



# **DIPLOMARBEIT**

## **MASTER`S THESIS**

**Maßnahmen zur Verringerung der Druckfestigkeitsverluste bei  
Lehmsteinen in feuchten Klimaten**

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

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Bauingenieurwesen

Von

Astrid STUMMER

9325414

Dr. Langfortstraße 7, 2651 Reichenau/Rax

Wien, im Herbst 2007

.....  
Astrid Stummer

## Vorwort

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die zum Gelingen meiner Diplomarbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt O. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Dr. h.c. Ulrich Schneider und Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Heinrich Bruckner, die mir das Erstellen dieser Arbeit ermöglichten und sich stets die Zeit genommen haben, mir bei Schwierigkeiten weiterzuhelfen.

Firma *Wienerberger* möchte ich für das zur Verfügung gestellte Material und die Nutzung der Mahlmaschine im Firmenlabor danken.

Ein Teil der praktischen Arbeit dieser Diplomarbeit wurde mit meinem Studienkollegen Ingo Kozek durchgeführt. An dieser Stelle möchte ich mich bei ihm für die gute Zusammenarbeit bedanken.

Großer Dank gilt meinen Eltern Edith Weigl und Wolfgang Graf für die moralische und finanzielle Unterstützung und die Mithilfe beim Babysitten.

Weiters gilt mein Dank meinen Schwiegereltern Helga und Manfred Stummer, die mich auch durch ihre Hilfe bei der Kinderbetreuung sehr unterstützten.

Last but not least, gilt mein Dank meinem Mann Michael und meinen beiden Söhnen Alexander und Benjamin, die vor allem in letzter Zeit öfters auf mich verzichten mussten.

1	Allgemeines .....	6
2	Grundlagen.....	8
2.1	Geschichte des Lehmbaus.....	8
2.1.1	Wandkonstruktionen.....	8
2.1.2	Dächer .....	11
2.1.3	Decken.....	11
2.1.4	Gewölbe.....	12
2.1.5	Fußböden.....	12
2.2	Lehm.....	15
2.2.1	Ton.....	15
2.2.2	Schluff, Sand, Kies .....	18
2.2.3	Wasser .....	18
2.2.4	Kornverteilung .....	19
2.3	Lehmvorkommen und –arten .....	21
2.3.1	Berglehm.....	22
2.3.2	Gehänge- oder Hanglehm .....	22
2.3.3	Geschiebemergel .....	22
2.3.4	Geschiebelehm .....	23
2.3.5	Wiesenlehm .....	23
2.3.6	Lösslehm.....	23
2.4	Baulehm .....	25
2.5	Festigkeitseigenschaften von Lehm .....	25
2.5.1	Bindekraft.....	25
2.5.2	Druckfestigkeit.....	25
2.5.3	Trockenzugfestigkeit .....	26
2.5.4	Biegezugfestigkeit .....	26
2.6	Lehmzusätze .....	26
2.6.1	Mineralische Zusätze .....	28
2.6.1.1	Zement.....	28
2.6.1.2	Kalk .....	28
2.6.1.3	Salz .....	29
2.6.1.4	Soda.....	29
2.6.1.5	Eisenoxid.....	30
2.6.1.6	Wasserglas .....	30
2.6.1.7	Puzzolane – Trass.....	31

2.6.1.8	Gips.....	31
2.6.2	Tierische Zusätze .....	32
2.6.2.1	Blut.....	32
2.6.2.2	Urin .....	32
2.6.2.3	Kasein .....	33
2.6.2.4	Molke .....	33
2.6.2.5	Knochenleim .....	33
2.6.2.6	Kuhmist.....	34
2.6.2.7	Weitere Eiweißstoffe.....	34
2.6.2.8	Wachse .....	35
2.6.3	Pflanzliche Zusätze .....	35
2.6.3.1	Pflanzenöle .....	35
2.6.3.2	Stärke.....	36
2.6.3.3	Melasse.....	36
2.6.3.4	Pflanzensäfte .....	36
2.6.3.5	Harze .....	37
2.6.4	Weitere Zusätze .....	38
2.6.4.1	Bitumen.....	38
2.6.4.2	Asche .....	38
2.6.4.3	Seife.....	39
2.6.4.4	Synthetische Zusätze .....	39
2.6.5	Zusammenfassung.....	40
3	Versuchsordnung.....	41
3.1	Probekörper .....	41
3.1.1	Herstellung.....	41
3.1.2	Trocknung und Lagerung .....	43
3.2	Prüfung .....	46
3.2.1	Prüfmaschine .....	46
3.2.2	Biegezugversuch.....	47
3.2.3	Druckversuch .....	49
3.3	Auswertung.....	51
3.4	Verwendete Materialien .....	51
3.4.1	Lehm.....	51
3.4.2	Gewählte Zusatzstoffe.....	52
4	Vorversuche .....	55

4.1	Normversuche bezüglich Festigkeit.....	55
4.2	Vorversuche mit Kasein als Zusatzstoff .....	61
4.3	Vorversuche mit Wasserglas als Zusatzstoff.....	69
4.4	Vorversuche mit Leinölfirnis als Zusatzstoff .....	75
4.5	Vorversuche mit Harnstoff und Ammoniak als Zusatzstoff .....	81
4.6	Vorversuche mit Zement als Zusatzstoff .....	89
4.7	Vorversuche mit Kalk als Zusatzstoff .....	96
4.8	Vorversuche mit Asche als Zusatzstoff .....	102
4.9	Zusammenfassung der Vorversuche.....	108
5	Versuche mit ausgewählten Zusätzen – Auswertung.....	113
5.1	Ausgangssituation.....	113
5.2	Weitere Vorgehensweise .....	120
5.3	Auswertung der Festigkeitswerte .....	122
5.4	Zusammenfassung und Interpretation der Detailversuche .....	139
6	Zusammenfassung und Ausblick .....	142
7	Literatur .....	145

# 1 Allgemeines

## Einleitung und Aufgabenstellung

Lehmbauten werden meist mit primitiven Bauten in Ländern der dritten Welt verbunden. Diese Bauweise war aber früher auch in Österreich weit verbreitet. Vor allem dort wo Lehm vorhanden war, wurde er direkt für Bauzwecke verwendet. Viele dieser Bauten haben die Jahre überdauert und werden heute noch genutzt. Oft sind diese Lehmbauten von außen nicht als solche erkennbar.

Wasser- und Witterungseinflüsse bedeuteten von jeher ein Problem für den Lehmbau. Dies war einer der Gründe warum der Lehm als Baumaterial fast vollständig durch industrialisierte Baustoffe vom Markt verdrängt wurde.

In letzter Zeit besinnen sich wieder auch einige Architekten auf Vorteile die das Bauen mit Lehm mit sich bringt. Dazu zählen die Wiederverwendbarkeit, Ressourcenschonung (zur Baustoffherstellung wird wenig Energie benötigt), Luftfeuchtereulation, Bindung von Gerüchen, etc.

Um die Feuchtebeständigkeit des Lehms zu erhöhen mischte man früher bereits verschiedenste Stoffe dem Lehmbaumaterial bei.

Im Rahmen eines Projektes versucht die Fa. *Wienerberger* die Lehmeigenschaften durch Zusätze zu verbessern. Bis jetzt wurde noch keine zufriedenstellende Lösung gefunden. Im Rahmen dieser Diplomarbeit sollen nun weitere Zusatzstoffe auf ihre festigkeitsverbessernden Eigenschaften bei Feuchteeinwirkung untersucht werden.

## Ausgangssituation

Das Bauen in früherer Zeit unterlag noch kaum Prüfungen und Kontrollen. Gebaut wurde mit traditionellen, lang erprobten Baumethoden. Heute dürfen Baumaterialien nur mit entsprechenden Zulassungen auf den Markt.

Das Bauen mit Lehm erlebte zwar nach dem zweiten Weltkrieg aufgrund von Energieknappheit wieder einen Aufschwung und in Deutschland wurde eine eigene Lehmbaunorm entwickelt, aber dieser war nur von kurzer Dauer und die DIN – Norm wurde 1971 wieder zurückgezogen.

Aktuell finden sich in der Literatur kaum Untersuchungen zur Verbesserung der Festigkeitseigenschaften von Lehmbaustoffen bei Feuchteinfluss. Angaben finden sich zu traditionell eingesetzten Zusatzstoffen und deren vermuteter Wirkung. Vereinzelt findet man auch Untersuchungen, bei denen aber oft Angaben zu Prüfmethoden, -parametern und -rahmenbedingungen fehlen.

## Ziel

Ziel dieser Arbeit ist es, Zusatzstoffe auf ihren Einfluss auf die Verringerung der Druckfestigkeitsverluste bei Lehmsteinen in feuchten Klimaten zu untersuchen. Dazu wurde nach Angaben in der Literatur gesucht, eine Auswahl getroffen und mit zur Verfügung gestellten Materialien der Firma *Wienerberger* Biegezug- und Druckfestigkeitsversuche an prismatischen Lehmprobekörpern durchgeführt. Bei den Überlegungen zur Versuchsdurchführung erschien es sinnvoll auch Angaben zum Schwindverhalten zu dokumentieren, da Lehmbaustoffe durch Trocknung schwinden und dies durch die Zusatzstoffe auch beeinflusst wird und im Rahmen der Versuchsdurchführung durch geringen Mehraufwand mit untersucht werden kann.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Geschichte des Lehmbaus

Lehm ist eines der ersten Baumaterialien der Menschheit. Erste Baukonstruktionen aus Lehm waren ausgehobene Gruben mit einer darüber gewölbten Konstruktion aus dem gewonnenen Aushubmaterial. Die ältesten bekannten Lehmbautechniken wurden bei Ausgrabungen von über 11.000 Jahre alten Lehmsteinhäusern gefunden.

Zumeist wird Lehmbau mit Afrika verbunden. Hier hat sich eine beeindruckende Vielfalt an Bauformen und eine meisterhafte Beherrschung des Baumaterials Lehm entwickelt. Weniger bekannt ist, dass in Asien prozentuell gesehen weit mehr Menschen in Lehmbauten wohnen. In Europa finden sich Zeugnisse des Lehmbaus aus der Zeit der Römer. Zu Beginn des 19. Jahrhunderts, mit fortschreitender Industrialisierung, gerät der Lehmbau immer mehr in Vergessenheit. Erst der 1. und 2. Weltkrieg erinnerte wieder an die alte Bauweise. Baustoff- und Rohstoffknappheit machten den Lehmbau wieder attraktiv. Ab etwa 1950 werden wieder vorwiegend von der Industrie gefertigte Baustoffe verwendet.

Einerseits löste die Energiekrise 1973 ein Renaissancedenken aus, andererseits führte ein neu entstandenes Ökologiebewusstsein zu einer Wiederentdeckung der Lehmbauweisen. Seither entstanden wieder Interessensgruppen, Lehmbaufirmen und auch in der Lehre und Forschung fand der Lehm wieder einen Platz.

In den verschiedenen Kulturen entwickelten sich unterschiedliche Lehmbauweisen. Der Baustoff Lehm wurde hauptsächlich eingesetzt für Fundamente, Wände, Dächer (in trockenen Gegenden), Decken, Gewölbe und Fußböden.

#### 2.1.1 Wandkonstruktionen

Im Lauf der Zeit sind viele Wandkonstruktionen entstanden. In der DIN 18953 (1971 zurückgezogen, aber immer noch Grundlage für Lehmbauten) sind folgende Lehmwände angeführt (/21/):

- Gemauerte Lehmwände (Abbildung 2.1)
- Gestampfte Lehmwände (Abbildung 2.2)

- Gewellte Lehmwände (Abbildung 2.3)
- Leichtlehmwände in Gerippebauten (Abbildung 2.4)

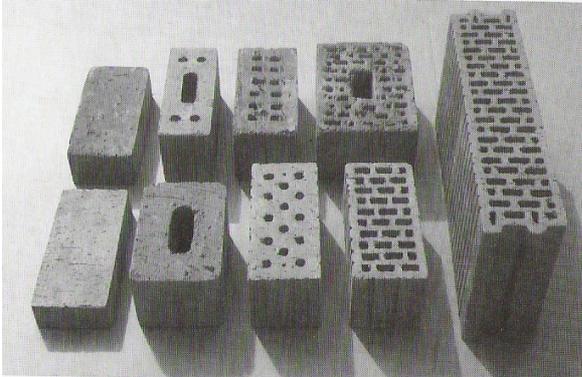


Abbildung 2.1 Links: Beispiele für industriell gefertigte Lehmsteine (Minke, S.119 /1/); Rechts: Beispiel für ein Sichtmauerwerk aus Lehmziegeln (/49/)

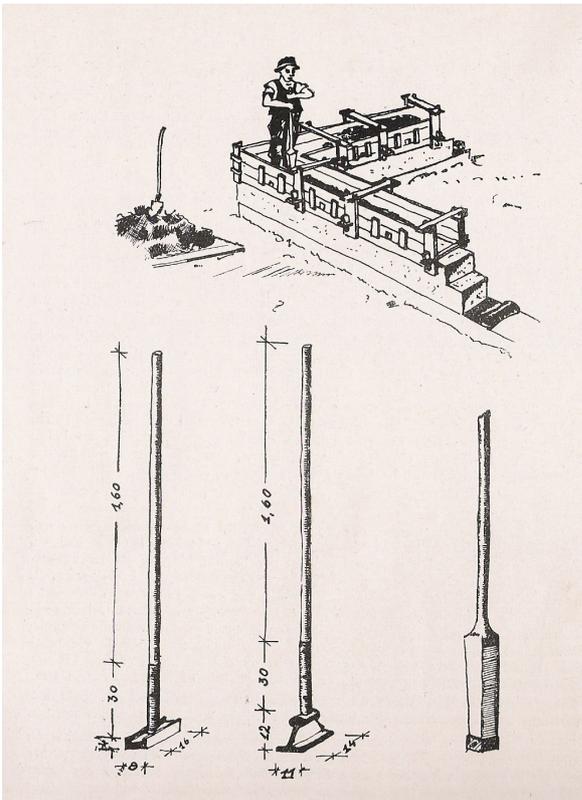


Abbildung 2.2 Stampflehm (Links: Pollak/Richter, S.82 /9/; Rechts: Einbringen des Lehms mittels Krankübel bei einer Stampflehmwand, Kapelle der Versöhnung, Berlin /50/)

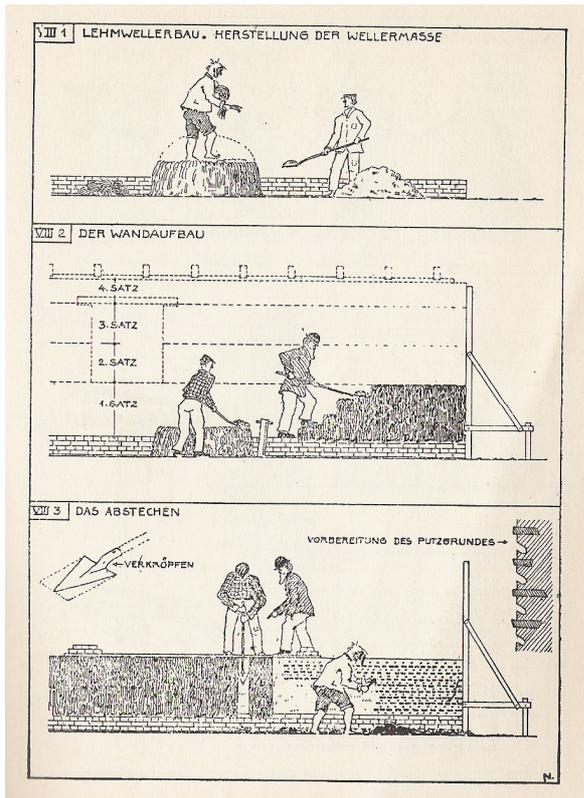


Abbildung 2.3 Lehmwellerbau (Links: Niemeyer, S.143 /6/; Rechts: Lehmwellerscheune in Steigra /Sachsen-Anhalt, Deutschland /51/)

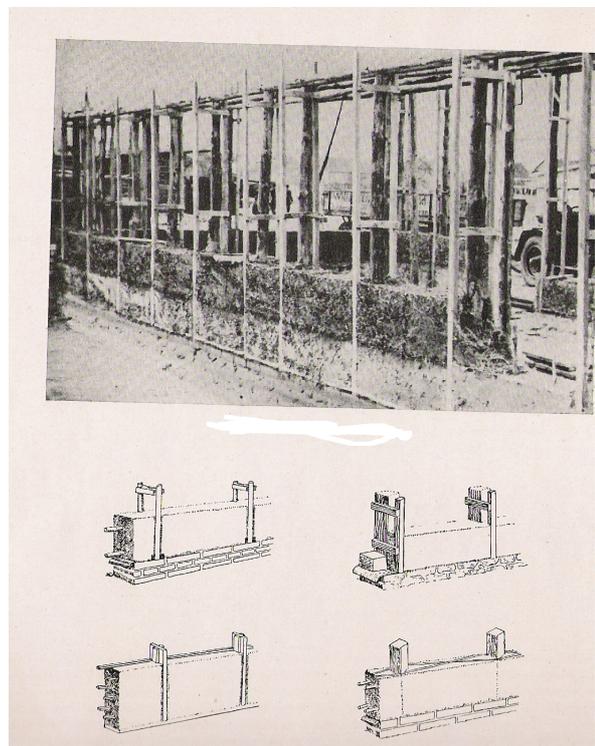
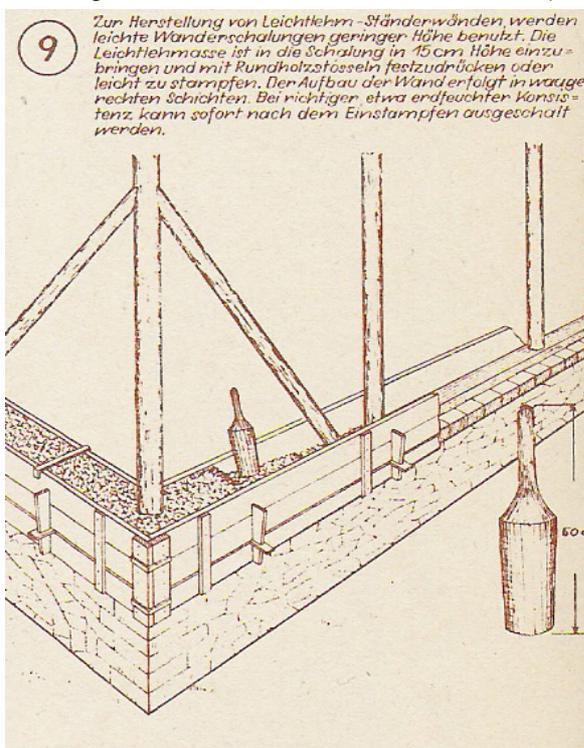


Abbildung 2.4 Leichtlehmwände in Gerippebauten (Links: Beispiel für eine Wanderschaltung für eine Leichtlehmständerwand in Sieber, S86 /5/; Rechts: Beispiele für Lehmständerwände in Pollak/Richter, S.110 /9/)

Heute geht der Trend zu großformatigen Lehmsteinen und Fertigteilen. In Abbildung 2.5 sind zwei Beispiele für aktuelle Entwicklungen abgebildet.



Abbildung 2.5 Links: Lehmstein Fa. Wienerberger. Rechts: n&l Biofaserlehm® - Fertigplatte

### 2.1.2 Dächer

In den trockenen heißen Klimazonen wurden zumeist Flachdächer aus Lehm gebaut. Hier war kein Regenschutz erforderlich. Auch in niederschlagsarmen Gebieten kamen Lehmflachdächer zum Einsatz. In Anatolien, Türkei wird zur Abdichtung der Flachdächer ein besonders ton- und salzhaltiger Lehmschlamm verwendet. Dieser Lehm bleibt aufgrund der wasseranziehenden Wirkung des Kochsalzes sehr lange feucht und bildet dann eine wasserdichte Schicht. Wird das Salz im Laufe der Jahre durch den Regen aus der obersten Schicht herausgespült, wird von den Bewohnern Salz auf das Dach gestreut, oder das Dach mit Salzwasser begossen (*Dalokay*, S.41 /8/). Siehe auch Punkt 2.6.1.3.

Steildächer, die bevorzugte Dachform in regenreichen Gebieten, wurden eher selten aus Lehm hergestellt. Aus brandschutztechnischen, wärmedämmenden und schalldämmenden Gründen wurde Lehm in Kombination mit anderen Materialien eingesetzt. Beim Strohlehmschindeldach beispielsweise kam Langstroh in Kombination mit fettem Lehm zum Einsatz (*Pollak/Richter*, S.126 /9/).

### 2.1.3 Decken

Bei traditionellen Deckenkonstruktionen wurden Lehmfüllungen eingebracht, um den Brand-, Schall-, und Wärmeschutz zu verbessern. Bei *Minke* (*Minke*, S.223 /1/) werden folgende Decken genannt:

- Stampflehmdecke auf tragenden Hölzern

- Spalierdecke
- Gestampfte Stakendecke
- Wickeldecken.

Diese alten Konstruktionen sind sehr aufwändig in der Ausführung. Später entwickelte Deckenkonstruktionen arbeiten mit vorgefertigten Lehmsteinen:

- Holzbalkendecken mit Lehmsteinen
- Kappendecken.

#### 2.1.4 Gewölbe

Gewölbe aus Lehm wurden hauptsächlich mit Lehmsteinen errichtet. Die dabei verwendeten Gewölbebautechniken sind schalungsfreie und geschalte Formen. Eine seltene, weil auch langsame Bauweise ist das Nasslehmgewölbe.

#### 2.1.5 Fußböden

Lehmfußböden wurden hauptsächlich bei untergeordneten Räumlichkeiten eingesetzt. Bekannt sind vor allem Lagerräume mit Lehm Boden für Obst und Gemüse. Einen traditionellen Lehmfußbodenaufbau zeigt die Abbildung 2.6.

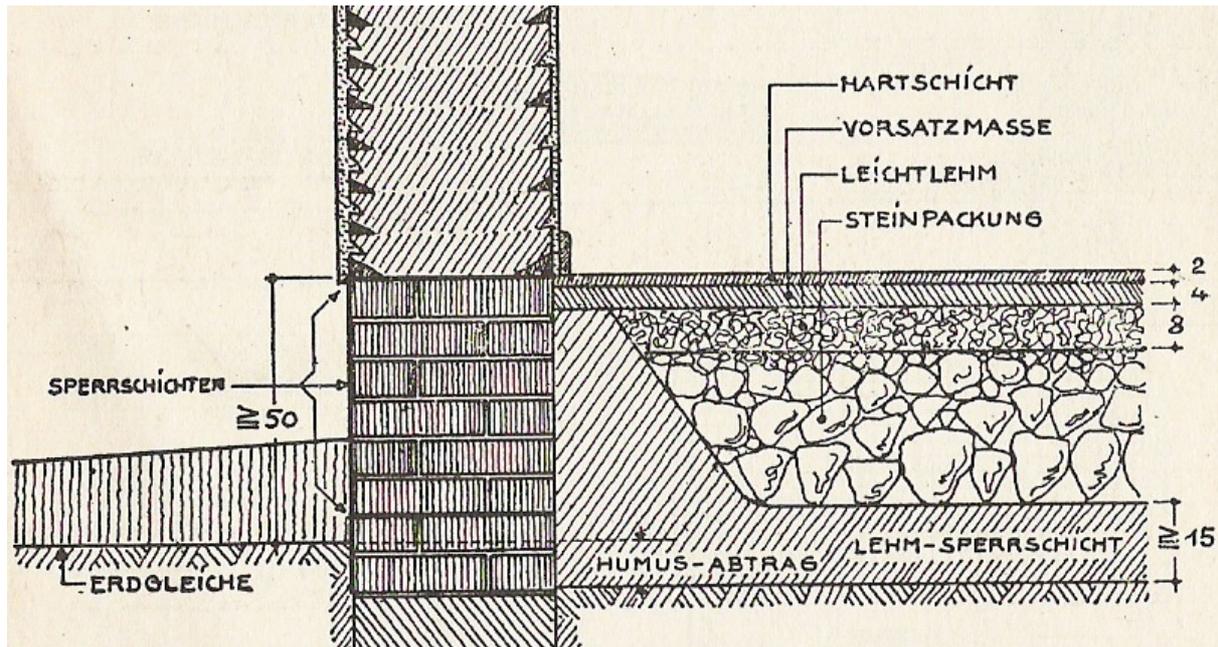


Abbildung 2.6 Lehmfußbodenaufbau (Niemeyer, S.148 /6/)

An der Universität Kassel wurden vor einigen Jahren Lehmfußböden hergestellt und getestet (Minke, S.226 /1/):

- Aufbau 1:
- 12 cm Stampflehmfußboden oder Hirnholzplasterboden
    - Lehmschicht (dünn, breiig) – zum Verfestigen der Blähtonpartikel
  - 10 cm Wärmedämmung (Blähtonpartikel)
  - Feuchtigkeitssperre (Kunststoff- oder Bitumendachbahn)
  - 3 cm Ausgleichsschicht (Grobsand) verdichtet
  - 15 cm kapillarkraftbrechende Schicht (Schotter)

Um das Trockenschwindmaß in Grenzen zu halten, wurde eine Mischung von ca. 10 % Ton und ca. 50 % Grobsand hergestellt und ein Teil des Anmachwassers durch Leinölfirnis ersetzt. (Hier wurden auf 100 Liter trockene, lockere Lehm-masse 4 Liter Leinölfirnis und je nach Tongehalt 3 bis 4 Liter Wasser zugemischt.) Der Zusatz von Leinölfirnis bewirkt eine erhöhte Wasserbeständigkeit und Abriebfestigkeit der Oberfläche. Werte und Prüfmetho-den hierzu sind in der Literatur nicht angegeben. Der Stampflehmfußboden wurde in 3 Schichten mit jeweils steigendem Leinölfirnisgehalt eingebracht. Die einzelnen Schichten wurden mit elektrischen Vibrationsstampfern verdichtet. Weiters wurde nach der ersten Schicht ein Rost aus 10 x 10 cm dicken Kanthölzern ausgelegt (Raster 1,80 x 1,80 m). Auf die zweite Schicht

folgte ein Hartholzrost aus 2 x 4 cm dicken Leisten (Raster 30 x 30 cm). In diesen Rost wurde dann die dritte Schicht eingestampft. Der Zeitaufwand für die Herstellung dieses Fußbodens inkl. Unterbau betrug ca. 16 h/m<sup>2</sup>. Für die Variante eines Hirnholzbodens wurden immer noch 10 h/m<sup>2</sup> benötigt. In Abbildung 2.7 ist die Herstellung dieses Bodens abgebildet.

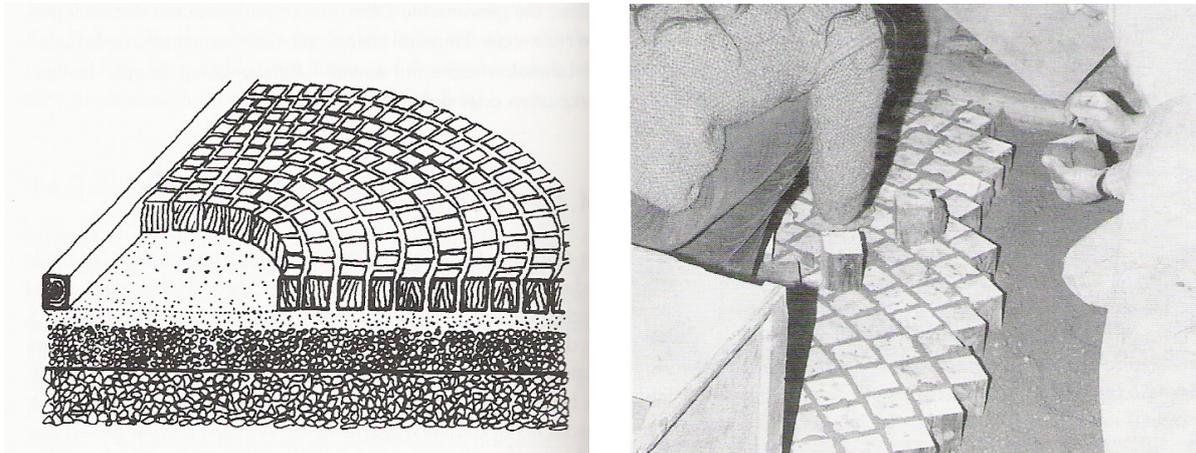


Abbildung 2.7 Lehmfußboden mit Hirnholzplaster (Minke, S.226, 228 /1/)

Diese hohe Arbeitsintensität macht diese Fußbodenkonstruktion sehr teuer, wenn sie von Fachleuten hergestellt wird. Sie eignet sich aber auch für den Selbstbau.

Eine wesentlich schneller herstellbare Lehmfußbodenkonstruktion ( ca. 1 ¼ h/m<sup>2</sup>) zeigt die Abbildung 2.8.

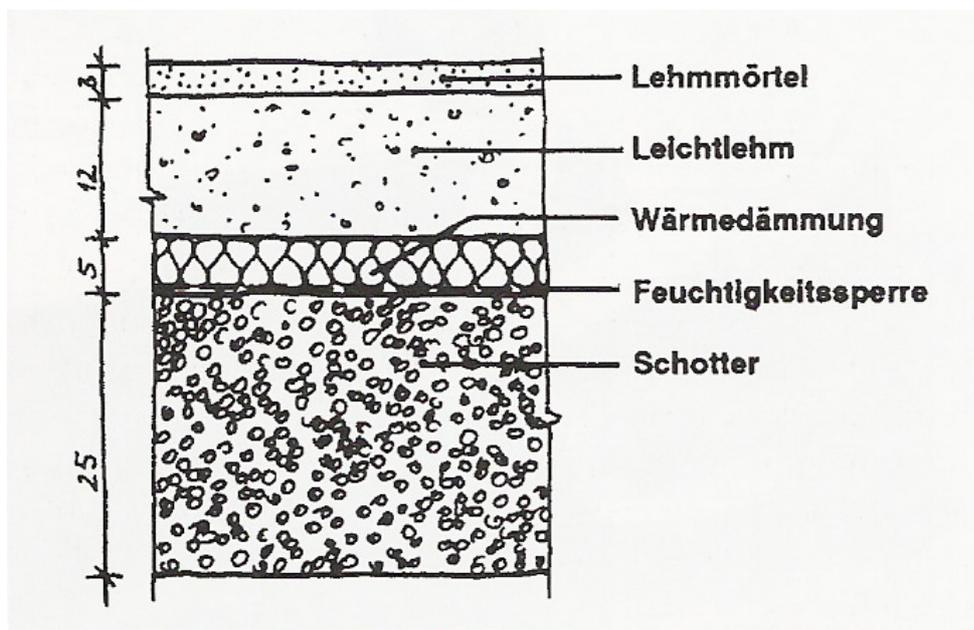


Abbildung 2.8 Aufbau einer Leichtlehmfußbodenkonstruktion (Minke, S.228 /1/)

Die Leichtlehmischung besteht aus Lehmmörtel, Estrichsand und Blähton (Körnung 1 – 4 mm). Sie wird im Freifallmischer gemischt, auf die Wärmedämmung geschüttet und abgezogen. Die Lehmmörtelschicht besteht aus zwei Lagen. Die untere Lage, ca. 2 – 3 cm stark, wurde mit Estrichkies (Körnung 0 – 4 mm) stark gemagert. Der Lehm enthielt nur 7 % Ton und 20 % Schluff. Die ca. 1 cm dicke Deckschicht wurde mit Estrichsand (Körnung 0 – 2 mm) hergestellt. Um die Abriebfestigkeit der Deckschicht zu erhöhen wurden 5 Zusätze ausprobiert: dünnflüssiger Tischlerleim (Styrolbutadien (Polystyrol) – Emulsion), Natrium – Wasserglas, Leinölfirnis, Kalk – Kasein – Leim, Kalk – Kasein mit Kreidepulver. Die verschiedenen Zusätze zeigten keine großen Unterschiede bei den Abriebtests. Bei Wasserglas waren die Versuchswerte am niedrigsten und bei Kalk – Kasein – Kreide am besten. Durch den Zusatz von Leinölfirnis wurde die Trockenzeit stark verlängert und eine unangenehme Geruchsentwicklung war zu bemerken. Auch die Styrolbutadien - Emulsion verursachte eine Geruchsbelästigung, aber die Beeinträchtigungsdauer war weit kürzer. (etwa 2 – 4 Wochen)

Die Deckschicht wurde abschließend (nach dem Austrocknen) mit einer Hartwachsschicht versehen (*Minke*, S.228 /1/).

## 2.2 Lehm

Lehm ist ein Gemisch aus Ton, Schluff (Feinstsand), Sand und Wasser. Es können auch Beimengungen von größeren Gesteinspartikeln sowie organisches Material enthalten sein.

Je nach seiner Zusammensetzung wird der Lehm als tonig, schluffig oder sandig bezeichnet.

Im Lehm wirkt der Ton als Bindemittel, welcher die übrigen gröbereren Partikel miteinander verbindet.

### 2.2.1 Ton

Als Ton werden feinste Bodenteilchen bezeichnet, deren Durchmesser kleiner als 0,002 mm ist. Ton ist ein Verwitterungsprodukt aus Feldspat und anderen Mineralien der Urgesteine. Feldspate bestehen aus Aluminiumoxid, einem weiteren Metalloxid und Kieselsäure.

Tone bestehen aus Mineralien in hexagonaler Plättchenform mit großer spezifischer Oberfläche und hoher Oberflächenaktivität.

Die drei bekanntesten Tonminerale sind Kaolinit ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), Montmorillonit ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) und Illit ( $(\text{K}, \text{H}_3\text{O})\text{Al}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{H}_2\text{O}, \text{OH})_2$ ).

Um die Unterschiede der Tonminerale besser darzustellen sind in den folgenden Abbildungen und Tabellen Kristallgitteraufbauten, Mikroskopaufnahmen und Zusammensetzungen dargestellt. (Abbildung 2.9, Tabelle 2.1, Abbildung 2.10, Tabelle 2.2, Abbildung 2.11, Tabelle 2.3)

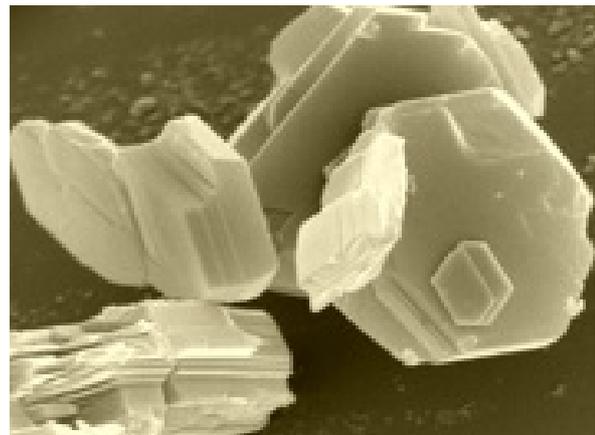
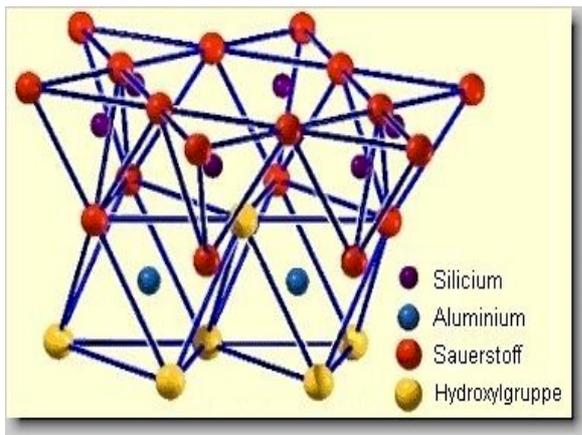
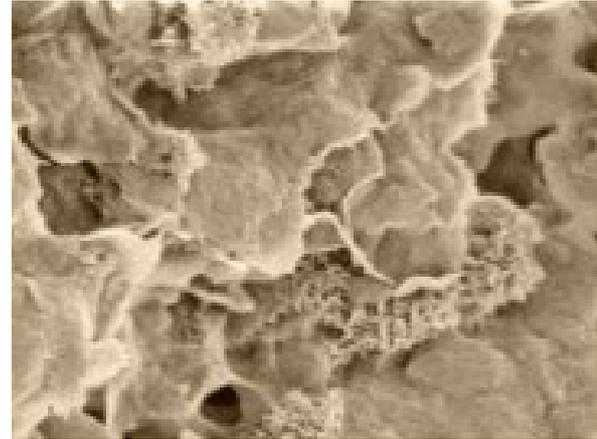
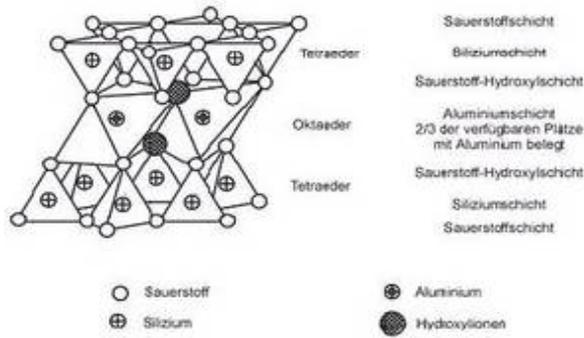


Abbildung 2.9 Links: Kristallgitter von Kaolinit (Zweischichttonmineral). Kaolinit besteht aus einer Oktaederschicht (koordiniert um Al) und einer Tetraederschicht (koordiniert um Si) /52/; Rechts: Kaolinit unter dem Mikroskop /53/

Tabelle 2.1 Zwei Beispiele chemischer Daten von Kaolinit in Masse-% /52/

	Amberg / Deutschland	Cornwall / England
$\text{SiO}_2$	49,6	47,8
$\text{Al}_2\text{O}_3$	34,4	37,3
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0,5	0,53
$\text{TiO}_2$	0,4	0,04
$\text{K}_2\text{O}$	2,6	1,72
$\text{Na}_2\text{O}$	0,1	0,05
$\text{CaO}$		0,2
$\text{MgO}$		0,1
Glühverlust	11,4	12,31

Schichtpaket des Montmorillonitgitters:



Die Symbole der Ionen stellen nicht deren wahre Größe dar, sondern nur ihren Schwerpunkt

Abbildung 2.10 Links: Schichtgitter von Montmorillonit (Dreischichttonmineral) /54/; Rechts: Montmorillonit unter dem Mikroskop /53/

Tabelle 2.2 Zwei Beispiele chemischer Analysedaten von Montmorillonit in Masse-% ( in der Quelle nur mit „Beispiel“ ohne Ortsangabe angeführt) /52/

	Bsp. 1	Bsp. 2
SiO <sub>2</sub>	64,53	63,63
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,39	22,23
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,28	3,49
TiO <sub>2</sub>	0,46	0,46
K <sub>2</sub> O	0,32	0,51
Na <sub>2</sub> O	1,77	2,13
CaO	2,22	2,14
MgO	5,03	4,95
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		0,07
SO <sub>3</sub>		0,39

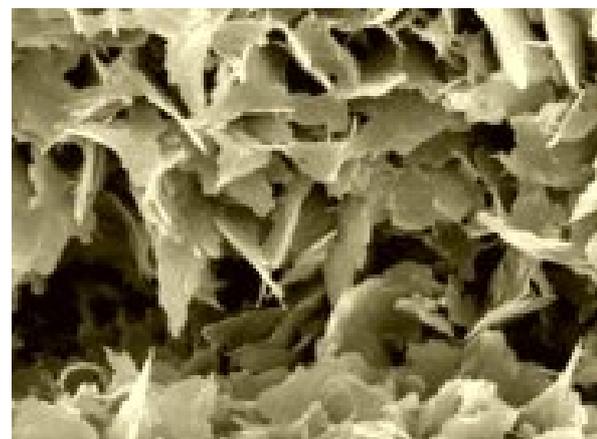
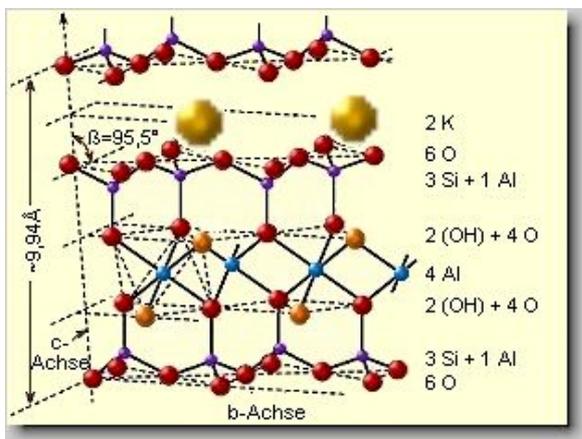


Abbildung 2.11 Links: Kristallgitter von Illit (Dreischichttonmineral). Dargestellt ist die doppelte Formel  $K_2Al_4[(OH)_4|Al_2Si_6O_{20}]$ . In den Tetraederschichten ist 1/4 der Si durch Al ersetzt. Die

dadurch negativ geladenen Schichtpakete  $\text{Al}_2(\text{OH})_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}]$  werden durch  $\text{K}^+$ -Ionen zusammengehalten./52/; Rechts: Illitunter dem Mikroskop /53/

Tabelle 2.3 Zwei Beispiele chemischer Analysedaten von Illit in Masse-% /52

	Bsp. 1	Bsp. 2
$\text{SiO}_2$	55,4	55,9
$\text{Al}_2\text{O}_3$	21,8	21,53
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	7,0	6,9
$\text{TiO}_2$	0,81	1,05
$\text{K}_2\text{O}$	9,4	8,7
$\text{Na}_2\text{O}$	0,38	0,41
$\text{CaO}$	1,2	1,3
$\text{MgO}$	3,7	4,2

### 2.2.2 Schluff, Sand, Kies

Schluff (Durchmesser 0,002 bis 0,06 mm), Sand (0,06 bis 2 mm) und Kies (2 bis 60 mm) unterscheiden sich sehr wesentlich von Ton. Sie können keine anderen Teile an sich binden und sind Zuschlagstoffe für den als Bindemittel wirkenden Ton.

### 2.2.3 Wasser

Lehm bindet Wasser. Die Art und Menge des Wassers im Lehm bestimmt wesentlich seine Eigenschaften.

- Kristallwasser: ist chemisch gebunden und entweicht erst beim Brennprozess bei 400 – 900 °C.
- Absorptionswasser: wird durch das elektrisch bedingte Sorptionsvermögen der Tonminerale gebunden.
- Porenwasser: dringt durch Kapillarwirkung in die luftgefüllten Poren des Lehms.

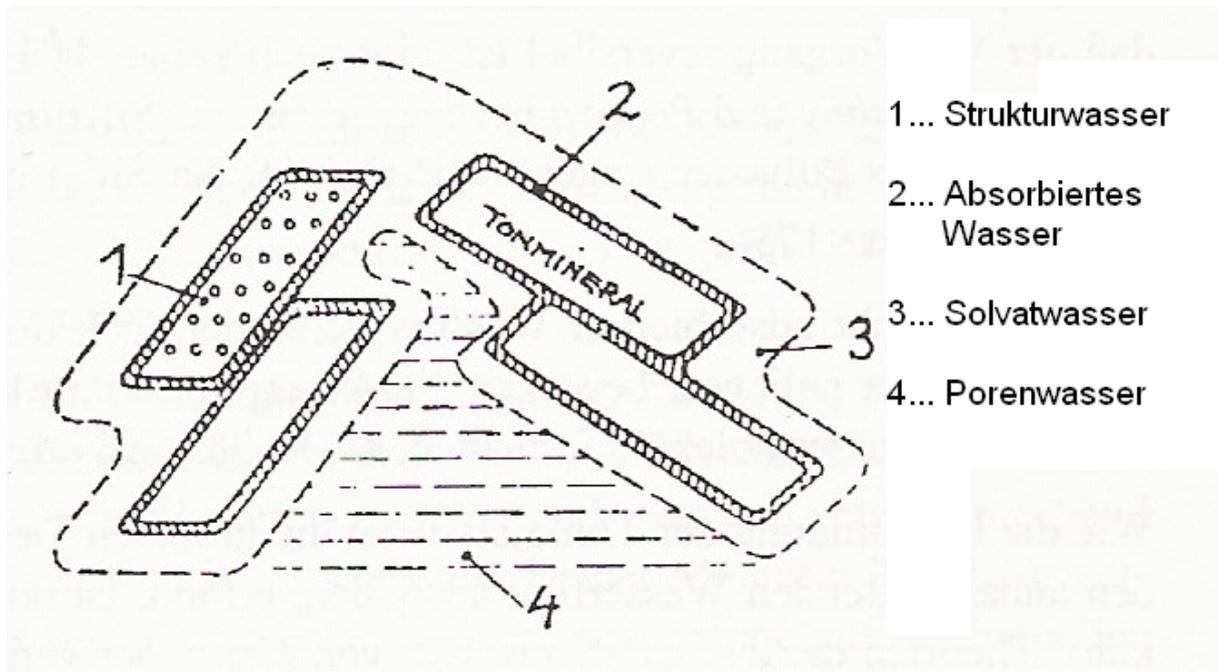


Abbildung 2.12 Wasserbindung im Lehm (Schwimmann, S. 75 /2/)

In der Abbildung 2.12 ist ein ungefähres Schema der im Lehm enthaltenen Wassermenge und –form dargestellt (Schwimmann, S. 75 /2/).

Kommt Ton mit Wasser in Berührung, dringt das Wasser in das blättrige Kristallgefüge ein. Dies bewirkt eine Volumenzunahme („*Quellen*“). Die Kristallplättchen sind dann von einem dünnen Wasserfilm umhüllt und gleiten deshalb beim Kneten aneinander vorbei. Dadurch ist der Lehm plastisch verformbar. Trocknet Lehm aus, so verdunstet das Wasser (absorbiertes Wasser, Solvatwasser, Porenwasser) und die Kristallplättchen des Tons lagern sich dicht aneinander. Es entstehen Kohäsionskräfte, welche die Zugfestigkeit des Lehms im plastischen Zustand und die Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit im trockenen Zustand bewirken.

## 2.2.4 Kornverteilung

Ein Lehm lässt sich aufgrund seiner Bestandteile Ton, Schluff, Sand und Kies charakterisieren. Eine übliche Darstellung der unterschiedlichen Bestandteile erfolgt in der sogenannten Körnungslinie nach DIN 18123 (/31/), auch Kornverteilungskurve genannt. In der Abbildung 2.13 sind beispielhaft drei Kornverteilungskurven von tonigem, stark schluffigem und stark sandigem Lehm abgebildet. Entsprechend der Zunahme an gröberen

Körnern durch den Schluff- bzw. Sandzusatz verschoben sich die Körnungslinien nach rechts.

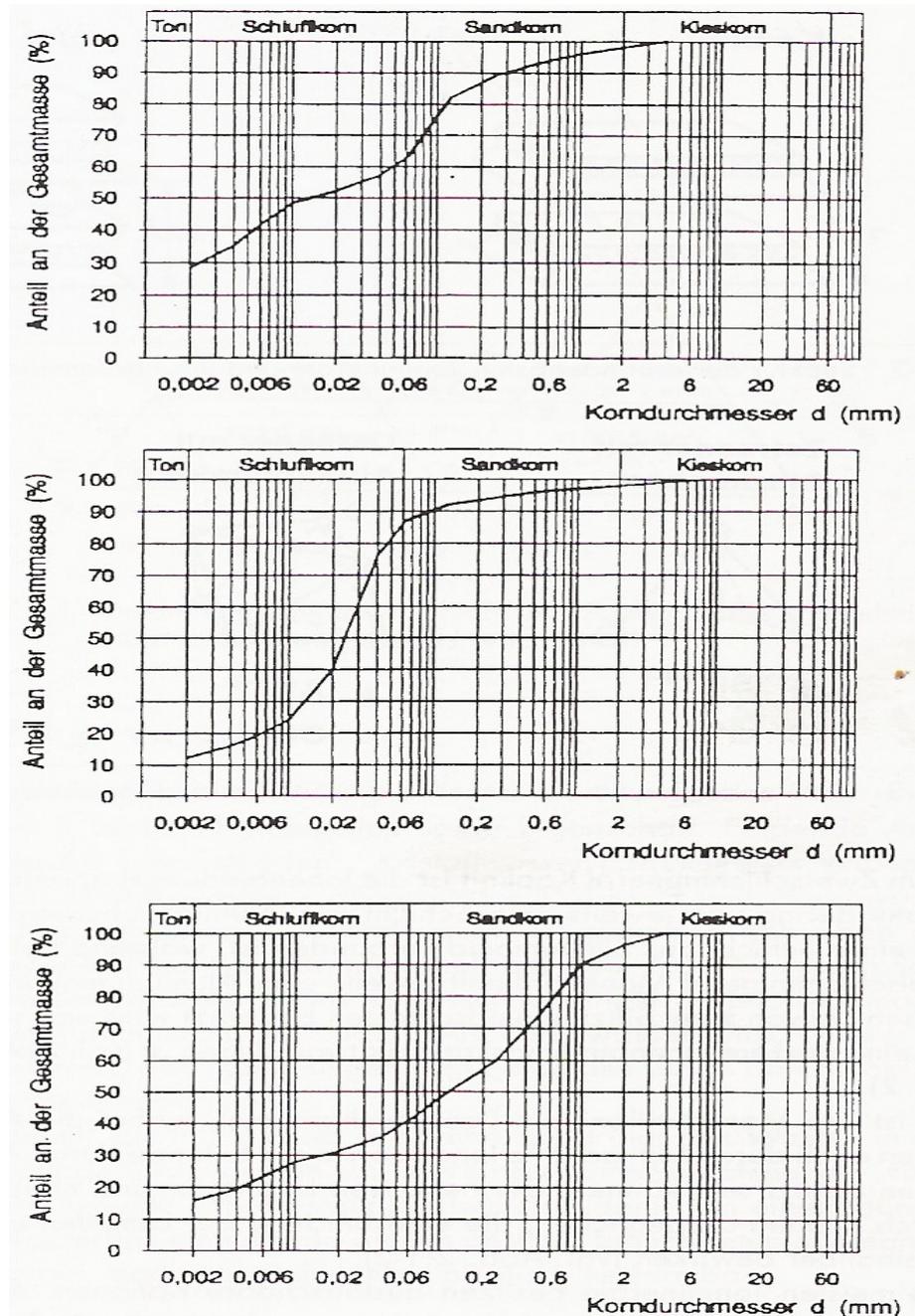


Abbildung 2.13 Kornverteilungskurven eines tonigen Lehms (oben), eines stark schluffigen Lehms (Mitte) und eines stark sandigen Lehms (unten) (Minke, S. 29 /1/)

Zur Klassifizierung von Lehm wird häufig ein Dreiecknetz verwendet, welche die drei Hauptkomponenten des Lehmes (Ton, Schluff und Sand) zu einander in Beziehung setzt und eine Charakterisierung der jeweiligen Lehme ermöglicht. (siehe Abbildung 2.14)

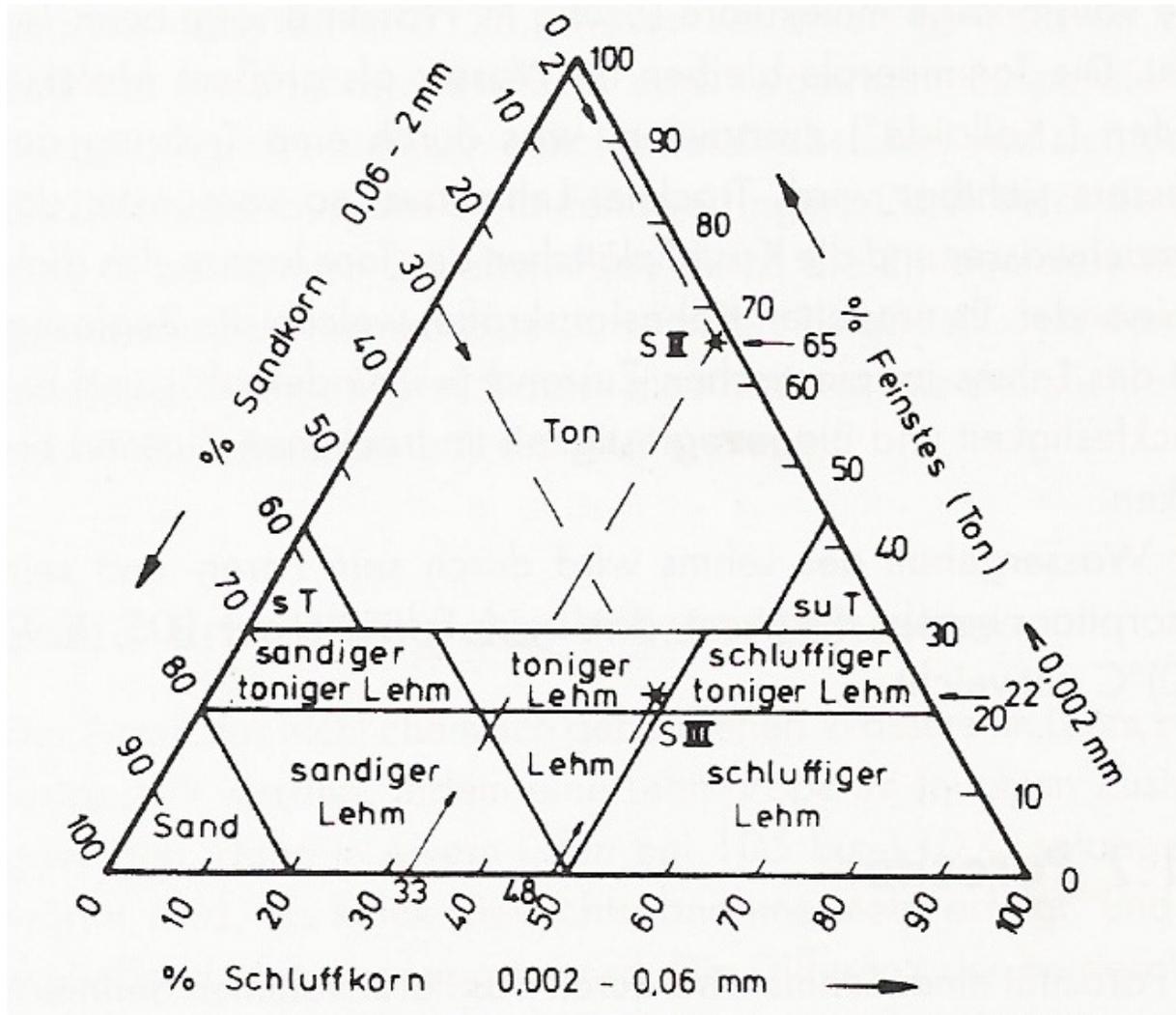


Abbildung 2.14 Darstellung des Ton-, Schluff- und Sandgehalts von Lehm mit Hilfe eines Dreiecknetzes (Minke, S. 31 /1/)

## 2.3 Lehmvorkommen und -arten

Farbe und Alter sind für den Lehmbau nicht von großer Bedeutung, während die Herkunft einen entscheidenden Einfluß für die Eignung als Baustoff hat. Die Unterschiede liegen vor allem im Tongehalt und Mineralgerüst.

Durch die Art der Entstehung lassen sich Lehme in zwei Gruppen einteilen:

- Lehme auf primärer Lagerstätte oder Verwitterungsböden (z.B.: Berglehm - lagert noch über dem Muttergestein und ist aus diesem durch Verwitterung entstanden)

- Lehme der umgelagerten Böden (sekundäre Lagerstätte; z.B.: Geschiebemergel, Geschiebelehm, Wiesenlehm, Lößlehm). Diese sind durch Wasser oder Wind von ihren ursprünglichen Lagerstätten zu anderen Stellen transportiert worden.

(Sieber, S.15 – 17 /5/; Pollak/Richter, S.13 – 17 /9/; /47/)

### 2.3.1 Berglehm

Dieser Lehm ist durch Verwitterung (durch die Einwirkung äußerer Kräfte, wie Temperaturunterschiede, Spaltenfrost und chemische Verwitterung) entstanden. Aus Urgesteinen (Granit, Gneis, Syenit) und Sedimentgesteinen (Tonschiefer, Sandstein, etc.) entstanden Verwitterungsprodukte, die nur in verhältnismäßig geringen Tiefen auftreten. Sie kommen auf Bergen vor und werden deshalb Berglehm genannt.

Die Form der einzelnen Sand- und Kieskörner ist bei den Urgesteinen scharfkantig und eckig, und bei den Sedimentgesteinen eher rund und geschliffen. Deshalb eignet sich der Berglehm gut als Baustoff für den (Stampf-) Lehmbau.

### 2.3.2 Gehänge- oder Hanglehm

Dieser hat sich aufgrund seines Eigengewichts entweder trocken verlagert, oder wurde durch Wasser- und Frosteinwirkung talwärts verschoben. Bei der Einwirkung durch Wasser kommt es zu einer Sortierung nach der Größe und es kann zu Auswaschungen des Tones und der feinen Mineralteilchen kommen. Auch das Vorkommen gröberer Gesteinsteile ist möglich. Dadurch ist die Zusammensetzung und Bindigkeit sehr verschieden.

### 2.3.3 Geschiebemergel

In der Eiszeit wurden von den Gletschern Grundmoränen mitgeführt, die beim zurückweichen der Eiszeit liegen blieben. Durch den hohen Druck der Gletscher wurden mitgeführte Gesteinsbrocken mit der Zeit zertrümmert und zermahlen. Die Zusammensetzung dieser Geschiebemergel ist sehr mannigfaltig.

Geschiebemergel ist sehr wasserfest. An Flussufern und Meeresküsten bildet dieser Lehm oft hohe, steile Wände, die nur wenig ausgewaschen oder abgeschwemmt sind. Durch Frosteinwirkung werden manchmal Schalen abgesprengt.

### 2.3.4 Geschiebelehm

Geschiebelehm ist das Verwitterungsprodukt des Geschiebemergels. Er ist ursprünglich meist kalkhaltig (mergelig) und im Laufe der Zeit wird er ausgelaugt. Dadurch sind die oberen Lagen mehr oder weniger entkalkt und die darunter liegenden Zonen stärker mit Kalk angereichert. Im Tongehalt treten zum Teil beachtliche Veränderungen auf. Auf den Lehmbau hat dieser Kalk, bestehend aus  $\text{CaCO}_3$  (kohlenaurer Kalk), im Gegensatz zum aktiven Kalziumhydroxid  $\text{Ca(OH)}_2$  (im Weißkalk und im angerührten Zement) keinen Einfluss. Die überwiegend gerundeten Körnungen und der geringe Anteil an klebefähigen Kolloiden macht die Geschiebelehme weniger druck- und zugfest als es die Berg- und Hanglehme sind.

### 2.3.5 Wiesenlehm

Wiesenlehm (auch Aue-, Schwemm-, Fluss- oder Schlicklehm genannt) entstand durch Flüsse und Bäche, die Gesteinsmaterial aus den Bergen mit sich führten und dieses mit langsam werdender Stromgeschwindigkeit absetzten. Größere Teile setzten sich früher ab, kleinere später. Unterschiedliche Strömungsverhältnisse (z.B. bei Hochwasser) führten zu unterschiedlichen Absetzverhältnissen. Dadurch haben Wiesenlehme eine sehr unterschiedliche Zusammensetzung. Meist haben Wiesenlehme eine sehr feinkörnige Struktur. Für Bauzwecke müssen diesem Lehm meist kiesige Zuschlagstoffe oder Faserstoffe zugemischt werden.

### 2.3.6 Lösslehm

Durch die Verwitterung von Lössmergel entsteht Lösslehm. Der Löss (ein mineralischer Staub) wurde durch Staubstürme in steppenartige Landschaften transportiert. Im Laufe der Jahrhunderte bildeten sich Schichten von mehreren Metern (in Mitteleuropa etwa 6 m).

Löss besteht aus winzigen eckigen Körnchen aus Feldspat, Glimmer, Quarz und Ton. Diese Körnchen sind mit einer feinen Kalkhaut überzogen. Durch chemische Vorgänge wird der Löss entkalkt und mit tonigen Bestandteilen angereichert.

Mineralisch setzt sich der Löss meist aus folgenden Hauptbestandteilen zusammen: Quarz, Illit, Calcit, Dolomit, Albit, Anorthit und Kaolinit.

Die Bindigkeit des Lösslehm ist eher gering. Bei einem bestimmten Feuchtigkeitsgehalt wird eine Plastizität und somit Bindigkeit vorgetäuscht, die nicht der Realität entspricht. Bezüglich des Schwindmaßes finden sich in der Literatur unterschiedliche Angaben. *Pollak/Richter* (*Pollak/Richter*, S.17 /9/) beschreiben ein geringes Schwindmaß. In der Sammlung Lehmbauverfahren (*Sieber*, S.15 /5/) wird dem Lösslehm ein erhebliches Schwinden zugeschrieben.

In Tabelle 2.4 ist beispielhaft die chemische Zusammensetzung eines lössschneckenhaltigen Lösses aus der Ziegelgrube der *Fa. Zeller* zwischen Alzenau und Kälberau (Deutschland) angeführt (/48/).

Tabelle 2.4 Chemische Zusammensetzung eines Lösslehms (/48/)

<b>Oxide:</b>	<b>Gew.-%:</b>
SiO <sub>2</sub>	63,9
LOI (lost of ignition / Glühverlust)	9,9
CaO	9,53
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,09
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,65
MgO	2,03
K <sub>2</sub> O	1,95
Na <sub>2</sub> O	1,09
TiO <sub>2</sub>	0,56
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,12
MnO	0,08
SO <sub>3</sub>	<0,1
<b>Spurenelemente:</b>	<b>ppm:</b>
As	<25
Ba	340
Ce	<30
Co	16
Cr	74
Cu	<30
Mo	<10
Nb	<10
Ni	<15
Pb	<15
Rb	73
Sr	187
Th	15
U	<10
V	60

Y	28
Zn	44
Zr	438

## 2.4 Baulehm

Baulehme sind tonhaltige Erden. Sie sind Gemische von Ton mit feinsandigen bis steinigen Bestandteilen, dem Mineralgerüst. Im trockenen Zustand erreichen sie Festigkeiten, die sie für Bauzwecke geeignet machen (/21/).

## 2.5 Festigkeitseigenschaften von Lehm

### 2.5.1 Bindekraft

Die Bindekraft ist ein Maß für die Zugfestigkeit im plastischen Zustand. Einfluss auf die Bindekraft hat in erster Linie der Tongehalt. Auch die Art der vorhandenen Tonminerale und der Wassergehalt wirken sich auf die Bindekraft aus. Um eine Vergleichbarkeit der Werte aus Bindekraftuntersuchungen zu gewährleisten, werden die Probekörper mit sog. Normsteife untersucht. Die Normsteife und die Bindekraftprüfung sind in DIN 18952 Blatt 2 (/3/) beschrieben.

### 2.5.2 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit trockener Lehmteile, im Gegensatz zur Nassdruckfestigkeit auch als Trockendruckfestigkeit bezeichnet, liegt im Allgemeinen zwischen 3 und 6 N/mm<sup>2</sup>. Bei extrem mageren Lehmmörtel kann sie bei 1 N/mm<sup>2</sup> liegen und bei idealer Zusammensetzung im Extremfall auch 10 N/mm<sup>2</sup> erreichen (*Minke*, S.60 /1/). Auch die Form und die Art der Aufbereitung und Verdichtung haben Einfluss auf die Druckfestigkeit.

In der Literatur finden sich zu den Druckfestigkeitsuntersuchungen oft keine Hinweise auf Dichte, Herstellung und Form, was eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse unmöglich macht. Insbesondere werden auch keine Angaben zum Feuchtegehalt während der Prüfung gemacht.

Die DIN 18953 / Blatt 2 (/21/) schreibt die in Tabelle 2.5 angegebenen Richtwerte für den Lehmsteinbau und die DIN 18954 (/22/) die in Tabelle 2.6 angegebenen Richtwerte für Lehmstoffe allgemein vor.

Tabelle 2.5 Richtwerte für den Lehmsteinbau (/21/)

Art der Lehmsteine	Mittelwert mind. N/mm <sup>2</sup>	Kleinster Einzelwert N/mm <sup>2</sup>
Gewöhnliche Lehmsteine	2,5	2,0
Leichtlehmsteine	0,1	0,05

Tabelle 2.6 Richtwerte für Lehmbaustoffe (/22/)

Rechnungsgewicht des trockenen und verdichteten Lehmbaustoffes N/mm <sup>2</sup>	Druckfestigkeit N/mm <sup>2</sup>	Zulässige Druckspannungen in N/mm <sup>2</sup>
1600	2,0	0,3
Bis	3,0	0,4
2200	4,0	0,5

### 2.5.3 Trockenzugfestigkeit

Die Trockenzugfestigkeit von Lehm beschreibt die Zugfestigkeit in völlig trockenem Zustand. Untersuchungen ergaben eine Trockenzugfestigkeit, die in etwa 10 – 11% der Druckfestigkeit entspricht (*Minke*, S.62 /1/).

### 2.5.4 Biegezugfestigkeit

Lehmteile sollen im allgemeinen nicht biegezugbeansprucht werden. Für Lehmputze und die Kantenfestigkeit von Lehmsteinen ist die Biegezugfestigkeit aber durchaus von Bedeutung. Beeinflusst wird sie vor allem durch den Tongehalt und der Art des Tons.

Um die Biegezugfestigkeit des Lehms zu erhöhen, werden ihm Faserstoffe wie z.B. Stroh beigemischt.

## 2.6 Lehmzusätze

Bereits unsere Vorfahren verwendeten zahlreiche Lehmzusätze, welche in den Lehm eingemischt (geknetet) wurden, um den Widerstand der Lehmbauten gegen Wasser bzw. seine Dauerhaftigkeit zu erhöhen. Diese traditionellen Verfahren wurden über Generationen hin weiter überliefert. Diese Verfahren – soweit sie noch bekannt sind – waren auf die ortsüblichen Lehmvorkommen abgestimmt. Die Wirkung von Lehmzusätzen ist kaum

erforscht, da das Bauen mit Lehm seit der Industrialisierung kaum noch angewandt wird. Erst in den letzten Jahren stieg partiell das Interesse, wieder mit Lehm zu bauen. Zu bemerken ist auch, dass die verschiedenen Lehmzusatzmittel sich auf manche Eigenschaften positiv auswirken, dafür aber andere negativ beeinflussen. In der Abbildung 2.15 sind die Ergebnisse einer Untersuchung von verschiedenen Zusatzmitteln auf das lineare Trockenschwundverhalten, die Bindekraft, die Biegezug- und Druckfestigkeit graphisch dargestellt.

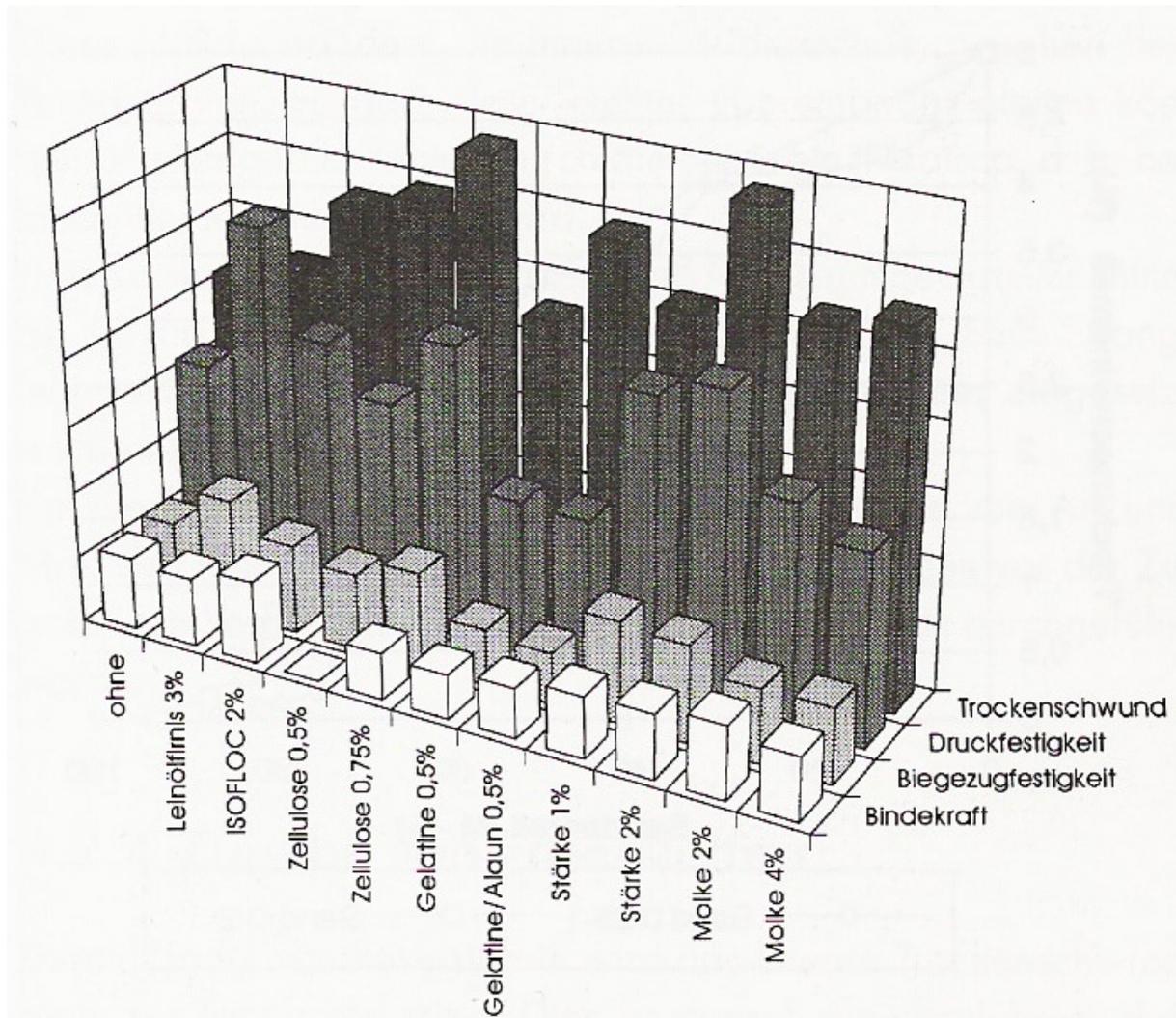


Abbildung 2.15 Einfluß von Zusätzen auf das lineare Trockenschwindmaß, Bindekraft, Biegezug- und -druckfestigkeit eines sandigen Lehms (T = 15 %, U = 29 %, S = 56 %) (Minke, S. 75 /1/)

Im Folgenden soll ein Überblick über bereits verwendete Zusätze gegeben werden. In den Literatur- und Internetquellen wurden hauptsächlich Angaben zur Festigkeitsverbesserung/-minderung und vermutete bzw. erforschte Auswirkungen auf das Lehmgefüge gesucht.

Beschrieben werden die unterschiedlichen Anwendungen, Erfahrungen, Auswirkungen, Sichtweisen, Interpretationen, etc.

## 2.6.1 Mineralische Zusätze

### 2.6.1.1 Zement

Zement eignet sich vor allem zur Stabilisierung von tonarmen Lehmen. Je mehr Ton in einem Lehm enthalten ist, umso mehr Zement wird benötigt, um einen ausreichenden Stabilisierungseffekt zu erreichen. Um das Quell- und Schwindmaß ausreichend einzuschränken, müssen die Zementpartikel, die gröber als die Tonpartikel sind, diese umschließen (*Minke*, S.79 /1/; *Kepler/Lemcke*, S.42 /12/).

Um eine möglichst vollständige Vermischung zu gewährleisten, ist es erforderlich den Lehm in trockenem gemahlten Zustand mit dem Zement zu vermischen.

Die Zementzugabe bewirkt zum Teil eine Erhöhung der Druckfestigkeit und zum Teil eine Erhöhung der Wasserbeständigkeit. Eine Dosierung ist auf das vorhandene Lehmmaterial und die gewünschten Eigenschaften abzustimmen.

Ein Vorteil einer Zementzugabe kann auch die beschleunigte Trocknungszeit sein. Der Zement benötigt zum Abbinden Wasser und entzieht so dem Ton Feuchtigkeit. Bei Zementzugaben von ca. 5 % ist der Trockenprozess für die Endfestigkeit von großer Bedeutung. Werden die Lehmsteine unter Sonneneinstrahlung getrocknet, erreichen die Steine nur eine Festigkeit von etwa 20 % als jene Steine die mit feuchten Tüchern oder mit Plastikfolie abgedeckt werden. Bei Lehmsteinen mit Zementzugaben von ca. 10 % ist eine schnelle Austrocknung nicht relevant für die Endfestigkeit (*Minke*, S.91 /1/).

### 2.6.1.2 Kalk

Kalk war ein weit verbreitetes Zusatzmittel. In der Literatur finden sich unterschiedliche Aussagen auf positive wie negative Eigenschaften.

Bei *Minke* wird angegeben, dass die Stabilisierung mit Kalk einen Verfestigungsprozess mit sich bringt. Einerseits schnell verlaufend, aber auch eine Langzeitverfestigung sei festzustellen (*Minke*, S.80 /1/).

*Schwimann* gibt an, dass bei Kalkzugabe die Festigkeit reduziert wird. Kalk hebt die Bindekraft des Tons teilweise auf. Aber auch positive Effekte sind möglich:

- Bei Lehmen mit stark quellenden Tonarten kann ein Kalkzusatz unter 1 % stabilisierend wirken.
- Bei sehr sandigen Lehmen entsteht bei hoher Kalkzugabe eine Art schlechter Kalkmörtel
- Bei allen anderen Lehmen und Dosierungen werden die Bauteile durch Kalkzugabe meist porös und brüchig. Der schwächende Effekt kann nach längerer Zeit verstärkt auftreten ( *Schwimann*, S.140 /2/).

*Keppler/Lemcke* beschreiben ebenfalls eine Reduzierung der Bindekraft bei mageren Lehmen. Bei fettem Lehm ist ein Kalkzusatz überflüssig. Die Plastizität des Lehms sinkt stark ab und eine höhere Wasserzugabe ist erforderlich. Außerdem wird der pH-Wert erhöht, dadurch wirkt das Material ätzend (*Keppler/Lemcke*, S.42 /12/).

Kalk wirkt im Lehm als Verdickungsmittel und als Magerung (*Volhard*, S.48 /25/).

### **2.6.1.3 Salz**

In der Türkei gibt es in den ariden und semiariden Klimazonen in Schlemm- und Flusslandschaften einen salzhältigen Lehmschlamm, genannt „Coarak“. Dieser wurde bzw. wird zum Teil immer noch zur Flachdachabdichtung verwendet. Coarak ist ein Lehm mit hohem Tongehalt und einem hohen Anteil an Salzen (hauptsächlich stark hygroskopisches Natriumsalz). In der trockenen Jahreszeit trocknet das Lehmdach stark aus, dabei tritt zwar eine starke Volumenreduktion auf, aber es kommt zu keiner Rissbildung. Das Salz speichert das Wasser. Die Lehmschlämme bleibt feucht genug um die Dichtheit zu gewährleisten. Während der regenreichen Zeit bleibt das Dach dicht. Allerdings wird mit der Zeit das Salz ausgewaschen und die Wirkung würde verloren gehen, wenn nicht in regelmäßigen Abständen Salz oder Salzwasser auf die Dachflächen aufgebracht würde (*Dalokay*, S.41 /8/). Bei geringen Zugaben von Salz wirkt es verflüssigend. Dadurch lässt sich der Lehm besser verdichten und es wird eine höhere Festigkeiten erzielt (*Schwimann*, S.155 /2/).

### **2.6.1.4 Soda**

Bei Montmorillonit-Tonen kann mit Soda eine stark verfestigende Wirkung erzielt werden. Bei anderen Ton-Mineralen hatte Soda allerdings einen gegenteiligen Effekt (*Wichmann*, S.25 /24/).

In der Töpferei wird Soda als Verflüssigungsmittel eingesetzt. Der Wasseranteil in der Tonmischung wird dabei herabgesetzt, was zu einem geringeren Schwindmaß und einer schnelleren Trocknung führt. Auch die Verdichtung wird erhöht und infolge dessen auch die Festigkeit. Vor allem bei Stroh – Leicht – Lehmen hat sich dieser Zusatz bewährt. Dabei wurde einem Lößlehm 0,1 – 0,2% Soda bzw. Soda mit Wasserglas kombiniert zugesetzt (*Volhard*, S.47 /25/).

#### **2.6.1.5 Eisenoxid**

An der University of New South Wales, Australien wurden Lehmversuche durchgeführt, bei denen mit Zusatz von Eisenoxid Versteinerungsprozesse beobachtet werden konnten. Durch Zugabe von Eisenoxid ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) bildet Lehm in einem bestimmten alkalischen Milieu ein unlösbares Eisensilikat. Bei Kaolinit – Tonen konnten mit Zusatz von Eisenoxid fünffach erhöhte Trockendruckfestigkeitswerte erzielt werden, auch die Nassdruckfestigkeit lieferte überzeugende Werte. Durch thermische Behandlung (max.  $500^\circ\text{C}$ ) konnte die Verfestigung noch beschleunigt und erhöht werden (*Minke*, S.91 /1/).

Bei der Entstehung von Lehm werden die charakteristischen Eigenschaften durch verschiedene Metallverbindungen geprägt (Eisenoxidhydrat  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  und andere Eisen-, Kalzium-, Magnesium- und Aluminiumverbindungen). Im Grundbau werden mechanische und elektroosmotische Verfahren zur Lehmbodenverbesserung herangezogen. Das lässt sich zum Teil auch für den Lehmbau heranziehen. Der Aufwand dabei, vor allem der energetische, ist aber hoch (*Schwimann*, S.160 /2/).

#### **2.6.1.6 Wasserglas**

Wasserglas (Kaliumsilikat) ist ein mit Pottasche verkochter Quarzsand. Es wird als wasserverdünnbares Bindemittel, das wasserunlöslich aufrocknet, verwendet. Wird Wasserglas auf Kalk- oder Lehmputz aufgetragen, verkieselt bzw. versteinert es durch das Trocknen an der Luft (*Schillberg/Knieriemen*, S.132,135 /30/).

Versuche mit Natriumwasserglas ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot 3 - 4 \text{SiO}_2$ ) zeigten eine Zunahme der Wasserfestigkeit bei mageren Lehmen (*Minke*, S.80 /1/).

Wasserglas vermischt sich gut mit dem Lehm und bewirkt eine Verflüssigung bei der Verarbeitung (Bei einer Zugabe von 0,1 – 0,4 % bezogen auf den trockenen Ton.). Durch die Zugabe von Verflüssigungsmitteln (z.B.: auch Soda, Humussäure, Gerbsäure, Tannin) reduziert sich der Wasseranteil und das Schwinden wird reduziert. Auch entsteht eine

dichtere Masse, was eine höhere Festigkeit zur Folge hat. Ein weiterer Vorteil ist die verkürzte Trocknungszeit. Auch hier ist anzumerken, dass die Verschiedenartigkeit der Lehme berücksichtigt werden muss (*Volhard*, S.47 /25/).

Im Zuge einer Diplomarbeit an der TU Wien wurden Versuche mit Zusatz von Na-Wasserglas durchgeführt. Dabei wurde das schnellere Trocknen als nachteilig gewertet, da ein höherer Wasserzusatz notwendig war, um die Normsteife zu erreichen. Auch neigten die Probekörper zu Verformungen (Verkrümmungen). Weiters wurde festgestellt, dass die Festigkeit mit steigendem Wasserglaszusatz steigt. Untersucht wurden Zusätze mit 2, 10 und 20 Massenprozent (*Öhlinger*, S.44 /34/).

Um bei Lehmböden eine bessere Abriebfestigkeit zu erzielen werden ca. 10% Wasserglas zugemischt. Probleme können die beim Trocknen entstehenden feinen Haarrisse bereiten. Diese sind immer sorgfältig zuzuschlämmen, da sonst die Wasserfestigkeit darunter leidet.

Zugaben von Wasserglas ab einem Prozentsatz von ca. 6% machen den Lehm starr und spröde.

Bei Lehmen mit Faserstoffzugabe hat eine Zugabe von Wasserglas eine brandschützende und verklebende Wirkung.

#### **2.6.1.7      Puzzolane – Trass**

Puzzolane bestehen aus amorphen, leicht reaktionsfähigen Siliziumoxiden. Sie entstehen entweder bei der schnellen Abkühlung von vulkanischem Auswurf oder aus Kieselskeletten von Pflanzen und Tieren im Meer. Puzzolane reagieren mit Wasser und Kalkhydrat zu Calciumsilikathydraten und erhärten zu einer dichten, wasserunlöslichen Gesteinsmasse. Trass ist ein natürliches Puzzolan. Künstliche Puzzolane entstehen durch die Verhinderung der Kristallbildung infolge sehr schneller Abkühlung (z.B.: beim Brennen von Ziegeln, bei der Gewinnung von Eisen im Hochofen als Hochofenschlacke) (/26/).

*Schwimmann* konnte bei seinen Versuchen mit Trass- und Ziegelmehlzugabe eine Erhöhung der Wasserfestigkeit erkennen. Optimal erwies sich ein Wert von 5% Trasszugabe für eine Verbesserung der Regenfestigkeit von Lehmputz (*Schwimmann*, S.153 /2/).

#### **2.6.1.8      Gips**

Gips eignet sich vor allem für Ausbesserungsarbeiten und nachträgliche Arbeiten. Lehm schwindet relativ stark und löst sich bei nachträglich aufgetragenen Teilen oft wieder ab.

Gips verbessert die Haftfähigkeit und reduziert das Schwindmaß so, dass später eingefügte Teile sich nicht mehr herauslösen.

Im Vorderen Asien wurde Gipszusatz für ortsübliche Gewölbetechniken und auch bei Mauermörteln verwendet. Allerdings ist Gips auch wasserlöslich.

Bei Estrichen kann auf die noch feuchte Oberfläche Gips gestreut und dann eingeschlagen werden. Das erhöht die Festigkeit.

Nachteilig bei der Zugabe von Gips ist die reduzierte Abriebfestigkeit – vor allem bei tonreichen Lehmen (*Schwimann*, S.142 /2/).

## 2.6.2 Tierische Zusätze

### 2.6.2.1 Blut

Tierblut wurde vor allem für Anstriche verwendet um die Festigkeit der Oberfläche zu erhöhen und um einen Bakterienbefall zu vermeiden. Die Proteine im Blut füllen die Poren und verkleben die Lehmteilchen. Bei den Römern wurde vorzugsweise Ochsenblut als Stabilisierungs- und Bindemittel verwendet. Im norddeutschen Raum wurden Stampflehtennen mit Ochsenblut gestrichen um die Abriebfestigkeit zu erhöhen (*Minke*, S.80 /1/).

### 2.6.2.2 Urin

Die Beimischung von Urin hat lange Tradition. Am häufigsten wurde der Urin von Menschen, Rindern oder Pferden verwendet. Je nach Herkunft unterscheidet sich der Urin in seiner Zusammensetzung.

Urin hat einen hohen Natriumgehalt. Dieser erhöht die Geschmeidigkeit des Lehms und reduziert die Rissbildung. Beim Austrocknen wird Kapillarwasser an die Oberfläche transportiert. Dabei werden die im Lehm gelösten Salze mittransportiert und setzen sich an der Oberfläche ab. Das führt zu einer verfestigten und wasserabweisenden oberen Schicht.

Diese Wirkung wurde im europäischen Raum bei Estrichen und Verputzen genutzt. Auch bei Überlagerkonstruktionen aus Lehm wurde statt Wasser Urin zugemischt, vorzugsweise Pferdeurin. Diese Technik liefert einen sehr witterungsbeständigen Baustoff. Heute wird sie noch zur Sanierung von Fachwerkbauten verwendet (*Schwimann*, S.144 /2/; *Volhard*, S.48 /25/).

Jauchen und Fäkalwässer können alkalisch sein. Das kann die Festigkeitseigenschaften von Lehm negativ beeinflussen.

In China wurde das sogenannte „Eierschalenporzellan“ aus Kaolinit, das in faulendem Urin (enthält Harnstoff und Ammoniumacetat) gemaukt wurde, hergestellt. Das Eierschalenporzellan ist für seine hohe Festigkeit bekannt. Die Biegefestigkeit kann dadurch auf das 10 – 20-fache erhöht werden (*Minke*, S.92 /1/; *Volhard*, S.49 /25/).

### **2.6.2.3 Kasein**

Kasein (=Käsestoff) ist ein Protein (=Eiweiß) und die wichtigste Eiweißart der Milch bei Wiederkäuern (/10/).

In den letzten Jahrzehnten des 19. Jahrhunderts entwickelten sich einige technische Verwendungsmöglichkeiten von Kasein; z.B.: für Anstriche, Malzwecke, Kitt- und Klebemittel (*Scherer*, S.1 /11/). Heute wird Kasein nur mehr selten verwendet, z.B. für Wandfarben.

*Schwimann* konnte bei seinen Versuchen mit Kaseinzusatz feststellen, dass sich die Verarbeitbarkeit, Abriebfestigkeit und Wasserfestigkeit verbessert. Bei längerer Wassereinwirkung verloren die Lehmproben aber trotzdem an Festigkeit (*Schwimann*, S.145 /2/).

Die Eiweißstoffe im Kasein füllen die Porenstruktur des Lehms. Dadurch wird wahrscheinlich die kapillare Wasseranziehung und das Quellverhalten der Tonteilchen behindert. Durch UV-Einwirkung werden die Proteinverbindungen aber langsam zerstört.

### **2.6.2.4 Molke**

Wenn man dem Lehm statt Wasser Molke zusetzt, lässt sich die Festigkeit und Plastizität erhöhen. Durch die in der Molke enthaltene Milchsäure (entsteht durch die Vergärung der Laktose der Milch) werden mit anderen Lehmbestandteilen Salze (Laktate) gebildet. Diese haben eine dichtende und verfestigende Wirkung auf die Lehmstruktur. Wettereinflüsse, vor allem die UV-Strahlung, können diese Funktion wieder zerstören (*Mandadjewa*, S.58 /27/).

### **2.6.2.5 Knochenleim**

Früher wurde Knochenleim oft als Anstrich- und Zusatzmittel genutzt. In Verbindung mit Alaun kann er wasserunlöslich gemacht werden.

Durch die schlechte Durchmischung von Lehm und Knochenleim entstehen beim Trocknen blättrige Strukturen, die sich negativ auf die Festigkeit auswirken (*Schwimann*, S.146 /2/).

### **2.6.2.6 Kuhmist**

Kuhmist ist eines der traditionellsten Lehmzusatzmittel. Er erhöht die Druckfestigkeit, Abriebfestigkeit und Wetterbeständigkeit des Lehms. Weiters wird durch die Zugabe von Kuhdung eine Schimmelbildung weitgehend verhindert.

Zum Schutz vor Erosion werden mancherorts die Außenwände mit einer Lehmschlämme mit Zusatz von Kalk und Kuhdung bestrichen (*Raith*, S.9 /23/).

*Volhard* beschreibt ein überliefertes Rezept eines Lehm-Dung-Häcksel-Putzes. Die im Dung enthaltene Magensäure und die feinen verdauten Pflanzenfasern machen den Lehmputz geschmeidig und reißfest (*Volhard*, S.128 /25/).

Bei *Schwimann* wird eine möglichst frische Verwendung des Kuhmistes empfohlen, da sonst Gärprozesse stattfinden. Auch Kuhdung aus Maisfütterung eignet sich nicht (*Schwimann*, S.144 /2/).

*Minke* beschreibt traditionelle indische Zumischungen von Kuhmist, bei denen Ruhezeiten eingehalten werden müssen um einen Fermentationsprozess einzuleiten. Bei Versuchen mit unterschiedlichen Lehmen und Kuhmistzugaben konnte eine Erhöhung der Wasserfestigkeit bei Lehmputzen festgestellt werden (*Minke*, S.80 /1/).

Die unterschiedlichen Sichtweisen bezüglich Gärprozess bei *Minke* und *Schwimann* könnten auf die verschiedenen verwendeten Lehme zurückzuführen sein.

Bis jetzt wurden die Gründe für die stabilisierende Wirkung kaum erforscht oder dokumentiert. Vermutlich wirken die im Kuhmist enthaltenen Kaseine, Ammoniakverbindungen und Zellulose verfestigend.

### **2.6.2.7 Weitere Eiweißstoffe**

Auch zahlreiche andere Eiweißstoffhaltige Produkte wie z.B. Gelatine, Kleister, Magermilch, Buttermilch wurden als Zusatzstoffe eingesetzt.

Beispielsweise wurde in Japan Gelatine aus Seetang zugesetzt. Diese Lehmputze werden sehr dicht, hart und glänzend. Durch aufpolieren erhält man einen Stucco-Lustro ähnlichen Putz.

Für Lehmsteine, Lehmputz und die ersten Flachdächer in Deutschland wurde Kleister aus Weizeneiweiß (Gluten) zugesetzt.

Bei allen Eiweißstoffzusätzen ist zu bemerken, dass sie durch UV-Strahlung aus dem Sonnenlicht zerstört werden und der Feuchtigkeitsschutz oberflächlich nachlässt (*Schwimann*, S.146 /2/).

### 2.6.2.8 Wachse

Wachs wurde dem Lehmputz zugesetzt, um ihn wasserabweisender zu machen. Das Untermischen von Wachs ist sehr schwierig, deshalb wurde es mit kolloiden Lösungsmitteln behandelt. Häufig wasserbeanspruchte Lehmoberflächen (wie zum Beispiel in Bauernküchen) wurden mit heißem Wachs behandelt.

Vermutlich füllt das Wachs die kapillaren Poren im Lehm, geht aber keine Verbindung mit ihm ein (*Schwimann*, S.151 /2/).

## 2.6.3 Pflanzliche Zusätze

### 2.6.3.1 Pflanzenöle

In Europa wird zumeist heimisches Öl wie z.B. Leinsamen-, Raps-, Sonnenblumen-, und Sojaöl als Zusatzmittel verwendet. Auf den anderen Kontinenten werden lokal vorhandene Öle eingesetzt.

Durch die Zumischung von Pflanzenöl lässt sich die Abschleimbarkeit und die Durchfeuchtungsgeschwindigkeit verringern.

Vermutlich bauen sich die Ölmoleküle in die Lehmstruktur ein, wodurch die Wasseraufnahme des Tons behindert wird. Öle „trocknen“ mit der Zeit aus. Dieser Trocknungseffekt ist eine nicht wieder umzukehrende Oxidation und Verkettung zu größeren Molekülen. Bei Wasserzutritt quellen die Öle und dichten so die Lehmstruktur ab. Die einzelnen Pflanzenöle unterscheiden sich in ihrer Trocknungszeit. Die besten Ergebnisse wurden mit mittel- bis langtrocknenden Ölen erzielt (*Keppler/Lemcke*, S.41 /12/).

Leinöl ist ein trocknendes Öl. Durch Zusatz von Trocknungstoffen erhält man Leinölfirnis. Leinöl und Leinölfirnis werden seit Jahrhunderten zur Holzkonservierung und zur Imprägnierung von Mauerwerk und Putz verwendet. Leinöl hat den Vorteil wasserabweisend zu wirken und trotzdem wasserdampfdurchlässig zu sein (/13/14/).

Bei Versuchen mit Leinölfirnis konnte eine Erhöhung des Wetterschutzes von Lehmoberflächen festgestellt werden. Nachteilig erwies sich allerdings eine reduzierte Wasserdampfdiffusion (*Minke*, S.81 /1/).

Als Lehmzusatzstoff konnte Leinöl die Härte und Abriebfestigkeit erhöhen. Optimale Werte erzielte *Schwimann* bei einer Zugabe von 5 – 7 % Leinölfirnis. Diese Mischung eignet sich besonders gut für Estriche und Stampflehmfußböden. Dabei sollte der Tonanteil im Lehm nicht über 10 % liegen (*Schwimann*, S.148 /2/).

### **2.6.3.2 Stärke**

Stärke ist ein von Pflanzen bei der Photosynthese über Glucose gebildetes Polysaccharid  $(C_6H_{10}O_5)_n$ . Sie besteht aus zwei Komponenten: Amylose und Amyloheptin. Stärke findet breite Anwendung in der Nahrungsmittelindustrie, aber auch in technischen Bereichen wie bei der Papierherstellung, Textilausrüstung, in Gießereien, bei der Herstellung von Klebstoffen, als Füllstoffe für partiell abbaubare Kunststoffe, als Bindemittel für Dämmstoffe und Granulate. Unbehandelte Stärke eignet sich meist nicht zur Weiterverarbeitung. Deshalb werden durch thermische oder chemische Prozesse die Stärkemoleküle je nach Anforderung verändert (/18/).

Bei NAWARO (Internetplattform GrAT – Gruppe Angepasste Technologien) und *Minke* wird gekochter Stärke eine die Erosion reduzierende Wirkung zugeschrieben (*Minke*, S.81 /1/16/). Beim Lehmbau in China und Japan wurde zum Teil Reispaste als Zusatz verwendet. Damit konnten mit Lehmputz reliefartige Konstruktionen gestaltet werden. Die Japaner ließen ihre Putzmassen mauken. Grund dafür ist wahrscheinlich die dabei entstehenden Milchsäure (beim Vergären von Stärke entsteht Milchsäure).

*Schwimann* führte Versuche mit Kartoffelmehl durch. Dadurch ließ sich Plastizität und Klebkraft verbessern. Bei Versuchen mit Lehmputz mit einem Zusatz von 5 - 10 % Stärke wurde eine dichte glänzende Oberfläche erzielt (*Schwimann*, S.147 /2/).

### **2.6.3.3 Melasse**

Melasse ist ein honigartiger dunkelbrauner Zuckersirup, der als Nebenerzeugnis in der Zuckerproduktion anfällt (/15/). Melasse besteht zu etwa 50 % aus Zucker, 20 % Wasser und aus organischen und anorganischen Stoffen, besonders Stickstoffverbindungen und Kaliumsalzen (/17/).

In manchen Berichten wird beschrieben, dass ein Zusatz von Melasse die Erosion reduziert. Durch eine geringe Kalkzugabe kann diese Wirkung noch verbessert werden (*Minke*, S.81 /1/16/).

### **2.6.3.4 Pflanzensäfte**

In manchen Ländern werden öl- und latexhaltige Pflanzensäfte z.B.: von Sisalagaven, Bananen und dem Wolfsmilchgewächs *Euphorbia herea* als Anstrichmittel zur Erhöhung der Wetterfestigkeit verwendet. Meist geschieht dies in Verbindung mit Kalkzugabe (*Minke*, S.81 /1/).

Kautschuk wird in seinen Heimatländern dem Putzmörtel zugesetzt und als Anstrichmittel eingesetzt um die Oberflächen vor Erosions- und Wassereinflüssen zu schützen.

Beispiele aus Ghana:

In Ghana werden die getrockneten Fruchtschoten des Heuschreckenbohnen Baums (Locust bean tree) in Wasser gekocht. Es entsteht eine rote, vermutlich stärkehaltige Flüssigkeit, sono - water. Diese wird auf den fertigen Lehmputz und auf das Lehmdach gesprenkelt, um die Wasserfestigkeit und die Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Einflüsse zu erhöhen. Der Putz erhält dadurch eine dunkle, ölig glänzende Oberfläche.

Mit den Fruchtsamen dieses Baumes werden in Ghana Gewürzbällchen (dowa-dowa-balls) hergestellt. Dabei wird der Samen zuerst in Wasser eingeweicht und dann wieder abgeschöpft. Die zurückbleibende Flüssigkeit (zähe, klebrige Konsistenz) wird mit Lehm vermischt und verleiht so dem Lehmputz mehr Bindekraft.

Ein weiteres Beispiel aus Ghana zur Verbesserung der Oberflächenresistenz ist ein ölhältiges Nussgranulat-Wassergemisch, ein Abfallprodukt, das bei der Sheanuss-Butter Herstellung anfällt. Es wird entweder auf die Oberfläche aufgetragen oder dem Lehmputz zugemischt (/16/, *Kunze*, S.108, 111 /33/).

### **2.6.3.5 Harze**

In manchen Regionen festigt man die Mauern mit einem pflanzlichen Harzgemisch (*Raith*, S.9 /23/).

Naturharze sind pflanzlichen oder tierischen Ursprungs (z. B. Schellack) (/19/).

Baumharz, gelöst mit heißem Öl, wird dem Lehm zugesetzt um seine Wasserbeständigkeit zu erhöhen und härtere Oberflächen zu erhalten. In der Literatur finden sich Angaben zu dem Naturharz „Vinsol“. Dieses zeigt bei knapp 1 %iger Zumischung den größten Stabilisierungseffekt. Es wird vermutet, dass sich ein Harzfilm von molekularer Dicke auf die Luft – Wasser – Grenzflächen im Lehm legt (*Keppler/Lemcke*, S.42 /12/).

Schellack (Produkt der indischen Lackschildläuse) kann mit Wasser und Borax (Alkalisalz) wasserlöslich gemacht werden. Man erhält dadurch ein geruchloses, umweltfreundliches Bindemittel, das wasserunlöslich trocknet (*Schillberg/Knieriemen*, S.132 /30/).

Mit Schellack, gelöst in Spiritus, können Anstriche auf den Lehm aufgebracht werden. Anstiche aus Schellack, gelöst in Spiritus erhöhen die Oberflächenfestigkeit und Wasserfestigkeit (*Schwimann*, S.150 /2/).

## 2.6.4 Weitere Zusätze

### 2.6.4.1 Bitumen

Natürlicher Asphalt wurde bereits im 5. Jahrhundert vor Christus von den Babyloniern bei der Lehmsteinherstellung verwendet. Die Asphaltbeigabe bewirkte eine Erhöhung der Wasserfestigkeit. In den letzten Jahren finanzierte die Erdölindustrie einige Forschungsprojekte zur Bitumenbeigabe bei Lehmbaustoffen. Diese Untersuchungen ließen aber oft die Vielfalt der Lehme außer Acht (*Wichmann*, S.24 /24/).

In manchen Gegenden war natürliches Bitumen (Kohleteer) vorhanden. Damit wurden streichbare Emulsionen bestehend aus Kohleteer, pulverisierter Kreide, Sand und kochendem Wasser hergestellt und zum Schutz vor Regen- und Winderosion auf Lehmwänden aufgetragen (*Raith*, S.9 /23/).

In Ghana wird folgendermaßen vorgegangen: Das Bitumen wird erhitzt bis es flüssig ist. Dann wird der Lehm rasch zugemischt und mit den Füßen kräftig getreten. Nach dieser Bearbeitung wird heißes Wasser dazugemischt, um eine weiche gut zu verarbeitende Masse zu erhalten. Diese Masse wird dann schnell auf Wände und auch auf Außenböden verteilt. (rechtzeitig bevor die Bitumen-Wasser-Lehmmasse wieder hart wird). Solchermaßen behandelte Oberflächen sollen das Eindringen von Wasser weitgehend verhindern (*Kunze*, S.109 /33/).

Problematisch ist die Durchmischung von Bitumen und Lehm. Es ist notwendig das Bitumen chemisch zu brechen und in Wasser zu suspendieren. Diese Bitumen-Emulsionen bewirken bei manchen Lehmen ein festeres Verkleben der einzelnen Teilchen, bei bestimmten Tonarten kann es aber auch zu einer Verminderung der Druckfestigkeit kommen. Durch Hitzeeinwirkung, UV-Einfluss, Oxidation und Vergasung von Bestandteilen kommt es zu chemischen Änderungen im Gefüge. Das kann zu einer Schwächung des Baustoffes führen. Ähnlich wie Bitumen wirken auch Paraffin, Cracköl, Petroleum, Holzteer, Pech, Asphaltöl und Mineralaltöl. Diese Produkte (ausgenommen Paraffin) sind aber aufgrund ihrer Geruchsbelästigung, ihrer gesundheitlich bedenklichen Wirkung und dem Einfluss auf die Umwelt nicht ohne weiteres als Zusatzmittel für den Baustoff Lehm zu empfehlen.

### 2.6.4.2 Asche

Schon seit Jahrhunderten wird Holzasche als Verfestigungsmittel verwendet. Besonders die feine weiße Asche von vollständig verbranntem Hartholz hat gute Ergebnisse gezeigt (*Wichmann*, S.25 /24/).

Die Zumischung von Holzasche bewirkt einen Ionenaustausch der sich plastifizierend auf die Konsistenz auswirkt. Es bilden sich beinahe wasserunlösliche Kalkstein- und Gipsverbindungen. Das hat eine verklebende und stützende Wirkung auf die Lehmstruktur.

Versuche mit Lehmputzmörtel mit Zusatz von Asche (0,1 %; 0,5 % und 1 %) wiesen eine härtere Oberfläche als der Vergleichsputz auf. Wobei die anteilmäßig unterschiedlichen Aschezumischungen kaum Unterschiede aufwiesen (*Schwimann*, S.154 /2/).

In Ghana wird für den Lehminnenputz oft Asche als Zusatz verwendet, teilweise auch in Kombination mit Kuhdung (*Kunze*, S.107 /33/).

*Öhlinger* stellte bei ihren Versuchen mit Zusätzen von 1 %, 2 %, 5 %, 10 %, 20 % Asche eine Steigerung der Festigkeit bei 1 % und 2 % Zusatz fest. Bei einer Zumischung von 5 % und mehr Asche vielen die Festigkeitswerte wieder ab (*Öhlinger*, S.49 /34/).

#### **2.6.4.3 Seife**

Bekannt ist der Zusatz von Seife bei Tadelaktputzen. Das ist ein antiker marokkanischer Kalkputz der hauptsächlich für Saunen und Hammams verwendet wurde. In richtig verarbeiteter Form ist dieser Putz wasserfest, beinahe wasserdicht und hat eine glänzende Oberfläche (/28/29/; *Raith*, S.24 /23/).

Wird dem Lehm Seife zugesetzt (im Anmachwasser aufgelöst), verbessert sich die Formbarkeit und die Dichtigkeit wird erhöht, infolge auch die Festigkeit (*Wichmann*, S.25 /23/).

Früher kamen seifenartige Mittel (Verbindungen einer Fettsäure mit Natrium, Kalium, Kalzium, Zink, Aluminium, usw.) als Mörteldichtungsmittel zum Einsatz. Diese reduzierten aber teilweise die Festigkeit. Speziell gewöhnliche Schmierseife (Kaliseife) reduziert die Festigkeit erheblich (*Niemeyer*, S.94 /6/).

#### **2.6.4.4 Synthetische Zusätze**

Eine ähnliche Wirkung wie mineralische Zusätze haben Kunstharze, synthetische Wachse, Paraffine und synthetischer Latex. Diese Stoffe sind meist teuer und haben den Nachteil, dass sie durch UV – Licht zerstört werden und die Wasserdampfdurchlässigkeit reduzieren.

Silane, Silicone, Siloxane, Acrylate, Kieselsäureester können als Hydrophobierungsmittel (Imprägnierung einer Oberfläche mit einer farblosen Flüssigkeit) eingesetzt werden. Mit einem Zusatz von 1 – 4 % konnten die besten Ergebnisse erzielt werden (*Minke*, S.82 /1/).

Silane, Siloxane und Siliconharze reduzieren die Wasseraufnahme um mehr als 90 % und die Wasserdampfdurchlässigkeit um 5 – 8 %. Durch die Beimischung entsteht eine

chemische Reaktion mit den mineralischen Baustoffen und macht den Lehm sehr witterungsbeständig.

Acrylharze und Kieselsäureester reduzieren die Wasseraufnahme um mehr als 90 % und die Wasserdampfdurchlässigkeit um 15 – 30 % (*Minke*, S.203 /1/).

### 2.6.5 Zusammenfassung

Bei den Literaturrecherchen war erkennbar, dass die einzelnen Autoren zum Teil unterschiedliche Erfahrungen machten und auch unterschiedliche Ergebnisse erzielten. Das ist zum Teil auf die verschiedenen verwendeten Lehme zurückzuführen. Ein weiterer Grund könnten die unterschiedlichen Versuchsbedingungen sein (Probekörperherstellung, Form, Lagerung, Prüfgerät, etc.). Im Allgemeinen sind die Versuche und die dabei erzielten Ergebnisse oft schlecht dokumentiert und daher kaum nachvollziehbar. Da kein Lehmvorkommen dem anderen gleicht, sind in jedem Fall Versuche mit dem gewünschten Zusatzstoff durchzuführen.

Die Aufzählung der Zusatzmittel erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Es finden sich auch noch weitere Zusatzmittel in der Literatur auf die hier nicht näher eingegangen wurde.

## 3 Versuchsanordnung

Aufgrund einer vorangegangenen Diplomarbeit zum Thema Zusatzstoffe zur Lehmverbesserung und zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurde die gleiche Probekörperform, Art der Herstellung und Lagerungsbedingungen gewählt wie in den anderen Arbeiten des Institutes für Hochbau und Technologie (vgl.: Materialeigenschaften Diplomarbeit *Martin Trojan /56/*).

### 3.1 Probekörper

In Anlehnung an die ÖNORM B 3303 (/4/) wurden für die Biegezug- und Druckversuche prismatische Versuchskörper angefertigt. Maße: Länge: 16 cm, Breite: 4 cm, Höhe: 4 cm

Pro Versuchsreihe wurden 12 Probekörper angefertigt. Die Probekörper wurden in einem Klimaschrank unter raumklimatischen Bedingungen (20°C und 50% Luftfeuchtigkeit) getrocknet. Anschließend wurden 6 Probekörper unter feuchten klimatischen Bedingungen (30°C und 80% Luftfeuchtigkeit) im Klimaschrank gelagert. Versuchsweise wurden bei ein paar Serien (Grundmaterial, Wasserglas 5%, Zement 5%, Harnstoff 10% + Ammoniak 1%) zusätzlich 6 Probekörper an der Raumluft (ca. 21°C und ca. 30% Luftfeuchtigkeit) getrocknet. Bei den erhaltenen Druck- und Biegezugwerten konnten aber keine signifikanten Unterschiede zu einer Lagerung im Klimaschrank (raumklimatische Bedingungen) festgestellt werden. Infolgedessen wurden die weiteren Versuchsserien zuerst an der Raumluft getrocknet und dann vor den Versuchen an der Prüfmaschine im Klimaschrank gelagert. Die Prüfung der Probekörper erfolgte mit einer Universalprüfmaschine der Firma *Zwick* im Labor des Instituts für Hochbau und Technologie, Abteilung Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz.

#### 3.1.1 Herstellung

Der Lehm (raumtrockene körnige Konsistenz) wurde mit Wasser und den dementsprechenden Zusätzen (die Zugabe erfolgt in Massenprozent) mittels eines Rührstabs (Abbildung 3.1) gemischt bis die Normsteife lt. DIN 18 952 (/5/) erreicht war. Zur

Ermittlung der Normsteife werden 200g vom Prüfmaterial abgewogen, durch mehrmaliges Aufschlagen verdichtet und mit den Händen zu einer Kugel ( $d \sim 55\text{mm}$ ) geformt. Die Kugel lässt man aus 2m Höhe auf eine glatte, nicht saugende Fläche fallen. Misst die entstehende Abplattung genau 50mm, dann ist die Normsteife erreicht.



Abbildung 3.1 Rührstab

Die Lehmmasse wurde in Formen aus Stahl in 3 Lagen eingefüllt, wobei jede Lage eingestampft wurde. In Abbildung 3.2 sind die verwendeten Geräte zu sehen. Die Abmessungen der Lehmprismen betragen zum Zeitpunkt des Ausschalens 40 x 40 x 160 mm.



Abbildung 3.2 Spachtel, Stahlform, Stampfer

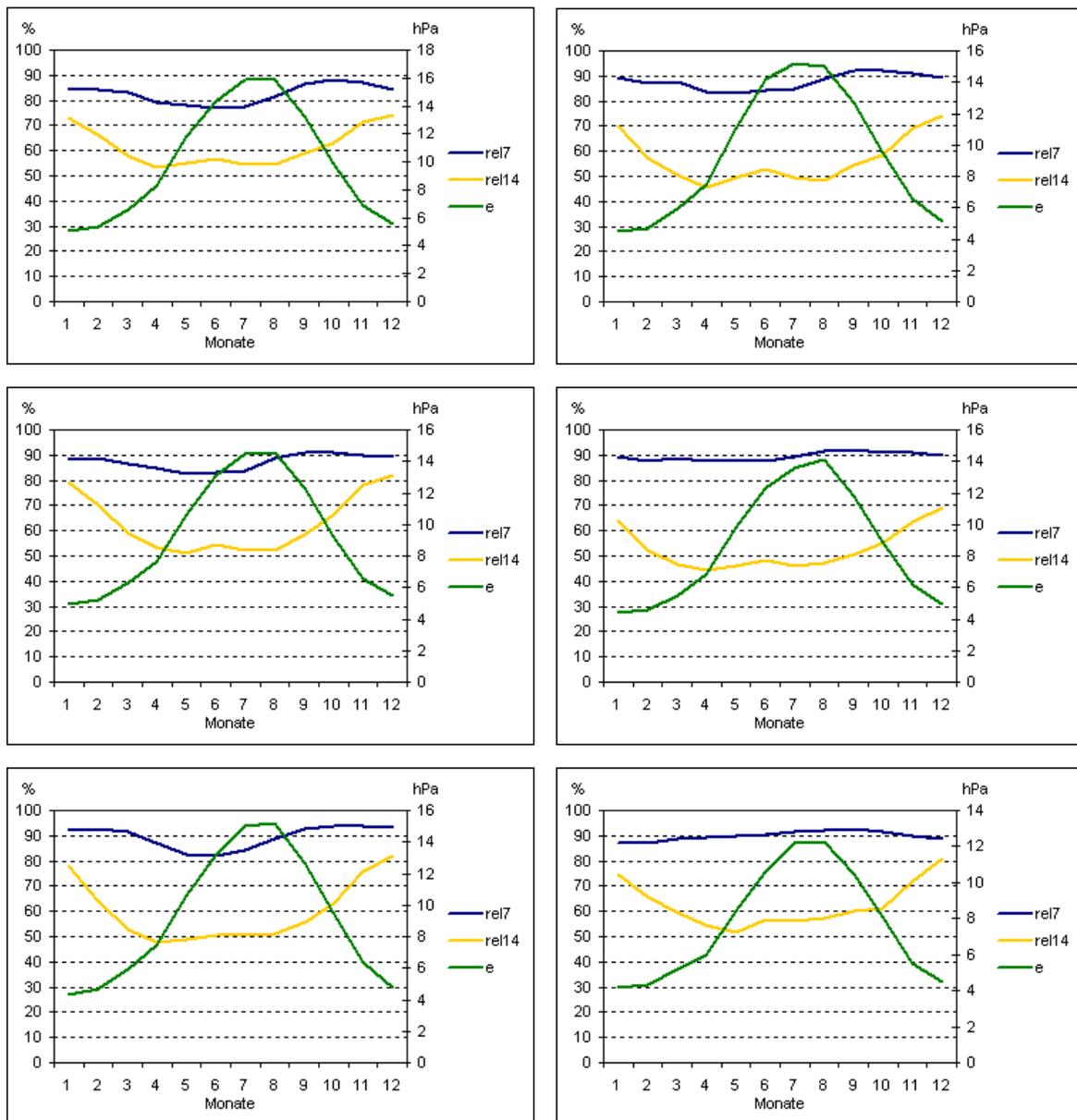
### 3.1.2 Trocknung und Lagerung

Anschließend wurden die feuchten Probekörper ausgeschalt und in einen Klimaschrank (Abbildung 3.4) oder an die Raumluft zum Trocknen gelegt. Die Trockenbedingungen im Klimaschrank sollten in etwa Raumklima entsprechen. Gewählt wurde eine Temperatur von 20°C und eine Luftfeuchtigkeit von 50 %. Die gemessenen Durchschnittswerte der Raumluft im Labor betragen 21°C und 32 % Luftfeuchtigkeit. Eine Mindesttrockenzeit von 3 Tagen wurde eingehalten. Anschließend wurden jeweils 6 Probekörper (die Hälfte) einer Serie für 3 Tage unter feuchten Bedingungen im Klimaschrank (Abbildung 3.4) gelagert.

Folgende Überlegungen flossen in die Wahl des feuchten Klimats ein:

Im Vergleich verschiedener Luftfeuchtigkeitsgrafiken aus Österreich fällt ein ähnlicher Verlauf auf. In Abbildung 3.3 stellen die blauen Linien die Mittelwerte der relativen Luftfeuchtigkeit aller 7 Uhr Termine und die gelben Linien die Mittel der relativen Luftfeuchtigkeit aller 14 Uhr Termine aus den Jahren 1971 – 2000 dar. Die 14 Uhr Werte schwanken im Bereich von etwa 45 – 70 % und die 7 Uhr Werte im Bereich von ca. 80 – 90 %. Es kann davon ausgegangen werden, dass die gewählten Bedingungen, drei Tage durchgehend

andauernde Luftfeuchtigkeit von 80 % einen Extremwert darstellt. Die Lagerung der Lehmsteine auf der Baustelle muss in jedem Fall vor Regen und Bauwässern geschützt erfolgen, entweder durch eine Überdachung, Plastikfolie oder ähnlichem. Für die Versuchsserien wurde ein feuchtes Klima mit 80 % Luftfeuchtigkeit und einer Temperatur von 30°C gewählt.



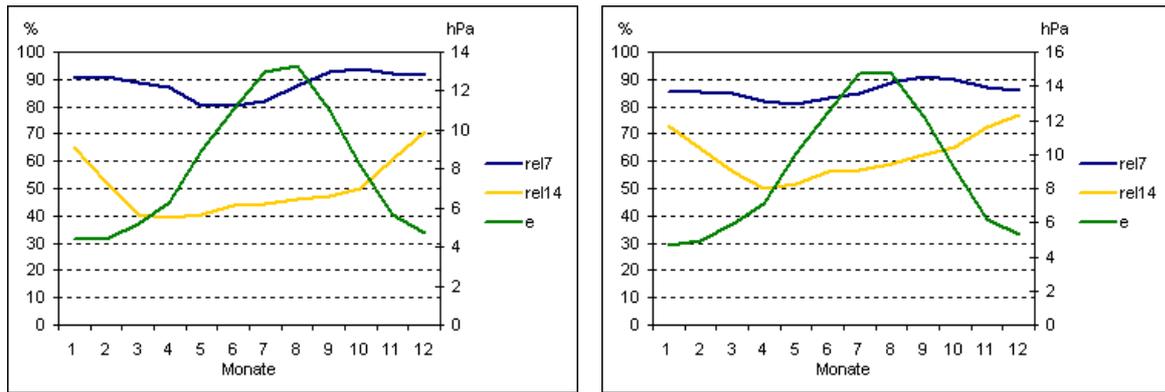


Abbildung 3.3 Luftfeuchtigkeitsdaten von Österreich (Durchschnitt aus 1971 - 2000) an den Beispielen von: Baden/NÖ, Kleinzicken/Bgld, Gallspach/OÖ, Bruck/Mur/Stmk, Klagenfurt/K, Saalbach/S, Haiming/T, Vandans/V (von links oben nach rechts unten) (/57/)



Abbildung 3.4 Klimaschrank

Nach der Lagerung im Klimaschrank wurden die Probekörper abgewogen und abgemessen.

### 3.1.3 Schwind- und Feuchtemessungen

Für die Feststellung des Schwindmaßes wurden die trocken gelagerten Probekörper solange abgemessen, bis die Änderung weniger als 0,5 % betrug. Bei den feucht gelagerten Probekörpern erfolgte die Messung unmittelbar nach der Entnahme aus der Klimakammer (3 Tage gelagert bei 30°C und 80 % Luftfeuchtigkeit).

Um Aufschluss über den Feuchtigkeitsgehalt der Probekörper zu erhalten, wurden diese nach erfolgter Festigkeitsprüfung (Probekörperteilstück) in einem Trockenofen bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet (= Darrtrocknung). Aus der Differenz Gewicht des Probekörperstücks nach der Festigkeitsprüfung (und der jeweiligen vorgelagerten klimatischen Lagerung) und des Gewichts nach der Darrtrocknung wurde der Feuchtegehalt ermittelt.

## 3.2 Prüfung

### 3.2.1 Prüfmaschine

Die Versuche wurden mit einer Stand-/Universalprüfmaschine der Firma *Zwick* durchgeführt.(Abbildung 3.5).



Abbildung 3.5 Stand-/Universalprüfmaschine

### 3.2.2 Biegezugversuch

Die Biegezugfestigkeit wurde an Prismen im Dreipunktversuch ermittelt. Abbildung 3.6 zeigt die Versuchsanordnung. Die Kraftübertragung erfolgt über die 3 Rollenlager auf den

Probekörper. Zwei Rollenlager sind um eine zweite Achse – 90° zur Rolle – beweglich gelagert.

Die Maschine fährt die Konsole automatisch herunter bis der Probekörper mit einer geringen Vorlast belastet ist. Diese Kraft geht nicht in die Bruchkraft ein, das bedeutet dass der Nullpunkt im Kraft-Wegdiagramm die Kraftachse bei 30 N schneidet. Darauf folgt die Steigerung der Belastung bis zum Bruch.

Die Maschine misst die Bruchkraft. Mit den eingegebenen Querschnittsabmessungen wird die Biegezugfestigkeit nach folgender Formel berechnet:

$$\sigma_z = \frac{F_{Bruch}}{W_y} = \frac{F_{Bruch}}{\frac{b \cdot h^2}{6}} .$$

$W_y$  .... Widerstandsmoment um die y-Achse

b.... Breite des Querschnitts in y-Richtung

h.... Höhe des Querschnitts in z - Richtung.

$F_{Bruch}$  Bruchkraft

$\sigma_z$ . Biegezugfestigkeit

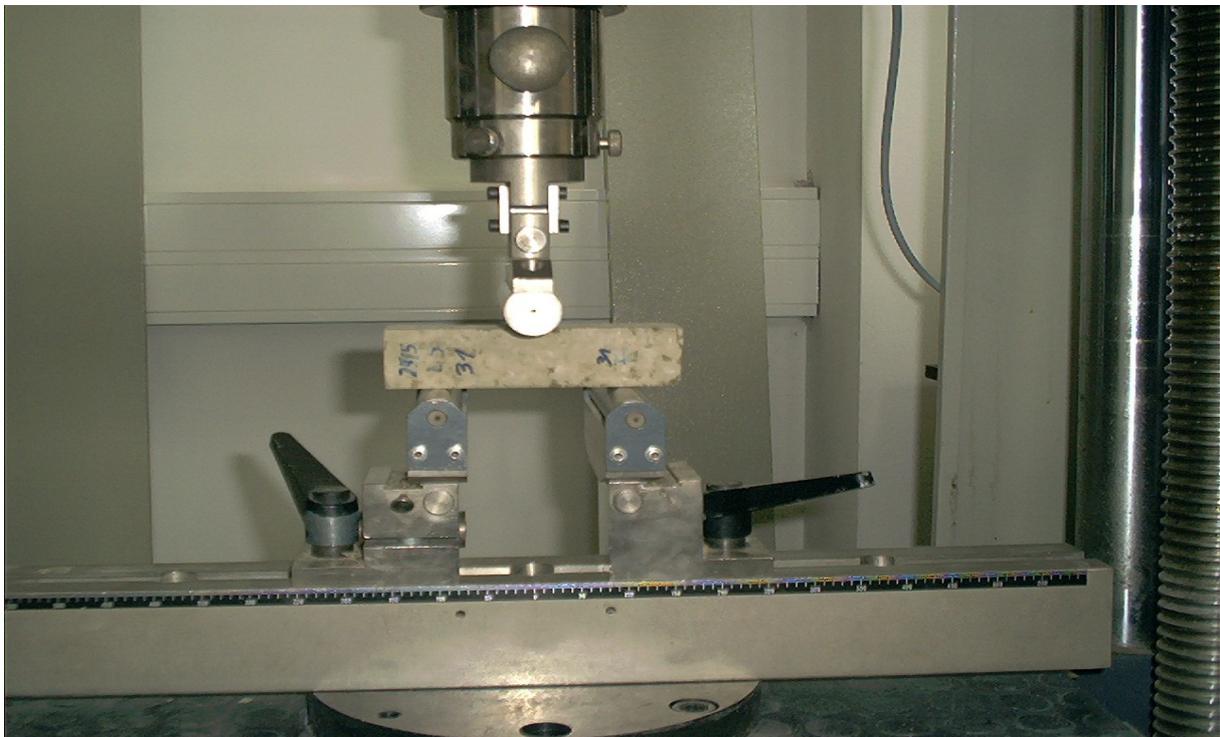


Abbildung 3.6 Prüfmaschine mit Probekörper - Anordnung für Feststellung der Biegezugfestigkeit

In Abbildung 3.7 ist ein Bild eines erfolgten Biegezugversuchs dargestellt.



Abbildung 3.7 Bruchbild nach Biegezugversuch

### 3.2.3 Druckversuch

Anschließend an den Biegezugversuch wurde an den zwei Prismenreststücken aus dem Biegezugversuch die Druckfestigkeit bestimmt. In Abbildung 3.8 ist die Anordnung für den Druckfestigkeitsversuch dargestellt.

Die Kraftübertragung erfolgt über Metallklötze mit 62,5 mm Länge und 40 mm Breite. (Bei kleineren Reststücken wurde die Längenabmessung im Rechenprogramm entsprechend adaptiert.) Der untere Klotz ist starr mit der Unterlage verbunden, der obere ist über ein Kugelgelenk mit der beweglichen Konsole verbunden.

In Abbildung 3.9 ist ein Probekörper nach erfolgter Druckbelastung zu sehen. Dabei entsteht im Regelfall ein typischer Bruchkegel.

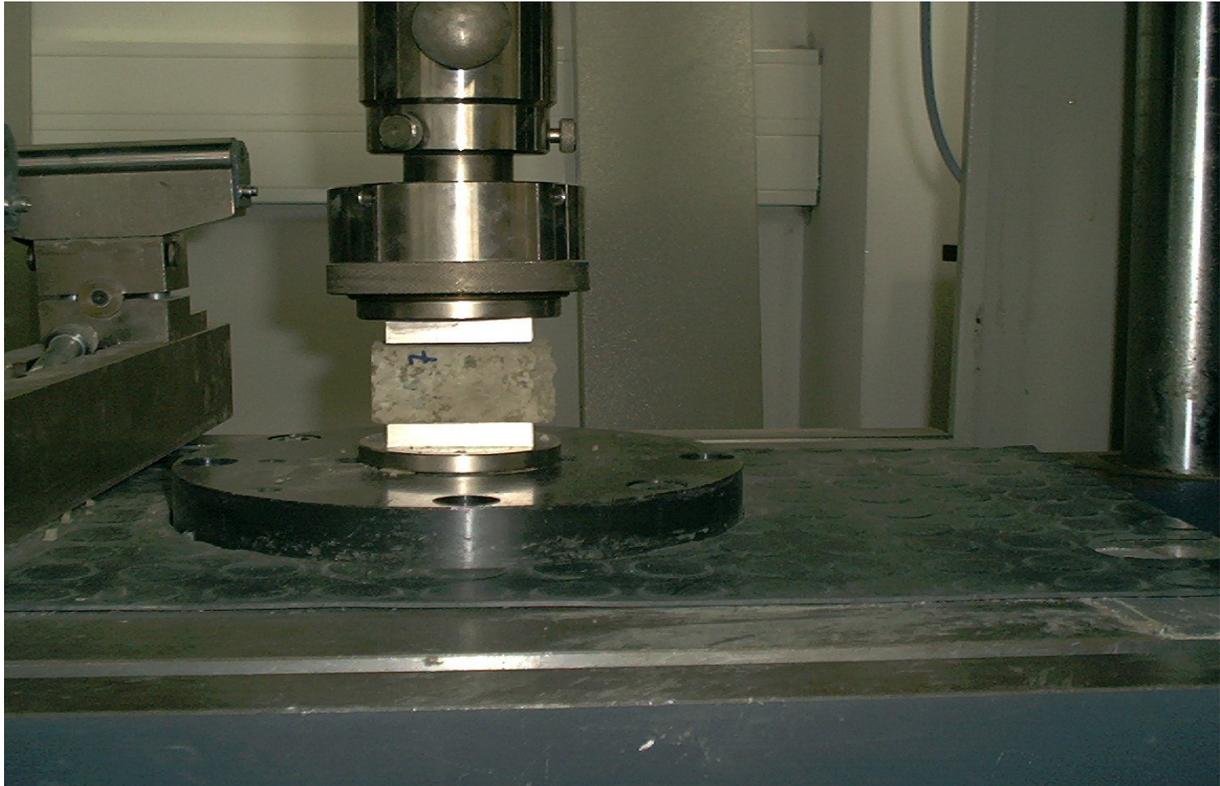


Abbildung 3.8 Prüfmaschine mit Probekörper - Anordnung für Feststellung der Druckfestigkeit



Abbildung 3.9 Bruchbild nach Druckversuch

### 3.3 Auswertung

Messungen sind fehlerbehaftet. Um dies in der Auswertung zu berücksichtigen ist ein Fehlerintervall angegeben. Hier wurde ein 5 % Konfidenzintervall berechnet.

Die Werte in den Diagrammen sind die Mittelwerte  $x$  der jeweiligen Versuchsserie. Das Fehlerintervall ergibt sich aus dem berechneten Konfidenzwert  $k$  zu:

$$\Delta = [k - x; k + x].$$

### 3.4 Verwendete Materialien

#### 3.4.1 Lehm

Von der Firma *Wienerberger* wurde für die Versuche Lehmmaterial aus der Lehmgrube in Göllersdorf zur Verfügung gestellt. Es gibt dort zwei Lehmvorkommen. Hier wurde mit dem „blauen“ Lehm gearbeitet. Nähere Angaben über die mineralische Zusammensetzung des Lehmes wurden von der Fa. *Wienerberger* leider nicht zur Verfügung gestellt.

Für eine bessere Verarbeitbarkeit wurde der Lehm in Hengersdorf im Labor der Firma *Wienerberger* gemahlen. In Abbildung 3.10 ist ein Foto des verwendeten Materials abgebildet.



Abbildung 3.10 Lehm gemahlen aus Göllersdorf

### 3.4.2 Gewählte Zusatzstoffe

Für die Auswahl der gewählten Zusätze flossen folgende Überlegungen mit ein:

- Ausreichende Verfügbarkeit
- Gleichbleibende Qualität
- Evtl. ein Abfallprodukt
- Kostengünstig – der Preis des Endproduktes darf nur geringfügig steigen
- Möglichst geringer Mengenzusatz
- Andere Eigenschaften des Lehms nicht verschlechtern
- Lt. Literatur günstiger Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften

Folgende Zusatzstoffe wurden untersucht:

#### **Kasein:**

Lieferant: W. Neuber's Enkel OHG Groß – Drogerie, Linke Wienzeile 152, 1060 Wien

**Leinölfirnis:**

Lieferant: : W. Neuber's Enkel OHG Groß – Drogerie, Linke Wienzeile 152, 1060 Wien

**Harnstoff:**

Lieferant: : W. Neuber's Enkel OHG Groß – Drogerie, Linke Wienzeile 152, 1060 Wien

**Ammoniak:**

Ammoniaklösung 24 %

Lieferant: : W. Neuber's Enkel OHG Groß – Drogerie, Linke Wienzeile 152, 1060 Wien

**Natrium - Wasserglas:**

Lieferant: : W. Neuber's Enkel OHG Groß – Drogerie, Linke Wienzeile 152, 1060 Wien

**Kalk:**

Spezikalk

Lieferant: Baumit / Wopfinger

**Zement:**

Der Rote CEM II/B-M (S-L) 32,5 R

Lieferant: Perlmöser / Lafarge

**Asche:**

Biomasseasche aus reinem Hackgut ohne Rinde. Zusammensetzung siehe Abbildung 3.11.

Lieferant: Firma Renet / EVN, 2700 Wr. Neustadt



## 4 Vorversuche

In der Diplomarbeit von *Martin Trojan* (/55/) wurden bereits folgende Zusatzstoffe untersucht: Stroh, Asche, Wasserglas und Tennissand (=Ziegelmehl). Wobei das Ziel eine Erhöhung der Festigkeit im trockenen Zustand war.

Nach der durchgeführten Literaturrecherche wurden folgende Zusatzmittel ausgewählt: Kasein, Wasserglas, Harnstoff mit Ammoniak, Leinölfirnis, Asche, Kalk und Zement (Beschreibung siehe 3.4.2). Den Zusatzstoffen wurde eine positive Wirkung auf die Festigkeitseigenschaften des Lehms zugewiesen.

Die Beschreibung der Versuche erfolgt folgendermaßen:

- Beschreibung und Erwartungen aus der Literatur
- Angaben zur Vorgangsweise bei der Mischung
- Erhaltene Ergebnisse, inklusive eines Vergleichs zum Grundmaterial anhand von Tabellen und Grafiken (Das Schwindmaß wird in Prozent des Volumens angegeben:  $\epsilon = \Delta v / V.$ )
- Auffälligkeiten beim Mischen, nach der Lagerung und bei der Versuchsdurchführung an der Maschine

Die Vorversuche wurden gemeinsam mit *Ingo Kozek* durchgeführt. Die Ergebnisse sind auch in seiner Diplomarbeit (/56/) dargestellt.

Anmerkung: Für das Ausgangsmaterial (ohne Zusatz) wird im folgenden der Begriff „Grundmaterial“ verwendet. Beim Vergleich des Grundmaterials mit den jeweiligen beigemengten Zusatzstoffen wird für eine bessere Übersichtlichkeit nur der Name des Zusatzes genannt und nicht „Grundmaterial plus Zusatzstoff“.

### 4.1 Normversuche bezüglich Festigkeit

Für den Vergleich der Festigkeitseigenschaften und des Schwindverhaltens des Lehmgrundmaterials mit den beigemengten Zusatzstoffen wurden zuerst Probekörper ohne Zusatzstoff hergestellt. Die Herstell-, Lager-, Prüfbedingungen, usw. sind in Kapitel 3 beschrieben.

In der Abbildung 4.1 ist eine Skizze zur Prüfkörperform und den Bezeichnungen angegeben.

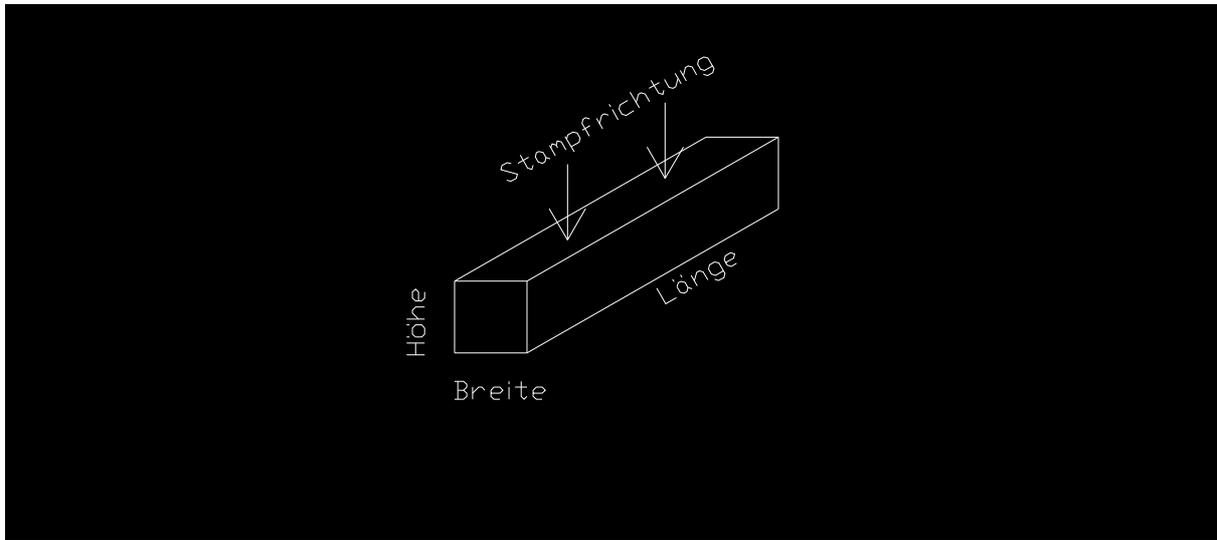


Abbildung 4.1 Prüfkörperform

In den folgenden Grafiken sind die Veränderungen von Querschnittsabmessungen und des Gewichts der Probekörper aufgrund der Lagerung dargestellt (Abbildung 4.4, Abbildung 4.5, Abbildung 4.6, Abbildung 4.7, Abbildung 4.8, Abbildung 4.2).

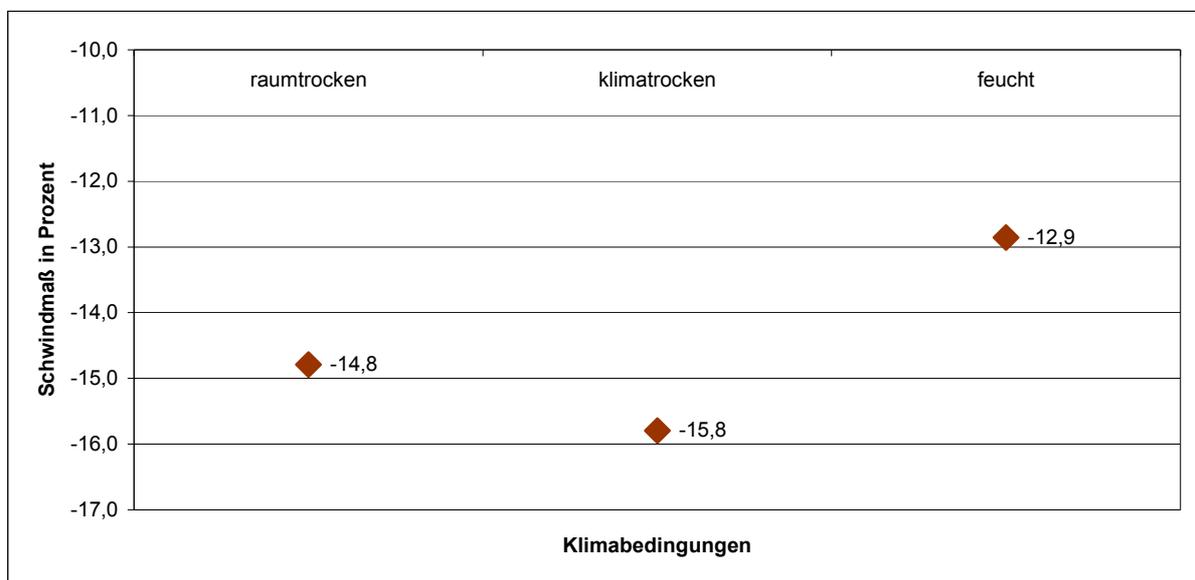


Abbildung 4.2 Grundmaterial - Schwindmaß in Prozent (Lagerbedingungen und Zeitpunkt siehe Kapitel 3.1)

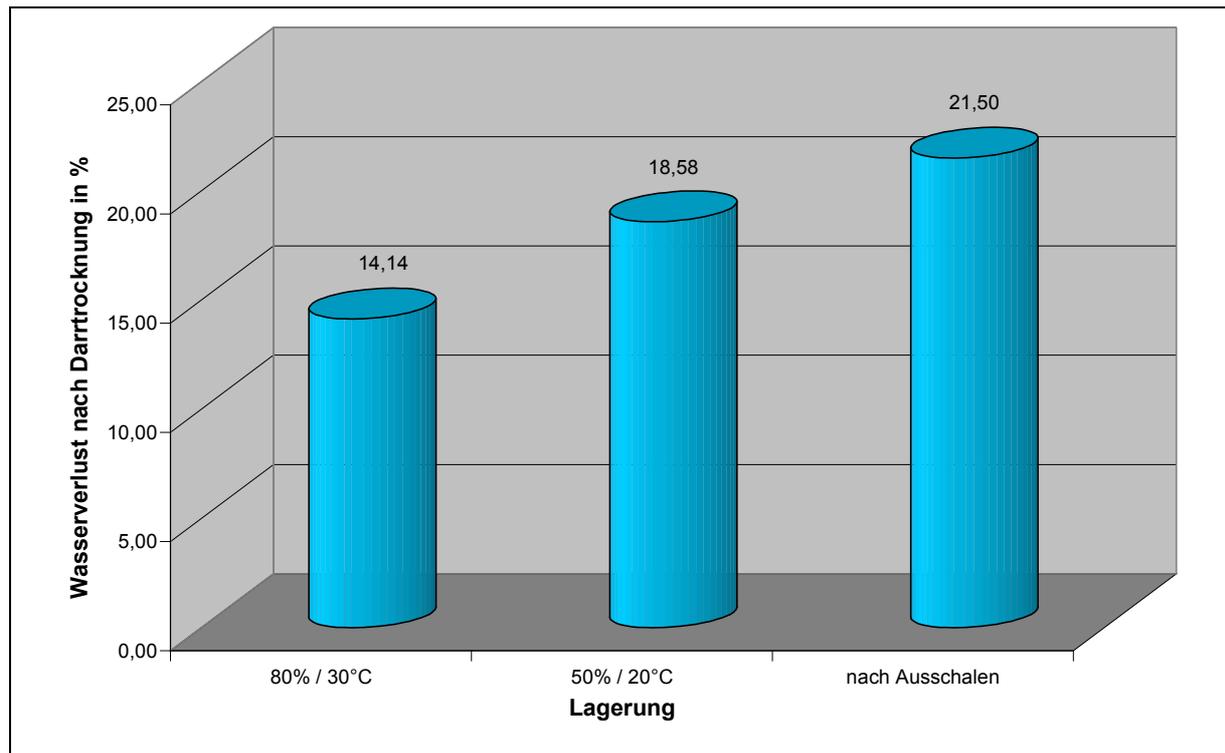


Abbildung 4.3 Wasserverlust nach Darrtrocknung – Grundmaterial (Lagerbedingungen siehe Kapitel 3.1)

Nach der feuchten Lagerung sind Probekörper etwas größer und schwerer als nach der trockenen Lagerung. Eine Ausnahme bildet die Breite der Probekörper. Nach einer anschließenden Darrtrocknung (Trocknung des Probekörpers in im Trockenschrank bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz) wurde ein Feuchtegehalt von 21,5 % bei den frisch ausgeschalteten Probekörpern ein Feuchtegehalt von 18,6 % bei den trocken gelagerten Probekörpern und 14,1 % bei den feucht gelagerten Probekörpern ermittelt (Abbildung 4.3).

Die in Abbildung 4.2 dargestellten Schwindwerte zeigen ein für einen Baustoff sehr hohes Schwindmaß von bis zu 15 %. Das könnte auf einen hohen Tongehalt im Lehm hinweisen. Im Vergleich zu anderen Baustoffen zeigt vor allem auch Holz ein hohes Schwindmaß (in tangentialer Richtung bis 10 %).

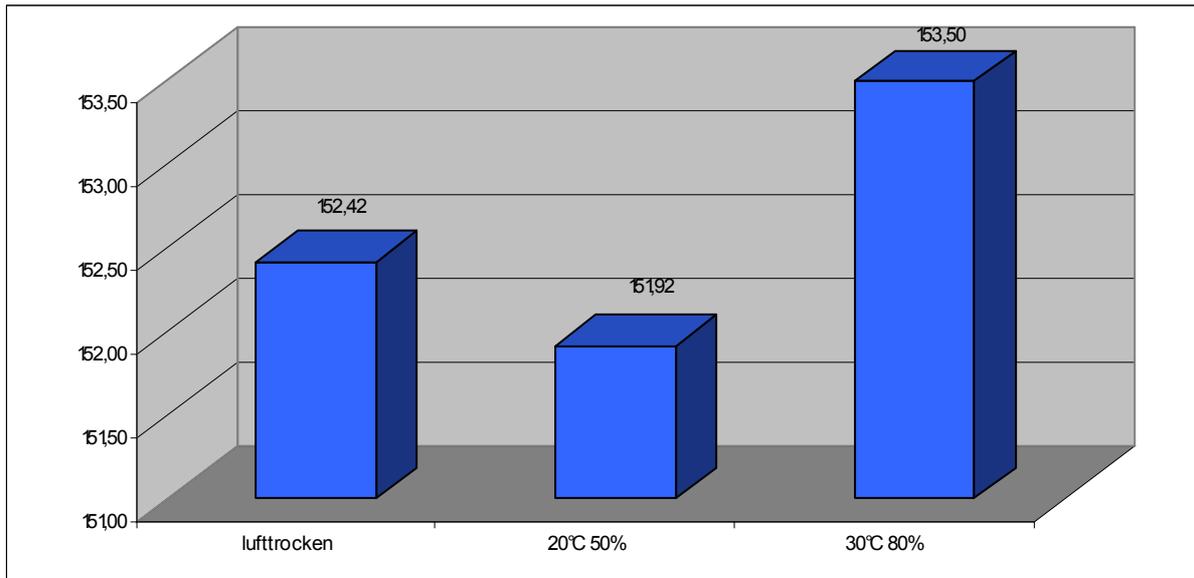


Abbildung 4.4 Grundmaterial (Ausgangswert nach Ausschalen: 160 mm) - Länge in [mm] (Lagerbedingungen und Zeitpunkt siehe Kapitel 3.1)

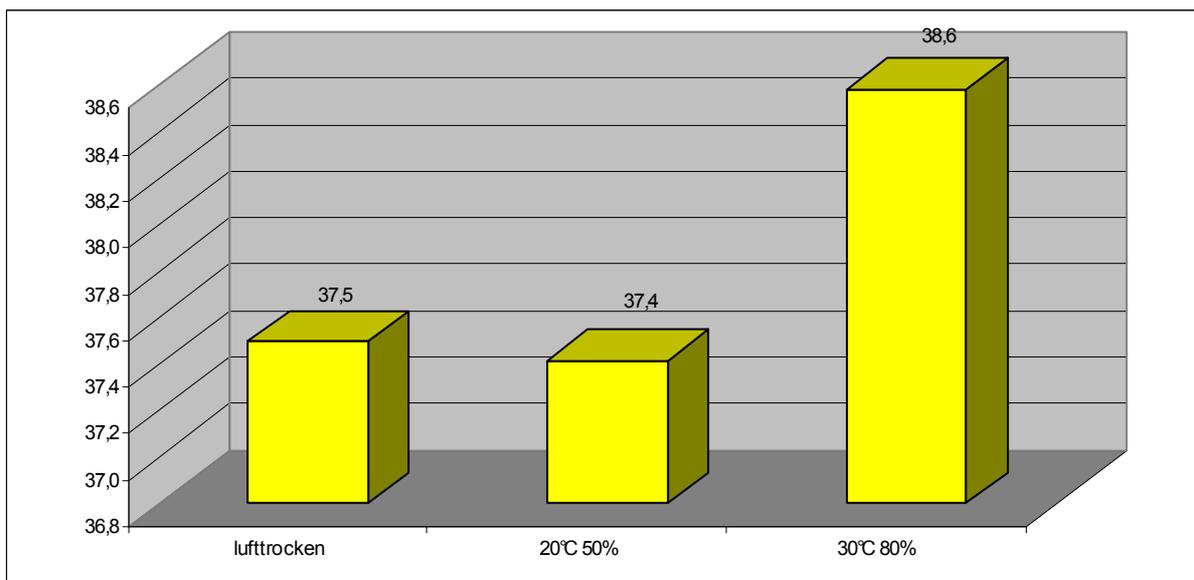


Abbildung 4.5 Grundmaterial (Ausgangswert nach Ausschalen: 40 mm) - Höhe in [mm] (Lagerbedingungen und Zeitpunkt siehe Kapitel 3.1)

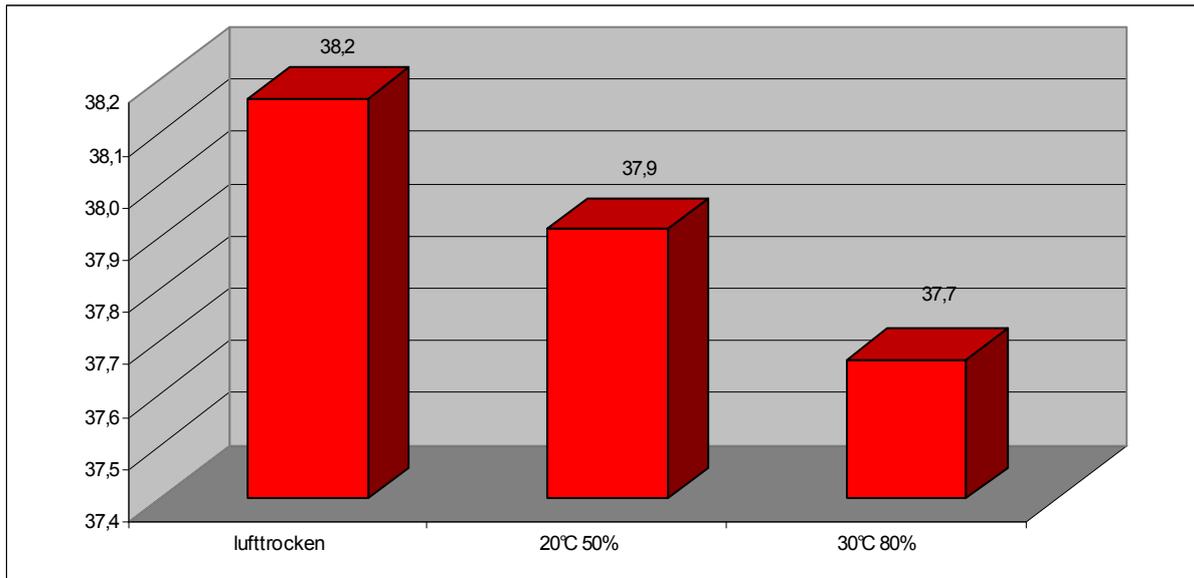


Abbildung 4.6 Grundmaterial (Ausgangswert nach Ausschalen: 40 mm- Breite in [mm]) (Lagerbedingungen und Zeitpunkt siehe Kapitel 3.1)

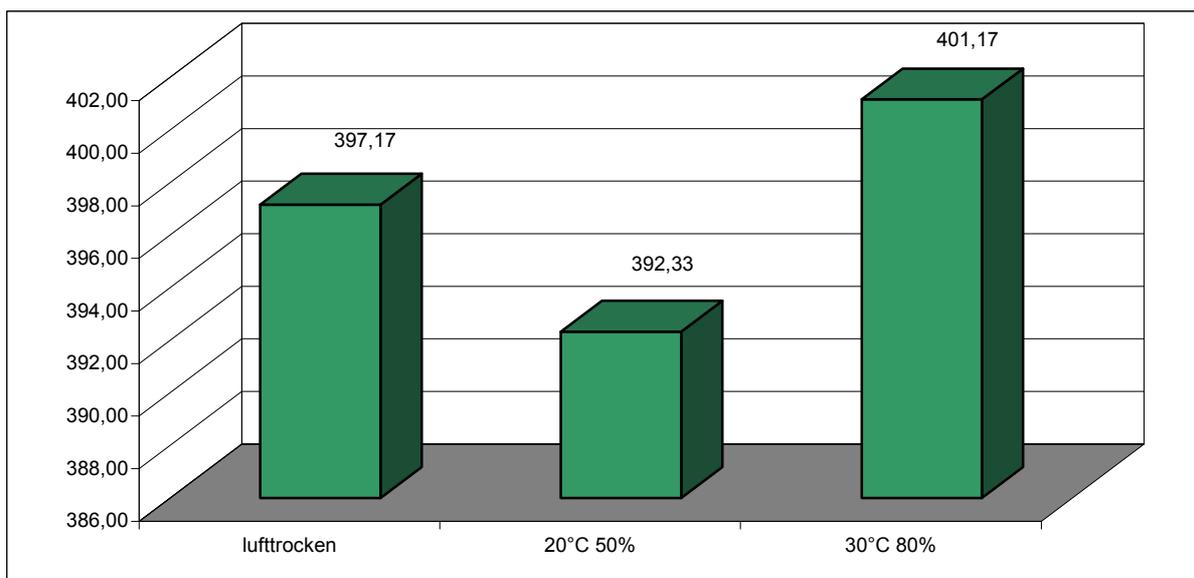


Abbildung 4.7 Grundmaterial (Ausgangswert nach Ausschalen: 481 g)- Gewicht in [g] (Lagerbedingungen und Zeitpunkt siehe Kapitel 3.1)

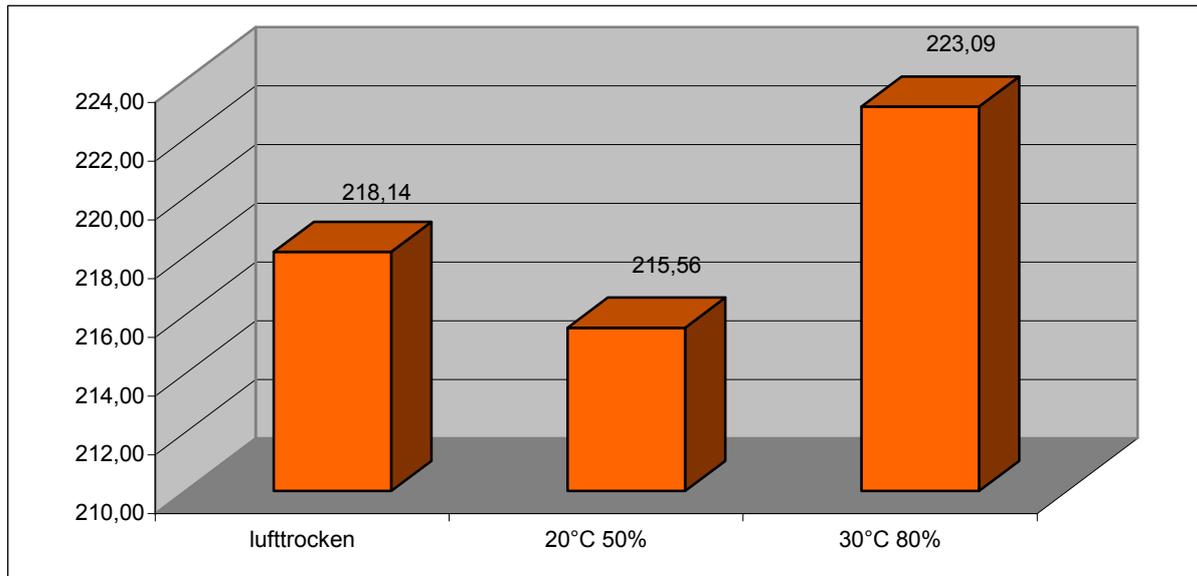


Abbildung 4.8 Grundmaterial (Ausgangswert nach Ausschalen: 256 cm<sup>3</sup> - Volumen in [cm<sup>3</sup>]  
(Lagerbedingungen und Zeitpunkt siehe Kapitel 3.1)

In den folgenden Diagrammen sind die Ergebnisse der Festigkeitsuntersuchungen dargestellt (Abbildung 4.9, Abbildung 4.10).

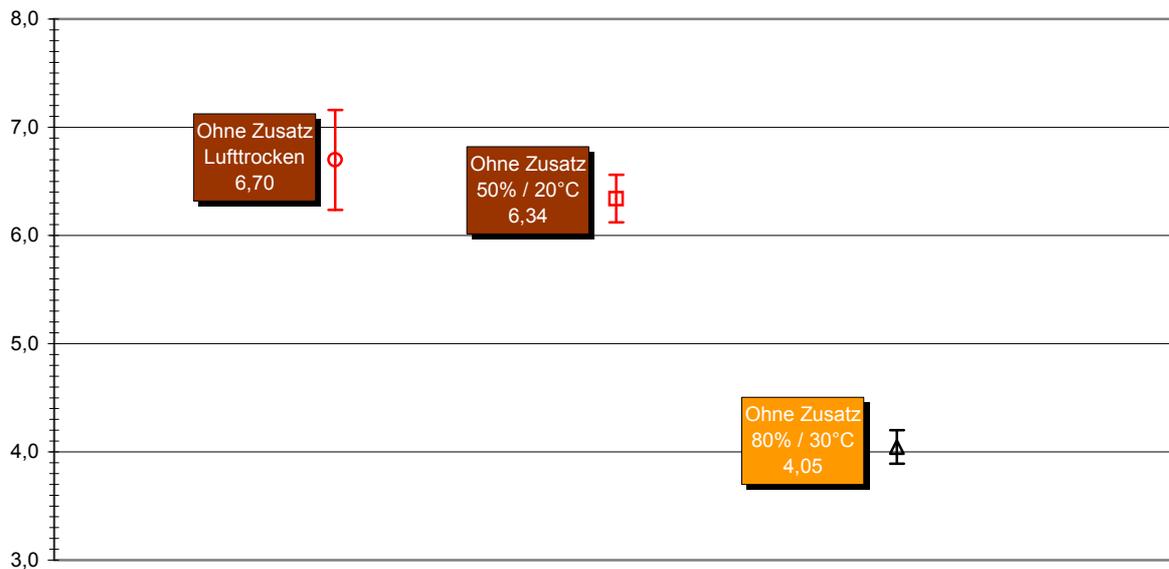
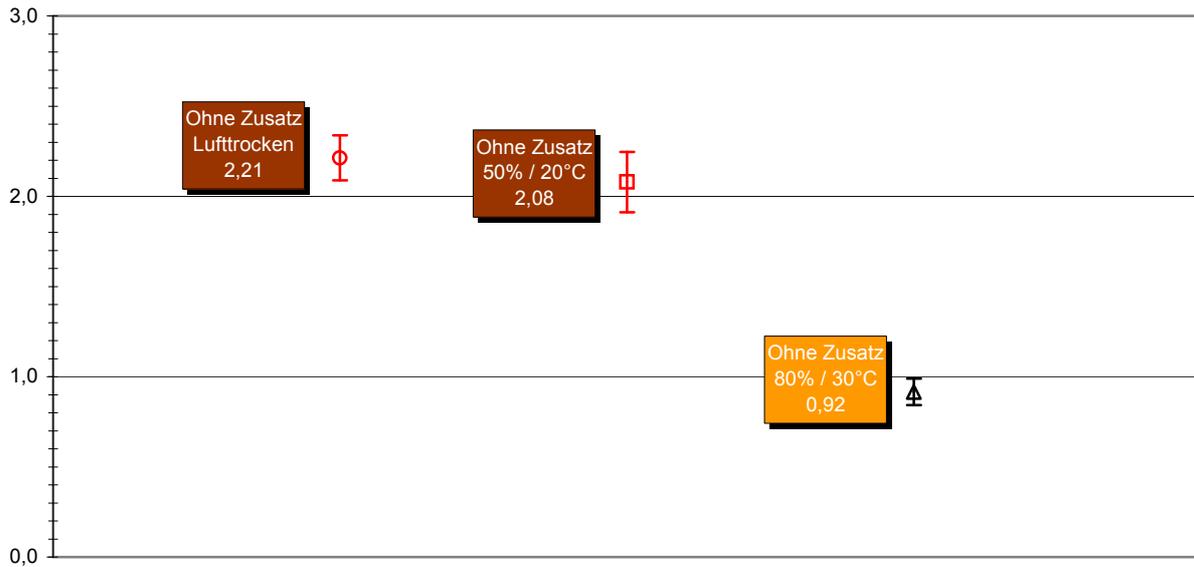


Abbildung 4.9 Grundmaterial - Druckfestigkeit in [N/mm<sup>2</sup>]

Abbildung 4.10 Grundmaterial - Biegezugfestigkeit in [N/mm<sup>2</sup>]

Die erhaltenen Werte entsprechen durchschnittlichen Lehmwerten aus der Literatur. Die Versuche zeigen den typischen Abfall der Druck- bzw. Biegezugfestigkeit bei feuchtem Lehm, insbesondere in Verbindung mit erhöhter Temperatur.

## 4.2 Vorversuche mit Kasein als Zusatzstoff

Mit Zusatz von Kasein konnten Verbesserungen der Materialeigenschaften hinsichtlich Verarbeitbarkeit, Abriebfestigkeit und Wasserfestigkeit erzielt werden (siehe auch Kapitel 2.6.2.3).

Für die Versuche wurden Zusatzmengen von 1 %, 5 %, 10 % und 20 % gewählt. Das Kaseinpulver wurde vorerst mit dem trockenen Lehm vermischt, erst dann wurde das Anmachwasser untergerührt.

Die Ergebnisse der Schwind- und Feuchtemessungen (Beschreibung siehe Kapitel 3.1.3) sind in den folgenden Abbildungen ersichtlich (Abbildung 4.12, Abbildung 4.13, Abbildung 4.14, Abbildung 4.15, Abbildung 4.16, Abbildung 4.17, Abbildung 4.11). Es ist der Vergleich Grundmaterial (grauer Balken) mit dem Gemisch aus Grundmaterial plus Kaseinzusatz (farbiger Balken) mit den beiden Klimalagerungen (trocken – 50% / 20°C und feucht – 80% / 30°C) dargestellt.

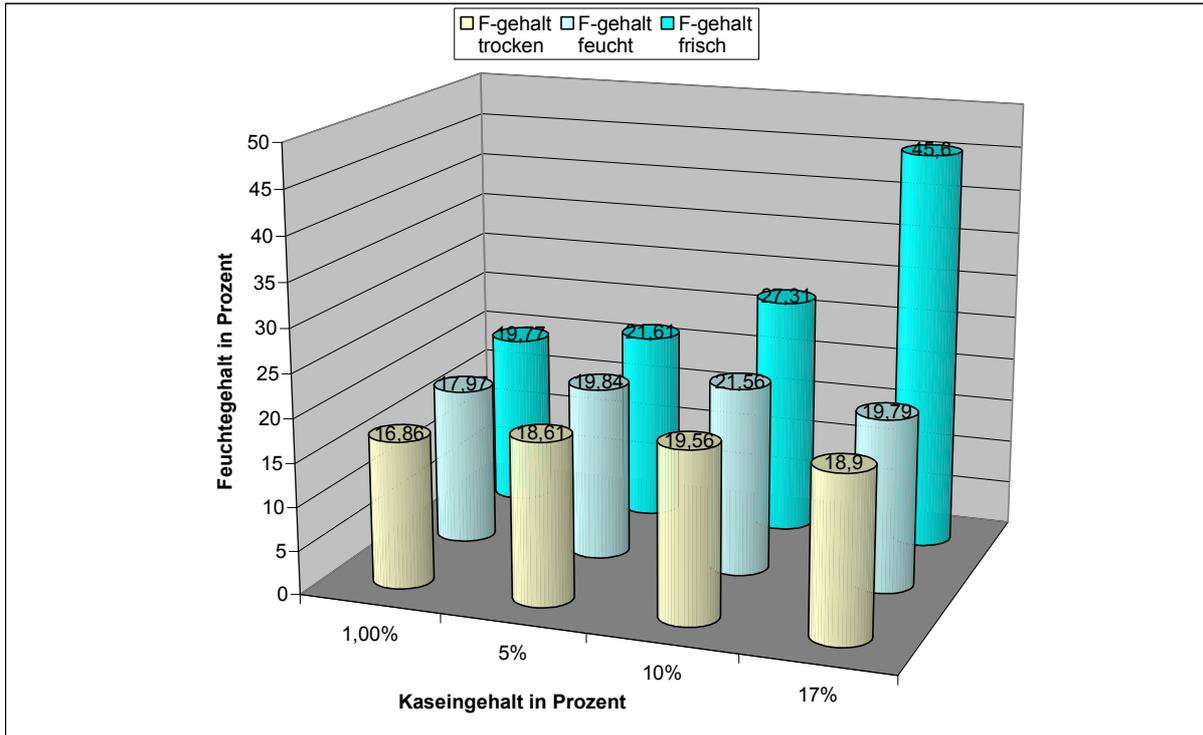


Abbildung 4.11 Kasein - Feuchtegehalt in Prozent

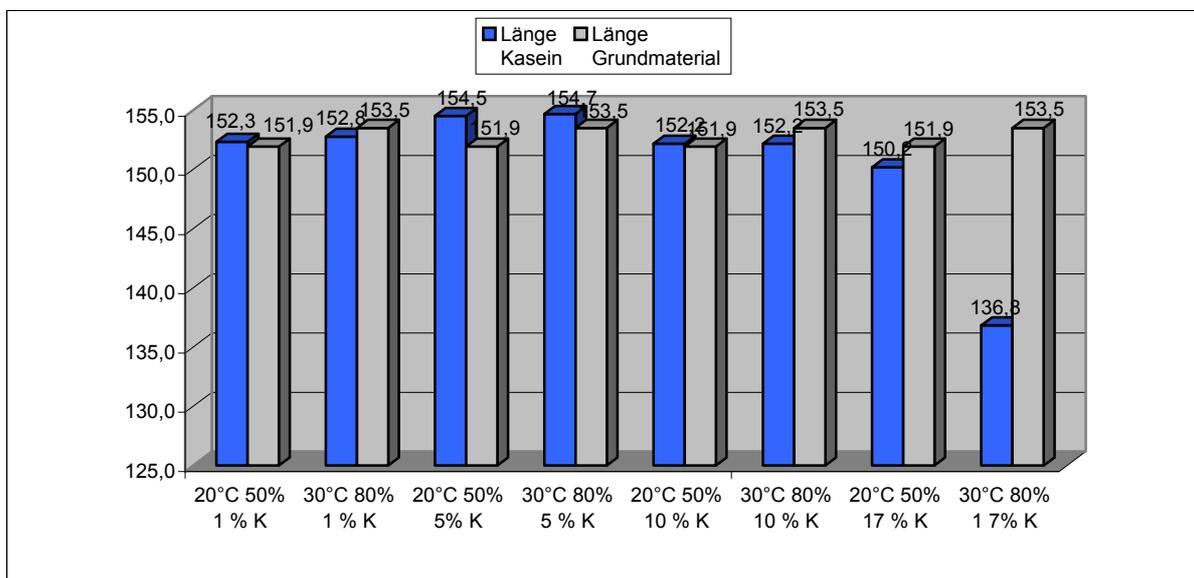


Abbildung 4.12 Kasein - Länge in [mm]

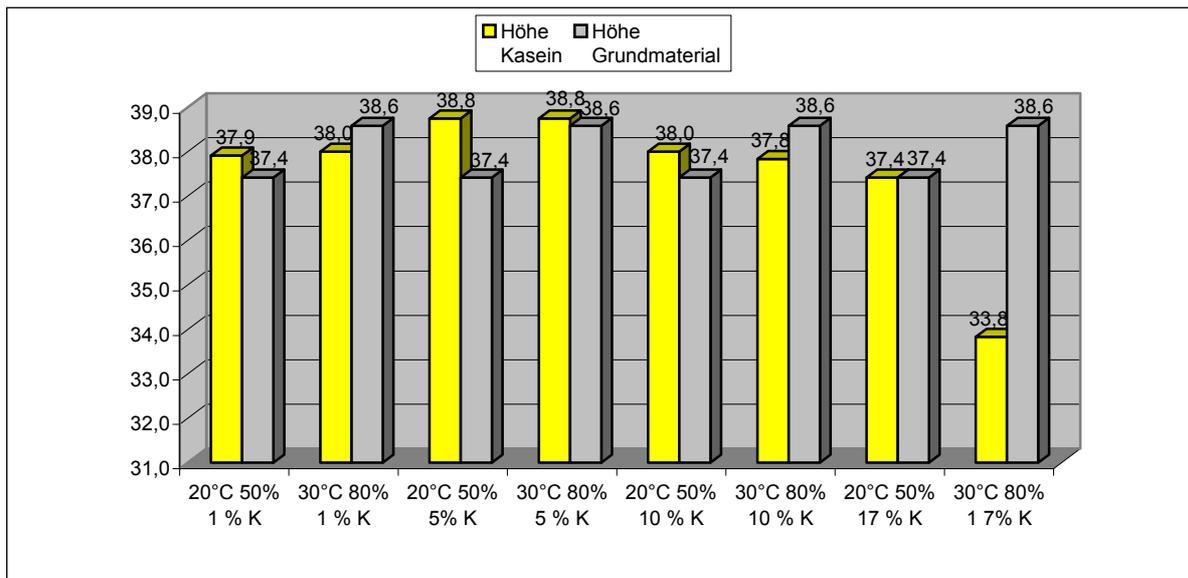


Abbildung 4.13 Kasein - Höhe in [mm]

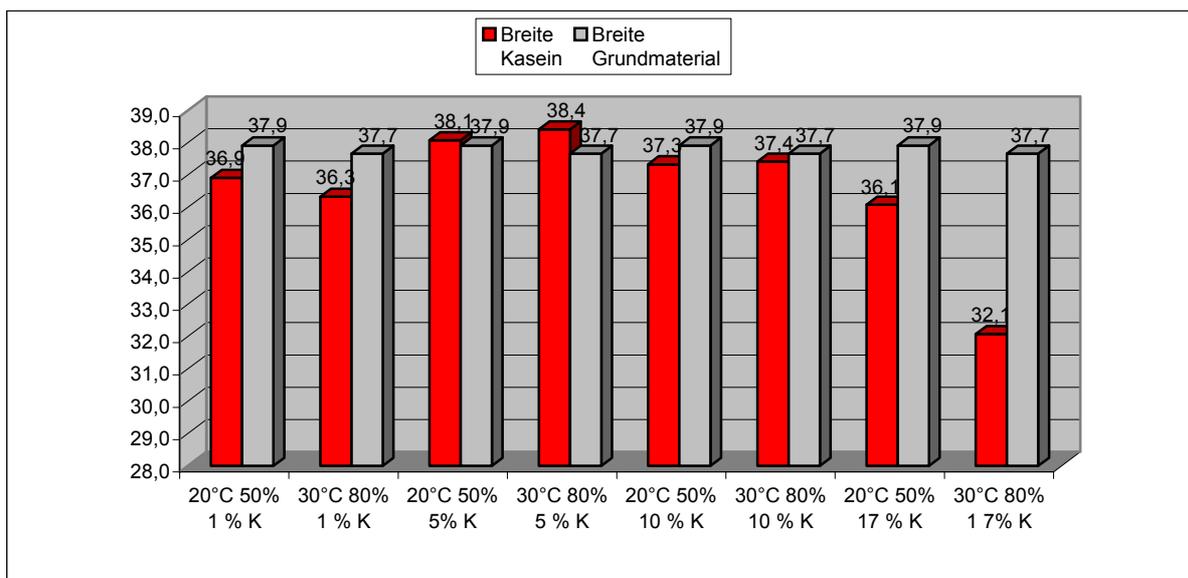


Abbildung 4.14 Kasein - Breite in [mm]

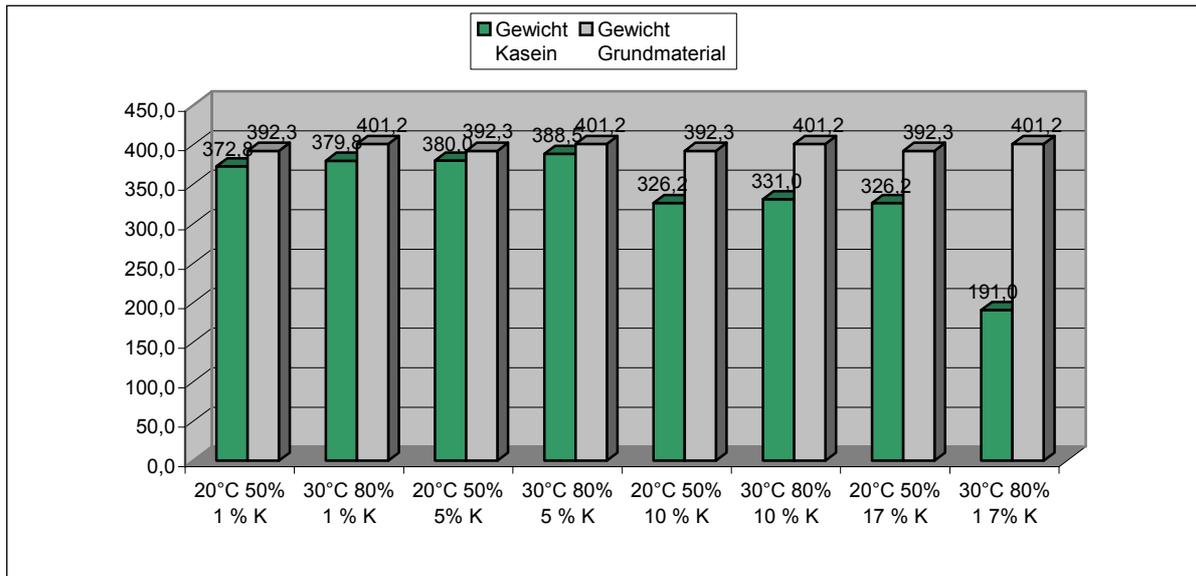


Abbildung 4.15 Kasein - Gewicht in [g]

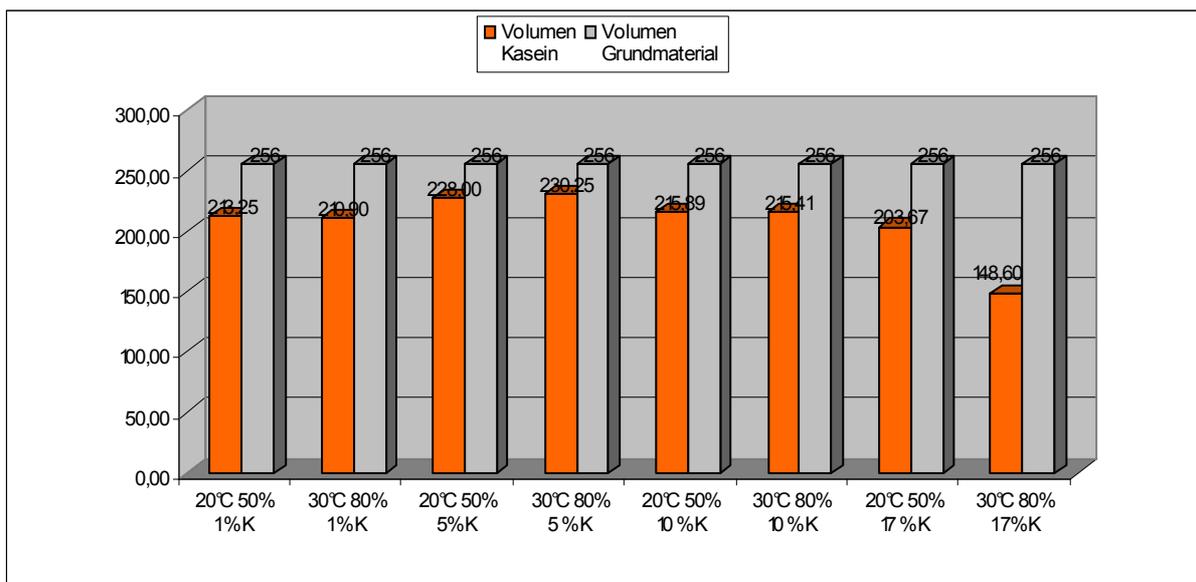


Abbildung 4.16 Kasein - Volumen in [cm<sup>3</sup>]

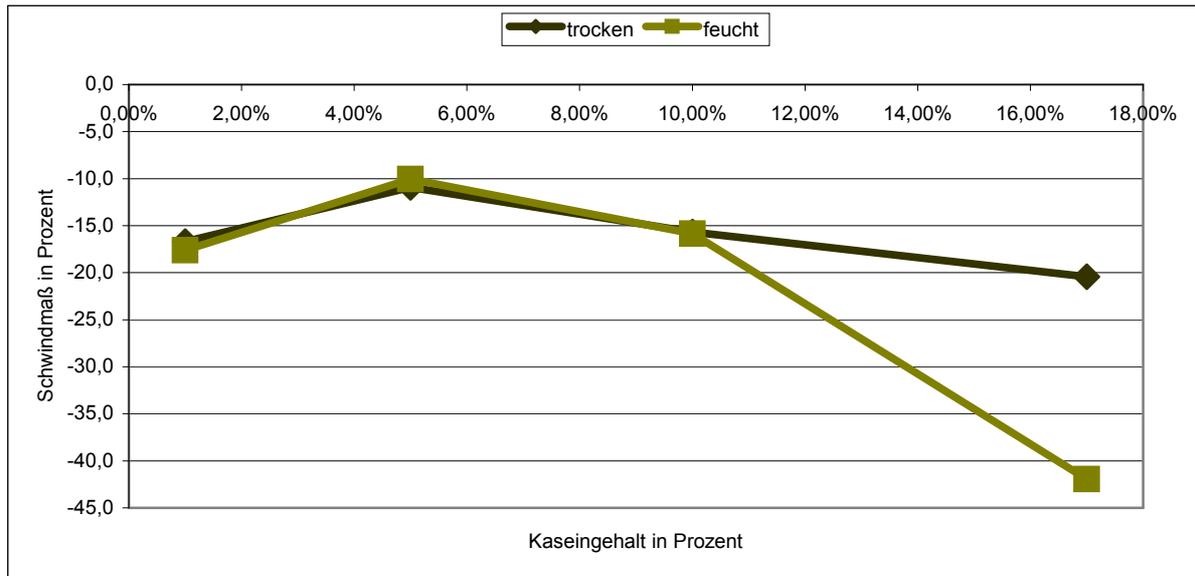


Abbildung 4.17 Kasein - Schwindmaß in Prozent

Der Größenunterschied zwischen den Probekörpern des Grundmaterials und denen mit Kaseinzusatz ist gering. Nur die Werte der Probekörper der Serie mit 17 % Kaseinzusatz und Lagerung bei 30°C / 80 % sind deutlich geringer als die des Grundmaterials. Analoges ist beim Gewicht beobachtbar.

Das größere Schwinden bei den Serien mit 17 % Kaseinzusatz ist vermutlich auf den höheren Wasseranteil zurückzuführen. Ein Schwindmaß diesen Ausmaßes (über 40 %) erscheint für einen Baustoff nicht geeignet.

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Festigkeitsuntersuchungen (Beschreibung lt. Kapitel 3) angeführt (Abbildung 4.18, Abbildung 4.19, Tabelle 4.1).

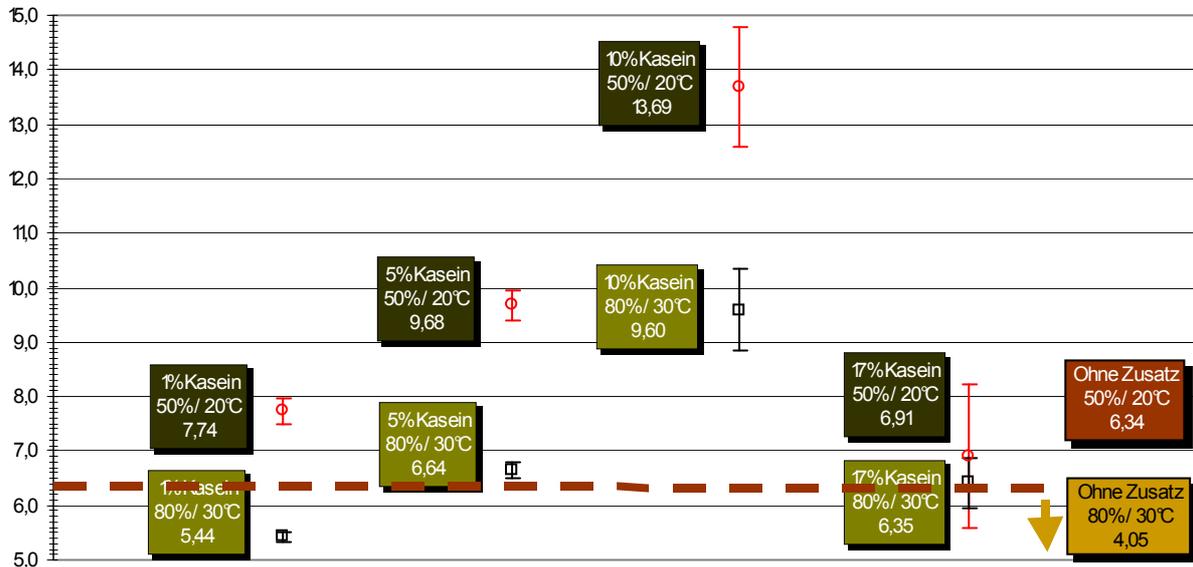


Abbildung 4.18 Kasein - Druckfestigkeit in [N/mm<sup>2</sup>]

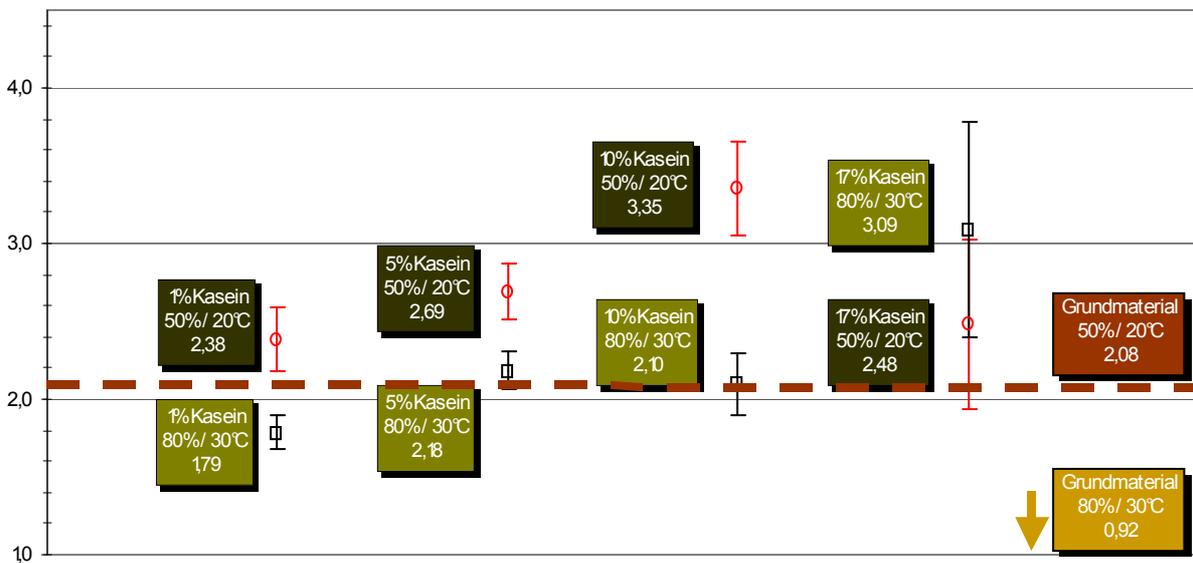


Abbildung 4.19 Kasein - Biegezugfestigkeit in [N/mm<sup>2</sup>]

Tabelle 4.1 Vergleich Kasein mit Grundmaterial

Material	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	[%] des Grundmaterials	Zu-/Abnahme [%]	Biegezugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	[%] des Grundmaterials	Zu-/Abnahme [%]
<b>1% Kasein – Klimakammer 20°C / 50 %</b>	7,74	122,08	<b>22,08</b>	2,38	114,63	<b>14,63</b>
<b>1% Kasein – Klimakammer 30°C / 80 %</b>	5,44	134,27	<b>34,27</b>	1,79	194,24	<b>94,24</b>
<b>5% Kasein – Klimakammer 20°C / 50 %</b>	9,68	152,67	<b>52,67</b>	2,69	129,42	<b>29,42</b>
<b>5% Kasein – Klimakammer 30°C / 80 %</b>	6,64	163,93	<b>63,93</b>	2,18	237,45	<b>137,45</b>
<b>10% Kasein – Klimakammer 20°C / 50 %</b>	13,69	215,94	<b>115,94</b>	3,35	161,21	<b>61,21</b>
<b>10% Kasein – Klimakammer 30°C / 80 %</b>	9,60	236,93	<b>136,93</b>	2,10	228,02	<b>128,02</b>
<b>17% Kasein – Klimakammer 20°C / 50 %</b>	6,91	108,95	<b>8,95</b>	3,09	119,30	<b>19,30</b>
<b>17% Kasein – Klimakammer 30°C / 80 %</b>	6,35	156,70	<b>56,70</b>	2,48	336,00	<b>236,00</b>

Bei den Versuchen mit Kasein ist zu bemerken, dass ein Zusatz von mehr als 17% Kasein nicht möglich war. Je mehr Kasein zugesetzt wurde umso mehr Wasser musste beigemischt werden. Dies hatte ein höheres Schwindmaß zur Folge. Bei der Verarbeitung zeigte sich bei diesem hohen Prozentsatz eine starke Plastifizierung. Durch das Ausschalen, Transportieren und Lagern konnte die genaue Prismenform nicht exakt erhalten werden.

Durch das Zumischen von Kasein kam es zu einer unangenehmen Geruchsentwicklung bei der Probekörperherstellung und beim Trocknen. Bei den trockenen Lehmprismen fiel dann keine Geruchsbelästigung mehr auf.

Außerdem trat bei diesen Probekörpern (17 % Kaseinzusatz) eine Schimmelbildung auf (Abbildung 4.20).

Die Druckfestigkeit der trockenen Probekörper wurde mit zunehmendem Kaseinprozentsatz markant gesteigert, erreichte aber bei 10 % ein Maximum. Die Werte der Serie mit 17 %

Kaseinzusatz vielen wieder stark ab, sogar unterhalb des Wertes der mit dem Grundmaterial erreicht wurde. Auch die feucht gelagerte Probekörperserie zeigte höhere Werte bei der Druckfestigkeit. Schon die Werte der Serie mit 1 % Kaseinzusatz lagen höher als die ohne Zusatz.

Analoge Ergebnisse wurden bei den Biegezugfestigkeitswerten erzielt. Einzig der Wert der feuchten Proben mit 17 % Kaseinzusatz zeigte eine weitere Steigerung der Biegezugfestigkeit.



Abbildung 4.20 Schimmelbildung an einer Probe mit 17 % Kaseinzusatz

Für eine Reduzierung der Druckfestigkeitsverluste von Lehm in feuchten Klimaten scheint ein Zusatz von Kasein sinnvoll zu sein. Der Bereich von 10 bis 17 % Kaseinzusatz sollte genauer untersucht werden, um herauszufinden bei welchem Prozentsatz die Druck- und Biegezugfestigkeit ein Maximum erreicht.

### 4.3 Vorversuche mit Wasserglas als Zusatzstoff

In der Literatur wurden folgende Vorteile bei Wasserglaszusatz genannt: Zunahme der Festigkeit bei mageren Lehmen, eine bessere Vermischbarkeit und eine erhöhte Abriebfestigkeit. Unterschiedliche Aussagen wurden zur verkürzten Trocknungszeit gemacht. Ein Autor beschrieb dies als nachteiligen Effekt, ein andere Autor hingegen fand diesen Effekt von Vorteil (siehe auch Kapitel 2.6.1.6).

Für die Versuche wurden Zusatzmengen von 1 %, 2,5 % und 5 % gewählt. Das Na-Wasserglas wurde zuerst mit dem Anmachwasser vermischt und anschließend dem trockenen Lehm untergemischt. Für die 5 % Serie wurde das Anmachwasser komplett durch Wasserglas ersetzt. Würde noch ein größerer Prozentsatz an Wasserglas zugesetzt, wäre die Masse zu feucht und die Normsteife könnte nicht eingehalten werden.

Die Ergebnisse der Schwind- und Feuchtemessungen (Beschreibung siehe Kapitel 3.1.3) sind in den folgenden Abbildungen ersichtlich (Abbildung 4.22, Abbildung 4.23, Abbildung 4.24, Abbildung 4.25, Abbildung 4.26, Abbildung 4.27). Es ist der Vergleich Grundmaterial (grauer Balken) mit dem Gemisch aus Grundmaterial plus Wasserglaszusatz (farbiger Balken) mit den beiden Klimalagerungen (trocken – 50% / 20°C und feucht – 80% / 30°C) dargestellt.

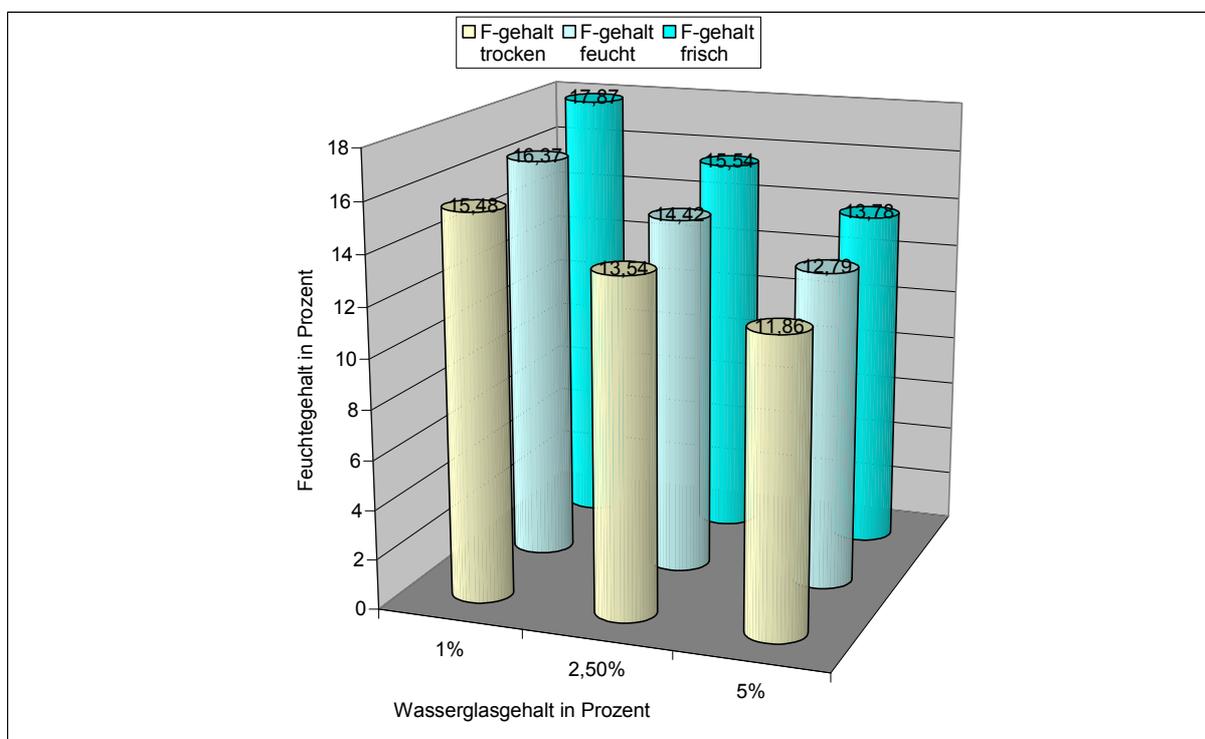


Abbildung 4.21 Wasserglas - Feuchtegehalt in Prozent

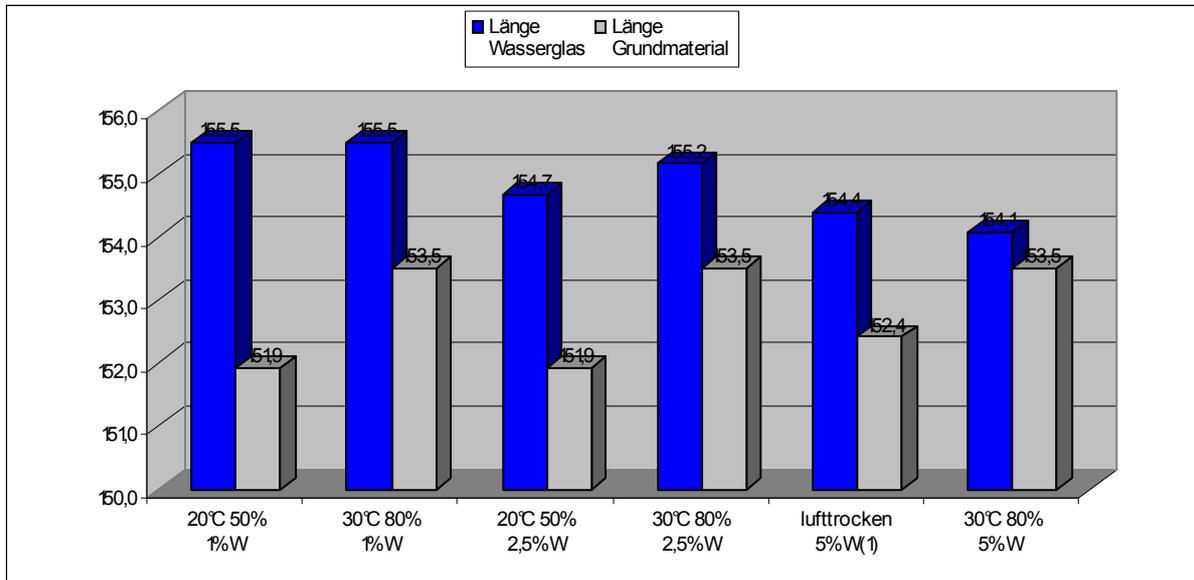


Abbildung 4.22 Wasserglas - Länge in [mm]

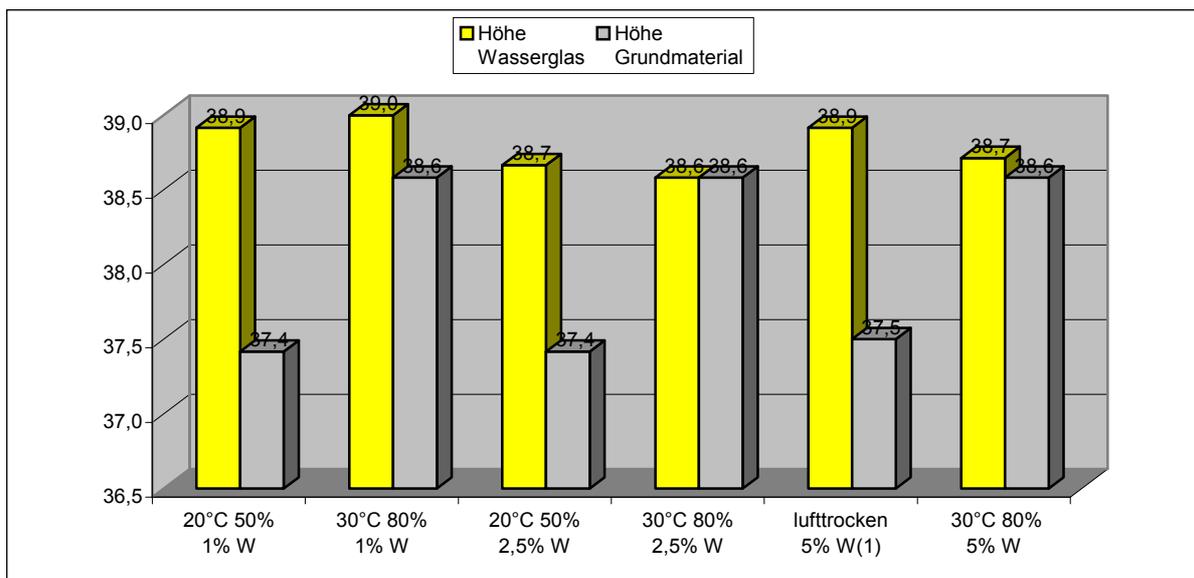


Abbildung 4.23 Wasserglas - Höhe in [mm]

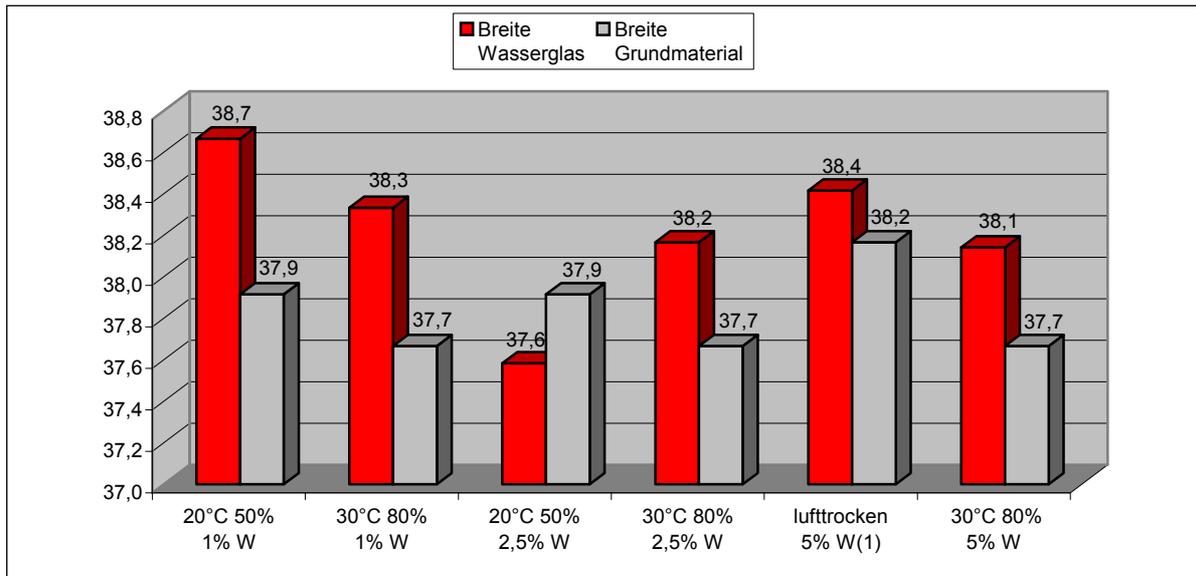


Abbildung 4.24 Wasserglas - Breite in [mm]

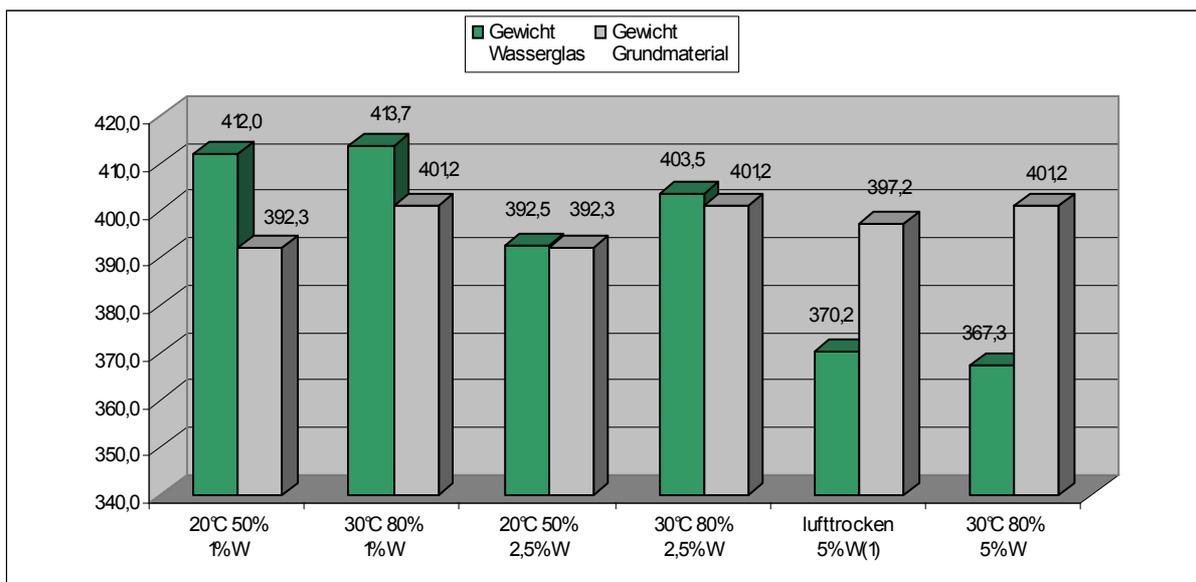


Abbildung 4.25 Wasserglas - Gewicht in [g]

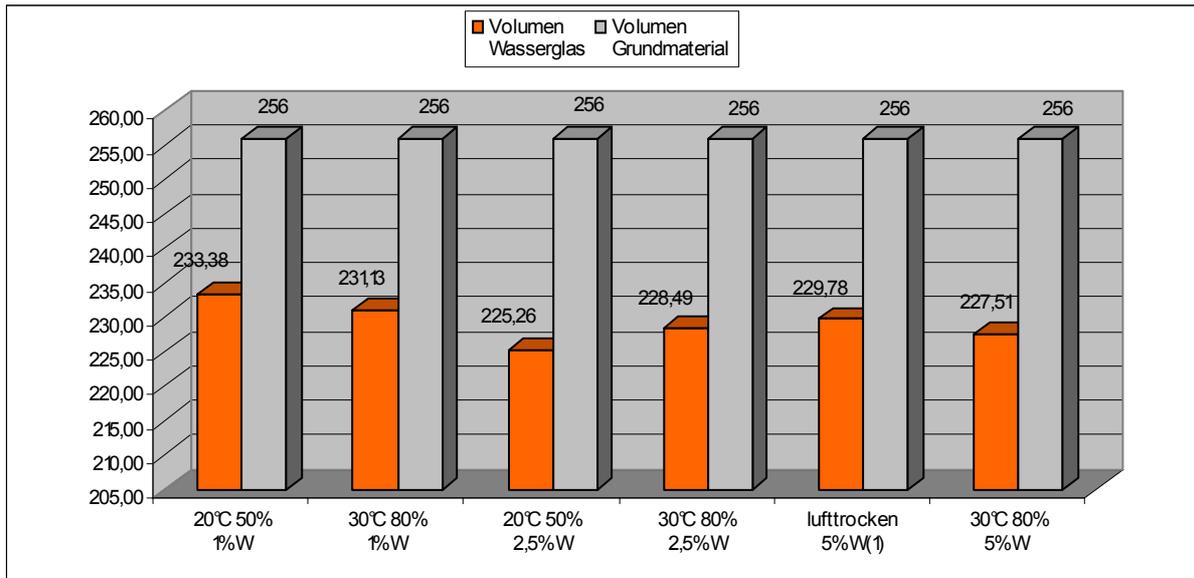


Abbildung 4.26 Wasserglas - Volumen in [g]

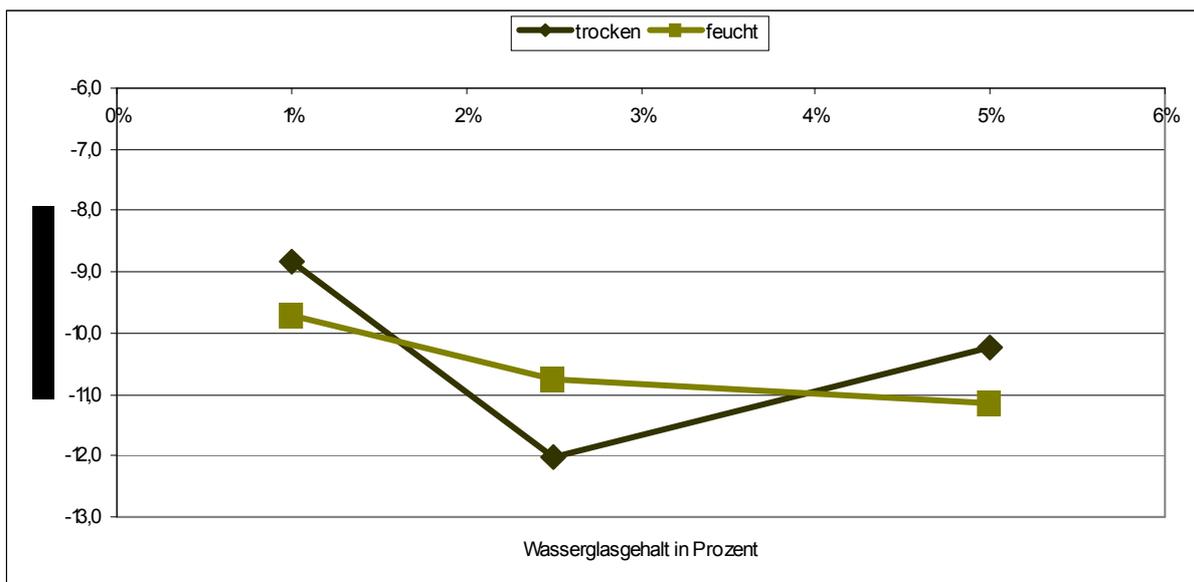


Abbildung 4.27 Wasserglas - Schwindmaß in Prozent

Im Gegensatz zum Grundmaterial schrumpfte die Länge der Probekörper mit Wasserglaszusatz weniger. Mit steigendem Prozentsatz aber, wurde dieser Effekt schwächer. Bei den Vergleichswerten der Höhe der Probekörper schrumpften die trockenen Serien weit weniger als das Grundmaterial. Bei der Breite war nur die Serie mit 1 % Zusatz deutlich größer als das Grundmaterial, die anderen Werte streuten. Die trocken gelagerte

Serie mit 2,5 % Wasserglaszusatz weist ein höheres Schwindmaß als die 1 % und die 5 % Serie auf.

Beim Vergleich des Gewichts fällt auf, dass die Serie mit 5 % Zusatz deutlich leichter, die Serie mit 1 % Zusatz geringfügig schwerer und die Serie mit 2,5 % in etwa gleich schwer wie das Grundmaterial war.

Die Ergebnisse der Festigkeitsuntersuchungen (Beschreibung siehe Kapitel 3) sind in den folgenden Tabellen und Abbildungen ersichtlich (Abbildung 4.28, Abbildung 4.29, Tabelle 4.2)

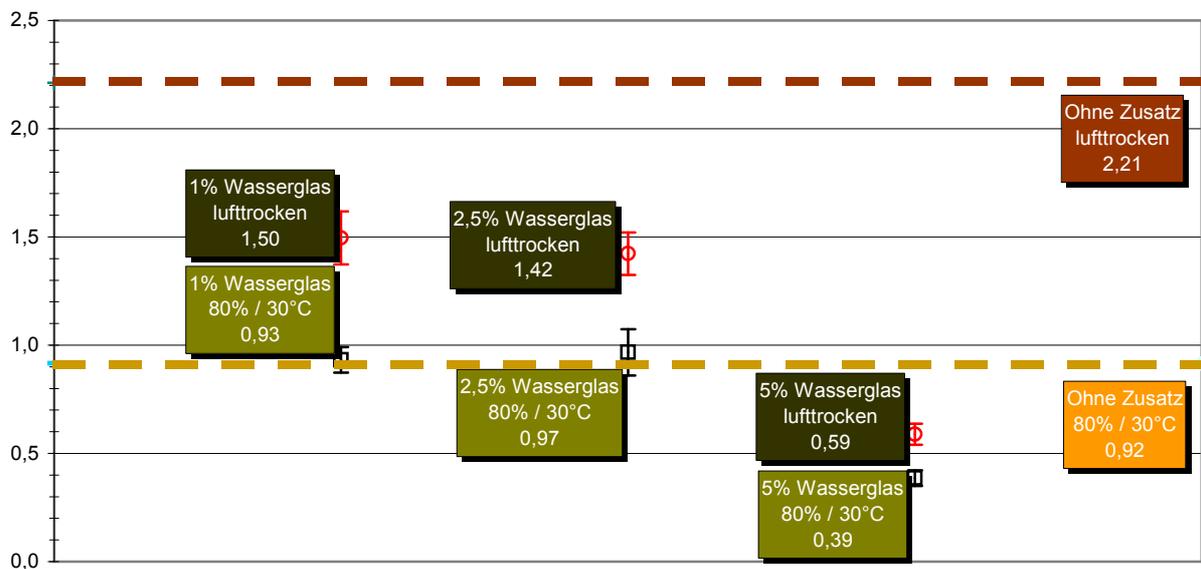


Abbildung 4.28 Wasserglas - Druckfestigkeit in [N/mm<sup>2</sup>]

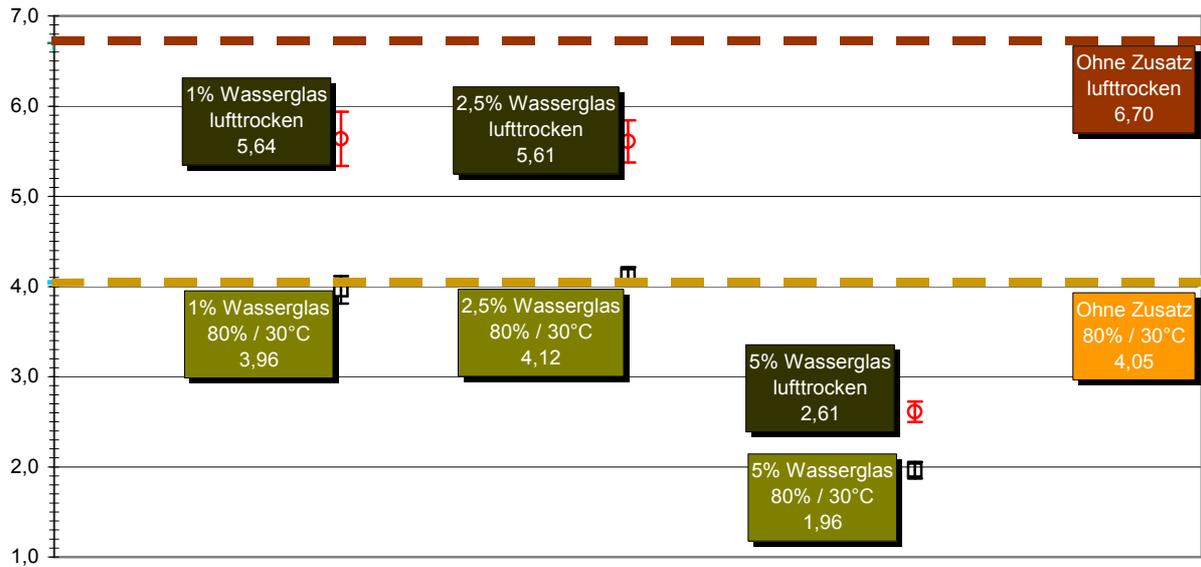

 Abbildung 4.29 Wasserglas - Biegezugfestigkeit in [N/mm<sup>2</sup>]

Tabelle 4.2 Vergleich Wasserglas mit Grundmaterial

Material	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	[%] des Grundmaterials	Zu-/Abnahme [%]	Biegezugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	[%] des Grundmaterials	Zu-/Abnahme [%]
<b>1% Wasserglas - Lufttrocken</b>	5,64	84,2	<b>-15,8</b>	1,5	67,6	<b>-32,4</b>
<b>1% Wasserglas – Klimakammer 30°C / 80 %</b>	3,96	97,9	<b>-2,1</b>	0,93	101,9	<b>1,9</b>
<b>2,5% Wasserglas - Lufttrocken</b>	5,61	83,7	<b>-16,3</b>	1,42	64,3	<b>-35,7</b>
<b>2,5% Wasserglas – Klimakammer 30°C / 80 %</b>	4,12	101,8	<b>1,8</b>	0,97	105,6	<b>5,6</b>
<b>5% Wasserglas - Lufttrocken</b>	2,61	64,5	<b>-35,5</b>	0,59	64,3	<b>-35,7</b>
<b>5% Wasserglas – Klimakammer 30°C / 80 %</b>	1,96	48,5	<b>-51,5</b>	0,39	42,2	<b>-57,8</b>

Bei den Versuchen mit Wasserglas wurde, aufgrund der flüssigen Konsistenz von Wasserglas, weniger Anmachwasser benötigt. Die Serien mit 1 % und 2,5 % Wasserglaszusatz zeigten nach der feuchten Lagerung kaum einen Unterschied zum

Grundmaterial. Bei den restlichen Serien war ein starkes Abfallen der Biegezug- und Druckfestigkeitswerte festzustellen.

Für eine Steigerung der Druckfestigkeit, sowohl im trockenen als auch im feuchten Zustand, scheint sich Wasserglas nicht zu eignen. Die Angaben in der Literatur zur Steigerung der Festigkeit konnten nicht bestätigt werden.

#### 4.4 Vorversuche mit Leinölfirnis als Zusatzstoff

Durch Ölzusatz konnte Abschleimbarkeit und Durchfeuchtungsgeschwindigkeit verringert werden. Versuche mit Leinölfirnis ergaben eine Erhöhung der Härte und Abriebfestigkeit. Laut Angaben in der Literatur hat Leinöl eine wasserabweisende Wirkung. Durch Zusatz von Leinölfirnis blieb zwar die Wasserdampfdurchlässigkeit erhalten, sie wurde aber reduziert (siehe auch Kapitel 2.6.3.1).

Für die Versuche wurden Zusatzmengen von 1 %, 5 % und 10 % gewählt. Das Leinölfirnis wurde mit dem Anmachwasser verrührt und anschließend dem trockenen Lehm untergemischt. Die Serie mit 10 % Leinölfirnisszusatz wurde komplett ohne Anmachwasser hergestellt d.h. dass das Anmachwasser komplett durch Leinölfirnis ersetzt wurde. Um die Normsteife einzuhalten kann nicht mehr Leinölfirnis zugesetzt werden. Bei der 5 % Serie wurde in etwa halb Wasser und halb Leinölfirnis zugemischt.

Im Folgenden sind Ergebnisse der Schwind- und Feuchtemessungen mit Leinölfirniszusatz dargestellt (Abbildung 4.30, Abbildung 4.31, Abbildung 4.32, Abbildung 4.33, Abbildung 4.34, Abbildung 4.35, Abbildung 4.36). Es ist der Vergleich Grundmaterial (grauer Balken) mit dem Gemisch aus Grundmaterial plus Leinölfirniszusatz (farbiger Balken) mit den beiden Klimalagerungen (trocken – 50% / 20°C und feucht – 80% / 30°C) dargestellt.

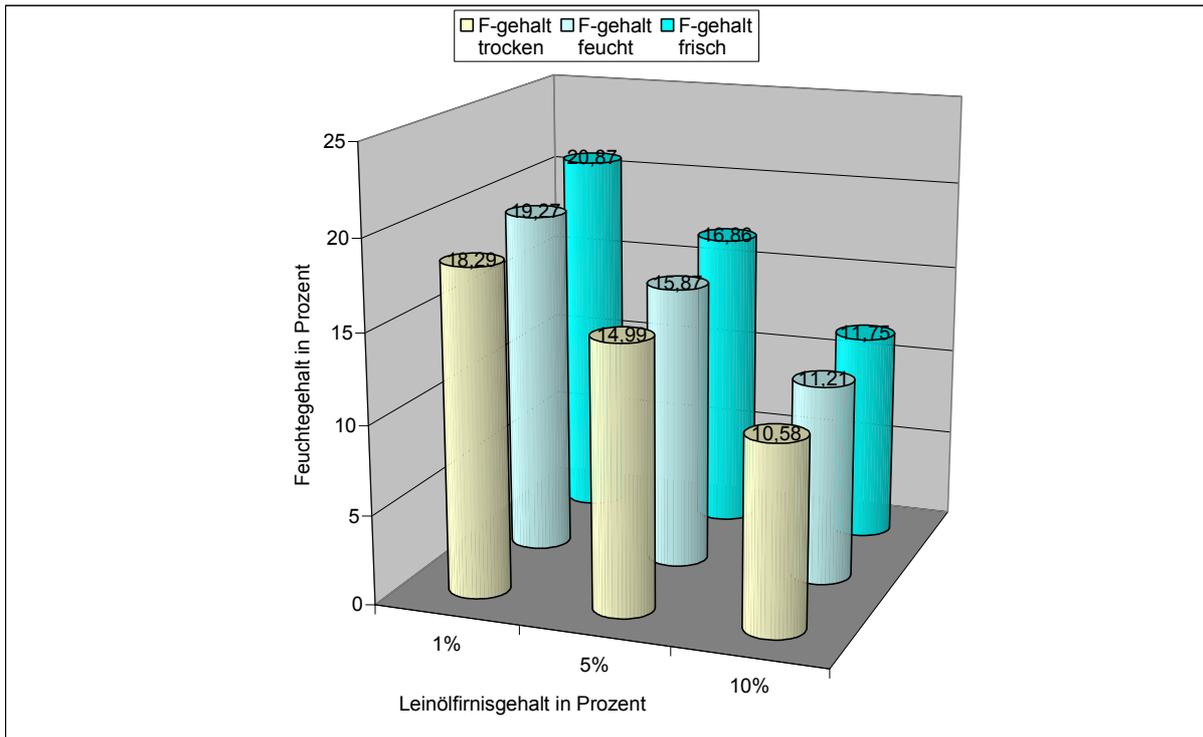


Abbildung 4.30 Leinölfirnis - Feuchtegehalt in Prozent

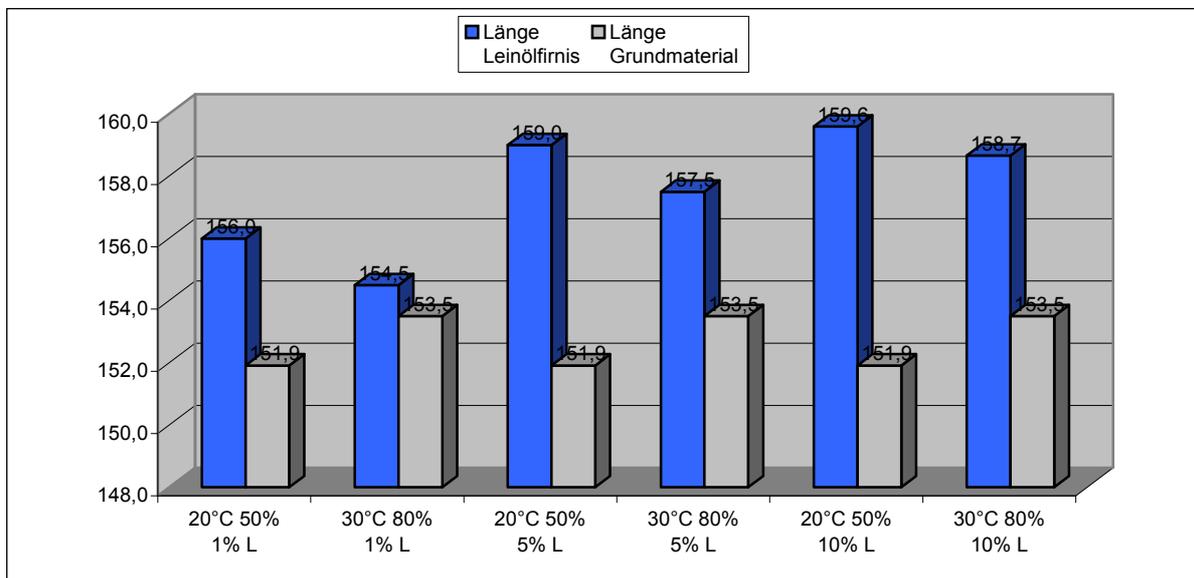


Abbildung 4.31 Leinölfirnis - Länge in [mm]

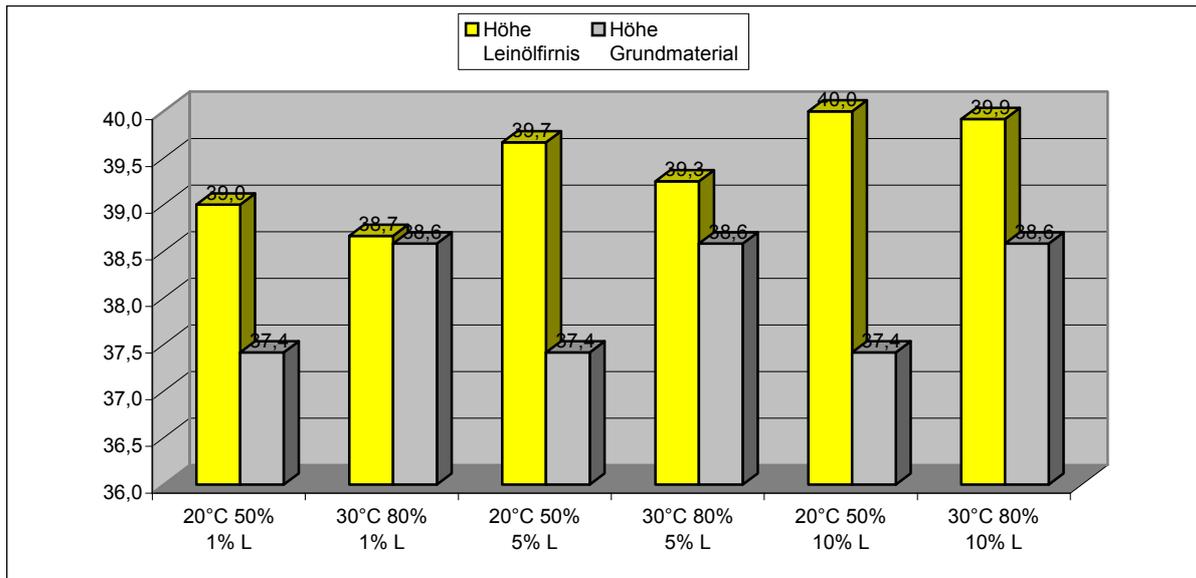


Abbildung 4.32 Leinölfirnis - Höhe in [mm]

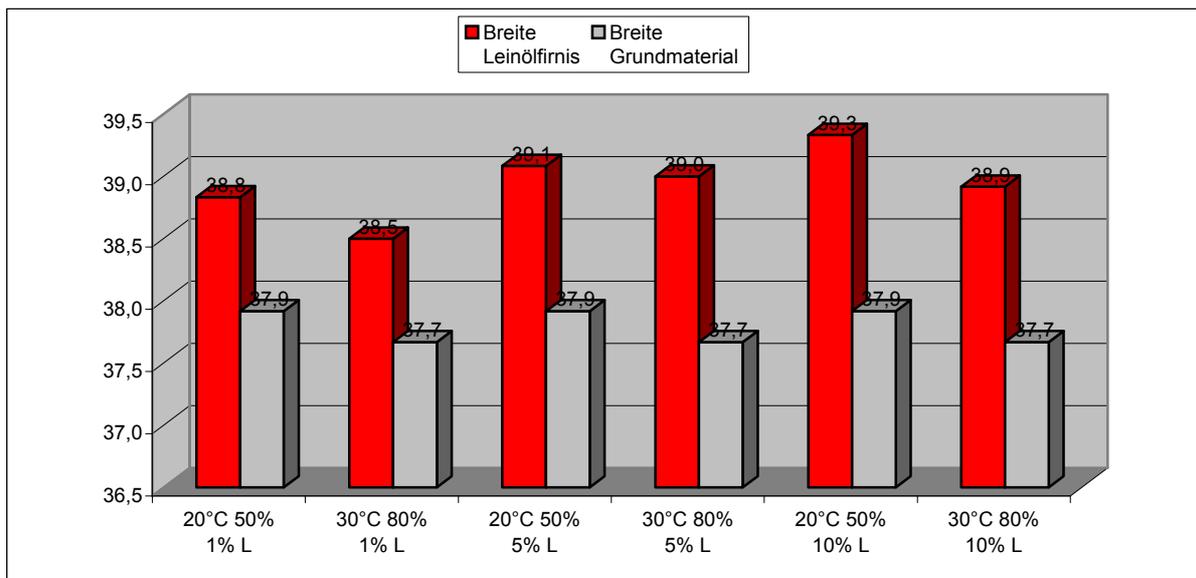


Abbildung 4.33 Leinölfirnis - Breite in [mm]

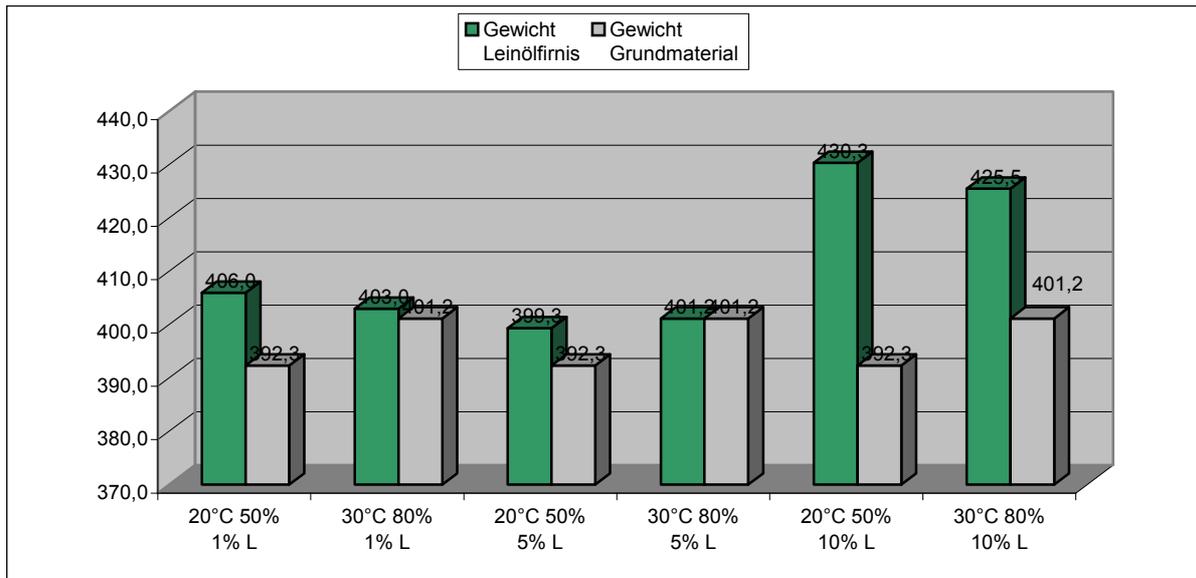


Abbildung 4.34 Leinölfirnis - Gewicht in [g]

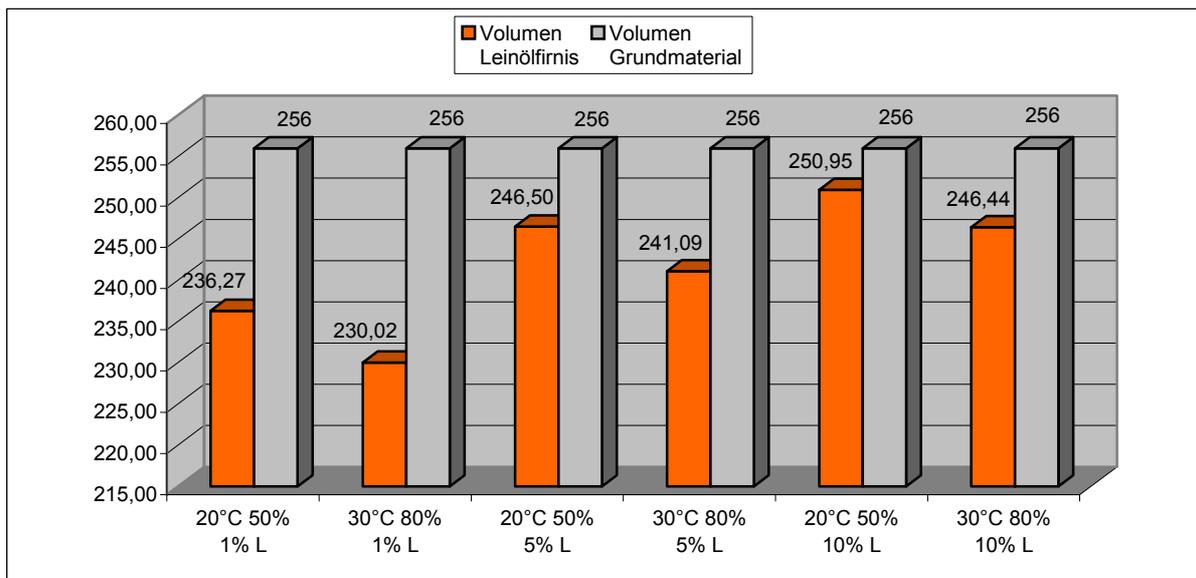


Abbildung 4.35 Leinölfirnis - Volumen in [cm³]

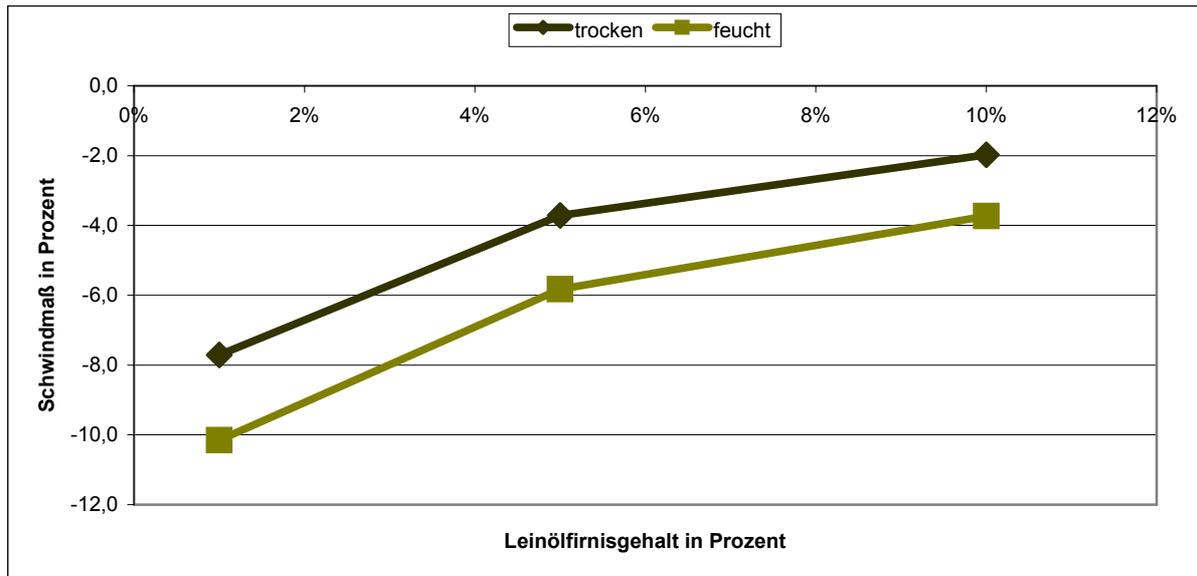


Abbildung 4.36 Leinölfirnis - Schwindmaß in Prozent

Auf das Schrumpfen wirkte sich der Leinölfirniszusatz positiv aus. Je höher der Prozentsatz gewählt wurde, umso geringer viel das Schrumpfen aus. Die Serie mit 10 % Leinölfirnis schrumpfte fast gar nicht mehr. Die Proben mit 1 % und 5 % Leinölfirnis waren in etwa gleich schwer wie das Grundmaterial, aber die 10 % Serie war deutlich schwerer (um ca. 30 – 40 g / ca. 10 %).

In den folgenden Tabellen und Abbildungen sind die Ergebnisse der Festigkeitsuntersuchungen (Beschreibung siehe Kapitel 3) dargestellt. (Abbildung 4.37, Abbildung 4.38, Tabelle 4.3).

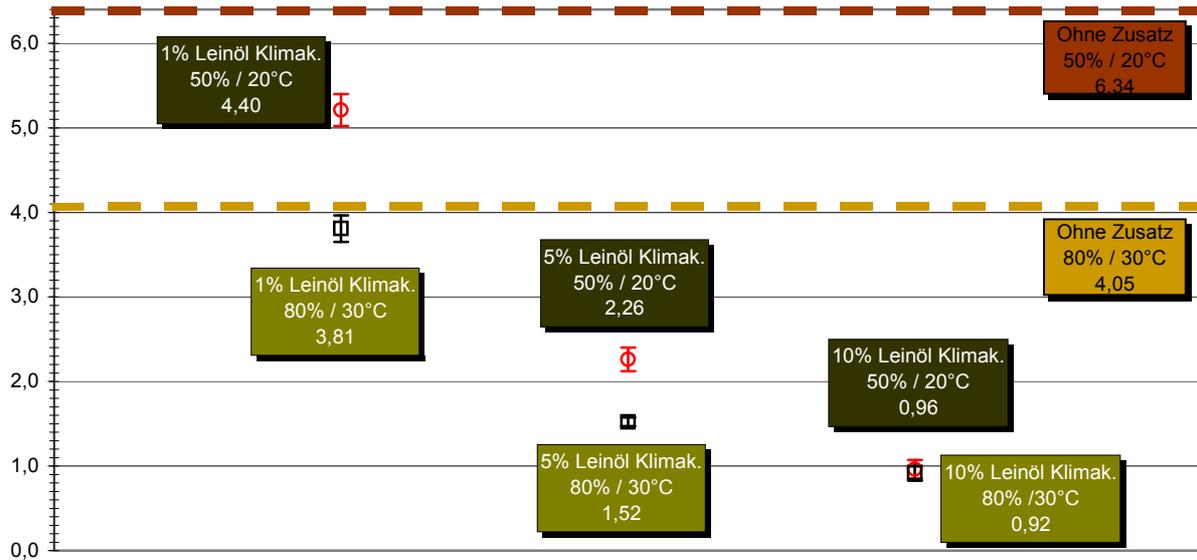


Abbildung 4.37 Leinölfirnis - Druckfestigkeit in [N/mm<sup>2</sup>]

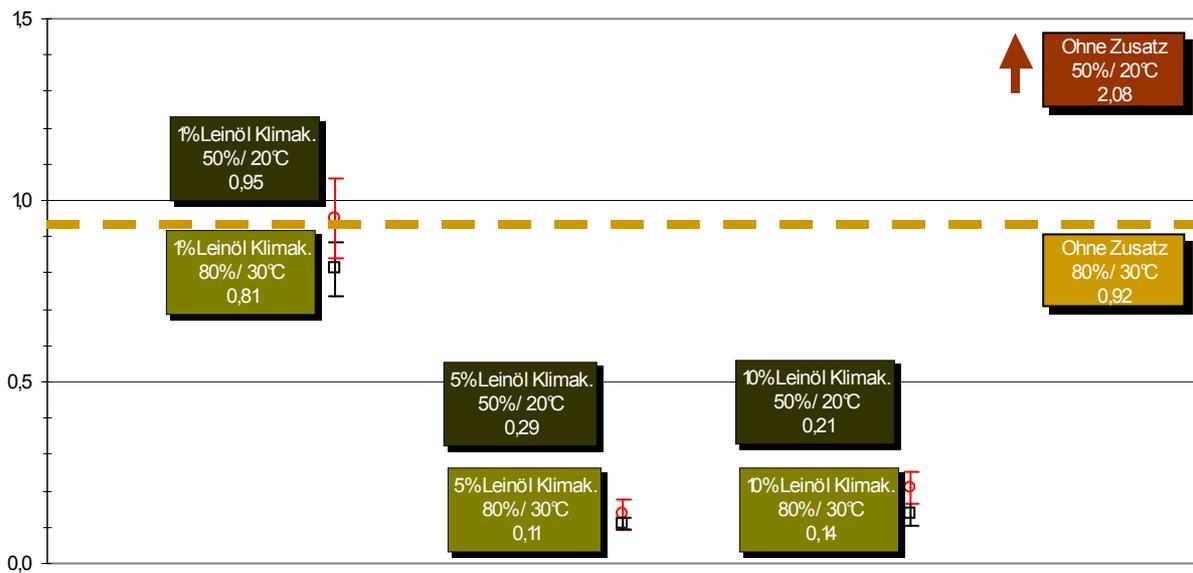


Abbildung 4.38 Leinölfirnis - Biegezugfestigkeit in [N/mm<sup>2</sup>]

Tabelle 4.3 Vergleich Leinölfirnis mit Grundmaterial

Material	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	[%] des Grundmaterials	Zu-/Abnahme [%]	Biegezugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	[%] des Grundmaterials	Zu-/Abnahme [%]
<b>1% Leinölfirnis – Klimakammer 20°C / 50 %</b>	5,21	77,8	<b>-22,2</b>	0,95	42,9	<b>-57,1</b>

<b>1% Leinölfirnis – Klimakammer 30°C / 80 %</b>	3,81	94,1	<b>-5,9</b>	0,81	88,6	<b>-11,4</b>
<b>5% Leinölfirnis – Klimakammer 20°C / 50 %</b>	2,26	33,8	<b>-66,2</b>	0,14	6,1	<b>-93,9</b>
<b>5% Leinölfirnis – Klimakammer 30°C / 80 %</b>	1,52	37,6	<b>-62,4</b>	0,11	11,9	<b>-88,1</b>
<b>10% Leinölfirnis – Klimakammer 20°C / 50 %</b>	0,96	23,8	<b>-76,2</b>	0,21	22,8	<b>-77,2</b>
<b>10% Leinölfirnis – Klimakammer 30°C / 80 %</b>	0,92	22,6	<b>-77,4</b>	0,14	14,8	<b>-85,2</b>

Die 10 % Probekörper waren nach dem Ausschalen sehr weich und formbar, was das transportieren und lagern erschwerte. Die Form der Probekörper blieb nicht genau erhalten. Schon die Serie mit 1 % Leinölfirniszusatz zeigte bei der Biegezug- und Druckfestigkeit schlechtere Werte als das Grundmaterial. Nur die feucht gelagerten Probekörper dieser Serie waren nur knapp unterhalb der Werte des Lehms ohne Zusatzstoffe. Bei den 5 % und 10 % Serien kann man erkennen, dass je mehr Leinölfirnis zugemischt wurde, umso niedriger vielen die Druck- und Biegezugfestigkeitsergebnisse aus.

Für eine Steigerung der Druck- und Biegezugfestigkeitswerte ist Leinölfirnis aufgrund dieser Versuchsreihe nicht zu empfehlen. Eventuell könnten in einer neuen Versuchsreihe geringere Prozentsätze untersucht werden.

## 4.5 Vorversuche mit Harnstoff und Ammoniak als Zusatzstoff

In der Literatur finden sich häufig Angaben zum Zusatz von Urin. Er soll die Geschmeidigkeit verbessern, die Rissbildung reduzieren, die Festigkeit und die Witterungsbeständigkeit erhöhen (siehe auch Kapitel 2.6.2.2).

Für die Versuche erschien es nicht ratsam mit Urin zu arbeiten. Grund dafür war ein Ekelgefühl und auch die Annahme, dass spätere Käufer durch einen Urinzusatz im Produkt abgeschreckt werden könnten. So wurden alternativ die Hauptbestandteile von Urin (Harnstoff und Ammoniak) als Zusatzmittel gewählt. Harnstoff und Ammoniak wurden in

unterschiedlichen Anteilen (5 % Harnstoff + 5% Ammoniak, 5 %Harnstoff + 1 % Ammoniak, 10 % Harnstoff + 0,1 % Ammoniak) dem Lehm zugesetzt.

Die Ergebnisse der Feuchte- und Schwindmessungen sind in den folgenden Abbildungen dargestellt. (Abbildung 4.39, Abbildung 4.40, Abbildung 4.41, Abbildung 4.42, Abbildung 4.43, Abbildung 4.44, Abbildung 4.45). Es ist der Vergleich Grundmaterial (grauer Balken) mit dem Gemisch aus Grundmaterial plus Harnstoff + Ammoniakzusatz (farbiger Balken) mit den beiden Klimalagerungen (trocken – 50% / 20°C und feucht – 80% / 30°C) dargestellt.

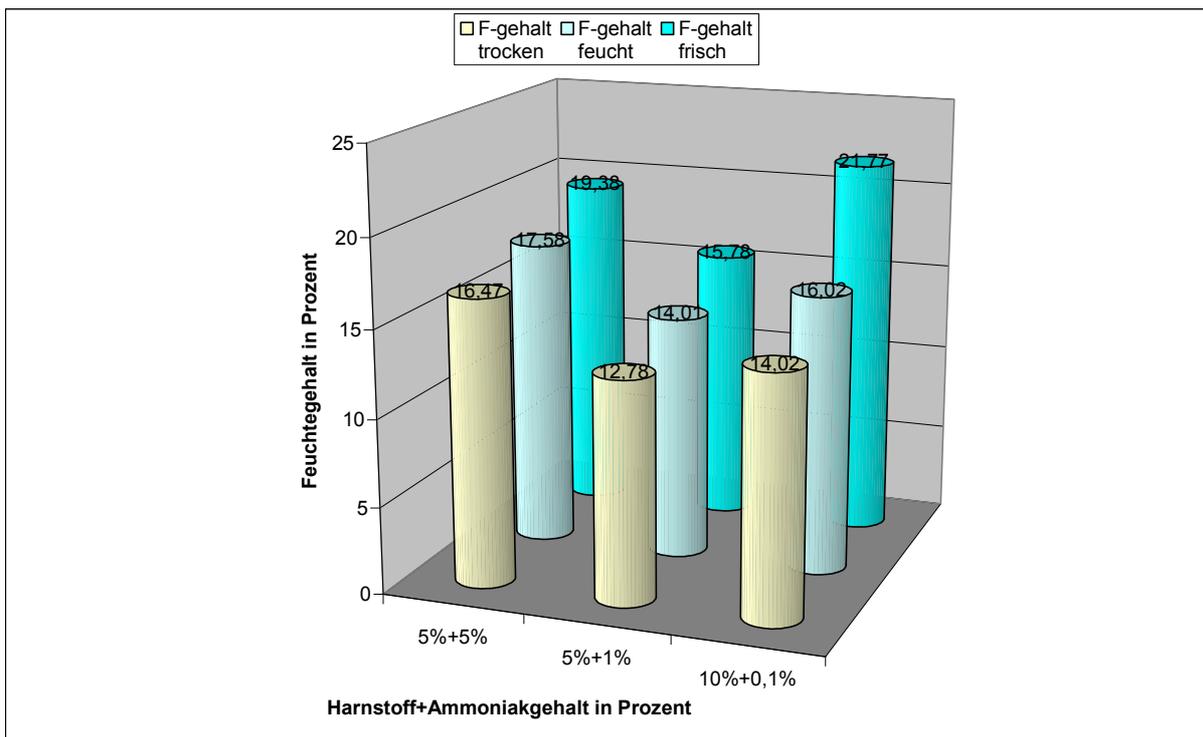


Abbildung 4.39 Harnstoff + Ammoniak - Feuchtegehalt in Prozent

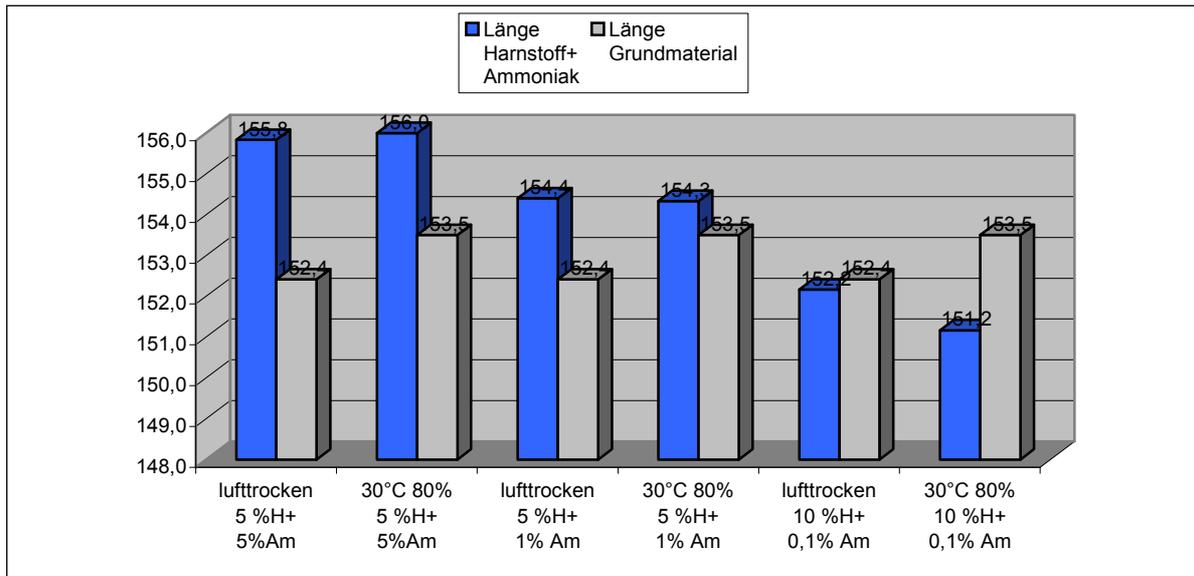


Abbildung 4.40 Harnstoff + Ammoniak - Länge in [mm]

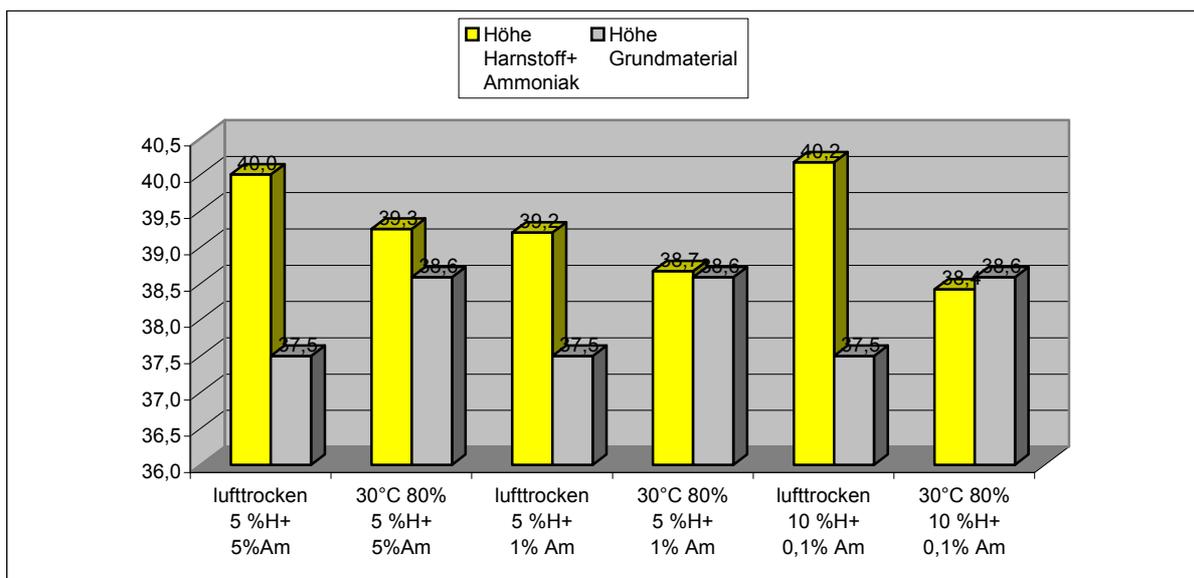


Abbildung 4.41 Harnstoff + Ammoniak - Höhe in [mm]

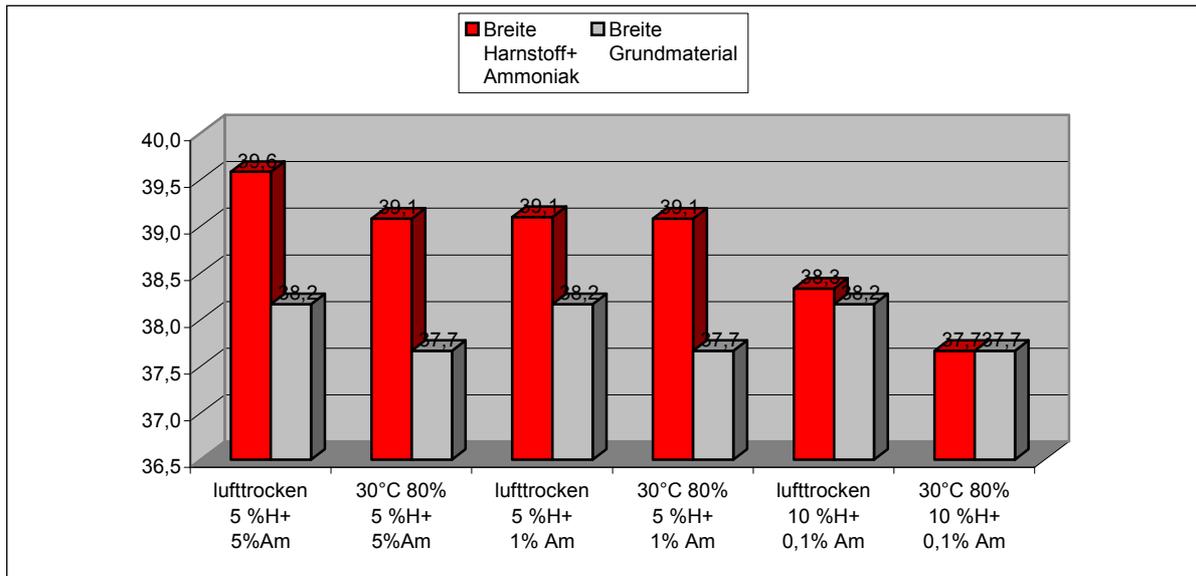


Abbildung 4.42 Harnstoff + Ammoniak - Breite in [mm]

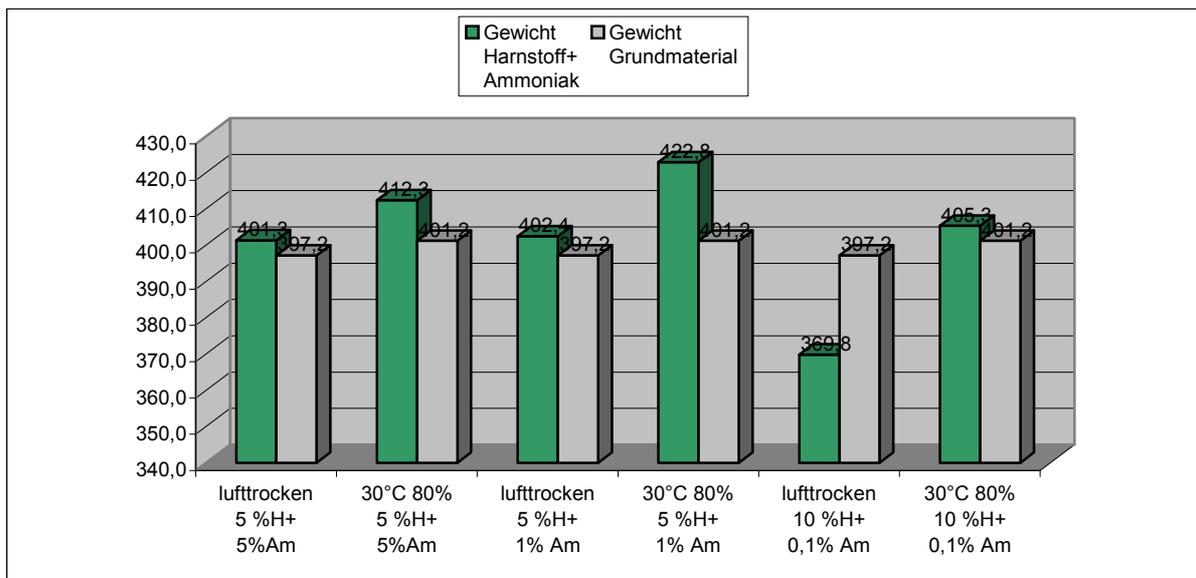


Abbildung 4.43 Harnstoff + Ammoniak - Gewicht in [g]

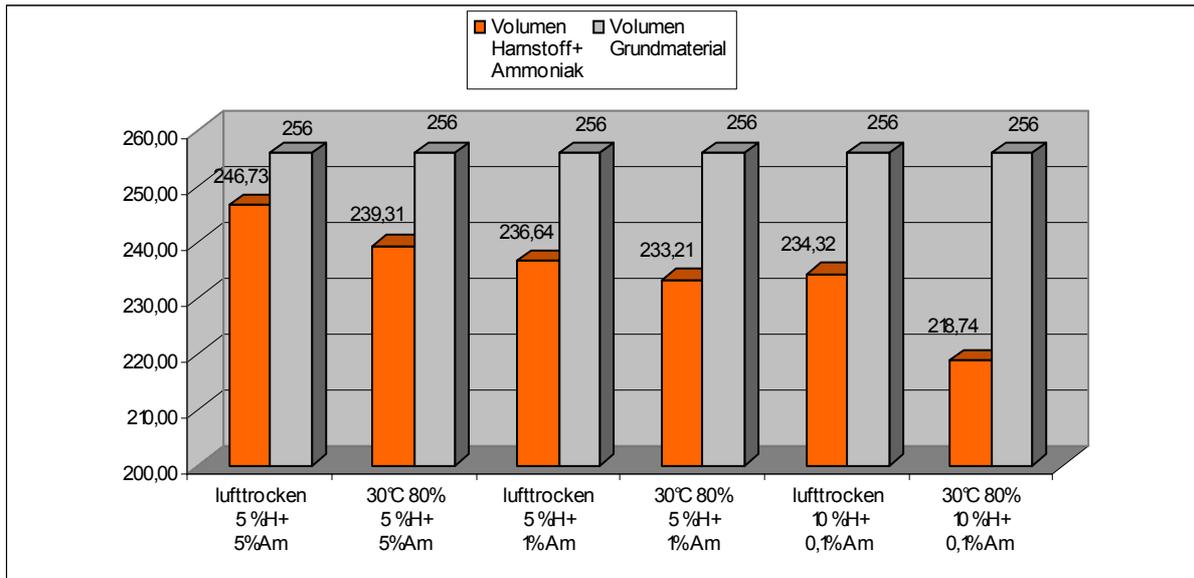


Abbildung 4.44 Harnstoff + Ammoniak - Volumen in [cm<sup>3</sup>]

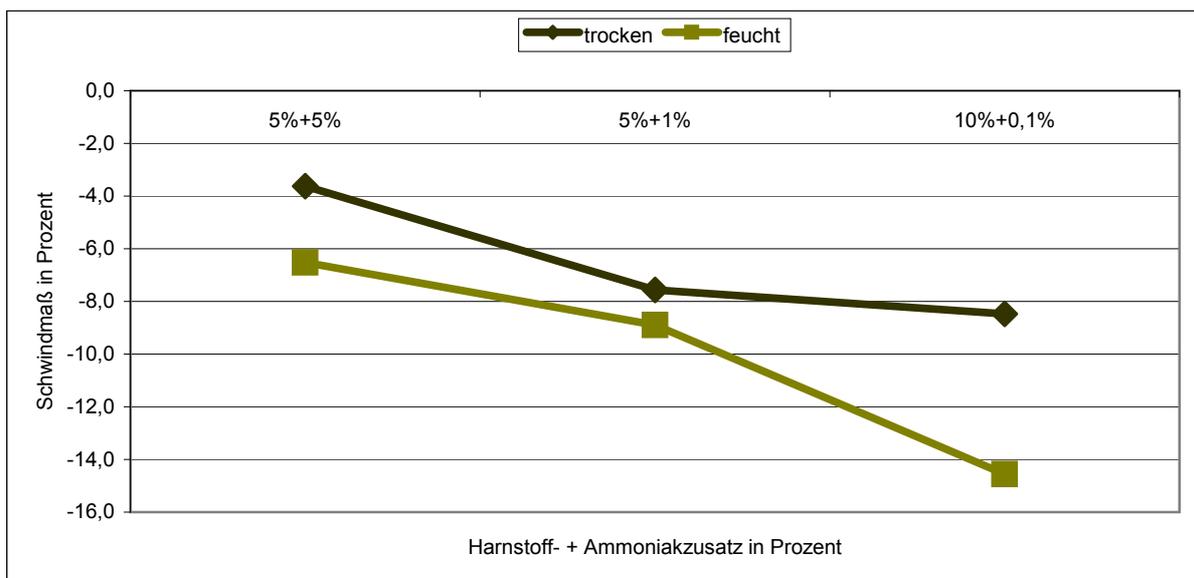


Abbildung 4.45 Harnstoff + Ammoniak - Schwindmaß in Prozent

Die Abmessungen der Probekörper veränderten sich nach dem Lagern unterschiedlich. Die Längenabmessungen der Serien mit 5 % Harnstoff + 5 % Ammoniak waren um ca. 3 mm größer als die Grundmaterialserien. Auch die Serien mit 5 % Harnstoff + 1 % Ammoniak blieben geringfügig größer. Die Probekörper mit 10 % Harnstoff + 0,1 % Ammoniak wurden etwas kürzer. Die Höhenabmessungen der trockenen Serien wiesen fast kein Schrumpfen

auf, die der feuchten Serien schrumpften in etwa gleich wie das Grundmaterial. Bei den Abmessungen der Breite wurden bei 5 % Harnstoff + 5 % Ammoniak und 5 % Harnstoff + 1 % Ammoniak weniger Schrumpfen festgestellt und bei 10 % Harnstoff + 0,1 % Ammoniak ein gleiches Ausmaß wie beim Lehm ohne Zusatzstoff. Die Probekörper mit und ohne Zusatzstoff waren in etwa gleich schwer. Ausnahmen bildeten die Serie 10 % Harnstoff + 0,1 Ammoniak / lufttrocken mit +28 g und die Serie 5 % Harnstoff + 1 % Ammoniak / feucht mit + 22 g.

In den folgenden Tabellen und Abbildungen sind die Ergebnisse der Festigkeitsuntersuchungen (Beschreibung siehe Kapitel 3) dargestellt. (Abbildung 4.46, Abbildung 4.47, Tabelle 4.4)

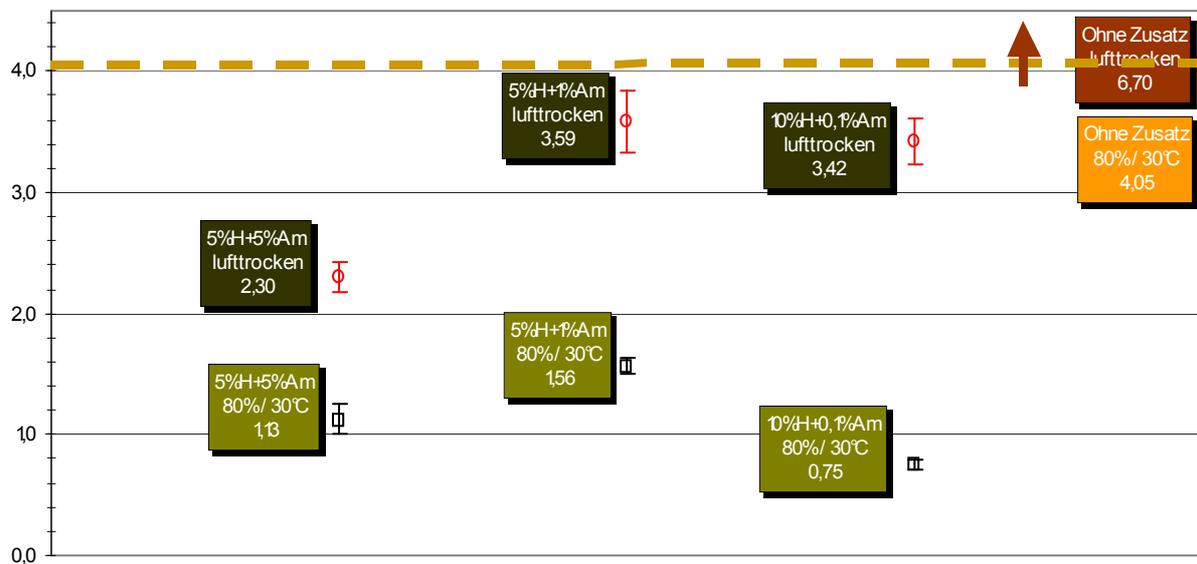


Abbildung 4.46 Harnstoff + Ammoniak - Druckfestigkeit in [N/mm<sup>2</sup>]

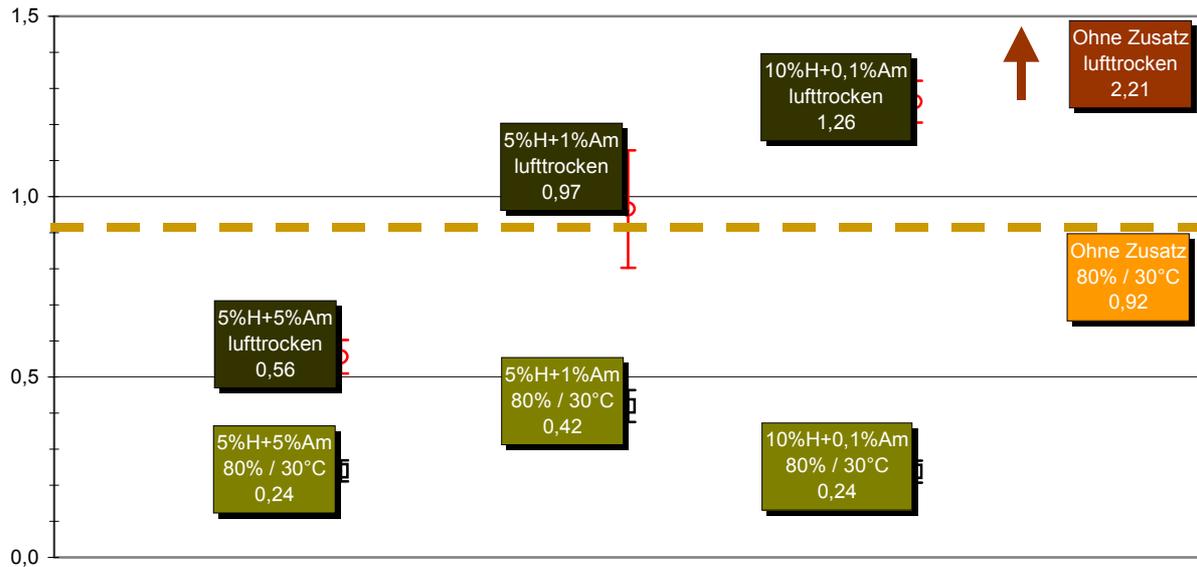


Abbildung 4.47 Harnstoff + Ammoniak - Biegezugfestigkeit in [N/mm<sup>2</sup>]

Tabelle 4.4 Vergleich Harnstoff + Ammoniak mit Grundmaterial

Material	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	[%] des Grundmaterials	Zu-/Abnahme [%]	Biegezugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	[%] des Grundmaterials	Zu-/Abnahme [%]
<b>5% H + 5% A lufttrocken</b>	2,30	34,4	<b>-65,6</b>	0,56	25,1	<b>-74,9</b>
<b>5% H + 5% A – Klimakammer 30°C / 80 %</b>	1,13	27,9	<b>-72,1</b>	0,24	26,2	<b>-73,8</b>
<b>5% H + 1% A lufttrocken</b>	3,59	53,5	<b>-46,5</b>	0,97	43,6	<b>-56,4</b>
<b>5% H + 1% A – Klimakammer 30°C / 80 %</b>	1,56	38,7	<b>-61,3</b>	0,42	45,8	<b>-54,2</b>
<b>10% H + 0,1% A lufttrocken</b>	3,42	84,6	<b>-15,4</b>	1,26	138,0	<b>38,0</b>
<b>10% H + 0,1% A – Klimakammer 30°C / 80 %</b>	0,75	18,6	<b>-81,4</b>	0,24	26,0	<b>-74,0</b>

Der stechend scharfe Geruch von Ammoniak machte das Arbeiten (Mischen und Stampfen) sehr unangenehm. Beim Trocknen entstanden Ausblühungen, sehr starke bei der Probekörperserie mit 10 % Harnstoff + 0,1 % Ammoniak (siehe Abbildung 4.48 und

Abbildung 4.49). Bei den Druck- und Biegezugfestigkeitswerten blieben die Probekörper mit Zusatz weit unterhalb der Werte des Grundmaterials (etwa 50 – 75 %). Einzige Ausnahme bildeten die Probekörper der Serie mit 10 % Harnstoff + 0,1 % Ammoniak nach dem Lufttrocknen. Hier wurde die Biegezugfestigkeit um 38 % gesteigert und die Druckfestigkeit lag nur kapp unterhalb der Grundmaterialwerte (15 %).



Abbildung 4.48 Serie Harnstoff 10 % + Ammoniak 0,1 % - Ausblühungen



Abbildung 4.49 Ein gebrochener Probekörper der 10%H + 0,1% Am - Serie mit Ausblühungen

Für eine Steigerung der Festigkeitswerte eignet sich dieser Zusatz nicht. Eventuell könnten noch andere Kombinationen untersucht werden, was aber aufgrund der Dämpfe nicht sinnvoll erscheint. Auch die Ausblühungen stellen die Verwendbarkeit für Bauzwecke in Frage.

## 4.6 Vorversuche mit Zement als Zusatzstoff

Laut Literatur eignet sich Zement vor allem für die Stabilisierung von tonarmen Lehmen. Für eine ausreichende Vermischung wird empfohlen den Zement zuerst mit dem trockenen Lehm (am besten gemahlen) zu mischen.

Die Vorteile einer Zementzugabe werden in einer Erhöhung der Festigkeit, Wasserbeständigkeit und in einer verkürzten Trockenzeit gesehen (siehe auch Kapitel 2.6.1.1).

Für die Versuche mit Zementzusatz wurde gemahlener Lehm verwendet. (wie auch für die anderen Versuche) Es wurden Probekörper mit 5 %, 10 % und 20 % Zementzusatz hergestellt. Im Folgenden sind die Ergebnisse der Feuchte- und Schwinduntersuchungen in grafischer Form angeführt (Abbildung 4.50, Abbildung 4.51, Abbildung 4.52, Abbildung 4.53, Abbildung 4.54, Abbildung 4.55, Abbildung 4.56). Es ist der Vergleich Grundmaterial (grauer

Balken) mit dem Gemisch aus Grundmaterial plus Zementzusatz (farbiger Balken) mit den beiden Klimalagerungen (trocken – 50% / 20°C und feucht – 80% / 30°C) dargestellt.

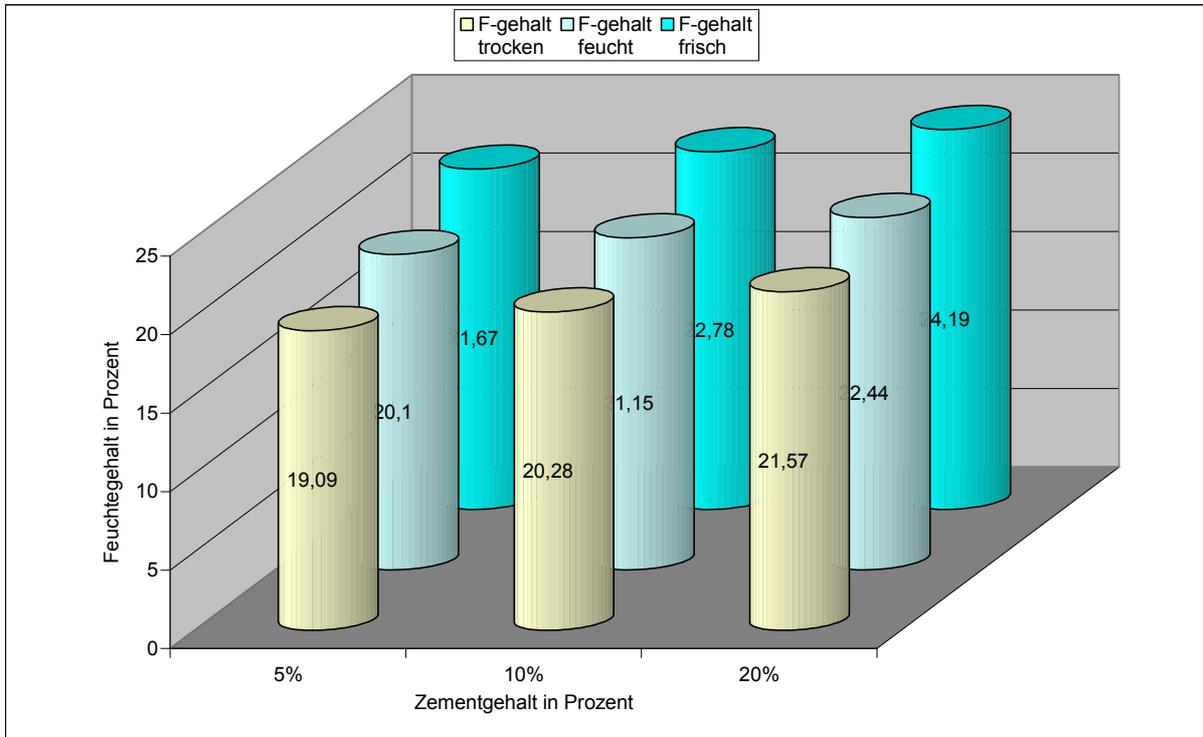


Abbildung 4.50 Zement - Feuchtegehalt in Prozent

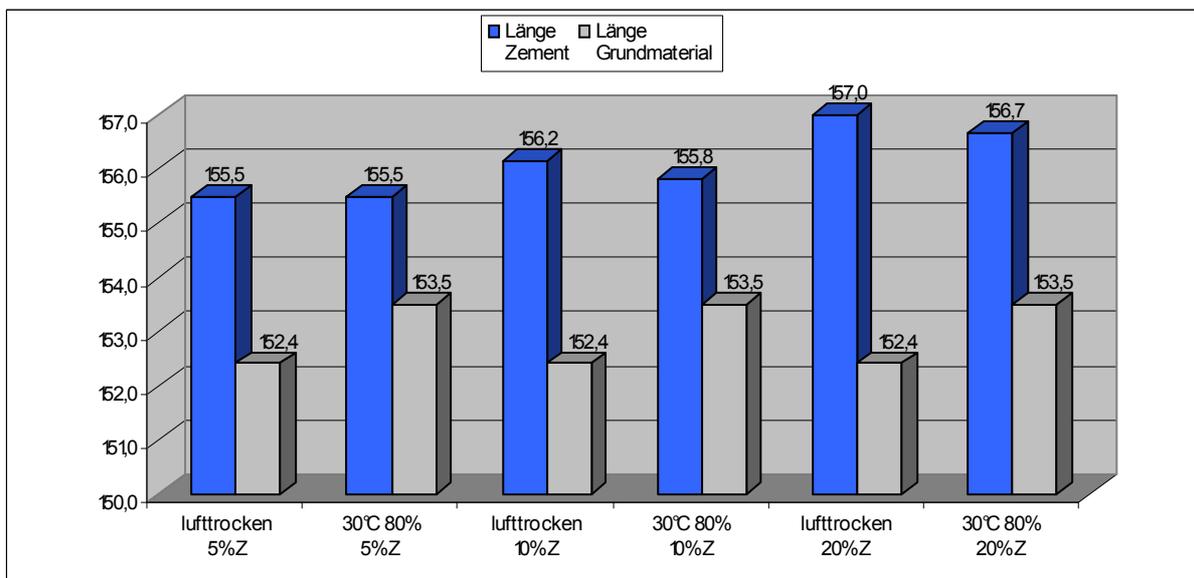


Abbildung 4.51 Zement - Länge in [mm]

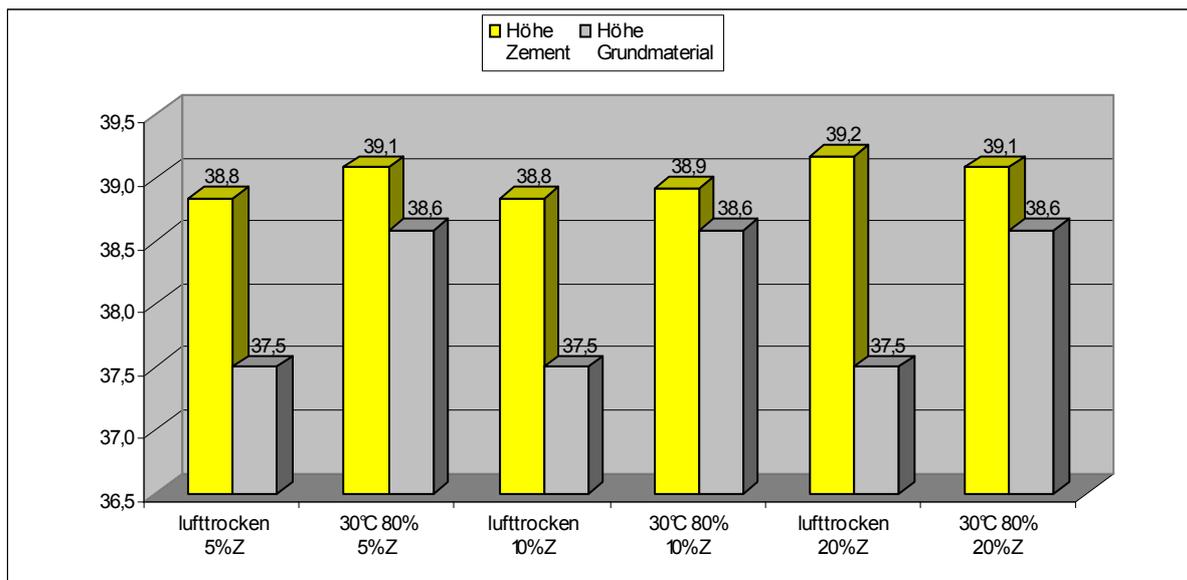


Abbildung 4.52 Zement - Höhe in [mm]

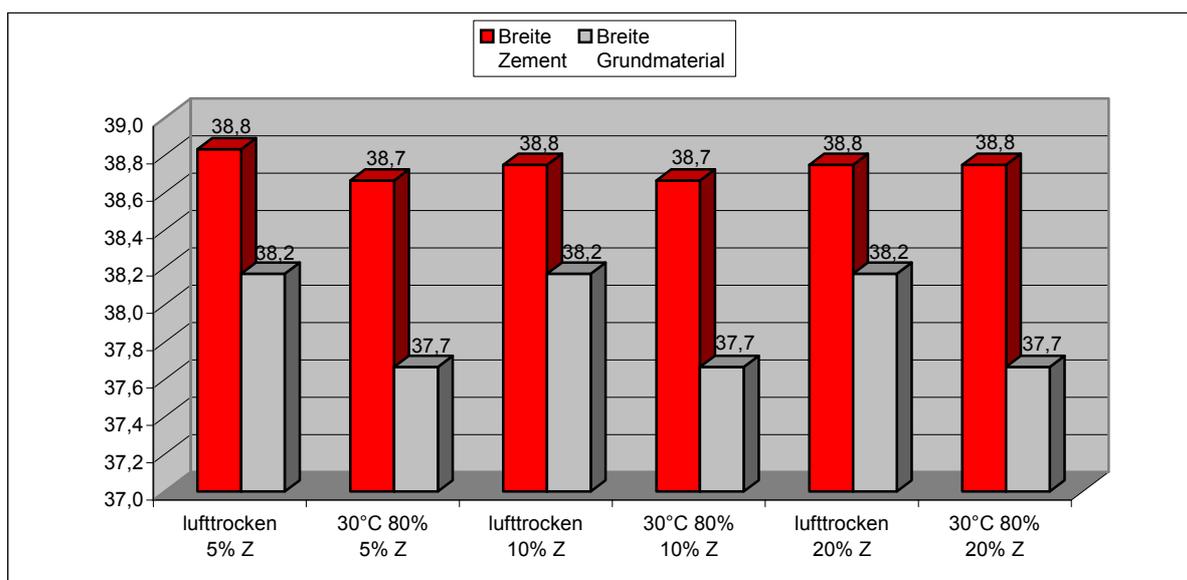


Abbildung 4.53 Zement - Breite in [mm]

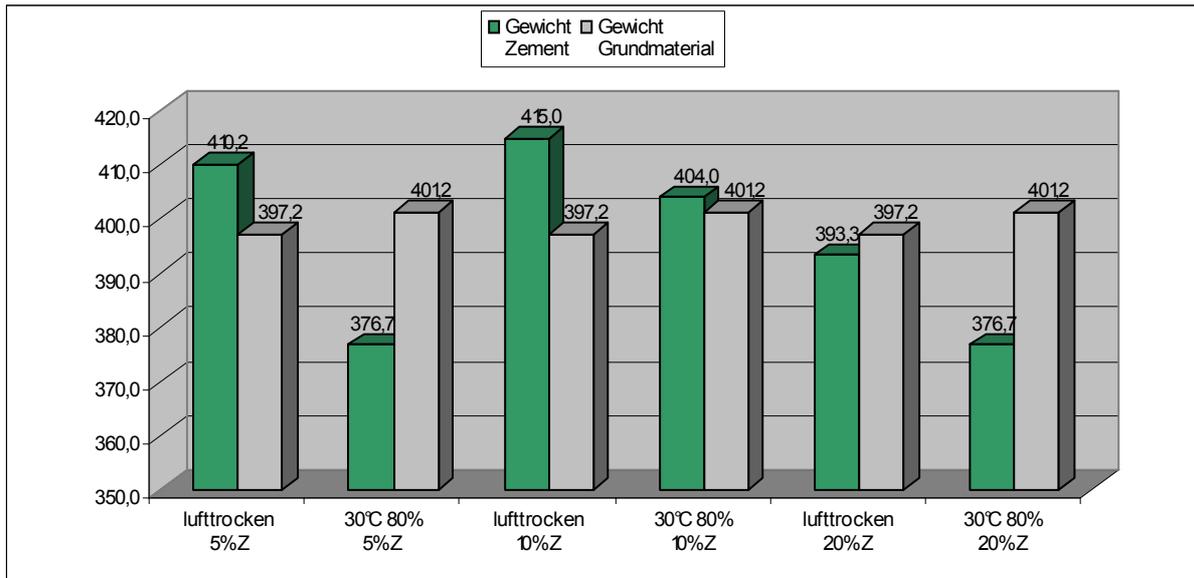


Abbildung 4.54 Zement - Gewicht in [g]

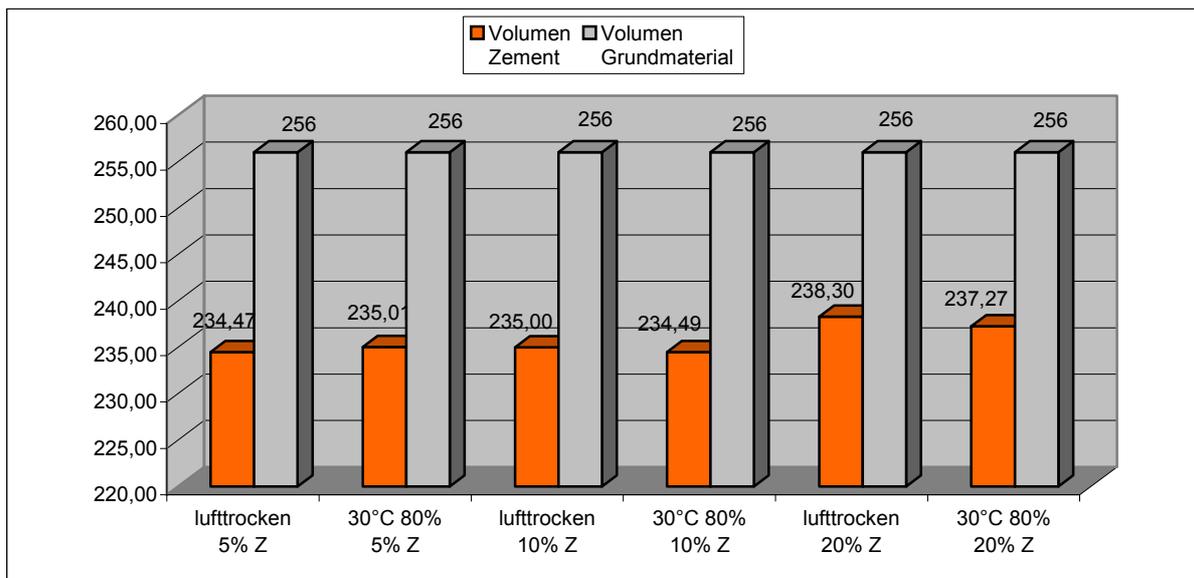


Abbildung 4.55 Zement - Volumen in [cm<sup>3</sup>]

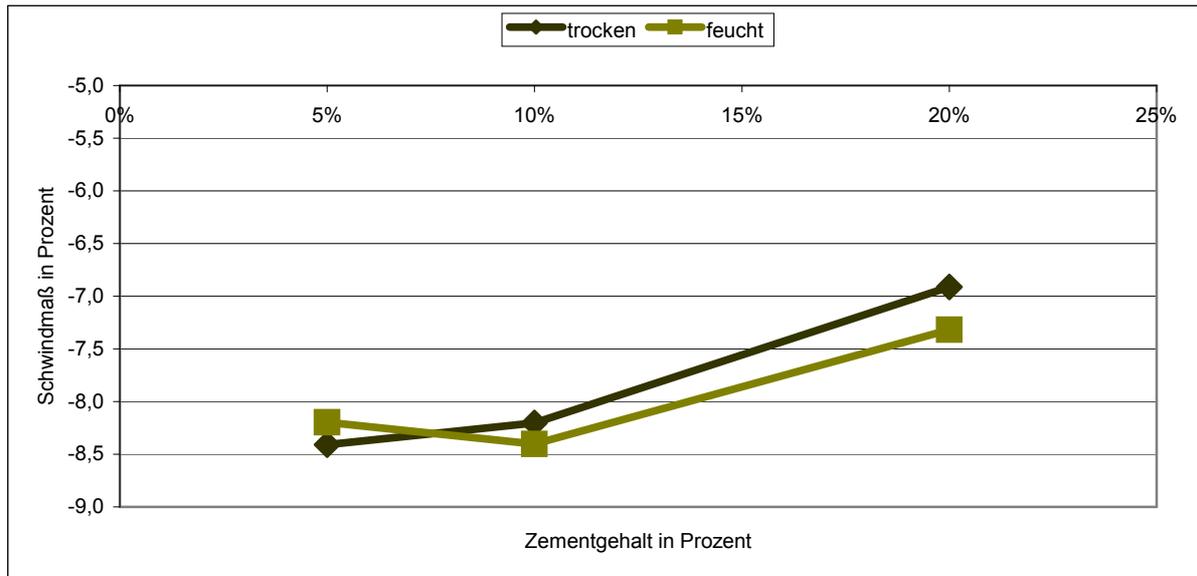


Abbildung 4.56 Zement - Schwindmaß in Prozent

Die Längenänderungen der Probekörper mit Zementzusatz fiel weit niedriger aus als die der Probekörper ohne Zusatz. Speziell bei den trockenen Serien kam es zu einem weit geringeren Schwindausmaß. Gewichtsmäßig waren die trockenen Proben mit Zusatz tendenziell schwerer als der Lehm ohne Zusatz (außer die Serie mit 20 % Zusatz). Im Gegensatz dazu waren die feuchten Serien mit Zusatz geringfügig leichter als die ohne Zusatz.

In den folgenden Tabellen und Grafiken sind die Ergebnisse der Festigkeitsuntersuchungen (Beschreibung siehe Kapitel 3) dargestellt (Abbildung 4.57, Abbildung 4.58, Tabelle 4.5).

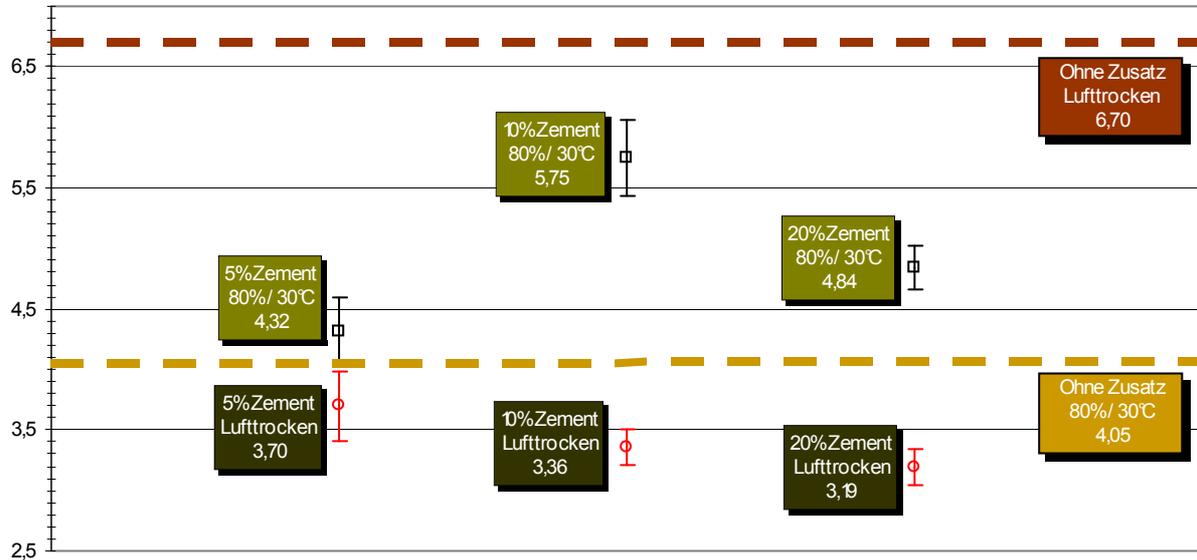


Abbildung 4.57 Zement - Druckfestigkeit in [N/mm<sup>2</sup>]

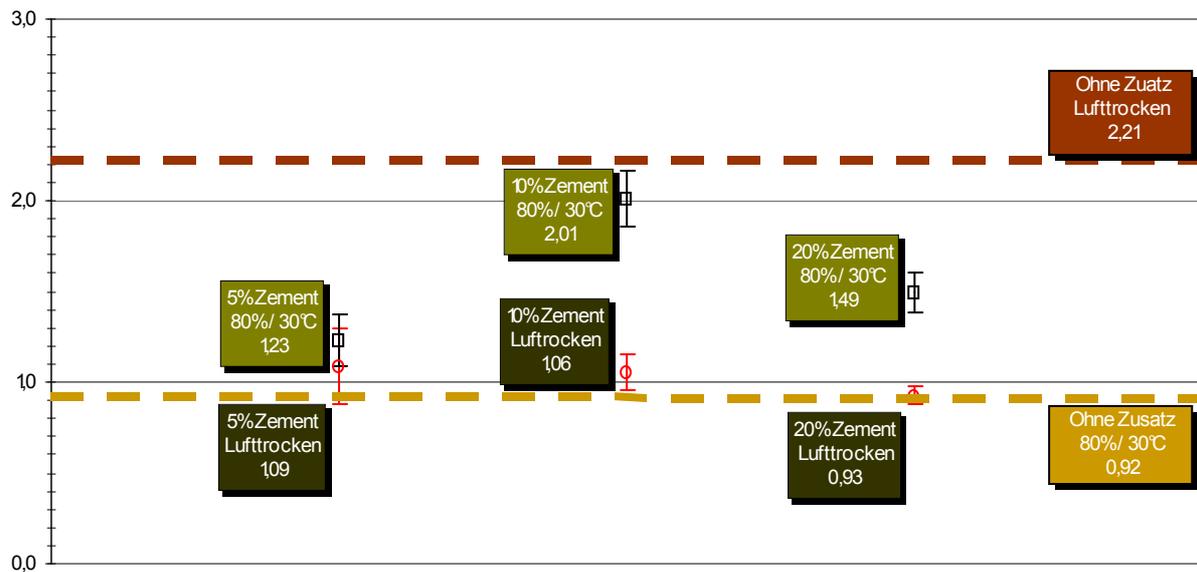


Abbildung 4.58 Zement - Biegezugfestigkeit in [N/mm<sup>2</sup>]

Tabelle 4.5 Vergleich Zement mit Grundmaterial

<b>Material</b>	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	[%] des Grundmaterials	<b>Zu-/Abnahme [%]</b>	Biegezugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	[%] des Grundmaterials	<b>Zu-/Abnahme [%]</b>
<b>5% Zement - Lufttrocken</b>	3,70	55,2	<b>-44,8</b>	1,09	49,1	<b>-50,9</b>
<b>5% Zement - Klimakammer 80% / 30°C</b>	4,32	106,7	<b>6,7</b>	1,23	134,2	<b>34,2</b>
<b>10% Zement - Lufttrocken</b>	3,36	50,2	<b>-49,8</b>	1,06	47,8	<b>-52,2</b>
<b>10% Zement - Klimakammer 80% / 30°C</b>	5,75	142,1	<b>42,1</b>	2,01	219,7	<b>119,7</b>
<b>20% Zement - Lufttrocken</b>	3,19	47,6	<b>-52,4</b>	0,93	42,1	<b>-57,9</b>
<b>20% Zement - Klimakammer 80% / 30°C</b>	4,84	119,7	<b>19,7</b>	1,49	163,3	<b>63,3</b>

Diese Probekörper (mit Zementzusatz) ließen sich bei der Herstellung gut verarbeiten. Schon beim Ausschalen machten sie einen festen Eindruck.

Bei den luftgetrockneten Probekörpern vielen die Druck- und Biegezugfestigkeitswerte viel schlechter aus als die des Grundmaterials (ca. um 50 %). Grund dafür könnte eine zu kurze Lagerzeit (3 Tage) sein. Hingegen die Werte der feuchten Probekörper eine deutliche Verbesserung der Festigkeitswerte zeigten. Vor allem die Biegezugwerte wurden stark gesteigert (bei 10 % Zementzusatz um knapp 120 %).

Hier ist möglicherweise das eingetreten, was schon bei *Minke* beschrieben wurde: Bei zu rascher Trocknung wird eine geringere Festigkeit erreicht, als wenn die Lehmsteine während der Trocknung abgedeckt werden (*Minke*, S91 /1/). Dagegen spricht allerdings, dass die Probekörper, die zuerst getrocknet und dann im feuchten Klimat gelagert wurden, höhere Festigkeiten erreichten. Das würde eher bedeuten, dass die Endfestigkeit nach 3 Tagen noch nicht erreicht war, was mit den Kenntnissen über die Zementerhärtung übereinstimmt.

Zement bewirkt eindeutig eine Festigkeitssteigerung für das feuchte Klimat. Bei weiteren Versuchen sind die Proben länger, als die hier eingehaltene Lagerung von 3 bzw. 6 Tagen, zu trocknen/lagern und evtl. beim Trocknen abzudecken.

## 4.7 Vorversuche mit Kalk als Zusatzstoff

Die Literaturangaben bezüglich Steigerung der Festigkeit sind unterschiedlich. *Minke* konnte eine Verfestigung (Kurz- und Langzeitverfestigung) beobachten (*Minke*, S.80 /1/).

Andere Autoren beschrieben eine reduzierte Festigkeit durch Kalkzugabe. Auch auf eine reduzierte Bindekraft und Plastizität wird hingewiesen. Baukörper wurden durch Kalkzugabe porös und brüchig, zum Teil verstärkte sich dieser Effekt nach einiger Zeit (siehe auch Kapitel 2.6.1.2).

Für diese Versuchsreihe wurden Prozentsätze von 0,5%, 5%, und 10% Kalkzugabe gewählt. In den folgenden Abbildungen sind die Ergebnisse der Feuchte und Schwindmessungen zusammengefasst (Abbildung 4.59, Abbildung 4.60, Abbildung 4.61, Abbildung 4.62, Abbildung 4.63, Abbildung 4.64, Abbildung 4.65). Es ist der Vergleich Grundmaterial (grauer Balken) mit dem Gemisch aus Grundmaterial plus Kalkzusatz (farbiger Balken) mit den beiden Klimalagerungen (trocken – 50% / 20°C und feucht – 80% / 30°C) dargestellt.

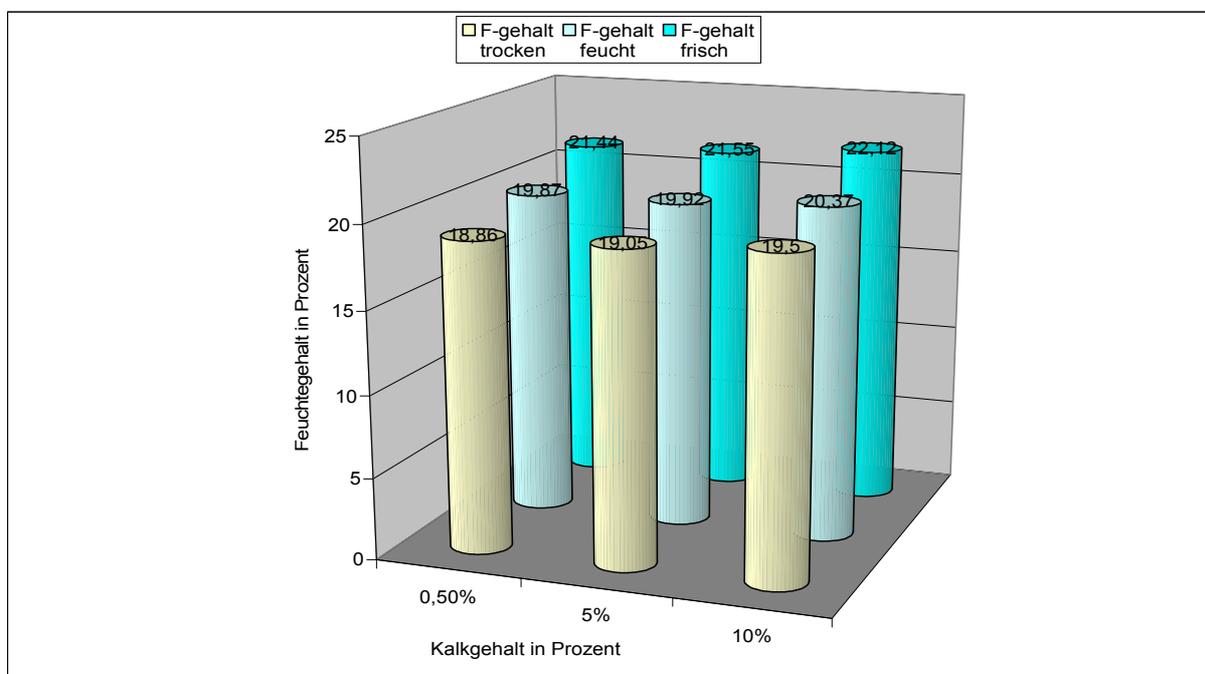


Abbildung 4.59 Kalk - Feuchtegehalt in Prozent

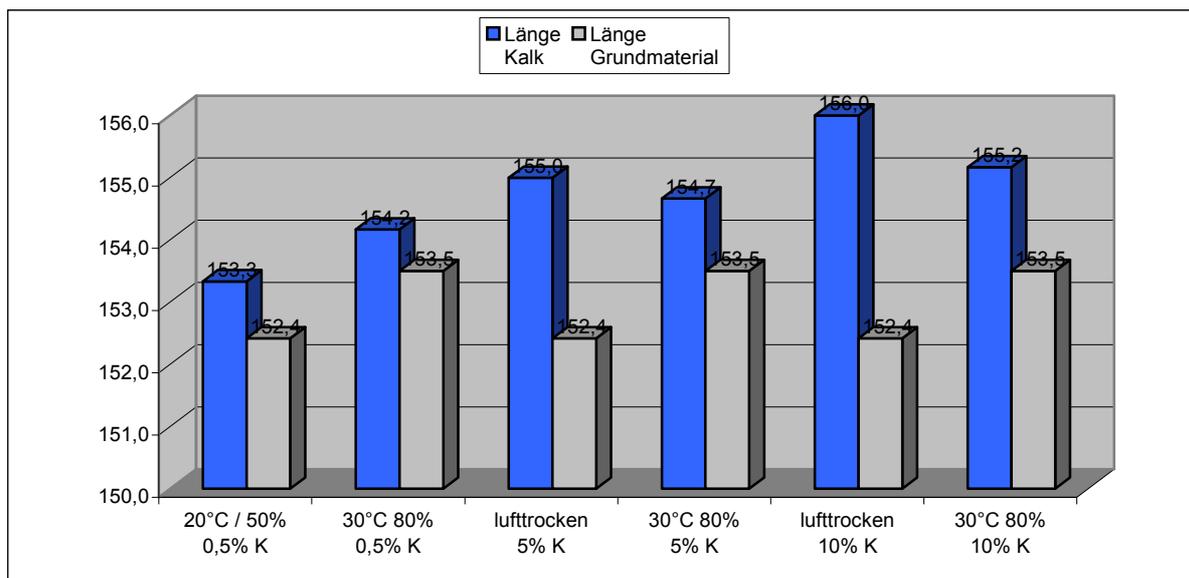


Abbildung 4.60 Kalk - Länge in [mm]

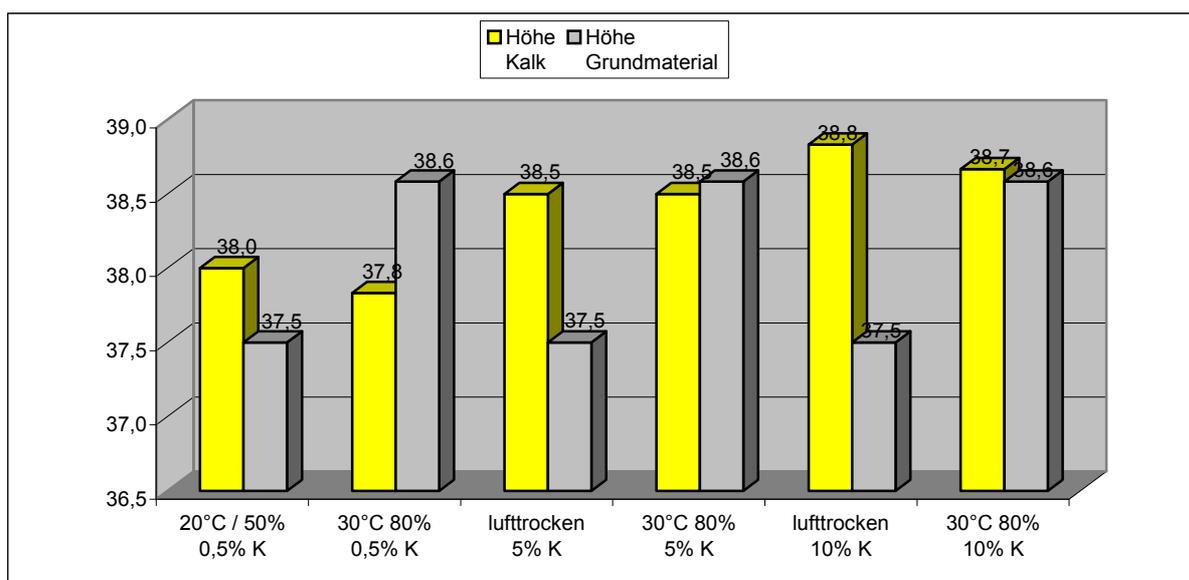


Abbildung 4.61 Kalk - Höhe in [mm]

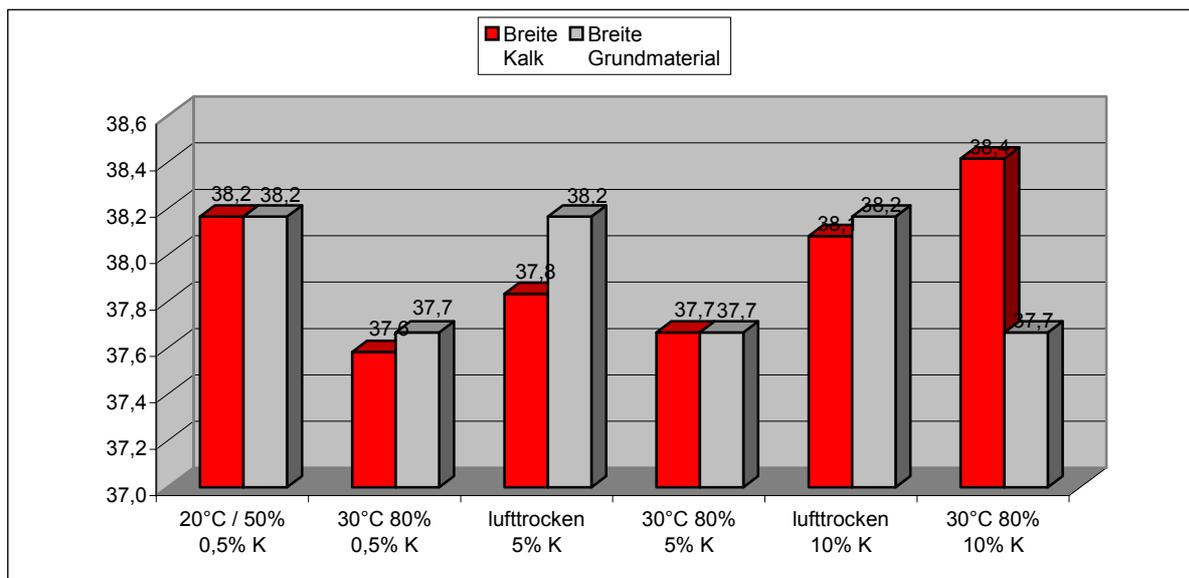


Abbildung 4.62 Kalk - Breite in [mm]

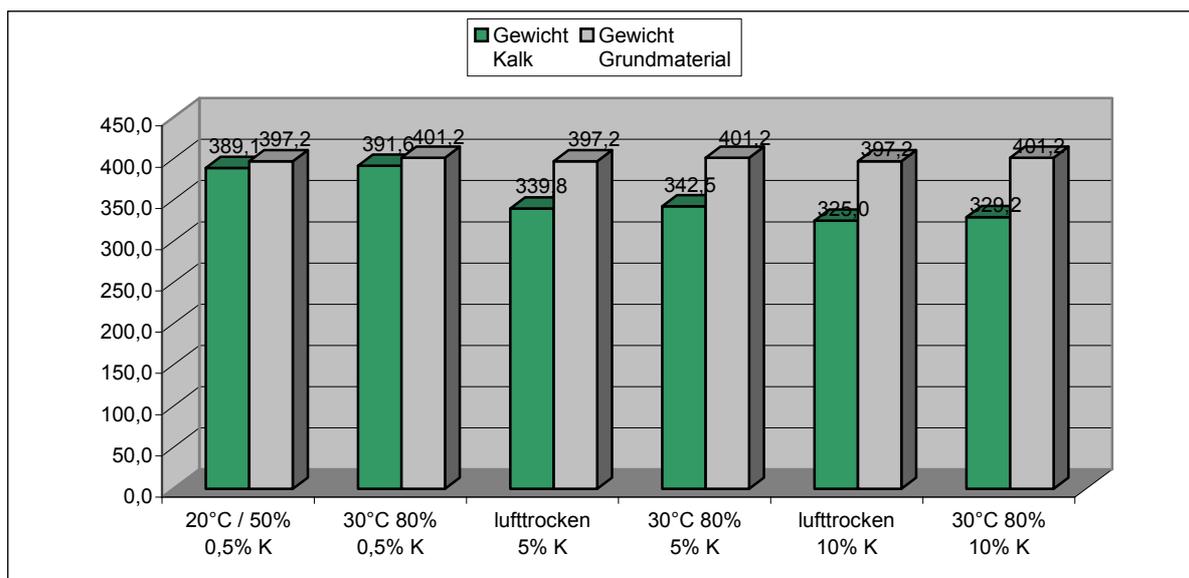


Abbildung 4.63 Kalk - Gewicht in [g]

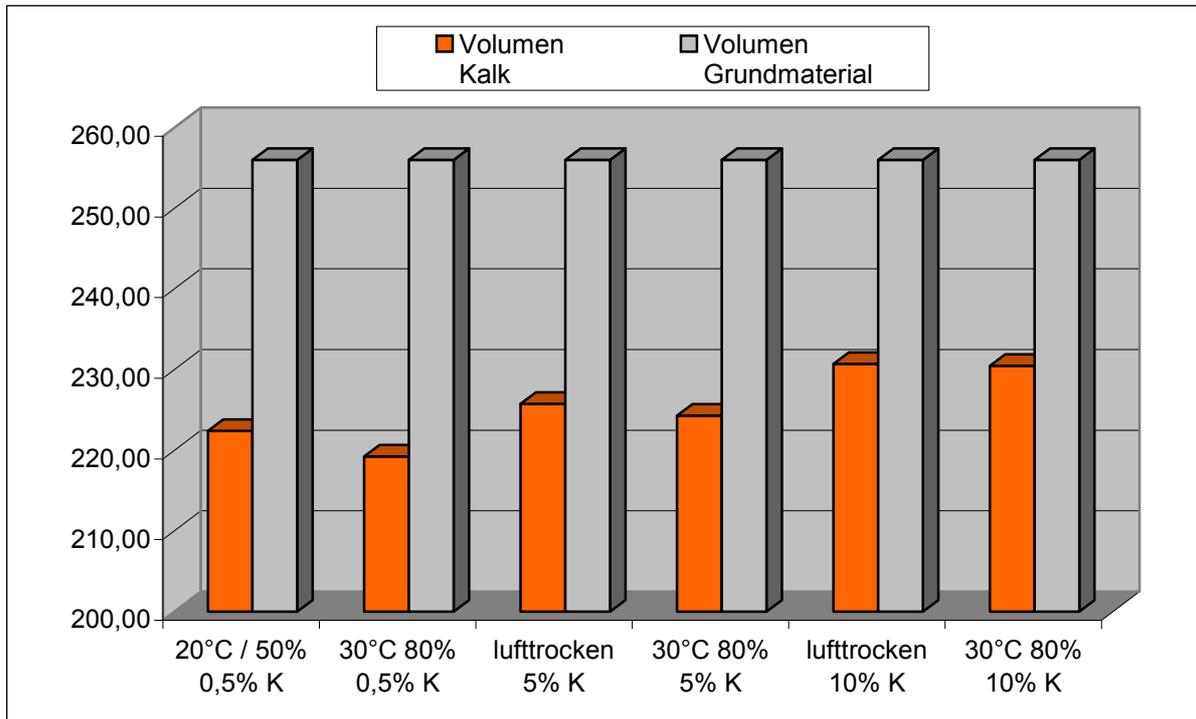


Abbildung 4.64 Kalk - Volumen in [cm<sup>3</sup>]

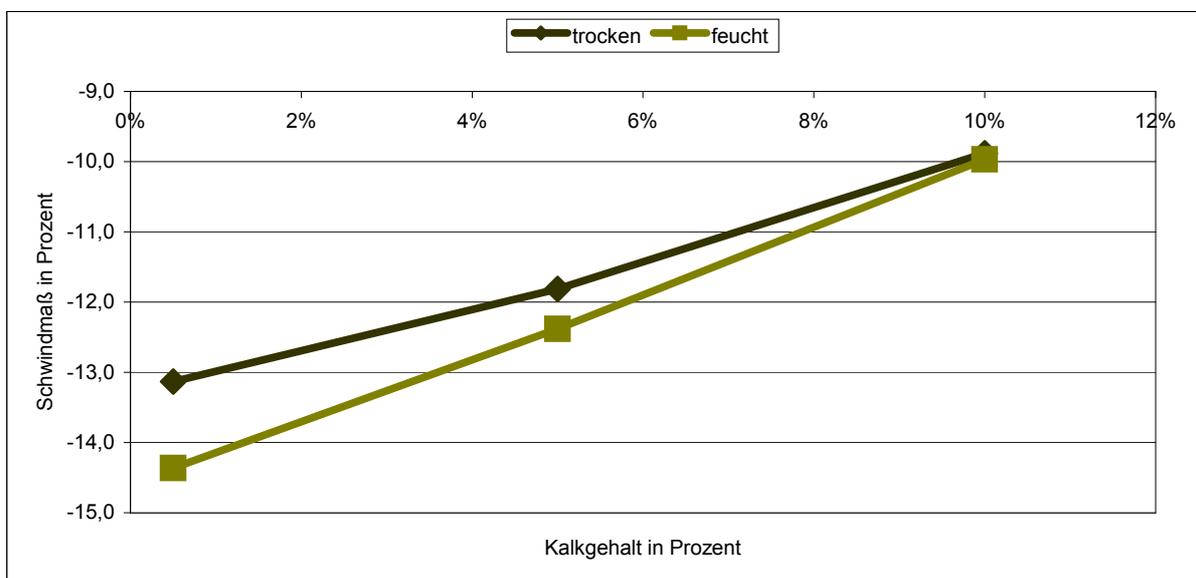


Abbildung 4.65 Kalk – Schwindmaß in Prozent

Bei dem Vergleich der Größenabmessungen viel auf, dass die Unterschiede zwischen trockenen und feuchten Probekörpern nicht so groß war. Im Vergleich zum Lehm ohne Zusatz war die Reduzierung der Abmessungen der Probekörper mit Kalkzusatz etwas

geringer, deutlicher war der Unterschied bei den trockenen Serien. Eine Ausnahme bildeten die Werte der Breiteabmessungen. Hier waren die Serien mit Zusatz eine Spur kleiner, außer die feuchte 10 % Serie. Beim Vergleich des Gewichts kann man erkennen, dass die 0,5 % Serie ca. 10 g, die 5 % Serie ca. 50 g und die 10 % Serie ca. 60 g leichter war als das Grundmaterial.

Das Schwindmaß wird durch steigenden Kalkgehalt reduziert.

In den folgenden Grafiken und Tabellen sind die Ergebnisse der Festigkeitsuntersuchungen (Beschreibung siehe Kapitel 3) dargestellt (Abbildung 4.66, Abbildung 4.67, Tabelle 4.6).

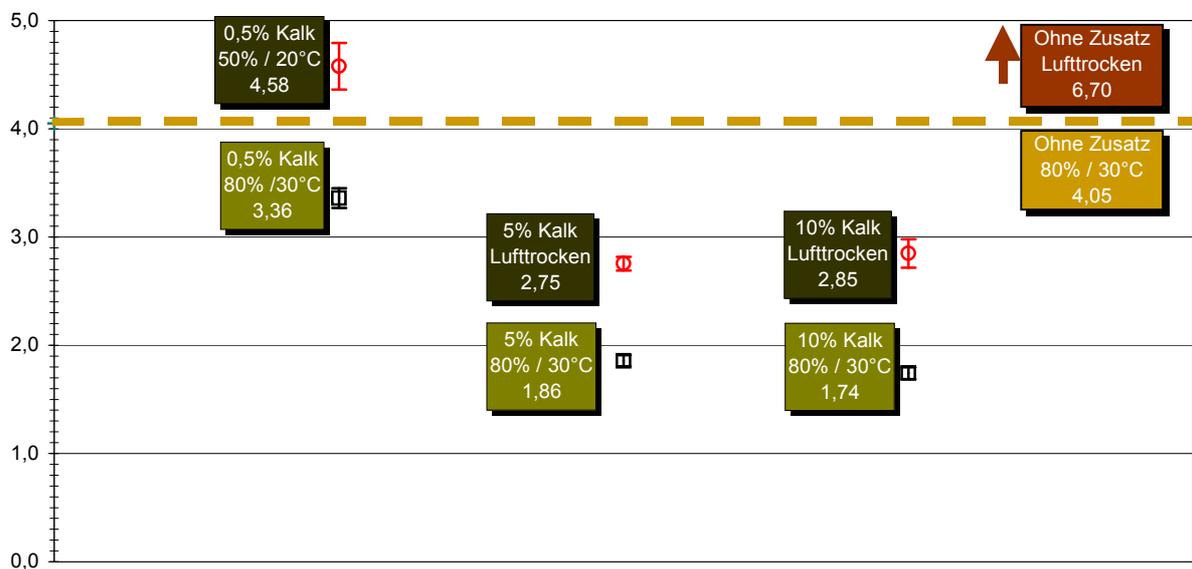


Abbildung 4.66 Kalk - Druckfestigkeit in [N/mm<sup>2</sup>]

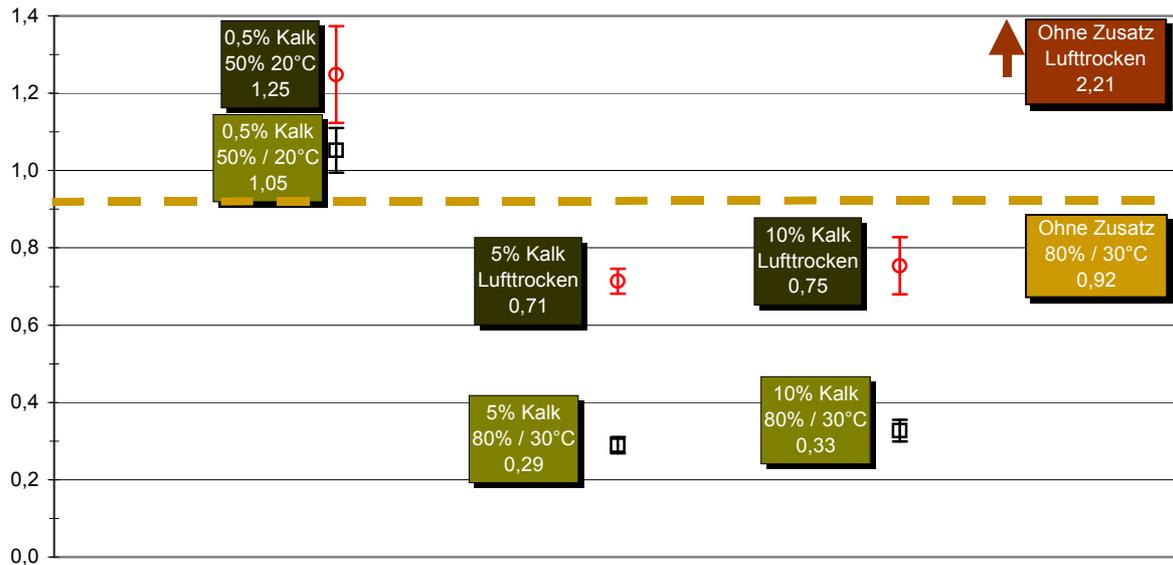


Abbildung 4.67 Kalk - Biegezugfestigkeit in  $[N/mm^2]$

Tabelle 4.6 Vergleich Kalk mit Grundmaterial

Material	Druckfestigkeit $[N/mm^2]$	[%] des Grundmaterials	Zu-/Abnahme [%]	Biegezugfestigkeit $[N/mm^2]$	[%] des Grundmaterials	Zu-/Abnahme [%]
<b>0,5% Kalk Klimak. 50% / 20°C</b>	4,58	72,2	<b>-27,8</b>	1,25	60,0	<b>-40,0</b>
<b>0,5% Kalk Klimak. 80% / 30°C</b>	3,36	83,1	<b>-16,9</b>	1,05	115,0	<b>15,0</b>
<b>5% Kalk - Lufttrocken</b>	2,75	41,1	<b>-58,9</b>	0,71	32,2	<b>-67,8</b>
<b>5% Kalk - 80% / 30°C</b>	1,86	45,9	<b>-54,1</b>	0,29	31,6	<b>-68,4</b>
<b>10% Kalk - Lufttrocken</b>	2,85	42,5	<b>-57,5</b>	0,75	34,0	<b>-66,0</b>
<b>10% Kalk - 80% / 30°C</b>	1,74	43,1	<b>-56,9</b>	0,33	35,7	<b>-64,3</b>

Durch die Kalkzugabe wurde die Lehmischung sehr trocken und bröselig. Das Ausschalen und Transportieren musste sehr vorsichtig durchgeführt werden da die Probekörper leicht zerfielen.

Die Druckfestigkeitswerte der 5% und 10% Serien lagen durchschnittlich 55 % unterhalb der Vergleichswerte von Lehm ohne Zusatz, bei den Biegezugfestigkeitswerten waren es sogar 65 %. Die Festigkeitswerte der 0,5% Serie vielen etwas weniger schlecht aus. Einzig die

Wert der Biegezugfestigkeit bei 0,5% Kalkzusatz. Nur die feuchte 0,5% Serie konnte eine Verbesserung des Biegezugfestigkeitswerts um 15% erzielen.

Aufgrund der durchgeführten Versuche konnte nur eine Verschlechterung (mit Ausnahme des Biegezugfestigkeitswertes der feuchten 0,5% Serie) der Festigkeitswerte festgestellt werden. Bei weiteren Versuchsreihen könnten evtl. geringere Prozentsätze (< 0,5% Kalkzusatz) untersucht werden.

## 4.8 Vorversuche mit Asche als Zusatzstoff

In der Literatur finden sich Angaben zur Verwendung von Asche als Zusatzstoff. Sie soll eine verfestigende Wirkung auf die Lehmstruktur haben. An der TU Wien wurden bereits im Rahmen von Diplomarbeiten Versuche mit Aschezusatz durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass ein Zusatz von 0,1 % bis 2 % Asche eine Steigerung der Festigkeit bewirkte. Höhere Prozentsätze (5% bis 20 %) hingegen reduzierten die Festigkeitswerte. (Siehe auch Kapitel 2.6.4.2)

Für die Versuchsreihe mit Asche (Materialbeschreibung siehe Kapitel 3.4.2) als Zusatzstoff wurden folgende Prozentsätze ausgewählt: 5 % und 10 %. In den folgenden Abbildungen und Tabellen sind die Ergebnisse der Schwind- und Feuchtemessungen dargestellt (Abbildung 4.68, Abbildung 4.69, Abbildung 4.70, Abbildung 4.71, Abbildung 4.72, Abbildung 4.73, Abbildung 4.74). Es ist der Vergleich Grundmaterial (grauer Balken) mit dem Gemisch aus Grundmaterial plus Aschezusatz (farbiger Balken) mit den beiden Klimalagerungen (trocken – 50% / 20°C und feucht – 80% / 30°C) dargestellt.

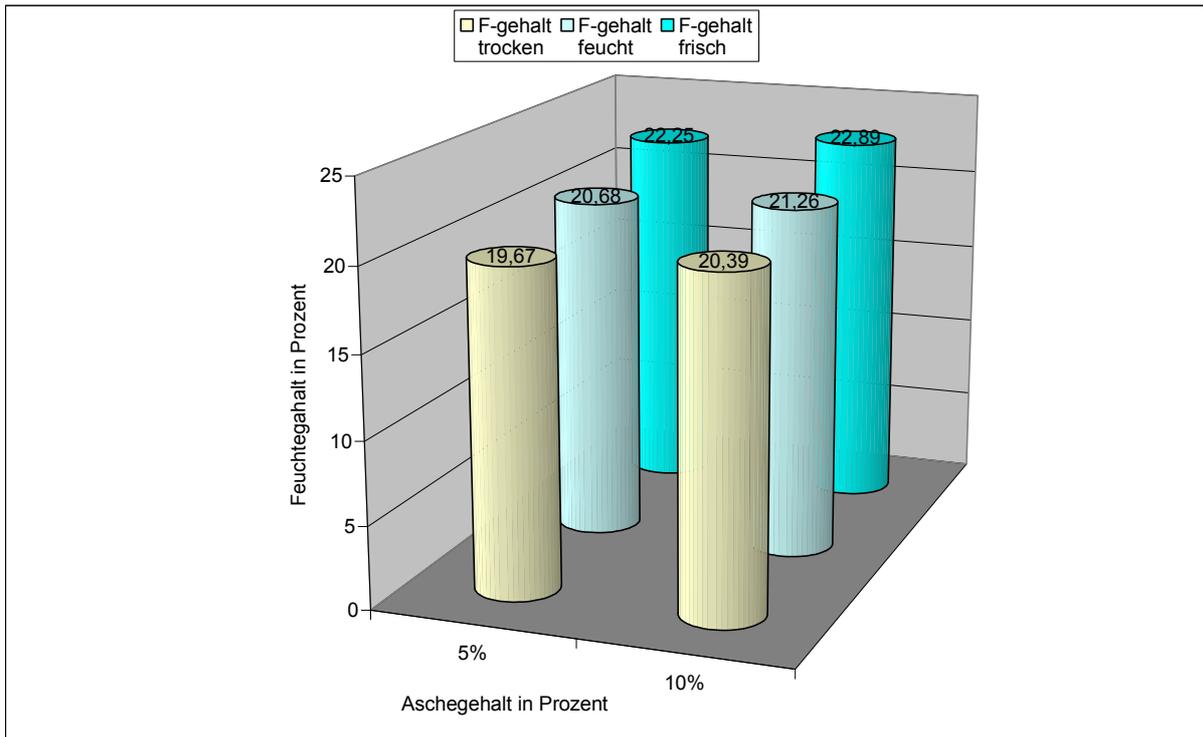


Abbildung 4.68 Asche - Feuchtegehalt in Prozent

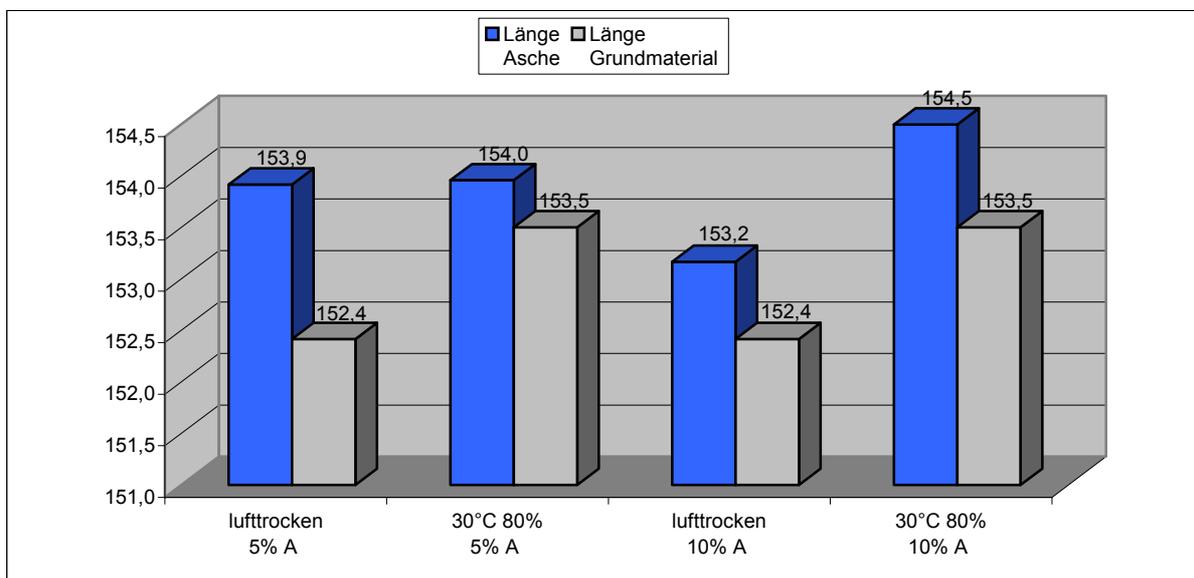


Abbildung 4.69 Asche – Länge in [mm]

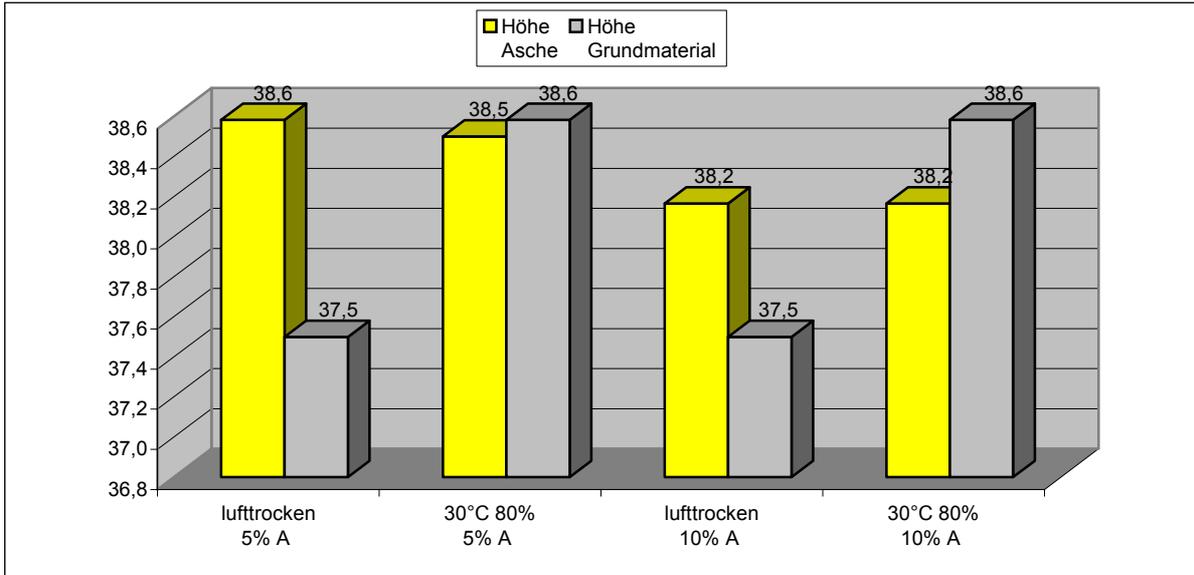


Abbildung 4.70 Asche - Höhe in [mm]

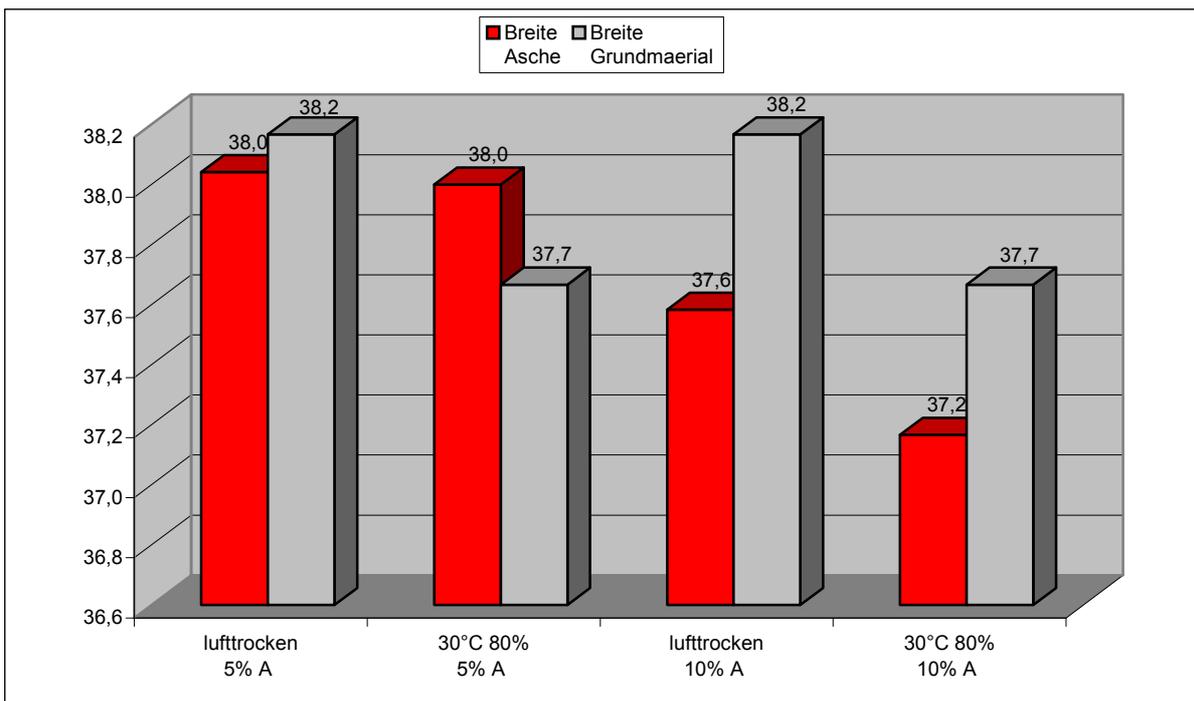


Abbildung 4.71 Asche - Breite in [mm]

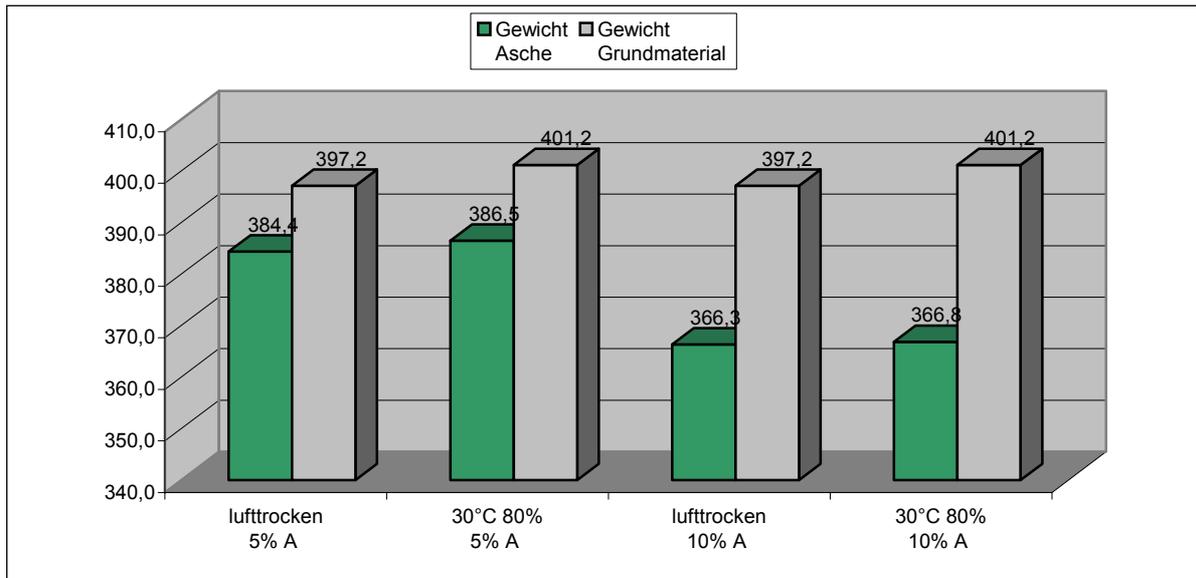


Abbildung 4.72 Asche - Gewicht in [g]

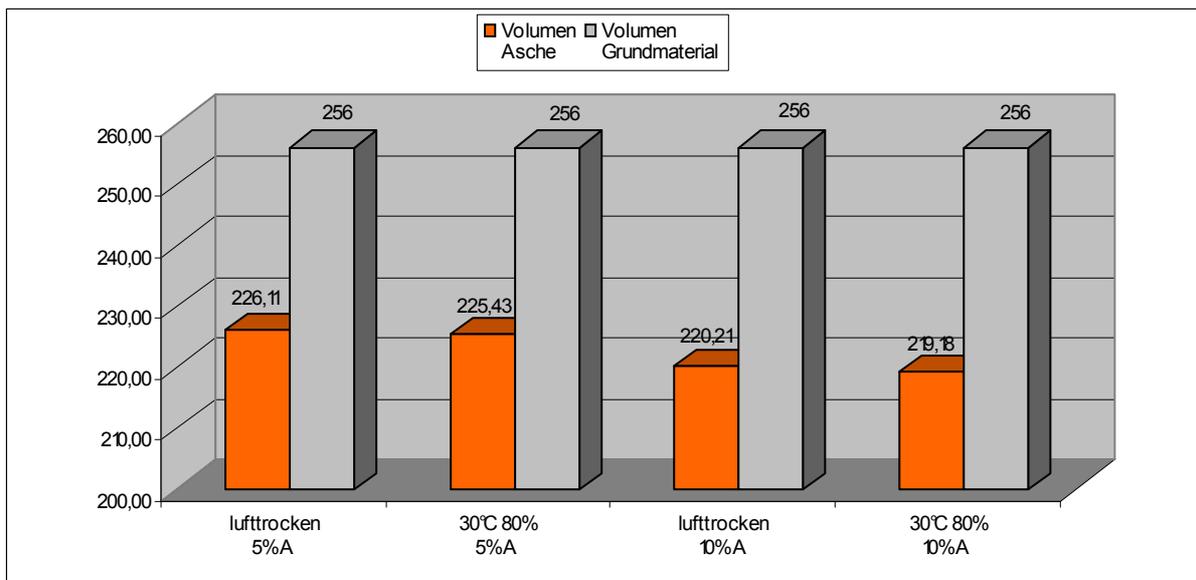


Abbildung 4.73 Asche - Volumen in [cm<sup>3</sup>]

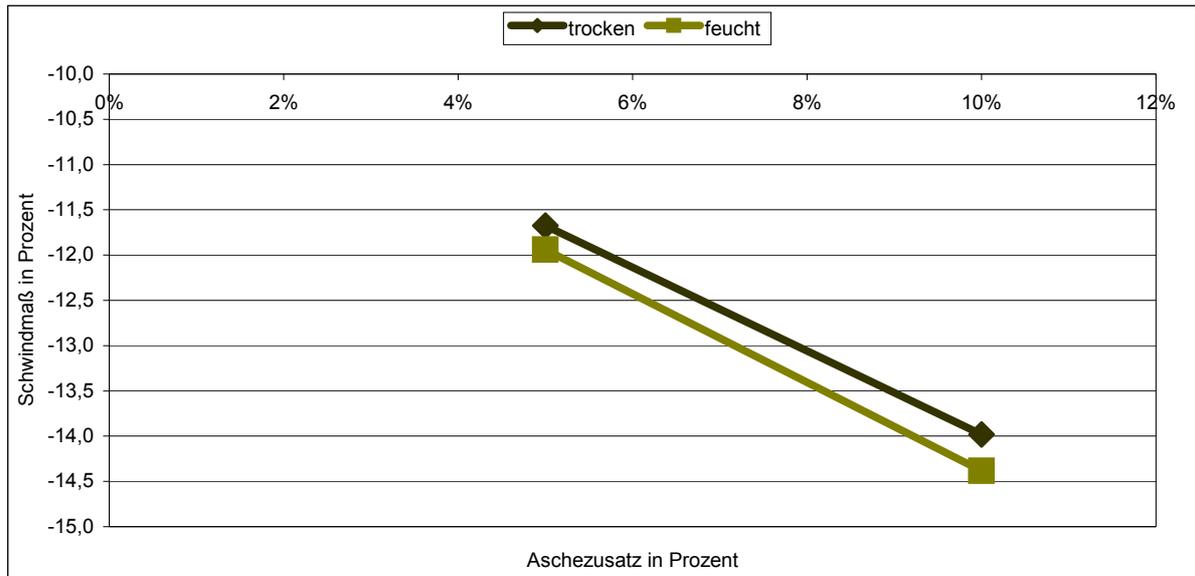


Abbildung 4.74 Asche - Schwindmaß in Prozent

Bei den Längenabmessungen der Serien mit Aschezusatz fiel die Reduktion weit geringer aus als bei den Grundmaterialserien. Die Abmessungen der Höhe nahmen bei den trockenen Ascheserien weniger ab als beim Grundmaterial. Bei den feuchten Probekörpern trat ein umgekehrter Effekt auf, allerdings von geringerer Deutlichkeit. Die Abmessungen der Breite zeigten unterschiedliche Abweichungen von + 0,3 bis – 0,6 mm. Insgesamt verringerte sich das Volumen um ca. 12 – 14 % im Vergleich zum Grundmaterial. Durch den Aschezusatz wurde das Gewicht reduziert. Bei den 5 % - Serien um durchschnittlich 13 g und bei den 10 % - Serien um etwa 32 g. Das Schwindmaß steigt durch einen höheren Aschezusatz.

In den folgenden Grafiken und Tabellen sind die Ergebnisse der Festigkeitsuntersuchungen (Beschreibung siehe Kapitel 3) dargestellt (Abbildung 4.75, Abbildung 4.76, Tabelle 4.7).

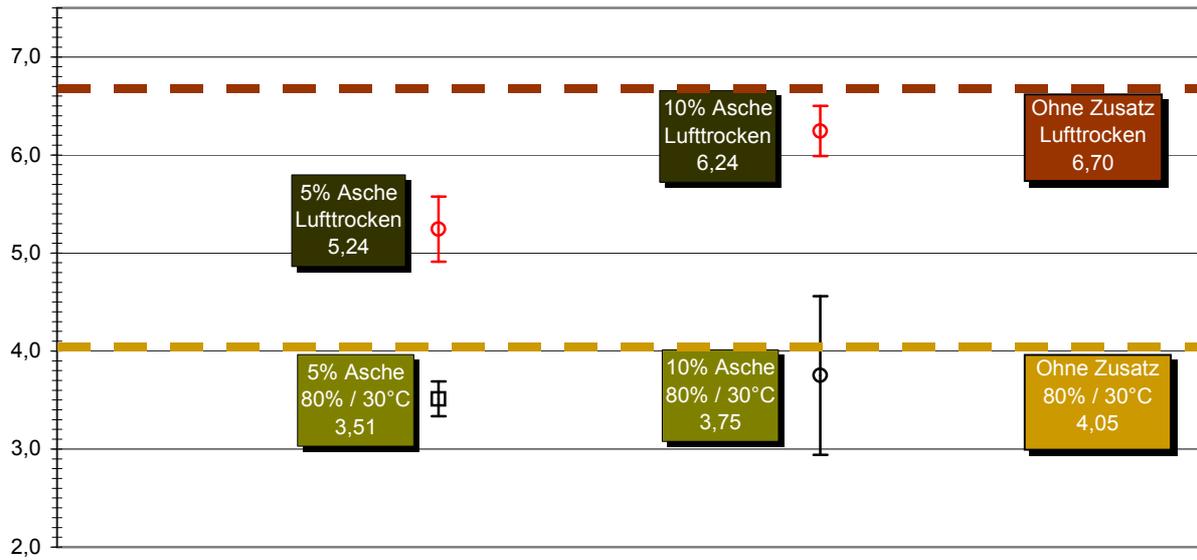


Abbildung 4.75 Asche - Druckfestigkeit in [N/mm<sup>2</sup>]

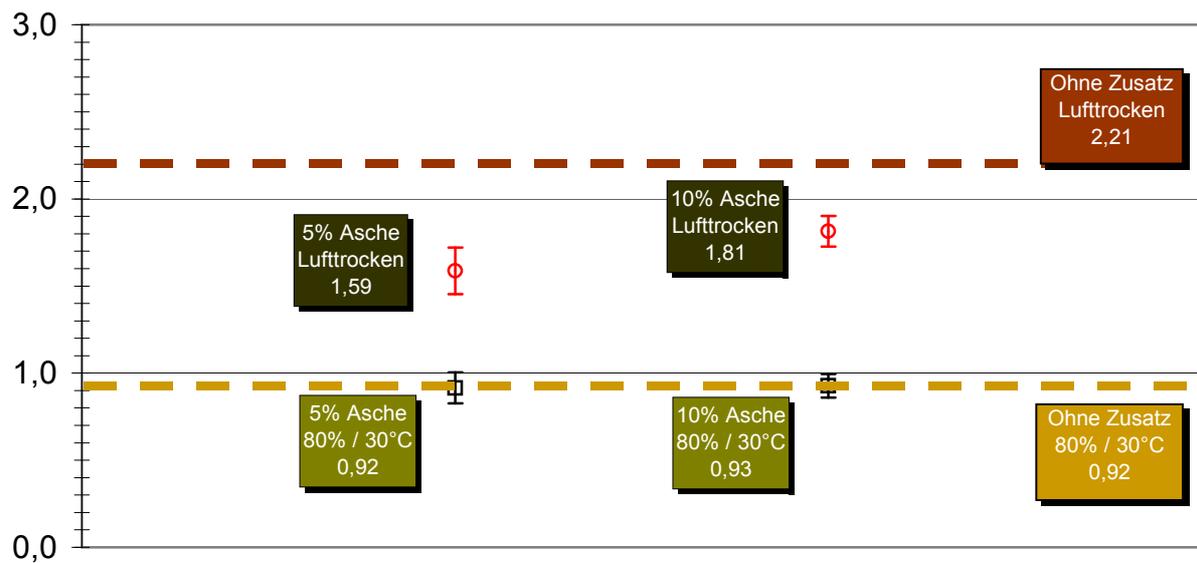


Abbildung 4.76 Asche - Biegezugfestigkeit in [N/mm<sup>2</sup>]

Tabelle 4.7 Vergleich Flugasche mit Grundmaterial

<b>Material</b>	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	[%] des Grundmaterials	<b>Zu-/Abnahme [%]</b>	Biegezugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	[%] des Grundmaterials	<b>Zu-/Abnahme [%]</b>
<b>5% Flugasche -lufttrocken</b>	5,24	78,3	<b>-21,7</b>	1,59	71,7	<b>-28,3</b>
<b>5% Flugasche - 80% / 30°C</b>	3,51	86,8	<b>-13,2</b>	0,92	100,0	<b>0,0</b>
<b>10% Flugasche -lufttrocken</b>	6,24	93,2	<b>-6,8</b>	1,81	82,0	<b>-18,0</b>
<b>10% Flugasche - 80% / 30°C</b>	3,75	92,7	<b>-7,3</b>	0,93	101,3	<b>1,3</b>

Der Zusatz von Asche bewirkte eine Abnahme der Druck- und Biegezugfestigkeitswerte um 7 – 30 %. Die Biegezugfestigkeitswerte der feucht gelagerten Serie zeigten in etwa die gleichen Ergebnisse wie das Grundmaterial.

## 4.9 Zusammenfassung der Vorversuche

Von den untersuchten Zusatzstoffen zeigen nur zwei eine Verbesserung der Festigkeitswerte. Sehr eindeutige Festigkeitssteigerungen sind bei den Versuchen mit Kasein als Zusatzstoff zu erkennen. Hier zeigen sowohl die trocken als auch feuchten Versuchsserien eine Zunahme der Biegezug- und Druckfestigkeit. Bei der 17 % Serie zeigte sich eine Schimmelbildung. Beim Zusatzstoff Zement sehen die Festigkeitssteigerungen weniger deutlich aus. Zwar wurden die Festigkeitswerte der feuchte gelagerten Serien gesteigert (die Werte der feuchten 10% Serie kamen fast an die Trockenwerte des Grundmaterials heran), die Festigkeitswerte der trocken gelagerten Serien fielen jedoch stark ab (die Biegezugfestigkeitswerte auf Höhe der Feuchtwerte des Grundmaterials und die Druckfestigkeitswerte sogar unterhalb dieses Wertes). Von den restlichen untersuchten Zusatzstoffen fielen die Ergebnisse von den Serien mit Harnstoff und Ammoniak insgesamt, mit Wasserglaszusatz 5 %, mit Leinölfirniszusatz 5 und 10 % und mit Kalkzusatz 5 und 10 % weit unterhalb des Grundmaterials. Bei den Serien Aschzusatz 5 %, Leinölfirniszusatz 1 %,

Kalkzusatz 0,5 % und Wasserglaszusatz 1 und 2,5 % waren die Festigkeitswerte nur geringfügig niedriger als die des Grundmaterials. Auffällig zeigte sich auch die Harnstoff (10 %) + Ammoniak (0,1 %) – Serie. Hier traten Ausblühungen während der Trockenzeit auf.

Bei allen Versuchsserien ist ein analoger Verlauf der Biegezug- und Druckfestigkeitswerte erkennbar. Eine einzige Ausnahme bildet hier die Serie mit 17 % Kaseinzusatz. Hier steigt im feuchten Zustand der Biegezugfestigkeitswert weiter an und der Druckfestigkeitswert fällt ab.

In der Abbildung 4.77 ist eine Übersicht über alle untersuchten Druckfestigkeitswerte der einzelnen Zusatzstoffserien und in Abbildung 4.78 eine Übersicht über alle untersuchten Biegezugfestigkeitswerte der einzelnen Zusatzstoffserien dargestellt.

In der Abbildung 4.79 sieht man, dass das Schwindverhalten der einzelnen Zusatzstoffe, auch je nach Prozentzugabe, sehr unterschiedlich ist. Einige Stoffe steigern durch höheren Prozentzusatz das Schwindmaß, andere reduzieren es. Bis auf das Kasein weisen sämtliche Serien ein geringeres Schwindmaß als das Grundmaterial auf.

Das geringste Schwindmaß hat Leinölfirnis 10 % mit etwa 3,5 %. Den höchsten Wert erreicht Kasein 17 % mit ca. 20 % im trockenen Zustand und ca. 42 % im feuchten Zustand.

Auf Grund der höheren erhaltenen Festigkeitswerte der Versuche mit Kasein und Zement als Zusatz wurden diese für eine detailliertere Untersuchung ausgewählt. Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Probekörper mit Kaseinzusatz dargestellt und erläutert. Die Resultate der Untersuchungen mit Zementzusatz sind in der Diplomarbeit von *Kozek /56/* abgebildet und erklärt.

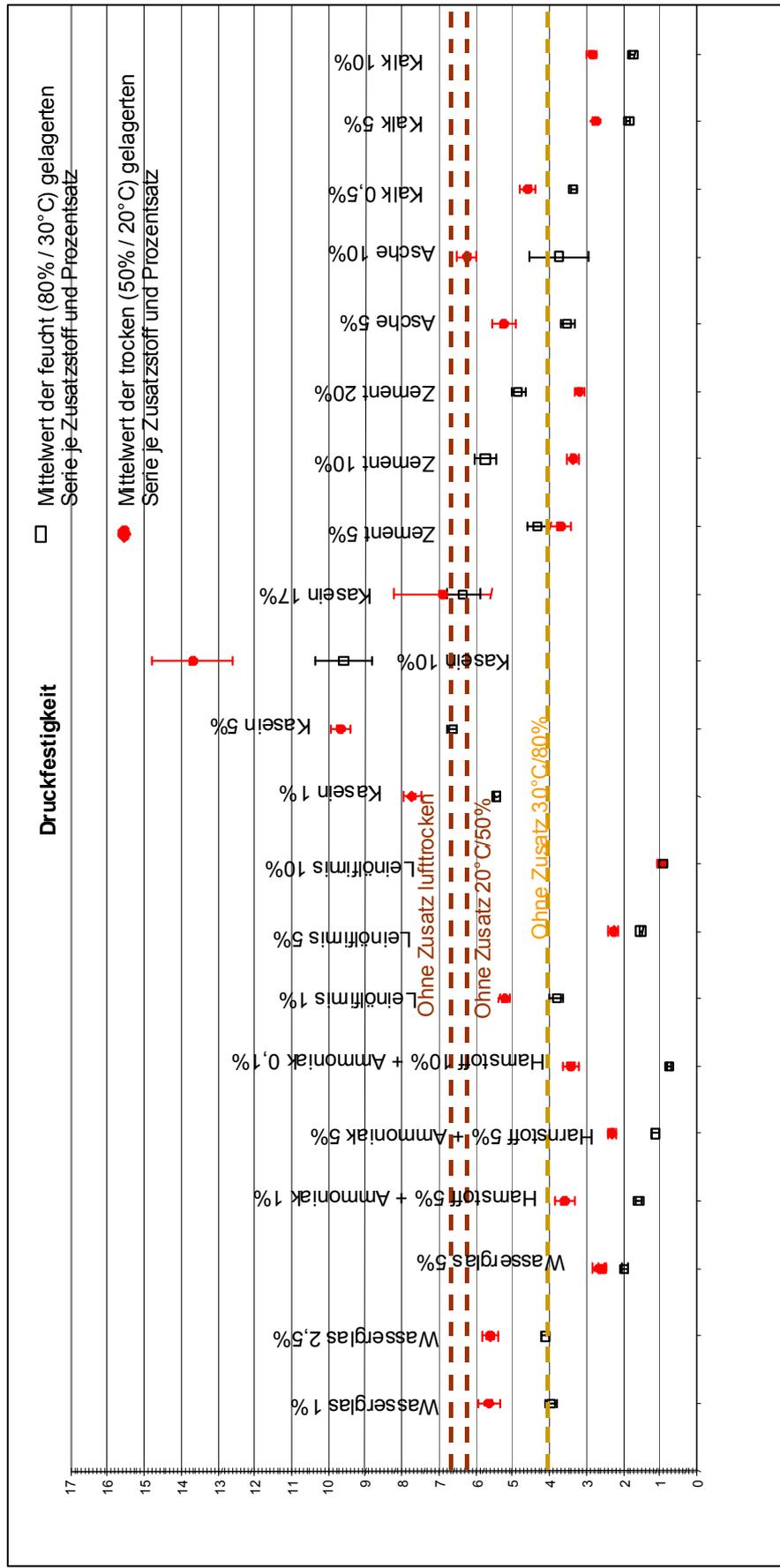


Abbildung 4.77 Übersicht Zusatzstoffe - Druckfestigkeit in  $[N/mm^2]$ . Die senkrechten Linien beim Mittelwert geben das Konfidenzintervall an.

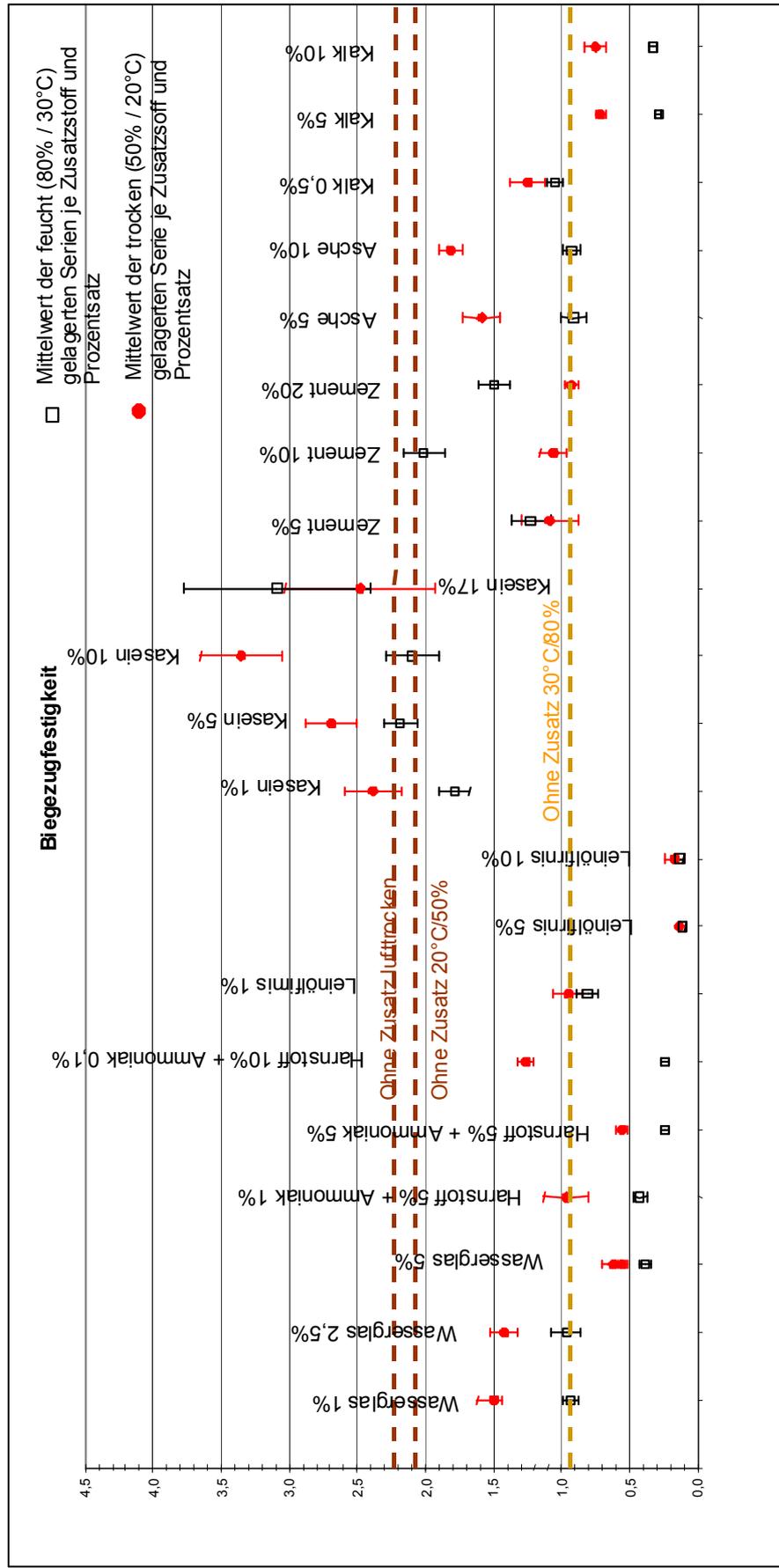


Abbildung 4.78 Übersicht Zusatzstoffe - Biegezugfestigkeit in  $[N/mm^2]$ . Die senkrechten Linien beim Mittelwert geben das Konfidenzintervall an.

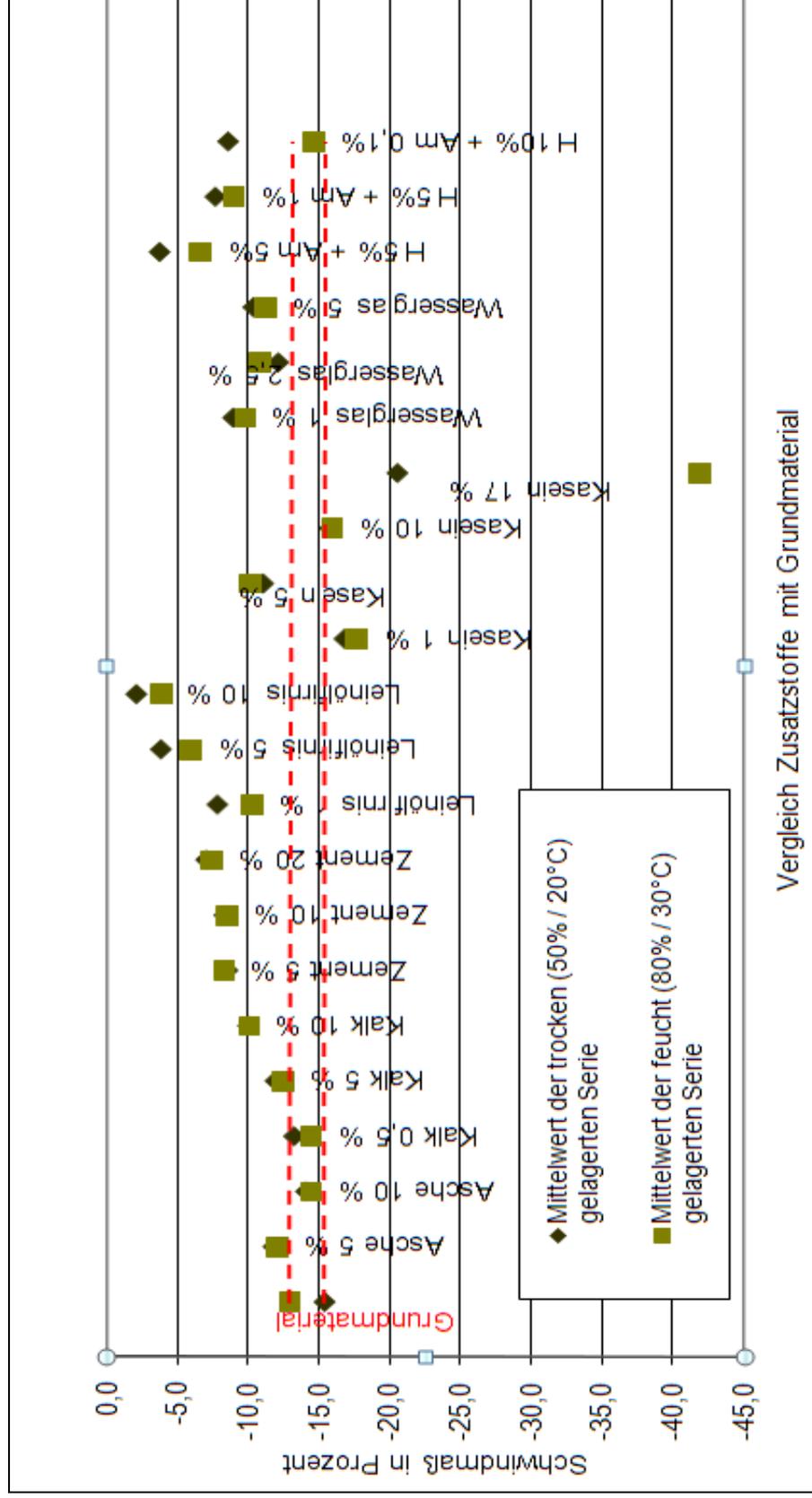


Abbildung 4.79 Schwindmaß - Vergleich der Zusatzstoffe mit dem Grundmaterial. (Die hellgrünen Quadrate (Werte der trockenen Serien) sind im Vordergrund angeordnet. Bei Überschneidung der Werte bzw. annähernd gleichen Werten ist nur ein Teil der dunkelgrünen Rauten (Werte der feuchten Serien) sichtbar)

## 5 Versuche mit ausgewählten Zusätzen – Auswertung

### 5.1 Ausgangssituation

Die Ausgangssituation ist in Abbildung 5.1, Abbildung 5.2, Abbildung 5.3, Abbildung 5.4, Abbildung 5.5, Abbildung 5.6, Abbildung 5.7 und Abbildung 5.8 noch einmal detailliert dargestellt. Die Herstellungs-, Lagerbedingungen usw. sind in Kapitel 3 beschrieben.

Die Druckfestigkeit der trockenen Probekörper wurde mit zunehmendem Kaseinprozentsatz markant gesteigert, erreichte aber bei 10 % ein Maximum. Die Werte der Serie mit 17 % Kaseinzusatz vielen wieder stark ab, sogar unterhalb des Wertes der mit dem Grundmaterial erreicht wurde. Auch die feucht gelagerte Probekörperserie zeigte höhere Werte bei der Druckfestigkeit. Schon die Werte der Serie mit 1 % Kaseinzusatz lagen höher als die ohne Zusatz.

Analoge Ergebnisse wurden bei den Biegezugfestigkeitswerten erzielt. Einzig der Wert der feuchten Proben mit 17 % Kaseinzusatz zeigte eine weitere Steigerung der Biegezugfestigkeit. Die Streubereiche der Festigkeitswerte waren jedoch vor allem bei der 17 % Serie sehr groß.

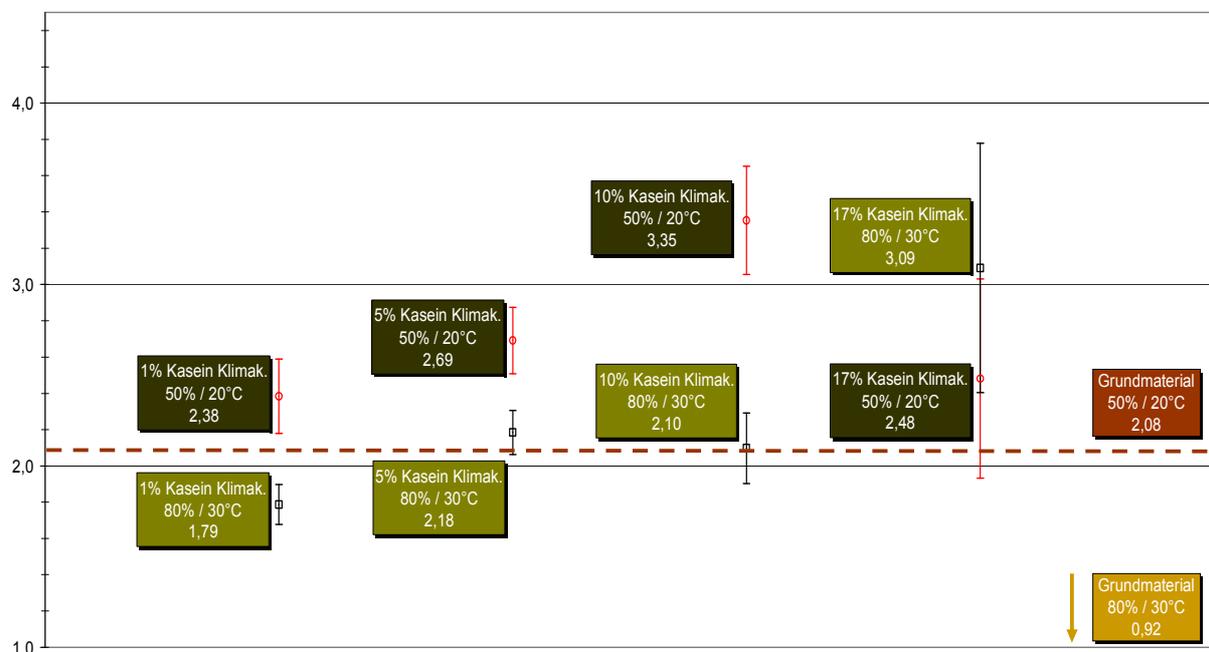


Abbildung 5.1 Biegezugfestigkeit [N/mm<sup>2</sup>] bei Kaseinzusatz - Ausgangssituation

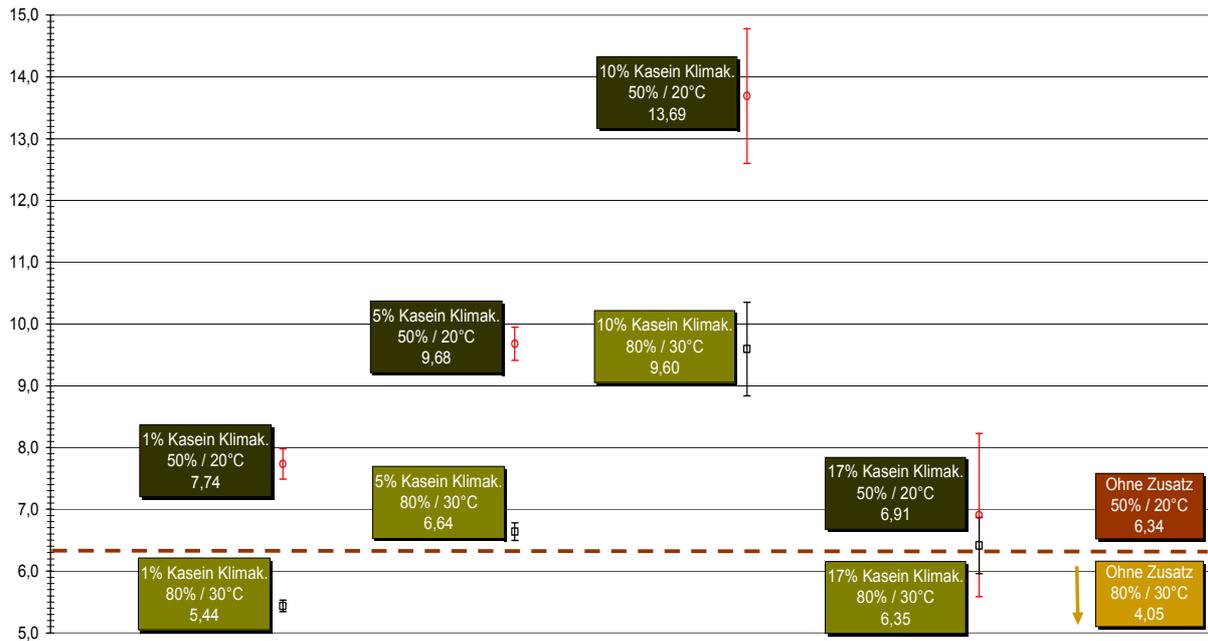


Abbildung 5.2 Druckfestigkeit [N/mm<sup>2</sup>] bei Kaseinzusatz – Ausgangssituation

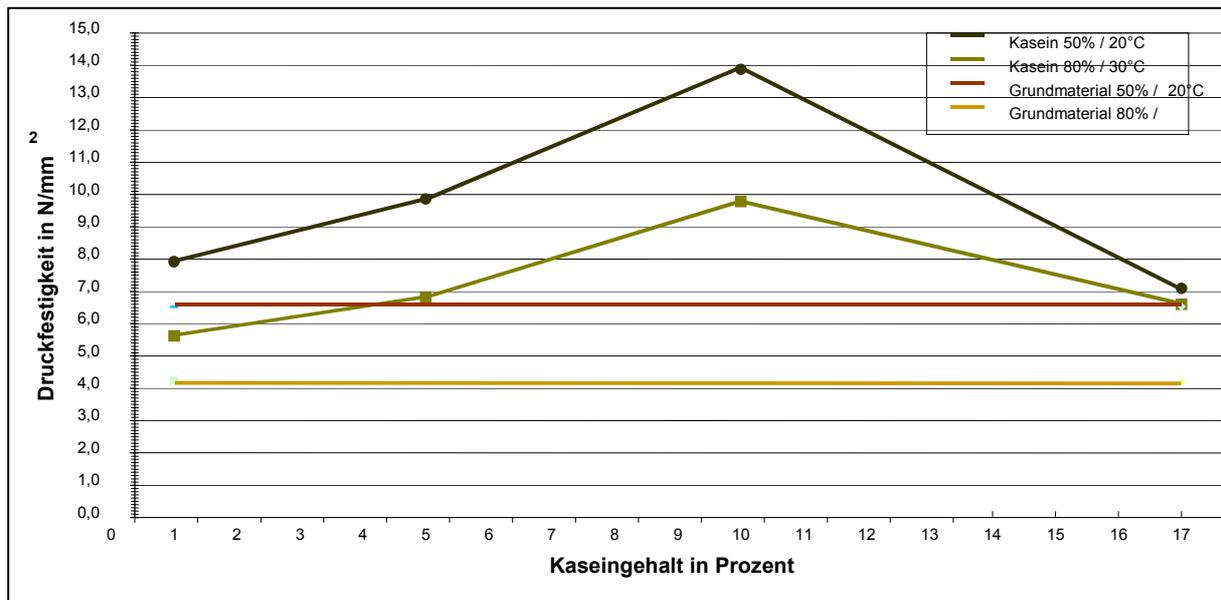


Abbildung 5.3 Lineare Darstellung der Druckfestigkeitswerte

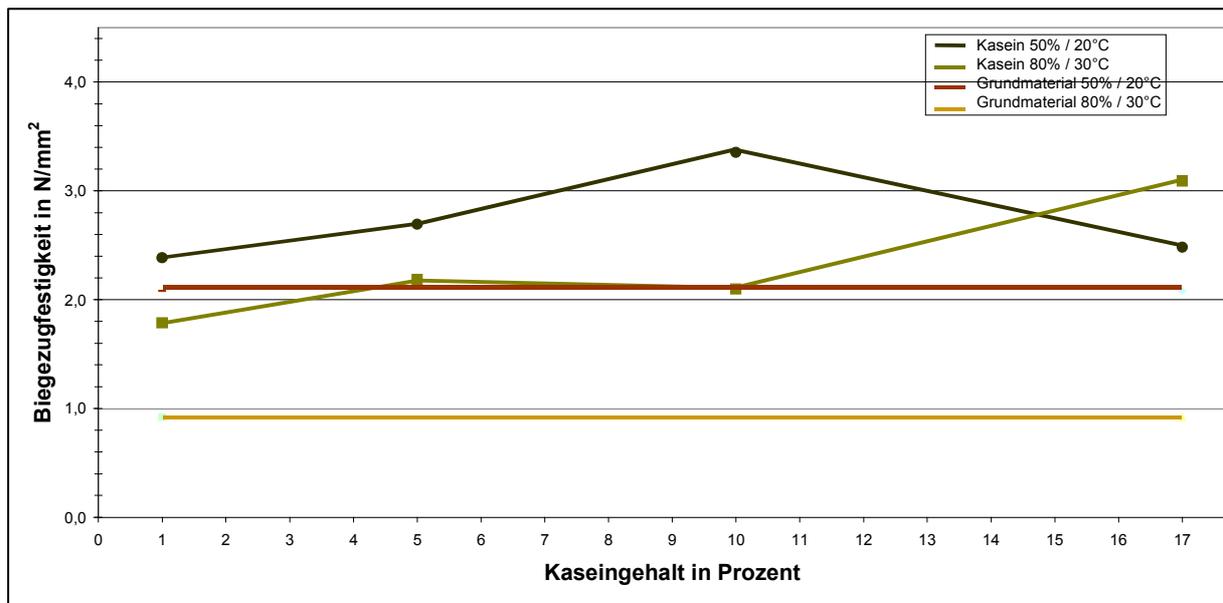


Abbildung 5.4 Lineare Darstellung der Biegezugfestigkeitswerte

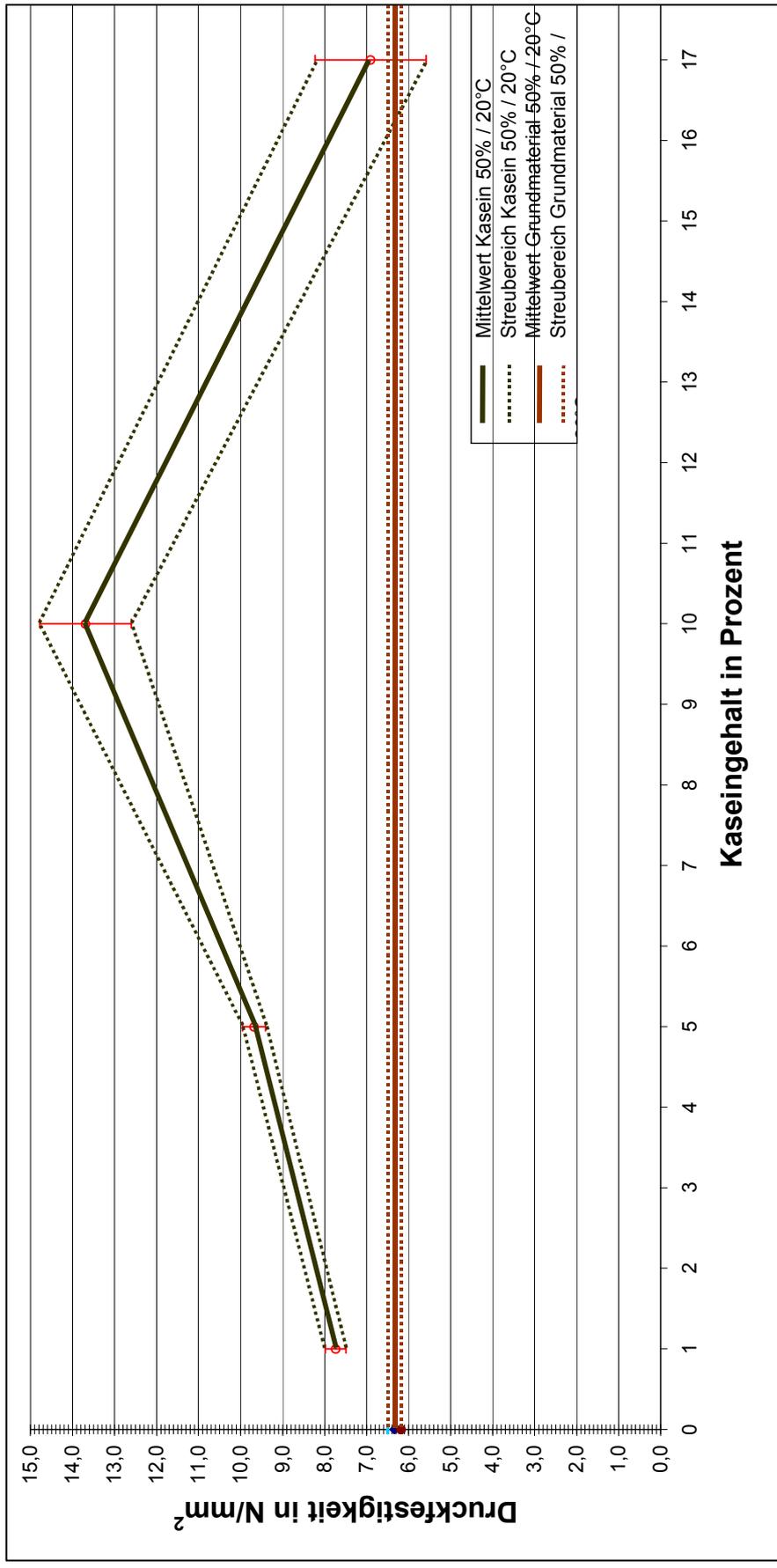


Abbildung 5.5 Streubreiche der Druckfestigkeitswerte (6 Versuche pro Messwert) - trockene Lagerung

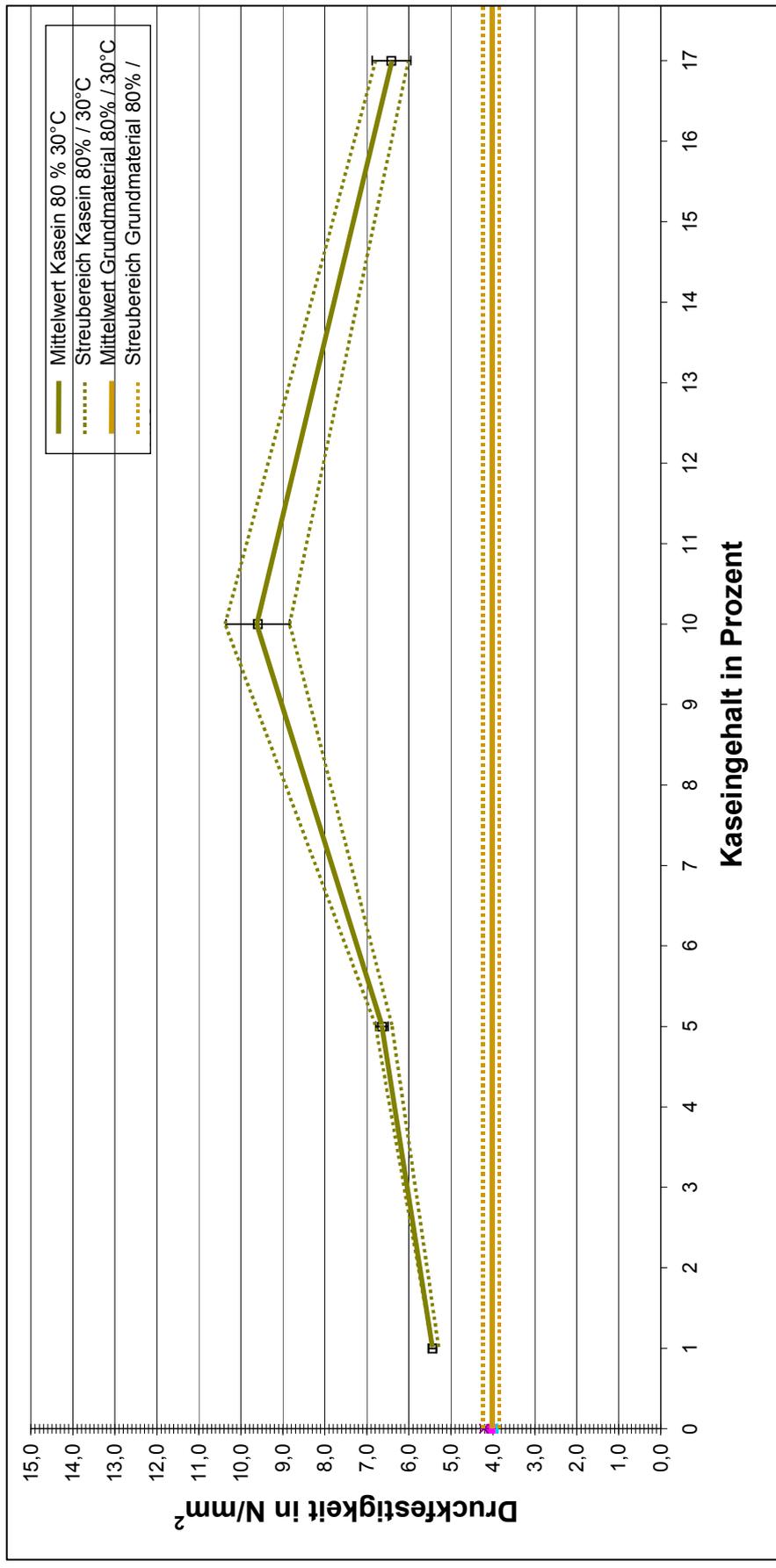


Abbildung 5.6 Streubereiche der Druckfestigkeitswerte (6 Versuche pro Messwert) - feuchte Lagerung

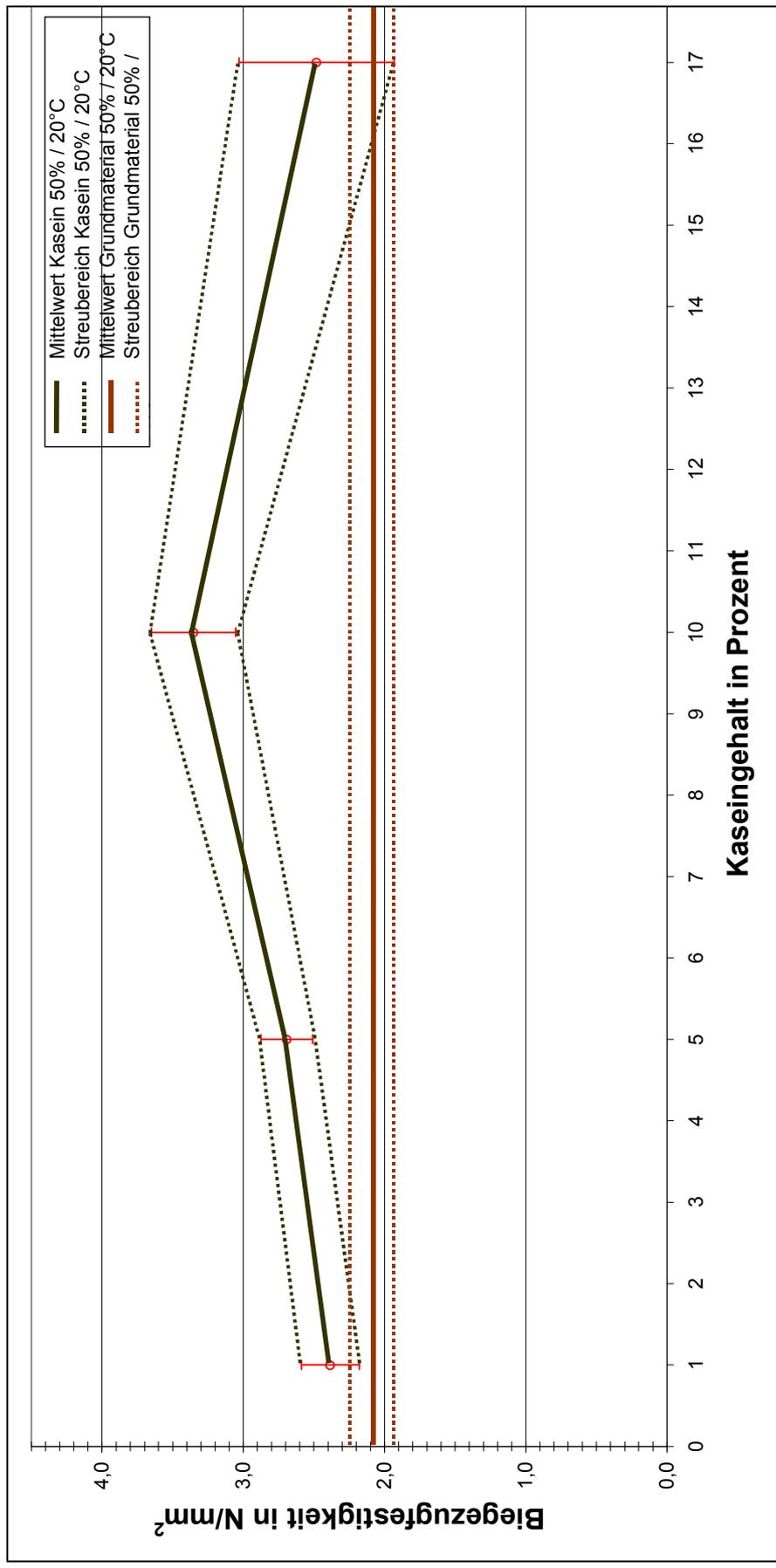


Abbildung 5.7 Streubereiche Biegezugfestigkeitswerte (6 Versuche pro Messwert) - trockene Lagerung

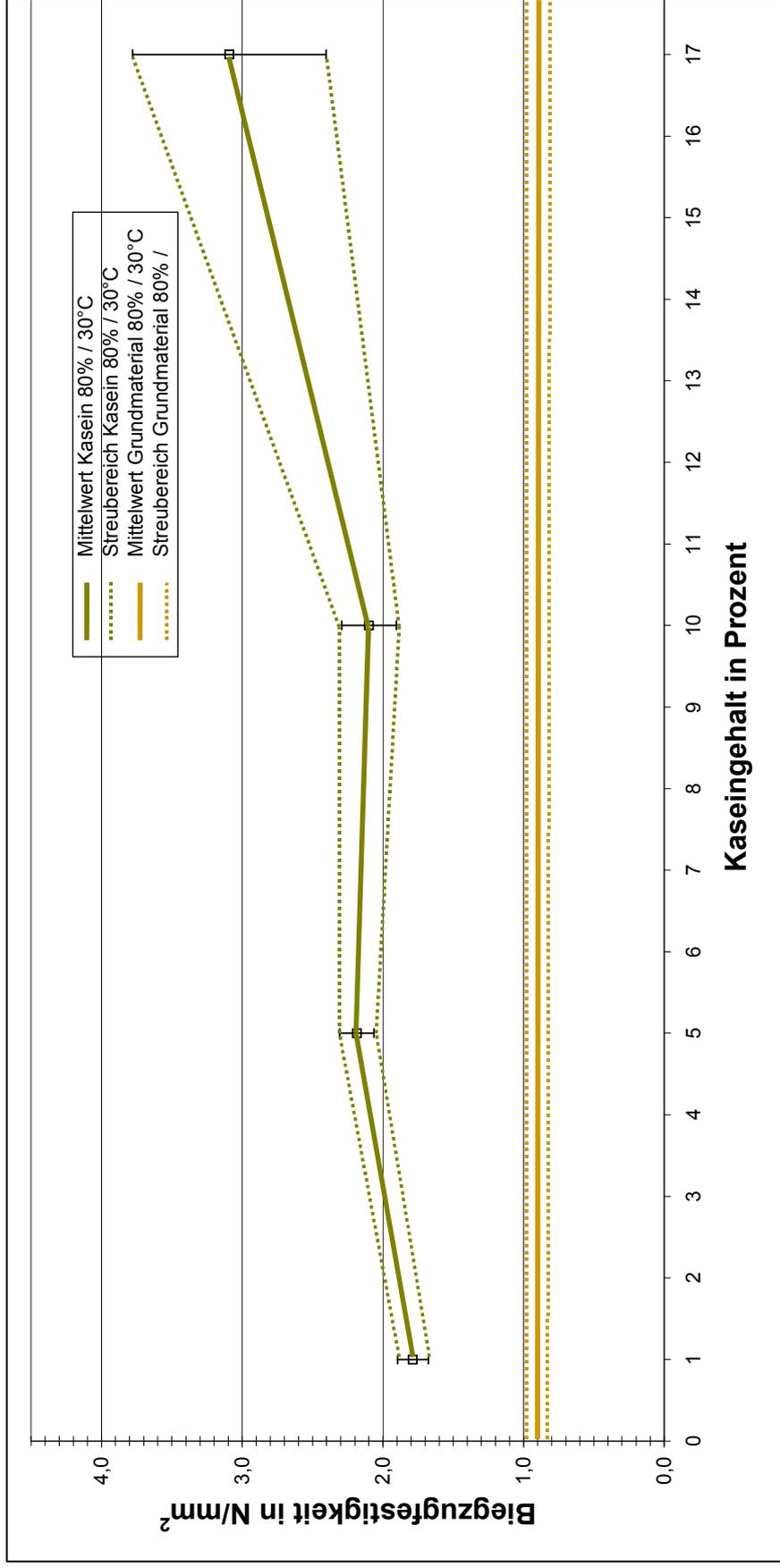


Abbildung 5.8 Streubreiche Biegezugfestigkeitswerte (6 Versuche pro Messwert) - feuchte Lagerung

## 5.2 Weitere Vorgehensweise

Für eine Reduzierung der Druckfestigkeitsverluste von Lehm in feuchten Klimaten scheint ein Zusatz von Kasein sinnvoll zu sein. In den weiteren Versuchen soll eine genauere Herausarbeitung des 10 % Bereiches erfolgen, um einen genaueren evtl. ausgerundeten Kurvenverlauf zu erhalten und den Bereich der maximalen Druckfestigkeitssteigerung festzustellen. Zu beobachten ist dabei auch ab welchem Kaseinprozentsatz eine Schimmelbildung entsteht.

Dafür wurden weitere Versuchsserien mit 6,5 %, 8 %, 10 %, 12 % und 14 % Kaseinzusatz vorgesehen.

Für die folgende Probekörperherstellung wurde wieder Lehm aus Göllersdorf geliefert und vor der weiteren Verarbeitung gemahlen.

Im Zuge dieser Versuchsserie wurden auch wieder Probekörper ohne Zusatzstoff hergestellt. (9 je Feuchtezustand). Die Serien mit Kaseinzusatz wurden wieder mit je 6 Probekörpern hergestellt. Die Klimabedingungen blieben die gleichen wie bei den Vorversuchen (siehe Kapitel 3.1.2).

Die Mischungen mit einem Kaseinzusatz größer 10 % waren wieder eher trocken und bröselig. Die Probekörper wiesen wieder eine starke Verformbarkeit auf, was eine besondere Vorsicht beim Ausschalen und Transportieren erforderte.

Aufgrund eines defekten Klimaschranks konnten die Lagerzeiten nicht eingehalten werden. Die feuchten Serien wurden über einen Zeitraum von etwa 2 Wochen unter feuchten Bedingungen zwischengelagert. Dabei kam es zu einer starken Schimmelentwicklung und extremen Geruchsbelästigung. Dies hatte zur Folge, dass die Serien mit 10 % und mehr Kaseinzusatz zerfielen und für eine weitere Untersuchung unbrauchbar waren. Um aber auch Werte im Bereich zwischen 10 und 17 % Kaseinzusatz zu erhalten wurde je noch eine 12 und eine 14 % Serie hergestellt.

Der Wassergehalt wurde wie bei den Vorversuchen mittels Darrtrocknung (Beschreibung siehe Kapitel 3.1.3) ermittelt. Zum Vergleich ist eine Grafik mit Grundmaterial (Abbildung 5.9) und eine mit Kaseinzusatz (Abbildung 5.10) dargestellt.

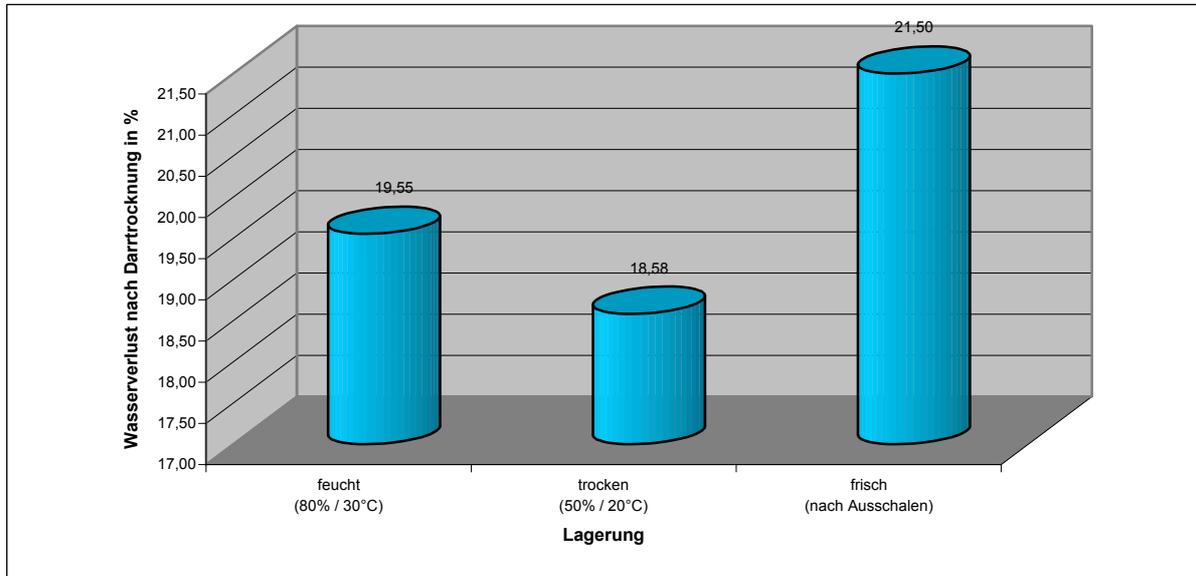


Abbildung 5.9 Grundmaterial – Wasserverlust in Prozent

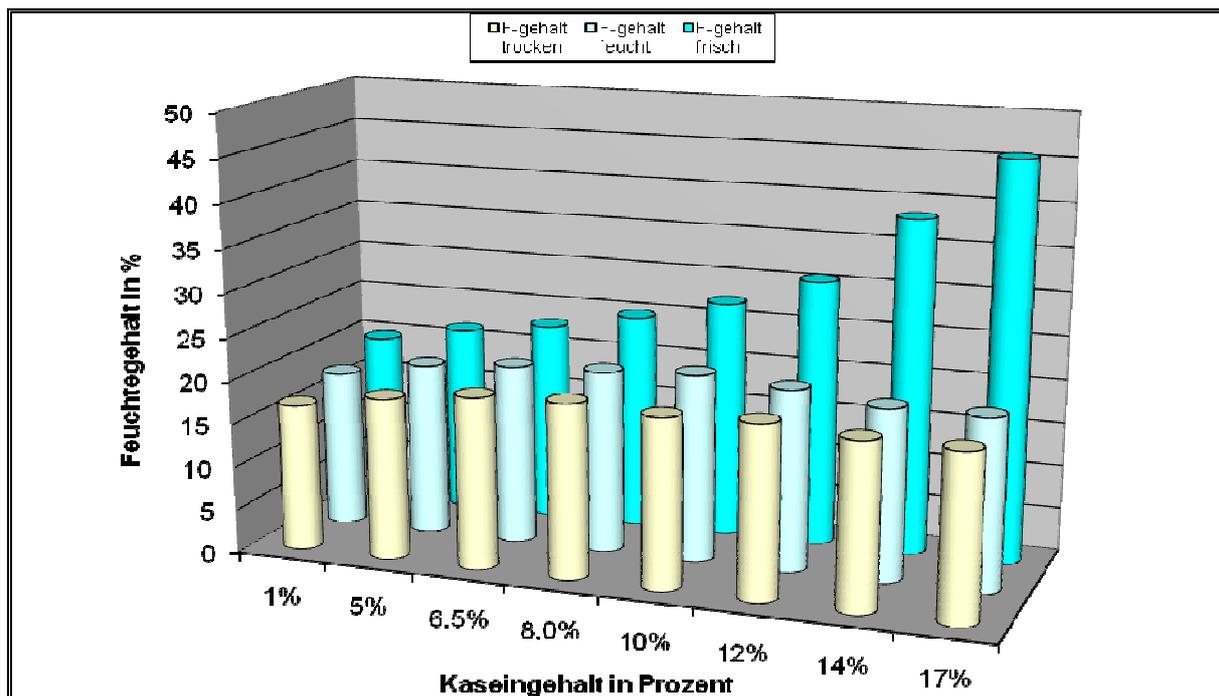


Abbildung 5.10 Kaseinzusatz – Feuchtegehalt in Prozent

Beim Vergleich des Wassergehalts fällt auf, dass bei höheren Kaseinzusätzen mehr Wasser in den frischen Probekörpern enthalten ist, als in jenen mit geringeren Zusätzen. Nach der Trocknung ist annähernd gleich viel Wasser enthalten.

### 5.3 Auswertung der Festigkeitswerte

In den folgenden Abbildungen und Tabellen sind prozentualen Vergleiche zwischen Grundmaterial und Kaseinzusatz dargestellt. (Tabelle 5.1, Abbildung 5.11, Abbildung 5.12)

Tabelle 5.1 Vergleich Grundmaterial mit Kaseinzusatz

<b>Vergleich mit Grundmaterial</b>						
Material	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	[%] des Grundmateri- als	<b>Zu- /Abnahme</b> [%]	Biegezugfest- igkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	[%] des Grundmateri- als	<b>Zu- /Abnahme</b> [%]
<b>1% Kasein Klimak. 50% / 20°C</b>	7,74	136,7	<b>36,7</b>	2,38	138,7	<b>38,7</b>
<b>1% Kasein Klimak. 80% / 30°C</b>	5,44	147,5	<b>47,5</b>	1,79	195,7	<b>95,7</b>
<b>5% Kasein Klimak. 50% / 20°C</b>	9,68	171,1	<b>71,1</b>	2,69	156,6	<b>56,6</b>
<b>5% Kasein Klimak. 80% / 30°C</b>	6,64	180,1	<b>80,1</b>	2,18	239,2	<b>139,2</b>
<b>6,5% Kasein Klimak. 50% / 20°C</b>	10,07	178,0	<b>78,0</b>	2,75	160,0	<b>60,0</b>
<b>6,5% Kasein Klimak. 80% / 30°C</b>	7,14	193,7	<b>93,7</b>	2,09	228,9	<b>128,9</b>
<b>8% Kasein Klimak. 50% / 20°C</b>	11,42	201,8	<b>101,8</b>	3,02	175,7	<b>75,7</b>
<b>8% Kasein Klimak. 80% / 30°C</b>	8,53	231,4	<b>131,4</b>	1,94	212,4	<b>112,4</b>
<b>10% Kasein Klimak. 50% / 20°C</b>	12,52	221,3	<b>121,3</b>	3,18	185,1	<b>85,1</b>
<b>10% Kasein Klimak. 80% / 30°C</b>	9,60	260,3	<b>160,3</b>	2,10	229,7	<b>129,7</b>
<b>12% Kasein Klimak. 50% / 20°C</b>	11,62	205,4	<b>105,4</b>	2,98	173,4	<b>73,4</b>

<b>12% Kasein Klimak. 80% / 30°C</b>	8,43	228,7	<b>128,7</b>	2,15	235,4	<b>135,4</b>
<b>14% Kasein Klimak. 50% / 20°C</b>	7,51	132,7	<b>32,7</b>	2,59	150,7	<b>50,7</b>
<b>14% Kasein Klimak. 80% / 30°C</b>	7,12	193,2	<b>93,2</b>	2,09	228,9	<b>128,9</b>
<b>17% Kasein Klimak. 50% / 20°C</b>	6,91	122,1	<b>22,1</b>	2,48	144,4	<b>44,4</b>
<b>17% Kasein Klimak. 80% / 30°C</b>	6,35	172,2	<b>72,2</b>	3,09	338,5	<b>238,5</b>

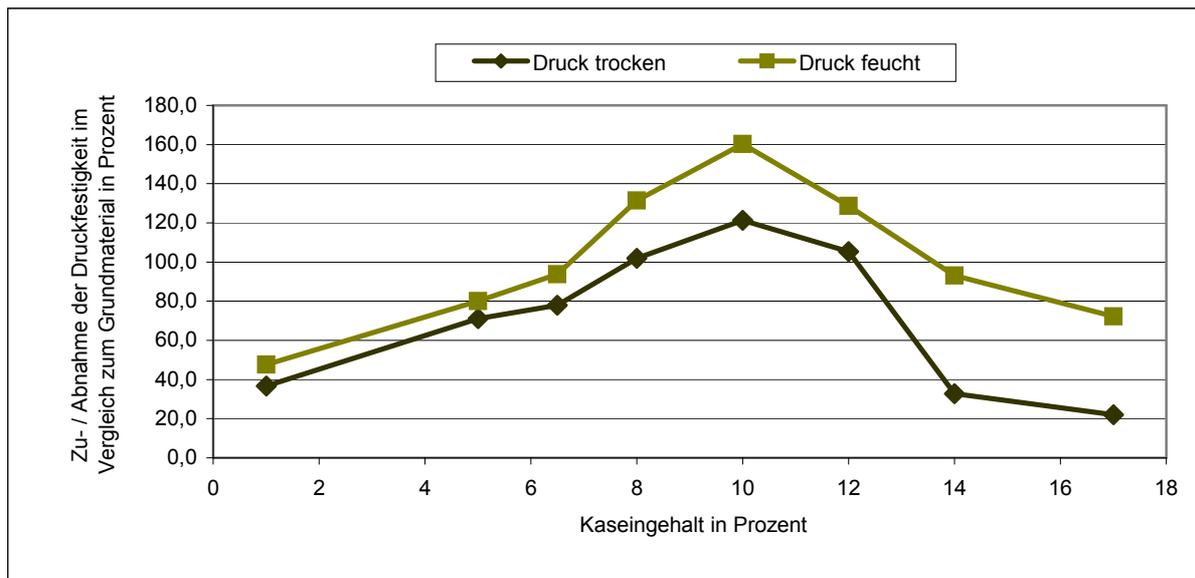


Abbildung 5.11 Zu- / Abnahme der Druckfestigkeit - Vergleich Grundmaterial mit Kasein

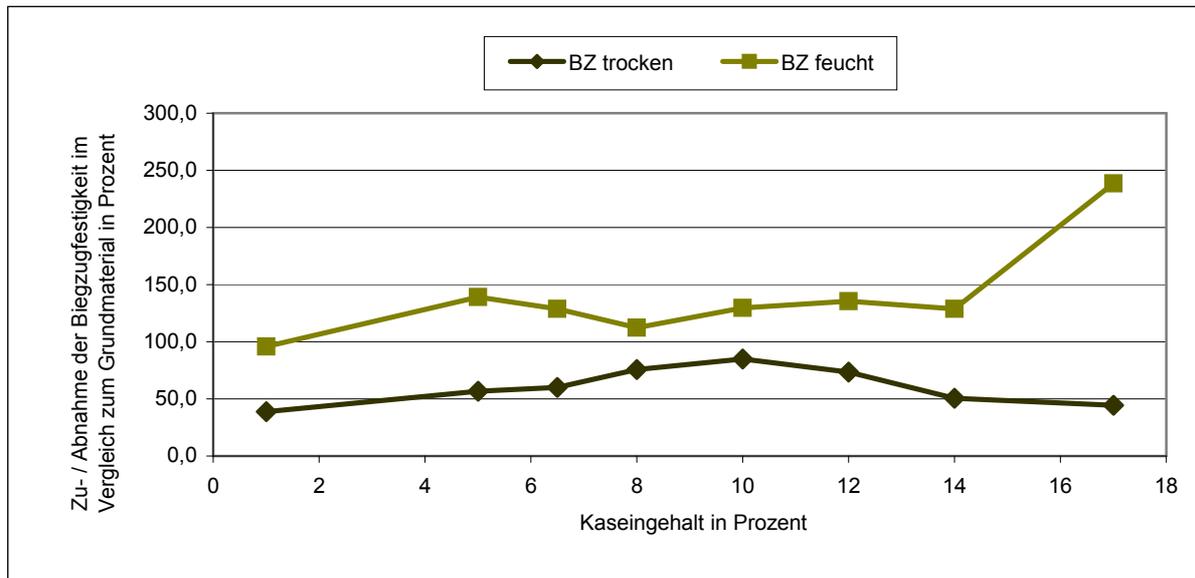


Abbildung 5.12 Zu-/ Abnahme der Biegezugfestigkeit - Vergleich Grundmaterial mit Kasein

Die neuen Serien mit 6 %, 8 %, 10 %, 12% und 14 % Kaseinzusatz zeigen etwas geringere Festigkeitssteigerungen bei den Biegezugfestigkeitswerten als bei den Druckfestigkeitswerten. Bei der 10 % Serie wurde ein Mittelwert über die Werte aus den Vorversuchen und den Detailversuchen ermittelt. Die Werte aus den Vorversuchen lagen hier etwas höher.

Beim Grundmaterial sanken nach den Detailversuchen die Mittelwerte der Biegezugfestigkeitswerte trocken von 2,1 auf 1,75 N/mm<sup>2</sup>, der Biegezugfestigkeitswerte feucht von 0,92 auf 0,85 N/mm<sup>2</sup>, der Druckfestigkeitswerte trocken von 6,2 auf 5,7 N/mm<sup>2</sup> und der Druckfestigkeitswerte feucht von 4,1 auf 3,7 N/mm<sup>2</sup>.

In den folgenden Abbildungen werden die Biegezug- und Druckfestigkeitswerte der Kaseinserien mit denen des Grundmaterials verglichen und dabei auch die Streubereiche dargestellt (Abbildung 5.13, Abbildung 5.14, Abbildung 5.15, Abbildung 5.16, Abbildung 5.17, Abbildung 5.18, Abbildung 5.19, Abbildung 5.20). Anschließend sind Vergleiche bezüglich Größen, Gewicht und Schwindmaß abgebildet (Abbildung 5.21, Abbildung 5.22, Abbildung 5.23, Abbildung 5.24, Abbildung 5.25, Abbildung 5.26). Die Bezeichnung „Ausgangswert“ bezieht sich auf den Zeitpunkt des Ausschalens nach der Probekörperherstellung.

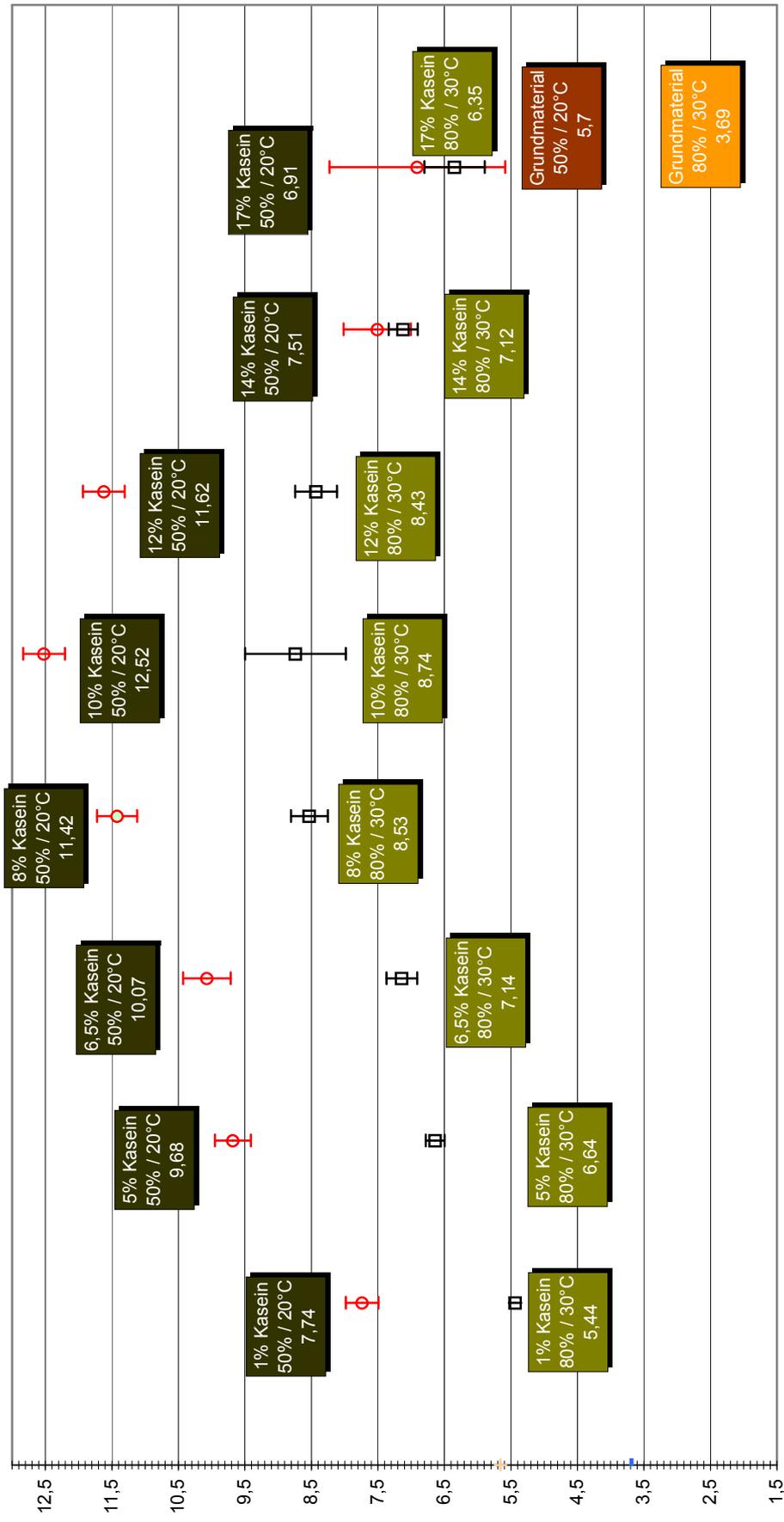


Abbildung 5.13 Druckfestigkeit in [N/mm<sup>2</sup>] – Übersicht aller Versuchsergebnisse mit Kaseinzusatz

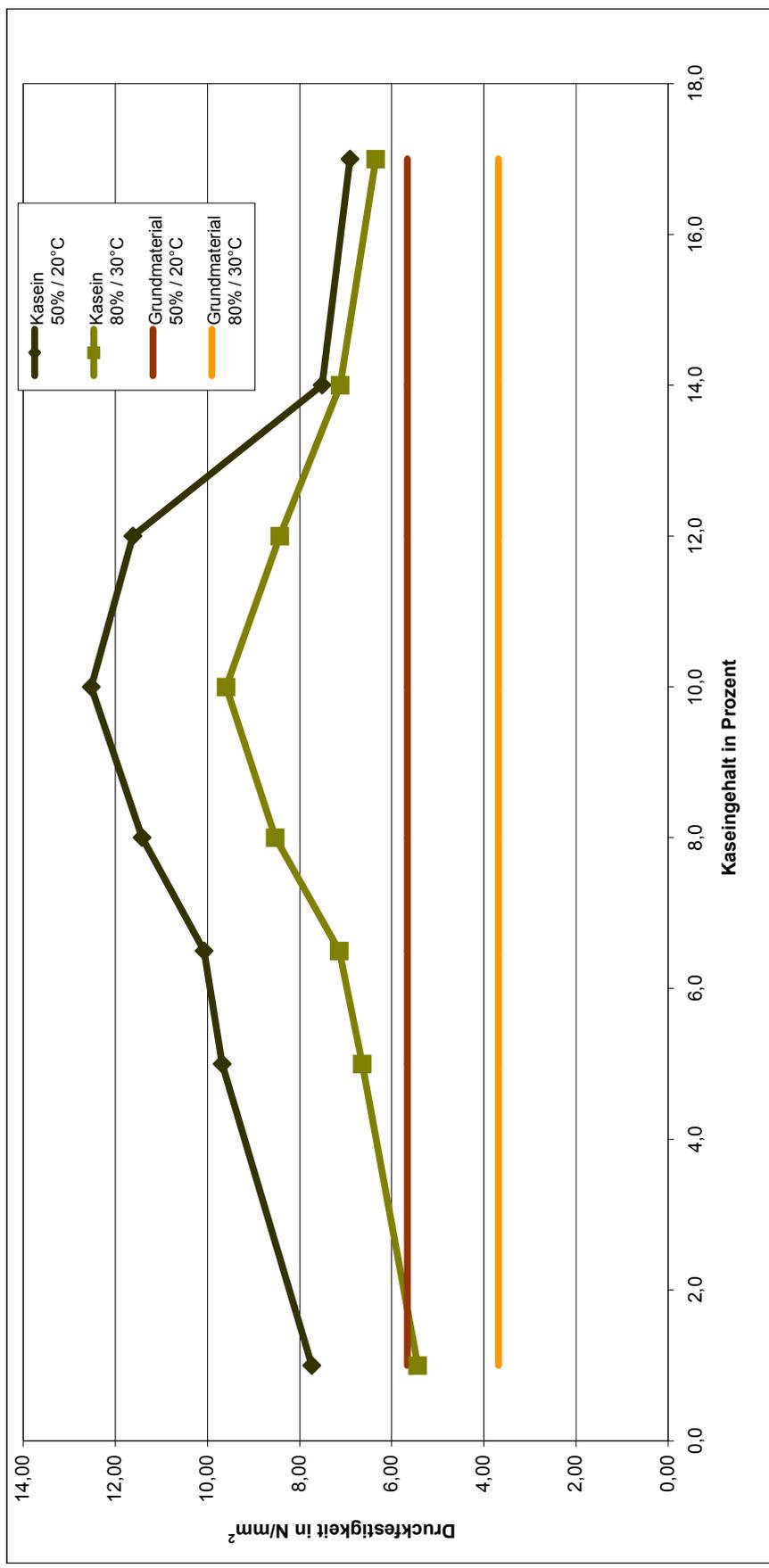


Abbildung 5.14 Druckfestigkeit in [N/mm²] – Lineare Darstellung aller Versuchsergebnisse mit Kaseinzusatz

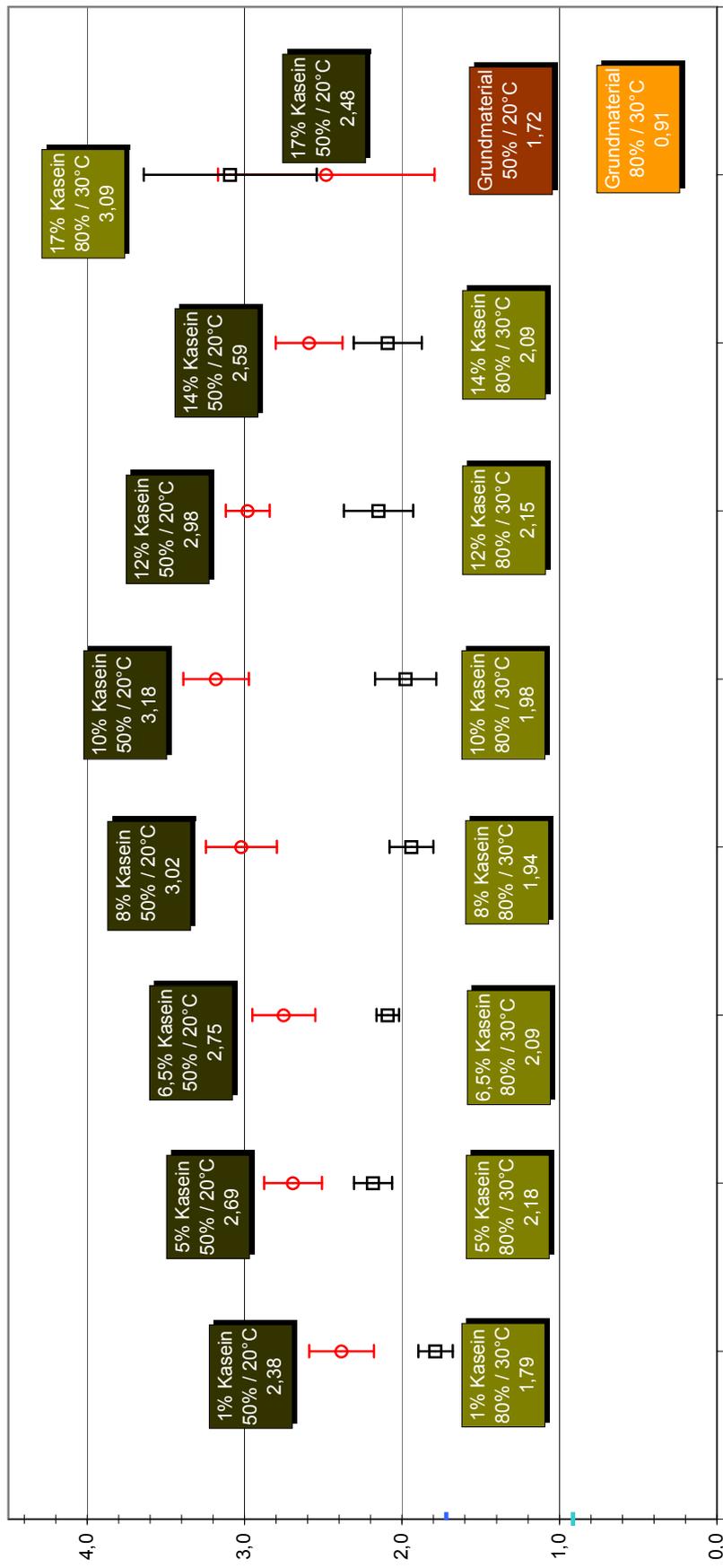


Abbildung 5.15 Biegezugfestigkeit in [N/mm<sup>2</sup>] - Übersicht aller Versuchsergebnisse mit Kaseinzusatz

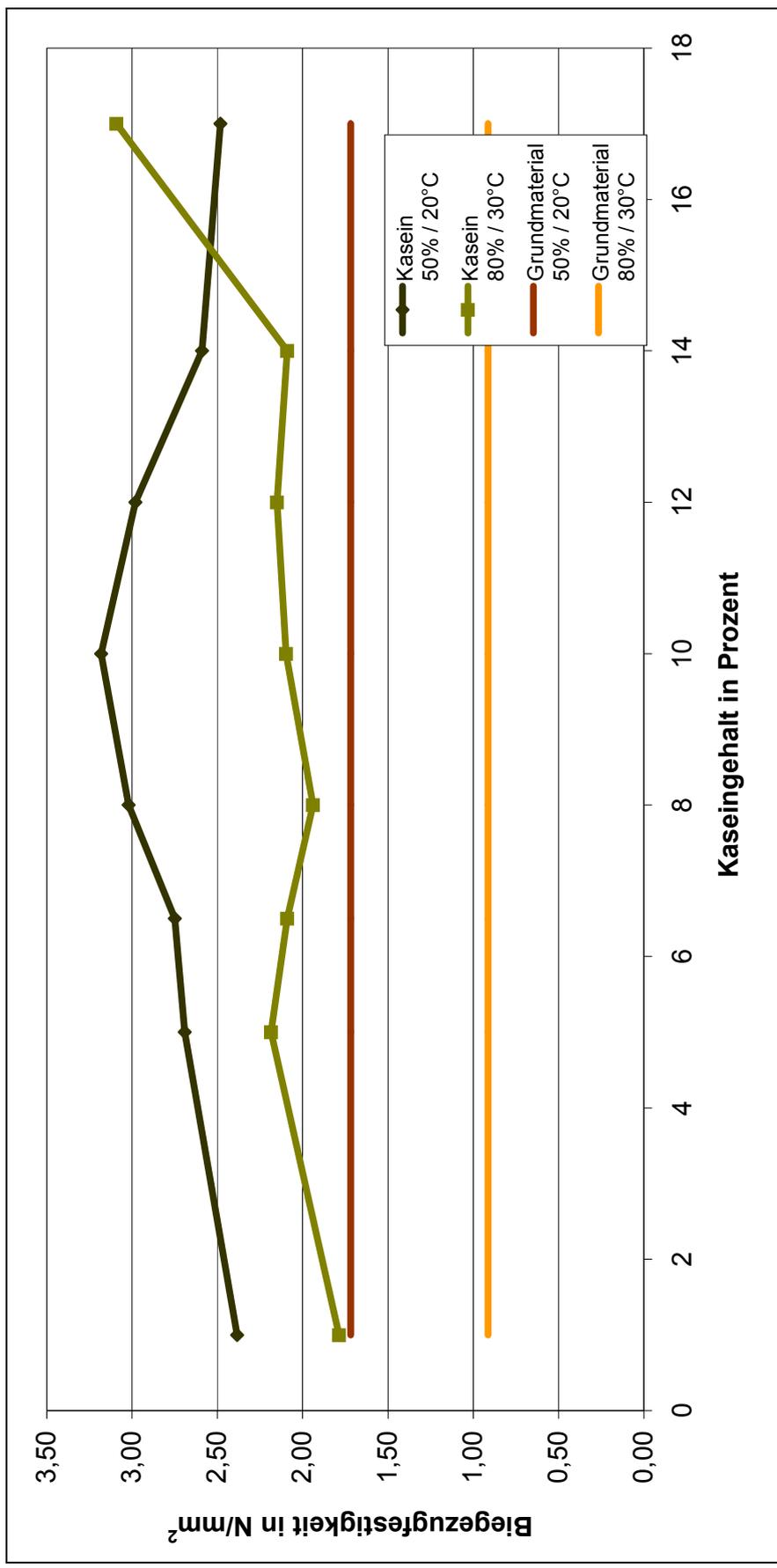


Abbildung 5.16 Biegezugfestigkeit in  $[\text{N}/\text{mm}^2]$  – Lineare Darstellung aller Versuchsergebnisse mit Kaseinzusatz

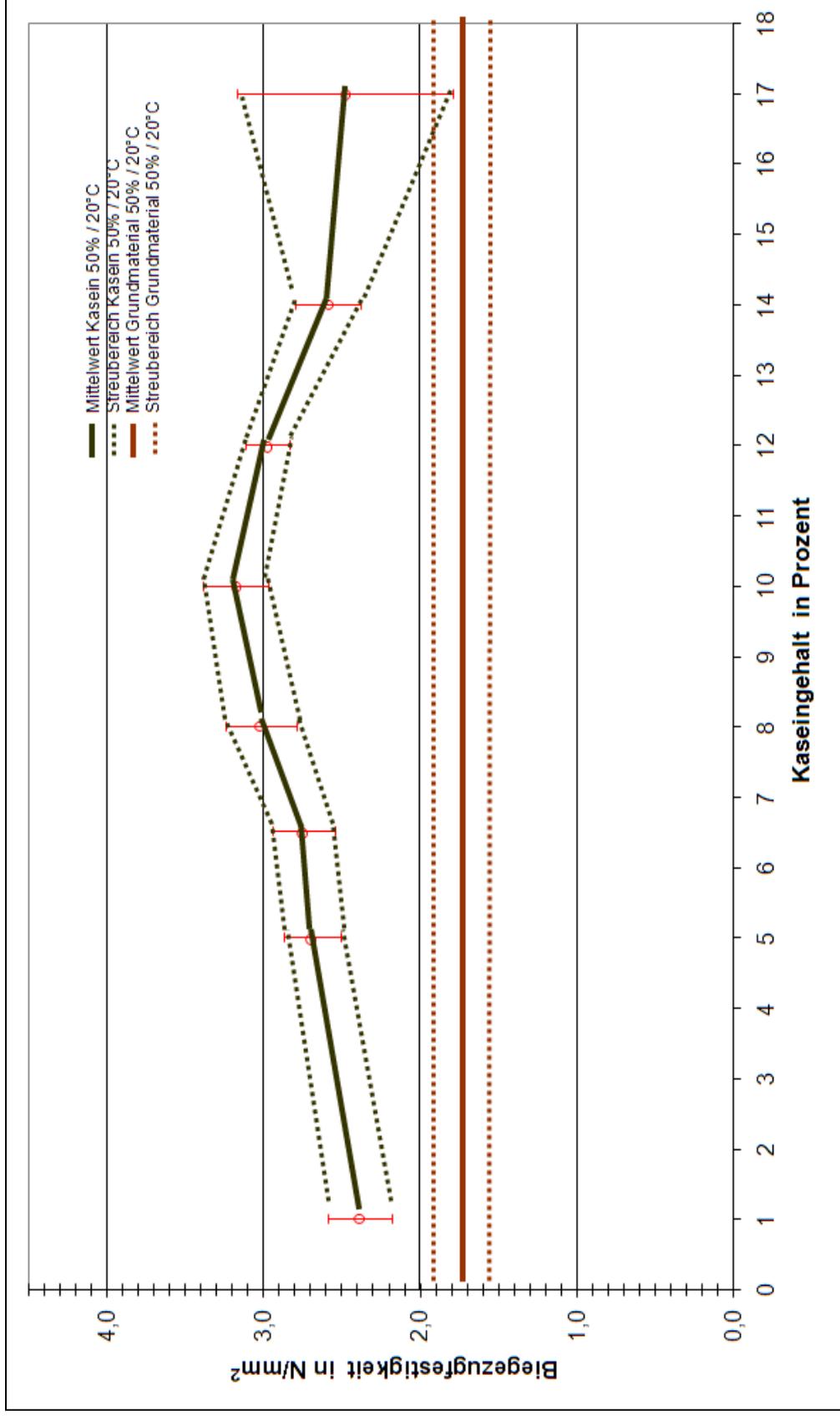


Abbildung 5.17 Biegezugfestigkeit [N/mm<sup>2</sup>] von Kaseinzusatz und Grundmaterial (50% / 20°C) – Darstellung der Streubreiche (Probekörperanzahl: Grundmaterial: 15, Kaseinzusatz: je 6 / mit Ausnahme der 10% Serie: 12)

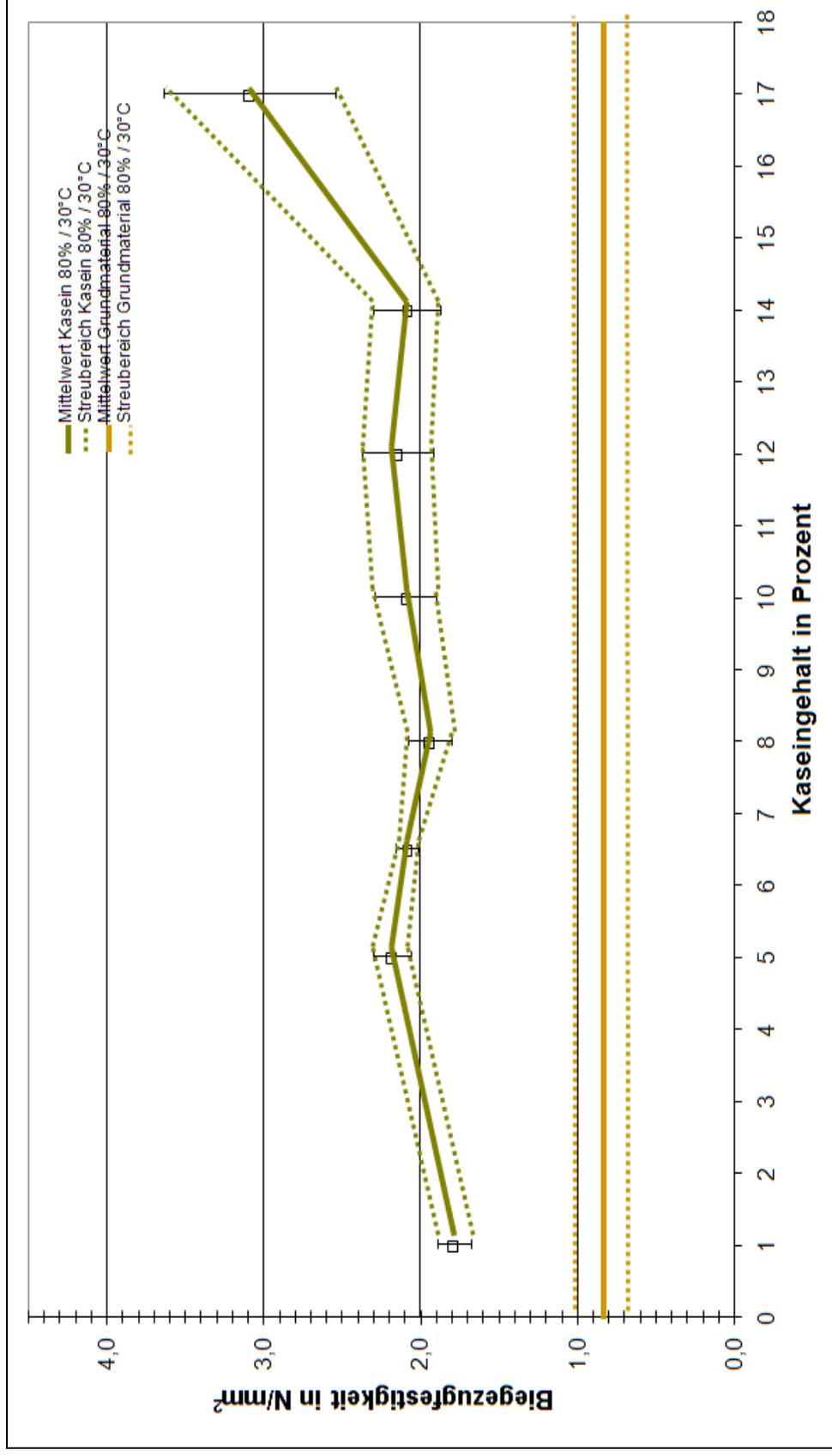


Abbildung 5.18 Biegezugfestigkeit [N/mm<sup>2</sup>] von Kaseinzusatz und Grundmaterial (80% / 30°C) - Darstellung der Streubereiche (Probekörperanzahl: Grundmaterial: 15, Kaseinzusatz: je 6 / mit Ausnahme der 10% Serie: 12)

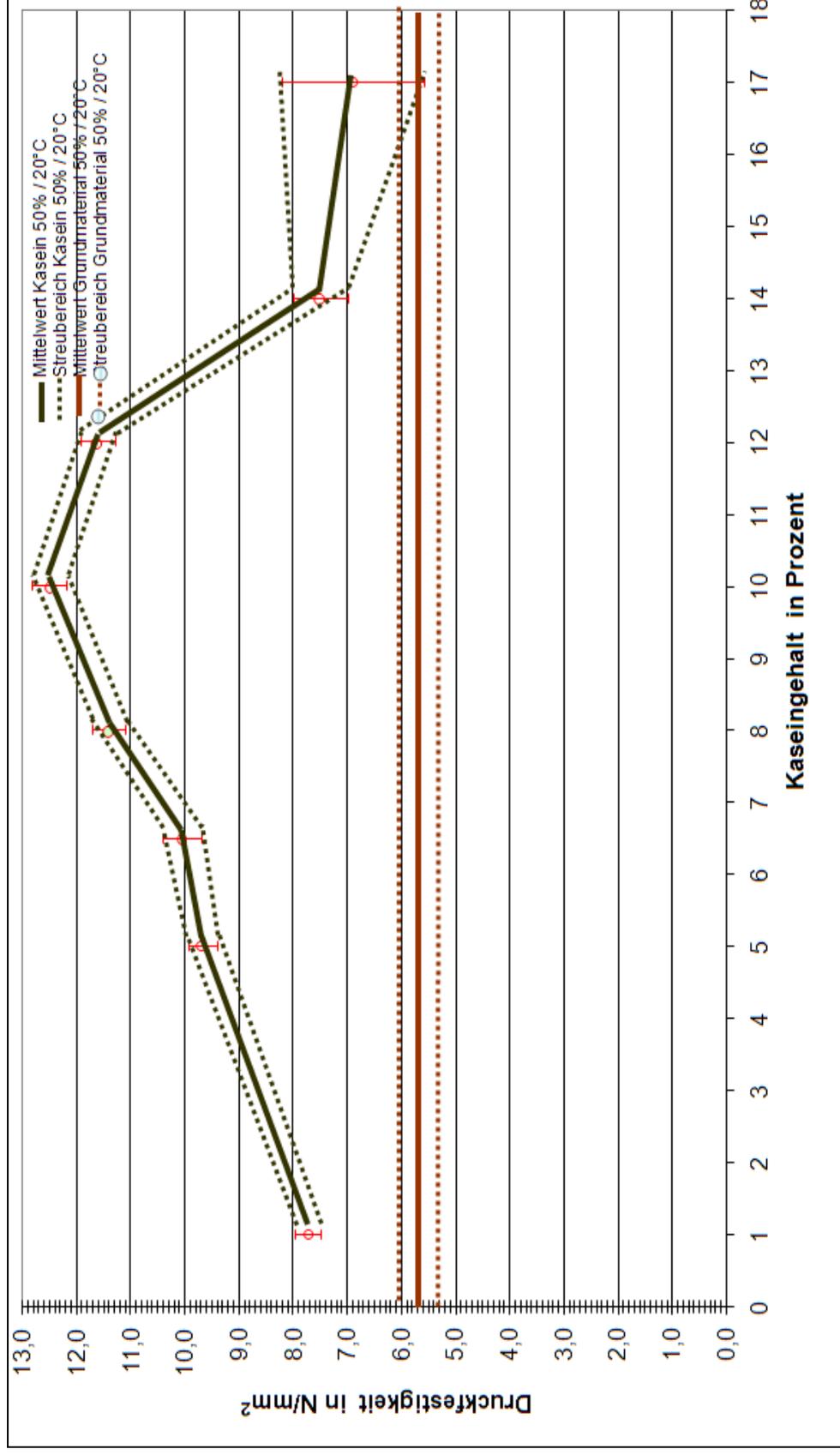


Abbildung 5.19 Druckfestigkeit von Kaseinzusatz und Grundmaterial (50% / 20°C) - Darstellung der Streubereiche (Probekörperanzahl: Grundmaterial: 15, Kaseinzusatz: je 6 / mit Ausnahme der 10% Serie: 12)

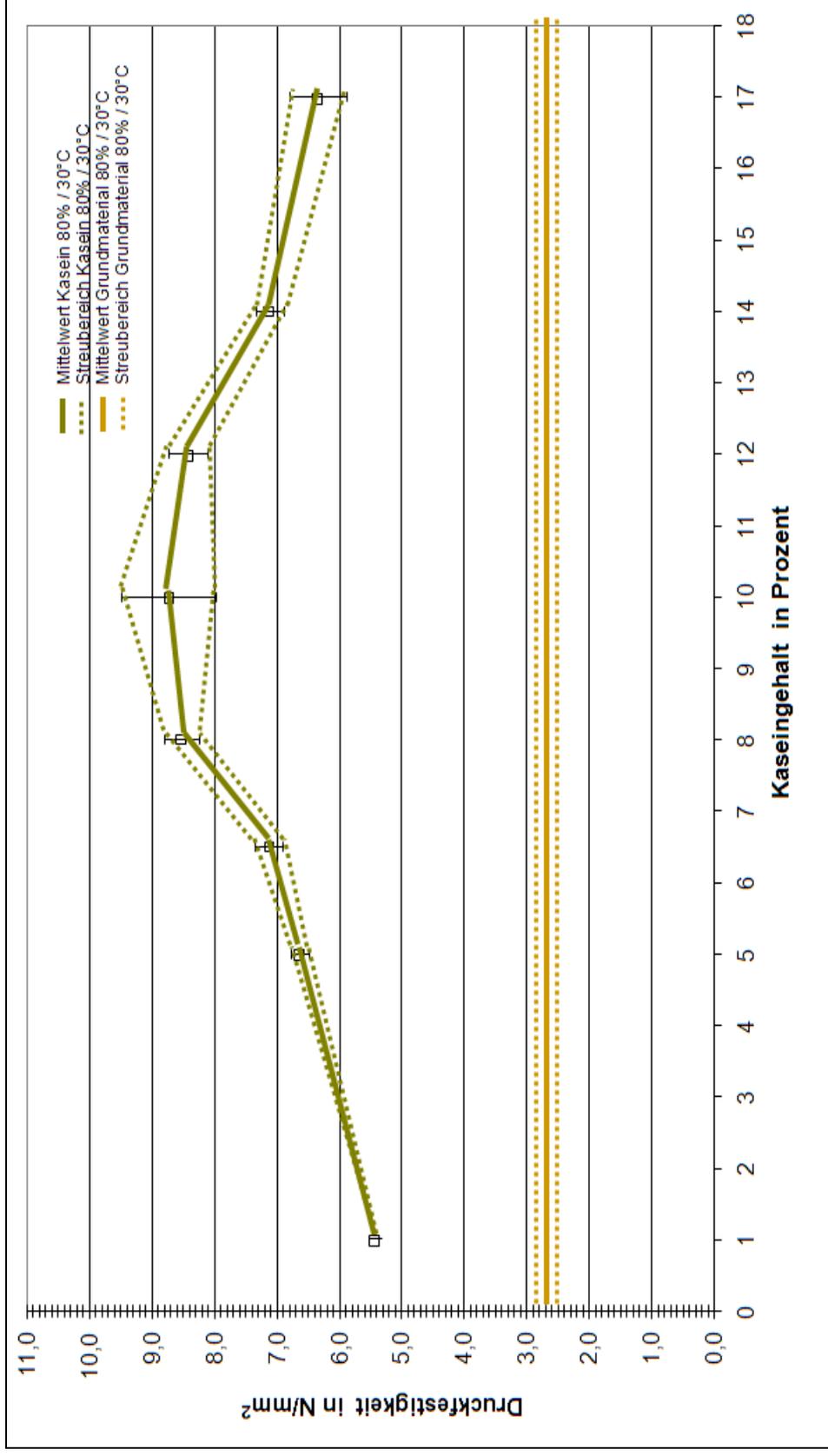


Abbildung 5.20 Druckfestigkeit von Kaseinzusatz und Grundmaterial (80% / 30°C) - Darstellung der Streubereiche (Probekörperanzahl: Grundmaterial: 15, Kaseinzusatz: je 6 / mit Ausnahme der 10% Serie: 12)

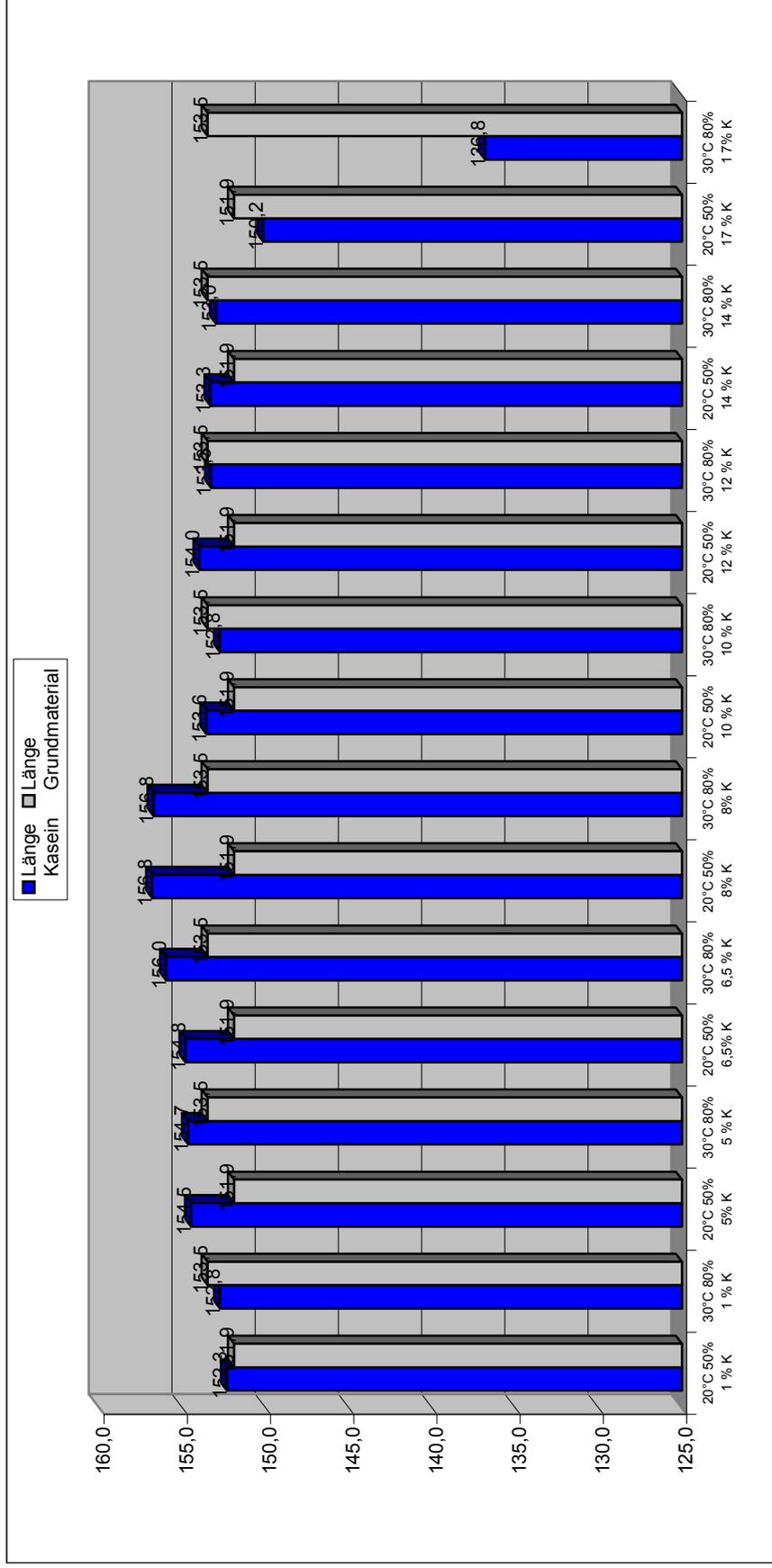


Abbildung 5.21 Länge der Probekörper in [mm] (Ausgangslänge 160 mm) - Vergleich Kaseinzusatz (blauer Balken) mit Grundmaterial (grauer Balken). Lagerungsbedingungen und Messzeitpunkt siehe Kapitel 3.1.

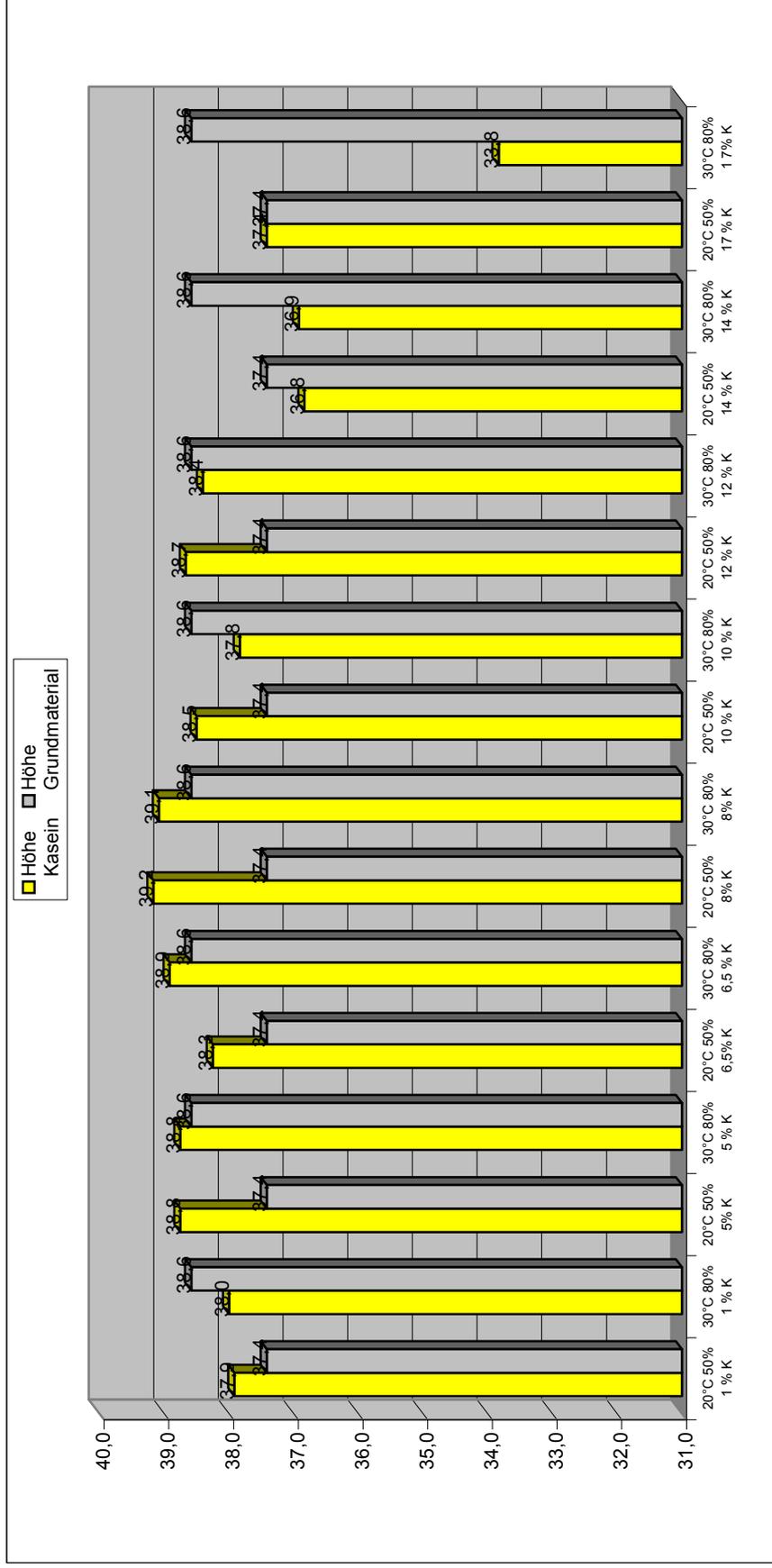


Abbildung 5.22 Höhe der Probekörper in [mm] (Ausgangshöhe 40 mm) - Vergleich Kaseinzusatz (gelber Balken) mit Grundmaterial (grauer Balken). Lagerungsbedingungen und Messzeitpunkt siehe Kapitel 3.1.

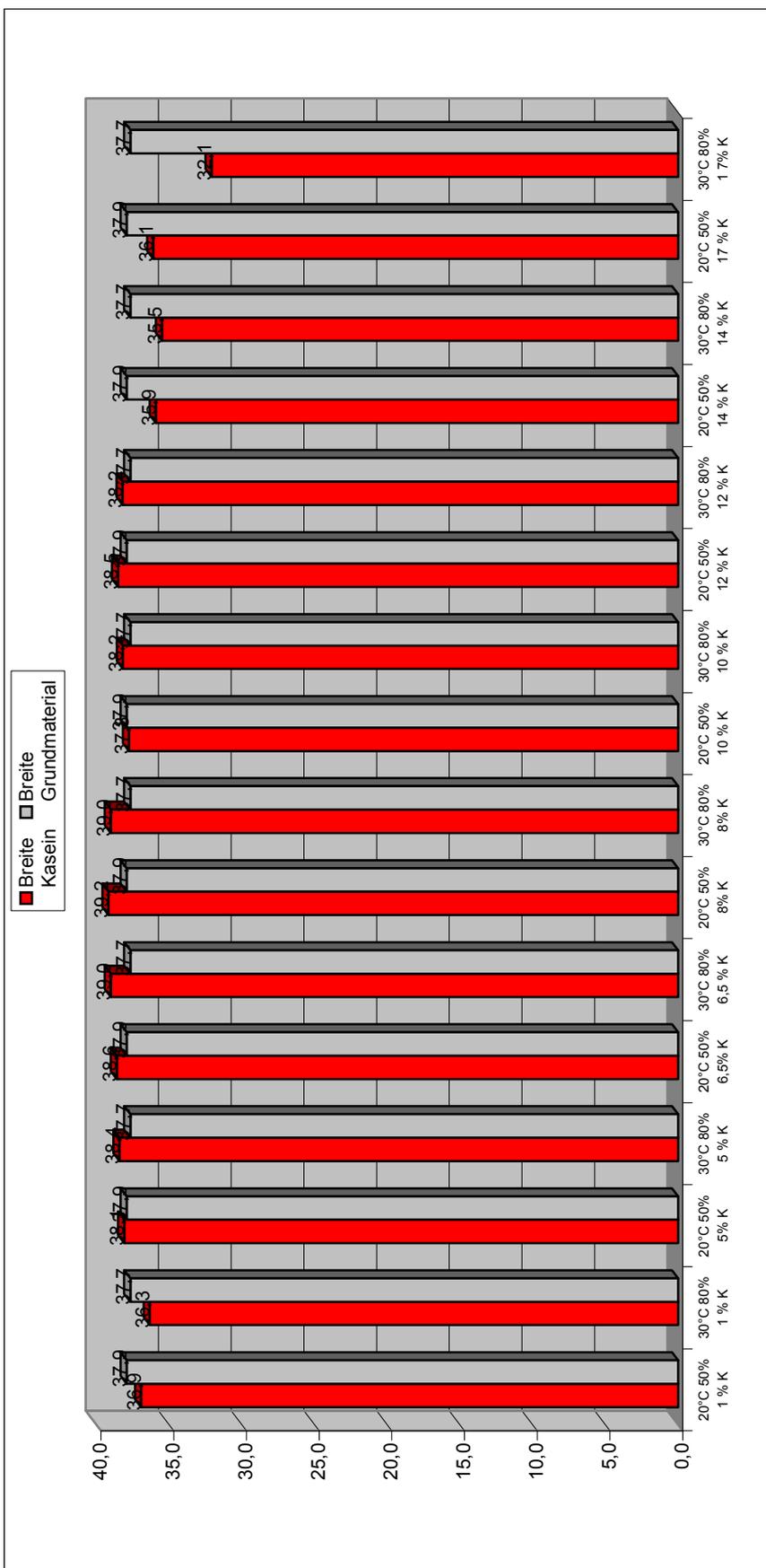


Abbildung 5.23 Breite der Probekörper in [mm] (Ausgangsbreite 40 mm) - Vergleich Kaseinzusatz (roter Balken) mit Grundmaterial (grauer Balken). Lagerungsbedingungen und Messzeitpunkt siehe Kapitel 3.1.

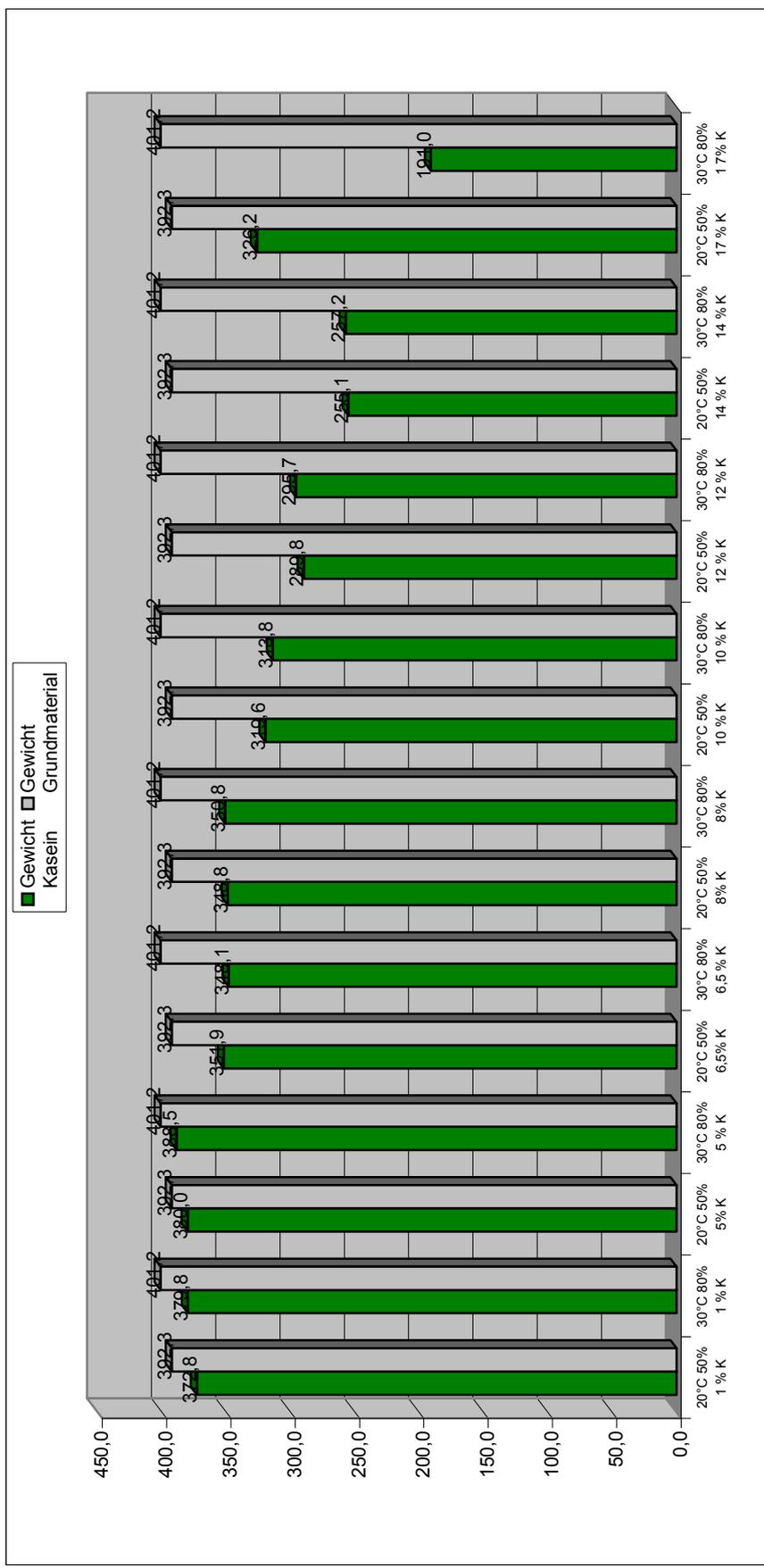


Abbildung 5.24 Gewicht der Probekörper in [g] (Ausgangsgewicht Grundmaterial: 481g; Kaseinzusatz: 467g) - Vergleich Kaseinzusatz (grüner Balken) mit Grundmaterial (grauer Balken). Lagerungsbedingungen und Messzeitpunkte siehe Kapitel 3.1.

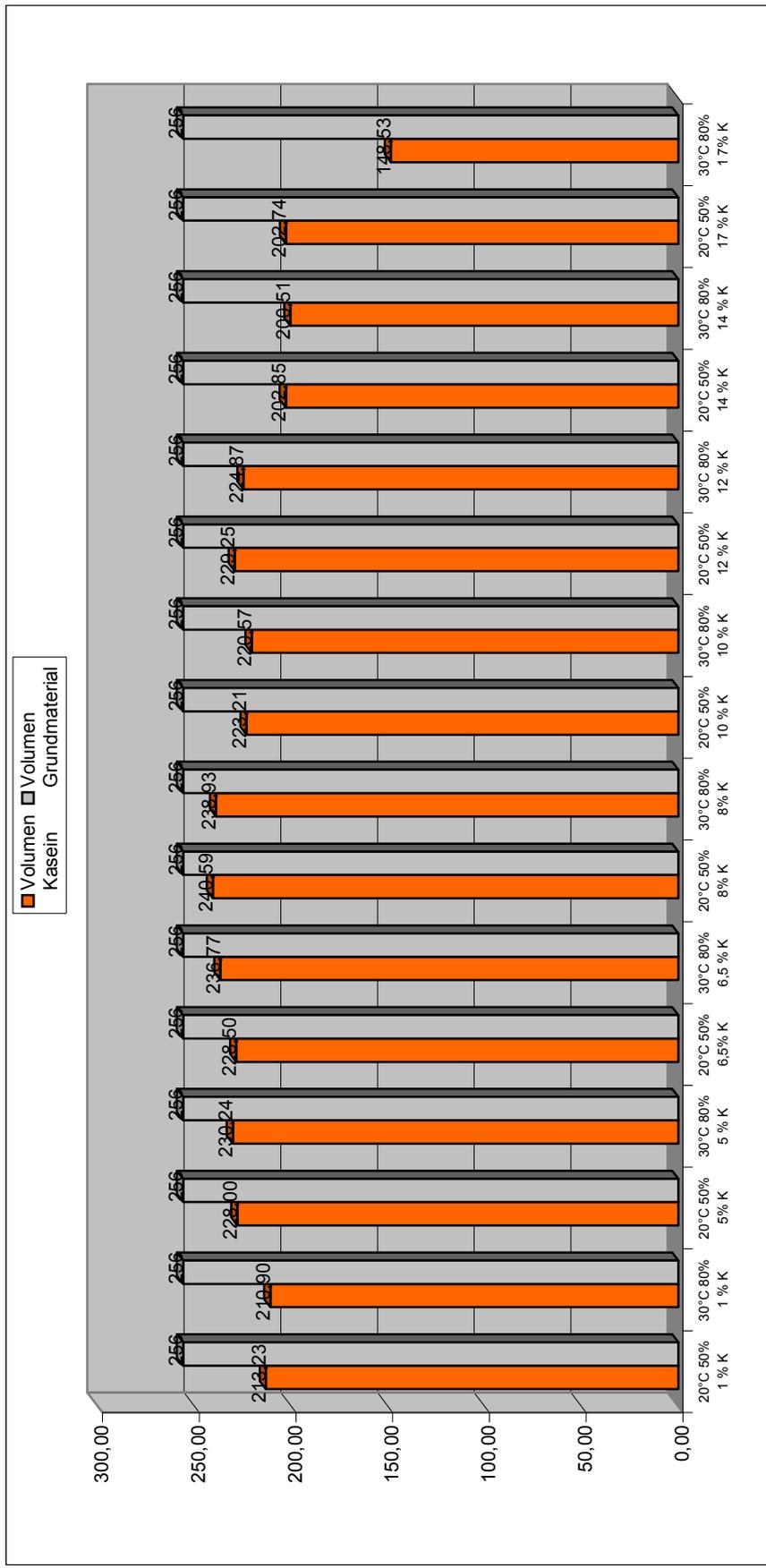


Abbildung 5.25 Volumen der Probekörper in [cm<sup>3</sup>] (Ausgangsvolumen: 256 cm<sup>3</sup>) - Vergleich Kaseinzusatz (oranger Balken) mit Grundmaterial (grauer Balken). Lagerungsbedingungen und Messzeitpunkt siehe Kapitel 3.1.



Abbildung 5.26 Schwindmaß in Prozent (Ausgangszeitpunkt: nach Ausschalen). Lagerungsbedingungen und Messzeitpunkt siehe Kapitel 3.1.

## 5.4 Zusammenfassung und Interpretation der Versuche mit ausgewählten Zusätzen (Detailversuche)

Die durchgeführten Detailversuche lieferten eine annähernde Ausrundung der Festigkeitskurven aus den Biegezug- und Druckvorversuchen. Nicht nur die Festigkeitswerte des Grundmaterials fielen etwas geringer aus, auch die Werte der Probekörper mit Kaseinzusatz zeigten niedrigere Ergebnisse als bei den Vorversuchen. Analog zum Vergleich der Grundmaterialwerte fällt beim Vergleich der 10 % Kaseinseries der Vor- und Detailversuche eine leichte Differenz auf. Die Differenz der Mittelwerte ist in Tabelle 5.2 dargestellt. Die Mittelwerte der Detailversuche lagen aber innerhalb der Schwankungsbreite der Vorversuche. Bei Betrachtung der Vor- und Detailversuche insgesamt, wurde eine leicht vergrößerte Schwankungsbreite festgestellt.

Tabelle 5.2 Vergleich der Mittelwerte der 10 % Kaseinseries aus Vor- und Detailversuchen

	Mittelwert Biegezug in [N/mm <sup>2</sup> ]	Diff. MW Biegezug in [N/mm <sup>2</sup> ]	Mittelwert Druck in [N/mm <sup>2</sup> ]	Diff. MW Druck in [N/mm <sup>2</sup> ]
trocken Vorversuch	3,35	0,34	13,69	2,99
trocken Detailversuch	3,01		10,70	
feucht Vorversuch	2,10	0,25	9,60	2,08
feucht Detailversuch	1,85		7,52	

Mögliche Gründe dafür könnten sein:

- anderes Grundmaterial (Für die Detailversuche wurde zwar aus der gleichen Lehmgrube Material entnommen, aber es ist davon auszugehen, dass innerhalb der Lehmgrube geringe Abweichungen der Materialhomogenität auftreten.)
- andere Probekörperherstellung (Die Herstellung erfolgte gleich wie bei den Vorversuchen. Es lag jedoch einige Zeit zwischen der Vorversuchsserie und der

Detailserie. Aufgrund der händischen Erzeugung ist hier vielleicht eine unzureichende Gleichmäßigkeit gegeben.)

Die Materialinhomogenität bedingt, dass die Versuche nur bedingt reproduzierbar sind. Es kann davon ausgegangen werden, dass eine maschinelle Herstellung den Schwankungsbereich reduziert.

Die Geruchsentwicklung und Schimmelbildung machten das Arbeiten mit Kasein zum Teil sehr unangenehm. Abbildung 5.27 zeigt zwei Probekörper mit Kaseinzusatz. Links liegt ein Probekörper mit 6,5 % Kaseinzusatz und rechts einer mit 14 % Kaseinzusatz. Beim rechten Probekörper sind eine starke Schimmelbildung, starkes Schwinden und große Deformationen erkennbar. Der Einbau von schimmelndem und stinkendem Baumaterial erscheint nicht sinnvoll. Somit scheiden die höherprozentigen Kaseinzugaben (ab etwa 10%) aus. Die hier verwendete Lagerung bei 80% Luftfeuchtigkeit und 30°C über einen Zeitraum von drei Tagen stellt einen Extremwert dar, der in der Realität nicht erwartet werden kann. Somit ist eine Schimmelbildung im fertigen, trockenen Bauwerk für niedrige Kaseinzusätze auszuschließen.



Abbildung 5.27 Schimmelbildung bei Kaseinzusatz

Auch die starke Verformbarkeit, der Probekörper mit einem Kaseinzusatz größer 10 %, nach dem Ausschalen stellt ein Problem dar.

Geringere Kaseinzugaben (1 – 5 %) bewirken bereits laut den Ergebnissen aus den Vorversuchen vor allem im Feuchtbereich eine deutliche Festigkeitssteigerung. Bei den Druckfestigkeitswerten zeigte sich eine Steigerung im Bereich von 34 – 64 % und bei den Druckfestigkeitswerten von 94 – 137 %. In diesem Bereich, evtl. auch darunter, scheinen weitere Untersuchungen sinnvoll.

Auch aufgrund der hohen Kosten von Kasein (1 kg reines Kasein aus der Großdrogeriehandlung kostet derzeit rund 50 € exkl. Steuern. Bei entsprechendem Mengenverbrauch sind hier aber sicher Preisreduktionen möglich.) erscheint es nicht wirtschaftlich hochprozentige Kaseinmengen beizumischen.

Im Größenvergleich kann bei 8 % Kaseinzusatz der geringste Volums- und Schwindverlust festgestellt werden (ca.7%). Wesentlich größer sind die Verluste bei 1 und 14 % Kaseingehalt (um 20 %), am größten bei der 17 % Kaseinserie (bis ca. 40 %).

Auch bei der Herstellung von gebrannten Ziegeln ist das Schwindmaß zu berücksichtigen. Vor dem Brennen werden die Ziegel vorgetrocknet. Während der Vortrocknung und dem darauffolgenden Brennen der Ziegel ist das Schwinden durch ein Übermaß zu berücksichtigen. Das Schwinden nach der Herstellung von Lehmsteinen kann also durch ein entsprechendes Übermaß berücksichtigt werden. Die Unterschiede der Luftfeuchtigkeit haben nur mehr einen geringen Einfluss auf die Volumsänderung. Es ist davon auszugehen, dass im eingebauten Zustand, bei entsprechendem Feuchteschutz, ein geringfügiges Quellen oder Schwinden kein Problem darstellt.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Diplomarbeit wurden Zusatzstoffe auf ihre Eignung zur Verbesserung der Festigkeitseigenschaften von Lehm untersucht. Ein besonderer Aspekt war dabei die Berücksichtigung eines höheren Feuchtigkeitsgehaltes im Baustoff und das mit der Feuchtigkeitsabnahme verbundene Schwinden. Gründe für diese Untersuchungen bilden die Festigkeitsreduktion durch Feuchtigkeitssteigerung im Lehm-Baustoff und die damit verbundenen statischen Einschränkungen. Ideengeber war die Firma *Wienerberger*, die bereits Forschungen zu diesem Thema durchführt und an weiteren Untersuchungsergebnissen interessiert ist.

Um den Iststand zu erheben und eine Auswahl an Zusätzen zu treffen wurde in der Literatur nach Aussagen über verbessernde Wirkungen von Lehmzusätzen gesucht. Die meisten Informationen zu den festigkeitsverbessernden Zusätzen sind vage formuliert, oft fehlen Angaben zu Prüfmethoden und Bedingungen und teilweise werden Überlieferungen unserer Ahnen wiedergegeben. Für diese Diplomarbeit wurde eine Auswahl von sieben Zusatzstoffen (Asche, Kalk, Zement, Kasein, Leinölfirnis, Wasserglas, Harnstoff + Ammoniak) für Vorversuche getroffen. Diese wurden dann mit unterschiedlichen Prozentzugaben unter genau festgelegten Rahmenbedingungen auf ihre Festigkeitseigenschaften, im speziellen die Biegezug- und Druckfestigkeiten, und auf ihr Schwindverhalten untersucht.

Unter den gewählten Zusätzen mit den jeweiligen Prozentzugaben fanden sich nur zwei Zusatzstoffe mit denen sich Festigkeitssteigerungen erzielen ließen. Die Werte der Biegezug- und Druckfestigkeitswerte wurden durch Kaseinzusatz sehr deutlich gesteigert. Mit Zementzusatz war vor allem eine Festigkeitssteigerung im feuchten Bereich festzustellen. Bei den restlichen Zusatzstoffen fielen die erhaltenen Festigkeitswerte sogar unterhalb der Werte, die mit Lehm ohne Zusatz erzielt wurden. Einige Zusätze reduzierten die Festigkeitseigenschaften sogar sehr deutlich.

Die weiteren Untersuchungen lieferten Werte, die eine Ausrundung der erhaltenen Kurven aus den Vorversuchen bewirkten. Eine maximale Festigkeitssteigerung wurde im Bereich

von 10 % Kaseinzusatz erzielt (Druckfestigkeit: trocken +121 %, feucht + 160 %; Biegezugfestigkeit: trocken + 85 %, feucht + 130 %).

Aus wirtschaftlichen (relativ hohe Kosten von Kasein), und auch hygienischen (Schimmelbildung an den Lehmprobekörpern ab einem Kaseingehalt von etwa 10 %) Gründen und der großen Verformbarkeit der frisch ausgeschalteten Probekörper mit hohem Kaseingehalt ist eine Untersuchung niedrig dosierter Kaseinzusätze sicher von Interesse. Auch im niedrig dosierten Bereich zeigten die Ergebnisse eine Festigkeitssteigerung (bei 1 % Kaseinzusatz: Druckfestigkeit: trocken + 37 %, feucht + 48 %; Biegezugfestigkeit: trocken +39 %, feucht + 96 %). Desgleichen zeigten auch die Schwindwerte im niedrig dosierten Bereich geringere Werte.

Auch die Auswirkungen auf andere Eigenschaften die durch Lehmzusatz verursacht werden bilden noch weitere Untersuchungsmöglichkeiten.

Es ist auch davon auszugehen, dass mit unterschiedlichen Lehmen verschiedene Ergebnisse mit gleichen Zusatzstoffen erzielt werden, d.h. in der Regel sind die Wirkungen von Zusatzstoffen von dem Lehm selbst abhängig und nicht generell reproduzierbar.

Entscheidend für weitere Untersuchungen werden einerseits der Markt, über die Nachfrage nach ökologischem Baumaterial, und andererseits die Bereitschaft von Lehr- und Forschungsanstalten sich mit diesem Thema auseinanderzusetzen sein. Auch die Wertigkeit des Ressourceneinsatzes gegenüber einem mit heutigen technischen Möglichkeiten hergestellten Baustoff wird von Gesellschaft, Politik und Fachleuten bestimmt und ist zeitlich variabel.

## Summary

The topic of this thesis is the analysis of additives and their ability to improve strength properties of loam. Generally, a higher content of moisture in loam materials reduces the static strength.

Therefore the focus was on the higher content of moisture in the loam and the occurrence of shrinkage caused by its reduction in building material. The Austrian company *Wienerberger* has already done some research on this issue and would be interested in further information and results.

To survey the actual state and making a choice on various additives, research on the improved impact of additives was necessary. However, there is a lack of information in the literature regarding such additives, also details of test methods are not sufficiently available.

In this thesis seven additives for preliminary tests were selected as followed: ash, lime, cement, casein, linseed oil, soluble glass, urea and ammoniac. All of them were tested (bending and compression test) under certain conditions with varying the percentages of the additives.

Only two out of seven chosen additives with their particular percentage would be able to improve the strength properties. The received values of the bending and compression test could be increased by adding casein and cement (especially under moist conditions). Furthermore some additives were reducing the strength properties to a larger extent. The maximum value of the strength was achieved by adding 10% of casein.

Because of the high costs of casein and hygienic problems such as mould growth, analyses with a lower amount of casein would be more efficient. It is also possible to achieve better strength properties of loam and lower shrinkage values by using less casein.

The impacts on other properties caused by the additives of loam provide the basis for further tests. The demand on the market and the willingness of research institutes to deal with ecological building materials are essential for more studies.

## 7 Literatur

Nr.	Autor	Titel, Verlag, Auflage, Ort, Jahr
/1/	<i>Minke Gernot</i>	Das neue Lehmhandbuch, ökobuch, 5. Auflage, Staufen bei Freiburg, 2001
/2/	<i>Schneider/Schwimmann /Bruckner</i>	Lehmbau für Architekten und Ingenieure, Werner Verlag, 1. Auflage, Düsseldorf, 1996
/3/		DIN 18952 Baulehm, Deutsches Institut für Normung, Oktober 1952, 1971 zurückgezogen
/4/		ÖNORM B 3303 Betonprüfung, Österreichisches Normungsinstitut, 2002 09 01
/5/	<i>Sieber Heinz G.</i>	Baustoff Lehm, C.F. Müller Verlag, 2. Auflage, Heidelberg, 1994
/6/	<i>Niemeyer Richard</i>	Der Lehmbau, ökobuch, Nachdruck der Originalausgabe 1946, Freiburg 1987
/7/	Dachverband Lehm e.V. (Hrsg)	Lehmbau Regeln, vieweg, 2. Auflage, Braunschweig, Wiesbaden 2002
/8/	<i>Dalokay Yalcin</i>	Lehmflachdachbauten in Anatolien, Dissertation an der Fakultät Bauwesen der technischen Universität Carolo-Wilhemina zu Braunschweig, 1966
/9/	<i>Pollak E., Richter E.</i>	Technik des Lehmbaues, Verlag Technik Berlin, Berlin, 1952
/10/		<a href="http://de.wikipedia.org/wiki/Kasein">http://de.wikipedia.org/wiki/Kasein</a> ; 5.5.2007
/11/	<i>Scherer Robert</i>	Das Kasein, Hartlebensverlag, Wien und Leipzig, 1905
/12/	<i>Keppler/Lemcke</i>	Mit Lehm gebaut, Blok Verlag, München, 1986
/13/		<a href="http://de.wikipedia.org/wiki/Lein%C3%B6l">http://de.wikipedia.org/wiki/Lein%C3%B6l</a> ; 9.5.2007
/14/		<a href="http://de.wikipedia.org/wiki/Lein%C3%B6lfirnis">http://de.wikipedia.org/wiki/Lein%C3%B6lfirnis</a> ; 9.5.2007
/15/		<a href="http://de.wikipedia.org/wiki/Melasse">http://de.wikipedia.org/wiki/Melasse</a> ; 10.5.2007
/16/		<a href="http://www.nawaro.com/newslette/2004_07_05_Newsletter.pdf">http://www.nawaro.com/newslette/2004_07_05_Newsletter.pdf</a> ; 11.5.2007
/17/		<a href="http://lexikon.meyers.de/meyers/Melasse">http://lexikon.meyers.de/meyers/Melasse</a> ; 14.5.2007
/18/		<a href="http://lexikon.meyers.de/meyers/St%C3%A4rke">http://lexikon.meyers.de/meyers/St%C3%A4rke</a> ; 14.5.2007
/19/		<a href="http://lexikon.meyers.de/meyers/Harze">http://lexikon.meyers.de/meyers/Harze</a> ;14.5.2007
/20/	<i>Kézdi Árpád</i>	Handbuch der Bodenmechanik, VEB Verlag für Bauwesen Berlin, Verlag der Ungarischen Akademie der Wissenschaften Budapest, Budapest 1969
/21/		DIN 18953 Baulehm Lehmbauteile, Deutsches Institut für Normung, Mai 1956, 1971 zurückgezogen
/22/		DIN 18954 Ausführung von Lehmbauten, Deutsches Institut für Normung, Mai 1956, 1971 zurückgezogen
/23/	<i>Raith Wolfgang</i>	Lehm · Tadelakt · Kalk, TERVEHN GmbH, Ditzingen (Stuttgart), 2005

/24/	<i>Wichmann Hans</i> (Hrsg.)	Architektur der Vergänglichkeit, Birkhäuser Verlag, Basel · Boston · Stuttgart, 1983
/25/	<i>Volhard Franz</i>	Leichtlehm, C. F. Müller Verlag, 5. Auflage, Heidelberg, 1995
/26/		<a href="http://www.diestatiker.de/diestatiker/components/com_docman/dl2.php?archive=0&amp;file=bmF0dXJzdGVpbl9rdW5zdHN0ZwluLnBkZg==">http://www.diestatiker.de/diestatiker/components/com_docman/dl2.php?archive=0&amp;file=bmF0dXJzdGVpbl9rdW5zdHN0ZwluLnBkZg==</a> ; 25.5.2007
/27/	<i>Mandadjieva Joana</i>	Baustoffeigenschaften von Lehm, Diplomarbeit an der TU Wien, Wien, 1997
/28/		<a href="http://www.fachwerk.de/wissen/putz-tadelakt-16936.html">http://www.fachwerk.de/wissen/putz-tadelakt-16936.html</a> ; 23.5.2007
/29/		<a href="http://de.wikipedia.org/wiki/Tadelakt">http://de.wikipedia.org/wiki/Tadelakt</a> ; 23.5.2007
/30/	<i>Schillberg Klaus/ Knieriemen Heinz</i>	Naturbaustoff Lehm, AT Verlag, Aarau/Schweiz, 1993
/31/		DIN 18123 Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Korngrößenverteilung, Deutsches Institut für Normung, 1996-11
/32/	<i>Miller/Grigutsch/Schulze</i>	Lehmhaufel, Redaktion der Wissenschaftlichen Zeitschrift der Hochschule für Architektur und Bauwesen, Unveränderter Nachdruck der 2. Auflage von 1947, Weimar, 1993
/33/	<i>Kunze Christine</i>	Lehmbau in Ghana. Was geht uns das an?, Diplomarbeit an der TU Wien, Wien, 2003
/34/	<i>Öhlinger Zinat Sadat</i>	Untersuchung des Schwindverhaltens von Lehm mit ausgewählten Zusatzstoffen, Diplomarbeit an der TU Wien, Wien, 2005
/35/	<i>Bazara Abdulhakiem</i>	Bautechnische Grundlagen zum Lehmgeschossbau im Jemen, Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau Technische Universität Berlin, Heft 29, Fraunhofer IRB Verlag, Berlin, 1998
/36/	<i>KirchBauhof gGmbH</i> (Hrsg.)	Moderner Lehm, Fraunhofer IRB Verlag, Berlin 2002
/37/	TU Berlin (Hrsg.)	Lehmbau in Theorie und Praxis, Seminarunterlagen vom Institut für Entwerfen, Konstruktion, Bauwirtschaft und Baurecht an der TU Berlin, Berlin, 1998
/38/	<i>Bruckner Alexander</i>	Bauen mit Lehm an Hand von Beispielen aus Österreich, Deutschland und Südtirol, Diplomarbeit an der TU Wien, Wien, 1996
/39/	<i>Lustig-Rössler Ursula</i>	Untersuchungen zum Feuchteverhalten von Lehm als Baustoff, Inaugural – Dissertation an der Gesamthochschule Kassel, Kassel, 1992
/40/	<i>Budnikov P.P.</i>	Technologie der keramischen Erzeugnisse, VEB Verlag Technik Berlin, Berlin 1953
/41/	Dachverband Lehm e. V. (Hrsg.)	Lehmbau Regeln, Vieweg Verlag, 2. Auflage, Braunschweig/Wiesbaden, 2002
/42/	<i>Kelm Adalbert</i>	Der Lehm, Ein Mittel zur Bekämpfung der Wohnungsnot, J. M. Gebhardt's Verlag, Leipzig, 1920
/43/	<i>Hetzl Michael</i>	Der Ingenieur – Lehm, Dissertation an der TU Wien, Wien, 1994
/44/		Lehmseminar – „Projekt Alberndorf“, Institut für Tragwerkslehre, Wien, 1991
/45/	<i>Dethier Jean</i> (Hrsg.)	Lehmarchitektur – Die Zukunft einer vergessenen Bautradition, Prestel – Verlag, München, 1982

/46/	Salmang Hermann / Scholze Horst	Die physikalischen und chemischen Grundlagen der Keramik, Springer Verlag, 5. Auflage, Berlin Heidelberg, 1968
/47/		<a href="http://www.taipa.de/Materialkunde.PDF">http://www.taipa.de/Materialkunde.PDF</a> ; 2.7.2007
/48/		<a href="http://www.spessartit.de/130.htm">http://www.spessartit.de/130.htm</a> ; 5.7.2007
/49/		<a href="http://www.lehm.at/typo3/index.php?id=654">http://www.lehm.at/typo3/index.php?id=654</a> ; 30.8.2007
/50/		<a href="http://www.tek.tu-berlin.de/forschung/lehmbau/tragender%20lehmbau/bilder_lehmbau/lehm08g.jpg">http://www.tek.tu-berlin.de/forschung/lehmbau/tragender%20lehmbau/bilder_lehmbau/lehm08g.jpg</a> ; 30.8.2007
/51/		<a href="http://www.tek.tu-berlin.de/forschung/lehmbau/tragender%20lehmbau/lehm21g.htm">http://www.tek.tu-berlin.de/forschung/lehmbau/tragender%20lehmbau/lehm21g.htm</a> , 30.8.2007
/52/		<a href="http://www.a-m.de/">http://www.a-m.de/</a> ; 5.9.2007
/53/		<a href="http://www.ahabc.de/entwicklung/stoffneubildung/tonminerale.html">http://www.ahabc.de/entwicklung/stoffneubildung/tonminerale.html</a> ; 5.9.2007
/54/		<a href="http://www.voneinanderlernen.uni-kiel.de/typo3/index.php?id=51/f.R.B.">http://www.voneinanderlernen.uni-kiel.de/typo3/index.php?id=51/f.R.B.</a> ; 5.9.2007
/55/	<i>Trojan Martin</i>	Auswirkungen durch Beimischen von Zusatzstoffen auf die Druckfestigkeit von Lehmbaustoffen, Diplomarbeit an der TU Wien, noch nicht veröffentlicht
/56/	<i>Kozek Ingo</i>	Untersuchung von chemisch wirksamen Zusatzstoffen zur Verbesserung des Feuchteverhaltens von Lehm (Arbeitstitel), Diplomarbeit an der TU Wien, noch nicht veröffentlicht
/57/		<a href="http://www.zamg.ac.at/fix/klima/oe71-00/klima2000/klimadaten_oesterreich_1971_frame1.htm">http://www.zamg.ac.at/fix/klima/oe71-00/klima2000/klimadaten_oesterreich_1971_frame1.htm</a> , 6.9.2007
/58/		Microsoft Excel – Hilfe (Office 2000) - KONFIDENZ