

# TU

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

## DIPLOMARBEIT

### Auswirkungen durch Beimischen von Zusatzstoffen auf die Druckfestigkeit von Lehmbaustoffen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs  
unter der Leitung von

O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Dr. h.c. Ulrich SCHNEIDER

Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Heinrich BRUCKNER

E206

Institut für Hochbau und Technologie

Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Bauingenieurwesen

Von

Martin TROJAN

9726028

Stockerauerstr. 150, A - 2100 Leobendorf

Leobendorf, 10.12.2007

Ich widme diese Diplomarbeit

*meinen Eltern Maria & Erwin*

die mich immer unterstützt haben

*meinen Freunden und Studienkollegen*

ohne die, meine viel zu kurze Studienzeit

nicht das geworden wäre was sie geworden ist

# VORWORT

Diese Diplomarbeit untersucht die Druckfestigkeit von Lehmstoffen, bzw. die Auswirkung auf diese durch gezieltes Beimischen von Zusatzstoffen.

Um die Druckfestigkeit von Lehm zu untersuchen wurden Lehmprismen hergestellt, getrocknet und anschließend geprüft. Der erzielte Wert dient als Referenzwert für weitere Untersuchungen.

Nach ausführlicher Literaturrecherche wurden 5 Zusatzstoffe (Strohspäne, Natronwasserglas, Spezial-Wasserglas-Wienerberger, Tennismehl und Holzasche) ausgewählt.

Das Mischungsverhältnis der einzelnen Stoffe wurde so lange variiert bis sich eine zugehörige maximale Druckfestigkeit eingestellt hat. Die erzielten Werte lagen je nach Zusatzstoffen über oder unterhalb des Referenzwertes von reinem Lehm. Anschließend, wurden auch noch vielversprechende Kombinationen von Zusatzstoffen untersucht.

Durch die Zugabe von 17,5% Tennismehl erhöht sich die Druckfestigkeit gegenüber dem reinen Lehm von 6,69 N/mm<sup>2</sup> auf 7,08 N/mm<sup>2</sup> das entspricht +5,8%.

Holzasche bewirkt bei einem Mischungsverhältnis von 3,5% eine Erhöhung der Druckfestigkeit von 6,69 N/mm<sup>2</sup> auf 7,03 N/mm<sup>2</sup> d.h. +5,1%.

Ein wesentliches Kriterium für den Baustoff Lehm ist neben der Druckfestigkeit im trockenen Zustand, die Druckfestigkeit im feuchten Zustand.

Um Richtwerte für zukünftige Projekte zu diesem Thema zu erhalten, wurden Versuche im kleineren Rahmen durchgeführt.

Die Druckfestigkeit von reinem Lehm im feuchten Zustand (Lagerungszeit von 12 Tagen bei 40°C und 80% Luftfeuchtigkeit) liegt bei 4,8 N/mm<sup>2</sup>.

Die Ergebnisse bezogen auf die reine Lehmprobe im feuchten Zustand bewegen sich zwischen -5,2% für Holzasche und +18,1% für Tennismehl. Eine Kombination von Holzasche und Tennismehl bewirkte eine Verbesserung um 3,3%.

## ABSTRACT

The aim of this diploma thesis is to analyse the change in pressure resistance of silt building materials by the addition of different additives.

In order to test these changes silt prisms were cast, dried and finally used for measurements. The obtained results for pure silt were used as reference values for subsequent experimental series.

After extensive literature research five additives were identified as candidates: straw shavings, sodium silicate, special sodium silicate-Wienerberger, brick granulate, and ash.

By varying the silt additive ratio the maximum pressure resistance value was determined. Depending on the additive these values were lower or higher compared to the reference value of pure silt prisms. Furthermore, promising combinations of additives were tested as well.

Compared to pure silt the addition of 17.5% brick granulate raises the pressure resistance from 6.69N/mm<sup>2</sup> to 7.08N/mm<sup>2</sup>, which is a plus of 5.8%.

Addition of 3.5% ash leads to an increase of the pressure resistance to 7.03N/mm<sup>2</sup>, which is 5.1% higher than pure silt.

Apart from the pressure resistance of dried silt, the pressure resistance of wet silt is also an essential criterion.

Small-scale experiments were performed to obtain standard values for future projects.

The value for the pressure resistance of wet silt (storage conditions: 12 days, at 40C, 80% humidity) is 4.8N/mm<sup>2</sup>.

Results from the mixtures with different additives lie between -5.2% (ash) and +18.1% (brick granulate). A combination of ash and brick granulate led to an increase in pressure resistance of 3.3%.

---

1	Einleitung .....	7
2	Grundlagen.....	9
2.1	Materialeigenschaften von Lehm .....	9
2.1.1	Dichte .....	10
2.1.2	Festigkeit .....	10
2.1.3	Wärmetechnische Eigenschaften.....	13
2.1.4	Verhalten gegenüber Feuchte.....	13
2.1.5	Formänderungsverhalten .....	15
2.1.6	Schalltechnische Eigenschaften .....	15
2.1.7	Brandverhalten .....	16
2.2	Hauptbestandteile im Lehm .....	16
2.2.1	Sandige Bestandteile .....	16
2.2.2	Ton .....	18
2.3	Anwendung von Lehmsteinen im Einfamilienhaus .....	22
2.3.1	Anforderungen und gesetzliche Rahmenbedingungen.....	22
2.3.2	Marktpotential .....	25
2.4	Vorschriften zur Prüfung von Mauersteinen und Lehmsteinen .....	27
2.4.1	Mauersteine und tragende Wände allgemein .....	27
2.4.2	Lehmsteine .....	30
2.4.3	Prüfung von Baulehm.....	31
3	Grundlagen zur Versuchsplanung.....	44
3.1	Maßnahmen zur Verbesserung der Druckfestigkeit.....	44
3.2	Zusatzmittel.....	45
3.2.1	Chemisch wirksame Zusatzmittel .....	46
3.2.2	Stützwirkung durch Zusatzmittel .....	48
3.2.3	Bildung neuer Bindemittelstruktur durch Zusatzmittel.....	50
3.3	Zuschlagstoffe .....	54
3.3.1	Mineralische Zuschläge.....	55
3.3.2	Faserstoffe .....	57
3.3.3	Kurzfaserige Stoffe .....	60
3.3.4	Holzige Stoffe .....	62
3.3.5	Mineralisch- dämmende Zuschläge .....	65
4	Vorversuche .....	68
4.1	Der Probekörper .....	68
4.1.1	Festlegen der idealen Probekörperform .....	69
4.1.2	Aufbereitung des Lehmes zur Herstellung des Probekörpers .....	74
4.1.3	Herstellung des Probekörpers.....	77
4.1.4	Trocknung des Probekörpers.....	78
4.2	Auswahl der Zusatzmittel und Zusatzstoffe.....	78

---

4.3	Festlegung der Prüfparameter .....	80
4.3.1	Einteilung des zeitlichen Ablaufes von der Herstellung bis zum Prüfen.....	80
4.3.2	Einteilung der Mischungsverhältnisse für den Vorversuch .....	81
4.3.3	Anzahl der notwendigen Probekörper.....	81
4.3.4	Beschreibung der Prüfverfahren.....	82
4.4	Ergebnisse des Vorversuchs .....	85
4.4.1	Biegezugversuche.....	85
4.4.2	Druckversuche.....	87
4.4.3	Zusammenfassung der Ergebnisse der Vorversuche.....	89
4.5	Weitere Vorgangsweise.....	91
5	Untersuchung der Lehmproben für den trockenen und feuchten Zustand	92
5.1	Untersuchung der Lehmproben für den trockenen Zustand.....	93
5.1.1	Lehmprismen mit einzelnen Additiven .....	93
5.1.2	Lehmprismen mit Kombinationen von Additiven .....	112
5.1.3	Zusammenfassung der Ergebnisse für den trockenen Zustand .....	123
5.2	Weiterführende Untersuchungen – feuchter Zustand.....	124
5.2.1	Versuchsordnung für den feuchten Zustand.....	125
5.2.2	Untersuchungsergebnisse der Lehmprismen für den feuchten Zustand.....	126
5.2.3	Zusammenfassung der Ergebnisse für den feuchten Zustand .....	134
6	Zusammenfassung .....	136
7	Literatur.....	140

# 1 Einleitung

Der Baustoff Lehm war in der Geschichte immer dann sehr erfolgreich, wenn der Materialtransport schwierig, und die Baustoffbeschaffung sehr teuer war, d.h. in den Zeiten geringerer Mobilität oder nach Kriegen. Seit dem Beginn der Umweltbewegung in den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts haben ökologische Argumente wichtige Begründungen für die Verwendung von Lehmstoffen in einer modernen Gesellschaft geliefert.

Lehm ist auf Grund seiner technischen und gestalterischen Eigenschaften ein Baustoff, mit dem man ressourcenschonend, ökologische, langlebige, vielfältige und sichere Bauvorhaben (nicht ausschließlich Einfamilienhäuser), verwirklichen kann. Diese Eigenschaften sind es Wert, Lehmsteinen vermehrt bei der Planung von neuen Gebäuden zu berücksichtigen.

Lehmstoffe wurden entsprechend den oben genannten Aspekten immer aus lokalen Vorkommen, d.h. meist direkt vom Aushub der Baustelle, hergestellt. Ein Nachteil des Lehms ist allerdings, dass seine Eigenschaften sehr stark von den jeweiligen Lehmbaugruben abhängen. Es ist daher nicht möglich, baurelevante Eigenschaften lokaler Vorkommen, wie z.B. die Druckfestigkeit, von verschiedenen Lehmvorkommen zu standardisieren. Für das heutige Baugeschehen ist es aber notwendig Lehm auch als industriellen Baustoff mit definierten Eigenschaften anzubieten. Eine Möglichkeit dazu ist die industrielle Herstellung von Lehmsteinen.

Entsprechend den normativen Anforderungen an Bausteine und Ziegel gilt es daher, die Kennwerte von Lehmsteinen in analoger Weise darzustellen und die bereits bekannten Schwachpunkte wie z.B. das Festigkeitsverhalten oder das Schwindverhalten im Zuge der Herstellung durch geeignete Zusätze und Verfahren zu verbessern.

Ziel dieser Arbeit ist es herauszufinden wie sich die Druckfestigkeit von trockenen Lehmprismen ändert, wenn dem Lehm bestimmte Zusatzmittel beimengt werden. Dabei soll zuerst die Wirkung der einzelnen Additive auf die Druckfestigkeit getestet und danach sinnvolle Kombinationen von Zusatzmitteln ermittelt werden.

Eine unverzichtliche Voraussetzung dabei ist, dass auch die Zusatzmittel ökologisch, leicht verfügbar, kostengünstig und industriell verarbeitbar sind.

Die Arbeit wird in folgende Abschnitte gegliedert:

- Grundlagen zu Lehm
- Geschichte der verwendeten Zusatzmittel
- Vorversuche zur Auswahl von Zusatzmitteln
- Festigkeitsuntersuchungen an Lehmprismen mit ausgewählten Zusatzmitteln.

## 2 Grundlagen

Das Kapitel „Grundlagen“ soll einen Überblick darüber verschaffen, was Lehm eigentlich genau ist und welche Materialeigenschaften dieser Baustoff zu bieten hat. Eine weitere wichtige Fragestellung ist das Anforderungsprofil eines Lehmsteines, um die Tragstruktur eines Einfamilienhauses gestalten zu können. Moderne Architektur in Kombination mit dem „alten Baustoff Lehm“ ist kein Widerspruch. Vielmehr ist hier die baustoffgerechte Planung maßgeblich. Letztlich stellt sich noch die Frage mit welchen Prüfmethode man die geforderten Lehmsteinanforderungen sicherstellen kann.

### 2.1 Materialeigenschaften von Lehm

Lehm ist ein Gemisch aus Ton mit sandigen Anteilen in unterschiedlichsten Korngrößenverteilungen. Eine eindeutige Definition ist auf Grund der Vielfältigkeit der Zusammensetzungen nicht möglich. Lehm ist im Prinzip ein Verwitterungsprodukt von Urgestein (z.B.: Feldspat, Glimmer, Augit, Hornblende). Der Ton dient im Lehm als Bindemittel für den Sand bzw. Kies. In dieser Diplomarbeit werden ausschließlich Lehme betrachtet, die als Baulehme von Bedeutung sind.

Baulehme sind natürlich vorkommende, zum Bauen geeignete Erdstoffe /15/. Erst die Aufbereitung und das Beimischen von Zuschlagstoffen oder Zusätzen machen den Baulehm zum Lehm Baustoff. Dieser Vorgang gestaltet sich auf Grund fehlender Fachliteratur äußerst schwer. Es gibt leider keine allgemein gültigen Richtlinien, Normen oder Verfahren, die bei der Vielfältigkeit des Baustoffes Lehm Gültigkeit haben. Die Aufbereitung und Beimischung von Zuschlagstoffen verlangt sehr viel Wissen und Erfahrungen.

Die Lehmzusammensetzung ist regional sehr unterschiedlich und kann von den gewünschten bzw. erhofften Eigenschaften stark abweichen. Ihr Auftreten kann sich in Farbe, Form und vor allem in ihrer Zusammensetzung stark ändern. Lehme lassen sich erst nach genauerer Analyse der Zusammensetzung hinsichtlich ihrer Brauchbarkeit im Bauwesen beurteilen. Daher ist eine Untersuchung der baurelevanten Eigenschaften jedes einzelnen Lehmvorkommens notwendig.

Wie bei allen anderen wichtigen Baumaterialien (z.B.: Holz, Ziegel, Beton, Stahl) ist auch beim Baustoff Lehm das Wissen über die technischen Eigenschaften die Voraussetzung, um als ernsthafte Alternative gegenüber anderen Baustoffen bestehen zu können. Nur so kann der wichtige Schritt vom belächelten „Öko-Baustoff für Freaks“, zum Baustoff der Zukunft im Ein- und Mehrfamilienhaushalt gemacht werden. Kenngrößen zur Dichte, Festigkeit, wärmetechnische Eigenschaften, Verhalten gegenüber Feuchte, Formänderungsverhalten, schalltechnisches Verhalten und das Brandverhalten sind die wichtigsten bautechnischen Eigenschaften.

Neben diesen allgemeinen technischen Eigenschaften sind zwei lehmspezifische Eigenschaften die Bindekraft und die Plastizität - von außerordentlicher Bedeutung. Beide sind regional sehr verschieden. Die Plastizität und die Bindekraft geben rasch Auskunft über die Brauchbarkeit des Lehmvorkommens für das Bauwesen als tragender Baustoff.

### 2.1.1 Dichte

Die Dichte von Lehm ist auf Grund seines Vorkommens bzw. seiner Inhomogenität nicht konstant. Es können daher nur Richtwerte angegeben werden. Die Rohdichte von Lehm schwankt zwischen  $1750 \text{ kg/m}^3$  und  $2400 \text{ kg/m}^3$ . Als Mittelwert kann für die Rohdichte  $1850 \text{ kg/m}^3$  angenommen werden. Dieser Wert ist für trockenen Lehm, ohne Zuschläge und ohne nähere Angaben des Wassergehalts, als Richtwert gut brauchbar.

Für den trockenen und verdichteten Lehmbaustoff mit Zuschlagstoffen sind Werte von  $1600 \text{ kg/m}^3$  bis  $2200 \text{ kg/m}^3$  realistisch.

### 2.1.2 Festigkeit

Angaben über Festigkeiten eines Lehmbaustoffes können nicht allgemein gegeben werden. Die Festigkeit hängt stark von der Zusammensetzung des Lehmes ab. Eine wichtige Rolle spielen der Wassergehalt, die Art der Behandlung und die Zuschlagstoffe. Es müssen daher Versuche mit dem jeweiligen Rohstoff gemacht werden.

### 2.1.2.1 DIE BINDEKRAFT

Der Begriff Bindigkeit stammt von *Niemeyer* und ist ein Maß für die Zugfestigkeit im erdfeuchten Zustand. Sie ist abhängig vom Tonanteil und von der Tonart. Je nach Bindekraft kann man den Lehm als „fett“ oder „mager“ bezeichnen. Fette Lehme haben eine hohe, magere Lehme eine niedrige Bindekraft. Der Zusammenhang zwischen Bindekraft und Tongehalt ist in der Tabelle 2-1 ersichtlich. Entsprechend der Bindekraft wird die Verwendung des Lehms gewählt und werden mögliche Zuschläge festgelegt. *Niemeyer* ist davon ausgegangen, dass das Materialverhalten von Lehm und Beton ähnlich ist, d.h. das Verhältnis Zug- Druckspannungen ist 1:10. Weiters ist er davon ausgegangen, dass die Bindekraft im erdfeuchten Zustand bereits alle Eigenschaften des Lehmes erfasst.

**Tabelle 2-1** Lehmbezeichnung nach Bindigkeit und Tongehalt /1/

<b>Bezeichnung</b>	<b>Bindekraft [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>Tongehalt [%]</b>
magerer Lehm	0,008 – 0,011	< 15 %
Fetter Lehm	0,020 – 0,027	20 – 30 %
sehr fetter Lehm	0,027 – 0,036	30 - 40 %

### 2.1.2.2 DIE PLASTIZITÄT ODER AUCH FORMBARKEIT

Die Plastizität oder auch Formbarkeit ist ebenfalls von der Art und Menge des Tones bzw. der Tonminerale abhängig. Die Plastizität kann man sich als Summe der Anziehungskräfte der einzelnen Tonminerale vorstellen.

Untersuchungen aus dem Erd- und Grundbau (nach DIN 4022, DIN 18122, DIN 18196) können zur Untersuchung und Benennung von Baulehm angewendet werden /27/.

Die plastischen Eigenschaften von Böden werden nach dem Wassergehalt an der Fließgrenze  $w_L$  wie folgt unterschieden:

- leicht plastisch,  $w_L < 35 \%$
- mittel plastisch,  $w_L = 35 - 50 \%$
- ausgeprägt plastisch,  $w_L > 50 \%$

Die Plastizitätszahl  $I_P$  ermöglicht eine weitere Unterscheidung des bodenphysikalischen Verhaltens (siehe auch Tabelle 2-2).

Es gilt allgemein:

$$I_P = w_L - w_P$$

$I_P$  = Plastizitätszahl

$w_L$  = Fließgrenze

$w_P$  = Ausrollgrenze

**Tabelle 2-2** Einteilung des bodenphysikalischen Verhaltens nach der Plastizitätszahl /15/

$I_P \geq 7 \%$	$I_P \geq 0,73 * (w_L - 20) \%$	$I_P \leq 4 \%$	$I_P < 0,73 * (w_L - 20) \%$
Ton	Ton	Schluff	Schluff

### 2.1.2.3 DRUCKFESTIGKEIT

Tonreiche, grobsandige Lehmvorkommen erreichen die höchsten Festigkeiten. Leider ist die Untersuchung der Druckfestigkeit nicht genormt. In der Literatur wurden Druckfestigkeiten von Massivlehm (Würfel 30 x 30 x 30 cm, bzw. Zylinderform  $d = 7,6$  cm  $h = 10$  cm), Lehmsteinen, Stampflehm und von Lehmbauteilen untersucht /23/. Die unterschiedlichen Verfahren und Druckkörperformen ergeben Druckfestigkeiten für gut verdichteten, luftgetrockneten Naturlehm aus Europa von 2 bis 5 N/mm<sup>2</sup> /23/.

### 2.1.2.4 ZUGFESTIGKEIT

Im Vergleich zur Druckfestigkeit sind die Trockenzugfestigkeit und die Scherfestigkeit gering. Das Verhältnis Zugfestigkeit zur Druckkraft ist ca. 1:6. Die Zugfestigkeit kann durch eine gute Verarbeitung und die Zugabe von ausreichend langen Fasern erhöht werden.

Durch intensives Mischen sowie durch Zugabe faseriger Stoffe kann die Zugfestigkeit erheblich erhöht werden. Die Zugfestigkeit von Rohlehm liegt zwischen 0,3 bis 1,0 N/mm<sup>2</sup> /23/.

### 2.1.2.5 BIEGEZUGFESTIGKEIT

Die Biegezugfestigkeit von Lehm wird durch Zugabe geeigneter Armierungen (z.B. Stroh- oder Holzeinlage) verbessert. Die Strohlehmbauteile sind biegesteifer und belastbarer als Naturlehm. Es werden vorzugsweise Lehme von mindestens 0,01 N/mm<sup>2</sup> Bindigkeit verwendet, um Tür- und Fensterstürze, Dachplatten und belastbare Deckenteile aus Strohlehm herzustellen.

Die Biegezugfestigkeit von Strohleichteilm liegt zwischen 1,2 bis 1,7 N/mm<sup>2</sup> abhängig von der verwendeten Fase (Roggenstroh, Holzeinlage, Pressstroh) und der Dichte /23/.

### 2.1.3 Wärmetechnische Eigenschaften

In Abhängigkeit von Dichte, Wassergehalt und Porengröße ist die wärmetechnische Eigenschaft des Lehmes gut untersucht und dokumentiert. In der Tabelle 2-3 sind einige  $\lambda$ -Werte aufgelistet. Die mittlere Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  bei Ausgleichsfeuchte erreicht einen Wert von ca. 0,9 W/mK /23/.

**Tabelle 2-3** Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  nach DIN 18953

Bezeichnung	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Wärmeleitzahl [W/mK]
Schwerlehm	2000	0,93
Faserlehm	1200 - 1700	0,7
Leichteilm	1200	0,47

### 2.1.4 Verhalten gegenüber Feuchte

#### 2.1.4.1 WASSERGEHALT BEI ERDFEUCHTE

Auf Grund des unterschiedlichen Wassergehaltes erdfeuchter Lehmstoffe, ist eine direkte Gegenüberstellung der einzelnen Lehmstoffe nicht möglich. Erst die Plastizität nach *Niemeyer* macht die unterschiedlichen Lehme vergleichbar. Der Lehm wird für die Normversuche so aufbereitet, dass eine Lehmkugel mit einem Gewicht von 200g aus einer Höhe von zwei Meter fallengelassen wird. Erreicht die Abplattung der Kugel 5 cm, ist eine

Normplastizität erreicht. Die Tabelle 2-4 zeigt eine Auflistung des Wassergehaltes abhängig zur Normsteife.

**Tabelle 2-4** Wassergehalt verschiedener Lehme bei Normsteife /1/

Bezeichnung	Feuchte [%]
Magerlehm	9,5-12
mittlerer Lehme	11-15
fette Lehme	12-20
Tone	15-23

#### 2.1.4.2 WASSERGEHALT BEI GLEICHGEWICHTSFEUCHTE

Lehmstoffe zählen zu den sehr trockenen Baustoffen. Lehmteile die ausgetrocknet sind, haben in Abhängigkeit von der Umgebungsfeuchte und dem Alter des Bauteils, eine Gleichgewichtsfeuchte von ca. 2,5 – 4,5 Gew.- %. *Minke* /16/ gibt in seinem Buch Werte von 2 – 8 % an. Die hohen Werte betreffen sehr tonhaltige Lehme.

Bei eigens durchgeführten 0-Proben (Serie ABC) werden die Prismen gleich nach der Herstellung im Trockenschrank bei 50 °C - 5 Tage lang getrocknet und danach in einem Klimaschrank bei 40 °C und 80 % Luftfeuchtigkeit - 8 Tage gelagert. Diese Proben erreichten eine Gleichgewichtsfeuchte von ca. 1,1 %.

#### 2.1.4.3 WASSERGEHALT BEI SCHWANKENDER UMGEBUNGSFEUCHTE

Schwankungen der Luftfeuchtigkeit sind für den Bewohner oft sehr unangenehm und wirken störend auf das Wohnklima. Dies kann durch die Wahl des richtigen Baustoffes verhindert werden.

Lehm besitzt die positive Eigenschaft, viel Feuchtigkeit rasch aufzunehmen und zeitversetzt wieder abzugeben. Seine Hygroskopizität ist die wichtigste Eigenschaft, die für das Wohnklima von sehr großer Bedeutung ist. Messungen in historischen Gebäuden ergeben eine Luftfeuchtigkeit von 40 – 45 %. In neueren Lehm- Wohnhäusern sind es 45 – 50 %. Diese Werte liegen genau im wohnmedizinisch optimalen Bereich.

Die natürliche Raumregulierung des Lehmstoffes funktioniert nur dann, wenn die Oberfläche nicht durch die Verwendung von anderen Baustoffen oder Putzen versiegelt wird.

## 2.1.5 Formänderungsverhalten

### 2.1.5.1 SCHWINDEN

Das Schwindmaß ist hauptsächlich vom Wassergehalt bei der Verarbeitung abhängig. Der Wassergehalt liegt im Bereich von 9 – 23 % und kann durch die Beimischung von Zusätzen verringert werden. In der Praxis hat sich herausgestellt, dass sich das Schwindmaß am besten auf den Tongehalt und den Wassergehalt beziehen lässt. Am Stärksten findet das Schwinden in der Anfangsphase des Trocknens statt. Es ist sinnvoll den Lehm vor dem Einbau vorzulagern, so dass er hohe Feuchtegehalte abbauen kann (empfohlen < 8 % beim Einbau).

### 2.1.5.2 WÄRMEDEHNUNG

Bei Temperaturerhöhung dehnt sich der Lehm geringfügig aus. Gleichzeitig verdunstet das gebundene Wasser. Bei weiterer Temperaturerhöhung geht diese Dehnung wieder zurück, er schwindet schließlich unter Versprödung und feinsten Rissbildung. Diese Vorgänge sind abhängig vom Wassergehalt und von der Lehmart. Die Grenze zwischen diesen Bereichen liegt bei maximal ca. 40 °C. Je mehr Wassergehalt und je höher der Tonanteil, desto früher beginnt das Schwinden des Lehmes. Der Wärmeausdehnungskoeffizient von Lehm wird unter 40 °C näherungsweise mit  $\alpha_t = 5 \cdot 10^{-6}$  angesetzt. Eine thermische Längenänderung (ohne Schwinden bei ca. 20 °C) liegt im elastischen Bereich des Lehmes, Schäden infolge Wärmedehnung treten bei Lehm daher nicht auf. Lehm ist ein elastischer Baustoff mit einem E-Modul für trockenen Massivlehm von 4350 N/mm<sup>2</sup> /23/.

## 2.1.6 Schalltechnische Eigenschaften

Körperschallübertragung und Schalllängsleitung sind bei Lehmbauten kein Problem. Die Schallgeschwindigkeiten sind gering. Leichtlehmteile wirken sich zudem günstig auf die schalltechnischen Eigenschaften aus. Bei Skelettbauweisen wirkt der Lehm dämpfend auf die hohe Schalllängsleistung des Holzes.

Die Schallgeschwindigkeit für Lehm, bei einer Dichte von 1700 kg/m<sup>3</sup>, beträgt 1600 m/s.

Zum Vergleich haben Ziegel derselben Dichte einen Wert von 2300 m/s, Beton 3500 m/s und Fichte 4600 m/s /23/.

### 2.1.7 Brandverhalten

Nach DIN 18951 (zurückgezogen) ist Lehm nicht brennbar im Sinne der DIN 4102, auch wenn ihm pflanzliche Zusatzstoffe lehmbaugerecht untergemischt werden, ein Raumgewicht von etwa  $1800 \text{ kg/m}^3$ , aber nicht unterschritten wird. Massive Lehmwände gelten bei einer Dicke von 25 cm als feuerbeständige Bauteile im Sinn von DIN 4102. In Feuermauern dürfen nach DIN 18951 keine organischen Fasern und keine Holzteile enthalten sein.

Nach der DIN 18952 (zurückgezogen) ist Lehm nicht brennbar, wenn eine Rohdichte von  $1700 \text{ kg/m}^3$  nicht unterschritten wird.

Leider gibt es zu diesem interessanten und wichtigen Thema keine aktuellen Normen oder Daten. Die meisten Aussagen sind Erfahrungswerte. So zeigt etwa eine über 80 Jahre lang verwendete Ofenform aus Ungarn, keine Schäden am Holzgerüst, das mit 4cm Lehm ummantelt war. Eine Folgerung dieser Beobachtung ist, dass Lehm nicht nur nicht brennbar ist, er behält im Brandfall seine Form, erhöht seine Festigkeit und schützt in ihm eingeschlossene, brennbare Stoffe.

## 2.2 Hauptbestandteile im Lehm

Lehm wird als Kies- Sand- Schluff- Gemisch mit Tonanteilen bezeichnet /15/. An dieser Stelle werden die wichtigsten Bestandteile des Lehmes überblicksartig beschrieben.

### 2.2.1 Sandige Bestandteile

Die sandigen Bestandteile können in Schluff, Sand und Kies unterteilt werden. Je nachdem, welche Fraktion überwiegt, werden dann die Lehme auch benannt (z.B.: sandige Lehme). In der Tabelle 2-5 sieht man die Zusammenhänge zwischen der Bezeichnung der mineralischen Lehmbestandteile und der Korngröße.

Tabelle 2-5 Einteilung der Bodenarten in Abhängigkeit der Korngröße /23/

Kornbereich	Bodenart	Benennung	Korngröße [mm]
<b>Grobkorn, Siebkorn</b>	Blöcke		> 400
	Steine		400 - 63
	Kies	Grobkies	63 - 20
		Mittelkies	20 - 6
		Feinkies	6 - 2
	Sand	Grobsand	2 – 0,6
		Mittelsand	0,6 – 0,2
Feinsand		0,2 – 0,06	
<b>Feinkorn, Schlammkorn</b>	Schluff	Grobschluff	0,06 – 0,02
		Mittelschluff	0,02 – 0,006
		Feinschluff	0,006 – 0,002
	Feinstkorn der Ton		< 0,002

Die Hauptmasse der mineralischen Bestandteile besteht aus der Körnung unter 0,5 mm. Daher sind viele Lehmbezeichnungen gebräuchlich, die nach der fühlbaren Kornfraktion im Feinsand und Feinkornbereich liegen.

Es wird unterschieden zwischen:

- grobsandigen Lehmen: griesartige Körnung mit 0,2 – 1 mm
- feinsandigen Lehmen: Korngröße zwischen 0,2 mm und gerade noch fühlbar
- schluffsandigen Lehmen: das Mineralgerüst ist nicht mehr fühlbar

Die Größe der Teilchen im Lehm ist ein wesentliches Merkmal. In diesem Fall sind nicht mehr die einzelnen Stoffeigenschaften für das Materialverhalten verantwortlich, sondern viel mehr die Kornoberfläche. Je kleiner die Bestandteile, desto stärker beeinflusst die Kornoberfläche die Lehmeigenschaften.

Weiters hat die Kornverteilung einen wesentlichen Einfluss auf die Baupraxis bzw. auf die Materialkenngrößen.

Sie beeinflusst nachweislich folgende Materialeigenschaften:

- Druck und Zugfestigkeit
- Wasserbedarf
- Feuchtegehalt
- Wasseranziehung und Kapillarität
- Quell- und Schwindverhalten
- Abschwemmfestigkeit

Die Kornform, ist neben der Zusammensetzung ein wichtiger Parameter, der großen Einfluss auf die Materialeigenschaften des Lehmes hat.

Unterschieden werden:

- plättchenförmige Körner
- scharfkantige Körner
- runde Körner

Um eine bessere Anwendbarkeit in der Baupraxis zu erreichen, sind grobkörnige, möglichst scharfkantige Sande als Zuschlag geeignet. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass die vorhandene Tonmenge ausreicht, um den zusätzlichen Mineralanteil zu binden.

### 2.2.2 Ton

Ton besteht aus zahlreichen Mineralien, welche aus wechselnden Mengenverhältnissen zusammengesetzt sind. Die wichtigsten Minerale sind Kalkspat, Quarz, Glimmer, Glaukonit, Dolomit, Feldspat, Hornblende und die Tonminerale Kaolinit, Halloysit und Montmorillonit. Die feinsten Anteile eines tonigen Sedimentes, die so genannten Tonsubstanzen bestehen somit nicht aus einem Material.

Ton lässt sich auf zwei verschiedenen Arten betrachten:

- als Tonpartikel
- als Tonminerale

### **2.2.2.1 BETRACHTUNG DER TONE NACH TONPARTIKEL UND TONMINERALEN**

Ton als Gesteinspartikel wird mit einer Korngröße von  $\leq 0,002$  mm definiert. Der Tongehalt eines Lehmes lässt sich unter diesem Aspekt mit der Siebanalyse ermitteln. Die Problematik dieser Methode ist das Vorhandensein von anderen Partikeln, die ebenfalls die vorher definierte Korngröße aufweisen, aber unterschiedliche Eigenschaften als Ton haben.

Ton als Mineral betrachtet wird hinsichtlich seiner kristallinen Struktur untersucht. Die wesentlichen Merkmale der kristallinen Struktur sind die plättchenförmige Gestalt der Tonminerale mit negativer Oberflächenladung. Dadurch erklärt sich die Fähigkeit, Wasser aufzunehmen und Ionen auszutauschen /15/.

### **2.2.2.2 GRUNDBAUSTEINE DER TONMINERALE**

Die Grundbausteine der Tonminerale sind:

- 4 Sauerstoffatome: Sie bilden eine Tetraedereinheit um ein vierwertiges Silizium-Ion
- 6 Sauerstoffatome: Sie bilden eine Oktaedereinheit um ein sechsstelliges Aluminium-Ion

Entsprechend ihrer interkristallinen Struktur unterscheiden sich die einzelnen Tonminerale in ihrem Verhalten gegenüber Wasser und Ionen /15/.

Von der großen Anzahl verschiedener Tonminerale sind als die Häufigsten zu nennen: Kaolinit, Illit, Chlorit und Montmorillonit (siehe Abbildung 2-1).

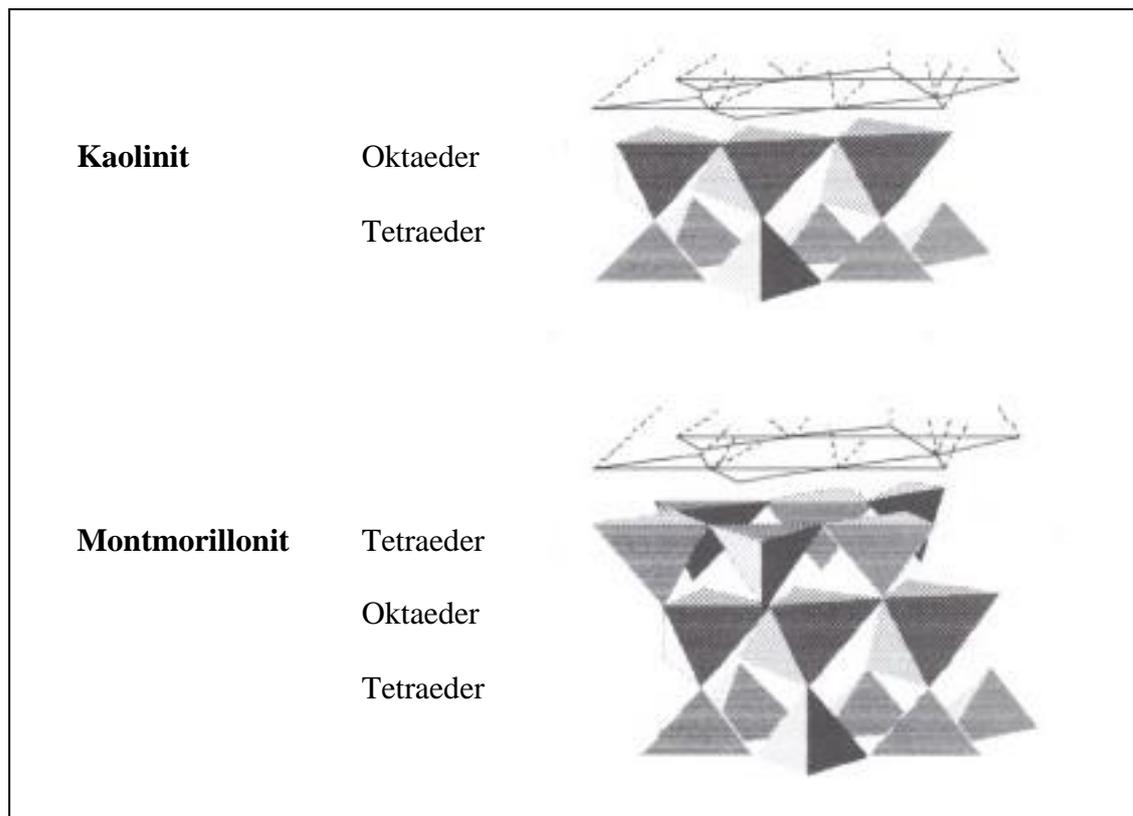


Abbildung 2-1 Schematischer Aufbau der Tonminerale /15/

### 2.2.2.3 TON-MOLEKÜLE UND WASSER

Es gibt drei Arten der Wasserbindungen im Ton:

- molekular gebundenes Wasser, Strukturwasser
- Oberflächenschicht gebundenes Wasser, Kohäsionswasser
- bewegliches Wasser dazwischen, Porenwasser

Das molekulargebundene Wasser oder auch Strukturwasser genannt, ist ein Bestandteil des kristallinen Aufbaus eines Tonminerals. Bei einer Hitzeeinwirkung  $\geq 500$  °C wird dieses Strukturwasser ausgetrieben und das Tonmineral ändert sich chemisch. Dieser Vorgang lässt sich nicht rückgängig machen und ist endgültig.

Die wässrige Oberflächenschicht zwischen den Plättchenstrukturen wird als Kohäsionswasser bezeichnet. Das Kohäsionswasser bildet einen Mantel um jedes Tonplättchen und bildet Wasser-Brücken zwischen den negativ geladenen Tonoberflächen und positiv geladenen

Gegen-Ionen. Damit entsteht eine Bindung der Tonteilchen aneinander. Je mehr Wasser dem Tonmineral zugeführt wird, desto länger werden die Wasserbrücken. Werden die Abstände zu groß, entsteht frei bewegliches Wasser oder auch Porenwasser.

Durch das Porenwasser wird der Ton plastisch bis flüssig. Der Übergang von Porenwasser zu Kohäsionswasser ist fließend.

Bei der Trocknung entstehen feine Haarrisse, durch deren Kapillarwirkung wieder Wasser aufgenommen werden kann. Die Menge an Kohäsionswasser und Porenwasser im Ton kann beliebig zu und abnehmen. Durch dieses Verhalten lässt sich die hervorragende Aufnahme und Abgabe von Wasser an die Luft erklären.

Das Aufquellen und Schrumpfen des Tones hängt direkt mit der Wasseraufnahme zusammen /15/.

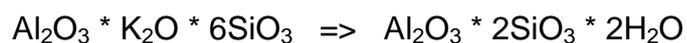
#### 2.2.2.4 TONARTEN

Ausgangstoff bei der Verwitterung zu Ton, sind vor allem die Feldspate. Diese Doppelsilikate sind Verbindungen der Kieselsäure mit Aluminiumoxid und dem Oxid eines zweiten Metalls. Andere tonbildende Mineralien sind Montmorillonit, Halloysit, Illit, Chlorit, Atapulgit, Sepiolit, Polygorskit, Vermikulit und viele mehr.

Kaolinit, der wichtigste Ton für den Lehm- und Ziegelbau in Europa, entsteht durch teilweise Auslagerung der Kieselsäure und durch die vollständige Auslagerung des Kaliums aus dem Primärmineral Kalifeldspat, wobei sich durch chemische Umsetzung das neue Mineral bildet.

Wenn aus Kalifeldspat, durch einen langen Verwitterungsvorgang, die Kaliumverbindung herausgelöst und Kristallwasser eingelagert wird, entsteht Aluminiumsilikathydrat = Kaolin.

Kaolin, oder kieselsaure Tonerde, ist in reiner Form ein weißer Ton.



Montmorillonit, ein anderes wichtiges Tonbildendes Mineral enthält zusätzlich zwei Siliziumoxidmoleküle. Seine Anziehungseigenschaften sind schwächer und die erreichbaren Festigkeiten sind geringer als die des Kaolins.

## 2.3 Anwendung von Lehmsteinen im Einfamilienhaus

Lehmsteine können und sollen im Einfamilienhaus oder im Mehrfamilienhaus in mehrerer Hinsicht eine tragende Rolle spielen. Die „moderne Architektur“ fordert immer mehr „ökologische Baustoffe“ um in den eigenen vier Wänden ein Klima zu erzeugen, in dem man sich wohl, geborgen und sicher fühlt, ohne dabei in gestalterischer Hinsicht Abstriche machen zu müssen. Der Baustoff Lehm bietet genau diese Eigenschaften, wenn er richtig, d.H. baustoffgerecht eingesetzt wird.

Lehmsteine können als tragendes Mauerwerk, als Ausfachungsmauerwerk oder als nichttragende Wände (z.B.: als Zwischenwände) eingesetzt werden. Die Verwendung bei Decken ist ebenfalls möglich.

Wie bei jedem anderen Bauwerk müssen auch hier Anforderungen und Rahmenbedingungen Berücksichtigung finden, die vom Gesetzgeber vorgegeben werden.

### 2.3.1 Anforderungen und gesetzliche Rahmenbedingungen

Die Anforderungen, die an ein modernes Lehmbauwerk gerichtet werden, sind heutzutage sehr vielfältig. Es genügt nicht mehr, nur einen einfachen Schutz gegen Wind und Wetter zu bieten. Das moderne Lehmbauwerk muss architektonischen Anforderungen, wie große Spannweiten bei Decken, Farbvielfalt oder aber auch Kombinationen mit Glas-Stahlkonstruktionen gerecht werden. Auch die bauphysikalischen Anforderungen sind gestiegen. Wärmedämmung, Schallschutz und Feuchteschutz sind Grundbedingungen für eine moderne Konstruktion. Die ökologischen Aspekte wie Ressourcenschonung, Verfügbarkeit, Energieaufwand, Wiederverwertung und einfache Handhabung sind bei diesem Baustoff jetzt schon gegeben.

Zum Schutz der Personen, die in einem Haus leben, egal ob Lehm, Ziegel, Beton, Stahl oder Holzhaus sind Normen oder Verarbeitungsrichtlinien unumgänglich geworden. Die rasche

Industrialisierung des letzten Jahrhunderts, brachte eine große Anzahl an Normen, die bei der Errichtung eines Wohnhauses anzuwenden sind.

Der Lehmbau unterscheidet sich in dieser Hinsicht. Alles Wissenswerte über den Werkstoff Lehm wurde über Jahrhunderte nur mündlich weitergegeben. Es existieren genügend bauliche Zeitzeugen, die das große Potential des Werkstoffes eindrucksvoll beweisen, jedoch gibt es keine Aufzeichnungen über die Verwendung und Verarbeitung.

Die Vielseitigkeit des Baustoffes in seiner Zusammensetzung, macht allgemein gültige Aussagen sehr schwierig. Daher war der Umgang mit Lehm immer mit sehr viel Erfahrung verbunden.

Trotz dieser Probleme gibt es einige neuere Veröffentlichungen zu diesem Thema:

- Der schweizerische Ingenieur- und Architekten- Verein veröffentlichte die Regeln zum Bauen mit Lehm, 1994 /15/.
- Lehmbau Regeln, Dachverband Lehmbau, Deutschland, 1998 /27/
- Diverse Fachliteratur wie z.B. Lehmbau für Architekten und Ingenieure, 1996 /23/, Lehmbau – Handbuch, 1995 /16/

Die meisten Normen stammen aber aus den Nachkriegsjahren. Diese Normen sind jedoch nicht mehr in Verwendung bzw. seit 1971 zurückgezogen aber noch weitgehend Stand der Technik.

- DIN 18951 – DIN 18957, /4/, /5/, /6/, /7/, /8/, /9/, /10/, /11/
- DIN 1169, /3/
- Der Lehmbau /17/

Die Tabelle 2-6 zeigt einige wichtige Grenzwerte, die laut Wiener Bauordnung bei Gebäuden einzuhalten sind. Diese Werte sind unabhängig vom verwendeten Baustoff. Die zukünftige Herausforderung besteht also darin, den Baustoff Lehm auf die geforderten Kennwerte, in genormten Verfahren zu prüfen und gegebenenfalls mit geeigneten Mitteln zu verbessern, so dass die gezeigten Werte eingehalten werden können.

Beim Schallschutz sind ebenfalls Mindestwerte einzuhalten, wobei man die Luftschalldämmung ( $R'_{w}$ ) und den Trittschallschutz ( $L'_{n,w}$ ) siehe Tabelle 2-7 unterscheidet.

Werte für eine geforderte Druckfestigkeit sind schwieriger zu finden. In der ÖNORM B3350, Ausgabe 2003-07-01 findet man lediglich Stein-Druckfestigkeiten für tragende Wände, siehe auch Tabelle 2-8.

**Tabelle 2-6** Grenzwerte des baulichen Wärmeschutzes nach der Wiener Bauvorschrift /28/

Außenwände, Feuermauern und Erdberührte Wände:	$U = 0,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Trennwände:	$U = 0,9 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Trennwände zwischen Wohnungen, Aufenthaltsräumen, Badezimmern und Aborten in Dachgeschossen einerseits und dem übrigen Dachgeschoss andererseits:	$U = 0,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Decken gegen Kellerräume, Geschäftsräume, Verkaufsräume und Räume mit ähnlicher Funktion, Lagerräume, Garagen und dergleichen sowie erdberührte Fußböden:	$U = 0,45 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Decken gegen Außenluft, Ein- und Ausfahrten beziehungsweise Durchfahrten sowie Decken des obersten Geschosses:	$U = 0,25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

**Tabelle 2-7** Mindest Schallschutzanforderungen für Einfamilien und Doppelhäuser /22/

Decken allgemein	---	erf $L'_{n,w} = 48 \text{ dB}$
Treppenläufe und –podeste und Decken unter Fluren	---	erf $L'_{n,w} = 53 \text{ dB}$
Haustrennwände	erf $R'_{w} = 57 \text{ dB}$	---

**Tabelle 2-8** Steindruckfestigkeit nach ÖNORM B 3350 /20/

Mauerstein allgemein	$f_b = 3,0 \text{ N}/\text{mm}^2$
Mauerstein für Objekte mit Erdgeschoss und maximal einem Obergeschoss	$f_b = 2,0 \text{ N}/\text{mm}^2$

### 2.3.2 Marktpotential

Das Marktpotential von Lehmziegeln ist zum derzeitigen Stand schwer einschätzbar. Es gibt Untersuchungen der Statistik Austria zu dem Thema, siehe Tabelle 2-9 und Tabelle 2-10 /25/, wann welche wie viele und welche Art von Bauwerke im Zeitraum 1992 bis 2002 errichtet wurden. Aus dieser Darstellung kann aber kein Schluss daraus gezogen werden, wie viele Bauherren Lehm dem Vorzug gegeben hätten.

Aus technischer und baupraktischer Sicht hat der Naturbaustoff Lehm durchaus das Potential, ein wichtiger Partner für private und baugewerbliche Betriebe zu werden. Abgesehen von den bauphysikalischen und ökologischen Aspekten, sind die Möglichkeiten der Eigenleistungen bei diesem Baustoff sehr groß. Man braucht zur Verarbeitung keine Spezialisten. Diese Tatsache ist gerade für private „Häuselbauer“ sehr wichtig.

Die Erhebung der Kosten pro Quadratmeter Wohnfläche liegt im Mehrgeschossbau bei ca. 1480 €, im Eigenheimbau betragen die Kosten jedoch nur 1390 € /25/. Dieser Unterschied ist auf die erbrachten Eigenleistungen zurückzuführen. Diese Kostenerhebung unterstreicht die Wichtigkeit von Eigenleistungen im privaten Hausbau.

**Tabelle 2-9** Wohnbautätigkeit 1992 – 2002, Fertigstellung von Wohnungen /25/

<b>1992</b>	<b>1993</b>	<b>1994</b>	<b>1995</b>	<b>1996</b>	<b>1997</b>	<b>1998</b>	<b>1999</b>	<b>2000</b>	<b>2001</b>	<b>2002</b>
40889	43449	48851	53353	57983	58029	57489	59447	53760	45850	41914

Im Jahr 2002 wurden 41914 Wohnungen fertig gestellt. Davon waren 34221 Neubauten, 7693 entstanden durch Zu- und Umbauten. Etwa die Hälfte (17002) der Neubauwohnungen befanden sich in Ein- und Zweifamilienhäuser. Die andere Hälfte (16594) waren Wohngebäude mit drei oder mehr Wohnungen /25/. Der Rest ca. 2 % (625) waren andere Gebäude, die für Wohnzwecke genutzt wurden.

**Tabelle 2-10** Fertig gestellte Gebäude und Wohnungen (Ein- oder Zweifamilienwohnhaus) nach Bauweise, /25/

Bauherr	Bauweise der Außenmauern bzw. Baumaterial													
	Insgesamt		Ziegel		Leichtbau- steine		Beton, Ziegelfertigteile		Beton- Mauwerk		Holzfertigteile, Blockbau		sonstige Bauweise	
			Ge- bäude	Woh- nungen	Ge- bäude	Woh- nungen	Ge- bäude	Woh- nungen	Ge- bäude	Woh- nungen	Ge- bäude	Woh- nungen	Ge- bäude	Woh- nungen
private Personen	14224	15082	9698	10390	232	242	893	933	284	300	2869	2961	248	256
Wohnbau- vereinigung	588	611	355	373	4	4	34	37	169	171	26	26	0	0
Gebiets- körperschaften	33	35	32	33	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0
sonst. juristische Personen	1203	1274	760	819	18	18	41	41	119	125	237	239	28	32
Zusammen- fassung	16048	17002	10845	11615	254	264	968	1011	572	596	3133	3228	276	288

Ungefähr 49 % der Neubauwohnungen waren von privaten Bauherrn (physische Personen) errichtet. 32 % entfielen auf gemeinnützige Bauvereinigungen, 18 % auf „sonstige juristische Personen“ und 1 % auf, die von Gebietskörperschaften (z.B. Gemeinden), errichtete Neubauten.

Die oben genannten Zahlen der Statistik Austria unterstreichen deutlich die großen wirtschaftlichen Möglichkeiten eines Lehmziegels. Grundvoraussetzung dafür ist jedoch, dass das Produkt in Eigenleistung verarbeitet werden kann.

## 2.4 Vorschriften zur Prüfung von Mauersteinen und Lehmsteinen

### 2.4.1 Mauersteine und tragende Wände allgemein

Im Gegensatz zum Lehmbau wird der Ziegelbau von der Industrie immer weiter entwickelt. Daher kommt es zu einem großen, dokumentierten und genormten Wissen, über die Ziegelherstellung und Verarbeitung von Ziegelsteinen im Einfamilien- und Mehrfamilienhaus. Technischen Daten wie die Druckfestigkeit, Wärmeschutz, Schallschutz und Brandverhalten sind bekannt und streuen nicht.

Mauersteine und tragende Wände werden nach folgenden Normen untersucht:

- ÖNORM B 3200 Mauer- und Hochlochziegel für tragendes Mauerwerk  
Ausgabe: 1999-06-01
- ÖNORM B 3350 Tragende Wände – Bemessung und Konstruktion  
Ausgabe: 2003-07-01
- EN 1052-1 Prüfverfahren für Mauerwerk, Teil 1: Bestimmung der Druckfestigkeit  
Ausgabe: 1999-01-01
- EN 771-1 Festlegungen für Mauersteine, Teil 1: Mauerziegel  
Ausgabe 2003-08-01
- EN 771-2 Prüfverfahren für Mauersteine, Teil 1: Bestimmung der Druckfestigkeit  
Ausgabe: 2000-10-01

Die nachfolgenden Kurzfassungen (Kapitel 2.4.1.1 bis 2.4.1.5) der oben genannten Normen, geben einen kleinen Einblick über die Vielfältigkeit für Mauersteine. Einen tieferen Einblick in diese Materie, würde den Rahmen dieser Diplomarbeit bei Weitem sprengen. Aus diesem Grund ist hier nur ein Einblick auf die Druckfestigkeit von Mauersteinen gegeben.

#### **2.4.1.1 ÖNORM B 3200**

##### Anwendungsbereich

Die ÖNORM B 3200, ist für alle werksmäßig hergestellten Ziegel, Mauerziegel und Hochlochziegel anzuwenden, die zur Herstellung von tragenden Wänden gemäß ÖNORM B 3350 geeignet sind /19/.

##### Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit ist die mittlere Bruchspannung der Ziegel einer Prüfserie, bezogen auf den Bruttoquerschnitt. Der Variationskoeffizient innerhalb einer Prüfserie darf 15 % nicht überschreiten. Eine allfällige Zuordnung zu Festigkeitsklassen erfolgt nach folgenden Werten in N/mm<sup>2</sup>: 5,0; 7,5; 10,0; 12,5; 15,0; 17,5; 20,0; 25,0; 30,0; 35,0; 40,0; 50,0.

Für die Druckfestigkeitsprüfung sind sechs Ziegel zu verwenden. Die Druckflächen der Ziegel sind plan zu schleifen. Die Prüfung erfolgt an trockenen Ziegeln. Der Druck ist normal zu der Fläche anzubringen, die im Mauerwerk als Lagerfläche vorgesehen ist. Die Einzelwerte der Druckfestigkeit sind in N/mm<sup>2</sup> anzugeben. Aus diesen Werten sind Mittelwert und Variationskoeffizient zu berechnen /19/.

#### **2.4.1.2 ÖNORM B 3350**

##### Anwendungsbereich

Diese ÖNORM basiert auf einem einfachen Verfahren und ist für die Konstruktion, statische Berechnung und Ausführung von tragenden and aussteifenden Wänden aus Mauerwerk, Mantelbeton oder aus unbewehrtem Beton anzuwenden. Die Anwendung der Nachweisverfahren sowie der Konstruktions- und Ausführungsregeln dieser ÖNORM ist beschränkt auf Hochbauten (z.B.: Wohnhäuser, Verwaltungsgebäude), mit einer

Deckenstützweite  $\leq 7,0$  m, einer Nutzlast  $\leq 5$  kN/m<sup>2</sup> und einer Raumhöhe bezogen auf die Rohbaulichte von  $\leq 3,50$  m /20/.

### Steindruckfestigkeiten von Mauersteinen

In dieser ÖNORM findet man Angaben für Steindruckfestigkeiten von Mauersteinen (siehe Tabelle 2-8). Alle verwendeten Mauersteine müssen den jeweiligen Produktnormen entsprechen, wobei sie eine Steindruckfestigkeit von  $\geq 3,0$  N/mm<sup>2</sup> aufweisen müssen. Für Objekte mit einem Erdgeschoss und maximal einem Obergeschoss darf die Steindruckfestigkeit auf 2,0 N/mm<sup>2</sup> verringert werden.

#### **2.4.1.3 EN 1052-1**

##### Anwendungsbereich

Diese Norm legt ein Verfahren zur Bestimmung der Druckfestigkeit von Mauerwerk fest. Sie enthält Anleitungen zur Herstellung der Prüfkörper, zu der erforderlichen Konditionierung vor der Prüfung, zur Prüfmaschine, zum Prüfverfahren, zum Berechnungsverfahren und zum Inhalt des Prüfberichtes.

##### Prüfung

Die Druckfestigkeit einer Probe von Mauersteinen ist nach dem in EN 772-1 angegebenen Verfahren zu bestimmen.

In Fällen, in denen sich die Festigkeit der Mauersteine im Laufe der Zeit verändert, sollte die Prüfung der Druckfestigkeit am selben Tag erfolgen wie die Prüfung des Mauerwerks.

#### **2.4.1.4 EN 771-1**

Diese Norm beschreibt die Eigenschaften von Mauersteinen aus Ton, sowie die an sie gestellten Anforderungen für die Verwendung im Mauerwerk. Sie gilt für zwei Gruppen von Mauersteinen aus gebranntem Ton (Mauerziegel) /12/. Die mittlere Druckfestigkeit ist vom Hersteller anzugeben.

### 2.4.1.5 EN 772-1

#### Anwendungsbereich

Diese Norm legt ein Verfahren zur Bestimmung der Druckfestigkeit von Mauersteinen fest.

#### Prinzip

Die Prüfkörper werden nach der Vorbereitung einzeln auf die Druckplatte einer Druckprüfmaschine aufgelegt und zentriert. Es wird eine gleichmäßig, verteilte Last aufgebracht, die stetig bis zum Bruch erhöht wird /13/.

#### Berechnung und Darstellung der Ergebnisse

Die Festigkeit jedes Prüfkörpers, wird durch Dividieren der erreichten Höchstlast durch die belastete Fläche errechnet. Diese ist die Bruttofläche bei Mauersteinen, die vollflächige oder mit Außensteg- oder Randstreifenvermörtelung zu verlegen sind oder die Vertiefungen aufweisen, die in der Praxis nicht verfüllt werden. Die Druckfestigkeit ist als Mittelwert der Festigkeit, der einzelnen Prüfkörper auf  $0,1 \text{ N/mm}^2$  gerundet, zu ermitteln. Der Variationskoeffizient des Prüfkörpers ist zu beachten.

### 2.4.2 Lehmsteine

Im Gegensatz zu gebrannten Mauersteinen (Ziegel) sind die Lehmsteine nur luftgetrocknet. Dadurch bekommt der „Grundstoff Lehm“ eine weitaus wichtigere Rolle als beim gebrannten Ziegel.

Die schwankende Zusammensetzung toniger Erden hinsichtlich des Korngrößenaufbaues und des Anteils an Tonsubstanz, macht eine genaue Prüfung, zur Beurteilung der bautechnischen Eignung erforderlich. Selbst eine langjährige Praxis und dem damit verbunden Umgang mit Lehm, wird eine solche Prüfung nicht ersetzen können. Ebenso schwankend wie die Zusammensetzung der erwähnten Erden, ist die Vorstellung von fein- und grobsandigem Lehm und einer gefühlsmäßigen Festlegung auf die Begriffe fett, mittelfett, mager und sehr mager /24/.

## 2.4.3 Prüfung von Baulehm

### 2.4.3.1 ZIEL DER PRÜFUNGEN

Ziel der Prüfung von Baulehm ist das Erkennen und Benennen der wesentlichen bautechnischen Eigenschaften, um seine Eignung für die Herstellung von Lehmstoffen beurteilen zu können /27/. Die nachfolgenden Methoden sind vor allem zur Prüfung von Baulehm für tragende Lehmweisen gedacht.

- Die Kornzusammensetzung und das Verhältnis der Korngrößen zu den abschlämmbaren Teilen, in groben Zügen, ermitteln zu können.
- Die Eingliederung in eine Korngrößengruppe zu ermöglichen, um wichtige Schlüsse für die Verarbeitung ziehen zu können.
- Die Bindekraft des Materials festzustellen, um eine Eingliederung in die Bindekraftklasse vornehmen zu können.
- Das Schwindmaß und das Wasseraufnahmevermögen zu prüfen.

Die Ergebnisse dieser Prüfungen geben ein ausreichendes Bild, um die Art der Aufbereitung, des Zuschlages und das Mischungsverhältnis bestimmen zu können.

Genormte Prüfungen nach europäischem Standard, wie sie beispielsweise bei den Mauersteinen üblich sind, um den heutigen Anforderungen eines modernen Baustoffes gerecht zu werden, sind leider nicht in Aussicht. Die Beurteilung der Brauchbarkeit eines Lehmsteines erfolgt also nach alten, zurückgezogen Normen und einigen neueren, nationalen Richtlinien.

Die Prüfverfahren werden eingeteilt in

- Baustellenversuche
- Norm- Versuche

### **2.4.3.2 PRÜFVERFAHREN AUF DER BAUSTELLE „BAUSTELLENVERSUCHE“**

Baustellenversuche geben die ersten wichtigen Hinweise über die technische Brauchbarkeit des Lehmvorkommens für das jeweilige Bauvorhaben. Diese Prüfverfahren erfordern ein hohes, fachliches Wissen über den Baustoff Lehm und sehr viel Erfahrung. Ein großer Nachteil dieser Verfahren ist, dass sie nicht überprüfbar, nachvollziehbar und damit „wissenschaftlich“ nicht anerkannt sind.

Aus diesem Grund verzichte ich hier auf eine umfangreiche Erläuterung der nachstehenden Versuche, sondern gebe nur deren Beziehungen an.

#### Handprüfverfahren

Handprüfverfahren dienen dazu, gefühlsmäßig einzuschätzen, wie ein Lehm zu verarbeiten ist, für welche Lehmbauverfahren er sich eignet, und welche ausgeschlossen- sowie welche Zuschläge und Zusätze eventuell erforderlich sind. Mit einiger Erfahrung kann eine, für die erste Planungsphase ausreichend genaue Prüfung, bereits manuell vorgenommen werden. Es gibt aber auch so genannte „Täuschlehme“, die leicht zu Fehleinschätzungen führen. Darum sollten Handprüfverfahren auf jeden Fall von Versuchen begleitet werden, in denen die technischen Eigenschaften in absoluten Zahlen festgestellt werden.

Handprüfverfahren:

- Fingerdruckprobe
- Formbarkeitsprobe
- Fallprobe
- Trockenbruchprobe
- Schüttelprobe
- Messerspitzenprobe
- Schmier- oder Seifenprobe
- Händewaschprobe
- Rollprobe

### Abschätzverfahren zur Bestimmung der Lehmeigenschaften

- Kauprobe
- Farbprobe
- Geruchsprobe
- Salzsäureprobe
- Sedimentationsprobe
- Einfach chemische Analyse
- Abschätzprobe nach Pollack
- Abschlammprobe nach Minke
- Aufschlammprobe nach Vollhard
- Aufschlammprobe nach Schwimann

### Sonstige Prüfungen

- Wassergehaltsprüfung
- Proctorversuch – optimale Verdichtungsfeuchte
- Abriebfestigkeitsprüfung

### 2.4.3.3 GÜLTIGE NORMEN UND RICHTLINIEN

In dieser Diplomarbeit wurden zur Lehmprüfung bzw. Probekörperprüfung die „alten“ DIN Normen (18951 bis 18957), die DIN 1169, die ÖNORM B 3303 und ÖNORM EN 12390-5 verwendet. Die Normen sind zwar teilweise aus dem Jahre 1951 und wurden schon zurückgezogen, sind aber immer noch Stand der Technik. Zusätzlich gibt es noch einige neuere, nationale Lehmbauregeln.

- DIN 18951 Blatt 1 Reichsgesetzliche Regelung des Lehmbaus, 1951
- DIN 18951 Blatt 2 Erläuterungen, 1951
- DIN 18952 Blatt 1 Baulehm, Begriffe, Arten, 1956
- DIN 18952 Blatt 2 Prüfung von Baulehm, 1956
- DIN 18953 Blatt 1 Baulehm, Lehmteile, Verwendung von Baulehm, 1956
- DIN 18953 Blatt 2 Gemauerte Lehmwände, 1956
- DIN 18953 Blatt 3 Gestampfte Lehmwände, 1956
- DIN 18953 Blatt 4 Gewellte Lehmwände, 1953
- DIN 18953 Blatt 5 Leichtlehmwände in Gerippebauten, 1953
- DIN 18953 Blatt 6 Lehmfußböden, 1953
- DIN 18954 Ausführung von Lehmbauten, Richtlinie, 1956
- DIN 18955 Baulehm, Lehmteile, Feuchtigkeitsschutz, 1956
- DIN 18956 Putze auf Lehmteilen, 1956
- DIN 18957 Lehmschindeldach, 1956
- DIN 1169 Lehmörtel für Mauerwerk und Putz, 1947
- Regeln zum Bauen mit Lehm Schweizerischer Ingenieur und Architekten Verein, 1994
- Lehmbauregeln Dachverband Lehm, 1998

### 2.4.3.4 PRÜFUNG VON BAULEHM NACH DIN 18 952

Nach der DIN 18 952 - erschienen im Oktober 1956 - wird der Baulehm auf folgende Materialeigenschaften hin geprüft:

- Bindekraft
- Trockenschwindung
- Aufschlammbarkeit
- Druckfestigkeit

#### 2.4.3.4.1 Bindekraft nach DIN 18 952

Die Bindekraftprüfung nach DIN 18 952 liefert unmittelbare Ergebnisse über die lehmbautechnische Eignung des Baulehmes für die verschiedenen Verwendungszwecke. Das von *Niemeyer* entwickelte Prüfverfahren erfolgt in mehreren genau festgelegten Schritten:

- Probennahme
- Sieben
- Aufbereitung
- Normsteife
- Prüfkörper
- Zerreiprüfung
- Zuordnung des Lehmes zu einer Bindekraftklasse

##### Probennahme

In den Lagerstätten ist der Lehm in seiner Zusammensetzung oft unterschiedlich. Um ein Gesamturteil über den Bereich der Lagerstätten zu bekommen, ist es wichtig, so viele Proben wie nötig zu nehmen, um ein Gesamtbild entwerfen zu können. Es dürfen keine Proben in weniger als 50 cm Tiefe entnommen werden. Diese Proben müssen frei von organischen Stoffen sein. Die Entnahme des Lehmes für die Diplomarbeit erfolgte von der Firma Wienerberger Österreich im Werk Hennersdorf direkt von der Halde. Der Lehm wurde von einer Tiefe > 50 cm entnommen und enthielt keinerlei sichtbare Anzeichen von organischen Stoffen.

##### Sieben

Vor der Prüfung werden alle steinigen Einschlüsse über 2 mm durch Sieben oder durch Auslesen beim Aufbereiten entfernt. Um zu sieben, muss der Lehm vorher getrocknet werden. Bei dem von der Firma Wienerberger zur Verfügung gestellten Lehm, konnte nicht gesiebt werden. Der Lehm kam in teilweise faustgroßen Stcken und war relativ feucht. Um eine durchgehende Lehmkrnung von ca. 1 bis 5 mm zu bekommen, wurde der Lehm bei der

Firma Wienerberger in Hennersdorf in einem Rundsiebbesicker in mehreren Arbeitsgängen (siehe Abbildung 2-2) zerkleinert.



**Abbildung 2-2** Rundsieb von der Firma Wienerberger

### Aufbereiten

Ist der Lehm vor der Aufbereitung nicht ausreichend feucht, so muss er vorher noch einen halben bis ganzen Tag feuchtgehalten zugedeckt mauken. In unserem Fall war der Lehm von der Halde feucht genug, um ihn gleich direkt mit einem Mauerhammer auf einer Platte gleichmäßig durchzuarbeiten. Durch die Zugabe von Wasser entstand ein gleichmäßiges, glattes Gefüge mit einer steif- plastischen Konsistenz.

### Normsteife

Zweck des Verfahrens ist es, Lehme der gleichen Konsistenz, auf die Normsteife prüfen zu können. Dazu werden von der aufbereiteten Probe 200g abgewogen, durch mehrmaliges Aufschlagen verdichtet und zwischen den Händen zu einer Kugel geformt. Es darf kein

Wasser mehr zugesetzt werden, andererseits soll auch nicht durch zu langsames Formen noch Wasser verdunsten bzw. mit den Händen entzogen werden. Die Kugel mit einem Durchmesser von ca. 55 mm lässt man dann aus einer Höhe von 2 m auf eine glatte, nicht saugfähige Platte fallen. Misst die entstehende Abplattung genau 50 mm, dann ist die Normsteife erreicht. Durch vorsichtigen Wasserzusatz oder durch Ausbreiten und Abtrocknen wird der Lehm auf diese Konsistenz genau eingestellt. Fette Lehme brauchen viel Wasser, magere Lehme eher weniger Wasser.

Die Abbildung 2-3 zeigt ein Bild von einer Kugel, zur Feststellung der Normsteife. Leider ist die Abplattung größer als 50 mm d.h., dass die Normsteife nicht erreicht bzw. überschritten wurde (zu viel Wasser).

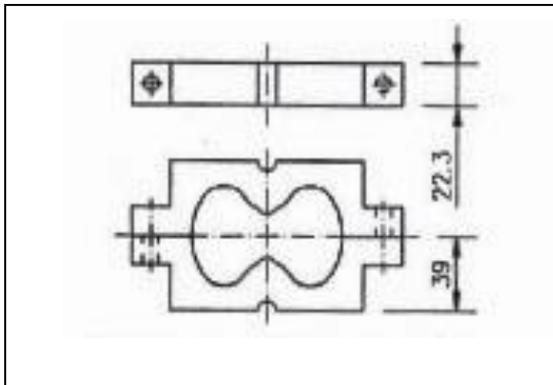
Für die Klassifizierung des Lehmes vom Werk Hennersdorf wurden 5 Kugeln, welche der Normsteife entsprachen hergestellt. Die Herstellung gestaltete sich aufwendig, weil dem Lehm etwas Wasser beigemischt werden musste.



**Abbildung 2-3** Feststellen der Normsteife

### Prüfkörper

Zeigt die Kugelfallprobe die richtige Steife an, so ist der Lehm sofort zu prüfen. Nachmauken und Abtrocknen würde die Festigkeit erhöhen. Die Masse wird in eine Form aus Stahl oder geöltem Hartholz (siehe Abbildung 2-4) mit einem Hammer kleinen Querschnitts fest eingestampft, so dass weiteres Verdichten nicht mehr möglich ist. Der Prüfkörper ist der „Achterling“ mit dem kleinsten Querschnitt von  $5 \text{ cm}^2$ . Der Prüfling wird auf beiden Seiten mit einem Messer begradigt und aus der Form gelöst.



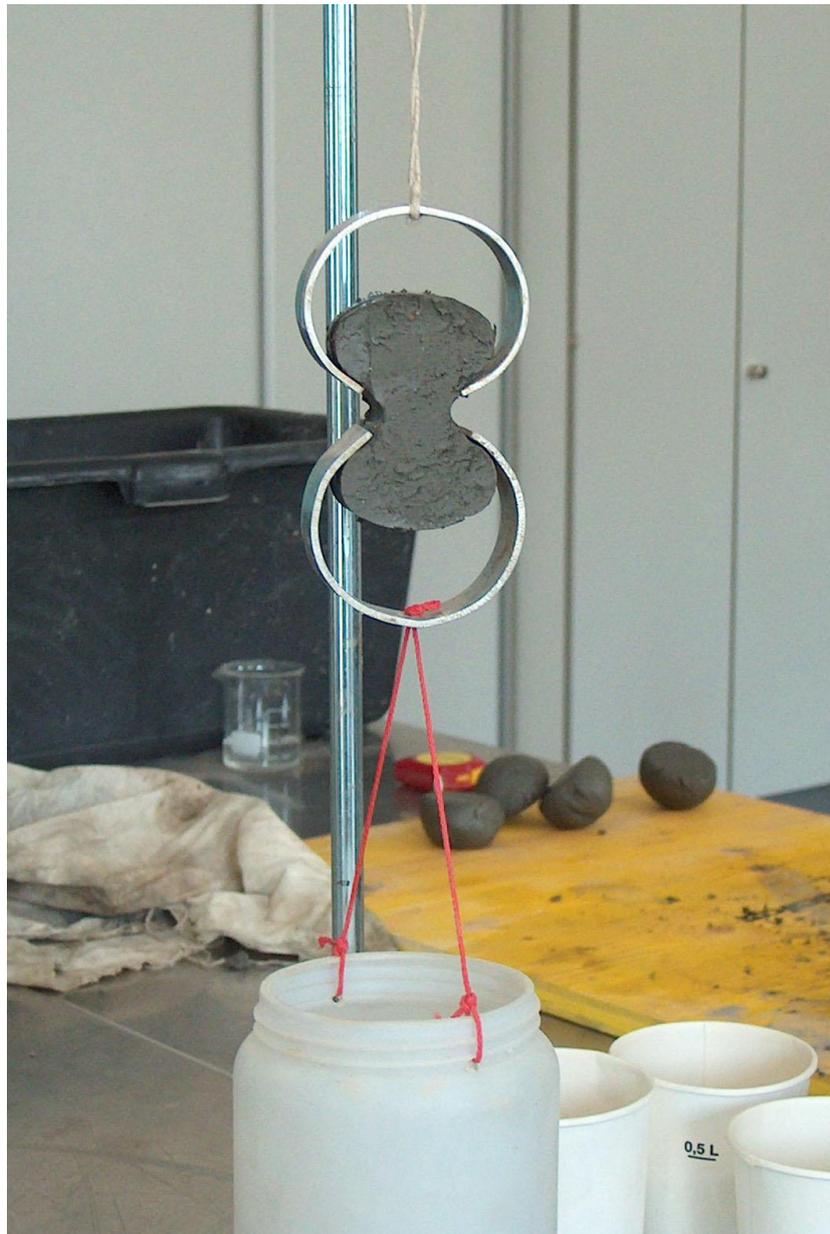
**Abbildung 2-4** Form des „Achterlings“ nach der DIN 18 952



Nachdem die 5 Kugeln entsprechend der Normsteife hergestellt waren, wurden sofort 5 „Achterling“ produziert. Die Herstellung ging sehr gut und rasch, so dass zwischenzeitlich keine Austrocknung des Lehmes stattfand.

### Zerreiprfung

Die Prüfkörper werden nun sofort in den Zerreiapparat, wie er in der Abbildung 2-5 zu sehen ist, eingespannt und geprüft. Es ist jede Vorrichtung geeignet, bei welcher der Probekörper von zwei Klauen umfasst wird, an deren unteren ein Behälter befestigt ist, in den langsam Sand, Wasser o.. eingefüllt wird, bis zum Abreißen. Man prüft drei bis fünf Proben und bildet aus den Ergebnissen das arithmetische Mittel. Die Bindigkeit des Lehmes ist als die Zugspannung, bezogen auf die 5 cm<sup>2</sup>, definiert.



**Abbildung 2-5** Zerreiapparat mit Sandbehälter

Die Zerreißprobe für die 5 „Achterling“ sind in der Tabelle 2-11 ersichtlich.

**Tabelle 2-11** Übersichtstabelle von Belastung der „Achterling“

<b>Bezeichnung</b>	<b>Belastung [N]</b>	<b>Querschnittsfläche [mm<sup>2</sup>]</b>	<b>Spannung [N/mm<sup>2</sup>]</b>
1. „Achterling“	11,2	500	0,0224
2. „Achterling“	12,4	500	0,0248
3. „Achterling“	11,9	500	0,0238
4. „Achterling“	12,2	500	0,0244
5. „Achterling“	13,5	500	0,0270

Als Durchschnittswert für die Spannung ergibt sich ein Wert von 0,0245 N/mm<sup>2</sup>.

#### Zuordnung des Lehmes zu einer Bindekraftklasse

In der DIN 18 952 werden die Lehme, nach ihrer Bindekraft, in vier als Baulehme zu verwendende Klassen eingeteilt. Die Tabelle 2-12 gibt einen guten Überblick über den Zusammenhang zwischen Bindekraft und Einteilung. Unter 0,005 N/mm<sup>2</sup> Bruchspannung ist der Lehm unbrauchbar.

**Tabelle 2-12** Einteilung der Baulehme nach der Bindekraft /6/

<b>Bindekraft [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>Benennung</b>
0,005 - 0,011	mager
0,011 - 0,020	fast fett
0,020 - 0,028	fett
0,028 - 0,036	sehr fett

Der Hennersdorfer Lehm weist eine Bindekraft von 0,0245 N/mm<sup>2</sup> auf, was nach der Tabelle 2-12 bedeutet, dass er als fett zu bezeichnen ist.

## 2.4.3.4.2 Trockenschwindung nach DIN 18 952

Wird zur Schwindprüfung die genormte Form verwendet, so lassen die Ergebnisse nach DIN 18952 ebenfalls eine Einteilung der Lehme in die Baulehmklassen zu. Die Form, wie man sie in der Abbildung 2-6 und Abbildung 2-7 sieht, besteht aus Stahl oder geöltem Hartholz. Die Lehmprobe wird auf Normsteife gebracht, in die Form eingestampft und glatt abgezogen. Auf der gestampften Lehmprobe werden im Abstand von 20 cm zwei Querstriche leicht eingeritzt. Der Prüfkörper soll dann bei Zimmertemperatur nicht über 20 °C lagern. Nach drei Tagen kann bei 60 °C weitergetrocknet werden, so lange, bis keine Längenänderung mehr feststellbar sind. Das Maß der Trockenschwindung ist der Mittelwert aus mindestens zwei Trocknungsproben desselben Lehmes. Die Einzelwerte dürfen nicht mehr als 2 mm voneinander abweichen. Die Zuordnung wird nach DIN 18952 folgendermaßen angegeben und in der Tabelle 2-13 deutlich gemacht.

Tabelle 2-13 Mittlere Trockenschwindung der Baulehme /6/

Längenschwindung		Lehmklasse, Benennung
[mm]	[%]	
2 - 5	0,9 - 2,3	mager
4 - 7	1,8 - 3,2	fast fett
6 - 10	2,7 - 4,5	fett
8 - 20	3,6 - 9,1	sehr fett

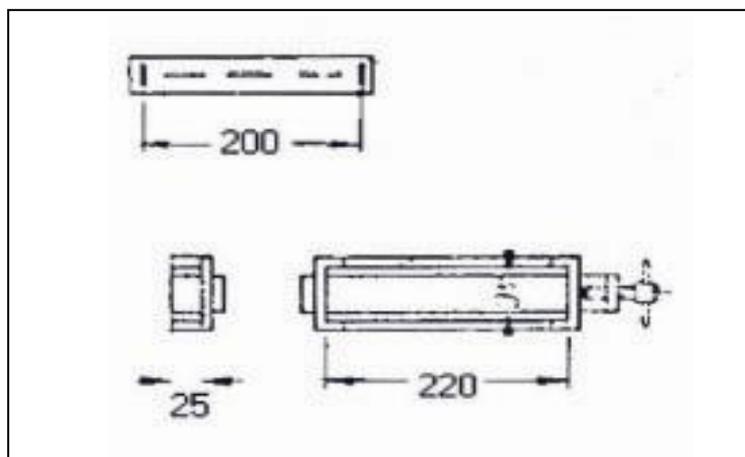
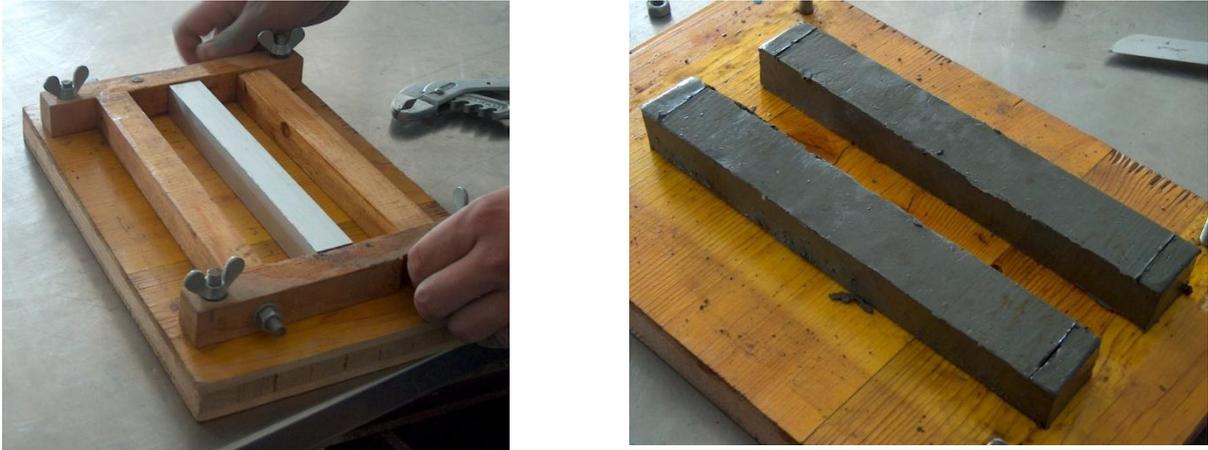


Abbildung 2-6 Prüfkörper für die Trockenschwindprüfung nach DIN 18 952



**Abbildung 2-7** Verwendete Form für die Trockenschwindprobe und eine Trockenschwindprobe

Der zu untersuchende Lehm weist ein Schwinden um ca. 1,0 cm auf. Das bedeutet, auf eine Ursprungslänge von 20 cm, einen Verlust von 5 %. Nach der Tabelle 2-13 bedeutet das, dass der Lehm von der Halde Hennersdorf fett bis sehr fett ist.

#### 2.4.3.4.3 Aufschlammbarkeit nach DIN 18 952

Ein getrockneter Probekörper, wie er zur Überprüfung der Trockenschwindung hergestellt wurde, wird mit seinem Ende, 5 cm in Wasser eingetaucht (siehe Abbildung 2-8). Es wird die Zeit vom Eintauchen bis zur Trennung des eingetauchten Teiles vom übrigen Probekörper gemessen. Ist der eingetauchte Teil des Probekörpers innerhalb einer Stunde abgetrennt, so ist der Lehm leicht aufschlammbar. Dauert es länger als eine Stunde, so ist er schwer aufschlammbar. Lehme, welche innerhalb von 45 Minuten aufschlammbar sind für den Lehmabau nicht verwendbar.

Bei dem getesteten Probekörper dauerte es 53 Minuten bis sich das untere Ende löste. Das bedeutet, dass der verwendete Lehm aus Hennersdorf als Baustoff geeignet ist.

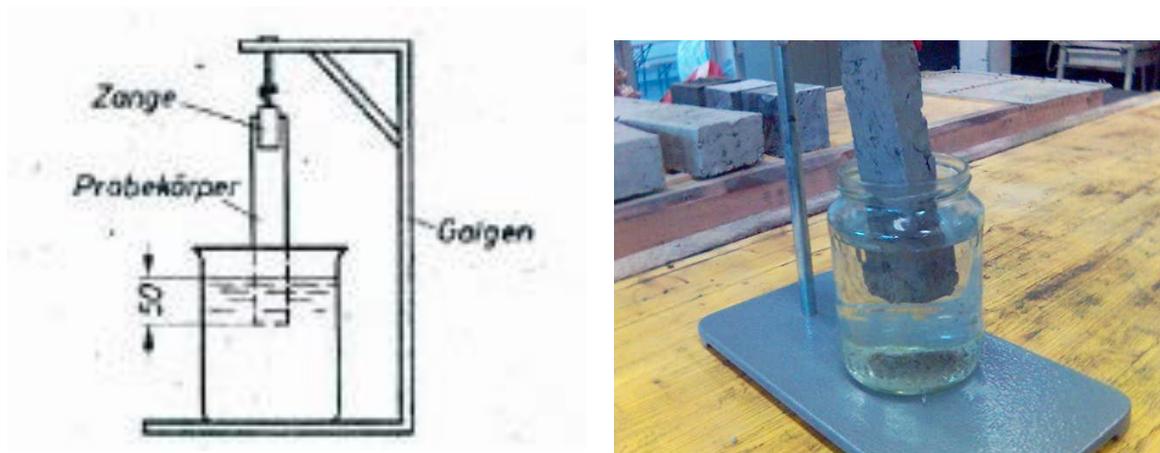


Abbildung 2-8 Feststellung der Aufschlammbarkeit

#### 2.4.3.4.4 Druckfestigkeit des Baulehmes nach DIN 18 952

Zum Nachweis der Druckfestigkeit werden mindestens vier Probewürfel, von 70 mm Kantenlänge, aus normsteifen Baulehm gestampft. Die Würfel werden sofort ausgeschalt und bei höchstens 20 °C an zugluftfreier, schattiger Stelle zum Trocknen auf einen Rost gestellt. Die Trocknung kann nach dem fünften Tag, nach der Fertigung, bei einer Temperatur von höchstens 80 °C, beschleunigt werden. Sobald an zusätzlich gefertigten Würfeln festgestellt ist, dass der Kern trocken ist, werden die Druckflächen der Würfel eben und parallel geschliffen. Der Prüfdruck muss in Richtung der Fertigung des Würfels angesetzt werden. Die Druckfestigkeit des Baulehmes ist der Mittelwert aus drei Druckfestigkeitsprüfungen aus dem Rechnungsquerschnitt von 50 cm<sup>2</sup> /24/.

## 3 Grundlagen zur Versuchsplanung

Die Grundlage zur Versuchsplanung und Versuchsordnung war die Aufgabenstellung. Ziel dieser Arbeit ist, eine Erhöhung der Druckfestigkeit von Lehmziegeln, im trockenen und feuchten Zustand zu erreichen.

Ausschlaggebend für eine zweckmäßige bzw. erfolgversprechende Versuchsplanung waren eine umfassende Literaturrecherche, Kreativität und Improvisationsvermögen. Auf Grund fehlender Auflistung von aktuellen Normen und Regeln war es auch notwendig, Versuchsanordnungen für einzelne Aufgabenstellungen selbst zu entwickeln. Es wurde eine Mischung aus Normversuchen und neu entwickelten Versuchen gewählt, um aussagekräftige Versuchsergebnisse zu erzielen.

### 3.1 Maßnahmen zur Verbesserung der Druckfestigkeit

Eine Verbesserung von Baustoffeigenschaften wie z.B. die Druckfestigkeit, Wasserbeständigkeit und Abriebfestigkeit von Lehmen, erreicht man bereits durch eine entsprechende mechanische Aufbereitung (Homogenisierung) des Materials ohne Zusatzstoffe. Durch die Aufbereitung bewirkt man eine Umstrukturierung des Haldenlehmes, der dabei eine Homogenisierung erfährt.

Um die Druckfestigkeit eines vorhandenen Lehmes zu verbessern, kann man neben der mechanischen Aufbereitung Zusatzmittel (chemische Methode) und / oder Zuschlagstoffe (physikalische Methode) bei der Homogenisierung beimengen. Das Mischungsverhältnis und die Art des Stoffes hängen stark vom vorhandenen Lehm ab. Die Vielfältigkeit des Lehmes lässt leider keine allgemeingültigen Mischungsrezepte zu.

Die vielen verschiedenen Hinweise auf brauchbare Zusätze sind mit Vorsicht zu behandeln. Viele Stoffe sind nur auf bestimmte Lehmvorkommen anwendbar und schlecht dokumentiert. Wenn ein Stoff bei einem Lehmvorkommen eine positive Auswirkung auf die Druckfestigkeit hervorruft, ist diese nicht automatisch auf andere Lehmvorkommen zu übertragen.

## 3.2 Zusatzmittel

Viele Zusatzmittel beeinflussen mehrere Lehmeigenschaften gleichzeitig. Sie beeinflussen z.B. durch chemische Reaktionen verschiedene Lehmeigenschaften. Eine Einteilung in Verfestiger, Verflüssiger oder Verdichter ist daher nicht zweckmäßig.

In der Wirkungsweise der Zusatzmittel können drei Grundprinzipien unterschieden werden, die sich häufig auch überlagern /23/:

- Chemisch wirksame Substanzen:

Die wirksamen Substanzen verändern die Eigenschaften der Feststoffe oder des Wasseranteiles. Meistens handelt es sich um einen Einfluss auf das Bindemittel - Ton durch Ionentausch oder neue chemische Verbindungen, die auch die Kristallstruktur selbst verändern können.

Zu diesen Substanzen gehören u.a.: Zement, Kalk, Gips, Soda etc.

- Stützwirkung:

Die Zusätze bilden eine Art räumliches Gitter zwischen den Feststoffen mit einer physikalischen Stützwirkung für die eigentliche Lehmstruktur.

Beispiele hierzu sind: Sand, Kies, Tennismehl, etc.

- Bildung einer neuen Bindemittelstruktur:

Das Zusatzmittel bewirkt eine Verklebung der Teilchen und die Hohlräume werden gefüllt. Die neue Bindemittelstruktur bildet mit der Ausgangsstruktur des Lehmes ein ineinander greifendes Ganzes.

Beispiele hierzu sind: Bitumen, Öle, Fäkalien etc.

Bei anorganischen Zusatzmitteln (z.B.: Zement, Kalk, Gips, Soda) sind mehr die chemischen Reaktionen und die Stützwirkung ausschlaggebend. Organische Verfestiger (z.B.: Bitumen, Öle, Fäkalien) bewirken vor allem eine Verklebung, aber auch chemische Bindungen mit dem Ton sind dabei möglich. Alle Prozentangaben bezogen auf das Mischungsverhältnis von Zusatzstoffen sind üblicherweise in Massenprozent angegeben.

### 3.2.1 Chemisch wirksame Zusatzmittel

#### 3.2.1.1 ZEMENT

Zement hat positive aber auch negative Einflüsse auf den Lehm. Seine Auswirkung auf den Lehmstein hängt stark von der Dosierung und vom Tonanteil ab. Bei günstiger Mischung und Kornverteilung lassen sich durch Zementzusatz sehr hohe Druckfestigkeiten erzielen. Ein optimaler Wert für die Dosierung von Zement ist nicht eindeutig bestimmbar, er hängt neben dem Ton auch von der Kornzusammensetzung ab. Die Zugabe von Zement ist nach oben hin beschränkt. Gibt man zu viel Zement dazu, sinkt die Festigkeit wieder. Die daraus entstehende Betonmischung ist zu schlecht und der Ton ist in seiner Wirksamkeit stark beeinträchtigt /23/.

Die Zugabe von Zement macht den Lehm abriebfester und witterungsbeständiger. Der Lehm wird wasserfest.

Das Hinzufügen von Zement schützt den Lehm nicht vor der Durchfeuchtung (Lehm wird genauso feucht), aber vor dem Abschwemmen. Der große Vorteil ist daher die Formstabilität im feuchten Zustand durch den Zement. Zement bewirkt auch eine rasche Trocknungszeit des Lehms, weil er zur Aushärtung Wasser benötigt und somit dem Lehm das Wasser entzieht. Dieser Effekt ermöglicht eine rasche Trocknungszeit für die Produktion.

Zement ist schwierig unterzumischen. Trockenes Mischen mit pulverisiertem Lehm ist die bewährteste Methode. Benötigt man eine große Menge, ist das Vermahlen des Lehmes jedoch sehr aufwändig /23/.

- sehr magere Lehme:

Der erforderliche Zementanteil, um eine Stabilisierung zu erreichen, von mehr als 15 % ist sehr hoch. Der Ton wird eher als notwendiges Übel angesehen. Die Bezeichnung Lehmstoff ist bei > 15 % Zementanteil zweifelhaft.

- tonreicher Lehm:

Eine Verfestigung ist zwischen 3 % und 8 %, je nach Tongehalt, feststellbar.

- stark tonreicher Lehm:

Eine Zugabe von Zement ist hier nicht Erfolg versprechend.

### **3.2.1.2 KALK**

Kalk als Zugabe, ist ein weit verbreiteter Zusatzstoff, speziell bei Lehmörtel. Leider bewirkt Kalk in den meisten Fällen keine Verbesserung des Lehmes. Er hat die Eigenschaft, die Bindekraft des Tones teilweise aufzuheben. Tonreiches Erdmaterial wird durch die Zugabe sofort krümelig. Will man einen mageren Lehm durch die Zugabe von Kalk verbessern erreicht man dadurch nur das Gegenteil. Eine Methode, mageren Lehm zu verbessern, ist die Zugabe von Tonmehl oder organischem Material.

Hat man aber die Aufgabe, eine stark quellende Tonart zu stabilisieren, kann die Zugabe von maximal 1% Kalk die richtige Methode sein.

Bei den meisten Lehmarten und Dosierungen werden die Bauteile durch Kalkzugabe porös und brüchig.

Lehmoberflächen von Steinen und Wänden werden durch den Kalkzusatz etwas abriebfester und witterungsbeständiger. Leider wird die Wasseraufnahme nicht behindert, sondern durch die porige Oberfläche sogar verstärkt.

Bei Lehmputzmörtel mit anschließendem Kalkanstrich oder Kalkfeinputz, nimmt man die geringe Festigkeitsabminderung in Verbindung mit einer besseren Haftung in Kauf. Es erfolgt eine chemische Bindung zwischen Lehm, Kalkmörtel oder Kalkzementmörtel.

Die Verarbeitung vom Kalk ist schwer. Eine gleichmäßige Untermischung ist durch die heruntergesetzte Plastizität des Lehmes aufwändig /23/.

### **3.2.1.3 GIPS**

Das nachträgliche Ausbessern von schadhafte Stellen in einer Lehmwand ist auf Grund des relativ großen Schwindmaßes (von Lehm) oft problematisch. Ausgebesserte Stellen lösen sich durch Schwinden immer wieder ab.

Lehm mit Gipszusatz eignet sich hingegen sehr gut für Ausbesserungsaufgaben. Gipszusätze verbessern die Haftfähigkeit und reduzieren das Trockenschwindmaß.

Je nach Verarbeitung des Lehmes mischt man unterschiedliche Prozentsätze an Gips zu. Bei trockenem, pulverisiertem Lehm reichen 3 – 5 % Gips. Will man Gips dem Anmachwasser zugeben, benötigt man ca. 5 – 10 % Gips /16/. Mörtel von tonreichem Lehm wird durch Gipszusatz etwas spröde. Die gipsvermischten Lehmoberflächen sind weniger abriebfest. Um

die Oberflächenhärte bei Estrichen zu erhöhen, kann man Gips auf feuchte Lehmoberflächen fein verteilt aufstreuen und einschlagen /23/.

#### **3.2.1.4 URIN**

Urin hat verflüssigende und verfestigende Wirkung und erhöht die Witterungsbeständigkeit.

Urin hat einen sehr hohen Anteil an Natrium, welches den Lehm geschmeidiger und somit weniger rissanfällig macht. Urin steigert die Bildsamkeit, gerade bei plastischen Lehmen, um ein Vielfaches. Darauf beruht beispielsweise das Herstellungsgeheimnis des papierdünn gedrehten chinesischen Porzellans.

Aber noch eine weitere Reaktion könnte für die besondere Wasserfestigkeit von Lehm mit Urinzusatz verantwortlich sein. Neben der Harnsäure hat Urin von grasfressenden Tieren einen hohen Gehalt an Oxalsäure. Das legt den Schluss nahe, dass diese organischen Säuren mit dem im Lehm vorhandenen oder austauschbaren Ionen Salze bilden. Die Kristallbildung von Calciumoxalat und Calciumureat bringt eine zusätzliche Stütze für die Lehmstruktur und auch eine Auffüllung der Hohlräume, wo sie dadurch die Wasseraufnahme behindern. Natriumoxalat ist ein in der Keramik vielfach verwendetes Verflüssigungsmittel /23/.

### **3.2.2 Stützwirkung durch Zusatzmittel**

#### **3.2.2.1 ASCHE**

Holzasche wird seit Jahrhunderten als Verfestiger benutzt. Sehr gute Ergebnisse erzielt man mit Asche aus vollständig verbranntem Hartholz.

Beim Veraschen von Holz bleiben folgende anorganische Bestandteile zurück:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  und  $\text{Mn}^{2+}$  als Kationen,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_3^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{2-}$  und  $\text{SiO}_3^{2-}$  als Anionen. Neben dem plastifizierend wirkenden Ionentausch mit den einwertigen Kalium- und Natriumionen spielen vermutlich auch Kristallisationsvorgänge eine Rolle. Siliziumoxid kann in die Kristallstruktur selbst eingebaut werden und aus dem Carbonat kann sich Kalkstein bilden, aus dem Sulfat Gips. Diese beinahe wasserunlöslichen Verbindungen verkleben und stützen die Struktur der Lehmbestandteile /23/.

### 3.2.2.2 WASSERGLAS

Kaliumsilikat (Wasserglas) bewirkt im Lehm eine Verflüssigung bei der Verarbeitung, eine Verfestigung bei der Aushärtung und die Oberfläche wirkt wasserabweisend. Auf Grund der guten Vermischung gestaltet sich die Verarbeitung ohne Probleme.

Die plastifizierende Wirkung entsteht durch einen Ionentausch an den Kanten und Oberflächen der zumeist mit  $\text{Ca}^{2+}$  oder  $\text{Mg}^{2+}$  belegten Tonkristalle. Mit den ausgelösten Ionen bilden sich Silikate ( $\text{CaSiO}_3$ ,  $\text{MgSiO}_3$ ), die zusätzlich verklebende Wirkung haben. Oberflächlich findet durch die Reaktion kalkhaltiger Untergründe eine Versteinerung des Wasserglases statt d.h. das wasserundurchlässliches  $\text{CaSiO}_3$  ausgefüllt wird. Es bilden sich wasser- und chemikalienbeständige Oberflächen. Durch zusätzliche Wasserglasanstriche erreicht man ein noch besseres Ergebnis.

Zur Verflüssigung von Lehm kann man Natronwasserglas oder auch Kaliwasserglas im Bereich von 0,1 % bis 0,4 % dazu mischen.

Um die Festigkeit und Abriebfestigkeit von Lehm Böden zu erhöhen, kann man bis zu 10% Natronwasserglas dazumischen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass beim Trocknen Haarrisse entstehen. Diese Haarrisse müssen laufend zugeschlämmt und zugeschlagen werden, sonst leidet die Wasserfestigkeit darunter. Beachtet man die nötige sorgfältige Verarbeitung, sind sehr harten Oberflächen möglich.

Will man dagegen einen Putz aufbringen, ist Vorsicht geboten. Der hohe Wasserglasanteil bewirkt zwar eine gute wasserabweisende Oberfläche, jedoch kann durch die entstandenen kapillaren Haarrisse das Wasser wieder eindringen. Zusätzlich kann das eingedrungene Wasser nur sehr schwer wieder ausdiffundieren. Die Unterschicht des Putzes bleibt dadurch lange feucht und es kann sich schollenweise der Putz lösen.

Eine hohe Wasserglaszugabe ab ca. 6 % birgt noch andere Gefahren in sich. Lehmsteine oder Putze mit einem so hohen Wasserglasanteil sind zwar fester, aber auch starr und spröde. Dieser Umstand kann bei Massivbauteilen notwendige Setzungen und Bewegungen verhindern. Speziell wenn Kombinationen von Wasserglasmischungen (Lehmstein mit wenig Wasserglas und Putz mit viel Wasserglas) Verwendung finden, sind Bauschäden unvermeidbar.

Bei sehr hohen Zugaben von Wasserglas (ab ca. 10 %), können hochdämmende Lehmmischungen aus dünnflüssigen Schlämmen mit hohem Faserstoffanteil leichte

hergestellt werden. Der Zusatz hilft dabei, die Fasern oder andere Dämmstoffe zu verkleben, wenn der Tonanteil nicht mehr ausreicht. Er wirkt auch als brandschützende Umhüllung /23/.

### **3.2.2.3 KASEIN**

Der Zusatz von Kaseinleim führt zu wasserfesten und abriebfesten Bauteilen und verbessert die Verarbeitbarkeit von Baulehm.

Kasein (Milcheiweiß) wird üblicherweise als Bindemittel für Anstriche eingesetzt. Es wird aus Magertopfen mit Borax ( $B_2O_3$ ) sowie mit anderen alkalischen Salzen oder mit Kalk aufgeschlossen und lässt sich als Zusatzstoff für den Lehmbau auch gut mit Leinölfirnis emulgieren. Die Eiweißstoffe behindern wahrscheinlich sowohl die kapillare Wasseranziehung, indem sie die Poren füllen, als auch die Quellung der Tonteilchen selbst, um die sie sich lagern. Auch die Beweglichkeit der Teilchen wird verbessert. Versuche zeigen, dass mit Kaseinleim angemischter Lehm, bei längerer Wassereinwirkung immer noch weich bleibt. Mit dem Calcium im Lehm und evtl. zugeführtem Kalk, bilden die kolloiden Eiweißlösungen Kalkaluminat oder Kalkkaseinate, die sehr gut dichten und eine stabilisierende, bindende Wirkung auf die Lehmstruktur haben. Alle diese Kalkproteinate werden aber im Laufe der Zeit durch Witterung und UV-Strahlung zerstört /23/.

## **3.2.3 Bildung neuer Bindemittelstruktur durch Zusatzmittel**

### **3.2.3.1 ÖLE UND ÖLHALTIGE SUBSTANZEN**

Öle bzw. ölhaltige Substanzen sind als Zuschlagstoff für Lehm schon lange bekannt und ergeben beim richtigen Mischungsverhältnis eine starke Verringerung der Abschwemmgeschwindigkeit und Durchfeuchtungsgeschwindigkeit. Die Wirkungsmechanismen wurden bis jetzt noch nicht ausreichend untersucht.

Das Austrocknen der Pflanzenöle löst eine nicht umkehrbare Oxidation und eine Verkettung zu größeren Molekülen aus, welche in der Lehmstruktur eingebaut werden. Dadurch wird die Wasseraufnahme des Tones vermindert. Die Verharzungszeit der Öle spielt dabei eine wesentliche Rolle. Besonders günstig haben sich Öle von mittlerer bis langer Verharzungszeit (maximal 1 Tag) herausgestellt. Gleichzeitig bleibt die Festigkeit erhalten. Die Poren werden

nicht verschlossen, die Diffusionsfähigkeit des Lehmes wird durch die Ölzugabe nicht behindert.

Werden die Ölsubstanzen in einem Ausmaß von 0,5 – 1,0 % dazugegeben, erreicht man den besten Stabilisierungseffekt. Je höher der Ölanteil, desto besser wird die Wasserbeständigkeit. Die Durchfeuchtung nimmt stark zu. Durch zunehmenden Ölanteil nimmt jedoch die Festigkeit ab. Die größte Härte und Abriebfestigkeit wird mit 5 -7 % Leinölfirnis erreicht.

Eine richtige Dosierung ist gerade bei diesem Stoff äußerst wichtig. Verwendet man für Fußböden zu geringen Zusatz erreicht man eine zu geringe Abriebfestigkeit, bei zu viel wird der Fußboden druckempfindlich.

Ein weiterer Nachteil ist die schlechte Verarbeitung. Die Mischung muss sehr oft (minütlich) umgerührt werden, da sich die Teile des Leinölfirnisses ständig entmischen. Am Boden des Gefäßes bildet sich dann eine gallertartige Masse.

Die Druckempfindlichkeit der Lehm Masse ist nicht nur von der Zugabe des Öls abhängig, sondern auch vom Tonanteil.

Lehmmassen mit hohem Ölanteil sind plastisch und eignen sich besonders für Ausbesserungsarbeiten /23/.

### **3.2.3.2 FÄKALSTOFFE**

Die Zugabe von Fäkalstoffen, zählt wohl zu den ältesten Methoden, um die Eigenschaften von Lehm zu verbessern. Kuhdung ist seit den Uranfängen des Lehmbaues der mit Abstand häufigste Zusatzstoff in allen Lehmbautraditionen.

Fäkalien erhöhen die Druckfestigkeit, Abriebfestigkeit und Wetterbeständigkeit des Lehmes.

Auch hier gilt dasselbe, wie bei fast allen anderen Zuschlagstoffen. Es gibt genügend dokumentierte Untersuchungen über die Wirkungsweise von Fäkalstoffen, jedoch keine darüber, welche Reaktionen für eine Verbesserung der Festigkeit verantwortlich sind. Die praktischen Tatsachen sind aber mit der zunehmenden Industrialisierung leider zu wenig, um dem wachsendem Sicherheitsbewusstsein Rechnung tragen zu können. Eine chemische und mikrobiologische Analyse der Vorgänge ist unbedingt notwendig.

Einige Faktoren der Wirkungsweise der Fäkalstoffe im Lehm sind aber schon jetzt bekannt:

- Höhere Plastizität, durch hochaktive Bakterienkulturen aus einer feuchten Lehm-Dung- Mischung, und damit eine bessere Verdichtung und Aushärtung.
- Enthaltene Magensäure (bestehend aus Salzsäure) der Fäkalien macht dem Lehm laut *Volhard* geschmeidiger.
- Der hohe Prozentanteil von ca. 88 % organischen Stoffen (feinste, verdaute Pflanzenfasern), geben dem Lehm auf rein mechanischem Weg mehr Stabilität. Die Widerstandsfähigkeit, Oberflächenhärte und Zugfestigkeit steigt. Dadurch bilden sich keine oder weniger Haarrisse, dies wirkt sich insgesamt wiederum positiv auf die Druckfestigkeit aus.
- Bestandteile des Fäkalstoffes wie z.B.: Natrium, Phosphor, Kalium, Calcium und Kohlenstoff bewirken eine Veränderung der Tonkristalle durch Anlagerung oder Ersetzen des vorhandenen Ionenbelags. Welche Bindungen und chemische Reaktionen dabei die Veränderung des Tonminerals bewirken, kann nach heutigem Stand nicht beurteilt werden.
- Fremde Moleküle dringen wie die Wassermoleküle in die Zwischenschichten der Tonminerale ein und füllen die Strukturen auf, wenn das Wasser entweicht.

Eine Verbesserung der Druckfestigkeit durch Zugabe von Fäkalien ist durch eine bessere Verdichtung der Tonplättchen und auch durch eine stärkere Anziehungskraft zwischen den Kristallschichten, also durch chemische Bindungen zu erklären.

Putzen wird oft bis zu ca. 10 % Dung zugesetzt. Die Geruchsentwicklung verschwindet nach dem Anstrich. Diese Art von Mörtel sind auch für dicke Schichten leicht zu verarbeiten. Für stark beanspruchte Oberflächen wird ein hoher Dunganteil bis zu 50 % verwendet /23/.

### 3.2.3.3 ERDÖLPRODUKTE

Natürlicher Asphalt wurde bereits vor 5000 Jahren in Babylon zur Lehmherstellung verwendet. Wie bei Fäkalstoffen hat die Verwendung von natürlichem Asphalt eine ähnliche Tradition.

Erdölprodukte wie z.B.: Bitumen, Cracköl, Petroleum wurden speziell in den letzten 30 Jahren zur Verfestigung von Lehmen herangezogen. Die oben genannten Produkte erhöhten

die Wasserfestigkeit und die Dauerhaftigkeit von Lehmbauteilen. Umfangreiche Versuche und Forschungen seitens der Erdölindustrie, zur Gewinnung neuer Marktanteile, ergaben aber keine brauchbaren Ergebnisse. Bei diesen Untersuchungen wurde auf die Vielfältigkeit des Lehmestoffes nicht Rücksicht genommen.

Bitumen muss zuerst erhitzt werden, um es mit Lehm vermischen zu können. Aus diesem Grund werden heute Bitumen-Emulsionen verwendet. Das nicht wasserlösliche Bitumen wird chemisch gebrochen und in Wasser suspendiert. Je nach Lehmart wirkt die Zugabe von Bitumen verfestigend oder aber auch verschlechternd auf die Druckfestigkeit. Die Mischbarkeit ist ebenfalls von der Lehmart abhängig.

Die Zugabe von Cutback-Ölen (Petroleum usw.) wirkt so ähnlich, wie die Zugabe von Bitumen. Durch die Zugabe von Paraffin (in Petroleum aufgelöst), ergab sich eine einfache und günstige Verarbeitung. Es entstand eine wasserabweisende Lehmmischung, welche die Festigkeit nicht negativ beeinflusste. Auf Grund der Geruchsbelästigung ist dieses Verfahren nur für Baustoffe geeignet, die im Außenbereich angewendet werden dürfen.

Im US-amerikanischen Lehmestoffbau haben Beimischungen von Holzteer, Pech, Asphaltöl bis hin zu Mineralöltöl eine gewisse Verbreitung gefunden. Manche Crackprodukte der Holz-, Kohle- und Erdöldestillation sind gesundheitlich bedenklich und auch nicht im Sinne der Wiederverwertbarkeit bzw. einer unbelasteten Umwelt zu empfehlen.

Der Hauptnachteil all dieser Verfahren besteht in der mangelnden Hitzebeständigkeit. Die Erdölprodukte gehen wahrscheinlich keine chemischen Bindungen mit dem Lehm ein, sondern bilden ein eigenes Gitter zwischen den Feststoffen des Lehmestoffes. Die Sonneneinstrahlung alleine kann genügen, um die Stützwirkung und somit die Schwächung des Bauteils zu bewirken.

Weiters werden die in Teer- und Bitumenemulsionen enthaltenen Kohlenwasserstoffverbindungen durch Luft und Licht chemisch verändert. Bei unbehandelten Bauteilen, wird durch UV-Zerstörung und durch Oxidation und Vergasung von Bestandteilen des Bitumenfilms der Wasserschutz mit der Zeit unwirksam.

Trotz dieser gravierenden Nachteile, die sich gesundheitlich und ökologisch sehr schlecht auf Mensch und Umwelt auswirken, ist das Bauen mit bitumenstabilisierten Lehmsteinen und Hochblocksteinen heute einer der verbreitetsten Lehmestoffbaumethoden der Welt /23/.

### 3.2.3.4 HARZE, WACHSE

Baumharze und ähnliche Naturstoffe werden, meist in heißem Öl gelöst, dem Lehm zugesetzt und bewirken eine noch bessere Wasserbeständigkeit und härtere Oberflächen. Mit einer Zumischung von ca. 1 % erzielt man die größte Stabilisierungswirkung.

Schellack, in Spiritus gelöst, ist sowohl als Zusatz als auch als Anstrich hervorragend geeignet, wasserdichte und abriebfeste Oberflächen zu erzeugen. Alle Zusätze, die den Lehm wasserabweisend machen sollen, sind am besten bei mageren Lehmen mit feinem Mineralgerüst wirksam.

Wachse wurden früher als Zugabe für Lehmputzen zugemischt, um sie wasserabweisender zu machen. Das Untermischen gestaltet sich aber als schwierig. Schlechte Untermischung bewirkte eine Rissanfälligkeit im Bauwerk. Wachse gehen vermutlich keine Verbindung mit dem Lehm ein. Sie füllen lediglich die kapillaren Poren.

Häufig wurden Lehmoberflächen, an wasserbeanspruchten Stellen von Bauernküchen, mit heißem Wachs behandelt, was von Zeit zu Zeit wiederholt werden musste. Mit Bohnerwachs oder anderen Hartwachsen imprägnierte Lehmfußböden werden ausreichend wasserfest und dauerhaft /23/.

## 3.3 Zuschlagstoffe

Die Wirkungsweise erfolgt in erster Linie über eine physikalische Stützwirkung eines räumlichen Gitters durch die Zuschlagstoffe auf die Lehmstruktur. Die strikte Unterscheidung zwischen Zusatzstoff und Zuschlagstoff ist im Lehmbau nicht möglich, weil Zuschlagstoffe sehr wohl chemische Auswirkungen auf den Lehm haben können.

Zuschlagstoffe werden eingesetzt, um folgende Aufgaben in der Konstruktion zu erfüllen:

- Reduktion des Schwindmaßes, Magerung
- Reduktion der Wärmeleitfähigkeit (Dämmung)
- Erhöhung der Zugfestigkeit (Armierung)
- Erhöhung der Druckfestigkeit
- Veränderung der Dichte

Um eine oben genannte Aufgabenstellung optimal erfüllen zu können, gibt es keine allgemein gültige Richtlinie, bezüglich der Menge und Art von Zuschlagstoffen. Die Mischungsverhältnisse und Arten sind je nach Lehmsorte und Zielsetzung unterschiedlich.

In dieser Diplomarbeit wurde speziell auf eine mögliche Verbesserung der Druckfestigkeit Wert gelegt. In den nachfolgenden Punkten wird eine Literaturrecherche über mögliche Zuschlagstoffe und deren Auswirkungen gegeben /23/.

### 3.3.1 Mineralische Zuschlüge

Mineralische Zuschlüge dienen hauptsächlich der Magerung und in letzter Zeit auch der Wärmedämmung. Je nach Zielsetzung (hohe Druckfestigkeit oder Rissfreiheit) der Konstruktion und der Lehmart (Tonanteils, Tonart und Wassergehalt), schwankt das Mischungsverhältnis.

Das Schwindmaß soll im Allgemeinen auf unter 1,5 % reduziert werden. Weitere Magerung geht in der Regel zu Lasten der Druckfestigkeit. Treten aber im zu errichtenden Bauteil ohnehin nur geringe Druckspannungen auf, so kann eine weitere Reduktion des Schwindmaßes vor allem im Stampfbau und bei den Nasslehmverfahren viele Vorteile bringen. Für die Herstellung von Lehmsteinen ist wiederum das Schwindmaß nicht wesentlich, die Zuschlagsmengen können reduziert werden /23/.

Mögliche mineralische Zuschlagstoffe:

- Sand
- Kies
- Splitt
- Schamottmehl
- Gesteinsmehl
- Eisenspäne

### **3.3.1.1 SAND**

Sand wird sehr oft tonreichen Lehmen beigemischt, um ein Mageres zu erzielen. Gleichzeitig kann die Druckfestigkeit erhöht werden, wenn der Wassergehalt mitberücksichtigt wird. Ansonsten kann es zu negativen Effekten kommen.

Scharfkantiger, nicht zu feiner Sand, verhält sich günstig. Die Kornfraktion muss so abgestimmt sein, dass die bereits im Lehm enthaltenen mineralischen Bestandteile, ein gutes Korngefüge ergeben /23/.

### **3.3.1.2 KIES**

Kies und Schotter erhöhen die Druckfestigkeit des Lehmes. Die Zugabe ist aber, aus konstruktionsbedingten Gründen, leider nicht überall möglich. Grobe Zuschläge eignen sich besonders im Stampfbau. Für die Herstellung von Lehmsteinen sollte jedoch die Korngröße von 1 cm nicht überschritten werden /23/.

### **3.3.1.3 SPLITT**

Geeignet als Splittzugabe sind Kleinschlag aus Naturgestein, Ziegel, Betonbrocken und anderen Abbruchmaterialien. Durch die Zugabe von Splitt, lassen sich Lehmsteine mit hoher Druckfestigkeit herstellen. Auf eine gute Durchmischung ist zu achten, damit der Verband sichergestellt ist. Es hat sich herausgestellt, dass Ziegel- und Sandsteinsplitt nicht nur die Druckfestigkeit erhöhen, sondern auch die Zugfestigkeit, im Gegensatz zu den anderen mineralischen Zuschlägen, nur geringfügig erniedrigen.

Nachteilig für die Verarbeitung wirkt sich bei splittartigen Zuschlägen die schlechte Untermischung aus.

Untersuchungen der technischen Hochschule Dresden /23/ haben gezeigt, dass durch geeignete Zuschläge, selbst schwach bindige Lehme ausreichend zu verbessern sind und dass auch bei starker Magerung mit Splittzuschlägen noch ausreichende Festigkeiten erreicht werden. Bei vermindertem Tonanteil reduziert sich zwar die Bindekraft, gleichzeitig wird aber bei guter Kornverteilung und günstiger Form des Zuschlags, der Mangel an starkem Bindemittel durch Reibung und struktureller Verteilung der Kräfte abgefangen /23/.

#### **3.3.1.4 SCHAMOTTMEHL**

Wird hauptsächlich für Kachelöfen, Kamine und allen dünnen Fugen im Ofenbau verwendet. Die Zugabe von Schamottmehl bewirkt eine bessere Hitzebeständigkeit, eine geringere Dehnung und die Haltbarkeit von Mörtelfugen /23/.

#### **3.3.1.5 GESTEINSMEHL**

Um Gesteinsmehl bzw. Gesteinspulver zuzusetzen, darf der Tonanteil nicht zu gering sein. Gesteinsmehl ist eine Alternative zu Sand. Gesteinsmehl wird hauptsächlich bei der Herstellung von Putzen verwendet. Je nach Art können völlig glatte, rissfreie Oberflächen oder stukkaturartige Putze hergestellt werden. Auch zur Farbgebung kann Gesteinsmehl untergemischt werden /23/.

#### **3.3.1.6 EISENSPÄNE**

Hammerschlag und Eisenfeilspäne verbessern die Abreibfestigkeit des Lehmstoffes. Die Verwendung bei stark beanspruchten Bauteilen liegt also auf der Hand. Auch als dekorative Zwecke werden Eisenspäne untergemischt /23/.

### **3.3.2 Faserstoffe**

Faserige Zuschläge dienen hauptsächlich zur Verbesserung der Zugfestigkeit. Je höher der Anteil an Faserstoffen, desto geringer wird die Druckfestigkeit und die Wärmeleitfähigkeit. Faserstoffe sind zumeist organische Stoffe /23/.

Mögliche Faserstoffe:

- Stroh
- Heu
- Hanf
- Jute
- Kunstfasern
- Glasfasern

### 3.3.2.1 STROH

Dieser Zuschlagstoff ist der Meistverwendetste und sicherlich auch einer der Ältesten. Die Zugabe von Stroh wirkt magernd, erhöht die Zugfestigkeit, die Wärmedämmung und die Wärmespeicherung des Bauteiles. Strohlehmteile sind auch im feuchten Zustand formstabil. In der Arbeitsfuge bilden sich keine Risse. Die Strohhalme bilden belüftete Hohlräume, welche die Trocknung beschleunigen. Gut verdichtete Wände mit hohem Strohanteil zeigen kaum Setzungen. Die gute Putzhaftung, einfache Verarbeitung und geringe Materialkosten sprechen ebenfalls für den Zuschlagstoff Stroh.

Von Nachteil sind die geringe Druckfestigkeit, die Brennbarkeit und die Verrottungsgefahr, welche die Verringerung der Dichte beschränken. Es ist darauf zu achten, dass nur trockenes Stroh ohne Unkraut verwendet wird. Schlecht gelagertes, feuchtes Stroh enthält vermehrt Bakterien und Pilzkulturen. Bei lang anhaltender Baufeuchte können Schimmelprobleme auftreten /23/.

### 3.3.2.2 HEU

Auf Grund der weichern und rissfesteren Faser gegenüber Stroh sind Grobheu, Heidekraut und alle anderen Gräser besser für massive Bauweisen geeignet. Für den Leichtlehm-Bau ist Heu, wegen seiner schlechten Dämmwirkung nicht geeignet. Heu besitzt weniger Luftporen und bei hohem Anteil unterliegt es hohen Setzungen. Früher wurde Heu mehr verwendet, weil es sehr leicht und billig zu beschaffen war. Für Putze sind Gräser besser geeignet als Getreidestroh /23/.

### 3.3.2.3 HANF

Die starken Hanffasern wurden im Lehm-Bau sehr geschätzt und meist nicht untergemischt, sondern in Längsrichtung mitgestampft oder in Mörtelfugen eingelegt. Die Fasern sperren nicht und verbinden sich gut. Ganze Stängel werden in zugbeanspruchten Bauteilen und Hausecken verwendet. Mit Hanfstricken werden Zwischenhölzer und Starke befestigt, auch zu Zwischengittern für beworfene Ausfachungen werden sie verwoben. Die kurzen Faserabfälle aus der Seilproduktion haben im Lehm-Bau als Magerung und Bewehrung in Putzen u.ä. Verwendung gefunden /23/.

#### **3.3.2.4 JUTE**

Jutefasern sind in Europa in Matten gewoben erhältlich. Sie finden Verwendung als reißfeste, gut haftende Putzeinlage. Taucht man Jutematten in Schlämme, können damit Holz- oder andere Teile verkleidet werden. Bröselige Putze werden mit gelehnten Jutebahnen saniert. Auch plastische Oberflächengestaltungen sind damit möglich. In den Herstellungsländern der Jute werden lose Jutefasern traditionell dem Lehmörtel zugesetzt /23/.

#### **3.3.2.5 KUNSTFASERN**

Von amerikanischen und australischen Lehmbaufirmen wurden verschiedene Kunstfasern verwendet, soweit bekannt hauptsächlich für dünne Fertigteile. Der große Vorteil besteht in der Unvergänglichkeit und den sehr hohen Festigkeiten, der Nachteil in der geringen Haftung und den hohen Kosten der Fasern /23/.

#### **3.3.2.6 GLASFASERN**

Kuppelkonstruktionen können mit Glasfaservlies zur Polyesterverarbeitung, schichtweise mit Lehm aufgebracht, auf eine Schalung hergestellt werden. Bereits hergestellte Kuppeln weisen eine Höhe von 5 m und im Scheitel eine Dicke von 9 cm auf. Der Wetterschutz besteht aus der silikonisierten Oberfläche nach dem Trocknen /23/.

### 3.3.3 Kurzfaserige Stoffe

Bei einer Faserlänge von  $< 5$  cm spricht man von kurzen Fasern. Die Zugabe von kurzfaserigen Stoffen als Zuschlag dient hauptsächlich zur Magerung und Wärmedämmung. Im Verputz wirken sie der Rissbildung entgegen und bilden stabilere und abriebfestere Oberflächen /23/.

Mögliche kurzfaserige Zuschlagstoffe:

- Haare
- Baumnadeln
- Flachsscheben
- Hanfwolle
- Strohhäcksel
- Strohmehl
- Spreu

#### 3.3.3.1 HAARE

Haare als Zuschlagstoff haben eine lange Tradition und sind weit verbreitet. Sie sind besonders dünn, anpassungsfähig, reißfest und halten sehr gut im Lehm. Möglicherweise gehen sie auch eine chemische Bindung mit dem Lehm ein. Haarmörtel ergibt in sehr dünnen Schichten einen festen Verputz. Reh- und Sauborsten waren für die stark dehnungsbeanspruchten Mörtelfugen im Ofenbau traditionell in Verwendung /23/.

#### 3.3.3.2 BAUMNADELN

Für Putzmörtel und Mauermörtel werden Baumnadeln verwendet. Die langen Kiefernadeln sind im Putz besser geeignet als Strohhäcksel, da sie nicht schimmeln, verrotten und besser haften. Mit höheren Zuschlaganteil findet Nadelleichtlehm als Deckenfüllung Verwendung und als elastische und dämmende Schicht unter Estrichen. Die weniger festen Fichtennadeln sind häufig als Füllstoff, zusammen mit anderen Faserstoffen, zur stärkeren Magerung in der Anwendung /23/.

### **3.3.3.3 FLACHSSCHEBEN**

Flachsscheben sind ein Abfallprodukt der Leinenherstellung mit einer Länge von ca. 10 bis 20 mm und einem Durchmesser von  $< 1,0$  mm. Die Scheben lassen sich gut untermischen, verfilzen sich und erhöhen die Zugfestigkeit beträchtlich. Nicht nur für Verputze, für die Flachs gerade noch ausreichend geschmeidig ist, auch für ganze Bauteile ist dieser Zuschlag gut einsetzbar. Die sehr feinen Fasern der Flachsschebe bringen eine große Haftfläche pro Masse, eine große Verfestigungswirkung und verringern auch die Wärmeleitung mehr als andere nicht hohle Fasern, da sich in der feinen, wollähnlichen Struktur viele kleine Luftporen bilden. Flachsscheben sind trotz ihrer kurzen Faserlänge sogar als armierender Zuschlag für Überlager verwendbar. Ein großer, praktischer Vorteil besteht darin, dass sie auch in großen Mengen leicht und billig zu beschaffen sind (im Gegensatz zu Rehhaaren und Kiefernadeln) /23/.

### **3.3.3.4 HANFWOLLE**

Hanfwolle ist ein Abfallprodukt aus der Hanfseileproduktion. Sie ist spröder als Flachs, kann aber genauso verwendet werden. Früher wurden lange Hanffasern als eine Art Zugbewehrung eingesetzt. Heute ist der Hanf teuer geworden und nicht in großen Mengen erhältlich /23/.

Hanfwolle wird unter anderem zur Herstellung von Dämmplatten (z.B. von der Firma isover) verwendet.

### **3.3.3.5 STROHHÄCKSEL**

Wird Stroh sehr kurz gehäckselt, kann es als Mörtelzuschlag verwendet werden. Das bedingt zwar etwas stärkere Putzschichten, bringt aber kontaktarme und rissfreie Oberflächen. Die kurzen, etwa 2 bis 3 cm langen, gespaltenen Halme stabiler Stroharten kommen in Putzschichten parallel zur Oberfläche zu liegen, verfilzen sich und bewirken erosionsbeständige, wasserabweisende Bauteiloberflächen. Bei großem Strohäckselanteil wird die Oberfläche druckempfindlich /23/.

### 3.3.3.6 STROHMEHL

Die unterschiedlich langen Strohfasern enthalten keine Hohlräume mehr. Der mehlartige Anteil bewirkt eine Feuchtigkeitsbindung im Lehm bei geringem Quellen. Die Kombination aus langen Fasern (< 10 cm) und Mehllanteil, bewirkt eine Erhöhung der Anfangsfestigkeit. Gleichzeitig wird aber das Wasser im Lehm länger gespeichert. Bei feuchtem Wetter erhöht sich dabei die Schimmelgefahr. Als Zuschlag zum Verputz wurden mit Strohmehl sehr gute Erfahrungen gemacht. Die Fasern sind leicht erhältlich, biegsam, verfilzen sich gut. Die Oberfläche bleibt rissfrei und wird härter als bei Sandzugabe /23/.

### 3.3.3.7 SPREU

Spreu wird als dämmender und magernder Zuschlag verwendet, vor allem für unbelastete Leichtlehmfüllungen in Decken, da die Zugfestigkeit wenig verbessert und die Druckfestigkeit stark reduziert wird. Die „schalige“ Form der Spreu hat eine Abmessung von ca. 3 mm mal 1,5 mm. In Verbindung mit langfaserigen Zuschlägen wird Spreu häufig auch in tragenden Bauteilen eingesetzt /23/.

## 3.3.4 Holzige Stoffe

Holzartige Zuschläge bilden weniger Poren als die meisten Faserstoffe, verbessern die Zugfestigkeit zumeist wenig, sind aber kaum verrottungsanfällig und bringen hohe Druckfestigkeiten auch bei leichten Mischungen /23/.

Mögliche holzige Zuschlagstoffe:

- Sägescharten
- Hobelscharten
- Hackschnitzel
- Schwachholz
- Staken
- Papier
- Schilf

#### **3.3.4.1 SÄGESCHARTEN**

Sägescharten (< 1,0 mm) werden zur Magerung von Lehmestrichen und Putzmörtel beigegeben. Die Oberflächen werden abriebfester. Bei zu hohen Anteilen wird die Oberfläche druckempfindlicher. Eine Verwendung im Verputz wird oft problematisch, da Sägescharten stark quellen und bei Feuchtigkeitseinwirkung Schäden verursachen können. In Lehmbauteilen hat die stark feuchtigkeitsbindende Wirkung wiederum den Vorteil der höheren Anfangsfestigkeiten bei leichter Verarbeitung. Meist werden Sägescharten mit anderen pflanzlichen Zuschlägen zusammen verwendet /23/.

#### **3.3.4.2 HOBELSCHARTEN**

In Lehmschlämme getränkte Hobelscharten (Länge von ca. 15 mm und einer Dicke von < 0,5 mm), eignen sich sehr gut als wärmedämmendes Füllmaterial in Decken und Dachausfachungen. Es sind sehr leichte Mischungen möglich, die Druckfestigkeit ist allerdings gering, und auch die armierende Wirkung ist nicht so gut wie bei Faserstoffen. Der Lehm dient bei sehr leichten, unverdichteten Schüttungen nur der feuerbeständigen Umhüllung der Späne und der formbeständigen Verklebung. Hobelscharten werden am besten mit faserigen Zuschlägen gemischt. Versuche steife Platten mit Hobelscharten und breiigen Schlämmen, ähnlich den magnesitgebundenen Holzwolleleichtplatten herzustellen, schlugen bisher fehl. Holzwolle wäre als Lehmzuschlag besser geeignet, da sie die Zugfestigkeit verbessert, sie ist aber schwerer erhältlich /23/.

#### **3.3.4.3 HACKSCHNITZEL**

Die Verwendung von Hackschnitzel (Länge von ca. 15 bis 20 mm und einer Dicke von ca. 1 mm) ist relativ neu, hat sich aber schon bewährt. Holzleichtlehme wurden bis jetzt nur für nicht tragende Ausfachungen verwendet. Die Druckfestigkeit ist aber verglichen mit anderen dämmenden Zuschlägen sehr gut, da Holz in sich stabil ist und sich die scharfkantigen Schnitzel gut verkeilen. Die Zugfestigkeit ist, verglichen mit Strohleichtlehm gering. Die Anschaffungskosten rindenfreier Hackschnitzel sind zwar höher als bei pflanzlichen Faserstoffen, die leichte maschinelle Verarbeitung ermöglicht aber wesentlich kürzere Arbeitszeiten.

In Holzleichteilmwänden gibt es keinerlei Setzungserscheinungen. Werden die Holzschnitzel wirklich trocken zugegeben, so entziehen sie zuerst dem Lehm Feuchtigkeit. Das Quellen des Holzes gleicht das Schrumpfen des Lehmanteiles aus. Die Trockenzeiten sind wesentlich kürzer als bei Strohleichteilmen. Stampfwände mit Holzzuschlag lassen sich aber nicht sofort ausschalen, da sich Hackschnitzel nicht gut verfilzen und der Lehm die Teile erst verbinden muss. Die Anfangsfestigkeit kann jedoch mit Sägescharten wegen des Wasserentzugs verbessert werden.

Die Wärmeleitzaht liegt im Allgemeinen etwas höher als bei Lehmmischungen mit gleichem Gewichtsanteil Stroh und ist stark vom Verdichtungsgrad abhängig /23/.

#### **3.3.4.4 SCHWACHHOLZ**

Nadelreisig, Birkenreisig, Strauchschnitt, Weidenruten u.ä. werden gemeinsam mit Stroh entsprechender Schnittlänge, als etwas stabilerer Zuschlag verwendet. Im Ganzen wird Schwachholz (Dicke von ca. 5 mm bis 40 mm) als Einlage in Stampfwänden und Mörtelfugen eingesetzt. Bei belasteten Deckenfüllungen und Faserlehmstützen empfiehlt sich ebenfalls das schichtenweise Einarbeiten von holzigen Stoffen oder anderen starken Fasern /23/.

#### **3.3.4.5 STAKEN**

Dickere Holzstäbe, Knüppelholz u.ä. sind nicht eigentliche Zuschläge, sie werden als Zugbewehrung in Lehmbauteilen eingesetzt /23/. Ein Verbund zwischen Staken (Dicke von 20 mm bis 40 mm) und Lehm wurde bis jetzt allerdings nicht nachgewiesen.

#### **3.3.4.6 PAPIER**

Mit Papierschnitzeln und ähnlichen Abfällen lässt sich gut dämmender Leichtlehm für unbelastete Füllungen herstellen. Eine leichte, steife Papierlehmischung ist gleichzeitig so geschmeidig und klebkräftig, dass sie sich ohne Schalung anwerfen bzw. aufspritzen lässt. Durch Zugabe von feinen Papierschnitzeln und Öl, lässt sich ein Lehmkitt herstellen, mit dem Risse und Fugen gut gedichtet werden können /23/.

### 3.3.4.7 SCHILF

Werden in Lehmschlämme getauchte Schilfrohre (Dicke von ca. 5 mm bis 15 mm) gebündelt eingebaut, wird dieser brand- und verrottungsbeständige Dämmstoff auch winddicht verbunden und braucht keine weitere Befestigung als Ausfachung. Aus kreuzweise, mit Massivlehm verpressten Schilfrohrmatten, werden stabile Lehmfertigteile hergestellt. In arabischen Ländern werden gespaltene Schilfrohre in verschiedenen Bauweisen als Zugverstärkung eingesetzt /23/.

### 3.3.5 Mineralisch- dämmende Zuschläge

Leichte mineralische Zuschläge bieten gegenüber organischen Dämmstoffen einige Vorteile.

Vorteile:

- höhere Druckfestigkeit
- Brandsicherheit
- keine Verrottungs- oder Schimmelgefahr
- einfache maschinelle Aufbereitung
- exakte Steuerung der Dichte

Nachteile:

- längere Ausschulfristen
- höhere Wasseraufnahme
- geringe Zug- und Kantfestigkeit
- höhere Materialkosten
- Lizenzgebühren

Mögliche mineralisch dämmende Zuschläge:

- Blähton
- Perlite
- Hüttenbims
- Bims
- Lava

### **3.3.5.1 BLÄHTON**

Blähton ist ein hochwertiger, druckfester Leichtzuschlag mit einem Durchmesser von < 10 mm, der allerdings wie alle geblähten Zuschläge einen hohen Primärenergieeinsatz erfordert. Die Einbindung der glatten Körner ist schlecht und die kugelige Kornform statisch ungünstig. Dennoch erreichen Mineralleichtlehme durch die hohe Eigenfestigkeit des Zuschlages, verglichen mit Strohlehm, hohe Druckfestigkeiten. Blähtonzuschläge eignen sich daher auch für tragende Bauweisen sowie für dämmende Lehmeestriche und andere belastete Fußbodenkonstruktionen. Die Blähtonpartikel verbinden sich nicht mechanisch wie die Faserstoffe, daher können Bauteile erst ausgeschalt werden, wenn der Lehm so weit abgetrocknet ist, dass er die Körner bindet. Der Schalungsaufwand steigt dadurch erheblich gegenüber z.B.: Strohleichtlehm. Blähton wird auch als wasserbindendes Substrat bei Dachbegrünungen verwendet. Diese Eigenschaft ist aber im Lehmabau nicht erwünscht. Bei zu hohem Zuschlaganteil steigt die Gleichgewichtsfeuchte und damit die Wärmeleitfähigkeit an, denn der Lehmanteil, der die Bauteilfeuchte und das Kondenswasser aus dem Innenbereich kapillar ableiten soll, ist bei Mineralleichtlehm nur gering /23/.

### **3.3.5.2 PERLITE**

Die rauen Perlitkörner haben einen Durchmesser von 1 bis 2 mm und bringen eine verbesserte Oberflächenfestigkeit des Mineralleichtlechmes. Die Druckfestigkeit der Bauteile ist aber bei hohen Perlitanteilen sehr gering /23/.

### **3.3.5.3 HÜTTENBIMS**

Zuschlag von geschäumten Hochofenschlacke haben einen Durchmesser von 1 bis 2 mm mit meist splittartigen, rauen Körnern ergibt bessere Druckfestigkeiten als Blähton, allerdings sind die Dichte und die Wärmeleitung höher /23/.

#### **3.3.5.4 BIMS**

Bims mit einem Durchmesser von ca. 1 bis 2 mm kann mit geringem Energieaufwand abgebaut werden und zeigt geringere Dichten als z.B.: Blähton. Die Wasseraufnahme ist doppelt so hoch, die Kornfestigkeit jedoch niedrig. Für dämmende Putze ist Naturbims ein geeigneter Zuschlag. Europäische Vorkommen zeigen aber teilweise stark erhöhte Radioaktivität. Griechischer und türkischer Naturbims sind dadurch nicht belastet und etwas fester /23/.

#### **3.3.5.5 LAVA**

Grobporige, basaltische Lava, hat einen Durchmesser von ca. 5 mm, und ist für tragende Bauweisen, ein ausreichend stabiler natürlicher mineralischer Zuschlag /23/.

## 4 Vorversuche

Als Vorversuche sind jene Versuche zu bezeichnen, welche zur „Richtungsbestimmung“ notwendig sind. Speziell im Lehm- und Ziegelbau, wo es keine modernen, genormten, Versuchsanordnungen zur Bestimmung von baustoffrelevanten Lehmeigenschaften gibt, ist Kreativität gefragt. Die Vorversuche orientieren sich hauptsächlich an den zu untersuchenden Eigenschaften, wie z.B. Druckfestigkeit und Schwindverhalten, an den Möglichkeiten des Labors und dem selbst gesetzten Zeithorizont. Oft sind solche Vorversuche nur nach der Try and Error – Methode zu optimieren und können dementsprechend sehr viel Zeit in Anspruch nehmen.

Vorversuche dienen hauptsächlich dazu, folgende Punkte zu klären:

- Festlegen des Probekörpers
- Auswahl der Additive
- Festlegen der Prüfparameter
- Optimierung der Versuchsanordnung
- weitere Vorgehensweise

### 4.1 Der Probekörper

Am Beginn der Arbeit stand die Frage: Welche Form der Prüfkörper aufweisen soll, um möglichst realistische und brauchbare Werte für die spätere industrielle Anwendung, der Herstellung eines Lehmziegels, zu erhalten? Neben der technischen Realisierung gab es vorher noch eher praktischerorientierte Fragen zu klären, um den gestellten Zeitrahmen einhalten zu können.

- Festlegung der idealen Probekörperform
- Aufbereitung des Lehmes zur Herstellung des Probekörpers
- Herstellung des Probekörpers
- Dauer der Trocknung des Probekörpers

### 4.1.1 Festlegen der idealen Probekörperform

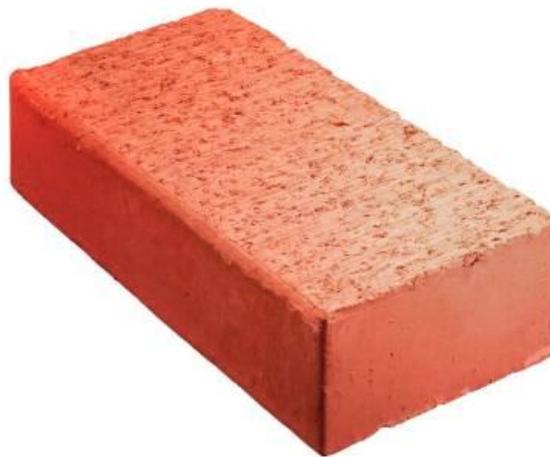
Das Aussehen des Probekörpers hat Auswirkung auf die Versuchsanordnung, auf die Herstellung der Probekörper und auf die Interpretation der Ergebnisse. Neben der Herstellungszeit (Aufbereitung, Menge, Trocknungsdauer, Form) war auch das Prüfverfahren ein wichtiges Entscheidungskriterium für die Form der Probekörper.

Um eine optimale Probekörperform zu finden, war es notwendig verschieden Formen auszuprobieren.

- Lehmstein – als Mauerziegel ( $d = 12,0 \text{ cm} * l = 25,0 \text{ cm} * h = 6,5 \text{ cm}$ )
- Lehmstein – als Prismenform ( $d = 4,0 \text{ cm} * l = 16,0 \text{ cm} * h = 4,0 \text{ cm}$ )

#### 4.1.1.1 LEHMSTEIN IN FORM EINES GEBRANNTEN MAUERZIEGELS

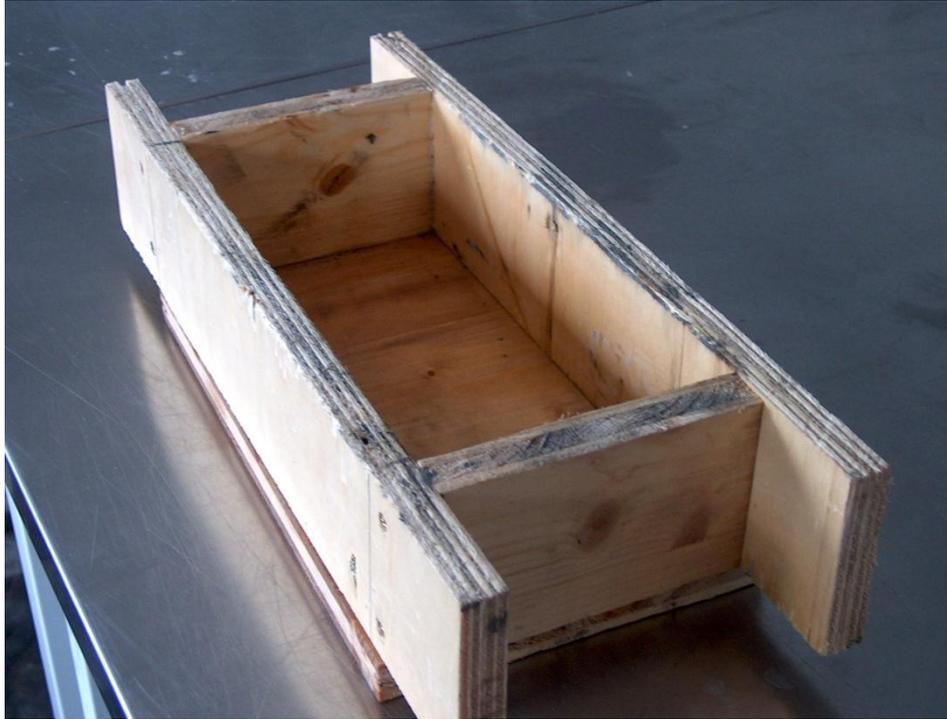
Die ursprüngliche Idee, die dieser Diplomarbeit voran ging, war die Entwicklung eines Lehmsteines, der zur Errichtung eines Einfamilienhauses oder eines Mehrfamilienhauses herangezogen werden kann. Aus diesem Grund wurde als erste Idee betreffend der Form des Prüfkörpers an einen normalformatigen Mauerziegel gedacht. In der Abbildung 4-1 sieht man einen gebrannten Mauerziegel der Firma Wienerberger /29/ mit folgenden Abmessungen:  $D = 12 \text{ cm}$ ,  $L = 25 \text{ cm}$  und  $H = 6,5 \text{ cm}$ . Der Ziegel hat ein Stückgewicht von ca. 2,9 kg.



**Abbildung 4-1** Normalformatiger Mauerziegel

### Erster Versuch zur Herstellung eines Lehmsteines als Mauerziegels

Es wurde versucht, Lehmsteine in Form eines Mauerziegels herzustellen. Als Schalung dienten schlichte, geschraubte Holzschalungen wie sie in der Abbildung 4-2 zu sehen sind, mit folgenden Abmessungen:  $d = 12 \text{ cm}$ ,  $l = 25 \text{ cm}$  und  $h = 7,5 \text{ cm}$ .



**Abbildung 4-2** Holzform für einen normalformatigen Lehmstein

Um eine ungefähre Richtzeit zu haben, wie lange ein normalformatiger Lehmstein trocknet, wurde ein einzelner Lehmstein ohne Zusatzstoffe hergestellt.

Für diesen Versuch wurden 4,5 kg Lehm, mit 4 mm und 8 mm Korndurchmesser, mit 1,5 Liter Wasser, mittels Handkneten zu einer homogenen Lehmmasse verarbeitet. Die Masse war sehr durchfeuchtet. Danach wurde der Lehm in die Holzschalung mit einem Holzstößel gestampft und im Trockenschrank bei  $50 \text{ °C}$  getrocknet. Nach 9 Tagen im Trockenschrank wurde der Probekörper zerstört. Er war innen feucht, lediglich eine 1 cm dicke Randschicht war trocken.

Die Hauptursache für den schlechten Trockenzustand war das zu feuchte Ausgangsprodukt, also eine schlechte Aufbereitungsmethode.

### Herstellung von fünf normalformatigen Lehmsteinen

Um die Trocknungszeit zu verkürzen, wurde jetzt eine andere Aufbereitungsmethode verwendet. Ein Kübel wurde mit Lehmkörnern von 16 mm Durchmesser zu 2/3 gefüllt. Danach wurde so viel Wasser beigemischt, dass der Lehm 5 cm überdeckt war. Diese Mischung wurde einen Tag und eine Nacht stehen gelassen und immer wieder mittels eines Holzstabes durchmischt. So entstand eine schlammige, sehr feuchte Lehmmischung. Um einen verarbeitbaren „trockenen“ Lehm zu bekommen, wurden jetzt Lehmkörner mit einem Durchmesser von 4 mm und 8 mm dazugemischt. So entstand eine nicht zu feuchte Lehmmischung mit einem sehr guten plastischen Gefüge, ohne Festkörperanteile und Störkörper. Die Untermischung erfolgte händisch. Die so entstandene Lehmmischung wurde von Hand und mittels Holzstößel in 5 Formen gestampft.

Die 5 Lehmsteine in Mauerziegelformat wurden danach 6 Tage, bei 80 % Luftfeuchtigkeit und 50 °C, und 40 Tage, bei 50 % Luftfeuchtigkeit und 40 °C, getrocknet. Die Tabelle 4-1 soll einen Überblick über die Gewichtsverteilung im nassen und im trockenen Zustand geben.

**Tabelle 4-1** Übersichtstabelle zur Herstellung von Mauerwerk-Lehmsteine

Bezeichnung	Gewicht, nass [g]	Gewicht, nass [g]	Gewicht, trocken [g]	Gewichtsverlust nach 46 Tagen [%]
	0 Tage	6 Tage 80% LF 40°C	46 Tage 50% LF 40°C	
NZ 1	4495,00	3864,50	3533,40	-21,4
NZ 2	4615,50	4093,00	3576,10	-22,5
NZ 3	4598,50	3974,00	3619,10	-21,3
NZ 4	4530,50	4039,00	3573,80	-21,1
NZ 5	4359,50	3825,00	3375,10	-22,6

Die Tabelle macht den sehr hohen feuchtigkeitsbedingten Gewichtsverlust von ca. 21 % sichtbar. Dieser Feuchtigkeitsverlust ist durch die Aufbereitung des Lehmes bedingt.

Auch hier sieht man, dass das optimale Verhalten von Lehmsteingröße und Trocknungsdauer noch nicht gefunden wurde. Der Lehm wurde nicht so feucht aufbereitet, wie beim ersten Versuch, die Trocknungsdauer von ca. 46 Tagen ist aber weiterhin viel zu hoch.

### Herstellung von einem Mauerziegel mit einer Presse

Ein weiterer Versuch, Lehmsteine in Mauerziegelformat sehr einfach herzustellen, war das Verpressen ohne Feuchtigkeitszugabe. Lehmkörner von der Halde, mit einem Durchmesser von 4 mm wurden einfach in die Holzform geschüttet. Danach wurde mit einer Presse solange verdichtet, bis die Holzform zu brechen drohte. Die Dicke des Steines reduzierte sich von 7,5 auf 5,5 cm. Der Lehmziegel wurde 6 Tage, bei 80 % Luftfeuchtigkeit und 50 °C sowie 40 Tage, bei 50 % Luftfeuchtigkeit und 40 °C, getrocknet.

Das Nassgewicht von 3050 g reduzierte sich im trockenen Zustand auf 2409 g. Das entspricht einem Feuchtigkeitsverlust von ca. 21 %.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das Vorhaben, Mauerziegel als Versuchskörper zu nehmen, nicht geglückt ist. Die Aufbereitung des Lehmes, um ihn dann von Hand in Holzschalungen zu verdichten, erfolgt für die Größe des Steines viel zu feucht. Der hohe Wassergehalt bewirkt eine zu lange Trocknungsdauer.

#### **4.1.1.2 LEHMSTEINE IN FORM VON PRISMEN**

Nachdem Lehmsteine in Form von gebrannten Mauerziegeln als Probekörper nicht infrage kamen, wurden neue, mögliche Probekörperformen gesucht. Eine viel versprechende Form ist die Prismenform wie sie auch in der Zementprüfung /18/ verwendet wird. Im Gegensatz zu den Mauerziegeln ist diese Form kleiner und es existieren bereits genormte Versuche für diesen Prüfkörper aus der Betonprüfung. Ein Vergleich mit bereits bestehenden Baustoffen wäre damit möglich.

Die Abmessung der Prismenform lautet 4 cm \* 4 cm \* 16 cm. Das Volumen gegenüber dem Mauerziegel reduzierte sich dabei um 87 %. Ein weiterer Vorteil der Prismenform ist, das Vorhanden sein von Stahlformen (siehe Abbildung 4-3) aus der Betonprüfung.

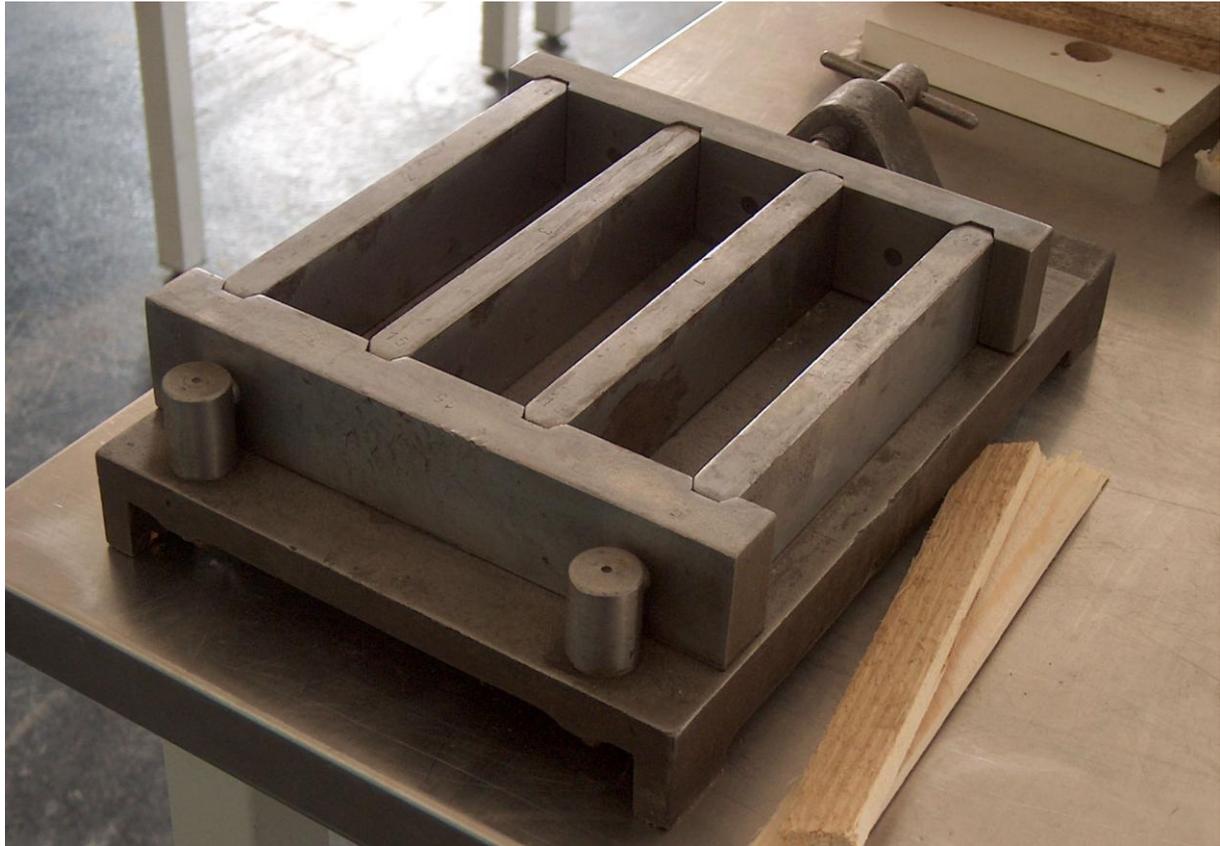


Abbildung 4-3 Stahlform für Prismen Probekörper

#### Erster Versuch zur Herstellung von Lehmprismen

Um zu überprüfen, ob sich die Trocknungszeit gegenüber dem Mauerstein entscheidend verbessert, wurde für die ersten Versuche die Aufbereitung des Lehmes so gemacht, wie bei den Mauersteinen. Feuchter Lehm (aus dem Wasserkübel) wurde mit trockenem Lehm (Korndurchmesser ca. 4 mm) solange vermischt, bis er eine Konsistenz erreicht hatte in der er gestampft werden konnte.

Nach dem Ausschalen wurden die Prismen gewogen und vermessen (Breite, Dicke und Länge). Danach wurden sie in einem Trockenschrank bei 50 °C getrocknet. Nach 4 Tagen erreichten sie ihr Trockengewicht. Der Trockenzustand nach bereits 4 Tagen zeigte eine deutliche Verbesserung im Gegensatz zum Mauerziegelformat. Aus der Abbildung 4-4 geht ein deutlicher Größenunterschied zwischen Mauerstein und Lehmprismen hervor.

Auf Grund dieser Ergebnisse war die Prüfkörperform gefunden. Für alle weiteren Versuche wurden also Probekörper mit einer Prismenform (4 cm \* 4 cm \* 16 cm) hergestellt.



**Abbildung 4-4** Vergleich Lehmstein in Mauerziegelformat zu Lehmprisma

#### 4.1.2 Aufbereitung des Lehmes zur Herstellung des Probekörpers

In dem Kapitel 4.1.1 wurden zur Probekörperherstellung sehr feuchte, von Hand aufbereitete Lehmmischungen verwendet. Diese Art der Aufbereitung war für die ersten Versuche zweckmäßig, ist aber auf Grund des hohen und stark schwankenden Feuchtigkeitsgehaltes nicht geeignet, um viele Probekörper an unterschiedlichen Tagen herzustellen.

In diesem Kapitel geht es darum, die Aufbereitung des Lehmes so zu gestalten, dass gleichbleibende Bedingungen zur Probekörperherstellung geschaffen werden. Der aufbereitete

Lehm soll für alle Proben folgende Eigenschaften haben:

- gleicher Feuchtigkeitsgehalt, gleiche Konsistenz
- gleiche Herstellungsart
- gleichmäßige Verteilung der Additive.

Der Lehm, der in dieser Diplomarbeit auf seine Druckfestigkeit zu untersuchen war, wurde von der Firma Wienerberger Österreich (Werk Hennersdorf) zur Verfügung gestellt und in Säcken direkt von der Halde, d.h. im erdfeuchten Zustand, geliefert. Die Korndurchmesser von 0 mm bis 15 cm (faustgroße, harte Brocken) machte eine mechanische Zerkleinerung unbedingt notwendig.

Das in Folge zur Verfügung stehende, gesiebte Lehmmaterial, mit einem Korndurchmesser von 0 mm bis 5 mm, ist weitaus unproblematischer zu behandeln, als das Ausgangsprodukt von der Halde und ermöglicht dadurch eine raschere und qualitative höhere Aufbereitung.

Die Aufbereitung des Lehmes für die Herstellung von Prüfkörperformen erfolgte immer nach den gleichen Maßstäben, um eine bessere Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse (unterschiedliche Herstellungstage) zu gewährleisten. Die Menge Lehm, die an einem Tag auf Grund der Versuchsanordnung benötigt wurde, wurde gewogen und in einen Kübel geleert. Während des Durchmischens (des Lehmes) mit einem Rührwerk der Firma Pro Tool (Rührwerk MXP 1602), siehe Abbildung 4-5, wurden 10 % Wasser, bezogen auf das Lehmgewicht, langsam zugegeben. Der zuerst körnige Lehm verwandelte sich zu einer plastischen, gut verarbeitbaren, aber nicht zu feuchten Masse ohne fühlbares Korngefüge.



**Abbildung 4-5** Rührwerk der Firma Pro Tool

Die so erzielte Konsistenz, ist bei allen weiteren Versuchen weitest gehend gleich geblieben. Mit diesem Ausgangsprodukt wird die so genannte 0-Probe hergestellt. Die 0- Probe ist also nichts anderes, als aufbereiteter Lehm. Mischungen mit Additiven werden so hergestellt, dass zu der 0-Probe die Prozentsätze der Additive, mit dem Rührwerk so vermischt werden, dass sich keine „Nester“ der dazu gemischten Stoffe bilden können. Eine gleichmäßige Durchmischung ist neben der Aufbereitung das Wichtigste, um seriöse Aussagen über die Wirkungsweise der Stoffe im Lehm zu erhalten. Bei hohen Prozentsätzen (z.B. ab 10,0 % Tennismehl und 10,0 % Strohspäne) ist es bei manchen Zusätzen notwendig, die Aufbereitung feuchter zu gestalten, damit sich der Lehm mit dem Zusatzstoff verbinden kann. Eine zusätzliche notwendige Wasserzugabe, um den Lehm feuchter aufzubereiten, erfolgte zugleich mit der Zugabe des Zusatzstoffes.

### 4.1.3 Herstellung des Probekörpers

Im Kapitel 4.1.1 wurde die richtige Probekörperform gefunden. Das Prisma mit den Abmessungen von  $4 * 4 * 16$  cm hat sich als ideal herausgestellt.

Dadurch, dass sich die Herstellung der Proben über einige Monate erstreckte und nicht an einem Tag gemacht werden konnte, war neben der gleichen Aufbereitung des Lehm auch eine gleiche Herstellungsmethode unbedingt notwendig. Die Aufbereitung des Lehm ist im Kapitel 4.1.2 ausführlich beschrieben.

Eine gleichwertige Probekörperherstellung an verschiedene Tagen, im Sinne der Form und der Verarbeitungsqualität, ist für das Gelingen der Versuche unbedingt notwendig. Dies ist deshalb so wichtig, um vergleichbare Aussagen über die Materialeigenschaften feststellen zu können. Für die Herstellung der Probekörper werden Stahlschalungen verwendet (siehe Abbildung 4-3). Diese garantieren die Formgleichheit (Abmessungen) der Probekörper. Die Stahlformen werden als erstes mit einem Schalungsöl benetzt, um ein leichtes Lösen der Form vom Probekörper zu ermöglichen. Der aufbereitete Lehm mit oder ohne Additive wird in drei bis vier Schichten, von Hand, in die Form gedrückt. Jede einzelne Schicht wird mit einem Stößel aus Holz verdichtet, so dass sich keine Hohlräume, speziell in den Ecken, bilden können. Die letzte Schicht ist so zu stampfen, dass eine leichte Überhöhung der Schalung erreicht wird. Dadurch ist ein Abziehen mit einem Stahllineal möglich. Nach dem Verdichten wird der Probekörper sofort ausgeschalt, vermessen, gewogen und mit einem Messer, durch eine Buchstaben-Zahlenkombination, an der Stirnseite beschriftet. Die Stahlschalung wird mit Wasser gereinigt und trocken gewischt. Das Abmessen und das Beschriften der Probe, ist für eine lückenlose Dokumentation der Lehmprismen, von der Herstellung bis zur Prüfung notwendig.

#### 4.1.4 Trocknung des Probekörpers

Nachdem die Fragen der optimalen Aufbereitung des Lehmes und der Probekörperherstellung beantwortet wurde, bleibt nur mehr die der richtigen Trocknung, um einen prüfbaren Probekörper zu bekommen. Die Trocknung ist deshalb so wichtig, weil mit einer zu raschen Trocknung der Lehmkörper Risse bekommen kann und daher schon vor der Zerstörungsprobe schadhaf ist. Ein zu langsames Trocken, ist zwar für den Probekörper nicht schlecht, aber zeitaufwendig. Ein goldener Mittelweg ist also gefragt.

Um die Druckfestigkeit der Probekörper im trockenen Zustand prüfen zu können, ist es erforderlich, dass die Proben innerlich „staubtrocken“ sind. Um diesen Zustand so rasch wie möglich und gleichzeitig so schonend wie möglich, für den Werkstoff Lehm zu erreichen, wurden die Proben in einem Klimaschrank von der Firma WTB Binder Labortechnik GmbH bei 40 °C und 50 % Luftfeuchtigkeit getrocknet. Die notwendige Trocknungsdauer wurde mit mehreren, eigenen dafür hergestellten Lehmprismen überprüft und betrug ca. 4 Tage. Bevor die Proben zerstört wurden, um die Trockenheit visuell zu überprüfen, wurden sie auch gewogen, um eine zukünftige Überprüfung des Trockengewichtes auch ohne Zerstörung möglich zu machen. Die Feuchtigkeitsabgabe der 0 Probe von der Herstellung bis zur Prüfung betrug ca. 22,7 % oder 108 g.

#### 4.2 Auswahl der Zusatzmittel und Zusatzstoffe

Die Literaturrecherche im Kapitel 3 ergab viele Additive mit denen eine mögliche Erhöhung der Druckfestigkeit in Lehmsteinen möglich erscheint. Aus zeitlichen Gründen wurde die Anzahl der Additive auf fünf Zusatzstoffe beschränkt. Die Auswahlkriterien der Additive wurden in Absprache mit der Firma Wienerberger getätigt.

Auswahlkriterien für mögliche Additive:

- ökologischer Gesichtspunkt
- Verfügbarkeit
- geringe Kosten
- industrielle Verarbeitbarkeit

Die oben genannten Vorraussetzungen ergaben dann folgende Additive die getestet wurden.

- **Strohspäne:** Strohlänge ca. 0.5 bis 2 cm,  
Firma Fex, ÖKO Faserverarbeitung, Neusiedl an der Taya,  
[www.fex.at](http://www.fex.at), [fex.neusiedl@aon.at](mailto:fex.neusiedl@aon.at), 02533/810210
- **Natronwasserglas:** Firma W. Neuber´s Enkel Groß-Drogerie, Wien  
[www.neubers-enkel.at](http://www.neubers-enkel.at), 01/597666868
- **Spezial-Wasserglas:** 2 Komponenten-Wasserglas,  
Firma Wienerberger Österreich, Werk Hennersdorf  
[www.wienerberger.at](http://www.wienerberger.at)  
Dr. Stimmeder, [gottfried.stimmeder@wienerberger.com](mailto:gottfried.stimmeder@wienerberger.com),  
1/60503-382
- **Holzasche:** Biomasseasche aus reinem Hackgut ohne Rinde  
Standort Biomassewerk ist Wr. Neustadt  
Firma EVN, [www.evn.at](http://www.evn.at)  
Dr. Vitovec, 02236/20012269, 0676/81032269  
Firma Renet, [www.renet.at](http://www.renet.at)
- **Tennismehl:** Korndurchmesser 0-2mm  
Firma Wienerberger Österreich, Werk Hennersdorf,  
[www.wienerberger.at](http://www.wienerberger.at), Dr. Stimmeder,  
[gottfried.stimmeder@wienerberger.com](mailto:gottfried.stimmeder@wienerberger.com), 1/60503-382

### 4.3 Festlegung der Prüfparameter

Prüfparameter dienen dazu Versuche transparent und jederzeit nachvollziehbar zu gestalten. Sorgfältig gewählte Prüfparameter sind die Garantie für einen reibungslosen und raschen Versuchsablauf. Im Gegensatz zu anderen Baustoffen, die bereits als homogene oder natürlich gewachsene Baustoffe aus der Industrie oder Natur vorliegen (Holz, Ziegel, Stein), muss der Lehm erst aufbereitet und in Form gebracht werden, um geprüft werden zu können. Dies macht eine gute Organisation der Arbeitsschritte nötig, um den Arbeitsaufwand so gut wie möglich aber auch so gering wie nötig gestalten zu können.

Die Prüfparameter wurden so gewählt, dass die mechanischen Eigenschaften des Lehmes (0-Probe) und der Lehmmischungen der Probekörper nicht durch die notwendige Zeitoptimierung (bedingt durch die Herstellung des Prüfkörpers) beeinträchtigt wird.

Die Prüfparameter umfassen folgende Punkte:

- Zeitlichen Ablauf festlegen
- Festlegen der zu prüfenden Mischungen
- Herstellung der notwendigen Anzahl an Prüfkörper
- Prüfverfahren

#### 4.3.1 Einteilung des zeitlichen Ablaufes von der Herstellung bis zum Prüfen

In den Kapiteln 4.1.2 bis 4.1.4 wird beschrieben, wie die Probekörper gefertigt wurden. Nach der Herstellung der Lehmprismen, kommt es zur Prüfung der mechanischen Eigenschaften. Nachdem die Probekörper eine Herstellungszeit von ca. 5 Tagen benötigen, hat sich folgender Ablauf als zweckmäßig erwiesen.

Die Einteilung nach dem Herstellungstag erscheint am zweckmäßigsten.

- Mittwoch: Herstellen der Probekörper
- Mittwochabend bis Montagvormittag: Trocknen der Probekörper
- Montag: Messen der Probekörper, Biegezugversuch
- Dienstag: Druckversuch

Die Anzahl der Prüftage (Montag und Dienstag) orientierte sich an der Anzahl der Proben. Die maximale Anzahl an Probekörper, die zu prüfen waren, betrug 39 Stück. Durchschnittlich waren es 30 Proben. So wie die Einteilung getroffen wurde, war durchaus ein zusätzlich zur Verfügung gestelltes Zeitkontingent bei den Prüftagen eingeplant. In den meisten Fällen war das Prüfen der gesamten Proben an einem Tag erledigt.

#### 4.3.2 Einteilung der Mischungsverhältnisse für den Vorversuch

Am Beginn der Vorversuche war es notwendig einmal festzustellen, in welchen Prozentbereichen die Zugabe von Additiven im Hinblick auf eine mögliche Druckerhöhung Sinn hat. Um das heraus zu finden, gab es am Anfang eine sehr grobe Unterteilung der Prozentsätze in „wenig“ (2,0 %), „mittel“ (10,0 %) und „viel“ (20,0 %). Von jedem Additiv wurden am Beginn der Versuche Probekörper mit 2,0 %, 10,0 % und 20,0 % angefertigt, geprüft und mit den Werten der ersten 0-Probe verglichen (alle Prozentangaben sind Massenprozent). Erst danach ergibt sich eine weitere sinnvolle Vorgehensweise, bezüglich der Mischungsverhältnisse. Näheres dazu im Kapitel 4.4 und 4.5.

#### 4.3.3 Anzahl der notwendigen Probekörper

Um Untersuchungsergebnisse statistisch auswerten zu können, sind mindestens drei Probekörper eines Mischungsverhältnisses notwendig. Die drei Probekörper, mit den jeweils gleichen Prozentsätzen an Zuschlagstoffen, werden zu einer Serie zusammengefasst.

Will man z.B. die Auswirkung von 2,0 % Asche auf die Druckfestigkeit untersuchen, stellt man eine Serie her, bei der 2,0 % Asche beigemengt wird. Die daraus resultierenden

Druckfestigkeiten werden mit einer Serie von 0-Proben (ebenfalls drei Probekörper), verglichen. Damit eine Vergleichbarkeit der jeweiligen Mischung mit der 0-Probe gegeben ist, wird sie aus der gleichen Lehmaufbereitung (gleicher Tag) hergestellt. Unregelmäßigkeiten bezüglich der Aufbereitung konnten so größtenteils ausgeschlossen werden. Zur Herstellung einer Serie benötigte man ca. zwei kg Lehm und 200 ml Wasser (100 ml Wasser je kg Lehm).

Meistens wurden an einem Tag drei Serien hergestellt. Damit konnten z.B.: Tennismehl, Holzasche und die 0-Probe verglichen werden. Die einzelnen Additive hatten meist unterschiedliche Prozentsätze, wie in der Tabelle 4-2 gezeigt wird. Am 18.08.2004 wurden drei Serien (D, E, F mit jeweils drei Probekörpern je Serie) hergestellt, Zusatzstoff und Prozentsatz. Von der 0-Probe wurde immer nur eine Serie je Herstellungstag produziert. Das ergibt dann neun Probekörper je Additiv und drei Probekörper für die 0-Probe. In Summe sind das 21 Probekörper.

**Tabelle 4-2** Herstellung von 3 Serien am 18.08.2004

<b>Serie</b>	<b>Tennismehl</b>	<b>Holzasche</b>	<b>0-Probe</b>
<b>D</b>	15,0 %	1,0 %	1 Serie
<b>E</b>	20,0 %	2,0 %	
<b>F</b>	30,0 %	5,0 %	

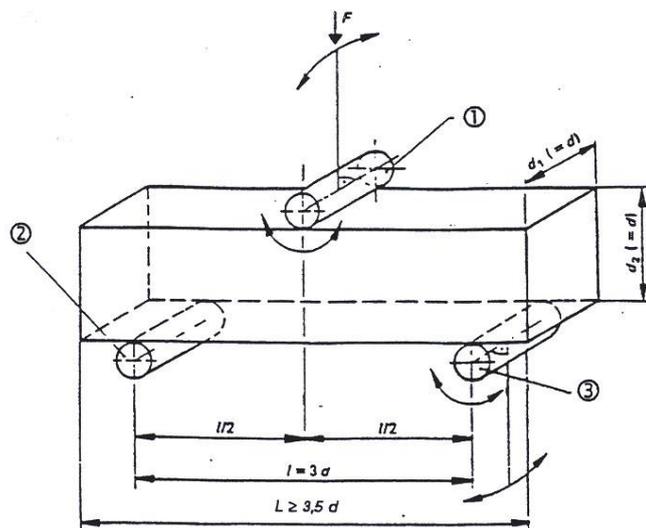
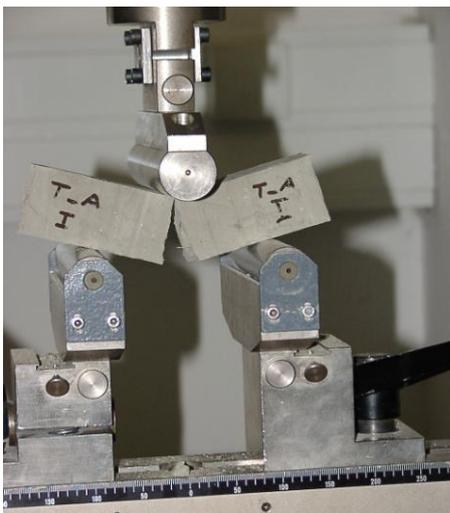
#### 4.3.4 Beschreibung der Prüfverfahren

Die mechanischen Eigenschaften der Probekörper wurden anhand eines Biegezugversuches und eines Druckversuches festgestellt. Auf Grund der Probekörperform wurden die Prüfverfahren aus der Betonprüfung herangezogen und nach den Bedürfnissen der Lehmprüfung abgewandelt. Beide Versuche wurden auf einer Prüfmaschine der Firma Zwick am Institut für Hochbau und Technologie, Zentrum für Baustoffforschung der TU Wien durchgeführt.

#### 4.3.4.1 BIEGEZUGVERSUCH

Die Versuchsanordnung für den Biegezugversuch stammt aus der EN 12390-5 /21/. Prismatische Probekörper werden einem Biegemoment, durch die Lasteintragung, über obere und untere Rollen ausgesetzt. Die aufgenommene Höchstlast ist aufzuzeichnen und die Biegezugfestigkeit zu berechnen. Die Vorrichtung zur Lastaufbringung ist in der Abbildung 4-6 zu sehen.

Der Abstand  $l$  zwischen den äußeren Rollen, muss für die Festbetonprüfung  $3 d$  betragen, wobei  $d$  die Breite des Probekörpers ist. Für die Lehmprüfung, wurde ein Abstand von 10 cm gewählt. Die Gesamtlänge des Probekörpers betrug ca. 16 cm.



#### Legende

- 1 Belastungsrolle (dreh- und kippar)
- 2 Auflagerrolle
- 3 Auflagerrolle (dreh- und kippar)

Abbildung 4-6 Vorrichtung zur Lastaufbringung nach EN 12390-5

Die Biegezugfestigkeit ist nach folgender Gleichung zu Berechnen:

$$f_{ct} = \frac{3}{2} * \frac{F * l}{d_1 * d_2^2}$$

$f_{ct}$  Biegezugfestigkeit in [MPa] bzw. [N/mm<sup>2</sup>]

F Höchstlast [N]

l Abstand zwischen den Auflagerrollen, [mm]

$d_1, d_2$  die Seitenmaße des Querschnitts, [mm]

(siehe Abbildung 4-6)

#### 4.3.4.2 DRUCKVERSUCH

Zur Feststellung der Druckfestigkeit von Prismenstücken nach ÖNORM B 3303 sind Reststücke vom Biegebalken, nach deren Prüfung im Biegezugversuch, wie im Kapitel 4.3.4.1 beschrieben, zu verwenden (siehe Abbildung 4-7). Die Prüfung der Druckfestigkeit folgt im Allgemeinen unmittelbar auf jene der Biegezugfestigkeit. Die Balkenreststücke müssen im Bereich der beabsichtigten Druckbelastung frei von Rissen, Ausbrüchen und anderen Beschädigungen sein.

Die Druckbelastung ist an quadratischen Druckflächen, senkrecht zur Herstellungsrichtung, über die gesamte Breite der Prismenstücke vorzunehmen. Die Kraft ist über zwei gehärtete Stahlplatten mit geschliffenen, quadratischen Oberflächen, die exakt übereinander liegend am Reststück angeordnet werden, einzuleiten /18/. In unserem Fall war die Druckplatte allerdings rund und die gehärteten Stahlplatten waren rechteckig und 62,5 mm lang und 40 mm breit.

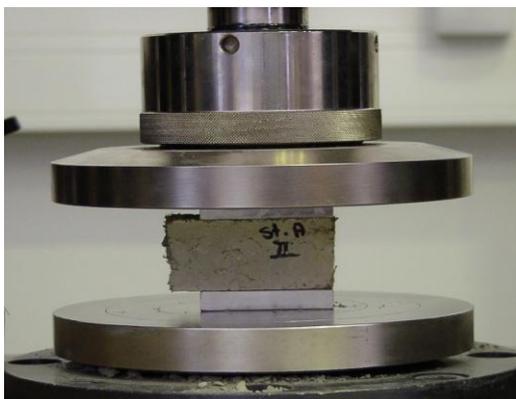
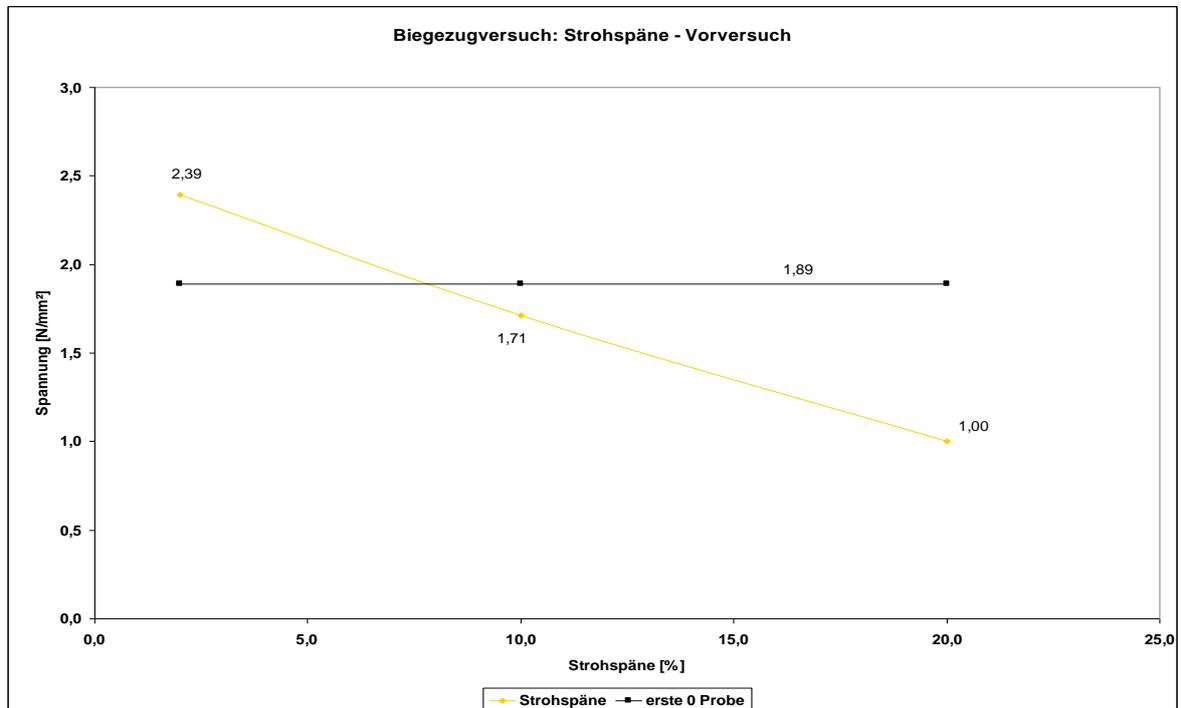


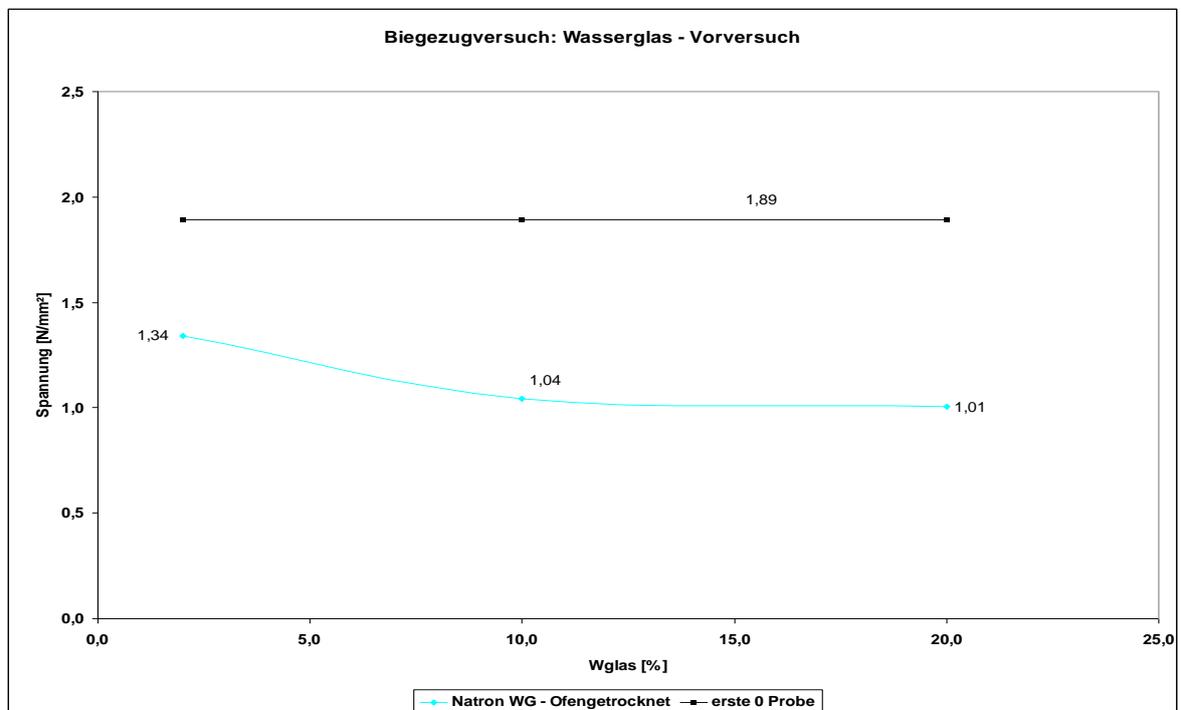
Abbildung 4-7 Aufbau des Druckversuches

## 4.4 Ergebnisse des Vorversuchs

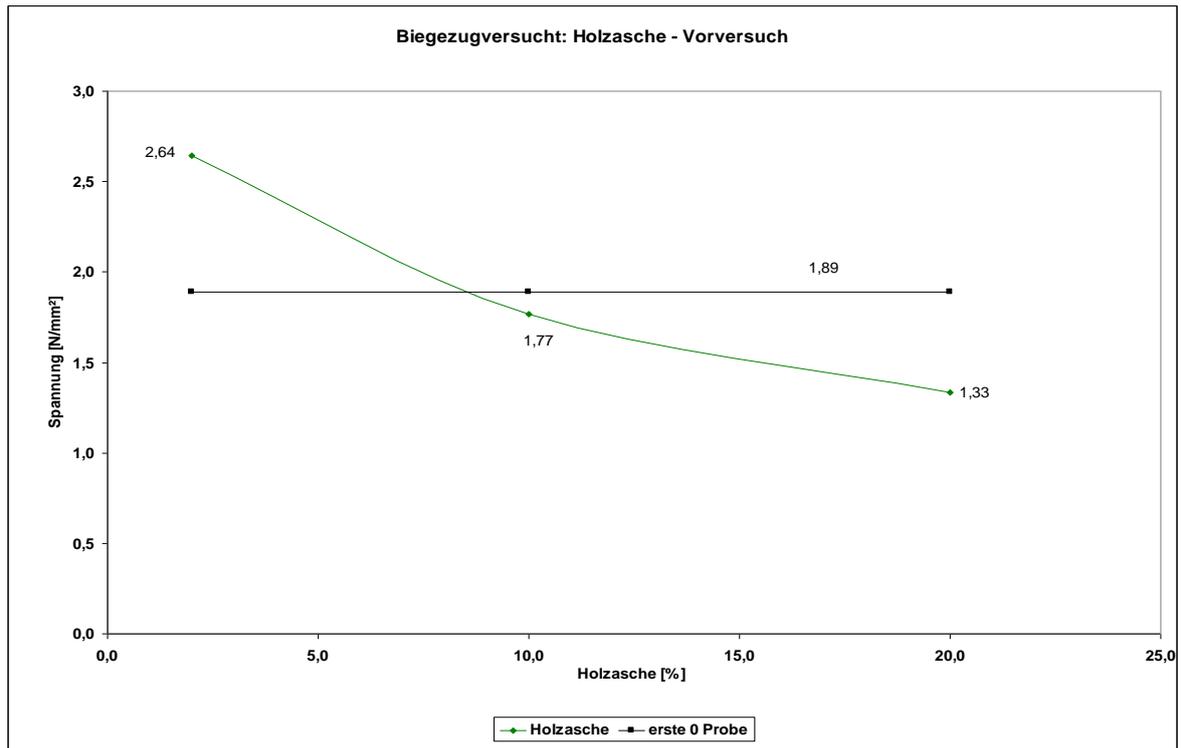
### 4.4.1 Biegezugversuche



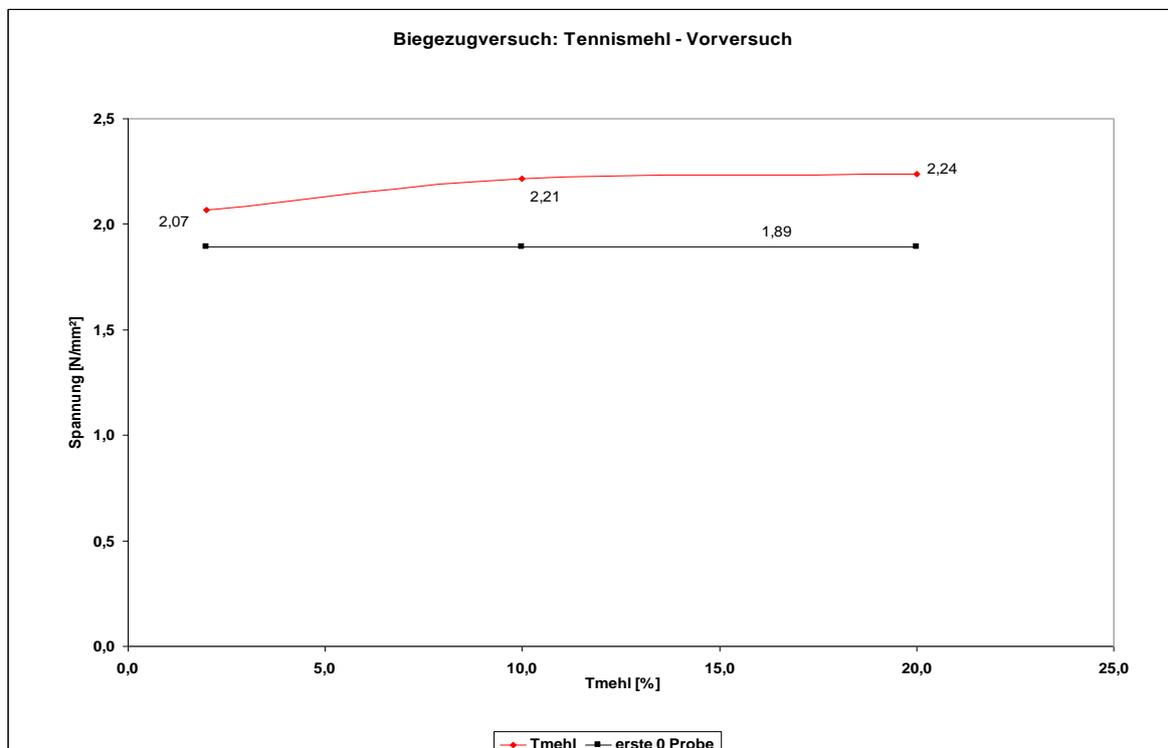
**Abbildung 4-8** Biegezugfestigkeit von Lehmprismen mit Strohspänen  $l \approx 10$  mm bei grober Prozentwahl



**Abbildung 4-9** Biegezugfestigkeit von Lehmprismen mit Wasserglas bei grober Prozentwahl



**Abbildung 4-10** Biegezugfestigkeit von Lehmprismen mit Holzasche bei grober Prozentwahl



**Abbildung 4-11** Biegezugfestigkeit von Lehmprismen mit Tennismehl bei grober Prozentwahl

## 4.4.2 Druckversuche

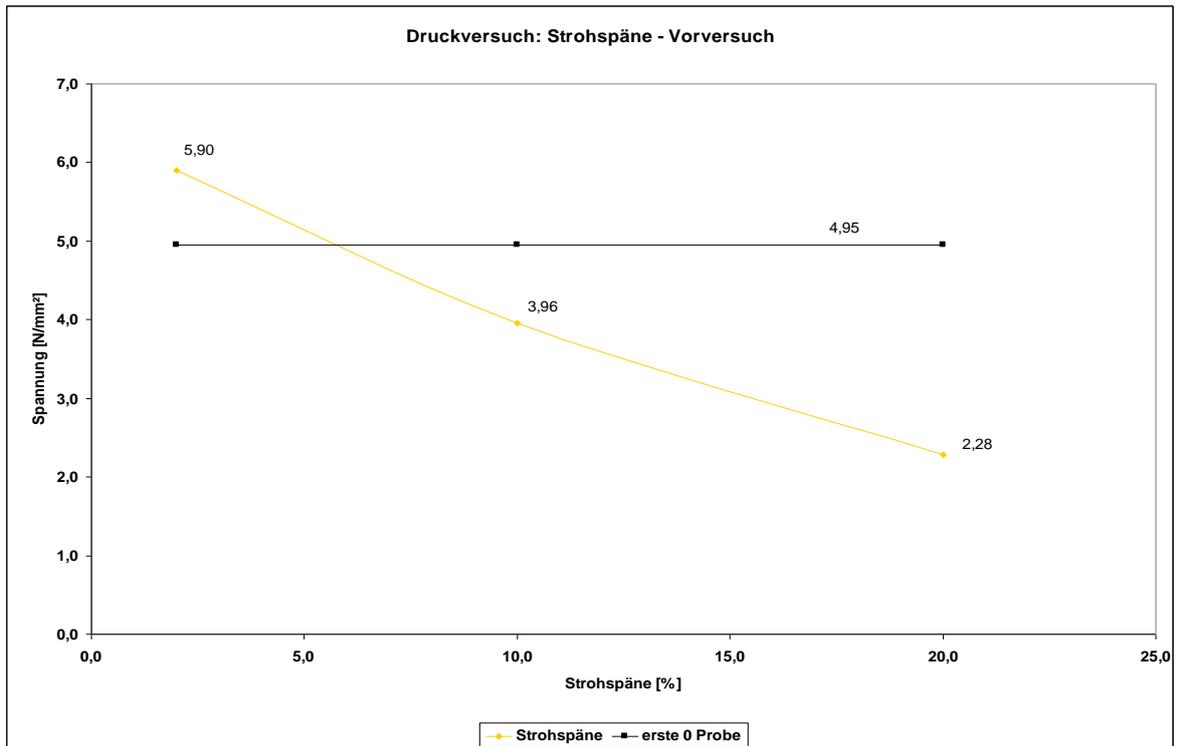


Abbildung 4-12 Druckfestigkeit von Lehmprismen mit Strohspäne bei grober Prozentwahl

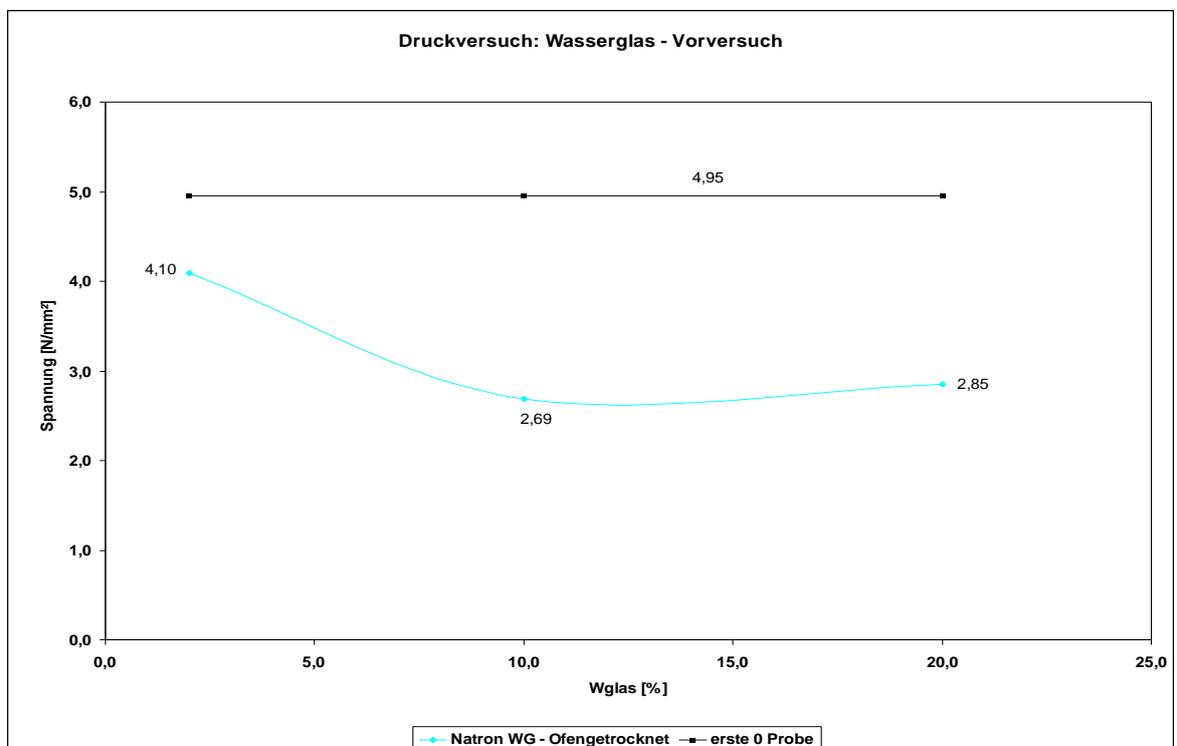
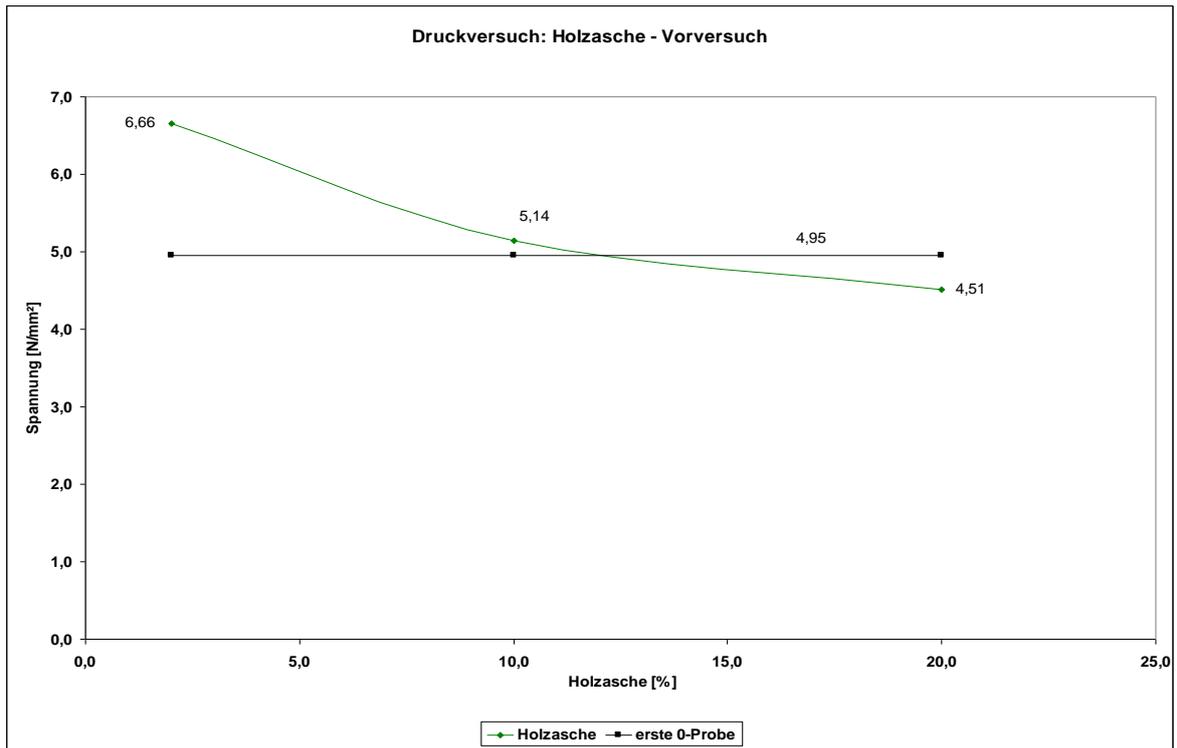
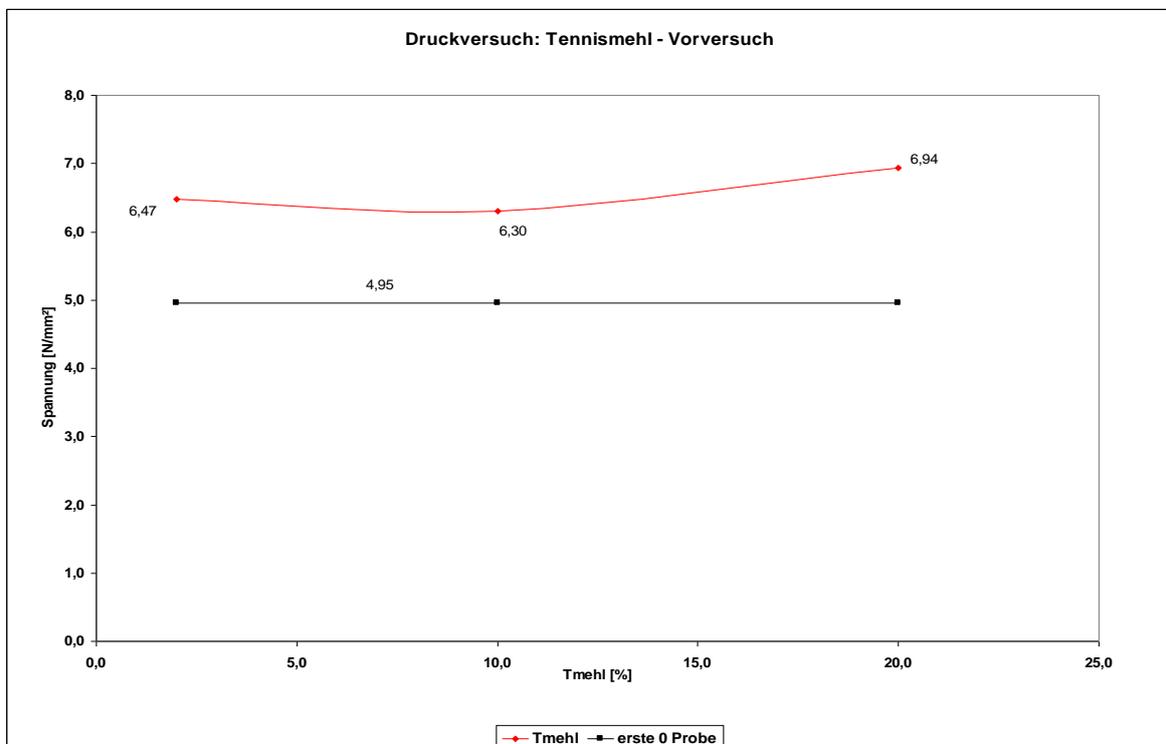


Abbildung 4-13 Druckfestigkeit von Lehmprismen mit Wasserglas bei grober Prozentwahl



**Abbildung 4-14** Druckfestigkeit von Lehmprismen mit Holzasche bei grober Prozentwahl



**Abbildung 4-15** Druckfestigkeit von Lehmprismen mit Tennismehl bei grober Prozentwahl

#### 4.4.3 Zusammenfassung der Ergebnisse der Vorversuche

Die oben vorangehend gezeigten Grafiken (Abbildung 4-8 bis Abbildung 4-15) machen deutlich, dass die Biegezugkraft und Druckkraft der einzelnen Lehmprismen abhängig von den Prozentsätzen der Zusatzstoffe sind. Unabhängig von der 0-Probe lassen sich bei jeder Mischung Prozentsätze ausmachen, die sich positiv oder negativ auf die Festigkeitswerte auswirken. Die Kurvenverläufe bei der Biegezugfestigkeit und bei der Druckfestigkeit sind qualitativ sehr ähnlich (siehe Abbildung 4-16 und Abbildung 4-17). Nur das Tennismehl stellt eine Ausnahme dar. Hier sieht man, dass eine geringe (ca. 2,0 %) Zugabe bereits einen deutlichen Abfall der Biegezugfestigkeit, gegenüber der Druckfestigkeit, bedeutet. Die Tabelle 4-3 zeigt eine Zusammenfassung, bei welchen Prozentbereichen eine Erhöhung der Druckfestigkeit möglich ist. Bei den Stoffen Stroh, Wasserglas und Asche sind geringe Prozentsätze scheinbar besser. Bei Tennismehl ist es genau umgekehrt. Viel Tennismehl bringt ebenfalls eine hohe Festigkeit. Für weiterführende Untersuchungen ist eine feinere Unterteilung der viel versprechenden Prozentsätze sinnvoll.

Bis auf Natron Wasserglas konnten alle Zusatzstoffe eine Erhöhung der Biegezugfestigkeit und der Druckfestigkeit bewirken.

**Tabelle 4-3** Zusammenfassung der Vorversuche

<b>Additiv</b>	<b>Aussichtsreiche Prozentsätze</b>
Strohspäne	< 2,0 %
Wasserglas - Ofengetrocknet	< 2,0 %
Holzasche	< 2,0 %
Tennismehl	> 20,0 %

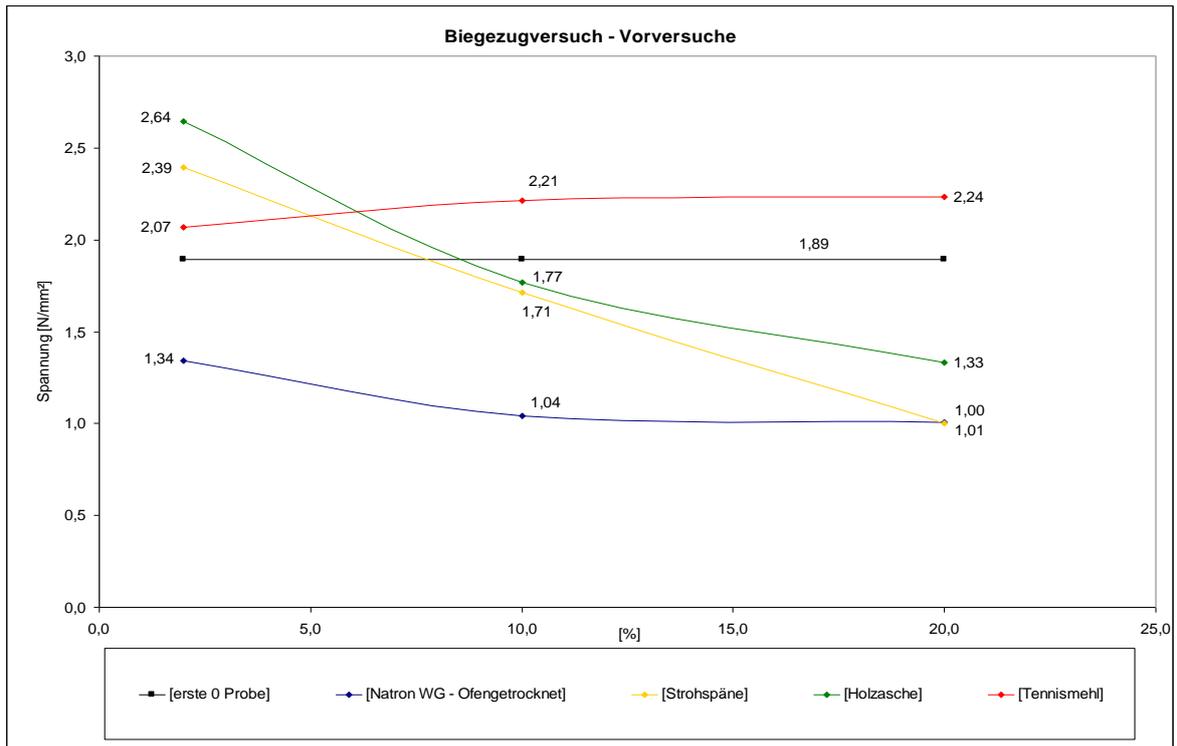


Abbildung 4-16 Zusammenfassung der Vorversuche für die Biegezugfestigkeit

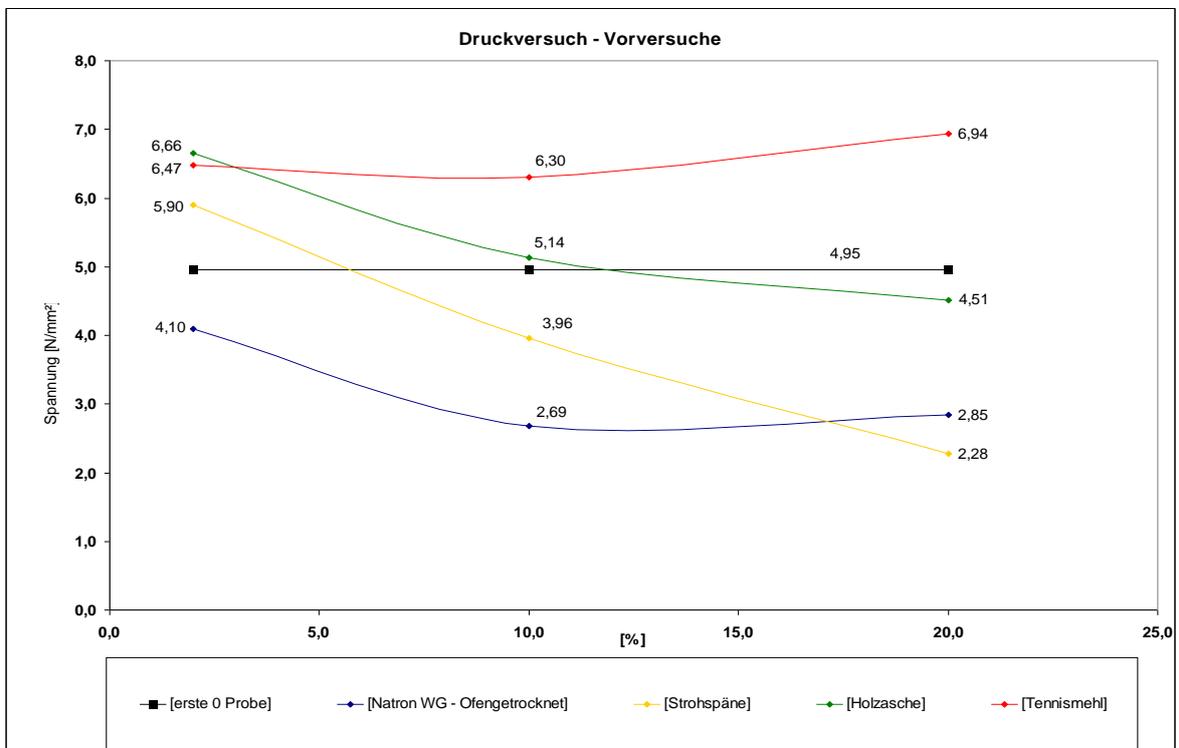


Abbildung 4-17 Zusammenfassung der Vorversuche für den Druckversuch

## 4.5 Weitere Vorgangsweise

Im Kapitel 4.4 wurden für jeden einzelnen Zusatzstoff mögliche Prozentsätze gefunden, welche eine Erhöhung der Druckfestigkeit ermöglichen. Jetzt ist eine gezielte Suche nach den idealen Prozentsätzen je Zusatzstoff möglich, um eine maximale Druckerhöhung zu bekommen.

Auf Grund der schlechten Ergebnisse von Wasserglas wird dieser Zusatzstoff nicht weiter betrachtet. Für alle anderen Additive wird jetzt eine neue Einteilung der zu untersuchenden Prozentsätze überlegt.

Tennismehl macht zum Beispiel den Anschein, dass bei einer Zugabe von mehr als 20% eine höhere Druckfestigkeit erreicht werden kann. Diese Überlegungen werden für jeden einzelnen Zusatzstoff getroffen und fließen dann, in die weiterführenden Untersuchungen ein (siehe Tabelle 4-4).

**Tabelle 4-4** Übersicht über die weitere Vorgehensweise

	<b>Strohspäne</b>			<b>Holzasche</b>			<b>Tennismehl</b>		
<b>Vorversuch</b>	< 2,0 %			< 2,0 %			> 20,0 %		
<b>1. Versuch</b>	1 %	1,5 %	2 %	1 %	2 %	5 %	15 %	20 %	30 %

Nach jeder Versuchsreihe werden die neuen Ergebnisse überprüft und die zu untersuchenden Prozentsätze neu definiert. Wichtig dabei ist, dass immer ein Prozentsatz gleichgehalten wird (z.B.: Tennismehl immer 20 %), um eine Vergleichbarkeit mit anderen Prozentsätzen zu bekommen. Mit dieser Methode sind Ausreißer leicht festzustellen und verfälschen so die Endauswertung nicht.

Nachdem die Prozentsätze der einzelnen Zusatzstoffe, bezogen auf die Druckfestigkeit, optimiert wurden, wurden danach die einzelnen Stoffe mit den optimalen Prozentsätzen kombiniert und untersucht.

Erst wenn durch die Zugabe von Einzelstoffen oder durch deren Kombination eine maximale Druckfestigkeit gefunden wurde, wurde diese auch im feuchten Zustand geprüft. Näheres wird im Kapitel 5 beschrieben.

## 5 Untersuchung der Lehmproben für den trockenen und feuchten Zustand

Jetzt geht es darum, genaue Prozentangaben für jeden Zusatzstoff (Strohspäne, Holzasche, Tennismehl) und für Kombinationen von Zusatzstoffen zu finden, bei denen die höchste Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit erreicht werden können. Nachdem jeder Einzelstoff und auch Kombinationen für den trockenen Zustand optimiert wurden, werden die „Testsieger“ auch für den feuchten Zustand überprüft.

Die Herstellung der Probekörper (Aufbereitung, Herstellung, Trocknung) und die Versuchsanordnung (Biegezugversuch, Druckversuch) ist identisch mit dem Kapitel 4 und wurde dort ausführlich beschrieben. Eine grobe Einschätzung von sinnvollen Prozentsätzen wurde ebenfalls schon im Kapitel 4 (siehe Tabelle 4-3) durch die Vorversuche behandelt. Werte aus den Vorversuchen werden in den nachfolgenden Diagrammen mit übernommen und fließen in die Bewertung ein.

## 5.1 Untersuchung der Lehmproben für den trockenen Zustand

### 5.1.1 Lehmprismen mit einzelnen Additiven

Um herauszufinden wie und bei welchen Prozentsätzen die einzelnen Additive (siehe Kapitel 4.2) die Druckfestigkeit und die Biegezugfestigkeit beeinflussen, werden am Beginn der Versuche nur Einzelstoffe mit verschiedenen Prozentsätzen dem Lehm beigemischt und anschließend geprüft. Eine grobe Richtungsangabe für sinnvolle Prozentsätze lieferten bereits die Vorversuche. Diese sind aus der Tabelle 4-3 bzw. Tabelle 5-1 ersichtlich.

**Tabelle 5-1** Werte aus dem Vorversuch

	<b>Biegezugversuch [N/mm<sup>2</sup>]</b>				<b>Druckversuch [N/mm<sup>2</sup>]</b>			
	<b>Strohspäne</b>	<b>Wasserglas</b>	<b>Holzasche</b>	<b>Tennismehl</b>	<b>Strohspäne</b>	<b>Wasserglas</b>	<b>Holzasche</b>	<b>Tennismehl</b>
<b>0 Probe</b>	1,90				4,95			
<b>2,0%</b>	2,44	1,35	2,68	2,10	5,90	4,10	6,66	6,47
<b>10,0%</b>	1,78	1,06	1,82	2,23	3,96	2,69	5,14	6,30
<b>20,0%</b>	1,06	0,99	1,36	2,29	2,28	2,85	4,51	6,94

#### 5.1.1.1 OPTIMIERUNG FÜR JEDEN EINZELNEN ZUSATZSTOFF

Nachdem Größenordnungen der möglichen Prozentsätze zur Erhöhung der Druckfestigkeit für jeden einzelnen Zusatzstoff im Kapitel 4.4 gefunden wurden, geht es jetzt darum, auf diese Erkenntnisse weitere Versuchsreihen zur Optimierung aufzubauen. Die gefundenen Richtwerte aus dem Kapitel 4.4 werden durch gezielte, feinere Unterteilungen der Prozentsätze optimiert. Dabei ist unbedingt darauf zu achten, dass mindestens ein Wert von der vorhergehenden Serie wiederholt wird („fixer Prozentsatz“). Das ist deshalb so wichtig, um überprüfen zu können, ob die „fixen Prozentsätze“ zueinander passen, oder ob Messfehler bzw. Herstellungsfehler aufgetreten sind. Später, nachdem alle Untersuchungen

abgeschlossen sind, dienen die „fixen Prozentsätze“ dazu, um die verschiedenen Serien miteinander vergleichbar zu machen. Die zwei anderen Werte können bzw. sollen bei jeder neuen Serie geändert werden.

Am Beispiel von Holzasche, siehe Tabelle 5-2, bedeutet das, dass eine Serie mit 2,0 % an jedem Herstellungstag wiederholt wird und zwei weitere Serien mit unterschiedlichen Prozentzahlen z.B. 1,0 % und 5,0 % neu dazukommen. So nähert man sich Schritt für Schritt den optimalen Prozentsätzen für jeden Zusatzstoff.

Weiters sieht man, in der Tabelle 5-2, wie die gesamte Versuchsreihe von Holzasche aufgebaut ist. An vier verschiedenen Tagen, wurden jeweils drei Serien ([A-B-C], [D-E-F], [G-H-I] und [K-L-M]) hergestellt. Der Wert für die Druckfestigkeit bei einer Zumischung von 2,0 % Holzasche, kann von jedem Herstellungstag überprüft werden. Gleichzeitig neben den Einzelmischungen, wurden auch 0 Proben von derselben Lehmaufbereitung (selber Tag und selber Lehm – Wassermischung) hergestellt und geprüft. Somit ist eine größtmögliche Transparenz gegeben. Einerseits besteht bei dieser Versuchsanordnung die Möglichkeit, immer wiederkehrende Prozentsätze (z.B. bei Holzasche 2,0 %) auf ihre Richtigkeit zu überprüfen, und gleichzeitig die erzielten Werte mit einer 0 Probe zu vergleichen. Diese Vorgehensweise wird bei allen Additiven wiederholt.

**Tabelle 5-2** Gewählte Prozentsätze am Beispiel von Holzasche

04.08.2004			11.08.2004			25.08.2004			02.09.2004		
Vorversuch			Optimierung								
A [%]	B [%]	C [%]	D [%]	E [%]	F [%]	G [%]	H [%]	I [%]	K [%]	L [%]	M [%]
2,0	10,0	20,0	1,0	2,0	5,0	1,5	2,0	3,5	2,0	2,75	3,5

### 5.1.1.2 DIE 0 – PROBE

Die 0 Probe besteht nur aus Lehm und dem zur der mechanischen Aufbereitung notwendigen Wasser. Die Abbildung 5-1 zeigt, dass sechs Serien an sechs verschiedenen Tagen hergestellt wurden (inklusive Vorversuche). Das ergibt in Summe 19 Prüfkörper (bei einer Serie wurden statt drei, vier Probekörper erzeugt) für die Biegezugfestigkeit und 38 für die Druckfestigkeit. Nach der Prüfung aller 0 Proben ergibt sich ein rechnerischer Mittelwert von 6,69 N/mm<sup>2</sup> für die Druckfestigkeit und 2,77 N/mm<sup>2</sup> für die Biegezugfestigkeit (siehe Abbildung 5-1 und Abbildung 5-2). Vergleicht man die Mittelwerte der 0 Probe aus 6 Serien mit dem Einzelwert aus dem Vorversuch (die erste Serie), so stellt man eine deutliche Verbesserung der Druckfestigkeit und der Biegezugfestigkeit fest (siehe Tabelle 5-3). Die Schwankungen entstehen einerseits durch den Baustoff Lehm und andererseits durch die nicht maschinelle Aufbereitung des Lehmes und ist durch das händische Stampfen zu begründen. Je länger die Versuche dauern, desto geringer sind die fertigungsbedingten Unterschiede.

Die mechanischen Werte der 0 Probe sind deshalb so wichtig, um den vorliegenden „reinen“ Werkstoff Lehm auf seine Baustoffeigenschaften überprüfen zu können. Gleichzeitig bilden sie die Grundlage, für eine Bewertung der nachfolgenden Lehmversuche mit Zusatzstoffen. Nur so kann man Aussagen treffen, ob die Zugabe von einzelnen Stoffen oder Stoffmischungen die Druckfestigkeit oder Biegezugfestigkeit von einem bestimmten Lehm erhöht wird und in welchen Größenordnungen sie sich bewegen.

**Tabelle 5-3** Mittlere Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit der 0 Probe

	<b>0 Probe Vorversuch</b>	<b>n</b>	<b>0 Probe</b>	<b>Standard- abweichung</b>	<b>Veränderung [%]</b>
<b>Biegezugversuch</b>	1,89 N/mm <sup>2</sup>	19	2,77 N/mm <sup>2</sup>	0,624 N/mm <sup>2</sup>	+ 46,6 %
<b>Druckversuch</b>	4,95 N/mm <sup>2</sup>	38	6,69 N/mm <sup>2</sup>	0,994 N/mm <sup>2</sup>	+ 35,2 %

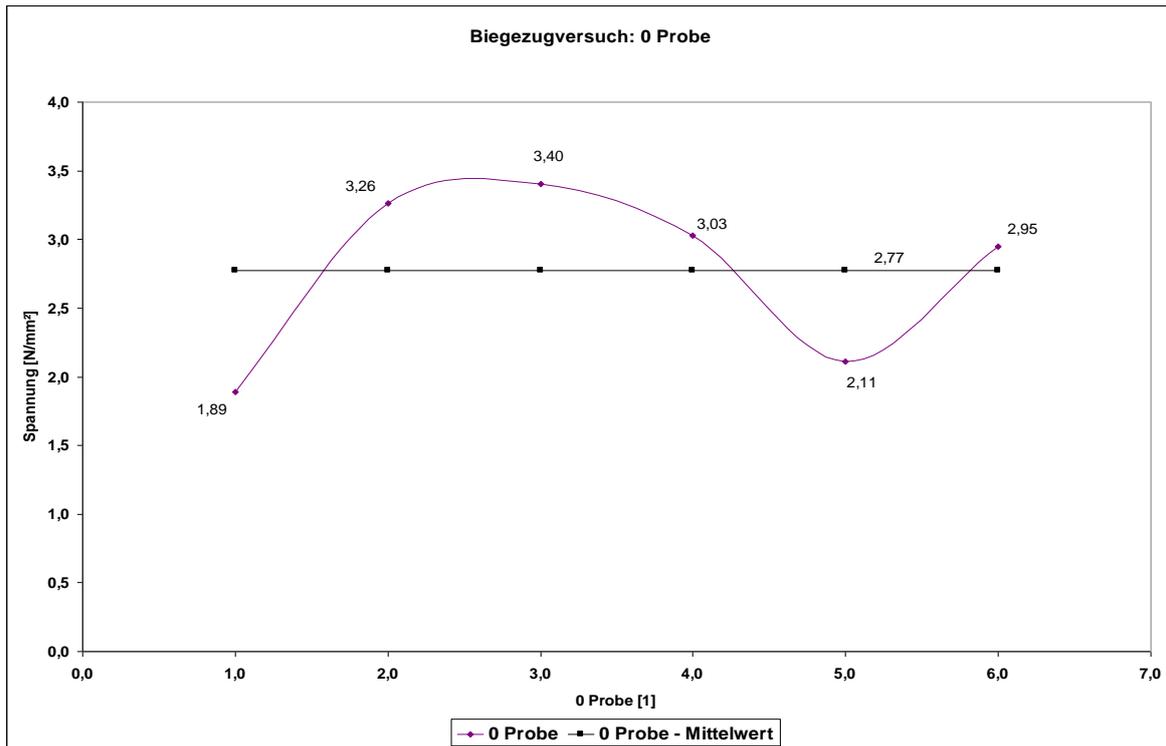


Abbildung 5-1 Auswertung der 0 Probe für den Biegezugversuch

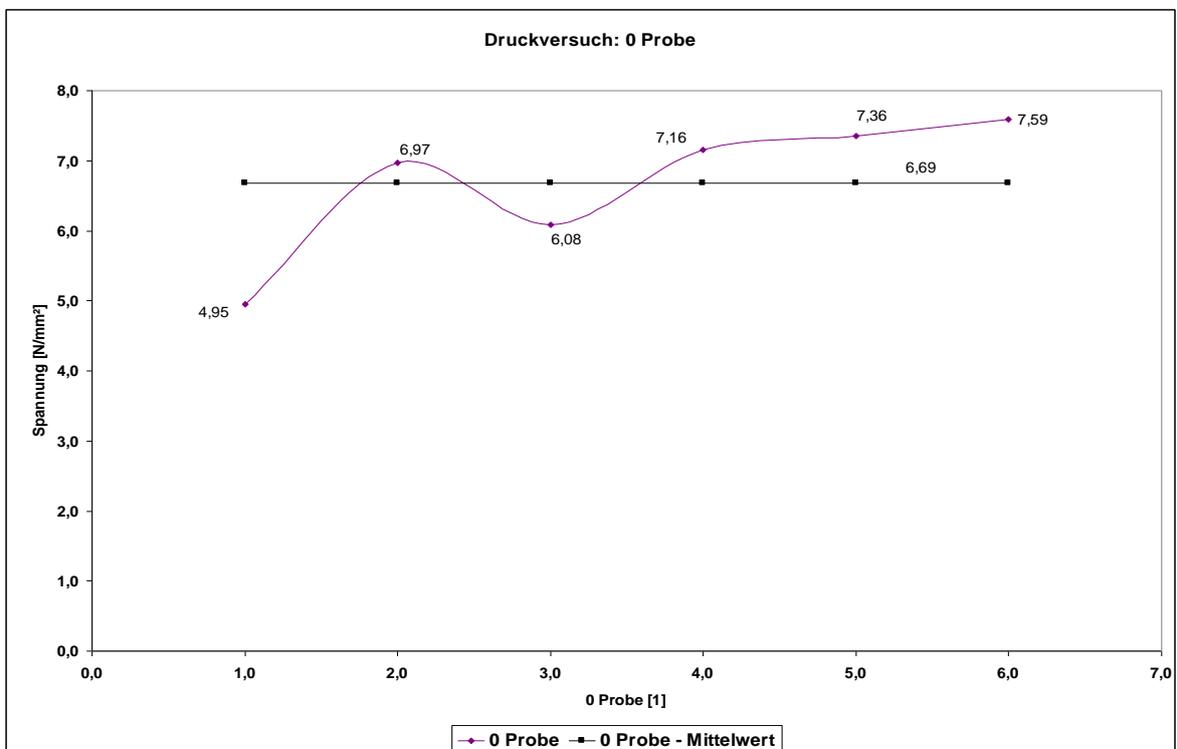


Abbildung 5-2 Auswertung der 0 Probe für den Druckversuch

### 5.1.1.3 STROHSPÄNE

Durch Zugabe von Strohspänen von 0,5 bis 2,0 cm Länge erzielt man die beste Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit bei niedrigen Prozentsätzen (siehe auch Abbildung 5-3 und Abbildung 5-4). Den Spitzenwert von 6,21 N/mm<sup>2</sup> für die Druckfestigkeit erzielt man durch eine Zugabe von ca. 1,5 %. Die Biegezugfestigkeit liegt bei einem Wert von 2,54 N/mm<sup>2</sup> und 1,0 % (siehe Tabelle 5-4). Im Gegensatz zu den Vorversuchen, wo die Werte oberhalb der 0 Probe waren, liegen beide Maximalwerte jetzt unterhalb der 0 Probe. Das liegt daran, dass sich die Druckfestigkeit und die Biegezugfestigkeit der 0 Probe (nach 6 Serien) deutlich nach oben verbessert haben. Die Druckfestigkeit verringert sich um 7,2 % und die Biegezugfestigkeit um 8,3 % gegenüber der 0 Probe.

Für Stroh wurden in Summe 6 Serien hergestellt. Das ergibt für die Biegezugfestigkeit 18 Probekörper und für den Druckversuch 36 Probekörper. Positiv zu beurteilen ist das geringe Schwindverhalten, wenn Stroh eingearbeitet ist. Negativ zu bewerten ist die Verarbeitbarkeit. Je mehr Stroh man dem Lehm beimischen wollte, desto feuchter musste der Lehm angemacht werden. Die Strohspäne wickelten sich auch bei der geringen Länge von 0,5 bis 2,0 cm unangenehm um den Rührstab des Rührwerkes. Eine industrielle Erzeugung mittels eines Mundstückes, wie es in der Ziegelindustrie (z.B.: Firma Wienerberger) üblich ist, ist damit fast ausgeschlossen.

Auf Grund der schlechten mechanischen Eigenschaften und der aufwendigen Aufbereitung wurden Strohspäne als Einzel-Zuschlagstoff nicht weiter untersucht.

Die erhoffte Verbesserung der Biegezugeigenschaft blieb leider aus. Die kurze Faser entwickelte keinen Verbund. Bei längerem Stroh zeigt sich zwar laut Literatur eine Verbesserung, jedoch ist diese nicht für industrielle Fertigung geeignet und wird nur bei Stampfwänden oder Leichtlehmwänden angewendet.

**Tabelle 5-4** Vergleich der maximalen Festigkeitswerte von Lehmproben mit Strohspänen und der 0 Probe

	n	Prozentanteil	Strohspäne	Standard- -abweichung	0 Probe	Vergleich mit 0 Probe
<b>Biegezugversuch</b>	3	1,0 %	2,54 N/mm <sup>2</sup>	0,293 N/mm <sup>2</sup>	2,77 N/mm <sup>2</sup>	- 8,3 %
<b>Druckversuch</b>	6	1,5 %	6,21 N/mm <sup>2</sup>	0,111 N/mm <sup>2</sup>	6,69 N/mm <sup>2</sup>	- 7,2 %

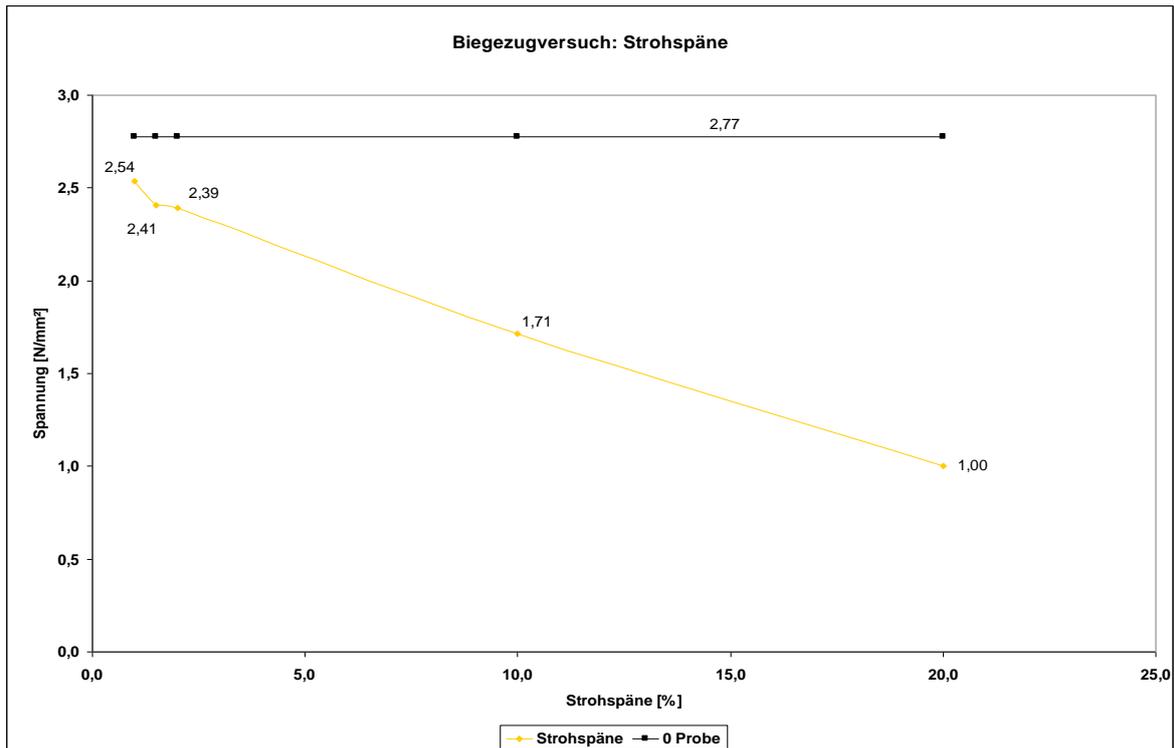


Abbildung 5-3 Auswertung für die Zugabe von Strohspänen für den Biegezugversuch

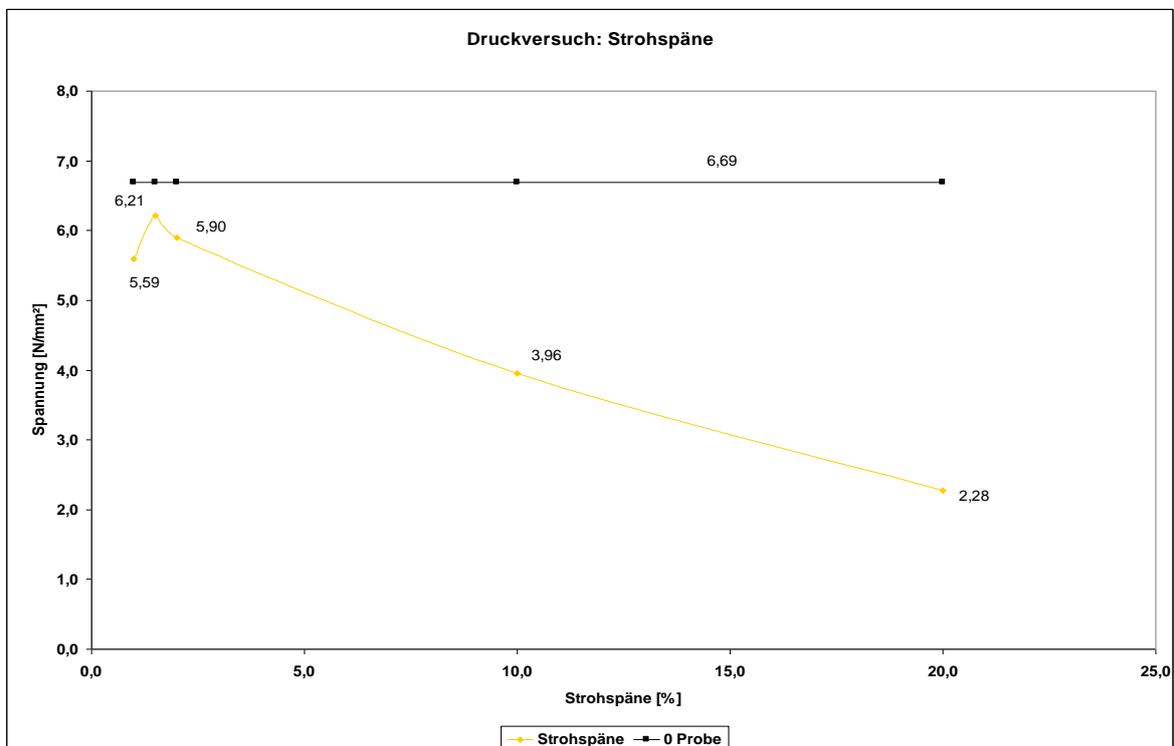


Abbildung 5-4 Auswertung für die Zugabe von Strohspänen für den Druckversuch

#### 5.1.1.4 WASSERGLAS

Eigentlich war die Versuchsreihe mit Wasserglas, auf Grund der schlechten Ergebnisse aus Druck- und Biegezugversuch, nach den Vorversuchen bereits abgeschlossen.

Die Firma Wienerberger schickte aber, nachdem die Vorversuche abgeschlossen waren, ein spezielles, Zwei-Komponenten-Wasserglas mit der Bitte, dieses auf eine mögliche verbessernde Wirkung, bezogen auf die mechanischen Festigkeiten, zu überprüfen. Nach einer umgehenden Recherche über das neue Wasserglas, entdeckte ich den wichtigen Hinweis, dass Wasserglas nicht erhitzt werden darf, weil es zu „Ausblühungen“ kommen und dadurch die Struktur des Lehmes, im Bezug auf die Festigkeiten, beeinträchtigt werden kann. Diese Eigenschaft des Wasserglases erklärt das überaus schlechte Abschneiden im Vorversuch (Trocknen des Probekörpers bei 40 °C und 50 % Luftfeuchtigkeit). Ich entschloss mich also, auf Grund meiner fehlerhaften ersten Behandlung des Zusatzstoffes, die Wirkungsweise von Natron-Wasserglas und des neuen Zwei-Komponenten-Wasserglases auf die Druckfestigkeit und die Biegezugfestigkeit von Lehm noch einmal zu überprüfen.

Die Verarbeitbarkeit von Lehmproben mit Natron- Wasserglas ist abhängig von der Menge an zugegebenem Wasserglas. Die erhoffte Verbesserung der Verarbeitbarkeit stimmt nur bedingt. Je mehr Wasserglas dem Lehm zugegeben wurde, desto plastischer und damit schlechter komprimierbarer wurde er. Je weniger zugegeben wurde, desto „krümeliger“ war der Lehm (Krümelig im Sinne von Kugelbildung, aber keine festen Lehmeinschlüsse). Je höher die Prozentzugabe war, desto spröder wirkte der trockene Probekörper. Verformungen in der Mitte des Probekörpers (nach der Trocknung) von bis zu 4 mm bei der Zugabe von 20 % Natronwasserglases waren deutlich zu sehen und sind in der Abbildung 5-5 dokumentiert.

Die Verarbeitung des Zwei-Komponenten-Wasserglases gestaltete sich schwierig. Je nach Mischungsverhältnis reduzierte sich die Verarbeitungsdauer von 30 min auf 10 min. Ein Nachteil, der gegen eine industrielle Fertigung spricht ist, dass Lehmbaustoffe, denen Wasserglas beigemischt wurde, nicht im Ofen getrocknet werden dürfen. Sie müssen ausschließlich luftgetrocknet werden. Die Produktionszeiten steigen dadurch um ein Vielfaches. Lehmproben mit Natron- Wasserglas im Klimaschrank, bei 40 °C und 50 %

Luftfeuchtigkeit getrocknet, erreichen eine Druckfestigkeit die um 34,5 % niedriger ist als Proben mit luftgetrocknetem Natron-Wasserglas.

Für die Versuche mit Wasserglas wurden 9 Serien hergestellt. Das bedeutet 27 Probekörper für den Biegezugversuch und 54 für den Druckversuch.

Um die neu erzielten Ergebnisse mit luftgetrockneten Probekörper besser mit den Ergebnissen der Vorversuche (ofengetrocknete Probekörper) vergleichen zu können, wurde dem Lehm Natron-Wasserglas ebenfalls 2,0 %; 10,0 %; und 20,0 % (identisch mit dem Vorversuch) beigemischt.

Bei Natron-Wasserglas erreicht man bei 2 % die maximale Druckfestigkeit von 6,26 N/mm<sup>2</sup> und die maximale Biegezugfestigkeit von 1,42 N/mm<sup>2</sup>. Das bedeutet ein Minus von 6,4 % (Druckfestigkeit) und ein Minus von 48,7 % (Biegezugfestigkeit) bezogen auf die 0 Probe.

Die erzielten Ergebnisse sind aber deutlich besser, als beim ofengetrockneten Natron-Wasserglas (siehe Abbildung 5-6 und Abbildung 5-7).

Beim Spezial-Wasserglas entschloss ich mich, auf Grund der Erfahrung aus dem Vorversuch (sehr schlechte Ergebnisse bei hohen Prozentsätzen), die Prozentsätze zu variieren. Darum kam es zu den verwendeten Prozentsätzen von 2,0 %; 5,0 % und 10,0 %.

Wie auch beim Natron-Wasserglas ist die Druckfestigkeit und die Biegezugfestigkeit bei einer Zugabe von 2 % am höchsten (siehe Tabelle 5-5). Leider erreicht man durch die Zugabe des Zwei-Komponenten-Wasserglases keine Verbesserung der Festigkeitswerte. Im Gegenteil, alle Werte liegen sogar unter dem des Natron-Wasserglases (siehe Abbildung 5-6 und Abbildung 5-7).

**Tabelle 5-5** Vergleich der maximalen Festigkeitswerte von Lehmproben mit Na Wasserglas bzw. zwei Komponenten Wasserglas und der 0 Probe

	n	Na Wglas Ofengetr. 2,0 %	Na Wglas Luftgetr. 2,0 %	Standard- abweichung	2 Komp Wglas Luftgetr. 2,0 %	0 Probe	Vergleich 0 Probe - Na Wglas Luftgetr.
<b>Biegezugfestigkeit</b>	3	1,34 N/mm <sup>2</sup>	1,42 N/mm <sup>2</sup>	0,339 N/mm <sup>2</sup>	1,06 N/mm <sup>2</sup>	2,77 N/mm <sup>2</sup>	- 48,7 %
<b>Druckfestigkeit</b>	6	4,10 N/mm <sup>2</sup>	6,26 N/mm <sup>2</sup>	0,264 N/mm <sup>2</sup>	4,98 N/mm <sup>2</sup>	6,69 N/mm <sup>2</sup>	- 6,4 %



**Abbildung 5-5** Probekörper mit 20% Natronwasserglas

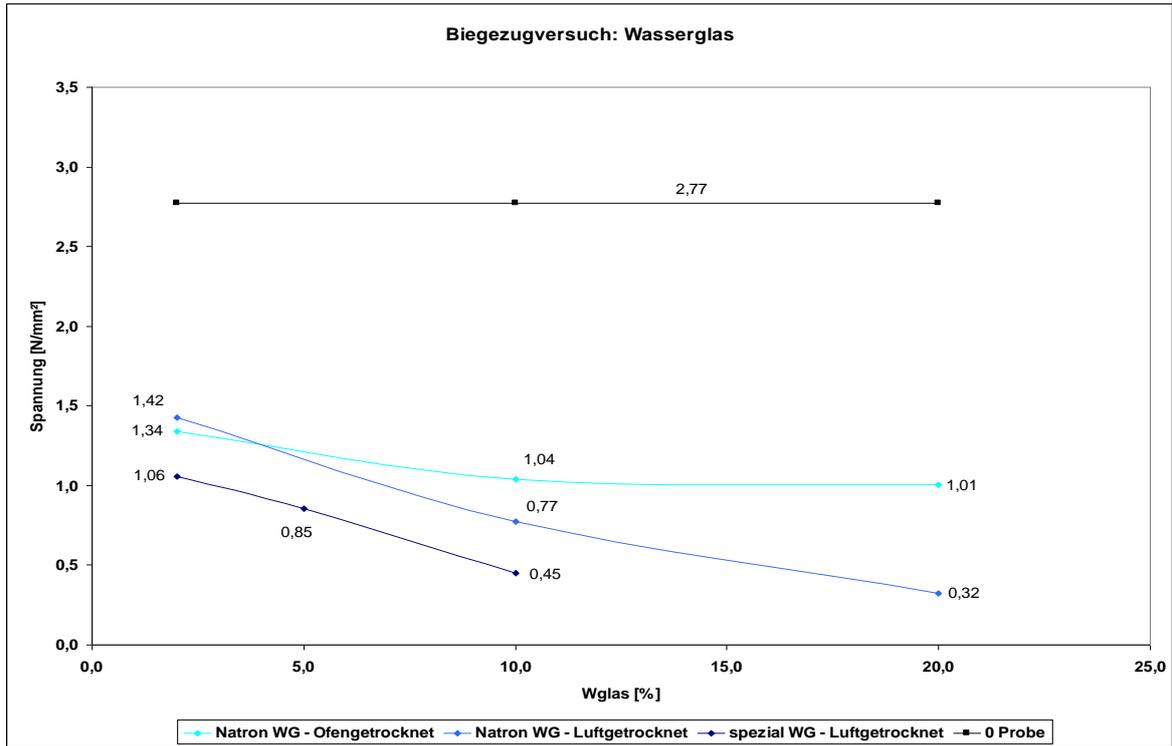


Abbildung 5-6 Auswertung für die Zugabe von Natron Wasserglas mit Ofentrocknung bzw. Lufttrocknung und spezial Wasserglas mit Lufttrocknung für den Biegezugversuch

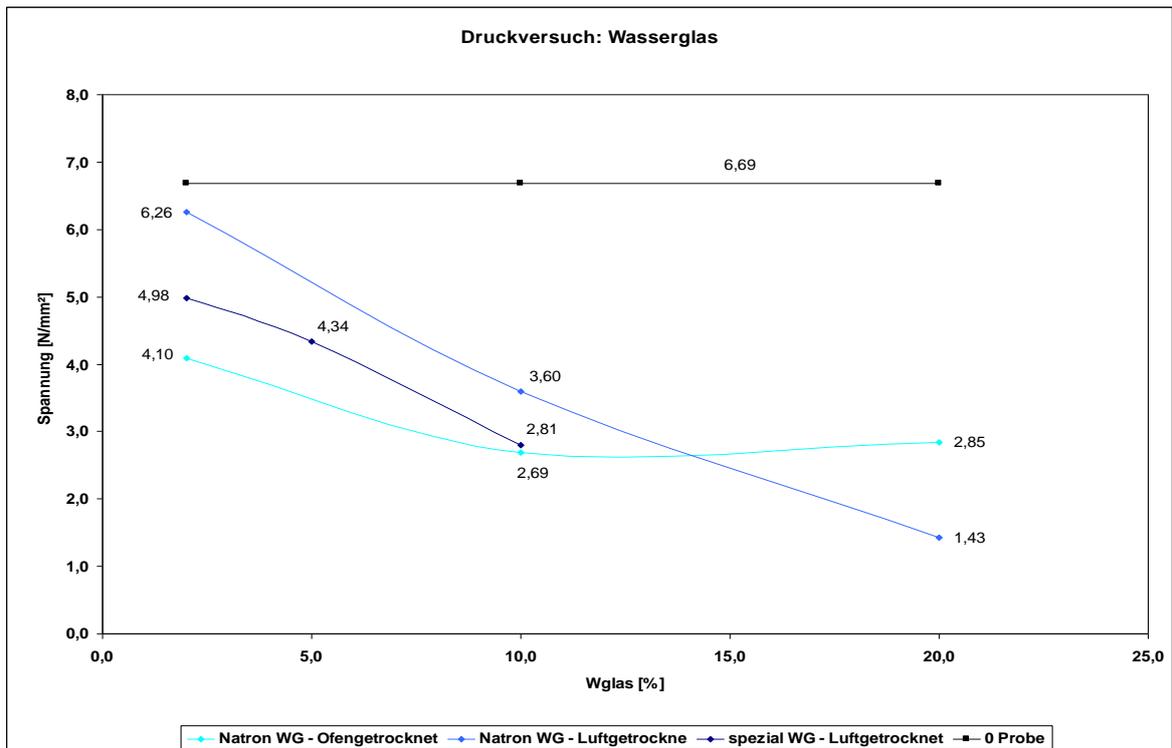


Abbildung 5-7 Auswertung für die Zugabe von Natron Wasserglas mit Ofentrocknung bzw. Lufttrocknung und spezial Wasserglas mit Lufttrocknung für den Druckversuch

### 5.1.1.5 HOLZASCHE

Der große Vorteil von Holzrasche ist die leichte Verarbeitung. Selbst bei hohen Prozentsätzen lässt sich Holzrasche, ohne zusätzliche Wasserzugabe, unproblematisch im Lehm untermischen. Es gibt keine Verklebungen am Rührwerk und keine „Nesterbildung“. Außerdem erreicht man durch die Zugabe von geringen Mengen an Holzrasche (ca. 3,5 % bzw. 2,75 %) die beste Wirkung, was die industrielle Fertigung mit einem Mundstück, sehr leicht möglich macht. Weiters ist die Verarbeitung, im Gegensatz zu Wasserglas, ohne besondere Schutzmaßnahmen möglich. Bei der Zugabe von Holzrasche ist ein geringeres Schwinden der Proben, bezogen auf alle anderen getesteten Zusätze, aufgefallen.

Wichtig bei der Herstellung von Holzrasche ist, dass nur Hartholz und keine Rindenteile verbrannt werden.

Für die Versuche mit Holzrasche sind in Summe 12 Serien (inklusive drei Serien aus den Vorversuchen) mit 36 Probekörper für den Biegezugversuch und 72 für den Druckversuch hergestellt worden.

Holzrasche zeigt im Bereich von 3,5 %, eine Erhöhung der Druckfestigkeit von 6,69 N/mm<sup>2</sup> auf 7,03 N/mm<sup>2</sup> (siehe Abbildung 5-9). Das bedeutet ein Plus von 5,1 % gegenüber der 0-Probe. Bei der Biegezugfestigkeit (siehe Abbildung 5-8) erreicht man bei 2,75 % das Maximum von 2,88 N/mm<sup>2</sup>, was ein Plus von 4,0 % bezogen auf die 0 Probe bedeutet (siehe Tabelle 5-6).

**Tabelle 5-6** Vergleich der maximalen Festigkeitswerte von Lehmproben mit Holzrasche und der 0 Probe

	Prozentanteil	n	Holzrasche	Standard-abweichung	0 Probe	Vergleich
<b>Biegezugversuch</b>	2,75 %	3	2,88 N/mm <sup>2</sup>	0,160 N/mm <sup>2</sup>	2,77 N/mm <sup>2</sup>	+ 4,0 %
<b>Druckversuch</b>	3,5 %	12	7,03 N/mm <sup>2</sup>	0,402 N/mm <sup>2</sup>	6,69 N/mm <sup>2</sup>	+ 5,1 %

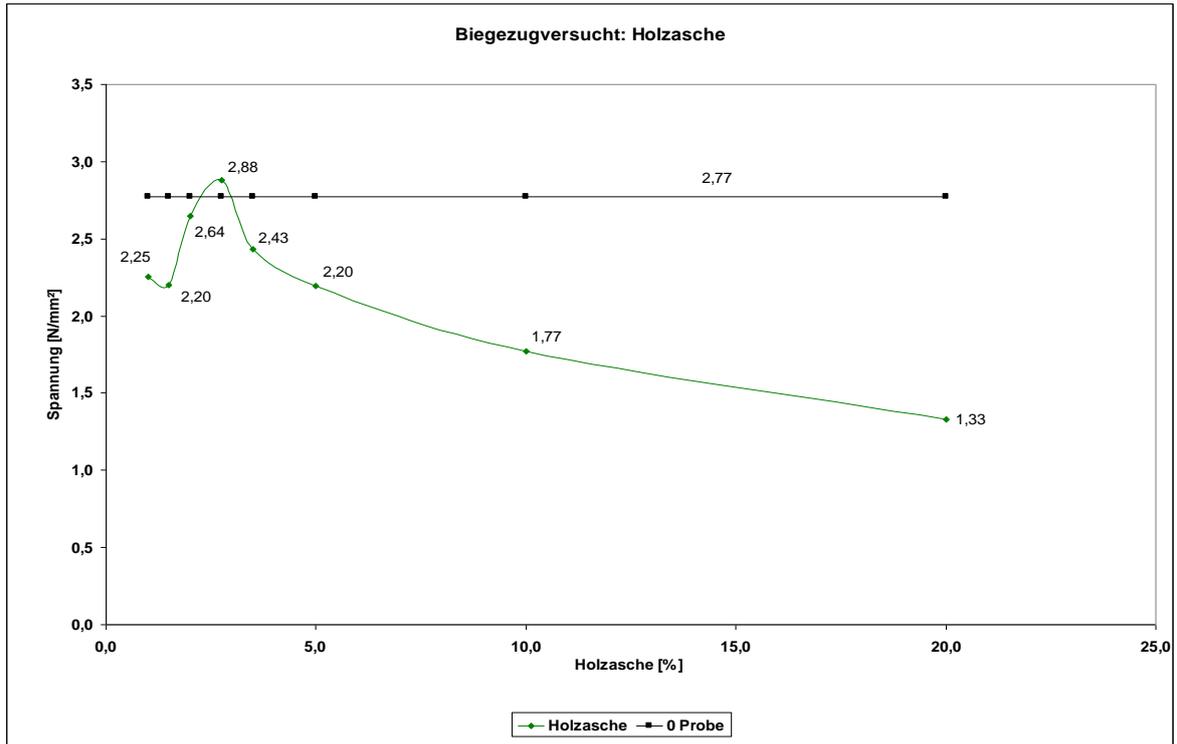


Abbildung 5-8 Auswertung für die Zugabe von Holzasche für den Biegezugversuch

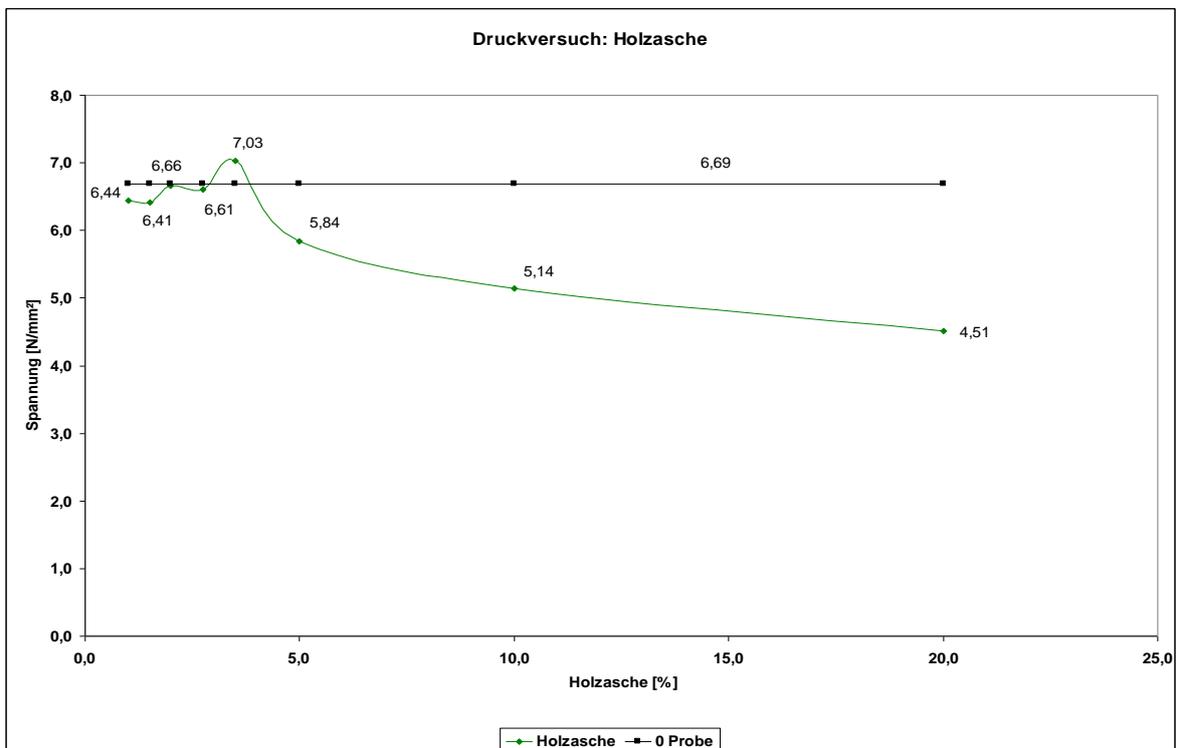


Abbildung 5-9 Auswertung für die Zugabe von Holzasche für den Druckversuch

### 5.1.1.6 TENNISMEHL

Die Verarbeitbarkeit von Tennismehl ist sehr stark von den verwendeten Prozentsätzen abhängig. Ab einer Zumischung von ca. 10 % musste dem aufbereiteten Lehm zusätzlich Wasser beigemischt werden, um eine Verbindung des Lehmes, mit den Körnern des Tennismehles, zu gewährleisten und um eine „Nesterbildung“ zu verhindern.

Das Durchmischen mit dem Rührwerk bereitete bei hohen Prozentanteilen und einem dementsprechenden höheren Wassergehalt keine Probleme. Eine industrielle Herstellung von Lehmsteinen, mit einem Mundstück, wie es in der Ziegelindustrie üblich ist, ist bis zu einer Zumischung von 20 % ebenfalls möglich, erfordert aber viel Erfahrung bei der Mundstückform.

Für Lehmprismen mit Tennismehl wurden in Summe 16 Serien, inklusive der drei für die Vorversuche hergestellt. Das sind 48 Probekörper für den Biegezugversuch und 96 für den Druckversuch.

Im Gegensatz zu Holzasche (ca. 3,5 %) benötigt Tennismehl einen hohen Prozentsatz von ca. 17,5 %, um eine Verbesserung der Druckfestigkeit und der Biegezugfestigkeit gegenüber der 0 Probe zu erreichen.

Die maximale Druckfestigkeit von 7,08 N/mm<sup>2</sup> erzielt man bei einer Zugabe von 17,5 % Tennismehl (siehe Abbildung 5-11). Das bedeutet eine Erhöhung um 5,8 % gegenüber der 0 Probe.

Beim Biegezugversuch (siehe Abbildung 5-10) sind ebenfalls 17,5 % notwendig um das Maximum von 2,63 N/mm<sup>2</sup> zu erreichen. Leider ist das eine Verschlechterung von 5,1 % bezogen auf die 0 Probe (siehe Tabelle 5-7).

**Tabelle 5-7** Vergleich der maximalen Festigkeitswerte von Lehmproben mit Tennismehl und der 0 Probe

	Prozentanteil	n	Tennismehl	Standard- abweichung	0 Probe	Vergleich
<b>Biegezugversuch</b>	17,5 %	9	2,63 N/mm <sup>2</sup>	0,228 N/mm <sup>2</sup>	2,77 N/mm <sup>2</sup>	- 5,1 %
<b>Druckversuch</b>	17,5 %	18	7,08 N/mm <sup>2</sup>	0,397 N/mm <sup>2</sup>	6,69 N/mm <sup>2</sup>	+ 5,8 %

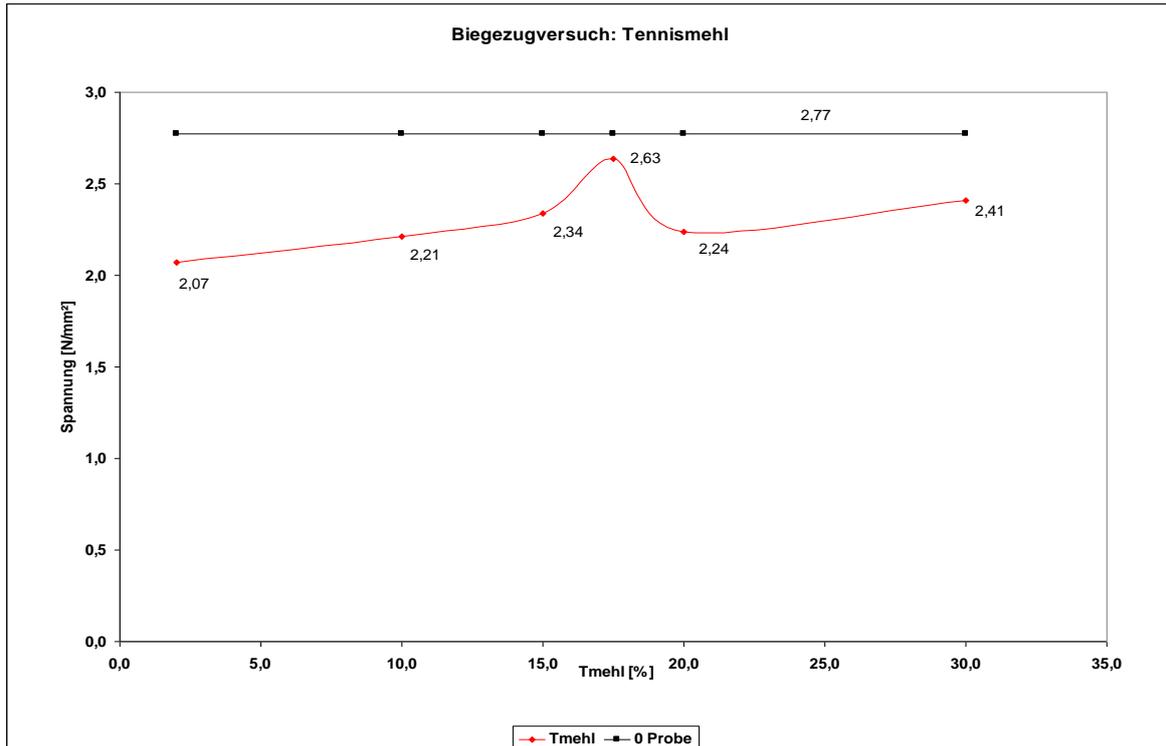


Abbildung 5-10 Auswertung für die Zugabe von Tennismehl für den Biegezugversuch

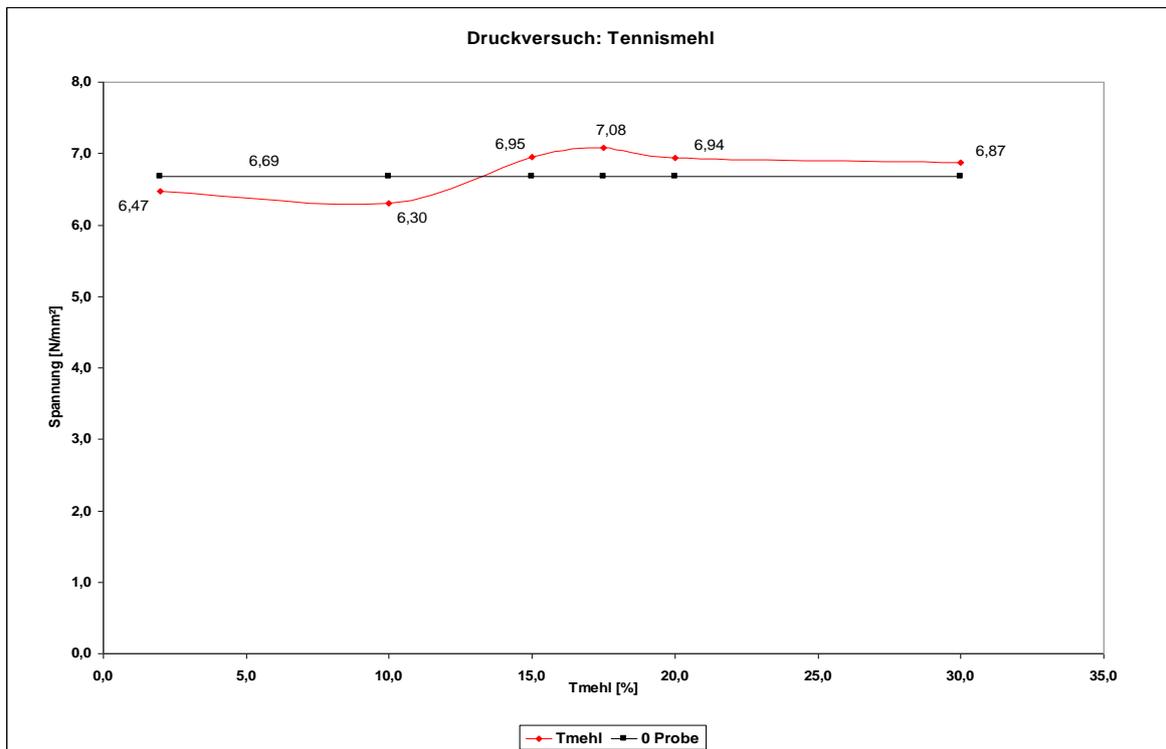


Abbildung 5-11 Auswertung für die Zugabe von Tennismehl für den Druckversuch

### 5.1.1.7 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE FÜR EINZELMISCHUNGEN

Das Beimischen von Einzelstoffen war nur bedingt erfolgreich (siehe Abbildung 5-12 und Abbildung 5-13). Von fünf verschiedenen Zusatzstoffen schafften nur Holzasche und Tennismehl eine Erhöhung der Druckfestigkeit um 5,1 % bzw. 5,8 %. Bei der Biegezugfestigkeit erreichte man nur durch die Zugabe von Holzasche eine Verbesserung um 4,0 % (siehe Tabelle 5-8). Erfreulich dabei ist, dass die ökologische Sicht dabei nicht zu kurz kommt. Beide Stoffe sind Abfallprodukte der Industrie und müssen nicht extra so wie z.B. Wasserglas erzeugt werden. Weiters sind sie in ausreichender Menge vorhanden.

In der Tabelle 5-9 und Tabelle 5-10 sieht man, welcher Stoff in wie viele Serien und zu welchen Prozentsätzen getestet wurde.

**Tabelle 5-8** Maximalwerte für jeden einzelnen Zusatzstoff bezogen auf die 0 Probe

	Bezeichnung	Prozentanteil	n	Werte	Standard-abweichung	0 Probe	Vergleich
Biegezugversuch	Strohspäne	1,0 %	3	2,54 N/mm <sup>2</sup>	0,293 N/mm <sup>2</sup>	2,80 N/mm <sup>2</sup>	- 8,3 %
	Na Wasserglas	2,0 %	3	1,42 N/mm <sup>2</sup>	0,339 N/mm <sup>2</sup>		- 48,7 %
	Holzasche	2,75 %	3	2,88 N/mm <sup>2</sup>	0,160 N/mm <sup>2</sup>		+ 4,0 %
	Tennismehl	17,5 %	9	2,63 N/mm <sup>2</sup>	0,228 N/mm <sup>2</sup>		- 5,1 %
Druckversuch	Strohspäne	1,5 %	6	6,21 N/mm <sup>2</sup>	0,111 N/mm <sup>2</sup>	6,69 N/mm <sup>2</sup>	- 7,2 %
	Na Wasserglas	2,0 %	6	6,26 N/mm <sup>2</sup>	0,264 N/mm <sup>2</sup>		- 6,4 %
	Holzasche	3,5 %	12	7,03 N/mm <sup>2</sup>	0,402 N/mm <sup>2</sup>		+ 5,1 %
	Tennismehl	17,5 %	18	7,08 N/mm <sup>2</sup>	0,397 N/mm <sup>2</sup>		+ 5,8 %

**Tabelle 5-9** Auflistung der Anzahl von Serien je Zusatzmittel

<b>Bezeichnung</b>	<b>Serien</b>	<b>Prüfkörper Biegezugversuch</b>	<b>Prüfkörper Druckversuch</b>
<b>0 Probe</b>	6	19	38
<b>Stroh</b>	6	18	36
<b>Natron Wasserglas</b>	6	18	36
<b>Spezial Wasserglas</b>	3	9	18
<b>Holzasche</b>	12	36	72
<b>Tennismehl</b>	16	48	96
<b>Summe</b>	<b>49</b>	<b>148</b>	<b>296</b>

Für die 0 Probe wurden in Summe 6 Serien hergestellt. Eine Serie enthielt aber statt drei, vier Probekörper. Dadurch erklärt sich die Summe der Probekörper für die 0 Probe mit 19 Probekörpern für den Biegezugversuch und 38 für den Druckversuch. Normalerweise ergeben 6 Serien - 18 Probekörper für den Biegezugversuch und 36 Probekörper für den Druckversuch (wie bei den Strohspänen, siehe in der Tabelle 5-9). Die Anzahl der angegebenen Serien beinhaltet auch die Serien aus den Vorversuchen.

**Tabelle 5-10** Auflistung der untersuchten Serien (inklusive Vorversuche) mit Prozentsätzen je Zusatzmittel

Bezeichnung	Vorversuche			Optimierung													
	[A-B-C]			[D-E-F]			[G-H-I]			[N-O-P-R]			[N-O-P]			[S]	
Strohspäne	A [%]	B [%]	C [%]								K [%]	L [%]	M [%]				
	2,0	10,0	20,0								1,0	1,5	2,0				
Na Wglas ofengetrocknet	A [%]	B [%]	C [%]														
	2,0	10,0	20,0														
Na Wglas luftgetrocknet														N [%]	O [%]	P [%]	
														2,0	10,0	20,0	
2 Komp. Wglas luftgetrocknet														N [%]	O [%]	P [%]	
														2,0	5,0	10,0	
Holzasche	A [%]	B [%]	C [%]	D [%]	E [%]	F [%]	G [%]	H [%]	I [%]	K [%]	L [%]	M [%]					
	2,0	10,0	20,0	1,0	2,0	5,0	1,5	2,0	3,5	2,0	2,75	3,5					
Tennismehl	A [%]	B [%]	C [%]	D [%]	E [%]	F [%]	G [%]	H [%]	I [%]	K [%]	L [%]	M [%]	S [%]	T [%]	U [%]	V [%]	
	2,0	10,0	20,0	15,0	20,0	30,0	2,0	15,0	20,0	15,0	17,5	20,0	17,5	10,0	15,0	17,5	

Die Buchstaben (A, B, C, D,.....) in der Tabelle 5-10, beschreiben die Serien und die Zahlen darunter die dabei untersuchten Prozentsätze.

Zur Erinnerung: Eine Serie je Additiv, enthält drei Probekörper mit derselben Prozentmischung. Je Herstellungstag werden immer drei Serien für jedes untersuchte Additiv hergestellt (z.B. an dem Tag, an dem die Serien DEF hergestellt wurden, ist nur Holzasche, Tennismehl und eine 0 Probe verarbeitet worden).

Serien mit der gleichen Bezeichnung haben denselben Herstellungstag und denselben Prüftag. Aus Platzgründen sind nicht alle gleichnamigen Serien untereinander dargestellt.

Die Bezeichnung der 0 Probe wird anhand dieser Tabelle ebenfalls besser verständlich. Die Serien A, B, und C wurden an einem Tag gemacht. Von dem benötigten Lehm, für die unterschiedlichen Zusatzstoffe und Prozentmischungen, wurde dann nur eine Serie der 0 Probe hergestellt. Daraus ergibt sich die Bezeichnung [A-B-C].

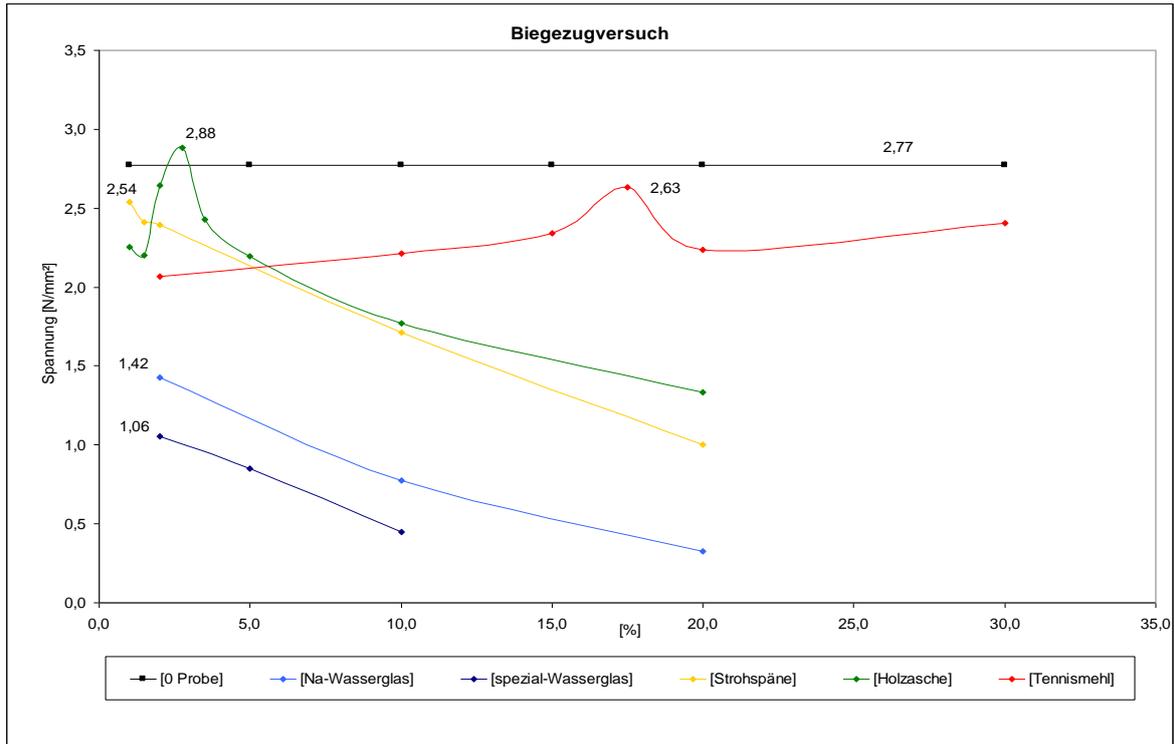


Abbildung 5-12 Zusammenfassung zur Optimierung der Biegezugfestigkeit von Lehmprismen mit einzelnen Additiven

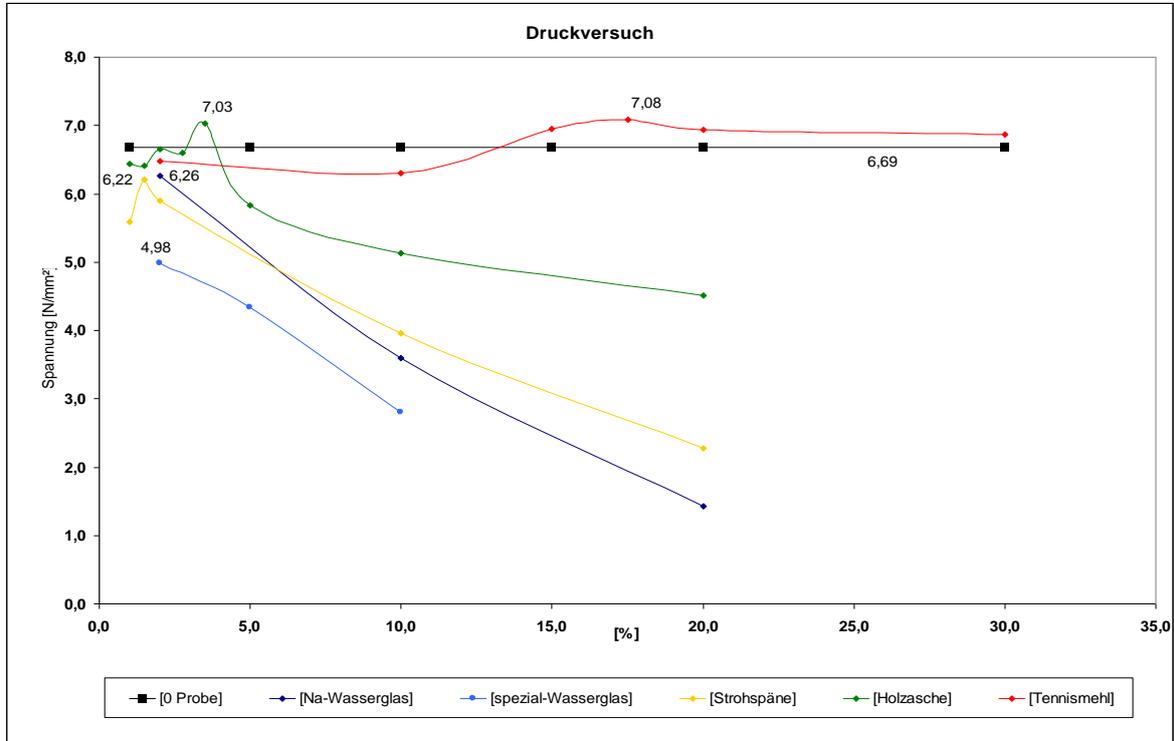


Abbildung 5-13 Zusammenfassung zur Optimierung der Druckfestigkeit von Lehmprismen mit einzelnen Additiven

## 5.1.2 Lehmprismen mit Kombinationen von Additiven

Nachdem jeder Zusatzstoff (Strohspäne, Wasserglas, Holzasche und Tennismehl) einzeln auf seine Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit optimiert wurde (siehe Tabelle 5-8), werden diese jetzt miteinander kombiniert.

Kombinationen mit Natron- Wasserglas oder dem Zwei- Komponenten Wasserglas werden auf Grund der schlechten Ergebnisse aus den vorhergehenden Versuchen nicht mehr untersucht.

### 5.1.2.1 MÖGLICHEN KOMBINATIONEN

Diese Versuchsreihe dient in erster Linie dazu, festzustellen, ob Kombinationen von einzelnen Stoffen überhaupt sinnvoll sind. Alle Zusatzstoffe werden miteinander kombiniert (siehe Tabelle 5-11). Dabei werden jene Prozentsätze gewählt, die sich bei den jeweiligen Einzelstoffen als optimal für den Druckversuch herausgestellt haben, und im Fall von Holzasche von 3,5 % auf 3,0 % variieren.

Die Lehmaufbereitung, die Probekörperform bzw. -größe und die Versuchsanordnung bleiben, wie im Kapitel 4 beschrieben, gleich.

Von jeder Kombination wird eine Serie hergestellt und mit der 0 Probe verglichen. Daraus ergeben sich statt Kurvenverläufe nur Einzelaufnahmen, die in einem Balkendiagramm besser dargestellt werden können. Die Werte sind wieder nur richtungsweisend und damit so zu deuten, wie das schon bei den Vorversuchen gemacht wurde.

Für diese Versuche werden 4 Serien mit 12 Probekörper für den Druckversuch, und 24 Probekörper für den Biegezugversuch hergestellt.

**Tabelle 5-11** Verwendete Kombinationen von Einzelstoffen

1. Kombination	1,5 % Strohspäne + 3,0 % Holzasche
2. Kombination	1,5 % Strohspäne + 17,5 % Tennismehl
3. Kombination	1,5 % Strohspäne + 3,0 % Holzasche + 17,5 % Tennismehl
4. Kombination	3,0 % Holzasche + 17,5 % Tennismehl

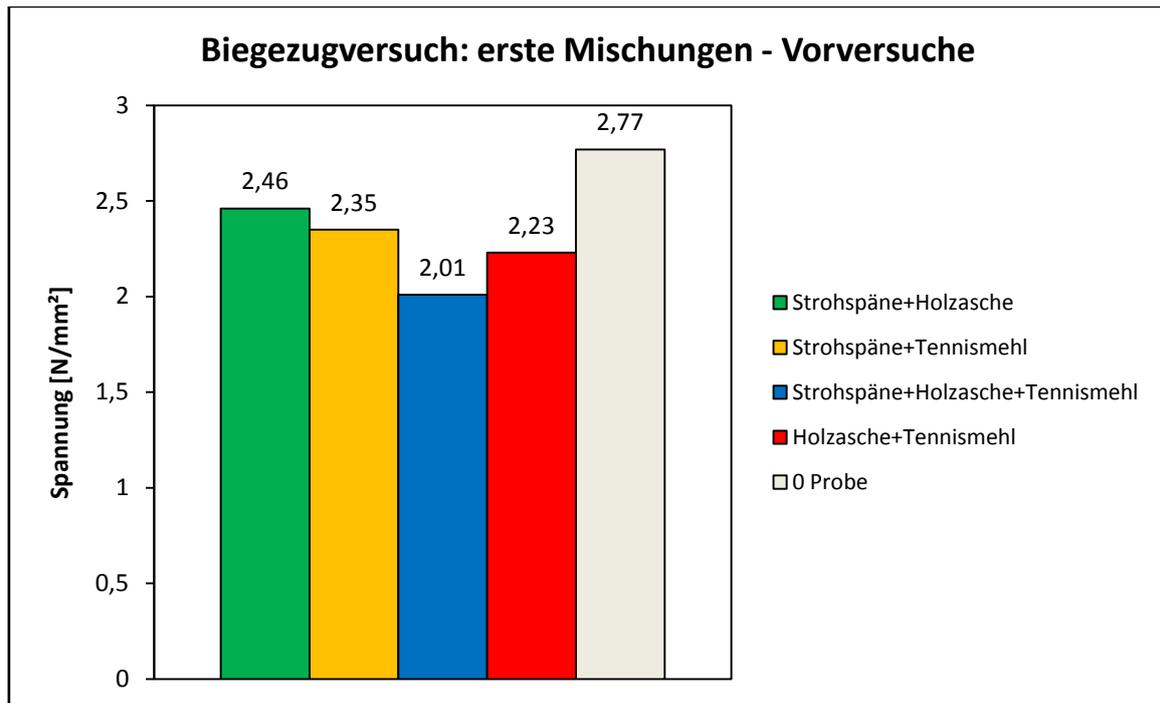


Abbildung 5-14 Auswertung der ersten Mischungen (Vorversuche) für den Druckversuch

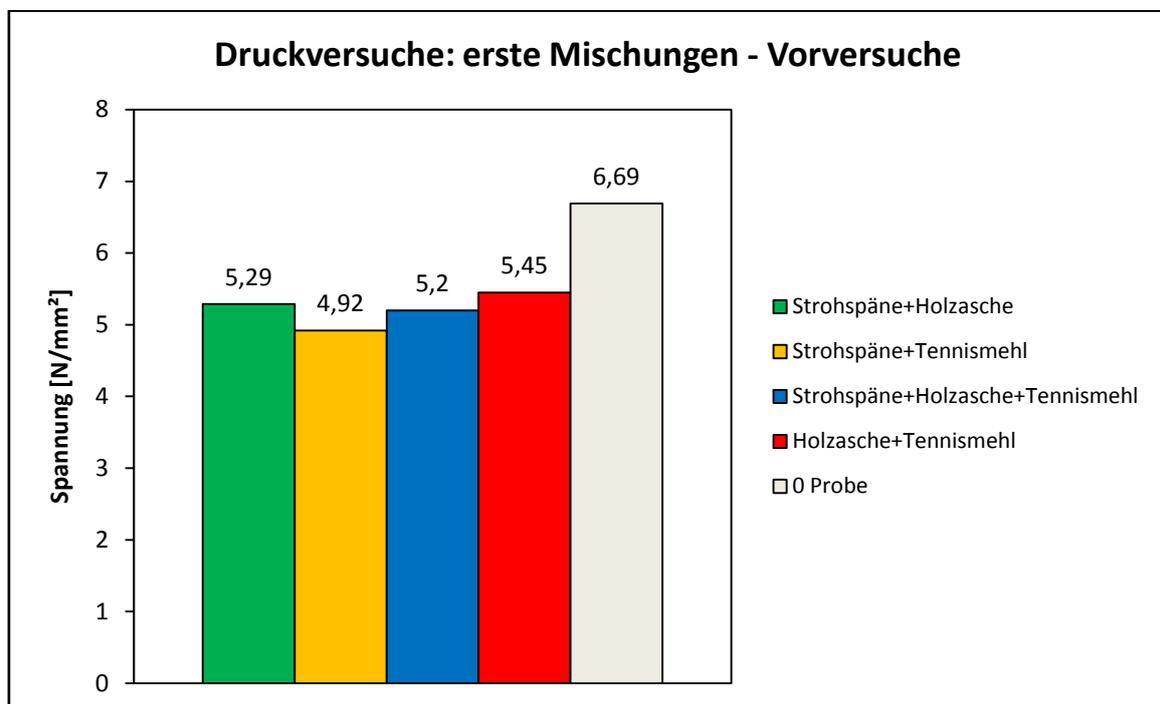


Abbildung 5-15 Auswertung der ersten Mischungen (Vorversuche) für den Biegezugversuch

**Tabelle 5-12** Festigkeitswerte für Mischungen im Vergleich mit der 0 Probe

	<b>1. Kombination</b> (Strohspäne + Holzasche)	<b>2. Kombination</b> (Strohspäne + Tennismehl)	<b>3. Kombination</b> (Strohspäne + Holzasche + Tennismehl)	<b>2. Kombination</b> (Holzasche + Tennismehl)	<b>0 Probe</b>
<b>n</b>	3	3	3	3	2,77
<b>Biegezugfestigkeit</b> [N/mm <sup>2</sup> ]	2,46	2,35	2,01	2,23	
<b>Standardabweichung</b> [N/mm <sup>2</sup> ]	0,395	0,266	0,212	0,265	
<b>Vergleich zu</b> <b>0 Probe [%]</b>	- 11,2	- 15,2	- 27,4	- 19,5	
<b>n</b>	6	6	6	6	6,69
<b>Druckfestigkeit</b> [N/mm <sup>2</sup> ]	5,29	4,92	5,20	5,45	
<b>Standardabweichung</b> [N/mm <sup>2</sup> ]	0,327	0,310	0,494	0,335	
<b>Vergleich zu</b> <b>0 Probe [%]</b>	- 20,9	- 26,5	- 22,3	- 18,5	

Die Tabelle 5-12 zeigt deutlich, dass die getesteten Mischungsverhältnisse nicht zu einer Druck- oder Biegezugverbesserung beitragen können. Die beste Druckfestigkeit von 5,45 N/mm<sup>2</sup> erzielt man mit einer Mischung aus 3,0 % Holzasche und 17,5 % Tennismehl (siehe Abbildung 5-15). Vergleicht man diesen Wert mit dem Wert der 0 Probe, ergibt das ein Minus von 18,5 %. Interessant ist, dass für die Biegezugfestigkeit eine andere Mischung die besten Werte ergibt. Strohspäne (1,5 %), in Kombination mit Holzasche (3,0 %), ergeben einen Wert für die Biegezugfestigkeit von 2,46 N/mm<sup>2</sup> (siehe Abbildung 5-14)- im Vergleich zur 0 Probe ein Minus von 11,2 %. Eine positive Wirkung der Strohspäne für die Biegezugfestigkeit ist sehr wahrscheinlich.

Trotz des durchaus negativen Versuchsergebnisses wird die Kombination Holzasche und Tennismehl aber trotzdem weiter untersucht.

### 5.1.2.2 HOLZASCHE UND TENNISMEHL

Die Kombination von Holzasche und Tennismehl liefert im Vergleich zur 0 Probe deutlich schlechtere Ergebnisse für die Druckfestigkeit und die Biegezugfestigkeit, hat aber von den getesteten Kombinationen die besten Aussichten auf eine mögliche Erhöhung der Festigkeitswerte. Aus diesem Grund wird diese Kombination weiter untersucht.

In den nachfolgenden Untersuchungen werden die Prozentsätze der beiden Partner variiert und die Auswirkungen auf die Druckfestigkeit und die Biegezugfestigkeit untersucht. Die Werte aus dem Vorversuch werden wieder berücksichtigt.

#### Holzasche bleibt gleich und Tennismehl variiert

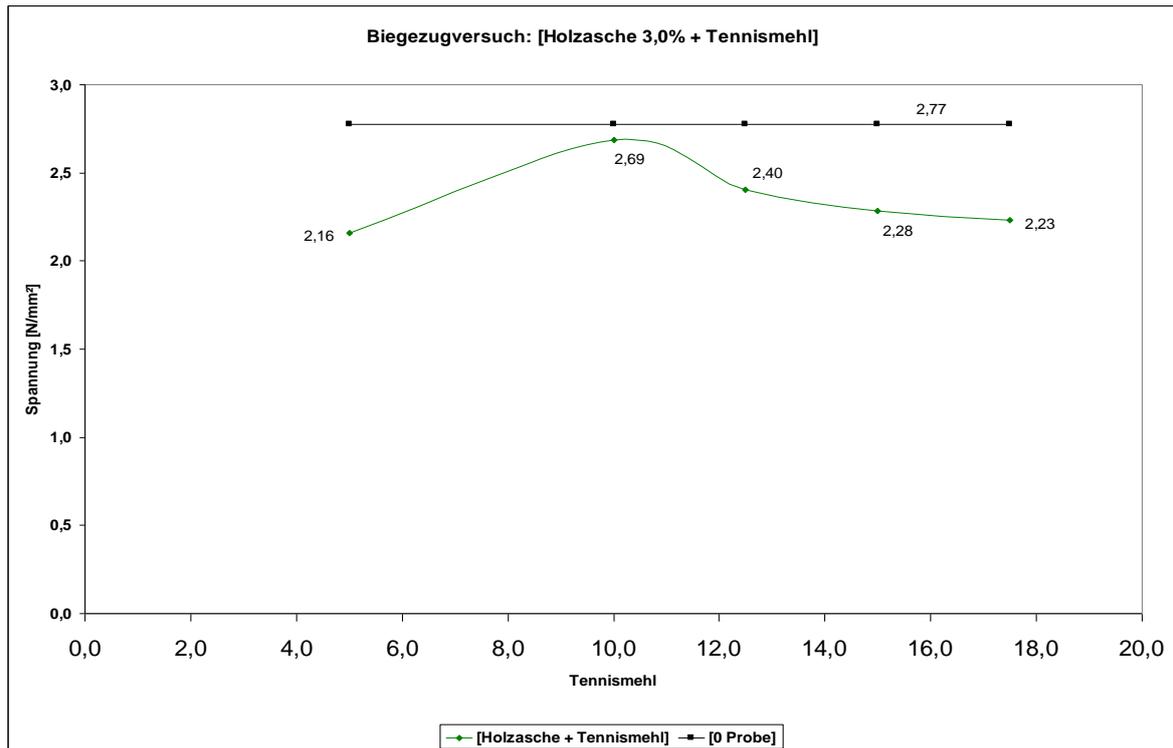
In dieser Versuchsreihe werden Probekörper hergestellt, bei denen die Prozentangabe für die Holzasche von 3,0 % gleich bleibt, die Menge des zugegebenen Tennismehles wird jedoch verändert.

Das Tennismehl wird in acht Serien mit fünf verschiedenen Prozentsätzen (1 x 5,0 %; 1 x 10,0 %; 2 x 12,5 %; 1 x 15,0 % und 3 x 17,5 %) zugemischt, wobei ein Wert für 17,5 % aus der vorhergehenden Versuchsreihe mitberücksichtigt wird.

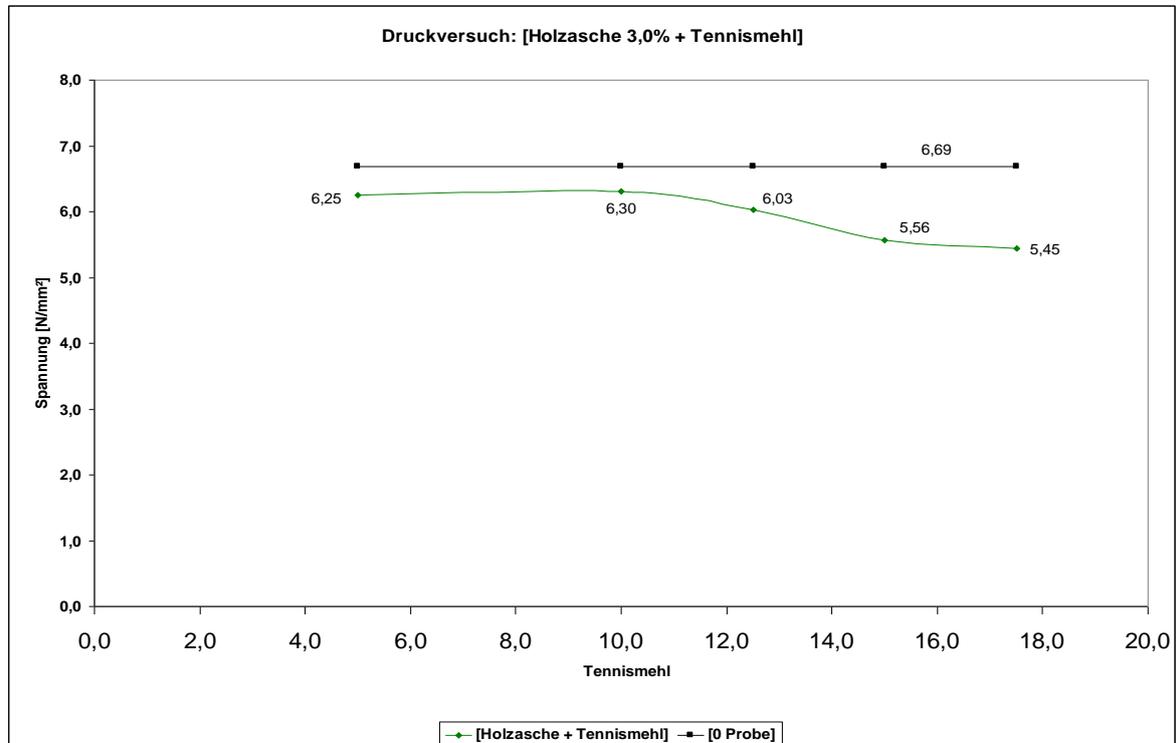
Durch das Variieren der Prozentsätze für das Tennismehl, konnte eine deutliche Steigerung der Druckfestigkeit und der Biegezugfestigkeit, gegenüber der ersten Kombinationsversuche erreicht werden. Die besten Ergebnisse für die Druckfestigkeit und die Biegezugfestigkeit erzielt man mit einer Mischung von 3,0 % Holzasche und 10,0 % Tennismehl (siehe Tabelle 5-13). Die Druckfestigkeit stieg von 5,45 N/mm<sup>2</sup> auf 6,30 N/mm<sup>2</sup> (siehe Abbildung 5-17), was eine Steigerung von 15,6 % bedeutet. Bei der Biegezugfestigkeit erreicht man einen Wert von 2,69 N/mm<sup>2</sup> (siehe Abbildung 5-16). Das bedeutet eine Steigerung von 9,3 % gegenüber den Vorversuchen. Leider liegen die Maximalwerte auch hier unterhalb der 0 Probe.

**Tabelle 5-13** Festigkeitswerte bei fixer Holzasche (3,0 %) und veränderlichem Tennismehl

	3,0 % Holzasche + 5,0 % Tennismehl	3,0 % Holzasche + 10,0 % Tennismehl	3,0 % Holzasche + 12,5 % Tennismehl	3,0 % Holzasche + 15,0 % Tennismehl	3,0 % Holzasche + 17,5 % Tennismehl	0 Probe	Vorversuche - Mischungen
<b>n</b>	3	3	6	3	6	2,77	2,46
<b>Biegezugfestigkeit</b> [N/mm <sup>2</sup> ]	2,16	2,69	2,40	2,28	2,23		
<b>Standardabweichung</b> [N/mm <sup>2</sup> ]	0,314	0,183	0,535	0,093	0,158		
<b>Vergleich zu</b> <b>0 Probe [%]</b>	- 22,0	- 2,9	- 13,4	- 17,7	- 19,5		
<b>Vergleich zu</b> <b>Vorversuch [%]</b>	- 12,2	+ 9,3	- 2,4	- 7,3	- 9,3		
<b>n</b>	6	6	12	6	12	6,69	5,45
<b>Druckfestigkeit</b> [N/mm <sup>2</sup> ]	6,25	6,30	6,03	5,56	5,45		
<b>Standardabweichung</b> [N/mm <sup>2</sup> ]	0,606	0,226	0,903	0,368	0,737		
<b>Vergleich zu</b> <b>0 Probe [%]</b>	- 6,6	- 5,8	- 9,7	- 16,9	- 18,5		
<b>Vergleich zu</b> <b>Vorversuch [%]</b>	+ 14,7	+ 15,6	+ 10,6	+ 2,0	+ 0		



**Abbildung 5-16** Biegezugfestigkeiten für die Mischung mit fixen 3,0 % Holzasche und veränderlichen Tennismehl



**Abbildung 5-17** Druckfestigkeiten für die Mischung mit fixen 3,0 % Holzasche und veränderlichen Tennismehl

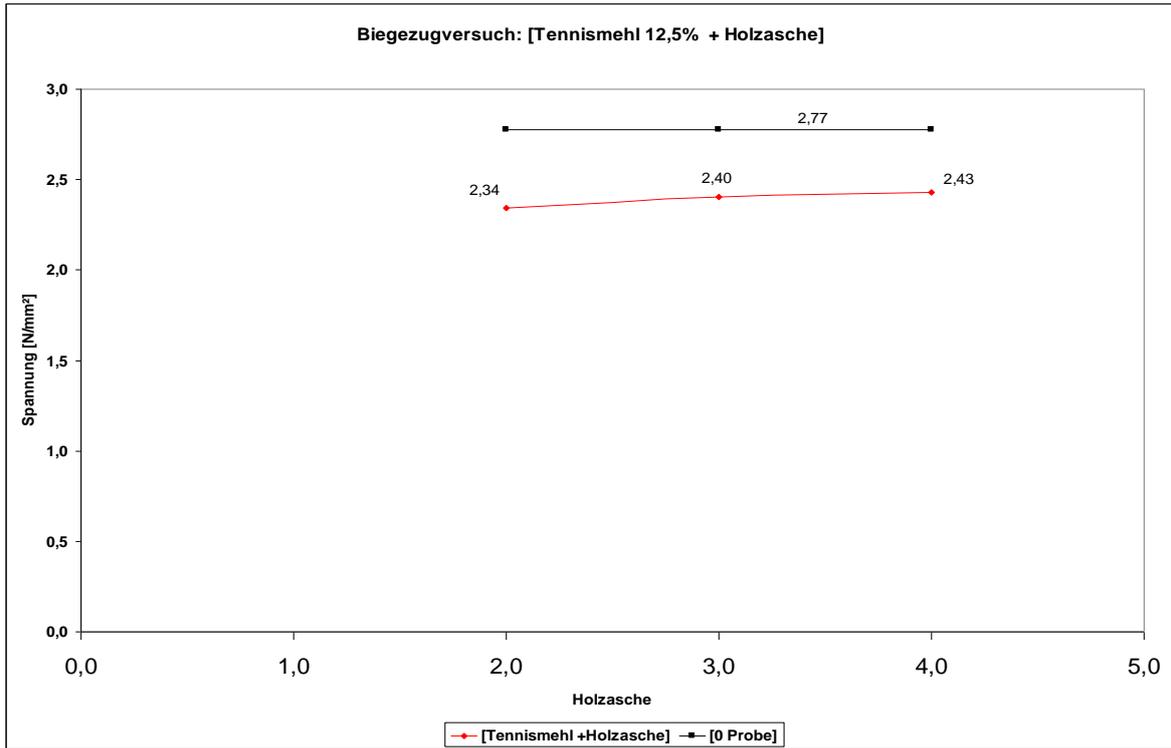
Tennismehl bleibt gleich und Holzrasche variiert

Nachdem die vorangegangenen Versuche nicht zu einer Druckerhöhung gegenüber der 0 Probe führten, wurden nun die Prozentsätze umgedreht. Das Tennismehl mit 12,5 % blieb fix und der Anteil der Holzrasche wurde verändert. Um auf die veränderte Situation aus dem vorhergehenden Versuch einzugehen, wird das Tennismehl auf 12,5 % fixiert. Danach wurden drei Serien mit 12,5 % Tennismehl und 2,0 %; 3,0 % bzw. 4,0 % Holzrasche hergestellt.

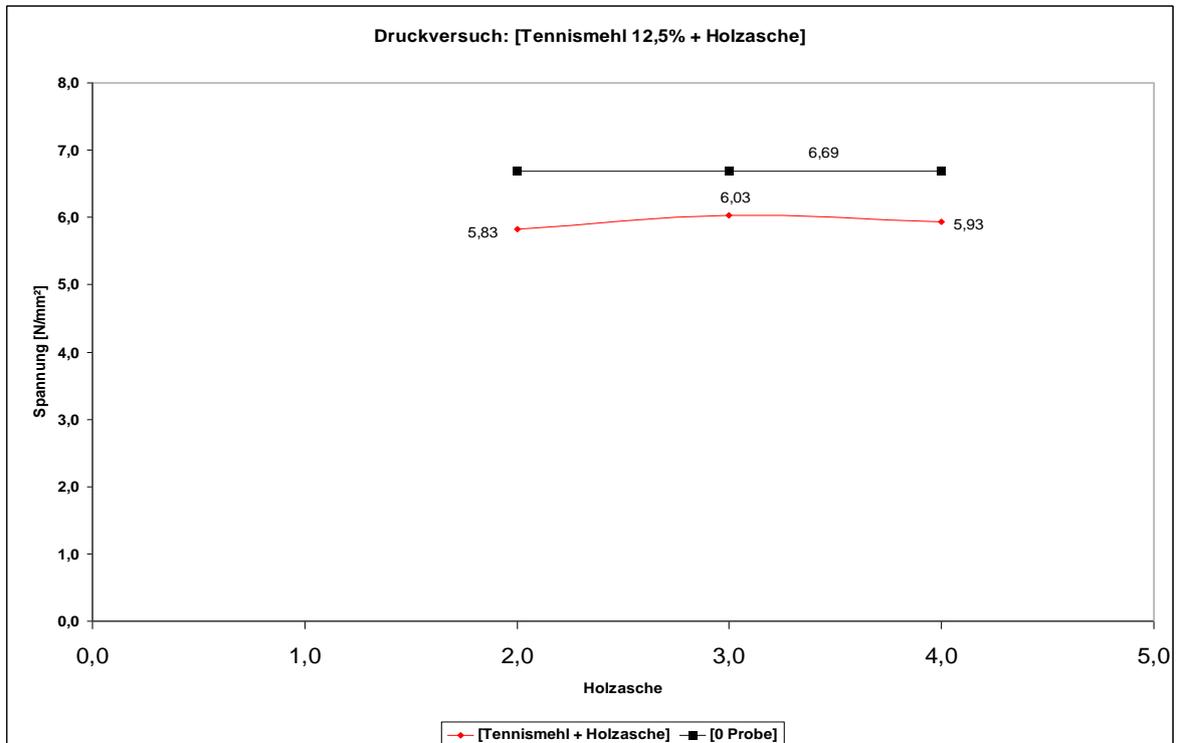
**Tabelle 5-14** Festigkeitswerte bei fixem Tennismehl und veränderlicher Holzrasche

	12,5 % Tennismehl + 2,0 % Holzrasche	12,5 % Tennismehl + 3,0 % Holzrasche	12,5 % Tennismehl + 4,0 % Holzrasche	0 Probe	Vorversuche - Mischungen
<b>n</b>	3	3	3	2,77 N/mm <sup>2</sup>	2,46 N/mm <sup>2</sup>
<b>Biegezugfestigkeit</b>	2,34 N/mm <sup>2</sup>	2,40 N/mm <sup>2</sup>	2,43 N/mm <sup>2</sup>		
<b>Standardabweichung</b>	0,191 N/mm <sup>2</sup>	0,117 N/mm <sup>2</sup>	0,124 N/mm <sup>2</sup>		
<b>Vergleich 0 Probe</b>	- 15,5 %	- 13,4 %	- 12,3 %		
<b>Vergleich Vorversuch</b>	- 4,9 %	- 2,4 %	- 1,2 %		
<b>n</b>	6	6	6	6,69 N/mm <sup>2</sup>	5,45 N/mm <sup>2</sup>
<b>Druckfestigkeit</b>	5,83 N/mm <sup>2</sup>	6,03 N/mm <sup>2</sup>	5,93 N/mm <sup>2</sup>		
<b>Standardabweichung</b>	0,433 N/mm <sup>2</sup>	0,355 N/mm <sup>2</sup>	0,257 N/mm <sup>2</sup>		
<b>Vergleich 0 Probe</b>	- 12,9 %	- 5,8 %	- 11,4 %		
<b>Vergleich Vorversuch</b>	+ 6,9 %	+ 10,6 %	+ 8,8 %		

Leider zeigt sich auch hier, dass die Mischungen mit 12,5 % Tennismehl und variablen Anteil an Holzrasche nicht zur Steigerung der Druckfestigkeit oder der Biegezugfestigkeit beitragen konnten (siehe Tabelle 5-14). In den Abbildung 5-18 und Abbildung 5-19 sieht man deutlich den Unterschied zur 0 Probe.



**Abbildung 5-18** Biegezugfestigkeiten für die Mischung mit fixem Tennismehl (12,5 %) und veränderlicher Holzasche



**Abbildung 5-19** Druckversuch für die Mischung mit fixem Tennismehl (12,5 %) und veränderlicher Holzasche

### **5.1.2.3 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE FÜR KOMBINATIONEN**

Die Ergebnisse aus dem Kapitel 5.1.2 zeigen leider keine Auswirkung auf eine Erhöhung der Druckfestigkeit oder eine Biegezugfestigkeit im Bezug auf die 0 Probe (siehe Tabelle 5-15).

Das Mischen von optimierten Einzelstoffen ist keine Garantie auf Erhöhung der Festigkeitswerte. Im Gegenteil, es wurden durchwegs schlechte mechanische Werte gemessen. Es scheint, als ob sich die positiven Mechanismen einzelner Zusatzstoffe bei einer Kombination mit anderen Zusatzstoffen umkehren. In Abbildung 5-20 und Abbildung 5-21 sieht man eine Zusammenfassung der erzielten Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit für die getesteten Kombinationen.

Die besten Festigkeitswerte für die getesteten Kombinationen ergab eine Mischung aus 3,0 % Holzasche und 10,0 % Tennismehl. Die damit erreichte Druckfestigkeit von 6,30 N/mm<sup>2</sup> liegt aber um 5,8 % unterhalb der 0 Probe. Bei der Biegezugfestigkeit von 2,69 N/mm<sup>2</sup> liegt der Wert 2,9 % unterhalb des Werts aus der 0 Probe. In Summe wurden 14 Serien mit 42 Probekörper für den Biegezugversuch hergestellt, und 84 Probekörper für den Druckversuch (siehe Tabelle 5-16).

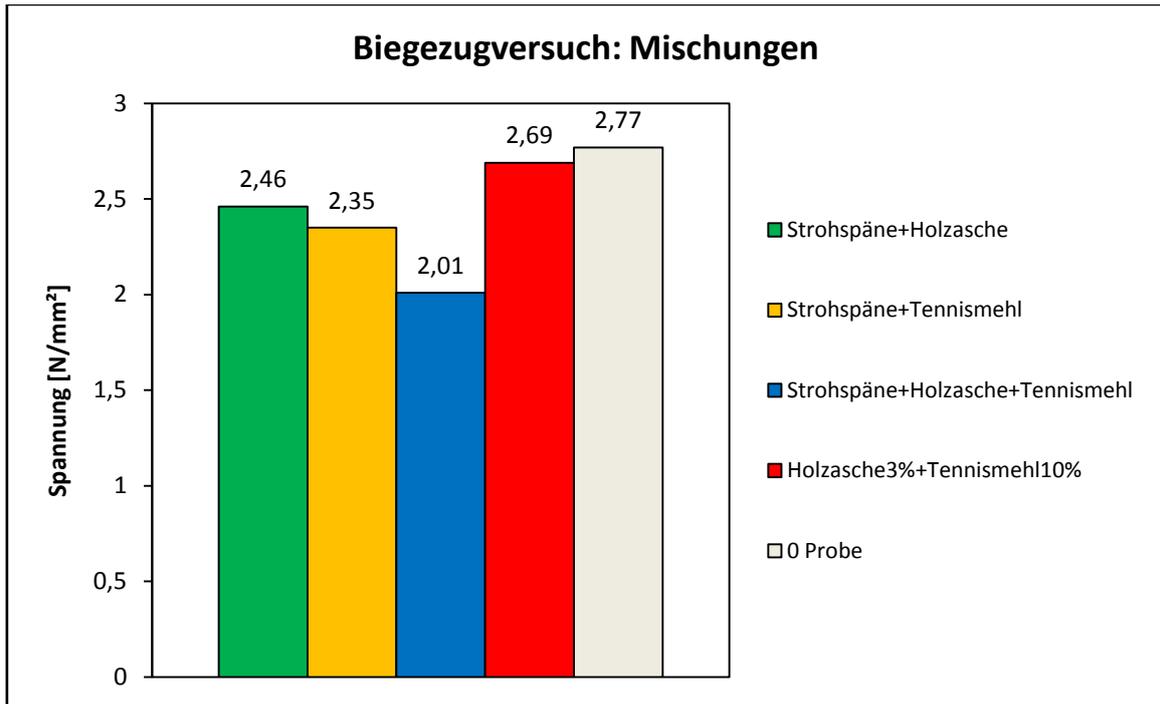


Abbildung 5-20 Zusammenfassung der besten Ergebnisse für Mischungen aus dem Biegezugversuche

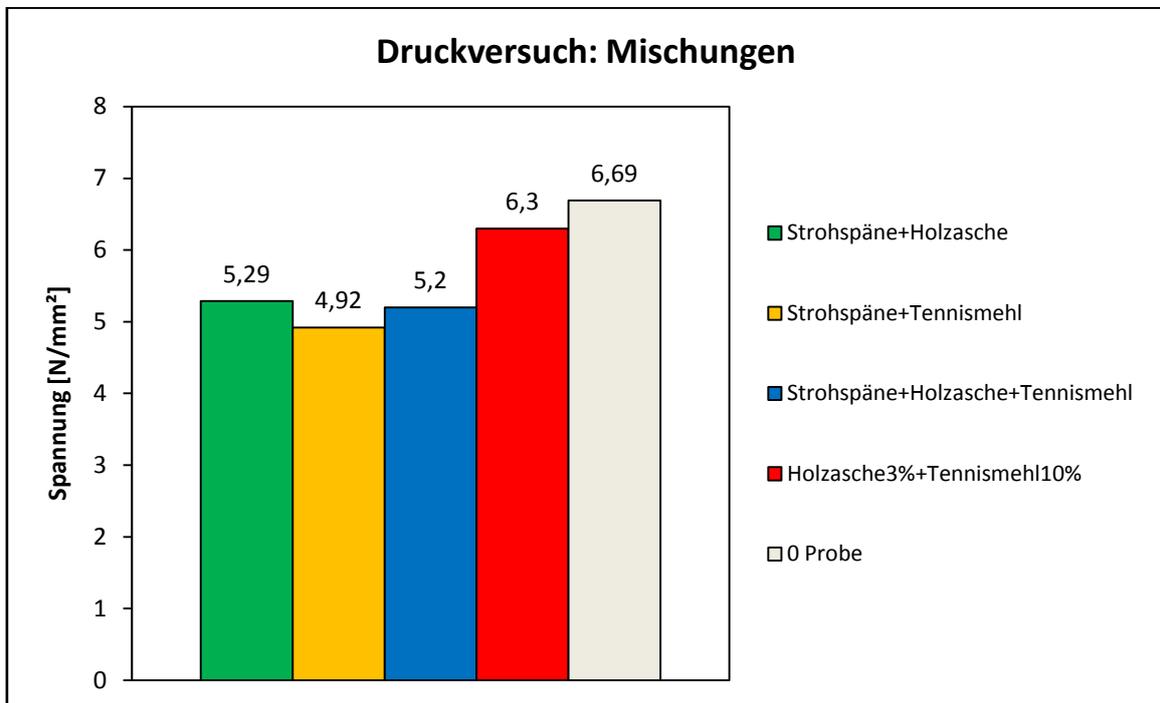


Abbildung 5-21 Zusammenfassung der besten Ergebnisse für Mischungen aus dem Druckversuch

**Tabelle 5-15** Maximalwerte der Kombinationen bezogen auf die 0 Probe

	<b>Bezeichnung</b>	<b>Prozentanteil</b>	<b>n</b>	<b>Werte [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>Standard- -abweichung [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>0 Probe [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>Vergleich [%]</b>
<b>Biegezugversuch</b>	Strohspäne & Holzasche	1,5 % & 3,0 %	3	2,46	0,395	2,77	- 11,2
	Strohspäne & Tennismehl	1,5 % & 17,5 %	3	2,35	0,266		- 15,2
	Strohspäne & Holzasche & Tennismehl	1,5 % & 3,0 % & 17,5%	3	2,01	0,212		- 27,4
	Holzasche & Tennismehl	3,0 % & 10,0 %	3	2,69	0,183		- 2,9
<b>Druckversuch</b>	Strohspäne & Holzasche	1,5 % & 3,0 %	6	5,29	0,327	6,69	- 20,9
	Strohspäne & Tennismehl	1,5 % & 17,5 %	6	4,92	0,310		- -26,5
	Strohspäne & Holzasche & Tennismehl	1,5 % & 3,0 % & 17,5%	6	5,20	0,494		- 22,3
	Holzasche & Tennismehl	3,0 % & 10,0 %	6	6,30	0,226		- 5,8

**Tabelle 5-16** Auflistung der Anzahl von Serien zur Herstellung der Kombinationen

<b>Bezeichnung</b>	<b>Serien</b>	<b>Prüfkörper Biegezugversuch</b>	<b>Prüfkörper Druckversuch</b>
<b>Vorversuche</b>	3	9	18
<b>Holzasche 3,0 % &amp; Tennismehl variabel</b>	8	24	48
<b>Tennismehl 12,5 % &amp; Holzasche variabel</b>	3	9	18
<b>Summe</b>	<b>14</b>	<b>42</b>	<b>84</b>

### 5.1.3 Zusammenfassung der Ergebnisse für den trockenen Zustand

Auf Grund der zahlreichen Untersuchungen von Lehmprismen mit und ohne Zusatzstoffen, kommt es zu zwei „Testsiegern“ für den trockenen Zustand:

Tennismehl und Holzasche sind jene Stoffe, die eine Erhöhung der Druckfestigkeit verursachen (siehe Tabelle 5-17)- vorausgesetzt, die jeweilige Dosierung der Stoffe stimmt. Holzasche und Tennismehl haben unterschiedliche Prozentsätze, bei denen eine Erhöhung der Festigkeitswerte feststellbar ist.

Kombinationen von einzelnen Additiven bewirkten keine Verbesserung der Druckfestigkeit und der Biegezugfestigkeit.

Die Verarbeitbarkeit der Holzasche ist auf Grund der geringen Prozentsätze sehr viel unproblematischer als beim Tennismehl. Ein weiterer Vorteil von Holzasche ist eine Erhöhung der Biegezugfestigkeit. Bei Tennismehl wurden leichte Verluste der Festigkeit gegenüber der 0 Probe gemessen.

Tennismehl erreicht bei 17,5 % das Maximum, was darauf schließen lässt, dass die Körner durch eine Stützwirkung (also eine mechanische Wirkung) einen wesentlichen Anteil an der Erhöhung der Druckfestigkeit haben und keine chemischen Reaktionen mit dem Lehm dafür verantwortlich sind. Im Gegensatz dazu erreicht die Holzasche bei 2,75 % ihren besten Wert. Auf Grund dieser Ergebnisse ist anzunehmen, dass auch chemische Reaktionen für die Erhöhung der Druckfestigkeit verantwortlich sind.

**Tabelle 5-17** Maximalwerte für Tennismehl und Holzasche bezogen auf die 0 Probe

	Bezeichnung	Prozentanteil	n	Werte	Standard- abweichung	0 Probe	Vergleich
Biegezugversuch	Holzasche	2,75 %	3	2,88 N/mm <sup>2</sup>	0,160 N/mm <sup>2</sup>	2,77 N/mm <sup>2</sup>	+ 4,0 %
	Tennismehl	17,5 %	9	2,63 N/mm <sup>2</sup>	0,228 N/mm <sup>2</sup>		- 5,1 %
Druckversuch	Holzasche	3,5 %	12	7,03 N/mm <sup>2</sup>	0,402 N/mm <sup>2</sup>	6,69 N/mm <sup>2</sup>	+ 5,1 %
	Tennismehl	17,5 %	18	7,08 N/mm <sup>2</sup>	0,397 N/mm <sup>2</sup>		+ 5,8 %

## 5.2 Weiterführende Untersuchungen – feuchter Zustand

Gerade für den Lehmstein ist eine Untersuchung des Tragverhaltens im feuchten Zustand ein wesentlicher Punkt. Erst ein weitgehend „wasserresistenter“ Lehmstein kann es schaffen, die notwendige Akzeptanz der Bauherren zu gewinnen und damit mit dem gebrannten Ziegel konkurrenzfähig zu sein. Die Lagerung auf der Baustelle (im Freien), das Vermauern bei feuchtem Klima oder Regen auf das unfertige Mauerwerk, dürfen die Steindruckfestigkeit nicht oder nur in einem Bereich verringern, da sonst die Notwendige Sicherheit für das Bauwerk und für die Arbeiter nicht gewährleistet ist.

Dieser Abschnitt dient als Grundlage weiterer Diplomarbeiten und soll daher nur eine mögliche Richtung bzw. Größenordnungen vermitteln. Der Umfang der Probekörper ist daher um ein Vielfaches geringer, als bei der Untersuchung für den trockenen Zustand. Die hier angegebenen Werte sind zwar nach bestem Wissen und Gewissen entstanden, sind aber auf Grund der geringen Probekörper zu wenig repräsentativ.

Aus diesem Grund werden nur die viel versprechenden Lehmmischungen für den trockenen Zustand, (siehe Kapitel 5.1) auch im feuchten Zustand geprüft.

### 5.2.1 Versuchsanordnung für den feuchten Zustand

Für den feuchten Zustand von Lehmsteinen bin ich davon ausgegangen, dass der Lehmstein nach der Produktion, also im trockenen Zustand, durch falsche Lagerung oder ungünstige Witterungsverhältnisse bei der Errichtung des Bauwerkes Feuchtigkeit aufnimmt.

Um Werte aus dem trockenen Zustand mit Werten für den feuchten Zustand vergleichen zu können, wurden Probekörper mit Holzasche, Tennismehl und eine Kombination von Holzasche und Tennismehl hergestellt. Es wurden drei Serien mit 0 Proben, drei Serien mit 3,0 % Asche, fünf Serien mit 17,5 % Tennismehl und zwei Serien mit 3,0 % Asche und 17,5 % Tennismehl hergestellt (siehe Tabelle 5-18).

Die Herstellung der Probekörper erfolgt genauso wie im Kapitel 4.1.3 beschrieben. Nach der vollständigen Trocknung werden die Probekörper bei 40 °C und 80 % Luftfeuchtigkeit 12 bzw. 5 Tage im Klimaschrank gelagert. Danach wurden die Proben wieder gewogen, vermessen und geprüft. Die Wasseraufnahme schwankte je nach verwendetem Zusatzstoff und Prozentanteil von 0,55 % (2,0 % Tennismehl bei 12 Tage) bis 1,12 % (17,5 % Tennismehl bei 5 Tage) bezogen auf das Trockengewicht (siehe Tabelle 5-19).

**Tabelle 5-18** Übersicht der hergestellten Serien und verwendeten Prozentangaben für den feuchten Zustand

0 Probe	3 Serien	keine Zusätze			
Asche	3 Serien	1,5 %	2,0 %	3,5 %	
Tennismehl	5 Serien	2,0 %	15,0 %	20,0 %	2 x 17,5 %
Asche + Tennismehl	2 Serien	2 x [3,0 % Holzasche + 17,5 % Tennismehl]			

**Tabelle 5-19** Feuchtigkeitsbedingte Gewichtszunahme je Zusatzstoff und Prozentanteil

<b>0 Probe</b>	12 Tage		+ 1,0 %
<b>Asche</b>	12 Tage	1,5 %	+ 0,65 %
	12 Tage	2,0 %	+ 0,72 %
	12 Tage	3,5 %	+ 0,79 %
<b>Tennismehl</b>	12 Tage	2,0 %	+ 0,55 %
	12 Tage	15,0 %	+ 0,68 %
	12 Tage	20,0 %	+ 0,65 %
	5 Tage	17,5 %	+ 1,12 %
<b>Asche + Tennismehl</b>	5 Tage	3,0 % + 17,5 %	+ 0,87 %

## 5.2.2 Untersuchungsergebnisse der Lehmprismen für den feuchten Zustand

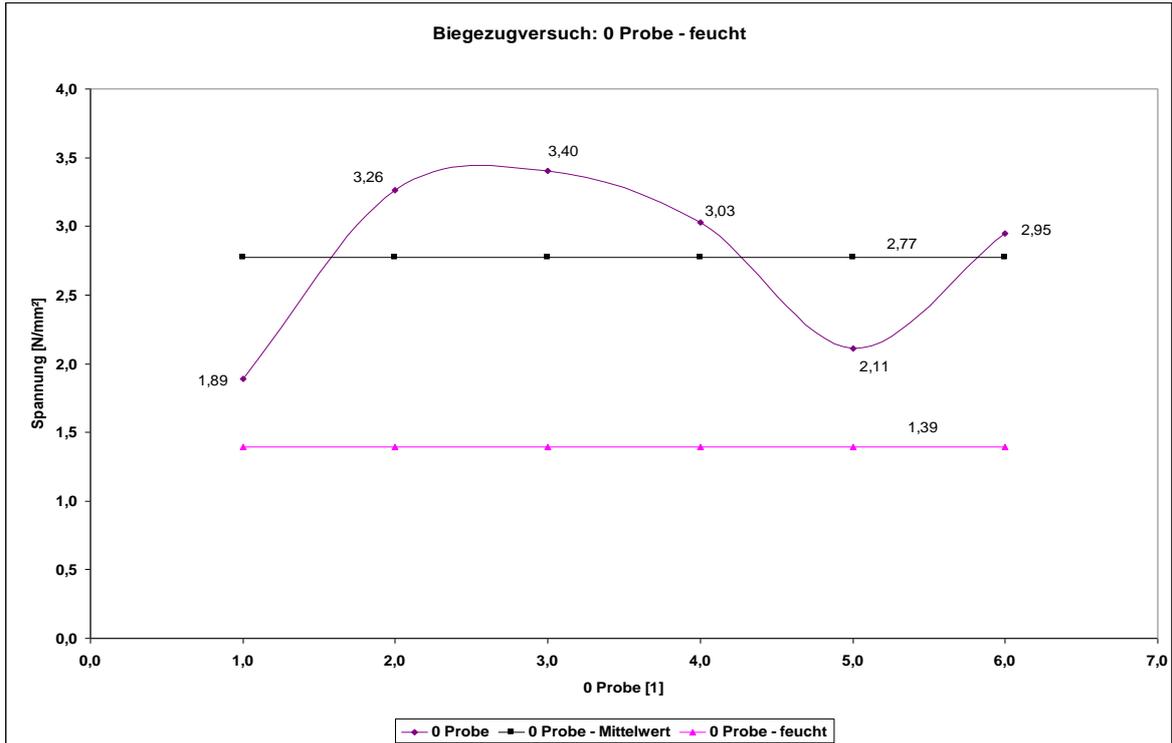
### 5.2.2.1 0 PROBE FEUCHT

Die 0 Probe im feuchten Zustand ist, wie auch im trockenen Zustand, der Referenzwert für alle anderen Probekörper mit Zusatzstoffen.

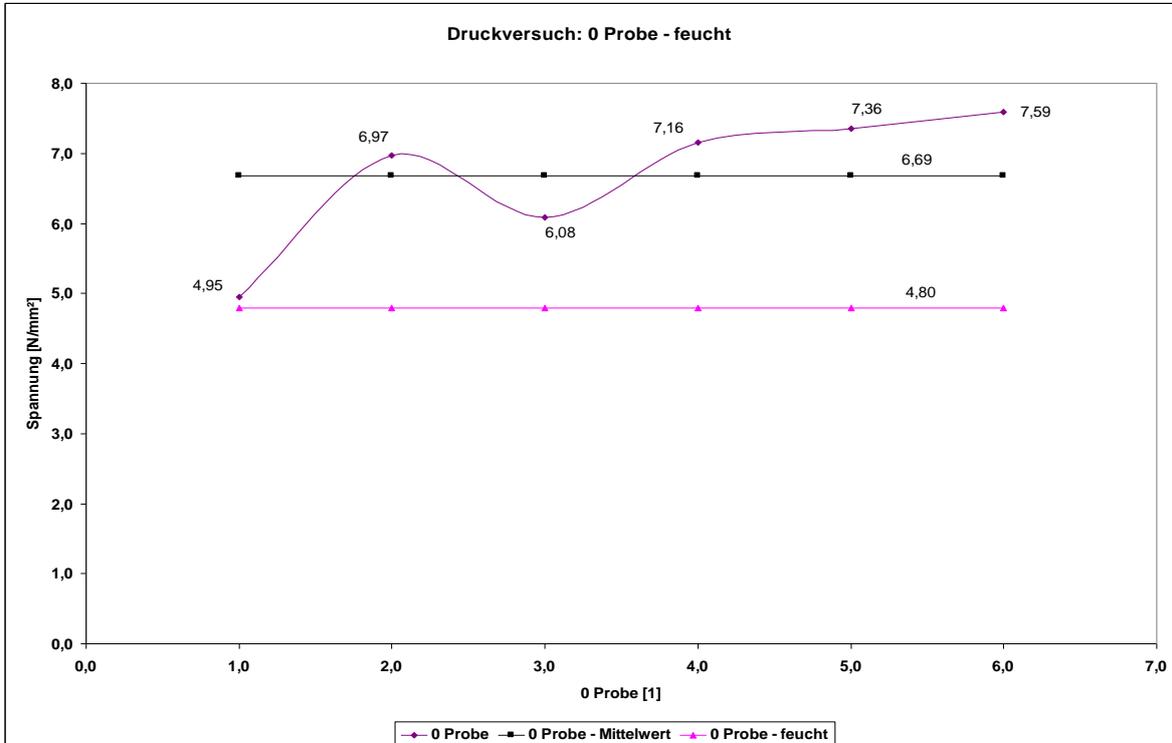
Wie zu erwarten, sind die Druckfestigkeit und die Biegezugfestigkeit der feuchten 0-Probe schlechter, als bei der trockenen 0-Probe (siehe Abbildung 5-22 und Abbildung 5-23). Bemerkenswert ist dabei, dass die Werte für die Biegezugfestigkeit und für die Druckfestigkeit nicht im gleichen Ausmaß absinken (siehe Tabelle 5-20).

**Tabelle 5-20** Prozentueller Unterschied zwischen 0 Probe und 0 Probe - feucht

	<b>0 Probe</b>	<b>n</b>	<b>0 Probe – feucht</b>	<b>Standard- -abweichung</b>	<b>Vergleich</b>
<b>Biegezugversuch</b>	2,77 N/mm <sup>2</sup>	9	1,39 N/mm <sup>2</sup>	0,239 N/mm <sup>2</sup>	- 49,8 %
<b>Druckversuch</b>	6,69 N/mm <sup>2</sup>	18	4,80 N/mm <sup>2</sup>	0,452 N/mm <sup>2</sup>	-28,3 %



**Abbildung 5-22** Vergleich der Biegezugfestigkeit von Lehmprismen (0 Probe) im trockenem und im feuchten Zustand



**Abbildung 5-23** Vergleich der Druckfestigkeit von Lehmprismen (0 Probe) im trockenem und im feuchten Zustand

### 5.2.2.2 HOLZASCHE IM FEUCHTEN ZUSTAND

Bei der Holzasche gibt es eine interessante Entdeckung. Die Zugabe von Holzasche in einem Ausmaß von ca. 1,5 % ergibt eine maximale Erhöhung der Biegezugfestigkeit gegenüber der feuchten 0-Probe. Im Gegensatz dazu, verschlechtert sich die Druckfestigkeit durch eine Zugabe von Holzasche (siehe Tabelle 5-21). Wenn man die Abbildung 5-24 und Abbildung 5-25 näher betrachtet, so ergibt sich bei einer Zugabe von ca. 2,0 % Asche das beste Verhältnis für die Biegezugfestigkeit und für die Druckfestigkeit. Bei 2,0 % verschlechtert sich die maximale Biegezugfestigkeit unwesentlich, aber die Druckfestigkeit erhöht sich signifikant. Leider ist aber der Wert für die maximale Druckfestigkeit um 5,2 % unterhalb der feuchten 0 Probe. Vergleicht man die erzielten Ergebnisse der feuchten Holzasche zu der trockenen Holzasche, so fällt die prozentuelle Verschlechterung für beide Festigkeitswerte mit 37,5 % und 35,3 % annähernd gleich aus.

Für das Tragverhalten von feuchten Lehmsteinen im Bauwesen ist eine Verschlechterung gegenüber der 0 Probe, durch eine Zugabe von Holzasche, allerdings nicht erwünscht.

**Tabelle 5-21** Vergleichswerte zwischen Holzasche trocken (bei Ausgleichsfeuchte) und feucht (bei einer Lagerung von 40°C und 80% LF)

	0 Probe -feucht	Holzasche - trocken	n	Holzasche - feucht	Standard- abweichung	Vergleich trocken -feucht	Vergleich 0 Probe feucht Holzasche feucht
Biegezugversuch für 1,5 % Holzasche	1,39 N/mm <sup>2</sup>	2,88 N/mm <sup>2</sup>	3	1,80 N/mm <sup>2</sup>	0,146 N/mm <sup>2</sup>	- 37,5 %	+ 29,5 %
Druckversuch für 2,0 % Holzasche	4,80 N/mm <sup>2</sup>	7,03 N/mm <sup>2</sup>	6	4,55 N/mm <sup>2</sup>	0,260 N/mm <sup>2</sup>	- 35,3 %	- 5,2 %

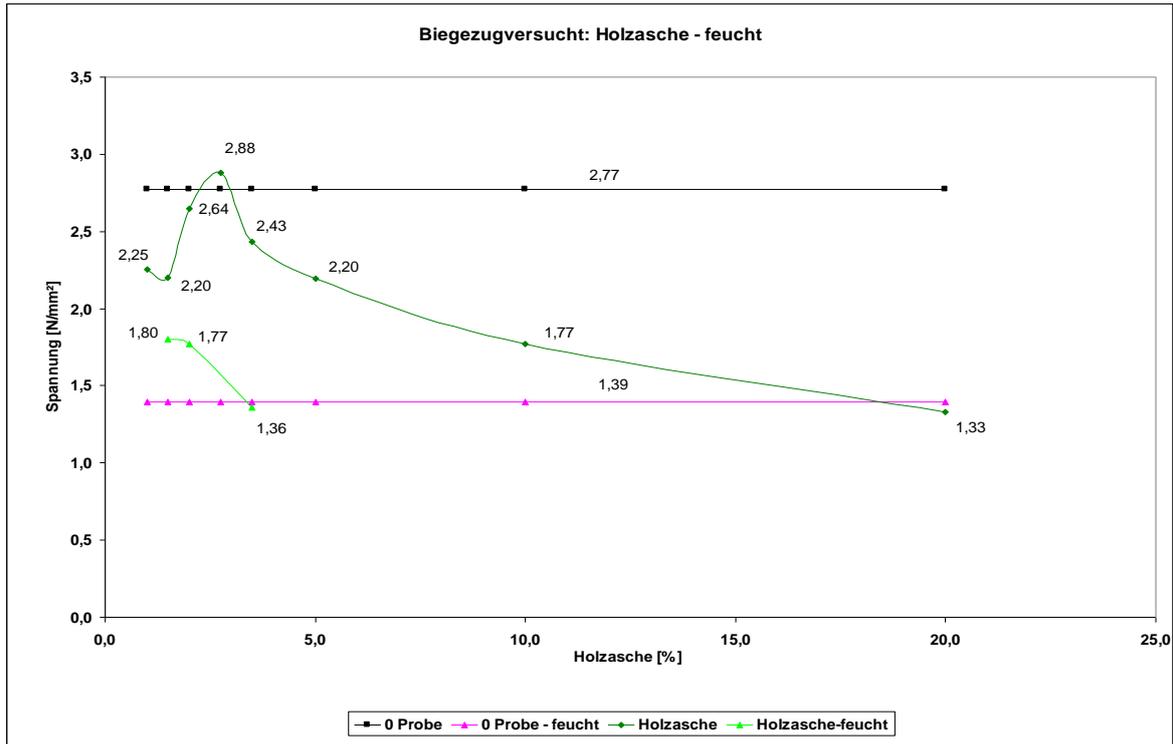


Abbildung 5-24 Vergleich der Biegezugfestigkeit von Lehmprismen mit Holzasche im trockenem und im feuchten Zustand

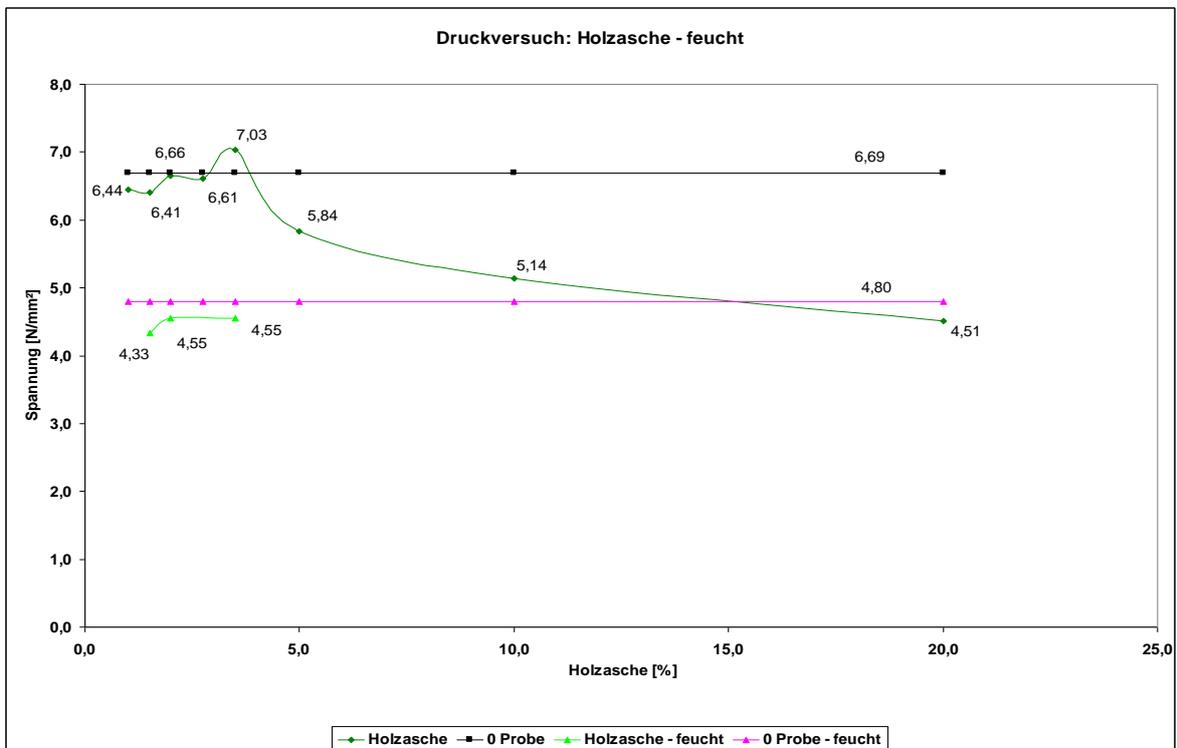


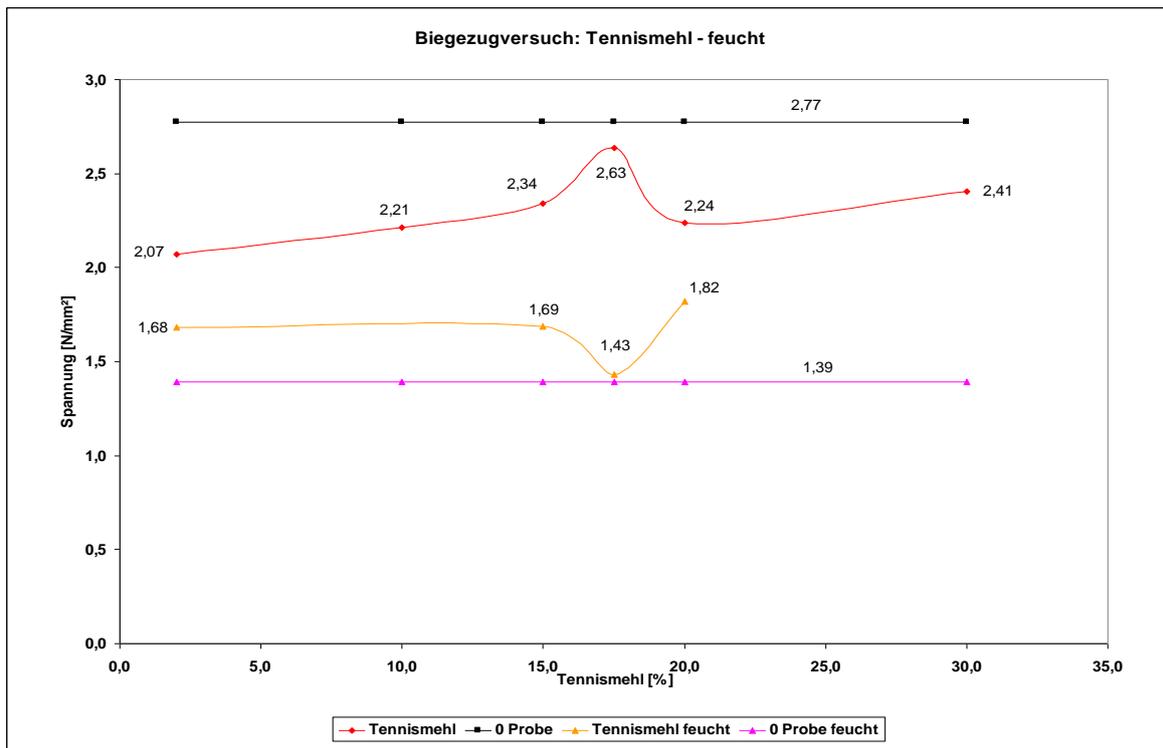
Abbildung 5-25 Vergleich der Druckfestigkeit von Lehmprismen mit Holzasche im trockenem und im feuchten Zustand

### 5.2.2.3 TENNISMEHL IM FEUCHTEN ZUSTAND

Die Zugabe von Tennismehl bewirkt im feuchten Zustand eine Verbesserung der Druckfestigkeit und der Biegezugfestigkeit (siehe Tabelle 5-22). Interessant dabei ist, dass die Maximalwerte für den feuchten Zustand bei  $\geq 20,0$  % erreicht werden (siehe Abbildung 5-26 und Abbildung 5-27). Im Gegensatz zum trockenen Zustand wurden die besten Werte für die Biegezugfestigkeit und für die Druckfestigkeit bei einer Zugabe von ca. 17,5 % Tennismehl erreicht. Bei einer solchen Menge an Zuschlagstoff wird die Verarbeitbarkeit sehr schwierig.

**Tabelle 5-22** Vergleichswerte zwischen Tennismehl trocken und feucht

	0 Probe -feucht	Tmehl -trocken [17,5 %]	n	Tmehl -feucht [20,0 %]	Standard- abweichung	Vergleich trocken - feucht	Vergleich 0 Probe - feucht Tmehl - feucht
Biegezugversuch	1,39 N/mm <sup>2</sup>	2,63 N/mm <sup>2</sup>	6	1,82 N/mm <sup>2</sup>	0,100 N/mm <sup>2</sup>	- 30,8 %	+ 30,9 %
Druckversuch	4,80 N/mm <sup>2</sup>	7,08 N/mm <sup>2</sup>	12	5,67 N/mm <sup>2</sup>	0,447 N/mm <sup>2</sup>	- 19,9 %	+ 18,1 %



**Abbildung 5-26** Vergleich der Biegezugfestigkeit von Lehmprismen mit Tennismehl im trockenem und im feuchten Zustand

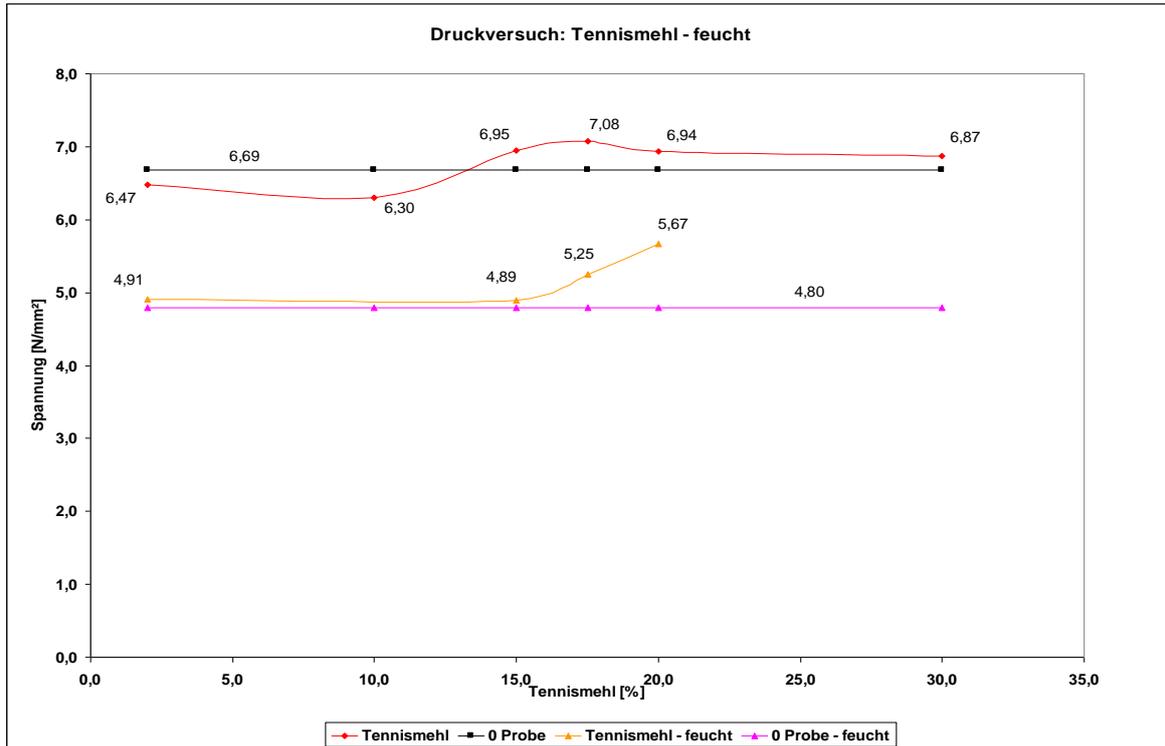


Abbildung 5-27 Vergleich der Druckfestigkeit von Lehmprismen mit Tennismehl im trockenem und im feuchten Zustand

#### 5.2.2.4 KOMBINATION VON HOLZASCHE UND TENNISMEHL IM FEUCHTEN ZUSTAND

Für die Kombination von Additiven wurde, wie auch für den trockenen Zustand, Holzasche und Tennismehl näher untersucht.

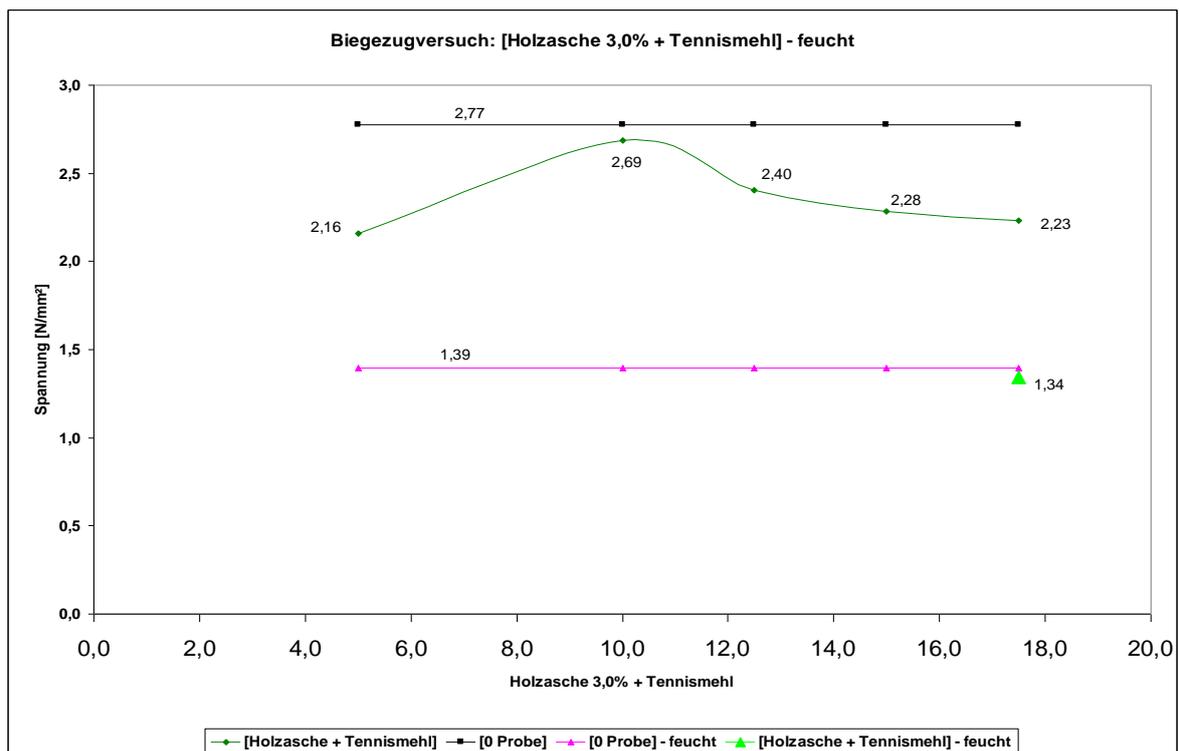
Um Vergleiche mit den Versuchswerten aus dem trockenen Zustand zu bekommen (Holzasche 3,0 % und Tennismehl variabel), entschloss ich mich die Holzasche mit 3,0 % zu fixieren. Auf Grund der vorhergehenden Untersuchungsergebnisse für den feuchten Zustand (maximalwert der Druckfestigkeit für Tennismehl bei ca. 20 %) entschloss ich mich, den Wert für das Tennismehl auf 17,5 % festzulegen. Dieser Wert wurde deshalb gewählt, weil er der maximal getestete Kombinationswert für den trockenen Zustand ist (siehe Abbildung 5-28 und Abbildung 5-29).

Eine Kombination von Holzasche und Tennismehl bringt für die getesteten Prozentsätze fast nichts. Bei der Druckfestigkeit erreicht man ein Plus von 3,3 % gegenüber der feuchten 0-Probe. Die Biegezugfestigkeit liegt um 3,6 % unterhalb der 0-Probe.

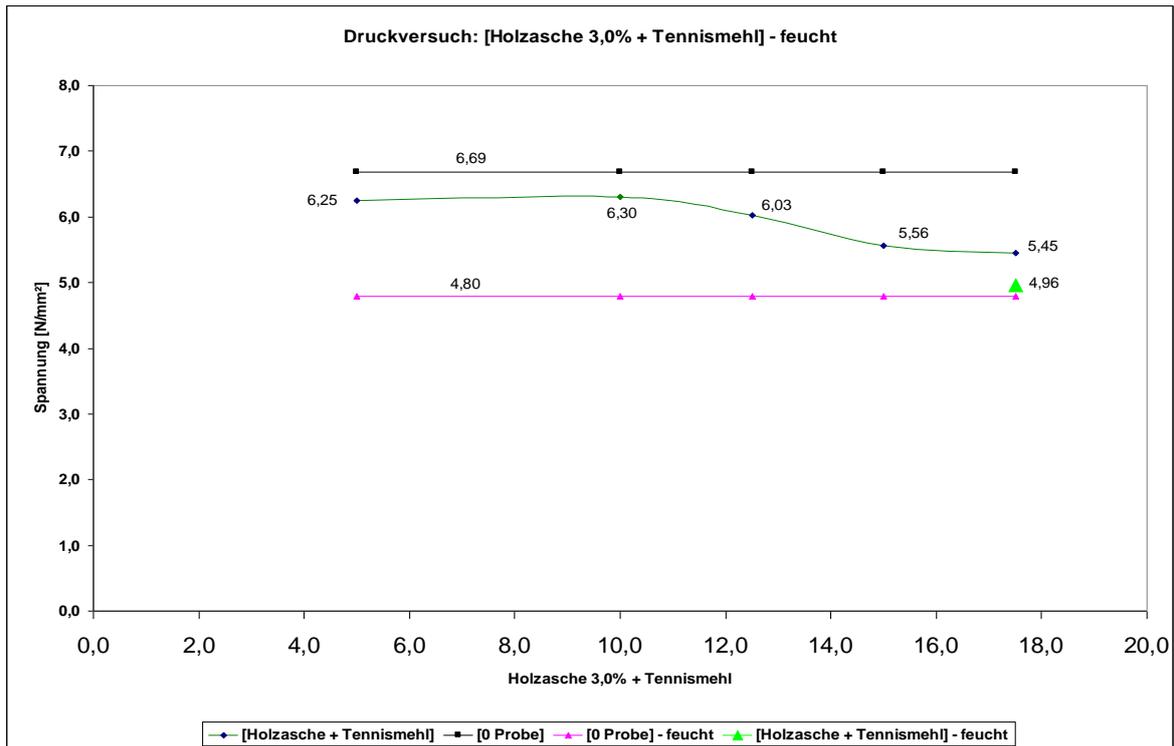
Wie auch schon beim trockenen Zustand ist auch beim feuchten Zustand eine wesentliche Verbesserung der Festigkeitswerte festzustellen (siehe Tabelle 5-23).

**Tabelle 5-23** Vergleichswerte zwischen Kombination trocken und feucht

	0 Probe -feucht	Kombination - trocken	n	Kombination - feucht 3 % Holzasche- 17,5 % Tennismehl	Standardabweichung	Vergleich Kombination - trocken Kombination - feucht	Vergleich 0 Probe - feucht Kombination - feucht
Biegezugversuch	1,39 N/mm <sup>2</sup>	2,23 N/mm <sup>2</sup>	6	1,34 N/mm <sup>2</sup>	0,125 N/mm <sup>2</sup>	- 39,9 %	- 3,6 %
Druckversuch	4,80 N/mm <sup>2</sup>	5,45 N/mm <sup>2</sup>	12	4,96 N/mm <sup>2</sup>	0,276 N/mm <sup>2</sup>	- 9,0 %	+ 3,3 %



**Abbildung 5-28** Vergleich der Biegezugfestigkeit von Lehmprismen mit einer Kombination von Holzasche und Tennismehl im trockenem und im feuchten Zustand



**Abbildung 5-29** Vergleich der Druckfestigkeit von Lehmprismen mit einer Kombination von Holzasche und Tennismehl im trockenem und im feuchten Zustand

### 5.2.3 Zusammenfassung der Ergebnisse für den feuchten Zustand

Im Gegensatz zum trockenen Zustand, wo es zwei Testsieger gibt, gibt es für den feuchten Zustand nur einen Testsieger. Dieser lautet Tennismehl siehe Abbildung 5-30 und Abbildung 5-31. Durch die Zugabe von Tennismehl erreicht man eine Erhöhung der Druckfestigkeit um 18,1 % und der Biegezugfestigkeit von 30,9 % gegenüber der feuchten 0 Probe (siehe Tabelle 5-24). Diese Werte sind aber nur mit einem sehr hohen Prozentanteil von 20 % zu erreichen, was die industrielle Herstellbarkeit aufwendiger werden lässt.

Holzasche erreicht nur eine Verbesserung der Biegezugfestigkeit um 29,5 %. Bei der erreichten Druckfestigkeit liegt der Wert um 5,2 % unterhalb der 0 Probe.

Insgesamt wurden zur Untersuchung des feuchten Zustandes 13 Serien mit 39 Probekörper hergestellt. Dieser Probenumfang reicht bei weitem nicht aus um das schwierige Problem der Wechselwirkungen zwischen den Lehmstoffen (Lehmmischungen) und den Umgebungsbedingungen (Temperatur, Feuchte) zu klären.

**Tabelle 5-24** Maximalwerte der feuchten Proben bezogen auf die 0 Probe im feuchten Zustand

	Bezeichnung	Prozentanteil	n	Werte	Standardabweichung	0 Probe - feucht	Vergleich
<b>Biegezugversuch</b>	Holzasche - feucht	1,5 %	3	1,80 N/mm <sup>2</sup>	0,146 N/mm <sup>2</sup>	1,39 N/mm <sup>2</sup>	+ 29,5 %
	Tennismehl - feucht	20 %	6	1,82 N/mm <sup>2</sup>	0,100 N/mm <sup>2</sup>		+ 30,9 %
	Holzasche & Tennismehl - feucht	3,0 % & 17,5 %	6	1,34 N/mm <sup>2</sup>	0,125 N/mm <sup>2</sup>		- 3,6 %
<b>Druckversuch</b>	Holzasche - feucht	2,0 %	6	4,55 N/mm <sup>2</sup>	0,260 N/mm <sup>2</sup>	4,80 N/mm <sup>2</sup>	- 5,2 %
	Tennismehl - feucht	20 %	12	5,67 N/mm <sup>2</sup>	0,447 N/mm <sup>2</sup>		+ 18,1 %
	Holzasche & Tennismehl - feucht	3,0 % & 17,5 %	12	4,96 N/mm <sup>2</sup>	0,276 N/mm <sup>2</sup>		+ 3,3 %

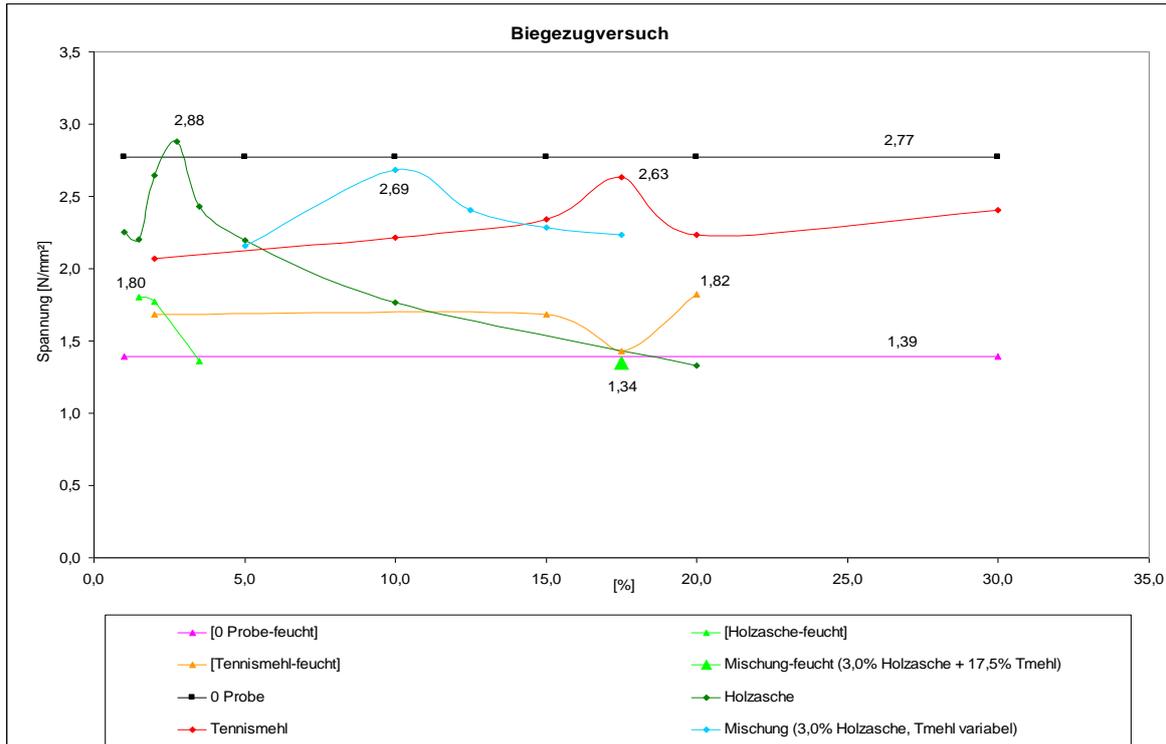


Abbildung 5-30 Gesamtvergleich zwischen feuchten und trockenen Zustand für die Biegezugfestigkeiten

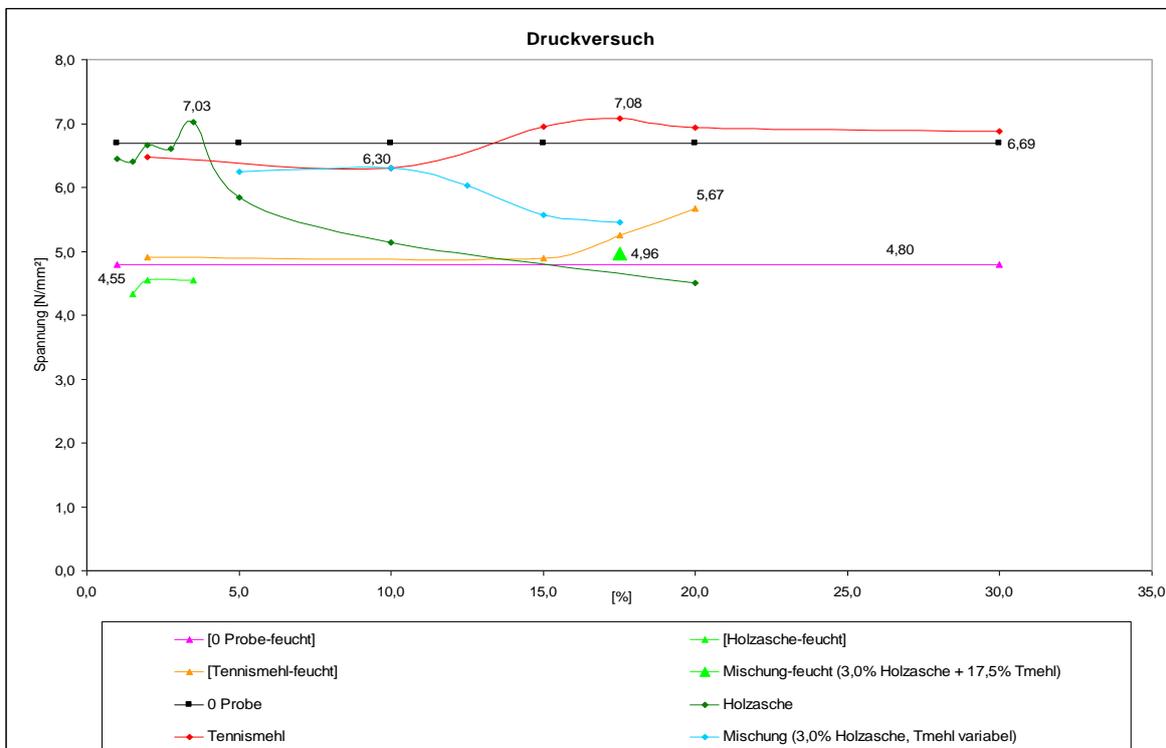


Abbildung 5-31 Gesamtvergleich zwischen feuchten und trockenen Zustand für die Druckfestigkeit

## 6 Zusammenfassung

Nachdem alle Untersuchungen abgeschlossen waren, kristallisierte sich Tennismehl als günstiger Zusatz heraus, Holzasche bringt ebenfalls Vorteile (Abbildung 6-1 und 6-2).

Durch das Beimischen von Tennismehl, konnte die Druckfestigkeit der Lehmprismen für den trockenen Zustand um 5,8 % und für den feuchten Zustand um 18,1 % gesteigert werden. Die Biegezugfestigkeit konnte nur für den feuchten Zustand um 30,9 % gesteigert werden. Für den trockenen Zustand verringerte sich die Biegezugfestigkeit aber um 5,1 %.

Um diese Festigkeitswerte zu bekommen, muss man allerdings ca. 17,5 % bis 20 % Tennismehl dem Lehm beimengen. Diese Mengen sind nicht unproblematisch für eine industrielle Fertigung mit einem Mundstück, wie es in der Ziegelindustrie üblich ist.

Holzasche hat nur für den trockenen Zustand alle Kriterien erfüllt. Eine Erhöhung der Druckfestigkeit von 5,1 % und eine Erhöhung der Biegezugfestigkeit von 4,0 % für den trockenen Zustand sind gute Werte. Nur beim feuchten Zustand weist der Lehm mit Holzasche Schwächen in der Druckfestigkeit auf. Die Druckfestigkeit sinkt für den feuchten Zustand um 5,2 % gegenüber der feuchten 0 Probe. Die Biegezugfestigkeit steigt aber um 29,5 % (siehe Tabelle 6-1). Die Ursache dieses Verhaltens ist bislang nicht geklärt, diesbezüglich sind weitere Versuche notwendig.

Im Gegensatz zum Tennismehl erreicht man diese Werte bei einer Zugabe von ca. 3,0 %. Diese geringen Prozentangaben sind für die industrielle Fertigung weit aus unproblematischer.

Für den trockenen Zustand ist die Holzasche zu bevorzugen. Die erzielte Druckfestigkeit ist fast genauso hoch wie beim Tennismehl, die Biegezugfestigkeit ist sehr viel höher als beim Tennismehl und die notwendigen Prozentsätze sind geringer und damit besser verarbeitbar.

Für einen sicheren Lehmbaustoff sind die Festigkeitswerte vor allem im feuchten Zustand ausschlaggebend. Darum scheidet die Holzasche als Zusatzmittel vermutlich aus.

Für die Untersuchungen wurden in Summe 76 Serien mit 229 Probekörper hergestellt. Die Verwendung anderer Additive wie Strohspäne und Wasserglas oder aber auch Kombinationen von Additiven, ergaben keine Erhöhung der Druckfestigkeit oder der Biegezugfestigkeit.

Nach der ÖNORM B 3350 müssen alle verwendeten Mauersteine für tragende Wände den jeweiligen Produktnormen entsprechen, wobei für alle Steine gilt, dass sie eine Steindruckfestigkeit von  $\geq 3,0 \text{ N/mm}^2$  aufweisen müssen. Für Objekte mit Erdgeschoss und maximal einem Obergeschoss (Einfamilienhaus) darf die Steindruckfestigkeit auf  $2,0 \text{ N/mm}^2$  verringert werden /20/.

Alle getesteten Lehmprismen, mit und ohne Additive, erfüllen die mindestens geforderten Steindruckfestigkeiten. Die in dieser Diplomarbeit angegebenen Werte sind nicht eins zu eins auf Mauersteine umzulegen. Es ist anzunehmen, dass sich die Steindruckfestigkeiten, je größer die Mauersteine werden, verringern siehe Tabelle 6-1. Diese Diplomarbeit soll lediglich mögliche, effektive Richtungen aufweisen, mit denen Lehmvorkommen aufbereitet werden können, um die Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit gegenüber einer 0 Probe zu erhöhen.

**Tabelle 6-1** Maximalwerte für Tennismehl und Holzasche für den trockenen und feuchten Zustand im Vergleich zur 0 Probe

		Bezeichnung	Prozentanteil	n	Werte	Standard- abweichung	0 Probe	Vergleich
<b>Biegezugversuch</b>	trocken	Holzasche	2,75 %	3	2,88 N/mm <sup>2</sup>	0,160 N/mm <sup>2</sup>	2,77 N/mm <sup>2</sup>	+ 4,0 %
		Tennismehl	17,5 %	9	2,63 N/mm <sup>2</sup>	0,228 N/mm <sup>2</sup>		- 5,1 %
	feucht	Holzasche	1,5 %	3	1,80 N/mm <sup>2</sup>	0,146 N/mm <sup>2</sup>	1,39 N/mm <sup>2</sup>	+ 29,5 %
		Tennismehl	20,0 %	6	1,82 N/mm <sup>2</sup>	0,100 N/mm <sup>2</sup>		+ 30,9 %
<b>Druckversuch</b>	trocken	Holzasche	3,5 %	12	7,03 N/mm <sup>2</sup>	0,402 N/mm <sup>2</sup>	6,69 N/mm <sup>2</sup>	+ 5,1 %
		Tennismehl	17,5 %	18	7,08 N/mm <sup>2</sup>	0,397 N/mm <sup>2</sup>		+ 5,8 %
	feucht	Holzasche	2,0 %	6	4,55 N/mm <sup>2</sup>	0,260 N/mm <sup>2</sup>	4,80 N/mm <sup>2</sup>	- 5,2 %
		Tennismehl	20,0 %	12	5,67 N/mm <sup>2</sup>	0,447 N/mm <sup>2</sup>		+ 18,1 %

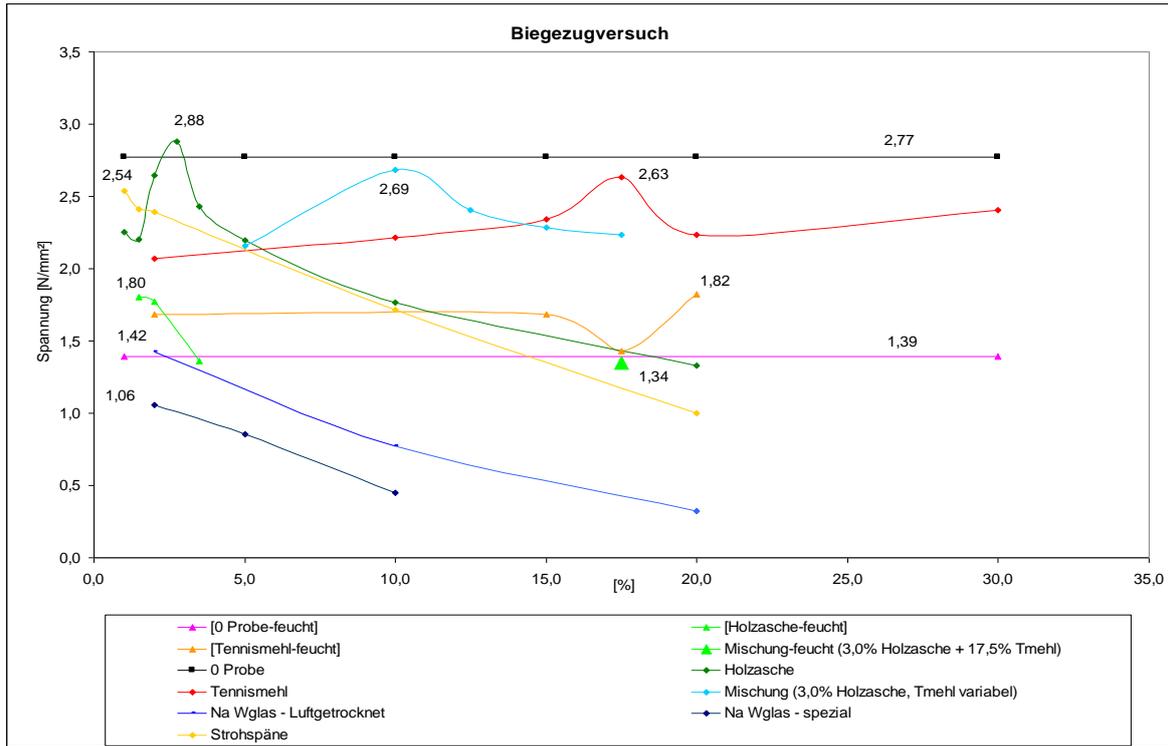


Abbildung 6-1 Gesamtübersicht der erreichten Biegezugfestigkeiten

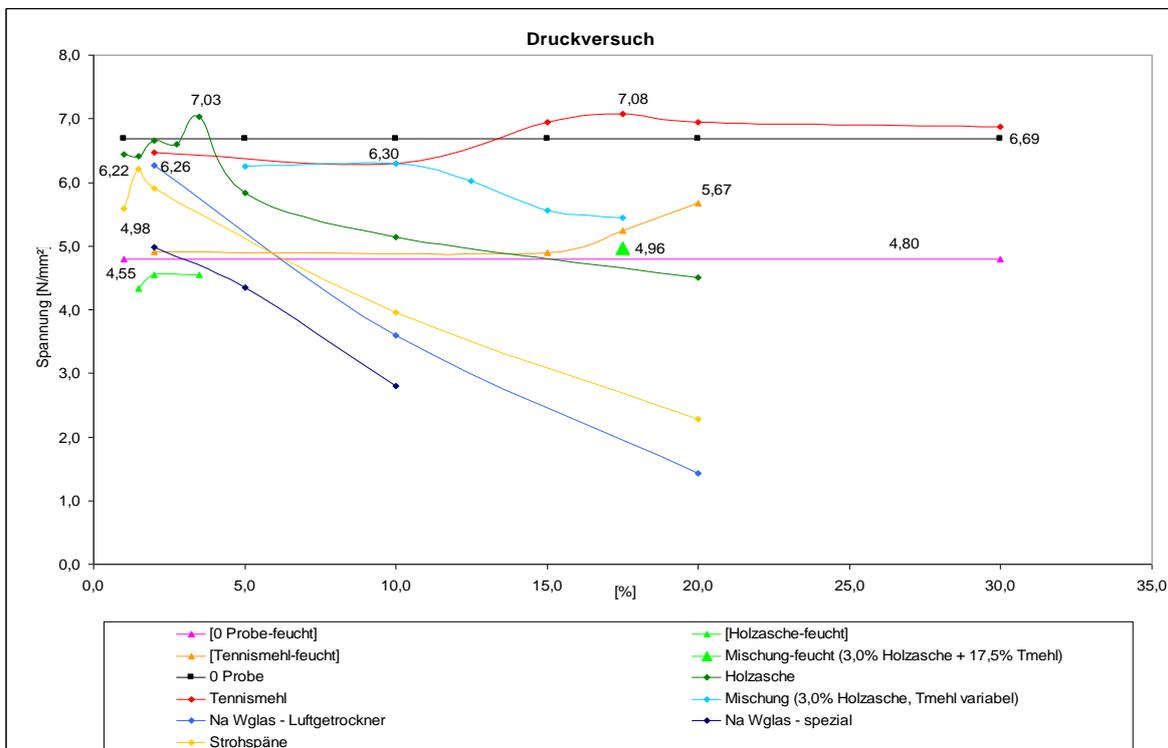


Abbildung 6-2 Gesamtübersicht der erreichten Druckfestigkeiten

Um sich dem Problem des Feuchteinflusses wissenschaftlich zu nähern, sind zusätzliche experimentelle Festigkeits- und Feuchteuntersuchungen, zunächst an den Nullproben und danach an praxisorientierten Proben notwendig, um den Feuchtehaushalt von Lehmanteilen auch theoretisch bewerten zu können.

Weiterhin wird empfohlen zu versuchen, die Lehmsteine durch die Zugabe von geringen Mengen an hydraulischen Baustoffen, Beton + hydraulischen Baustoffen und kalkhaltigen Baustoffen zu verbessern. Diesbezüglich kommen u.a. Trass, Hochofenschlacke, Flugasche und natürliche Puzzolane in Verbindung mit geeigneten Anregern (Kalk, Gips, Ziegelmehl, Silicastaub, etc.) in Frage. Mittels geeigneter Forschungen lassen sich auf der Basis ökologischer günstiger Mineralstoffe (Naturstoffe oder Abfallstoffe) aus den o.g. Zusatzstoffen mit großer Sicherheit hochwertige Lehmsteine entwickeln.

---

## 7 Literatur

- /1/ *Bruckner/ Schneider:* Naturbaustoffe, Werner – Verlag, Düsseldorf, 1. Auflage, 1998
- /2/ *Dachverband Lehm e.V.:* Lehm 2004; Tagungsbeitrag der 4. Internationalen Fachtagung für Lehmbau
- /3/ *DIN 1169:* Lehmmörtel für Mauerwerk und Putz, Juni 1947
- /4/ *DIN 18951 Blatt 2:* Lehmbauten Vorschriften für die Ausführung, Erläuterungen, Januar 1951
- /5/ *DIN 18952 Blatt 1:* Baulehm, Begriffe Arten, Mai 1956
- /6/ *DIN 18952 Blatt 2:* Baulehm, Prüfung von Baulehm, Oktober 1956
- /7/ *DIN 18953 Blatt 1:* Baulehm Lehmbauteile, Verwendung von Baulehm, Mai 1956
- /8/ *DIN 18953 Blatt 2:* Baulehm Lehmbauteile, Gemauerte Lehmwände, Mai 1956
- /9/ *DIN 18954 Vornorm:* Ausführung von Lehmbauten, Richtlinie, Mai 1956
- /10/ *DIN 18955 Vornorm:* Baulehm Lehmbauteile, Feuchtigkeitsschutz, August 1956
- /11/ *DIN 18956 Vornorm:* Putz auf Lehmbauteilen, August 1956
- /12/ *EN 771-1:* Festlegungen für Mauersteine – Teil1: Mauerziegel, April 2003
- /13/ *EN 772-2:* Prüfverfahren für Mauersteine –Teil 1: Bestimmung der Druckfestigkeit, Juni 2000
- /14/ *EN 1052-01:* Prüfverfahren für Mauerwerk, Teil 1: Bestimmung der Druckfestigkeit, Ausgabe: 1999-01-01
- /15/ *Hugi H. u.a.:* Regeln zum Bauen mit Lehm, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten- Verein, D0111, SIA Zürich, 1994
- /16/ *Minke Gernot:* Lehmbau – Handbuch, Der Baustoff Lehm und seine Anwendung, Ökobuch Verlag, 2. Auflage, 1995
- /17/ *Niemeyer R.:* Der Lehmbau, Ökobuchverlag Staufen Nachdruck der Originalausgabe 1946
- /18/ *ÖNORM B 3303:* Betonprüfung, 1.März 1983

- 
- /19/ *ÖNORM 3200:* Mauerziegel- und Hochlochziegel für tragendes Mauerwerk  
Anforderungen und Prüfungen Normkennzeichnung  
Ausgabe: 1999-06-01
- /20/ *ÖNORM 3350:* Tragende Wände – Bemessung und Konstruktion,  
Ausgabe 2003-07-01
- /21/ *ÖNORM EN12390-5:* Prüfung von Festbeton, Teil 5, Biegezugfestigkeit von  
Probekörpern, Ausgabe 2001-05-01
- /22/ *Schneider/ Klaus Jürgen:* Bautabellen für Ingenieure, 15 Auflage, 2002, Werner  
Verlag
- /23/ *Schneider/ Schwimann/ Bruckner:* Lehmbau für Architekten und Ingenieure,  
Werner - Verlag, Düsseldorf, 1. Auflage, 1996
- /24/ *Sieber Heinz G.:* Baustoff Lehm, Sammlung Lehmbauverfahren,  
Lehrmittelwerkstätten A. Reimann, Weilburg  
C.F Müller – Verlag, Karlsruhe, 1988,
- /25/ *Statistik Austria:* Wohnbautätigkeit 2002, Bewilligungen und Fertigstellungen  
2002, Wohnbaukosten 2001, Wien 2004,
- /26/ *Volhard Franz:* Leichtlehmbau Alter Baustoff – neue Technik, C.F. Müller  
Verlag, Heidelberg, 5. Auflage, 1995
- /27/ *Volhard, Ulrich:* Lehmbau Regeln, Dachverband Lehm, Weimar, Vieweg Verlag,  
Juni 1998
- /28/ *Wiener Bauvorschrift:* 4. Auflage nach dem Stand 1.1.2002 , Linde Verlag
- /29/ *Wienerberger:* Preisliste 2004, gültig ab 1. Nov. 2003