
Alternative natürliche Materialien zur Verstärkung von Mauerwerk bei Erdbebenbeanspruchung

Diplomarbeit

von

Andreas Maximilian Schäfer

angefertigt am

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie

Lehrstuhl für Massivbau

Institutsleiter: Prof. Dr.-Ing. L. Stempniewski

Betreuer: Dipl.-Ing. M. Urban

August 2012

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung	2
1.3	Zur Gliederung	3
2	Theoretische Grundlagen	4
2.1	Theorie	4
2.1.1	Erdbebeneinwirkung	4
2.1.2	Baudynamische Grundlagen	7
2.1.3	Bauwerke unter Erdbebenlast	8
2.1.4	Tragwiderstand und Duktilität	9
2.1.5	Elastizität und Plastizität	10
2.1.6	Duktilität	10
2.2	Mauerwerk	13
2.2.1	Charakteristische Eigenschaften der Bestandteile von Mauerwerk	13
2.2.2	Mauerwerk unter einaxialer Beanspruchung	14
2.2.3	Mauerwerk unter mehraxialer Beanspruchung	16
2.2.4	Charakteristische Eigenschaften der Bestandteile von Mauerwerk	19
2.3	Mauerwerksputze & -mörtel	22
2.3.1	Zusammensetzung	22
2.3.2	Schwinden	24
2.3.3	Lehm zur Herstellung von Mauerwerksputz	25
2.4	Faserwerkstoffe	27
2.4.1	Bedeutung von Faserwerkstoffen	27
2.4.2	Mechanische Eigenschaften	28
2.4.3	Biologische Zusammensetzung & Aufbau	29
2.4.4	Faserarten im Detail	32
2.5	Gewebe & Textilien	38
2.5.1	Linienförmige Gebilde	38
2.5.2	Flächengebilde	39
3	Stand der Technik	40
3.1	Schwegler – 1994	40
3.2	Wallner – 2007	41
3.3	Münich – 2010	41
4	Experimentelle Untersuchung	42

4.1	Versuchsplanung.....	42
4.2	Untersuchungen an Lehm-Putzen.....	44
4.2.1	Ausgangsstoffe	45
4.2.2	Versuchsdurchführung.....	48
4.2.3	Ergebnisse & Empfehlung.....	53
4.3	Zugversuche an Naturfasern.....	54
4.3.1	Ausgangsstoffe	54
4.3.2	Versuchsdurchführung.....	55
4.3.3	Ergebnisse & Empfehlung.....	71
4.4	Zugversuche an Einzelsteinproben	73
4.4.1	Versuchsvorbereitung	73
4.4.2	Versuchsdurchführung.....	77
4.4.3	Ergebnisse und Empfehlung.....	86
4.5	Schubversuche an Dreisteinproben	89
4.5.1	Versuchsvorbereitung	89
4.5.2	Versuchsdurchführung.....	93
4.5.3	Ergebnisse und Empfehlung.....	103
5	Fazit und Aussicht.....	105
5.1	Fazit	105
5.2	Aussicht.....	106
	Abbildungen.....	107
	Tabellen.....	110
	Literatur	112
	Danksagung.....	114
	Anhang A: Vergleich der Fasertypen.....	115
	Anhang B: Rissbilder bei den Schubversuchen.....	119

1 Einleitung

1.1 Motivation

Schon zu Altertumszeiten war der Mauerwerksbau eine der vorherrschenden Bauformen. Dies hat sich bis heute nicht sehr verändert. Vor allem im Wohnungsbau sind die günstigen Materialkosten, sowie die guten bauphysikalischen Eigenschaften ausschlaggebende Kriterien. Bild 1.1. zeigt wie stark Mauerwerk im Vergleich zu anderen Bauweisen im städtischen und vor allem ländlichen Raum vertreten ist. Aufgrund seiner jedoch eher mangelhaften Fähigkeit Horizontalkräfte abzutragen, führen vor allem starke Erdbeben zu großen Schäden an den Gebäuden oder sogar zum Einsturz.

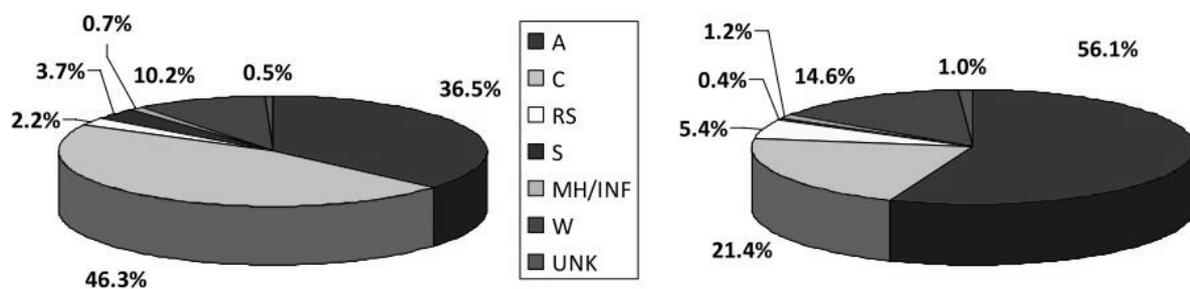


Bild 1.1: Weltweite Verteilung Gebäudeklassen in städtischen (links) und ländlichen (rechts) Gegenden, Diagrammbeschriftung im Uhrzeigersinn (A = Mauerwerk, C = Stahlbeton, RS = Natursteinmauerwerk, S = Stahl, MH/INF = Mobile Bauhausung / schlechte Bauqualität, W = Holz, Unk = unbekante Typologie) [7]

Ein Hauptgrund liegt hierbei vor allem in der nur mäßigen Schubtragfähigkeit von Mauerwerksscheiben. Dies liegt zum einen in der nur unzureichenden Dimensionierung von Bauwerken für den Lastfall Erdbeben, welcher erst in den vergangenen Jahrzehnten ausreichend erörtert und analysiert wurde um entsprechende Lastmodelle zur Bemessung von Bauwerken unter Erdbebenlast zu liefern. Andererseits auch in der teilweise nur mäßigen Bauausführung, diese findet sich vor allem in den Entwicklungsländern und in Ländern mit starker Korruption, was bei Erdbebenereignissen zu teilweise immensen, aber eigentlich vermeidbaren Schäden führen kann. Hinzu kommen Alterserscheinungen und Verwitterung von älteren Bestandsbauwerken. Bild 1.2 zeigt eine globale Übersicht über das allgemeine Einsturzrisiko des Bauwerksbestands. Wobei bei einem Erdbebenereignis die Wahrscheinlichkeit des Einsturzes bei weitem höher anzusetzen ist.

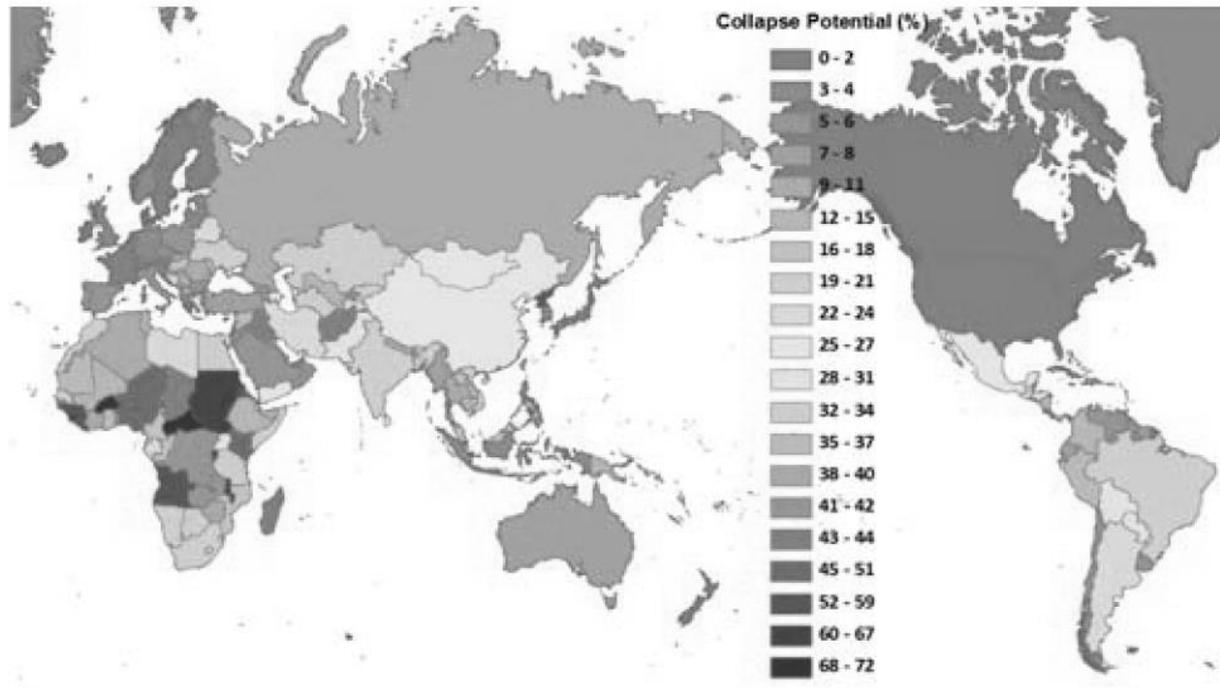


Bild 1.2: Globale Übersicht über das allgemeine Einsturzrisiko des Bauwerksbestands. [7]

Die Notwendigkeit einer ökonomischen Lösung zur Verstärkung von Mauerwerk unter Erdbebenlast wurde bereits vor Jahren erkannt. Unter anderem durch den Einsatz von Faserverbundwerkstoffen auf der Oberfläche von Mauerwerksscheiben war es möglich den Lastabtrag von Erdbeben deutlich zu erhöhen, dies zeigen jüngere Forschungsarbeiten, welche hier ebenfalls vorgestellt werden. Als materielle Grundlage dieser Untersuchungen wurden bisher hauptsächlich künstliche Materialien verwendet, z.B. Aramid, Polypropylen, etc. Trotz der guten mechanischen Eigenschaften dieser Werkstoffe, haben sie alle einen entscheidenden Nachteil. Dieser ist hierbei der verhältnismäßig kostenintensive Rohstoffbedarf, welcher zwar für die Industrienationen als tragbar anzusehen ist, aber für Entwicklungsländer eine gewaltige Hürde bei der Verstärkung des Bauwerksbestandes darstellt.

1.2 Zielsetzung

In diesem Sinne ist somit die Nutzung von natürlichen Faserverbundstoffen zu untersuchen. Daraus entstehen mehrere Vorteile. Zum einen lässt sich die Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen stärker mit dem Gedanken der Nachhaltigkeit vereinigen, da hierbei im Vergleich zu der Herstellung von teuren Glasfasern oder Kunststoffen ein weitaus geringerer Energiebedarf notwendig ist und es auch in der Natur der natürlichen Rohstoffe liegt, dass diese nachwachsen. Ein weiterer entscheidender Vorteil der Nutzung von natürlichen Fasern ergibt sich aufgrund der landwirtschaftlichen Anbaufähigkeit dieser Rohstoffe, so wäre es für Entwicklungsländer nicht mehr notwendig, teure High-Tech-Produkte wie Glasfasern zu Weltmarktpreisen zu erstehen. Sie wären somit in der Lage, aus „lokalen“ Produkten, eine aktive

Verstärkung ihrer Bestandsgebäude kostengünstig herzustellen. Demgemäß sollen im Rahmen dieser Arbeit verschiedene natürliche Faserstoffe untersucht, getestet und im Sinne ihrer Anwendbarkeit als seismisches Verstärkungstextil bewertet werden. Zusätzlich soll die Verwendung von Lehm untersucht werden und als natürlicher Mauerwerksputz die Funktion der Matrix für die Fasergewebe einnehmen. Lehm ist nahezu weltweit verfügbar und besitzt gute mechanische und bauphysikalische Eigenschaften. Somit wäre ein Gesamtpaket zur nachhaltigen Verstärkung von Mauerwerksstrukturen gegeben.

1.3 Zur Gliederung

Zu Beginn sollen die Grundlagen zum Verständnis der Werkstoffe und Einwirkungen erläutert werden. Allen voran der Lastfall Erdbeben und seine Wirkung auf Bauwerke und im Speziellen auf Mauerwerk. Darauf aufbauend sollen die Schadensfälle von Mauerwerk unter Erdbebenlast erläutert werden. Hinzu kommt eine kurze Übersicht über die Verwendung von Mauerwerkputzen und –mörteln, deren Zusammensetzung und vor allem der Einsatz von Lehm. Damit ist die Betrachtung der Ausgangssituation nahezu abgeschlossen. Im abschließenden Teilkapitel für die Grundlagen sollen verschiedene natürliche Fasermaterialien vorgestellt werden und die Herstellungsmöglichkeiten von einfachen Naturfasergeweben. Bevor mit der experimentellen Untersuchung begonnen wird, werden kurz verschiedene Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Faserverbundwerkstoffe für Mauerwerk unter Erdbebenlast vorgestellt und deren Nutzen für diese Arbeit erläutert.

Die experimentelle Untersuchung gliedert sich in insgesamt vier Teilversuchsreihen. Begonnen wird mit der experimentelle Untersuchung von Lehm-Putzen. Hierbei werden verschiedene Rezepturen als Kleinproben angefertigt und auf Mauerwerk appliziert. Die zweite beschäftigt sich mit der Eignung der natürlichen Faserstoffe. Hierbei werden an Zugversuchen die Literaturangaben der Werkstoffe überprüft und eine Datengrundlage, zur Beurteilung ihrer Eignung für eine Mauerwerksverstärkung, geschaffen und bewertet. Ziel dieser ersten beiden Versuchsreihen ist eine grundlegende Empfehlung für die weiteren Untersuchungen. Zum einen sollen die mechanischen Kenngrößen der für den Versuch verwendeten Faserstoffe ermittelt werden, sowie ein geeigneter Lehm-Putz entwickelt werden, welcher in den weiteren Versuchen angewendet wird. In der dritten Versuchsreihe soll die Zugtragfähigkeit im Haftverbund mit Putz und Mauerwerk untersucht werden. Darauf aufbauend ergibt sich die letzte Versuchsreihe, welche sich mit der Schubtragfähigkeit multiaxialer Naturfasergewebe beschäftigt. Diese Versuche werden zusätzlich mit einem einfachen mechanischen Modell abgeglichen und verifiziert. Als Abschluss dieser Arbeit sollen die Ergebnisse der verschiedenen Versuchsreihen verglichen, ausgewertet und erläutert werden, so dass am Ende eine Empfehlung für die Herstellung von natürlichen Fasergeweben gegeben werden kann.

2 Theoretische Grundlagen

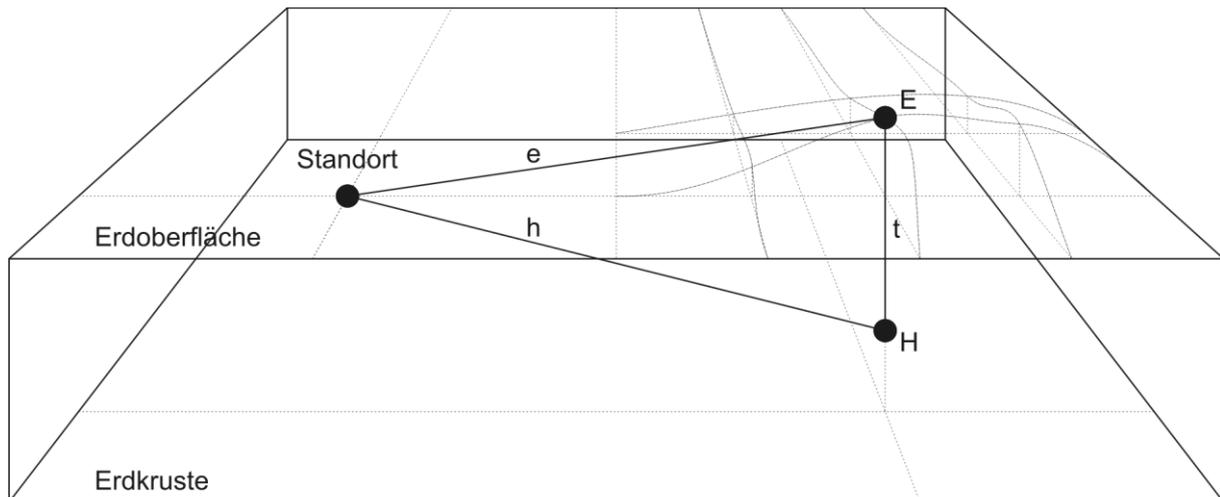
Im folgenden Kapitel sollen alle notwendigen theoretischen Grundlagen, welche zum Verständnis von Mauerwerk in Bezug auf seine Versagensarten unter Erdbebenlast notwendig sind, erläutert werden, insbesondere soll hierbei auf den Faktor der Duktilität eingegangen werden. Zusätzlich werden verschiedene Möglichkeiten zur Herstellung von natürlichen Mauerwerkspitzen erläutert und diskutiert, sowie eine Übersicht über die zur Verfügung stehenden natürlichen Fasermaterialien dargestellt und ihre Verwendbarkeit diskutiert.

2.1 Theorie

Hier sollen die notwendigen theoretischen Grundlagen kurz erläutert werden. Angefangen von den Ursachen von Erdbeben bis zum Verhalten von Bauwerken unter Erdbebenbeanspruchung.

2.1.1 Erdbebeneinwirkung

Erdbeben sind seismische Ereignisse bei denen große Mengen an Energie freigesetzt werden. Tektonische Erdbeben entstehen wenn sich die die festen Platten, welche die obere Erdkruste bilden, relativ zueinander verschieben. Zum einen können diese sich untereinander schieben, oder vorbeibewegen. Dabei kann es dazu kommen, dass sich lokale Spannungen bilden, die sich dann in Form von Erdbeben wieder lösen, in der Regel befinden sich diese Spannungen in einer Tiefe von 5-40km. Diese Bereiche können Ausdehnungen von wenigen Metern bis hin zu mehreren 100km annehmen. Für die Lokalisierung wird diese Bruchfläche jedoch punktuell auf das sog. Hypozentrum reduziert. Die Projektion des Hypozentrums auf die Erdoberfläche bezeichnet man als Epizentrum. Darüber hinaus gibt es noch weitere Ursachen für Erdbeben (z.B. Vulkane, Einsturz von Hohlräumen), die aber nur sehr lokal begrenzt auftreten und relativ energiearm im Vergleich zu tektonischen Beben sind. Daher werden diese nicht für die Beurteilung der Erdbebengefährdung herangezogen. [2]



E - Epizentrum e - Epizentraldistanz
H - Hypozentrum h - Hypozentraldistanz
t - Herdtiefe

Bild 2.1: Geographische Beschreibung von Erdbeben

Die bei einem Erdbeben freigesetzte Energie wird dabei in Wärme- und Wellenenergie umgewandelt. Letztere äußert sich in verschiedenen Arten von Wellen, die sich in ihrer Ausbreitungs- und Bewegungsart unterscheiden. Zum einen gibt es die P- & S-Wellen, welche auch als Raumwellen bezeichnet werden. Diese breiten sich im Erdinneren aus und treten zeitlich versetzt voneinander auf, darüber hinaus werden sie in den verschiedenen Schichten und Oberflächen innerhalb der Erde mehrfach umgelenkt und gebrochen bis sie schließlich an die Erdoberfläche treten. Dort werden die Wellen in Rayleigh- und Love-Wellen unterschieden. Während erstere eine elliptische Bodenbewegung verursachen, führen die Love-Wellen zu einer horizontalen Scherbewegung des Bodens. [2]

Die dabei freigesetzte Wellenenergie wird als Magnitude beschrieben. Deren Bestimmung erfolgt über die Auswertung der gemessenen Geschwindigkeiten der Erdbebenwellen. Die Einordnung der Magnitude wird durch eine logarithmische Skala vorgenommen. Dadurch ergibt sich eine 32-fache Energiesteigerung je Stufe. Es besteht in der Regel ein direkter Zusammenhang zwischen Größe der Bruchfläche, der dazugehörigen Gesteinsfestigkeit und der Magnitude. Die Erdbebenhäufigkeit nimmt mit steigender Magnitude sehr stark ab. Die stärksten Erdbeben erreichten bis dato eine Magnitude von 9,5. 2011 sorgte das Tohoku-Erdbeben vor der Küste Japans mit einer Magnitude von 9,0 einen gewaltigen Schaden und ging als „teuerstes Erdbeben“ in die jüngere Geschichte ein [6].

Im ingenieurmäßigen Sinne ist es jedoch unpraktisch mit einem „Energemaß“ wie der Magnitude zu rechnen. Somit wurde die Größe der Intensität eingeführt. Diese beschreibt die Wirkung des Erdbebens an der Oberfläche auf Menschen, Bauwerke

und die Umwelt. Die Intensität hängt vor allem mit den lokalen Bodenverhältnissen, der Exposition und der Vulnerabilität vor Ort zusammen. [2]

EMS intensity	Definition	Description of typical observed effects (abstracted)
I	Not felt	Not felt.
II	Scarcely felt	Felt only by very few individual people at rest in houses.
III	Weak	Felt indoors by a few people. People at rest feel a swaying or light trembling.
IV	Largely observed	Felt indoors by many people, outdoors by very few. A few people are awakened. Windows, doors and dishes rattle.
V	Strong	Felt indoors by most, outdoors by few. Many sleeping people awake. A few are frightened. Buildings tremble throughout. Hanging objects swing considerably. Small objects are shifted. Doors and windows swing open or shut.
VI	Slightly damaging	Many people are frightened and run outdoors. Some objects fall. Many houses suffer slight non-structural damage like hair-line cracks and fall of small pieces of plaster.
VII	Damaging	Most people are frightened and run outdoors. Furniture is shifted and objects fall from shelves in large numbers. Many well built ordinary buildings suffer moderate damage: small cracks in walls, fall of plaster, parts of chimneys fall down; older buildings may show large cracks in walls and failure of fill-in walls.
VIII	Heavily damaging	Many people find it difficult to stand. Many houses have large cracks in walls. A few well built ordinary buildings show serious failure of walls, while weak older structures may collapse.
IX	Destructive	General panic. Many weak constructions collapse. Even well built ordinary buildings show very heavy damage: serious failure of walls and partial structural failure.
X	Very destructive	Many ordinary well built buildings collapse.
XI	Devastating	Most ordinary well built buildings collapse, even some with good earthquake resistant design are destroyed.
XII	Completely devastating	Almost all buildings are destroyed.

Bild 2.2: Europäische Intensitätskala EMS-98 [2]

Um die Wirkung von Erdbeben auf Bauwerke zu charakterisieren ist vor allem die Bodenbeschleunigung maßgebend, da diese als Fußpunkterregung eine dynamische Wirkung auf das Tragwerk hat. Diese hängt vor allem von der maximalen Beschleunigung sowie von der Frequenzverteilung und dem dazugehörigen zeitlichen Verlauf ab. Das Antwortspektrum vereinigt diese Faktoren. Das Antwortspektrum errechnet sich entweder über eine normgemäße Ermittlung, auf Basis von beobachteten Erd-

beben unter Berücksichtigung von lokalen Faktoren wie Bodenart und geographische Lage. Oder durch direkte Übertragung eines von einem dokumentierten Erdbeben aufgezeichneten Spektrums. [3, 1]

2.1.2 Baudynamische Grundlagen

Um zu verstehen wie der Lasteintrag bei Bauwerken unter Erdbebenlast funktioniert, sind Grundkenntnisse der Baudynamik notwendig. Als Basismodell der gängigen Berechnungsverfahren fungiert der Einmassenschwinger. Hierbei wird eine dynamische Fußpunkterregung auf einen gedämpften Einmassenschwinger übertragen, siehe Abbildung 2-3. Dies führt zu einer Differentialgleichung 2. Ordnung.

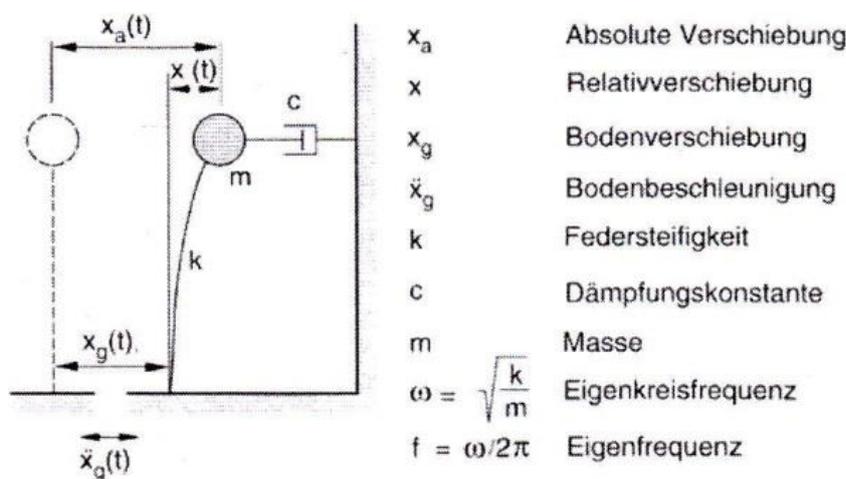


Bild 2.3: Fußpunkterregter Einmassenschwinger [2]

Aus Gleichgewichtsgründen ergibt sich:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{x}_g(t) \quad (1)$$

Und führt zur Standardform:

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega\dot{x} + \omega^2x = -\ddot{x}_g(t) \quad (2)$$

Mit: $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$: Eigenkreisfrequenz des ungedämpften Schwingers

$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{f}$ Eigenperiode

$\zeta = \frac{c}{2m\omega}$ Dämpfungsmaß

Im Falle eines Mehrmassenschwingers (komplexe Strukturen) wird das System gemäß den wesentlichen Charakteristika auf wenige Freiheitsgrade reduziert. Im Falle

eines mehrstöckigen Rahmenbauwerks werden die Freiheitsgrade je Stockwerk auf eine Richtung reduziert (Analyse am Schnitt, nur eine Horizontalachse). Hierbei werden die Stockwerksmassen punktuell zugeordnet, die Steifigkeiten ergeben sich gemäß den Randbedingungen des Bauwerks (z.B. Stützensteifigkeit). So ergibt sich ein Gleichungssystem mit einer diagonalen Massenmatrix, einer symmetrischen Steifigkeitsmatrix sowie einer Dämpfungsmatrix. Die Dämpfung ergibt sich aus innerer und äußerer Dämpfung. Erstere entsteht je nach Material durch die Baustoffdämpfung und durch Reibung an Kontaktflächen innerhalb der Baustruktur, während die äußere Dämpfung als Abstrahldämpfung in den Untergrund zu verstehen ist. Die Dämpfung eines Bauwerks wird durch das *Lehr'sche* Dämpfungsmaß ζ beschrieben. Zur Ermittlung der maßgebenden Eigenfrequenzen bei welchen das Bauwerk in Resonanz übergeht, erfolgt die Lösung des Eigenwertproblems durch die Modalanalyse. Dies erfolgt am ungedämpften System. Dies ist möglich, da die Fehler für Dämpfungsmaße $\zeta \ll 1$ vernachlässigbar klein bleiben.

$$|\underline{k} - \omega^2 \underline{m}| = 0 \quad (3)$$

Durch die Lösung des Eigenwertproblems ergibt sich zu jeder Eigenperiode T eine Eigenform, welche über den Eigenvektor definiert ist. Zur Ermittlung in der Praxis können entweder aufwendige Computermodelle Anwendung finden, oder es werden Formeln z.B. nach *Bachmann*[2] zur Abschätzung angewendet.

2.1.3 Bauwerke unter Erdbebenlast

Gefährlichste Eigenschaft der Erdbebeneinwirkung ist die Lastrichtung. Abgesehen von Windlasten werden Bauwerke nicht für den Abtrag horizontaler Lasten ausgelegt, sondern gemäß der natürlichen Lastrichtung nur vertikal. Somit sind auch vertikale Bodenbewegungen infolge Erdbeben in der Regel vernachlässigbar. Kritisch werden die starken horizontalen Beschleunigungen des Bodens. Zur Berechnung der Erdbebeneinwirkungen auf ein Gebäude können mehrere Verfahren angewendet werden. Bei dem Ersatzkraft- und dem Antwortspektrenverfahren wird „pseudodynamisch“ gerechnet, indem statische Ersatzkräfte auf das Bauwerk aufgebracht werden. Die Größe der Spektralbeschleunigung ist von der jeweiligen Eigenperiode abhängig und wird durch das Antwortspektrum ermittelt. Die einwirkenden Kräfte werden gemäß der relativen Verschiebung der Eigenform auf die einzelnen Freiheitsgrade verteilt. Während beim Ersatzkraftverfahren lediglich die erste Eigenform berücksichtigt wird, werden beim Antwortspektrenverfahren auch höhere Eigenformen betrachtet. Wie viele dies jedoch sind, ist von der jeweiligen Bemessungsnorm abhängig. Wenn mehrere Eigenformen berücksichtigt werden, wird die Last zusätzlich, gemäß den Ersatzmassenfaktoren, die sich für jede Eigenform ergeben, auf die Eigenformen verteilt.

$$F = M * S_a \quad (4)$$

Mit:	F	Totale horizontale Erdbeben-Ersatzkraft
	M	Masse der jeweiligen Betrachtungseinheit (z.B. 3.Stock, 2.Eigenform) in Abhängigkeit der Ersatzkraft
	S_a	Spektralbeschleunigung

Der Vollständigkeit halber soll noch das deutlich aufwendigere Zeitverlaufsverfahren erwähnt werden, bei welchem eine nicht-lineare, dynamische Berechnung angewendet wird. [2]

2.1.4 Tragwiderstand und Duktilität

Grundlage des Erdbebenverhaltens von Bauwerken ist der Tragwiderstand gegen horizontale Kräfte, sowie die Duktilität, also das Verformungsvermögen des Bauwerks. Um einen gewissen Widerstand gegen Erdbebeneinwirkungen zu erreichen muss das Gebäude entweder einen hohen Tragwiderstand und eine kleine Duktilität aufweisen, oder einen niedrigen Tragwiderstand gegenüber einer hohen Duktilität, oder jeweils die Mitte von beidem. [2]

In Bezug auf die Materialtheorie besteht der Unterschied zwischen Tragwiderstand und Duktilität, dass ersteres von einer „Aufnahme“ der Erdbebenkräfte ausgeht und die Duktilität diese durch plastische Verformung absorbiert. Im Falle dieser Verformungen entstehen jedoch erhebliche Schäden am Bauwerk, der Einsturz wird jedoch verhindert. Die Gewährleistung eines hohen Tragwiderstands ist jedoch äußerst unwirtschaftlich, da jedoch derart starke Erdbeben eher selten auftreten, wird meist ein gewisser Grad an Schaden durch plastische Verformung in Kauf genommen. So ist es vor allem in seismisch aktiven Regionen gängig, derartige Schäden zu akzeptieren. Die Duktilität muss jedoch durch eine entsprechende konstruktive Durchbildung des Bauwerks erbracht werden. [2]

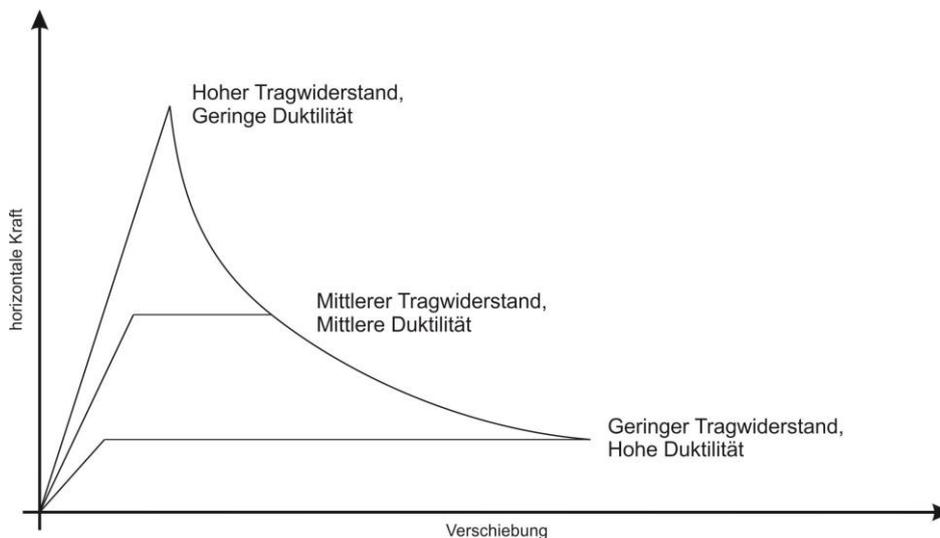


Bild 2.4: Beschreibung von Tragwiderstand und Duktilität über das Last-Verschiebungs-Diagramm

2.1.5 Elastizität und Plastizität

Es wird prinzipiell nach elastischem, ideal-elastischem, plastischem sowie starr-plastischem Materialverhalten unterschieden. Das Werkstoffverhalten ist vor allem für die Modellbildung von besonderer Bedeutung. Wichtigster Unterschied ist, dass sich elastische Materialien reversibel in Bezug auf Verformungen verhalten, während sich plastische Materialien irreversibel verhalten. Mauerwerk weist jedoch nahezu keine Möglichkeit zu plastischem Verhalten auf. Dies soll durch das Aufbringen von lamina-ren Faserverbundwerkstoffen erbracht werden um somit die geforderte Duktilität zu erreichen. Bild 2.4 zeigt die Spannungs-Dehnungsdiagramme der verschiedenen Materialtheorien im Vergleich. [20]

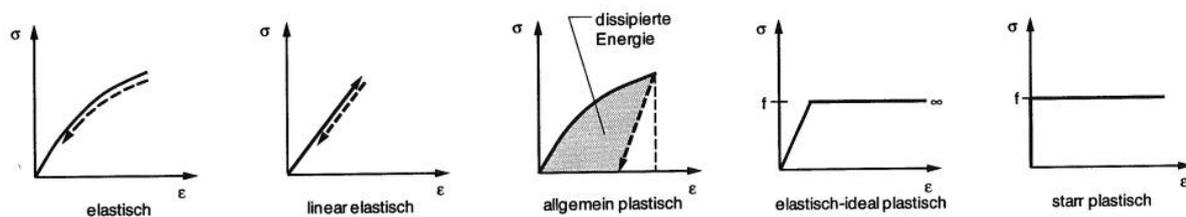


Bild 2.5: Materialverhalten verschiedener Werkstoffe [20]

2.1.6 Duktilität

Duktilität ist ein Maß zur Beschreibung der Dissipationsfähigkeit von Energie eines Bauwerks durch elastische und plastische Deformation. Die Duktilität ist als Quotient zwischen plastischer Grenzverformung und elastischer Fließdehnung zu verstehen. In der Regel wird das reale Verformungsverhalten durch ein bi-lineares elastisch-idealplastisches Verhalten angenähert. Hierbei wird zwischen verschiedenen Arten der Duktilität unterschieden. Zum einen die Dehnungsduktilität, welche ein Maß für die Dehnung unter zentrischer Normalkraft ist. Zum anderen die Krümmungsduktilität, welche die Krümmung unter dem Einfluss eines Biegemoments widerspiegelt. Die Rotationsduktilität ergibt sich aus dem Rotationswinkel eines plastischen Gelenks unter Biegebeanspruchung. Diese Duktilitätsformen werden auch als lokale Duktilität bezeichnet, da diese auf Bauteilebene stattfindet. Deren Zusammenspiel summiert sich zur globalen Duktilität, welche durch die sog. Verschiebeduktilität definiert ist und die Verschiebung des Gesamttragwerks ab Fließbeginn betrachtet. Diese Zusammenhänge werden in Abbildung 2-5 dargestellt. [2]

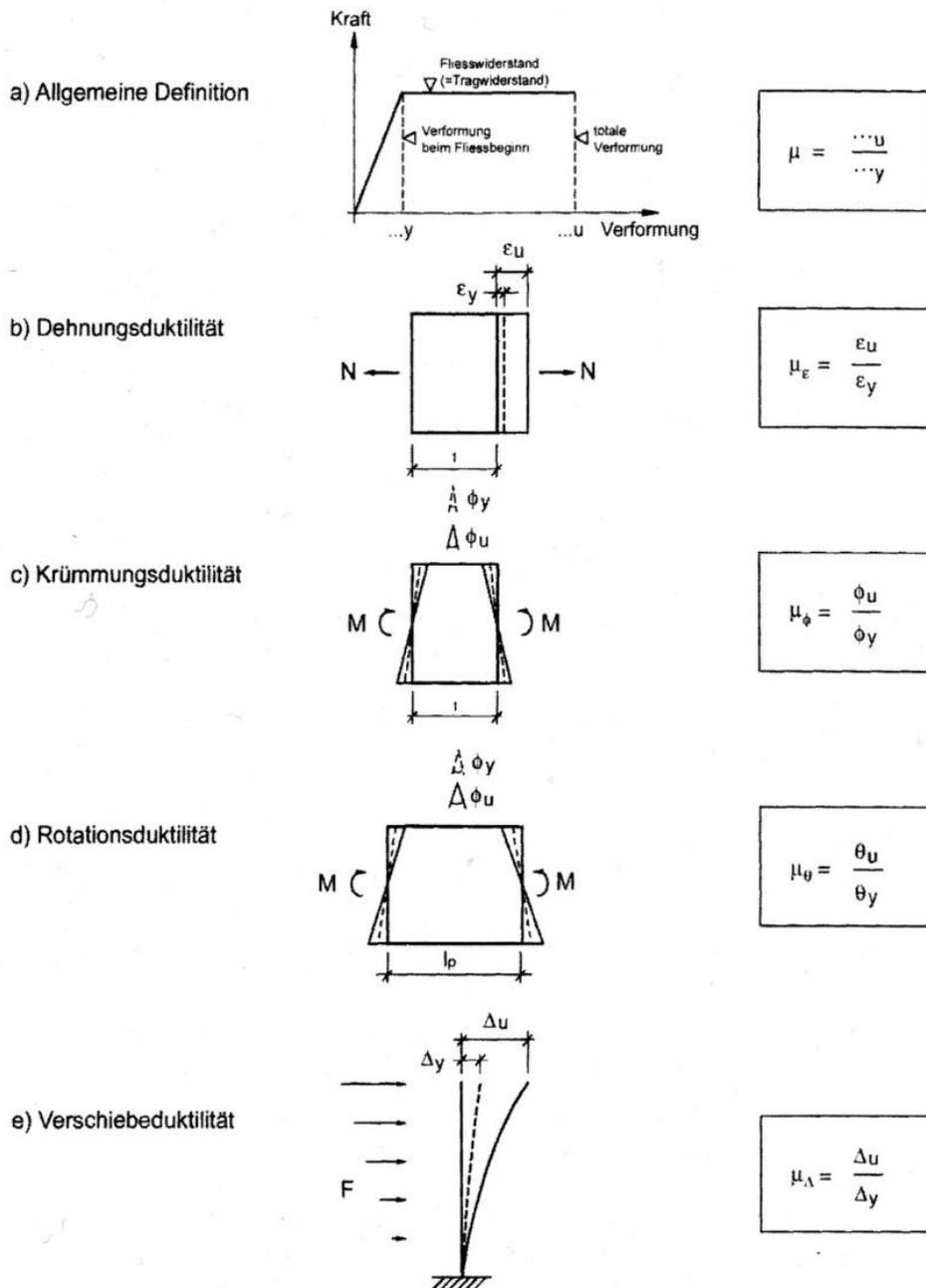


Bild 2.6: Duktilität nach Bachmann. [2]

Grundsätzlich besitzen spröde Werkstoffe wie Glas, unbewehrter Beton, oder Mauersteine eine sehr geringe oder fast gar keine Duktilität. Diese kann jedoch durch Kombination untereinander (z.B. Mauersteine mit Mörtel) oder durch Kombination mit anderen Werkstoffen (z.B. Beton mit Stahl) erreicht werden. Diese bildet sich entweder dadurch, dass einer der Werkstoffe von sich aus eine Duktilität aufweist (z.B. Stahl), durch Ablösemechanismen der Verbundpartner (z.B. Mauerwerk) oder durch Rissbildung (z.B. Beton), welche die Steifigkeit des Bauteils vermindert und somit das Verformungsvermögen erhöht. In der Gesamtheit tritt nun eine sog. Systemduktilität auf. [3]

Normativ wird zur Berücksichtigung der Duktilität der elastische Tragwiderstand bzw. die elastische Ersatzkraft abgemindert. Hierzu liefert *Bachmann* [2] zwei verschiedene mathematische Ansätze um den Duktilitätsfaktor q zu ermitteln.

Das „Prinzip der gleichen maximalen Verschiebung“ liefert den Zusammenhang zwischen linear-elastischem und elastisch-plastischen Verhalten.

$$\alpha_{\mu} = \frac{F_{pl}}{F_{el}} = \frac{1}{\mu_{\Delta}} \quad \text{bzw.} \quad q = \mu_{\Delta} \quad (5)$$

Das „Prinzip der gleichen Formänderungsarbeit“:

$$\alpha_{\mu} = \frac{F_{pl}}{F_{el}} = \frac{1}{\sqrt{2\mu_{\Delta}-1}} \quad \text{bzw.} \quad q = \sqrt{2\mu_{\Delta}-1} \quad (6)$$

Darüber hinaus gibt DIN4149 [1] Vorschläge für den Verhaltensbeiwert q (siehe Tabelle 2-1), diese dürfen jedoch nur dann angewendet werden, wenn die erforderliche Energiedissipationsfähigkeit des Tragwerks durch entsprechende bauliche Durchbildung gewährleistet wurde. Höhere Werte sind auf diese Weise ebenfalls möglich, erfordern jedoch sorgfältige erdbebenresistente Tragwerksplanung.

Bauart	Verhaltensbeiwert	
	min q	max q
Beton	1,5	3,0
Stahl	1,5	8,0
Holz	1,5	4,0
Mauerwerk	1,5 (unbewehrt)	2,5 (bewehrt)

Tab. 2.1: Verhaltensbeiwerte nach DIN4149 [1]

2.2 Mauerwerk

Mauerwerk ist ein Kompositwerkstoff, welcher im Wesentlichen aus zwei Komponenten besteht. Zum einen aus Mauersteinen, welche in der Regel den Hauptbestandteil des Mauerwerks definieren, als auch aus Mörtel, welcher den Verband der Mauersteine herstellt. Zusätzlich kann Mauerwerk mit oder ohne Bewehrung ausgeführt werden. [14]

Markantestes Merkmal von Mauerwerk gegenüber anderen Baustoffen wie Stahl oder Beton ist seine hochgradige Anisotropie. [11]

Die Anordnung und Auswahl der Komponenten bestimmt in höchstem Maße die mechanischen und bauphysikalischen Eigenschaften des Mauerwerks. Markant sind hierbei die signifikanten Unterschiede in horizontaler und vertikaler Richtung und die zu einem richtungsabhängigen Materialverhalten führen. [14]

Die primären Aufgaben von Mauerwerk sind das Abtragen von Belastungen aus Eigengewicht und Verkehrslast, das rissfreie Ertragen von Verformungen aus äußerer Beanspruchung (Lasten, Feuchte, Temperatur) sowie diverser bauphysikalischer Anforderungen, wie z.B. ausreichender Wärme- und Schallschutz, auf welche in dieser Arbeit aber nicht weiter eingegangen wird.

Im Rahmen von Bemessungsaufgaben werden meist zuerst die Anforderungen der Bauphysik berücksichtigt an welche sich die konstruktive Auslegung des Bauwerks im Nachhinein anpasst. Somit folgte in der Vergangenheit die konstruktive Bemessung der Bauphysik.

2.2.1 Charakteristische Eigenschaften der Bestandteile von Mauerwerk

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Anwendung an Mauerwerk aus künstlichen Mauersteinen, da die Unregelmäßigkeit und Heterogenität von natürlichen Steinen in Bezug auf Formgebung und Eigenschaften im Rahmen dieser Arbeit keine verlässlichen Versuchsdaten gewährleistet. Hinzu kommt der Umstand, dass in Deutschland hauptsächlich mit künstlichen Steinen gebaut wird.

Eine Unterteilung der künstlichen Mauersteine erfolgt nach dem jeweiligen Ausgangsmaterial und ergibt sich im Wesentlichen zu Mauerziegel, Porenbeton- & Betonsteine sowie Kalksandsteine [14]. Die Auswahl der Steine hängt sehr stark von den statischen und bauphysikalischen Anforderungen des Bauwerks ab. Die Festigkeit eines Steines wird vorwiegend über die Trockenrohdichte des Steins definiert. Eine hohe Trockenrohdichte führt zusätzlich zu einem verbesserten Schallschutz, verschlechtert jedoch die Wärmedämmeigenschaften, da hierfür geringere Dichten angestrebt werden. Tabelle 2.2 gibt einen ausschnittweisen Überblick über die gängigen Mauersteine. [11]

Steinart	Rohdichte [kg/m ³]	Festigkeit [N/mm ²]
Mauerziegel DIN EN 771-1	0,6 – 2,2	4 – 60
Kalksandsteine DIN EN 771-2	0,7 – 2,0	4 – 28
Leichtbetonsteine DIN EN 771-3	0,5 – 2,0	2 – 8
Porenbetonsteine DIN EN 771-4	0,4 – 0,9	2 – 12
Normalbetonsteine DIN EN 771-3	1,2 – 2,4	4 – 12

Tab. 2.2: Übersicht über Rohdichten und Festigkeiten der gängigen Mauersteine [11]

Der Mauermörtel besteht aus Gesteinskörnung (bzw. Zuschlägen), Wasser und Bindemitteln. Zusätzlich können unter Umständen Zusatzmittel und –stoffe eingesetzt werden. Als Bindemittel werden meistens Kalke oder Zemente verwendet. Im Mauerwerk wird Mörtel zwischen die Mauersteine eingebracht um den kraftschlüssigen Verbund zu gewährleisten. Neben einer Einteilung nach der Zusammensetzung des Mörtels, wird zusätzlich in der Anwendung als Normal-, Leicht- und Dünnbettmörtel unterschieden. Eine Übersicht über die zulässigen Druckspannungen verschiedener Mörtel in Abhängigkeit von der Steinfestigkeitsklasse der Mauersteine ist in Tabelle 2.3 gegeben. [11]

Steinfestigkeitsklasse	Normalmörtel mit Mörtelgruppe					Dünnbettmörtel	Leichtmörtel	
	I	II	IIa	III	IIIa		LM 21	LM 36
2	0,3	0,5	0,5			0,6	0,5	0,5
4	0,4	0,7	0,8	0,9		1,1	0,7	0,8
6	0,5	0,9	1,0	1,2		1,5	0,7	0,9
8	0,6	1,0	1,2	1,4		2,0	0,8	1,0
12	0,8	1,2	1,6	1,8	1,9	2,2	0,9	1,1
20	1,0	1,6	1,9	2,4	3,0	3,2	0,9	1,1
28		1,8	2,3	3,0	3,5	3,7	0,9	1,1
36				3,5	4,0			
48				4,0	4,5			
60				4,5	5,0			

Tab. 2.3: Grundwerte der zulässigen Druckspannungen in N/mm² [19]

Mauerwerk aus künstlichen Steinen wird normgemäß im regelmäßigen Verbund ausgeführt. Dies bedeutet, dass die Mauersteine schichtweise zueinander versetzt aufgetragen werden und, die Fugen werden gemäß ihrer Ausrichtung in Lagerfugen (horizontal) Stoßfugen (vertikal) unterteilt. [22]

2.2.2 Mauerwerk unter einaxialer Beanspruchung

Die Eigenschaften von Mauerwerk werden durch die Kombination von Stein- und Mörtel Eigenschaften bestimmt. Die Erfassung des Trag- und Verformungsverhaltens von Mauerwerk lässt sich nur durch eine geeignete Betrachtung der gegenseitigen Beeinflussung abbilden. Dies lässt sich nur gewährleisten wenn auch ein korrekter Verband zwischen Mauerstein und –mörtel vorliegt. Mauerwerk erfährt Belastungen in seiner Ebene (Eigengewicht, Auflast, Zwang, etc.) sowie in senkrechter Richtung

(Wind, Erddruck, Zwang, etc.). Dies führt zu Druck, Schub, Zug und/oder Biegung im Mauerwerk. Aufgrund seiner deutlich höheren Druckfestigkeit gegenüber seiner Zugfestigkeit, wird Mauerwerk vorwiegend als Druckglied eingesetzt. [11]

Der Regelfall der Mauerwerksbeanspruchung ist die einachsige Zug- bzw. Druckbeanspruchung parallel, oder senkrecht zu den Lagerfugen. Von *Hilsdorf* [10] wurden die ersten ingenieurwissenschaftlichen Untersuchungen von Mauerwerk unter Druckbeanspruchung durchgeführt. Grundlegend ist, dass Mauerwerk eine hohe Druckfestigkeit besitzt. Für den Lastabtrag kommen dem Lagerfugenmörtel zwei Aufgaben zu, zum einen bildet er den Formschluss zwischen den einzelnen Mauersteinschichten, zum anderen verbindet er diese auch kraftschlüssig miteinander. Bei einaxialer Druckbeanspruchung wird das Mauerwerk in Lastrichtung gestaucht, während es gleichzeitig eine Querdehnung erfährt. In der Regel nimmt der weichere Mörtel diese Querdehnung auf. Dieser wird allerdings durch Reibung mit dem angrenzenden Stein behindert. Es entsteht ein Zwangszustand, welcher in den Mauerwerksteinen zu Querkzugspannungen führt. Das Resultat ist ein triaxialer Spannungszustand. In der Verbindung bedeutet dies, dass die Bruchfestigkeit von Mauerwerk, welches eine vertikale Druckbelastung erfährt, von der Steinzugfestigkeit abhängig ist. Aufgrund der Umschnürungswirkung des allseitigen Drucks um den Mörtel, erhöht sich dessen Druckfestigkeit. Somit liegt die Mauerwerksfestigkeit zwischen Mörtelfestigkeit und der Steindruckfestigkeit. (Siehe Abbildung 2-2 [22]). [11] [10]

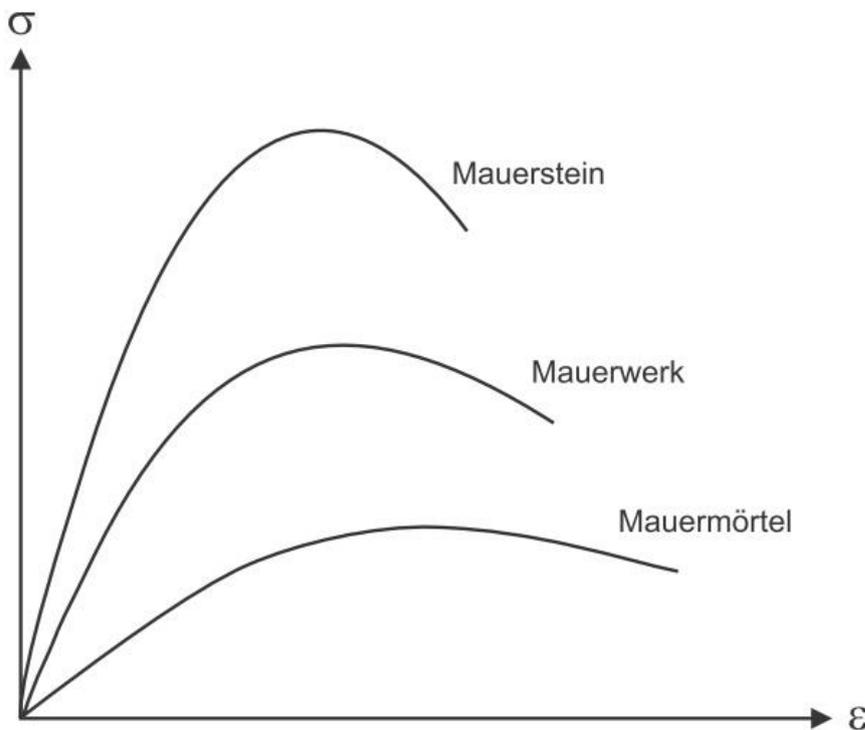


Bild 2.7: exemplarische einaxiale Druckspannungsverläufe von Mauerwerk und dessen Einzelkomponenten [22]

Darüber hinaus ist Mauerwerk auch in der Lage, Zug- und Schubkräfte abzutragen. Allerdings beträgt die Zugfestigkeit gegenüber der Druckfestigkeit nur ca. 10%. Nach DIN 1053-100 darf die Zugfestigkeit senkrecht zur Lagerfuge nicht angesetzt werden. Wichtiges Nebenkriterium, neben dem Lastabtrag durch die Zugfestigkeit, ist die Gewährleistung der Rissicherheit im Zustand der Gebrauchstauglichkeit. Hierbei unterscheidet man zwischen Scheibenbeanspruchung (Last längs zur Wandebene) und Plattenbeanspruchung (Last quer zur Wandebene). [11]

Speziell bei Zugbelastung parallel zur Lagerfuge tritt ein kritischer Fall ein. Da die Stoßfugen keine Zugspannungen übertragen können, müssen Mauersteine ober- und unterhalb der Fuge die doppelte Belastung aufnehmen. Dies lässt sich über den Lasteinleitungsbereich darstellen, welcher sich über die doppelte Steinhöhe erstreckt (siehe Abbildung 2-7). [11]

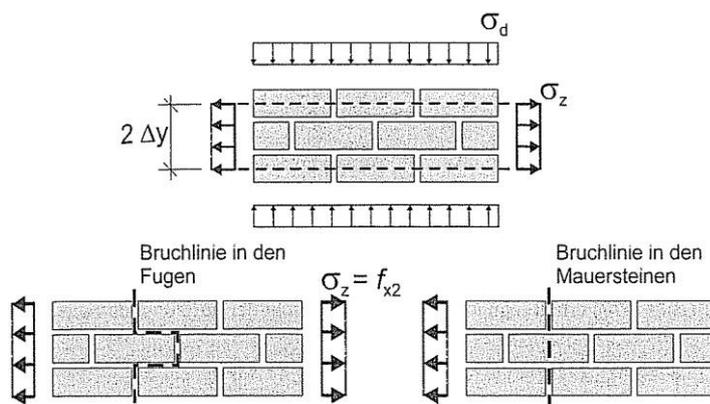


Bild 2.8: Bruchmechanismus von Mauerwerk unter einaxialer Zugbelastung parallel zur Lagerfuge [11]

Gerade für die Scheibenbeanspruchung ist die Schubtragfähigkeit maßgebendes Festigkeitskriterium. Bei einer plattenartigen Belastung gilt es darüber hinaus Biegezugspannungen aufzunehmen.

Bei einer Zugbeanspruchung in Richtung der Lagerfuge kann entweder der Zugbruch in der Fuge oder im Mauerstein eintreten. In der Regel besitzen die Steine eine ausreichende Zugfestigkeit, so dass das Versagen eher in der Fuge auftritt, dies liegt meist an einer zu geringen Schubfestigkeit zwischen Mörtel und Mauerstein. [11]

2.2.3 Mauerwerk unter mehraxialer Beanspruchung

Als mehraxiale Beanspruchung einer Mauerwerkswand wird hier nur die Belastung als Scheibe betrachtet, da für die Aussteifung von Bauwerken die Annahme getroffen wird, dass die horizontale Belastung stets in Richtung der starken Mauerwerksachse auftritt. Dies ergibt sich aus der Lastverteilung von Horizontallasten gemäß der entsprechenden Biegesteifigkeit der Wandscheiben. Das führt dazu, dass für die horizontale Lastverteilung nur die Hauptrichtung der Biegesteifigkeiten angesetzt wird,

die schwachen Wandachsen werden vernachlässigt. [11]. Dieser Belastungsfall lässt sich über eine Analyse der Schubtragfähigkeit darstellen, welche vor allem auf dem Schubmodell nach *Mann & Müller* [12] aufbaut.

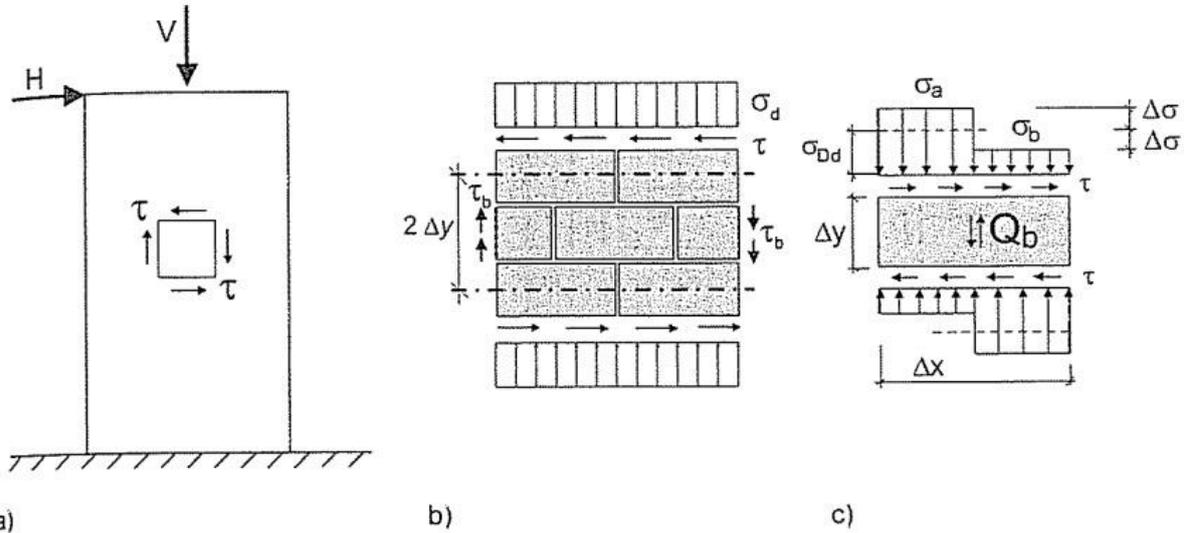


Bild 2.9: Schubbeanspruchung von Mauerwerk: a) Wand b) Wandelement c) Einzelstein [11]

Zur Untersuchung von Schubversagen wird ein Wandelement herausgeschnitten, welches ideal durch Schubspannungen und vertikal zusätzlich durch Normalspannungen belastet wird. Aus Beobachtungen ergab sich nach *Mann & Müller* [12], dass in Stoßfugen von Mauerwerk keine Schubspannungen übertragen werden können, dies liegt unter anderem daran, dass diese entweder nur mangelhaft vermörtelt wurden, auf knirsch gesetzt wurden, oder dass aufgrund des Schwindens keine Schubspannungsübertragung gewährleistet werden kann. Hieraus entsteht ein Drehmoment am Einzelstein, dieses Drehmoment muss durch ein Gegenmoment aus Vertikalspannungen kompensiert werden. Das Gegenmoment addiert sich mit den bereits vorhandenen Vertikalspannungen aus Eigengewicht und anderen Auflasten.

In der Summe führt dies auf der einen Steinhälfte zu einer Spannungserhöhung, auf der anderen Seite zu einer Reduktion gemäß Bild Abbildung 2-3. Dies bedeutet, dass zwei unterschiedlich stark überdrückte Bereiche auf dem Mauerstein existieren. Aus diesem allgemeinen Zusammenhang der Schubbeanspruchung von Mauerwerk resultieren 4 maßgebende Schadensbilder (siehe Bild 2.9 [11]):

- Klaffen der Fugen (Versagen A)
- Fugengleiten (Versagen B)
- Zugbruch der Mauersteine (Versagen C)
- Schub-Druck-Versagen (Versagen D)

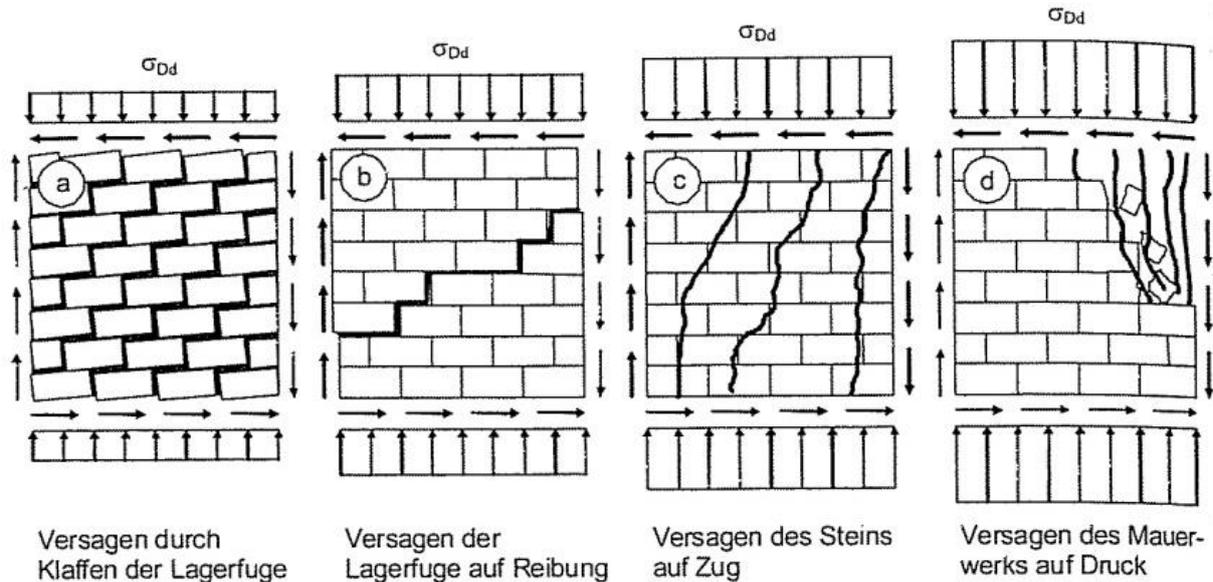


Bild 2.10: Versagensformen einer Wandscheibe unter Schub und Vertikalspannung [11]

Die Versagen A wird prinzipiell auch von Versagen B abgedeckt und soll hier nicht weiter erläutert werden. Für ein Verhältnis Länge/Höhe des Mauersteins ≤ 1 wird das Versagen A nach DIN 1053-100 ohnehin ausgeschlossen.

Versagen B: Maßgebender Unterschied zwischen Versagen A und Versagen B ist die bei B etwas höhere Vertikalspannung. Dies kann auf der weniger stark überdrückten Fughälfte zu einem Aufreißen führen, welches sich in diagonalen Rissen in der Wand entlang der Lager- und Stoßfugen äußert. Die Modellierung dieses Versagensbildes erfolgt über das *Mohr-Coulomb*-Reibungsgesetz und definiert sich über die Haftscherfestigkeit und der auflastabhängigen Reibung. [11]

Versagen C: Bei weiterer Steigerung der Vertikalspannungen kann es aufgrund der schiefen Hauptzugspannungen innerhalb der Mauersteine zu einem Zugbruch kommen. Da die Stoßfugen (wie bereits erläutert) als nichttragend angesehen werden, müssen Schubspannungen aus zwei Steinschichten in einem einzelnen Mauerstein aufgenommen werden.

Versagen D: Hier wird die charakteristische Mauerwerksdruckfestigkeit erreicht, was zu einem Versagen auf Druck führt gemäß *Mann/Müller* [Mann]. Allerdings gilt es darauf hinzuweisen, dass bei einer derart hohen Normalkraft Stabilitätsversagen (Knicken) oder Biegedruckversagen wahrscheinlich ist. Ebenso ist der Zugbruch (Versagen C) eher zu erwarten. [11]

2.2.4 Charakteristische Eigenschaften der Bestandteile von Mauerwerk

Nach *Mann & Müller* [12] lassen sich die oben beschriebenen Schadensbilder unter anderem durch ein Gleichgewicht am Einzelstein beschreiben. Dies gilt vor allem für die Bruchbedingungen A & B. Maßgebend hierbei ist die drehwirksame Spannungsdifferenz $2 * \Delta\sigma$. [11]

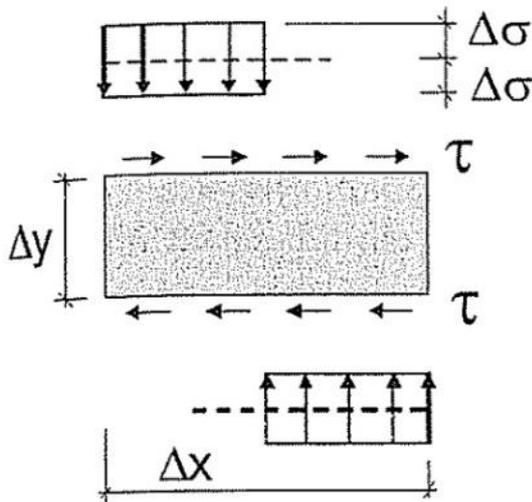


Bild 2.11: Gleichgewicht am Einzelstein ohne Normalspannungen [11]

Aus dem Gleichgewicht ergibt sich:

$$\Delta\sigma = 2\tau \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (7)$$

Die Normalspannungen je Stein im Mauerwerk ergeben sich somit

$$\sigma_{a,b} = \sigma_{Dd} \pm 2\tau \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (8)$$

Durch eine ähnliche Betrachtung ergibt sich auch die Bruchbedingung für das Versagen durch Klaffen der Fuge. Diese soll hier nur der Vollständigkeit halber aufgeführt werden. Die Grenzs Schubspannung ergibt sich hierfür zu [11]:

$$\tau_u = (f_{xl} + \sigma_{Dd}) \frac{l_{st}}{2h_{st}} \quad (10)$$

Versuche haben gezeigt, dass der Schub in den Lagerfugen und damit das Versagen von Mauerwerk sehr stark mit den aufgebrachtten Schub- und Druckspannungen zusammenhängen. Dieser Zusammenhang lässt sich über das Mohr-Coulomb-

Kriterium darstellen. Somit setzt sich der Verbindungsschub zwischen Stein und Mörtel aus einer Anfangsschubfestigkeit und einem Schubreibungsvermögen. [8]

$$\tau = \tau_0 + \mu * \sigma_n \quad (11)$$

Mit:

- τ : Grenzschubspannung
- μ : Reibungsbeiwert
- τ_0 : Haftscherfestigkeit für $\sigma_n = 0$
- σ_n : Drucknormalspannung senkrecht auf den Lagerfugen

Dies lässt sich mit dem Modell nach *Mann & Müller* [12] verbinden. Hier wird zusätzlich noch durch den abgetreppten Normalspannungsverlauf die Haftscherfestigkeit und der Reibungsbeiwert abgemindert. Im Rahmen der Bemessung kann vereinfachend für alle Mörtel ein abgeminderter Reibungsbeiwert von $\mu_{red} = 0,4$ angenommen werden. [11]

Der Zugbruch von Mauersteinen wird vor allem durch den Umstand geprägt, dass die Stoßfugen als nichttragend betrachtet werden und somit die Querkräfte von jeweils zwei Gesteinsschichten aufnehmen müssen, dies ähnelt dem Mechanismus unter einaxialer Zugbelastung parallel zur Lagerfuge.

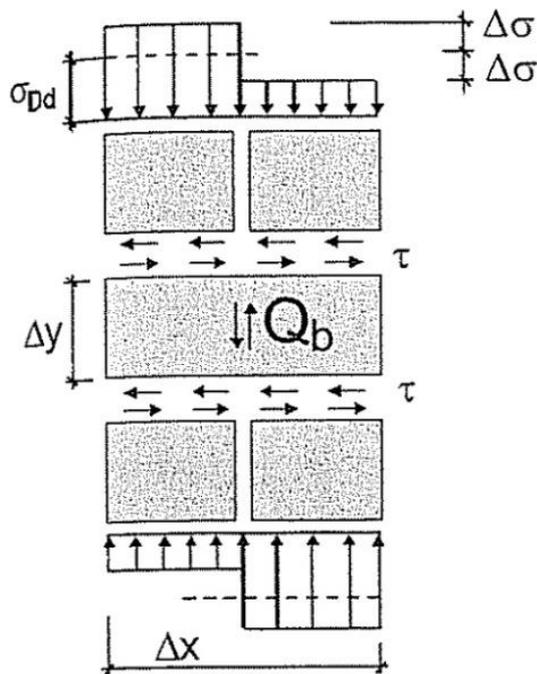


Bild 2.12: Versagen der Mauersteine auf Zug [11]

Gemäß dem Verhältnis zwischen Schubspannung und Normalkraft bilden sich im Innern der als Scheibe idealisierten Mauersteine geneigte Schubspannungen aus. Aufgrund der von zwei Steinschichten eingetragenen Schubspannung und des abgetreppten Normalspannungsverlaufs, ergeben sich erhöhte Momenten- und Querkräf-

te. Dies führt in der Summe zu einer 2,3-fach erhöhten Schubspannung im Einzelstein. Das Versagen tritt ein sobald die schiefe Hauptzugspannung größer als die Zugfestigkeit f_{bt} des Mauersteins wird. Die Bruchbedingung ergibt sich somit zu: [11]

$$\tau = \frac{f_{bt}}{2,3} \sqrt{1 + \frac{\sigma_{Dd}}{f_{bt}}} \quad (12)$$

Wenn man all diese Bruchkriterien in ein gemeinsames Diagramm überträgt, so ergibt sich eine Einhüllende innerhalb welcher kein Mauerwerksversagen auftritt. Siehe Abbildung 2-12:

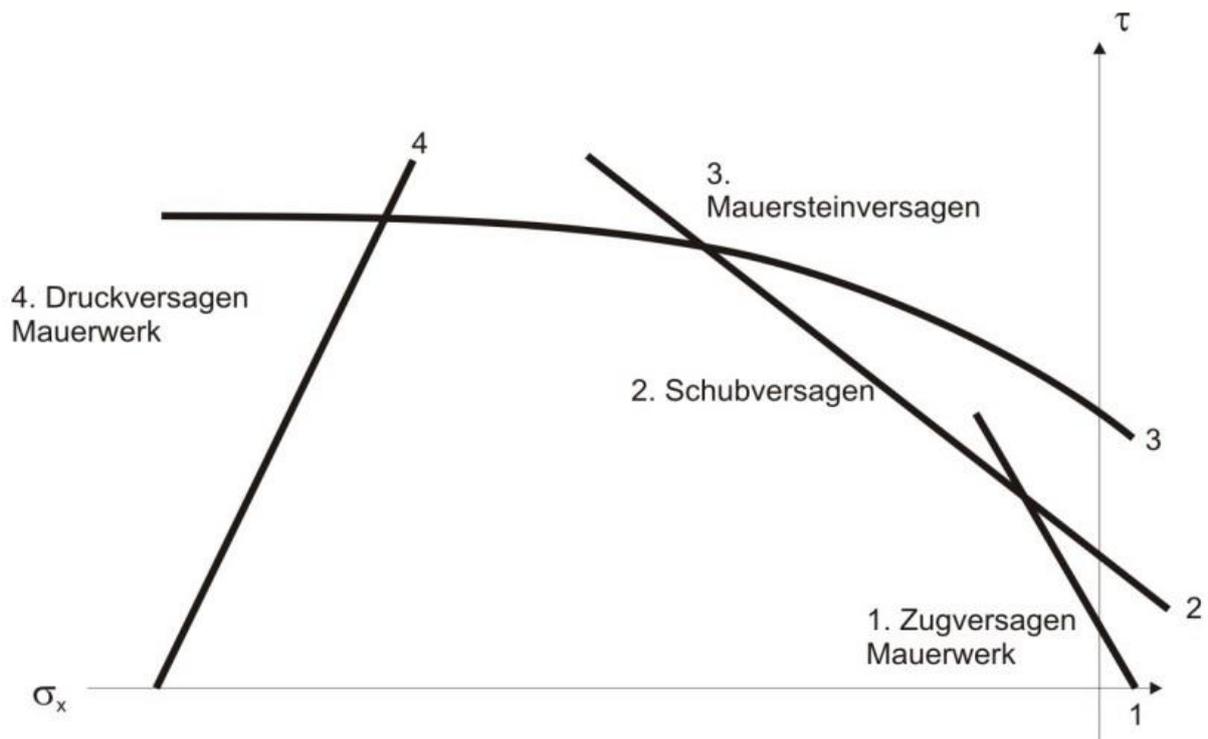


Bild 2.13: Versagenskriterien nach Mann & Müller [14]

2.3 Mauerwerksputze & -mörtel

Dieses Kapitel soll einen Überblick über die Zusammensetzung und die Eigenschaften von Mörtel & Putzen zur Verkleidung von Mauerwerk geben. Besonders die Fähigkeit des Schwindens soll hierbei kurz erläutert werden. Im Speziellen soll nachfolgend auf die Verwendung von Lehm als natürlichen Rohstoff für Mörtel und Putze eingegangen werden.

2.3.1 Zusammensetzung

Putze und Mörtel bestehen grundsätzlich aus 4-5 Bestandteilen. Dies sind zum einen die Bindemittel, also der „Klebstoff“ innerhalb der Matrix, feine Zuschläge (bis max. 4mm), in der Regel der massenbezogene Hauptbestandteil, Zusatzmittel und –stoffe, die gezielt Eigenschaften des Mörtels beeinflussen können, sowie das Zugabewasser, welches in den meisten Fällen das Abbinden in Gang setzt und auch die nötige Viskosität zur Verarbeitung gewährleistet.

Bindemittel:

Bindemittel verbinden die einzelnen Mörtelbestandteile miteinander. Die meisten Bindemittel werden auf mineralischer Basis aus Gesteinen gewonnen, gemahlen und gebrannt. Durch Hinzugabe von Wasser (außer bei Luftkalk) zu einem Bindemittel ergibt sich Bindemittelleim. Dessen Eigenschaften und Verarbeitbarkeit hängen stark von den Ausgangsstoffen des Bindemittels ab. Im Folgenden sollen nun die wichtigsten Gruppen von Bindemitteln kurz erläutert werden. [17]

Gips & Anhydrit: Gips wurde bereits im alten Ägypten verwendet und vor allem seit dem Mittelalter im Stuckaturbereich angewendet. Unter Zugabe von Wasser weist Gips eine Volumenvergrößerung von 0,7 bis 1,0% auf, dadurch wird das Entstehen von Schwindrisen verhindert. Positiver Einfluss von Gips im Innenraum, ist seine feuchtigkeitsregulierende Wirkung aufgrund seiner Porenstruktur. Unter Brandeinwirkung entsteht aufgrund von Wassermangel ein Halbhydrat, welches eine höhere Wärmedämmwirkung aufweist und sich somit positiv im Brandfall auswirkt. Unter Dauerfeuchte beginnt Gips zu faulen und löst sich auf. [Roos]

Luftkalk: Luftkalk wurde bereits von den Sumerern in Mesopotamien verwendet und gehört zu den am leichtesten herzustellenden Formen von Bindemitteln. Luftkalke schwinden sehr stark beim Abbinden und müssen daher stets mit Zuschlägen verwendet werden. Da Kalk hierzu jedoch das in der Luft vorhandene Koh-

lendioxid benötigt, kann er zum einen durch künstliche Kohlendioxidzufuhr beim Erhärten beschleunigt werden, zum anderen kann er z.B. im Inneren von Mauern nur äußerst langsam oder fast gar nicht erhärten, da die Kohlendioxidzufuhr fehlt. Darüber hinaus ist karbonatisierter Kalk widerstandsfähig gegenüber Witterungseinflüssen, da er unlöslich im Wasser ist, zeigt jedoch unter Säureeinwirkung starke Beeinträchtigungen. [17]

Hydraulischer Kalk: Hydraulische Kalke werden seit dem späten Mittelalter, ab dem 15. Jahrhundert verwendet. Ihr maßgebender Unterschied zu den Luftkalen ist die Fähigkeit auch mit Wasser zu erhärten und löst sich im erhärteten Zustand auch nicht in diesem auf. Ansonsten verhalten sich diese ähnlich wie die Luftkalke, gelten aber aufgrund der allgemein besseren Eigenschaften als die hochwertigeren Bindemittel. [17]

Zement: Der Siegeszug der Zemente begann etwa zur Mitte des 18. Jahrhunderts durch die Herstellung der Portlandzemente. Sie binden ebenfalls mit Wasser ab, gehören somit zu den hydraulischen Bindemitteln, sind aber nach dem Erhärten gleichzeitig unter nicht-aggressiver Wassereinwirkung beständig. Beim Erhärten entsteht innerhalb der Zementmatrix ein basisches Milieu, welches v.a. beim Stahlbeton für den Korrosionsschutz der Bewehrung benötigt wird. Im Allgemeinen ist Zement korrosionsbeständig, es können jedoch unter Säureeinfluss, oder wechselnder Befeuchtung oder anderer aggressiver äußerer Einflüsse Abnutzungserscheinungen auftreten. [17]

Lehm: Lehm wird schon seit vielen tausend Jahren erfolgreich als Baustoff für verschiedene Anwendungen eingesetzt. Er kann ebenfalls als Bindemittel verwendet werden und kann sich mit der richtigen Rezeptur durchaus auch mit modernen Materialien messen. Auf die genauen Anwendungsmöglichkeiten von Lehm als Putz und dessen Eigenschaften wird in Kapitel 2.3.3 gesondert eingegangen.

Zuschläge:

Zuschläge sind dichte oder poröse Gesteine bis zu einem Korndurchmesser von 4 mm. Die Wahl des Zuschlags beeinflusst maßgeblich die Feststoffeigenschaften des Mörtels. Für die normale Anwendung werden meist Sande eingesetzt, sowohl natürliche aus Flüssen gewonnene, sog. Flusssande, oder aus Gesteinen wie Granit durch Zerkleinerung, sog. Bruchsande. Für besondere Anwendungen können auch natürliche Cellulosefasern eingebracht werden um die Festigkeit zu erhöhen. Zur Herstel-

lung von besonders leichtem Mörtel mit hoher Wärmedämmeigenschaft werden sog. Leichtzuschläge z.B. aus Bims oder Blähton eingesetzt. [17]

Zusatzmittel & -stoffe:

Zusatzmittel beeinflussen gezielt bestimmte Eigenschaften bei der Verarbeitung. In der Regel lassen sich diese Effekte nicht, oder nicht einfach durch Veränderung der Bindemittel oder der Zuschläge erreichen. So können Füllstoffe, zum Beispiel Feinzuschläge aus demselben Material wie der bereits vorhandene Zuschlag, dazu verwendet werden um beispielsweise die Verarbeitbarkeit zu verbessern. Auch die Farbe lässt sich zum Beispiel durch die Zugabe von Pigmenten beeinflussen. In folgender Tabelle werden die gängigen Zusatzmittel aufgeführt, ihre Wirkung und die historischen Mittel, die in der Vergangenheit, ohne moderne Chemie, verwendet wurden um besagte Wirkung zu erreichen. [17]

Bezeichnung	Abkürzung	Wirkung auf die Hydratation	Historische Zugabestoff
Verflüssiger	BV	Reguliert Verarbeitungszeit Verbessert Haftverbund von Mörtel und Untergrund	Milch, Käse, Eier, Buttermilch
Verzögerer	VZ	Verlängert Abbindezeit	Zucker, Wein
Luftporenbildner	LP	Erzeugt definierten Luftporenraum, verbesserte Stand- & Abriebfestigkeit	Blut, Stärke
Dichtungsmittel	DM	Abdichtung des Porenraums	Nussöl, Schmalz,
Beschleuniger	BE	Verkürzt Abbindezeit	Gips
Stabilisierer	ST	Verringert Wassersaugen von Mauersteinen	-
Elastizität	-	Verhindert Rissbildung	Tierhaare, Stroh
Farbton	-	Verändert Farbton	Holzkohle, Ziegelmehl

Tab. 2.4: Übersicht über Zusatzmittel [17]

2.3.2 Schwinden

Die mechanischen Eigenschaften bilden sich während des Abbindevorgangs im Zuge verschiedener chemischer Prozesse aus. Kritisches Element ist hierbei die Schwindrissbildung.

Die Bindemittel erhärten relativ langsam und verlieren dabei an Volumen. Solange der Mörtel noch frisch und weich ist, sowie keine starre Haftung mit dem Untergrund besitzt, können durch Schwinden aufgebaute Zugspannungen durch den verschieblichen Verbund mit dem Untergrund abgebaut werden. Sobald jedoch die Erhärtung einsetzt und sich Festigkeit und E-Modul entwickeln, steigt auch die Haftung mit dem Untergrund. Es bilden sich Spannungen, welche sich nicht über Verschiebungen abbauen lassen. Zusätzlich kann Schwinden eintreten, sobald überschüssiges An-

machwasser durch z.B. Sonneneinstrahlung verdunstet. Daher wirkt sich zu viel Anmachwasser negativ auf das Trocknungsverhalten aus. Da zu Beginn der Erhärtung die Zugfestigkeit des Mörtels noch sehr gering ist, übersteigen die Zugspannungen in Folge Schwinden die Zugfestigkeit. Es bilden sich Risse. [17]

Die Bildung von Schwindrissen lässt sich durch korrekte Dosierung des Wasseranteils, Nachbehandlung (schnellen Wasserentzug der Oberfläche durch Befeuchtung verhindern) sowie Schutz vor Erschütterungen entgegen wirken. [17]

2.3.3 Lehm zur Herstellung von Mauerwerksputz

Lehm ist ein natürlicher Kompositwerkstoff aus Ton, Sand, organischen und felsigen Einschlüssen. Er wird schon seit Jahrtausenden als Grundlage verschiedener Baumaterialien verwendet. Von der Nutzung als gebrannter Lehmziegel zum Bauen von Mauerwerk, als Füllstoff im Sinne einer Wärmedämmung, oder auch als Mörtel bzw. Putzmörtel. Wichtigstes Merkmal von Lehm ist, dass man ihn nahezu überall auf der Welt vorfindet, vor allem in den heiß-trockenen und gemäßigten Regionen der Erde ist Lehm daher als Baustoff verwendet worden. Dies führt zu einer sehr großen Variation des Baustoffs. Es können auch lokal große Unterschiede auftreten. Daher ist es wichtig, die Zusammensetzung des verwendeten Lehms zu kennen, hinzu kommt auch eine notwendige Veränderung der Zusammensetzung in Abhängigkeit des Verwendungszwecks. Da Lehm kein genormter Baustoff ist, liegt es vor allem am Anwender, die Eigenschaften zu kennen, zu beurteilen und gegebenenfalls durch Zusätze zu verändern. [13]

Lehm benötigt, um den Abbindevorgang einzuleiten, Anmachwasser. Sobald dies verdunstet, reduziert sich das Volumen und führt zu Trocknungs- bzw. Schwindrissen. Je nach Lehmsorte wurden bei prismatischen Probekörpern Verkürzungen von 3-12% (Nasslehmverfahren) und 0,4-2% (Stampflehm) festgestellt. Diesen Effekt kann man durch eine Reduzierung des Lehmgehalts, durch Zugabe von Fasern und/oder Optimierung der Kornverteilung reduziert werden. Hinzukommt, dass Lehm nicht wasserfest ist und daher stets vor Regen und Frost geschützt werden sollte. Dies lässt sich durch konstruktive Maßnahmen und/oder einer entsprechenden Oberflächenbehandlung bewerkstelligen.

Darüber hinaus reguliert Lehm die Luftfeuchtigkeit innerhalb von Räumen, welches sich vor allem für Innenputze eignet. Außerdem besitzt Lehm ein hervorragendes Wärmespeichervermögen, somit verfügt Lehm über ausgezeichnete bauphysikalische Eigenschaften. Da es in dieser Arbeit speziell um die Anwendung im Außenbereich geht, wird diese Eigenschaft nicht weiter erläutert. Allgemeine Vorteile dieses Baustoffes liegen vor allem am geringen Energieaufwand bei der Herstellung von Baumaterialien aus Lehm. Zusätzlich entfallen in vielen Fällen Material- und Transportkosten, da Lehm gerade beim Aushub von Kellern in großen Mengen anfällt. Dieser kann direkt vor Ort weiterverarbeitet werden, somit entfällt der Einkauf und

Lieferung externer Materialien, sowie der Abtransport des Lehms. Außerdem ist Lehm in der Handhabung auch für Laien unter fachkundiger Anleitung, leicht zu verarbeiten. Speziell die Konservierungsfähigkeit von Holz innerhalb einer Lehmmatrix stellt sich als gewaltiger Vorteil heraus. Holz und andere organische Stoffe (im Speziellen hier das Fasermaterial) werden innerhalb der Lehmmatrix entfeuchtet und trockengehalten, so dass ein Befall von Insekten und/oder Pilzen auszuschließen ist. [13]

2.4 Faserwerkstoffe

Im folgenden Kapitel soll ein allgemeiner Überblick über Faserwerkstoffe gegeben werden. Angefangen wird mit der historischen Entwicklung und den üblichen Anwendungsbereichen von Fasern. Darauf aufbauend soll die allgemeine Kategorisierung von Fasern erläutert werden, sowie deren mechanische und physikalische Eigenschaften. Im Speziellen soll auf die biologische Zusammensetzung von natürlichen Fasermaterialien eingegangen werden. Abschließend werden die wichtigsten natürlichen Fasermaterialien steckbriefartig vorgestellt und ihr Nutzen erläutert.

2.4.1 Bedeutung von Faserwerkstoffen

Naturfasern gehören zur menschlichen Gesellschaft seit jeher. Schon in der Vorzeit wurden Pflanzen wie zum Beispiel Hanf und Flachs angebaut und kultiviert um daraus Kleidung und Textilien herzustellen. So wurde zum Beispiel Hanf vor allem im Nahen Osten und Mesopotamien angebaut, Funde datieren bereits auf 8000-6000 vor Christus. In der Schweiz wurde bereits vor über 4000 Jahren Flachs kultiviert und daraus Leinen hergestellt. Diese Entwicklung setzte sich bis zur Moderne fort. Mit der industriellen Verarbeitung von Baumwolle und der raschen Entwicklung von synthetischen Fasern im 20. Jahrhundert traten jedoch die traditionellen Naturfasern zunehmend in den Hintergrund bis sie fast ganz verschwunden waren. Mit dem neuen ökologischen Denken wurden diese Nutzpflanzen im Sinne von Umweltschutz und Nachhaltigkeit wiederentdeckt. Vor allem in Bezug auf den Materialkreislauf betrachtet man Naturfasern als äußerst ökologische Alternative, da sie natürlich zu 100% biologisch abbaubar sind. Vor allem wenn man die allgemeine Ökobilanz von Naturfasern betrachtet fällt der große nachhaltige Vorteil gegenüber beispielsweise Glasfaser auf. So verbrauchen natürliche Fasern vom Anbau bis zur Fertigstellung eines Textilvlieses einen um bis 83% geringeren Energieaufwand im Vergleich zu synthetischen Fasern wie zum Beispiel Glasfaserstoffe. [4]

Technische Naturfasern stehen in direkter Konkurrenz mit aus Erdöl gewonnenen Produkten, also den Kunststofffasern. Seit der Wiedereinführung der Naturfaser in Deutschland in den 1980er Jahren drängen Naturfasern aus Jute, Flachs und Hanf wieder auf den Markt. So werden mittlerweile Naturfasern als Verstärkungsfasern in Kunststoffen vorwiegend für die Automobilindustrie eingesetzt. Wie jedes Agrarprodukt leiden Naturfasern jedoch an einer Witterungsabhängigkeit in Bezug auf die Ernte. So hängen die Erträge und die Produktion selbiger sehr stark vom Jahresklima ab. So kann es zum einen aufgrund schlechter Wetterlage zu Lieferengpässen kommen, oder umgekehrt aufgrund einer guten Erntesession zu einem Überangebot. In diesem Rahmen ist noch die Preisstabilität der Hanffaser hervorzuheben. Diese ergibt sich aus dem Umstand, dass man aus produktionstechnischer Sicht den Preis nicht weiter senken kann, jedoch Konkurrenzprodukte wie Jute und Flachs den all-

gemeinen Preis für Naturfasern drücken, da diese auch in ihrer Anwendung in Konkurrenz zueinander stehen. Mehr zu den einzelnen Faserarten und ihren Eigenschaften in Kapitel 2.4.4. [5]

Im Allgemeinen kann man Faserwerkstoffe nach natürlicher und synthetischer Herkunft kategorisieren. Letztere sollen hier nicht weiter betrachtet werden, sie werden lediglich in den Übersichten zum Vergleich aufgeführt. Innerhalb der natürlichen Faserstoffe unterscheidet man wiederum gemäß ihrer Herkunft, ob sie pflanzlichen, tierischen oder mineralischen Ursprunges sind. Pflanzliche Fasern unterteilen sich zusätzlich gemäß der pflanzlichen Erscheinungsform nach Fruchtfasern, Samenfasern, Blattfasern etc. Wichtigste Vertreter sind die sog. Bastfaserarten, zu welchen unter anderem Flachs, Hanf, Jute und Kenaf gehören. [4]

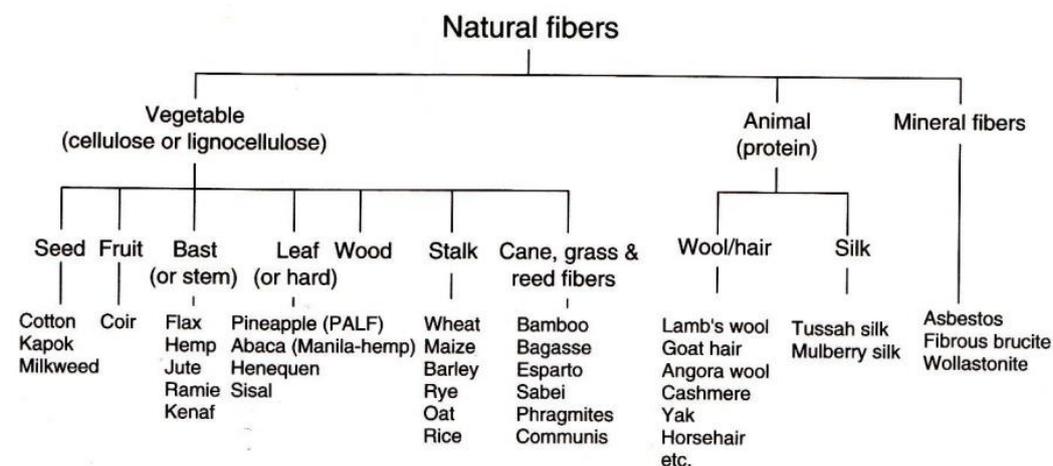


Bild 2.14: Übersicht über natürliche Faserstoffe [4]

Man unterscheidet zusätzlich nach der Dimension der Faser. So beschreibt man die größte Fasereinheit als Faserstamm, also genau aus der Natur entnommen (bei Flachs ca. $\varnothing 2 - 3\text{mm}$). Dieser Stamm wird in Bastfaserbündel unterteilt, die wiederum zur Anwendung in technische Fasern zerkleinert wird (bei Flachs ca. $\varnothing 50 - 100\ \mu\text{m}$). Die kleinste, genutzte Fasereinheit ist die Elementarfasern (bei Flachs $\varnothing 20\ \mu\text{m}$), welche sich auf mikroskopischer Ebene noch in Mesofibrillen ($\varnothing 0,5\ \mu\text{m}$) und Mikrofibrillen ($\varnothing 4 - 20\text{nm}$) unterteilen lässt.

2.4.2 Mechanische Eigenschaften

Im Vergleich zu gängigen Faserwerkstoffen wie Karbon oder Glasfaser sind die mechanischen Eigenschaften von natürlichen Faserwerkstoffen deutlich geringer. Wenn man jedoch das Verhältnis von Dichte zu den spezifischen mechanischen Eigenschaften betrachtet, zeigen Naturfasern einen ähnlichen Wert wie Glasfaser. Ein großer Nachteil von Naturfasern ist die Unbeständigkeit und Variationsspanne der mechanischen Eigenschaften im Vergleich von synthetischen Fasern. Denn diese Eigenschaften hängen sehr stark von den Anbautechniken, dem Klima und vieler weiterer Randbedingungen ab, welche auch sehr stark die Morphologie der Mutter-

pflanze beeinflussen können. Daher bleibt es eine stete Herausforderung für die Agrarwirtschaft eine kontinuierliche Qualität von Fasermaterial zu gewährleisten. [4] Die verhältnismäßig hohen Zugfestigkeiten von Einzelfasern (300 – 1500 N/mm² je nach Faserart) erscheinen auf den ersten Blick sehr hoch (Baustahl 500 N/mm²), man muss jedoch stets die Einbaudichte der Fasern betrachten, so dass bei einem Packungsbündel bzw. einem Garn die Netto-Zugfestigkeit nicht erreicht werden kann. Tabelle 2.5 gibt einen Überblick über die wichtigsten mechanischen Eigenschaften. [4]

Faser	Dichte [g/cm ³]	Durchmesser [µm]	Zugfestigkeit [N/mm ²]	E-Modul [kN/mm ²]	Grenzdehnung [%]
Flachs	1,5	40 - 600	345 – 1500	27,6	2,7 – 3,2
Hanf	1,47	25 – 500	690	70	1,6
Jute	1,3 - 1,49	25 – 200	393 – 800	13 – 26,5	1,16 – 1,5
Kenaf			930	53	1,6
Fasernessel			650	38	1,7
Sisal	1,45	50 – 200	468 – 700	9,4 – 22	3 – 7
Baumwolle	1,5 – 1,6	12 – 38	287 – 800	5,5 – 12,6	7 – 8
Kokos	1,15 – 1,46	100 – 460	131 – 220	4 – 6	15 – 40
Glasfaser	2,55	< 17	3400	73	2,5
Karbon	1,78	5 – 7	3400 – 4800	240 – 425	1,4 – 1,8

Tab. 2.5: Mechanische Eigenschaften verschiedener natürlicher Fasern und synthetischer Fasern [4]

2.4.3 Biologische Zusammensetzung & Aufbau

Naturfasern sind ebenfalls als natürlicher Kompositwerkstoff zu verstehen. Die meisten Naturfasern bestehen vorwiegend aus Cellulose, Hemicellulose, Lignin, natürlichen Wachsen sowie Wassereinschlüssen, in welchen die genannten Bestandteile zusätzlich in gelöster Form finden lassen. In Tabelle 2.6 ist eine Übersicht über die Zusammensetzung von Naturfasern gegeben. Die genaue Zusammensetzung ist jedoch stark von der jeweiligen Sorte abhängig, so sollen dies hier nur Anhaltswerte darstellen. [4]

Faser	Cellulose	Hemicellulose	Lignin	Pectin	Wachse / Fette	Wasserlös. Stoffe
Flachs	71	18,6 – 20,6	2,2	2,3	1,7	8 – 12
Hanf	70 – 74	17,9 – 22,4	3,7 – 5,7	0,9	0,8	6,2 – 12
Jute	61 – 71,5	13,6 – 20,4	12 – 13	0,2	0,5	12,5 – 13,7
Kenaf	45 – 57	21,5	8 – 13	3 – 5		
Fasernessel	86					11 – 17
Sisal	66 – 78	10 – 14	10 – 14	10	2	10 – 22
Baumwolle	85 – 90	5,7		0 – 1	0,6	7,85 – 8,5
Kokos	32 – 43	0,15 – 0,25	40 – 45	3 – 4		8

Tab. 2.6: Zusammensetzung von verschiedenen Naturfasern (Angaben in %) [4]

Grundsätzlich kann man Pflanzenfasern als eine Matrix aus amorphem Lignin und/oder Hemicellulose verstehen, welche von Mikrofibrillen aus kristalliner Cellulose, verstärkt wird. Pflanzenfasern sind Bündel von langgestreckten, dickwandigen toten Pflanzenzellen. Eine einzelne Faser erreicht Längen zwischen 1 – 50mm und einen Durchmesser von 10 – 50 µm. Das röhrenartige, hohle Innere einer solchen Faser wird als Lumen bezeichnet. Die Zellwand, welche den Lumen umschließt, gliedert sich in mehrere Schichten. Die äußerste und damit älteste Schicht wird als primäre Zellwand bezeichnet.

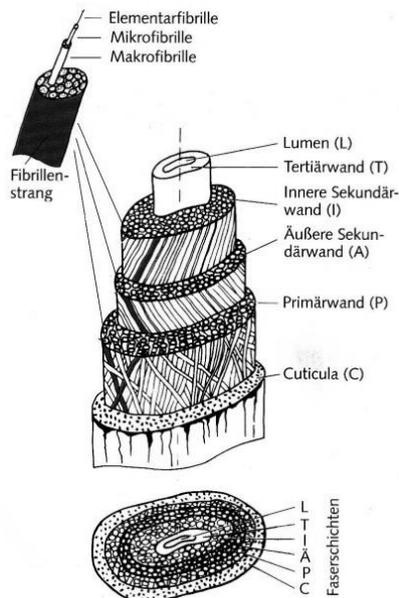


Bild 2.15: Aufbau einer Naturfaserzelle [21]

Cellulose ist die Hauptkomponente der meisten Pflanzenfasern. Sie formt die Mikrofibrillen der Faser. Im Allgemeinen ist Cellulose alkalibeständig und resistent gegen Oxidationsmittel, aber dafür stark säurelöslich. Die Cellulose hat einen signifikanten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Faser (Siehe Abbildung 2.15) und bildet ihr Gerüst. Hemicellulose formt die Unterstützungsmatrix für die Cellulose Mikrofibrillen. Es bindet sehr leicht Wasser, und hat eine ausgeprägte Alkali- und Säurelöslichkeit.

Lignin gibt der Pflanzenfaser ihre Steifigkeit indem es die größeren Zwischenräume zwischen den Mikrofibrillen auffüllt. Bei einem zu hohen Anteil an Lignin, sinkt jedoch die Steifigkeit aufgrund der fehlenden Zugfestigkeit (Lignin hat gegenüber Cellulose einen zu hohen Anteil). Es lässt sich als thermoplastisches Polymer beschreiben mit einem Schmelzpunkt von ca. 170°C. Lignin ist säurebeständig, weist aber eine Alkalilöslichkeit auf. [4]

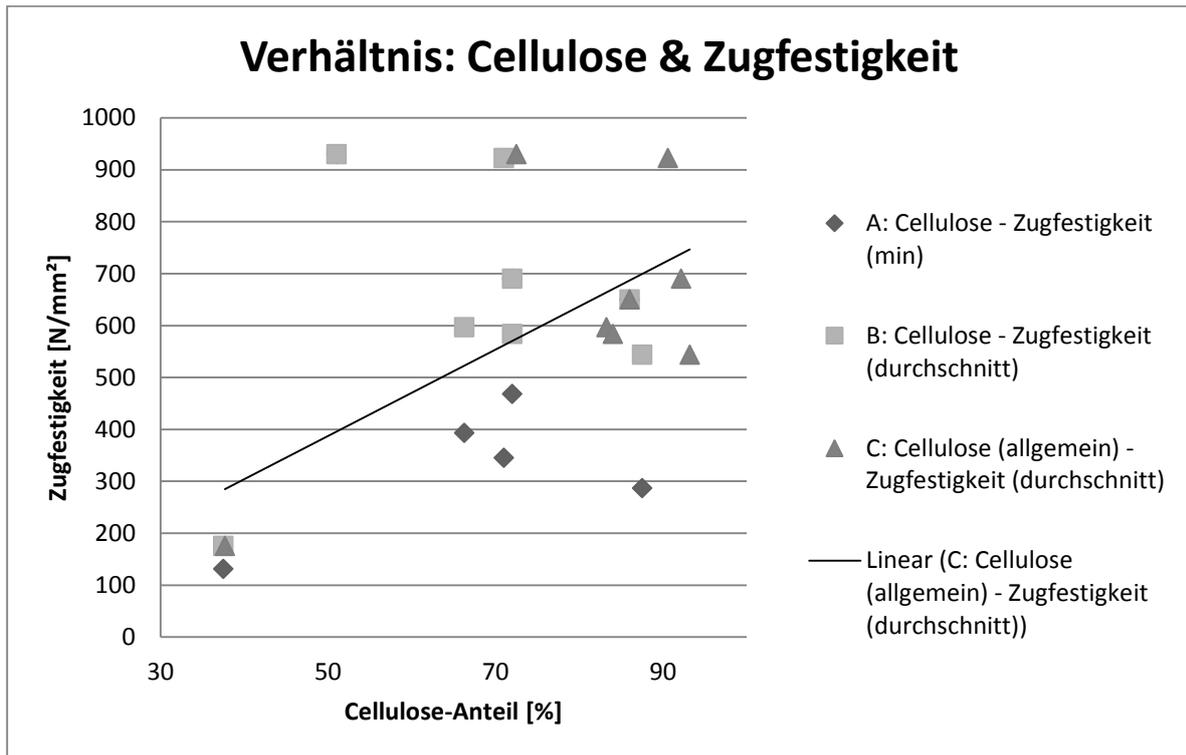


Bild 2.16: Zugfestigkeit in Abhängigkeit des Cellulose-Anteils, reine Cellulose zur Mindestzugfestigkeit (A); reine Cellulose zur durchschnittlichen Zugfestigkeit [B]; Summe aus Cellulose und Hemicellulose zur durchschnittlichen Zugfestigkeit.

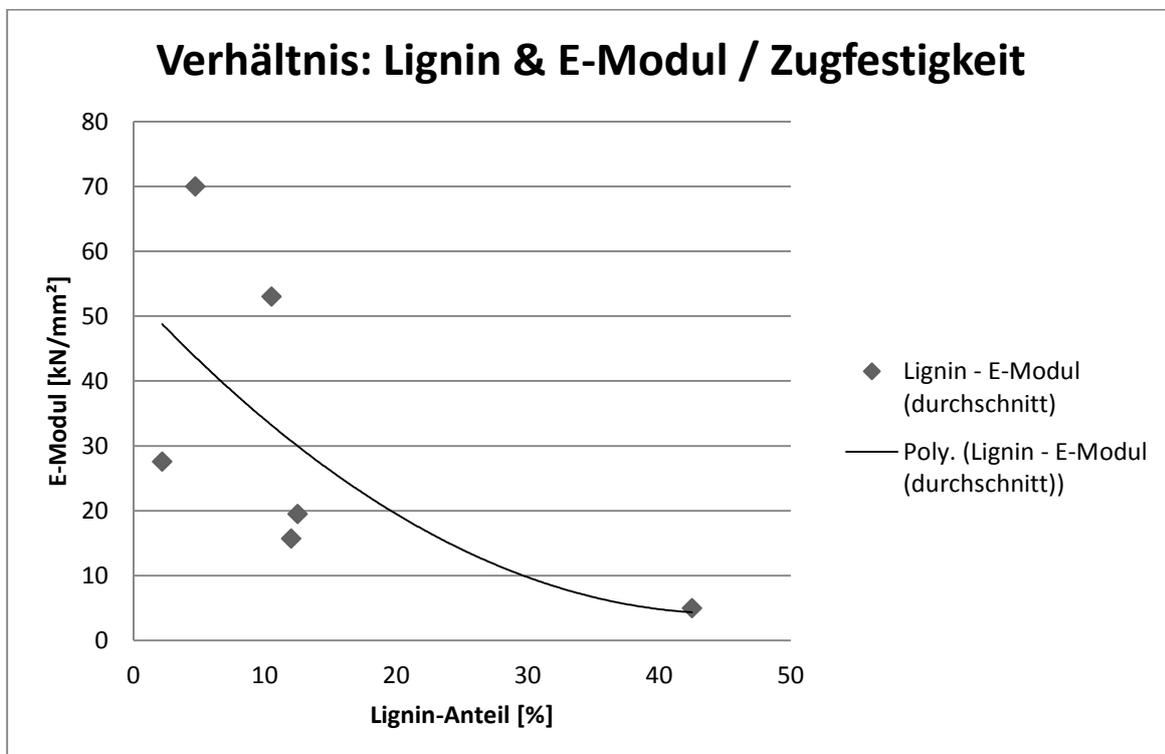


Bild 2.17: Verhältnis zwischen durchschnittlichem E-Modul und Lignin-Anteil

2.4.4 Faserarten im Detail

Im Folgenden sollen nun die für die Herstellung von natürlichen Kompositwerkstoffen zur Mauerwerksverstärkung geeignetsten Faserwerkstoffe erläutert werden. Die Auswahl ergab sich aus einer einfachen Betrachtung der mechanischen Eigenschaften. So wurden ausschließlich Fasern mit einer durchschnittlichen Zugfestigkeit von 600 N/mm² je Einzelfaser ausgewählt.

Hanf (*Cannabis sativa*):

Herkunft:	ursprünglich Zentralasien (kultiviert seit über 12.000 Jahren)
Heutige Anbauggebiete:	nahezu weltweit
Pflanzengröße:	1,2 – 5 m (davon ca. 28 – 46% als Bastfaser nutzbar)
Zugfestigkeit:	690 N/mm ²
E-Modul:	70.000 N/mm ²
Dauerhaftigkeit:	hohe Alkalibeständigkeit, geringe Beständigkeit gegen Säuren. hervorragender Feuchtwiderstand und selbst unter Wasser verrottet Hanf äußerst langsam.

Hanf ist eine der bekanntesten und wichtigsten Faserarten. Obwohl es durch die Absonderung eines THC-haltigen Sekrets, welches als halluzinogene Droge einen eher zweifelhaften Ruf erlangte, gehört Hanf zu den wichtigsten, natürlichen Industriefasern und das seit hunderten von Jahren. Aufgrund der schon von Natur aus sehr hohen Wachstumsrate und der hohen Widerstandsfähigkeit gegen Schädlinge ist Hanf eine sehr wohlwollende Pflanze und daher aus agrartechnischer Sicht sehr vorteilhaft. [4]



Bild 2.18: morphologische Stadien von Hanf nach E.W.Smith [9]

Morphologisch bedingt liegt der Bastfaseranteil zwischen 28 und 46%. Hanf gibt es als ein- und zweigeschlechtliche Pflanzenkultur. Während zweigeschlechtliche Kulturen feinere Fasern liefern und dadurch eher von der Textilindustrie bevorzugt werden, finden eingeschlechtliche Pflanzen Anwendung in der Papierindustrie. Die Elementarfasern von Hanf sind an ihrer Oberfläche stark unregelmäßig, aber dickwandig mit einer Länge von 13 – 25 mm. Die sehr guten mechanischen Eigenschaften, Zugfestigkeit von 690 N/mm² und der für Pflanzenfasern sehr hohe E-Modul von 70.000 N/mm², zusammen mit der guten Verfügbarkeit auf den Märkten, sind signifikante Vorteile der Hanffaser.

Flachs (*Linum usitatissimum*):

Herkunft:	Mesopotamien (ca. 8000 v. Chr.)
Heutige Anbaugeländer:	Europa, Argentinien, Indien, China und Staaten der ehem. Sowjetunion
Pflanzengröße:	0,80 – 1,50 m (davon ca. 75% als Bastfaser nutzbar)
Zugfestigkeit:	345 – 1500 N/mm ²
E-Modul:	27.600 N/mm ²
Dauerhaftigkeit:	beständig gegen leichte Säuren, gute Beständigkeit gegen Alkalieinwirkung

Flachs gehört zu den am längsten genutzten Naturfasern überhaupt. Industriell ist lediglich der Stamm der Pflanze nutzbar, welcher ca. 75% der Gesamthöhe ausmacht. Die Wachstumsrate liegt bei 80 bis 110 Tagen zwischen Aussaat und Ernte. Je nach Flachsart können sehr hohe Zugfestigkeiten erreicht werden. Hinzu kommt die natürliche Biegsamkeit der Fasern, trotz der hohen Festigkeit. Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten gehört Flachs jedoch zu den teureren Naturfasern, aufgrund der sehr arbeitsintensiven Produktionsabläufe. [4]

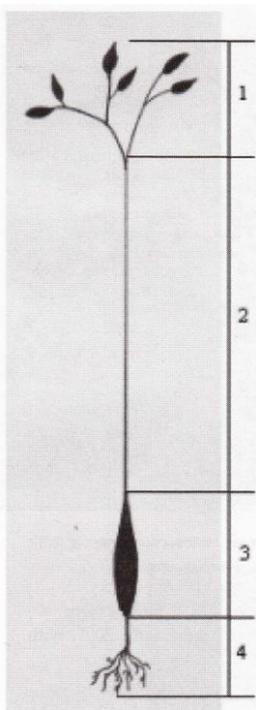


Bild 2.19: Aufbau einer Flachspflanze: (1) Krone, Äste, Blüte (2) Stamm (3) Kotyledon (Keimblatt) (4) Wurzeln. [4]

Jute (*Corchorus capsularis*):

Herkunft:	europäischer Mittelmeerraum und Vorderasien (ca. 10000 v. Chr.)
Heutige Anbaugeländer:	Indien, Bangladesch, Thailand, China und Brasilien
Pflanzenhöhe:	2,0 – 3,5 m
Zugfestigkeit:	393 – 800 N/mm ²
E-Modul:	13.000 – 26500 N/mm ²
Dauerhaftigkeit:	Besondere Empfindlichkeit gegenüber chemischer und photochemischer Einwirkung. Mäßiger Widerstand gegen Säuren und Feuchtigkeit.

Jute wird ausschließlich zur Nutzung der Pflanzenfasern angebaut. Jute gilt als eine der umweltfreundlichsten, dauerhaftesten und vielseitigsten Naturfasern. Besonderes Merkmal sind die äußerst langen Elementarfasern von 1,5 bis 3m Länge. Trotz seiner guten Zugfestigkeit bewirkt der hohe Lignin-Anteil gegenüber anderen Naturfasern erhöhte Sprödigkeit. Insofern Jute trocken gelagert werden kann, erreicht es eine fast ewige Dauerhaftigkeit. Hauptanwendungsgebiet für die Jute sind Textilprodukte, aber auch naturfaserverstärkte Kunststoffe. [4]



Bild 2.20: Jutepflanze [4]

Sisal (Agave sisalana):

Herkunft:	Mexiko & Zentralamerika
Heutige Anbauggebiete:	in allen Tropenräumen in Westindien, Afrika, Fernost und Südamerika
Pflanzengröße:	0,6 – 1,5 m
Zugfestigkeit:	468 – 700 N/mm ²
E-Modul:	9.400 – 22.000 N/mm ²
Dauerhaftigkeit:	unbeständig gegen Säuren

Sisal gehört ebenfalls zu den weltweit am meisten genutzten Pflanzenfasern. Größter Unterschied von Sisal zu den anderen Faserarten ist, dass Sisal aus den Blättern der Pflanze gewonnen wird und nicht aus den Stängeln. Die Fasern werden hierzu aus den langen, fleischigen, schwertförmigen Blättern entfernt. Deren Länge variiert zwischen 0,6m und 1,5m. Interessantes Merkmal sind die Unterschiede zwischen den Fasern in Abhängigkeit von welcher Stelle des Blattes sie entnommen wurde. So weisen Fasern vom unteren Teil des Blattes eine geringere Zugfestigkeit auf, dafür jedoch eine höhere Bruchdehnung. Während es im mittleren Abschnitt des Blattes genau umgekehrt ist. Die Fasern an der Spitze weisen eher durchschnittliche Eigenschaften auf. [4]

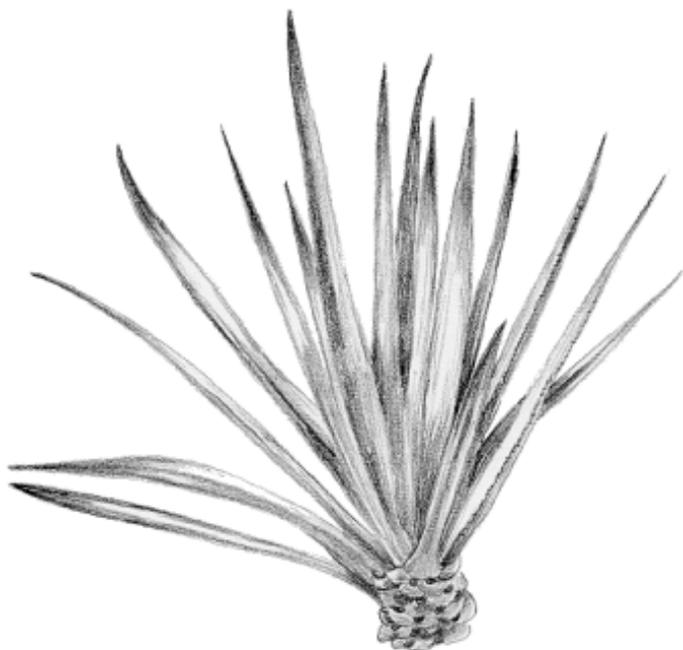


Bild 2.21: Sisalpflanze [4]

Kenaf (*Hibiscus cannabinus*)

Herkunft:	Asien und Afrika
Heutige Anbauggebiete:	Asien und Afrika
Pflanzengröße:	2,4 – 6,0 m
Zugfestigkeit:	930 N/mm ²
E-Modul:	53.000 N/mm ²
Dauerhaftigkeit:	verliert Festigkeit unter Feuchteeinwirkung

Kenaf gehört zu den schwieriger zu verarbeitenden Naturfasern, besitzt jetzt hervorragende umweltfreundliche Qualität, da die Pflanze selbst auch einen hohen Anteil an CO₂ absorbiert. Kenaf produziert sowohl kurze als auch lange Fasern. Diese variieren auch sehr stark in Dicke und Oberflächenstruktur. Kenaf findet in Europa noch keinen großen Absatz, daher soll es hier lediglich als Option genannt werden und wird in dieser Arbeit nicht weiter berücksichtigt. [4]

Nesselfaser

Herkunft:	Europa (ab 3000 v. Chr.)
Heutige Anbauggebiete:	wird nur vereinzelt angebaut
Pflanzengröße:	bis 2,8 m
Zugfestigkeit:	650 N/mm ²
E-Modul:	38.000 N/mm ²
Dauerhaftigkeit:	keine Informationen vorhanden

Die Nesselfaser wurde vor allem im Mittelalter und während den Weltkriegen bei allgemeiner Ressourcenknappheit für die Textilgewinnung angebaut. Heute ist die Nesselfaser kommerziell kaum genutzt und wird nur vereinzelt angebaut. Sie soll hier nur als Option aufgeführt werden und wird in dieser Arbeit nicht weiter berücksichtigt [4]

2.5 Gewebe & Textilien

Dieses Kapitel soll eine kurze Übersicht über verschiedene Arten von Garnen und textilen Flächengebilden geben und wie man diese zur Anwendung als Verstärkungsgewebe einsetzen kann.

2.5.1 Linienförmige Gebilde

Als linienförmige Gebilde werden Seile, Schnüre, Garn und Zwirne verstanden. Die einfachste Form sind Garne, welche durch verschiedene Verfahren aus den technischen Fasern hergestellt werden. Zur Herstellung von Garnen aus Faserpflanzen werden zu Beginn die Faserbündel geöffnet und in mehreren Schritten aufbereitet und gereinigt bis reine, technische Langfasern übrig bleiben. Aus diesen können durch mechanische Spinn- und Zwirnverfahren Schnüre und Seile hergestellt werden. Die Details dieser Herstellungsformen sollen hier nicht weiter erläutert werden, für die weitere Recherche empfiehlt sich [21].

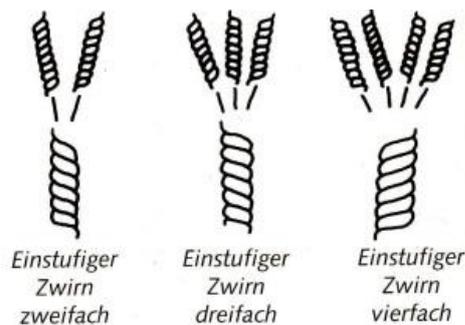


Bild 2.22: Einstufige Glattzwirne verschiedener Fachung [21]

Für Schnüre und Seile aus Bastfasern verwendet man in der Regel Glattzwirne. Bei diesen unterscheidet man nach ihrer Stufigkeit und ihrer Fachung. Einstufige Zwirne bestehen aus mehreren Garnen, die vor dem Zwirnen zusammenlaufen, die Fachung gibt Aufschluss über die Anzahl der Garne, welche sich bei der Herstellung auf derselben Hülse befinden. Mehrstufige Zwirne entstehen aus anderen ein- oder mehrstufigen Zwirnen, die wiederum miteinander verzwirnt werden.

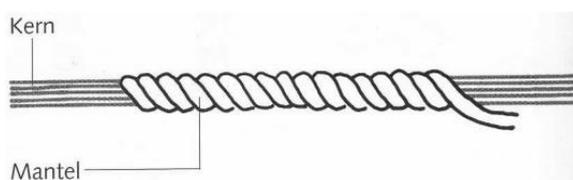


Bild 2.23: Mantel-Kern-Garn [21]

Darüber hinaus existieren viele weitere Arten von Zwirnen. Insbesondere sollen hier noch Spezialgarne wie das Kern-Mantel-Garn erwähnt werden. Hierbei wird ein Garn durch ein zweites umwickelt. Dies kann aus verschiedenen Gründen genutzt werden.

Entweder aus mechanischen Gesichtspunkte, dass das innere Garnmaterial aus elastischem und der Mantel unelastischem Material, oder aufgrund physikalischer Eigenschaften, oder durch den Einsatz preiswerter Garne im Kern, welche durch höherwertige, kostenintensivere Materialien im Mantel umschlossen und geschützt werden.

2.5.2 Flächengebilde

Aus den linienförmigen Gebilden entstehen durch weitere mechanische Verarbeitung Flächengebilde. Die mechanisch gesehen einfachsten Gebilde sind die Gewebe. Diese sind in der Regel Gebilde, welche aus zwei sich rechtwinklig kreuzenden Fadensystemen bestehen. Die beiden Richtungen werden als Kette und Schuss bezeichnet, wovon der Kettfaden jeweils abwechselnd unter und über dem Schussfaden liegt. Während bei den Geweben der Winkel zwischen Kette und Schuss rechtwinklig sein muss, ist dieser bei Geflechtem variabel. Gewebe unterscheidet man allgemein in Leinwandbindung, Körperbindung und Atlasbindung. [21] Aufgrund der welligen Oberflächenstruktur infolge des Webvorgangs erfährt ein Gewebe bei Zugbeanspruchung zu Beginn erst eine Streckung, was zu einer leichten Steifigkeitsminderung führt [22].

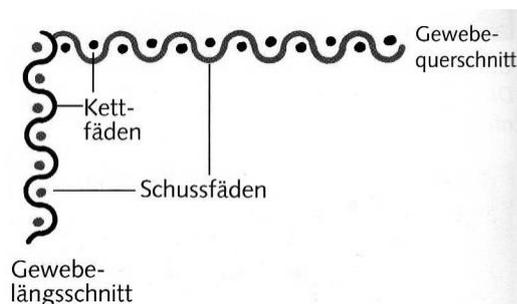


Bild 2.24: Gewebeaufbau [21]

Aufgrund der einfachen Herstellungsweise ist vor allem die Leinwandbindung für Flächengebilde für Naturtextilien zur Verstärkung von Mauerwerk zu empfehlen. Körper- und Atlasbindungen werden vor allem in der Textilindustrie für optische Effekte eingesetzt und haben im ingenieurmäßigen Sinne nur eine untergeordnete Bedeutung.

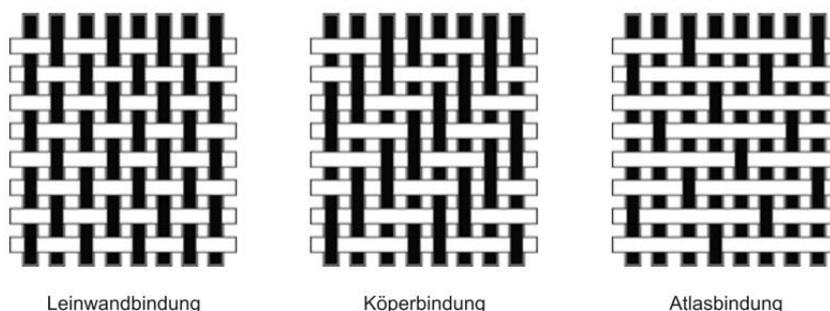


Bild 2.25: Gewebearten [22]

3 Stand der Technik

Im folgenden Kapitel sollen einige ausgewählte Forschungsarbeiten zum Thema „Verstärken von Mauerwerk durch Faserverbundwerkstoffe“ vorgestellt und erläutert werden. Ausgangspunkt all jener Forschungsarbeiten war die Anwendung von faserverstärkten Kompositen auf Basis von synthetischen Faserstoffen wie Carbon oder Aramid in einer Matrix aus Epoxidharz oder auf Basis von Zement. Diese Arbeiten liefern eine wichtige Grundlage zum Verständnis der Faserverbundwerkstoffe an Mauerwerk. Dennoch soll hier darauf hingewiesen werden, dass in dieser Arbeit vornehmlich natürliche Fasern und Putze eingesetzt werden. Dementsprechend sollen hier nur die nach Ansicht des Autors relevantesten Werke vorgestellt werden.

3.1 Schwegler – 1994

Schwegler befasste sich als einer der ersten mit faserverstärktem Mauerwerk. So wurden verschiedene Lamine aus faserverstärkten Kunststoffen und Epoxidharz in Zug-Kleinversuchen untersucht. Als wichtigste Erkenntnis ergab sich hierbei, dass für eine nutzbare Rissüberbrückung ein Lösen der Faser aus dem Verbund mit der Matrix eintreten muss. Der Fall, dass das Versagen durch ein Zugversagen der Faser eintritt, aufgrund sehr guter Verbundeigenschaften, würde zu einem zu spröden Bruchverhalten führen. Darüber hinaus wurden verschiedene Anordnungen von Laminaten und Geweben auf realmaßstäblichen Mauerwerkswänden in zyklischen Großversuchen getestet. Daraus ergab sich, dass zusätzliche Verstärkungsmaßnahmen für Gewebelamine nicht notwendig sind, sowie, dass eine Exzentrizität aufgrund einseitiger Applikation von Geweben auf Mauerwerk zu vernachlässigbaren Verformungen führt. [20]

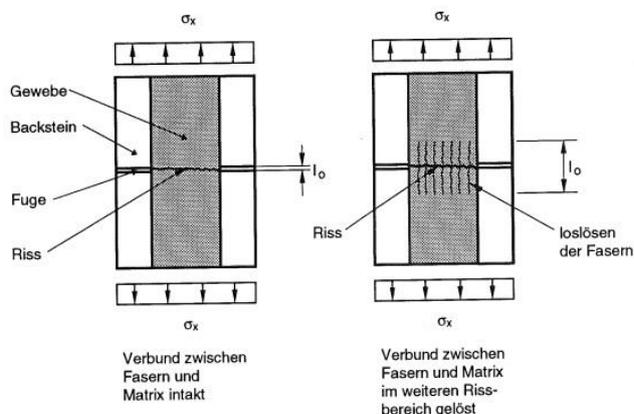


Bild 3.1: Mauerwerkskleinkörper im Fugenbereich; Bei erhöhter Beanspruchung löst sich der Verbund zwischen Matrix und Faser [20]

3.2 Wallner – 2007

Wallner beschäftigte sich in seiner Arbeit ausführlich mit biaxial belasteten Mauerwerksscheiben. Hierbei verwendete er Matrizen auf Zement- und Epoxidharzbasis. Er variierte sowohl die Fasermaterialien (E-Glas, Kohlenstoff, Polyester), als auch die Wandgeometrie und das Matrixmaterial. Hierbei ergab sich eine Proportionalität zwischen Größe der mit Kompositmaterial verstärkten Fläche und der Wandtragfähigkeit. Die Applikation von Laminaten führte zu einer Tragfähigkeitssteigerung von bis zu 250%, während die Anfangssteifigkeiten der Prüfkörper unverändert blieben. Es bestätigte sich auch Schweglers Annahme, dass die einseitige Applikation von Verstärkungslaminaten keinen merklichen Einfluss infolge der Exzentrizität hatten, jedoch, im Vergleich zur beidseitigen Applikation, eine geringere Tragfähigkeitssteigerung festzustellen war. Darüber hinaus stellte er fest, dass auch Wände mit Öffnungen von den Verstärkungslaminaten profitieren und somit eine Steigerung des Tragwiderstands erfahren. Bezüglich der Matrizenmaterialien wurde herausgefunden, dass zementöse Matrizen die Duktilität steigern, während der Einsatz von Epoxidharzmatrizen zu einer Steigerung der Tragfähigkeit führt. [22]

3.3 München – 2010

München testete in verschiedenen Klein- und Großversuchen vor allem das Verhalten von zementösen Matrizen und der Untersuchung von hybriden, textilen Strukturen mit dem Ziel die unterschiedlichen Fasereigenschaften zur Steigerung der Tragfähigkeit und zusätzlich der Duktilität. Dies wurde durch den Einsatz von hochfesten Fasern, sowie hochdehnbaren Fasern erreicht. Darüber hinaus wurden die Möglichkeiten mehrdirektionaler Gewebe untersucht. Es wurde experimentell nachgewiesen, dass der Einsatz von hybriden, mehrdirektionalen Textilien zu einer Tragwiderstands- und Duktilitätssteigerung führte und damit ein deutlich verbessertes Nachbruchverhalten gewährleistete. In Tabelle 3.1 sind Vergleichende Ergebnisse von verstärktem und unverstärktem Mauerwerk nach den Versuchen von *München* dargestellt. [14]

	Unverstärktes Mauerwerk (SW_02)	Verstärktes Mauerwerk (SW_08)
Verstärkt mit:	-	Sika & QUAD_06
Maximale Last	$F_{max} = 138 \text{ kN}$	$F_{max} = 232 \text{ kN}$
Tragwiderstand (75% von F_{max})	$F_{75\%} = 103,5 \text{ kN}$	$F_{75\%} = 174 \text{ kN}$
Verschiebung bei $F_{75\%}$	$\Delta_{el} = 3,58 \text{ mm}$	$\Delta_{el} = 13,59 \text{ mm}$
Verschiebung am abfallenden Ast bei $F_{75\%}$	$\Delta_{pl} = 6,65 \text{ mm}$	$\Delta_{pl} = 39,44 \text{ mm}$
Verschiebungsduktilität	$\mu_{\Delta} = 1,85$	$\mu_{\Delta} = 2,90$

Tab. 3.1: Tabellarischer Vergleich Verstärktes und unverstärktes Mauerwerk nach *München* [14]

4 Experimentelle Untersuchung

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt in der Erstellung, Erprobung und Bewertung von natürlichen Materialien zur Verstärkung von Mauerwerk unter Erdbebenlast. Zu Beginn sollen hierbei die natürlichen Materialien getrennt voneinander getestet und beurteilt werden. Als zweite Hälfte dieser Untersuchung soll deren Zusammenwirken bei speziell ausgewählten Versuchsaufbauten beurteilt werden. Ziel ist hierbei vor allem die Erhöhung der Systemduktilität der Mauerwerksscheiben, welche gemäß des Lastfalls Erdbeben unter Schub belastet werden. Um dies zu simulieren werden im Verlauf dieser Arbeit zwei Kleinversuche vorgestellt und mit verschiedenen natürlichen Materialien durchgeführt.

4.1 Versuchsplanung

Im Rahmen dieser Arbeiten sollen sowohl natürliche Putze als auch natürliche Fasermaterialien untersucht werden. Zu Beginn werden verschiedene Mischungen von Lehm-Putzen in Kleinversuchen erprobt. Davon unabhängig werden ebenfalls die einzelnen zur Verfügung stehenden Naturfasern in Zugversuchen getestet.

Aus diesen Testergebnissen wird zum einen ein für die weiteren Versuche zur Anwendung kommender Lehm-Putz gewählt, sowie eine Auswahl an verschiedenen Naturfasern, welche für die verschiedenen Applikationen als Gewebe getestet werden.

Versuchsreihe	Materialien	Durchführung	Ziel
Lehm-Putz	Lehm und natürliche Zusatzstoffe	An Mauerwerkskleinproben	Ermittlung einer brauchbaren Rezeptur für Lehm-Putz
Naturfasern	Im freien Handel erhältliche Naturfasern	Zugversuche an Garn und Seilen	Ermittlung mechanischer Eigenschaften Vorabauswahl
Zugversuche	Naturfasern, Lehm- & Zementputz, Ziegelsteine	Zugversuche an verstärkten Einzelsteinen	Ermittlung des einaxialen Arbeitsvermögens Ermittlung Verbundverhalten
Schubversuche	Naturfasern, Zementputz, Kalksandvollsteine	Schubversuche an Drei-Stein-Körpern	Ermittlung Eigenschaften je Gewebeat Schubtragfähigkeit

Tab. 4.1: Übersicht über alle zur Anwendung gekommenen Testreihen.

In diesem Rahmen soll als erste Hauptversuchsreihe ein Zugversuch an Einzelsteinproben durchgeführt werden. Dabei handelt es sich um beidseitig durch Naturfasergewebe verstärkte Ziegelsteine. Hierbei soll zum einen das Arbeitsvermögen der Fasern innerhalb der Matrix untersucht werden und auch ein direkter Vergleich zwischen Putzen auf Lehm- und Zementbasis erbracht werden. Darüber hinaus soll auch Verbundverhalten der Fasern in den verschiedenen Matrizen untersucht werden und daraus eine weitere Auswahl für die zweite Versuchsreihe getroffen werden.

In dieser werden Schubversuche an Kalksandsteinen durchgeführt, welche ebenfalls beidseitig mit Naturfasergewebe innerhalb einer Zementmatrix verstärkt wurden, als Mörtel wird hierbei ein italienischer Mauerwerksmörtel verwendet. Teil dieser Versuchsreihe ist auch das unterschiedliche Verhalten von bidirektionalem und dreidirektionalem Gewebe zu untersuchen.

Mit den Zugversuchen am Einzelstein, sowie den Schubversuchen werden die beiden möglichen Rissverhalten Mode I und Mode II untersucht. So werden Mode I Risse mit den Zugversuchen am Einzelstein geprüft und die Mode II Risse durch die Schubversuche an den Drei-Stein-Körpern.

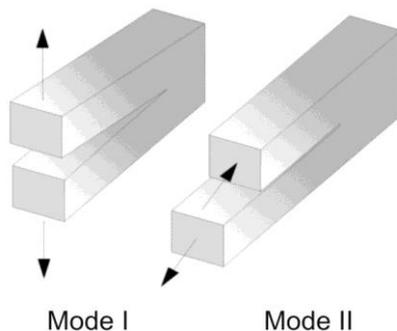


Bild 4.1: Riss Mode I & Riss Mode II [14]

Abschließend soll nach jeder Versuchsreihe eine Empfehlung zum einen für die weiteren Versuche als auch für die direkte Anwendung stehen.

4.2 Untersuchungen an Lehm-Putzen

Lehm wurde vor allem aufgrund seiner hervorragenden bautechnischen Eigenschaften und seiner einfachen, globalen Verfügbarkeit ausgewählt. Lehm wird wie in 2.3.3. beschrieben seit Jahrhunderten erfolgreich angewendet, wurde jedoch in den letzten Jahrhunderten vornehmlich durch moderne Baustoffe auf Zementbasis ersetzt. Heute gibt es nur wenige Untersuchungen über das Verhalten von Baustoffen aus Lehm. In der Regel wird auf Erfahrung und historische Werke zurückgegriffen. Hervorzuheben ist jedoch das von Gernot Minke verfasste Lehmbau-Handbuch, welches hervorragend den Umgang mit dem Baustoff Lehm beschreibt. In dieser Arbeit werden diese Empfehlungen aufgegriffen und für die Anwendung als Lehm-Putz erprobt.

So gilt es nach *Minke* [13] verschiedene Punkte bei der Herstellung von Lehm-Putzen zu beachten:

- In Lehm sollten große Mengen Grobsand vorhanden sein, falls dem nicht so ist, sollte dies durch Zugabe von Sand kompensiert werden.
- Dem Putz sollten Fasern oder Haare, Stroh- oder Heuhäcksel, zur Vermeidung von Makrorissen durch Schwinden, hinzugegeben werden.
- Die Mischung sollte gut durchmischt sein, dass sich der Ton gut verteilen kann
- Wenn die Mischung richtig zusammengesetzt ist, sollte der Putz an der senkrecht gehaltenen Kelle kleben bleiben, beim Abwerfen aber gut herunter gleiten können.

Darüber hinaus sollten die Lagerfugen des Mauerwerks mindestens 1cm tief ausgekratzt werden um einen genügend rauen Untergrund zu gewährleisten, da Lehm keine chemische Bindung mit der zu verputzenden Oberfläche eingehen kann. Falls dies nicht möglich ist bzw. der Untergrund keine ausreichende Rauigkeit aufweisen kann, so lässt sich diese auch durch einen Zementunterputz gewährleisten. Prinzipiell gilt, dass alle Oberflächen, welche aus saugenden Materialien, wie Ziegel- oder Kalksandstein, vorgesenst werden, damit dem Lehm-Putz die Feuchtigkeit nicht einseitig entzogen wird.

4.2.1 Ausgangsstoffe

Jegliche hier verwendeten Ausgangsstoffe sind natürlichen Ursprungs. Als Basis wird hierbei Lehm aus der Vorderpfalz verwendet, welcher einen leicht sandigen, stark schluffigen/tonigen Anteil hat. In [13] werden mehrere Testverfahren zur einfachen Determinierung der Zusammensetzung von Lehm erläutert.

Lehm: Zu Beginn lässt sich ein einfacherer Geruchstest durchführen um zu überprüfen ob der Lehm organische Bestandteile enthält. Da der Lehm einen leichten Modergeschmack aufwies, bedeutet dies, dass organische Bestandteile vorhanden sind. Zur Prüfung der Körnung sind mehrere Versuche möglich. Bei einem Reibe- und Waschtest, bei welchem eine feuchte Lehmprobe zwischen Finger und Handfläche zerrieben wird, führte zu der Annahme, dass ein leicht sandiger, stark schluffiger/toniger Lehm vorliegt. Dies ließ auch bei einem Beißttest beweisen, hierbei wird beim Beißen des Lehms darauf geachtet, ob dieser unangenehm knirscht (sandig) und wie stark die Klebeeigenschaften an der Zunge sind (eher schluffig, oder tonig).

Wie bereits in Kapitel 2.2.2 erläutert, gibt es verschiedene Möglichkeiten die Eigenschaften eines Putzes gezielt zu beeinflussen. Hierzu kann man entweder moderne Chemikalien einsetzen, oder beruft sich auf historische Zusatzstoffe. In dieser Arbeit werden ausschließlich natürliche Stoffe eingesetzt um den gewünschten Effekt herbei zu führen. Die Bandbreite der durch die Zugabe auftretenden Effekte werden im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter untersucht, sondern man verlässt sich auf die Richtigkeit der Angaben aus [13].

Quarzsand: Gemäß der Empfehlung nach Minke wird dem Lehmgemisch Quarzsand hinzugegeben. Die Menge lässt sich daran erkennen wie der Putz eine Bindefähigkeit an den Stein widergibt. Löst er sich plattenförmig ab, so muss weiterhin Sand zugegeben werden. Löst er sich jedoch in kleinen Teilen ab, wenn man den Stein anstößt, so gilt es den Sandanteil zu verringern, indem man Lehm bzw. reinen Ton hinzugibt um den Bindemittelanteil zu erhöhen. Das Untermischen von groben Bestandteilen wie Sand und Kies wird als „Magern“ bezeichnet. [13]

Kalk: Kalk verringert durch Agglomeration der feinen Bestandteile das Wasserbindungsvermögen des Lehms, insofern genügend Feuchtigkeit vorhanden ist. Kalk beschleunigt und stabilisiert den Erhärtungsprozess und führt zu einer

Langzeitverfestigung. Zusätzlich erhöht Kalk die Wetterfestigkeit, sowie die Druckfestigkeit des Lehms. Allerdings ist die Zugabemenge von Kalk sehr stark vom Lehm abhängig und kann bei falscher Dosierung die Trockenfestigkeit verringern. Alternativ kann auch Zement eingesetzt werden. Die Auswirkungen von Kalk auf die Druckfestigkeit sind in Bild 4.2 wiedergegeben. [13]

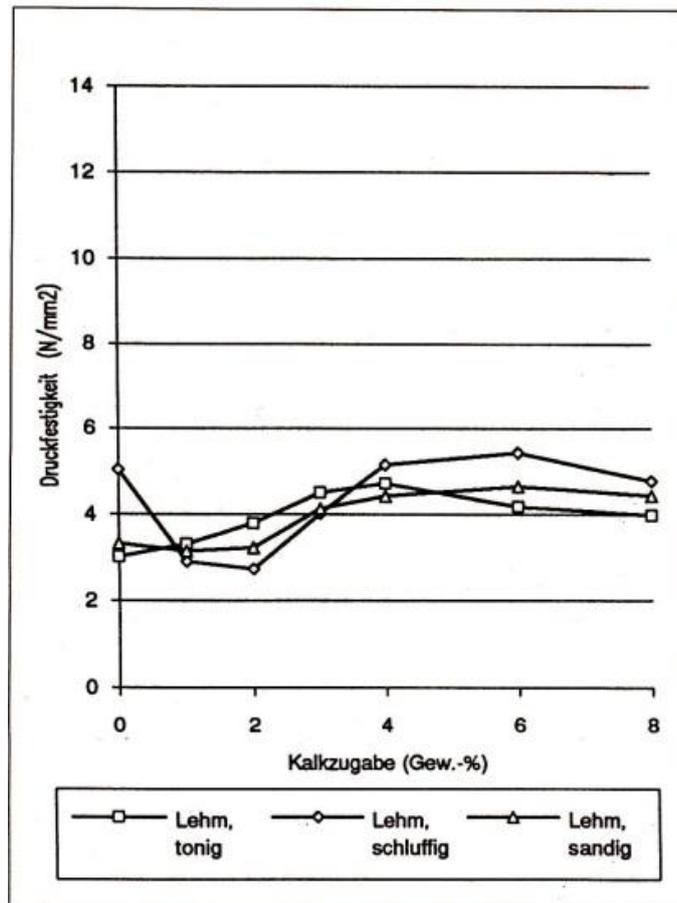


Bild 4.2: Veränderung der Druckfestigkeit von Lehmen nach Kalkzugabe, nach Untersuchungen von [13]

Magerquark:

Durch den Einsatz von Molkeprodukten lässt sich nach historischen Belegen und Versuchsergebnissen nach [13] die Bindekraft mit dem Untergrund erhöhen. Die hierzu notwendige Menge sollte im Einzelfall geprüft werden.

Leinöl:

Der Verwendung von Leinöl führt auf eine Versuchsreihe nach [13] zurück, wonach Leinöl zwar nur das zweitbeste Ergebnis zur Verbesserung der Abriebfestigkeit erzielte, dafür durch korrekte Nachbehandlung die bessere Oberflächenversiegelung erzielte. In einigen Ländern werden Pflanzenöle auch zur Verbesserung der Wetterfestigkeit

dem Lehm zugegeben. In Versuchen nach [13] wurden die sehr gute und längjährige Verbesserung der Wetterfestigkeit durch die Zugabe von Leinöl nachgewiesen.

Kokosfasern:

Fasern werden dem Lehm zugegeben um die Rissbildung bei der Trocknung zu verringern. Früher wurden meist Haare oder Strohhäcksel beigemischt. Die Zugabe von Fasern führt darüber hinaus zu einer Erhöhung der Zug- und Druckfestigkeit. Außerdem binden die Fasern einen Teil des Anmachwassers. Diese Vorgänge führen vor allem zu einer Verringerung der Rissbildung während der Trocknungsphase. Für grobe Fasern oder Langfasern gilt dies nicht uneingeschränkt. Der Effekt von Kokosfasern und anderen Faserstoffen auf das Schwindverhalten ist in Bild 4.3 wiedergegeben. [13]

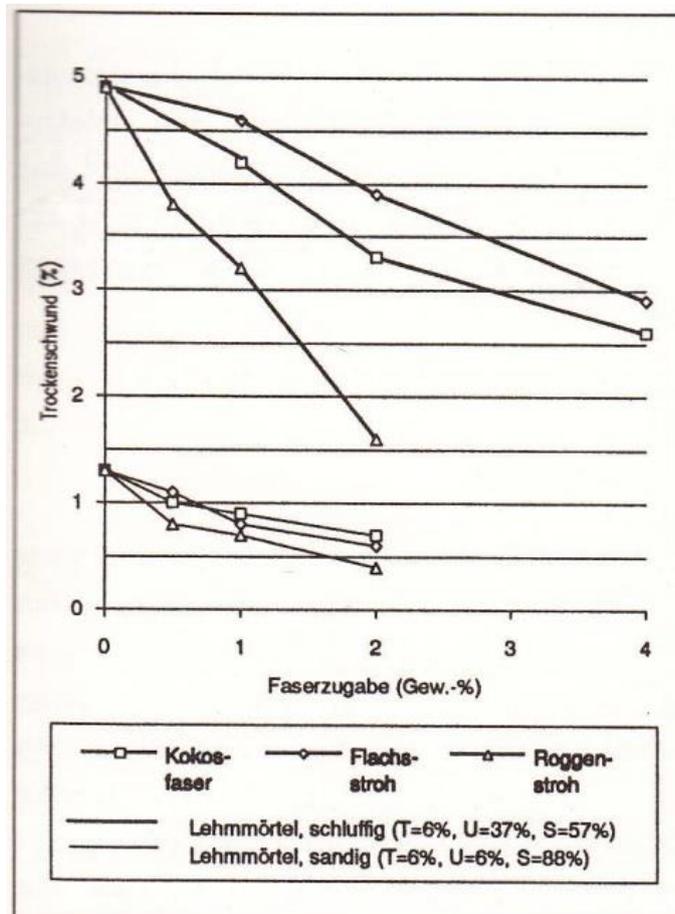


Bild 4.3: Veränderung des Schwindverhaltens von Lehmen nach Faserzugabe, nach Untersuchungen von [13]

4.2.2 Versuchsdurchführung

Zur Erprobung verschiedener Mischungen von Lehm-Putzen wurden zwei kleine Mauerabschnitte gebaut. Hierzu wurden zum einen Hochlochziegelsteine von poroton® eingesetzt und zum anderen Kalksandsteine. Hintergrund dieser Auswahl liegt in der Überprüfung der Untergrundhaftung von Lehm-Putzen. Lehm-Putz benötigt einen aufgerauten Untergrund um mit diesem einen Haftverbund einzugehen, da Lehm beim Abbinden keine chemische Verbindung mit dem Untergrund eingehen kann. Deswegen sollen die unterschiedlichen Mauerwerkssteine demgemäß untersucht werden. Da Kalksandsteine eine sehr glatte Oberfläche aufweisen, sind hier eher schlechtere Ergebnisse zu erwarten. Auf Grundlage dieser Ergebnisse wird für die folgenden Versuche der Mauersteintyp ausgewählt.

Wie von Minke gefordert wurden die Lagerfugen ca. 1cm tief mit der Kelle ausgekratzt um die Haftbedingungen zu verbessern. Zusätzlich wurde der Untergrund vorgeätzt um einen einseitigen Feuchtigkeitsentzug des Putzes zu verhindern. Die Versuche wurden unter realistischen Bedingungen bei klarem Wetter im Freien durchgeführt. Es wurden insgesamt 11 Rezepturen angesetzt und in Kleinproben getestet.

Die ersten Versuche wurden in Kleinmengen per Hand in einem Becher gemischt. Nachdem dies aber zu einer nicht ausreichend guten Durchmischung führte, wurden größere Mengen angesetzt und in einem Kleinmischgerät verarbeitet. Die Menge des Anmachwassers wurde so lange erhöht bis eine verarbeitbare Masse entstand. Die Zutaten wurden gemäß den Vorschlägen nach *Minke* [13] gewählt. Als Quarzsand wurde für die Kleinversuche eine Körnung von 0,5 – 1mm gewählt. Der dazu verwendete Lehm wurde naturtrocken beigemischt. Er wurde auf keine Weise veredelt, oder gereinigt. So konnten durchaus größere Kieselsteine oder organische Bestandteile wie Wurzelreste gefunden werden. Aufgrund der trockenen Konsistenz des Naturlehms musste dieser während der Verarbeitung mehrfach mit der Kelle zerschnitten werden um die Klumpen zu lösen. Die in den Versuchen verwendeten Rezepturen sind in Tabelle 4.2.-4. aufgelistet. Die farbliche Markierung soll einen Hinweis zur Eignung der Rezeptur geben.

4 Experimentelle Untersuchung

	1		2		3		4	
Lehm-Putz	Anteile:		Anteile:		Anteile:		Anteile:	
	[g]	[%]	[g]	[%]	[g]	[%]	[g]	[%]
Lehm	300	59%	300	56%	300	55%	200	34%
Grobsand	150	29%	150	28%	150	27%	200	34%
Zusatzwasser	60	12%	60	11%	50	9%	120	20%
Kokosfaser			2				2	
Leinöl			20	4%			20	3%
Magerquark					50	9%		
Kalk							50	8%
	510		532		550		592	

Tab. 4.2: Rezepturen der handgemischten Lehm-Putze.

	5		6		7		8	
Lehm-Putz	Anteile:		Anteile:		Anteile:		Anteile:	
	[g]	[%]	[g]	[%]	[g]	[%]	[g]	[%]
Lehm	600	50%	600	54%	700	47%	1000	39%
Grobsand	300	25%	300	27%	350	23%	1000	39%
Zusatzwasser	200	17%	120	11%	280	19%	350	14%
Kokosfaser	2		2		7		7	
Leinöl	40	3%	40	4%	50	3%	75	3%
Magerquark			50	4%	60	4%	85	3%
Kalk	50	4%			50	3%	50	2%
	1192		1112		1497		2567	

Tab. 4.3: Rezepturen der maschinengemischten Lehm-Putze.

	9		10		11	
Lehm-Putz	Anteile:		Anteile:		Anteile:	
	[g]	[%]	[g]	[%]	[g]	[%]
Lehm	400	26%	400	27%	250	27%
Grobsand	800	52%	800	54%	500	55%
Zusatzwasser	200	13%	100	7%	50	5%
Kokosfaser	2,5		2,5		2,5	
Leinöl	50	3%	25	2%	35	4%
Magerquark	60	4%	100	7%	50	5%
Kalk	25	2%	50	3%	25	3%
	1537,5		1477,5		912,5	

Tab. 4.4: verfeinerte Rezepturen innerhalb eines zweiten Testdurchlaufs.

Die Proben 1 – 4 wurden hierbei per Hand gemischt und der Untergrund nicht vorbereitet, so dass der Putz auf trockenes Mauerwerk appliziert wurde. Probe 1 diente vor allem zur Beobachtung eines reinen Lehm-Putzes ohne Zusatzstoffe. Dieser löste

sich jedoch bereits nach weniger als 30min vom Untergrund ab und zeigte leichte Schwindrissbildung. Der zeitnahe Verlust der Haftung lässt sich auch durch unzureichende Vorbehandlung des Untergrunds erklären. Der Einsatz von Leinöl und Kokosfasern zur Verhinderung der Schwindrissbildung wurde bei Probe 2 gezeigt, so waren keine Rissbildung zu beobachten. Allerdings löste sich die Probe nach ca. 45min vom Ziegelmauerwerk ab. Ebenfalls wird hier die unzureichende Vorbehandlung des Untergrunds als Hauptgrund benannt. Das Haftungsproblem konnte jedoch bei Probe 3 kompensiert werden. Hierbei wurde Magerquark hinzugemischt. Die Probe zeigte keine Neigung sich vom Untergrund abzulösen, allerdings wurden wieder starke Schwindrisse beobachtet, was auf das Fehlen von Fasern zurückzuführen ist. Das reine Hinzugeben von Kalk, wie bei Probe 4, führte Minuten nachdem der Putz aufgebracht wurde zu einem Ablösen vom Untergrund, es war jedoch eine deutlich verbesserte Verarbeitbarkeit zu bemerken, weitere Effekte waren nicht zu beobachten.

Nachdem bei den Rezepturen 1 – 4 neben der schlechten Untergrundhaftung auch die Durchmischung des Putzes ein befriedigendes Ergebnis verfehlte, wurde ab Probe 5 eine Kleinmischmaschine verwendet, sowie eine Vorbehandlung des Untergrundes eingesetzt, dabei wurde der Mauerstein mit einem Schwamm vorgesenkt, um ein zu starkes Saugen und damit den einseitigen Feuchtigkeitsverlust zu verhindern. Zusätzlich wurden die Kokosfasern kleiner geschnitten. Ursprünglich wurden sie mit einer maximalen Länge von bis zu 8cm eingemischt, was zu unerwünschten Verklumpungen führte. Daher wurden ab Probe 5 die Kokosfasern auf eine maximale Länge von 2cm geschnitten. Außerdem wurde die Testmenge verdoppelt um Proben auf einem größeren Untergrund applizieren zu können.

Probe 5 enthielt erstmals alle Zusatzstoffe, ausgenommen dem Magerquark. Dies sollte nach den Ergebnissen der ersten Versuche zu einem zeitnahen Ablösen vom Untergrund führen, sowie einer verminderten Schwindrissbildung. Erste Annahme war zutreffend. Nach einer Abbindezeit von circa 45min löste sich der Putz an den Rändern ab und zog sich zusammen. Außerdem zeigten sich schon nach weniger als 30min erste Schwindrisse, welche sich rasch ausbreiteten. Die Annahme, dass die Zugabe von Fasern allein die Schwindrissbildung unterbinden könnte, erwies sich somit als falsch. Allerdings erwies sich das Kürzen der Fasern vor allem für die Verarbeitung als äußerst sinnvoll, dies zeigte sich insbesondere bei den folgenden Rezepturen. Bild 4.4 zeigt eine Momentaufnahme der Schwindrisse an Probe 5.

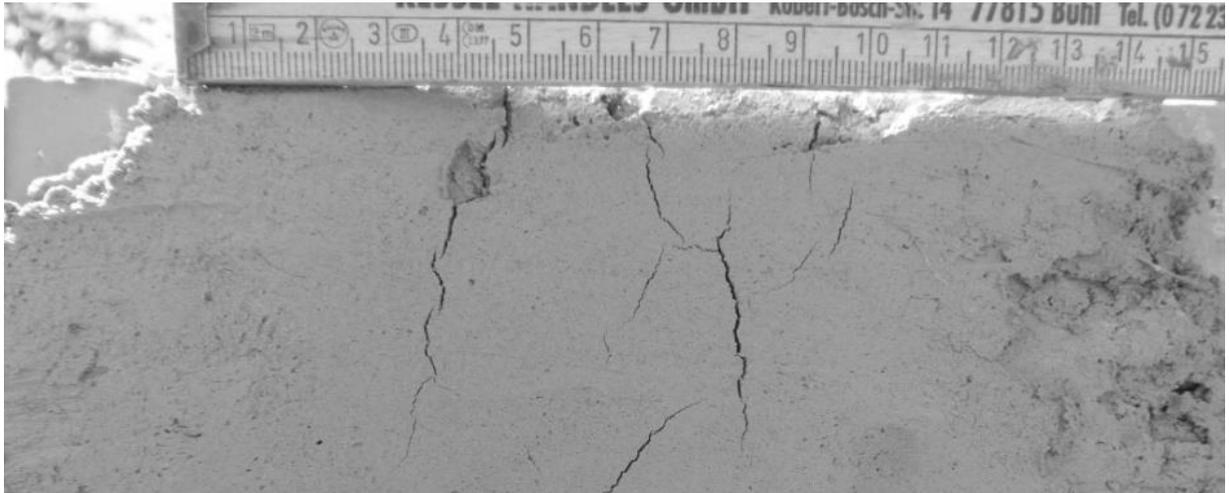


Bild 4.4: Schwindrisse an Probe 5 nach ca. 30min

Nach insgesamt ca. 60min konnte man jedoch Probe 5 komplett als einzelnes Stück vom Mauerwerk ablösen. Die Haftung mit dem Untergrund war auf der gesamten Fläche nicht mehr gegeben.

Probe 6 erwies sich als bis dato beste Rezeptur. Trotz sehr starker Bildung von Schwindrissen, zeigte sie exzellente Verarbeitbarkeit und eine sehr gute Haftung mit dem Untergrund. Trotz Vor- und Nachbehandlung in Form ausreichender Feuchtigkeitzufuhr waren ausgeprägte Schwindrisse nicht zu verhindern. Die Proben 7 & 8 führten zu ähnlichen Ergebnissen, obwohl hier bereits mit einer Minderung des Lehmanteils begonnen wurde, waren die Schwindrisse nach wie vor zu stark. Bild 4.5. zeigt ein typisches Rissbild.

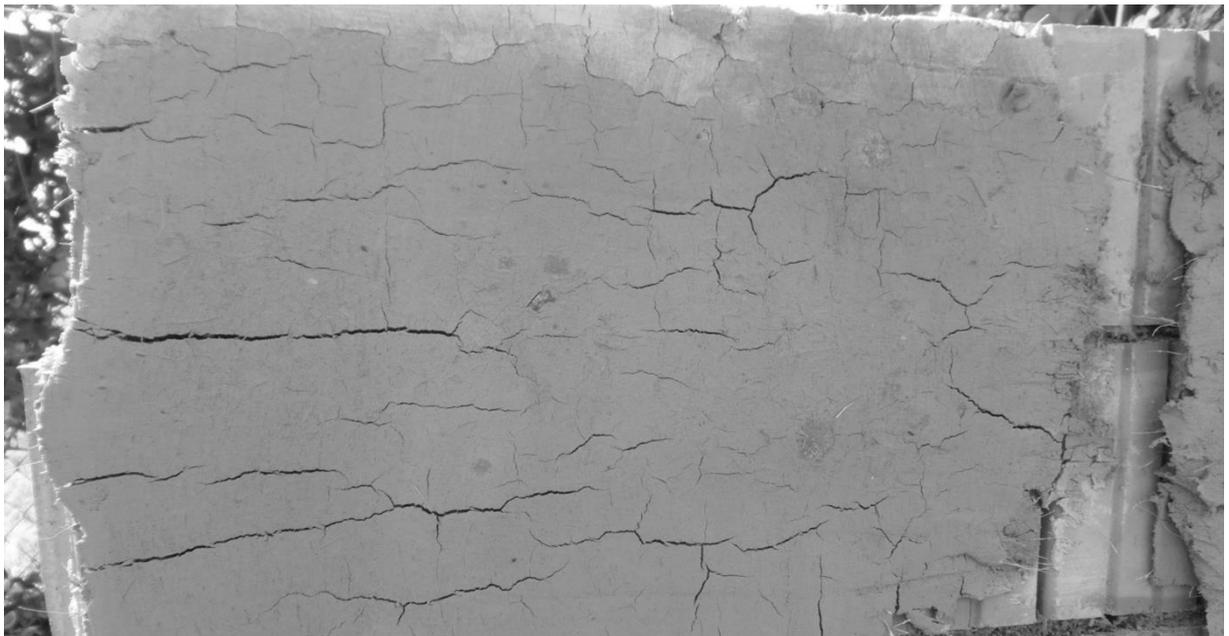


Bild 4.5: Schwindrisse an Probe 6 nach ca. 30min

Erst bei Probe 9 konnte ein befriedigendes Ergebnis erzielt werden. Signifikanter Unterschied zu den vorhergegangenen Mischungen war die Minimierung des Lehmannteils auf fast 25%, anstatt 40 – 60%. So zeigten sich auch Tage nach der Verarbeitung keine Risse, welche durch Schwinden hervorgerufen wurden. Lediglich die Verarbeitbarkeit verschlechterte sich, da die Masse sehr zäh zu verarbeiten war. Außerdem war ein Haften sowohl an Ziegelmauerwerk als auch an Kalksandsteinen zu beobachten. Bild 2.6 zeigt Probe 9 nach 2 Tagen. Die dabei sichtbaren Risse gehen auf Fehler während der Verarbeitung zurück, ansonsten war die Probe rissfrei.



Bild 4.6: Probe 9 nach 2 Tagen, keine Schwindrissbildung und gutes Haftungsvermögen am Untergrund.

Die Rezepturen 10 und 11 sollten die Mischung, welche bei Probe 9 angewendet wurde weiter verfeinern. Während die 10. Probe überraschenderweise ein sehr starkes Fließvermögen aufwies, konnten bei Probe 11 sehr gute Eigenschaften nachgewiesen werden. Haftung mit dem Untergrund, und das Ausbleiben der Risse sprechen für sich. Lediglich die Verarbeitbarkeit muss hier als Manko hervorgehoben werden. So ist die Konsistenz des Putzes äußerst trocken und eher als „klebriger Sand“ zu verstehen. Auch nach mehreren Wochen unter Witterungseinfluss zeigten die Proben 9 – 11 weder eine Neigung Risse zu bilden, noch sich vom Untergrund abzulösen. Die Proben der Rezepturen 9 – 11, welche auf Ziegelsteine appliziert wurden, zeigten auch nach mehreren Wochen in der freien Witterung keine Anzeichen von Schädigung oder Rissen. Lediglich eine Teilprobe der Rezeptur 9, welche auf Kalksandstein appliziert wurde, zeigte eine Neigung sich vom Untergrund abzulösen. Es soll angemerkt werden, dass es sich um eine nass-sommerliche Witterung handelte, so führte dies zu einer Temperaturspanne von 7 – 32°C, außerdem waren Starkregenereignisse in Folge von Gewittern aufgetreten. Das Verhalten von Lehmputzen bei sehr niedrigen Temperaturen konnte nicht untersucht werden.

4.2.3 Ergebnisse & Empfehlung

Die Versuche zeigten, dass das Problem der Schwindrissbildung nicht zu unterschätzen ist. Außerdem ist die korrekte Vorbehandlung des Untergrunds durch Nässen unbedingt einzuhalten. Vor allem das Haften mit dem Untergrund kann schnell zum Problem werden. Die nach [13] vorgeschlagenen Zusatzstoffe sind sehr zu empfehlen. Allerdings ist gerade bei feuchten Zusatzstoffen wie Leinöl und Magerquark darauf zu achten, dass diese ebenfalls einen Wasseranteil besitzen, somit die notwendige Menge an Anmachwasser abnimmt. Neben den in 4.2.1. genannten Richtlinien zur Verarbeitung von Lehm-Putzen nach [13] sollten darüber hinaus folgende Punkte beachtet werden:

- Der Einsatz von Fasern wird dringend empfohlen um größere Schwindrisse zu verhindern. Die Fasern sollten dabei eine Länge von 2cm nicht überschreiten. Die Steifigkeit des Materials nimmt stark zu.
- Molkereiprodukte verbessern die Untergrundhaftung. Obwohl hier nur Magerquark untersucht wurde, wird ein ähnliches Verhalten bei anderen Produkten stark vermutet.
- Das Verhältnis von Lehm zu Sand sollte im Einzelfall geprüft werden. Aufgrund des stark schluffigen/tonigen Lehms, war ein Verhältnis von 2:1 (Sand:Lehm) zu empfehlen.
- Zur Verbesserung der Wetterfestigkeit sollten Naturöle z.B. Leinöl beigemischt werden. Zur genauen Dosierung sollten weitere Untersuchungen durchgeführt werden.
- Kalk kann als zusätzliches Bindemittel und zur Erhöhung der Druckfestigkeit beigemischt werden, darüber hinaus wird die Verarbeitbarkeit verbessert.

Die Rezeptur zur Probe 11 wird in den folgenden Versuchsreihen als Lehm-Putz beispielhaft verwendet. Die mechanischen Eigenschaften sprechen hierbei für sich, jedoch sollten zum Erreichen einer besseren Verarbeitbarkeit weitere Untersuchungen durchgeführt werden.

Inwiefern sich Lehm als Matrix für Faserverbundwerkstoffe eignet wird in Abschnitt 4.4. bei Zugversuchen an Einzelsteinen näher untersucht.

4.3 Zugversuche an Naturfasern

Im Rahmen dieser Versuchsreihe sollen die verschiedenen Naturfasern auf ihre mechanischen Eigenschaften und insbesondere ihrem Arbeitsvermögen untersucht werden.

4.3.1 Ausgangsstoffe

Wie in Kapitel 2.4 beschrieben, gibt es eine Reihe von Naturfasern, welche sich für den Einsatz als Verstärkungsgewebe eignen. So wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Auswahl von 4 Fasertypen getroffen, welche verhältnismäßig günstig und leicht zu erhalten sind. In der Regel sind Naturfasern stets als Gezwirne oder Geflechte zu kaufen. Die gängigste Form sind hierbei Schnüre, Seile und Garne. Da Schnüre und Garne eher in der Textilindustrie angewendet werden, kann man bei Seilen von der Verarbeitung des Faserstoffes von einer besseren Qualität ausgehen, da hier mechanische Eigenschaften im Vordergrund stehen. Die Bilder 4.7 – 4.9 zeigen Nahaufnahmen der gezwirnten Schnüre von Hanf-1S, Jute-2,5 und Sisal-2,5, dabei sind sehr gut die einzelnen Zwirnstufen und der Grad der Verarbeitung zu erkennen.

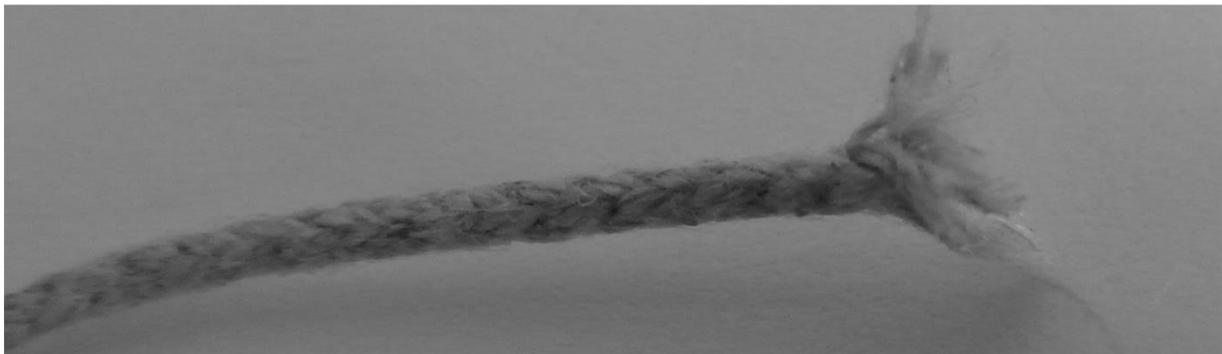


Bild 4.7: Nahaufnahme, Hanfseil, 1,0 mm, mehrstufiges Gezwirn



Bild 4.8: Nahaufnahme, Jute, 2,5 mm, dreistufiges Gezwirn

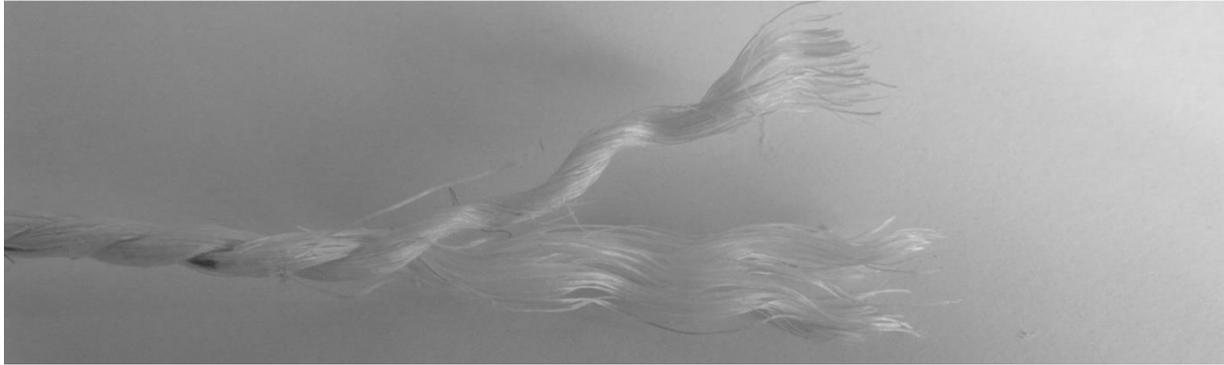


Bild 4.9: Nahaufnahme, Sisal, 2,5 mm, zweistufiges Gezwirn

Tabelle 4.5 gibt abschließend eine kurze Übersicht über die verwendeten Naturfasern und deren Verarbeitung. Die Angaben zur „Beschreibung“ sind gemäß ihrer Produktbeschreibung übernommen worden, im Allgemeinen sind sie jedoch alle als Gezwirne bzw. Faserstränge zu verstehen, können jedoch als Schnüre, Garne, oder Seile eingesetzt werden. Folgende Fasern wurden für diese Testreihe erstanden und vorbereitet.

Bezeichnung	Durchmesser	Beschreibung	Verarbeitung
Hanf-1,5	1,5 mm	Schnur	2-stufiges Gezwirn
Hanf-1S	1 mm	Seil	mehrstufiges Gezwirn
Hanf-1	1 mm	Nähgarn	1-stufiges Gezwirn
Jute-2,5	2,5 mm	Garn	3-stufiges Gezwirn
Sisal-2,5	2,5 mm	Paketschnur	2-stufiges Gezwirn
Sisal-2	2 mm	Seil	2-stufiges Gezwirn
Flachs-2	2 mm	Paketschnur	1-stufiges Gezwirn
Flachs-2,5	2,5 mm	Paketschnur	2-stufiges Gezwirn

Tab. 4.5: Naturfasern, welche für die Zugversuche eingesetzt wurden.

4.3.2 Versuchsdurchführung

Zum Test der Fasern wurden von jedem Fasertyp 3 Einzelproben mit einer Länge von je 10cm in einem Zugversuch getestet. Die Versuche wurden alle weggesteuert durchgeführt, mit einer Messfrequenz von 2Hz. Die Zuggeschwindigkeit musste je nach Fasertyp variiert werden, lag aber im Mittel bei 0,2 mm/s. Gemessen wurden der Weg, sowie die Kraft. Aus den Messdaten und den Randbedingungen lassen sich alle Werte zur Beurteilung des Arbeitsvermögens bzw. des Potentials zur Energiedissipation der Fasern berechnen.

Es ist anzumerken, dass die in Tabelle 2.5 beschriebenen Zugfestigkeiten und E-Moduli sich auf eine technische Einzelfaser beziehen. Da ein Test von Einzelfasern technisch nur sehr schwer umzusetzen ist, werden alle Versuche an gezwirnten Fasergebilden durchgeführt, also an den Schnüren bzw. Seilen. Somit werden die ge-

4 Experimentelle Untersuchung

messenen Ergebnisse am Seil niemals die Höhe der Ergebnisse an der technischen Einzelfaser erreichen, da aufgrund der Zwirndichte, Imperfektionen und der unterschiedlichen Verarbeitung der Seile nur von Bruttofestigkeiten der Fasern gesprochen werden kann. Die genauen Unterschiede der mechanischen Eigenschaften von technischen Einzelfasern und verarbeitbaren Textilprodukten wie Seile sollen in dieser Arbeit jedoch nicht untersucht werden. Die Zugfestigkeit ist hierbei ein Bruttowert in Abhängigkeit der Verarbeitungsichte. Die in den Versuchen ermittelten Zugfestigkeiten berechnen sich aus:

$$f_{max} = \frac{F_{max}}{A} \quad (13)$$

Der E-Modul berechnet sich aus der maximalen Zugfestigkeit über der Grenzdehnung:

$$E = \frac{f_{max}}{\varepsilon_{Grenz}} \quad (14)$$

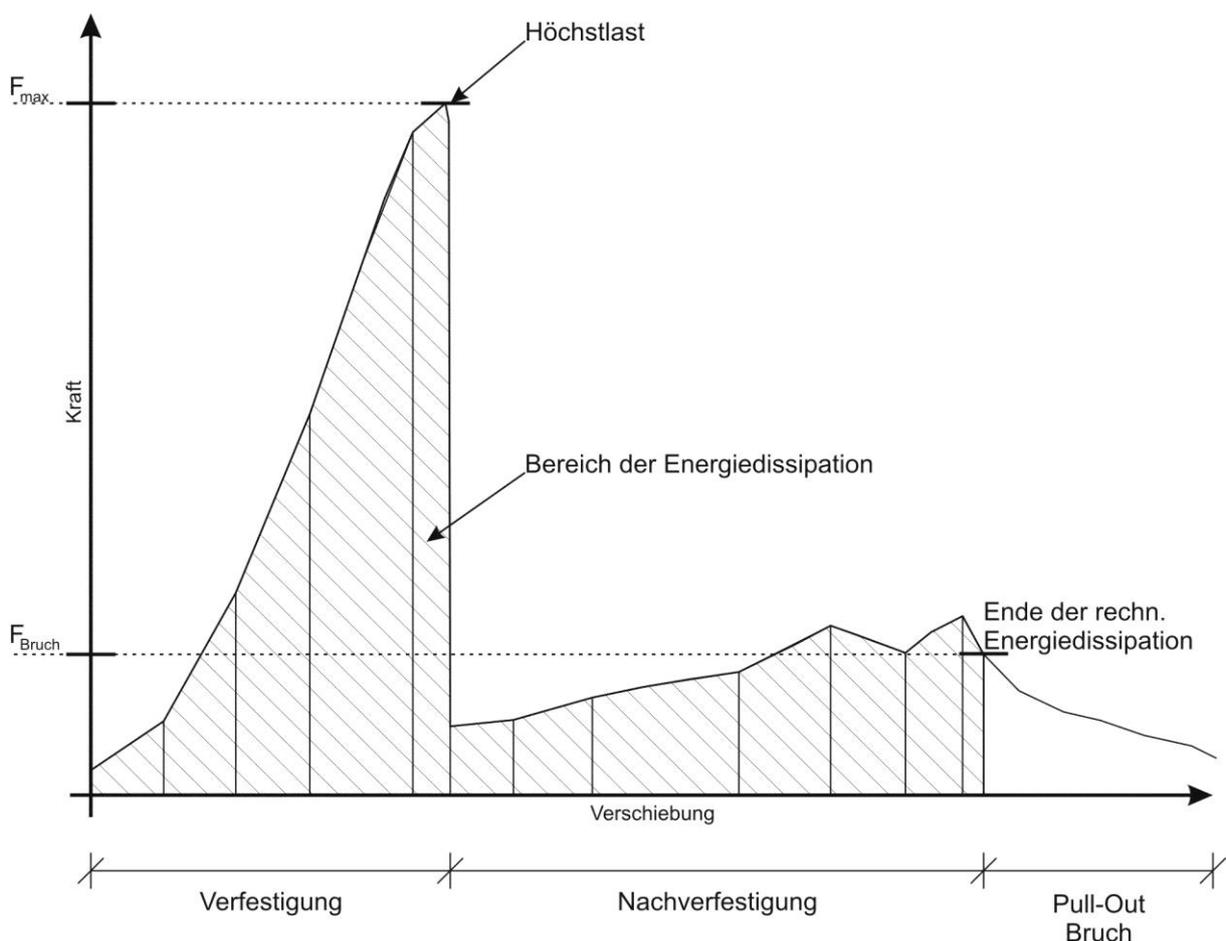


Bild 4.10: Diagrammbeispiel

Das Arbeitsvermögen, welches auch als Energiedissipation bezeichnet werden kann, lässt sich durch Integration des Kraft-Weg-Verlaufs berechnen. Da jedoch keine

Funktion gegeben ist, sondern nur eine Anzahl von Datenpunkten, wird das Arbeitsvermögen durch Tabellenkalkulation mit dem Trapezverfahren ermittelt. Um den Effekt der Plateaubildung nach Überschreiten der Zugfestigkeit zu berücksichtigen, wird die Wegänderung so lange zum Arbeitsvermögen hinzugezählt wie noch 20% der maximalen Zugkraft notwendig sind um eine Wegänderung herbeizuführen. Das Arbeitsvermögen ist mit der Fähigkeit zur Energiedissipation gleichzusetzen.

Das Bruchverhalten von Naturfasern gestaltet sich im Wesentlichen sehr ähnlich, unabhängig von der gewählten Faserart. Zunächst beginnt eine Primärverfestigung, welche durch die Zugfestigkeit der Primärfasern definiert ist. Als Primärfasern sind hierbei solche zu verstehen, welche zuerst die Zugkraft erfahren. Durch die Verarbeitung vieler Einzelfasern zu einem Garn bzw. einer Schnur ist es nicht immer gegeben, dass die Einzelfasern an jeder Stelle die gleiche Straffheit aufweisen, so dass unter Belastung erst einige Fasern straff gezogen werden müssen, bevor diese eine Kraft erfahren können. Somit sind als Primärfasern solche zu verstehen, welche die geringste Verschiebung erfahren müssen um unter Zugspannung gesetzt zu werden, alle Fasern, die erst im späteren Verlauf der Belastung eine Kraft erfahren werden als Sekundärfasern bezeichnet. Speziell bei mehrfach gezwirnten Schnüren ist dies ausschlaggebend, da hierbei mehrere Zwirne mit unterschiedlicher Straffheit in der Schnur vorliegen, wird die Kraft in der Regel erst zu einem Zwirn geleitet bis dieses reißt und im Anschluss auf das nächste weitergeleitet, dies ist vor allem bei den Sisalschnüren der Fall. Dieses „Weiterleiten“ der Zugkraft auf Sekundärfasern lässt sich als Nachverfestigung verstehen und bildet meistens, insofern genügend Sekundärfasern vorliegen, eine zweite Belastungsspitze. Das Verhältnis zwischen Höchstlast und der maximalen Nachverfestigung ist vom Verhältnis zwischen Sekundär und Primärfasern abhängig. Im Theoriefall, könnte bei einem Verhältnis von 50% die Höchstlast bei der Nachverfestigung ein zweites Mal erreicht werden. In der Realität gestaltet sich das Bruchverhalten jedoch durchaus komplizierter. Denn der maßgebende Unterschied zwischen Primär- und Sekundärfasern, vom Belastungszeitpunkt abgesehen, ist dass die Primärfasern in der Regel schlagartig und zur selben Zeit reißen, während die Sekundärfasern nach und nach brechen.

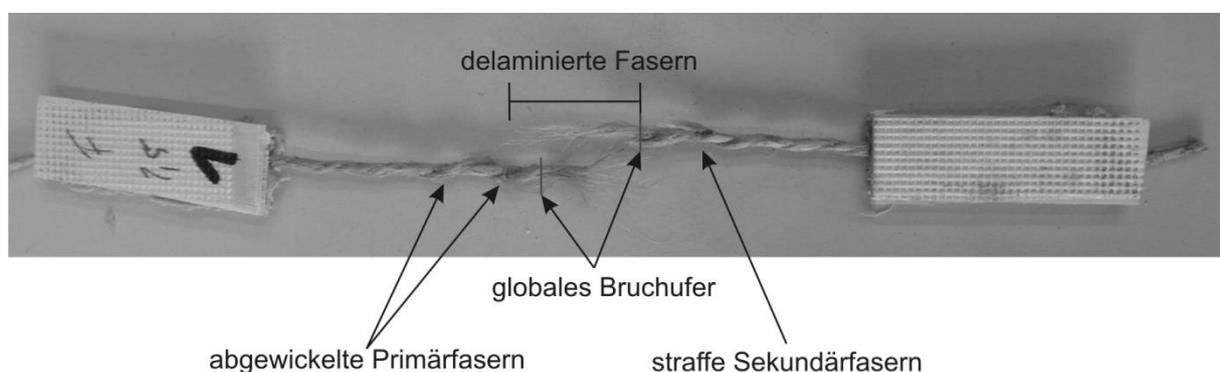


Bild 4.11: Bruchbereich einer Schnur, dargestellt ist Probe Flachs – 2,5 – 1

Zusätzlich zur Nachverfestigung, welche aus dem Reißen der Sekundärfasern resultiert, erfolgt eine Delamination von Fasern, welche bereits gerissen sind, jedoch deren Bruch nicht am globalen Bruchufer entstand, sondern lokal davon entfernt. Diese werden in Folge der weiteren Verschiebung aus der Schnur herausgezogen, dabei wird in Folge von Reibung zwischen den Fasern weitere Energie dissipiert. Wenn es für die Schnur nicht mehr möglich ist mindestens 20% der Höchstlast im Rahmen der Nachverfestigung aufrecht zu erhalten, um eine Wegänderung herbeizuführen, kann man davon ausgehen, dass die meisten Fasern endgültig gerissen sind und nur noch Delamination vorliegt. Diese Annahme basiert auf Beobachtungen und der Auswertung von 23 Einzelzugversuchen.

Flachs

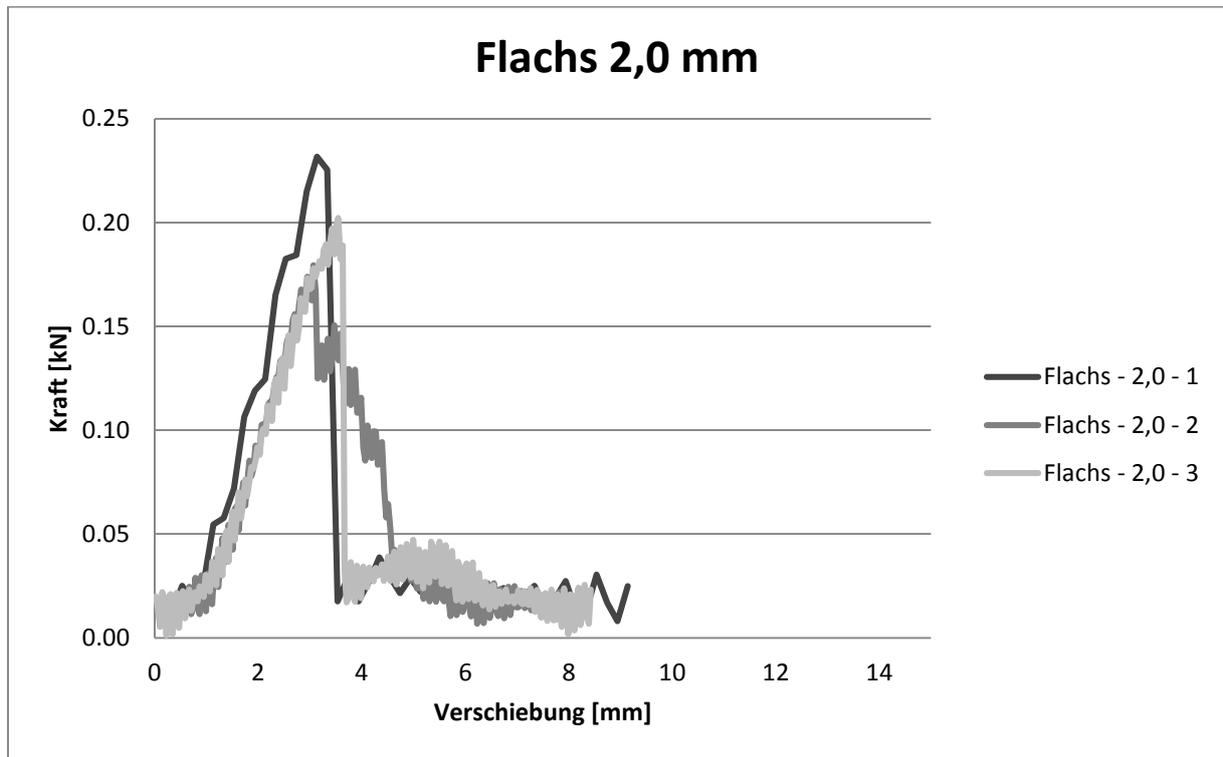


Bild 4.12: Kraft-Weg-Diagramm von Flachs-Schnüren von 2,0mm

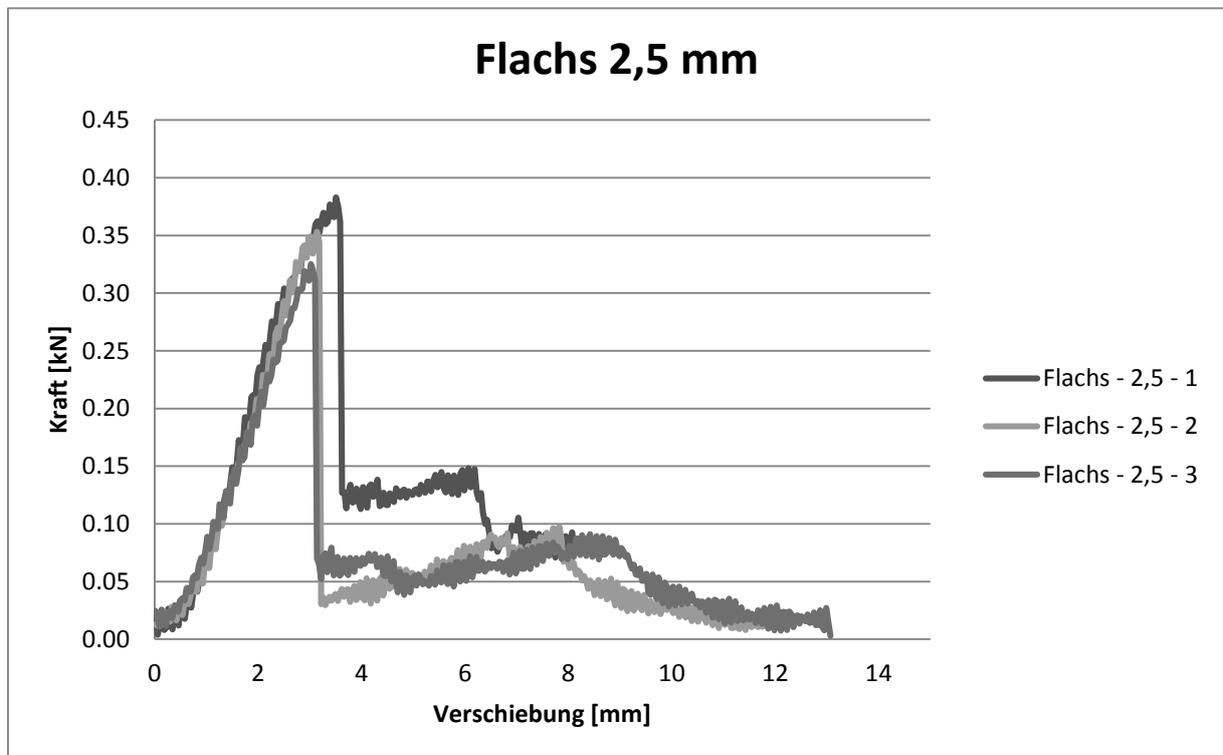


Bild 4.13: Kraft-Weg-Diagramm von Flachs-Schnüren von 2,5mm

Bei den Flachsfasern wurden zwei verschiedene Schnüre getestet. Zum einen waren dies Faserstränge mit einer Dicke von 2,0 mm und zum anderen von 2,5 mm. Hervorzuheben sei hierbei vor allem die signifikante Steigerung des Arbeitsvermögens und der Nachverfestigung. Tabelle 4.6 gibt einen Vergleich der mechanischen Kennwerte und des Arbeitsvermögens von Flachsschnüren wieder, die Werte wurden für die verschiedenen Durchmesser unter den jeweils drei Versuchen gemittelt.

Durchmesser	2 mm	2,5 mm	Steigerung
Querschnittsfläche	3,14 mm ²	4,91 mm ²	156,25%
E-Modul	2033,34 N/mm ²	2507,59 N/mm ²	123,32%
max. Zugspannung	65,07 N/mm ²	72,07 N/mm ²	110,76%
Max. Zugkraft	204,43 N	353,79 N	173,06%
Energiedissipation	0,3753 Nm	0,9800 Nm	261,12%

Tab. 4.6: Vergleich von Flachsschnüren mit 2,0mm und 2,5mm

Während die maximale Dehnung bei beiden Durchmessern in etwa gleich in einem Bereich von 3 – 4% lag, zeigen jedoch die etwas dickeren Schnüre eine deutlich erhöhte Zugfestigkeit. Obwohl beide Schnüre von demselben Zulieferer stammten, scheinen sie eine unterschiedliche Faserdichte vorzuweisen. Besonders die deutlich höhere Nachverfestigung aufgrund der stärkeren zweifachen Verzwirnung gewährt eine Steigerung der Energiedissipation auf über 260%, obwohl die Querschnittsfläche nur auf etwas mehr als 150% gesteigert wurde.

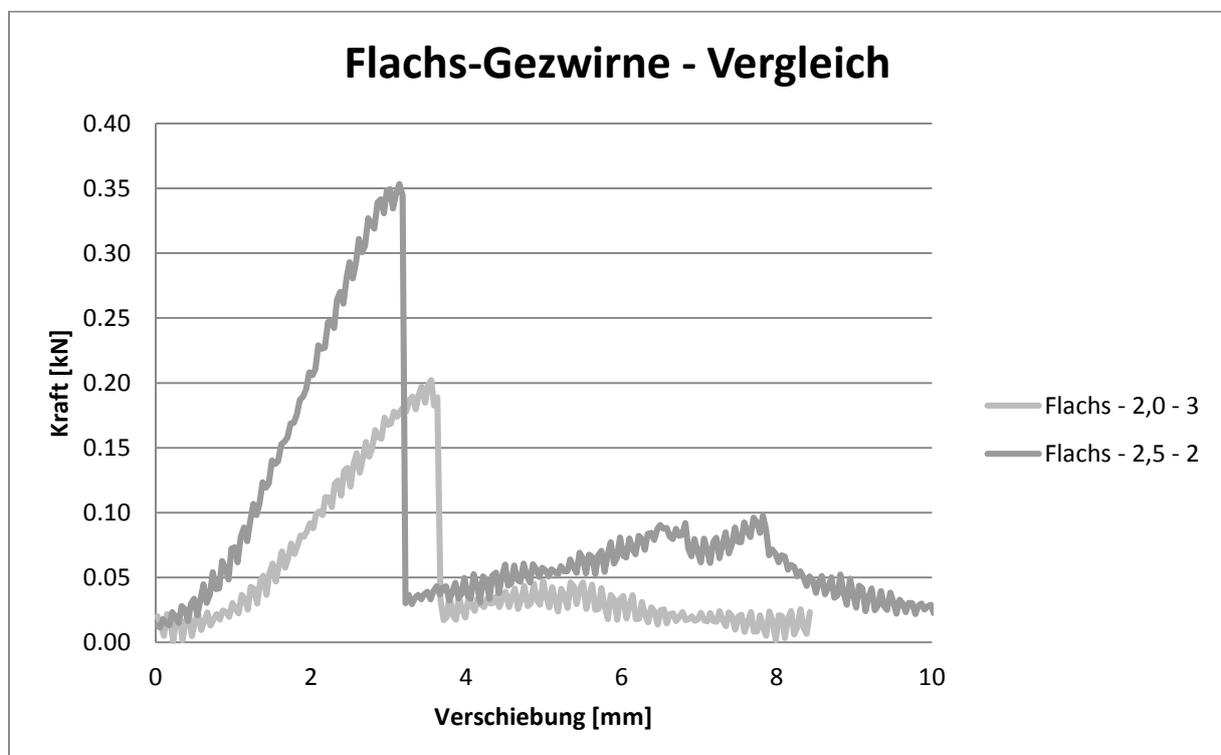


Bild 4.14: Kraft-Weg-Diagramm, Vergleich von Flachsschnüren mit 2,0mm und 2,5mm

4 Experimentelle Untersuchung

Die Bilder 4.15 – 4.18 zeigen die geprüften Schnüre vor und nach der Testdurchführung. Man beachte hierbei, dass die Fasern bei den 2,5 mm-Proben deutlich stärker miteinander verhakten als bei den 2,0 mm-Proben. So entstand bei den Flachsschnüren mit 2,5 mm Durchmesser ein deutlich größerer Bruchbereich, ebenfalls zu erkennen ist das Abwickeln der zuerst gebrochenen Primärfasern zu erkennen, während die Sekundärfasern aufgrund der starken Dehnung gegen Ende des Versuchs die stärkste Straffung erfuhren und somit nahezu gerade aus der Schnur herausstehen. Aufgrund der deutlich verbesserten Eigenschaften von Flachsschnüren mit einem Durchmesser von 2,5 mm gegenüber dünneren Schnüren und das hohe Energiedissipationsvermögen sind diese Flachsschnüre zur Herstellung von Verstärkungstextilien zu empfehlen.

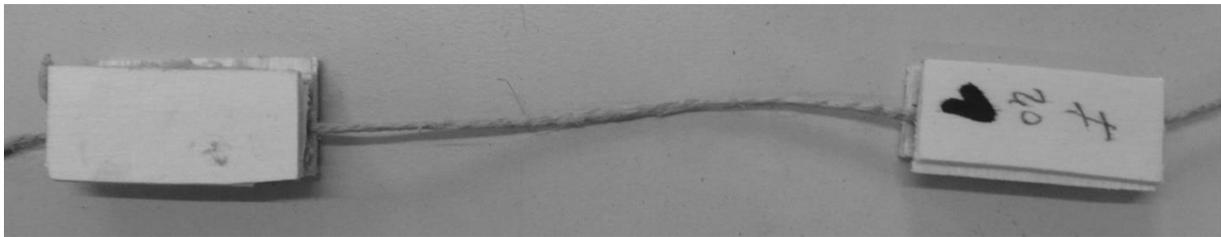


Bild 4.15: Probe Flachs – 2,0 – 1 unmittelbar vor Einsetzen in die Prüfmaschine.



Bild 4.16: Probe Flachs – 2,0 – 1 unmittelbar nach Herausnehmen aus der Prüfmaschine.

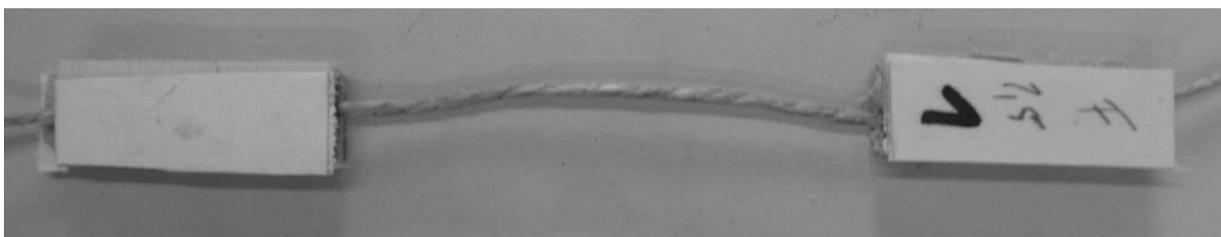


Bild 4.17: Probe Flachs – 2,0 – 1 unmittelbar vor Einsetzen in die Prüfmaschine.



Bild 4.18: Probe Flachs – 2,5 – 1 unmittelbar nach Herausnehmen aus der Prüfmaschine.

Jute

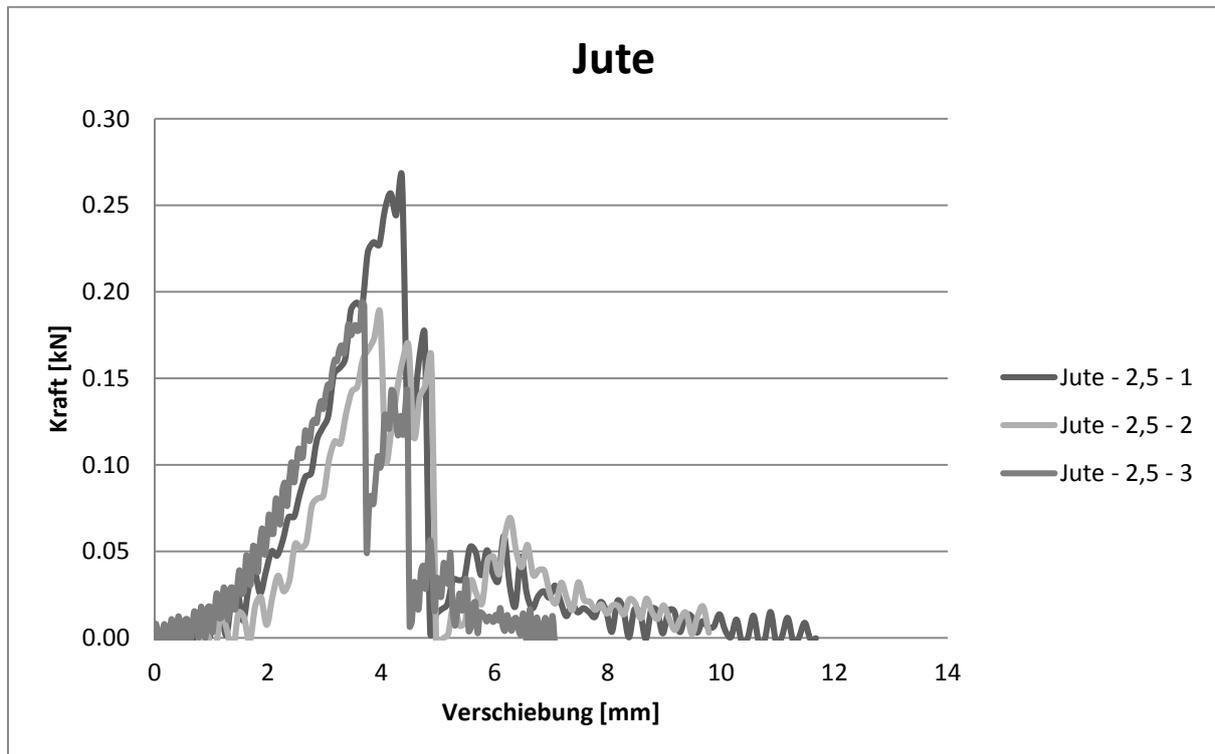


Bild 4.19: Kraft-Weg-Diagramm von Jute-Garn von 2,5 mm

Bei den Versuchen mit 2,5mm dicken Jutegarn wurden ähnliche Zugkräfte erreicht wie bei den 2,0mm-Flachsschnüren. Der große Unterschied lag vor allem in dem schlechteren Nachbruchverhalten. So gab es beinahe keinerlei Nachverfestigung infolge des Reißens weiterer Fasern. Demnach ist das Dehnverhalten der Jutefasern als nicht sonderlich gut einzustufen, was für den Einsatz als Verstärkungstextil nicht zu Gute kommt. In Tabelle 4.7. sind die gemessenen und aus den drei Versuchen gemittelten, mechanischen Eigenschaften des Jutegarns wiedergegeben. Lediglich die Energiedissipationsfähigkeit zeigt eine leichte Verbesserung gegenüber den 2,0mm-Flachsschnüren, dies ist auf die leichte Plateaubildung beim Bruch von Probe *Jute – 2,5 – 2* und *Jute – 2,5 – 3* zurückzuführen.

Durchmesser	2,5 mm
Querschnittsfläche	4,91 mm ²
E-Modul	1547,85 N/mm ²
max. Zugspannung	44,04 N/mm ²
Max. Zugkraft	216,20 N
Energiedissipation	0,4200 Nm

Tab. 4.7: Mechanische Eigenschaften des Jutegarns mit 2,5 mm

Bild 4.20 und Bild 4.21 zeigen gut, wie sich die Jutefasern aus dem Garn beim Bruch herausgelöst haben. Während bei Probe *Jute – 2,5 – 1* nur wenige Einzelfasern tief aus dem Garn gezogen wurde, erkennt man bei Probe *Jute – 2,5 – 2* deutlich, wie stark die beiden Bruchufer ineinander übergingen waren und wie es somit zur Plateaubildung im Kraft-Verschiebungsdiagramm führte.



Bild 4.20: Probe *Jute – 2,5 – 1* unmittelbar nach Herausnehmen aus der Prüfmaschine.



Bild 4.21: Probe *Jute – 2,5 – 2* unmittelbar nach Herausnehmen aus der Prüfmaschine.

Hanf

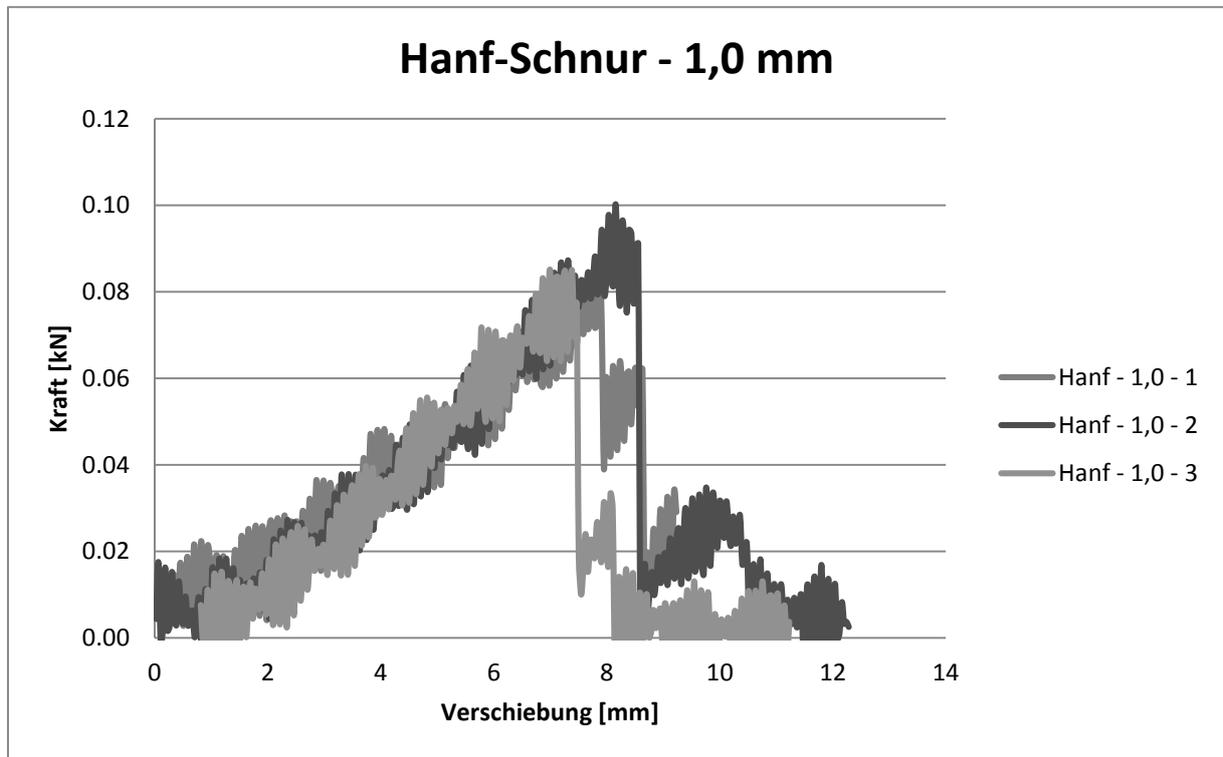


Bild 4.22: Kraft-Weg-Diagramm von Hanf-Schnüren 1,0 mm

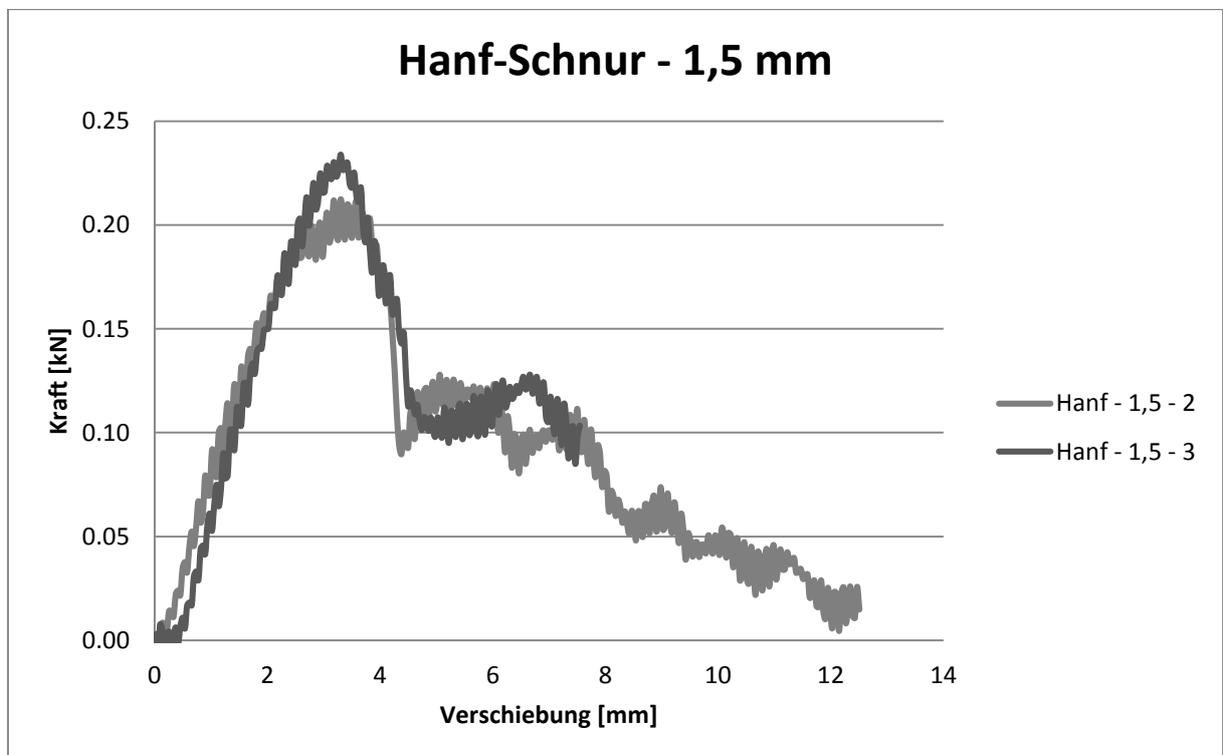


Bild 4.23: Kraft-Weg-Diagramm von Hanf-Schnüren 1,5 mm

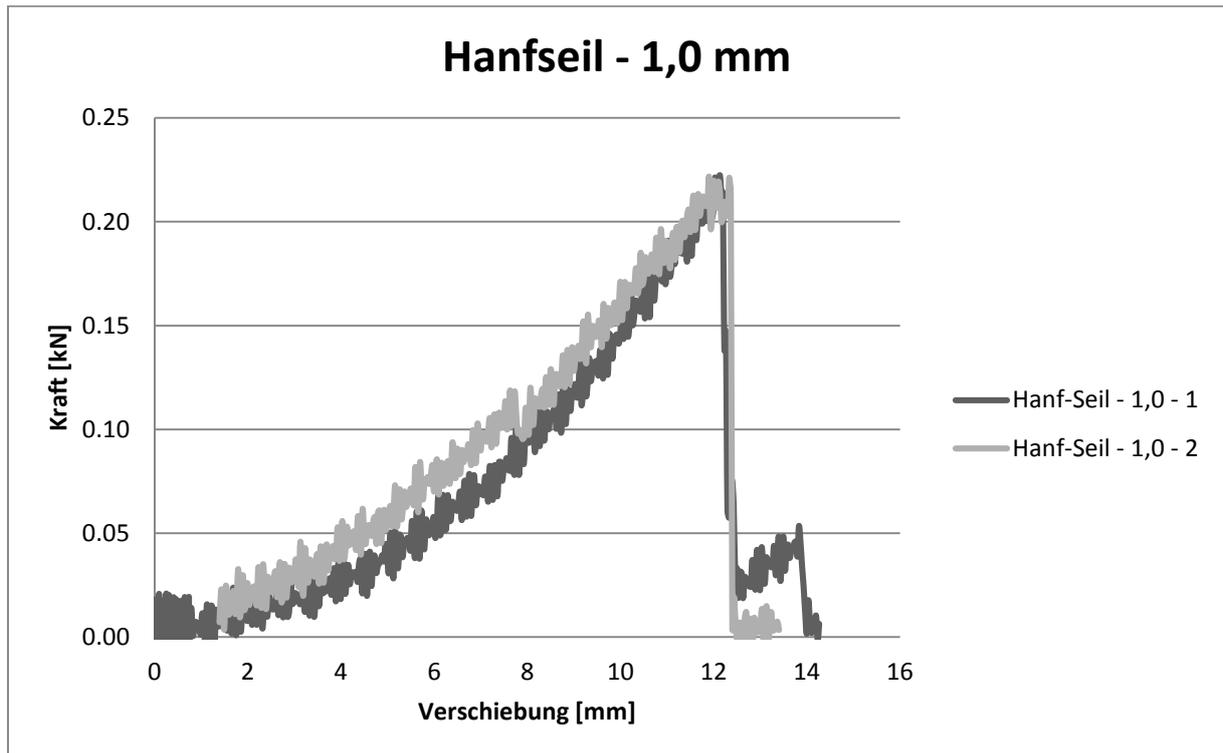


Bild 4.24: Kraft-Weg-Diagramm von Hanf-Seil 1,0 mm

Insgesamt wurden 3 verschiedene Arten von Hanfgezwrn getestet. Zum einen zwei verschiedene Hanfschnüre von 1,0 mm und 1,5 mm Dicke, sowie ein Hanfseil von 1,0 mm Dicke. Während dem Test der 1,5mm-Hanf Fasern wurden diese aus der Matrix herausgezogen, was beim Versuch Hanf - 1,5 - 1 zu nicht aussagefähigen Daten führte, daher wurden diese aus dem Diagramm entfernt und in den Berechnungen nicht berücksichtigt. Besonders interessant sind zum einen die Unterschiede bei einer geometrischen Veränderung von 1,0 mm auf 1,5 mm Dicke, ähnlich wie bei den Flachfasern.

Durchmesser	1 mm Hanfseil	1 mm Hanfschnur	Verhältnis
Querschnitts-fläche	0,785 mm	0,785 mm	100,00%
E-Modul	2510,16 N/mm ²	1536,34 N/mm ²	61,20%
max. Zugspannung	282,70 N/mm ²	115,37 N/mm ²	40,81%
Max. Zugkraft	222,03 N	90,61 N	40,81%
Energie-dissipation	1,052 Nm	0,335 Nm	31,87%
Durchmesser	1 mm Hanfseil	1,5 mm Hanfschnur	Verhältnis
Querschnitts-fläche	0,785 mm	1,767 mm	225,00%
E-Modul	2510,16 N/mm ²	3822,49 N/mm ²	152,28%
max. Zugspannung	282,70 N/mm ²	124,81 N/mm ²	44,15%
Max. Zugkraft	222,03 N	220,55 N	99,33%
Energie-dissipation	1,052 Nm	1,135 Nm	107,85%

Tab. 4.8: Mechanische Eigenschaften der verschiedenen Hanf-Gezwirne.

Allerdings muss auch der Unterschied in der Verarbeitung hervorgehoben werden, was sehr gut beim Vergleich von 1,5 mm-Schnur und 1,0 mm-Seil zu erkennen ist, Ziel dieser vergleichenden Tests ist es somit auch eine Aussage über die verschiedenen Verarbeitungsarten von Gezwirn zu geben und beurteilen zu können welche Arten sich hierbei zur weiteren Verwendung eignen. Tabelle 4.8 zeigt den direkten Vergleich der mechanischen Kennwerte und zeigt das Verhältnis zwischen den Werten des Seiles und der Schnüre.

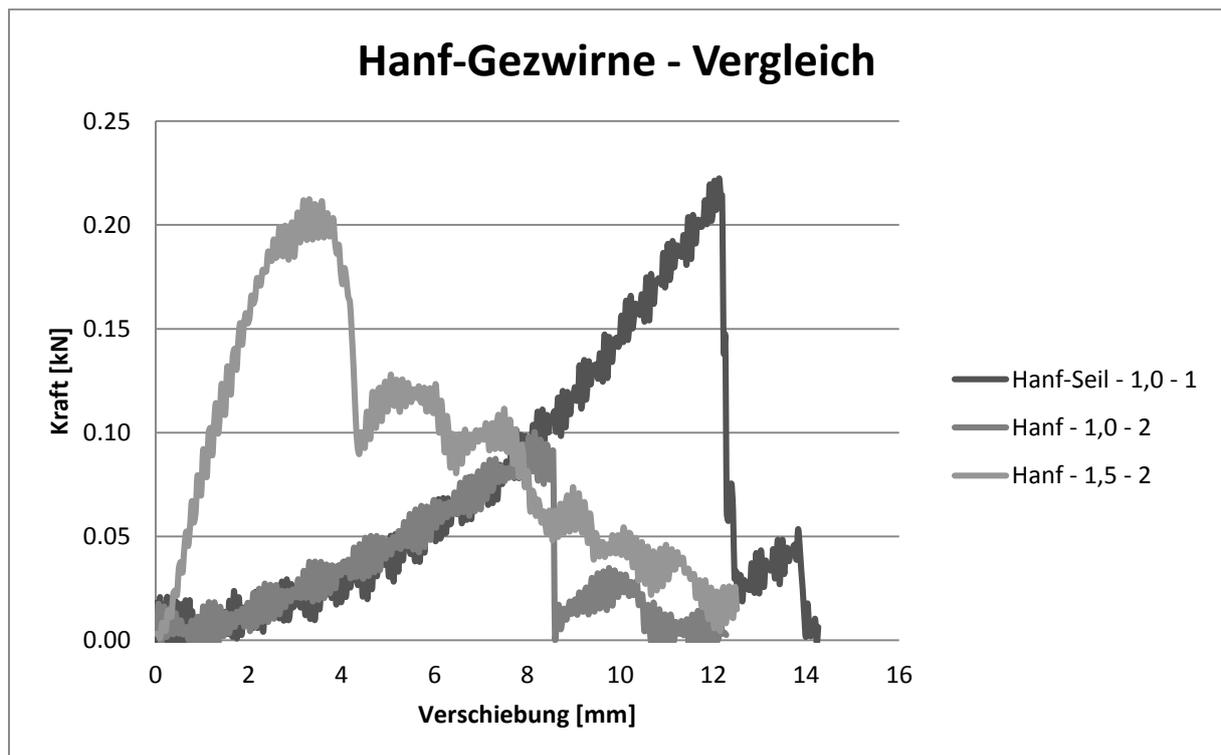


Bild 4.25: Kraft-Weg-Diagramm, Vergleich von Hanf-Schnüren mit 2,0mm und 2,5mm

Besonders fällt hierbei der starke Anstieg der mechanischen Eigenschaften bei gleichem Durchmesser zwischen Seil und Schnur auf. Dies ist vor allem auf die bessere Verarbeitung zurückzuführen. Während die Schnur als Nähgarn Verwendung findet und daher eher optischen Randbedingungen unterliegt, wurde das Seil speziell für die mechanische Beanspruchung hergestellt. So erreicht das 1 mm dicke Hanfseil einen ähnlichen Wert bei der Energiedissipation, wie die um über 200% größere 1,5 mm Hanfschnur. Darüber hinaus ist die Bruchlast nahezu identisch, was zu einer deutlichen Steigerung der Zugspannungen im Hanfseil führt. Aufgrund der Fertigung war es wohl Ziel, dass bei dem Hanfseil ein Versagen mit markanter Vorankündigung entsteht, daher ist der E-Modul vergleichsweise gering und eine hohe Grenzdehnung kann erreicht werden, allerdings ist nahezu keine Nachverfestigung festzustellen. Dem gegenüber kann man vor allem bei der 1,5 mm Hanfschnur direkt dem Kraft-Weg-Diagramm entnehmen, wann einzelne Fasern gerissen sind und die ansonsten sehr markante Nachverfestigung nachgelassen hat, während die Hanfschnur und auch das Hanfseil mit jeweils 1,0 mm beinahe spröde versagen.

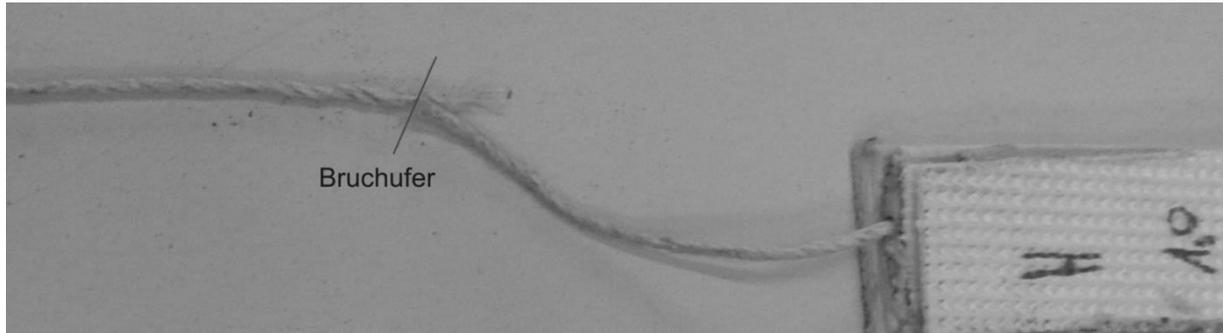


Bild 4.26: Bruchufer der Probe Hanf – 1,0 – 1



Bild 4.27: Bruchufer der Probe Hanf – 1,0 – 3

Dieser Spröbruch ist darauf zurückzuführen, dass es kaum lokale Bruchufer gab und der Bruch an einem einzigen globalen Bruchufer entstand, dies lässt auf eine sehr homogene Verarbeitung des Gezwirns schließen. Die Bilder 4.25 und 4.26 zeigen die Bruchufer der Proben *Hanf – 1,0 – 1* und *Hanf – 1,0 – 3*.

Nach diesen Beobachtungen wird vor allem das Hanfseil für eine weitere Verarbeitung als Verstärkungstextil empfohlen, da es nicht nur ein großes Arbeitsvermögen besitzt, sondern auch eine hohe Zugfestigkeit aufweist. Alle weiteren Versuche wurden mit dem Hanfseil durchgeführt. Als alternative eignet sich auch eine Hanfschnur mit einer Dicke von mindestens 1,5mm. Von Schnüren, die als sog. Nähgarn verkauft werden, wird abgeraten, da diese nicht für eine mechanische Beanspruchung ausgelegt sind.

Sisal

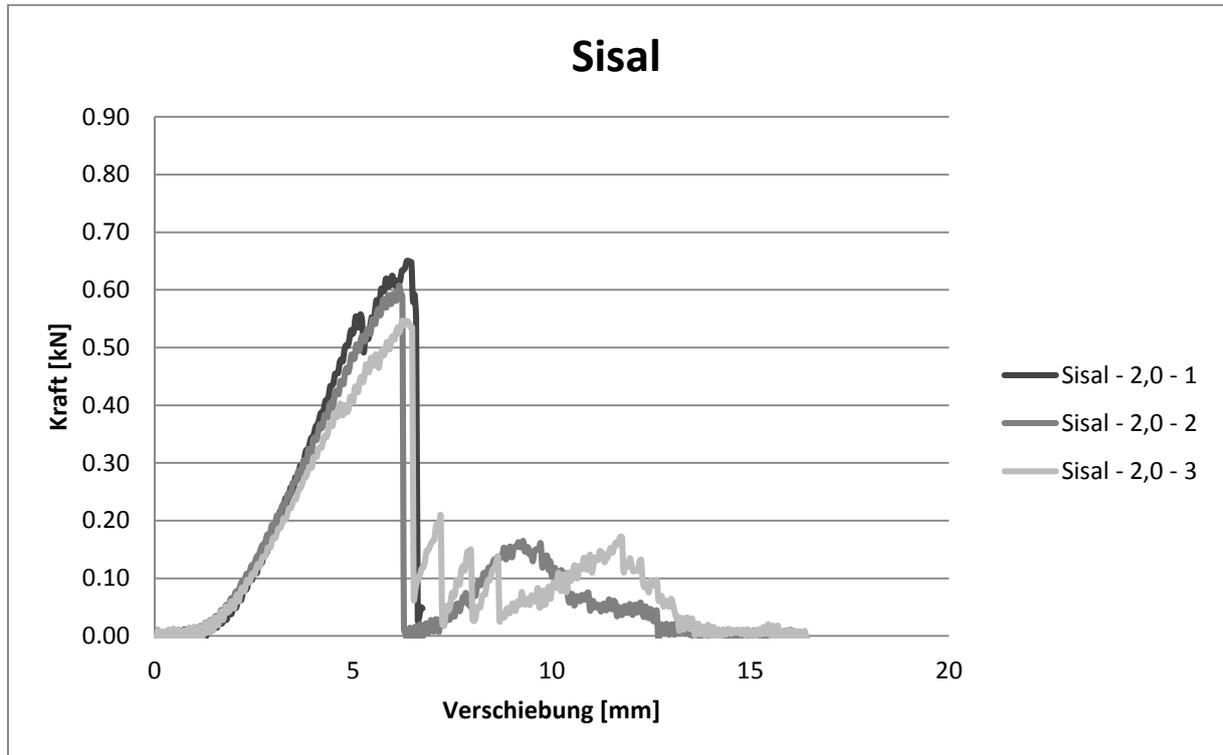


Bild 4.28: Kraft-Weg-Diagramm von Sisal-Schnüren 2,0 mm

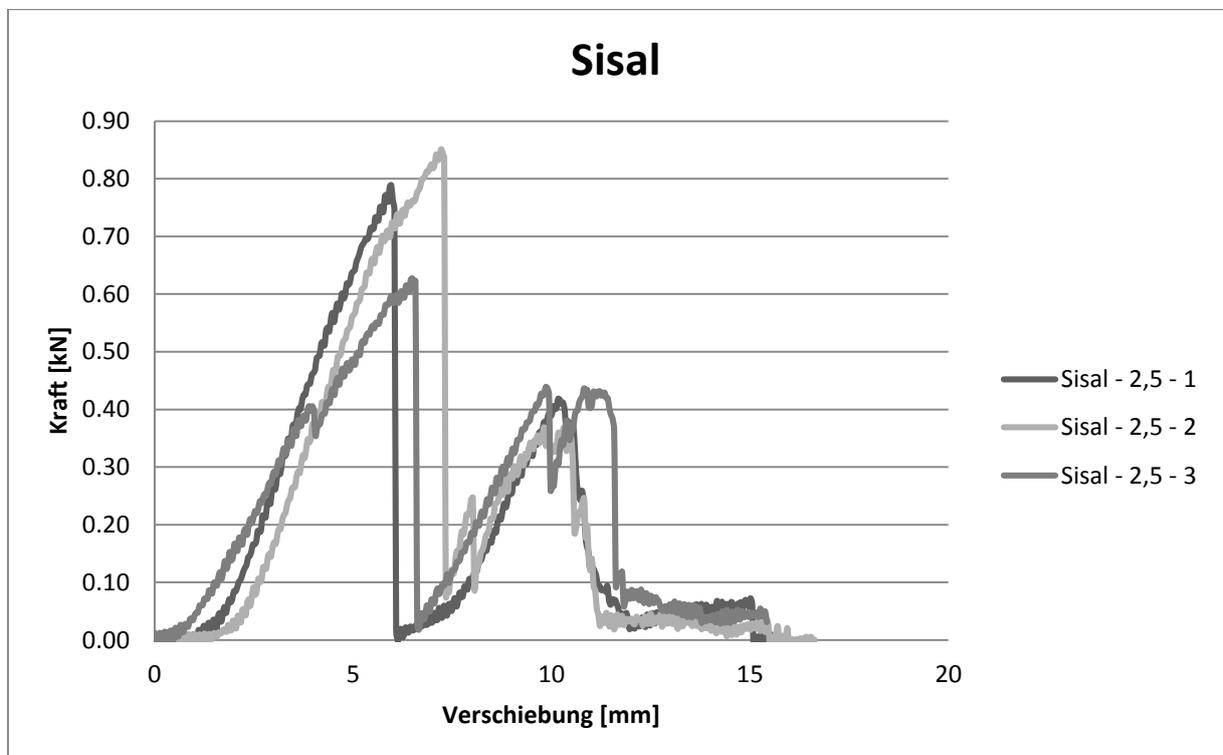


Bild 4.29: Kraft-Weg-Diagramm von Sisal-Schnüren 2,5 mm

Bei den Sisal-Gezwirnen wurden 2 Schnüre mit einer Dicke von jeweils 2,0 mm und 2,5 mm getestet. Signifikant ist, dass sich bei allen Proben ein sehr starkes Nachbruchverhalten feststellen lässt. Dies ist auf das starke 2-stufige Gezwirn zurückzuführen. Da das Verhältnis zwischen Primär- und Sekundärfasern beinahe 50% betrug, ließen sich vor allem bei den 2,5 mm Schnüren eine ausgeprägte zweite Belastungsspitze feststellen.

Die mechanischen Eigenschaften heben sich sehr stark von den zuvor getesteten Naturfaserstoffen ab. In nahezu allen Kategorien erreichen Sisalfasern höhere Werte. Ein genauer Vergleich zwischen den einzelnen Fasertypen wird in Abschnitt 4.3.3. gegeben.

Durchmesser	2	2,5	Steigerung
Querschnittsfläche	3,14 mm	4,91 mm	156,25%
E-Modul	4636,14 N/mm ²	3417,99 N/mm ²	73,72%
max. Zugspannung	191,55 N/mm ²	153,96 N/mm ²	80,37%
Max. Zugkraft	601,77 N	755,73 N	125,58%
Energiedissipation	1,883 Nm	3,199 Nm	169,87%

Tab. 4.9: Mechanische Eigenschaften der verschiedenen Sisal-Gezwirne.

Beim Vergleich der mechanischen Eigenschaften fällt vor allem der Abfall der Zugspannungen und des E-Moduls bei steigendem Durchmesser auf. Dies ist auf die Verarbeitungsdichte des Materials zurückzuführen. Darüber hinaus wies das dickere Sisal eine stärkere Inhomogenität zwischen den beiden Gezwirnen auf. So dass, die beiden Belastungsspitzen von Primär- und Sekundärfasern deutlich näher beieinander lagen, welches zu einem deutlich höheren Arbeitsvermögen führt.

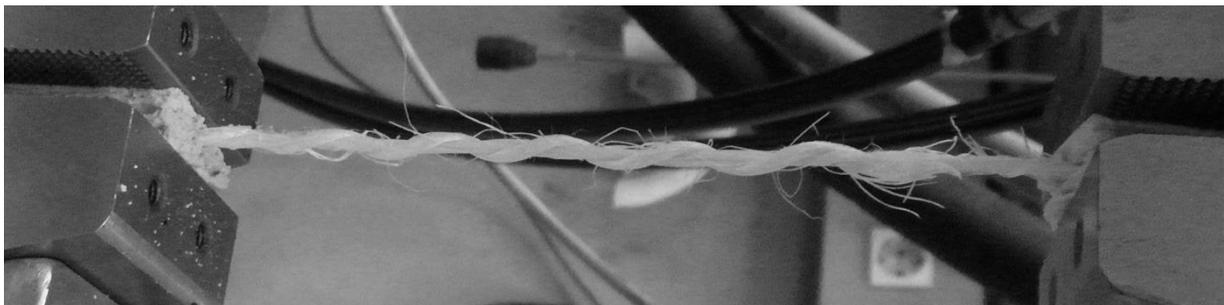
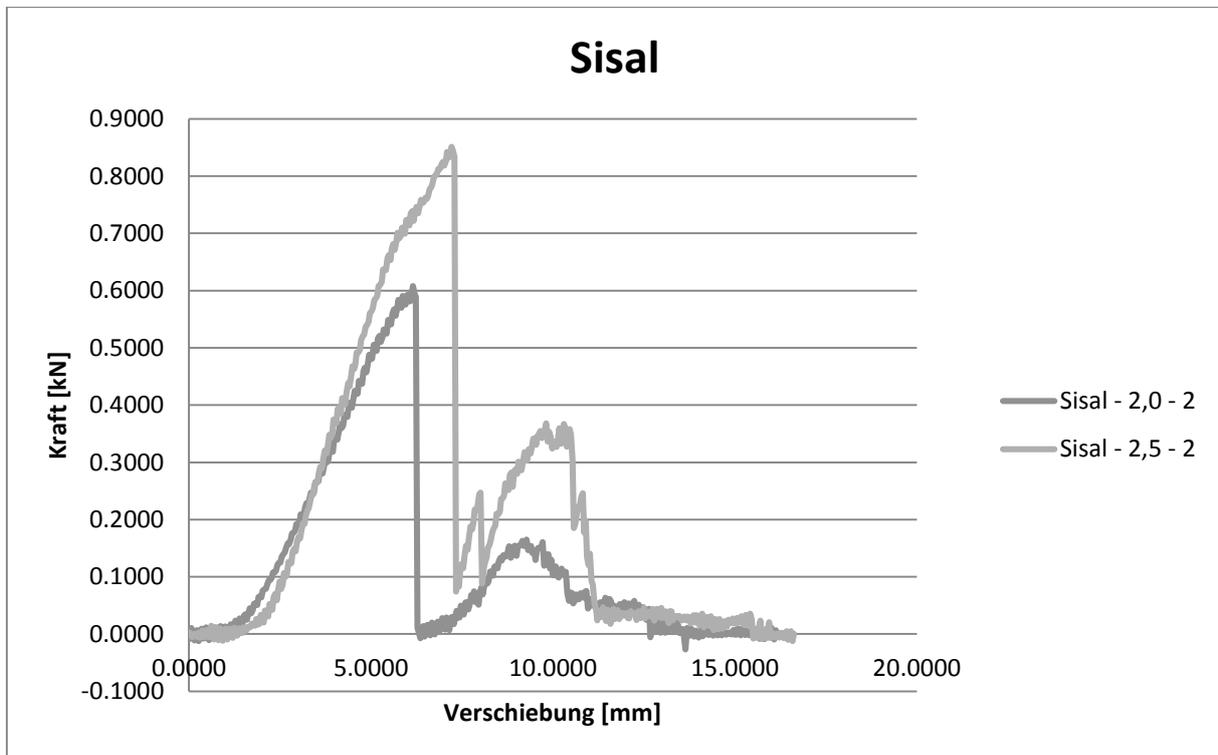


Bild 4.30: Probe Sisal – 2,0 – 3 in der Zugmaschine, kurz nach Reißen der Primärfasern.



Bild 4.31: Probe Sisal – 2,5 – 1 unmittelbar nach Herausnehmen aus der Prüfmaschine.

Somit eignen sich beide getesteten Sisal-Gezwirne zum Einsatz als Verstärkungstextil, aufgrund ihrer hohen Energiedissipation. Ob jedoch die maximale Zugkraft in der Realität erreicht werden kann, oder ob diese generell als Überdimensioniert zu betrachten ist, wird in den Versuchsreihen der Abschnitt 4.4 und 4.5. näher erläutert.



4.3.3 Ergebnisse & Empfehlung

Aus insgesamt 23 Einzelversuchen an 8 verschiedenen Fasertypen aus 4 verschiedenen Naturstoffen lassen sich nun eindeutige Unterschiede erkennen. Diese gehen sowohl auf die Verarbeitung, auf das Material und auch auf die Geometrie zurück. Um zu entscheiden ob sich eine Faserart zum Einsatz als Verstärkungstextil lohnt, sollen 4 verschiedene Randbedingungen betrachtet werden.

Maximale Dehnung: Ein hohes Dehnvermögen sorgt für eine ausreichende Duktilität.

Großes Arbeitsvermögen: Ein großes Arbeitsvermögen gewährleistet und sehr hohe Energiedissipation während der Erdbebenbelastung und steigert somit die Duktilität.

E-Modul & Zugfestigkeit: Es sollte eine Mindestzugfestigkeit, sowie E-Modul eingehalten werden um ein ausreichend hohes Arbeitsvermögen zu erreichen. Wird der E-Modul jedoch zu hoch, kann dies zu einem spröden Bruchverhalten führen. Ist die Zugfestigkeit zu hoch, wird diese wahrscheinlich nicht ausgenutzt und jegliches Nachbruchverhalten wird unwichtig.

Oberflächenrauigkeit: Die Faser sollte eine gewisse Rauigkeit aufweisen um einen ausreichenden Haftverbund mit der Matrix zu gewährleisten. Dies wird in Abschnitt 4.4 im Rahmen von 1-Stein-Zugversuchen untersucht und hier noch nicht berücksichtigt.

	Flachs		Hanf		Jute	Sisal		
Typ	Schnur	Schnur	Seil	Nähgarn	Schnur	Garn	Seil	Schnur
Durchmesser [mm]	2,00	2,50	1,00	1,00	1,50	2,50	2,00	2,50
Querschnittsfläche [mm ²]	3,14	4,91	0,79	0,79	1,77	4,91	3,14	4,91
E-Modul [N/mm ²]	2033,34	2507,59	2510,16	1536,34	3822,49	1547,85	4636,14	3417,99
max. Dehnung [%]	3	3	11	8	3	3	4	5
max. Zugspannung [N/mm ²]	65,07	72,07	282,70	115,37	124,81	44,04	191,55	153,96
max. Zugkraft [N]	204,43	353,79	222,03	90,61	220,55	216,20	601,77	755,73
Energiedissipation [Nm]	0,38	0,98	1,05	0,34	1,13	0,42	1,88	3,20

Tab. 4.10: Mechanische Eigenschaften aller in dieser Versuchsreihe getesteten Faserarten

Tabelle 4.10 gibt eine Gesamtübersicht über alle in der Versuchsreihe ermittelten mechanischen Eigenschaften. Aufgrund der schlechten Energiedissipation bei Flachs (2mm) und dem Hanf-Nähgarn werden diese von Beginn an für weitere Versuche ausgeschlossen. Lediglich Jute wird weiterhin verwendet um dieses Material nicht ganz auszuschließen und um in Folgeversuchen unter anderem die Oberflächenrauigkeit zu untersuchen. Bei den Sisal-Gezwirnen wird die etwas stärkere 2,5 mm Schnur für weitere Versuche gewählt, da sie das bei weitem höhere Arbeitsvermögen aufweist. Als Mindestzugkraft wird hierbei nun ein Wert von 200 N pro Gezwirn angesetzt, welches von den gewählten Fasern stets eingehalten wurde, lediglich das Nähgarn aus Hanf hat, wie bereits bei der Versuchsdurchführung beschrieben, keine Eignung für die weitere Verwendung erbracht.

Alle Fasern erreichten eine Bruchdehnung von mindestens 3%, besonders das Hanfseil konnte hierbei überzeugen, mit einer fast 4 mal höheren Bruchdehnung von über 11%. Vor allem bei Sisal und dem dickeren Flachs-Gezwirn wird es sich noch herausstellen, ob die hohe Zugfestigkeit notwendig ist.

Eine allgemeine Empfehlung aufgrund der hier gewonnenen mechanischen Daten lässt sich für nahezu alle Fasern aussprechen, solange ihre aus der Herstellung bedingte Primärnutzung eine vorwiegend mechanische Beanspruchung vorsieht, daher sind weitere Tests mit dem Nähgarn aus Hanf nicht vorgesehen, ebenfalls wird die 1,5 mm Hanfschnur nicht weiter getestet, da das 1,0 mm Hanfseil deutlich mehr Vorteile aufweist und, aufgrund den starken Unterschieden in der Verarbeitung, kein weiterer Vergleichstest notwendig ist.

Neben in dieser Versuchsreihe erhaltenen grundlegenden Erkenntnissen über die mechanischen Eigenschaften der Naturfasern, gilt es nun ihren Einsatz innerhalb einer Matrix am Mauerwerk zu testen. Vor allem das Verbundverhalten der Fasern innerhalb der Matrix liegt hier im Mittelpunkt um auch die Haftbedingungen bewerten zu können und somit auch eine Aussage über die Oberflächenbeschaffenheit der einzelnen Fasern geben zu können.

Im Anhang A ist noch eine erweiterte Vergleichsübersicht der einzelnen getesteten Faserarten für die verschiedenen mechanischen Eigenschaften zu finden.

4.4 Zugversuche an Einzelsteinproben

Im Rahmen dieser Versuchsreihe sollen die verschiedenen Naturfasern auf ihre mechanischen Eigenschaften und insbesondere ihr Arbeitsvermögen untersucht werden.

4.4.1 Versuchsvorbereitung

Als Grundlage dienen hier die Erkenntnisse aus 4.2 und 4.3. Nachdem in Kapitel 4.2 verschiedene Lehmischungen zur Anwendung als Oberflächenputz untersucht und bewertet wurden, soll nun die daraus entstandene Mischungsempfehlung auf ihre Eignung als Matrixmaterial für Textilien untersucht werden. Zum Vergleich wird hierbei auch ein Kalkzementputz der Firma Röfix© verwendet. Bei der Auswahl der Fasern wurden die Ergebnisse aus 4.3 berücksichtigt, dementsprechend werden das Nähgarn aus Hanf und auch die 1,5 mm-Hanfschnur nicht weiter berücksichtigt.

In dieser Versuchsreihe soll Riss Mode I untersucht werden. Dieser beschreibt ein Entstehen des Risses senkrecht zur Rissebene. Dieses Versagen kann in Stoß- und Lagerfugen sowie innerhalb des Mauersteins auftreten. Jeder Versuchskörper wurde in zwei Hälften geschnitten und ganzflächig und symmetrisch mit Laminat verstärkt. Die Fuge blieb dabei unvermörtelt. Um die Last einzuleiten wurden an den Versuchskörper Stahlplatten geklebt. Verwendet wurden Poroton© Hochlochziegel im Format 2DF und einer mittleren Druckfestigkeit von 15 N/mm² (Herstellerangabe). Die Last wird hierbei rein vom aufgetragenen Laminat aufgenommen.

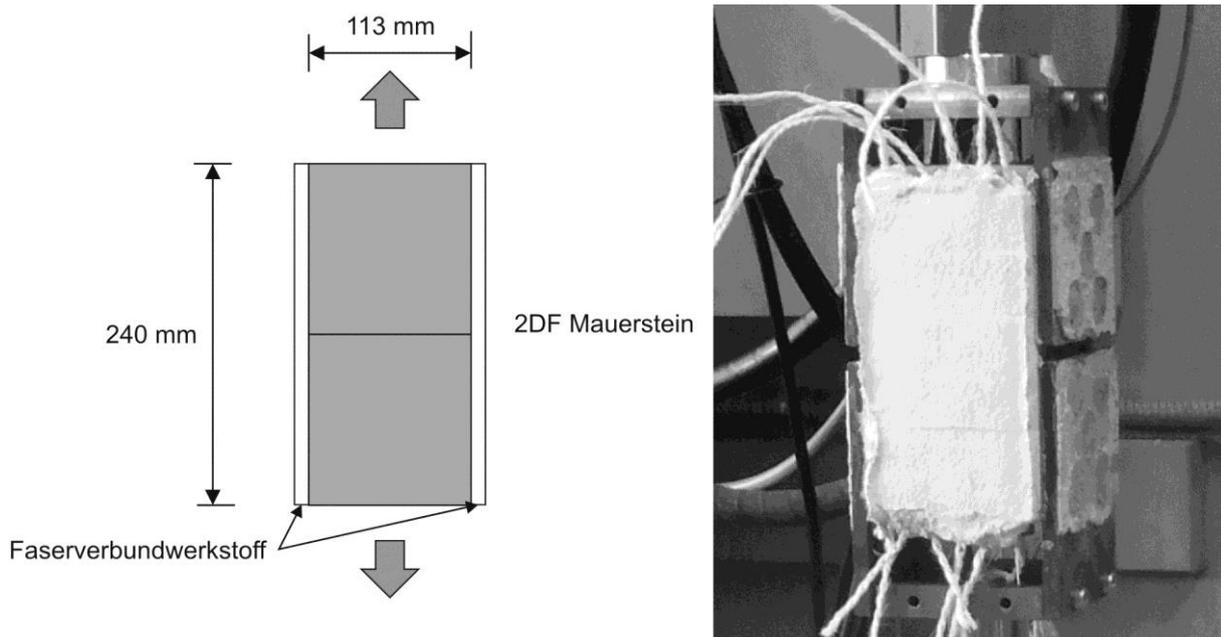


Bild 4.32: Versuchsaufbau für die Zugversuche für Riss Mode I.

Dieser Versuchsstand geht auf die Arbeiten von [22] zurück. Die Belastung wurde weggesteuert aufgebracht, mit einer Geschwindigkeit von 1,0 – 5,0 mm/min. Gemessen wurde die Zylinderkraft und der Zylinderweg.

Für die Lehmmatrix wurde die Rezeptur Nr. 11 gemäß Kapitel 4.2 verwendet. Die Lamine wurden beidseitig ca. 1,5 – 2 cm dick aufgetragen. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten wird von einer mittleren Mörteldicke von 1,75 cm ausgegangen. Dies ging auf die grobe Verarbeitung des Lehms zurück. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten wurde auch der Kalkzementputz mit einer solchen Dicke appliziert. In jedes Laminat wurden 6 Faserstränge eingelegt, dies führt pro Versuchskörper zu 12 Fasergezwrinen. Im Durchschnitt ergab sich aus der Geometrie ein Abstand zwischen den Strängen und auch zum Rand von ca. 1,6 cm.

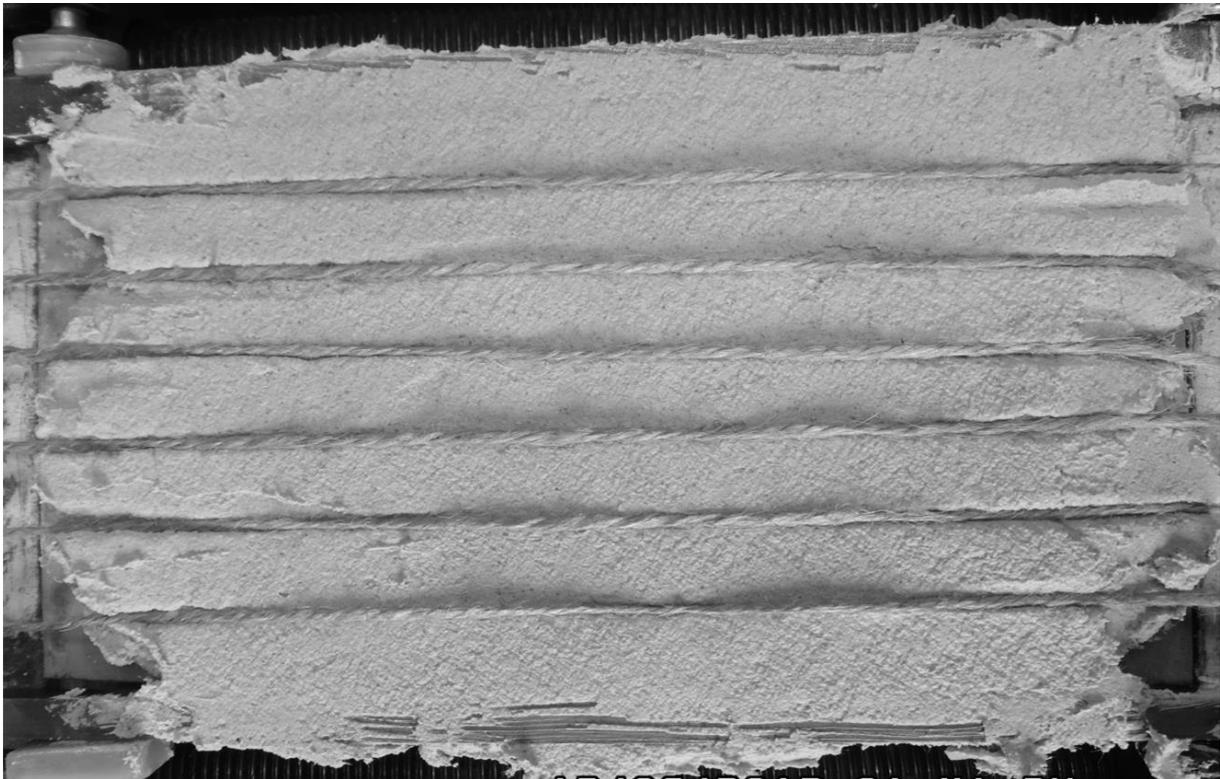


Bild 4.33: Verteilung der Fasern im Versuchskörper.

Um dem Lehm eine ausreichende Untergrundhaftung zu gewährleisten wurden an Stelle von Kalksandvollsteinen, Hochlochziegel verwendet. Dieser Einsatz stellte sich jedoch als Irrtum heraus. Ungefähr 24h nach Applikation löste sich die Lehmmatrix vom Untergrund ganzheitlich ab, sodass diese nachträglich geklebt werden musste. Hierzu wurde Sikadur®-31 verwendet, ein Kompositklebstoff auf Epoxidharzbasis. Das Ablösen der Lehmmatrix wird auf das Fehlen von rauen Fugen zurückgeführt, an welchen die Matrix im Normalfall haften würde. Dies hat zur Folge, dass in dieser Versuchsreihe ausschließlich das Verbundverhalten von Matrix und Faser getestet wird. Eine Aussage zwischen dem Verbund von Matrix und Untergrund ist nicht mehr

möglich. Bei den Versuchskörpern mit Kalk-Zementputz trat dies jedoch nicht auf. Das Alter der Versuchskörper betrug 28 Tage. Tabelle 4.11 zeigt die hierbei verwendete Versuchsmatrix.

Versuchs-Nr.	Fasertyp	Durchmesser	Putzart
1	Hanf - 1mm	1 mm	Zementputz
2	Jute - 2,5mm	2,5 mm	Zementputz
3	Sisal - 2,5mm Z	2,5 mm	Zementputz
4	Sisal - 2,5mm L	2,5 mm	Lehm-Putz
5	Sisal - 2mm - Z	2 mm	Zementputz
6	Sisal - 2mm - L	2 mm	Lehm-Putz
7	Flachs - 2mm - Z	2 mm	Zementputz
8	Flachs - 2mm - L	2 mm	Lehm-Putz
9	Flachs - 2,5mm - Z	2,5 mm	Zementputz
10	Flachs - 2,5mm - L	2,5 mm	Lehm-Putz

Tab. 4.11: Versuchsmatrix für die Zugversuche an den Einzelsteinproben.

Neben den Einzelstein-Proben wurden auch mehrere Versuchskörper aus Lehm, zur Bewertung der einaxialen Druckfestigkeit, hergestellt. Hierbei wurden einfache Prismen verwendet, welche eine Größe von 3x3x10 cm vorwiesen. Diese wurden sowohl hochkant als auch quer getestet. Tabelle 4.12 und Abbildung 4.34 geben die Ergebnisse dieser Versuche wider.

Probe-Nr.	Geometrie	Spannung
1	hochkant	-1,20 N/mm ²
2	hochkant	-1,22 N/mm ²
3	quer	-2,54 N/mm ²
4	quer	-2,49 N/mm ²
5	quer	-2,69 N/mm ²

Tab. 4.12: Prismenfestigkeit unter einaxialer Druckbelastung der verwendeten Lehmmischung

Der Kalk-Zementputz wurde bereits in einer vorangegangenen Versuchsreihe vom Institut für Massivbau und Baustofftechnologie ausreichend getestet. Diese Daten wurden dem Autor zur Verfügung gestellt. Zum Einsatz kamen der Röfix© V7 und Röfix© V8. Ersterer wurde für die Einzelsteinproben verwendet, während der V8 in Kapitel 4.5 bei den Drei-Stein-Proben eingesetzt wurde. Tabelle 4.13 gibt Aufschluss über die im Vorfeld ermittelten mechanischen Eigenschaften.

Mörteltyp	Druckfestigkeit	Biegezugfestigkeit	E-Modul
Röfix V7	14,26 N/mm ²	1,42 N/mm ²	6956,00 N/mm ²
Röfix V8	14,23 N/mm ²	1,31 N/mm ²	6474,00 N/mm ²

Tab. 4.13: Mittelwerte der mechanischen Eigenschaften des verwendeten Kalk-Zementputzes

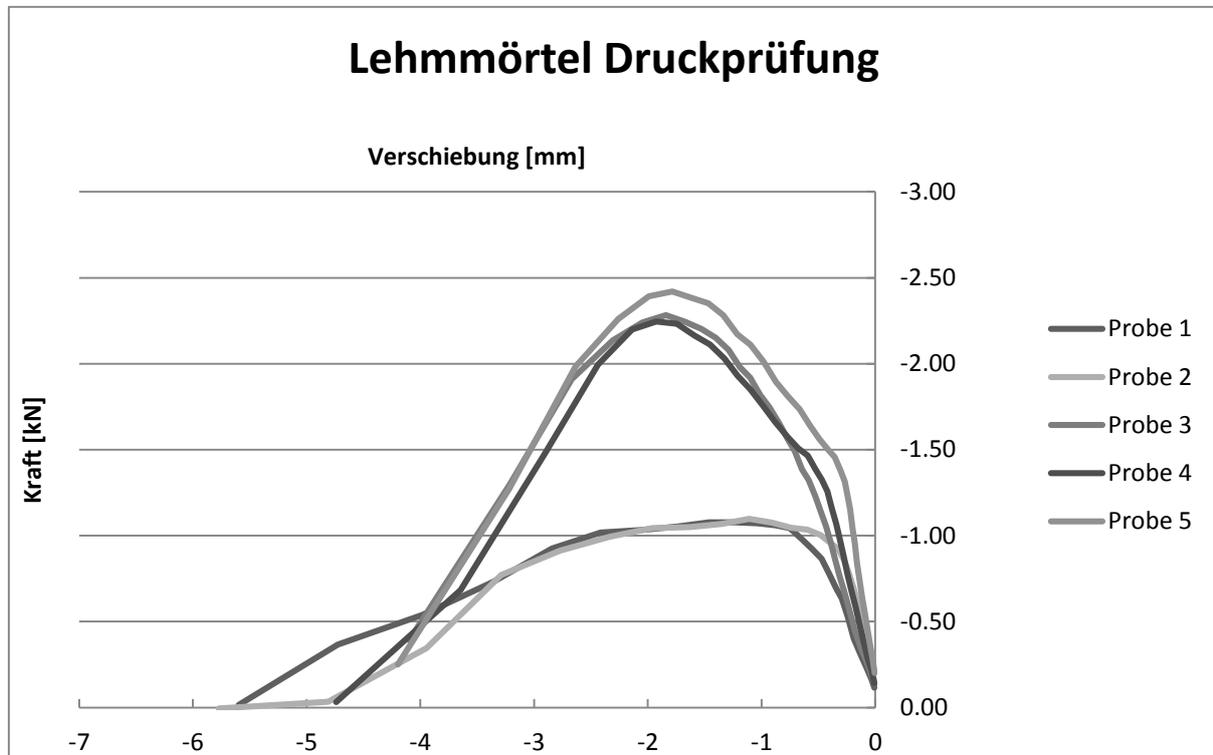


Bild 4.34: Last-Verschiebungs-Diagramm der Lehmmörtel-Proben

4.4.2 Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden in zwei Schritten geführt. Zu Beginn wurden die Versuchskörper sehr langsam mit 1 mm/min belastet bis es zum Bruch der Mörtelmatrix kam. Danach wurde die Geschwindigkeit langsam erhöht bis 5 mm/min.

Demgemäß lässt sich das Last-Verschiebungsdiagramm in drei Bereiche unterteilen. Im ersten Bereich, welcher als Vorbruchphase bezeichnet werden kann, wird die gesamte Matrix belastet. Da es sich um nicht-vorbelastete Proben handelte, befanden sich die Faserstränge noch nicht in einem festen Haftverbund mit der Matrix. Dieser Haftverbund entsteht erst durch weitere Dehnung der Matrix. Die Vorbruchphase ist abhängig von:

- der Faserart,
- der Verarbeitung des eingelegten Textils
- des Verbundverhaltens zwischen Matrix und Faser

Sobald ein Großteil der Faserstränge in den Haftverbund übergegangen ist, beginnt die Bruchphase. Hierbei wird bei einer sehr geringen Dehnung und unter großem Lastaufwand der Bruch der Matrix erreicht. Nachdem diese gebrochen ist, beginnen sich die Faserstränge in ihrer Gesamtlänge innerhalb des Probekörpers straff zu ziehen und werden langsam herausgezogen, hierbei fällt die Last deutlich ab. Dieser Vorgang wird als Pull-Out [14] bezeichnet und beschreibt die Nachbruchphase. Abbildung 4.35 zeigt beispielhaft ein Last-Verschiebungs-Diagramm in welchem die Bruchphasen dargestellt sind.

Somit lassen sich zwei charakteristische Größen ermitteln. Zum einen die Höchstlast F_{max} , welche bei Bruch der Matrix erreicht wird. Zum anderen die Kraft zum Herausziehen der Faserstränge aus der Matrix F_{pull} . Letztere ergibt sich aus dem mathematischen Mittel der gemessenen Kräfte nach Erreichen der Höchstlast. Erfahrungsgemäß schwankt diese Kraft um einen Mittelwert, da die Faserstränge nicht homogen in der Matrix verteilt sind und sich partiell straff ziehen müssen oder sich das Reibungsmilieu innerhalb der Matrix aufgrund von Abrieb oder Versteifung ändert.

Zur Berechnung der Spannungen lassen sich zwei Ansätze verfolgen. Zum einen die Annahme, dass ähnlich wie beim Stahlbeton Mikrorisse entstehen, welche dafür sorgen, dass unter Zugbelastung einzig die Bewehrung, in diesem Fall die Faserstränge, die Zugkraft aufnehmen. Andererseits lässt sich die Theorie verfolgen, dass sich die Zugkraft auf die gesamte Matrixfläche verteilt. Tatsächlich wird sich ein Spannungszustand einstellen, der zwischen diesen beiden Annahmen zu finden ist. Daher sollen hier beide berücksichtigt werden.

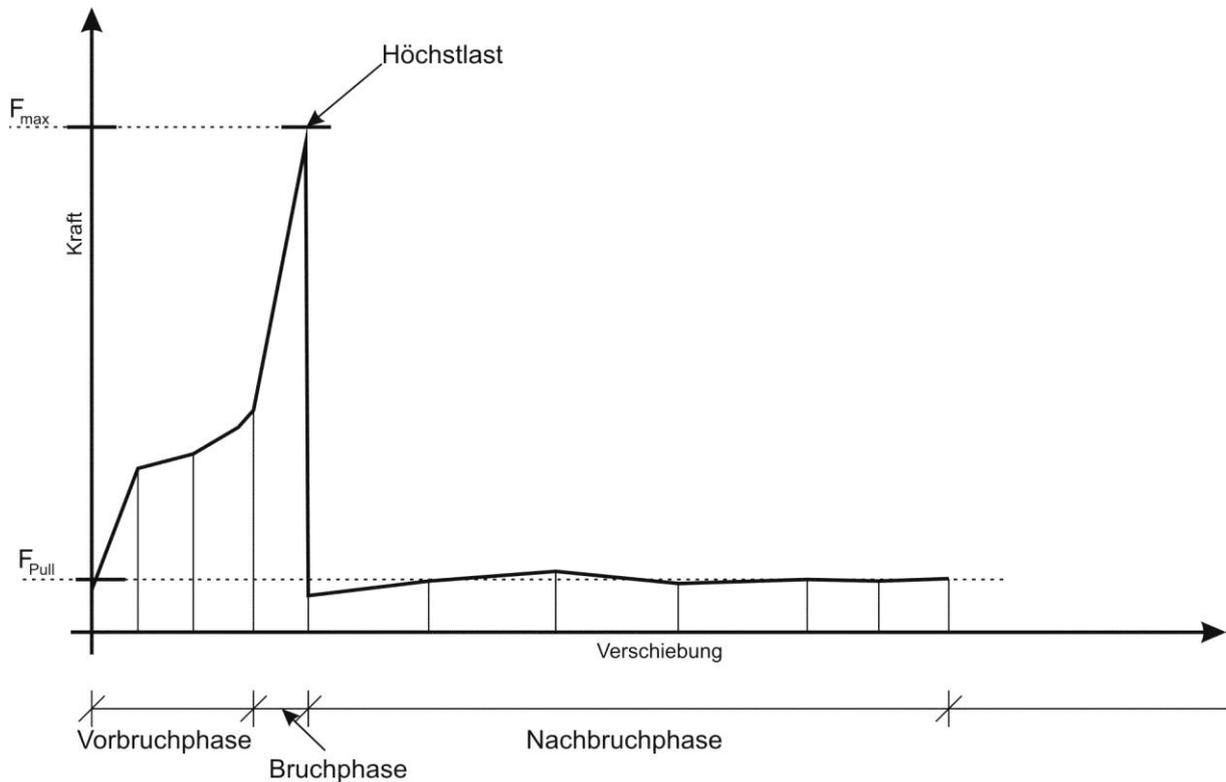


Bild 4.35: Diagrammbeispiel

Die Spannungen unter der Annahme, dass nur die Faserstränge die Zugkraft aufnehmen berechnen sich wie folgt:

$$\sigma_F = \frac{F_{max}}{n \cdot A_F} \quad (15)$$

Für die Annahme, dass sich die Spannung gänzlich auf die Matrixfläche verteilt ergibt sich diese wie folgt:

$$\sigma_M = \frac{F_{max}}{A_M} \quad (16)$$

Mit:

- F_{max} : Höchstlast
- n : Anzahl der Faserstränge innerhalb der belasteten Matrix
- A_F : Brutto-Querschnittsfläche eines Faserstrangs
- A_M : Querschnittsfläche der gesamten belasteten Matrix

Darüber hinaus lässt sich auch die Pull-Out-Spannung quantifizieren. Hierbei wird die mittlere Pull-Out-Kraft F_{Pull} mit der Gesamtfläche, der unter Reibung stehenden Fasern geteilt. Aufgrund der Inhomogenität der Fasern und der Reibungsfläche wird davon ausgegangen, dass nur 75% der Faserlänge in Reibverbund übergehen. Es ist jedoch zu beachten, dass es sich hierbei um einen idealisierten Versuch handelt. Die Gesamtlänge der Fasern innerhalb der Matrix ist daher auf die Länge des Versuchskörpers beschränkt und liegt damit bei 24 cm, bei großen Mauerwerksschei-

ben, sind daher deutlich größere Längen wahrscheinlicher. Bild 4.36 zeigt ein idealisiertes Teilstück mit Matrix und Faser.

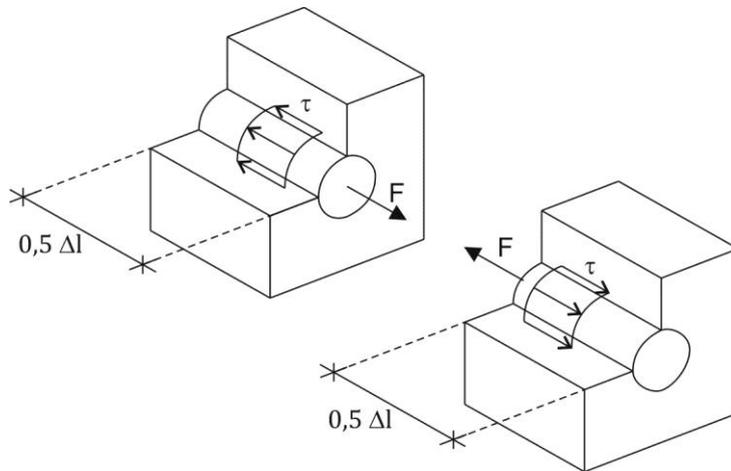


Bild 4.36: Idealisiertes Teilstück einer Matrix mit Faser unter Zugbelastung

Die Spannung, welche sich beim Pull-Out einstellt errechnet sich wie folgt:

$$\tau_{Pull, d} = \frac{F_{Pull}}{n * U * \Delta l * 0,75} \quad (17)$$

Da diese Spannung jedoch noch um den Faserdurchmesser variiert, wird der Index d angehängt. Die tatsächliche Spannung je mm-Durchmesser errechnet sich wie folgt:

$$\tau_{Pull} = \frac{\tau_{Pull, d}}{d} \quad (18)$$

Mit:

- F_{Pull} : mittlere Kraft zum Herausziehen der Fasern aus der Matrix
- U : Brutto-Umfang eines Faserstrangs
- n : Anzahl der Faserstränge innerhalb der belasteten Matrix
- Δl : Länge eines Faserstrangs innerhalb der Matrix
- d : Durchmesser eines Faserstrangs

Im Folgenden werden nun die einzelnen Versuche erläutert. Dabei wird grundlegend in Versuche mit Lehm-Putz und mit Kalk-Zementputz unterschieden und weiterhin nach Faserart aufgeteilt.

Lehm-Putz als Matrix

Insgesamt sollten 4 Proben mit Lehm als Matrix geprüft werden. Leider wurde eine Probe mit 2,0 mm Sisalgewebe beim Einbau so stark geschädigt, dass sie nicht weiter geprüft werden konnte. Außerdem waren die Proben mit 2,5 mm Sisalgewebe und 2,0 mm Flachsgewebe bereits aufgrund von mechanischer Einwirkung beim Transport auf einer Seite vorgerissen. So verblieb nur noch eine ungestörte Probe. Allerdings unterschieden sich die Ergebnisse nur unwesentlich zwischen vorgerissenen Versuchskörpern und ungestörtem Versuchskörper.

Der größte Unterschied zum oben beschriebenen Kraft-Verschiebungs-Verlaufs zeigt sich im Pull-Out-Verhalten innerhalb einer Lehmmatrix. Anstatt, dass das Gefüge nur lokal Reibung ausgesetzt wird, zerbröckelt der Lehm-Putz großflächig, dies führt sehr schnell zur Delamination der gesamten Matrix.

Abbildung 4.37 zeigt die Last-Verschiebungs-Kurven der drei durchgeführten Versuche mit einer Lehmmatrix.

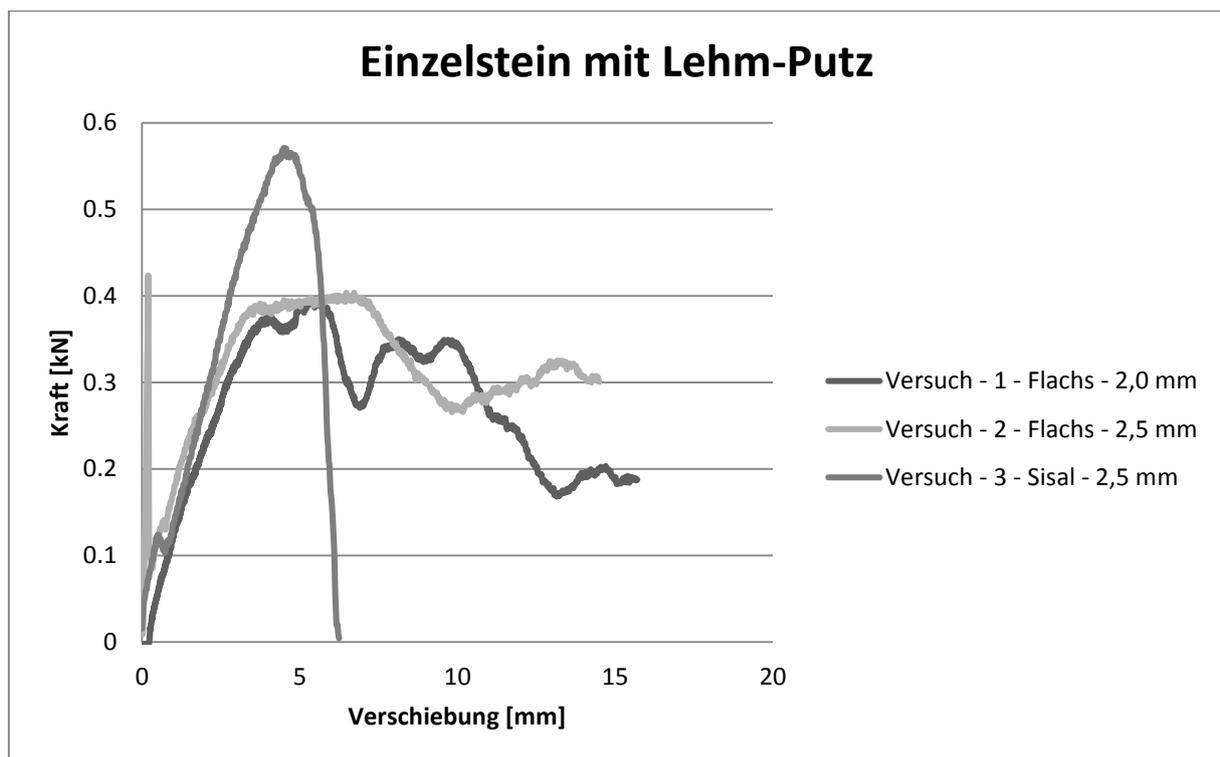


Bild 4.37: Last-Verschiebungs-Diagramm für Einzelstein-Versuche mit Lehm-Putz

Bei Versuch 2 – Flachs – 2,5 mm, der ungestörten Probe, erkennt man bereits nach einer kleinsten Dehnung das Erreichen der Höchstlast. Das Pull-Out-Verhalten erreicht beinahe eine ähnlich große Last, zerstört dabei jedoch das gesamte Matrixgefüge. Bei den auf einer Seite vorgerissenen Versuchskörpern lassen sich ebenfalls kleine Lastspitzen erkennen, welche das Reißen der Matrix anzeigen. Besonders

auffällig ist die große Laststeigerung der mit Sisal verstärkten Matrix. Dies ist auf die ganzflächige Delamination der Matrix zurückzuführen daher sank danach die Last auf den Nullpunkt, da sich die Matrix komplett abgelöst hatte, während beim Flachs die Matrix nur partiell abgelöst wurde und abschnittsweise abbröckelte.

Aufgrund dieses Verhaltens ließ sich keine Pull-Out-Kraft berechnen. Als einziges Kriterium soll hier die Spannung bei Höchstlast betrachtet werden. Für die beiden vorgerissenen Proben wird die Höchstlast während der Delamination herangezogen, während beim ungestörten Versuchskörper 2 die Bruchlast verwendet werden konnte.

Tabelle 4.14 gibt eine Übersicht über die ermittelten mechanischen Eigenschaften der mit einer Lehmatrix versehenen Versuchskörper.

Versuch-Nr.	Fasertyp	Durchmesser	Max. Zugkraft	Spannung in Fasern	Spannung in Matrix
1	Flachs	2,0 mm	0,40 kN	10,50 N/mm ²	0,10 N/mm ²
2	Flachs	2,5 mm	0,41 kN	7,03 N/mm ²	0,10 N/mm ²
3	Sisal	2,5 mm	0,57 kN	9,69 N/mm ²	0,14 N/mm ²

Tab. 4.14: Mechanische Eigenschaften der Versuchskörper mit einer Lehmatrix

Hier soll bereits angemerkt werden, dass Lehm als Matrix für Verstärkungstextilien nicht geeignet ist. Aufgrund seiner Schwäche gegenüber mechanischen Einwirkungen ist Lehm nicht in der Lage einen ausreichenden Reibverbund zu gewährleisten. Vor allem im nun folgenden Vergleich zu den Versuchskörpern mit Zementmatrix sind die Unterschiede in den Festigkeiten sehr groß.

Kalk-Zement-Putz als Matrix

Bei den Versuchskörpern mit einer Matrix aus Kalk-Zement-Putz stellte sich in nahezu allen Fällen ein idealer Last-Verschiebungs-Verlauf ein. Getestet wurden die vier verschiedenen Fasertypen, wovon bei Sisal und Flachs jeweils auch verschiedene Durchmesser untersucht wurden.

Alle Versuchskörper versagten durch Pull-Out nachdem zuvor eine Lastspitze beim Bruch der Matrix erreicht wurde. Damit lassen sich alle drei Bruchphasen wiederfinden. Bei 5 von 6 Versuchskörpern bildete sich ein ideales Bruchufer, welches einen nahezu geraden Schnitt durch die Mörtelmatrix bildete. Lediglich bei dem Versuchskörper mit Hanffasern bildete sich ein inhomogenes Rissbild, dies ist wahrscheinlich auf eine partielle Vorschädigung des Ziegelsteins zurückzuführen. Dies soll hier jedoch nicht weiter berücksichtigt werden, allerdings wird empfohlen bei zukünftigen Versuchen Kalksandvollsteine zu verwenden, da die Hochlochziegelsteine bereits bei der Verarbeitung und Anbringen der Metallplatten dazu neigten zu zerbrechen.

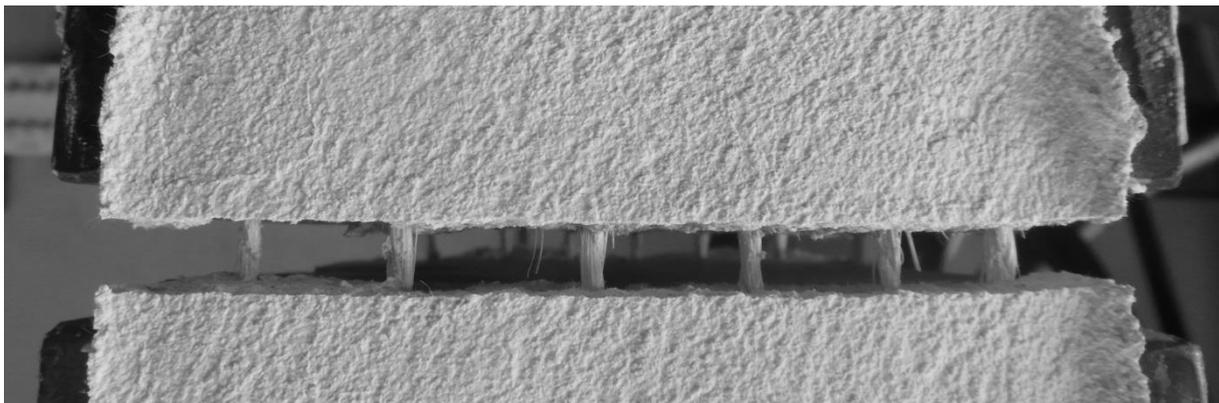


Bild 4.38: Bruchufer eines Versuchskörpers während der Belastung

Bild 4.38 zeigt beispielhaft das Bruchufer des Versuchskörpers Sisal – 2,0 mm mit Kalk-Zement-Putz. Gut zu erkennen ist der gerade Schnitt. Zum Zeitpunkt der Aufnahme befand sich der Versuchskörper bereits in der Nachbruchphase, während die Faserstränge aus der Matrix gezogen wurden.

Deutliche Unterschiede fanden sich bei den mechanischen Eigenschaften der verschiedenen Versuchskörper. Vor allem die deutlich höhere Bruchlast, je nach Faserart bis zu Faktor 18, gegenüber den Versuchskörpern mit Lehmmatrix, zeigt wie leistungsfähig die Verbindung von Naturfasern und eines modernen Kalk-Zement-Putzes sein kann. Die Bild 4.39 – 4.41 zeigen die Kraft-Verschiebungs-Diagramme der getesteten Versuchskörper.

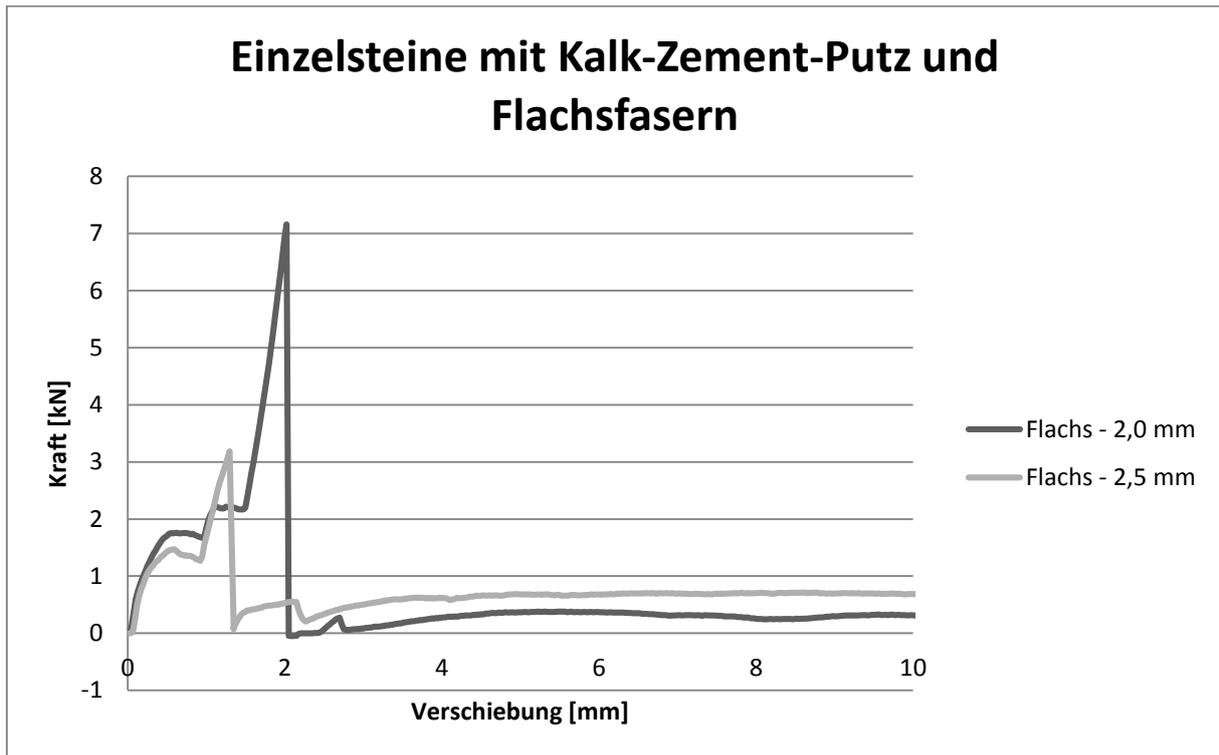


Bild 4.39: Last-Verschiebungs-Diagramm von Flachsfasern in Kalk-Zementmatrix

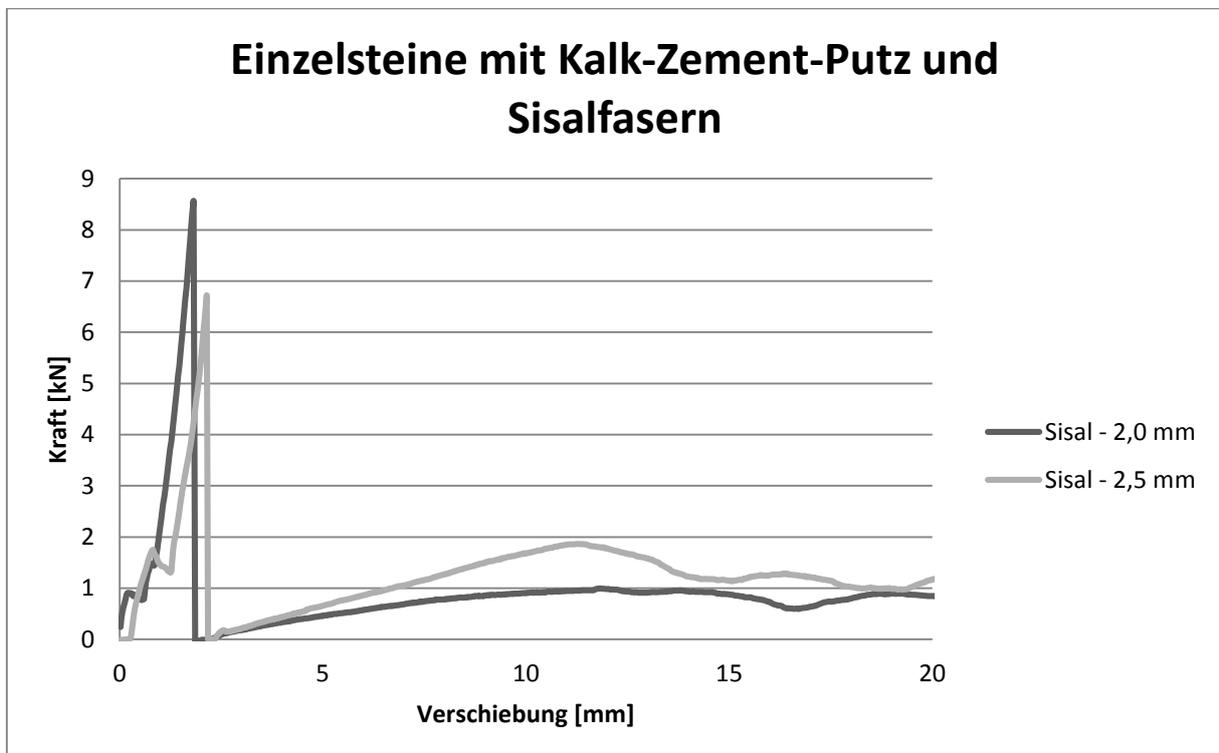


Bild 4.40: Last-Verschiebungs-Diagramm von Sisalfasern in Kalk-Zementmatrix

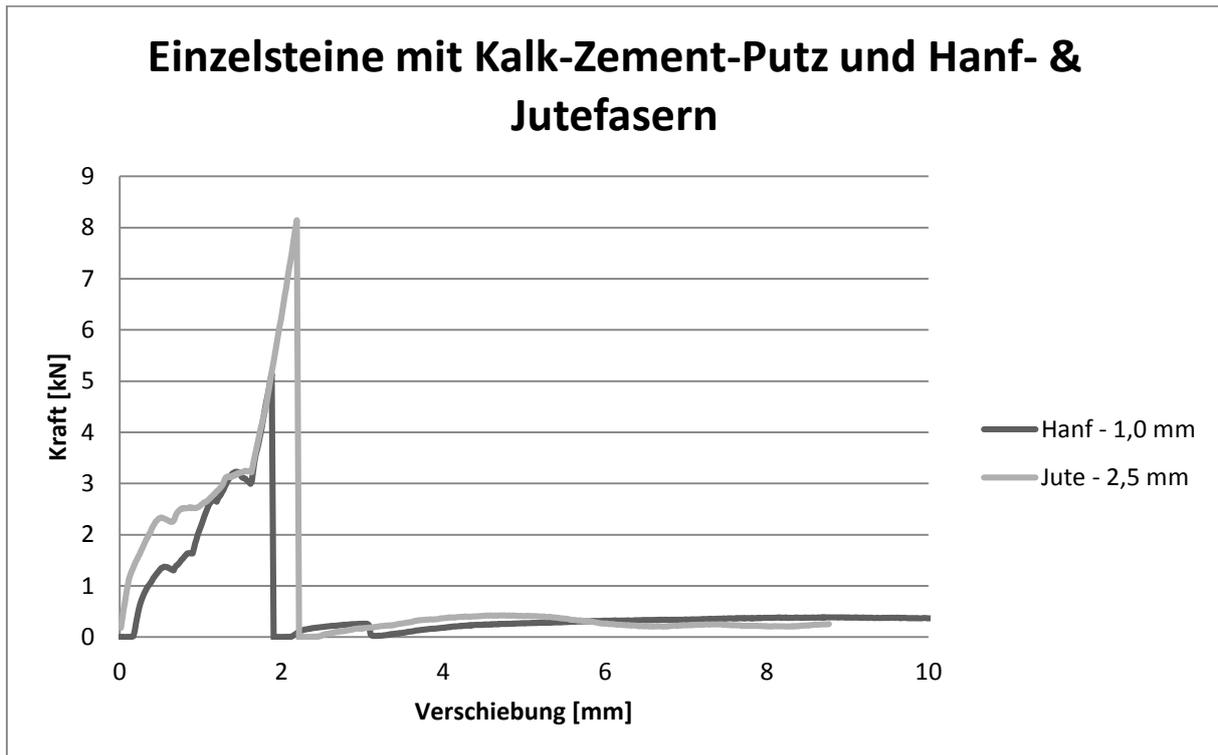


Bild 4.41: Last-Verschiebungs-Diagramm von Hanf- & Jutefasern in Kalk-Zementmatrix

Sehr gut zu erkennen ist bei jedem Versuchskörper die Vor- und Nachbruchphase. Allerdings fällt bei Flachs – 2,5 mm auf, dass sich wider Erwarten eine geringere Höchstlast einstellt im Vergleich zu dem dünneren Flachs – 2,0 mm. Dies dürfte wahrscheinlich auf eine unerkannte Vorschädigung zurückzuführen sein, ähnlich wie bei den Vorschädigungen der Versuchskörper mit Lehmmatrix. Daher wird dieser Versuch für die Beurteilung der Höchstlast nicht berücksichtigt.

Markant für alle Versuchskörper war das gutmütige Pull-Out-Verhalten. So wurden alle Faserstränge sauber durch die Matrix gezogen. Wie bereits in Kapitel 4.4.1 beschrieben ergaben sich stets leichte Schwankungen aufgrund von Veränderungen im Reibungsmilieu.

Die allgemeinen mechanischen Eigenschaften in Bezug auf die Höchstlast ist in Tabelle 4.15 wiedergegeben. Die mechanischen Eigenschaften aus dem Pull-Out-Verhalten stehen in Tabelle 4.16. Beachtenswert sind die genauen numerischen Zusammenhänge. So ergibt sich aus den Versuchen mit den Sisalfasern ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Reibungskraft und dem Durchmesser der Einzelstränge. Dieser Zusammenhang lässt sich bei Flachs jedoch nicht beobachten, was allerdings auf die oben genannte Vorschädigung zurückzuführen sein dürfte.

4 Experimentelle Untersuchung

Versuch-Nr.	Fasertyp	Durchmesser	Max. Zugkraft	Spannung in Fasern	Spannung in Matrix
1	Hanf	1,0 mm	5,15 kN	546,13 N/mm ²	1,30 N/mm ²
2	Jute	2,5 mm	8,14 kN	138,23 N/mm ²	2,06 N/mm ²
3	Sisal	2,5 mm	6,72 kN	114,14 N/mm ²	1,70 N/mm ²
4	Sisal	2 mm	8,57 kN	227,35 N/mm ²	2,17 N/mm ²
5	Flachs	2 mm	7,16 kN	189,99 N/mm ²	1,81 N/mm ²
6	Flachs	2,5 mm	3,19 kN	54,07 N/mm ²	0,81 N/mm ²

Tab. 4.15: Mechanische Eigenschaften in Bezug auf die Bruchlast der Versuchskörper mit einer Zementmatrix

Versuch-Nr.	Fasertyp	Durchmesser	Umfang	Reibungsspannung	Reibungsspannung je mm-Ø
1	Hanf	1,0 mm	37,70 mm	4,26 N/mm ²	4,26 N/mm ²
2	Jute	2,5 mm	94,25 mm	1,55 N/mm ²	0,62 N/mm ²
3	Sisal	2,5 mm	94,25 mm	6,47 N/mm ²	2,59 N/mm ²
4	Sisal	2 mm	75,40 mm	5,29 N/mm ²	2,64 N/mm ²
5	Flachs	2 mm	75,40 mm	2,04 N/mm ²	1,02 N/mm ²
6	Flachs	2,5 mm	94,25 mm	3,55 N/mm ²	1,42 N/mm ²

Tab. 4.16: Mechanische Eigenschaften in Bezug auf die Reibungskraft der Versuchskörper mit einer Zementmatrix

Hervorzuheben seien die hervorragenden Eigenschaften von Hanffasern, welche trotz eines Brutto-Durchmessers von nur 1,0 mm nicht nur die höchste Spannung unter Annahme einer vollen Belastung des Textils erreichen, sondern auch die zweithöchste Reibungsspannung je mm-Durchmesser. Interessant ist vor allem der Versuchskörper, welcher mit Jute verstärkt wurde. Dieser Versuchskörper zeigte ein verhältnismäßig sprödes Materialverhalten, denn während die Bruchlast über 8 kN lag, verzeichnete die Reibungsspannung von weniger als 0,2 N/mm² je cm Faserstrang innerhalb der Matrix.

Abschließend sollen nun in Kapitel 4.4.3 die Ergebnisse dieser Versuchsreihe zusammengefasst werden um eine vorläufige Empfehlung für die die Matrixmaterialien zu geben.

4.4.3 Ergebnisse und Empfehlung

Nach der Auswertung von insgesamt 10 Einzelversuchen zeichnet sich bereits ein klares Bild von den Verwendungsmöglichkeiten der geprüften Materialien ab. So lässt sich die Anwendung von Lehm als Matrixmaterial für natürliche Verstärkungstextilien ausschließen. Trotz seiner ansonsten guten bauphysikalischen und mechanischen Eigenschaften, fehlt Lehm die nötige Widerstandskraft gegenüber mechanischer Beanspruchung. So kann Lehm nur einen begrenzten Haft- und Reibverbund mit den Fasersträngen eingehen und wird dabei erheblich geschädigt. Was zu ungenügenden Versuchsergebnissen führte. Darüber hinaus kann diese Schädigung infolge der Bewegung der Faserstränge im Inneren der Matrix zur Delamination führen und somit zu einem ganzheitlichen Versagen des Versuchskörpers. Gemäß dieser Erkenntnis wird für Lehm keine Empfehlung zur Anwendung als Matrix für natürliche Verstärkungstextile ausgesprochen. Allerdings sollte angemerkt werden, dass für dünne, synthetische Verstärkungstextile in Verbindung mit einer verbesserten Rezeptur für die Lehm-Matrix durchaus Potential besteht und hier weitere Versuchsreihen empfohlen werden.

Für Verstärkungen auf Basis eines Kalk-Zement-Putzes konnten innerhalb dieser Versuchsreihe durchaus gute bis sehr gute Ergebnisse erzielt werden. So fällt vor allem das 1 mm-Hanfseil sehr positiv auf, da dieses die beste Materialausnutzung der geprüften Naturfasern aufweist und bei der Betrachtung der theoretischen Spannung in den Fasern bei Bruch der Matrix bis zu einem Faktor 5 gegenüber den anderen Materialien aufweist (der vorgeschädigte Versuchskörper mit 2,5 mm Flachfasern wird hierbei nicht betrachtet). Bild 4.42 und Bild 4.43 geben einen allgemeinen Vergleich zwischen den verschiedenen Materialien mit Kalk-Zement-Putz in Bezug auf ihre mechanischen Eigenschaften unter Zugbelastung sowie bei Reibung.

Besonders angemerkt soll hier vor allem Jute werden. Denn Jute erreichte beim Bruch der Matrix eine maximale Zugkraft von 8,14 kN, was man als sehr gutes Ergebnis zu betrachten ist. Allerdings zeigte Jute wiederum während der Nachbruchphase ein verhältnismäßig schlechtes Reibverhalten und dabei die schlechteste Materialausnutzung in Bezug auf die Reibungsspannung. Daher wird die Annahme getroffen, dass Jute sich eher als Material zur Erhöhung des Tragwiderstand eignet und zur Erhöhung der allgemeinen Duktilität. Inwiefern diese Annahme auch weiterhin gerechtfertigt ist, wird in Kapitel 4.5 bei den Schubversuchen weiter untersucht.

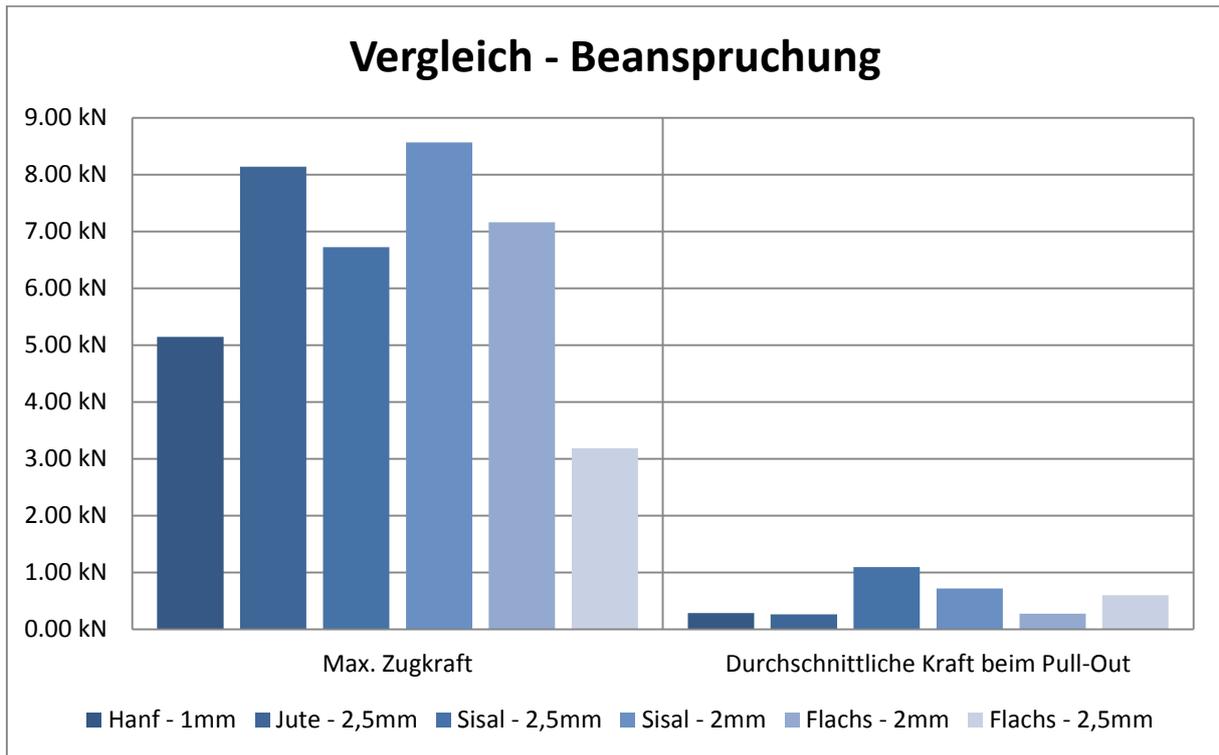


Bild 4.42: Vergleich der maximalen Zugkraft und der durchschnittlichen Reibungskraft während der Beanspruchung

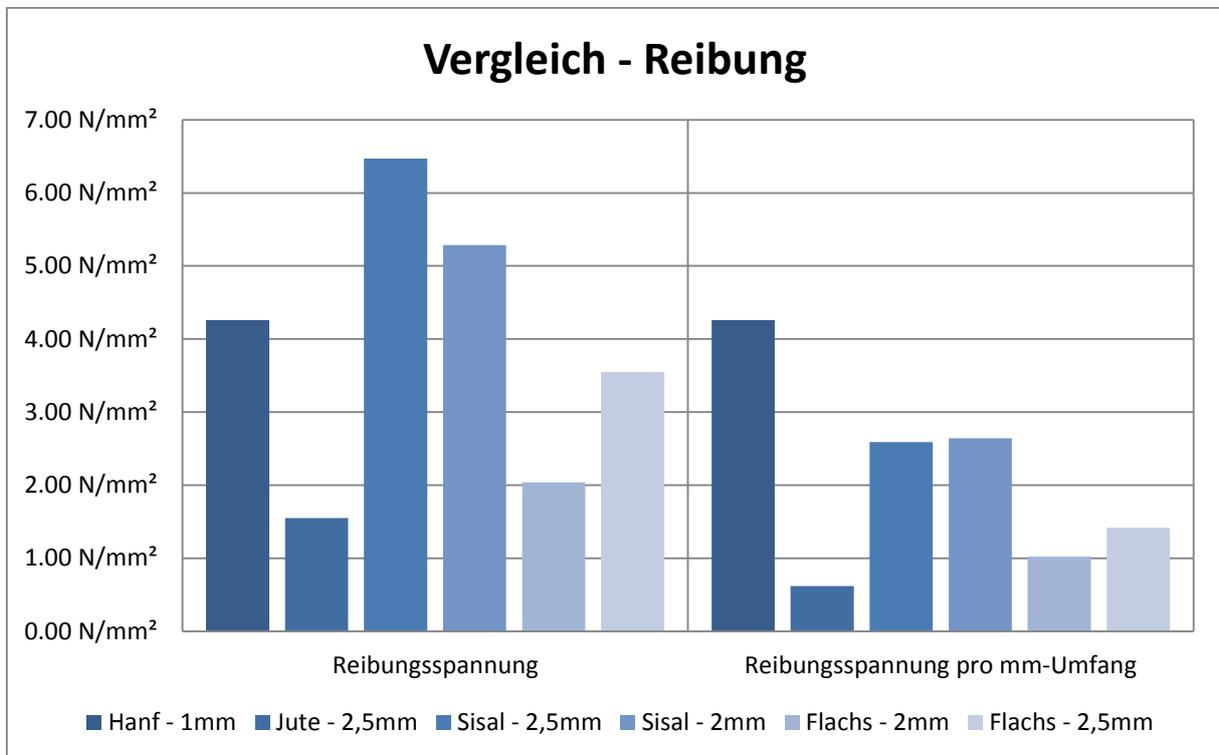


Bild 4.43: Vergleich der Reibungsspannung während der Beanspruchung

Abschließend soll nun ein kleiner Vergleich mit den von *Wallner*[22] geführten Zugversuchen geführt werden. Da bei diesem jedoch nur eine Matrixdicke von 70 mm verwendet wurde, wird dieser Wert um den Faktor 1,6 erhöht um vergleichbare Werte zu erhalten. Während es in dieser Arbeit zu einem durch Pull-Out dominierten Versagen kam, führte bei *Wallner* das Versagen meist zu einer Delamination der Matrix vom Stein einschließlich des verwendeten Textils. Ebenfalls sei angemerkt, dass hierbei engmaschige Gewebe eingesetzt wurden und keine Gelege aus Fasersträngen. Erwähnt seien hierbei nur die mit einer Zementmatrix geführten Versuche.

Variante	Material	Flächengewicht	max. Zugkraft	max. Zugkraft (Faktor 1,6)
5	Kohlenstoff	375 g/m ²	7,60 kN	12,16 kN
6	Polyester	265 g/m ²	3,75 kN	6 kN
7	Polyethylen	130 g/m ²	4,85 kN	7,76 kN

Tab. 4.17: Auswahl der Ergebnisse, der von *Wallner* geführten Versuche. [22]

Im direkten Vergleich mit Tabelle 4.15 kann man erkennen, dass die mit Naturfaser verstärkten Versuchskörper nur unwesentlich schwächer abschneiden als welche, die mit synthetischen Fasern verstärkt wurden.

Einzigster Nachteil der Naturfasern liegt in der geforderten Mindestdicke an die Matrix. Da einige der Naturfaserstränge eine Dicke von 2,5 mm erreichen, wird eine mindestens doppelt bis dreifach so dicke Matrix gefordert um ausreichenden Schutz vor Witterung zu gewährleisten und vor allem um ausreichenden Raum zur Ausbildung eines Haft- und Reibverbunds zu garantieren.

Weiteres soll im Folgenden im Rahmen von Schubversuchen getestet und erläutert werden.

4.5 Schubversuche an Dreisteinproben

Im Rahmen dieser Versuchsreihe sollen nun abschließend mehrere Geometrische Kenngrößen weiter untersucht werden und die Eignung von Naturfasern zur Verstärkung von Mauerwerk unter Schubbeanspruchung überprüft werden.

4.5.1 Versuchsvorbereitung

Dieser Versuchsstand wurde in Anlehnung an DIN 1052-3 konzipiert und wurde bereits bei [14] und [22] verwendet und dient für Versuche im Riss Mode II. Dabei wurden im Vorfeld insgesamt 10 Versuchskörper aus jeweils drei Kalksandvollsteinen der Größe 3DF mit Fugendicken von jeweils ca. 1,2 cm aufeinander gemauert. Dazu wurde ein italienischer Mörtel verwendet, dessen mechanische Eigenschaften ebenfalls getestet wurden. Diese Werte sind Tabelle 4.18 zu entnehmen. Der Versuchsstand besitzt fest definierte Lasteinleitungspunkte, was zu einer guten Vergleichbarkeit führt. Darüber hinaus wurde eine seitliche Vorspannung kraftgesteuert von 4,2 kN aufgebracht, welches einer Spannung von $0,1 \text{ N/mm}^2$ entspricht. Dies entspricht ca. 50% der normalen Auflast von Mauerwerk in einem Wohnhaus. Bild 4.44 können der Versuchsaufbau und die Geometrie entnommen werden.

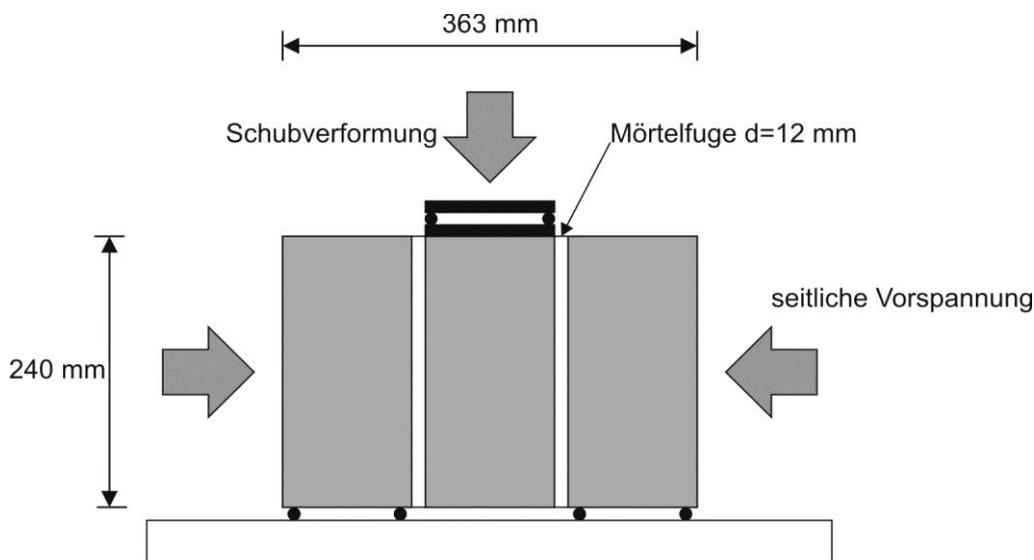


Bild 4.44: Versuchsaufbau für die Schubversuche für Riss Mode II

Gemessen wurde:

- Zylinderkraft
- Zylinderweg
- Vorspannkraft
- Horizontale Verschiebung

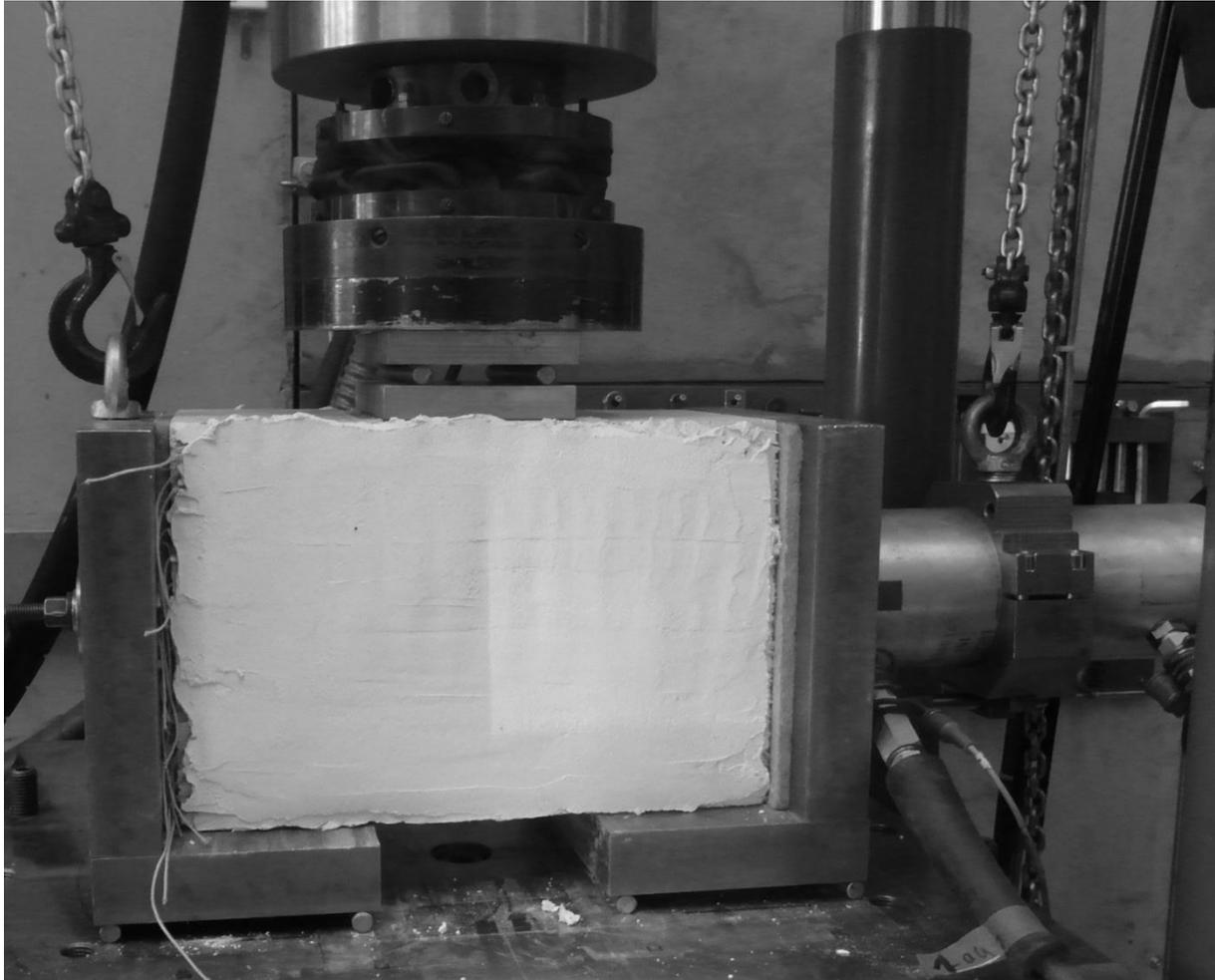


Bild 4.45: Versuchsaufbau für die Schubversuche für Riss Mode II in der Prüfhalle

Die Messfrequenz lag bei 2 Hz. Die Belastung wurde weggesteuert gefahren. Die Belastungsgeschwindigkeit wurde schrittweise gesteigert und betrug anfangs 1 mm/min, ab einer Verschiebung von 10mm wurde die Geschwindigkeit auf 3 mm/min gesteigert und ab einer Verschiebung von 15mm letztlich auf 5mm/min angehoben. Die Versuche wurden bei einem Maximalweg von 20 mm abgebrochen.

	Biegezuglast	Biegezugfestigkeit	Bruchlast	Druckfestigkeit
Italienischer Mörtel	0,5798 kN	0,8837 N/mm ²	5,9720 kN	3,6712 N/mm ²

Tab. 4.18: Mechanische Eigenschaften des verwendeten Mörtels.

Für diese Versuchsdurchführungen wurden erstmals vollständige Gewebe aus den verschiedenen natürlichen Fasermaterialien verwendet. Hierzu wurde ein einfacher Webrahmen gebaut mit welchem die Gewebe hergestellt werden konnten. Der Webrahmen maß eine Webfläche von ca. 50 x 50 cm aus. Eine Rastermöglichkeit für das Gewebe bis zu einer Dichte von 0,5 cm ist möglich. Somit wurden insgesamt 14 Einzelgewebe händisch für 7 Versuchskörper hergestellt. Dabei handelte es sich stets um triaxiale Gewebe, diese konnten bei der Applikation auf die Mauerwerksproben in

ihrer Orientierung variiert werden, so dass sich zwei Applikationsrichtungen ergaben. Während 2 Faserrichtungen stets die Schubfuge im 45° Winkel schneiden, konnte die dritte Achse entweder längs der Fuge oder orthogonal angeordnet werden, letztes führt zu einer weiteren Verstärkung der Fuge. Das Webmuster ist Bild 4.46 zu entnehmen. Die Gewebe wurden in eine Matrix aus Röfix© V8 mit einer Stärke von ca. 0,5 – 1,0 cm gebettet.

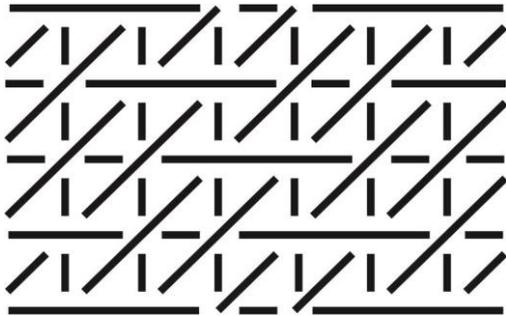


Bild 4.46: Webmuster für die Naturfasergewebe

Zwei weitere Versuchskörper wurden mit einem monodirektionalen und einem biaxialem Gelege versehen. Bei Probe 7 wurde einseitig Gewebe mit einer Dichte von 1 cm und auf der zweiten Seite ein Gewebe mit einer Dichte von 1,5 cm appliziert um herauszufinden auf welcher Seite das Versagen zuerst eintritt. Probe 1 gilt als Ausgangslage, welche unverstärkt getestet wurde. Verwendet wurde bei allen Proben Kalk-Zement-Mörtel Röfix©V8 der Firma Röfix©, dessen mechanische Eigenschaften können Tabelle 4.13 entnommen werden. Das Alter der Versuchskörper betrug 28 Tage. Somit ergab sich folgende Versuchsmatrix.

	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5
Material	ohne Fasern	Hanf	Hanf	Hanf	Hanf
Faserdicke		1,00 mm	1,00 mm	1,00 mm	1,00 mm
Geometrie		1-axial	2-axial	3-axial	3-axial
3.Achse verstärkend?		nein	nein	nein	nein
Gewebedichte		10 mm	10 mm	10 mm	15 mm

	Probe 6	Probe 7	Probe 8	Probe 9	Probe 10
Material	Hanf	Jute	Flachs	Sisal	Sisal
Faserdicke	1,00 mm	2,00 mm	2,50 mm	2,50 mm	2,50 mm
Geometrie	3-axial	3-axial	3-axial	3-axial	3-axial
3.Achse verstärkend?	ja	ja	nein	ja	nein
Gewebedichte	15 mm	10 - 15 mm	15 mm	15 mm	20 mm

Tab. 4.19: Versuchsmatrix für Drei-Stein-Schubversuche.

4.5.2 Versuchsdurchführung

Das Bruchverhalten von Drei-Stein-Körpern im Schubversuch lässt sich in zwei Phasen unterteilen. Zu Beginn der Lastaufbringung zeigt sich der Versuchskörper äußerst steif und erreicht bei einem von zwei Belastungsspitzen seine Maximallast. Hierbei tritt eine markante Rissbildung auf bis die Matrix gebrochen ist. Die beiden Belastungsspitzen treten durch eine zeitliche Versetzung der Rissbildung auf beiden Seiten des Versuchskörpers auf. Danach fällt die Last auf teilweise deutlich unter 50% der Maximallast ab. In dieser Phase, welche als Nachbruchphase charakterisiert ist, entstehen große Reibungskräfte und auch das Verstärkungstextil beginnt sich zu versteifen. Die Nachbruchphase ist von starker Rissbildung und Delamination des Verstärkungslaminats geprägt.

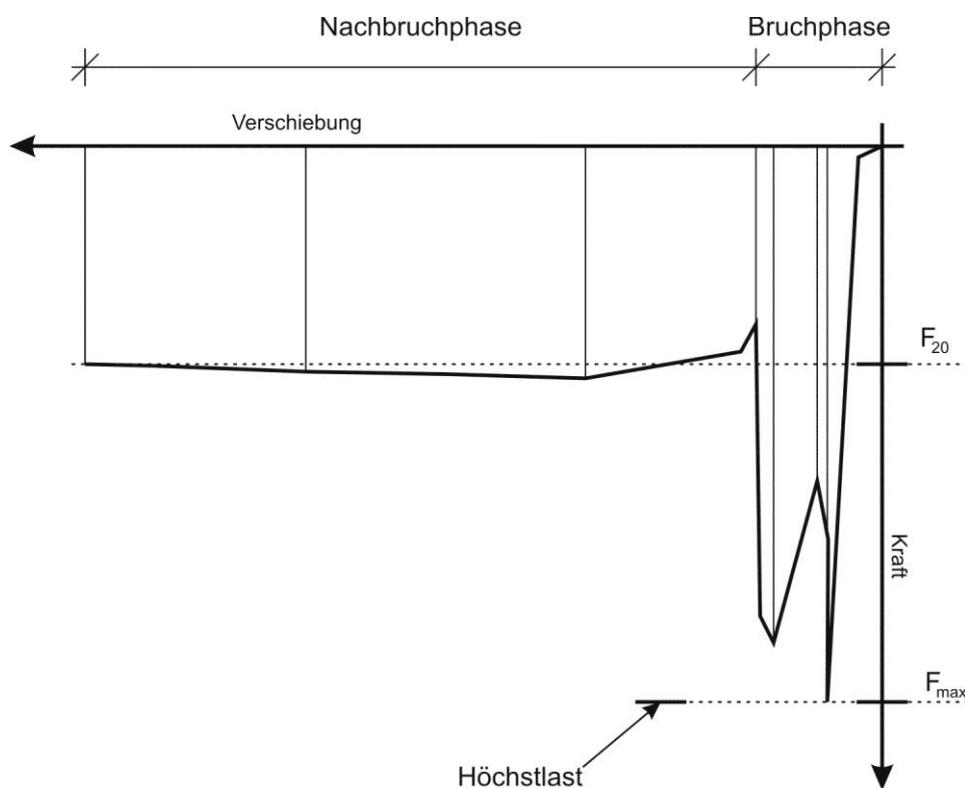


Bild 4.47: Diagrammbeispiel

Um die verschiedenen Versuchskörper miteinander vergleichen zu können wird wie in Kapitel 4.3 das Arbeitsvermögen betrachtet. Dieses berechnet sich hier analog aus den Lastverschiebungsdigrammen. Neben der Maximalkraft wird auch die Kraft bei Erreichen einer Verschiebung von 20 mm betrachtet, sowie die durchschnittliche Schubkraft während der Nachbruchphase.

Zuerst wurde ein unverstärkter Versuchskörper getestet. Diese Ergebnisse sollen als Maßstab dienen in wie weit sich die mechanischen Eigenschaften durch den Einsatz von Verstärkungstextilien verbessern lassen. Tabelle 4.19 gibt die gemessenen Da-

ten wider. Bild 4.48 zeigt den Last-Verschiebungsverlauf, wobei dieser Versuch bei einer Verschiebung von 10 mm abgebrochen wurde. Für die Berechnung der Energiedissipation wurde der Verlauf linear interpoliert. Es sei jedoch angemerkt, dass sich die Probe während der Versuchsdurchführung verkantete, sodass der Bruch verzögert wurde, daher wird angenommen, dass in Realität ein durchaus geringeres Arbeitsvermögen erreicht wird. Daher zur Betrachtung des Steigerungspotentials eine Abminderung der Energiedissipation von Probe 1 auf 70% vorgenommen. Alle Angaben zur prozentualen Steigerung der Energiedissipation beziehen sich auf die abgeminderten Werte von Probe 1.

	Probe 1	Probe 1 (abgemindert)
max. Kraft	-18,78 kN	-13,15 kN
F ₂₀	-8,67 kN	-6,07 kN
Energiedissipation	178,11 Nm	124,68 Nm
mittlere Schubkraft	-7,96 kN	-5,57 kN

Tab. 4.20: Versuchsergebnisse für Probe 1

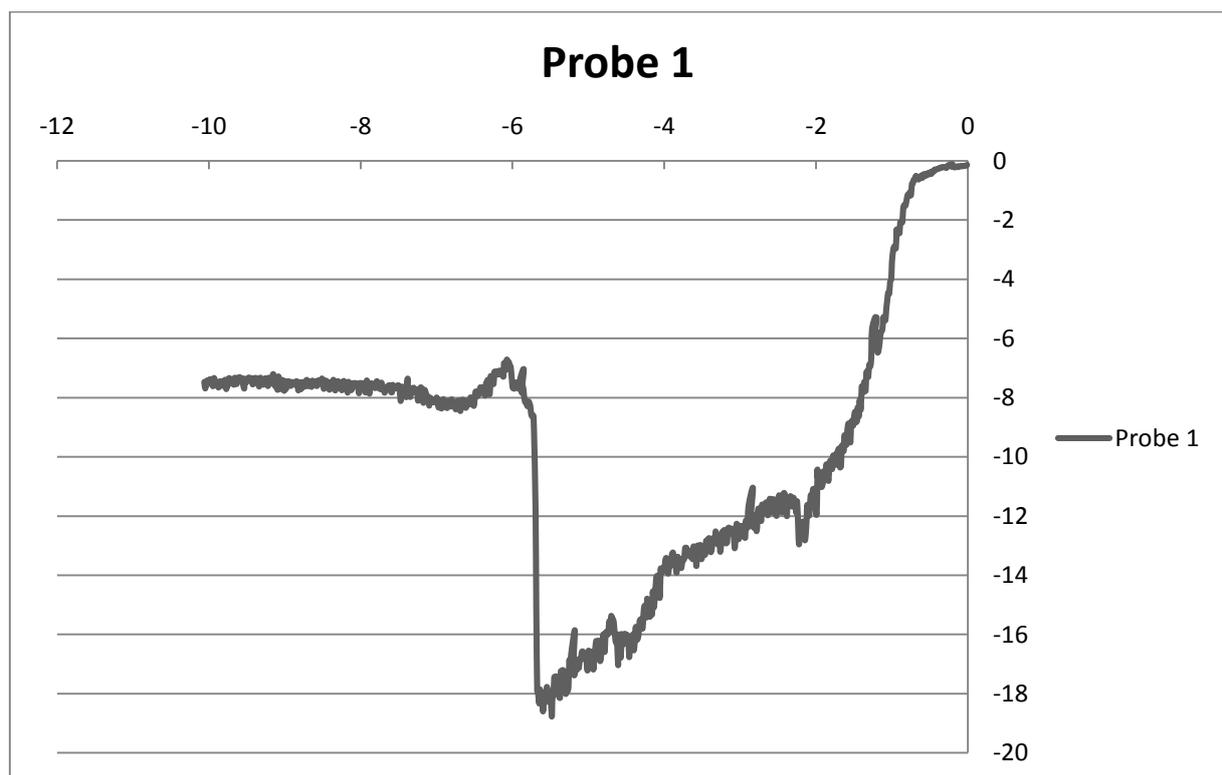


Bild 4.48: Last-Verschiebungs-Diagramm von Probe 1

Nun folgend sollen die Ergebnisse der Versuche 2 – 10 erläutert werden. Diese werden gemäß den gemessenen Parametern zusammenfassend betrachtet. In Anhang B finden sich darüber hinaus zusätzliche Fotografien über den Bruchverlauf der einzelnen Versuche.

Einfluss der Gewebe Orientierung (Probe 2 & 3)

Bei Probe 2 & 3 wurden jeweils Hanfseile mit einer Dicke von 1 mm verwendet. Für Probe 2 wurden diese orthogonal zur Fuge angeordnet, während bei Probe 3 ein Kreuzgelege im 45° Winkel zur Fuge angeordnet wurde, gemäß Bild 4.49. Verwendet wurden jeweils 21 Faserstränge auf die Breite des Laminats, was einem durchschnittlichen Faserabstand von ca. 1 cm entspricht.



Bild 4.49: Anordnung der Fasern während der Versuchsvorbereitung von Probe 2

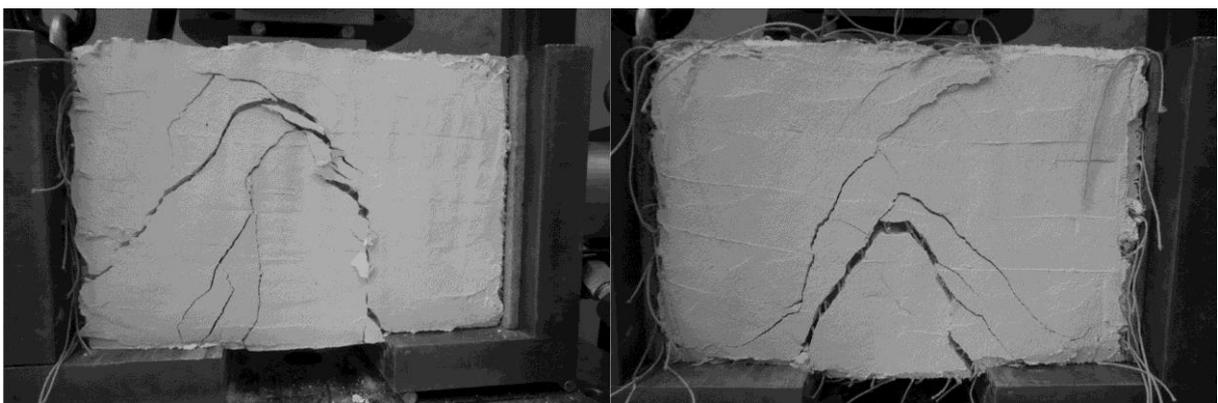


Bild 4.50: Rissbildung bei Probe 2 (links) und Probe 3 (rechts) an der Vorderseite während der Nachbruchphase

Durch den Einsatz der Faser-Verstärkung konnte nur eine leichte Steigerung der Maximalkraft erreicht werden. Allerdings in Bezug auf das Arbeitsvermögen eine Steigerung von 30%. Wie bei [14] wurde festgestellt, dass orthogonal ausgerichtete Textili-

en eine höhere Schubkraft aufweisen als solche, die einen Winkel von 45° aufweisen. Insbesondere bei Probe 3 kam es einseitig zu einer großflächigen Delamination und einem kleinen Bruchufer, was dazu führte, dass nur wenige Faserstränge beim Bruch- und Schubvorgang beteiligt waren. Bild 4.50 zeigt die Rissbilder von Probe 2 und Probe 3 im Vergleich. Hervorzuheben ist der starke Größenunterschied der delaminierten Bereiche. Durch den Einsatz von einfachen Gelegen konnte somit die maximale Kraft und die Energiedissipation bereits leicht verbessert werden, es werden weitere Steigerungen durch den Einsatz von Geweben erwartet, welche sich bei weitem steifer verhalten sollten als einfache in die Matrix applizierte Gelege. Die genauen Steigerungen gegenüber Probe 1 können Tabelle 4.19 entnommen werden.

	Probe 2	Probe 3
max. Kraft	-23,36 kN	-22,84 kN
Steigerung gegenüber Probe 1	124,39%	121,62%
F₂₀	-11,41 kN	-9,09 kN
Steigerung gegenüber Probe 1	131,57%	104,74%
Energiedissipation	213,61 Nm	193,41 Nm
Steigerung	171,32%	155,13%
mittlere Schubkraft	-9,86 kN	-9,08 kN
Steigerung gegenüber Probe 1	123,88%	114,12%

Tab. 4.21: Versuchsergebnisse für Probe 2 & 3.

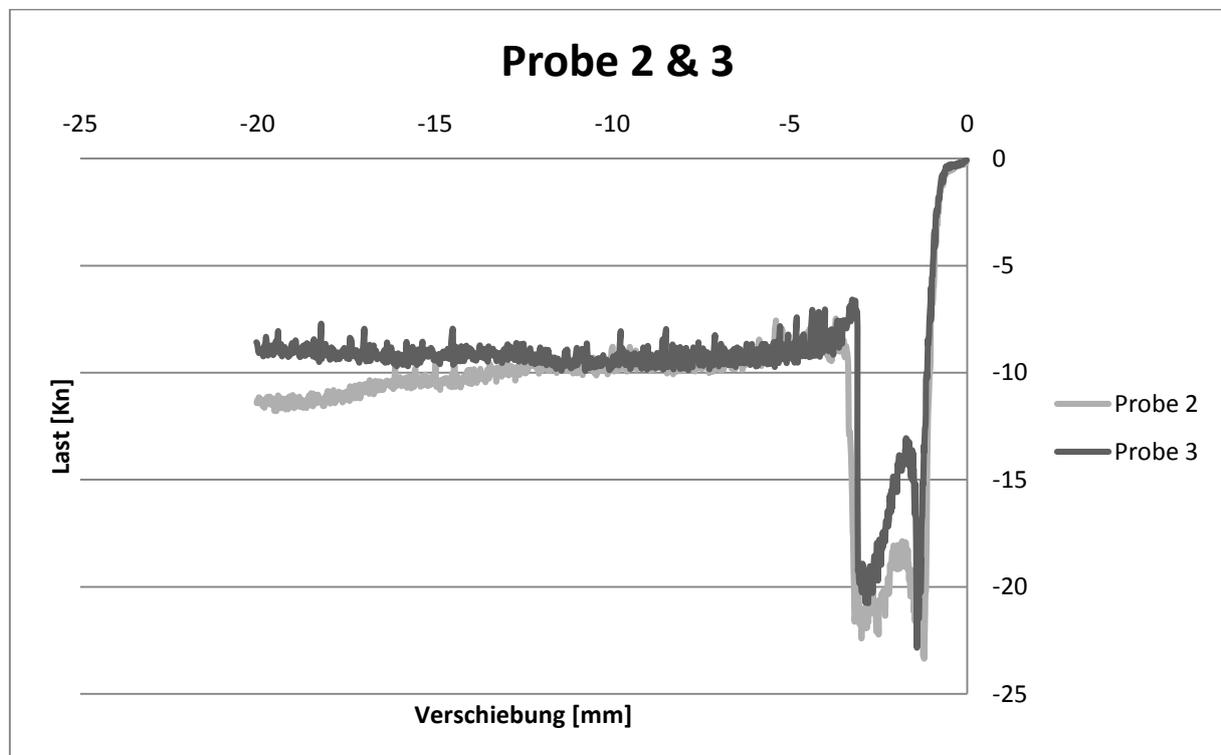


Bild 4.51: Last-Verschiebungs-Diagramm von Probe 2 & 3

Gewebedichte und Vergleich bi- & triaxialer Gewebe (Probe 4 – 6)

Bei den Proben 4 bis 6 wurden jeweils Hanfseile mit einer Dicke von 1 mm appliziert. Während bei den Proben 5 & 6 jeweils ein triaxiales Gewebe mit einer Maschendichte von 1,5 cm verwendet wurde, besaß Probe 4 eine Maschendichte von 1 cm. Bei Probe 6 wurde das Gewebe so eingelegt, dass die dritte Gewebeachse orthogonal zur Fuge lag und somit verstärkend wirkte. Bild 4.52 zeigt Probe 4 kurz bevor die zweite Schicht Putz aufgetragen wurde. Gut zu erkennen ist hierbei, dass sich die lockeren Naturfasergewebe nicht homogen applizieren ließen.



Bild 4.52: Applikation des Hanf-Gewebes von Probe 4.

Während die Steigerung der Maximalkraft nach wie vor eher zweitrangig zu betrachten ist, gilt vor allem die Steigerung des Arbeitsvermögens als wichtigstes Kriterium. Dies wurde durch den Einsatz von Gewebe nochmals gesteigert und abermals durch die Verwendung der dritten Gewebeachse zur Verstärkung der Fuge.

Der Einsatz der dritten Gewebeachse zeigt sich vor allem bei der Steigerung der mittleren Schubkraft, welches wiederum zu einer Steigerung der Energiedissipation führt. Die Verwendung einer Gewebedichte von nur 1 cm wird nicht empfohlen. Es war zwar eine Steigerung in allen Bereichen zu verzeichnen, vor allem bei der Schubkraft mit einer Verschiebung von 20 mm, was allerdings bei einer Steigerung des Materi-

albedarfs von 33% in keinem Verhältnis steht. Zusätzlich würde eine Steigerung der Gewebedichte zu einer Minderung des Verbundverhaltens zwischen oberer und unterer Laminatschicht führen, zwischen welchen das Gewebe verklebt ist und die Neigung zur Delamination erhöhen.

	Probe 4	Probe 5	Probe 6
max. Kraft	-21,57 kN	-20,56 kN	-24,01 kN
Steigerung gegenüber Probe 1	114,85%	109,46%	127,85%
F₂₀	-11,64 kN	-10,48 kN	-10,30 kN
Steigerung gegenüber Probe 1	134,16%	120,77%	118,72%
Energiedissipation	221,63 Nm	229,35 Nm	235,73 Nm
Steigerung gegenüber Probe 1	177,76%	183,96%	189,07%
mittlere Schubkraft	-10,83 kN	-10,02 kN	-11,35 kN
Steigerung gegenüber Probe 1	136,10%	125,87%	142,58%

Tab. 4.22: Versuchsergebnisse für Probe 4 & 6.

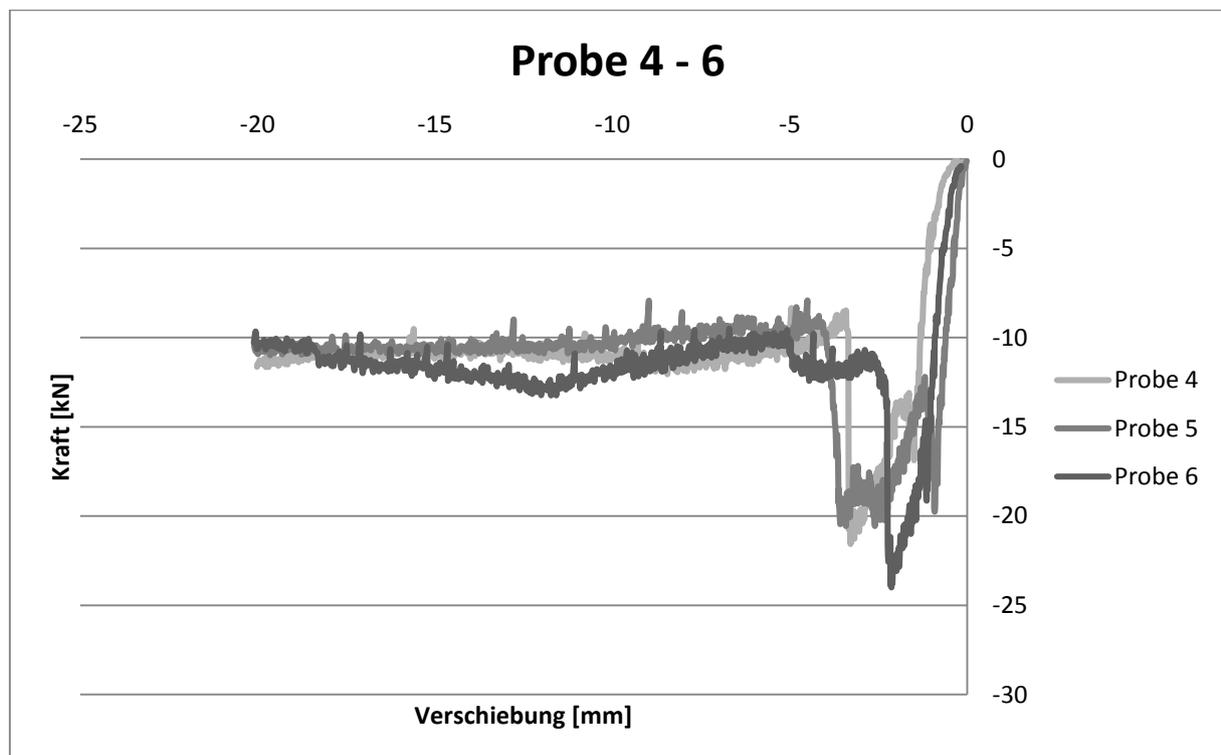


Bild 4.53: Last-Verschiebungs-Diagramm von Probe 4 – 6

Verwendung von Jute & Flachs und Betrachtung asymmetrischer Laminatapplikation (Probe 7 & 8)

Bei Probe 7 wurden zwei Gewebe aus Jute appliziert, die Faserstränge wiesen dabei eine Dicke von 2,5 mm auf. Die Vorderseite wies eine Gewebedichte von 1 cm auf, während die Rückseite eine Dichte von 1,5 cm hatte. Ziel dieser Asymmetrie war die Untersuchung, wie sich dieser Umstand auf das Bruchverhalten auswirkt. So beschränkte sich die Rissbildung beinahe ausschließlich auf die Vorderseite.

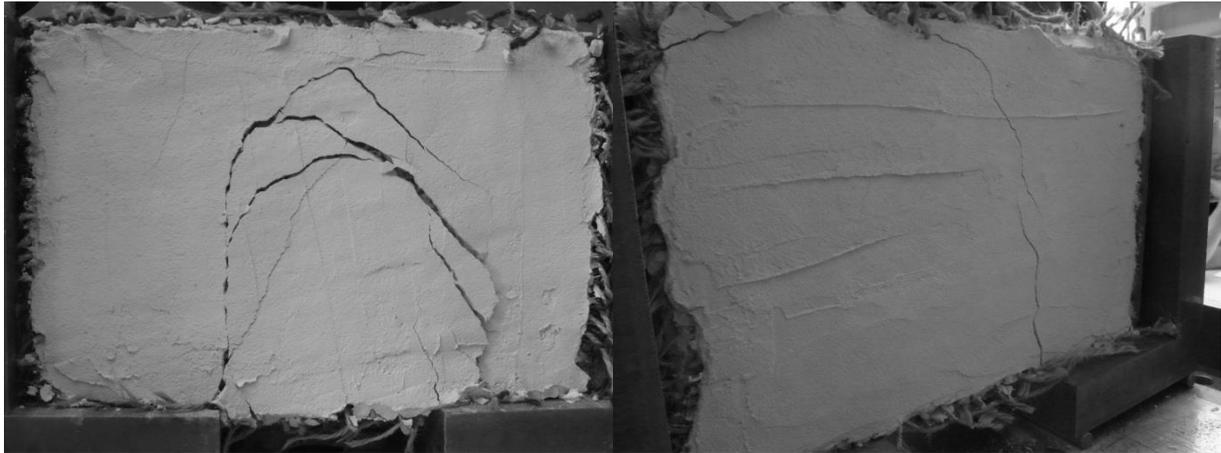


Bild 4.54: Rissbilder von Probe 7, Vorder- und Rückseite zur gleichen Zeit.

Trotz dieses Umstands wies dieser Versuchskörper gute mechanische Eigenschaften auf und konnte diese gegenüber Probe 1 steigern. Vor allem die Energiedissipation lag wieder deutlich über der Vorgabe. Dass sich die anderen Werte nicht so weit steigern ließen, trotz verstärkender Anordnung der dritten Gewebeachse, wird wohl auf die allgemein schlechteren mechanischen Eigenschaften von Jute zurückgeführt.



Bild 4.55: Rissbild von Probe 8

Probe 8 kann als sehr guter Versuchskörper bezeichnet werden. Alle Werte wurden gegenüber der Vorgabe deutlich gesteigert und dies sogar ohne verstärkende An-

ordnung der dritten Gewebeachse. Vor allem die Steigerung der Energiedissipation auf über 200 % ist bemerkenswert. Verwendet wurde hierbei ein Gewebe aus Jutefasern mit einer Dicke von 2,5 mm. Das Rissbild zeigte eine starke Rissentwicklung auch außerhalb des Fugenbereichs. Dies geht auf eine gute Lastausbreitung über das gesamte Gewebe zurück. Bild 4.55 zeigt die Vorderseite des Versuchskörpers 8.

	Probe 7	Probe 8
max. Kraft	-20,82 kN	-25,26 kN
Steigerung gegenüber Probe 1	110,87%	134,50%
F_20	-11,68 kN	-12,33 kN
Steigerung gegenüber Probe 1	134,62%	142,16%
Energiedissipation	217,27 Nm	260,71 Nm
Steigerung gegenüber Probe 1	174,26%	209,11%
mittlere Schubkraft	-10,12 kN	-14,30 kN
Steigerung gegenüber Probe 1	127,21%	179,73%

Tab. 4.23: Versuchsergebnisse für Proben 7 & 8.

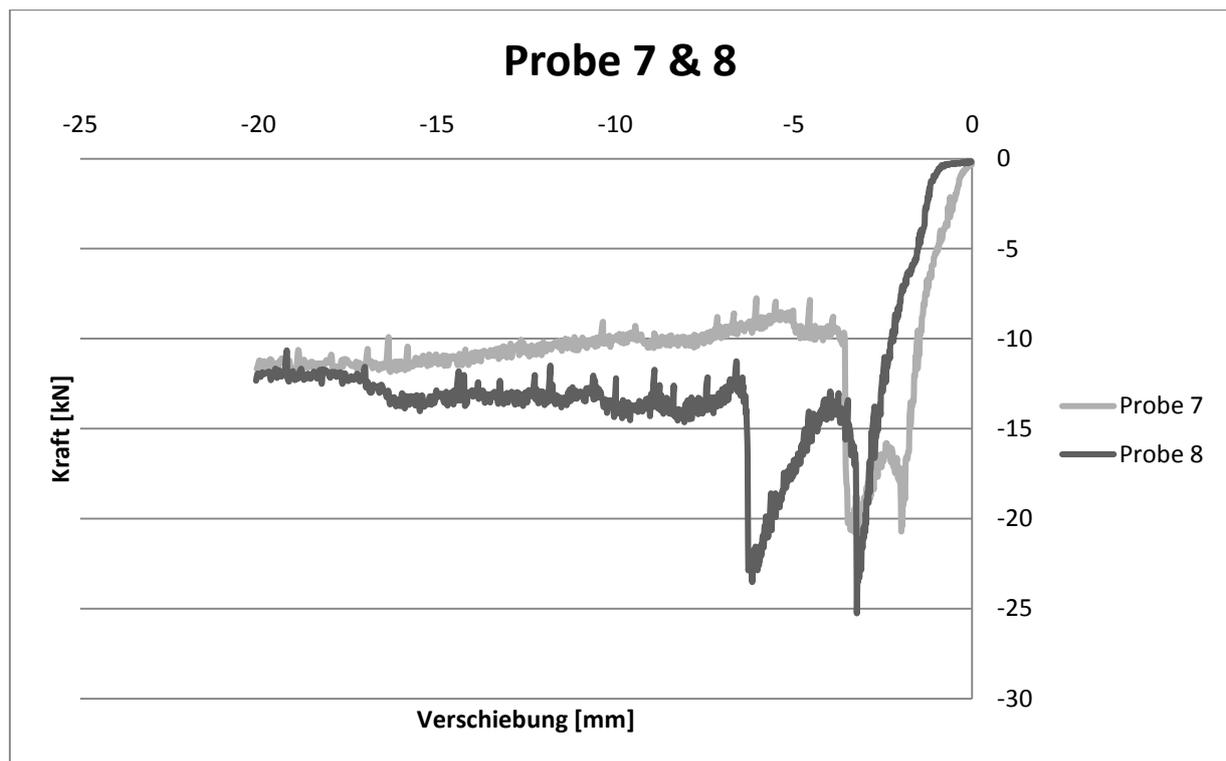


Bild 4.56: Last-Verschiebungs-Diagramm von Proben 7 & 8

Verwendung von Sisal (Probe 9 & 10), Variation der Gewebedichte

Bei den Proben 9 & 10 wurde jeweils Sisal mit einer Dicke von 2,5 mm verwendet. Bei Probe 9 wurde eine Gewebedichte von 1,5 cm angesetzt, während diese bei Probe 10 auf eine Weite von 2,5 cm abgemindert wurde. Bei beiden Proben wurde die dritte Gewebeachse verstärkend angeordnet.

Während bei Probe 9 die im Vergleich zu den anderen Versuchskörpern besten Ergebnisse erzielt wurden, konnte Probe 10 sich kaum über die Werte der Vorgabe halten. Während bei Probe 9 kaum Delamination auftrat und dafür ein beinahe perfektes Rissbild entstand, wies Probe 10 eine starke Neigung zur Ablösung vom Untergrund, darüber hinaus schien die Verwendung der Fasern kaum einen Einfluss auf die Probe zu haben. Dies kann zwar auch auf andere Randbedingungen zurückgeführt werden, aber im Rahmen dieser Untersuchung wird empfohlen eine Gewebedichte von 1,5 cm nicht zu unterschreiten.



Bild 4.57: Rissbild Probe 9

Aufgrund der hervorragenden Ergebnisse von Probe 9, welche das Arbeitsvermögen auf sogar über 260% steigern konnte, wird Sisal trotz der Ergebnisse aus Probe 10 für die Verwendung als Verstärkungstextil empfohlen.

	Probe 9	Probe 10
max. Kraft	-26,50 kN	-19,25 kN
Steigerung gegenüber Probe 1	141,12%	102,51%
F₂₀	-16,42 kN	-9,72 kN
Steigerung gegenüber Probe 1	189,32%	112,07%
Energiedissipation	327,64 Nm	196,94 Nm
Steigerung gegenüber Probe 1	262,79%	157,96%
mittlere Schubkraft	-15,62 kN	-9,32 kN
Steigerung gegenüber Probe 1	196,26%	117,07%

Tab. 4.24: Versuchsergebnisse für Proben 9 & 10.

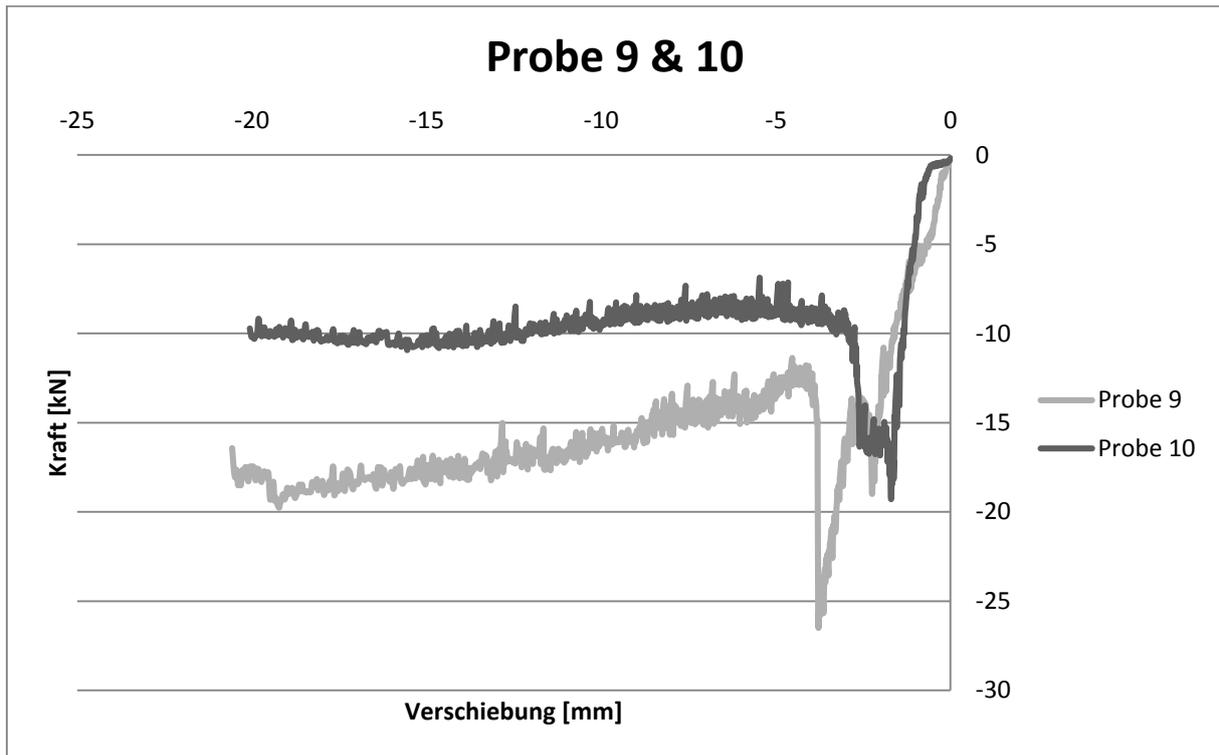


Bild 4.58: Last-Verschiebungs-Diagramm von Proben 9 & 10

4.5.3 Ergebnisse und Empfehlung

Nach der Betrachtung von 10 Versuchskörpern unter Schubbeanspruchung lässt sich ein klares Bild zur Verwendung von Naturfasern als Verstärkung in diesem Belastungsmilieu zeichnen. Prinzipiell lässt sich Mauerwerk generell mit einem Gewebe aus Naturfasersträngen verstärken, der Grad dieser Verstärkung hängt jedoch sehr stark von den geometrischen Randbedingungen und der Wahl des Fasermaterials ab.

Anhand dieser Untersuchungen wird eine Gewebedichte von 1,5 cm empfohlen. Höhere Dichten können vor allem bei dickeren Fasersträngen zu einem schlechteren Verbundverhalten führen, da die Nettofläche, welche die obere und untere Putzschicht verbindet, mit steigender Gewebedichte und Faserstrangdicke abnimmt. Des Weiteren wird bei triaxialen Textilien empfohlen, dass die dritte Gewebeachse verstärkend angeordnet wird. Da dieser Versuchsaufbau eine horizontale Schubbelastung simuliert, die in dieser Form auch bei Erdbeben auftritt, wird empfohlen die dritte Gewebeachse vertikal anzuordnen, so dass die beanspruchten Lagerfugen von insgesamt drei Faserachsen unterstützt werden. Außerdem wird empfohlen, die Dicke der Faserstränge auf maximal 2,5 mm zu begrenzen. Zum einen ist mit größeren Dicken auch ein größerer Materialaufwand und ein steigendes Flächengewicht verbunden, zum anderen steigt mit der Dicke der Faserstränge auch die Dicke der Putzschicht und kann je nach Material deutlich über 1,0 cm liegen.

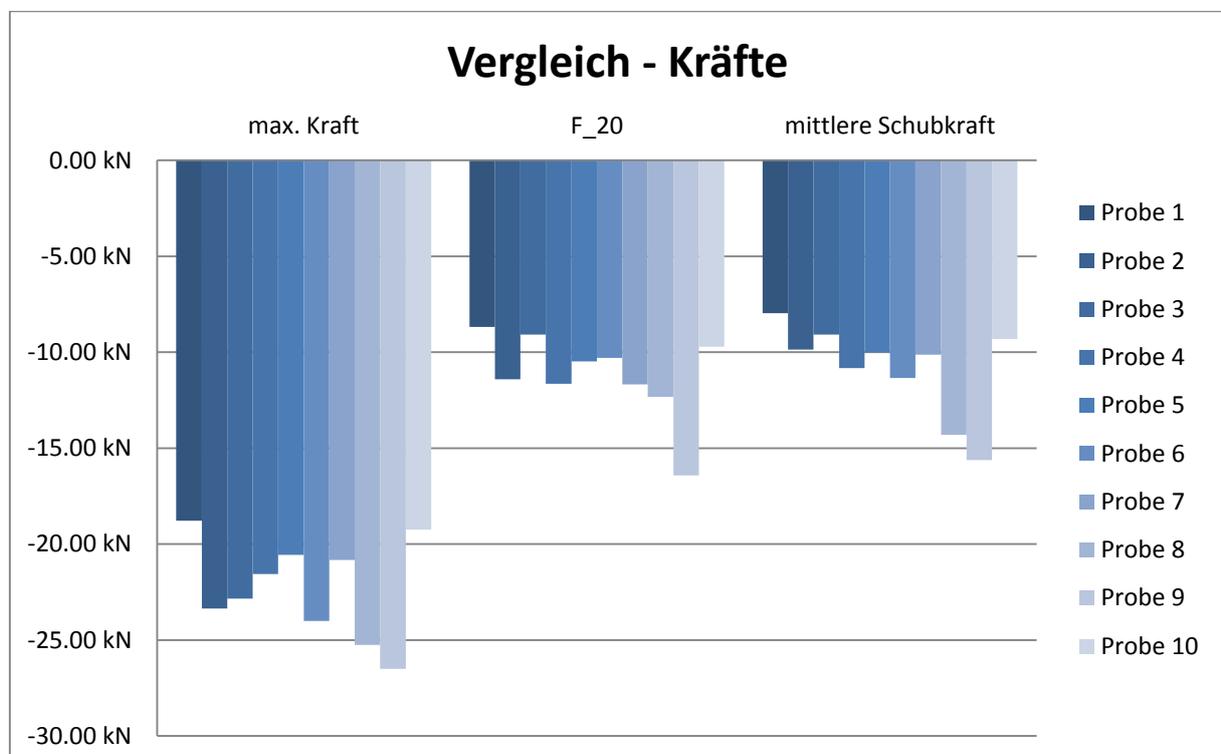


Bild 4.59: Vergleich der gemessenen Kraftgrößen der Proben 1 – 10

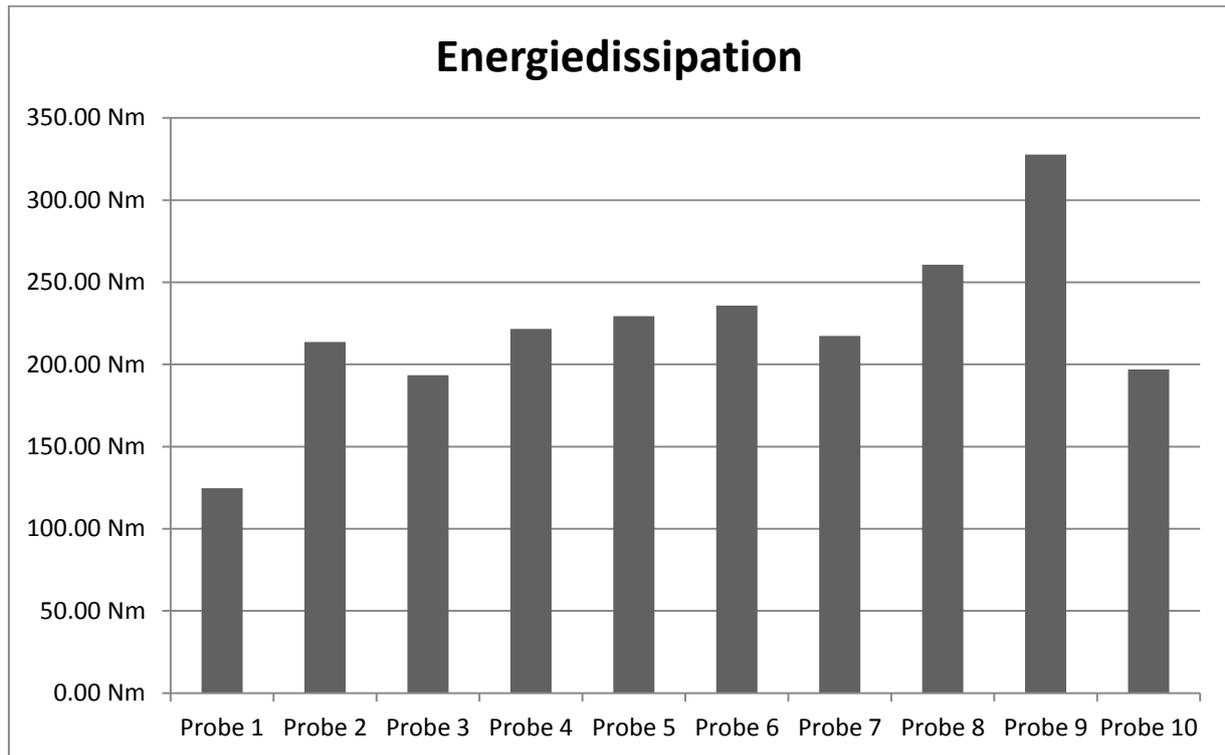


Bild 4.60: Vergleich des Arbeitsvermögens der Proben 1 – 10

Im direkten Vergleich der verschiedenen Materialien zeigte sich vor allem Sisal mit hervorragenden Testergebnissen. Dies ist jedoch auch mit einem höheren Materialaufwand verbunden, da die Sisalfasern, welche hier getestet wurden eine Dicke von 2,0 – 2,5 mm aufwiesen. Selbiges gilt auch für den Einsatz von Flachsfasern, die ebenfalls sehr gute Ergebnisse erreichen konnten, jedoch auch bereits die maximale Dicke erreicht haben. Hanf erzielte dagegen eher durchschnittliche Ergebnisse, allerdings wurden hierbei auch die dünnsten Faserstränge mit einer Dicke von nur 1,0 mm eingesetzt und daher einen deutlich geringen Materialaufwand benötigten. Vor allem Jute konnte im Vergleich zu den anderen verwendeten Materialien nur bedingt überzeugen. Trotz einer Faserstrangdicke von 2,5 mm, blieben die Ergebnisse teilweise sogar hinter denen von Hanf zurück. Als gesonderte Randbedingung soll noch die Verarbeitbarkeit der Fasern angemerkt werden. Da alle Gewebe in dieser Arbeit händisch hergestellt wurden, ergab sich, dass Hanf und Flachs die beste Verarbeitbarkeit aufweisen, dies liegt vor allem an der guten Verarbeitung der Faserstränge. Im Vergleich waren Jute und Sisal, letzteres vor allem wegen seiner Steifigkeit, durchaus unangenehm und verursachten, aufgrund ihrer groben Faserstruktur, Blasen und führten zur Hornhautbildung an den Händen.

Durch Einhalten dieser Randbedingungen kann auf Grundlage dieser Testergebnisse für alle Materialien eine Empfehlung ausgesprochen werden. Wichtig sei jedoch stets die Berücksichtigung von Materialmenge, -preis und Nutzen.

5 Fazit und Aussicht

Abschließend soll hier noch einmal alles zusammengefasst kurz erläutert werden und eine Aussicht auf zukünftige Forschungsarbeiten gegeben werden.

5.1 Fazit

Nachdem im Rahmen dieser Arbeit insgesamt 57 Einzelversuche durchgeführt wurden, kann nun eine allgemeine Empfehlung für den Einsatz von natürlichen Materialien zur Verstärkung von Mauerwerk unter Erdbebenlast gegeben werden.

Zu Beginn stand die Betrachtung von Lehm als Matrix für die Naturfasern. Obwohl Lehm hervorragende Bauphysikalische Eigenschaften aufweist und vor allem im ökologischen Bauwesen derzeit eine Renaissance feiert, kann Lehm aufgrund seiner mangelnden Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Einwirkungen nicht empfohlen werden. So war nicht nur eine deutlich höhere Dicke für den Putz notwendig um die Faserstränge einzubetten, darüber hinaus wurde die Lehmmatrix bei den Einzelstein-Versuchen durch den Pull-Out der Faserstränge großflächig zerrieben und delaminiert. Diese Umstände lassen sich möglicherweise durch eine Verbesserung der Lehmrezeptur kompensieren, allerdings ist die Erfolgchance hierbei eher als gering anzusehen. Moderne Putze aus Kalk und Zement sind nicht nur in Bezug auf ihre mechanischen Eigenschaften höherwertig, sondern auch zuverlässiger.

Die verschiedenen getesteten Fasermaterialien weisen alle eine grundsätzliche Eignung zum Einsatz in einem Verstärkungstextil auf, solange ihre Verarbeitung ausreichende mechanische Eigenschaften gewährleistet, dies wurde vor allem beim Test der verschiedenen Hanfschnüre und -seile gezeigt. Eine größere Faserstrangdicke als 2,5 mm wird nicht empfohlen, da dies nur zu einer Erhöhung der Matrixdicke führt und damit zu einem höheren Flächengewicht. Hierbei ist der Anstieg der mechanischen Eigenschaften im Zuge größerer Faserstrangdicken nicht verhältnismäßig.

Besonders Sisal und Flachs erreichten sehr hohe Werte in Bezug auf die mechanischen Eigenschaften in allen Testreihen. Dabei sei jedoch angemerkt, dass es sich hierbei um dickere Faserstränge handelte. Während Hanf zwar effektiv geringere Werte erreichte, jedoch in Bezug auf den Faserquerschnitt in fast allen Testreihen die beste Materialausnutzung vorwies.

So erreichten die mit Naturfasern verstärkten Mauerwerksproben teilweise eine Steigerung von über 200% in Bezug auf ihr Arbeitsvermögen. Dies gewährleistet ein deutlich duktileres Verhalten und damit eine ausgeprägtere Widerstandsfähigkeit gegenüber Einwirkungen aus Erdbeben.

Abschließend lässt sich somit sagen, dass die Untersuchung der Naturfasern als erfolgreich zu bewerten ist.

5.2 Aussicht

Nachdem für Naturfasern eine allgemeine Empfehlung ausgesprochen werden kann, gilt es diese weiter zu untersuchen. Da im Rahmen dieser Arbeit viele Randbedingungen nur mit einem einzelnen Versuchskörper getestet werden konnten, gilt es nun diese Ergebnisse weiter zu verifizieren und vor allem zu untersuchen, wie stark die mechanischen Kennwerte streuen.

Die Entwicklung geeigneter Gewebe sollte ebenfalls weiter untersucht werden. Da im Rahmen dieser Arbeit nur einfache Gewebe als Kleinproben händisch hergestellt werden konnten, wird empfohlen, um einer produktionsbedingten Inhomogenität vorzubeugen, in Zusammenarbeit mit der Industrie, hochwertiger verarbeitete Gewebe herzustellen. Hierbei lassen sich auch weitere Gewebemuster untersuchen. Wie bereits oben genannt, können weitere Untersuchungen an natürlichen Putzen geführt werden. So wird hierbei vor allem die Betrachtung von reinen Kalkputzen empfohlen und die Entwicklung einer verbesserten Rezeptur bei Lehm-Putzen.

Darüber hinaus können auch weitere Fasermaterialien untersucht werden, die im deutschen Handel eher selten zu finden sind, wie zum Beispiel Kenaf oder Nesselfaser. Da in dieser Arbeit nur handelsübliche Seile und Schnüre aus Naturfasern verwendet wurden, die man in dieser Form auch im Einzelhandel erstehen kann, wird hierbei empfohlen, Sonderanfertigungen seitens der Industrie zu überprüfen um Faserstränge zu erhalten, die genau für den Einsatz als Verstärkungstextil geeignet sind. So lässt sich unter Umständen die Faserstrangdicke von z.B. Sisal verringern bei gleichbleibenden Werten, indem die Nettoquerschnittsfläche erhöht wird. Auf diese Weise lassen sich in absehbarer Zeit geeignete Kombinationen zur Herstellung von natürlichen Fasergeweben entwickeln.

Somit ist mit dieser Arbeit eine grundlegende Wissensbasis gegeben, anhand welcher man sich in Zukunft zur Betrachtung von Naturfaserstoffen zur Verstärkung von Mauerwerk orientieren kann. Leider konnte hierbei die Verwendung natürlicher Matrizen nur ungenügend untersucht werden, dies wird für zukünftige Arbeiten empfohlen.

Abbildungen

Bild 1.1: Weltweite Verteilung Gebäudeklassen in städtischen (links) und ländlichen (rechts) Gegenden, Diagrammbeschriftung im Uhrzeigersinn (A = Mauerwerk, C = Stahlbeton, RS = Natursteinmauerwerk, S = Stahl, MH/INF = Mobile Bauhausung / schlechte Bauqualität, W = Holz, Unk = unbekannte Typologie) [7]	1
Bild 1.2: Globale Übersicht über das allgemeine Einsturzrisiko des Bauwerksbestands. [7]	2
Bild 2.1: Geographische Beschreibung von Erdbeben	5
Bild 2.2: Europäische Intensitätskala EMS-98 [2]	6
Bild 2.3: Fußpunkterreger Einmassenschwinger [2]	7
Bild 2.4: Materialverhalten verschiedener Werkstoffe [20]	10
Bild 2.5: Duktilität nach Bachmann. [2]	11
Bild 2.6: exemplarische einaxiale Druckspannungsverläufe von Mauerwerk und dessen Einzelkomponenten [22]	15
Bild 2.7: Bruchmechanismus von Mauerwerk unter einaxialer Zugbelastung parallel zur Lagerfuge [11]	16
Bild 2.8: Schubbeanspruchung von Mauerwerk: a) Wand b) Wandelement c) Einzelstein [11]	17
Bild 2.9: Versagensformen einer Wandscheibe unter Schub unter Vertikalspannung [11]	18
Bild 2.10: Gleichgewicht am Einzelstein ohne Normalspannungen [11]	19
Bild 2.11: Versagen der Mauersteine auf Zug [11]	20
Bild 2.12: Versagenskriterien nach <i>Mann & Müller</i> [14]	21
Bild 2.13: Übersicht über natürliche Faserstoffe [4]	28
Bild 2.14: Aufbau einer Naturfaserzelle [21]	30
Bild 2.15: Zugfestigkeit in Abhängigkeit des Cellulose-Anteils, reine Cellulose zur Mindestzugfestigkeit (A); reine Cellulose zur durchschnittlichen Zugfestigkeit [B]; Summe aus Cellulose und Hemicellulose zur durchschnittlichen Zugfestigkeit	31
Bild 2.16: Verhältnis zwischen durchschnittlichem E-Modul und Lignin-Anteil	31
Bild 2.17: morphologische Stadien von Hanf nach E.W.Smith [9]	33
Bild 2.18: Aufbau einer Flachspflanze: (1) Krone, Äste, Blüte (2) Stamm (3) Kotyledon (Keimblatt) (4) Wurzeln. [4]	34
Bild 2.19: Jutepflanze [4]	35
Bild 2.20: Sisalpflanze [4]	36
Bild 2.21: Einstufige Glattzwirne verschiedener Fachung [21]	38
Bild 2.22: Mantel-Kern-Garn [21]	38
Bild 2.23: Gewebeaufbau [21]	39
Bild 2.24: Gewebearten [22]	39

Bild 3.1: Mauerwerkskleinkörper im Fugenbereich; Bei erhöhter Beanspruchung löst sich der Verbund zwischen Matrix und Faser [20]	40
Bild 4.1: Riss Mode I & Riss Mode II [14].....	43
Bild 4.2: Veränderung der Druckfestigkeit von Lehm nach Kalkzugabe, nach Untersuchungen von [13].....	46
Bild 4.3: Veränderung des Schwindverhaltens von Lehm nach Faserzugabe, nach Untersuchungen von [13].....	47
Bild 4.4: Schwindrisse an Probe 5 nach ca. 30min.....	51
Bild 4.5: Schwindrisse an Probe 6 nach ca. 30min.....	51
Bild 4.6: Probe 9 nach 2 Tagen, keine Schwindrissebildung und gutes Haftungsvermögen mit am Untergrund.....	52
Bild 4.7: Nahaufnahme, Hanfseil, 1,0 mm, mehrstufiges Gezwirn.....	54
Bild 4.8: Nahaufnahme, Jute, 2,5 mm, dreistufiges Gezwirn	54
Bild 4.9: Nahaufnahme, Sisal, 2,5 mm, zweistufiges Gezwirn	55
Bild 4.10: Diagrammbeispiel	56
Bild 4.11: Bruchbereich einer Schnur, dargestellt ist Probe Flachs – 2,5 – 1	57
Bild 4.12: Kraft-Weg-Diagramm von Flachs-Schnüren von 2,0mm	59
Bild 4.13: Kraft-Weg-Diagramm von Flachs-Schnüren von 2,5mm	59
Bild 4.14: Kraft-Weg-Diagramm, Vergleich von Flachs-Schnüren mit 2,0mm und 2,5mm.....	60
Bild 4.15: Probe Flachs – 2,0 – 1 unmittelbar vor Einsetzen in die Prüfmaschine. ...	61
Bild 4.16: Probe Flachs – 2,0 – 1 unmittelbar nach Herausnehmen aus der Prüfmaschine.....	61
Bild 4.17: Probe Flachs – 2,0 – 1 unmittelbar vor Einsetzen in die Prüfmaschine. ...	61
Bild 4.18: Probe Flachs – 2,5 – 1 unmittelbar nach Herausnehmen aus der Prüfmaschine.....	61
Bild 4.19: Kraft-Weg-Diagramm von Jute-Garn von 2,5 mm.....	62
Bild 4.20: Probe Jute – 2,5 – 1 unmittelbar nach Herausnehmen aus der Prüfmaschine.....	63
Bild 4.21: Probe Jute – 2,5 – 2 unmittelbar nach Herausnehmen aus der Prüfmaschine.....	63
Bild 4.22: Kraft-Weg-Diagramm von Hanf-Schnüren 1,0 mm	64
Bild 4.23: Kraft-Weg-Diagramm von Hanf-Schnüren 1,5 mm	64
Bild 4.24: Kraft-Weg-Diagramm von Hanf-Seil 1,0 mm	65
Bild 4.25: Kraft-Weg-Diagramm, Vergleich von Hanf-Schnüren mit 2,0mm und 2,5mm	66
Bild 4.26: Bruchufer der Probe Hanf – 1,0 – 1	67
Bild 4.27: Bruchufer der Probe Hanf – 1,0 – 3.....	67
Bild 4.28: Kraft-Weg-Diagramm von Sisal-Schnüren 2,0 mm	68
Bild 4.29: Kraft-Weg-Diagramm von Sisal-Schnüren 2,5 mm	68
Bild 4.30: Probe Sisal – 2,0 – 3 in der Zugmaschine, kurz nach Reißen der Primärfasern.	69

Bild 4.31: Probe Sisal – 2,5 – 1 unmittelbar nach Herausnehmen aus der Prüfmaschine.....	70
Bild 4.32: Versuchsaufbau für die Zugversuche für Riss Mode I.	73
Bild 4.33: Verteilung der Fasern im Versuchskörper.	74
Bild 4.34: Last-Verschiebungs-Diagramm der Lehmörtel-Proben.....	76
Bild 4.35: Diagrammbeispiel	78
Bild 4.36: Idealisertes Teilstück einer Matrix mit Faser unter Zugbelastung	79
Bild 4.37: Last-Verschiebungs-Diagramm für Einzelstein-Versuche mit Lehm-Putz.	80
Bild 4.38: Bruchufer eines Versuchskörpers während der Belastung	82
Bild 4.39: Last-Verschiebungs-Diagramm von Flachfasern in Kalk-Zementmatrix	83
Bild 4.40: Last-Verschiebungs-Diagramm von Sisalfasern in Kalk-Zementmatrix	83
Bild 4.41: Last-Verschiebungs-Diagramm von Hanf- & Jutefasern in Kalk-Zementmatrix.....	84
Bild 4.42: Vergleich der maximalen Zugkraft und der durchschnittlichen Reibungskraft während der Beanspruchung.....	87
Bild 4.43: Vergleich der Reibungsspannung während der Beanspruchung	87
Bild 4.44: Versuchsaufbau für die Schubversuche für Riss Mode II	89
Bild 4.45: Versuchsaufbau für die Schubversuche für Riss Mode II in der Prüfhalle	90
Bild 4.46: Webmuster für die Naturfasergewebe	91
Bild 4.47: Diagrammbeispiel	93
Bild 4.48: Last-Verschiebungs-Diagramm von Probe 1	94
Bild 4.49: Anordnung der Fasern während der Versuchsvorbereitung von Probe 2	95
Bild 4.50: Rissbildung bei Probe 2 (links) und Probe 3 (rechts) an der Vorderseite während der Nachbruchphase.....	95
Bild 4.51: Last-Verschiebungs-Diagramm von Probe 2 & 3.....	96
Bild 4.52: Applikation des Hanf-Gewebes von Probe 4.	97
Bild 4.53: Last-Verschiebungs-Diagramm von Probe 4 – 6	98
Bild 4.54: Rissbilder von Probe 7, Vorder- und Rückseite zur gleichen Zeit.	99
Bild 4.55: Rissbild von Probe 8.....	99
Bild 4.56: Last-Verschiebungs-Diagramm von Proben 7 & 8.....	100
Bild 4.57: Rissbild Probe 9.....	101
Bild 4.58: Last-Verschiebungs-Diagramm von Proben 9 & 10.....	102
Bild 4.59: Vergleich der gemessenen Kraftgrößen der Proben 1 – 10.....	103
Bild 4.60: Vergleich des Arbeitsvermögens der Proben 1 – 10.....	104

Tabellen

Tab. 2.1: Verhaltensbeiwerte nach DIN4149 [1]	12
Tab. 2.2: Übersicht über Rohdichten und Festigkeiten der gängigen Mauersteine [11]	14
Tab. 2.3: Grundwerte der zulässigen Druckspannungen in N/mm ² [19]	14
Tab. 2.4: Übersicht über Zusatzmittel [17]	24
Tab. 2.5: mechanische Eigenschaften verschiedener natürlicher Fasern und synthetischer Fasern [4]	29
Tab. 2.6: Zusammensetzung von verschiedenen Naturfasern (Angaben in %) [4]...	29
Tab. 3.1: Tabellarischer Vergleich Verstärktes und unverstärktes Mauerwerk nach <i>Münich</i> [14]	41
Tab. 4.1: Übersicht über alle zur Anwendung gekommenen Testreihen.....	42
Tab. 4.2: Rezepturen der handgemischten Lehm-Putze.....	49
Tab. 4.3: Rezepturen der maschinengemischten Lehm-Putze.	49
Tab. 4.4: verfeinerte Rezepturen innerhalb eines zweiten Testdurchlaufs.	49
Tab. 4.5: Naturfasern, welche für die Zugversuche eingesetzt wurden.....	55
Tab. 4.6: Vergleich von Flachsschnüren mit 2,0mm und 2,5mm	60
Tab. 4.7: Mechanische Eigenschaften des Jutegarns mit 2,5 mm.....	62
Tab. 4.8: Mechanische Eigenschaften der verschiedenen Hanf-Gezwirne.	65
Tab. 4.9: Mechanische Eigenschaften der verschiedenen Sisal-Gezwirne.	69
Tab. 4.10: Mechanische Eigenschaften aller in dieser Versuchsreihe getesteten Faserarten	71
Tab. 4.11: Versuchsmatrix für die Zugversuche an den Einzelsteinproben.	75
Tab. 4.12: Prismenfestigkeit unter einaxialer Druckbelastung der verwendeten Lehmmischung	75
Tab. 4.13: Mittelwerte der mechanischen Eigenschaften des verwendeten Kalk- Zementputzes	76
Tab. 4.14: Mechanische Eigenschaften der Versuchskörper mit einer Lehmmatrix .	81
Tab. 4.15: Mechanische Eigenschaften in Bezug auf die Bruchlast der Versuchskörper mit einer Zementmatrix	85
Tab. 4.16: Mechanische Eigenschaften in Bezug auf die Reibungskraft der Versuchskörper mit einer Zementmatrix	85
Tab. 4.17: Auswahl der Ergebnisse, der von <i>Wallner</i> geführten Versuche. [22].....	88
Tab. 4.18: Mechanische Eigenschaften des verwendeten Mörtels.....	90
Tab. 4.19: Versuchsmatrix für Drei-Stein-Schubversuche.....	91
Tab. 4.20: Versuchsergebnisse für Probe 1	94
Tab. 4.21: Versuchsergebnisse für Probe 2 & 3.	96
Tab. 4.22: Versuchsergebnisse für Probe 4 & 6.	98

Tabellen

Tab. 4.23: Versuchsergebnisse für Proben 7 & 8.	100
Tab. 4.24: Versuchsergebnisse für Proben 9 & 10.	101

Literatur

- [1] DIN 4149-2005-04: *Bauten in deutschen Erdbebengebieten. Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten*, Normenausschuss im Bauwesen im DIN, Berlin 2005.
- [2] Bachmann, H.: *Erdbebensicherung von Bauwerken, 2., überarbeitete Auflage*, Birkhäuser, 2002.
- [3] Bachmann, H., Paulay, Moser: *Erdbebenbemessung von Stahlbetonhochbauten*, Birkhäuser, 1990.
- [4] Bismarck, A., Mishra, S., Lampke, T.: *Plant Fibers as Reinforcement for Green Composites*, S.37-108, in *Natural Fibers, Biopolymers and Biocomposites*, edited by Mohanty, A., Misra, M., Drzal, L., CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2005.
- [5] Carus, M.: *Mart- und Preisentwicklung bei Naturfasern und Naturfaserverbundwerkstoffen*, in *Faserpflanzen aus ökologischem Anbau, Anbau – Verarbeitung – Markt*, herausgegeben von Grundmann E., Tagungsband zur Fachtagung am 19.Juni 2007 in Kassel-Wilhelmshöhe, Schriftenreihe IBDF, Band 20, Verlag Lebendige Erde, Darmstadt, 2007.
- [6] CATDAT, Daniell, J., Vervaeck, A.: *Damaging Earthquakes Database 2011 – The Year in Review*. Center for Disaster Management and Risk Reduction Technology, Karlsruhe, 2012.
- [7] Daniell, J., Wenzel, F., Khazai, B., Vervaeck, A.: *A Country-by-Country Building Inventory and Vulnerability Index for Earthquakes in comparison to historical CATDAT Damaging Earthquake Database losses*, Australian Earthquake Engineering Society 2011 Conference, 18.-20. Nov. 2011, Barossa Valley, South Australia, 2011.
- [8] Drysdale, R., Hamid A., Baker, L.: *Masonry Structures – Behaviour & Design*, Prentice Hall Inc., New Jersey, 1994
- [9] Frank, W.: *Hanf & Co.: die Renaissance der heimischen Faserpflanzen*. Hrsg.: Katalyse - Institut für angewandte Umweltforschung – Göttingen, Verlag Die Werkstatt, 1996.
- [10] Hilsdorf, H.: *Untersuchungen über die Grundlagen der Mauerwerkfestigkeit. Bericht Nr. 40*, Materialprüfamt für das Bauwesen TH München, 1965.
- [11] Jäger, G. und Marzahn, W.: *Mauerwerk Bemessung nach DIN 1053-100*. Ernst & Sohn, 2010.

- [12] Mann, W., Müller, H.: *Schubtragfähigkeit von gemauerten Wänden und Voraussetzung für das Entfallen des Windnachweises* in Mauerwerk-Kalender 10, S.95 – 114, Hrsg. P. Funk, Ernst & Sohn, Berlin, 1985.
- [13] Minke, G.: *Lehmbau-Handbuch – Der Baustoff Lehm und seine Anwendung*, ökobuch Verlag, Staufen bei Freiburg, 1994.
- [14] München, J. C.: *Hybride Multidirektionaltexilien zur Erdbebenverstärkung von Mauerwerk - Experimentelle und numerische Untersuchungen mittels eines Makromodells*. Dissertation, Universität Karlsruhe, 2010.
- [15] Müller, H. S.: *Baustoffkunde und Konstruktionsbaustoffe*. Skript, Universität Karlsruhe, 2009/2010.
- [16] Raschke, M.: *Die Korrelation zwischen Erdbebenstärke und Bauwerkschaden und deren Anwendung in der Risikoanalyse*, Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, Shaker Verlag, Aachen, 2004.
- [17] Ross, H., Stahl, F.: *Praxis-Handbuch Putz 3.Auflage, Stoffe, Verarbeitung, Schadensvermeidung*, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co. KG, Köln, 2003.
- [18] Schermer, D.: *Verhalten von unbewehrtem Mauerwerk unter Erdbebenbeanspruchung*, Dissertation, Technische Universität München, 2003.
- [19] Schneider: *Bautabellen für Ingenieure – mit Berechnungshinweisen und Beispielen*, 19.Auflage, Werner Verlag, 2010.
- [20] Schwegler, G.: *Verstärken von Mauerwerk mit Faserverbundwerkstoffen in seismisch gefährdeten Zonen*, Bericht 229, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Dübendorf, 1994.
- [21] Völker, U., Brückner, K.: *Von der Faser zum Stoff – Textile Werkstoff- und Warenkunde*, Hrsg. Dr. Felix Brückner, Handwerk und Technik, Hamburg, 2001.
- [22] Wallner, C.: *Erdbebengerechtes Verstärken von Mauerwerk durch Faserverbundwerkstoffe – experimentelle und numerische Untersuchungen*. Dissertation, Universität Karlsruhe, 2007.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich noch allen herzlichst danken, die mir während meinem Studium und während der Anfertigung dieser Arbeit beigestanden haben.

Besonders möchte ich auch Herrn Moritz Urban (Institut für Massivbau und Baustofftechnologie) danken, der mich während der Bearbeitung dieser Arbeit betreute und die Anregung zu diesem Thema hatte und mir stets mit Rat, Tat und Lehm zur Seite stand. Ebenso möchte ich Herrn Prof. Dr. Stempniewski (Lehrstuhl für Massivbau) danken, dass ich an seinem Institut diese Arbeit anfertigen konnte, für seine Zeit während seinen Sprechstunden und als Mentor während meinem Studium. Dank gilt auch den Mitarbeitern der Materialprüfungsanstalt Karlsruhe, welche mich bei der Durchführung der Versuche unterstützten.

Darüber hinaus gilt es auch all meinen Freunden und Kommilitonen zu danken, für den fachlichen Austausch, den Spaß während und nach den Vorlesungen, die gemeinsame Zeit und die wertvolle Freundschaft, die auch nach dem Studium hoffentlich erhalten bleibt.

Mein größter Dank gilt natürlich meiner Familie, insbesondere meinen Eltern für die Geduld und Unterstützung während des Studiums und der Zeit als ich diese Arbeit anfertigte. Dass sie immer ein offenes Ohr hatten und sich die letzten vier Jahre stets anhörten mit welchen Plänen ich meine Zukunft gestalten möchte, bis ich schließlich bei dieser Arbeit ankam.

Ohne meinen Vater und meine Mutter wäre ich heute nicht dort, wo ich jetzt bin.

Vielen Dank Euch allen.

Anhang A: Vergleich der Fasertypen

Übersicht über alle Einzelversuche:

Flachs – 2,0 mm

Bezeichnung	F2 - 1	F2 - 2	F2 - 3
Max. Kraft	73,77 N	57,10 N	64,35 N
Spannung	2350,83 N/mm ²	1936,15 N/mm ²	1813,05 N/mm ²
E-Modul	0,34 N/mm ²	0,39 N/mm ²	0,39 N/mm ²
Energiedissipation	0,2318 Nm	0,1794 Nm	0,2022 Nm

Flachs - 2,5 mm

Bezeichnung	F2,5 - 1	F2,5 - 2	F2,5 - 3
Max. Kraft	78,02 N	71,95 N	66,25 N
Spannung	2740,61 N/mm ²	2290,72 N/mm ²	2491,44 N/mm ²
E-Modul	1,25 N/mm ²	0,81 N/mm ²	0,88 N/mm ²
Energiedissipation	0,3830 Nm	0,3532 Nm	0,3252 Nm

Hanf - 1,0 mm

Bezeichnung	H1 - 1	H1 - 2	H1 - 3
Max. Kraft	0,09 N	0,10 N	0,08 N
Spannung	110,35 N/mm ²	127,64 N/mm ²	108,12 N/mm ²
E-Modul	1402,67 N/mm ²	1565,01 N/mm ²	1641,33 N/mm ²
Energiedissipation	0,3555 Nm	0,3853 Nm	0,2653 Nm

Hanf-Seil - 1,0 mm

Bezeichnung	H1S - 1	H1S - 2
Max. Kraft	0,22 N	0,22 N
Spannung	283,32 N/mm ²	282,08 N/mm ²
E-Modul	2342,82 N/mm ²	2677,51 N/mm ²
Energiedissipation	0,9890 Nm	1,1155 Nm

Hanf - 1,5 mm

Bezeichnung	H1,5 - 2	H1,5 - 3
Max. Kraft	0,21 N	0,23 N
Spannung	120,06 N/mm ²	132,40 N/mm ²
E-Modul	3635,60 N/mm ²	4009,37 N/mm ²
Energiedissipation	1,1286 Nm	1,1411 Nm

Jute 2,5 mm

Bezeichnung	J2,5 - 1	J2,5 - 2	J2,5 - 3
Max. Kraft	0,27 N	0,19 N	0,19 N
Spannung	84,79 N/mm ²	59,80 N/mm ²	61,86 N/mm ²
E-Modul	2519,48 N/mm ²	2410,71 N/mm ²	2325,38 N/mm ²
Energiedissipation	0,4958 Nm	0,3961 Nm	0,3682 Nm

Sisal 2,0 mm

Bezeichnung	S2 - 1	S2 - 2	S2 - 3
Max. Kraft	0,65 N	0,61 N	0,55 N
Spannung	207,12 N/mm ²	193,50 N/mm ²	174,02 N/mm ²
E-Modul	4882,65 N/mm ²	4657,02 N/mm ²	4368,74 N/mm ²
Energiedissipation	1,7595 Nm	1,8357 Nm	2,0537 Nm

Sisal - 2,5 mm

Bezeichnung	S2,5 - 1	S2,5 - 2	S2,5 - 3
Max. Kraft	0,79 N	0,85 N	0,63 N
Spannung	160,75 N/mm ²	173,33 N/mm ²	127,79 N/mm ²
E-Modul	3814,67 N/mm ²	4112,58 N/mm ²	2326,70 N/mm ²
Energiedissipation	2,7897 Nm	3,4173 Nm	3,3887 Nm

Direkter Vergleich der mechanischen Eigenschaften der Fasertypen:

E-Modul	Flachs		Hanf			Jute	Sisal	
	Schnur	Schnur	Seil	Nähgarn	Schnur	Garn	Seil	Schnur
	2,00 mm	2,50 mm	1,00 mm	1,00 mm	1,50 mm	2,50 mm	2,00 mm	2,50 mm
	2033 N/mm ²	2507 N/mm ²	2510 N/mm ²	1536 N/mm ²	3822 N/mm ²	1547 N/mm ²	4636 N/mm ²	3417 N/mm ²
Flachs - 2,00 mm	100,00%	123,32%	123,45%	75,56%	187,99%	76,12%	228,01%	168,10%
Flachs - 2,50 mm	81,09%	100,00%	100,10%	61,27%	152,44%	61,73%	184,88%	136,31%
Hanf – 1,00 mm	81,00%	99,90%	100,00%	61,20%	152,28%	61,66%	184,69%	136,17%
Hanf – 1,00 mm	132,35%	163,22%	163,39%	100,00%	248,81%	100,75%	301,77%	222,48%
Hanf – 1,50 mm	53,19%	65,60%	65,67%	40,19%	100,00%	40,49%	121,29%	89,42%
Jute – 2,50 mm	131,37%	162,00%	162,17%	99,26%	246,95%	100,00%	299,52%	220,82%
Sisal – 2,00 mm	43,86%	54,09%	54,14%	33,14%	82,45%	33,39%	100,00%	73,72%
Sisal – 2,50 mm	59,49%	73,36%	73,44%	44,95%	111,83%	45,29%	135,64%	100,00%

max. Zugspannung	Flachs		Hanf			Jute	Sisal	
	Schnur	Schnur	Seil	Nähgarn	Schnur	Garn	Seil	Schnur
	2,00 mm	2,50 mm	1,00 mm	1,00 mm	1,50 mm	2,50 mm	2,00 mm	2,50 mm
	65 N/mm ²	72 N/mm ²	282 N/mm ²	115 N/mm ²	124 N/mm ²	44 N/mm ²	191 N/mm ²	153 N/mm ²
Flachs - 2,00 mm	100,00%	110,76%	434,44%	177,29%	191,80%	67,68%	294,36%	236,59%
Flachs - 2,50 mm	90,29%	100,00%	392,24%	160,07%	173,17%	61,11%	265,77%	213,61%
Hanf – 1,00 mm	23,02%	25,49%	100,00%	40,81%	44,15%	15,58%	67,76%	54,46%
Hanf – 1,00 mm	56,40%	62,47%	245,04%	100,00%	108,18%	38,18%	166,03%	133,44%
Hanf – 1,50 mm	52,14%	57,75%	226,51%	92,44%	100,00%	35,29%	153,48%	123,35%
Jute – 2,50 mm	147,75%	163,64%	641,86%	261,94%	283,37%	100,00%	434,90%	349,55%
Sisal – 2,00 mm	33,97%	37,63%	147,59%	60,23%	65,16%	22,99%	100,00%	80,37%
Sisal – 2,50 mm	42,27%	2,11%	8,27%	3,38%	3,65%	1,29%	5,60%	4,50%

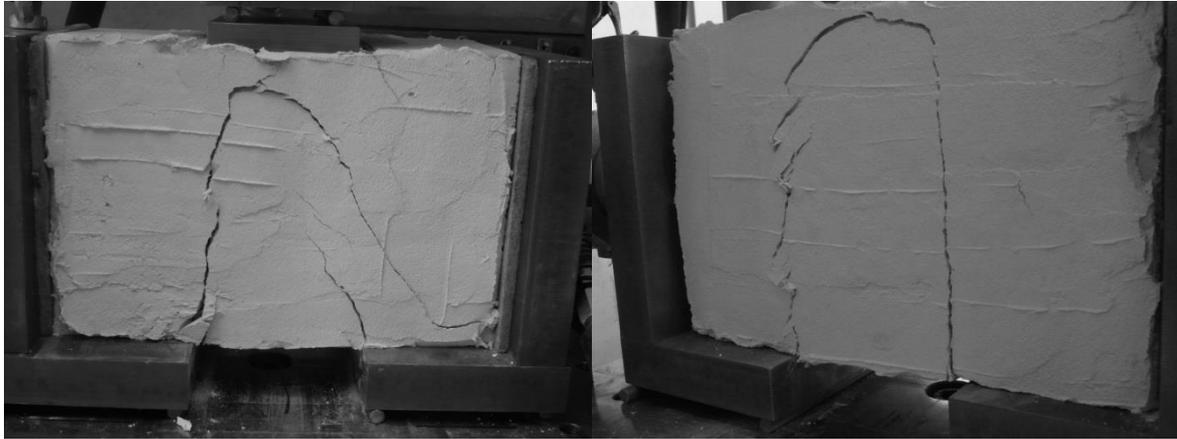
Anhang A: Vergleich der Fasertypen

Max. Zugkraft	Flachs		Hanf			Jute	Sisal	
	Schnur	Schnur	Seil	Nähgarn	Schnur	Garn	Seil	Schnur
	2,00 mm	2,50 mm	1,00 mm	1,00 mm	1,50 mm	2,50 mm	2,00 mm	2,50 mm
	204,43 N	353,79 N	222,03 N	90,61 N	220,55 N	216,20 N	601,77 N	755,73 N
Flachs - 2,00 mm	100,00%	173,06%	108,61%	44,32%	107,88%	105,76%	294,36%	369,67%
Flachs - 2,50 mm	57,78%	100,00%	62,76%	25,61%	62,34%	61,11%	170,09%	213,61%
Hanf – 1,00 mm	92,07%	159,34%	100,00%	40,81%	99,33%	97,37%	271,03%	340,37%
Hanf – 1,00 mm	225,62%	390,45%	245,04%	100,00%	243,41%	238,60%	664,12%	834,03%
Hanf – 1,50 mm	92,69%	160,41%	100,67%	41,08%	100,00%	98,03%	272,84%	342,65%
Jute – 2,50 mm	94,56%	163,64%	102,70%	41,91%	102,01%	100,00%	278,34%	349,55%
Sisal – 2,00 mm	33,97%	58,79%	36,90%	15,06%	36,65%	35,93%	100,00%	125,58%
Sisal – 2,50 mm	27,05%	46,81%	29,38%	11,99%	29,18%	28,61%	79,63%	100,00%

Energie- dissipation	Flachs		Hanf			Jute	Sisal	
	Schnur	Schnur	Seil	Nähgarn	Schnur	Garn	Seil	Schnur
	2,00 mm	2,50 mm	1,00 mm	1,00 mm	1,50 mm	2,50 mm	2,00 mm	2,50 mm
	0,375 Nm	0,978 Nm	1,052 Nm	0,335 Nm	1,135 Nm	0,420 Nm	1,883 Nm	3,198 Nm
Flachs - 2,00 mm	100,00%	261,12%	280,40%	89,36%	302,40%	111,92%	501,75%	852,32%
Flachs - 2,50 mm	38,30%	100,00%	107,38%	34,22%	115,81%	42,86%	192,16%	326,41%
Hanf – 1,00 mm	35,66%	93,12%	100,00%	31,87%	107,85%	39,92%	178,94%	303,97%
Hanf – 1,00 mm	111,91%	292,22%	313,79%	100,00%	338,42%	125,25%	561,51%	953,83%
Hanf – 1,50 mm	33,07%	86,35%	92,72%	29,55%	100,00%	37,01%	165,92%	281,85%
Jute – 2,50 mm	89,35%	233,31%	250,53%	79,84%	270,19%	100,00%	448,31%	761,54%
Sisal – 2,00 mm	19,93%	52,04%	55,88%	17,81%	60,27%	22,31%	100,00%	169,87%
Sisal – 2,50 mm	11,73%	30,64%	32,90%	10,48%	35,48%	13,13%	58,87%	100,00%

Anhang B: Rissbilder bei den Schubversuchen

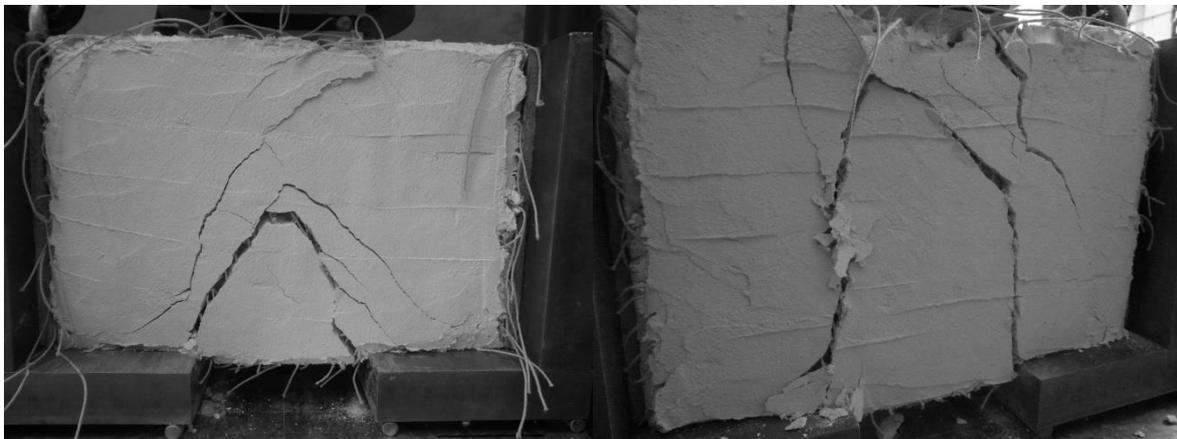
Probe 1 (Vorder- & Rückseite)



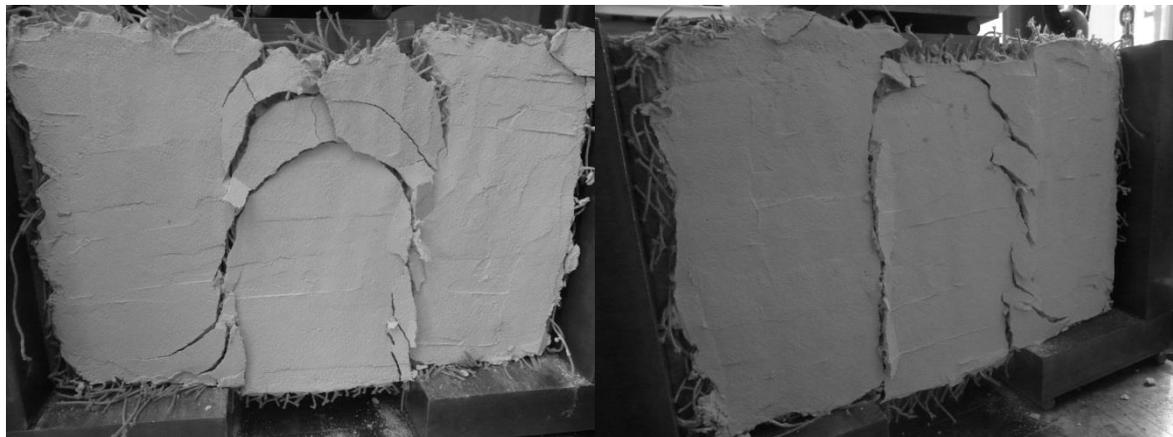
Probe 2 (Vorder- & Rückseite)



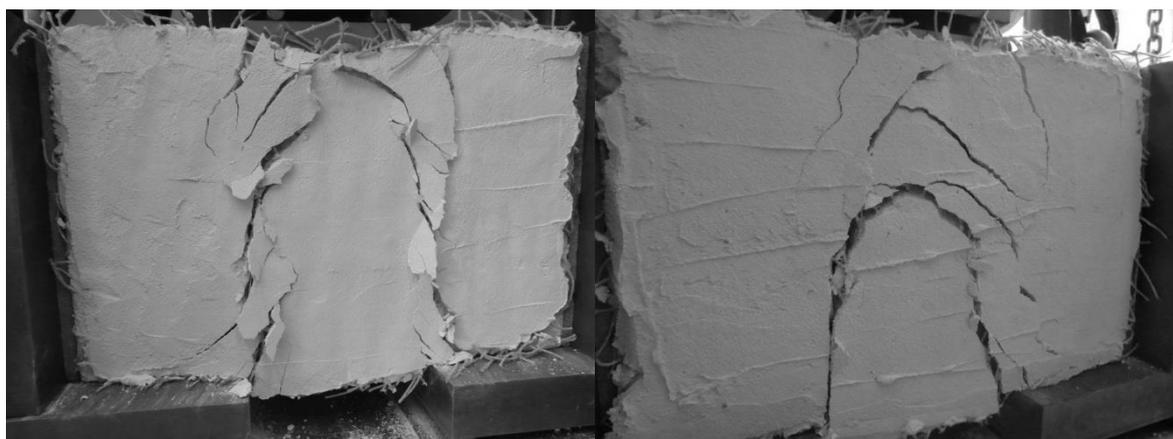
Probe 3 (Vorder- & Rückseite)



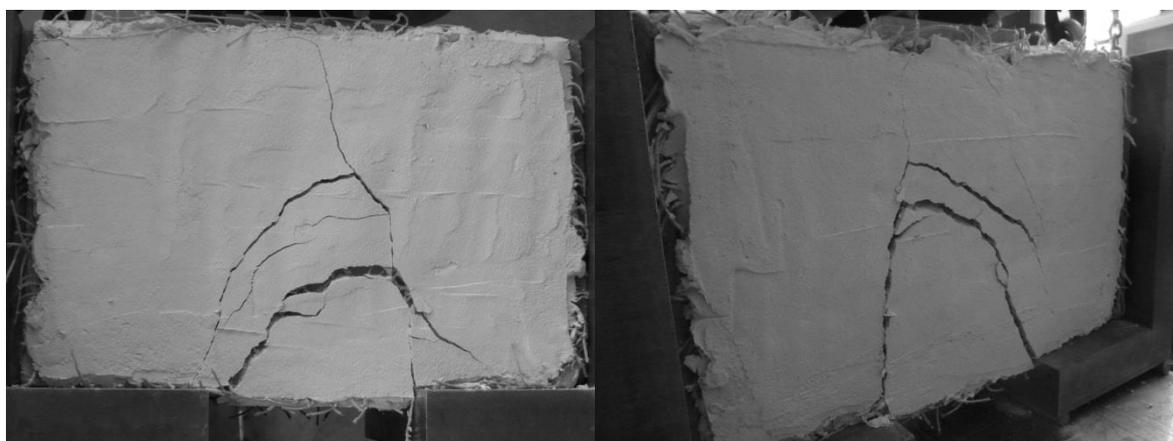
Probe 4 (Vorder- & Rückseite)



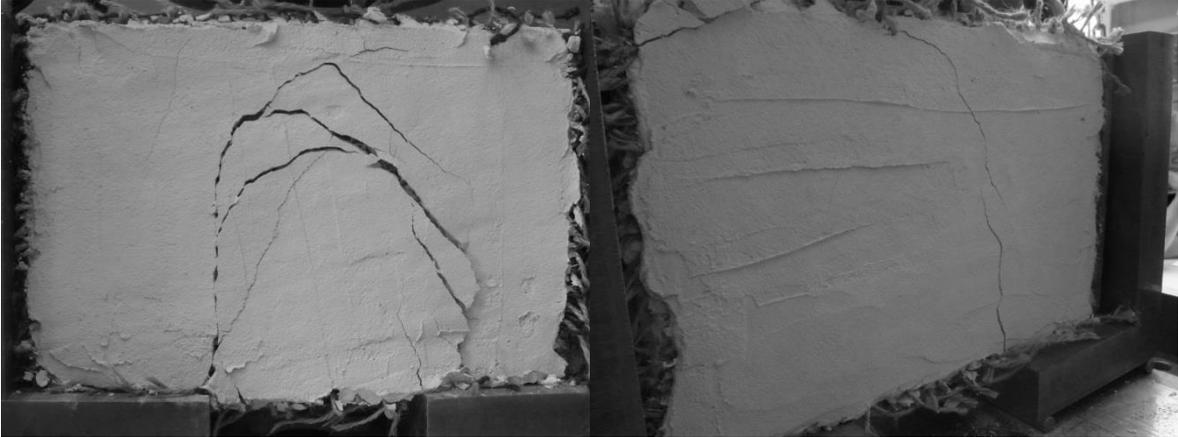
Probe 5 (Vorder- & Rückseite)



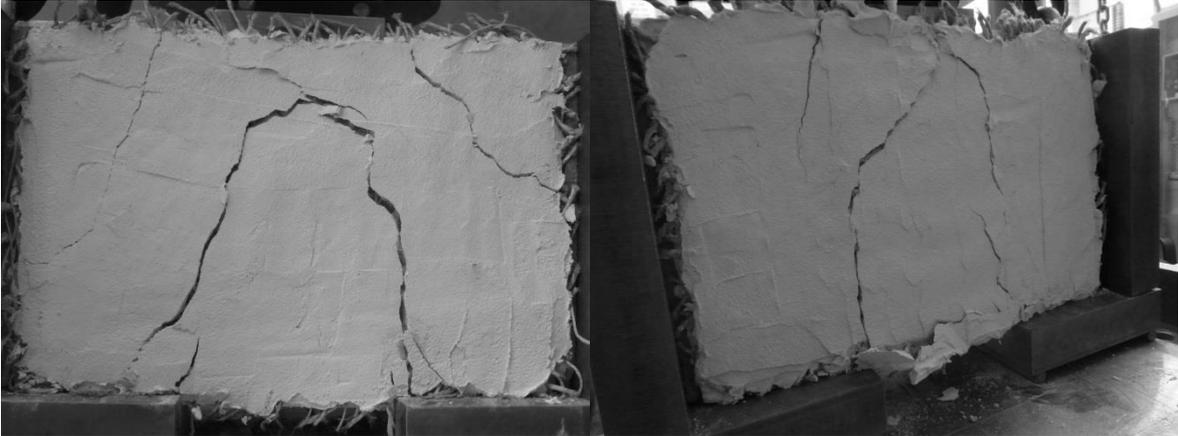
Probe 6 (Vorder- & Rückseite)



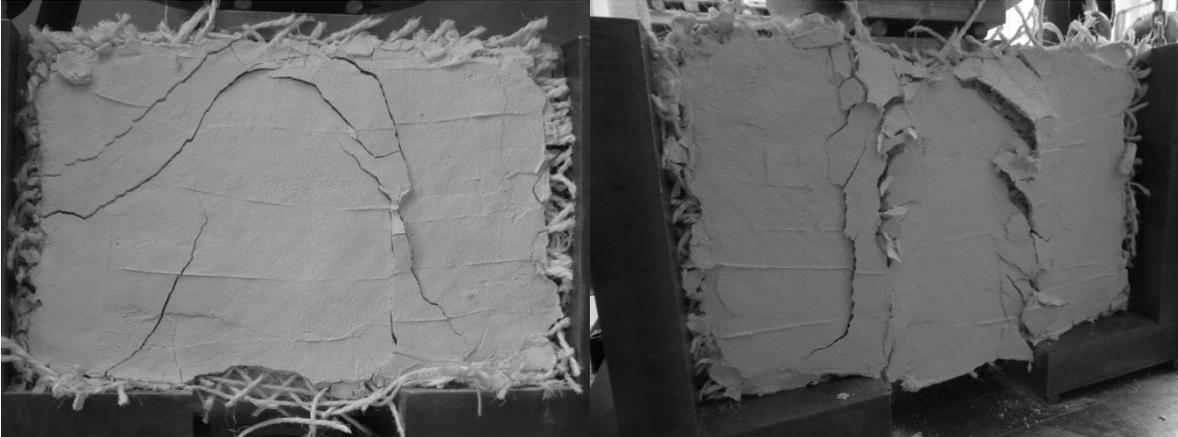
Probe 7 (Vorder- & Rückseite)



Probe 8 (Vorder- & Rückseite)



Probe 9 (Vorder- & Rückseite)



Probe 10 (Vorder- & Rückseite)

