Lehmmischung LM_2410-01-10 wurden im Herbst 2024 Plan-Lehmsteine im Format 8, 10 und 12 DF hergestellt.

Die Druckfestigkeitsklassen von den 8 und 10 DF-Steinen entsprachen der Druckfestigkeitsklasse 4, die 12 DF-Lehmsteine wiesen sogar die nach Norm höchste Druckfestigkeitsklasse 6 in der Erstprüfung auf. Ein Vergleich der Korngrößenverteilung der Lehmsteine mit den verwendeten Produktionslehmen zeigt, dass die Ergebnisse reproduzierbar sind und dass die Steine eine sehr feinkörnige Lehmsteinmatrix aufweisen (siehe *Abbildung 64*)

Abgeleitet aus den Prüfergebnissen aus der Produktion und den Erkenntnissen aus den Laborversuchen vgl. Kapt. V 1.3 und V 1.4, sollte der **Produktionslehm** für die Herstellung formgepresster Lehmsteine die in *Tabelle 12* aufgeführten Randparameter aufweisen:

Tabelle 12: Zielzusammensetzung der Produktionslehme für die Herstellung von Lehmsteinen im Formpressverfahren

Kenngröße	Wertbereich
Materialfeuchte	8-9 M.-%
Größtkorn	8-11 mm
Siebdurchgang 2 mm	70-80 M.-%
Siebdurchgang 0,25 mm	50-60 M.-%
Siebdurchgang 0,063 mm	40-50 M.-%
Mindesttonanteil im Feinkornbereich	20 ± 10 M.-%
Tonminerale	bevorzugt Smektite

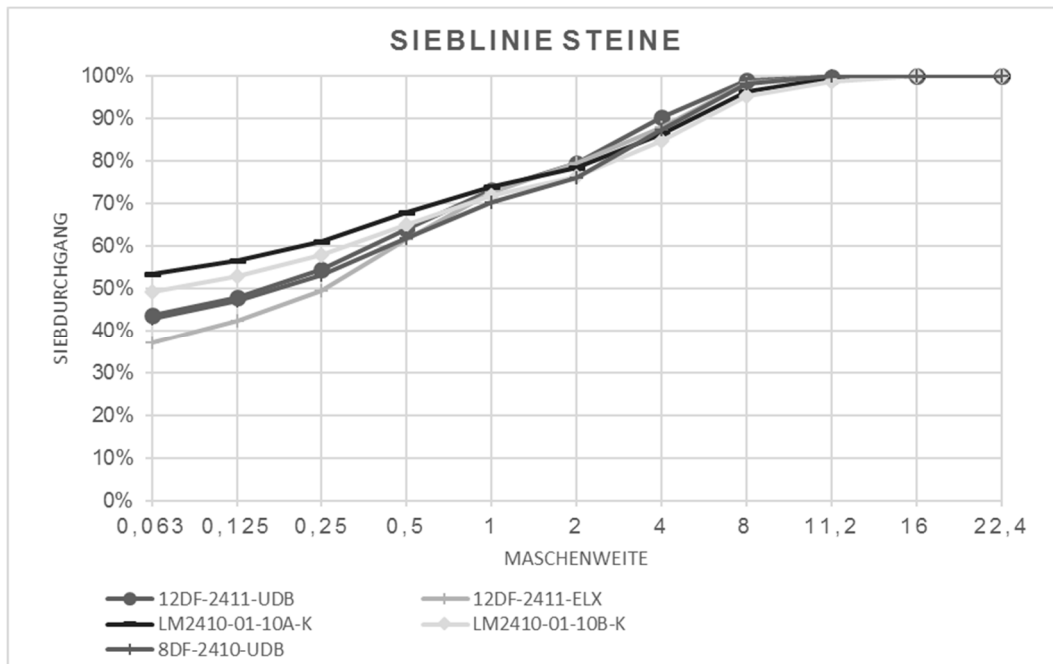


Abbildung 64: Sieblinien von Lehmsteinen mit optimalen Eigenschaften bezüglich Druckfestigkeit und Anwendungsklasse

V 1.6 Bauphysikalische Untersuchungen

Wärmeleitfähigkeit

Im Rahmen der Untersuchung der Wärmeleitfähigkeit (λ) anhand der selbstgepressten Prüfkörper mit dem Zweiplattenverfahren wurden für drei Mitteltemperaturen die in *Tabelle 13* aufgeführten Ergebnisse ermittelt. Mit steigender Probenmitteltemperatur zeigte sich ein Anstieg der Wärmeleitfähigkeit: Bei 10 °C lag der Wert bei 0,98 W/mK, bei 20 °C bei 1,02 W/mK und bei 30 °C bei 1,04 W/mK. Die Messergebnisse sind grafisch in *Abbildung 65* dargestellt. Eine lineare Regression beschreibt den Zusammenhang zwischen der Probenmitteltemperatur und der Wärmeleitfähigkeit mit der Gleichung:

$$\lambda = 0,003 \cdot MT + 0,954 \quad (MT = \text{Mitteltemperatur der Probe})$$

Tabelle 13: Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsmessung des Lehmsteins nach dem Zweiplattenverfahren

Messung Nr.	Heizleistung [W]	Temperatur der kalten Probenoberfläche [°C]	Temperatur der warmen Probenoberfläche [°C]	Mitteltemperatur der Probe [°C]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
1	22,05	5,5	16,0	10,8	0,98
2	22,69	15,5	25,9	20,7	1,02
3	23,24	25,4	35,7	30,5	1,04

Für die als Referenzwert in der Literatur übliche Mitteltemperatur von 10 °C wurde zusätzlich eine erweiterte Messunsicherheit berücksichtigt, wodurch sich ein Wärmeleitfähigkeitswert

von $\lambda(10\text{ °C}) = 0,9842 \pm 0,0394\text{ W/mK}$ ergibt. Diese Messunsicherheit wurde automatisch von der verwendeten Software berechnet und berücksichtigt Messgeräteabweichungen, Probenbedingungen und methodische Einflüsse.

Die Wärmeleitfähigkeit des untersuchten Lehmsteins liegt im erwarteten Bereich für Lehmbaumstoffe vergleichbarer Rohdichte. Der ermittelte Wert des untersuchten Lehmsteins mit $0,98\text{ W/mK}$ bei einer Rohdichte von 2.127 kg/dm^3 liegt etwa 20 % unter dem ungünstigsten Rechenwert für Lehmbaumstoffe dieser Dichteklasse. Im Vergleich zu

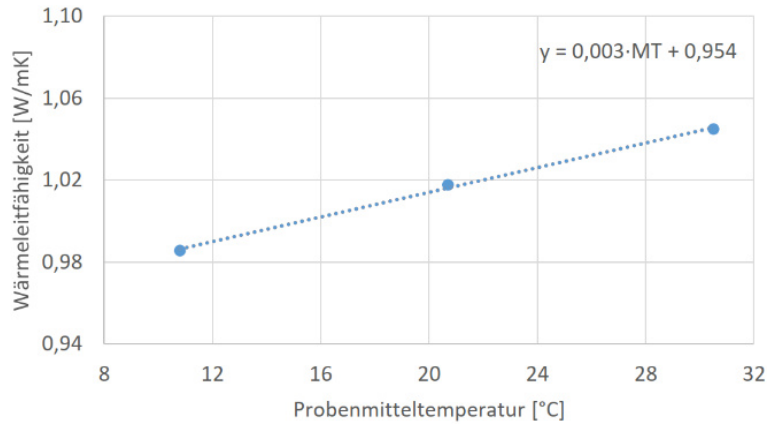


Abbildung 65: Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Probenmitteltemperatur

Mauerwerkssteinen aus Kalksandstein ($\lambda = 1,3\text{ W/mK}$), Ziegel ($\lambda = 1,2\text{ W/mK}$) oder Beton ($\lambda = 1,6\text{ W/mK}$) mit ähnlicher Rohdichte zeigt der Lehmstein etwas bessere Dämmeigenschaften. Die leichte Zunahme der Wärmeleitfähigkeit bei steigender Probenmitteltemperatur ist hauptsächlich auf die temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit der in den Poren eingeschlossenen Luft zurückzuführen. Mit zunehmender Temperatur bewegen sich die Luftmoleküle schneller, wodurch der Wärmetransport effizienter wird. Experimentelle Daten zeigen, dass die Wärmeleitfähigkeit von Luft im Temperaturbereich von 20 °C bis 50 °C um etwa 10 – 15 % steigt. Da Lehmsteine eine hohe Porosität aufweisen, beeinflusst dieser Effekt maßgeblich ihre Wärmeleitfähigkeit und erklärt den beobachteten Anstieg in den Messergebnissen.

Wasserdampfadsorption

Die Untersuchung der Wasserdampfadsorption wurde über einen Zeitraum von 24 Stunden an drei Probekörpern durchgeführt. Die Messwerte der einzelnen Proben wurden gemittelt und sind im folgenden Diagramm grafisch dargestellt. Das Diagramm zeigt die aufgenommene Wasserdampfmenge in Abhängigkeit von der Zeit. Insgesamt wurden über einen Zeitraum von 24 Stunden etwa 170 g/cm^2 Wasserdampf aufgenommen. Die Steigung des Graphen zeigt zu Beginn einen steilen Anstieg der aufgenommenen Wasserdampfmenge, der

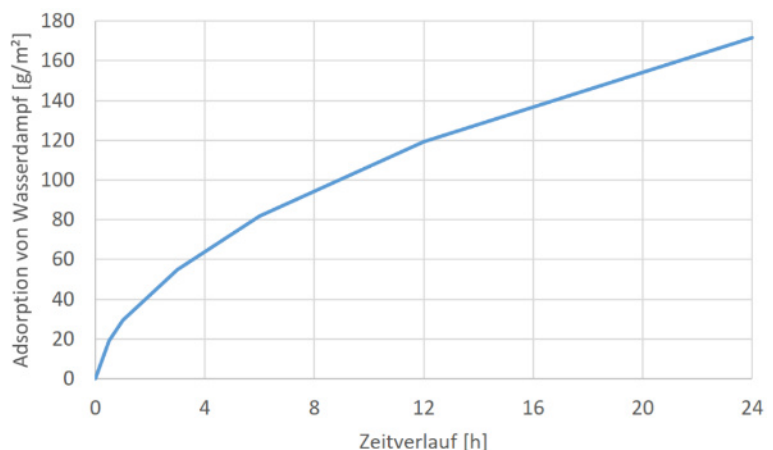


Abbildung 66: Wasserdampfadsorption des Lehmsteins über einen Zeitraum von 24h

der Graphen zeigt zu Beginn einen steilen Anstieg der aufgenommenen Wasserdampfmenge, der

bereits nach einer Stunde deutlich abnimmt und anschließend in einen annähernd linearen Verlauf übergeht.

Der Lehmstein erfüllt die Anforderungen der Wasserdampfadsorptionsklasse III. Die aus der Messkurve ersichtliche schnelle Wasserdampfaufnahme in der Anfangsphase der Messung ist darauf zurückzuführen, dass zu Beginn die Poren noch frei von Wassermolekülen sind. Dadurch können sich diese ungehindert anhaften. Gleichzeitig besteht anfangs ein starkes Konzentrationsgefälle zwischen der Umgebungsluft und den Poren des Steins, welches den Diffusionsfluss in der Anfangsphase erhöht. Auch die angenommene feine Porenstruktur durch die höhere Packungsdichte des Steins begünstigt die schnelle Aufnahme aufgrund der stärkeren Kapillarkräfte. Mit fortschreitender Zeit verlangsamt sich die Adsorptionsrate durch die zunehmende Füllung der Adsorptions durch Wassermoleküle. Gleichzeitig nimmt das Konzentrationsgefälle ab und der Diffusionsfluss wird verringert. Mit der

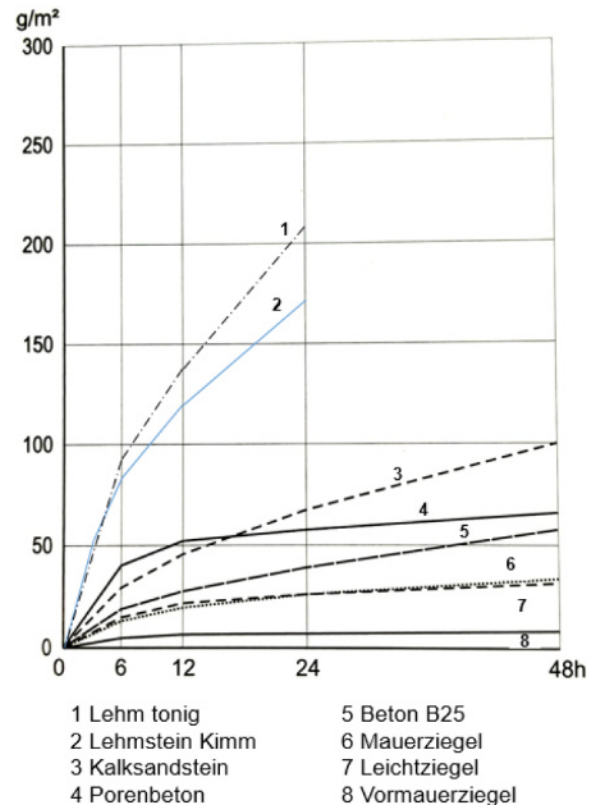


Abbildung 67: Adsorptionskurven von Wasserdampf verschiedener Baustoffe

Sättigung der leicht zugänglichen Poren kommt es zudem zum Quellen der Tonminerale durch den Kontakt mit Wasser. Dadurch wird ihr Volumen vergrößert, der Porenraum verengt sich und die Adsorptionsrate wird allmählich verlangsamt.

Während der untersuchte Lehmstein innerhalb von 24 Stunden etwa 170 g/m² Wasserdampf aufnimmt, liegt die Aufnahme gebrannter Ziegel lediglich bei 10 bis 30 g/m². Auch Kalksandstein zeigt mit 70 g/m² eine deutlich geringere Wasserdampfaufnahme. Dies verdeutlicht die typische feuchteregulierende Eigenschaft von Lehm, die vor allem auf den mineralogischen Effekt der Quelltone zurückzuführen ist. Während konventionelle Baustoffe Feuchtigkeit hauptsächlich kapillar speichern, können Lehmbaustoffe Wassermoleküle zusätzlich in der Kristallstruktur von Dreischicht-Tonmineralen zwischengespeichert werden. Auch im Vergleich zu den Richtwerten für Lehmbaustoffe (Lehmbau Regeln) zeigt der untersuchte Stein erhöhte Adsorptionswerte. Dies könnte mit dem erhöhten Mikroporenanteil zusammenhängen, der besonders relevant für die Wasserdampfadsorption ist.

Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl

In folgendem Diagramm ist exemplarisch die zeitabhängige Massezunahme des Probekörpers 1 im Klimaschrank dargestellt. Aus der Steigung der Regressionsgerade des linearen Abschnitts der Messreihe ergibt sich ein Dampfdiffusionsstrom G mit 0,4121 g/d. Daraus lässt sich eine Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ von 17,3 sowie eine wasserdampf-

diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d von 0,51 m berechnen. Für die Prüfkörper 2, 3 und 4 wurden die gleichen Berechnungen durchgeführt und aus den Ergebnissen ein Mittelwert gebildet. Somit ergab sich eine mittlere Wasserdampfdiffusions-widerstandszahl von 16,8 und eine mittlere wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d von 0,50 m.

Die ermittelte Wasserdampf-diffusionswiderstandszahl von 16,8 liegt über den typischen Vergleichswerten für Lehmbaumstoffe, die gemäß DIN 4108-4 im Trockenbereichsverfahren von $\mu = 10$ angegeben werden. Der erhöhte Diffusionswiderstand und die damit einhergehende geringere Wasserdampfpermeabilität deuten auf

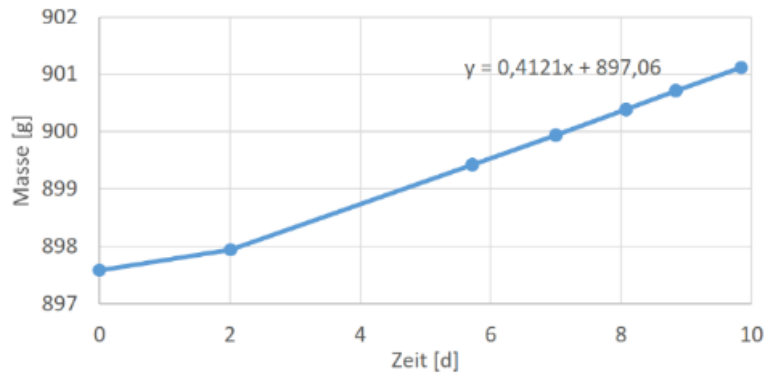


Abbildung 68: Zeitabhängige Massenänderung des Prüfkörpers 1 durch Wasserdampfaufnahme

eine vergleichsweise niedrige effektive Porosität des Lehmsteins hin. Dies steht im Einklang mit der hohen Rohdichte von 2.127 g/m^3 sowie der inhomogenen Materialzusammensetzung. Die breite Korngrößenverteilung trägt zu einer hohen Packungsdichte bei, da die Hohlräume zwischen den größeren Partikeln durch feinere Körner ausgefüllt werden. Dadurch entstehen weniger durchgängige Porenkanäle, was die Wasserdampfdiffusion zusätzlich hemmt. Auch der Anteil quellfähiger Tonminerale im Lehmstein hat einen Einfluss. Durch Wassereinlagerung bei steigender Feuchte vergrößert sich das Volumen der Tonminerale, wodurch sich die Porenstruktur verändert. Dies reduziert die effektive Porosität und hemmt die Wasserdampfdiffusion. Für die entsprechende äquivalente Luftschichtdicke wurde ein Wert von 0,5 m ermittelt. Baustoffe mit einem s_d -Wert unter 0,5 m gelten als diffusionsoffen, während Werte über 1,5 m bereits als dampfbremsend eingestuft werden. Der untersuchte Lehmstein liegt mit 0,5 m genau an der Grenze zwischen diffusionsoffen und -bremsend, was bedeutet, dass er Feuchtigkeit aufnehmen und wieder abgeben kann, ohne den Feuchtetransport völlig zu blockieren. Ein Vergleich mit anderen Baustoffen zeigt, dass der untersuchte Lehmstein in einem mittleren Bereich liegt. Kalksandstein ($\mu = 5 - 25$) besitzt ähnlich niedrige bis moderate Werte, während Klinker ($\mu = 50 - 100$) und Beton ($\mu = 70 - 150$) deutlich höhere Widerstände aufweisen und den Feuchtetransport erheblich stärker hemmen.

Tabelle 14: Ergebnisse der Wasserdampfdiffusion

Probe	Wasserdampfdiffusions-widerstandszahl μ	wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d [m]
1	17,3	0,51
2	17,0	0,50
3	17,1	0,51
4	15,9	0,47
\bar{x}	16,8	0,50
s	0,629	0,019

V 1.7 Neuentwickelte Prüfverfahren

Haftzugprüfung an Lehmsteinen

Die mit der Lehmsteinpresse hergestellten Probekörper erreichten eine mittlere Haftzugfestigkeit von $0,15 \text{ N/mm}^2$. Das Bruchbild äußerte sich bei allen Prüfkörpern in Form eines Kohäsionsbruchs, bei dem der Riss innerhalb der Lehmschicht verlief. Die Ergebnisse der 13 Einzelprüfungen sind in *Tabelle 15* zusammengefasst. Die Proben mit Ringnut sind dabei mit einem „R“ gekennzeichnet, die mit den Noppen mit einem „N“. Die Haftzugfestigkeit der Probekörper mit Ringnut lag zwischen $0,10 \text{ N/mm}^2$ und $0,22 \text{ N/mm}^2$. Im Vergleich dazu wiesen die Proben mit Noppen insgesamt geringere Haftzugfestigkeiten auf, mit Werten zwischen $0,03 \text{ N/mm}^2$ und $0,18 \text{ N/mm}^2$.

Probe	Haftzugfestigkeit [N/mm ²]
R1	0,21
R2	0,18
R3	0,22
R4	0,21
R5	0,15
R6	0,10
R7	0,19
\bar{x}_R	0,18
s	0,042
N8	0,18
N9	0,17
N10	-
N11	0,03
N12	0,11
N13	0,07
\bar{x}_N	0,11
s	0,064

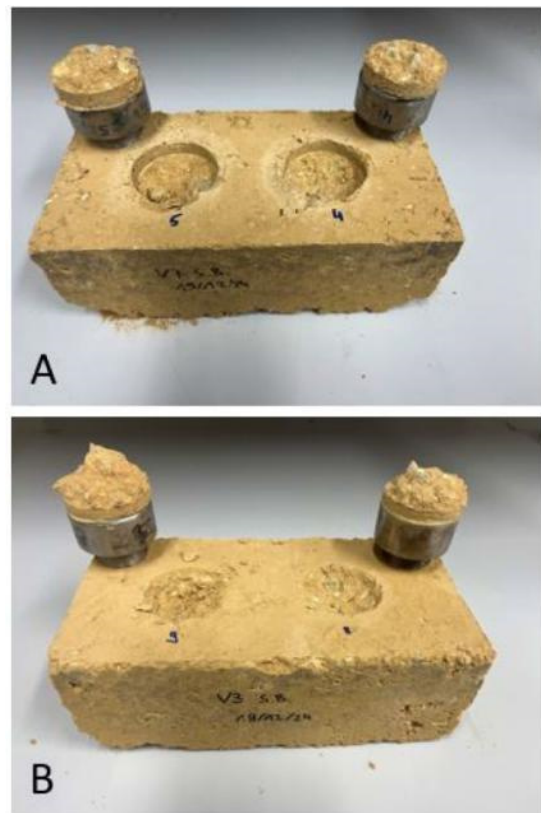


Tabelle 15: Haftzugfestigkeiten der Probekörper mit Ringnut (R) und mit Noppen (N)

Abbildung 69: Bruchbilder an Prüfkörper mit Ringnut (A) und mit Noppen (B)

Die geringeren Haftzugfestigkeitswerte der Probekörper mit den Noppen sind auf eine zu geringe Einwaage bei der Herstellung der Prüfkörper zurückzuführen. Ein Vergleich mit Literaturwerten von $0,4$ bis $0,6 \text{ N/mm}^2$ die Forschergruppen aus Deutschland und Italien an Lehmsteinen aus Ziegellei-lehmen ermittelt haben, ergibt eine deutlich geringere Haftzugfestigkeit. Dies lässt sich auf den deutlich geringeren Tongehalt und die wenig konsistente Formgebung (erdfeuchte statt plastischer Konsistenz) zurückführen. Hinzu kommen die bereits beschriebenen Herausforderungen bei der Präparierung der Prüffläche für das Aufbringen der Haftzugstempel. Erste Versuche mit Schablonen aus Teflon dazu sind jedoch vielversprechend.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass bereits eine erste Versuchsreihe das Potential dieser Prüfmethode aufgezeigt hat. Weiterführend sind noch die folgenden Fragestellungen zu bearbeiten:

- Vergleichmäßigung der Prüfkörperherstellung
- Verbesserung der Prüfflächenpräparation
- Aufzeigen einer (linearen?) Korrelation zwischen Haftzugfestigkeit und Lehmsteinfeuchte

Plastizität/Bindekraft Produktionslehm: Pfefferkorn

Die Plastizität/Bindekraft-Untersuchungen mit dem Verfahren nach Pfefferkorn wurden an Produktionslehm von 8 DF und 10 DF Steinen durchgeführt. Dazu wurden bereits hergestellte Steine wieder replastifiziert, getrocknet, auf 4 mm Größtkorn abgeseibt und Probenmengen mit den Materialfeuchten von 5, 6, 7, 8, 9 und 10 M.-% Wassergehalt hergestellt. Die daraus hergestellten Lehm-Zylinder wurden mit dem Pfefferkorn-Gerät geprüft.

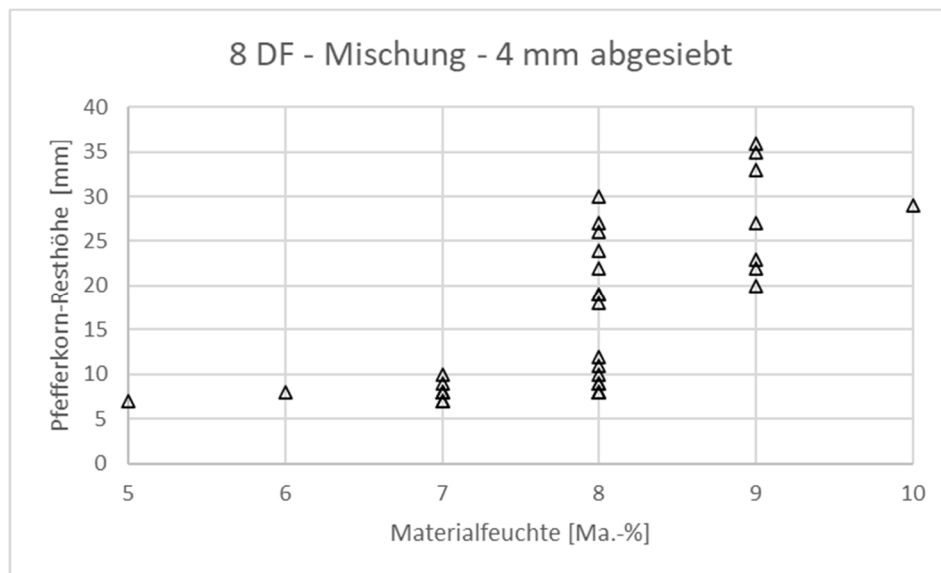


Abbildung 70: Abhängigkeit des Pfefferkorn-Wertes (Plastizität) von der Materialfeuchte (8 DF-Mischung)

Wie die Grafiken für die Produktionslehme von 8 DF- und 10 DF-Steine zeigen, ist eine Abhängigkeit des Pfefferkornwertes von der Materialfeuchte prinzipiell gegeben. Die Punkteverteilungen zeigen bei beiden Mischungen einen sehr vergleichbaren Verlauf. Die Werte für die Materialfeuchten 5, 6, 7 und 10 sind sehr gut reproduzierbar. Im für die Produktion von formgepressten Lehmsteinen relevanten Bereich von 8 bis 9 M.-% ergeben sich jedoch signifikante Streueffekte bei der Messwertermittlung. Dem kann ggfs. in weiterführenden Untersuchungen mit einem Siebschnitt bei 2 mm entgegengewirkt werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass mit dieser einfachen Methodik die Materialfeuchte von Produktionslehm gut bestimmt werden kann.

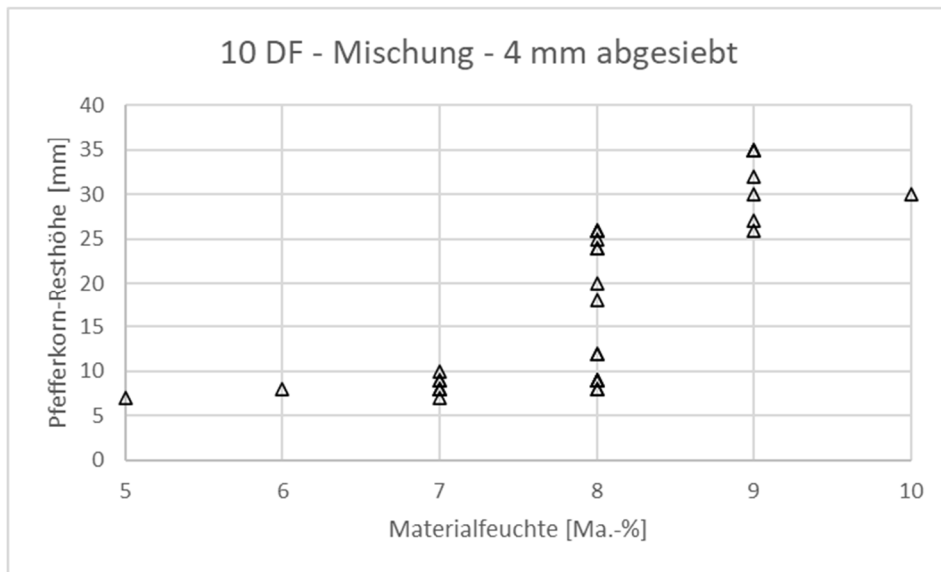


Abbildung 71: Abhängigkeit des Pfefferkorn-Wertes (Plastizität) von der Materialfeuchte (10 DF-Mischung)

Zerstörungsfreie Untersuchungen

Für die vergleichende Untersuchungsreihe mittels zerstörungsfreier Messverfahren wurden 9 Lehmsteine im Format 2 DF bzw. 6 Lehmsteine im Format 4DF direkt nach dem Pressvorgang einer Produktionscharge entnommen, mittels PE-Folie luftdicht verpackt und bis zum Beginn der Untersuchungen gelagert. Die Untersuchungsreihe startete mit dem gleichzeitigen Entpacken aller Lehmsteine und anschließender (Trocken-)Lagerung bei 23 °C / 50 % rLF über einen Zeitraum von 18 Tagen. In regelmäßigen Abständen wurden die Messverfahren

- a) Ultraschalllaufzeitmessung (dyn. E-Modul)
- b) Hammer-Schlag-Verfahren (dyn. E-Modul)
- c) Resonanzanalyse/Kugelfalltest (dyn. E-Modul)
- d) Rückprallhammer (indirekter dyn. E-Modul)
- e) Steindruckfestigkeit

sowie Bestimmung des Trocknungsverlaufes durchgeführt.

Tabelle 16: Versuchsplan zerstörungsfreie Untersuchungen a) bis c) und e)

Tag	dyn. E-Modul (S1, S2, S3)	Druckfestigkeit
0	x (S4, S5, S6)	x (S4, S5, S6)
2	x	
5	x	
9	x (S7, S8, S9)	x (S7, S8, S9)
12	x	
18	x (S1, S2, S3)	x (S1, S2, S3)

Die mittels Resonanzanalyse (Kugelfalltest) ermittelten E-Moduln werden im Weiteren nicht betrachtet, da die damit erzielten Ergebnisse unrealistisch hohe Werte ergaben und sich über den Verlauf der Trocknung auch keine Veränderungen eintraten.

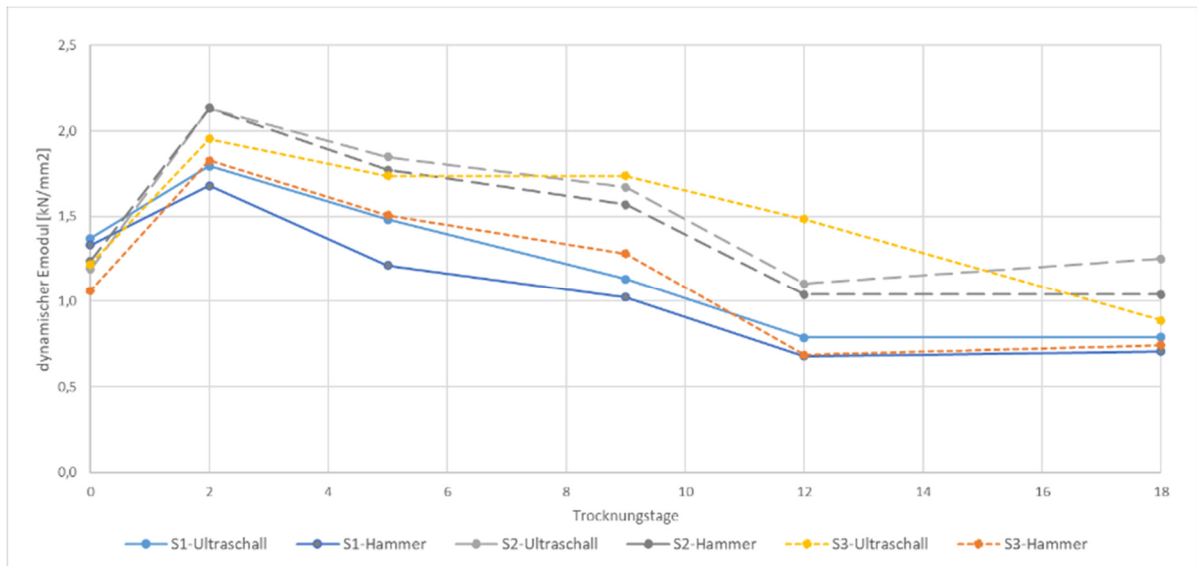


Abbildung 72: Zeitliche Entwicklung der dynamischen E-Moduln aus Ultraschalllaufzeitmessung und Hammer-Schlag-Verfahren

Der Vergleich der Messverfahren Ultraschalllaufzeit und Hammer-Schlag-Verfahren zeigt zum einen einen prinzipiell vergleichbaren Verlauf der ermittelten E-Moduln aus beiden Messverfahren über die Trocknungszeit. Noch nicht erklärlich ist der sprunghafte Anstieg am 2. Trocknungstag. Danach nehmen die Messwerte bei beiden Messverfahren stetig ab.

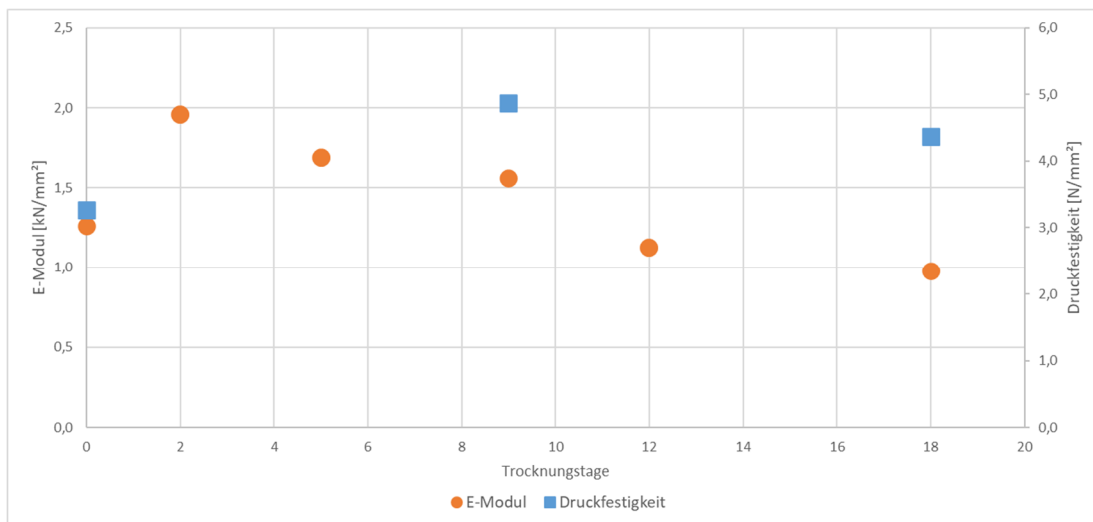


Abbildung 73: Zeitliche Entwicklung des mittleren dynamischen E-Moduln (Ultraschalllaufzeitmessung) und der mittleren Steindruckfestigkeit

Aus dem Verlauf, der alle 9 Tage gemessenen Steindruckfestigkeiten, lässt eine stetige Entwicklung (zunehmende Druckfestigkeiten) nicht ableiten. Hinzu kommt die hier nicht dargestellte erhebliche Streubreite der Messwerte der Steindruckfestigkeit $\pm 0,5-1,0 \text{ N/mm}^2$, während diese bei den Ultraschalllaufzeitmessungen im Mittel bei $\leq 0,2 \text{ kN/mm}^2$ lagen.

Die Untersuchungen mit dem Rückprallhammer erfolgten sowohl an 2 DF-Steinen und an 4 DF-Steinen. Hierbei zeigte sich, dass aufgrund von Randeffekten die Methode an Steinformaten ≥ 4 DF angewendet werden sollten. Hinzu kommt, dass bei Versuchsreihen auf eine ausreichende Anzahl an Lehmsteinen geachtet werden muss, da das Verfahren bei Lehmsteinen nur als quasi-zerstörungsfrei betrachtet werden kann. Durch den Impuls des Rückprallhammers können Mikrorisse in die sich noch verfestigende Gefügematrix eingebracht werden. Diese wirken sich bei wiederholenden Messungen am selben Stein negativ aus. Ähnlich wie bei den voran beschriebenen zerstörungsfreien Methoden ist bei der Rückprallhammer-Methode über den Trocknungsverlauf ein stetiger Anstieg festzustellen, während sich dies bei der Steindruckfestigkeit nicht widerspiegelt.

Zusammenfassend kann für die untersuchten zerstörungsfreien Messmethoden festgestellt werden, dass zunächst qualitativ eine Korrelation zum Trocknungsverlauf der Lehmsteine darstellbar ist. Diese zeigt sich sensibler als die Korrelation zwischen Trocknungsverlauf und Steindruckfestigkeit. Das Resonanzverfahren ist ungeeignet für die Anwendung an formgepressten Lehmsteinen. Es ist die Aufgabe von umfangreicheren Versuchsreihen diese zu quantifizieren und im besten Fall eine lineare Korrelation abzuleiten und für den Einsatz in der laufenden Produktion zu kalibrieren.

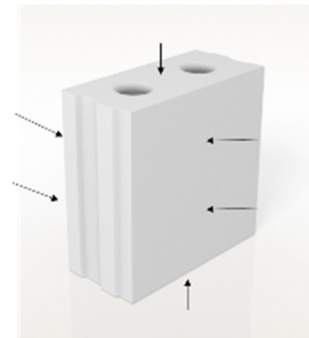


Abbildung 74: Messpunkte am Stein, Rückprallhammer

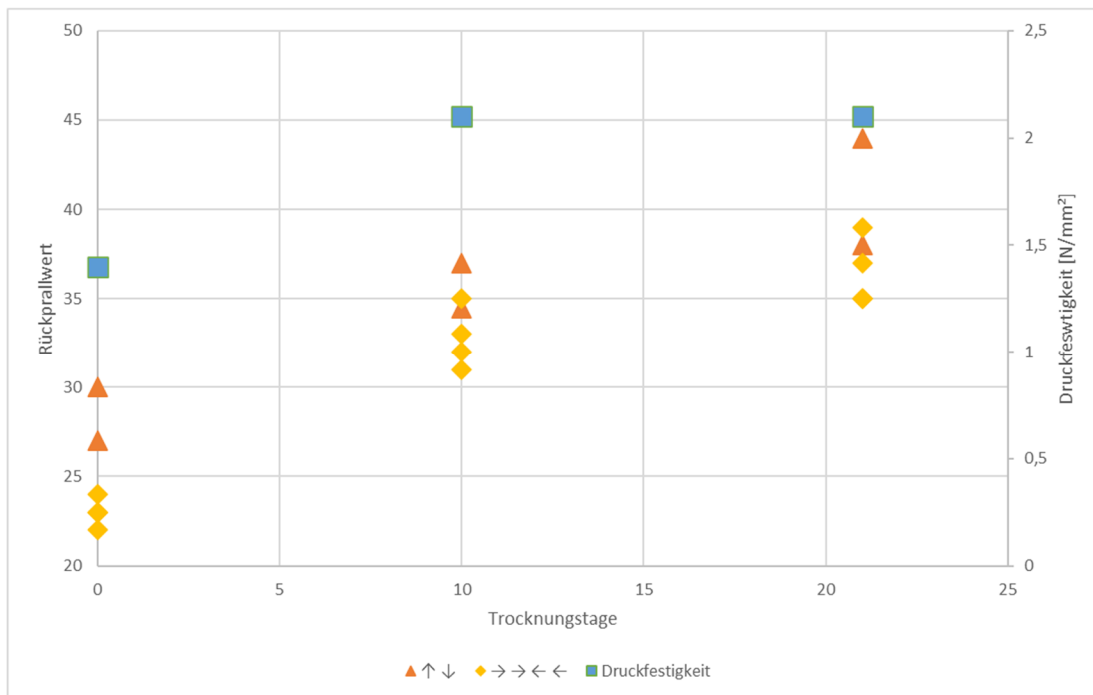


Abbildung 75: Zeitliche Entwicklung der Rückprallhammer-Werte und der Steindruckfestigkeit

V 2 Produktion

V 2.1 Einflüsse in der Materialaufbereitung

Die im Projekt hergestellten Lehmsteine wurde alleinig aus den Lehmen aus dem Tagebau der Firma Kimm hergestellt. Die verwendeten Lehme wurden mit Baggern und Mulden gewonnen. In der Aufbereitung werden die Lehme bis zu dreimal gesiebt und dazwischen immer wieder in Mieten gelagert.

Die Homogenisierung erfolgte mittels Radlader durch mehrmaliges Umschichten bei der Trocknung sowie im Zuge der Siebungen. Erfolgte die Aufbereitung zu Projektbeginn im Wesentlichen noch durch einen Siebprozess, wurde im Projektverlauf mit zunehmende Erkenntnisgewinnen die Aufbereitungsmethode immer weiter optimiert und verfeinert. Eine unzureichende Aufbereitung hat direkten Einfluss auf die Qualität des Endproduktes. Die wesentlichen Erkenntnisse sind in Tabelle 17 zusammengefasst.

Tabelle 17: Aufbereitung von Lehm – Einflussfaktoren und Steuerungsmöglichkeiten

Prozess-schritte	Kritische Einflussfaktoren	Mögliche Gefahr/ Negative Auswirkungen	Steuerungsmöglichkeiten
Abbaggern der Lehm-schicht	Witterung	Materialfeuchte wird zu hoch, lange Trocknungszeit	Gewinnung aus gewachsenem Bodenschichten nur bei trockenem Wetter mgl., weil sonst Materialfeuchte zu hoch wird
	Tonbänder	Tonlinsen im Lehmstein	Nicht geeignet, müssen separiert werden
	Schichten mit schwarzen Einschlüssen/ Organik	Schimmelbildung	Lehm nicht geeignet
	Geringe Schichtstärken	Verunreinigung durch angrenzende Schichten	Min 1m Schichtstärke erforderlich
	Zu kleines Vorkommen	Materialmenge nicht ausreichend für industrielle Fertigung.	min. 1000 to Rohlehm in gleichmäßiger Qualität erforderlich für Aufbereitung für industrielle Fertigung
Zwischen-lagerung von Rohlehm in Mieten	Lagerungszeit und Dichte der Oberflächen	Auswaschung von Feinstbestandteilen wie Schluff und Ton Reduzierung der Bindigkeit	Oberfläche muss bei längerer Lagerung gut verdichtet werden, gegebenenfalls Abdecken
Sieben	Hohe Materialfeuchte	Verstopfung der Siebe	Siebmaschengröße ist auf Materialfeuchte abzustimmen.

Fortsetzung Tabelle 17

Prozess-schritte	Kritische Einflussfaktoren	Mögliche Gefahr/ Negative Auswirkungen	Steuerungsmöglichkeiten
Luft-trocknung	Schichtdicke	Halde zu hoch, Trocknung erfolgt nur in den oberen 10 cm	Zur Trocknung Lehm in Schichtdicken von 30-50 cm ausbreiten und mehrmals wenden
	Hohe Temperaturen	Übertrocknung, Ungleichmäßiges Trocknen	Lehm nur kurz in der Sonne trocknen, besser im Schatten. Nach Trocknung sofort wieder in einer Halde aufschichten um Restfeuchte zu halten.
	Hohe Luftfeuchtigkeit, niedrige Temperaturen	Keine Trocknung möglich.	Möglichst den Lehm in Hallen trocken lagern, Nutzung von Abwärme aus Produktion
Technische Trocknung	Verweildauer im Trockner und Heiztemperatur	Übertrocknung, Kugelbildung	Verweildauer abstimmen auf Materialfeuchte und Zielfeuchte
Lagerung in Halden	Umgebungsfeuchte	Entmischungen an der Oberfläche, Oberflächenfeuchte abweichend von Materialfeuchte	Lagerung witterungsgeschützt unter Dach. Bei hohen Temperaturen, Oberfläche nach Möglichkeit feucht halten.

V 2.2 Einflüsse im Formgebungsprozess

Die formgepressten Lehmsteine werden mittels hydraulischer Kalksandsteinpressen gefertigt. Das Kalksandsteinwerk der Firma Kimm verfügt über drei hydraulische Pressen auf der normalweise Kalksandsteine bzw. Lehmsteine in den Formaten von NF bis 16DF gefertigt werden. Auf zwei Pressen ist auch die Fertigung von Planelementen möglich. Für die Fertigung der Lehmsteine wurden zwei Produktionsvarianten erprobt.

Variante 1 (Geschlossener Produktionskreislauf)

Bei der KS-Anlage handelt sich um einen geschlossenen Produktionskreislauf siehe *Abbildung 76*. Bei der Lehmsteinproduktion wird der Lehm in der Sandhalle in einem Tiefensilo in die Anlage aufgegeben. Anschließend durchläuft er eine nachgeordnete Siebmaschine, wo er nochmal auf die richtige Größtkorn mit einem Harfensieb auf **Lehm fein** abgeseibt wird. Danach geht es weiter zu der Sandsiloreihe: Mittels verschiedener Förderbänder/Reversierbänder wird der Lehm zu einem leeren Sandsilo gefördert, wo er kurz zwischengelagert wird. Über eine Chargierwaage wird das notwendige Material abgerufen und mit einem Aufzugkübel hoch zum Mischer gefördert. Bei dem Mischer handelt es sich um einen Eirich-Intensivmischer. In diesem wird der Lehm ca. 3 Minuten aufgemischt und nochmal homogenisiert. Auch besteht hier die Möglichkeit nochmal Wasser dem Gemisch zuzufügen. Über den Austragsteller geht es weiter mittels Förderbänder/Reversierbänder zum entsprechenden Reaktor, der die Presse mit Material versorgt. Hier verbleibt normalerweise das Kalksandstein- Gemisch für mehrere Stunden bis es der Presse zugeführt wird. Bei der

Lehmsteinproduktion durchläuft der Lehm nur kurz den Reaktor. Je nach Füllgrad beträgt die Fallhöhe in diesem Schritt bis zu 10 m. Der Austrag aus dem Reaktor erfolgt über die Reaktorzunge. In einem nachgeschalteten Doppelwellenmischer wird der Produktionslehm nochmal kurz durchmischt. Der Lehm wird dann weiter transportiert über das Pressenband zum Fülltrichter kurz vor der Presse.

Der Lehm wird in den Pressenbereich über eine Rüttelrinne in den Füllkasten gefüllt. Dieser fährt zweimal über den Formkasten um die Steinformen zu befüllen. Mit der ersten Überfahrt öffnet sich der Formkasten nach unten und das Material wird nach unten gesogen. Anschließend wird der Lehm für ca. 15 Sekunden zu Lehmsteinen verdichtet. Fehlerhafte Lehmsteine werden nach dem Pressen direkt aussortiert, gehäckselt und über ein Streugutsilo wieder dem Produktionslehm mit beigemischt, dies erfolgt unterhalb von dem Mischer.

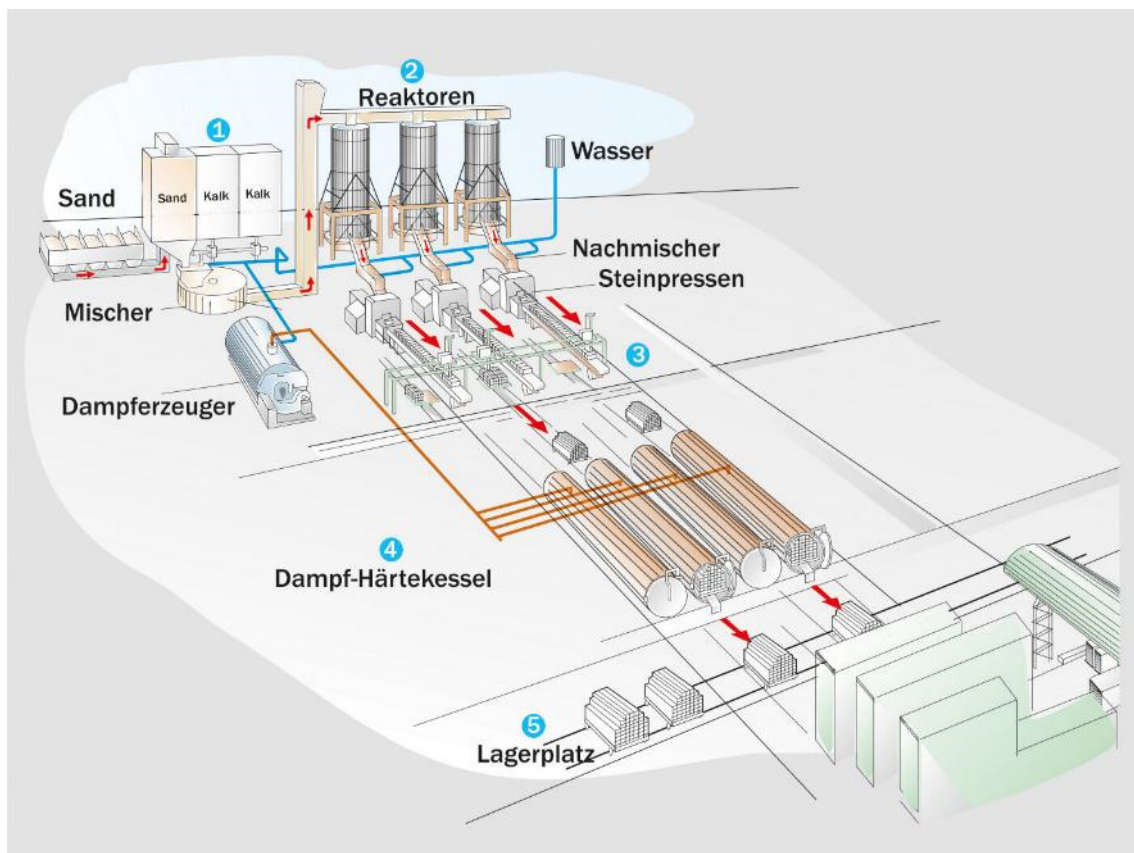


Abbildung 76: Prinzipskizze Kalksandsteinwerk (Quelle: Bundesverband Kalksandsteinindustrie)

Variante 2 (Externe Lehmzuführung)

Für die Herstellung der Lehmsteine wurde in dem Projekt noch eine weitere Fördermöglichkeit geschaffen. Über einen im Außenbereich angeordnete Aufgabebunker wird der Lehm mittels Förderbänder direkt in die Anlage gefördert. Das Förderband wurde so angeordnet, dass das Material auf das Förderband vor dem Doppelwellenmischer in die Anlage übergeben wird. Der Pressvorgang erfolgt analog zu der vorgenannten Variante. Da das Material bei dieser Produktionsweise nicht im Kreis geführt wird, müssen Fehlhübe gesondert aussortiert

und über ein Förderband in einen Container überführt werden. Aus den Steinen wird dann im Zuge der Aufbereitung wieder Produktionslehm.

Beide Verfahren haben ihre Vor- und Nachteile, die nachfolgend tabellarisch kurz erläutert werden

Tabelle 18: Varianten zur Lehmsteinproduktion auf bestehender KS-Anlage

Variante 1	
Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Witterungsunabhängig: Lehm wird in überdachter Halle aufgegeben • Lehm wird nochmals gesiebt auf Lehm fein, daher auch möglich Lehm mittel zuzugeben • Siloanlage zur gezielten Einstellung der Mischung. Zudosierung von Sanden oder anderen Gesteinen wie KS-Bruch mgl. • Mischtechnik: Nochmalige Homogenisierung mgl., auch Nachsteuerung der Feuchtigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Keine parallele Produktion mit Kalksandsteinen mgl. • Kein einfacher Produktionswechsel zwischen Lehmsteinen und Kalksandsteinen mgl, Anlage muss vor und nach der Lehmsteinproduktion komplett leer gefahren werden und gereinigt. • hohe Fallhöhe durch den Reaktor, Gefahr von Entmischung • Häcksler schafft nicht ausreichend die Lehmsteine zu zerkleinern, zu große Materialbrocken dann im Produktionslehm, was zu erneuten Fehlhüben führen kann
Variante 2	
Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Produktion von Lehmsteinen auch während laufender KS- Produktion mgl. • Förderwege ohne Fallhöhe • Geringere Stillstandzeiten weil Reinigung von Reaktor und Sandsilo entfällt • Produktion aktuell nur bei guter Witterung mgl., da Seitenaufgabebunker nicht eingehaust ist 	<ul style="list-style-type: none"> • Kein integrierte Sieb- und Mischtechnik in der Produktion • Produktionslehm muss fertig aufbereitet sein. • Nachjustierung Feuchte nicht mgl.

Bei den verschiedenen Produktionen kam es unabhängig von der gewählten Variante immer wieder zu Entmischungen, die als Kiesnester im Stein erkennbar sind (s. *Abbildung 9*).

Zu erkennen war eine Systematik: Die pressenabgewandte Seite der Steine wies meist eine gröbere Struktur als die pressenzugewandte Seite auf. Identifiziert werden konnte, dass dies maßgeblich mit dem Befüllprozess des Formkastens zusammenhing. Der Füllwagen wird über eine Rüttelrinne aus dem Fülltrichter befüllt. Durch die Rüttelung kam es zu einer Entmischung des Lehmgemisches, so dass zuerst die groben und dann die feinen Bestandteile in den Füllwagen fielen. Durch den Einbau von Gummilappen als Sperren auf der Rüttelrinne konnte dieser Effekt reduziert werden. Als weitere Effekte wurden die Materialfeuchte und die Korngrößenverteilung identifiziert. Wies der Produktionslehm eine zu geringe Feuchtigkeit von unter 6 % auf, wurden ebenfalls verstärkt Entmischungen beobachtet.

Im Laufe des Projektes wurden immer wieder Anpassungen an der Materialfeuchte und der Korngrößenverteilung vorgenommen. Wurde zu Beginn noch mit einer möglichst groben Körnung gearbeitet, wurde diese im Laufe des Projektes immer weiter reduziert. Auch wurde festgestellt, dass durch eine Erhöhung des Feinanteils die Oberflächenstruktur der fertig gepressten Lehmsteine deutlich verbessert werden konnte und Entmischungen weniger auftraten. Auch reagierte die Mischung weniger sensibel auf Feuchteschwankungen in der Produktion, da das Feinstkorn, durch die Erhöhung der inneren Oberfläche die Feuchtigkeit besser in der Lehmmatrix binden kann.

Als weitere Fehlstellen wurden Horizontalrisse, Kantenabbrüche, Nasen an den Kanten festgestellt.

Tabelle 19: Mögliche Schadensbilder an Lehmsteinen und Ursachen

Schadensbilder	Ursachen
Kiesige Oberflächenstruktur, abbröselnde Kanten	Sieblinie zu grobkörnig, zu geringer Feinkornanteil im Produktionslehm,
Einseitige Kiesnester	<ul style="list-style-type: none"> Entmischung beim Befüllprozess des Formkastens Mischung zu trocken
Nasen an den Steinkanten nach dem Pressen	Produktionslehm zu feucht
Steinhöhe zu hoch	Presse kann nicht richtig nachsteuern, möglicherweise Klumpen im Produktionslehm
Steinhöhe zu niedrig	Lehmmenge im Füllkasten nicht ausreichend
Horizontalrisse im Stein	Mehrere Ursachen möglich: <ul style="list-style-type: none"> Abheber beim Pressen – Mischung war zu feucht Stein wächst nach dem Pressen – Bindekraft zu gering um dem Entgegenzuhalten
Netzartige Risse	<ul style="list-style-type: none"> Erhöhtes Schwinden, Korngerüst nicht stabil genug Trocknungsschwindrisse: Trocknung zu schnell bzw. zu hohe Ausgangsfeuchte
Kantenabplatzungen	<ul style="list-style-type: none"> Zu wenig Feinanteil in der Mischung Zu geringe Bindekraft

Visuell nicht erkennbar sind Fehler, die aus einem zu niedrigen Pressdruck resultieren. Da der Pressdruck einen signifikanten Einfluss auf die Festigkeit hat, wurde bei der parallelen Produktion von Lehmsteinen auf zwei verschiedenen Pressen mit unterschiedlichen Formatgrößen sowie in Versuchsreihen an der Laborpresse erkannt. Optisch sahen die Steine vergleichbar aus, die äußeren Maße entsprachen den Zielwerten, jedoch wiesen die Steine unterschiedliche Rohdichten auf und auch unterschiedliche Festigkeiten.

Erkannt wurde auch ein Zusammenhang zwischen der Schlankheit der Steine und der Druckfestigkeit. Je gedrungener die Form war, umso höher waren die gemessenen Festigkeiten am Endprodukt. Offensichtlich kommt es bei dem Pressvorgang zu einem nicht unerheblichen

Reibungsverlust über die Formhöhe, und zwar umso größer das Verhältnis Oberfläche zu Volumen des Lehmsteines ist. Weitere Forschungen sind in diesem Bereich notwendig.

V 2.3 Trocknung

Die Trocknung der Rohlehme auf die richtige Produktionsfeuchte sowie die Trocknung der Lehmsteine nach dem Formgebungsprozess stellt eine der größeren Herausforderungen bei der Lehmsteinproduktion dar.

Lehmtrocknung

Je nach Jahreszeit und Umgebungsbedingungen weist der Rohlehm Feuchtigkeiten zwischen 10 und 15 M.-% auf. Wichtig ist den Lehm bei trockener Witterung zu gewinnen, da aufgelockerte Lehme noch höhere Feuchtigkeitsmengen aufnehmen können. Bei länger trockenen Umgebungsbedingungen kann der Lehm in einer Schichtdicke von 30-50 cm flächig ausgebreitet werden, und dieser trocknet innerhalb weniger Tage/Wochen je nach Umgebungstemperatur. Da für die Trocknung sehr große Flächen benötigt werden und der Lehm während der Trocknung auch mehrmals gewendet werden muss, sind diese Prozessschritte für eine kontinuierliche witterungsunabhängige Lehmsteinproduktion zu zeitintensiv.

In dem Projekt wurden daher auch die maschinelle Trocknung mittels einer Trommeltrockners untersucht. Bei dem Verfahren durchläuft das Material eine rotierende Röhre in der das Material in mehreren „Materialvorhängen“ nach unten fällt dabei mit wärmer Luft durchströmt wird. Wie das Material durch die Röhre transportiert wird (Anzahl Materialvorhänge und Verweildauer) kann gesteuert werden durch verschiedene Hub- und Förderschaukeln in der Röhre.

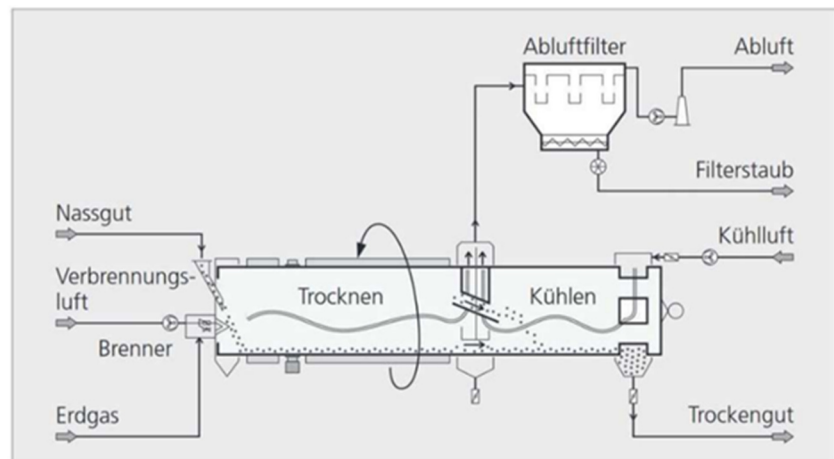


Abbildung 77: Prinzipskizze Trommeltrockner (Quelle: Fa. Allgaier)

In einem Technikumsversuch mit der Firma Allgaier aus Usingen wurde die prinzipielle Eignung dieses Verfahren für den Lehm getestet. Die Herausforderung bei den Versuchen war, dass es sich nur um eine Teiltrocknung handelte, d.h. der Lehm wurde von ca. 10-12 M.-% auf 5-8 M.-% heruntergetrocknet. Bei der Trocknung durfte außerdem der Lehm nicht überhitzt werden, weil sonst die Bindekraft der Tone irreversibel geschädigt wird. Die max. Materialtemperatur sollte daher 60 °C nicht übersteigen.

Es wurden mehrere Versuchsreihen mit auf 24 mm gesiebten Rohlehm durchgeföhrt. Zusammenfassend konnte es geschafft werden, den Lehm in einer Verweilzeit von 2-3 min

auf die Zielfeuchtigkeit zu trocknen. Trotz einer Heißgastemperatur von ca. 300 °C lag die Trockenguttemperatur nur bei 50 °C. Aus dem getrockneten Lehm wurden anschließend im Labor Probewürfel gepresst, zur Überprüfung, ob noch eine ausreichende Bindigkeit im Lehm gegeben ist. Es wurden keine negativen Veränderungen am Lehm festgestellt, so dass dieses Verfahren prinzipiell für die Trocknung von Lehmen geeignet ist. Für die Produktion ist die Anpassung der Trocknungstrommel auf die zu erwartenden Materialmenge und – feuchte entsprechend anzupassen.



Abbildung 78: Lehm-trocknungsversuche im Technikum Fa. Allgaier

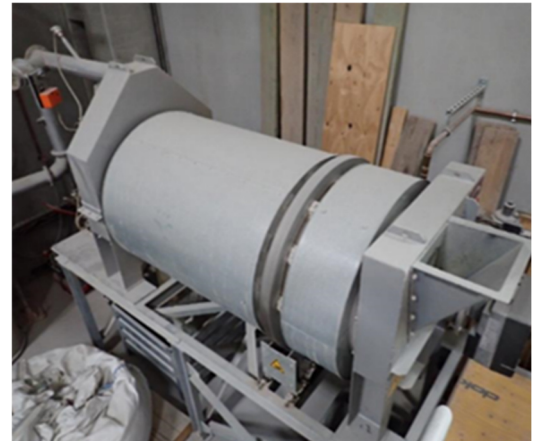


Abbildung 79: Labor-Trommel-trockner an der MFPA

Trocknungsversuche an einem Trommel-trockner im Technikumsformat an der MFPA bestätigten die voran beschriebenen Erkenntnisse. Dabei wurden die Trocknungsverläufe in Abhängigkeit von der Trommeldrehzahl und der Feuchte des Aufgabegutes sowie die Massenströme und Aufheizgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Trommeldrehzahl und Masse des Aufgabegutes ermittelt.

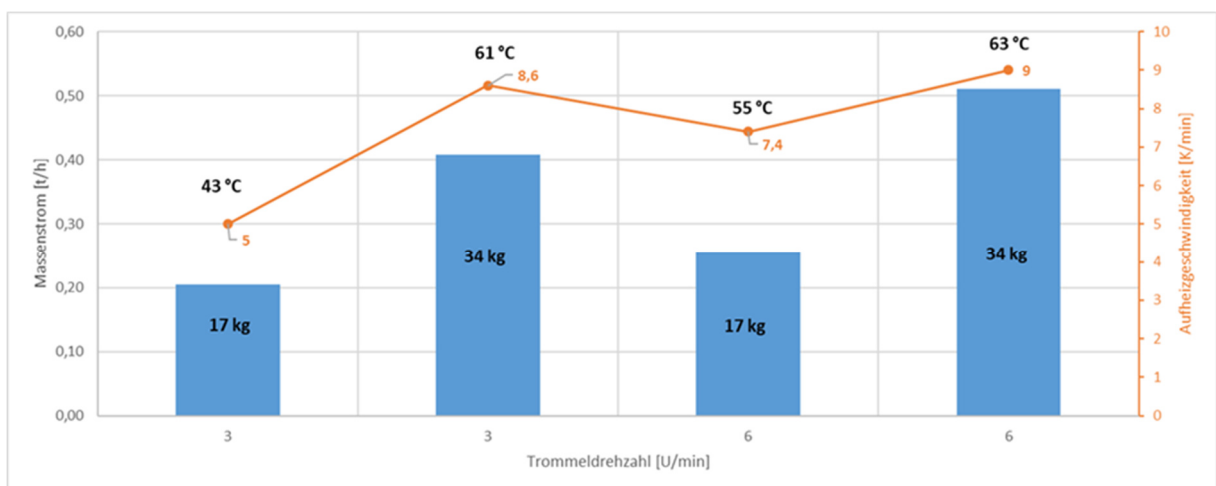


Abbildung 80: Trocknungsversuche MFPA – Massenströme und Aufheizgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Trommeldrehzahl und der Masse des Aufgabegutes

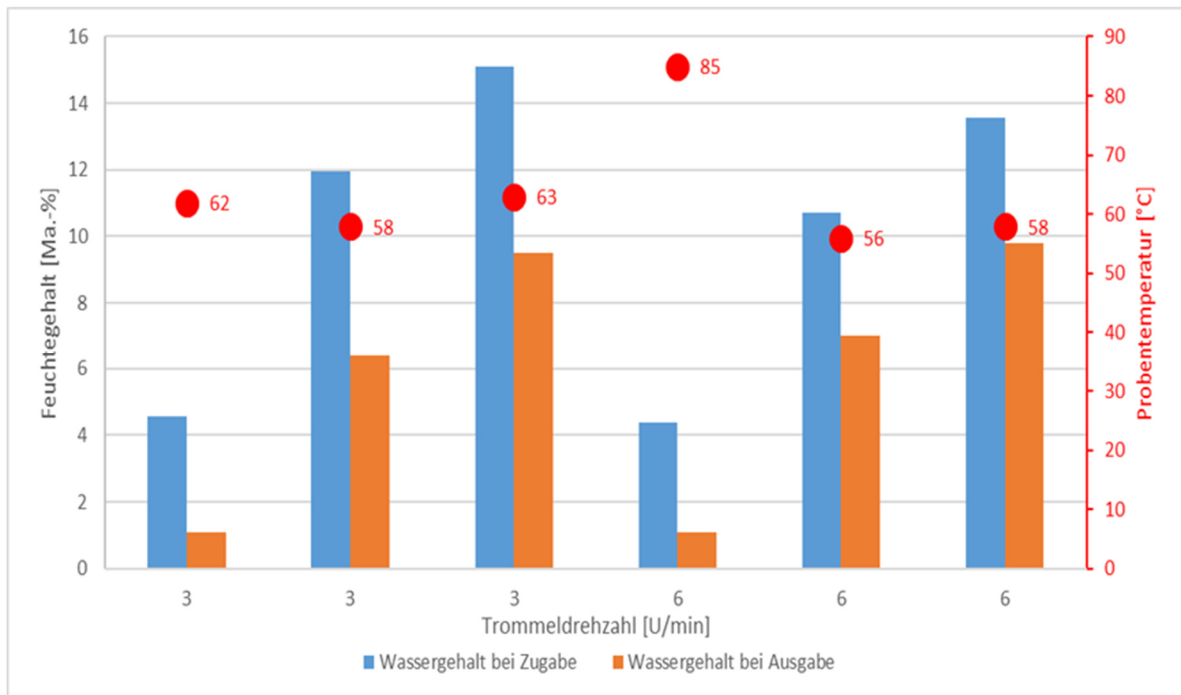


Abbildung 81: Trocknungsversuche MFPA – Trocknungsverläufe in Abhängigkeit von der Trommeldrehzahl und der Feuchte des Aufgabegutes

Trocknung Lehmsteine

Bei den formgepressten Lehmsteinen handelte es sich um Lehmvollsteine. Die Trocknung dieser erfolgte in der Produktion vorwiegend durch Abwärme aus der Kalksandsteinproduktion. Je nach Formatgröße dauert die Trocknung sehr lange. Nach dem Pressvorgang verbleiben die Lehmsteine bisher mehrere Tage bzw. Wochen in den offenen Autoklaven, bis sie eine ausreichende Festigkeit aufweisen und eine Restfeuchte von unter 4 M.-% aufweisen. In den Autoklaven beträgt die relative Luftfeuchtigkeit 70-80% und die Temperatur 25-35 °C, je nach parallellaufender KS-Produktion.



Abbildung 82: Vergleich Trocknung Lehmstein 10DF mit und ohne Ventilator

Die restliche Feuchtigkeit muss dann in der Lagerung bzw. auf der Baustelle nach Errichtung der Wände entweichen. Die Endfeuchtigkeit in den Steinen stellt sich meist erst in der Nutzung nach mehreren Monaten ein, diese liegt dann bei unter 2 M.-%. Die Endfestigkeit liegt daher meist auch deutlich höher als die ausgewiesene Festigkeit zum Zeitpunkt der Auslieferung.

In dem Projekt wurden daher verschieden Möglichkeiten erörtert und getestet wie der Trocknungsprozess verbessert werden kann. Eine wesentliche Herausforderung ist, das anlagenbedingt die Steine nach dem Pressvorgang in mehreren Lagen übereinandergestapelt werden. Die Steine stehen auf den Härtewagen in Reihen, die einen Abstand von ca. 2 cm haben, d.h. die Trocknung der Lehmsteine erfolgt in der Regel nur über 2 Seitenflächen, im Randbereich, bzw. in der obersten Lage, stehen 3 bzw. 4 Seiten zur Trocknung zur Verfügung.



Abbildung 83: Stapelung Halbsteine - hier 2DF - in Lagen und Reihen



Abbildung 84: Stapelung Vollsteine in 3 Lagen - hier 10 DF – Versuch Variation Stapelbild - Spalt auch in Querrichtung

Variiert wurden daher die Stapelbilder auf den Härtewagen nach dem Pressvorgang (*Abbildung 84*). Auch wurde untersucht, wie die Trocknung in den einzelnen Lagen aussieht. Bei den Autoklaven handelt es sich um 27 m lange Röhren mit einem Durchmesser von 2,2 m. Um den Abtransport der feuchten Luft zu verbessern wurde, auch der Einsatz von Ventilatoren an einem Röhrende untersucht (s. *Abbildung 82*). Es wurde eine bessere Trocknung in den ersten 2-3 Wochen festgestellt, danach war kein Unterschied mehr erkennbar (*Abbildung 85**Abbildung 86*). Bei längerer Trocknung bestand die Gefahr einer Übertrocknung, erkennbar an verstärktem Auftreten von Haarrissen an den Oberflächen und einem Festigkeitsabfall.

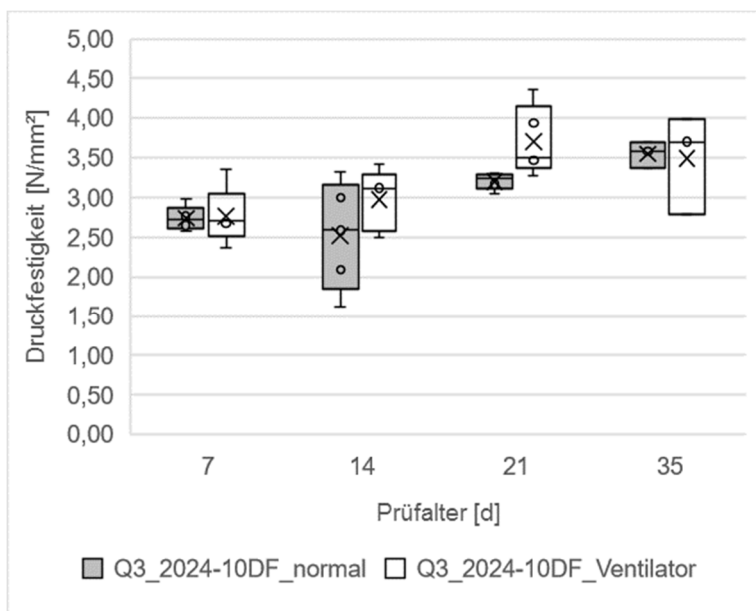


Abbildung 85: Druckfestigkeit bei Trocknung Lehmsteine mit und ohne Ventilator

Die Trocknungsdauer der Lehmsteine stellte sich in dem Projekt als entscheidender Faktor in der Produktion heraus. Die Lehmsteine durchlaufen nach dem Pressvorgang die gesamte Fertigungsstraße für Kalksandsteine. Nach der Presse werden die Steine auf Härtewagen gestapelt, fahren durch die Autoklaven um anschließend in die Paketierung transportiert zu werden. Der Umlauf ist ausgerichtet auf die Produktionsdauer von Kalksandsteinen,

die nach dem Härteprozess in der Regel 1- 3 Tage im Autoklaven verweilen. Diese Zeit ist für die Trocknung der Lehmstein zu kurz. Aktuell werden die Lehmsteine noch im Chargenbetrieb hergestellt, für die Trocknung sind dann die entsprechenden Autoklaven über mehrere Wochen mit den Lehmsteinen belegt und stehen nicht für die Kalksandsteinproduktion zur Verfügung. Für eine kontinuierliche Produktion ist daher ein größerer Zwischenpuffer notwendig.

Eine weitere Einschränkung ist das Stapelbild auf den Härtewagen. Die Steine stehen in mehreren Lagen aufeinander, dies verlangsamt zusätzlich die Trocknung. Eine Vereinzelung der Stein wäre ideal, ist jedoch in der aktuellen Form nicht realisierbar. Es wurden deshalb mit Industriepartnern Überlegungen angestellt, wie eine industrielle Fertigung von Lehmsteinen zu optimieren wäre. Um den Trocknungsprozess von Lehmsteinen steuerbar zu machen, wird die Integrierung einer Trocknungskammer in die Produktionskette als unabdingbar angesehen. Diese Kammer ist außerhalb der aktuellen Fertigungsstraße anzuordnen. Idealerweise werden die Steine für die Trocknung vereinzelt und auf Lochblechen

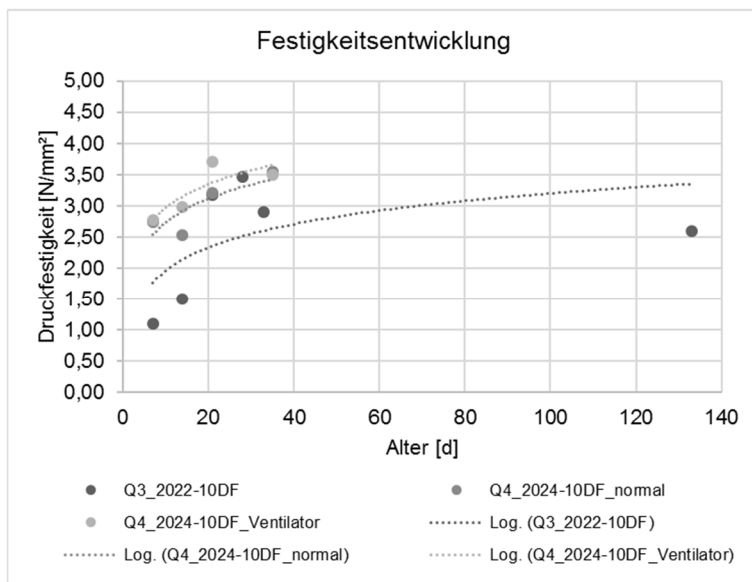


Abbildung 86: Festigkeitsentwicklung Lehmsteine 10DF unterschiedlicher Produktionschargen

steuerbar zu machen, wird die Integrierung einer Trocknungskammer in die Produktionskette als unabdingbar angesehen. Diese Kammer ist außerhalb der aktuellen Fertigungsstraße anzuordnen. Idealerweise werden die Steine für die Trocknung vereinzelt und auf Lochblechen

in Hochregalen gelagert und nach erfolgter Trocknung wieder in Pakete zusammengefasst. Wie dies technisch umgesetzt werden kann wird derzeit geprüft.

Mikrowellentrocknung

Im Rahmen eines parallel an der MFPA laufenden Forschungsvorhabens - Multisensorisches Prozesslabor zur Etablierung der Hochtemperatur-Mikrowellentechnik in Produktionsprozessen – wurden auch an einigen Lehmsteinen Trocknungsversuche mit diesem Verfahren durchgeführt. Beim Leistungsmikrowellenverfahren entsteht im Vergleich zu konventionellem Wärmeeintrag bspw. im Umluftöfen die Wärme direkt durch Einkopplung der Mikrowellenstrahlung im Objekt bzw. Produkt. Für ein Scale-Up und den Transfer der Mikrowellentechnologie in industrielle Prozesse steht der MFPA seit 2024 eine Leistungsmikrowellenanlage mit vier Solid-State Mikrowellenquellen mit 500 W für die Frequenz von 2,45 GHz und 1x1 kW für die Frequenz von 915 Mhz zur Verfügung. Eine Luftkonditionierung mit Temperaturen von ca. 20 bis 120 °C und Einstellung der Luftfeuchte von ca. 30 bis 98 % relative Feuchte ist möglich. Die Anlage ermöglicht die Evaluierung von Trocknungsprozessen von größeren Bauteilen beginnend bei Ziegel und Lehmprodukten bis hin zu Feuerfestmaterialien. Für eine Bewertung der Trocknungsprozesse und analytische Auswertung werden eine Waage, Infrarotkamarasysteme und verteil-messende faseroptische Temperatursensorik genutzt. Letztere Sensormesstechnik ist insbesondere geeignet, um im Inneren von Bauteilen mit einer hohen Ortsauflösung „Cold- und Hot-Spots“ zu erfassen.

Die prinzipielle Eignung konnte damit nachgewiesen werden. Jedoch befindet sich diese Technologie für den industriellen Einsatz noch im Forschungsstadium.



Abbildung 87: Leistungsmikrowellenanlage mit Luftkonditionierung und Sensorik an der MFPA

V 2.4 Paketierung und Lagerung

Die formgepressten und getrockneten bzw. teilgetrockneten Lehmsteine durchlaufen nach den Autoklaven die Paketierung. Dort werden die Lehmsteine entsprechend dem Stapelbild von den Härtewagen auf Europalatten umgehoben. Auf die oberste Lage wird ein Kantenschutz aufgelegt und die Paletten werden mit Bändern für den Transport umreif. Anschließend werden die Lehmsteinpakete in das Lager überführt. Aus logistischen Gründen stehen die fertig produzierten Lehmsteinpaletten bis zum Transport in der Regel im Freigelände oder unter einem Dach. Da die Lehmsteine der Anwendungsklasse II entsprechen und für den Einsatz im witterungsgeschützten Außenbereich vorgesehen sind, müssen sie während der Lagerung vor ungünstigen Witterungseinflüssen geschützt werden. In dem Projekt wurden deshalb verschiedenste Verpackungsvarianten für die Lehmsteine getestet und bezüglich ihrer Praktikabilität bewertet.

Besonderen Schutz bedarf es ins besonders bei der unteren und obersten Steinlage. Die Palettenunterlage muss möglichst eben sein und um ein Verkanten der Steine zu verhindern, bzw. ein Schrägstellen der Steinpakete auf der Palette. Bei kleineren Formaten besteht die Gefahr, dass die Steine nicht richtig auf den Brettern stehen und dazwischen kippen. Auf die Europalette wurde deshalb eine MDF-Platte montiert, auf der die Steine stehen. Als weitere Möglichkeit ist die Verwendung von Einlegehölzern zwischen den Brettern der EP-Palette. Weiterhin wurde festgestellt, dass auf die unterste zwingend eine Sperrschicht gegen aufsteigende Feucht anzuordnen ist. Stehen die Paletten auf feuchtem Untergrund, nehmen die Steine durch Diffusion Umgebungsfeuchte wieder auf.



Abbildung 88: Ungünstige Verpackung

Die Feuchteauf- und -abgabe der Steine war ein wesentlicher Aspekt bei den verschiedenen Versuchen. Da die großformatigen Steine z.T. nach der Trocknung noch im Kern eine Restfeuchte aufweisen, können sie nicht mit normalen Verpackungsfolien eingepackt werden. Festgestellt wurde, dass bei warmer Witterung und/oder Sonnenschein, diese Restfeuchte nach außen diffundiert, an der Folie kondensiert und sich an der Oberseite sammelt bzw. an den Seitenflächen nach unten abfließt. Dies kann dann zu einem Erweichen der obersten bzw. untersten Steinlage führen.

Es wurde deshalb in Zusammenarbeit mit verschiedenen Folienherstellern nach geeigneten Folien gesucht, die ausreichend diffusionsoffen sind, um ein weiteres Abtrocknen der Steine im Lager zu ermöglichen.

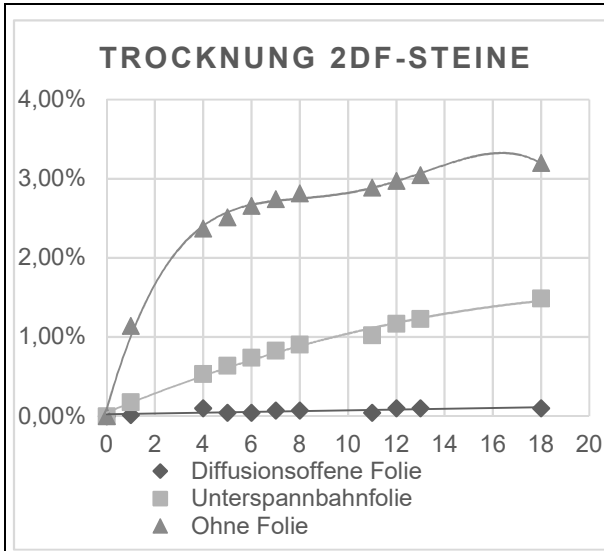


Abbildung 89: Trocknungsverlauf kleinformatige Steine

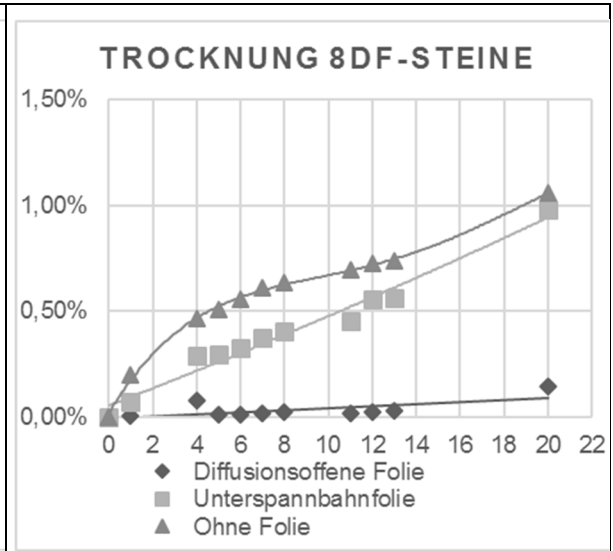


Abbildung 90: Trocknungsverlauf großformatige Steine



Abbildung 91: Trocknungsversuche Lehmsteine in Folie



Abbildung 92: Verpackung der Lehmsteine mit diffusionsoffenen Hauben

gabesystem zu etablieren.

Dünne diffusionsoffene Folien, die aus der Lebensmittelindustrie stammen, haben sich leider als nicht ausreichend diffusionsoffen erwiesen, die Durchlassraten waren zu gering (siehe *Abbildungen Abbildung 89 Abbildung 90*). Am geeignetsten haben sich Materialien herausgestellt, die normalerweise als Unterspannbahnen im Dach eingesetzt werden. Die Steine waren bei Regen gut geschützt und konnten bei trockener Witterung weiter abtrocknen.

Um keinen unnötigen Verpackungsmüll auf der Baustelle zu produzieren wurde im nächsten Schritt versucht aus den Materialien Hauben anfertigen zu lassen, die mehrmals verwendet werden können. Der Vorteil von Hauben ist, dass sie zur Anlieferungskontrolle heruntergenommen werden können und dass bei ungünstiger Witterung während des Bauens angefangene Paletten schnell wieder geschützt werden können. Da die Herstellung der Hauben sehr kostenintensiv ist und im Sinne der Ressourcenschonung, wird angestrebt eine Rück-

V 3 Qualitätskontrolle und Qualitätssicherung

In der DIN 18942-100 [28] sind in Tabelle 1 die Prüfungen für die Qualitätskontrolle der Lehmsteine beschrieben. Die Methoden bewerten nur das Endprodukt Lehmstein bezüglich seiner normativen Eigenschaften. Für die Produktion formgepresster Lehmsteine in gleichmäßiger Qualität ist ein Qualitätssicherungssystem, das die Prozesse von der Gewinnung über die Aufbereitung der Lehme bis zum fertigen Endprodukt beschreibt.

Da Lehm ein natürliches Produkt ist unterliegt es großen Schwankungen bezüglich der Zusammensetzung und der Eignung. Um diesen Baustoff besser zu verstehen bzw. sicherer handeln zu können, sind Qualitätskontrollen in den verschiedenen Prozessschritten unabdingbar. In den nachfolgenden Abbildungen ist dargestellt in welchen Produktionsschritten eine Qualitätssicherung nach aktuellem Stand sinnvoll erscheint.

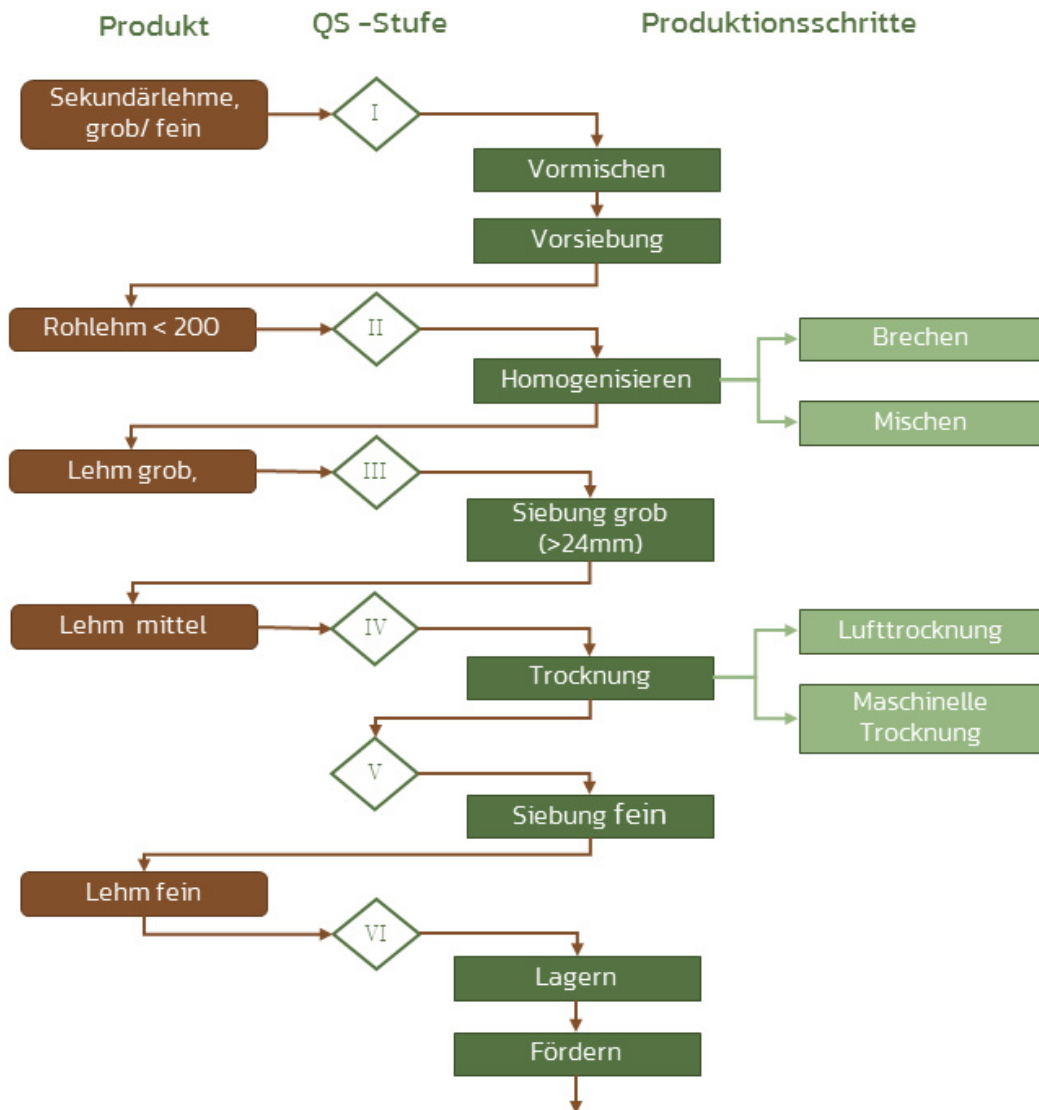


Abbildung 93: Qualitätssicherung Gewinnung und Aufbereitung

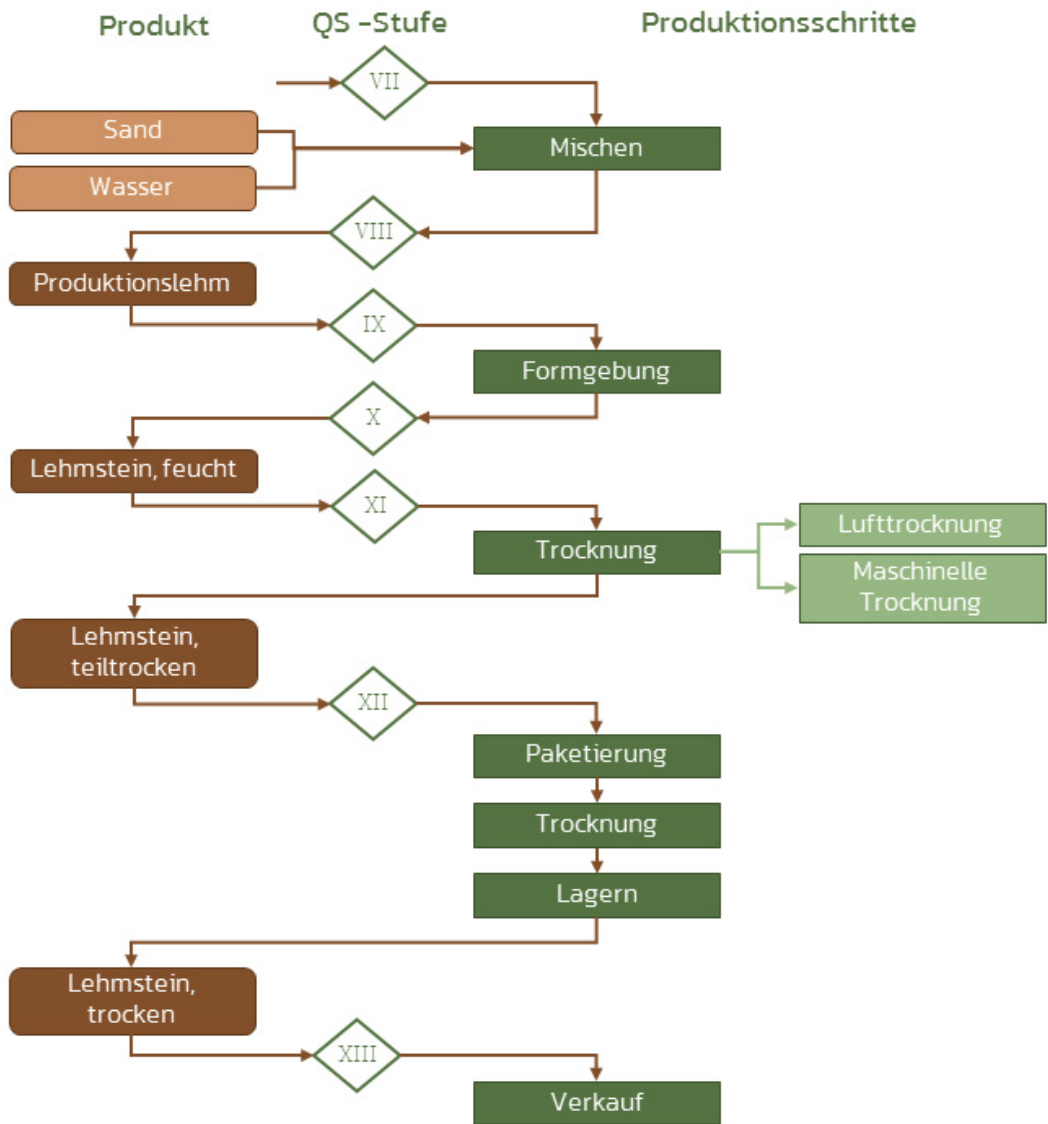


Abbildung 94: Qualitätssicherung Produktion

Welche Qualitätskontrollen in jeder QS-Stufe notwendig sind bzw. empfohlen werden ist in Tabelle 20 dargestellt. Die Prüfmethode sind in Kapt. IV 5, Tabelle 4 beschrieben.

Der Prüfumfang und die Häufigkeit in den verschiedenen Qualitätsstufen kann bisher noch nicht angegeben werden. Hiefür sind mehr Erfahrungswerte notwendig. Diese Erkenntnisse können erst in einer kontinuierlichen Produktion gewonnen werden. Ein Prüplan sollte fester Bestandteil in der Werksproduktionskontrolle für industriell hergestellte formgepresste tragenden (Plan-)Lehmsteine sein.

Tabelle 20: Prüfungen in den verschiedenen QS-Stufen

QS-Stufe	(Zwischen-) Produkt	Prüfmethode	Entscheidung abh. von Ergebnis
I	Sekundärlehm	P1, (P2)*	Lehm geeignet?
II	Rohlehm <200mm	P3	Welche Homogenisierungs-Methode ist anzuwenden? Beimengung Sand / Lößlehm erforderlich?
III	Lehm grob	P4 a); P5	Welche Siebmasche erforderlich?
IV	Lehm mittel	P4 a); P5	Welche Trocknungsmethode?
V		P4 a); P1	Welche Siebmasche für Siebung fein erforderlich? Wie ist die Bindigkeit?
VI	Lehm fein	P4 a) und b), P3	Beimengungen in Produktion nötig?
VII		P 4b), P6	Berieselung notwendig? Sichtbare Entmischungen?
VIII		P7	Dosierung Mischer korrekt?
IX	Produktionslehm	P4b), P5	Wie ist die Presse/Anlage einzustellen?
X		P7, P8	Richtiger Pressdruck für das Format? Höheneinstellung korrekt? Füllgrad Formkasten ausreichend?
XI	Lehmstein, feucht	P6, P4 b), P9-P15,	Fehlerhafte Steine, was muss aussortiert werden? (1. Aussortierung) Wie muss getrocknet werden?
XII	Lehmstein, teiltrocken	P4b), P9-P15	Trocknung und Festigkeit ausreichend für Paketierung? Rissbildung? Verformungen? (2. Aussortierung)
XIII	Lehmstein, trocken	P9-P12, P15, P16	Wie ist der Lehmstein normativ einzugruppieren: Druckfestigkeitsklasse, Rohdichteklasse, Anwendungsklasse?

*) wenn vorige Prüfung positiv

Zu definieren sind auch Zielgrößen mit den zugehörigen Toleranzen in den einzelnen Prozessschritten. Die zulässigen Abweichungen hängen hier maßgeblich von der zu verwendeten Maschinenteknik ab. Basierend auf den Erkenntnissen aus diesem Projekt sollten folgende Kenngrößen in einem Qualitätssicherungsplan neben den normativen Kenngrößen mitdefiniert werden.

Tabelle 21: Zielgrößen in der Produktion formgepresster Lehmsteine

Kenngröße	Produkt	Randparameter
Mindesttongehalt	Produktionslehm	Abh. von Tonmineralik
Korngrößenverteilung	Produktionslehm	Materialzusammensetzung
Wassergehalt	Produktionslehm	Materialzusammensetzung
Mindestpressdruck	Lehmstein, feucht	Formatgröße
Mindestrohddichte feucht	Lehmstein, feucht	Materialzusammensetzung
Grünstandfestigkeit	Lehmstein, feucht	Materialzusammensetzung

V 3.1 Weitergehende Prüfmethode für die QS

Im Rahmen von an der MFPA laufenden Forschungen zu Analyseverfahren zur automatisierten Qualitätssicherung von mineralischen Bauprodukten unter Verwendung von multispektraler Sensorik wurden an ausgewählten Lehmstein-Chargen die Eignung dieser Methode untersucht. Die hier verwendete Sensorik wird zur Ermittlung von Materialkennwerten verwendet. Im Falle der Lehmsteine waren dies die Maßhaltigkeit der Steingeometrie und die Oberflächengüte bzw. Textur der Lehmstein-Seitenflächen. Der Mehrwert des neuen Ansatzes liegt darin, dass die bei der laufenden Produktion am Transportband durch Mitarbeiter vorzunehmenden händischen Messungen (Vermessen der Steingeometrie mit Längenmessgeräten) und die subjektive Auswahl der Steinoberflächengüte bzw. -textur durch ein optisches Laborgerät ersetzt werden. Dazu wurden zunächst von den Lehmsteinen selbst erzeugte Bilddaten genutzt. Die Auswertung der bildanalytischen Eigenschaften erfolgt durch das Training von Klassifikatoren aus dem maschinellen Lernen. Hierbei konnte gezeigt werden, dass der SOLL-IST-Abgleich bzgl. der Steinmaße zielgenau und schnell detektiert werden kann. Die Bewertung der Oberfläche hinsichtlich „gut“ und „schlecht“ zeigte bei der Anwendung maschineller „Lernmethoden“ bereits gute Erkennungsraten.

V 4 Bauablauf

V 4.1 Hebeteknik

Formgepresste Lehmsteine weisen die gleichen geometrischen Abmessungen wie Kalksandsteine auf. Die Steine verfügen an den Stirnflächen über ein Nut- und Federsystem zum kraftschlüssigen Stoßen der Steine ohne Vermörtelung der Stoßfuge. An der Steinoberseite sind Dornlöcher angeordnet, die für das Anheben der Steine mit einem Versetzgerät benötigt werden. Da die Lehmsteine als Vollstein hergestellt werden ist ein Anheben maximal bis zur Formatgröße 6DF möglich. Größere Steine können nur mit Hebekran und Versetzzange angehoben werden. Ziel in dem Projekt war es, dass die Bauabläufe für die Vermauerung der Lehmsteine möglichst vergleichbar zu den bekannten Arbeitsabläufen für Kalksandsteinmauerwerk sind. Es sollte in dem Projekt daher untersucht werden, wie die Dornlöcher zu modifizieren sind, um die Steine sicher anheben zu können.

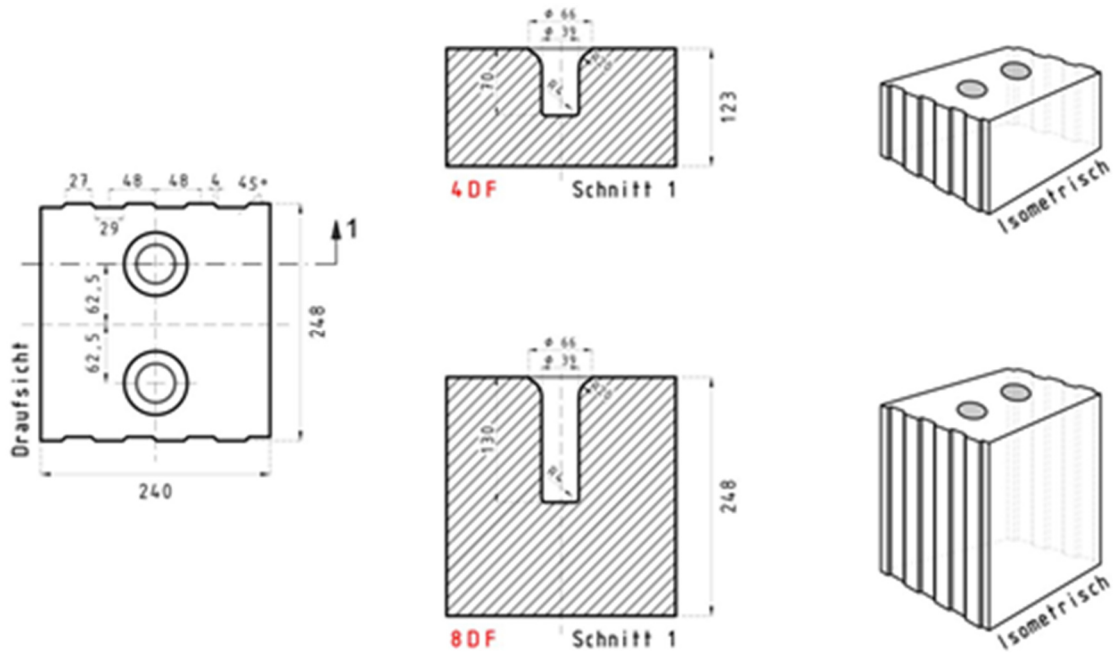


Abbildung 95: Technische Zeichnung formgepresste Plan-Lehmsteine mit Nut- und Feder-System und modifiziertem Dornloch, dargestellte Formate 4 und 8DF

Standardmäßig beträgt die Lochtiefe bei 248 mm hohen KS-Steine 75 mm und bei 123 mm hohen Steinen 45mm. Der Lochdurchmesser beträgt 38mm. Da die Lehmsteine ein deutlich poröseres Gefüge aufweisen und auch die Festigkeit im Vergleich zu KS-Steinen sehr niedrig ist, wurden die Dornlöcher vertieft.



Abbildung 96: Modifiziertes Formwerkzeug mit langen Dornen für Steinhöhe 248mm



Abbildung 97: Versetzzange: Modell Lissmac VSG 840 Vario-Steingreifer mit Vario-Wechselbacken B30 Porenbetonsteine

Beim Anheben der Steine werden die Steine an der Spitze der Greifwerkzeuge gehalten. In Gesprächen mit dem Hebewerkzeughersteller Lissmac wurden verschiedene Varianten diskutiert. Als Resultat wurden die Dorne auf 130 mm für die 248 mm hohen Lehmstein verlängert, so dass die Steine im Schwerpunkt angehoben werden können.

Die Greifzange wurde entsprechend modifiziert. Als ideales Greifwerkzeug haben sich die Backen für Porenbetonsteine herausgestellt. Die Greifwerkzeuge für Kalksandsteine sind nicht

geeignet, da sie nur im oberen Viertel den Stein anheben. Entsprechend mussten auch die Formwerkzeuge für die Kalksandsteinpresse modifiziert werden (*Abbildung 96*).

Von dem Projektpartner Lissmac wurden entsprechen Hebeversuche mit der modifizierten Zange (*Abbildung 97*) durchgeführt. Auch wurde getestet, ob es möglich ist mehrere Steine auf einmal anzuheben. Die Ergebnisse der Traglastversuche zeigten, dass ein Anheben von 1m Steinreihe möglich ist und die notwendige Reservelast eingehalten wird.

V 4.2 Mauerwerkstechnik

Die formgepressten Lehmsteine werden vorwiegend als Plan-Lehmsteine verwendet. Hierfür entwickelte der Projektpartner Maxit einen auf den formgepressten Lehmstein angepassten Lehmdünnbettmörtel (siehe *Kapt. IV 4*). Das Vermauern von großformatigen Mauerwerksteinen mit Hebetchnik und Dünnbettmörtel ist seit mehr als 30 Jahren status quo im Mauerwerksbau. Die Übertragbarkeit dieser wirtschaftlichen Arbeitsweise auf das Lehmsteinmauerwerk war ein Ziel in diesem Projekt.

In enger Kooperation mit der Ausbildungsstätte ASK konnte unter Praxisbedingungen das Arbeiten mit Mauerkran und Versetzzange auf der Lehrbaustelle mit Lehrlingen erprobt werden. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wurde eine Verarbeitungsrichtlinie [25] entwickelt, die als Leitfaden für ausführende Firmen zur Verfügung gestellt wird.

V 4.3 Dünnbettmörtel

Für die Applizierung der Lehmdünnbettmörtel stehen dem Anwender verschiedene Hilfsmittel zur Verfügung. In dem Forschungsprojekt wurde die Anwendbarkeit getestet. Die Auswahl der Gerätschaften ist abhängig von der Konsistenz des Lehmdünnbettmörtels. Für den Auftrag auf formgepresste Lehmsteine gehen Dünnbett-Mörtelschlitten für KS-Steine sowie Mörtelkellen. Systeme mit Mörtelrolle wie sie für Ziegelmauerwerk verwendet werden funktionieren nicht. Für diese Systeme werden Mörtel mit deutlich fließfähiger Konsistenz benötigt.



Abbildung 98: Auftrag des Lehmdünnbettmörtels mit einem Mörtelschlitten

V 4.4 Errichtung des Mauerwerks

Die Plan-Lehmsteine nach DIN 18945 weisen die gleichen Formatgrößen wie Kalksandsteine auf. Die Errichtung des Mauerwerks mit den großformatigen Plan-Lehmsteinen erfolgt im Läuferverband. Die Lagerfugen werden mit Lehmdünnbettmörtel ausgeführt und die Stoßfugen bleiben, soweit statisch nicht anders gefordert, unvermörtelt. Die Plan-Lehmsteine weisen an den Stirnseiten ein Nut- und Federsystem auf, das einen formschlüssigen Verbund der Steine ermöglicht. Für diese Bauweise wurde zu Projektende auch eine allgemeine

Bauartengenehmigung [26] durch das DIBt erteilt, so dass diese Bauweise jetzt auch Stand der Technik ist und über die normativen Vorgaben hinaus geht.

Wie in *Kapt. IV 6* erwähnt wurde während der Projektlaufzeit ein Musterhaus durch die Firma Kimm errichtet. Mit dem Projekt sollten verschiedene Fragestellungen untersucht werden:

- Welche Arbeitsvorbereitungen sind notwendig?
- Welche Gerätschaften werden benötigt?
- Wie ist die Verarbeitung bei kalter oder warmer Witterung?
- Wie können die Wände nach oben geführt werden, sind Trocknungszeiten zu beachten?
- Wie sind Anschlüsse auszuführen?
- Wie können im Lehmsteinmauerwerk Ringanker, Stürze ausgeführt?
- Sind Schneidearbeiten möglich und was ist dabei zu beachten?
- Wie ist der Witterungsschutz während der Bauphase zu gestalten?
- Welche Arbeitszeitrichtwerte können ermittelt werden?

Arbeitsvorbereitungen auf der Baustelle

Bei der Errichtung des Lehmsteinmauerwerk sind technischen Vorgaben der DIN 18940 zu berücksichtigen. Bevor mit dem Lehmsteinmauerwerk begonnen werden kann., ist sicherzustellen, dass ein ausreichender Schutz vor aufsteigender Feuchtigkeit gegeben ist. Laut Norm muss die unterste Steinlage bis 5 cm Oberkante Fertigfußboden aus einem wasserbeständigen Material ausgeführt werden, bzw. ist diese Schicht bis mindesten 30 cm über Höhe Außengelände zu führen. Zum Schutz vor aufsteigender Feuchtigkeit sind dabei Horizontalsperren anzuordnen. In der Praxis hat sich gezeigt, dass die Anordnung von zwei Horizontalsperrschichten im untersten Geschoss und jeden aufgehenden Geschoss von einer Sperrschicht sinnvoll ist.

Die erste Schicht verhindert den Aufstieg von Feuchtigkeit aus dem Untergrund, die zweite Speerschicht ist nach der ersten Steinlage anzuordnen und dient als zusätzlicher Schutz bei Wassereintrag durch Havarie oder bei Regen im Bauzustand. Für das Setzen der formgepressten großformatigen Plan- Lehmsteine sind ein Hebegerät und eine Versetzzange zwingend erforderlich. Die Greifwerkzeuge der Setzzange müssen auf die Dornlöcher der Lehmstein angepasst sein. Wie in *Kapt. V 4.1* beschrieben, werden die Steine möglichst im Schwerpunkt angehoben, um ein sicheres Heben zu ermöglichen. Als weitere Gerätschaften sind ein auf die Mauerwerksbreite abgestimmter Mörtelschlitten oder eine Mauerkelle notwendig.



Abbildung 99: Anordnung von Kimmschicht und horizontaler Sperrschichten unter Lehmsteinmauerwerk

Verarbeitung bei kalter und warmer Witterung

Das Mauer darf nur bei frostfreier Witterung erfolgen, die Temperatur sollte mindestens 5 °C betragen. Die Erhärtung der Mörtelfuge erfolgt bei Lehmörteln wie auch beim Lehm dünnbettmörtel nur durch Trocknung des Mörtels. Bei Verwendung von Lehm dünnbettmörtel ist der Trocknungsprozess kurz, da die Feuchtigkeit aus der 2 mm Mörtelschicht von den Lehmsteinen schnell adsorbiert wird und sich ein erster Verbund einstellt. Bei niedrigen Temperaturen und hoher Umgebungsfeuchte kann sich die Trocknung der Mörtelfuge etwas verlängern. Ein Vornässen der Steinlage vor dem Mörtelauftrag ist nicht erforderlich. Bei sehr warmen Umgebungsbedingungen ist darauf zu achten, dass nur so viel Mörtel aufgetragen wird wie auch zeitnah Steine gesetzt werden können. Bei Temperaturen oberhalb von 30°C ist ein Vornässen der Steinlage sinnvoll, um ein Aufbrennen des Mörtels zu verhindern. Die Steine sollten möglichst vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt werden. In Labortests wurde festgestellt, dass die Verarbeitungszeit bei Steintemperaturen von über 40°C auf unter 10 min abfallen kann.

Errichten der Wände

Laut DIN 18940 ist Lehmsteinmauerwerk umlaufend gleichmäßig hochzuführen. Hintergrund sind die langen Trocknungszeiten der Mörtelschichten bei Verwendung von normalen Lehmmauermörteln im Dickbettverfahren, die im Mittel mit einer Schichtstärke von 1,2 cm appliziert werden.

Bei Verwendung von Lehm dünnbettmörtel ist die nicht erforderlich, weil die Mörtelschichten in kurzer Zeit gut antrocknen und beim Setzen weiterer Steinlagen verformungsstabil bleiben. Ein Vorteil ist, dass in einzelnen Bereichen gearbeitet werden kann, und diese nach Fertigstellung wieder vor Witterung geschützt werden können.

Mauerwerksanschlüsse

Der Anschluss von Lehmsteinmauerwerk an Stahlbetonstützen oder die Verbindung von Lehmsteinwänden untereinander in Stumpfstoßtechnik kann mit üblichen Mauerwerksverbindern erfolgen.

Ringanker und Stürze

Bei Lehmsteinmauerwerk ist in jedem Geschoss umlaufend ein Ringanker anzuordnen. In der Regel erfolgt dies mittels U-Schalen, die ausbetoniert werden oder als Ortbetonerfüllungsbalken. Da formgepresste Lehmsteine der Anwendungsklasse II entsprechen, darf nicht direkt auf das Lehmsteinmauerwerk betoniert werden. Es ist eine Sperrschicht anzuordnen. Im Musterhaus wurden verschiedene Varianten angewandt:

1. Anordnen eine KS-Halbsteinlage als oberste Steinlage unter dem Ringanker (*Abbildung 100*)
2. Verwendung von KS-U-Schalen mit Ortbetonerfüllung
3. Aufbringen einer mineralischen Sperrschicht auf die Mauerwerkskrone und dann Aufbetonieren (*Abbildung 101*).

Tür- und Fensterstürze können aus Ziegel, Beton oder Kalksandstein hergestellt werden. Bei DIA-Stürzen ist darauf zu achten, dass eine Übermauerung erforderlich ist. Sinnvoll ist nach Möglichkeit auf Stürze weitgehend zu verzichten, da diese ein anderes Verformungsverhalten aufweisen als Lehmsteine. In dem Objekt wurde sich deshalb dafür entschieden, möglichst raumhohe Fenster anzuordnen, so dass der Ringanker gleichzeitig auch als Fenstersturz fungiert.

Schneidearbeiten

Lehmsteine sind wasserlöslich und können daher nur trocken geschnitten werden. Bei der Objektplanung ist daher zu empfehlen möglichst mit den Baurichtmaßen zu planen und die notwendigen Schneidearbeiten zu minimieren. Zudem ist bei formgepressten Lehmsteinen die Herausforderung, eine saubere Schnittführung zu erzielen, da die Lehmsteine aus einer weichen Matrix mit eingebundener harten und runden Gesteinskörnung bestehen. In dem Projekt wurden verschiedene Schneidemöglichkeiten getestet.

Arbeitszeitrichtwerte

Eine wichtige Fragestellung zu Projektbeginn war, wie ist die Verarbeitung der Plan-Lehmsteine mit Lehmdünnbettmörtel überhaupt möglich.

Die Modifikationen an den Lehmstein-Formaten und der Hebewerkzeuge lassen eine Übertragung der Arbeitszeitrichtwerte für Kalksandsteinmauerwerk auf das Plan-Lehmsteinmauerwerk zu. Ein Mehraufwand resultiert vor allem durch Schneidearbeiten und den aufwendigeren Witterungsschutz in der Bauphase. Hier ist eine gute Planung vor Projektbeginn erforderlich, um die Kosten für diesen Mehraufwand niedrig zu halten.



Abbildung 100: Ausführung Lehmsteinmauerwerk, unten zwei Kimmschichten mit zwei horizontalen Sperrschichten. Oben: Ringbalken als Fenstersturz, Ausführung in Ortbeton auf KS-Halbstein



Abbildung 101: Untergrund Ortbetonringbalken: Mineralische Sperrschicht direkt auf Lehmsteinmauerwerk zum Schutz vor Erweichen des Lehmsteinmauerwerks

Witterungsschutz

Mauerwerkswände aus Lehmsteinen der Anwendungs-klasse II sind feuchteempfindlich und müssen deshalb während der gesamten Bau-phase vor Witterung geschützt werden. Prinzipiell sind die Mauerwerkskronen nach Fertigstellung abzudecken, damit bei Regen kein Wasser über die Lochungen in die Wände eindringen kann. Bei den Lehmsteinwänden sind diese sogar vollflächig zu schützen, um eine Erosion an den Oberflächen zu



Abbildung 102: Witterungsschutz während der Bauausführung. Die Wände sind vollflächig vor Niederschlag zu schützen.

vermeiden. Für den Schutz stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung: Die Wände, an denen nicht gerade gearbeitet wird, werden vollständig mit Baufolien abgedeckt. Nach Fertigstellung bleiben die Wände bis zur Ausführung der Fassadenarbeiten verhüllt. Alternativ besteht auch die Möglichkeit mittels einer mobilen Überdachung die gesamte Baustelle einzuhausen. Auf anderen Baustellen hat sich dieses Verfahren bauablauftechnisch und finanziell bereits bewährt.

V 5 Mauerwerkseigenschaften

V 5.1 Mauerwerksfestigkeit

Die Bemessung von tragenden Lehmsteinmauerwerk erfolgt nach DIN 18940, die Bemessungsansätze basieren auf den EC6 [29]. In dem Forschungsbericht von Wiehle und Brinkmann [30] wurde die Übertragbarkeit diese vereinfachten Bemessungsverfahren auf tragendes Lehmsteinmauerwerk überprüft und mit Messreihen an Mauerwerkswänden validiert. Die geprüften Mauerwerkswänden wurden mit Steinformaten in den Größen 2 und 3DF mit Lehmmauermörtel nach DIN 18946 errichtet. Zu dem Zeitpunkt der Normerstellung gab es noch kein großformatigen Lehmsteine, so dass bisher keine Versuchsergebnisse hierfür vorliegen. Im Zuge der Bauartengenehmigung kam daher die Frage auf, wie die Mauerwerksfestigkeiten aus den Steinfestigkeiten abzuleiten sind. Da bei Plan-Lehmsteinmauerwerk mit Lehmdünnbettmörtel die Stoßfugen unvermörtelt bleiben ist ein direkter Vergleich nicht gegeben. In der Bauartengenehmigung wurde daher bis hinreichend Messdaten vorliegen eine Abminderung der Mauerwerksfestigkeit gegenüber den Normwerten in Höhe von 10 % vorgenommen. Zu Projektende wurden noch verschiedene 24er und 36,5er Wandaufbauten an der MPA Hannover geprüft.

Aus Steinen im Format 8DF (248 x 240 x 240) wurden 5 RILEM-Körper (1,25m x 1,25m) und 3 Wände (2,5m x 1,25m) geprüft. Die verwendeten Steine wiesen in der Erstprüfung die Festigkeitsklasse 4 auf. Zusätzlich wurden noch 3 Wände mit 12DF Steinen (248 x 365 x 248) geprüft. RILEM-Körper machten mit dieser Wandstärke keinen Sinn, da die Prüfkörper zu gedrungen waren. Vorgabe seitens des DIBt war, dass der Schlankheitsgrad der Wände zwischen 5 und 10 liegen sollte. Die 12DF Steine wurden mit in das Versuchsprogramm mit aufgenommen, da sie in der Erstprüfungen die höchste Festigkeitsklasse 6 aufwiesen. Für diese Festigkeitsklasse liegen bisher noch keine Bemessungsgrößen vor.



Abbildung 103: RILEM -Körper nach Herstellung, Format 8DF



Abbildung 104: RILEM-Körper nach Prüfung, Versagensbild

Die Ergebnisse der 5 geprüften RILEM-Körper hergestellt aus den 8DF-Steinen ergaben eine mittlere Druckfestigkeit von $3,07 \text{ N/mm}^2$ bei einem Variationskoeffizienten von 0,019. Die weiteren Ergebnisse der Wandversuche stehen noch aus und werden im Nachgang zum Projekt veröffentlicht.

V 6 Ökobilanzierung

Für Lehmsteine existiert seit März 2023 eine Musterumweltproduktdeklaration herausgegeben von dem Dachverband Lehm [31]. Betrachtet werden in der Muster-UPD formgeschlagene Lehmsteine im NF-Format. Die Grundlage für die Erstellung einer Typ III UPD nach DIN EN 15804 [32] ist Berechnung der Ökobilanz des Produktes nach DIN EN ISO 14040/DIN EN ISO 14044 [33],[34].

Für die industriell hergestellten formgepressten Lehmsteine wird auch eine UPD angestrebt. In dem Projekt wurden die entsprechend Datengrundlagen geschaffen und eine Ökobilanz berechnet. Die Zugrundeliegende Normen waren: DIN EN ISO 14040, 14044 und DIN EN 15804. Für die Erstellung der Ökobilanz wurde folgende Software verwendet: Umberto Version 11 in Zusammenhang mit der Datenbank ecoinvent 3.8 database

Tabelle 22: Übersicht des Untersuchungsrahmen der Ökobilanz für die Lehmsteinherstellung

Szenario	
Ziel	Ziel der Ökobilanz ist die Erstellung einer Datengrundlage und Informationsbasis für Entscheidungen im Projekt "Lehmsteine" bezüglich der Nachhaltigkeit (Umweltwirkungsindikatoren).
Funktionale Einheit	1 t Lehmstein am Werkstor
Systemgrenzen (inkludierte Prozessschritte)	Lehmsteinherstellung (beginnend bei Aufbereitung Lehm) (Außerhalb der Systemgrenze ist M1-1 Ablagern der Lehmschicht und M1-2 Transport Lehm)
Allokation	Nicht erforderlich
Wirkungskategorien & Methoden für die Wirkungsabschätzung	IPCC (2013, Standard) ReCiPe (2008, updated, Midpoint, Hierarchischer Ansatz) Cumulative Energy/(Exergy) Demand Standard
Anforderungen an die Daten	Aktualität, Ortsgenau, Technologische Übereinstimmung
Annahmen	Massenverluste des Herstellungsprozesses Exakter Energiebedarf der einzelnen Teilprozessschritte
Limitierungen	Einflüsse von Leckagen, Unfällen, unvorhergesehenen Events oder Ereignisse werden nicht betrachtet

V 6.1 Produktdaten und Prozessbeschreibung

Grundlage für die Ökobilanz war die Herstellung von 1to Plan-Lehmsteinen nach DIN 18945 auf einer Kalksandsteinpresse nach der Herstellungsvariante 1 (vgl. Kapt. V 2.2).

Für die Ökobilanz werden folgende Lebenszyklusphasen betrachtet:

- A1 Rohstoffversorgung
- A2 Transport

A3 Herstellung

Die folgenden Prozesse in A1 – A3 wurden nicht betrachtet:

- Gewinnen der Lehmschicht (Ablagern und Transport Lehm)
- Rückgewinnung und Einsatz des Materials, das in der Feinsiebung entsteht
- Nutzen der Abwärme zur Lufttrocknung
- Transport von Personen zum Betrieb
- Transport von Personen innerhalb des Betriebes
- Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten
- Emissionen unter Langzeitstrategie

Die Herstellung der Lehmsteine gliedert sich in acht Prozessschritte

Tabelle 23: Betrachtete Prozessschritte für die Herstellung von Lehmsteinen in der Ökobilanz

Prozessschritt	Beschreibung Prozess	Unterprozesse
M1	Aufbereitung Gewinnung	Abbaggern Sekundärlehm Transport innerhalb der Gewinnung, Beschickung Siebmaschine Grobsiebung
M2	Transport Gewinnung zu Werk 1	Aufladen Groblehm Transport
M3	Sieben	Homogenisieren und Beschickung Siebmaschine (Radlader) Feinsiebung
M4	Transport von Werk 1 zu Werk 2	Aufladen mit Radlader Transport mit LKW
M5	Beschickung KS-Anlage	Beschickung Tiefensilo mit Radlader
M6	Produktion Lehmsteine	KS-Anlage gesamt: Fördern, Mischen, Formgebung, Transport auf Härtewagen, Paketierung
M7	Trocknung	Lufttrocknung, Nutzung von Abwärme von KS-Produktion
M8	Lagerung	Transport Paletten aus KS-Anlage (Traktor) Transport ins Lager (Stapler) Verladen auf LKW (Stapler)

V 6.2 Ergebnisse Ökobilanz

Die Stoff – und Energieflüsse, die der Berechnung zugrunde gelegt wurden, sind in Abbildung 105 dargestellt. Für die Herstellung einer Tonne Lehmsteine werden aktuell 1,82 to Rohlehm benötigt. 55% des Stoffstromes gehen bis zum Ende durch.

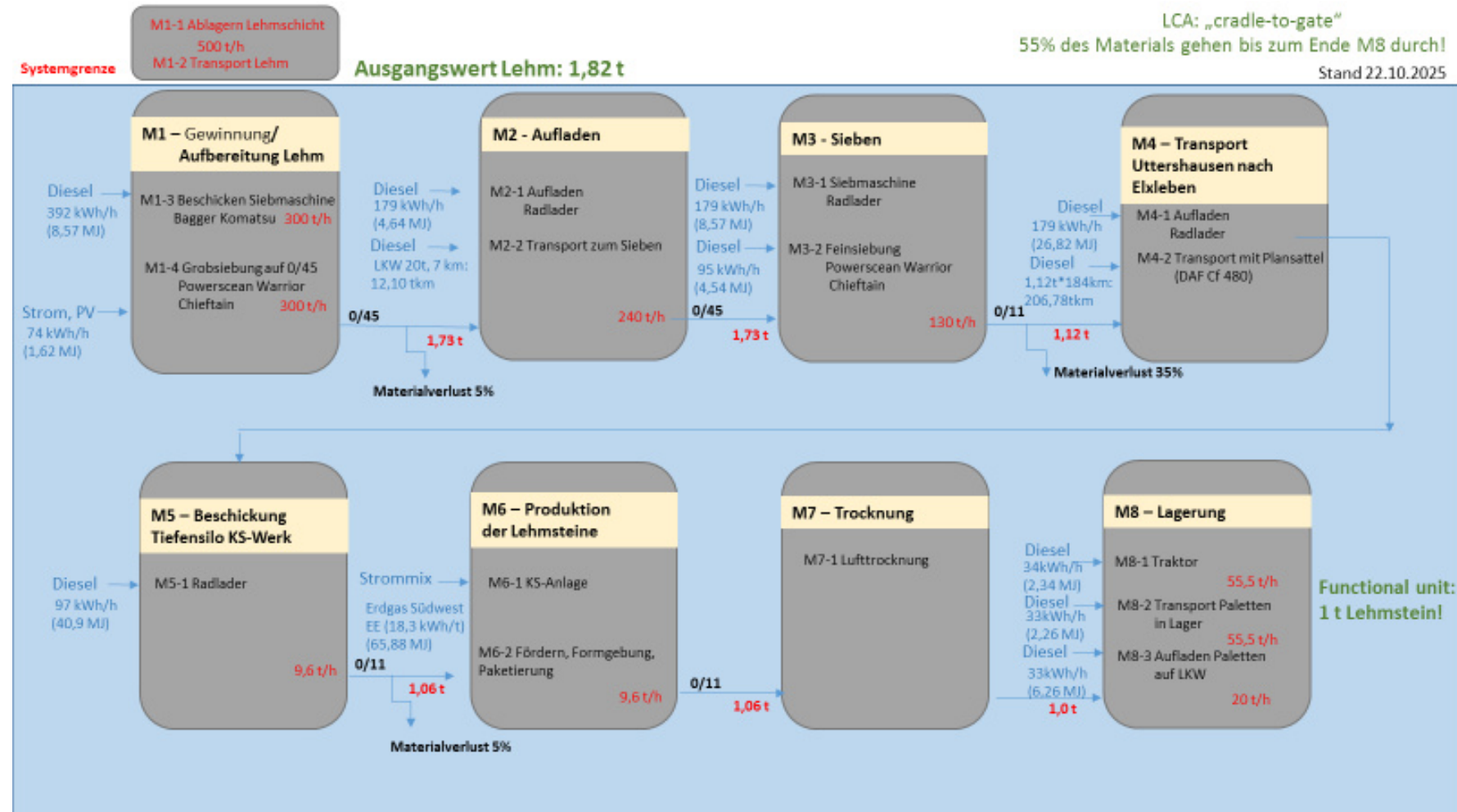
In A1 nicht berücksichtigt werden die Prozessunterschlritte M1-1 „Abbaggern der Lehmschicht“ und M1-2 „Transport der Lehmschicht“, da es sich bei den Lehmen um Sekundärlehme aus der Kiesgewinnung handelt. Diese Prozessschritte fallen zwingend bei der Kiesgewinnung an und sind dort ökobilanziell zu berücksichtigen.

Tabelle 24: Umweltindikatoren bezogen auf 1 to Lehmstein

Abkürzung	Einheit	A1 (M1-3)	A2 (M4)	A3 (M5-M8)	A1-A3
Umweltinformationen					
Treibhauspotenzial, (GWP-total)	kg CO ₂ -eq	4,446	36,089	5,129	45,665
Potenzial des Abbaus der stratosphärischen Ozonschicht, (ODP)	kg CFC 11 eq	7,729E-07	6,5E-06	8,22E-07	8,167E-06
Versauerungspotenzial, (AP)	kg SO ₂ eq	0,024	0,092	0,039	0,155
Eutrophierungspotenzial Süßwasser, (EP freshwater)	kg P eq	2,731E-05	2,665E-04	3,297E-05	3,27E-04
Eutrophierungspotenzial Salzwasser (EP-marine)	kg N eq	0,001	0,003	0,002	0,007
Troposphärisches Ozonbildungspotential, (POCP)	kg NMVOC eq	0,039	0,116	0,068	0,222
Potenzial für die Verknappung von abiotischen Ressourcen für nicht fossile Ressourcen (ADP-Mineralien und Metalle (ADP-mm))	kg Fe eq	0,108	0,759	0,261	1,128
Potenzial für die Verknappung von abiotischen Ressourcen für Wasser	m ³ water eq	0,006	0,056	0,007	0,070
Feinstaub	kg PM10 eq	0,013	0,054	0,021	0,087
Beschreibung des Ressourceneinsatzes					
Nicht erneuerbare Energien Total (PENRE)	MJ Eq				719,702
Erneuerbare Primärenergie (PERT)	MJ Eq				81,458

Das Gesamttreibhausgaspotential für die Produktion von 1 to/Lehmsteine beträgt derzeit 45,7 kg CO₂-eq. Die detaillierten Umweltindikatoren gemäß den Modulen nach DEN EN 15978 sind in *Tabelle 24* aufgeführt. Das größte Optimierungspotential steckt aktuell in dem Modul A2. Durch Zusammenlagerung der Prozesse Aufbereitung der Lehme und Fertigung der Lehmsteine möglichst an einem Werksstandort kann zukünftig der GWP total auf unter 10 kg CO₂-eq reduziert werden.

Abbildung 105: Stoff- und Energieflüsse der Lehmsteinherstellung mit Systemgrenzen (basierend auf den Daten ermittelt von der Firma Kimm)



VI. Projektdissemination zum Zeitpunkt des Abschlussberichtes

Wissenstransfer:

- Vorlesungen/Zertifikatsstudium/Seminare/Exkursionen/Qualifizierungsarbeiten:
- Materialforschungs- und -prüfanstalt Weimar
- Bauhaus-Universität Weimar
- Bauhaus Weiterbildungsakademie Weimar e.V.
- Fachhochschule Erfurt
- Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Hochschule Biberach
- TU Darmstadt
- TU Dortmund
- ASK Kassel
- TU Wien

Vorträge/Artikel/Poster:

- 21. ibausil 2023 Weimar [35]
- LEHM 2024 Weimar [36],[37]
- Österreichische Lehmbautagung 2023 Wien
- 114. MNU-Bundeskongress 2024 Jena
- DGNB-Seminare: 2025online
- C.A.R.M.E.N. e.V.-Statusseminar 2024 online
- Earth Builder Summit 2025 Biberach [38]
- BVPI Jahrestagung 2025 Erfurt
- DER PRÜFINGENIEUR 66 Ausgabe Mai.2025 [39]
- bauhandwerk Ausgabe 11 und 12, .2025 [40],[41]
- Mitarbeit – DIN Normausschuss Lehmbaumstoffe
- Arbeitskreis PÜZ Lehmbaumstoffe

Impact-Maximierung:

- eingetragener Markenname – Conclay
- Regelmäßige Berichterstattung per Social Media
- Conclay-Webseite,
- Newsletter, LinkedIn, Instagram, Youtube, Podcast
- Werksveranstaltungen im Werk Elxleben
- Errichtung eines Musterhauses im Werk Wabern-Udenborn

- Richtfest – Wohngebäude in Wangen
- Bauart - allgemeine bauaufsichtliche Zulassung / Bauartgenehmigung (Z-17.6-1325) für Conclay-Lehmstein vom DIBt

Akzeptanz fördern: Teilnahmen/Präsentationen

- BAU 2023 und 2025, München
- Zukunftsdiallog BAU 2023 Verband gewerblicher Unternehmer Hessen,
- DGNB Sustainability Challenge 2024, Sieger Kategorie Innovation
- Hessen Innovativ Kongress 2024 Frankfurt
- Vonovia Construction Contest 2024, Sieger Kategorie Baustoffe
- BUWOG Innovation Day Berlin 2025
- Lehrbaustellen, Maurerseminare, Workshops – Kassel, Lauterbach, Erfurt
- Broschüren – Produktinformationen, Verarbeitungsrichtlinien

Networking:

- Mitgliedschaft Dachverband Lehm e.V.,
- Industrieverband Lehmbaustoffe e.V.,
- Forschungsbündnis WIR!-GoLehm
- Kooperation Fachhochschule Erfurt, Bauhaus Weiterbildungsakademie Weimar e.V., Hochschule Biberach, TU Darmstadt, TU Dortmund, ackergold eG, netzwerk lehm, maxit, Lissmac, Lasco Umformtechnik, ArgillaTherm

VII. Fazit

Das Forschungsprojekt „Industrielle Fertigung von großformatigen Lehmsteinen für nachhaltige und wirtschaftliche Gebäude“ hat aufgezeigt, dass die Herstellung und Verarbeitung von formgepressten Lehmsteinen sicher möglich ist. Die Bauweise mit Plan-Lehmsteinen und Lehmdünnbettmörtel macht den Lehmmauerwerksbau konkurrenzfähig zu etablierten bekannten Massivwandbaustoffen ist.

Wesentliche Ergebnisse des Projektes sind

- die Erstellung eines Materialmodells für den Produktionslehm für formgepresste Lehmsteine
- die Findung/Entwicklung neuer Prüfmethode für die Bewertung des Produktionslehms
- die Analyse des Produktionsprozesses von der Gewinnung der Rohstoffe bis zum Endprodukt
- die Erarbeitung eines Qualitätssicherungssystems für die gesamte Prozesskette
- die Berechnung einer Ökobilanz von formgepressten Lehmsteinen
- die Erstellung einer Verarbeitungsrichtlinie für die Bauweise mit Plan-Lehmsteinen und Lehmdünnbettmörtel
- die Durchführung von Wandversuchen für die Bestimmung der Mauerwerksfestigkeit

Da zu Projektbeginn so gut wie keine Kenntnisse zur Fertigung von formgepressten Lehmsteinen und deren Qualitätssicherung vorlagen, mussten oft neue Ansätze gefunden werden: Wie kann man in den verschiedenen Prozessschritten die Zwischen- und Endprodukte hinreichend genau bewertet werden? Welche Kenngrößen sind entscheidend für eine industrielle Produktion?

Die vorgestellten Ergebnisse sind daher als erster Schritt zu sehen um den umfangreichen Fertigungsprozess zu beschreiben. Weitergehenden Untersuchungen zur Optimierung der Prüfverfahren und des Materialmodells sind zukünftig erforderlich. Auch das Qualitätssicherungskonzeptes ist zu verifizieren, anzupassen und die Übertragbarkeit auf andere Produktionsstätten zu überprüfen.

Die erstellte Ökobilanz stellt den aktuellen Stand der Produktion dar. Auch hier wurden Optimierungspotentiale erkannt, insbesondere gilt es zukünftig die Transportwege zwischen der Lehmgewinnung und der Produktion zu minimieren. Ein wichtiger Ansatz kann hierbei die Herstellung von Produktionslehm nach Rezept sein, so dass verstärkt lokale Ressourcen genutzt werden können. Hierzu sind weitergehende Forschungen notwendig. Auch das Thema Trocknung der Lehmsteine nach dem Pressen muss verfahrenstechnisch weiter optimiert werden. Für die Fertigung im Industriemaßstab ist eine maschinelle Trocknung der Lehmsteine unabdingbar, um eine kontinuierliche Produktion zu ermöglichen. Welche Methoden ökobilanziell am sinnvollsten sind, ist zu untersuchen.

Auch in der Bauausführung werden noch verschiedene Verbesserungsmöglichkeiten gesehen. Der Bauablauf wird derzeit vor allem durch die Witterung beeinflusst. Ziel ist es, die Bauweise robuster gegenüber Witterungseinflüssen zumachen. Dies betrifft Verbesserungen am Lehmstein selbst wie auch an der konstruktiven Ausführung und im Bauablauf.

Fragen der Bemessung wurden in diesem Projekt nur am Rande betrachtet. Erste Wanddruckversuche mit formgepressten Plan-Lehmsteinen wurden durchgeführt. Weitergehende Wandversuche sind nötig um die derzeitigen Bemessungsmodelle zu verfeinern.

Abschließend kann gesagt werden, dass in dem Projekt der höchste Technologiereifegrad 9 „Nachweise des erfolgreichen Einsatz des qualifizierten Systems“ erreicht wurde. Während der Projektlaufzeit erfolgte die Markteinführung der tragenden Lehmstein, erste Häuser mit formgepressten Plan-Lehmsteinen wurden errichtet, sowie zum Projektende wurde ein abZ/abG für die Bauweise mit Plan-Lehmsteinen und Lehmdünnbettmörtel erteilt.

Wir bedanken uns bei der Deutschen Bundestiftung Umwelt ohne deren Unterstützung dies nicht möglich gewesen wäre.

VIII. Literaturverzeichnis

- [1] DIN 18940: 2023-06: Tragendes Lehmsteinmauerwerk – Konstruktion, Bemessung und Ausführung. Berlin, DIN Media
- [2] DIN 18945: 2024-03: Lehmsteine – Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung. Berlin: DIN Media.
- [3] Straub, A. F.: Earth Building Components – Production Sites and Processes. Diploma Thesis, TU Wien, 2024.
- [4] DIN EN ISO 17892-2: 2015-03 Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 2: Bestimmung der Dichte des Bodens
- [5] DIN 18124: 2019-02: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Korndichte - Weithalspyknometer
- [6] DIN 663137-2: 2019-03: Bestimmung der Dichte fester Stoffe - Teil 2: Gaspyknometrie
- [7] DIN EN ISO 17892-4:2017-04 Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 4: Bestimmung der Korngrößenverteilung
- [8] DIN 18132: 2012-04: Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte - Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens
- [9] DIN EN 196-3: 2017-03: Prüfverfahren für Zement - Teil 3: Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit
- [10] DIN 18127: 2012-09: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Proctorversuch
- [11] DIN 18952-2: 1956-10: Lehmbau - Baulehm - Prüfung von Baulehm. Norm zurückgezogen
- [12] DIN EN ISO 17892-12: 2020-07: Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 12: Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenzen
- [13] DIN 18122-2: 2020-11: Baugrund – Untersuchung von Bodenproben – Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen) – Teil 2: Bestimmung der Schrumpfgrenze
- [14] Dachverband Lehm e. V. (Hrsg.): Lehmbau Regeln. Vieweg+Teubner Verlag, 3. Auflage, 2008
- [15] DIN EN ISO 14688-1: 2020-11: Geotechnische Erkundung und Untersuchung — Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden — Teil 1: Benennung und Beschreibung
- [16] DIN EN ISO 12572: 2025-03: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit - Verfahren mit einem Prüfgefäß
- [17] DIN 4108-4: 2020-11: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte
- [18] DIN EN 772-20:2005-05: Prüfverfahren für Mauersteine - Teil 20: Bestimmung der Ebenheit von Mauersteinen
- [19] DIN EN 772-16: 2011-07: Prüfverfahren für Mauersteine - Teil 16: Bestimmung der Maße
- [20] DIN EN 12664: 2001-05: Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren

- mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät - Trockene und feuchte Produkte mit mittlerem und niedrigem Wärmedurchlasswiderstand
- [21] DIN 18948: 2024-03: Lehmplatten - Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung
 - [22] DIN EN 1015-12: 2016-12: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil 12: Bestimmung der Haftzugfestigkeit zwischen Putz und Untergrund
 - [23] DIN 18946: 2024-03: Lehmmauermörtel – Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung. Berlin: DIN Media.
 - [24] DIN EN 933-1: 2012-03: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung – Siebverfahren
 - [25] Fröhlich, S.; Dubielzig, S.: Conclay- Verarbeitungsrichtlinie – Mauern mit Lehmsteinen von Conclay. Kimm GmbH & Co. KG (Hrsg.), Wabern, Dezember 2024
 - [26] Deutsche Institut für Bautechnik: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung/ Allgemeine Bauartengenehmigung Z-17.6-1325, Lehmsteinmauerwerk Conclay im Dünnbettverfahren; Geltungsdauer: 18.11.2025 bis 18.11.2027.
 - [27] Janson, C.: Materialforschung Stampflehm – Ein Beitrag zur Weiterentwicklung des Baustoffes Stampflehm. Dissertation, TU Berlin – Fakultät VI – Planen Bauen Umwelt, 2013
 - [28] DIN 18942-100: 2024-03: Lehmbaustoffe und Lehmbauprodukte - Teil 100: Übereinstimmungs- und Konformitätsnachweis
 - [29] DIN EN 1996-1-1: 2019-09 – Entwurf: Eurocode 6 – Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk. Berlin, DIN Media
 - [30] Wiehle, P., Brinkmann, M. et al.: Schaffung von Bemessungsgrundlagen für Lehmmauerwerk auf Basis von DIN EN 1996/NA mittels experimenteller und numerischer Untersuchungen. DBU-Abschlussbericht (Projekt 34599/01), Berlin, 2023
 - [31] Dachverband Lehm e. V.: Muster-UPD, Lehmsteine nach DIN 18945, Weimar, 2023
 - [32] DIN EN 15804: 2022-03 Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte
 - [33] DIN EN ISO 14040: 2021-02: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen
 - [34] DIN EN ISO 14044: 2021-02: Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen
 - [35] Liebrich, C.; Fröhlich, S: Industrielle Fertigung von großformatigen Lehmsteinen für nachhaltige und wirtschaftliche Gebäude. In: Proceedings of 21st. Ibausil. Weimar, 2023.
 - [36] Fröhlich, S., Liebrich, C.; Kimm-Friedenberg, S.: Industrielle Fertigung von großformatigen Lehmsteinen für nachhaltige und wirtschaftliche Gebäude – Teil 1 Produktion und Qualitätssicherung. LEHM 2024. Weimar, 2024.
 - [37] Fröhlich, S., Liebrich, C.; Kimm-Friedenberg, S.: Industrielle Fertigung von großformatigen Lehmsteinen für nachhaltige und wirtschaftliche Gebäude – Teil 2. Posterbeitrag. LEHM 2024. Weimar, 2024.
 - [38] Fröhlich, S., Liebrich, C., Kimm-Friedenberg, S.: Lehmsteinmauerwerk 2.0 – Bauen mit großformatigen Lehmplansteinen. In: Earth Builder Summit 2025 – Proceedings Part B. Biberach, 2025

- [39] Prüflingenieur Liebrich, C.: Mit DIN 18940 für tragenden Lehmsteinmauerwerksbau gibt es jetzt eine neue Bauweise für den Geschosswohnungsbau, DER PRÜFINGENIEUR 66, Ausgabe Mai 2025.
- [40] Ölcüm, I.: Lehm-Serie, Teil 4: Norm macht Bauen mit tragendem Lehmsteinmauerwerk möglich, Ausgabe November 2025
- [41] Ölcüm, I.: Lehm-Serie, Teil 5: Tipps zur Errichtung von Lehmsteinmauerwerk, Bauhandwerk, Ausgabe Dezember 2025