

Abschlussbericht

„Grundlagen zur bauaufsichtlichen Anerkennung der Strohballenbauweise- Weiterentwicklung der lasttragenden Konstruktionsart und Optimierung der bauphysikalischen Performance“, DBU, Az. 22430



Prof. Dr.-Ing. Ireneusz Danielewicz, Dr. rer. nat. Cornelia Fitz, Dr. rer. nat. Wolfgang Hofbauer, Dipl.- Ing. Marc Klatecki, Dr.-Ing. Benjamin Krick, Dipl.-Biol. Nicole Krueger, Dr.-Ing. Martin Krus, Prof. em. Dr.-Ing. Gernot Minke, Dr.-Ing. Frank Otto, Dipl.- Ing. Architekt Dirk Scharmer, Dipl.-Ing. Wolfgang Teuber

Holzkirchen, Kassel, Magdeburg, Oberursel, Sieben Linden, 24. September 2008

Fachverband Strohballenbau Deutschland e.V., Sieben Linden 1, 38486 Poppau
Tel. 04131- 2278649, Email: info@fasba.de, Web. www.fasba.de

Az	22430-25	Referat	25	Fördersumme	124.924,00 €
----	-----------------	---------	-----------	-------------	---------------------

Antragstitel	Grundlagen zur bauaufsichtlichen Anerkennung der Strohballenbauweise - Weiterentwicklung der lasttragenden Konstruktionsart und Optimierung der bauphysikalischen Performance
---------------------	--

Stichworte	Ökobau, Baustoff , Bauteil
-------------------	----------------------------

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
35,5 Monate	15.07.2005	30.06.2008	1

Zwischenberichte	halbjährlich
------------------	--------------

Bewilligungsempfänger	Fachverband Strohballenbau e.V. Sieben Linden 1 38486 Poppau	Tel	04131 / 727804
		Fax	04131 / 727805
		Projektleitung	Dirk Scharmer

Bearbeiter

Kooperationspartner	Hochschule Magdeburg-Stendel, Magdeburg Zentrum für Umweltbewusstes Bauen, Kassel (ZUB) Mit dem Forschungslabor für Experimentelles Bauen, Kassel (FEB)
----------------------------	---

Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens

Trotz Vorliegens einer allg. bauaufsichtlichen Zulassung für Strohballen als Dämmstoff fehlen wissenschaftlich anerkannte Nachweise für viele wünschenswerte und praktisch bereits erprobte Strohballenkonstruktionen. Mit Hilfe des vorliegenden Projekts soll ein möglichst großer Teil des anstehenden Untersuchungsbedarfs abgedeckt werden.

Schwerpunkte des Projektes bilden die Untersuchung der lasttragenden Bauweise, die Ermittlung der hygrothermischen Eigenschaften und der Schimmelbeständigkeit von Strohballenbauteilen. Darüber hinaus soll mit Hilfe von normgerechten Prüfungen in den Bereichen Brandschutz, Wärmeschutz und Schallschutz die baurechtliche Anwendbarkeit der geprüften Bauteile unter entsprechenden baurechtlichen Anforderungen dargestellt werden.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Untersuchung der lasttragenden Strohballenbauweise: Mit Hilfe von verschiedenen Belastungstests wurden die elasto- mechanischen Kennwerte von kleinen und großen Strohballen/ -bauteilen ermittelt.

Untersuchung der hygrothermischen und mikrobiologischen Eigenschaften: Mit Hilfe von rechnerischen Simulationen wurde das hygrothermische Verhalten von Strohballenbauteilen und die mikrobielle Empfindlichkeit bestimmt. Mit Hilfe von realbewitterten Strohballenwänden wurde das reale hygrothermische und mikrobielle Verhalten von Strohballenwänden und deren Wetterfestigkeit am ungünstigen Standort Holzkirchen untersucht. Mit Hilfe der Lagerung von mikrobiell beimpften Strohproben in Klimaschränken wurde labormäßig die Schimmelresistenz von Stroh ermittelt. Mit Hilfe von Feuchte- Temperatur- Messtechnik wurde das reale hygrothermische Verhalten von gebauten Strohballenhäusern an verschiedenen Klimastandorten untersucht.

Untersuchung verschiedener bauphysikalischer und bautechnischer Eigenschaften: Mit Hilfe von bauaufsichtlich anerkannten Nachweisprüfungen wurden die Eigenschaften von Strohballen/ -bauteilen in den Bereichen Brandschutz, Wärmeschutz und Schallschutz ermittelt: Die Feuerwiderstandsdauer, das Brandverhalten, die Wärmeleitfähigkeit, der Wärmedurchlasswiderstand und das Luftschalldämmmaß.

Ergebnisse und Diskussion

Projektbereich „Lasttragendes Bauen“: Es konnte entsprechend der ursprünglichen Zielsetzungen nachgewiesen werden, dass Strohballen und Strohballenbauteile vertikalen Lasten in entsprechend konzipierten ein- bis eineinhalb- geschossigen Gebäuden standhalten können. Dabei wurde festgestellt, dass Kleinballen für kleinere und leichtere Gebäude geeignet sind und Großballen demgegenüber etwas höheren Belastungen standhalten. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Bauteile mindestens mit der 2-fachen Last der späteren Gebrauchslast vorzuspannen sind. Des Weiteren konnte innerhalb der Laufzeit des vorliegenden Projektes nicht das genaue Langezeitverhalten von Relaxation und Kriechen ermittelt werden. Nach den hier gewonnenen Erkenntnissen sind lasttragende Strohbauteile mit weiteren Hilfsbauteilen aus Holz oder Metall gegen Knicken und Beulen zu sichern. Eine Aussteifungsleistung der Strohballenwände konnte auch nach Verputzen der Wände nicht ermittelt werden. Im Bereich lasttragendes Bauen besteht ein erheblicher weiterer Untersuchungsbedarf. Die Qualität der hier gewonnenen Erkenntnisse lässt es nicht, wie erhofft zu diese direkt als Grundlage für die Verbesserung der bauaufsichtlichen Anerkennung in diesem Bereich zu verwenden.

Projektbereich „Hygrothermische Eigenschaften“: Die grundsätzliche feuchtetechnische Eignung der Bauweise wurde bestätigt. Von den als tauglich erhofften Bauteilaufbauten konnten einige jedoch noch nicht nachgewiesen werden. Einige in der Praxis bislang als tauglich eingeschätzte Bauteilaufbauten müssten nach den gewonnenen Erkenntnissen als bedenklich eingestuft werden. Aufgrund der soliden Praxiserfahrungen sollten weiteren Untersuchungen insbesondere einerseits das Ziel verfolgen die im vorliegenden Projekt umgesetzte Untersuchungsmethodik weiterzuentwickeln andererseits das Verhalten der Strohballenwände in Praxis wissenschaftlich und statistisch zuverlässig zu beurteilen.

Projektbereich: „Bautechnische Eigenschaften“: Die Ergebnisse der Untersuchungen im Bereich Brandschutz erreichen im vollen Umfang das erhoffte Niveau. Eine mit 8mm Lehmputz verkleidete Strohballenwand kann als schwerentflammbar und feuerhemmend klassifiziert werden.

Die Ergebnisse im Bereich Wärmeschutz erreichen überwiegend das erhoffte Niveau. Die guten Dämmeigenschaften von Strohballen wurden bestätigt. Mit Hilfe der geringen Anzahl der möglichen Wärmeleitfähigkeitstests konnte jedoch kein einheitliches Erklärungsbild der Werteverianz bei verschiedenen Rohdichten und höheren relativen Feuchten erreicht werden. Die direkte Prüfung des Wärmedurchlasswiderstands an einem Realbauteil zeigt keine vollständige Übereinstimmung mit der rechnerischen Ermittlung dieses Wertes aus der gemessenen Wärmeleitfähigkeit. Hier sind weitere Prüfungen in größerer Anzahl erforderlich, des Weiteren muss untersucht werden, welche Einflussfaktoren bei der Herstellung der Ballen auf die Dämmleistung einwirken.

Die Ergebnisse im Bereich Schallschutz liegen im erwarteten Bereich. Mit Strohballen lassen sich Außenwände mit durchschnittlichen Anforderungen an das Luftschalldämmmaß erstellen. Mit Hilfe von weiteren Untersuchungen könnten an dieser Stelle Optimierungen erreicht werden.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Zielsetzungen, Inhalte und Ergebnisse des Vorhabens wurden auf diversen Veranstaltungen, Tagungen, Seminaren und einigen Fachveröffentlichungen einer breiten Öffentlichkeit präsentiert. Neben kleineren Seminaren wurden auch Tagungen teilweise mit internationalen Teilnehmern veranstaltet. Hervorzuheben ist hierbei insbesondere das europäische Strohballenbautreffen im August 2007 im Ökodorf Sieben Linden mit über 150 Teilnehmern aus 16 Nationen. Nach Abschluss des Projektes sind weitere Veröffentlichungen geplant.

Fazit

Das vorliegende Projekt konnte im Wesentlichen wie erwartet durchgeführt werden. Die Qualität der Ergebnisse hat nicht in allen Bereichen das erhoffte Niveau erreicht. Weiterer Untersuchungsbedarf ist im Laufe des Projektes deutlich geworden und soll in weiteren Vorhaben abgedeckt werden. Hierbei sind insbesondere die Bereiche lasttragendes Bauen und Hygrothermische Eigenschaften zu nennen. Neben weiteren Tests und Prüfungen sollten die bauaufsichtliche Anerkennung an dieser Stelle weiterentwickelt werden. Im Zuge der zugenommenen Klimaschutzdiskussion sollten in zukünftigen Vorhaben die Bereiche Ökobilanz, Passivhaustauglichkeit, Dämmoptimierung ebenfalls Berücksichtigung finden.

Abschlussbericht „Grundlagen zur bauaufsichtlichen Anerkennung der Strohballenbauweise-
Weiterentwicklung der lasttragenden Konstruktionsart und Optimierung der bauphysikalischen
Performance“ , gefördert von DBU, Az. 22430

Der vorliegende Bericht ist das Ergebnis der Zusammenarbeit folgender Beteiligten:

Projektträger:

Fachverband Strohballenbau Deutschland e.V.
Sieben Linden 1, D- 38486 Poppau, www.fasba.de

Projektleitung:

Dipl.- Ing. Architekt Dirk Scharmer
In de Masch 6, D- 21394 Südergellersen, Tel. 04131- 727804, Email: info@wand4.de

Projektpartner:

1. Hochschule Magdeburg- Stendal
Breitscheidstr. 2, D- 39114 Magdeburg, Tel. 0391- 886 4170
Projektbereich A1: Lastversuche an Großballen: Prof. Dr.-Ing. I. Danielewicz

2. Zentrum für Umweltbewusstes Bauen e.V. (ZUB) an der Universität Kassel
Gottschalkstr. 28a, D- 34127 Kassel, Tel. 0561-804 3189
Projektbereich A2 Lastversuche an Kleinballen: Forschungslabor für
Experimentelles Bauen (FEB), Prof. em. Dr.-Ing. Gernot Minke, Dr.-Ing. Benjamin Krick
Projektbereich B1 Hygrothermisches Verhalten
Dr.-Ing. Frank Otto, Dipl.- Ing. Marc Klatecki

Beauftragte Einrichtungen und Institute

1. Fraunhofer Institut für Bauphysik Holzkirchen
Fraunhoferstr. 10, D- 83626 Valley, Tel. 08024-643-0
Projektbereich B2: Hygrothermische Verhalten und Mikrobiologie
Dr. rer. nat. Cornelia Fitz
Dr.-Ing. M. Krus
Dr. rer. nat. Wolfgang Hofbauer
Dipl.-Biol. Nicole Krueger

2. Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. in München
Wärmeleitfähigkeit und Wärmedurchlasswiderstand
Lochhamer Schlag 4, D-82166 Gräfelfing, Tel. 089-858 00-0
Dipl. Phys. Stefan Sieber

3. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (IBMB) / Materialprüfungsanstalt für das
Bauwesen (MPA), Beethovenstr. 52, 38106 Braunschweig, Tel. 0531-5400
Brandverhalten und Feuerwiderstand
Dipl. Ing. Christian Maertins/ Dipl.- Ing. Nicole Bollmohr

4. Institut für Akustik und Bauphysik (IAB)
Kiesweg 22, 61440 Oberursel, Tel. 06171-75031
Messung der Luftschalldämmung
Ansprechpartner: Dipl.- Ing. W. Teuber



Dank

Der FASBA e.V. dankt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU), die das vorliegende Projekt gefördert hat. Viele der durchgeführten Arbeiten sowie das Aufbringen des fünfzigprozentigen Eigenanteils sind nur durch umfangreiche Spenden und ehrenamtliche Mitarbeit zahlreicher Privatpersonen möglich geworden. Hierfür dankt der FASBA allen SpenderInnen sowie insbesondere den folgenden HelferInnen:

Britta Imhoff, Friederike Fuchs, Burkard Rüger, Olaf Eggers, Ulrich Schmidt, Stefan Ohnesorg, Steffen Knöffler, Günther Schmidt, René Werner, Benjamin Krick, Bettina Keller, Heinz Michael Fischer, Wolf Suhm, Marc Jaspert.

Als Projektleitung bedanke ich mich bei allen Projektbeteiligten für die gute Zusammenarbeit und für das an vielen Stellen über das vereinbarte Maß weit hinausgehende Engagement.

Dipl.- Ing. Architekt Dirk Scharmer [Projektleitung], 24. September 2008



Abschlussbericht „Grundlagen zur bauaufsichtlichen Anerkennung der Strohballenbauweise-
Weiterentwicklung der lasttragenden Konstruktionsart und Optimierung der bauphysikalischen
Performance“ , gefördert von DBU, Az. 22430

Inhaltsverzeichnis

Dank.....	5
Inhaltsverzeichnis.....	6
Abbildungsverzeichnis	13
Tabellenverzeichnis	18
Zusammenfassung des Gesamtprojekts.....	20
1 Einleitung	21
1.1 Strohballenbau: Chancen für Klimaschutz und Nachhaltigkeit.....	21
1.2 Projektbeteiligte.....	21
1.2.1 Fachverband Strohballenbau Deutschland e.V.	21
1.2.2 Hochschule Magdeburg- Stendal, Fachbereich Bauwesen (HS-MD-SDL)	21
1.2.3 Zentrum für umweltbewusstes Bauen (ZUB) in Kassel in Kooperation mit dem Forschungslabor für experimentelles Bauen (FEB)	22
1.2.4 Fraunhofer Institut für Bauphysik.....	22
1.3 Anlass für das Vorhaben und Zielsetzung.....	23
1.4 Projektbereich A „Lasttragender Strohballenbau“	23
1.5 Projektbereich B „Hygrothermische Eigenschaften“	23
1.6 Projektbereich C „Bautechnische Eigenschaften“	24
2 Arbeitsprogramm	24
2.1 Projektbereich A „Lasttragender Strohballenbau“	24
2.2 Projektbereich B „Hygrothermische Eigenschaften“	24
2.3 Projektbereich C „Bautechnische Eigenschaften“	25
3 Ergebnisse	25
3.1 Projektbereich A „Lasttragendes Bauen“	25
3.1.1 Bedeutung für die Praxis:	26
3.2 Projektbereich B „Hygrothermische Eigenschaften“	26
3.2.1 Bedeutung für die Praxis:	27
3.3 Projektbereich C „Bautechnische Eigenschaften“	27
3.3.1 Brandschutz.....	27
3.3.2 Wärmeschutz.....	27
3.3.3 Schallschutz	27
4 Erreichter Sachstand im Vergleich mit den ursprünglichen Zielen	28
4.1 Lasttragendes Bauen	28
4.2 Hygrothermisches Verhalten	28
4.3 Brandschutz	29
4.4 Wärmeschutz	29
4.5 Schallschutz	30
5 Maßnahmen zur Verbreitung	31
2005.....	31
2006.....	31
2007.....	31

2008.....	32
6 Ökologische und ökonomische Bilanzierung der Bauweise.....	33
6.1 Empirische Kurzdarstellung der Baukosten von Strohballenbauten.....	33
6.2 Empirische Kurzdarstellung der Ökobilanz von Strohballenbauten.....	33
A Lastversuche und lasttragender Gebäudetyp	35
A 1 Lastversuche Großballen.....	36
1 Einleitung	37
1.1 Teilprojekt „Lasttragende Strohballenbauweise“	37
1.2 Festlegung des Versuchsprogramms.....	37
1.3 Versuchsprogramm	38
2 Versuchsprogramm, Prüfstände und Messwerterfassung	40
2.1 Realisiertes Versuchsprogramm.....	40
2.2 Verwendete Strohballen	42
2.3 Meßwertaufnahme.....	43
2.4 Prüfstände	44
3 Versuche an Einzelballen.....	47
3.1 Druckversuch (Kurzzeitbelastung) an Einzelballen, Pos 1.1	47
3.2 Kriechversuche an Einzelballen, Pos. 1.2	51
3.3 Relaxationsversuche an Einzelballen, Pos. 1.3.....	52
3.4 Schubversuche an Einzelballen - Pos 1.4	56
3.5 Wiederholte Belastung - Pos. 1.5	57
3.6 Bindegarnausfall unter Gebrauchsbedingungen - Pos. 1.6.....	60
3.7 Simulation eines Wasserschadens, Pos. 1.7 Tabelle 2.....	61
3.8 Druckversuche mit unterschiedlicher Belastungsgeschwindigkeit Pos. 1.8	62
3.9 Druckversuche mit Teilflächenbelastung, Pos. 1.9.....	64
4 Versuche an Wandelementen.....	67
4.1 Vorversuche 2005	67
4.2 Herstellung der Wände.....	68
4.2.1 Wand 1, Pos. 2.1	68
4.2.2 Wand 2, Pos 2.1	70
4.3 Kriechversuche Pos. 2.2.....	72
4.4 Relaxationsversuche Pos. 2.3	72
4.5 Druckversuche an vorgespannten Wänden, Pos. 2.4	74
4.6 Schubversuche an vorgespannten Wänden, Pos. 2.5.....	76
5 Versuche an verputzten Wänden.....	79
5.1 Herstellung der Putzschichten	79
5.2 Druckversuch an der Wand 2, Pos. 2.7	80
5.3 Schubversuche an verputzten Strohballenwänden, Pos 2.6	81
6 Zusammenfassung und Ausblick	83
A 2 Lastversuche Kleinballen	84
1 Einleitung	85
2 Methode	85
2.1 Testprogramm	85
2.2 Begründung zur seitlichen Einspannung von Testballen.....	86
2.3 Definition verwendeter und zu ermittelnder Kennwerte	87
2.3.1 Feuchtegehalt u , ermittelt aus der relativen Luftfeuchte innerhalb der Ballen.....	87

2.3.2	Trockenmasse m_{tr} der Versuchsballen.....	87
2.3.3	Trockendichte ρ_{tr} der Versuchsballen.....	87
2.3.4	Stauchung in Anlehnung an DIN EN 826	88
2.3.5	Stauchung bei einer Spannung von 40 kN/m ² ϵ_{40}	88
2.3.6	Kriechverformung	88
	Gesamtverformung	88
2.3.7	Ausgangsquerschnitt der Versuchsballen in Anlehnung an DIN EN 826	88
2.3.8	Druckspannung in Anlehnung an DIN EN 826	89
2.3.9	Druckspannung bei 10% Stauchung σ_{10}	89
2.3.10	Druck-Elastizitätsmodul in Anlehnung an DIN EN 826.....	89
2.3.11	Relaxation.....	91
2.4	Versuchsdurchführungen	92
2.4.1	Tests mit dem Prüfstand „Toni Technik“	92
2.4.2	Tests mit den Relaxationsprüfständen	92
2.4.3	Tests mit dem Kriechprüfstand.....	92
2.4.4	Tests mit dem HD-Ballen Kombiprüfstand	93
2.4.5	Tests mit dem Wandprüfstand.....	94
3	Material	96
3.1	Strohballen	96
3.2	Lehmputze.....	96
3.3	Prüfstände	96
3.3.1	Prüfstand Toni Technik.....	96
3.3.2	Relaxationsprüfstände.....	97
3.3.3	Kriechprüfstand	97
3.3.4	HD-Ballen Kombiprüfstand.....	98
3.3.5	Wandprüfstand	99
3.4	Weitere Messinstrumente.....	99
3.4.1	Hygrometer/Thermometer	99
3.4.2	Gewichtsmessung	100
3.4.3	Längenmessung.....	100
4	Darstellung und Diskussion der Versuchsergebnisse.....	100
4.1	Spannungs-Stauchungstests an Einzelballen	100
4.2	Relaxationstests an Einzelballen.....	102
4.3	Relaxationstest an Einzelballen mit Simulation eines Garnausfalls bzw. eines Wasserschadens.....	104
4.4	Kriechtests an Einzelballen	105
4.5	Kriechtest an einem Einzelballen mit Simulation eines Wasserschadens.....	106
4.6	Tests zum elasto-mechanischen Verhalten von unverputzten und verputzten Strohballenwänden.....	107
4.6.1	Zum Spannungs-Stauchungsverhalten der untersuchten Wandkonstruktionen	107
4.6.2	Zum Relaxationsverhalten der untersuchten Wandkonstruktionen	108
5	Ansätze zum Nachweis Last- bzw. selbsttragender Konstruktionen	109
5.1	Nachweis über den Putz	110
5.2	Nachweis über Vorspannung	110
6	Schlussfolgerungen	111
7	Literatur.....	111

A 3 Gebäudetyp	112
1 Zusammenfassung.....	112
B Hygrothermische Eigenschaften von Strohballen und Strohballenbauteilen	113
B 1 Voruntersuchungen durch das Zentrum für Umweltbewusstes Bauen in Kassel	114
1 Einleitung	115
2 Physikalische Grundlagen.....	115
2.1 Relative Luftfeuchte	115
2.2 Baustofffeuchte.....	118
2.3 Feuchtetransportmechanismen	120
3 Literaturrecherche	122
3.1 Untersuchungsergebnisse	122
3.2 Materialkennwerte	128
3.3 Hygrothermische Simulationen.....	129
3.4 Biohygrothermische Simulation	130
4 Untersuchungsmethodik	131
5 Berechnungsgrundlage und Festlegungen	131
5.1 Untersuchte Konstruktionen	131
5.2 Materialkennwerte	138
5.3 Verwendete Randbedingungen	140
5.3.1 Außenklima.....	140
5.3.2 Innenklima	141
5.3.3 Festlegung der Basisorientierung	142
5.3.4 Wärmeübergang.....	143
5.4 Bewertung der obersten Geschossdecke zu unbeheiztem Dachraum.....	143
6 Bewertungskriterien	146
7 Untersuchungsergebnisse	147
7.1 Darstellung der Untersuchungsergebnisse.....	147
7.2 Außenwände	149
7.3 Mit Strohballen ertüchtigte Außenwände.....	152
7.4 Geneigte Dächer	155
7.5 Flachdächer	158
7.6 Geschossdecken	159
7.7 Außenwände aus Großballen.....	160
7.8 Einfluss der Einbaufeuchte.....	161
7.9 Bewertung der Untersuchungsergebnisse.....	162
8 Zusammenfassung und Ausblick	165
9 Literaturverzeichnis	166
Anhang Projektteil B1 ZUB Hygrothermik	168
1 Wandkonstruktionen	169
Bauteil 1.1.....	169
Bauteil 1.1.2.....	170
Bauteil 1.1.3.....	171
Bauteil 1.1.4.....	172
Bauteil 1.1.5.....	173
Bauteil 1.1.5a.....	174
Bauteil 1.1.5b.....	175

Bauteil 1.2.....	176
Bauteil 1.2.2.....	177
Bauteil 1.2.3.....	178
Bauteil 1.2.4.....	179
Bauteil 1.3.1.....	180
Bauteil 1.3.2.....	181
Bauteil 1.3.4.....	182
Bauteil 1.4.....	183
Bauteil 1.4.1.....	184
2 Mit Strohballen ertüchtigte Außenwände.....	185
Bauteil 2.1.....	185
Bauteil 2.2.....	186
Bauteil 2.3.....	187
Bauteil 2.4.....	188
Bauteil 2.5.....	189
Bauteil 2.6.....	190
3. Dachkonstruktionen.....	191
Bauteil 3.1.....	191
Bauteil 3.2.....	192
Bauteil 3.3.....	193
Bauteil 3.4.....	194
Bauteil 3.5.....	195
4. Flachdachkonstruktionen.....	196
Bauteil 4.1.....	196
Bauteil 4.2.....	197
Bauteil 4.3.....	198
Bauteil 4.4.....	199
Bauteil 4.5.....	200
5. Deckenkonstruktionen.....	201
Bauteil 5.1.....	201
Bauteil 5.2.....	202
Bauteil 5.3.....	203
6. Wandkonstruktionen mit dickerer Dämmung.....	204
Bauteil 6.1.....	204
Bauteil 6.2.....	205
7. Langzeituntersuchungen.....	206
Langzeituntersuchungen Bauteil 1.1.....	206
Langzeituntersuchungen Bauteil 1.1.5a.....	207
B 2 Untersuchungen des Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Holzkirchen.....	208
1 Zusammenfassung.....	209
2 Einleitung.....	211
3 Beschreibung des Untersuchungsumfangs und Begründung der Methodik.....	211
4 Laboruntersuchungen am Lehmputz und Kalkputz.....	212
4.1 Zielsetzung der Untersuchung.....	212
4.2 Prüfverfahren.....	212
4.3 Ergebnisse.....	214

5	Bestimmung des Isoplethensystems für Strohballen	215
5.1	Zielsetzung der Untersuchung.....	215
5.2	Prüfverfahren	215
5.3	Ergebnisse.....	217
6	Messtechnische Untersuchungen an einer Versuchswand	217
6.1	Zielsetzung der Untersuchung.....	217
6.2	Aufbau der Versuchswand	218
6.3	Ergebnisse.....	219
6.3.1	Temperatur- und Feuchteverlauf	219
6.3.2	Materialfeuchte	220
7	Biologische Untersuchungen an einer Versuchswand	221
7.1	Zielsetzung der Untersuchungen.....	221
7.2	Prüfverfahren	221
7.3	Ergebnisse.....	222
7.3.1	Keimgehalt des Ausgangsmaterials	222
7.3.2	Keimgehalt nach dem Verputzen.....	222
7.3.3	Keimgehalt nach Bewitterung	223
7.4	Diskussion und Schlussfolgerungen.....	224
8	Rechnerische Untersuchungen.....	226
8.1	Grundlagen der Berechnungen	226
8.2	Bauteilaufbauen.....	227
8.3	Baustoffkennwerte	227
8.4	Programmparameter und Simulationseinstellungen.....	228
8.5	Validierung der Berechnung	228
8.6	Ergebnisse.....	229
8.7	Berechnung des langfristigen Verhaltens	229
8.8	Diskussion und Schlussfolgerungen.....	230
8.9	Berechnungsergebnisse.....	230
8.10	Diskussion und Schlussfolgerungen.....	231
9	Literatur.....	232
10	Anhang	234
10.1	Bilder	234
10.2	Diagramme	254
10.3	Tabellen.....	281
10.4	Zeichnungen der Wände	288
B 3	Messtechnik an realisierten Gebäuden.....	290
1	Zusammenfassung.....	291
2	Abbildungen	292
2.1	Handmessgeräte für den Baustelleneinsatz.....	292
2.2	Feuchte- Temperaturmesssystem mit internetfähigem Datenlogger.....	292
2.3	Internetportal für Messdaten.....	293
C	Bautechnische Nachweise.....	294
C 1	Brandschutz.....	295
1	Zusammenfassung.....	295
C 2	Wärmeschutz.....	298
1	Zusammenfassung.....	298

2	Ergebnisse.....	299
2.1	Lambdamessungen verschiedene Rohdichten, Materialfeuchten und Halmrichtungen.....	299
2.2	Messung des Wärmedurchlasswiderstands nach DIN EN 1934.....	299
C 3	Schallschutz.....	300
3	Zusammenfassung.....	300
	Anhang.....	302
1	Anhang Projektteil A 3 Lasttragender Haustyp: Statische Beurteilungen.....	302
	Anhang Projektteil A 3 Lasttragender Haustyp: Beurteilung der Standsicherheit lasttragender Haustyp „Kleinballen“.....	303
1	Berechnungsgrundlagen.....	304
1.1	Gebäudebeschreibung.....	304
1.2	Normen und Vorschriften.....	304
1.3	Gebäudeskizzen.....	305
2	Einwirkungen auf die Wände.....	307
2.1	Dachlasten.....	307
2.2	Wandlasten.....	309
3	Beanspruchung der Wände.....	310
3.1	Druckbeanspruchung.....	310
3.2	Schubbeanspruchung.....	311
3.3	Biegung senkrecht zur Wandebene.....	311
4	Festlegungen des „California Building Code“.....	313
4.1	Anforderungen an Strohballen.....	313
4.2	Anwendbarkeitsgrenzen.....	313
5	Elastomechanischen Eigenschaften der Strohballen.....	315
5.1	Druckfestigkeit der Strohballen und Druckversagen.....	315
5.1.1	Druckversuche an der Hochschule Magdeburg-Stendal (FH).....	316
5.1.2	Druckversuche an Kleinballen im ZUB an der Universität Kassel.....	320
5.2	Querkrafttragfähigkeit in Wandrichtung- Scheibenschub.....	322
6	Nachweis der Standsicherheit des Gebäudes.....	325
6.1	Nachweis gemäß „California Building Code“(CBC).....	325
6.2	Nachweis auf der Grundlage der Ergebnisse von Belastungsversuchen.....	326
6.3	Magdeburger Versuche an Großballen.....	326
6.3.3	Aufnahme der Vertikallast - Einzelballen:.....	326
6.3.4	Aufnahme der Vertikallast Wandelemente:.....	326
6.3.5	Aufnahme der Horizontallasten aus Wind.....	326
6.4	Kasseler Versuche an Kleinballen.....	327
6.4.6	Aufnahme der Vertikallast - Einzelballen:.....	327
6.4.7	Aufnahme der Vertikallast Wandelemente:.....	327
6.4.8	Aufnahme der Horizontallasten aus Wind.....	327
7	Schlussfolgerung.....	327
	Anhang Projektteil A 3 Lasttragender Haustyp: Beurteilung der Standsicherheit lasttragender Haustyp „Großballen“.....	328
1	Berechnungsgrundlagen.....	329
1.1	Gebäudebeschreibung.....	329
1.2	Normen und Vorschriften.....	330
1.3	Gebäudeskizzen.....	331

2	Einwirkungen auf die Strohballenwände	335
2.1	Dachlasten.....	335
2.2	Wandlasten.....	337
2.3	Deckenlasten	337
3	Beanspruchung der Strohballenwände	338
3.1	Wand im OG	338
3.2	Wand im EG	339
4	Elastomechanischen Eigenschaften der Strohballen.....	340
4.1	Druckfestigkeit und Druckversagen von Einzel-Strohballen	340
4.2	Druckversuche an vorgespannten Wandelementen.....	341
4.3	Druckversuche an vorgespannten und verputzten Wänden.....	342
4.4	Schubversuche an Wänden	342
5	Beurteilung der Standsicherheit der Strohballenwände des Mustergebäudes.	343
5.1.9	Aufnahme der Vertikallast durch Einzelballen:	343
5.1.10	Aufnahme der Vertikallast durch Wandelemente:	343
5.1.11	Aufnahme der Horizontallasten aus Wind	344
6	Schlussfolgerung.....	344
2	Anhang Projektteil C Bautechnische Nachweise: Prüfberichte und allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis	345
	Anhang Bautechnische Nachweise: Brandschutz.....	347
7	Feuerwiderstandstests an Strohballenwänden	347
7.1	Feuerwiderstandstest an einer lehmverputzten Holzständerwand mit Strohballendämmung: Prüfbericht	347
7.1.12	Allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis.....	369
7.2	Feuerwiderstandstest an einer lehmverputzten lasttragenden Strohballenwand: Prüfbericht 380	
8	Brandverhalten von Strohballenwänden	401
8.1	Brandverhalten nach DIN EN 13823 („Single-Burning-Item“- Test): Prüfbericht	401
8.2	Klassifizierungsbericht nach DIN EN 13501-1: 2007.....	414
8.3	Brandverhalten nach DIN EN 11925-2 („Brennbarkeits“- Test): Prüfbericht.....	420
	Anhang Bautechnische Nachweise: Wärmeschutz.....	429
9	Wärmeleitfähigkeitstests an Stroh: Prüfberichte	429
10	Wärmedurchlasswiderstand einer lehmverputzten Holzständerwand mit Strohdämmung: Prüfbericht.....	448
	Anhang Bautechnische Nachweise: Schallschutz.....	460
11	Schallschutzmessung einer Strohballenwand: Prüfbericht.....	460

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1 :	Prototyp-Gebäude in lasttragender Strohballenbauweise mit Großballen.....	38
Abbildung 2-1	Lagerung der Strohballen in der Laborhalle.....	42
Abbildung 2-2:	Rohdichteverteilung der untersuchten Strohballen	43
Abbildung 2-3:	Prüfstand I „Yale“ mit Meßeinrichtung.....	44
Abbildung 2-4:	Prüfstände II (links) und III (rechts)	44
Abbildung 2-5:	Prüfstand 1 /Yale, Versuche mit Einzelballen.....	45

Abbildung 2-6: Prüfstand II, Versuche mit Einzelballen, M 1:33	45
Abbildung 2-7: Prüfstand III Versuche mit Einzelballen, M 1:50	46
Abbildung 2-8: Prüfstand III, Versuche an Wandelementen, M 1:50	46
Abbildung 3-1: Druckversuch an Einzelballen, Pos 1.1, Prüfstand Yale, Ballen 2, bei $\varepsilon \sim 50\%$	48
Abbildung 3-2: $\sigma - \varepsilon$ –Beziehung der Einzelballen unter Druckbelastung Pos 1.1 Ballen 1-5, $\varepsilon = 0 - 50\%$	48
Abbildung 3-3: $\sigma - \varepsilon$ –Beziehung für Einzelballen unter Druckbelastung Pos 1.1 Ballen 1-7, $\varepsilon = 0 - 30\%$	50
Abbildung 3-4: Veränderung des Elastizitätsmoduls E mit zunehmender Stauchung für Kurzzeitbelastung	50
Abbildung 3-5: Versuchseinrichtung für Kriechversuche	51
Abbildung 3-6: Ergebnisse der Kriechversuche.....	52
Abbildung 3-7: Relaxationsversuche an Einzelballen, Pos 1.3 v.l.n.r: Ballen Nr. 13, $\varepsilon_0 = 10\%$, Ballen Nr. 9, $\varepsilon_0 = 20\%$, Ballen Nr. 10, $\varepsilon_0 = 30\%$	53
Abbildung 3-8: Relaxationsversuche an Einzelballen, Pos 1.3 Ballen 6,7,9,10,13: Abbau der Spannung bei konstanter Stauchung.....	55
Abbildung 3-9: Relaxationsversuch Pos. 1.3, Ballen 10, $\varepsilon = 30\%$ ungefilterter Spannungsverlauf und Temperaturgang während Versuchszeit.....	56
Abbildung 3-10: $\sigma - \varepsilon$ - Beziehung für wiederholte Belastung, Pos 1.5 Ballen 12:	57
Abbildung 3-11: Versuchsverlauf Ballen 12. Bild links: Stauchungs-Zeit-Verlauf, Bild rechts: Spannungs-Zeit-Verlauf.....	57
Abbildung 3-12: $\sigma - \varepsilon$ - Beziehung für wiederholte Belastung, Pos 1.5 Ballen 13:.....	58
Abbildung 3-13: Versuchsverlauf Ballen 13. Bild links: Stauchungs-Zeit-Verlauf, Bild rechts: Spannungs-Zeit-Verlauf.....	58
Abbildung 3-14: $\sigma - \varepsilon$ - Beziehung für wiederholte Belastung, Pos 1.5 Ballen 23:.....	59
Abbildung 3-15: Versuchsverlauf Ballen 23. Bild links: Stauchungs-Zeit-Verlauf, Bild rechts: Spannungs-Zeit-Verlauf.....	59
Abbildung 3-16: Erntegarnausfall unter Gebrauchsspannung, Pos 1.6 Strohballen Nr. 6 nach Durchtrennen von 2 Erntegarnen, nach Versuche gekippt.....	60
Abbildung 3-17: Spannungsänderung in Ballen nach Erntegarnausfall unter $\varepsilon_0 = 20\%$, links: Ausfall von 2 Erntegarnen rechts: Ausfall von 4 Erntegarnen Ballen 6 aus Pos. 1.3 Ballen 26 aus Pos. 1.3	61
Abbildung 3-18: Zugversuch am Bindegarn.....	61
Abbildung 3-19: Stauchungsänderung infolge Wasserbeaufschlagung der Strohballen	62
Abbildung 3-20: σ - ε -Beziehung für Ballen Nr. 22 und 23, unterschiedliche Belastungsgeschwindigkeit,.....	63
Abbildung 3-21: Belastungsgeschwindigkeit als ε -t- Diagramm, Pos. 1.8:	63
Abbildung 3-22: Druckversuche mit Einleitung der Druckkraft über Teilflächenpressung Pos. 1.9, Ballen 24 mit aufliegendem Rähm	64
Abbildung 3-23: σ - ε -Linie der Einzelballen, Ballen 22 und 23 mit flächiger Lasteinleitung: Ballen 24 und 27 mit Lasteinleitung über Rähm	65
Abbildung 3-24: Plastischer (bleibender) Eindruck infolge Rähmlast. Pos. 1.9, Ballen 24	65
Abbildung 3-25: Ausbreitung der vertikalen Teilflächenlast in Strohballen	66
Abbildung 4-1: Wandelement I, M 1:33	69
Abbildung 4-2: Wandelement I beim Zusammenbau; Schablonen zwischen den Strohballen	69
Abbildung 4-3: Wandelement I Dauerlastversuch unter Stauchung $\varepsilon = 23\%$, Pos. 2.3, rote Linien zeigen Außermittigkeit, blaue Linien markieren die einzelnen Ballenlagen	70
Abbildung 4-4: Wand 2 vor dem Vorspannen.....	71

Abbildung 4-5:	Fertiggestellte Wand 2, Stauchung $\varepsilon = 16 \%$	71
Abbildung 4-6	Wandelement 1, Relaxationsversuch Pos.2.3, Stauchung $\varepsilon = 23 \%$ =konst.	72
Abbildung 4-7:	Wand 2 Relaxationsversuch Pos.2.3, Stauchung $\varepsilon = 16 \%$ = konst.	73
Abbildung 4-8:	Kraft-Stauchungs-Beziehung für vorgespannte Strohballenwand Wand 1 Druckversuch nach 99 Tagen Dauerbelastung $\varepsilon = 23 \%$	74
Abbildung 4-9:	Wand 2 im Kurzzeit-Druckversuch.....	75
Abbildung 4-10:	Kraft-Stauchungs-Beziehung für vorgespannte Strohballenwand Wand 2 Druckversuch nach 31 Tagen Dauerbelastung $\varepsilon = 16 \%$	75
Abbildung 4-11:	Versuchseinrichtung – Schubbelastung der Wände	76
Abbildung 4-12:	Kraft-Verschiebungs-Beziehung für Wand 1 und 2, gesamter Messbereich	77
Abbildung 4-13:	Kraft-Verschiebungs-Beziehung für Wand 1 und 2, Ausschnitt aus Bild 45 für $v_h 10\text{mm}$	77
Abbildung 5-1:	Verwendeter Lehmputz, manueller Auftragung der ersten Putzschicht.....	79
Abbildung 5-2:	Anschluß des Putzes an Rähm und Schwelle, Wand 2.....	79
Abbildung 5-3:	links: Verputzte Wand 1 rechts: Verputzte Wand 2 im Prüfstand	80
Abbildung 5-4:	Kraft-Setzungs-Beziehung der verputzten Wand 2.....	80
Abbildung 5-5:	Kraft-Verschiebungs-Beziehung für verputzte und nicht verputzte Wände unter Horizontalbeanspruchung in Wandebene , gesamter Messbereich.....	81
Abbildung 5-6:	Kraft-Verschiebungs-Beziehung für verputzte und nicht verputzte Wände unter Horizontalbeanspruchung in Wandebene, Ausschnitt aus Bild 51.....	82
Abbildung 5-7:	Wand 1 nach Schubversuch	82
Abbildung 2-1	Einspannung von Einzelballen in Wänden durch Nachbarballen und Verstärkungselemente wie Ballennägeln und Fundamentanker	87
Abbildung 2-2:	Zum Druckelastizitätsmodul nach DIN EN 826	89
Abbildung 2-3:	Zur rechnerischen Ermittlung von F_p und E	90
Abbildung 2-4	zur rechnerischen Ermittlung von E und ε_p in % aus der Spannung σ	91
Abbildung 2-5	Schematischer Ablauf der Tests mit dem HD-Ballen Kombiprüfstand.....	93
Abbildung 2-6:	Test 2.3: Wand vor der Belastung (1) und bei einer Spannung von 40 kN/m^2 (2)	95
Abbildung 3-1:	Prüfstand Toni Technik	96
Abbildung 3-23-3:	Relaxationsprüfstände der ersten und zweiten Generation	97
Abbildung 3-4:	Kriechprüfstand	97
Abbildung 3-5:	HD-Kombiprüfstand.....	98
Abbildung 3-6:	Wandprüfstand 2.....	99
Abbildung 4-1:	Spannungs-Stauchungsdiagramm Kleinballen flach liegend ohne seitliche Einspannung	101
Abbildung 4-2:	Spannungs-Stauchungsdiagramm Kleinballen flach liegend ohne seitliche Einspannung (Ausschnitt)	102
Abbildung 4-3:	Ballen 1.1.5 bei einer Spannung von ca. 130 kN/m^2	102
Abbildung 4-4:	Relaxationsdiagramm flach liegender HD-Weizenballen mit seitlicher Einspannung $\sigma_s =$ $20, 40$ und 60 kN/m^2	103
Abbildung 4-5:	Relaxationsverhalten flach liegender HD-Weizenballen in Abhängigkeit von der Startspannung.....	104
Abbildung 4-6:	Einfluss eines Garnaufalls und eines Wasserschadens auf das Relaxationsverhalten flach liegender eingespannter HD-Weizenballen	105
Abbildung 4-7:	Kriechverhalten seitlich eingespannter flach liegender HD-Weizenballen bei einer Spannung von 60 kN/m^2	106
Abbildung 4-8:	Kriechverformung flach und hochkant liegender seitlich eingespannter HD- Weizenballen unter Wassereinfluss	107

Abbildung 4-9: Spannungs-Stauchungskennlinien der untersuchten Wände	108
Abbildung 4-10: Relaxationskennlinien der untersuchten Strohballenwände	109
Abbildung 2-1 Mobiles Messsystem.....	292
Abbildung 2-2 Kombisensor.....	292
Abbildung 2-3 Datenloggerausenansicht	293
Abbildung 2-4 Screenshot des Messdaten- Internetportals	293
Bild 2-1: Carrier Diagramm [1]	117
Bild 2-2: Wassergehaltsbereiche in einem porösen, hygroskopischen Baustoff [1].....	118
Bild 2-3: Feuchtespeicherfunktionen verschiedener Materialien [3].....	119
Bild 2-4: Wassertransport und -speicherung in porösen Baustoffen [1].....	120
Bild 2-5: Feuchtetransport in einer Zylinderkapillare im Winter bei unterschiedlichen Wassergehalten [3].....	121
Bild 3-1: Isoplethenlinie der Sporenauskeimung bei idealem Nährboden [7].....	123
Bild 3-2: Isoplethenlinie der Sporenauskeimung bei Substratgruppe I [7]	124
Bild 3-3: Isoplethenlinie der Sporenauskeimung für Stroh [7]	124
Bild 5-1: Verwendete Feuchtespeicherfunktion für Stroh.....	139
Bild 5-2: Verwendete Feuchtespeicherfunktion für Lehmputz.....	139
Bild 5-3: Jahrestemperaturverlauf des Klimadatensatzes „ibp1991“	140
Bild 5-4: Jahresverlauf der relativen Luftfeuchte des Klimadatensatzes „ibp1991“	140
Bild 5-5: Jahresschlagregensumme in Abhängigkeit von der Orientierung	141
Bild 5-6: Strahlungsintensität für den Standort Holzkirchen „ip 1991“	141
Bild 5-7: Jahresverlauf der in Ansatz gebrachten Raumlufttemperatur.....	142
Bild 5-8: Jahresverlauf der in Ansatz gebrachten relativen Raumluftfeuchte.....	142
Bild 5-9: Verlauf des Wassergehalts in der Strohballendämmung in Abhängigkeit von der Orientierung	143
Bild 5-10: Darstellung des für die Simulationsrechnung herangezogenen Reihenmittelhauses.....	144
Bild 5-11: Temperaturen im Dachraum	145
Bild 5-12: Jahresverlauf der relative Luftfeuchte im Dachraum	146
Bild 7-1: Ergebnisdarstellung im Anhang.....	148
Bild 7-2: Lokaler Wassergehalt in der äußeren Grenzschicht der Strohballendämmung der Konstruktion 1.1, „Monitor 1“.....	150
Bild 7-3: Lokaler Wassergehalt bei der Konstruktion 1.1, „Monitor 2“	150
Bild 7-4: Gemittelter Wassergehalt in der Strohballendämmung bei den Konstruktionen 1.1- 1.1.4 ...	150
Bild 7-5: Schimmelpilzwachstum der Konstruktion 1.1, links in der äußeren Grenzschicht der Strohballendämmung (Monitor 1) und rechts in 5 cm Tiefe (Monitor 2).....	151
Bild 7-6: Lokaler Wassergehalt in der äußeren Grenzschicht der Strohballendämmung bei der Konstruktion 1.1.5, „Monitor 1“	151
Bild 7-7: Lokaler Wassergehalt in 5 cm Tiefe der Strohballenschicht bei der Konstruktion 1.1.5, „Monitor 2“	152
Bild 7-8: Schimmelpilzgefährdung der Konstruktion 1.1.5, links in der äußeren Grenzschicht (Monitor 1) und rechts in 5 cm Tiefe (Monitor 2“).....	152
Bild 7-9: Gemittelter Wassergehalt in der Strohballendämmung der Konstruktion 2.2	153
Bild 7-10: Schimmelgefährdung der Konstruktion 2.1, links an der äußeren Grenzschicht (Monitor 1) und rechts in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung (Monitor 2).....	153
Bild 7-11: Schimmelpilzgefährdung der Konstruktion 2.4, links an der äußeren Grenzschicht (Monitor 1) und rechts in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung (Monitor 2).....	154
Bild 7-12: Schimmelgefährdung der Konstruktion 2.5, links an der äußeren Grenzschicht (Monitor 1)	

und rechts in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung (Monitor 2)	155
Bild 7-13: Lokaler Wassergehalt an der äußeren Grenzsicht (Monitor 1) der Strohballendämmung der Konstruktion 3.1	155
Bild 7-14: Lokaler Wassergehalt in 5 cm Tiefe (Monitor 2) in der Strohballendämmung der Konstruktion 3.1	156
Bild 7-15: Gemittelter Wassergehalt in der Strohballendämmung der Konstruktion 3.1	156
Bild 7-16: Gemittelter Wassergehalt in der Strohballendämmung der Konstruktion 3.4	156
Bild 7-17: Schimmelpilzwachstum in 5 cm Tiefe in der Strohballendämmung der Konstruktion 3.1 ...	157
Bild 7-18: Schimmelpilzwachstum in 5 cm Tiefe in der Strohballendämmung der Konstruktion 3.4 ...	157
Bild 7-19: Lokaler Wassergehalt in der äußeren Grenzsicht der Strohdämmung der Konstruktion 3.5	157
Bild 7-20: Gemittelter Wassergehalt in der Strohballendämmung der Konstruktion 4.1 (links); Lokaler Wassergehalt der Konstruktion in der äußeren Grenzsicht (mitte) und in 5 cm Tiefe (rechts). 158	
Bild 7-21: Gemittelter Wassergehalt in der Strohballendämmung der Konstruktion 4.5 (links); Lokaler Wassergehalt der Konstruktion in der äußeren Grenzsicht (mitte) und in 5 cm Tiefe (rechts). 158	
Bild 7-22: Schimmelpilzwachstum der Konstruktion 4.1; links in äußerer Grenzsicht und rechts in 5 cm Tiefe in der Strohballendämmung	159
Bild 7-23: Schimmelpilzwachstum der Konstruktion 4.5; links in äußerer Grenzsicht und rechts in 5 cm Tiefe in der Strohballendämmung	159
Bild 7-24: Schimmelpilzwachstum der Konstruktion 6.1, links in der äußeren Grenzsicht und rechts in 5 cm Tiefe in der Strohballendämmung	161
Bild 7-25: Schimmelpilzwachstum bei der Konstruktion 1.1 über einen Zeitraum von 4 Jahren (links Schichtgrenze zum Außenputz, rechts 5 cm Tiefe)	162
Bild 7-26: Schimmelpilzwachstum bei der Konstruktion 1.1.5a über einen Zeitraum von 4 Jahren (links Schichtgrenze zum Außenputz, rechts 5 cm Tiefe)	162
Bild 10-1: Grundprinzip des Versuchsaufbaus.....	234
Bild 10-2: Das Stroh aus der Inkubationseinheit 2.3 (25°C, 95%) nach Ablauf der Beobachtungsdauer, Pilzwachstum über den gesamten Prüfkörper verteilt sichtbar.	234
Bild 10-3: Der Stroh-Lehmputz-Verbund aus der Inkubationseinheit 2.3 (25°C, 95%) nach Ablauf der Beobachtungsdauer, Pilzwachstum über den gesamten Prüfkörper verteilt sichtbar.	235
Bild 10-4: Holzrahmen mit Strohballendämmung beim Einbau in das Versuchsgebäude.	236
Bild 10-5: Stopfen der Ballenstöße.....	237
Bild 10-6: Aufbringen der ersten Lehmputzschicht außen.	238
Bild 10-7: Aufbringen der ersten Kalkputzschicht außen.	239
Bild 10-8: Auftragen der letzten Lehmputzschicht außen.....	240
Bild 10-9: Wetterschutz während der Putzarbeiten.	241
Bild 10-10: Muster vom Wandaufbau zur Durchführung von Probennahmen.....	242
Bild 10-11: Lehmputzfläche (links) mit Auswaschungen, Kalkputzfläche (rechts) mit Rissen im oberen Teil.	242
Bild 10-12: Fotografische Ansicht des abgerutschten Lehmputzes im Januar 2007.....	243
Bild 10-13: Mit Lärchenholz verschaltete Versuchswand im Juni 2007.	244
Bild 10-14: Probennahme aus dem verputzten Prüfkörper	245
Bild 10-15: Probennahme aus der Strohballenversuchswand	246
Bild 10-16: Befallener Getreidehalm aus dem Strohballen (Ausgangsmaterial) im Auflichtmikroskop.	247
Bild 10-17: Befallender Getreidehalm im Durchlichtmikroskop (aus dem Ausgangsmaterial)	247
Bild 10-18: Sporen von Chaetomium sp. von Probe 10 (aus dem Ausgangsmaterial)	248
Bild 10-19: Dunkle Pilzhyphen auf Strohalm (Pflanzenparasit).....	248

Bild 10-20: Pilz- und Lehmreste an Getreidehalm im Auflichtmikroskop (verputzter Prüfkörper)	249
Bild 10-21: Fruchtkörper und Sporenbehälter (Asci) von <i>Chaetomium sp.</i>	249
Bild 10-22: Pilzreste an Getreidehalm von einer Strohprobe der Lehmputzwand im Auflichtmikroskop	250
Bild 10-23: Hyphen eines Pflanzenparasiten und Sporen von <i>Alternaria sp.</i> auf einem Halm aus der Lehmputzwand.....	250
Bild 10-24: Hyphen eines Saprophyten auf einem Halm aus der Kalkputzwand im Auflichtmikroskop	251
Bild 10-25: Hyphen und Sporen von <i>Mucor sp.</i> auf einem Halm der Kalkputzwand im Durchlichtmikroskop.....	251
Bild 10-26: Verallgemeinertes Isoplethensystem der Substratgruppen 0, I und II für Sporenkeimung (oben) und Myzelwachstum (unten) nach [8], das für alle im Bau auftretende Pilze gilt. Die oben angegebenen Werte charakterisieren die Zeitdauer, nach welcher eine Keimung abgeschlossen ist, die unteren Werte in mm/d das zu erwartende Wachstum. LIM bedeutet: Lowest Isopleth for Mould. 252	
Bild 10-27: Für die Berechnungen implementierter Wandaufbau mit Angabe der Schichtdicken und des Gitteraufbaus.....	253
Bild 10-28 Zeichnungen der Versuchswandelemente.....	289

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1: Versuchsprogramm für Großballen und Wandelementen aus Großballen.....	39
Tabelle 2-1: Ausgeführte Versuche an der Hochschule Magdeburg- Stendal	40
Tabelle 2-2: Prüfstände, Übersicht	44
Tabelle 2-1: Testprogramm	85
Tabelle 3-1: Angaben zu den verwendeten Lehmputzen	96
Tabelle 4-1: Physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse Kleinballen flach liegend ohne seitliche Einspannung.....	100
Tabelle 4-2: Physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse HD-Weizenballen flach liegend mit seitlicher Einspannung.....	103
Tabelle 4-3: Physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse HD-Weizenballen flach liegend mit seitlicher Einspannung.....	104
Tabelle 4-4: Physikalische Balleneigenschaften und Stauchungen flach liegender HD-Ballen	105
Tabelle 4-5: Kennwerte zum elasto-mechanischen Verhalten der untersuchten Wände	107
Tabelle 2-1: Wasserdampfkonzentration in der Luft im Sättigungszustand in Abhängigkeit von der Temperatur [1]	116
Tabelle 2-2: Werte der Konstanten a, b, und n angegeben für verschiedene Temperaturbereiche [2].....	117
Tabelle 3-1: Wandaufbauten der untersuchten Konstruktionen aus [6]	125
Tabelle 3-2: Verwendete Materialdaten in [6]	126
Tabelle 3-3: Ergebnisse der hygrothermischen Simulationen aus [6].....	128
Tabelle 3-4: Untersuchungsergebnisse des Forschungsinstituts für Wärmeschutz e.V. [9]	129
Tabelle 3-5: Ergebnisse der Laboruntersuchungen an Lehmputz aus [4], [5]	129
Tabelle 5-1: Beschreibung der untersuchten Bauteile	132
Tabelle 5-2: Verwendete Materialkennwerte für die Strohballendämmung	138
Tabelle 5-3: Materialkennwerte des Lehmputzes	139
Tabelle 5-4: Verwendete Materialkennwerte aus der Programm-Datenbank.	139
Tabelle 5-5: Verwendete Wärmeübergangskoeffizienten	143
Tabelle 5-6: Verwendete Strahlungskennwerte	143

Tabelle 5-7: Flächen der Außenbauteile für das Reihenmittelhaus	144
Tabelle 5-8: Verwendete Bauteilaufbauten	145
Tabelle 7-1: Gewählte Darstellungsform der Untersuchungsergebnisse der hygrothermischen Simulationen	147
Tabelle 7-2: Untersuchungsergebnisse der Wandkonstruktionen.....	149
Tabelle 7-3: Untersuchungsergebnisse der mit Strohballen ertüchtigten Außenwände	153
Tabelle 7-4: Untersuchungsergebnisse der Dachkonstruktionen.....	155
Tabelle 7-5: Untersuchungsergebnisse der Flachdachkonstruktionen	158
Tabelle 7-6: Untersuchungsergebnisse der Deckenkonstruktionen.....	160
Tabelle 7-7: Untersuchungsergebnisse der Wandkonstruktion aus Großballen	160
Tabelle 7-8: Untersuchungsergebnisse der Langzeitbewertung	161
Tabelle 7-9: Bewertung der Konstruktionen	163
Tabelle 10-1: Hygrothermische Materialkennwerte des eingesetzten Lehminnenputzes	281
Tabelle 10-2: Hygrothermische Materialkennwerte des Kalkputzes	282
Tabelle 10-3: Kennwerte des Strohs.....	283
Tabelle 10-4: Untersuchungsbedingungen in den einzelnen Klimaboxen	283
Tabelle 10-5: verwendete Sporensuspensionen	284
Tabelle 10-6: Bewertung des Pilzwachstums.....	284
Tabelle 10-7: Koloniebildende Einheiten des Ausgangsmaterials (Strohballen).....	285
Tabelle 10-8: Häufigkeiten der in Anzuchtschalen vorgefunden Mikroorganismen des Ausgangsmaterials (Strohballen).....	285
Tabelle 10-9: Koloniebildende Einheiten des verputzten Prüfkörpers.....	286
Tabelle 10-10: Häufigkeiten der in Anzuchtschalen vorgefunden Mikroorganismen des verputzten Prüfkörpers.....	286
Tabelle 10-11: Koloniebildende Einheiten der Strohproben der Lehmputzwand	286
Tabelle 10-12: Koloniebildende Einheiten der Strohproben der Kalkputzwand	286
Tabelle 10-13: Häufigkeiten der in Anzuchtschalen vorgefunden Mikroorganismen der Lehmputzwand	287
Tabelle 10-14: Häufigkeiten der in Anzuchtschalen vorgefunden Mikroorganismen der Kalkputzwand	288
Tabelle 10-15: Bewertungshilfe für kultivierbare Pilze im Teppichbodenstaub [6]. Gesamt-KBE ohne <i>Alternaria</i> , <i>Aureobasidium</i> , <i>Cladosporium</i> , Hefen, sterile Mycelien.	288
Tabelle 2-1: Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsmessungen	299
Tabelle 2-2: Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsmessungen	299
Tabelle 2-3: Ergebnisse der Wärmeleitdurchlasswiderstandmessung.....	299

Zusammenfassung des Gesamtprojekts

„Grundlagen zur bauaufsichtlichen Anerkennung der Strohballenbauweise- Weiterentwicklung der lasttragenden Konstruktionsart und Optimierung der bauphysikalischen Performance“

gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, Az. 22430

von
Dipl.- Ing. Architekt Dirk Scharmer
In de Masch 6
21394 Südergellersen
Tel. 04131-727804
Email: info@wand4.de



1 Einleitung

1.1 Strohballenbau: Chancen für Klimaschutz und Nachhaltigkeit

Mit landwirtschaftsüblichen Getreidestrohballen lassen sich auf einfache Weise komfortable, hochwärmegeämmte Gebäude errichten. Die Herstellung von Strohballen ist mit sehr wenig Energieaufwand und praktisch keinen umweltschädlichen Emissionen verbunden, da sie beim Getreideanbau nebenbei anfallen. Strohballen bleiben für die Verwendung als Baustoff naturbelassen. Das Material wird weder für die Erhöhung der Schimmelbeständigkeit noch für die Verbesserung des Brandverhaltens zusätzlich behandelt. Zusammen mit Holz und Lehm ist insgesamt ein Hauskonzept möglich, das keine gesundheitsbedenklichen Materialien enthält, dessen Rohstoffe hierzulande beinahe unbegrenzt bzw. in großer Menge vorhanden sind und das einen besonders geringen Herstellungsenergieaufwand (10 bis 200mal weniger als für andere Dämmstoffe) enthält. Bezogen auf die Erstellung eines Einfamilienhauses beträgt die Differenz zu einem konventionellen Gebäude ca. dem Primärenergiebedarf für 10 Jahre Beheizung eines „KfW-40“- Hauses. Wer mit Strohballen baut, leistet dreifachen Klimaschutz. Beim Wachstum der Pflanze wird der Atmosphäre Kohlendioxid entzogen, bei der Herstellung wird nur sehr wenig Kohlendioxid emittiert (die Strohballenmenge eines Einfamilienhauses entzieht der Atmosphäre ca. 25t Kohlendioxid, die Emissionsmenge einer 4-köpfigen Familie über 4 Jahre), beim Betrieb eines Strohballengeämmten wird nur sehr wenig Heizenergie benötigt. Gebäude aus Strohballen sind vergleichsweise kostengünstig erhältlich und können von angeleiteten Laien verarbeitet werden. Dieser hohe Eigenleistungsanteil ermöglicht Baukosten für ein energetisch, gesundheitlich und ökologisch hochwertiges Gebäude aus Strohballen, die mit einem durchschnittlichen Gebäudestandard vergleichbar sind.

1.2 Projektbeteiligte

1.2.1 Fachverband Strohballenbau Deutschland e.V.

Der Fachverband Strohballenbau Deutschland e.V. (FASBA) wurde im Sommer 2002 im Ökodorf Sieben Linden mit dem Ziel den Strohballenbau in Deutschland zu fördern gegründet. Er hat gut 150 Mitglieder in ganz Deutschland, bestehend aus Privatpersonen und Baufachleuten. Vor Beginn des vorliegenden Projekts konnten, insbesondere durch die Kooperation in einem Förderprojekt („Strohballenbau in der Altmark“, Region Aktiven-Projekt des BMVEL) schon Fortschritte bei der Entwicklung einer fachgerechten Bautechnik und der bauaufsichtlichen Anerkennung der Bauweise (durch Zustimmung im Einzelfall) gemacht werden. Neben einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (Z-23.11-1595) ist der FASBA Inhaber weiterer allgemeiner bauaufsichtlicher Prüfzeugnisse zum Strohballenbau, beispielsweise zu Strohballen als normalentflammbarer Baustoff und zu feuerhemmenden Strohballenaußenwänden.

1.2.2 Hochschule Magdeburg- Stendal, Fachbereich Bauwesen (HS-MD-SDL)

Das Bauteilprüflabor unter Leitung von Prof. Dr. Danielewicz verfügt über Erfahrungen in der Durchführung von Versuchen zur Bestimmung von mechanischen Baustoff- und Bauteileigenschaften. Es steht eine moderne Laborausstattung zur Verfügung mit der alle notwendigen Untersuchungen im Bereich lasttragender Strohballenbau durchgeführt werden können. Die Räumlichkeiten sowie die apparative Ausstattung erlauben eine qualifizierte Prüfung von großformatigen Wandelementen unter allen maßgebenden Beanspruchungsarten. Die für die Strohballenbauweise wichtigen Langzeitmessungen können dort ebenfalls durchgeführt werden. Die eigenen, in Vorversuchen

gewonnenen Erkenntnisse erlauben einen guten Überblick über das erforderliche Versuchsprogramm sowie die Möglichkeiten von Strohballen als Baustoff. Projektzielsetzungen

1.2.3 Zentrum für umweltbewusstes Bauen (ZUB) in Kassel in Kooperation mit dem Forschungslabor für experimentelles Bauen (FEB)

Im Jahr 2001 wurde auf dem Versuchsgelände des Forschungslabors für Experimentelles Bauen ein 36 m² großes Testgebäude errichtet, bei dem die Wände aus 50 cm dicken Strohballen bestehen, die beidseitig mit Lehm verputzt sind. Die Wände sind lasttragend, d.h. die 12000 kg schwere Dachlast wird direkt von den Strohballen in die Fundamente abgetragen, ohne dass eine tragende Holzkonstruktion vorhanden ist.

Im Jahr 2002 wurde in Kaliningrad, Russland, unter Leitung des Antragstellers mit einer Gruppe von Studenten die Wände einer Holzständerkonstruktion eines 264 m² großen Kinderhauses mit Strohballen gedämmt und mit Lehm verputzt.

Im Jahr 2003 wurde im Rahmen eines Workshops mit Studenten eine Strohballenkuppel, die als Tonstudio dient, im Westerwald errichtet.

Im Februar 2004 erschien das Fachbuch „Der Strohballenbau“ (Autoren: Gernot Minke, Friedemann Mahlke), in dem auf die baukonstruktiven Möglichkeiten und die bauphysikalischen Probleme von Strohballenwänden genauer eingegangen wird und Beispiele von Bauten aus aller Welt vorgestellt werden.

1.2.4 Fraunhofer Institut für Bauphysik

Das Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP) hat herausragende Kenntnisse und Möglichkeiten im Bereich des Nachweises und der Erprobung von bauphysikalischen Eigenschaften von Dämmstoffen aus Pflanzenfasern. Dort wird die Zertifizierung der Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen für das derzeitige Förderprogramm des BMVEL, sowie die Prüfungen für und Betreuung von bauaufsichtlichen Zulassungen in diesem Bereich durchgeführt. Das IBP ist vom DIBt anerkannte Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle für Schall- und Wärmedämmstoffe in den Bereichen "Wärme-Kennwerte" sowie "Emissionen/ Schimmel". Herr N. König ist im Sachverständigenausschuss "Dämmstoffe" des DIBt seit vielen Jahren tätig.

Das IBP führte bereits vor Projektbeginn Sonderuntersuchungen und Forschungsarbeiten zum Feuchte- und Schimmelpilz-Risiko [Künzel], [Sedlbauer, Kehrer], zur wärmeschutztechnischen Bemessung von Bauteilen und Bauteilanschlüssen [König] sowie zum Emissions- und Geruchsverhalten [Breuer] durch, die für das bauphysikalische Verhalten der Strohballenbauart angewendet werden können. U.a. sind zu nennen:

- Literaturrecherche und Herstellerumfrage vom Herbst 2000 zum Thema „Hygrothermische Kennwerte für Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen“ sowie Messungen von hygrothermischen Kennwerten für Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen und ergänzende Berechnungen zur hygrothermischen Charakterisierung entsprechender Konstruktionen im Auftrag der DBU,
- Untersuchungen zur Wärmespeicherung und Reduzierung der sommerlichen Überwärmung von Dachwohnungen sowie die ganzheitliche Beurteilung der Bauteileigenschaften und Anschlussbauteilen mittels einer QFD-Methode,
- Untersuchungen und Recherche zu innenraumrelevanten Fragestellungen, u.a. an nachwachsenden Rohstoffen sowie Erstellung von Produktdatenbanken u.a. mit Fragestellungen der Baustoffemissionen, Gerüchen und Behaglichkeit in Räumen.

1.3 Anlass für das Vorhaben und Zielsetzung

Obleich die Bauweise in Nordamerika schon über 100 Jahre bekannt ist, existieren relativ wenig anerkannte bautechnische Nachweise, insbesondere in Europa. Hierzulande steckte die Bauweise zuletzt noch in den Kinderschuhen. Der Projektträger FASBA e.V. hat sich zum Ziel gesetzt die Verbreitung der Strohballenbauweise in Deutschland u.a. durch wissenschaftliche Untersuchungen und bauaufsichtliche Nachweise zu fördern. Vor Beginn des Projektes konnte der FASBA bereits einzelne Untersuchungen und Nachweise durchführen, z.B. eine allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung erreichen. Darin konnte allerdings nur ein kleiner sehr abgegrenzter Anwendungsbereich nachgewiesen werden. Für den weitaus größten Teil der wünschenswerten und teilweise praktisch schon erprobten Konstruktionen fehlen anerkannte wissenschaftliche Untersuchungen und die Absicherung durch bauaufsichtlich anerkannte Nachweise. Mit Hilfe des vorliegenden Projekts soll ein möglichst großer Teil des anstehenden Untersuchungsbedarfs abgedeckt werden.

Ein Schwerpunkt des Projektes bildet neben der Untersuchung der lasttragenden Bauweise die Ermittlung der hygrothermischen Eigenschaften und damit der Schimmelbeständigkeit von Strohballenbauteilen. Darüber hinaus soll mit Hilfe der durchgeführten normgerechten Prüfungen in den Bereichen Brandschutz, Wärmeschutz und Schallschutz die baurechtliche Anwendbarkeit der geprüften Bauteile unter entsprechenden baurechtlichen Anforderungen dargestellt werden.

1.4 Projektbereich A „Lasttragender Strohballenbau“

Es soll nachgewiesen werden, dass unverputzte Strohballenwandelemente vertikale und horizontale Lasten in 1-2geschossigen Gebäuden aufnehmen können. Der Nachweis soll unabhängig von der Bekleidung der Strohballen durchgeführt werden. Dabei sollen sowohl Kleinballen als auch große Quaderballen untersucht werden. Basierend auf den Untersuchungsergebnissen soll ein genehmigungsfähiger lasttragender Gebäudetyp entwickelt werden. Wenn möglich sollen Ergebnisse dieses Projektteils Bestandteil eines bauaufsichtlichen Genehmigungsverfahrens werden.

1.5 Projektbereich B „Hygrothermische Eigenschaften“

In verputzten, direkt bewitterten Außenwänden kann nach den bislang üblichen Beurteilungskriterien Schimmelpilzwachstum innerhalb der Strohballen nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden. Zu dem in der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung Z-23.11-1595 als sicher nachgewiesenen Anwendungsbereich sollen daher weitere taugliche Bauteilaufbauten ermittelt und nachgewiesen werden. In den Voruntersuchungen die das Zentrum für Umweltbewusstes Bauen (ZUB) durchführt werden zahlreiche Aufbauten mit Hilfe von WUFI und WUFI- Bio hinsichtlich ihres jahreszeitlichen hygrothermischen Verhaltens und dem sich daraus ergebenden Schimmelrisiko untersucht und bewertet. Als Ergebnis entsteht ein Bauteilkatalog mit knapp 40 Bauteilaufbauten und Varianten.

Die Arbeiten beim Fraunhofer Institut für Bauphysik in Holzkirchen (IBP) zielen darauf ab, die Tauglichkeit von zwei direkt verputzten Wandaufbauten zu untersuchen. Hierfür wird das hygrothermische Verhalten der beiden Versuchswände unter realen Verhältnissen messtechnisch untersucht und mit den Simulationsergebnissen verglichen. Möglicher Schimmelbefall des Strohs wird vor, während und zum Ende der Bewitterung mikrobiologisch untersucht. Die Empfindlichkeit von weiteren Strohproben wird unter unterschiedlichsten klimatischen Verhältnissen ermittelt und hieraus Schimmelisoplethen erstellt.

Neben der theoretisch- wissenschaftlichen Nachweismethode stellt die Untersuchung gebauter Strohballenhäuser eine wichtige Verifikation der Eignung von Bauteilen dar. Hierfür führt der FASBA einzelne dezentrale Maßnahmen zur Messung von Temperatur und Feuchte in Strohballenwänden durch.

1.6 Projektbereich C „Bautechnische Eigenschaften“

Mit den durchgeführten Untersuchungen in den Bereichen Brandschutz, Wärmeschutz und Schallschutz sollen Grundlagen für erweiterte bauaufsichtlicher Anerkennungen gewonnen werden. Hierfür wurden verschiedene Tests durchgeführt, die sich streng an den national/ europäisch anerkannten Prüfnormen halten, damit die Ergebnisse möglichst weitgehend in bauaufsichtlichen Verfahren anerkennbar sind.

2 Arbeitsprogramm

Die entsprechend des bewilligten Programms durchgeführten Arbeiten untergliedern sich in drei Bereiche:

Bereich A: Lasttragender Strohballenbau mit Kleinballen und mit Großballen

Bereich B: Hygrothermische Eigenschaften

Bereich C: Bautechnische Nachweise

sowie im Auftrag des Projektträgers. Im Projektbereich C wurden diverse Maßnahmen durch mehrere beauftragte Institute durchgeführt:

1. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (IBMB) / Materialprüfungsanstalt für das Bauwesen (MPA)

2. Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. (FIW) in München

3. Institut für Akustik und Bauphysik (IAB) in Oberursel

Weitere ergänzende Arbeiten wurden seitens des Projektträgers selbst, sowie von zusätzlichen Auftragnehmern durchgeführt.

2.1 Projektbereich A „Lasttragender Strohballenbau“

Der Projektbereich A untergliedert sich in drei Bereiche. Im Bereich A1 wurden elastomechanische Untersuchungen an flachliegenden Großballen und Großballenwänden vom Projektpartner *Hochschule Magdeburg- Stendal* durchgeführt. Im Bereich A2 wurden elastomechanische Untersuchungen an flachliegenden Kleinballen und Kleinballenwänden vom Projektpartner *Zentrum für umweltbewusstes Bauen in Kassel (ZUB)* mit dem *Forschungslabor für experimentelles Bauen (FEB)* durchgeführt. Im Bereich A3 wurden mit Hilfe der festgestellten Eigenschaften zwei Gebäudetypen konzipiert und statisch beurteilt. Alle Tests erfolgten zunächst unter der Grundannahme dass ein direkter Verputz zwar zu einer tatsächlichen Stabilisierung der Wände führt, dieser aber im Rahmen eines bauaufsichtlich anerkennbaren Nachweisansatzes hierzulande nicht berücksichtigt werden kann. Im Laufe des Testprogramms wurden, ungeachtet dessen, zusätzliche Tests an verputzten Wänden eingeschoben um den Einfluss der Putzflächen zumindest qualitativ abschätzen zu können. Die ursprünglich im Projektbereich A4 „Mitwirkung bei bauaufsichtlicher Anerkennung“ vorgesehene Arbeiten konnte im zeitlichen Rahmen des Projekts nicht durchgeführt werden, da verwendbare Ergebnisse nicht rechtzeitig zur Verfügung standen und der für das DIBt notwendige Realbezug, der ursprünglich außerhalb dieses Vorhabens bereitgestellt werden sollte nicht realisiert werden konnte (weitere Zulassungsbeantragungen).

2.2 Projektbereich B „Hygrothermische Eigenschaften“

Der Projektbereich B untergliedert sich in zwei Bereiche. Gemeinsames Ziel aller Arbeiten war Strohballenbauteile auf Basis ihres hygrothermischen Verhaltens hinsichtlich ihrer Schimmelbeständigkeit zu klassifizieren. Im Projektbereich B1 wurden durch den Projektpartner

Zentrum für umweltbewusstes Bauen (ZUB) in Kassel zum einen hygrothermische Simulationen mit dem Programm WUFI zum anderen mit dem festgestellten hygrothermischen Langzeitverhalten mikrobielle Risikoabschätzungen gängiger Strohballenbauteilaufbauten mit Hilfe des Programms WUFI-Bio aufgestellt. Im Projektbereich B2 wurden durch das beauftragte Fraunhofer Institut für Bauphysik in Holzkirchen (IBP) zwei Wandaufbauten realbewittert und während des Bewitterungszeitraumes messtechnisch auf Temperatur und Feuchte untersucht. Fehlende Baustoffkennwerte wurden labormäßig ermittelt. Das eingesetzte Stroh wurde zu verschiedenen Zeitpunkten mikrobiologisch auf koloniebildende Einheiten von Mikroorganismen untersucht. Beimpfte Strohproben wurden zur Feststellung der Schimmellempfindlichkeit nach Lagerung im Brutschrank bei verschiedenen Klimaten über insgesamt 100 Tage mikroskopisch auf Schimmelbefall untersucht und klassifiziert. Im Projektbereich B3 wurden durch den FASBA Maßnahmen zur Messung von realisierten Strohballenbauten durchgeführt. Hierbei konnten zwei technisch modifizierte Handmessgeräte für den Baustelleneinsatz entwickelt und zum Einsatz gebracht werden, mit deren Hilfe Qualitätssicherung während der Verarbeitung der Strohballen ermöglicht wird. Darüber hinaus wurde ein Strohballenhaus mit einer stationären Temperatur- Feuchtemesstechnik ausgestattet sowie ein internetbasiertes Portal zur bundesweiten Erfassung und Auswertung von Messdaten entwickelt und zum Einsatz gebracht. Die ursprünglich im Projektbereich B4 „Mitwirkung bei bauaufsichtlicher Anerkennung“ vorgesehenen Arbeiten konnten im zeitlichen Rahmen des Projekts nicht durchgeführt werden, da verwendbare Ergebnisse nicht rechtzeitig zur Verfügung standen und der für das DIBt notwendige Realbezug, der ursprünglich außerhalb dieses Vorhabens bereitgestellt werden sollte nicht realisiert werden konnte (weitere Zulassungsbeantragungen).

2.3 Projektbereich C „Bautechnische Eigenschaften“

Der Projektbereich C untergliedert sich in die Bereiche C1 Brandschutz, C2 Wärmeschutz und C3 Schallschutz. Die Untersuchungen hatten das Ziel Grundlagen für erweiterte bauaufsichtliche Anerkennungen zu gewinnen. Im Bereich C1 wurden durch das *Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (IBMB) / Materialprüfungsanstalt für das Bauwesen (MPA)* drei verschiedene Prüfprogramme im Bereich Brandschutz absolviert: Zwei Feuerwiderstandstests und eine Prüfung des Brandverhaltens bestehend aus mehreren Einzelprüfungen. Im Bereich C2 wurden durch das *Forschungsinstitut für Wärmeschutz e. V. (FIW) in München* verschiedene Prüfungen im Bereich Wärmeschutz durchgeführt: Die Wärmeleitfähigkeit wurde an unterschiedlichen Materialvarianten unter unterschiedlichen Bedingungen gemessen und der Wärmedurchlasswiderstand wurde an einer realen Wand gemessen. Im Bereich C3 wurde durch das *Institut für Akustik und Bauphysik (IAB) in Oberursel* die Luftschalldämmung einer lehmverputzten Strohballenwand gemessen.

3 Ergebnisse

3.1 Projektbereich A „Lasttragendes Bauen“

Im Projektbereich A „Lasttragendes Bauen“ konnte entsprechend der ursprünglichen Zielsetzungen nachgewiesen werden, dass Strohballen und Strohballenbauteile vertikalen Lasten in entsprechend konzipierten ein- bis eineinhalbgeschossigen Gebäuden standhalten können. Dabei wurde festgestellt, dass Kleinballen für kleinere und leichtere Gebäude geeignet sind und Großballen demgegenüber etwas höheren Belastungen standhalten. Belastungsversuche an Einzelballen haben erwartungsgemäß gezeigt, dass diese selbst unter untypisch hohen Belastungen (Kleinballen

300kN/m², Großballen bis zu 750 kN/m²) nur stark komprimiert (teilweise über 50%) werden und kein Bauteilversagen im üblichen Sinne erfolgt. Für die Entwicklung eines Bemessungsansatzes wurden daher die Langzeittests unter realistischen Gebrauchsspannungen herangezogen. Diese Untersuchungen zeigen, dass die verwendeten Großballen unter Berücksichtigung der gemessenen bis zu 50%igen Relaxation für maximal auftretende Spannungen im Gebrauchszustand von 40 kN/m² geeignet sind, während bei den Kleinballenwände von etwa 20 kN/m² ausgegangen werden kann. Die zur Ermittlung dieser Werte durchgeführten Tests verliefen über Zeiträume zwischen 24 und 100 Tagen. Der gemessene Spannungsabbau betrug bis zu 50%, wobei hiervon der weitaus größte Teil nach wenigen Stunden erfolgt ist. Strohballenwände müssen also ca. um das doppelte des späteren Gebrauchszustands vorgespannt werden. Dem Bemessungsansatz liegt die Annahme zu Grunde, dass eine Beaufschlagung mit Sicherheitsbeiwerten entfallen kann, da durch die hohe Vorkomprimierung bewiesen ist, dass die Wände der doppelten späteren Maximalspannung standhalten können.

3.1.1 Bedeutung für die Praxis:

1. Lasttragende Strohballenwände müssen stark vorkomprimiert werden

Die derzeitigen Erkenntnisse machen ein sehr starkes Vorkomprimieren der unverputzten lasttragenden Strohballenwände erforderlich. Bei Wänden mit flachliegenden Kleinballen ist bei Ausnutzung der Maximalspannung im Gebrauchszustand von 20 kN/m² unter Berücksichtigung eines Spannungsabbaus von 50% eine Vorspannung von 40 kN/m² aufzubringen. Im bislang üblichen Strohballenbau wird mit deutlich geringeren Vorspannungen gearbeitet, sodass an dieser Stelle Verfahrensänderungen erforderlich würden. Hier sollten Untersuchungen zur Feststellung erfolgen, inwieweit sukzessives Nachspannen mit geringeren Vorspannungen über mehrere Tage, bzw. wenige Wochen ohne aufwändige Einrichtungen zu ähnlichen Stabilisierungen führen kann, wie das kurzfristige Aufbringen der hohen Spannung, wie es im vorliegenden Projekt erfolgt ist. Im Rahmen von stationären Fertigungen sind jedoch durchaus Einrichtungen und Geräte mit kleinem bis mittlerem Investitionsbedarf denkbar, die deutlich stärkere Vorkomprimierungen mit geringem Arbeitsaufwand ermöglichen.

2. Hilfsbauteile gegen Knicken und Beulen

Inwieweit die bei den Testwänden teilweise eingesetzten Hilfsbauteile aus Stahl und Holz in der Praxis umsetzbar sind oder einer Optimierung hinsichtlich bautechnischem Aufwand und Ökobilanz bedürfen, ist zu prüfen. Hier könnte ein nachfolgendes Entwicklungsvorhaben für die Umsetzbarkeit in Praxis erhebliche Vorteile bringen.

3. Queraussteifung noch nicht mit Strohballenwänden nachweisbar

Die größte Einschränkung für die Praxis stellt das derzeit noch nicht nachweisbare Aussteifungsverhalten von lasttragenden Strohballenwänden dar. Hierdurch bleiben bis auf weiteres selbst kleine reine lasttragende Strohballengebäude ohne zusätzliche Verstrebungen oder Diagonalen zumindest auf Basis der hier durchgeführten Untersuchungen statisch nicht nachweisbar.

3.2 Projektbereich B „Hygrothermische Eigenschaften“

Die grundsätzliche feuchtetechnische Tauglichkeit der Bauweise konnte bestätigt werden. Im Projektbereich B1 wurde mit Hilfe von rechnerischen Verfahren etliche Strohballenaufbauten als tauglich ermittelt, mehrere von den erwünschten Aufbauten können jedoch derzeit noch nicht als tauglich bezeichnet werden. Im Projektbereich B2 können die untersuchten realen Versuchswände ohne weitere Modifikation nicht als tauglich erwiesen werden. Sowohl bei der wissenschaftlichen

theoretischen Betrachtung mit WUFI und WUFI- Bio als bezogen auf die realen Beobachtung hinsichtlich mikrobieller Aktivitäten werden nach dem derzeitigen Stand erhebliche Bedenken aufgeworfen. Bezogen auf die Ermittlung der Schimmelpflichtigkeit von Stroh muss als Ergebnis dieses Projektes die Frage nach der Geeignetheit des bisherigen wissenschaftlichen Nachweisansatzes gestellt werden, da dieses in der Konsequenz viele in der Praxis derzeit als funktionierend anzusehende Gebäude als untauglich hinstellt. Ein geeigneter Nachweisansatz muss einerseits möglichst weitgehend die Realität widerspiegeln andererseits ausreichend Sicherheiten beinhalten. Zukünftige Arbeiten in diesem Bereich sollten zunächst bestehende Gebäude gründlich auf das mögliche Vorhandensein von Schimmelwachstum untersuchen, um darauf bezogen einen validierten rechnerischen Nachweisansatz zu entwickeln. Hier besteht ein dringender weiterer Untersuchungsbedarf.

3.2.1 Bedeutung für die Praxis:

Für die Praxis bedeuten die Ergebnisse der hier durchgeführten Arbeiten, dass es für die Errichtung von direkt verputzten Strohballenwänden ohne Wetterschutz weiterhin keinen anerkannten abgesicherten Nachweis gibt. Ohne weitere Untersuchung wird es auch zukünftig nicht möglich sein wenigstens leicht- oder mittelstark bewitterte Wandflächen ohne weiteren Wetterschutz mit Lehm- oder Kalkputzen zu verkleiden und sich hierfür auf gesicherte Erkenntnisse zu berufen.

3.3 Projektbereich C „Bautechnische Eigenschaften“

Mit Hilfe der im Projektbereich C größtenteils sehr erfolgreich durchgeführten Untersuchungen werden die bestehenden Erkenntnisse und bautechnischen Verfahren wissenschaftlich erweitert und abgesichert.

3.3.1 Brandschutz

Durch die absolvierten Brandtests können ab sofort feuerhemmende und schwerentflammbare Strohballenbauteile mit einer sehr geringen Putzbekleidungsstärke von ca. 1cm bauaufsichtlich anerkannt errichtet werden. Insgesamt stellen die Ergebnisse eine hervorragende Bestätigung und Erweiterung der bisher gängigen Praxis dar.

3.3.2 Wärmeschutz

Die gemessenen Werte bedeuten für die Praxis eine deutliche Absicherung des derzeitigen Wissenstandes. Eine Passivhaustauglichkeit in einem realen Gebäude, je nach Größe und Konzeption wird bei einem Bemessungswert für die Wärmeleitfähigkeit von 0,052 W/mK ab einer Strohballendämmstärke von ca. 45cm gegeben sein.

Bei hohen Verdichtungen über 130 Kg/m³ sowie bei einer Durchfeuchtung der Strohballendämmung muss von einer leichten Verschlechterung der Dämmleistung ausgegangen werden.

3.3.3 Schallschutz

Mit der bei der verwendeten Strohballenwand gemessenen Luftschalldämmung von $R_{w,R}=43\text{dB}$ liegt nun ein bauaufsichtlich anerkennbarer Nachweis für die Verwendung als Außenwand in den Lärmpegelbereichen I (>35 dB) bis IV (>40dB) vor. Die Leistung liegt im erwarteten Rahmen und ermöglicht zukünftig den abgesicherten Einsatz der geprüften Strohballenwandart für die entsprechenden Anforderungen.

4 Erreichter Sachstand im Vergleich mit den ursprünglichen Zielen

4.1 Lasttragendes Bauen

Die ursprünglichen Ziele des Vorhabens wurden nicht in vollem Umfang erreicht. Die nachweisbaren maximalen Gebrauchsspannungen wurden gegenüber den erhofften Werten um ca. 50% unterschritten, was die Anwendbarkeit der lasttragenden Bauweise noch nicht im vollen Umfang bestätigt. Der im Vorfeld konzipierte 2-geschossige Gebäudetyp wurde hiermit erst durch das Verringern der Lastannahmen und zusätzliche Stützen im Innenbereich des Gebäudes nachweisbar. Der Ansatz den Nachweis ohne eine Einbeziehung der Tragwirkung der Putzflächen zu führen wird zwar angesichts der Komplexität nach wie vor als zielführend erachtet, hat aber u.a. auch zu den hohen Spannungsabbau in den Langzeittests von bis zu 50% geführt und bedingt auch das nicht eindeutige zur Ruhe kommen des Spannungsabbaus. Die daraus resultierenden hohen Vorspannungskräfte beeinträchtigen die einfache Umsetzbarkeit der Ergebnisse in die Praxis deutlich. Hier können weitere Untersuchungen, u.a. Langzeittests mit sukzessiven Vorspannvorgängen mit geringeren Kräften wesentliche Verbesserungen bringen.

Innerhalb des vorliegenden Projekts war die Dauer der Langzeittest zu gering mit der Folge, dass derzeit noch nicht genau bekannt ist, ob bzw. wann der Spannungsabbau bei unverputzten Strohballenwänden vollständig zum Stillstand kommt. Wenngleich weder die Tragfähigkeit noch die Gebrauchstauglichkeit hierdurch eingeschränkt werden, sind an dieser Stelle weitere Untersuchungen über längere Zeiträume (3 bis 9 Monate) erforderlich.

Sowohl bei den getesteten Kleinballen-, als auch Grossballenwänden wurden für die Tests zusätzliche Hilfsbauteile aus Stahl bzw. Holz eingesetzt um das Knicken und Beulen der Wände unter Last zu verhindern, was ursprünglich nicht beabsichtigt war. Notwendig waren diese insbesondere durch die hohen Vorspannkkräfte geworden, aber auch weil die negative Wirkung der sich aus den realen Einsatzbedingungen ergebenden hohen Schlankheit unter der Testbedingungen ohne weitere Stabilisierung zu noch geringeren Tragfähigkeiten geführt hätte.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen konnte die Aufnahmefähigkeit von realistischen Windlasten nicht im erhofften Maße nachgewiesen werden. Hierzu sind ebenfalls weitere Untersuchungen erforderlich. Derzeit sind abweichend von den erhofften Projektergebnissen nur Gebäude nachweisbar, deren Aussteifung über zusätzliche Bauteile, wie z.B. Streben in Innenwänden erfolgt. Gebäude, die ausschließlich Strohballenwände als lasttragende Bauteile enthalten sind mit den erreichten Untersuchungsergebnissen nicht nachweisbar.

4.2 Hygrothermisches Verhalten

Die Arbeiten im Bereich hygrothermisches Verhalten zeigen, bezogen auf die erhofften Projektergebnisse, ein gemischtes Bild. Durch die Arbeiten am Zentrum für Umweltbewusstes Bauen (ZUB) liegen nun das rechnerische hygrothermische Verhalten und eine Schimmelrisikoeinstufung einer Vielzahl von Konstruktionen vor, wobei einige wünschenswerte Konstruktion noch nicht als unbedenklich eingestuft werden können. Durch die Arbeiten am Fraunhofer Institut für Bauphysik in Holzkirchen konnte die grundsätzliche Schimmelpfindlichkeit des verwendeten Stroh bestimmt und das Verhalten von zwei realbewitterten Strohballenwänden messtechnisch und simulationsmäßig

eingeschätzt, sowie die sich einstellende mikrobielle Situation mikrobiologisch untersucht werden. Bis auf den unwitterbedingten Ausfall einer der beiden Wänden konnten alle Erkenntnisse im erwarteten Umfang gewonnen werden. Die Qualität und Aussagekraft der Ergebnisse erreichen jedoch nicht das erhoffte Niveau. Der Einsatz der derzeit in der Praxis häufig üblichen direktbewitterten, verputzten Strohballenwände kann auf Basis der vorliegenden Ergebnisse nicht empfohlen werden. Für bewitterten Fassaden ist nach den gewonnenen Erkenntnissen mindestens eine Hydrophobierung, besser noch eine hinterlüftete Vorhangfassade erforderlich. Ein Weglassen der in der jetzigen Fassung der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (AbZ) geforderten zwischen Wetterschutz und Strohdämmung liegenden zusätzlichen Überdämmung ist nach Aussage des ZUB nur bedingt empfehlenswert. Eine Erhöhung des innenseitigen Diffusionswiderstand, wie ebenfalls in der AbZ festgesetzt, ist weiterhin ratsam. Ursprünglich war erhofft worden, dass sowohl die Überdämmung als auch die Erhöhung des innenseitigen Diffusionswiderstand mit Hilfe der Projektergebnisse als nicht mehr notwendig erachtet werden könnten und damit die Projektergebnisse als Grundlage für eine deutliche Überarbeitung der bestehenden Zulassung zum Einsatz kommen können. Es ist jedoch denkbar, dass die derzeit in der Zulassung Z-23.11-1595 formulierten Einschränkungen im Anwendungsbereich zumindest leicht in Richtung der ursprünglichen Erwartungen verringert werden können. Wesentlicher Hemmschuh für deutliche Verbesserungen stellt nach wie vor das Finden einer sicheren wissenschaftlichen Nachweismethodik dar, die eine möglichst genaue Übereinstimmung mit der Praxis zeigt. Bei realisierten Strohballenbauten konnte bisher nur in Ausnahmefällen und unsachgemäßer Anwendung Schimmel in Strohballenbauteilen beobachtet werden. Weitere Untersuchungen sollten zunächst das Aufstellen einer geeigneten Methodik zum Ziel haben, bzw. einen pragmatischen Ansatz verfolgen, der von der funktionierenden Realität ausgeht.

4.3 Brandschutz

Die im Bereich Brandschutz durchgeführten Arbeiten erfüllen in vollen Umfang die erwarteten Ergebnisse und ermöglichen den bauaufsichtlich anerkannten Einsatz von Strohballenwänden unter den entsprechenden Bedingungen in einer deutlich größeren Vielfalt und Leistung als vor Beginn des Projektes. Das Ergebnis eines Feuerwiderstandstests hat ein weiteres allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis für eine feuerhemmende Außenwand aus Strohballen ermöglicht, die weiteren Prüfergebnisse können als Grundlage für zukünftige bauaufsichtliche Anerkennungen dienen.

4.4 Wärmeschutz

Mit Hilfe der durchgeführten Tests konnten die erwarteten Erkenntnisse gewonnen werden. Für den Bereich der Wärmeleitfähigkeit unter trockenen Bedingungen an leichten und mittleren Rohdichten konnten die bisher gemessenen Werte im Wesentlichen bestätigt und statistisch abgesichert werden. Die Testergebnisse der Wärmeleitfähigkeit unter feuchten Bedingungen bestätigen, dass die feuchtebedingte Verschlechterung der Dämmleistung in der labormäßigen Realitätsnachbildung unterhalb des derzeit in der Zulassung 20%igen Aufschlags von 20% bleibt. Eine weitere Untersuchung mit einer größeren Probenschar könnte hier noch Optimierungen ermöglichen, es muss jedoch bedacht werden, dass ein avisierter geringerer Aufschlag unter Umständen zu einer engmaschigeren Qualitätssicherung in der Baustoffbereitstellung führen kann um Ausreißer zu eliminieren.

Das Ergebnis der Prüfung des Wärmedurchlasswiderstands eines Realbauteils zeigt eine Dämmleistung auf dem Niveau der international bei dieser Art von Messungen erzielten Werte. Unklar bleibt dabei die Korrespondenz zu den gemessenen Wärmeleitfähigkeiten am Baustoff, die bei der

normgerechten Berechnung des Wärmedurchlasswiderstands zu deutlich positiveren Werten führt. Inwieweit dies nur ein aufbau- oder testbedingtes Phänomenen im Einzelfall oder regelmäßiges Verhalten ist können weitere Untersuchungen aufzeigen. Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass die Untersuchungsergebnisse im Bereich Wärmeschutz im wesentlichen eine Absicherung der bestehenden Erkenntnisse darstellen, neue Erkenntnisse, die zu einer Überarbeitung der bestehenden Zulassung führen oder eingearbeitet werden können/müssen, liegen nicht vor.

4.5 Schallschutz

Siehe Kapitel 3.3.3.

5 Maßnahmen zur Verbreitung

2005

1. bis 3. Juli

Tagung des FASBA auf Burg Waldeck

Vorgetragen durch Projektleiter Dirk Scharmer

Dargestellte Inhalte: Projektzielsetzungen und Stand der Arbeiten des Projekts

Publikum: Bundesweite Teilnehmer, europäische Gäste, FASBA- Mitglieder (ca. 120 Personen)

Herbst

Spendenkampagne mit intensiver Information der FASBA- Mitglieder und weiterer interessierter Person. Über 50.000 EUR Spenden von Privatpersonen zur Durchführung des Projekts.

2006

25. Januar und 2. Februar

Veranstaltung der Landwirtschaftskammer Niedersachsen in Bavendorf

Vorgetragen durch Projektleiter Dirk Scharmer

Dargestellte Inhalte: Projektzielsetzungen und Stand der Arbeiten des Projekts

Publikum: Landwirte aus Niedersachsen (ca. 50 Personen)

18. bis 20. August

Tagung des FASBA in Walthershausen

Vorgetragen durch Projektleiter Dirk Scharmer

Dargestellte Inhalte: Projektzielsetzungen und Stand der Arbeiten des Projekts

Publikum: Bundesweite Teilnehmer, internationale Gäste (USA, Europa), FASBA- Mitglieder (ca. 90 Personen)

7. Dezember

Veranstaltung der Handwerkskammer Lüneburg- Stade in Kooperation mit der FNR in Lüneburg

Vorgetragen durch Projektleiter Dirk Scharmer

Dargestellte Inhalte: Projektzielsetzungen und Stand der Arbeiten des Projekts

Publikum: Fachleute aus Lüneburg und Umgebung (ca. 100 Personen)

2007

6. März

Veranstaltung des Netzwerk Baubiologie Lüneburg

Vorgetragen durch Projektleiter Dirk Scharmer

Dargestellte Inhalte: Projektzielsetzungen und Stand der Arbeiten des Projekts

Publikum: Fachleute aus Lüneburg und Umgebung (ca. 40 Personen)

8. bis 10. Juni

Fachseminar Strohballenbau im Ökodorf Sieben Linden (Veranstalter: Freundeskreis Ökodorf e.V.)

Vorgetragen durch Projektleiter Dirk Scharmer

Dargestellte Inhalte: Projektzielsetzungen, Stand der Arbeiten und Inhalte des Projekts

Publikum: Bundesweite Teilnehmer, (ca. 30 Personen)

5. bis 12. August

Internationale Tagung des FASBA im Ökodorf Sieben Linden

Vorgetragen durch Projektleiter Dirk Scharmer, Projektpartner FEB (Dipl.- Ing. Krick und Prof. Dr. –Ing. Minke), mit vertiefenden Workshops zu einzelnen Themen

Dargestellte Inhalte: Projektzielsetzungen, Stand der Arbeiten und Inhalte des Projekts

Publikum: ca. 150 Internationale Teilnehmer Gäste aus 16 Nationen

2008

Februar

Lehrgang Baubiologie in Lüneburg

Verschiedene Veranstaltungen des Bildungswerk Weser- Ems und VERDI

Vorgetragen durch Projektleiter Dirk Scharmer

Dargestellte Inhalte: Biohygrothermisches Verhalten von Stroh, Abschlussarbeit zu diesem Thema

11. bis 13. April

Fachseminar Strohballenbau im Ökodorf Sieben Linden (Veranstalter: Freundeskreis Ökodorf e.V.)

Vorgetragen durch Projektleiter Dirk Scharmer

Dargestellte Inhalte: Projektzielsetzungen, Stand der Arbeiten und Inhalte des Projekts

Publikum: Bundesweite Teilnehmer, (ca. 30 Personen)

14. bis 16. April

Veranstaltung des europäischen Strohballenbaunetzwerks zu europäischer Zulassung von Strohballen als Baustoff in Hebden Bridge/ UK

Vorgetragen durch Projektleiter Dirk Scharmer

Dargestellte Inhalte: Projektzielsetzungen, Stand der Arbeiten und Inhalte des Projekts (detailliert)

Teilnehmer: 12 Personen aus Europa

24. bis 31. Mai

Fachseminar Strohballenbau im Ökodorf Sieben Linden (Veranstalter: Freundeskreis Ökodorf e.V.)

Vorgetragen durch Projektleiter Dirk Scharmer

Dargestellte Inhalte: Projektzielsetzungen, Stand der Arbeiten und Inhalte des Projekts

Publikum: Bundesweite Teilnehmer, (ca. 20 Personen)

3. Juni

Disputation Benjamin Krick

Dargestellte Inhalte: Lasttragendes Bauen mit Kleinballen, Arbeitsbereich FEB

Publikum: 10 Teilnehmer bundesweite Fachleute

7. bis 13. Juni

Fachseminar Strohballenbau im Ökodorf Sieben Linden (Veranstalter: Freundeskreis Ökodorf e.V.)

Vorgetragen durch Projektleiter Dirk Scharmer

Dargestellte Inhalte: Projektzielsetzungen, Stand der Arbeiten und Ergebnisse des Projekts

Publikum: Bundesweite Teilnehmer, (ca. 15 Personen)

3. bis 9. August

Fachseminar Strohballenbau im Ökodorf Sieben Linden (Veranstalter: Freundeskreis Ökodorf e.V.)

Vorgetragen durch Projektleiter Dirk Scharmer

Dargestellte Inhalte: Projektzielsetzungen, Stand der Arbeiten und Ergebnisse des Projekts

Publikum: Bundesweite Teilnehmer, (ca. 15 Personen)

5. bis 7. September

Tagung des FASBA im Ökozentrum Verden

Vorgetragen durch Projektleiter Dirk Scharmer, Projektpartner FEB (Dipl.- Ing. Krick und Prof. Dr. –Ing. Minke, Dr.-Ing. Frank Otto (ZUB), Prof. Dr.-Ing. Danielewicz

Dargestellte Inhalte: Inhalte und Ergebnisse des Projekts detailliert

Publikum: ca. 70 Fachleute aus Deutschland mit europäischen Gästen

14. bis 26. Oktober (geplant)

Veranstaltung des europäischen Strohballenbaunetzwerks in Marsaz/ Frankreich

Aufarbeitung und Europaweite Verbreitung aller wichtigen Ergebnisse, zukünftige Kooperationen

Teilnehmer: Ca. 15 Personen aus ganz Europa

24. bis 26. Oktober (geplant)

Interne Fachveranstaltung des FASBA

Zur vertieften Aufarbeitung aller Projektergebnisse und zukünftigen Forschungsbedarf. Verbreitung aller relevanten Ergebnisse über ganz Deutschland

Teilnehmer: FASBA- Mitglieder aus ganz Deutschland

6 Ökologische und ökonomische Bilanzierung der Bauweise

Strohballenbauten sind verglichen mit dem Üblichen deutlich umweltfreundlicher und kosten erfahrungsgemäß in etwa das Gleiche konventionelle Gebäude. Genaue Untersuchungen zur ökologischen und ökonomischen Bilanzierung waren nicht Gegenstand dieses Vorhaben.

6.1 Empirische Kurzdarstellung der Baukosten von Strohballenbauten

Die Baukosten der meisten Strohballenbauten in Deutschland, von denen der FASBA Kenntnis hat, liegen im Bereich 1.200 bis 1.500 EUR/m² NGF Kostengruppen 300, 400, 700 nach DIN 276. Damit kosten diese Häuser in etwa genauso viel, wie handwerklich hergestellte konventionelle Gebäude.

Eine genauere Betrachtung der Kostenstruktur lässt bei handwerklich hergestellten Gebäuden vermuten, dass der Anteil für die Lohnkosten weit über 50% der Kosten beträgt.

Außenwände aus Strohballen liegen je nach Bekleidungsart zwischen 140 und 180 EUR/m². Damit liegen sie im Bereich üblicher, etwas schlechter gedämmter Holzrahmenwände mit Zelluloseflocken und deutlich günstiger als zweischaliger Mauerwerkswände. Genauere Untersuchungen zu Erstellungskosten von Strohballenwänden sind für zukünftige Vorhaben empfehlenswert.

6.2 Empirische Kurzdarstellung der Ökobilanz von Strohballenbauten

Weitgehende ökologische Bilanzierungen wurden von Krick in [1] aufgestellt. Daneben wurde dort auch der Arbeitsaufwand verschiedener Strohballenkonstruktionen untersucht, sodass diese Arbeit bei zukünftig auch als Grundlage für detailliertere Arbeiten zur Kostenabschätzung verschiedener Strohballenbauweisen dienen kann.

Erste überschlägige Berechnungen des FASBA zeigen folgende Ergebnisse.

Bei der Herstellung von Strohballen wird 10 bis 100mal weniger Energie verbraucht als für die Herstellung aller anderen Dämmstoffe.

Bei der Herstellung eines Einfamilienhauses wird in der Gesamtbilanz der Atmosphäre ca. 25t Kohlendioxid entzogen, das entspricht der durchschnittlichen Emissionsmenge einer vierköpfigen Familie über 4 Jahre.

Die Herstellung konventionellen Einfamilienhauses (EFH) gegenüber der eines Strohballenhauses benötigt etwa die Menge an Energie mehr, mit der ein gut gedämmtes EFH über 10 Jahre beheizt wird.

Genauere Untersuchungen zu Ökobilanzen von Strohballenwänden sind für zukünftige Vorhaben empfehlenswert.

- [1] B. Krick, *Untersuchung von Strohballen und Strohballenkonstruktionen hinsichtlich ihrer Anwendung für ein energiesparendes Bauen unter besonderer Berücksichtigung der lasttragenden Bauweise*, Dissertation an der Universität Kassel: Kassel University Press, 2008.

A Lastversuche und lasttragender Gebäudetyyp

A 1 Lastversuche Großballen



von Prof. Dr.-Ing. I. Danielewicz
Hochschule Magdeburg- Stendal
Breitscheidstr. 2, D- 39114 Magdeburg, Tel. 0391- 886 4170

1 Einleitung

1.1 Teilprojekt „Lasttragende Strohballenbauweise“

Im Rahmen des Teil-Projekts „*Grundlagen für den lasttragenden Einsatz von Strohballen in Gebäude*“ sollten materialtechnische und konstruktive Grundlagen für eine lasttragende Strohballenbauweise erarbeitet werden. Das Hauptziel des Projektes bei erfolgreichem Abschluss aller Untersuchungen ist die bautechnische Entwicklung einer passivhaustauglichen lasttragenden Bauweise für Deutschland und die Schaffung der Grundlagen für deren bauaufsichtliche Anerkennung.

Die Strohballenbauweise untergliedert sich in zwei Konstruktionsarten:

- den lasttragenden Einsatz von Strohballen
- und der Nutzung von Strohballen als wärmedämmende Ausfachung.

In Deutschland ist die Strohballenbauweise bislang wenig bekannt. Seit 1998 sind etwa ein Dutzend solcher Gebäude entstanden. Die Strohballen sind dort jedoch lediglich als Ausfachung von Holzständerkonstruktionen eingesetzt und übernehmen keine lasttragende Funktion. In der lasttragenden Bauweise entstanden bis heute lediglich wenige Experimental- Nicht- Wohngebäude. Da es zu den mechanischen Eigenschaften von Strohballen und ihrem Tragverhalten derzeit noch keine aussagekräftigen Untersuchungen gibt, basiert der lasttragende Einsatz der Ballen lediglich auf Erfahrung der Handwerker. Eine Bemessung ist nicht möglich.

Im Ausland ist die lasttragende Strohballenbauweise etwas stärker verbreitet. Auch dort gibt es aber kaum Datenmaterial zu den mechanischen Eigenschaften der Strohballen. Etwas umfangreicher ist das Datenmaterial zum Verhalten von verputzten Strohballen. In diesen Untersuchungen wird der Putz jedoch als mittragendes Bauteil angesetzt, er übernimmt sogar die meiste Beanspruchung einer Wand. In dem vorliegenden Projekt sollen die Strohballen als tragender Baustoff untersucht werden. Die positive, verstärkende Funktion der Putzschichten soll als nicht genutzte „Tragfähigkeitsreserve“ betrachtet werden.

Die vorhandene Wissenslücke zum Tragverhalten von Strohballen soll mit Hilfe von experimentellen Untersuchungen, die im Rahmen dieses Projektes von den Kooperationspartnern:

- Universität Kassel - Zentrum für Umweltbewusster Bauen und (UNI Kassel)
- Hochschule Magdeburg- Stendal (FH) – Fachbereich Bauwesen (HS MD-SDL)

durchgeführt werden, geschlossen werden. Während in Kassel die Kleinballen untersucht werden, widmet sich die HS MD-SDL den elasto-mechanischen Eigenschaften der Großballen mit Abmessungen 200cm / 85cm / 75cm. Die Untersuchungen umfassten Versuche an Einzelballen und an raumhohen Wandelementen.

1.2 Festlegung des Versuchsprogramms

Die Auslegung des Versuchsprogramms erfolgte in Anlehnung an die Erfordernisse eines nachzuweisenden Prototyp-Hauses. Hierbei handelt es sich um ein 2-geschossiges Einfamilienhaus mit ca. 150m². Auf der Grundlage der erzielten Ergebnisse soll das Gebäude optimiert werden, um in der Endphase zu einer bauaufsichtlichen Zulassung zu gelangen.

Das Prototyp-Gebäude ist nachstehend dargestellt. Die Höhe und die Art der Beanspruchungen, die in das Prüfprogramm für die Strohballen aufgenommen wurden, ergeben sich aus den zu erwarteten Beanspruchungen der im Bild eingerahmten Gebäudewand.

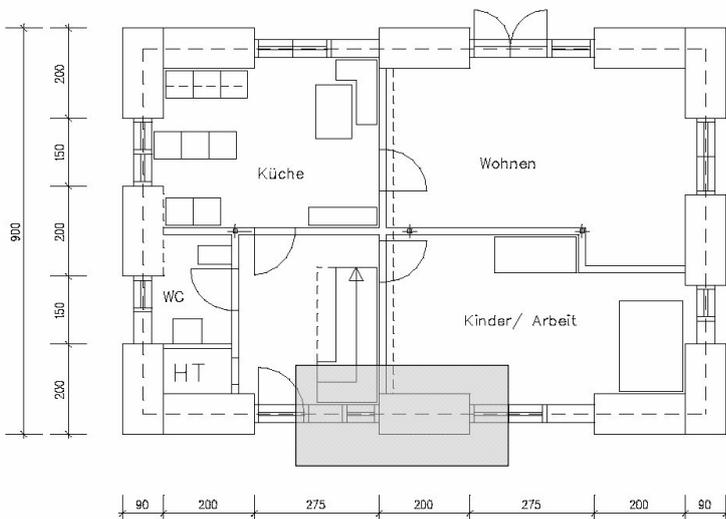
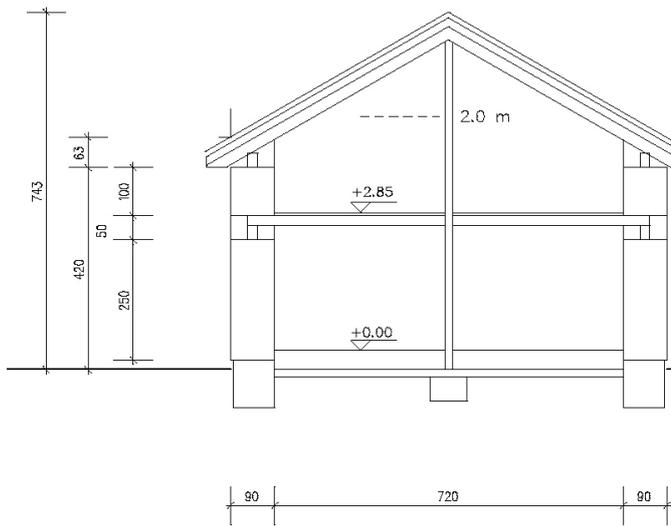


Abbildung 1-1 : Prototyp-Gebäude in lasttragender Strohballenbauweise mit Großballen

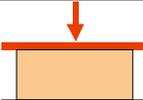
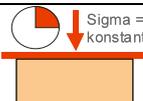
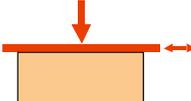
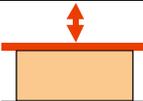
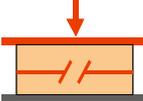
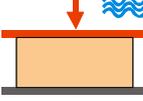
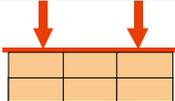
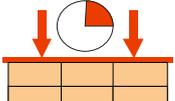
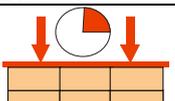
Die überschlägige Lastermittlung ergibt eine vertikale Wandbeanspruchung in der Größenordnung von $\sigma = 65 \text{ kN/m}^2$.

Es soll nachgewiesen werden, dass unverputzte Strohballenwandelemente vertikale und horizontale Lasten in dem o.g. Gebäude aufnehmen können. Der Nachweis soll vorrangig unabhängig von der Bekleidung der Strohballen durchgeführt werden, eine Verbesserung der Belastbarkeit durch z.B. Verputzen (insbesondere Lehmputz) soll abgeschätzt werden.

1.3 Versuchsprogramm

Das mit dem AG vereinbarte Versuchsprogramm umfasst die in der Tabelle 1-1 zusammengestellten Untersuchungen an Einzelballen (Pos. 1) und Wandelementen (Pos. 2)

Tabelle 1-1: Versuchsprogramm für Großballen und Wandelementen aus Großballen

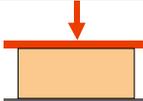
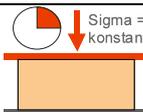
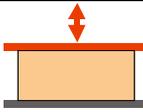
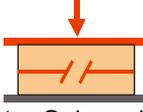
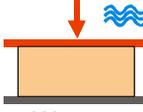
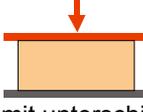
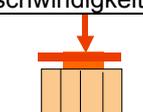
1	Versuche an Einzelballen	Beschreibung	Zweck/Ergebnis
1.1	 Druckversuche unter Kurzzeitbelastung	5 Druckversuche	σ - ε -Kennlinie und E-Modul
1.2	 Druckversuche unter Langzeitbelastung	2 Druckversuche bei einer Spannung von $\sigma = 80 \text{ kN/m}^2$	ε -t-Kennlinie. Kriechverhalten
1.3	 Druckversuche unter Langzeitbelastung	3 Druckversuche bei einer Anfangsspannung von 40, 70, 100 kN/m^2 $\varepsilon = \text{konst.}$	σ -Kennlinie. Relaxationsverhalten
1.4	 Schubversuch unter Gebrauchsspannung	2 Schubversuche	τ - ε_h -Kennlinie
1.5	 Spannungswechsel	2 Druckversuche mit Spannungswechsel von +/- 20% der Gebrauchsspannung	σ - ε -Hysterese Verhalten unter Spannungswechsel
1.6	 Erntegarnausfall	2 Versuche mit Durchtrennung des Bindegarns unter Gebrauchslasten	Verhalten nach Garnausfall
1.7	 Simulation eines Wasserschadens	1 Druckversuch Ballen steht im Wasser. Wasserhöhe konstant bei 5-10 cm	Einfluss des Schlagregens auf Setzungsverhalten und Tragfähigkeit
2	Versuche an Wandelemente		
2.1	 Druckversuch unter Kurzzeitbelastung	2 Druckversuche bis 130 % der Gebrauchslast	Verifizierung der σ - ε -Kennlinie, für die Wände, Elastizitätsmodul der Wandelemente,
2.2	 Sigma = konstant Druckversuch unter Dauerlast $\sigma = \text{konst.}$	1 Druckversuch Die Belastung wird auf der Grundlage der Ergebnisse aus den Versuchen 1.2 und 1.3 festgelegt	Verifizierung der ε -t-Kennlinie, Kriechverhalten
2.3	 Epsilon = konstant Druckversuch unter Dauerlast $\varepsilon = \text{konst.}$	1 Druckversuch Die Belastung wird auf der Grundlage der Ergebnisse aus den Versuchen 1.2 und 1.3 festgelegt	Verifizierung der σ -t-Kennlinie, Spannungsabbau (Relaxation)

2 Versuchsprogramm, Prüfstände und Messwerterfassung

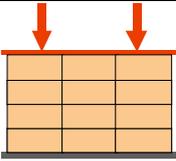
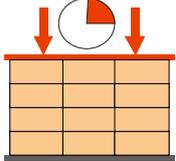
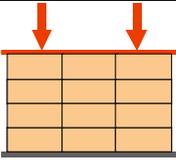
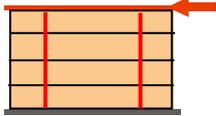
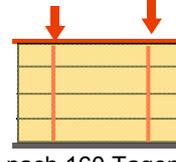
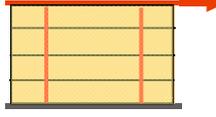
2.1 Realisiertes Versuchsprogramm

Das an der Hochschule Magdeburg- Stendal realisierte Versuchsprogramm ist in der Tabelle 2-1 zusammengestellt. Der Umfang der Untersuchungen wurde nach Ansprache mit dem AG verändert und erweitert.

Tabelle 2-1: Ausgeführte Versuche an der Hochschule Magdeburg- Stendal

1	Versuche an Einzelballen	Beschreibung	Zweck/Ergebnis
1.1	 Druckversuche unter Kurzzeitbelastung	7 Versuche mit Druckspannung von: 5 x max $\sigma \geq 400 \text{ kN/m}^2$ 2 x max $\sigma = 100 \text{ kN/m}^2$	$\sigma - \varepsilon$ - Kennlinie und E-Modul der Strohballen
1.2	 Kriechversuche über $t \geq 30$ Tage	2 Versuche Dauerbelastung mit Anfangsspannung von: $\sigma_0 \approx 60 \text{ kN/m}^2$	$\varepsilon - t$ - Kennlinie; Setzungsverhalten unter konstanter Spannung; Verhalten unter Dauerlast
1.3	 Relaxationsversuche über $t \geq 30$ Tage	3 Versuche Dauerstauchung von: $\varepsilon_{1\text{-konst.}} = 10\%$ $\varepsilon_{2\text{-konst.}} = 20\%$ $\varepsilon_{3\text{-konst.}} = 30\%$	$\sigma - t$ - Kennlinie; Spannungsabbau unter konstanter Stauchung; Spannungsverlust infolge Relaxation
1.4	Schubversuch unter Gebrauchs-Druckspannung	durch Wandversuche ersetzt	Bestimmung des Schubmoduls ; Eignung der Strohballen zur Gebäudeaussteifung.
1.5	 Wiederholter Spannungswechsel	2 Versuche wiederholte Be- und Entlastung auf dem Gebrauchslastniveau	$\sigma - \varepsilon$ -Hysterese unter Wechselbelastung, E-Modul unter Wiederbelastung ;
1.6	 Garnausfall unter Gebrauchsspannung	2 Versuche Durchtrennen der Garne an Ballen unter Druckspannung	Tragverhalten nach Garnausfall unter Gebrauchslasten; Sicherheit gegen ungewollte Garnbeschädigung unter Gebrauchslasten
1.7	 Simulation eines Wasserschadens	2 Versuche Flutung eines mit Druck belasteten Ballens Wasserhöhe von 5 cm	Einfluß des Schlagregens bzw. eines Rohrbruches auf Setzungsverhalten und Tragfähigkeit
1.8	 Druckversuch mit unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten	2 Druckversuche mit unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten	Überprüfung des Einflusses der Belastungsgeschwindigkeit auf die Tragfähigkeit
1.9	 Druckversuche unter Teilflächenbelastung	2 Versuche Einleitung der Belastung über einen schmalen Rähm.	Überprüfung der Tragfähigkeit der Einzelballen bei einer nicht voll-flächigen Lasteinleitung

Fortsetzung Tabelle **Tabelle 2-1: Ausgeführte Versuche an der Hochschule Magdeburg- Stendal:**

2	Versuche an Wandelementen	Beschreibung	Zweck/Ergebnis
	Alle Versuche wurden an zwei vorgespannten Wänden durchgeführt.		
2.1	 <p>Druckversuch unter Kurzzeitbelastung</p>	<p>2 Versuche Herstellung von vorgespannten Wandelementen $P_1 \rightarrow \varepsilon_1 = 23 \%$ $P_2 \rightarrow \varepsilon_2 = 15 \%$</p>	<p>Verifizierung der $\sigma - \varepsilon$-Kennlinie, E-Modul der Wandelemente</p>
2.2	entfällt	-	-
2.3	 <p>Sigma = konstant Relaxationsversuch über $t \geq 80$ Tage</p>	<p>2 Versuche Messung der Verluste der Vorspannkraft unter konstanter Stauchung, wie unter 2.1 erzeugt Versuchsdauer: Wand 1 $t = 80$ Tage Wand 2 $t = 100$ Tage</p>	<p>Überprüfung der Relaxationsverluste der Einzelballen Festlegung der erforderlichen Vorspannung für $t = 0$</p>
2.4	 <p>Druckversuch nach 30 Tagen Dauerlast</p>	<p>2 Versuche Belastung mit einer äußeren Last mit einem Maximalwert F von : $F_1 < P_1$ und $F_2 < P_2$</p>	<p>Verifizierung der $\sigma - \varepsilon$-Beziehung der vorgespannten Wand</p>
2.5	 <p>Schubversuch nach 30 Tagen Dauerlast</p>	<p>2 Versuche Horizontalbelastung am Wandkopf bis zur signifikanten Abnahme des Widerstandes</p>	<p>Festlegung des Schubmoduls G der Strohballenwände, Eignung zur Gebäudeaussteifung</p>
2.6	 <p>Druckversuch nach 160 Tagen Dauerlast</p>	<p>1 Versuch Druckbelastung am Wandkopf einer verputzten Wand über die Vorspannkraft</p>	<p>Überprüfung des Putz-Einflusses auf die vertikale Tragfähigkeit der Wand</p>
2.7	 <p>Schubversuch nach 90 Tagen Dauerlast an verputzten Wänden</p>	<p>2 Versuche Horizontalbelastung am Wandkopf einer verputzten Wand bis zur signifikanten Abnahme des Widerstandes</p>	<p>Überprüfung des Putz-Einflusses auf die Schubtragfähigkeit der Wände, Eignung zur Gebäudeaussteifung</p>

Die Änderungen des Versuchsprogramms sind durch die in den ersten eigenen Versuchen gewonnenen Erkenntnisse begründet.

Bei den **Einzelballen** wurde im Wesentlichen auf die Durchführung von Schubversuchen verzichtet. Diese wurden an Wandelementen durchgeführt. Zusätzlich wurde die Auswirkung der Lasteinleitung über einen schmalen Rähm (Pos. 1.9 - Teilflächenbelastung) im Vergleich zur Belastung über die volle Ballenbreite, sowie der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit (Pos. 1.8) auf $\sigma - \varepsilon$ -Beziehung untersucht.

Bei den **Wandelementen** sind keine Kriechversuche durchgeführt worden. Diese wurden durch zusätzliche Relaxationsversuche ersetzt. Weiterhin wurden die bereits erwähnten Schubversuche durchgeführt.

Neu aufgenommen wurden Untersuchungen an lehmverputzten Wänden. Hierbei wurde der Einfluss des Putzes auf das Tragverhalten unter Druck- und Schubbeanspruchung getestet.

Nach der Durchführung von Versuchen an Einzelballen wurde entschieden, die Wandelemente vorzuspannen. Die Vorspannung diente der Vorwegnahme der im Laufe der Zeit zu erwarteten Setzungen der Wände unter Dauerlasten. Die Vorspannung wurde mittels Zugstäbe aus Spannstahl realisiert. So sind also alle Versuche (Druck und Schubversuche an unverputzten und verputzten Wänden) an vorgespannten Wänden durchgeführt worden.

Die Dauer der Relaxationsversuche wurde von den geplanten 30 Tagen auf 80 bzw. 100 Tage verlängert.

Sowohl bei den Einzelballen als auch bei den Wandelementen erwies sich die Vorgabe einer Drucknormalspannung als Versuchsparameter als ungeeignet. Deshalb diente bei den meisten Versuchen als Versuchsparameter die aufgebrauchte oder die erreichte relative Stauchung der Strohballen.

2.2 Verwendete Strohballen

Die untersuchten Ballen wurden am 17. August 2005 aus einem Roggenstroh mit einer Strohballenpresse Typ New Holland D710 gepresst. Die Ballenabmessungen betragen Länge x Breite x Höhe = 185 x 85 x 48 cm. Der Gewichtsmittelwert lag bei 90,4 kg, was einer Rohdichte von $\rho = 129 \text{ kg/m}^3$ entsprach.

Der Roggen stammte aus einem kontrollierten biologischen Anbau. Während der Ballenherstellung herrschte ein trockenes Sommerwetter. Die relative Luft- bzw. Strohfeuchte wurde nicht gemessen. Bis zum Abtransport wurden sie regengeschützt in Mechtersen bei Lüneburg zwischengelagert.



Abbildung 2-1 Lagerung der Strohballen in der Laborhalle

Am 15. und 16. Juni 2006 erfolgte der Abtransport per LKW in die Versuchshalle der Hochschule Magdeburg- Stendal, wo sie auf Holzpaletten in Stapeln von 5 Ballen aufbewahrt wurden (Abbildung 1-1).

Die Strohballen wurden vor der Versuchsdurchführung ausgemessen und gewogen. Die Streuung der Rohdichte ist im Abbildung 2-2 dargestellt. Es muss festgestellt werden, dass die zur Untersuchung bereitgestellten Ballen wesentlich ungleichmäßiger gepresst wurden, als die üblich im Strohballenbau verwendete Ballen.

Es ergeben sich folgende statistische Parameter.

Probenanzahl :	$n = 36$
Mittelwert Rohdichte:	$\rho = 130,12 \text{ kg/m}^3$
Standardabweichung:	$\sigma_p = 8,73$

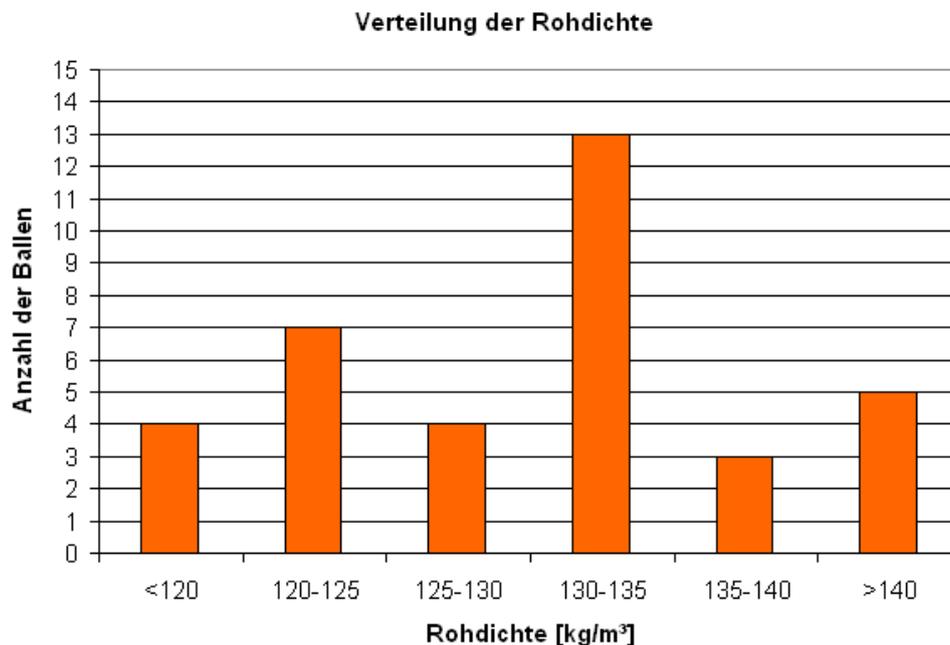


Abbildung 2-2: Rohdichteverteilung der untersuchten Strohballen

2.3 Meßwertaufnahme

Die Aufnahme der Messwerte in Belastungsversuchen erfolgte mit Hardware der Firmen Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM), Micro-Epsilon und Testo. Verwendet wurden Messverstärker HBM MGCplus, HBM Spider8 und HBM SpiderMobil. Als Messprogramm wurde „Catman“ der Version 4.5 von HBM eingesetzt.

Die Kraftmessungen erfolgten mit einer Kraftmeßdose HBM C6/2 MN mit einem Messbereich von 0-2000 kN, zwei Kraftmessdosen HBM C16/500 mit einem Meßbereich von 0-500 kN und zwei Wägezellen HBM RTN22 t mit einem Messbereich von 0-218 kN.

Die Weggrößen wurden mit Seilzugwegaufnehmern des Typs Micro-Epsilon WDS-5000 mit einem Messbereich von 0-5000 mm oder induktiven Tastspitzen des Typs HBM WA 100 mit einem Messbereich von 0-100 mm gemessen.

Die Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit wurden bei Langzeitversuchen mit Hilfe von Messdaten-Speichergeräten des Typs Testo testostor 171 aufgezeichnet.

2.4 Prüfstände

Die Belastungsversuche wurden in vier Prüfständen durchgeführt:

Tabelle 2-2: Prüfstände, Übersicht

Nr./Bezeichnung	Beschreibung	Druckzylinder	Druckkraft	Hub
		Typenbezeichnung	[kN]	[mm]
I / Yale	mobiler Stahlrahmen Yale RPY-200-35 ME	Yale YH-200/350	2000	350
II	Prüfrahmen 1 (klein)	Yale YH-100/150	1000	150
		Yale YH-70/350	700	350
III	Prüfrahmen 1 (groß)	Yale YH-100/150	1000	150
		Yale YH-70/350	700	350
IV	Scheiteldruckpresse	Walter & Bay	300	300



Abbildung 2-3: Prüfstand I „Yale“ mit Meßeinrichtung



Abbildung 2-4: Prüfstände II (links) und III (rechts)

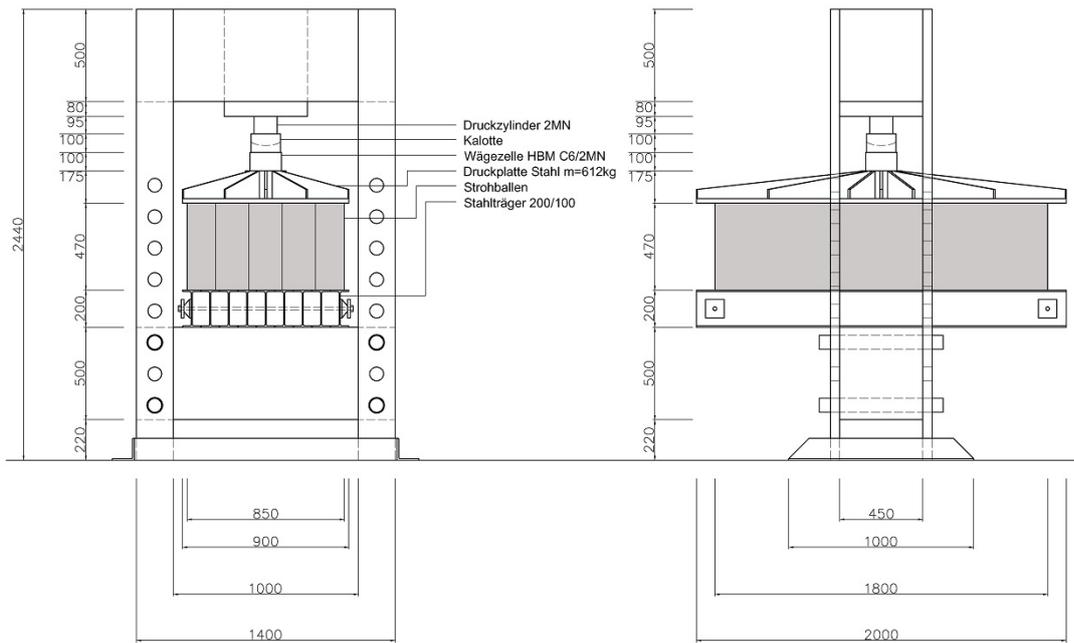


Abbildung 2-5: Prüfstand 1 /Yale, Versuche mit Einzelballen

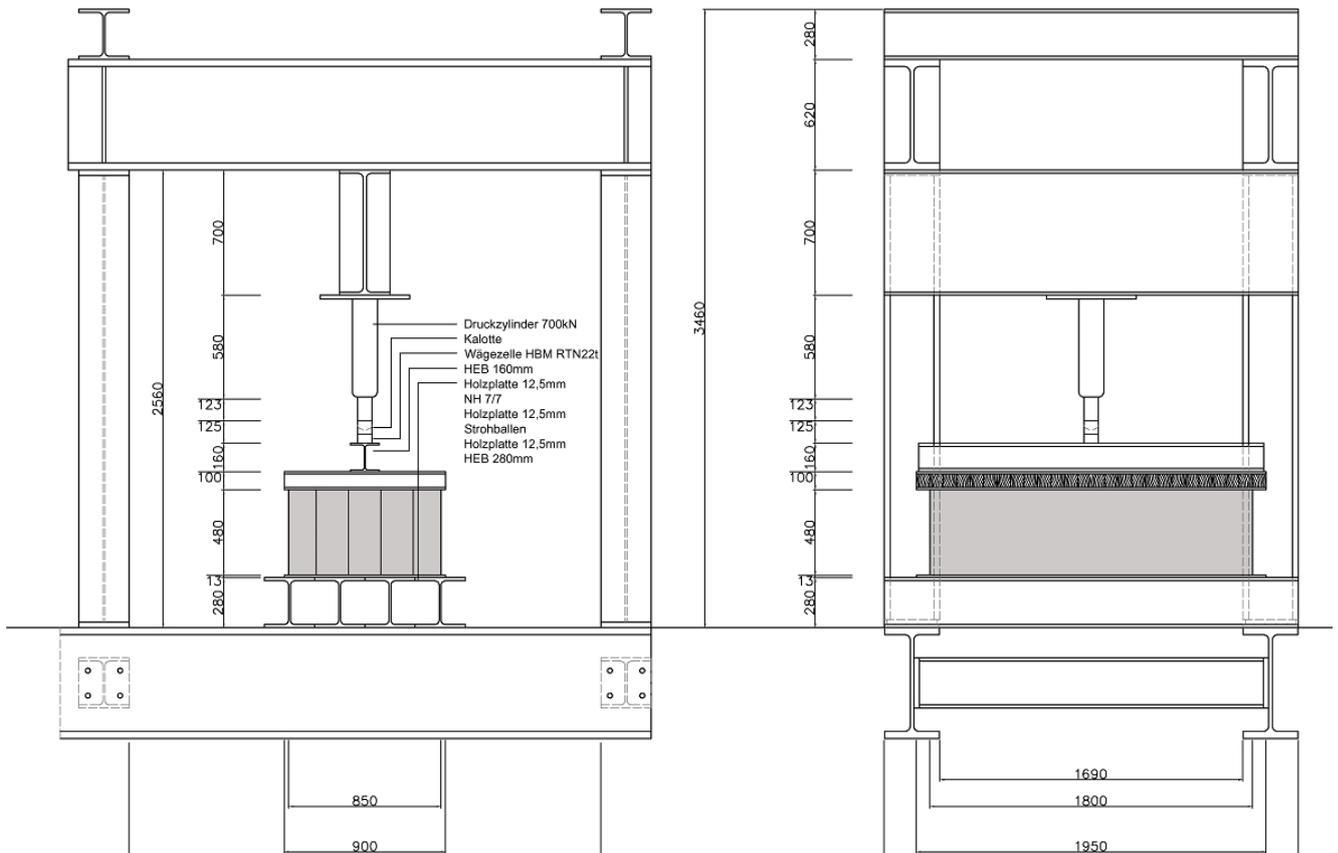


Abbildung 2-6: Prüfstand II, Versuche mit Einzelballen, M 1:33

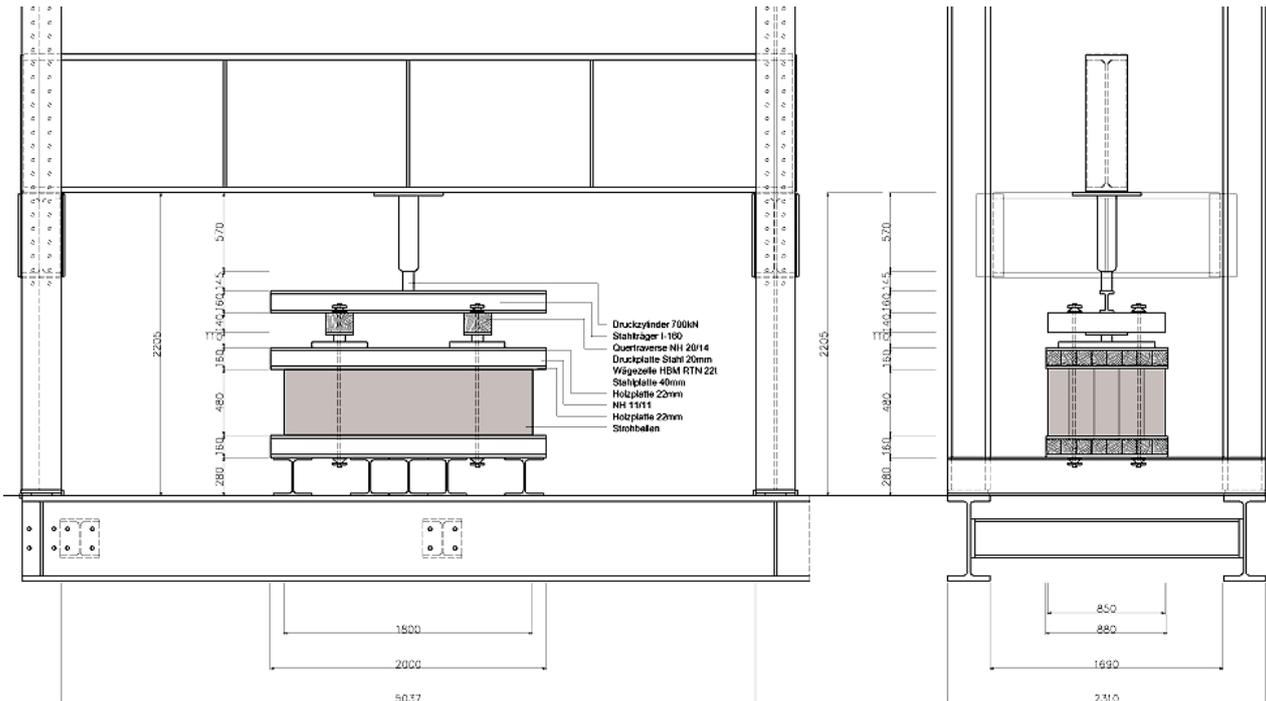


Abbildung 2-7: Prüfstand III Versuche mit Einzelballen, M 1:50

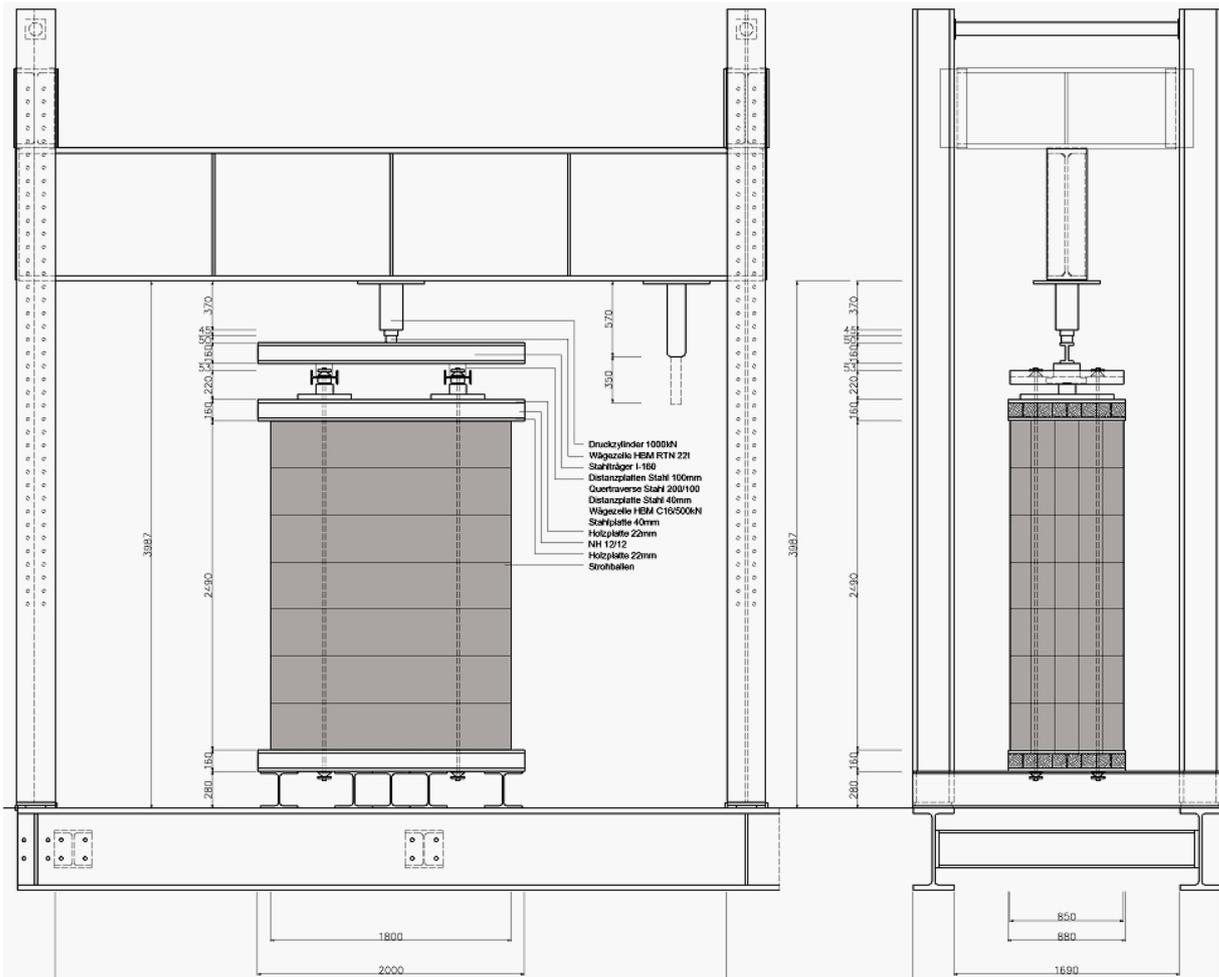


Abbildung 2-8: Prüfstand III, Versuche an Wandelementen, M 1:50

3 Versuche an Einzelballen

3.1 Druckversuch (Kurzzeitbelastung) an Einzelballen, Pos 1.1

Versuchsbeschreibung

Die untersuchten Strohballen wurden zentrisch, ohne Behinderung der Querdehnung auf Druck beansprucht. Die Versuchsziele waren:

- Ermittlung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung für Strohballen
- Ermittlung des Elastizitätsmoduls auf dem Niveau der Gebrauchsbeanspruchungen
- Feststellung der maximalen Druckbeanspruchbarkeit der Strohballen
- Feststellung der Versagensart

Fünf Strohballen wurden bis zu einer Stauchung von über $\varepsilon = 50 \%$ belastet (Pos. 1.1), bei weiteren Ballen wurde eine geringere Stauchung angesetzt. Auch die im Bild nicht dargestellten Spannungs-Stauchungs-Beziehungen aus Versuchen zu anderen Positionen des Versuchsprogramms wiesen ähnliche Verläufe auf.

Die Versuche wurden weggesteuert durchgeführt, bis zum Erreichen der vorgegebenen Endstauchung durchgeführt. Die Datenerfassung erfolgte mit Messverstärker HBM MGCplus. Aufgenommen wurden die Druckkraft (Kraftmeßdose), und Setzung an zwei Punkten neben der Kraftmeßdose (Seilzug-Wegaufnehmer). Die Abtastrate betrug 5Hz. Die Versuche wurden im Prüfstand 1 (Yale) durchgeführt.

Die Messaufzeichnung beginnt stets bei einer Anfangsspannung von $\sigma = 4 \text{ kN/m}^2$. Diese Spannung resultiert aus dem Eigengewicht der Belastungsplatte (Rippenverstärkte Stahlplatte) der Kalotte und Kraftmeßdose. Sie erzeugt eine Stauchung von ungefähr $\varepsilon = 2 \%$. Als Basishöhe der unbelasteten Ballen gilt eine unter der Auflast einer 4 cm starken Holzbohle gemessener Höhe.

Versuchsergebnisse

Spannungs-Dehnungs-Verläufe:

Die ermittelten Spannungs-Dehnungs-Beziehungen für Ballen 1-5 (Abbildung 3-2) weisen grundsätzlich 3 Bereiche auf:

1. Bereich bis $\varepsilon = 15 \%$ mit einem konstanten E-Modul von etwa $E = 750 \text{ kN/m}^2$
2. Bereich von $\varepsilon = 15-30 \%$ mit einer Abflachung der $\sigma - \varepsilon$ - Linie $E=300\text{kN/m}^2$
3. Bereich von $\varepsilon = 30-50 \%$ mit einem überproportionalen Spannungsanstieg



Abbildung 3-1: Druckversuch an Einzelballen, Pos 1.1, Prüfstand Yale, Ballen 2, bei $\epsilon \sim 50\%$

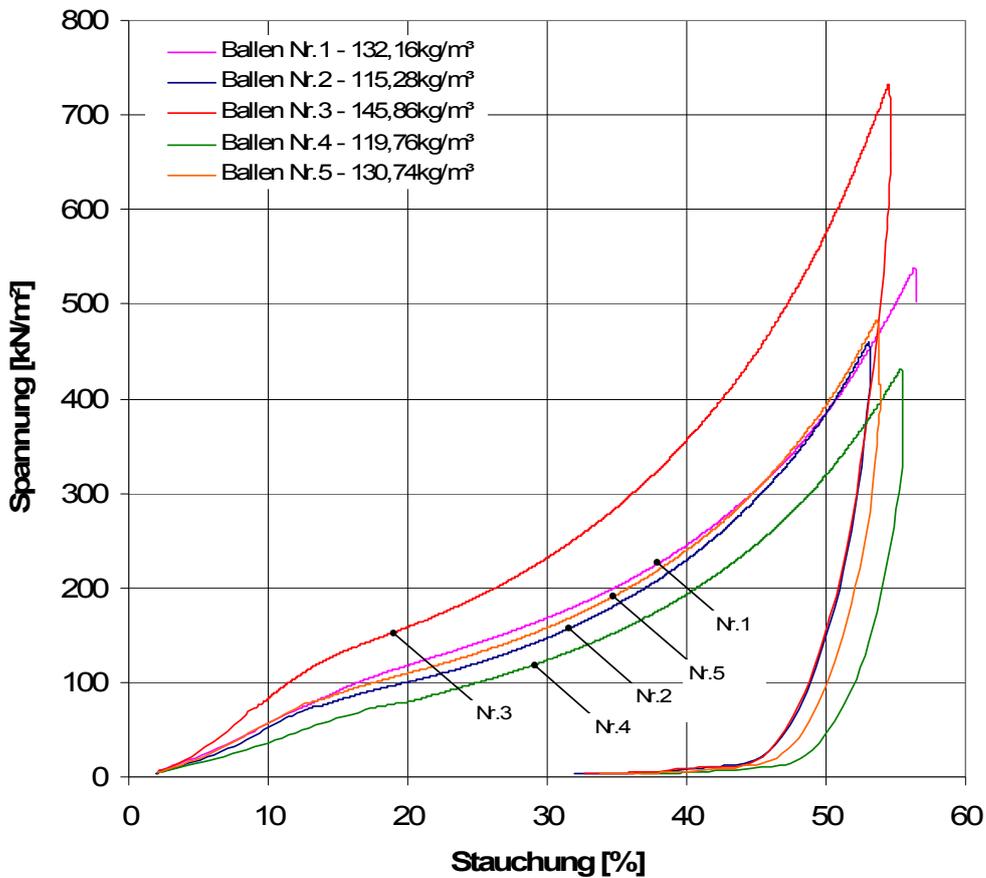


Abbildung 3-2: $\sigma - \epsilon$ -Beziehung der Einzelballen unter Druckbelastung
Pos 1.1 Ballen 1-5, $\epsilon = 0 - 50\%$

Die Neigung der Spannungs-Dehnungs-Verläufe (Elastizitätsmodul E) ist in allen ε -Bereichen sehr stark von der Rohdichte der Ballen abhängig. Der schwerste Ballen Nr. 3 (Rohdichte $\rho = 146 \text{ kg/m}^3$) ist deutlich steifer als die übrigen, so dass er als „Ausreißer“ gewertet werden kann.

E-Modul:

Mit den aufgenommenen Messwerten kann für jede inkrementelle Stauchungszunahme ein zugehöriger E-Modul ermittelt werden. Dieser ist in Abbildung 3-4 grafisch dargestellt worden. Die zuvor beschriebenen drei Stauchungsbereiche sind deutlich erkennbar. (Die etwas „unruhigen“ Linienverläufe bei 14%-Stauchung sind auf die Umstellung der Belastungsgeschwindigkeit zurückzuführen. Diese war maschinen-technisch bedingt.

Für den Bereich der Gebrauchslasten (Spannung von etwa $40\text{-}60 \text{ kN/m}^2$) lässt sich aus den Versuchen ein E-Modul von $E = 750 \text{ kN/m}^2$ (bei $\varepsilon = 9\text{-}12\%$) ableiten. Die ungefähre Neigung der σ - ε Linie ist in Abbildung 3-4 eingezeichnet. Bei einer weiteren Belastungszunahme ($80\text{-}120 \text{ kN/m}^2$) nimmt der E-Modul auf etwa 300 MN/m^2 ab.

Für die vorgespannten Wandelemente ist der Spannungsbereich von etwa $80\text{-}120 \text{ kN/m}^2$ von Interesse. Infolge von Relaxation findet ein etwa 50%er Spannungsabbau statt. Damit eine dauerhafte Vorspannung von $\sigma = 40\text{-}60 \text{ kN/m}^2$ in den Wänden verbleibt müssen sie auf ca. $80\text{-}120 \text{ kN/m}^2$ vorgespannt werden. Hierzu ist eine Stauchungen von 16% bis 25 % notwendig. In diesem Stauchungsbereich flacht der E-Modul deutlich ab, was jedoch für vorgespannte Wandelemente nicht von Bedeutung ist, da hier anstelle des Erstbelastungs-E-Moduls ein E-Modul unter wiederholter Belastung tritt.

Alle Ballen wiesen nach Entlastung eine dauer-plastische verzögert- elastische Stauchung auf. Bei Ballen, die mit einer maximalen Stauchung von 50% beansprucht wurden konnte unmittelbar nach Versuchsende eine Stauchung von $\varepsilon_{t=0} = 35\%$ gemessen werden. Diese verringerte sich nach ungefähr einem Monat auf einen Wert von $\varepsilon_{\text{Rest}} = 25\%$. Auch in anderen Versuchen schwächer belastete Ballen wiesen stets eine plastische Verformung auf. Nach Versuchsende „federten“ die Ballen nicht vollständig zurück.

Querdehnung:

Die Querdehnung der Ballen bei der maximalen Stauchung von $\varepsilon_v = 50\%$ lag in Längsrichtung bei durchschnittlich $\varepsilon_l = 16\%$, die Breite der Ballen nahm um durchschnittlich $\varepsilon_b = 13,3\%$ zu. Hieraus kann eine Querdehnzahl μ von ca. 0,25 bis 0,3 abgeleitet werden

Grenzspannung - Tragfähigkeit

Die Grenzbelastung für die Strohballen konnte nicht ermittelt werden. Die Versuche wurden bei einer Stauchung von über 50% abgebrochen. Es wurden Druckspannungen bei ungehinderter Querdehnung von im Mittel 450 kN/m^2 aufgenommen, im Einzelfall von 700 kN/m^2 . Die Drucktragfähigkeit der Strohballen stellt weder ein Bemessungs- noch ein Entwurfskriterium dar.

Versagensart

Ein Tragfähigkeitsversagen stellte sich in keinem der untersuchten Ballen ein. Die Ballen verhielten sich auch unter einer wiederholten Stauchung und Entlastung sehr „gutmütig“. Bei keinem der getesteten Ballen kam es zu einem Garnaussfall bzw. sonstigen Beschädigungen.

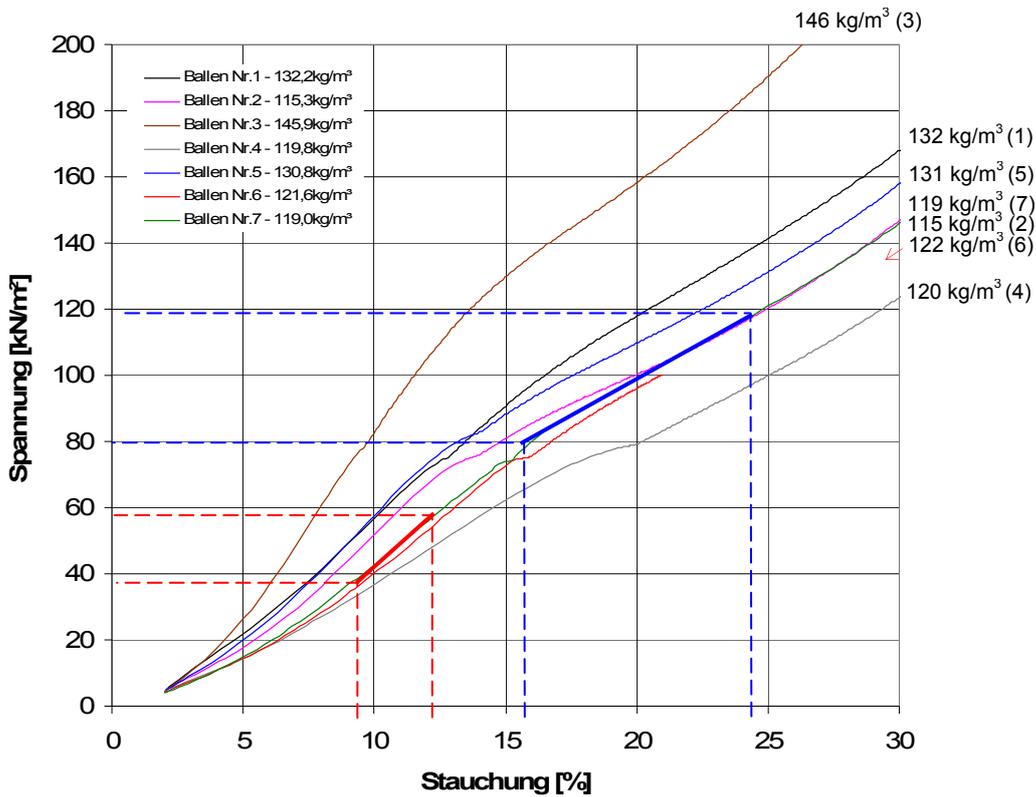


Abbildung 3-3: $\sigma - \epsilon$ -Beziehung für Einzelballen unter Druckbelastung
 Pos 1.1 Ballen 1-7, $\epsilon = 0 - 30 \%$

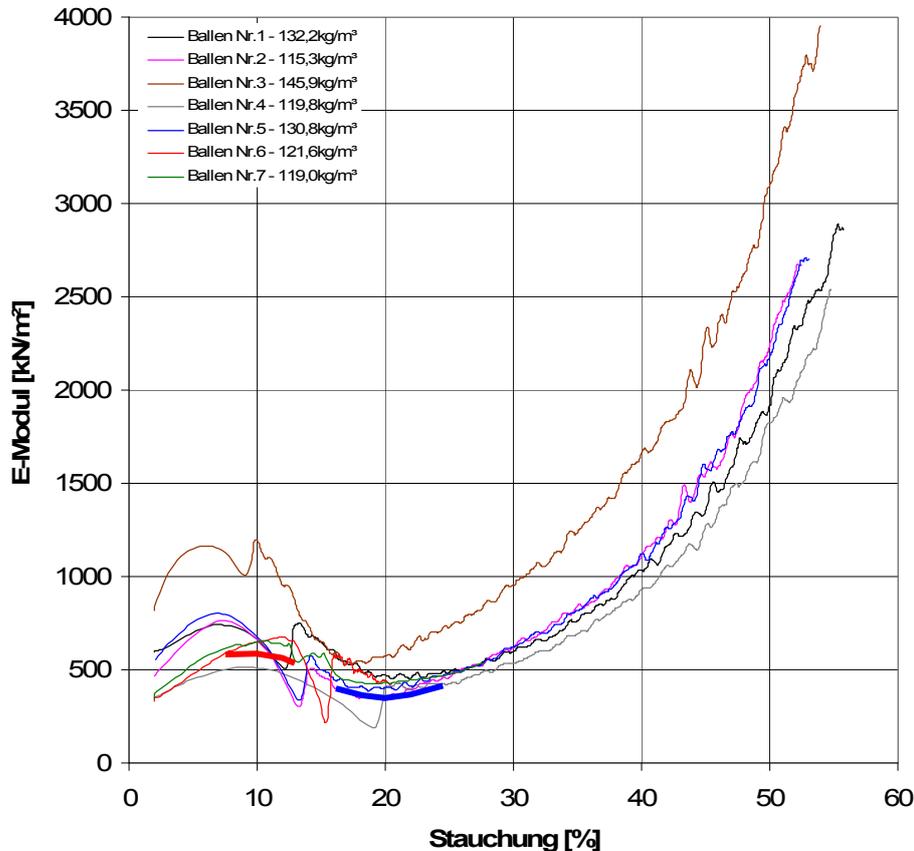


Abbildung 3-4: Veränderung des Elastizitätsmoduls E mit zunehmender Stauchung für Kurzzeitbelastung

3.2 Kriechversuche an Einzelballen, Pos. 1.2

Versuchsbeschreibung

Die Kriechversuche wurden in einer Scheitelprüfmaschine (Prüfstand IV) durchgeführt. Nach dem Anfahren der vorgegebenen Kraft wurde diese im weiteren Verlauf automatisch nachgesteuert. Die eingestellte Schwelle der Kraftregulierung betrug 3 kN.

Die Lasteinleitung erfolgte flächig, über eine steife Holztafel. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 3-5 dargestellt.



Abbildung 3-5: Versuchseinrichtung für Kriechversuche

Versuchsergebnisse

In allen drei Versuchen wurden die Ballen annähernd gleich hoch belastet. Die fast doppelt so große Stauchung im ersten Versuch, ist mit der geringeren Rohdichte des ersten Strohhallens zu begründen. (Dieser Versuch musste auf Grund eines Maschinenschadens vorzeitig abgebrochen werden). Bei den planmäßig, über 45 Tage durchgeführten Versuchen war zu beobachten, dass die Zunahme der Kriechverformungen sich deutlich verlangsamte. Ein Endwert wurde nicht erreicht. Eine sehr konservative Extrapolation der im zweiten und dritten Versuch aufgenommenen Stauchungen, erlaubt die Abschätzung deren Endwertes auf 45 mm. Hieraus ergibt sich eine Endkriechzahl für eine Druckspannung von 40 kN/m² von:

$$\varepsilon(\sigma=40\text{kN/m}^2, (t=0-\infty)) = 1,3$$

Sicherlich sind an dieser Stelle weitere Untersuchungen mit der Variation der Rohdichte und der Beanspruchungshöhe erforderlich. Der angegebene Wert von 1,3 kann nur als erster Anhaltspunkt interpretiert werden.

Kriechversuch 1; 55 kN

Beginn 10.12.2007

Kriechversuch 2: 60 kN

Beginn 14.03.2008

Kriechversuch 3: 60,1 kN

Beginn 11.05.2007

$\sigma = 39,7 \text{ kN/m}^2$

$\rho = 116 \text{ /m}^3$

$\sigma = 40,0 \text{ kN/m}^2$

$\rho = 122 \text{ kg/m}^3$

$\sigma = 41,5 \text{ kN/m}^2$

$\rho = 133 \text{ kg/m}^3$

Versuchsdauer = 18 Tage

$\epsilon_0 = 21\% \text{ bis } \epsilon_{18} = 22,4\%$

Versuchsdauer = 35 Tage

$\epsilon_0 = 10,5\% \text{ bis } \epsilon_{35} = 11,7\%$

Versuchsdauer = 45 Tage

$\epsilon_0 = 7,4\% \text{ bis } \epsilon_{45} = 8,6\%$

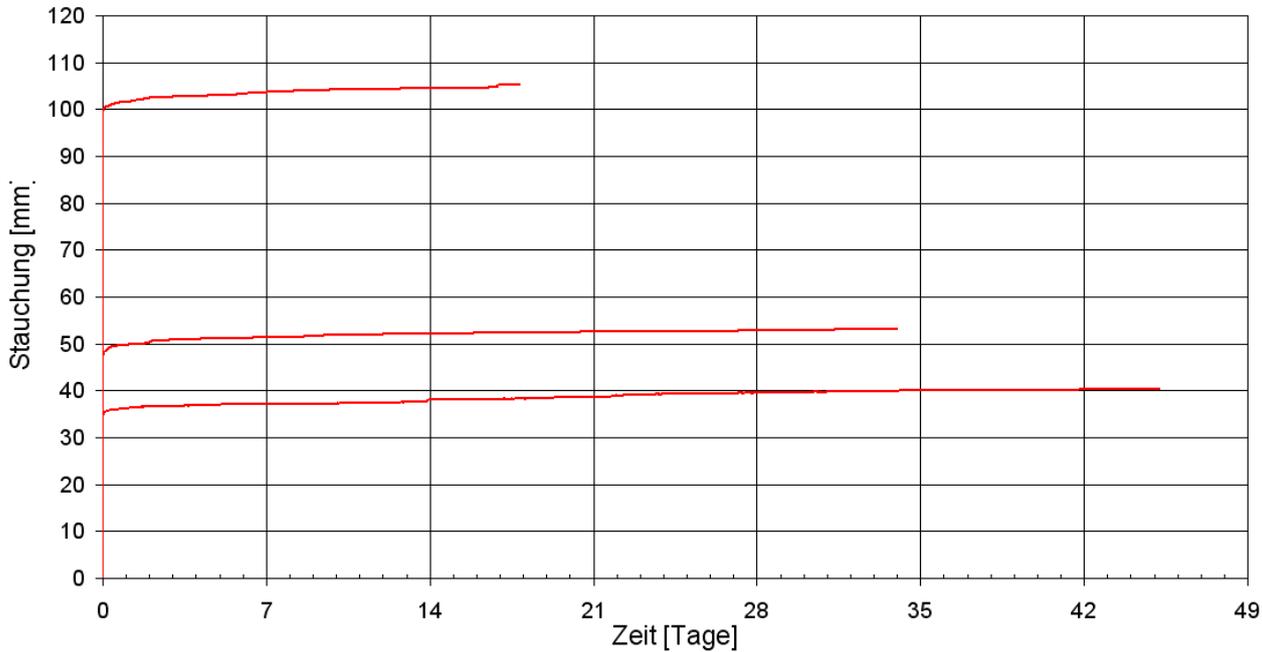


Abbildung 3-6 Ergebnisse der Kriechversuche

3.3 Relaxationsversuche an Einzelballen, Pos. 1.3

Versuchsbeschreibung

In Relaxationsversuchen sollte der Verlust der in die Strohballen eingeleiteten Druckspannung über einen definierten Beobachtungszeitraum ermittelt werden. Hierzu wurden drei Langzeitmessungen unter konstant gehaltener Stauchung durchgeführt. Die aufgebrachte Stauchung betrug $\epsilon = 10\%$, $\epsilon = 20\%$ und $\epsilon = 30\%$. Die Messung des Spannungsverlustes bzw. Verlustes der eingeleiteten Druckkraft erfolgte mittels Kraftmaßdosen bzw. Wägezellen.

An zwei weiteren Ballen wurden Relaxationsmessungen über die Dauer von 4 bzw. 7 Tage durchgeführt.

Tabelle 4: Ergebnisse der Relaxationsversuche

Ballen Nr.	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Stauchung ϵ_0 [%]	Versuchsdauer [Tage]	Spannung σ_0 T=0 [kN/m ²]	Spannung σ_{End} T=Dauer	Spannungsverlust $[\sigma_0 - \sigma_{\text{End}}]/\sigma_0$ [%]
10	122,7	30	33	139	57	59
9	138,2	20	33	126	68	46
13	130,1	10	33	46	20	56
7	119,0	30	4	146	71	51
6	121,6	20	7	96	51	46



Abbildung 3-7: Relaxationsversuche an Einzelballen, Pos 1.3 v.l.n.r: Ballen Nr. 13, $\epsilon_0 = 10\%$, Ballen Nr. 9, $\epsilon_0 = 20\%$, Ballen Nr. 10, $\epsilon_0 = 30\%$

Versuchsauswertung

Der Spannungsverlust erfolgt in drei Phasen unterschiedlicher Geschwindigkeit:

Phase 1: bis eine Stunde nach Lasteinleitung

Phase 2: bis zwei Tage nach Lasteinleitung

Phase 3: bis zum Versuchende

Phase 1:

Innerhalb der ersten Stunde nach Lasteinleitung fällt die Spannung bereits um 20% bis 30% ab. Der Spannungsabbau beginnt sofort, nach dem die Last aufgebracht wird. Der Mittelwert des Spannungsverlustes aus allen 5 Ballen beträgt 24%, Mittelwert aus Ballen 9,10,13 beträgt 22%.

Phase 2:

Die Verluste erreichen im Mittel 41% (Mittelwert aus 5 Ballen) bzw. 38% (Mittelwert aus Ballen 9, 10 und 13) der Ausgangsspannung. Am Ende der Phase 2 stellen sich in bereits 73% der endgültigen Spannungsverluste ein. Der Einfluss der Ballenrohddichte scheint für die Höhe der Spannungsverluste nicht vorherrschend zu sein. Die eindeutige Wertung ist jedoch schwierig, da einerseits die Anzahl der Proben recht gering ist, andererseits der Einfluss der Stauchungshöhe nicht von der Rohddichte entkoppelt betrachtet werden kann.

Phase 3:

In dieser Phase findet ein langsamer, stetiger Spannungsverlust statt.

Beim Ballen 13 ($\epsilon_0=10\%$) scheint der Relaxationsvorgang nach 14 Tagen abgeschlossen zu sein. Der Endwert der relaxationsbedingten Spannungsverluste würde demnach bei 56% liegen.

Beim Ballen 9 ($\epsilon_0=20\%$) flacht die Linie im Abbildung 3-8 ebenfalls gegen Horizontale ab. Es kann ein auf der sicheren Seite liegender Spannungsendwert von ca. $\sigma = 65 \text{ kN/m}^2$ angegeben werden, was ein Gesamtrelaxationsverlust von 50% bedeuten würde.

Für den auf $\epsilon_0=30\%$ gestauchten Ballen 10 wäre offensichtlich ein wesentlich größerer Beobachtungszeitraum erforderlich. Der Spannungsabbau findet auch nach 33 Tagen unvermindert weiter statt. Unglücklicherweise wurde in diesem Versuch der leichteste Ballen mit 30% am stärksten vorkomprimiert.

Tabelle 5: Verlauf der Relaxationsverluste

Ballen Nr.	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Stauchung ε [%]	Spannungsverlust in [%] nach:			
			1 Std.	2 Tage	2 Wochen	33 Tage
10	122,7	30	21	37	55	59
9	138,2	20	24	36	44	46
13	130,1	10	21	42	55	56
7	119,0	30	31	47	-	-
6	121,6	20	23	42	-	-
Mittel	126,3	-	23	42	51	53,7

Aus den drei durchgeführten Langzeitversuchen lässt sich eine prinzipielle Abhängigkeit zwischen der aufgetragenen Stauchung und den Relaxationsverlauf ableiten. Während die Stauchungen von 10% und 20% zu Spannungsverlusten führten, die in dem Beobachtungszeitfenster abgeklungen sind, ist eine bei einer Stauchung von 30% der Spannungsabbau nicht zum Stillstand gekommen.

An Ballen 6 und 7 wurde während der Belastungseinleitung Querdehnmasse aufgenommen. Bei Ballen 6 führte die Stauchung in Lastrichtung von $\varepsilon_h = 20$ % zur Querdehnung in Ballenlängsrichtung von $\varepsilon_l = 4,3$ %, und in Ballenquerrichtung von $\varepsilon_b = 3,6$ %. Bei Ballen 7 mit $\varepsilon_h = 30$ % wurde ein $\varepsilon_l = 8,5$ %, und $\varepsilon_b = 9,3$ % ermittelt.

Bemerkung zur Anfangsspannung

Durch den sehr starken Spannungsverlust während der ersten Minuten nach dem Aufbringen der Belastung ist die Angabe der Relaxationsverluste in der üblichen Form d.h. als Quotient der zum Zeitpunkt t vorhandenen Spannung und der Anfangsspannung, problematisch. Die aufgetragene maximale Anfangsspannung wird praktisch sofort abgebaut. Wird eine Wand oder ein Strohballen mittels z.B. zwei Pressen vorgespannt, die abwechselnd Kraft einleiten, ist die in die Strohballen eingeleitete Maximalspannung praktisch nicht definierbar. Während die eine Presse die Last aufbringt, stellt sich unter der anderen bereits ein deutlicher Kraftabbau ein. Dasselbe Problem entsteht, wenn eine permanente Kontrolle der eingeleiteten Kraft nicht möglich ist, sondern diese in diskreten Zeitabständen abgelesen werden kann.

**Pos.1.3 Dauerlastversuche
Ballen 6,7,9,10,13 Spannungsabbau**

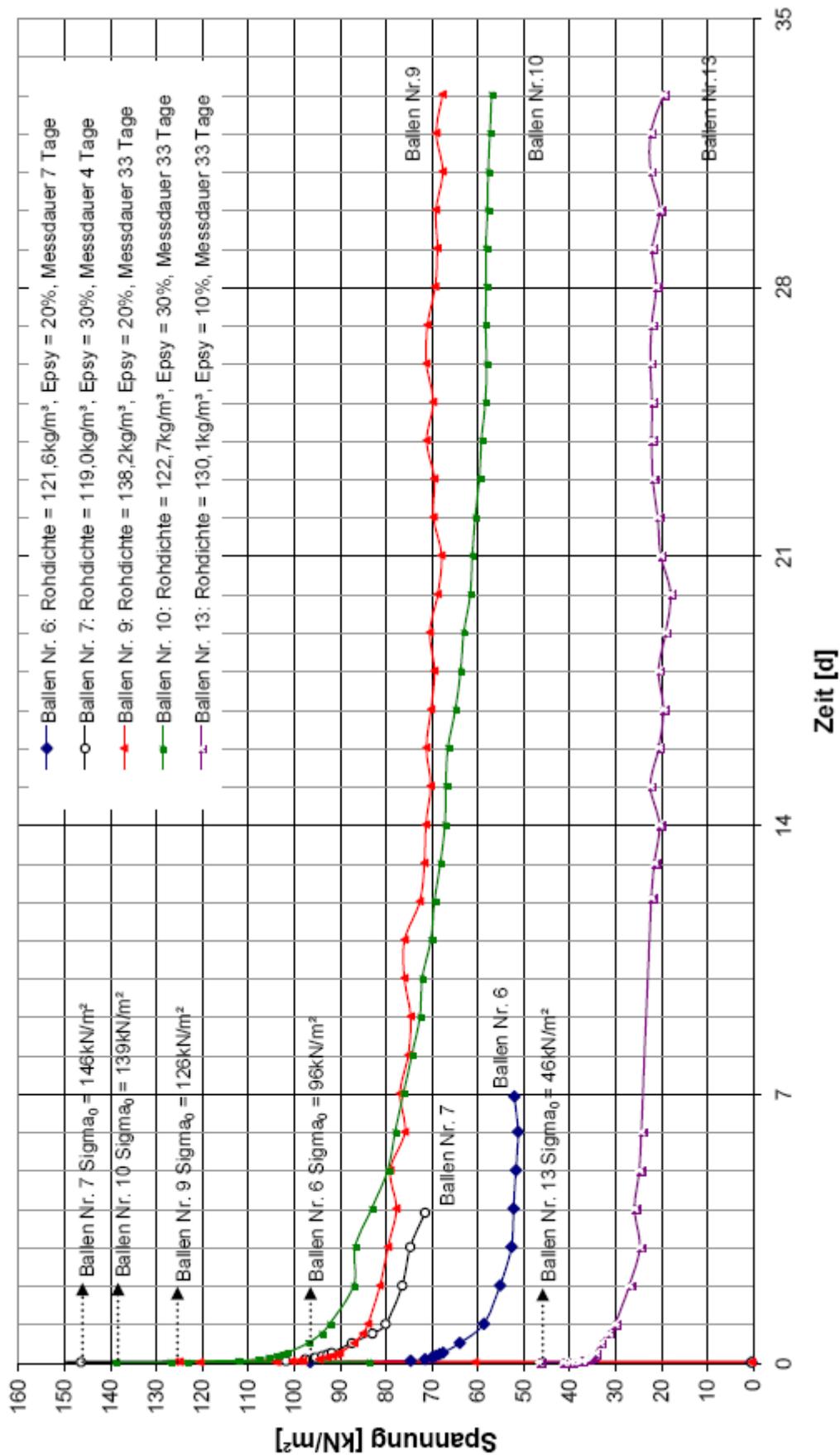


Abbildung 3-8: Relaxationsversuche an Einzelballen, Pos 1.3
Ballen 6,7,9,10,13: Abbau der Spannung bei konstanter Stauchung

Die in Abbildung 3-8 dargestellten Spannungsverläufe weisen einen nicht stetigen Verlauf auf, gekennzeichnet durch Spannungszu- und -abnahmen in der Phase 3. Diese Spannungsschwankungen resultieren aus klimatischen Einflüssen wie Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit, denen die Ballen während der Versuchsdurchführung ausgesetzt wurden. Für den Ballen Nr. 10 wurde während der Versuchsdurchführung der Temperaturgang aufgezeichnet. In Abbildung 3-9 sind gemessene Spannung und die Lufttemperatur über die Zeit dargestellt. Es ist deutlich erkennbar, dass die Spannungsschwankungen innerhalb eines Tages dem Temperaturgang verzögert folgen. Die erhöhte Spannung im Ballen 13 zwischen dem 14. und dem 30. Versuchstag (Abbildung 3-8) ist ebenfalls auf die höheren Lufttemperaturen der Augusttage 2006 zurückzuführen.

In den in Abbildung 3-6 dargestellten Linien ist der Einfluss der Tages-Temperaturschwankung zwecks besserer Lesbarkeit rausgerechnet worden.

Der Schwankung der Luftfeuchtigkeit wurde nicht registriert, so dass Aussagen über deren Einfluss nicht möglich sind.

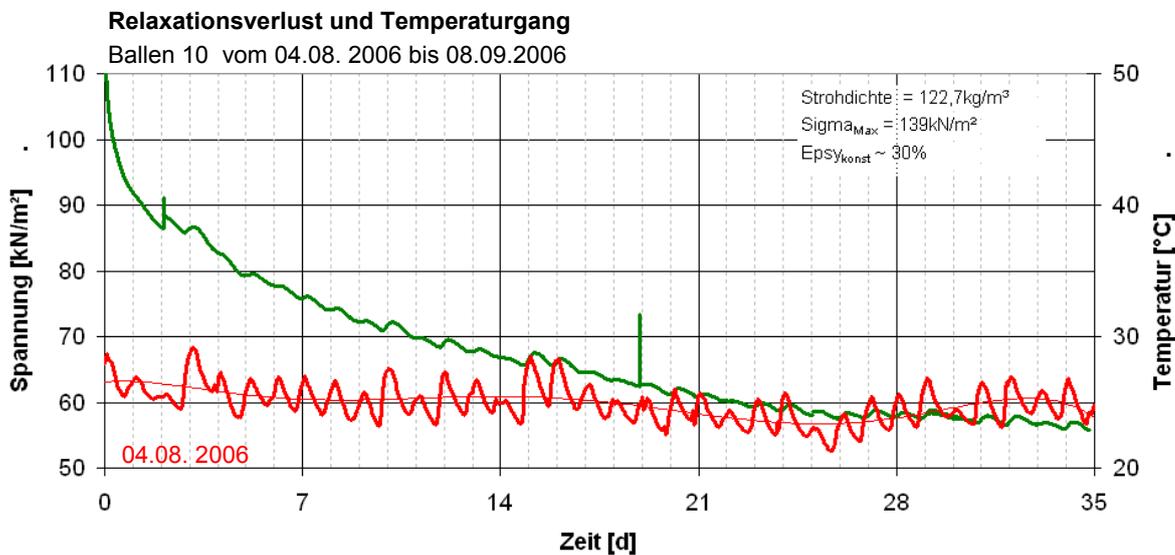


Abbildung 3-9: Relaxationsversuch Pos. 1.3, Ballen 10, $\epsilon = 30\%$
ungefilterter Spannungsverlauf und Temperaturgang während Versuchszeit

3.4 Schubversuche an Einzelballen - Pos 1.4

Die Schubversuche an Einzelballen wurden durch Untersuchungen an Wandelementen ersetzt. Der Grund hierfür liegt in der Tatsache, dass Versuche an Einzelballen keine Aussage zum Tragverhalten der horizontalen Fuge zwischen den Strohballen erlauben.

3.5 Wiederholte Belastung - Pos. 1.5

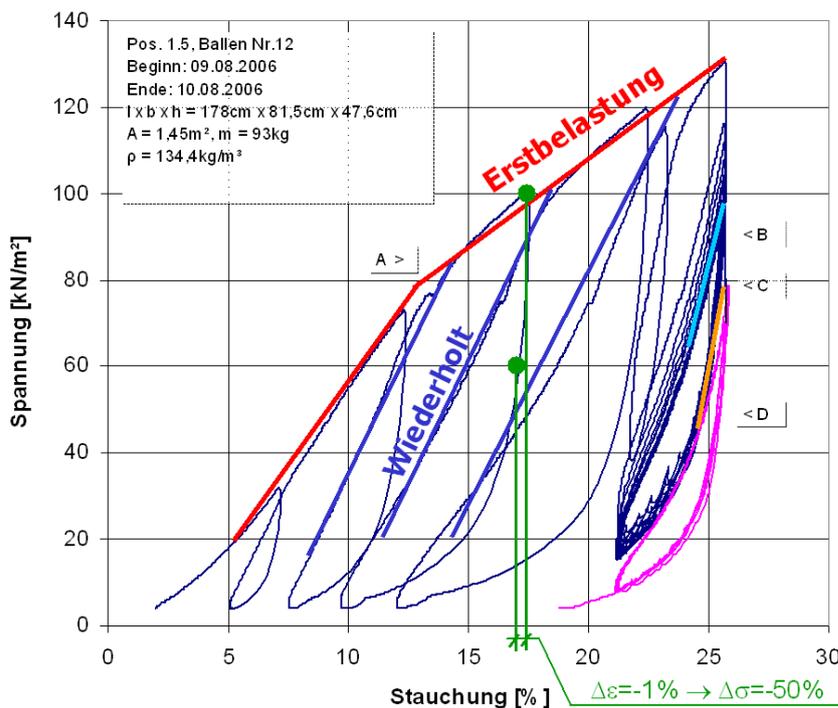
Versuchsbeschreibung

Die Strohballen wurden zwischen zwei Grenzstauchungen (Abbildung 3-11) mehrmals belastet. Ziel der Versuche war die Bestimmung des E-Moduls unter wiederholter Belastung. Durchgeführt wurden drei Versuche, deren Einzelheiten nachstehend angegeben sind.

Versuchsdurchführung und Auswertung

Strohballen Nr. 12: Der Versuch wurde weggesteuert mit 4 Belastungsphasen durchgeführt.

- Phase A Stufenweise Belastung bis zu einer Grenzstauchung von 26 %
- Phase B 11 Lastwechsel mit Grenzstauchungen von $\epsilon_{\max} = 26$ und $\epsilon_{\min} = 21$ %
- Phase C „Ruhephase“ von 22,5 Stunden mit einer konstanten Stauchung $\epsilon_{\max} = 26$
- Phase D 3 Lastzyklen mit Grenzstauchungen von $\epsilon_{\max} = 26$ und $\epsilon_{\min} = 21$ %



E-Modul für Erstbelastung:
 $\sigma < 80 \text{ kN/m}^2$: $E_{<80} = 750 \text{ kN/m}^2$,
 $\sigma > 80 \text{ kN/m}^2$: $E_{>80} = 380 \text{ kN/m}^2$,

E-Modul für Wiederbelastung:
 $\sigma > 40 \text{ kN/m}^2$: $E_n \approx 2000 \text{ kN/m}^2$,

Abbildung 3-10: $\sigma - \epsilon$ - Beziehung für wiederholte Belastung, Pos 1.5 Ballen 12:

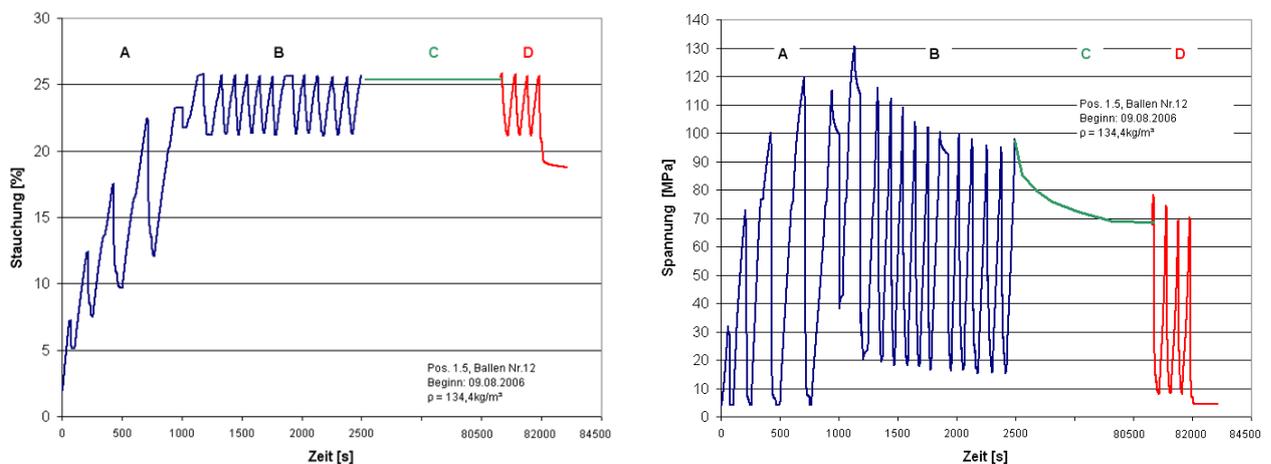
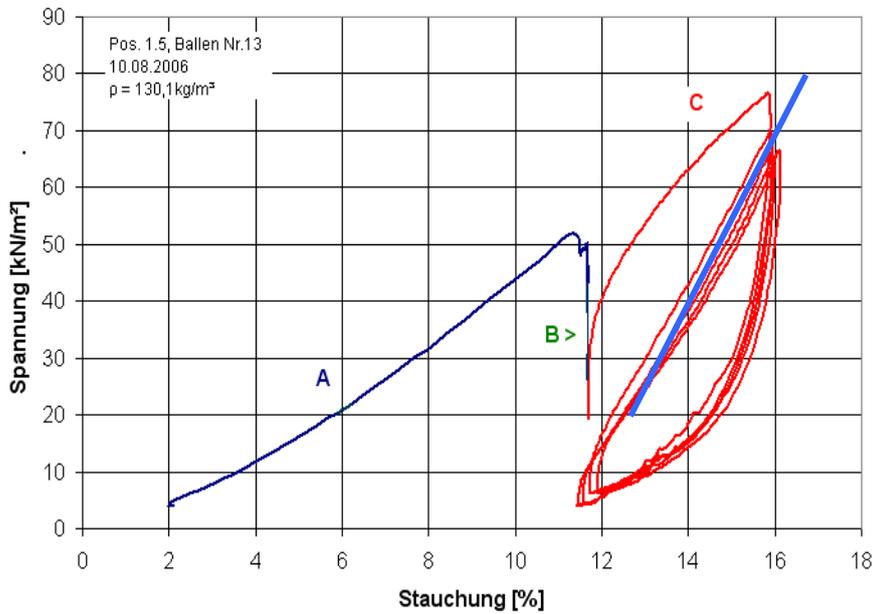


Abbildung 3-11: Versuchsverlauf Ballen 12. Bild links: Stauchungs-Zeit-Verlauf, Bild rechts: Spannungs-Zeit-Verlauf

Strohballen Nr. 13: Der Versuch wurde weggesteuert in 3 Belastungsphasen durchgeführt.

- Phase A Erstbelastung bis zur Grenzstauchung von 11 %
- Phase B „Ruhephase“ von 33 Tagen unter einer konstanten Stauchung $\epsilon_{\max} = 11$
- Phase C 5 Lastzyklen mit Grenzstauchungen von $\epsilon_{\min} = 11\%$ und $\epsilon_{\max} = 16$ %



E-Modul für Erstbelastung:
 $\sigma < 50 \text{ kN/m}^2$: $E_{<50} = 600 \text{ kN/m}^2$,

E-Modul für Wiederbelastung:
 $\sigma > 20 \text{ kN/m}^2$: $E_n \approx 1600 \text{ kN/m}^2$,

Abbildung 3-12: $\sigma - \epsilon$ - Beziehung für wiederholte Belastung, Pos 1.5 Ballen 13:

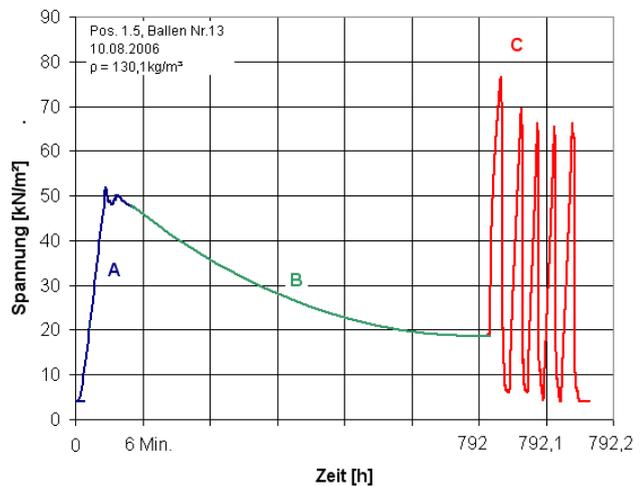
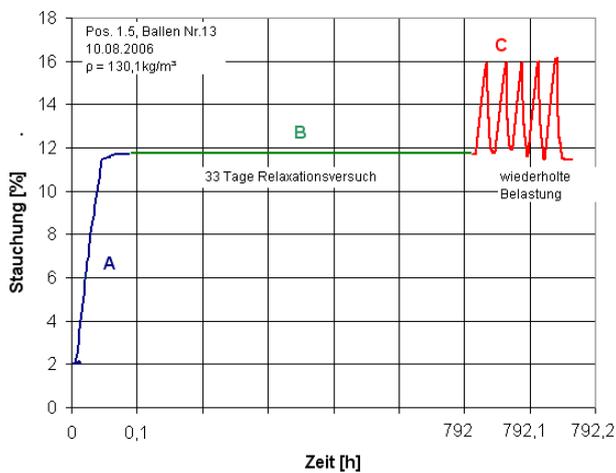


Abbildung 3-13: Versuchsverlauf Ballen 13.

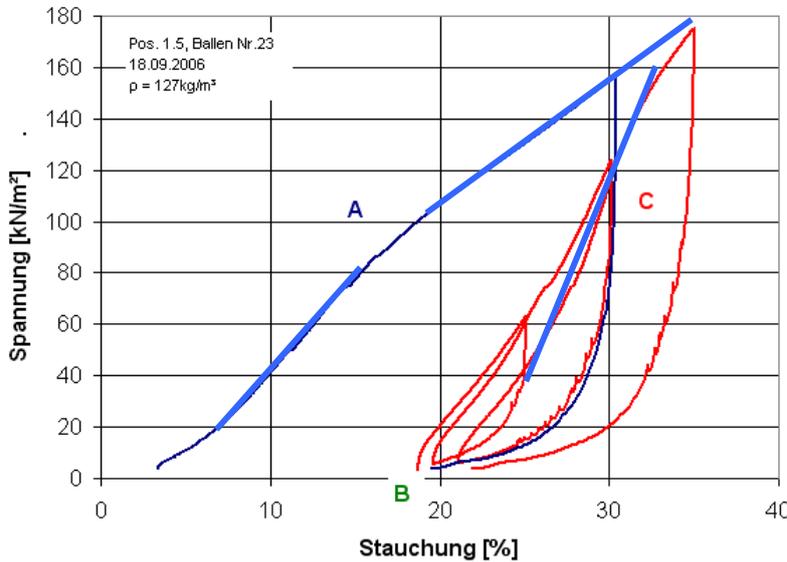
Verlauf

Bild links: Stauchungs-Zeit-Verlauf,

Bild rechts: Spannungs-Zeit-

Strohballen Nr. 23: Der Versuch wurde weggesteuert in 3 Phasen durchgeführt.

- Phase A Belastung von $\epsilon = 2 - 30 \%$, und vollständige Entlastung auf $\epsilon = 2 \%$
- Phase B „Ruhephase“ von 23 Stunden, Ballen ist vollständig entlastet
- Phase C 3 Lastzyklen mit Stauchungen bis $\epsilon_{\max 1} = 25 \%$, $\epsilon_{\max 2} = 30 \%$ und $\epsilon_{\max 3} = 35 \%$ zwischen den einzelnen Lastzyklen wurde der Ballen vollständig entlastet.



E-Modul für Erstbelastung:
 $\sigma < 80 \text{ kN/m}^2$: $E_{<80} = 600 \text{ kN/m}^2$,
 $\sigma > 100 \text{ kN/m}^2$: $E_{<100} = 450 \text{ kN/m}^2$,

E-Modul für Wiederbelastung:
 $\sigma > 20 \text{ kN/m}^2$: $E_n \approx 1600 \text{ kN/m}^2$,

Abbildung 3-14: $\sigma - \epsilon$ - Beziehung für wiederholte Belastung, Pos 1.5 Ballen 23:

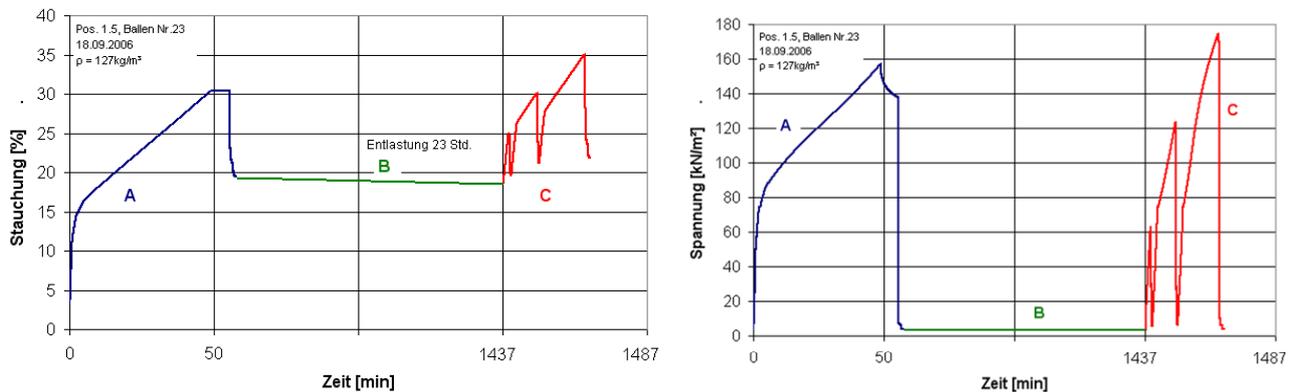


Abbildung 3-15: Versuchsverlauf Ballen 23. Bild links: Stauchungs-Zeit-Verlauf, Bild rechts: Spannungs-Zeit-Verlauf

Schlussfolgerungen

Die Erstbelastung der Strohballen führt zu einer „Nachverdichtung“ des Strohs, was zu einer maßgebenden Vergrößerung des E-Moduls führt. Dieser liegt dann bei 1,6 MPa bis 2,0 MPa. Somit ergibt sich für die Wandkonstruktionen aus Strohballen das Erfordernis, sie über das zu erwartete Niveau der Gebrauchsspannungen vorzuspannen. Den unter Pos. 1.5 untersuchten Relaxationsverlusten ist hierbei Rechnung zu tragen.

Weitere Lastwiederholungen führen zu einer weiteren leichten Steigerung des E-Moduls, vgl. Bild 19.

3.6 Bindegarnausfall unter Gebrauchsbedingungen - Pos. 1.6

Versuchsbeschreibung

In den „Bindegarnausfall“- Versuchen sollte die Tragfähigkeit der Strohballenelemente im Falle einer unbeabsichtigten Beschädigung der Bindegarne im eingebauten Zustand überprüft werden. Hierzu wurden zwei Versuche durchgeführt.

Der Ballen Nr. 6 wurde sechs Tage lang druckbelastet, wobei eine Stauchung von $\varepsilon = 20\%$ konstant gehalten wurde (wie Pos. 1.3). Anschließend wurde ein äußere und ein mittlere Garn durchtrennt.

Bei dem zweiten Versuch mit Strohballen Nr. 26 wurden nach 3-tägiger Druckbelastung unter konstanter Stauchung von $\varepsilon = 15\%$ nacheinander alle 4 Erntegarne von „links nach rechts“ durchtrennt.

Die Versuchsballen wurden mit einer Druckspannung von etwa 60 kN/m^2 belastet, was einer Spannung unter Gebrauchsbedingungen entspricht. Die nach Garntrennungen gemessenen Spannungsänderungen sind in Abbildung 3-17 und Abbildung 3-18 dargestellt.



Abbildung 3-16: Erntegarnausfall unter Gebrauchsspannung, Pos 1.6 Strohballen Nr. 6 nach Durchtrennen von 2 Erntegarnen, nach Versuchende gekippt

Versuchsauswertung

Die Durchtrennung eines oder zwei Erntegarne beeinflusst die Tragfähigkeit und die Gebrauchstauglichkeit der Ballen kaum. (Die Ballen sind mit insgesamt vier Garnen gebunden) Äußerlich ist überhaupt keine Veränderung feststellbar. Die Ballen fallen weder auseinander noch kommt es zu wahrnehmbarer Stauchungsänderung. Auch nach der Entlastung lassen sich Ballen mit zwei intakten Garnen problemlos aus dem Prüfstand entfernen, sie fallen nicht auseinander. (Der Garnausfall-Versuch wurde an weiteren vier Ballen mit gleichem Ergebnis durchgeführt, jedoch ohne Spannungsaufnahmen).

Die vorgenommenen Spannungsmessungen an den Ballen bestätigen den visuellen Eindruck. Das Durchtrennen eines Garnes führt zu einem Spannungsabfall von $\Delta\sigma = 0,5\text{-}1\%$, bei zwei Garnen, verändert sich die Spannung um $\Delta\sigma = 1,6\text{-}3,5\%$. Erst das Versagen des 3. oder 4. Garns führt zu größeren Spannungsänderungen von $\Delta\sigma = 8,4\%$ bzw. von $\Delta\sigma = 22,1\%$.

Nach jedem Garnausfall stabilisiert sich der Ballen sehr schnell auf einem neuen Spannungsniveau.

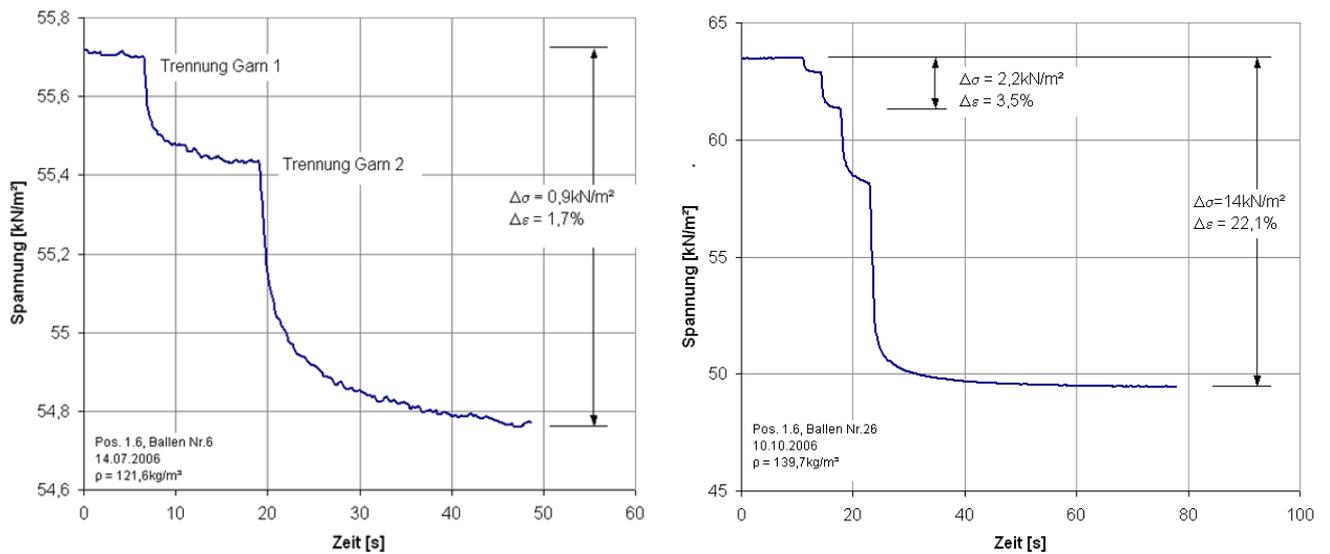


Abbildung 3-17: Spannungsänderung in Ballen nach Erntegarnausfall unter $\varepsilon_0 = 20\%$, links: Ausfall von 2 Erntegarnen rechts: Ausfall von 4 Erntegarnen Ballen 6 aus Pos. 1.3 Ballen 26 aus Pos. 1.3

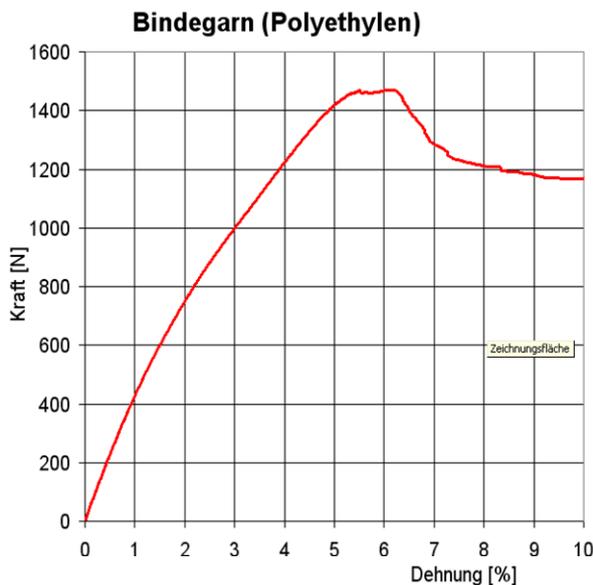


Abbildung 3-18: Zugversuch am Bindegarn

3.7 Simulation eines Wasserschadens, Pos. 1.7 Tabelle 2

Versuchsbeschreibung

Die Versuche dienten der Abschätzung der Auswirkung einer Wanddurchnässung auf die Tragfähigkeit bzw. auf das Setzungsverhalten einer Strohballenwand. Es galt zu überprüfen, ob ein unbemerkter Wasserschaden zum Versagen der Wand führen kann.

Die Strohballen wurden mit einer Spannung von ca. 40 kN/m^2 über 24 Stunden bzw. 72 Stunden belastet. Anschließend erfolgte die Wasserbeaufschlagung, indem die Ballen von unten geflutet wurden. Während der Versuchsdauer wurde ein konstanter Wasserstand von 3-5 cm Höhe gehalten. Gemessen wurde der Stauchungsverlauf, wobei die Last permanent nachgesteuert wurde.

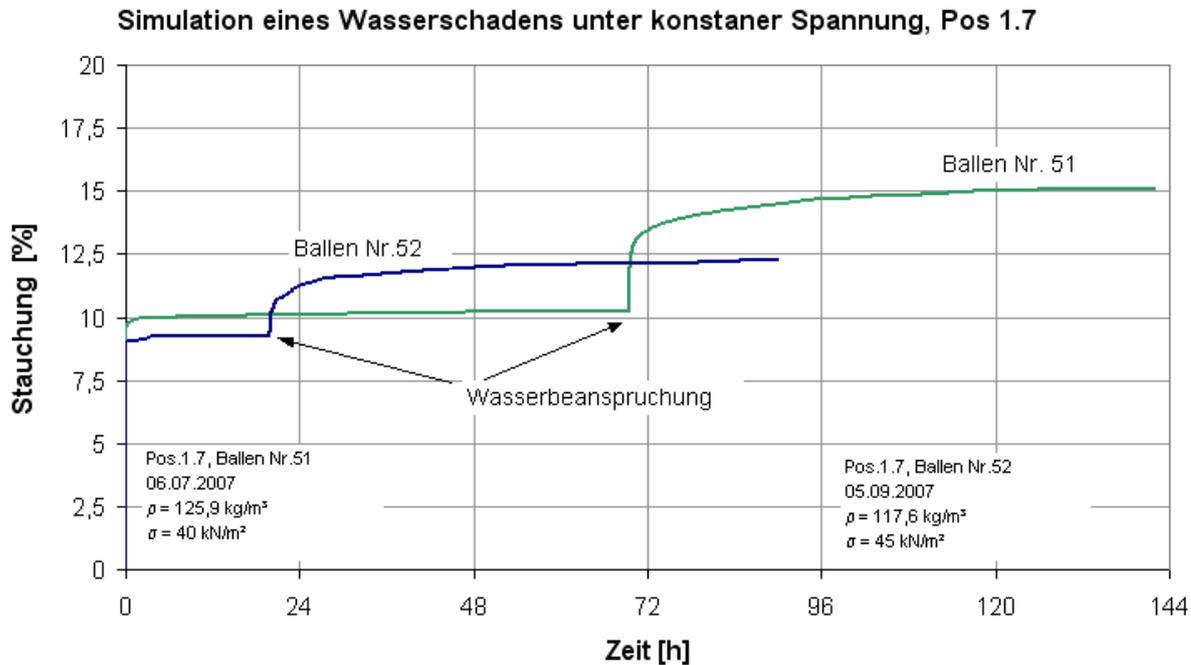
Versuchsauswertung

Abbildung 3-19: Stauchungsänderung infolge Wasserbeaufschlagung der Strohballen

Die Wasserbeaufschlagung führt zu einer maßgebenden Vergrößerung der Stauchung in Strohballen. Bei vorgespannten Wänden würde sie zu einem fast vollständigen Abbau der Vorspannung führen. Ein Versagen im Sinne von Verlust der Tragfähigkeit konnte nicht beobachtet werden.

3.8 Druckversuche mit unterschiedlicher Belastungsgeschwindigkeit Pos. 1.8Versuchsbeschreibung

Die vorangegangenen Versuche zeigten, dass die in die Strohballen eingeleitete Druckspannung infolge von Relaxation bereits innerhalb von wenigen Minuten maßgebend abgebaut wird. Der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit spielt bei den Versuchen an Einzelballen der Pos 1 keine Rolle, da sie alle mit ungefähr gleicher Belastungsgeschwindigkeit gefahren wurden. Bei den Wandversuchen (Pos. 2) konnte die Belastung jedoch nur wesentlich langsamer, sogar stufenweise aufgebracht werden. Grund dafür waren die großen, zum Erreichen der gewünschten Wandstauchung erforderlichen Vorspannwege. Diese lagen weit über dem Hub der verwendeten Pressen, so dass der erforderliche Gesamtweg in mehreren Stufen aufgebracht werden musste. Bei jeder Unterbrechung der Laststeigerung (bei konstant gehaltener Stauchung) konnte ein deutlicher Spannungsabbau gemessen werden. (vgl. Beschreibung zu Pos 1.3).

Um die Übertragbarkeit der an Einzelballen gewonnenen Arbeitslinien (σ - ε -Beziehung) auf die Wandelemente abzusichern, wurden mehrere Stauchungsversuche an Einzelballen ähnlicher Rohdichte mit unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten ausgeführt. Die Versuche dienten der Verifizierung des Zusammenhangs zwischen Belastungsgeschwindigkeit und der σ - ε -Beziehung.

Im nachfolgenden Bild sind Ergebnisse für die Ballen Nr. 22 und Nr. 23 gegenübergestellt. Beide Ballen wurden bis auf $\varepsilon = 30\%$ gestaucht. Die Rohwichten betragen bei Ballen Nr. 22 $\rho = 125\text{ kg/m}^3$ und bei Ballen Nr. 23 $\rho = 127\text{ kg/m}^3$. Die Endstauchung wurde innerhalb einer Zeit von $t = 105\text{ s}$ erreicht (Nr. 22) bzw. innerhalb $t = 2950\text{ s}$ (Nr. 23).

Versuchsauswertung

Die Versuchsergebnisse lassen auf keinen Zusammenhang zwischen der Belastungsgeschwindigkeit und der Elastizität der Ballen (σ - ϵ -Beziehung) bei Erstbelastung schließen. Die Spannungs-Dehnungs-Linie der beiden Ballen sind identisch. Beide Ballen erreichen bei der Maximalstauchung die gleiche Spannung von ca. $\sigma = 157 \text{ kN/m}^2$.

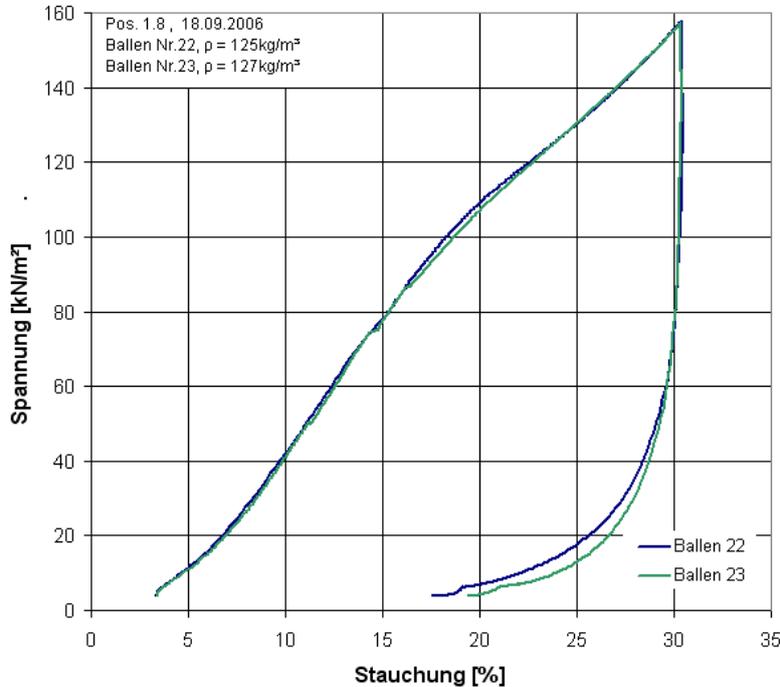


Abbildung 3-20: σ - ϵ -Beziehung für Ballen Nr. 22 und 23, unterschiedliche Belastungsgeschwindigkeit,

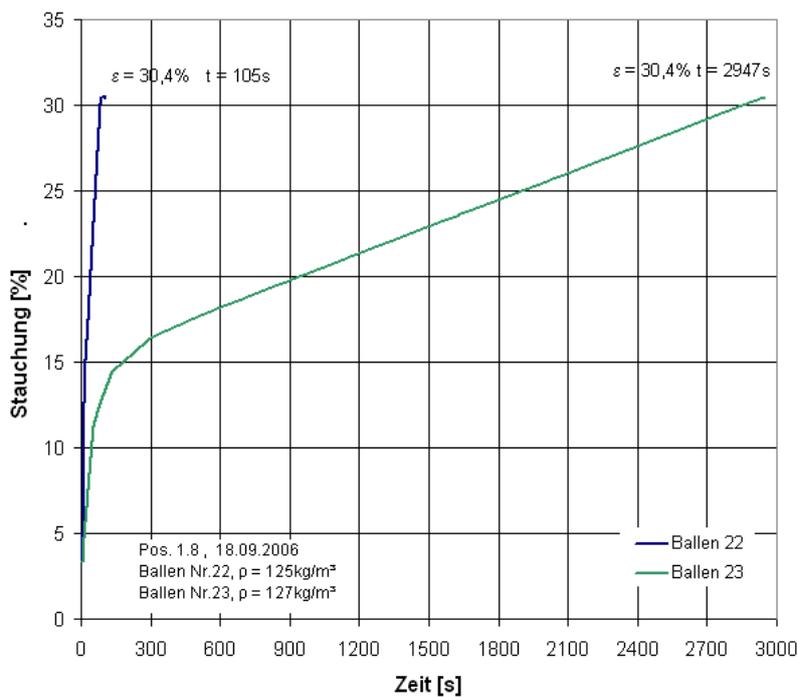


Abbildung 3-21: Belastungsgeschwindigkeit als ϵ -t- Diagramm, Pos. 1.8:

3.9 Druckversuche mit Teilflächenbelastung, Pos. 1.9

Versuchsbeschreibung

Im Strohballenbau werden die Vertikallasten aus dem Dach oder Decken üblicherweise über Holzrähme und Schwellen eingeleitet: Diese sind in der Regel schmaler als die Ballen. In den Versuchen der Pos. 1.9 sollte das Verhalten der Ballen unter einer rähmähnlichen Lasteinleitung überprüft werden. Grundsätzlich ging es um die Frage der Lastausbreitung im Stroh und um die Frage, ob die Ballen unter Teilflächenbelastung nicht vorzeitig versagen.

Die Lasteinleitung erfolgte über drei Kanthölzer NH 12/12 mit einer Gesamtbreite von 36 cm. Bei einer Ballenbreite von 84 cm wurden also 43% der Ballenbreite belastet. Die Länge der Lasteinleitungsfläche entsprach der Ballenlänge. In den später herzustellenden Wandelementen soll die Vorspannung über 40cm breite Kopf- und Bodenriegel eingeleitet werden.

Untersucht wurden zwei Ballen ähnlicher Rohdichte (Ballen Nr. 24: $\rho = 129 \text{ kg/m}^3$; Ballen Nr. 27: $\rho = 133 \text{ kg/m}^3$). Die Last wurde bis zum Erreichen einer maximalen Stauchung von $\epsilon = 30 \%$ gesteigert. Aufgenommen wurden Spannungs-Stauchungs-Beziehungen. Diese wurden dann mit den Arbeitslinien der Ballen unter vollflächiger Lasteinleitung verglichen.



Abbildung 3-22: Druckversuche mit Einleitung der Druckkraft über Teilflächenpressung Pos. 1.9, Ballen 24 mit aufliegendem Rähm

Versuchsauswertung

In den mit Teilflächenlast beanspruchten Ballen traten keine Auffälligkeiten auf. Ab einer Stauchung von etwa 7 % wurde unter derselben Belastungskraft eine höhere Stauchung gemessen, als bei Ballen mit flächiger Lasteinleitung. Bis zur dieser Stauchung war offensichtlich die Verzahnung der Halme im Ballen so stark, dass trotz der Teilflächenbelastung kaum Unterschiede in dem Last-Setzungsverhalten zu beobachten war. Stauchungen von über 7% (entspricht einer Druckspannung von 20 kN/m^2) erzeugen in teilflächenbeanspruchten Ballen etwa um 40 % geringere Spannungszuwächse. Hierbei ist die Stauchung über die Eindrückung des Rähms definiert.

Anders betrachtet erzeugen Druckspannungen bis ca. 20 kN/m^2 annähernd die gleichen Setzungen im Ballen, die weiteren Spannungszuwächse eine um 60 % größere Stauchung im Falle einer Teilflächenbelastung.

Bei der Abschätzung der Spannwege zur Erzeugung der gewünschten Vorspannkraft müssen die rähmbelasteten Ballen ab Spannungen über 20 kN/m² mit einem 1,6 fachen Spannweg berücksichtigt werden.

Die Spannungen bei einer Stauchung von $\epsilon = 30\%$ lagen bei Ballen Nr. 22 und 23 bei 150 kN/m², also im Mittelfeld der Versuchswerte aus Pos. 1.1. Für die teilflächenbelasteten Ballen Nr. 24 und 27 wurden Spannungen von ca. 116 kN/m² gemessen.

Die Querausdehnung der Ballen 24 und 27 bei der maximalen Stauchung von $\epsilon_h = 30\%$ betrug gemittelt in Längsrichtung $\epsilon_l = 5,4\%$ und in Breiterichtung $\epsilon_b = 4\%$.

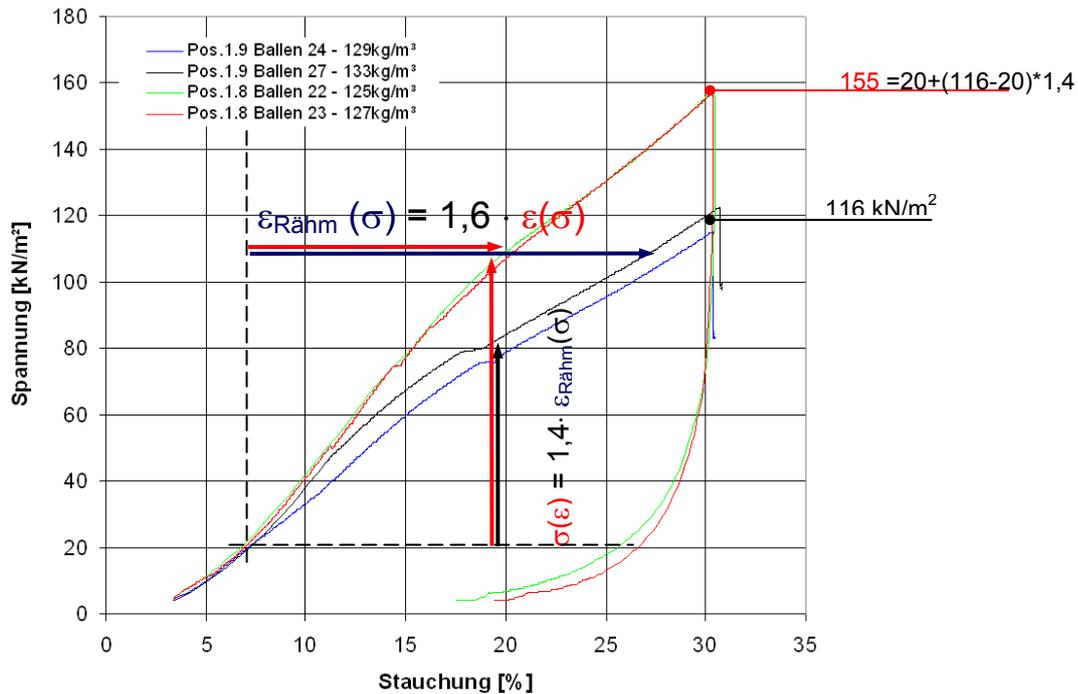
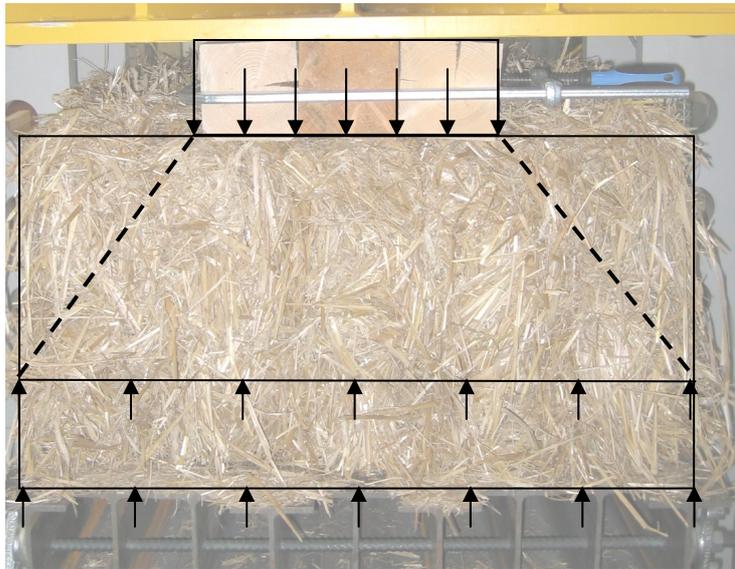


Abbildung 3-23: σ - ϵ -Linie der Einzelballen, Ballen 22 und 23 mit flächiger Lasteinleitung; Ballen 24 und 27 mit Lasteinleitung über Rähm



Abbildung 3-24: Plastischer (bleibender) Eindruck infolge Rähmlast. Pos. 1.9, Ballen 24

Eine Nachrechnung der gemessenen Stauchungen ergibt, dass zur Abschätzung der vertikalen Verformung der Ballen unter Teilflächenbelastung mit einer Ausbreitung der Last in den Strohballen von 1:1,5 gegen die Vertikale gerechnet werden kann.



Gleichlast:

$$\varepsilon_v = 0,2; 0,2 \times 47 = 10 \text{ cm}$$

Teilflächenlast

$$\varepsilon_{\text{unten}} = 0,2 \text{ über } h_u \text{ Höhe}$$

$$\max \varepsilon_{\text{oben}} = 0,2 \cdot 84 / 36 = 0,47$$

$$\varepsilon_{\text{Mittel}} = (0,2 + 0,47) \cdot \frac{1}{2} = 0,335 \text{ über } h_o$$

Setzungen

$$\varepsilon_{\text{unten}} \cdot h_u + \varepsilon_{\text{Mittel}} \cdot h_o = 0,3 \cdot 47 \text{ cm}$$

$$h_u + h_o = 47 \text{ cm}$$

$$h_o = 35 \text{ cm und } h_u = 12 \text{ cm}$$

Ausbreitung 1:1,5

Abbildung 3-25: Ausbreitung der vertikalen Teilflächenlast in Strohballen

In Versuchen mit Teilflächenbelastung ergaben sich erwartungsgemäß größere Setzungen als bei Ballen mit vollflächiger Belastung. Ein Versagen infolge des Aufspaltens des Ballens oder eines Garnbruches stellte sich jedoch trotz recht hoch angesetzter Druckbeanspruchung nicht ein.

4 Versuche an Wandelementen

4.1 Vorversuche 2005

Bereits im Jahr 2005 wurden an der Hochschule Magdeburg- Stendal Vorversuche an 3 Meter hohen Strohballenwänden aus Weizenstroh (210 x 85 x 60 cm) durchgeführt. Es zeigte sich hierbei, dass die Einleitung von hohen Druckkräften in die Wände problematisch ist. Kräfte, die Druckspannungen in der Größenordnung der späteren Gebrauchsspannungen erzeugten, führten zu ungleichmäßigen Stauchungen an beiden Wandenden (in Wandlängsrichtung) oder zum Ausknicken aus der Wandebene. Um das gewünschte Beanspruchungsniveau zu erreichen, mussten die Wände mit Hilfe von wandhohen, seitlich angeordneten „Führungsschienen“ aus massiven Kanthölzern stabilisiert werden. Danach konnten Spannungen von etwa 80 kN/m² bzw. Stauchung von ca. 15 % aufgebracht werden.

Auch in Versuchen an anderen Forschungseinrichtungen (UNI Kassel, UNI Zürich) konnten die Wände ohne horizontale Halterung nicht bis auf das Niveau der Gebrauchslasten druckbelastet werden.

In der heutigen Praxis, bei einem nicht lasttragenden Einsatz, werden die Ballen wesentlich schwächer druckbeansprucht. Zur Komprimierung der Strohballen in den Holzrahmen werden Spanngurte verwendet. Um das Knicken/Ausbeulen der Wand zu einer Seite zu vermeiden, werden Spannschlösser der Spanngurte auf beiden Seiten der Wand angeordnet. Den gegebenenfalls ungleichmäßigen Setzungen auf den beiden Wandseiten kann dann durch ein entsprechend stärkeres Spannen entgegengewirkt werden.

Eine relativ einfach zu realisierende Abhilfe gegen das Ausknicken der Wände unter höheren Druckkräften kann mit Hilfe der Vorspannung erzielt werden. Bei einer Anordnung des Spanngliedes im Wandinneren erzeugt man eine quasi Aussteifung (Abstützung der Spannelemente gegen Stroh) und zusätzlich die Möglichkeit, die Wandverformung während der Lasteinleitung (Vorspannung) zu kontrollieren und gegebenenfalls zu korrigieren. Die einzige dem Verfasser bekannte Bemessungsnorm für Strohballenkonstruktionen, California Building Code, fordert bei lasttragendem Einsatz von Strohballen Vorspannung über das Niveau der künftigen Gebrauchslasten. (California Building Code, Appendix L: Straw Bale Construction 4/26/06, Entwurf). Wie die Vorspannung zu realisieren sei, ist dort nicht weiter geregelt.

Die obigen Erkenntnisse führten zur der Entscheidung, alle Wandversuche an vorgespannten Strohballenwänden auszuführen. Aus der Sicht des Verfassers ist der lasttragende Strohballeneinsatz nur in Verbindung mit der Vorspannung erfolgversprechend.

Die Strohballenwände werden immer verputzt ausgeführt. Die Putzschichten schützen das Stroh vor klimatischen Einflüssen, Nagertieren und Feuer. Die Putzschichten leisten auch einen wesentlichen Beitrag zur Beanspruchbarkeit der Wände. In dem kalifornischen Building Code sind es nicht die Strohballen, sondern die Putzschichten, die vertikalen und horizontalen Lasten aufnehmen. Die Norm beschreibt detailliert, wie die Putzschichten auszubilden und anzuschließen sind. Das Stroh übernimmt hier nur die Funktion des Putzträgers und Aussteifung der Putzschichten.

Nach Meinung des Verfassers ist die Einbeziehung des Putzes als lasttragendes Element der Wand nicht zielführend. Die Putzschichten können erst dann ein Konstruktionselement der Wand werden, wenn sie eine Bewehrung erhalten. Der bewehrte Putz muss dann recht aufwendig an Holzbauteile wie Rähm, Decke etc. angeschlossen werden. Die Putzschichten müssen so elastisch sein, dass sie gleiche Stauchungen wie die Strohballen ertragen, ohne Schaden zu erleiden. Bei einem lasttragenden Ansatz des Putzes treten sofort zahlreiche Fragen, die im Rahmen des Projektes nicht einmal ansatzweise beantwortet werden können auf:

- Verzahnung mit dem Stroh,
- Festigkeit und Elastizität der Putzschicht selbst
- Kontrolle der Schichtdicke Ebenheitskontrolle
- Anschluss an die Schwellen und Rähm
- Art und Zusammensetzung des geeigneten Putzes selbst

Deshalb konzentrieren sich die weiteren Untersuchungen auf Tragverhalten der unverputzten Wände. Der günstige Beitrag des Putzes stellt eine quantitativ nicht definierte Tragfähigkeitsreserve dar, wird aber rechnerisch nicht angesetzt.

4.2 Herstellung der Wände

Es wurden zwei ca. 3m hohe Strohballenwände hergestellt und untersucht. Die wesentlichen Unterschiede zwischen den beiden Wänden liegen in der Höhe der Vorspannung, Einleitung der Vorspannkraft und in der Ausbildung des Rähms und der Schwelle.

4.2.1 Wand 1, Pos. 2.1

Die Wand sollte nach dem Vorspannen eine übliche Geschoßhöhe von ungefähr 2,80m aufweisen. Verwendet wurden 7 Strohballen (Nr. 14-unten, 15, 16, 18, 17, 11, 19-oben), die zwischen zwei Holztafeln – Rähm und Schwelle ($l \times b \times h = 200 \text{ cm} \times 82 \text{ cm} \times 16 \text{ cm}$) zusammengedrückt wurden. Die Gesamthöhe der nicht komprimierten Ballen betrug 325 cm. Bei einer Stauchung der Strohballen um 23% ergab sich die gewünschte Gesamthöhe der Wand (einschließlich Holztafeln) von 282 cm. Die mittlere Rohdichte der verwendeten Strohballen betrug $\rho = 130,8 \text{ kg/m}^3$. Die Einzelwerte lagen im Bereich 120 bis 139 kg/m^3 . Das gesamte Wandelement wog $m = 1056 \text{ kg}$.

Die Herstellung der Wand erfolgte liegend. Die Vorspannung wurde mittels vier Spannroststäben $d_s = 16 \text{ mm}$, die durch die Bohrungen in der Schwelle durchgesteckt und durch die Ballen durchgeschlagen wurden, eingeleitet. Um die Spannroststäbe präzise durchzuschlagen zu können, wurden entsprechende Schablonen angefertigt. Die Abweichung zwischen der Ist- und Sollage der Spannroststäbe beim Austritt aus den Ballen am Rähm betrug weniger als 1,5 cm. Sie ließen sich durch die Bohrungen des Rähms problemlos durchstecken. Dies belegte, dass der Einbau der Zugglieder auch unter Feldbedingungen von zwei Personen durchgeführt werden kann.

Bevor die Wände aufgerichtet werden konnten, wurden sie auf $\varepsilon=6\%$ manuell, durch das Anziehen von Muttern an den Spannelementen vorgespannt. Die endgültige Vorspannung bis zum Erreichen der Nennhöhe erfolgte mit hydraulischen Vorspanngeräten. Die Vorspannkraft wurde über zwei Stahltraversen auf die Spannroststäbe übertragen. Die Messung der eingeleiteten Kräfte erfolgte mit Hilfe von je einer Kraftmeßdose, die zwischen Traverse und Rähm- Holztafel platziert wurden. Die Weggrößen wurden mit einem Bandmaß manuell gemessen.

Um die gewünschte Vorspannkraft von 165 kN zu erzeugen, wurde ein Spannweg von ca. 75 cm erforderlich, was einer Stauchung der Strohballen von 23% entspricht. Dieser wurde in mehreren Spannvorgängen realisiert. Hierbei wurde versucht eine gleichmäßige Stauchung in der Wand zu erzeugen. Die Anordnung von vier Spanngliedern, die paarweise gespannt werden konnten, machte es möglich, den Rähm stets horizontal zu halten. Ab einer Stauchung von ungefähr 16% war eine horizontale Verschiebung des Rähms in Wandlängs- und Querrichtung sichtbar. Zum Ende des Vorspannens betrug die horizontale Verschiebung des Rähms gegenüber der Schwelle in Längsrichtung 15 cm, in Wandquerrichtung 10 cm. Die Ursache für die unerwartete Verzerrung der Wand ist die Inhomogenität der verwendeten Ballen, wie sie aus einer schlechten Verdichtung bei deren Herstellung resultiert. Die blauen Markierungen in der Seitenansicht des Wandelementes in Abbildung 4-3 zeigen

die Ränder der einzelnen Ballen. Die Verwendung von Ballen „direkt aus dem Feld“ ohne Qualitätsprüfung kann immer zu ähnlichen Ergebnissen führen.

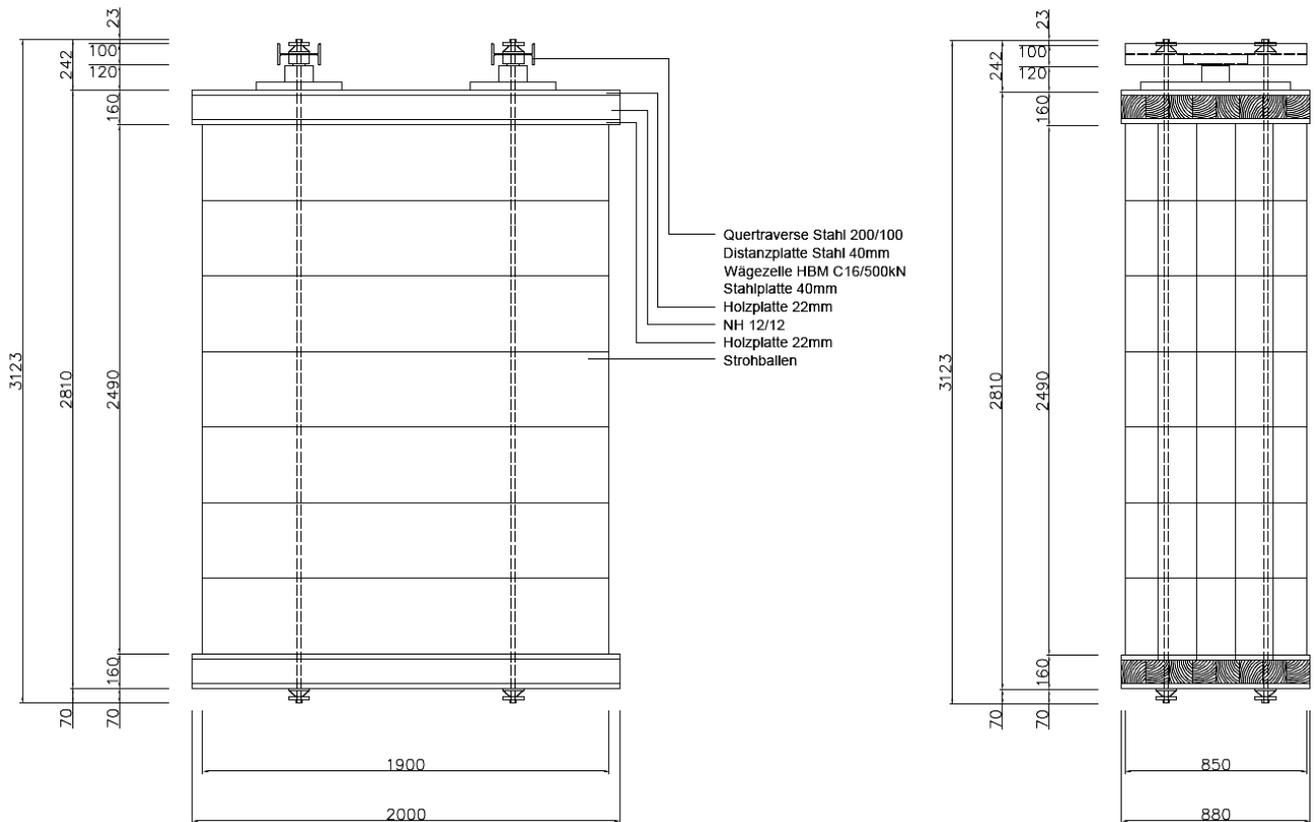


Abbildung 4-1: Wandelement I, M 1:33



Abbildung 4-2: Wandelement I beim Zusammenbau; Schablonen zwischen den Strohballen

Die Querdehnung der einzelnen Strohballen im Wandelement 1 wurde mit $\varepsilon_l = 9,8 \%$ in Längsrichtung und $\varepsilon_b = 7,5 \%$ in der Breite des Wandelements ermittelt.

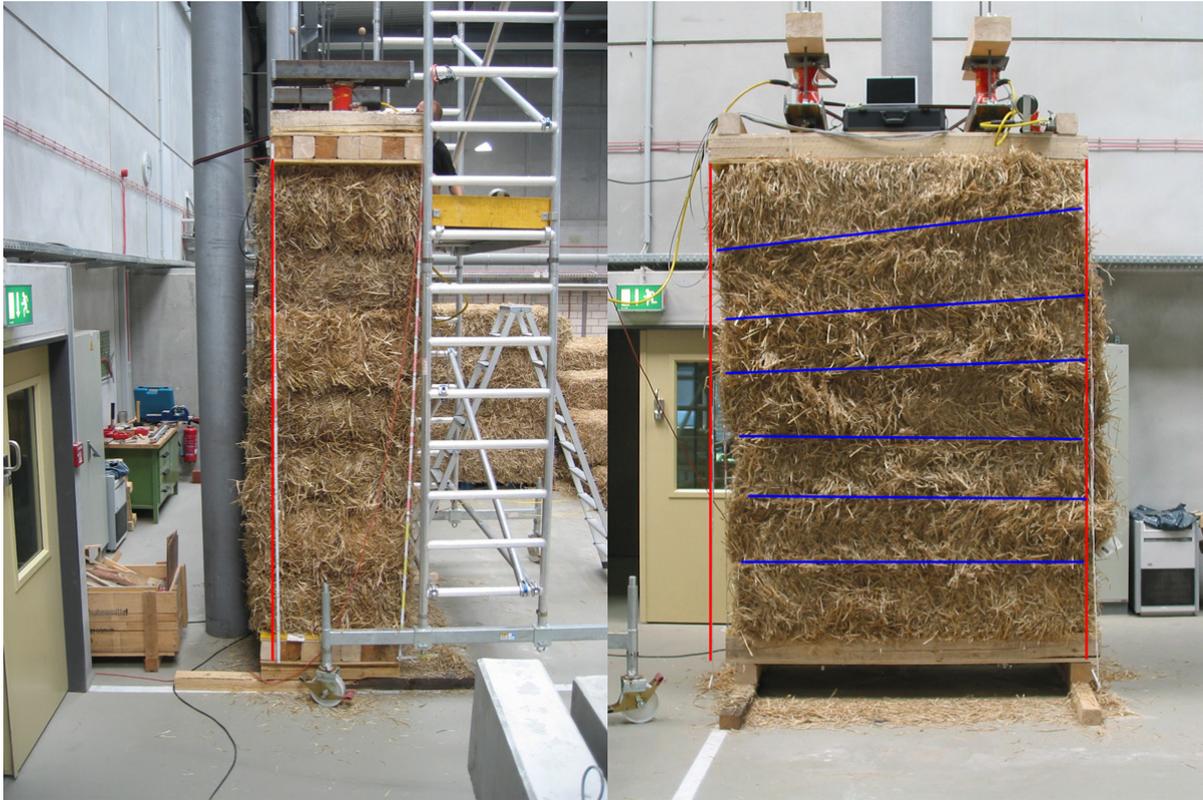


Abbildung 4-3: Wandelement I Dauerlastversuch unter Stauchung $\varepsilon = 23 \%$, Pos. 2.3, rote Linien zeigen Außermitigkeit, blaue Linien markieren die einzelnen Ballenlagen

4.2.2 Wand 2, Pos 2.1

Die Wand 2 wurde ähnlich ausgeführt wie die bereits beschriebene Wand 1. Sie bestand ebenfalls aus 7 Strohballen (Nr. 30 bis 36). Während die Wand 1 an der Ober- und Unterseite flächig, durch Holztafeln belastet wurde, wurde bei der Wand 2 ein 40 cm Breite Rähm und Schwelle eingebaut. Die Gesamthöhe der Strohballen vor der Vorspannung betrug 326 cm.

Nach Abbau der Relaxationsverluste sollte eine bleibende Spannung von 40 kN/m^2 verbleiben. Auf der Grundlage der Relaxationsversuche an Einzelballen wurde die erforderliche Anfangsspannung auf 80 kN/m^2 geschätzt. Aus der Pos 1.1 ließe sich hierfür eine erforderliche Stauchung von 15% herleiten. Für den untersten und obersten Ballen, der durch Rähm teilbelastet wurde, würde sich hierbei eine Stauchung von etwa $22,5\%$ ergeben. Der daraus errechnete Spannweg betrug 56 cm. Die Wand wurde auf eine „Endhöhe“ (ohne Holzbauteile) von 271 cm vorgespannt.

Die Vorspannung wurde mittels vier Spannstäbe (Einbau wie bei Wand 1) eingeleitet. Im Unterschied zur Wand 1 wurde jedoch liegend vorgespannt. Alle vier Spannstäbe konnten einzeln vorgespannt werden. Die Kraftmessung erfolgte ebenfalls an jeder Zugstange getrennt.

Das Aufrichten der Wand erfolgte eine Woche nach dem Vorspannen. Unplanmäßige Verformungen, wie sie bei der Wand 1 aufgetreten sind, waren nicht zu beobachten. Die Wand konnte absolut gleichmäßig gestaucht werden. Die leichte linksseitige Krümmung auf der linken Seite der Wand (Abbildung 4-3 rechts) resultiert aus den unterschiedlichen Breiten der verwendeten Ballen, die beim Zusammenbau der Wand zuerst auf einer ebenen Unterlage aufgestellt wurden.

Im Weiteren erfolgten Messungen der Vorspannkraftverluste infolge Relaxation und sowie Schub- und Druckversuche. Nach Ablauf von 3 Monaten wurde die Wand mit Lehmputz verputzt und erneut belastet.



Abbildung 4-4: Wand 2 vor dem Vorspannen



Abbildung 4-5: Fertiggestellte Wand 2, Stauchung $\epsilon = 16\%$

4.3 Kriechversuche Pos. 2.2

Auf die Durchführung von Kriechversuchen wurde zu Gunsten von Relaxationsuntersuchungen verzichtet. Die ursprünglich geplante Dauer der Relaxationsversuche wurde verdoppelt.

4.4 Relaxationsversuche Pos. 2.3

Wand 1

Die Wand 1 wurde auf 23,5 % gestaucht. Hierbei wurde eine Kraft von 163 kN und eine Anfangsspannung von 113 kN/m² aufgebaut. Fünf Tage nach der Herstellung musste die Wand entlastet werden, um die Belastungsanlage leicht zu modifizieren. Anschließend wurde die ursprüngliche Stauchung von 23,5 % aufgebracht. Dieser Vorgang ist in Abbildung 4-6 zu erkennen.

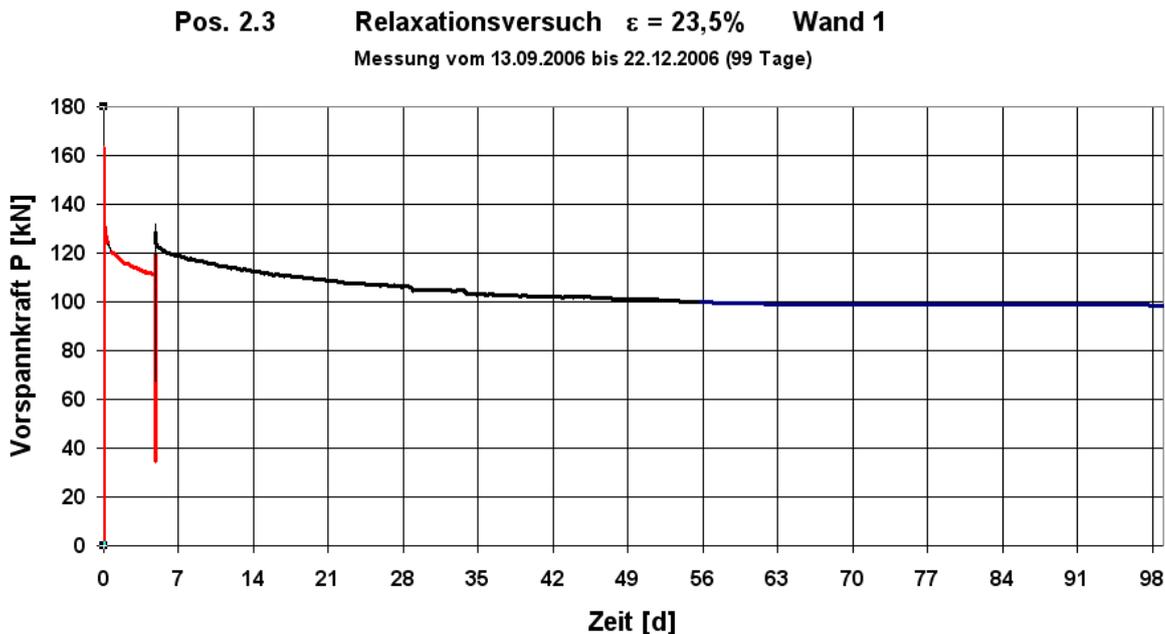


Abbildung 4-6 Wandelement 1, Relaxationsversuch Pos.2.3, Stauchung $\epsilon = 23 \%$ =konst.

Ähnlich wie bei Einzelballen, findet der stärkste Verlust der Vorspannkraft unmittelbar nach ihrer Einleitung statt. In der Beobachtungszeit von 99 Tagen ist der Verlust der Vorspannkraft nicht gänzlich zum Stillstand gekommen. Dennoch eine Quantifizierung der endgültigen Vorspannkraftverluste auf 50 % des eingeleiteten Wertes (80 kN von 163 kN) liegt für diesen Versuch auf der sicheren Seite. Hiermit finden die Versuche an Einzelballen ihre Bestätigung.

Wand 2

Die Wand 2 erhielt eine Stauchung von 16 %. Die Anfangs-Vorspannkraft lag bei 114 kN, die Spannung bei 79 kN/m². Wie bereits beschrieben, wurde die Wand noch auf dem Hallenboden liegend vorgespannt. Das Aufrichten der Wand erfolgte eine Woche später. Bei einem Strohgewicht der Wand von 652 kg und Gewicht der Rähms mit Messeinrichtung von 92 kg resultiert aus dem Aufrichten eine Verringerung der Beanspruchung der Spannstäbe und der eingesetzten Kraftmessdosen um insgesamt 744 kg (7,44 kN). Dieser Wert passt sehr gut zu der am siebten Tag gemessenen Vorspannkraftänderung.

Dreißig Tage nach Versuchsbeginn wurde die Wand am Rähm aufgehängt und mit Hilfe eines Kranes in den Prüfstand eingebaut. Das während dieses Vorganges aktivierte Eigengewicht der Strohballen ist im Vorspannkraftverlauf durch eine Kraftzunahme um 6 kN erkennbar.

Am 31. Tag wurde die Wand druck- und schubbelastet (Pos 2.4 und Pos. 2.5). Die aufgebrachte Druckkraft lag über der noch vorhandenen Vorspannkraft, so dass die Wand über die 16% hinweg komprimiert wurde, was zum Abbau der Vorspannkraft geführt hat.

Die weiteren „Sprünge“ sind auf das wiederholte Versetzen der Wand zurückzuführen. Der leichte Anstieg der Vorspannkraft (35.-40. Tag) bzw. schnellere Kraftabnahme ab 70. Tag ist möglicherweise auch auf klimatische Einflüsse zurückzuführen, da alle Versuche in einer nicht klimatisierten Laborhalle durchgeführt wurden.

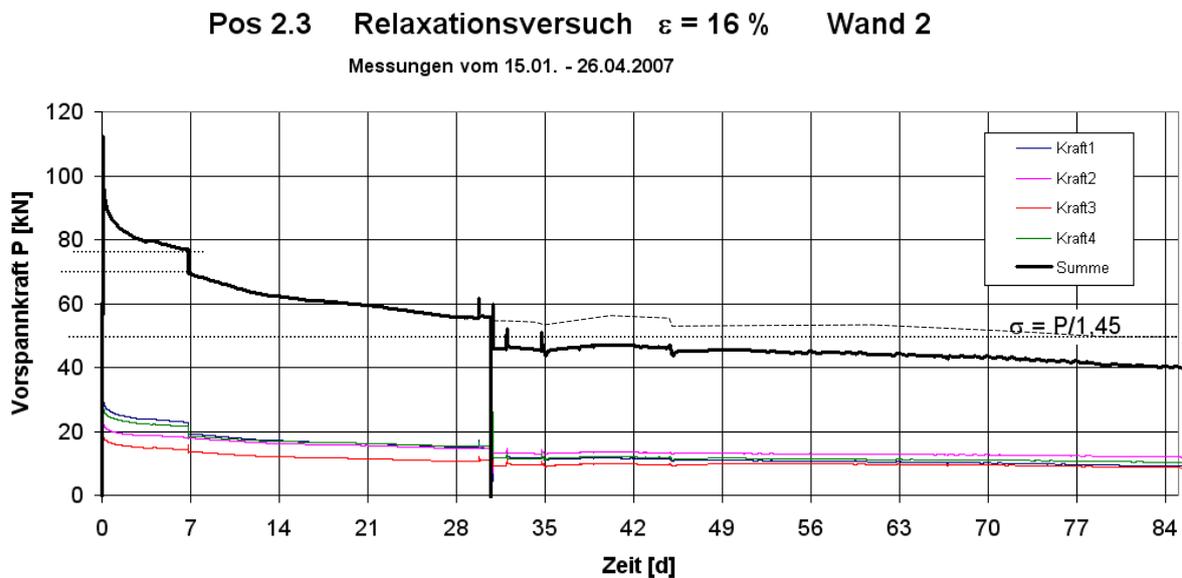


Abbildung 4-7: Wand 2 Relaxationsversuch Pos.2.3, Stauchung $\epsilon = 16\%$ = konst.

Auch bei der Wand 2 ist der Verlust der Vorspannkraft nicht gänzlich zum Stillstand gekommen. Erschwerend für die Abschätzung der Relaxationsverluste wirken sich die oben beschriebenen Beanspruchungsänderungen aus. Dennoch können auch hier die Relaxationsverluste auf ungefähr 55% quantifiziert werden. Eliminiert man den „Sprung“ nach 7 Tagen und hebt die Linie ab 30. Tag um den Versatz an, ergibt sich eine Anfangskraft von $P_0 = 108$ kN, die auf $P_{85 \text{ Tage}} = 49$ kN abgebaut wird. Der Verlauf der farbigen Linien im Bild (Zugkräfte in einzelnen Spannstäben) deutet auf eine Homogenisierung der Strohballen im Laufe der Zeit und infolge der Be- und Entlastungen.

Schlussfolgerung

Auf Grund der gemessenen Werte wird vorgeschlagen, bei der Planung von Wänden Relaxationsverluste mit 60 % zu berücksichtigen. Das bedeutet, dass Wände auf einen 2,5-fachen Wert der Gebrauchsspannung vorgespannt werden sollen.

4.5 Druckversuche an vorgespannten Wänden, Pos. 2.4

Wand 1

Der Druckversuch wurde nach Ende des Relaxationsversuches, nach 99 Tagen ausgeführt. Die noch vorhandene Vorspannkraft betrug 90 kN (von 163 kN zum Versuchsbeginn). Die Wand wurde über einen Stahllängsträger belastet, der auf den Stahltraversen aufgelegt wurde. Dadurch wurde eine doppelte Kontrolle der eingeleiteten und noch vorhandenen Kräfte möglich;

- über eine Kraftmessdose unter dem Zylinder der Presse (äußere Last)
- über die Kraftmessdosen der Wand (zwischen Stahltraversen und dem Rähm).

Es zeigte sich eine sehr gute Übereinstimmung der beiden Messwerte. Damit konnte auch die Zuverlässigkeit der gemessenen Relaxationsverluste bestätigt werden.

Der Verlauf der Kraft-Setzungslinie zeigt erwartungsgemäß zwei Bereiche mit unterschiedlichen Steigungen:

- Bereich 1 mit sehr geringen Stauchungsänderungen, solange die aufgebrachte Druckkraft unterhalb der noch vorhandenen Vorspannung bleibt
- Bereich 2 mit größeren Stauchungszunahmen unter Druckkraft größer als die Vorspannung

Für die beiden Bereiche lassen sich E-Moduli für die Strohballenwand wie folgt angeben:

$$E_1 = (0,155 \text{ MN} / 1,46\text{m}^2) / (15\text{mm}/2490\text{mm}) = 17,6 \text{ MN/m}^2$$

$$E_2 = (0,020 \text{ MN} / 1,46\text{m}^2) / (35\text{mm}/2490\text{mm}) = 0,97 \text{ MN/m}^2$$

Der E_2 -Modul liegt um ca. 30% über dem E-Wert, der für nicht vorgespannte Strohballen unter wiederholter Belastung beobachtet wurde (Pos. 1.5).

Wand 1 Pos. 2.4 Druckbelastung

22.12.2006 nach 99 Tage Dauerbelastung mit $\varepsilon = 23 \%$

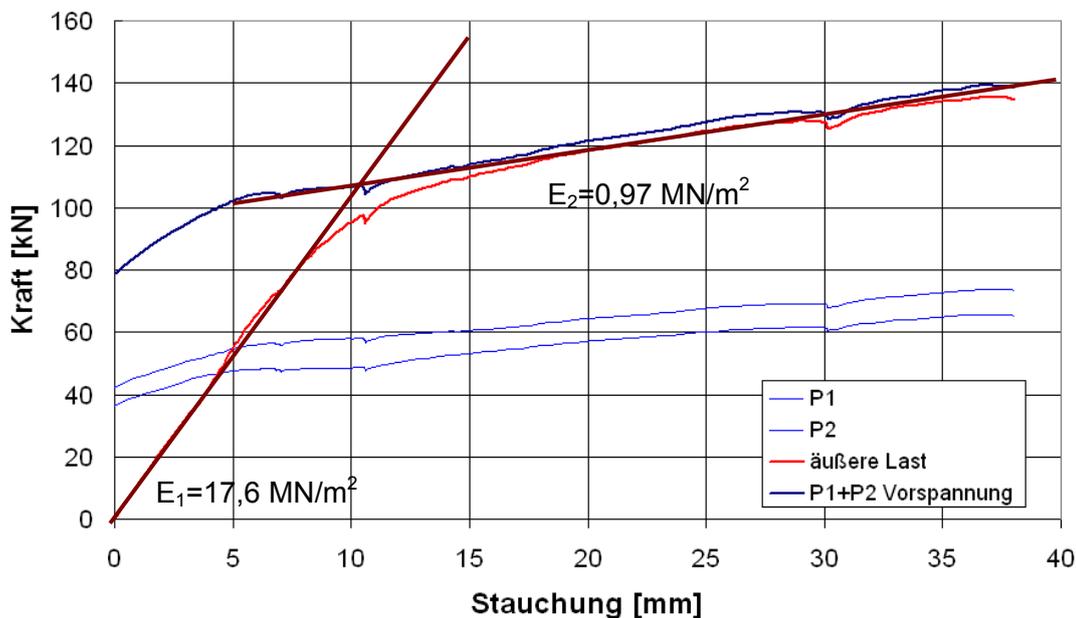


Abbildung 4-8: Kraft-Stauchungs-Beziehung für vorgespannte Strohballenwand Wand 1
Druckversuch nach 99 Tagen Dauerbelastung $\varepsilon = 23 \%$

Wand 2

Die Druckbelastung wurde direkt über dem Holzrähm eingeleitet. Dieser wurde in seiner Mitte mit einer Einzelkraft (Stempel der Presse) belastet. Die Belastung wurde also, anders als in Wand 1, nicht über die Kraftmessdosen der einzelnen Spannstahlstäbe eingeleitet, sondern direkt über den Rähm in die Strohballen. Die Kraftmessdosen der Spannstäbe wurden, wie zuvor beschrieben, unter der Schwelle platziert, so dass sie mit der steigenden Belastung der Wand zunehmend entlastet wurden.



Abbildung 4-9: Wand 2 im Kurzzeit-Druckversuch

Wand 2 Pos 2.4 Druckbelastung

15.02.2007 nach 30 Tagen Dauerbelastung mit $\varepsilon = 16\%$

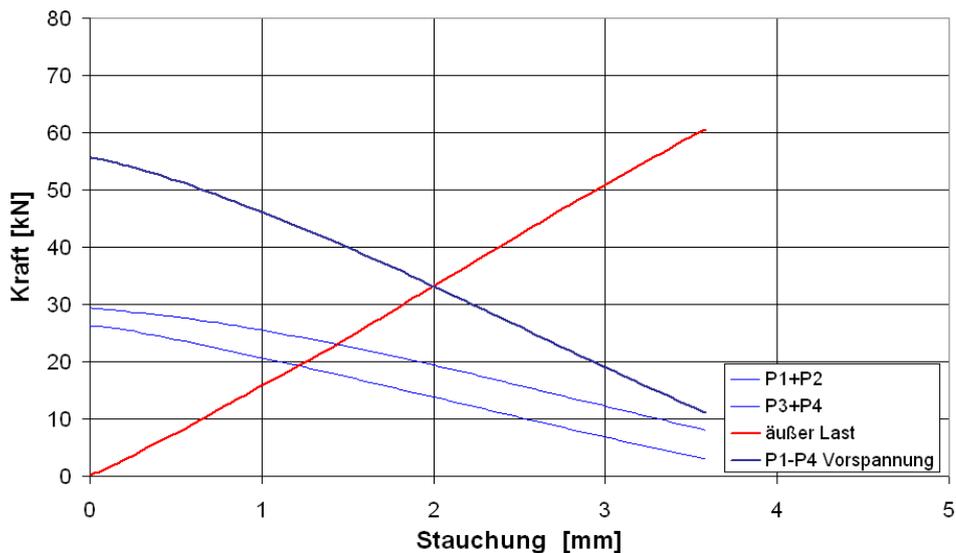


Abbildung 4-10: Kraft-Stauchungs-Beziehung für vorgespannte Strohballenwand Wand 2 Druckversuch nach 31 Tagen Dauerbelastung $\varepsilon = 16\%$

Erwartungsgemäß ergibt sich für Kräfte unterhalb der Vorspannung eine lineare Kraft-Stauchungs-Beziehung (auch Spannungs-Dehnungs-Linie). Die aufsummierte Kraft der einzelnen Spannstäbe baut nicht in gleichem Maße, wie die äußere Belastung gesteigert wird, ab. Beim Erreichen einer Druckkraft von 60 kN liegt die „Restkraft in den Spannstäben bei 11 kN und nicht bei Null.

Die Abweichung zwischen der äußeren Belastung und der Summe der Vorspannkraften kann wie folgt begründet werden:

Selbst bei vollständig abgeschraubten Spannmuttern der Spannstäbe über dem Rähm, zeigen die unter der Schwelle liegenden Kraftaufnehmer eine Restkraft, die aus der Verzahnung zwischen den Spannstäben und dem umhüllenden Stroh resultiert. Die im unteren Wandbereich liegenden Strohballen erhalten durch die Reibung zw. Spannstäben und Stroh eine Restvorspannung. Um die Kraft auf „Null“ zu setzen, müssen die Spannstäbe einige Millimeter in die Strohwand eingeschlagen werden. Weiterhin kann auch die Reibung zwischen Spannstäben und der immerhin 16 cm starken Rähm und Schelle selbst zu der Abweichung beigetragen haben.

Die zuverlässigsten Werte liefern die Kraftmessdose unter dem Pressenstempel und der Stempelweg (rote Linie in Abbildung 4-10). Die Kraft-Setzungs-Beziehung ist erwartungsgemäß linear.

Aus dem Versuch lässt sich ein E- Modul ableiten von:

$$E_1 = (0,060 \text{ MN} / 1,46\text{m}^2) / (3,6\text{mm}/2710\text{mm}) = 30,9 \text{ MN/m}^2$$

4.6 Schubversuche an vorgespannten Wänden, Pos. 2.5

Die Schubversuche wurden unmittelbar nach den Druckversuchen Pos 2.4 durchgeführt. Bei beiden Wänden wurden die Schwellen horizontal unverschieblich und gegen Abheben gesichert. Die Last-einleitung erfolgte an der Wandoberkante, indem der Pressenstempel auf Rähm drückte. Gemessen wurde die Kopfverschiebung (Stempelweg) und die aufgebrachte Horizontalkraft. Bei Wand 2 wurden zusätzlich Vorspannkraften in den Spannstäben aufgenommen.



Abbildung 4-11: Versuchseinrichtung – Schubbelastung der Wände

Schubversuch Wand 1 und 2

Wand 2 15.02.2007 (31 Tage Dauerbelastung)

Wand 1 15.01.2007 (99 Tage Dauerbelastung)

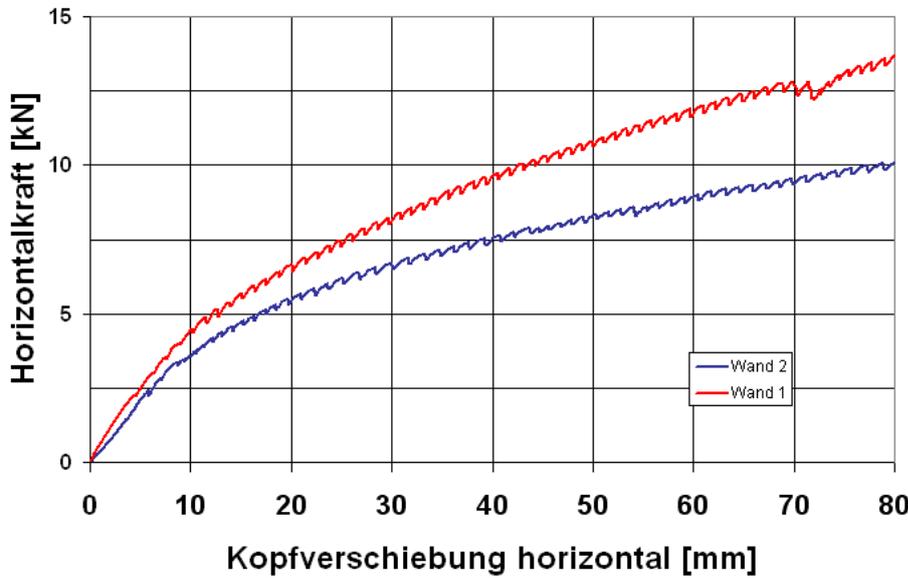


Abbildung 4-12: Kraft-Verschiebungs-Beziehung für Wand 1 und 2, gesamter Messbereich

Schubversuch Wand 1 und 2

Wand 2 15.02.2007 (31 Tage Dauerbelastung)

Wand 1 15.01.2007 (99 Tage Dauerbelastung)

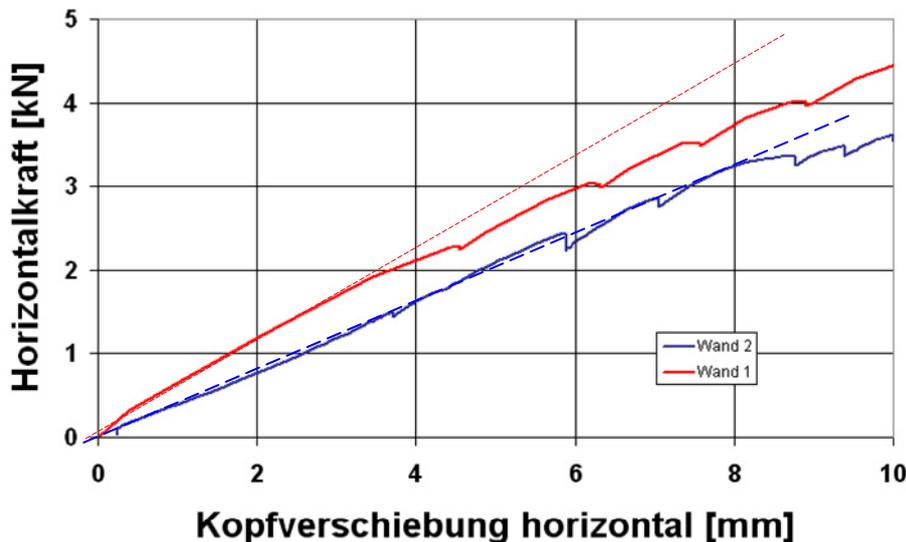


Abbildung 4-13: Kraft-Verschiebungs-Beziehung für Wand 1 und 2, Ausschnitt aus Bild 45 für $v_h \leq 10 \text{ mm}$

Die Verläufe in Abbildung 4-12 lassen zwei Last-Verformungs-Bereiche erkennen. Ab einer Kopfverschiebung von etwa 10 mm (Abflachen der Linie) konnte eine geringe Relativverschiebung zwischen Rähm und Strohballen beobachtet werden. Es ist zu vermerken, dass der Rähm und die Schwelle an die Strohballen lediglich durch die noch vorhandene Vorspannung angepresst waren. Dübel oder ähnliche Verbindungsmittel zur Schubsicherung wurden nicht verwendet. Offensichtlich reichte die Reibung in der Kontaktfläche Rähm/Strohballen zur Aufnahme einer h-Kraft von bis zur $H = 4,2 \text{ kN}$ aus, während bei größeren Kräften die Stahl-Zugstangen zusätzlich gegen das Stroh gedrückt

wurden. Die Schubverformung konzentrierte sich nicht auf Fugen und Übergänge, sondern war gleichmäßig über die gesamte Wandhöhe verteilt. Die Wand 1 wies höhere Tragfähigkeit bzw. einen größeren Widerstand auf, was auf die höhere noch vorhandene Vorspannkraft zurückzuführen ist.

Der praxisrelevante Bereich endet bei einer Kopfverschiebung von ungefähr 10 mm. Bei einer größeren Verschiebung würden die Einbauten der Wand, wie Türen und Fenster, Schaden nehmen können. Der Versuch zeigt, dass die Wand das Vielfache dieser Grenzverschiebung bei gleichzeitiger Steigerung Schubtragfähigkeit ohne Versagen aufnehmen kann. Demnach ist als Bemessungskriterium einer schubbeanspruchten Wand die Begrenzung der Verformung anzusehen.

Aus den Verläufen in Abbildung 4-13 lassen sich folgende Schubmoduli für die Wände ableiten:

$$\begin{aligned} G_{\text{Wand 1}} &= (H/A) / \varphi &= (5 \text{ kN}/1,46\text{m}^2) / (9 \text{ mm}/2490\text{mm}) &= 950 \text{ kN/m}^2 \\ G_{\text{Wand 2}} &= (H/A) / \varphi &= (4 \text{ kN}/1,46\text{m}^2) / (10 \text{ mm}/2710\text{mm}) &= 742 \text{ kN/m}^2 \\ G_{\text{Mittel}} &= &&= 846 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

5 Versuche an verputzten Wänden

5.1 Herstellung der Putzschichten

Wie bereits ausgeführt, wurden Versuche an verputzten Wänden in das Programm nachträglich aufgenommen. Hierbei ging es lediglich um eine erste Abschätzung der Auswirkung des Putzes auf die Druck- und Schubtragfähigkeit der Wände.

Verwendet wurde ein Lehmputz des Herstellers Claytec. Der Putz wurde in einem Zwangsmischer durchmischt und in zwei Schichten manuell aufgetragen. Zwischen den Putzaufträgen lag eine Trocknungsphase von 4 Wochen.



Abbildung 5-1: Verwendeter Lehmputz, manueller Auftragung der ersten Putzschicht

Der Putz wurde nicht bewehrt. Der Rähm und Schwelle bzw. die obere und untere Holztafel wurde lediglich beigeputzt, es wurden keine mechanischen Verbindungsmittel verwendet. Der Anschluss der Putzschichten an Holzbauteile bildete somit eine Schwachstelle. Besonders bei der Wand 2, mit schmalen Rähm, konnten der Putz für den Lastabtrag nicht vollständig aktiviert werden.

Wand 1 wurde auf Grund der bereits beschriebenen Verformungen nur mit Querkraft belastet, Wand 2 wurde unter Druck und Querkraft getestet.



Abbildung 5-2: Anschluß des Putzes an Rähm und Schwelle, Wand 2



Abbildung 5-3: links: Verputzte Wand 1 rechts: Verputzte Wand 2 im Prüfstand

5.2 Druckversuch an der Wand 2, Pos. 2.7

Die Wand 2 wurde dreimal belastet. Die aufgebrachte Druckkraft lag mit 60 kN über der noch vorhandenen Vorspannung von 30 - 40 kN. Offensichtlich wurde die Vorspannung innerhalb der letzten 60 Tagen nach Beendigung des Relaxationsversuches (Pos 2.3) kaum weiter abgebaut.

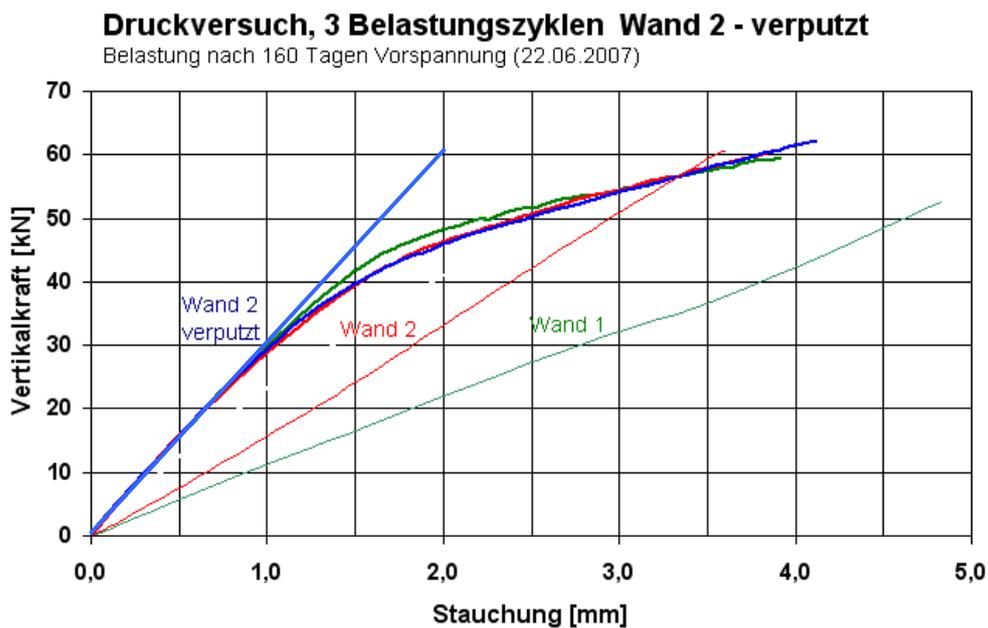


Abbildung 5-4: Kraft-Setzungs-Beziehung der verputzten Wand 2

Unter Druckbelastung traten keine Schäden am Putz auf. Auch die Fuge zwischen Putz und Holzbauteilen blieb intakt. Die Wand verhielt sich völlig elastisch, die Stauchung federte zurück. Die versteifende Wirkung des Putzes ist an der größeren Neigung der Linien der verputzten Wand im Vergleich zu denen für unverputzte Wände in Abbildung 5-4 zu erkennen. Für die verputzte Wand lässt sich ein E-Modul angeben von:

$$E_{\text{Putz}} = (0,06\text{MN}/1,46\text{m}^2) / (2\text{mm}/2710\text{mm}) = 49,5 \text{ MN/m}^2$$

Dieser Wert gilt nur für den Anfangsbereich der Kraft-Setzungs-Beziehung, bis zur Überwindung der Vorspannkraft. Mit einer Be- und Entlastung der Wand mit 30 kN (Spannungsänderung um $\pm 20 \text{ kN/m}^2$) geht eine vertikale Verformung am Wandkopf von 1,0 mm einher!

Dieses Ergebnis zeigt nochmals, dass die Vorspannung der Strohwände die große und lang andauernde Verformungszunahme eliminieren kann. Diese ist einer der Hauptfeinde dieser Bauweise.

5.3 Schubversuche an verputzten Strohballenwänden, Pos 2.6

Beide Wände wurden unten horizontal und gegen Abheben verankert und am Rähm horizontal belastet. Ähnlich wie bei dem Druckversuch ist auch hier eine versteifende Wirkung des Putzes zu erkennen. Im Gegensatz zu den unverputzten Wänden konnten recht große Verschiebungen des Rähms und der Schwelle gegenüber dem Putz beobachtet werden. Dennoch konnte durch beidseitiges Verputzen die Steifigkeit der Wand verdoppelt werden. Es ist davon auszugehen, dass bei einem besseren Anschluss an Holzbauteile eine noch deutlichere Steigerung der Schubsteifigkeit möglich ist.

In Abbildung 5-5 und Abbildung 5-6 sind die aufgenommenen Kraft-Verschiebungslinien für die Rähme der beiden Wände dargestellt.

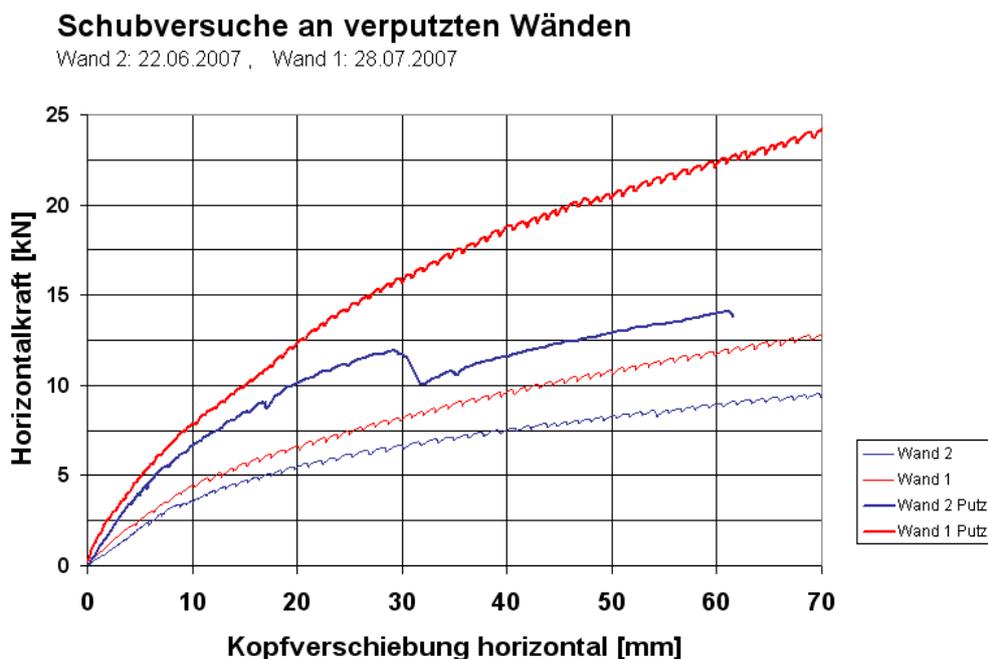


Abbildung 5-5: Kraft-Verschiebungs-Beziehung für verputzte und nicht verputzte Wände unter Horizontalbeanspruchung in Wandebene , gesamter Messbereich

Schubversuche an verputzten Wänden

Wand 2 22.06.2007 , Wand 1 28.07.2007

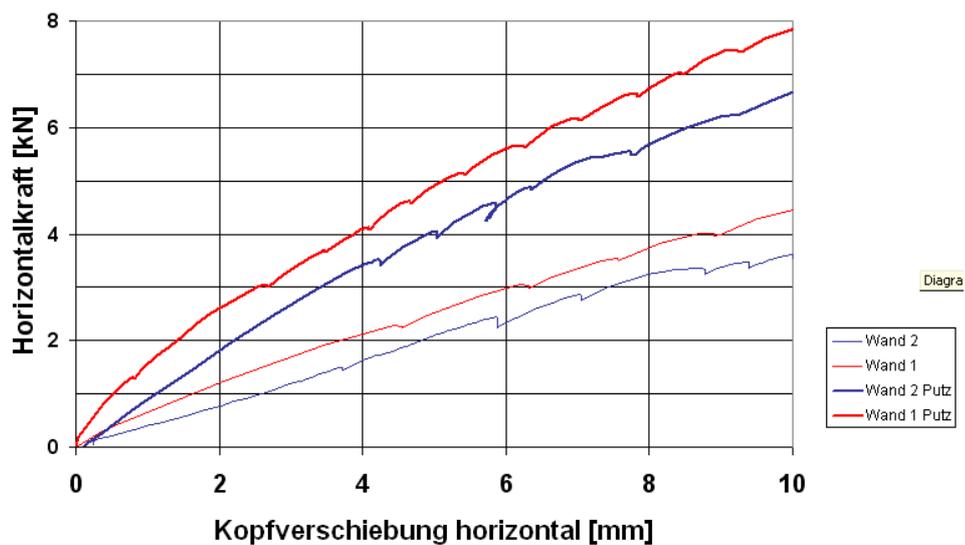


Abbildung 5-6: Kraft-Verschiebungs-Beziehung für verputzte und nicht verputzte Wände unter Horizontalbeanspruchung in Wandebene, Ausschnitt aus Bild 51



Abbildung 5-7: Wand 1 nach Schubversuch

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des von der Deutschen Bundsstiftung Umwelt geförderten Projektes „**Grundlagen zur bauaufsichtlichen Anerkennung der Strohballenbauweise** - Weiterentwicklung der lasttragenden Konstruktionsart und Optimierung der bauphysikalischen Performance“ wurden an der Hochschule Magdeburg- Stendal Versuche zur Bestimmung von elasto-mechanischen Eigenschaften von Strohballen aus Roggen durchgeführt. Die Untersuchungen umfassten die Durchführung von Belastungstest an Einzelballen und Strohballenwänden. Untersucht wurden Großballen mit Abmessungen 180 cm x 82 cm x 47 cm.

Auf der Grundlage der durchgeführten Versuche konnten Erkenntnisse zur Belastbarkeit, Steifigkeit und Versagensart der Strohballen unter Normal- und Schubkräften gewonnen werden. Weiterhin wurden ausgedehnte Untersuchungen der rheologischen Eigenschaften von Strohballen durchgeführt.

Im zweiten Teil der Untersuchungen wurden längsvorgespannte Wände aus Strohballen gebaut und getestet. Untersucht wurden das Relaxationsverhalten der Wände sowie das Tragverhalten unter Druck und Schubkräften. Es konnten Erkenntnisse zu erforderlicher Vorspannung der Wände, sowie zu deren Tragverhalten gewonnen werden.

Im letzten Teil des Projektes wurden Strohballenwände mit Lehmputz verputzt und wieder unter Druck und Schubbeanspruchung getestet. Der tragfähigkeitssteigernde Beitrag des Putzes konnte quantifiziert werden.

Es kann konstatiert werden, dass die weitere Entwicklung der Bauweise sich auf den Einsatz der Großballen konzentrieren sollte. Weiterhin sollen Strohballenwände grundsätzlich vorgespannt eingesetzt werden. Hiermit können die Stabilitätsprobleme bei Wänden mit für den Wohnungsbau üblichen Höhen bewältigt werden. Die Vorspannung der Strohballenwände kann grundsätzlich vor Ort durchgeführt werden, entsprechende baustellentaugliche Vorspanntechnologien müssen noch entwickelt werden. Bei der weiteren Entwicklung der Bauweise soll die lasttragende Mitwirkung des Putzes nicht angesetzt werden.

Die an der Hochschule Magdeburg- Stendal durchgeführten Untersuchungen liefern eine Grundlage zur Ausrichtung der weiteren Forschungsaktivitäten auf diesem Gebiet. Die weiteren Arbeiten auf dem Gebiet des lasttragenden Einsatzes der Strohballen sollten sich auf folgende Schwerpunkte konzentrieren:

- Entwicklung einer Qualitätskontrolle des Baustoffes Strohballen.
- Quantifizierung der Unterschiede im Druck- und Dauerstandsverhalten von Ballen aus verschiedenen Strohsorten
- Erweiterung der Datenbasis zum rheologischen Verhalten der Strohballen
- Detaillierung von Holzbauteilen einer Strohballenwand; Holzschwellen, Rähme
- Entwicklung eines wirtschaftlichen und einfachen Vorspannsystems für Strohballenwände
- Entwicklung und Erstellung eines Mustergebäudes zur weiteren Erprobung der Bauweise.

Magdeburg den 01.Mai 2008

Prof. Dr.-Ing. I. Danielewicz

A 2 Lastversuche Kleinballen



Zentrum für Umweltbewusstes Bauen e.V. (ZUB) an der Universität Kassel
Gottschalkstr. 28a, D- 34127 Kassel, Tel. 0561-804 3189
Forschungslabor für Experimentelles Bauen (FEB)
Prof. em. Dr.-Ing. Gernot Minke, Dr.-Ing. Benjamin Krick

1 Einleitung

Der nicht lasttragende Strohballenbau ist in Deutschland durch die Erteilung einer allgemeinen Bauaufsichtlichen Zulassung im Jahr 2006 in begrenztem Umfang genehmigungsfähig.

Der Lasttragenden Bauweise stehen, obgleich z.B. in den Vereinigten Staaten, Großbritannien oder der Schweiz erfolgreich eingesetzt, in Deutschland massive Bedenken der Zulassungsbehörden entgegen.

Da der lasttragenden Bauweise z.B. in [6] als ökonomisch wie ökologisch sinnvoller angesehen wird, zielt das Projekt, dessen Endbericht hier vorliegt darauf ab, durch Untersuchungen an Einzelballen und Wänden aus Strohballen die Genehmigungsfähigkeit lasttragender Bauten zu verbessern.

Die Untersuchungen an Kleinballen und Kleinballenwänden wurden durch das Forschungslabor für Experimentelles Bauen (FEB) an der Universität Kassel (Leitung: Prof. em. Dr.-Ing. Gernot Minke) durchgeführt. Dieses Teilprojekt ist eng mit der Dissertation *Untersuchung von Strohballen und Strohballenkonstruktionen hinsichtlich ihrer Anwendung für ein energiesparendes Bauen unter besonderer Berücksichtigung der lasttragenden Bauweise* von Benjamin Krick verbunden, die im gleichen Zeitraum am FEB entstand.

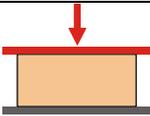
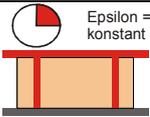
2 Methode

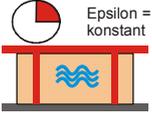
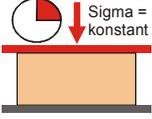
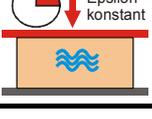
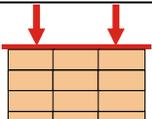
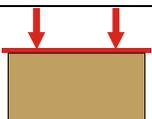
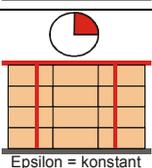
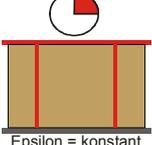
2.1 Testprogramm

Im Rahmen dieses Projektteils wurden 21 Tests zum elasto-mechanischen Verhalten von Einzelballen und 4 Versuche zum Verhalten von Wänden aus Strohballen durchgeführt.

Untersucht wurde das Spannungs-Stauchungsverhalten, das Relaxations- und Kriechverhalten flach liegender HD-Weizenballen. Eine Wand wurde verputzt. Zusätzlich wurde der Einfluss von Wasserschäden und Garnaufall betrachtet. Zum Testprogramm siehe Tabelle 2-1.

Tabelle 2-1: Testprogramm

Test	Anzahl	Test	Zweck/Ergebnis	
1. Tests an Einzelballen				
1.1 Spannungs-Stauchungstests an Ballen zwei unterschiedlicher Dichtegruppen		6	Tests ohne seitliche Einspannung	Ermittlung von Spannungs-Stauchungskennlinien, Elastizitätsmodul, Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls Stauchung von der Ballendichte
1.2 Relaxationstests mit seitlicher Einspannung		3	Tests $\sigma_S=20 \text{ kN/m}^2$	Ermittlung des Relaxationsverhaltens, Abhängigkeit desselben von der Startspannung
		3	Tests $\sigma_S=40 \text{ kN/m}^2$	
		3	Tests $\sigma_S=60 \text{ kN/m}^2$	
1.3 Relaxationstest mit seitlicher Einspannung und Simulation eines Garnauffalls		1	Test $\sigma_S=40$	Auswirkung eines Garnauffalls auf das Relaxationsverhalten

1.4 Relaxationstest mit seitlicher Einspannung und Simulation eines Wasserschadens		1	Test $\sigma_S=40$	Auswirkung eines Wasserschadens auf das Relaxationsverhalten
1.5 Kriechtests mit seitlicher Einspannung		3	Tests $\sigma=60 \text{ kN/m}^2$	Ermittlung des Kriechverhaltens
1.6 Kriechtest mit seitlicher Einspannung und Simulation eines Wasserschadens		1	Tests $\sigma=20 \text{ kN/m}^2$	Einfluss eines Wasserschadens auf das Kriechverhalten
2. Wandelemente				
2.1 Spannungs-Stauchungstest an einer unverputzten Wand		1	Test	Ermittlung einer Spannungs-Stauchungskennlinie, Elastizitätsmodul
2.2 Spannungs-Stauchungstest an einer verputzten Wand		1	Test	Auswirkungen einer Putzschicht auf das Spannungs-Stauchungsverhalten
2.3 Relaxationstest an einer unverputzten Wand		1	Test $\sigma_S=40$	Ermittlung des Relaxationsverhaltens
2.4 Relaxationstest an einer verputzten Wand		1	Test $\sigma_S=40$	Auswirkungen einer Putzschicht auf das Spannungs-Relaxationsverhaltens

2.2 Begründung zur seitlichen Einspannung von Testballen

Die ursprüngliche Planung des Testprogramms sah keine seitliche Einspannung der zu testenden Strohballen vor. Ziel der Tests an Einzelballen war einerseits das Verhalten von Einzelballen an sich zu untersuchen, und andererseits vom Verhalten der Einzelballen Rückschlüsse auf das Verhalten von Wänden aus Strohballen zu ziehen.

Nach der Auswertung der ersten Testergebnisse wurde jedoch klar, dass die Werte von Einzelballen schwerlich mit denen von Wänden vergleichbar sind, da Einzelballen innerhalb einer Wand einerseits durch die benachbarten Ballen und andererseits durch die in vielen Strohballenkonstruktionen eingesetzten Strohballennägel und Fundamentanker in ihrer Querdehnung behindert werden. Daher wurde bei weiteren Tests eine seitliche Einspannung eingeführt, die der Situation eines Strohballens in einer Wand eher entspricht.

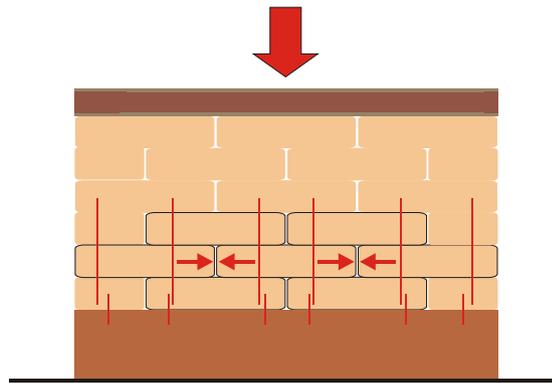


Abbildung 2-1 Einspannung von Einzelballen in Wänden durch Nachbarballen und Verstärkungselemente wie Ballennägel und Fundamentanker

2.3 Definition verwendeter und zu ermittelnder Kennwerte

2.3.1 Feuchtegehalt u , ermittelt aus der relativen Luftfeuchte innerhalb der Ballen

Zur Ermittlung des Feuchtegehalts u wurden die relative Luftfeuchte und die Temperatur mit dem modifizierten kombinierten Feuchte- Temperaturmessgerät des Herstellers Extech (vgl. 3.4.1) gemessen. Dazu wurde die Lanze des Messgerätes bis in die Ballenmitte geschoben und der Wert genommen, nachdem die Anzeige nach ca. 5 Minuten zur Ruhe gekommen war.

Die Werte wurden in die für Weizenstroh geltende, in [2] ermittelte Formel nach der BET-Theorie eingesetzt und der Masse bezogene Feuchtegehalt u berechnet.

2.3.2 Trockenmasse m_{tr} der Versuchsballen

Die Trockenmasse wird aus der Rohmasse und der Masse bezogenen Feuchte wie folgt berechnet:

$$m_{tr} = \frac{m}{1 + u}$$

Dabei ist:

- m_{tr} : Trockenmasse des Strohballens
- m : Rohmasse des Strohballens (kg)
- u : Massebezogener Feuchtegehalt des Ballens (g/g)

2.3.3 Trockendichte ρ_{tr} der Versuchsballen

Die Trockendichte der Versuchsballen wird nach folgender Gleichung bestimmt:

$$\rho_{tr} = \frac{m_{tr}}{l_0 \cdot b_0 \cdot h_0}$$

Dabei ist:

- ρ_{tr} : Trockendichte der Versuchsballen (kg/m³)
- m_{tr} : Trockenmasse des Strohballens (kg), ermittelt nach 2.3.2
- l_0 : Ausgangslänge des Ballens in Anlehnung an DIN EN 822 (m)
- b_0 : Ausgangsbreite des Ballens in Anlehnung an DIN EN 822 (m), alternativ die Breite des Kanals der verwendeten Strohballenpresse
- h_0 : Ausgangshöhe des Ballens in Anlehnung an DIN EN 822 (m), alternativ die Höhe des Kanals der verwendeten Strohballenpresse

2.3.4 Stauchung in Anlehnung an DIN EN 826

Die Stauchung (negative Dehnung) der Versuchsballen wird in Anlehnung an DIN EN 826 nach folgender Formel ermittelt:

$$\varepsilon = 100 \cdot \frac{X}{h_0}$$

Dabei ist: ε : Stauchung (%)
 X : Verformung (Höhenänderung) (m, mm)
 h_0 : Ausgangshöhe des Versuchsballens in Anlehnung an DIN EN 822 (m, cm, mm)

2.3.5 Stauchung bei einer Spannung von 40 kN/m² ε_{40}

Die Stauchung ε_{40} wird wie folgt ermittelt:

$$\varepsilon_{40} = 100 \cdot \frac{X_{40}}{h_0}$$

Dabei ist: ε_{40} : Stauchung bei einer Spannung von 40 kN/m² (%)
 X_{40} : Verformung (Höhenänderung) bei einer Spannung von 40 kN/m² (m, mm)
 h_0 : Ausgangshöhe des Versuchsballens in Anlehnung an DIN EN 822 (m, cm, mm)

2.3.6 Kriechverformung

Die Kriechverformung wird definiert als Stauchung unter konstanter, andauernder Belastung und wird hier nach folgender Formel ermittelt:

$$\varepsilon_K = 100 \cdot \frac{X_K}{h_S}$$

Dabei ist: ε_K : Kriechverformung (%)
 X_K : Verformung (Höhenänderung) durch Kriechen (m, mm)
 h_S : Höhe des Versuchsballens unmittelbar nach dem Aufbringen der Last (m, cm, mm)

Gesamtverformung

Die Gesamtverformung wird definiert als die Summe der Verformungen infolge Stauchung und Kriechen. Sie wird hier nach folgender Formel ermittelt:

$$\varepsilon_G = 100 \cdot \frac{X_K + X}{h_0}$$

Dabei ist: ε_G : Gesamtverformung (%)
 X : Verformung (Höhenänderung) (m, cm, mm)
 X_K : Verformung (Höhenänderung) durch Kriechen (m, mm)
 h_0 : Ausgangshöhe des Versuchsballens in Anlehnung an DIN EN 822 (m, mm)

2.3.7 Ausgangsquerschnitt der Versuchsballen in Anlehnung an DIN EN 826

Der Ausgangsquerschnitt der Versuchsballen wird in Anlehnung an DIN EN 826 wie folgt ermittelt:

$$A_0 = l_0 \cdot b_0$$

Dabei ist: A_0 : Ausgangsquerschnitt des Probekörpers senkrecht zur Belastungsrichtung (m²)
 l_0 : Ausgangslänge des Ballens in Anlehnung an DIN EN 822 (m)

b_0 : Ausgangsbreite des Ballens in Anlehnung an DIN EN 822 (m), alternativ die Breite des Kanals der verwendeten Strohballempresse

2.3.8 Druckspannung in Anlehnung an DIN EN 826

Die Druckspannung wird definiert als der Quotient aus der auf den Versuchsballen aufbrachten Kraft und dem Ausgangsquerschnitt (Abweichend von der DIN wird die Spannung in kN/m^2 angegeben):

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

Dabei ist: σ : Druckspannung (kN/m^2)
 F : Druckkraft senkrecht zur Querschnittsfläche (kN)
 A_0 : Ausgangsquerschnitt des Probekörpers senkrecht zur Belastungsrichtung (m^2)

2.3.9 Druckspannung bei 10% Stauchung σ_{10}

Die Druckspannung σ_{10} wird in Anlehnung an DIN EN 826 als die Spannung definiert, die anliegt, wenn der Strohballen um 10% gestaucht ist (Abweichend von der DIN wird die Spannung in kN/m^2 angegeben):

$$\sigma_{10} = \frac{F_{10}}{A_0}$$

Dabei ist: σ_{10} : Druckspannung bei 10% Stauchung (kN/m^2)
 F_{10} : Druckkraft senkrecht zur Querschnittsfläche bei 10% Stauchung (kN)
 A_0 : Ausgangsquerschnitt des Probekörpers senkrecht zur Belastungsrichtung (m^2)

2.3.10 Druck-Elastizitätsmodul in Anlehnung an DIN EN 826

Der Druck-Elastizitätsmodul ist nach DIN EN 826 (Wärmedämmstoffe für das Bauwesen: Bestimmung des Verhaltens bei Druckbeanspruchung) definiert als das „Verhältnis von Druckspannung zur zugehörigen Stauchung unterhalb der Proportionalitätsgrenze, sofern ein linearer Zusammenhang vorliegt“ (EN 826: 3).

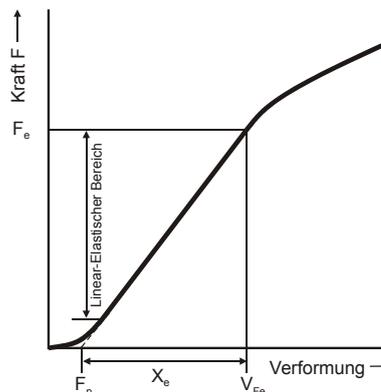


Abbildung 2-2: Zum Druckelastizitätsmodul nach DIN EN 826

Der Druck-Elastizitätsmodul (DIN EN 826) wird wie folgt berechnet:

$$E = \frac{F_e}{A_0} \cdot \frac{h_0}{X_e}$$

- Dabei ist:
- E : Druck-Elastizitätsmodul (DIN EN 826) (kN/m²)
 - F_e: Kraft am Ende des konventionell elastischen Bereiches (obere Proportionalitätsgrenze) (kN)
 - A₀: Ausgangsquerschnitt des Probekörpers senkrecht zur Belastungsrichtung (m²)
 - h₀: Ausgangshöhe des Prüfkörpers (m)
 - X_e: Verformung bei F_e (m) (gemessen ab F_p)
 - F_p: Verformungsnullpunkt (m)

Der Verformungsnullpunkt wird nach DIN EN 826 wie folgt bestimmt:

„Die Nullpunktverformung ist zu bestimmen, indem z.B. mit einem Lineal die steilste gerade Strecke der Kraft-Verformungs-Kurve [...] bis zur Nullachse der Kraft F_p verlängert wird“ (EN 826 1996: 5)

Die vorgeschlagene Methode der grafischen Ermittlung von F_p erscheint umständlich und nicht zeitgemäß. Daher wurde in [2] folgende Formel zur rechnerischen Bestimmung von F_p entwickelt:

Es wurde eingeführt:

- F_a: Kraft am Beginn des konventionell elastischen Bereiches (untere Proportionalitätsgrenze) (kN)
- h_a: Höhe des Prüfkörpers bei F_a (m)
- h_e: Höhe des Prüfkörpers bei F_e (m)

$$F_p = \frac{-(F_a - \frac{F_e - F_a}{h_e - h_a} \cdot h_a)}{\frac{F_e - F_a}{h_e - h_a}}$$

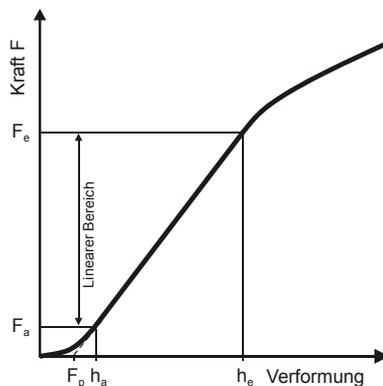


Abbildung 2-3: Zur rechnerischen Ermittlung von F_p und E

Um den E-Modul ohne F_p bestimmen zu können, wurde folgende Formel entwickelt:

$$E = \frac{\frac{F_e - F_a}{A_0}}{\frac{h_e - h_a}{A_0}}$$

Ist

- σ_e: Die Spannung an der oberen Proportionalitätsgrenze [F_e/A₀] (kN/m²),
- σ_a: Die Spannung an der unteren Proportionalitätsgrenze [F_a/A₀] (kN/m²),
- ε_e: Die Verformung in % bei σ_e [h_e/h₀*100],
- ε_a: Die Verformung in % bei σ_e [h_a/h₀*100],

so lautet die Formel für den Druck-Elastizitätsmodul:

$$E = \frac{(\sigma_e - \sigma_a) \cdot 100}{\varepsilon_e - \varepsilon_a}$$

Es wird für den Nullverformungspunkt analog zu F_p eingeführt: ε_p (%).

$$\varepsilon_p = \frac{-\left(\sigma_a - \frac{\sigma_e - \sigma_a}{\varepsilon_e - \varepsilon_a} \cdot \varepsilon_a\right)}{\frac{\sigma_e - \sigma_a}{\varepsilon_e - \varepsilon_a}}$$

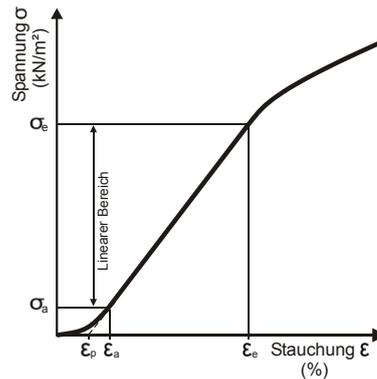


Abbildung 2-4 zur rechnerischen Ermittlung von E und ε_p in % aus der Spannung σ

Soll aus einer Spannung bei bekanntem E-Modul die Stauchung errechnet werden, so gilt folgende Formel:

$$\varepsilon(\%) = \varepsilon_p + \frac{\sigma \cdot 100}{E}$$

2.3.11 Relaxation

Die Relaxation wird als zeitabhängige Abnahme der Spannung bei konstanter Stauchung definiert. Sie beschreibt die Differenz zwischen Startspannung und Restspannung in Prozent aus:

$$\sigma_X = 100 - \sigma_R$$

Dabei ist: σ_X : Relaxation (%)
 σ_R : Restspannung (%)

mit:

$$\sigma_R = 100 \cdot \frac{\sigma_r}{\sigma_s}$$

Dabei ist: σ_R : Restspannung (%)
 σ_r : Restdruckspannung (kN/m²)
 σ_s : (Start-)Druckspannung (kN/m²)

2.4 Versuchsdurchführungen

2.4.1 Tests mit dem Prüfstand „Toni Technik“

Nach dem Folgend beschriebenen Verfahren wurden die Ballen der Testreihe 1.1 geprüft. Die Versuche wurden an der Materialprüfanstalt der Uni Kassel durchgeführt.

Der zu prüfende Ballen wurde mit den unter 3.4 beschriebenen Hilfsmitteln gewogen, in seiner Länge gemessen und mittig in die unter 3.3.1 beschriebene Prüfeinrichtung „Toni Technik“ eingebracht. Die Lasteinleitungsplatte der Prüfeinrichtung wurde auf 36 cm (Kanalmaß der Strohballenpresse) abgesenkt und das Prüfprogramm gestartet. Zunächst wurde durch das Absenken der Lasteinleitungsplatte eine Kraft von 1,7 kN aufgebaut (Diese entspricht je nach Ballenlänge, einer Spannung von bis zu 3,7 kN/m²). Ab diesem Punkt begann die Wegmessung. Es wurde Weg gesteuert mit einer Geschwindigkeit von 0,42 mm/s bis zum Erreichen des maximalen Kolbenweges vom 250 mm (erreicht nach 10 Minuten) gefahren. Nach dem Entlasten des Ballens wurde der Versuch mit der nächsten Probe wiederholt. Auf diese Weise wurden insgesamt 6 Weizenballen geprüft.

2.4.2 Tests mit den Relaxationsprüfständen

Die Tests mit den Proben der Reihe 1.3 wurden im Keller des Forschungslabors für experimentelles Bauen (FEB) an der Uni Kassel durchgeführt. Für die Durchführung wurden parallel drei der unter 3.3.2 beschriebenen Relaxationsprüfstände verwendet.

Der zu prüfende Ballen wurde mit den unter 3.4 beschriebenen Werkzeugen gewogen, in seiner Länge gemessen, in den Relaxationsprüfstand eingebracht und seitlich arretiert.

Mithilfe der Gewindestangen wurde die berechnete Kraft aufgebracht. Nach jeweils 10 Minuten wurde eine volle Stunde lang die Kraft wieder auf den berechneten Wert erhöht. Erst dann wurde die Relaxation zunächst in größer werdenden zeitlichen Abständen gemessen, später in der Regel täglich eine Messung durchgeführt. Nach Ablauf eines Monats wurde der Vorgang mit der nächsten Probe wiederholt. Bei späteren Tests wurde die Spannung alle 12 Stunden von einem Datenlogger aufgezeichnet. Es wurden 9 Weizenstrohballen bei Anfangsspannungen von 20, 40 und 60 kN/m² geprüft.

2.4.3 Tests mit dem Kriechprüfstand

Die zu testenden Proben wurden vermessen, gewogen und in den unter 3.3.3 beschriebenen Kriechprüfstand eingebracht. Die Ballen wurden mittels der seitlichen Einspannung fixiert und anschließend die Last durch Absenken und Beschweren des Lastarmes aufgebracht. Die Tests im Keller des Forschungslabors für experimentelles Bauen (FEB) an der Uni Kassel durchgeführt.

Der zu prüfende Ballen wurde mit den unter 3.4 beschriebenen Werkzeugen gewogen, in seiner Länge gemessen, seine Feuchtigkeit und Temperatur bestimmt und in den unter 3.3.3 beschriebenen Kriechprüfstand eingebracht.

Zunächst wurde der Ballen mit Hilfe von Gewindestangen vorgespannt, sodann das Gewicht am Lastarm bis zum Erreichen der vorher errechneten Kraft erhöht. Dabei wurde darauf geachtet, dass es zu keiner Winkelverzerrung im zu prüfenden Strohballen kam. Zeichnete sich eine solche ab, wurde der Ballen entlastet und neu justiert. Nach dem Erreichen der jeweiligen Prüfspannung begann die Wegmessung. Diese wurde in zeitlich größer werdenden Abständen manuell mittels einer Schieblehre (siehe Abschnitt 3.4.3) durchgeführt. Auf diese Weise wurden drei HD-Weizenstrohballen getestet.

2.4.4 Tests mit dem HD-Ballen Kombiprüfstand

Die Versuche 1.4, 1.5 und 1.6 wurden mit dem im Rahmen von [2] entwickelten, unter 3.3.4 beschriebenen, Kombiprüfstand durchgeführt. Die Tests fanden im Keller des FEB Kassel statt. Zunächst wurden die Proben mit den unter 3.4 beschriebenen Werkzeugen gewogen, in ihrer Länge, Breite und Höhe vermessen und die relative Luftfeuchte sowie die Temperatur in der Ballenmitte bestimmt. Die Proben wurden mittig in den Prüfstand eingebracht und arretiert (Behinderung der Längsdehnung). Die Lasteinleitungsplatte wurde aufgelegt, Kraftmessdose und Joch in Position gebracht. Die Ballenabmessungen wurden in eine Exceltabelle eingetragen, mit deren Hilfe der Digit-Wert bestimmt wurde, welcher der Spannung von 40 kN/m^2 entspricht, bis zu der das Spannungs-Stauchungsverhalten getestet wurde.

Dieser Wert wurde mit Hilfe des externen Tastaturinterfaces der SPS (Speicherprogrammierbare Steuerung) in die Steuerung eingegeben und der Test gestartet.

Der Ballen wurde nun bis zu einer Spannung von 40 kN/m^2 belastet (1 in [2]). Direkt nach Erreichen der Endspannung schalteten die Motoren ab und hielten so die Stauchung konstant. Es schloss sich der Relaxationstest an. (3 in [2]).

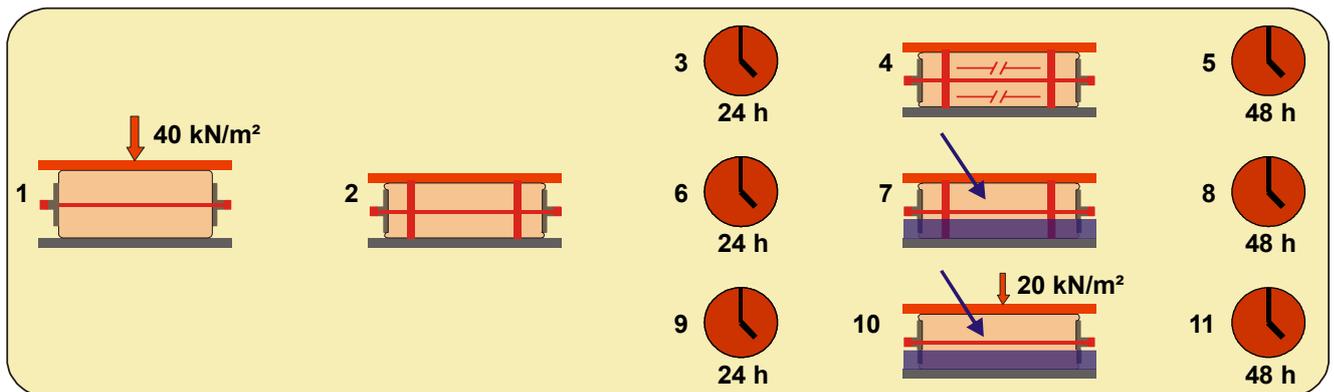


Abbildung 2-5 Schematischer Ablauf der Tests mit dem HD-Ballen Kombiprüfstand

Simulation eines Garnaufschlusses (Relaxation)

Zur Simulation eines Garnaufschlusses wurde nach dem Aufbringen der Spannung zunächst die Relaxation über 24 Stunden gemessen (3 in [2].), um sicher zu stellen, dass sich der Testballen ähnlich verhält wie andere Ballen. Dann wurden die Garnbänder durchtrennt (4) und die Relaxation über weitere 48 Stunden aufgenommen (5).

Simulation eines Wasserschadens (Relaxation)

Für diesen Versuch wurde der Prüfstand mit einer Folie ausgerüstet, die unter und um den Ballen herum eine wasserundurchlässige Wanne bildet.

Nach dem Aufbringen der Spannung wurde zunächst die Relaxation über 24 Stunden aufgezeichnet (6 in Abbildung 2-5). Nun wurde Wasser bis zu einer Höhe von 10 cm in die beschriebene Wanne eingegossen (7), konstant gehalten und die Relaxation über weitere 48 Stunden stündlich aufgezeichnet (8).

Simulation eines Wasserschadens (Kriechen)

Für diesen Versuch wurde der Prüfstand mit einer Folie ausgerüstet, die unter und um den Ballen herum eine wasserundurchlässige Wanne bildet.

Nach dem Aufbringen der Spannung wurde zunächst die Relaxation stündlich über 24 Stunden aufgezeichnet (9 in Abbildung 2-5). Die Speicherprogrammierbare Steuerung wurde so programmiert, dass sie, sobald die Spannung unter 20 kN/m^2 fällt, so lange nachdrückt, bis die 20 kN/m^2 wieder erreicht und konstant hält (Kriechmodus).

Nach der Relaxationsphase von 24 h wurde Wasser bis zu einer Höhe von 10 cm in die beschriebene Wanne eingegossen und konstant gehalten (10). Durch den Einfluss des Wassers sank die Spannung unter 20 kN/m^2 , die SPS erhöhte die Spannung auf 20 kN/m^2 , die Kriechphase begann. Die Wegänderung wurde über 48 h jeden Zehntel Millimeter aufgezeichnet (11).

2.4.5 Tests mit dem Wandprüfstand

Spannungs-Stauchungsverhalten der unverputzten Strohballenwand (Test 2.1)

Der Versuch wurde im Hof des Forschungslabors für Experimentelles Bauen (FEB) an der Uni Kassel durchgeführt.

Für die Durchführung wurden der unter 3.3.5 beschriebene Wandprüfstand verwendet.

Die zu prüfenden Ballen wurde mit den unter 3.4 beschriebenen Werkzeugen gewogen, in ihrer Länge gemessen und unverwechselbar gekennzeichnet.

Zunächst wurden als U-Form ausgebildete, seitliche Begrenzungs- und Stabilisierungselemente auf der unteren Lasteinleitungsplatte aufgerichtet und lotrecht befestigt.

Auf die untere Lasteinleitungsplatte wurden an den Außenkanten Dreiecksleisten aufgebracht um ein Verrutschen der Strohballen zu verhindern.

Die Strohballen wurden nach Bedarf gekürzt, wobei die Summe der Länge der Ballen ca. 3-5% über der späteren Wandlänge lagen. Die Ballen wurden lagenweise eingebaut zwischen die seitlichen Begrenzungen gedrückt. Mittels eines Holzhammers wurden sie in ihrer Lage justiert.

Nach der dritten Lage wurde eine 16 cm breite und 2,4 cm starke Bohle eingelegt. In diese Bohle wurden zur Aufnahme der Ballennägel über jedem Ballen 2 Löcher gebohrt. Die Ballennägel mit einer Länge von 100 cm wurden eingeschlagen. Zur Aufnahme von Zugkräften wurde an den Enden der Bohle, die aus der seitlichen Begrenzung herausragten, ein Riegel angebracht. In die folgende Ballenlage wurden pro Ballen zwei 100 cm lange Ballennägel so eingeschlagen, dass sie innerhalb der Garnbindungen knapp an der Bohle vorbei in die unteren Ballenlagen drangen. Über die fünfte Ballenlage wurde wieder eine Bohle gelegt und mit 60 cm langen Ballennägeln fixiert. Die sechste Ballenlage wurde arretiert wie die vierte, die siebente wieder mit 60 cm langen Ballennägeln.

Der Verbund mit der oberen Druckplatte wurde mittels Dreieckleisten an den Außenkanten der Platte hergestellt.

Nun wurden über 2 Joche und Gewindestangen beide seitlichen Begrenzungen gespannt, um ein seitliches Ausweichen der Begrenzungen zu verhindern.

Der Test begann, die Wandhöhe (2 Messpunkte), die Presskraft der beiden Zylinder wurden aufgenommen.

Bei einer Spannung von 22 kN/m^2 hatte einer der verwendete Pneumatisch-hydraulische Zylinder seinen maximalen Hub erreicht, die Konstruktion wurde umgespannt und der Test bis zu einer Spannung von 40 kN/m^2 fortgesetzt. Es schloss sich eine Relaxationsmessung (Test 2.3) an.

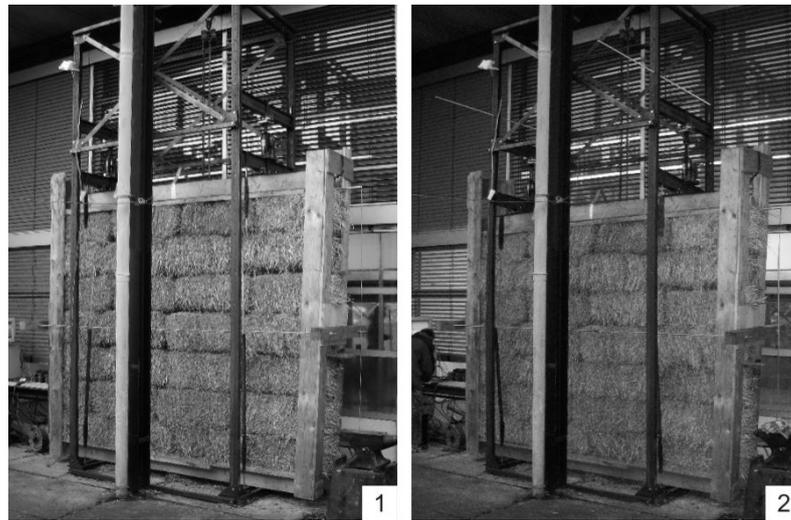


Abbildung 2-6: Test 2.3: Wand vor der Belastung (1) und bei einer Spannung von 40 kN/m² (2)

Spannungs-Stauchungsverhalten der verputzten Strohballenwand (Test 2.2)

Der Versuch wurde in einer Außenklimahalle bei Grebenstein in Nordhessen durchgeführt. Zunächst wurde ein Leiterraum aus 58/78 Kanthölzern aufgebaut. In die Sprossen der Leiter wurden Löcher zur Aufnahme angespitzter Buchenrundstäbe gegen das Verrutschen der Ballen eingelassen. Die Buchenrundstäbe wurden in die Löcher eingeschlagen und 78/78 Kanthölzer an den Seiten der Wand aufgerichtet und mittels BMF- Winkeln befestigt. Strohballen wurden gewogen und vermessen und nach Bedarf gekürzt. Die Endballen jeder Lage wurden mittels eines Elektrofuchsschwanzes entsprechend den Kanthölzern ausgeklinkt. Die ersten vier Lagen aus flach liegenden Ballen wurden aufgeschichtet, justiert und mit Bambusstecken genagelt. Die sechste Lage wurde wieder genagelt, dann wurde eine 5/250 Bohle, die entsprechend den Holzpfosten ausgeklinkt war, aufgelegt. Mit einem großen Holzhammer wurden überstehende Ballen und Ungleichmäßigkeiten in der Wand plan geschlagen.

Nun wurde die Wand mittels Paketspannbändern um ca. 4,4% vorgespannt. Dazu wurden die Paketbänder mit einem Spanner angezogen während mit einem großen Holzhammer auf die Bohle geschlagen wurde. Die Vorspannung wurde durch das Aufbringen einer Last bis zum Stauchen der Wand ermittelt. Die aus den Ballen herausstehenden Strohhalme wurden mit einer Heckenschere abrasiert.

Nun wurde eine erste Lehmschicht in die Wand einmassiert und anschließend eine zweite Lage in nass aus Gumbel Grubenlehm aufgebracht. Nach dem Trocknen dieser Lagen wurde die dritte Putzlage aus Maxit IP334 Lehm grob aufgezogen.

Nach dem Trocknen dieser Lage wurde die Wand bis 40 kN/m² belastet. Sodann schloss sich ein Relaxationstest (Test 2.4) über einen Monat an.

Relaxationsverhalten der unverputzten Strohballenwand (Test 2.3)

Der Versuch wurde im Hof des Forschungslabors für Experimentelles Bauen (FEB) an der Uni Kassel durchgeführt. Für die Durchführung wurde der in 3.3.5 beschriebene Wandprüfstand verwendet. Der Untersuchung des Relaxationsverhaltens ging der Spannungs-Stauchungstest 2.1 voraus. Die Daten wurden mittels eines Datenloggers alle 24 Stunden über einen Zeitraum von einem Monat aufgezeichnet.

Relaxationsverhalten der verputzten Strohballenwand (Test 2.4)

Der Versuch wurde in einer Außenklimahalle bei Grebenstein in Nordhessen durchgeführt. Für die Durchführung wurde der in 3.3.5 beschriebene Wandprüfstand verwendet.

Der Untersuchung des Relaxationsverhaltens ging der Spannungs-Stauchungstest 2.2 voraus. Die Daten wurden mittels eines Datenloggers jede Stunde über einen Zeitraum von einem Monat aufgezeichnet.

3 Material

3.1 Strohballen

Verwendet wurde HD-Weizenstrohballen (*Triticum aestivum*) Das Stroh stammt aus ökologischem Anbau und wurde mit einem Claas Compact 40 Mähdrescher gemäht und gedroschen. Das Pressen der Ballen erfolgte mit einer Welger AP 53 HD-Ballenpresse im Rahmen der Pressversuche von [2]. Die Ballen wiesen einen großen Anteil Langstroh, sehr steife Stängel mit gut erhaltener, kaum geknickter wenig gesplissener Rohrstruktur auf.

3.2 Lehmputze

Für die Tests der verputzten Strohballenwand wurde als Unterputz ein fetter Gumbel Ziegeleilehm, für den Oberputz der Maxit IP 334 Lehmputz grob verwendet. Beide Putze wurden 2006 am FEB im Rahmen eines noch unveröffentlichten Forschungsprojektes untersucht. Die Ergebnisse sind in [2] dargestellt.

Tabelle 3-1: Angaben zu den verwendeten Lehmputzen

Lehmputz	Korngröße (mm)	Trockenschwindmaß (mm/m)	Biegezugfestigkeit (kN/m ²)	Druckfestigkeit (kN/m ²)
Gumbel Ziegeleilehm	0-5	k.A.	232	2286
Maxit IP 334 Lehmputz grob	0-1,5	10,5	197	1352

3.3 Prüfstände

3.3.1 Prüfstand Toni Technik

Die Versuche der Reihe 1.1 wurden an der Materialprüfanstalt der Uni Kassel mit einer Prüfmaschine der Marke „Toni Technik“ durchgeführt. Die Maschine kann über eine elektronische Steuerung Weg- und Zeit gesteuert gefahren werden. Die Maximalkraft beträgt 200 kN.



Abbildung 3-1: Prüfstand Toni Technik

3.3.2 Relaxationsprüfstände

Für die Relaxationstests der Reihe 1.2 wurden die in [2] entwickelten Relaxationsprüfstände verwendet.

Die Prüfstände bestehen im Wesentlichen aus einer Halterung für die zu prüfenden Strohballen, sowie einem Ober- und Unterjoch, welche die Ballen über Gewindestangen zusammenpressen. Zwischen Oberjoch und oberer Lasteinleitungsplatte befindet sich eine Kraftmessdose (Typ Global Weighing PR 6051/00S) zur Messung der aktuell wirkenden Kraft. In Längsrichtung wird der Strohballen durch Lasteinleitungselemente und Gewindestangen in seiner Länge fixiert (seitliche Einspannung). Die aktuell wirkende Kraft wurde über einen Messverstärker angezeigt, der in zeitlich größer werdenden Abständen abgelesen wurde.

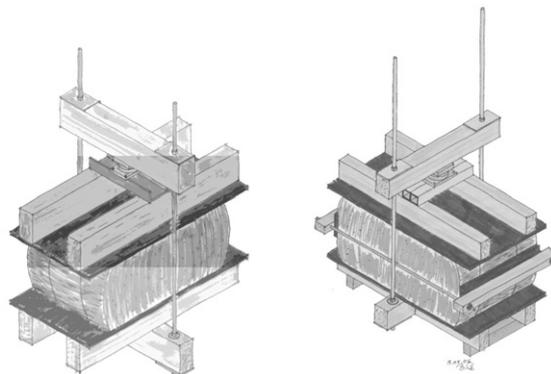


Abbildung 3-23-3: Relaxationsprüfstände der ersten und zweiten Generation

3.3.3 Kriechprüfstand

Der in [2] entwickelte Kriechprüfstand wurde für die Testreihe 1.5 verwendet. Er besteht im Wesentlichen aus einer Halterung, welche den zu testenden Strohballen aufnimmt und einem Hebel, der auf der einen Seite fixiert, auf der anderen mit einem variablen Gewicht beaufschlagt, den Strohballen in seiner Halterung unter Spannung setzt. Zwischen dem Hebelarm und der oberen Lasteinleitungsplatte befindet sich ein Kraftsensor (Typ Global Weighing PR 6051/00S) zur Messung der aktuell wirkenden Kraft. In Längsrichtung wird der Strohballen durch Lasteinleitungselemente und Gewindestangen in seiner Länge fixiert (seitliche Einspannung). Die Wegmessung erfolgte manuell mittels einer Schieblehre (siehe 3.4.3).



Abbildung 3-4: Kriechprüfstand

3.3.4 HD-Ballen Kombiprüfstand

Die Versuche 1.3, 1.4 und 1.6 wurden mit dem in [2] entwickelten Kombiprüfstand durchgeführt. Der HD-Ballen Kombiprüfstand ermöglicht es, sowohl Spannungs- Stauchungs- als auch Relaxations- und Kriechtests zu durchzuführen.

Er verfügt über einen elektrischen Antrieb, der über eine Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS), die auch als Datenlogger eingesetzt wird, in Verbindung mit einer Kraftmessdose und einem Wegmesser angesteuert wird.

Beschreibung des Prüfstandes: Im Wesentlichen besteht der Prüfstand aus der unteren und der oberen Lasteinleitungsplatte, die über ein Joch und 2 Gewindestangen M16, Festigkeitsklasse 10.6 zusammengepresst werden können. Die untere Lasteinleitungsplatte ruht auf vier 70 cm hohen Beinen.

Die Gewindestangen werden durch 2 Rohrmotoren (Typ Triton TEM 45 S 40, Nenndrehmoment: 40 Nm) angetrieben. Oberhalb des Joches sind zwei feststehende Muttern angebracht, die das Joch durch die Drehung der Gewindestangen nach unten auf die zwischen den Lasteinleitungsplatten liegende Probe pressen. Zur Synchronisierung sind die Motoren über eine Kette miteinander verbunden.

Beschreibung der Kraftmessung: Die Kraft wird über einen Kraftsensor (Typ ME KM38), der zwischen der oberen Lasteinleitungsplatte und dem Joch platziert ist, gemessen.

Beschreibung der Wegmessung: Die Wegmessung erfolgt über die Umdrehung der Gewindestangen. Diese wird über ein Zahnrad abgenommen, das wiederum ein Zahnrad treibt, welches mit einer Taktscheibe verbunden ist. Die Bewegung dieser Scheibe wird durch eine Lichtschranke (Typ Sharp GP 1 A 71R) aufgenommen. Die maximale Auflösung beträgt 0,05 mm.

Beschreibung der Speicher programmierbaren Steuerung (SPS): Bei der SPS handelt es sich um eine Entwicklung von Jonathan Blanz und des Verfassers speziell für diesen Prüfstand.

Sie basiert auf der C-Control M-Unit 2.0, (max. 20.000 Instruktionen/s, 10 kByte Programmspeicher, 8 A/D-, 24 I/O-Ports)

Die Verstärkung der Signale der Kraftmessdose wird über einen INA 141

Präzisionsinstrumentenverstärker mit einstellbarem Offset und Gain realisiert. Die A/D-Wandlung erfolgt über einen der 8-Bit-Wandler der C-Control M-Unit.

Referenz- und Versorgungsspannung von 5,0 Volt werden über einen Präzisions-Low-Drop-

Spannungsregler (Typ, LT 1086-5 CT, Spannungskonstanz 0,015%) bereitgestellt. Die

Programmierung und Bedienung erfolgt über ein USB-Interface mit einem PC sowie über ein externes Tastermodul.

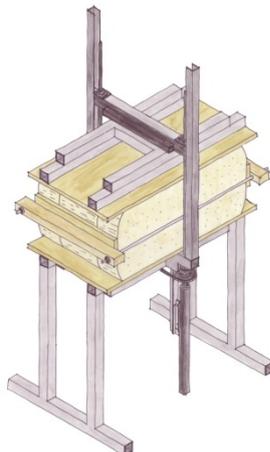


Abbildung 3-5: HD-Kombiprüfstand

3.3.5 Wandprüfstand

Der Wandprüfstand besteht aus oberer und unterer Lasteinleitungsplatte (jeweils 3 m lang und 0,5 m breit), die über einen pneumatisch-hydraulischen Antrieb zusammen gepresst werden können. Die Kraftübertragung zwischen den Lasteinleitungsplatten wird von einem stabilen Stahlrahmen übernommen. Zur Kraftmessung wurden Sensoren des Typs Global Weighing PR 6051/00S eingesetzt, die Messwerte wurden mittels Datenloggern gespeichert. Zur Wegmessung wurden bei der unverputzten Wand Maßbänder mit Millimeterteilung verwendet. Bei der verputzten Wand erfolgt die Wegmessung über eine Taktscheibe, deren Bewegung von einer Lichtschranke abgetastet wird. Angetrieben wird die Taktscheibe über eine Kette, die eine Verbindung zwischen oberer und unterer Lasteinleitungsstruktur herstellt. Die maximale Auflösung beträgt 0,1 mm. Die Messwerte wurden mittels eines Datenloggers gespeichert. Der Wandprüfstand wurde im Rahmen von [2] entwickelt.

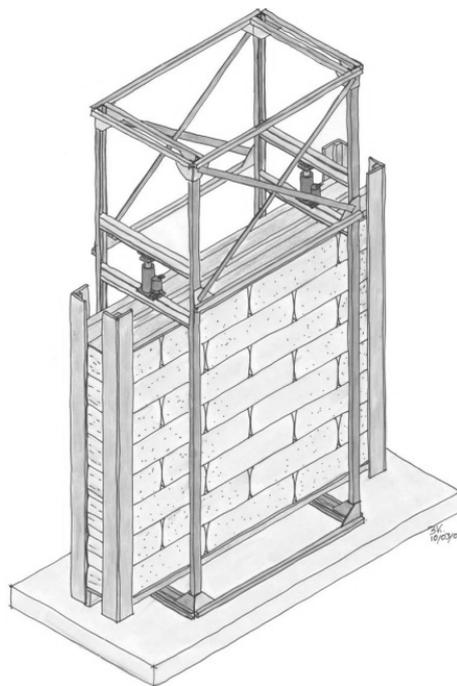


Abbildung 3-6: Wandprüfstand 2

3.4 Weitere Messinstrumente

3.4.1 Hygrometer/Thermometer

Zur Messung der relativen Luftfeuchte und Temperatur im Ballen wurde ein Fernsensor-Hygrothermometer des Herstellers Extech (Modellnummer 448515) verwendet. Das Messgerät wurde im Rahmen von [2] mittels Exsikkatorlösungen abgeglichen. Dabei wurde festgestellt, dass das Gerät in einem Feuchtebereich über 60% rH hinreichend genaue Werte (3,1% maximale Abweichung bei der Messung der relativen Luftfeuchte, 6% bei der Messung der Temperatur) liefert.

3.4.2 Gewichtsmessung

Für die Gewichtsbestimmungen an HD-Kleinballen kam eine digitale Plattformwaage des Herstellers Soehnle (Typ 2710) zur Anwendung.

3.4.3 Längenmessung

- Die Abmessungen der Ballen wurden mit einer millimetergenauen Schieblehre, welche im Rahmen von [2] konstruiert wurde, bestimmt
- Zur Messung des Kriechens und zum Justieren von Prüfständen kam eine 1/100stel mm genaue digitale Schieblehre, Messbereich 0-300 mm der Marke PROFITEXX, zum Einsatz.

4 Darstellung und Diskussion der Versuchsergebnisse

4.1 Spannungs-Stauchungstests an Einzelballen

Die Spannungs-Stauchungstests an flach liegenden Kleinballen ohne seitliche Einspannung wurden wie in Abschnitt 2.4.1 beschrieben an der Materialprüfanstalt der Uni Kassel mit der Prüfanlage „Toni Technik“ durchgeführt. Es wurden die Ballen mit den Probennummern 1.1.1 bis 1.1.6 verwendet.

Tabelle 4-1 listet physikalische Balleneigenschaften sowie Testergebnisse auf.

Tabelle 4-1: Physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse Kleinballen flach liegend ohne seitliche Einspannung

Probennummer	Abmessungen (m)			u (g/g)	ρ_{tr} (kg/m ³)	σ_{10} (kN/m ²)	σ_e kN/m ²	ϵ_{40} (%)	ϵ_p (%)	E-Modul kN/m ²
	l	b	h							
1.1.1	0,700	0,480	0,360	0,158	76,96	18,00	15,00	32,19	-3,57	137,34
1.1.2	0,790	0,480	0,360	0,152	69,71	14,00	11,00	36,67	-1,76	134,80
1.1.3	0,720	0,480	0,360	0,154	71,16	14,00	10,00	37,02	-1,82	137,49
1.1.4	0,850	0,480	0,360	0,164	117,73	30,00	19,00	15,97	-1,48	272,16
1.1.5	0,790	0,480	0,360	0,164	111,08	24,00	22,00	20,05	-2,28	201,82
1.1.6	0,850	0,480	0,360	0,185	107,41	33,00	20,00	14,42	-0,93	332,78
Ø Ballen „locker“	0,737	0,480	0,360	0,155	72,61	15,33	12,00	35,29	-2,38	136,54
Ø Ballen „dicht“	0,830	0,480	0,360	0,171	112,07	29,00	20,33	16,81	-1,56	268,92

u: Massespezifischer Feuchtegehalt; ρ_{tr} : Trockendichte; σ_{10} : Spannung bei 10% Stauchung; σ_e : Spannung am Ende des Proportionalbereiches; ϵ_{40} : Stauchung bei einer Spannung von 40 kN/m²; ϵ_p : Nullpunktverschiebung; Ø Mittelwert aus den betreffenden Werten

Beobachtungen

Während des Pressens ist in den Ballen ein Knistern zu vernehmen. Es wird kein Reißen des Polypropylengarns verzeichnet. Nach dem Entfernen der Last dehnen sich die Ballen schnell wieder aus.

Unter zunehmender Spannung wird neben der vertikalen Stauchung eine Längendehnung beobachtet, die mit steigender Spannung abnimmt und die gegen Ende des Testes fast zum Erliegen kommt.

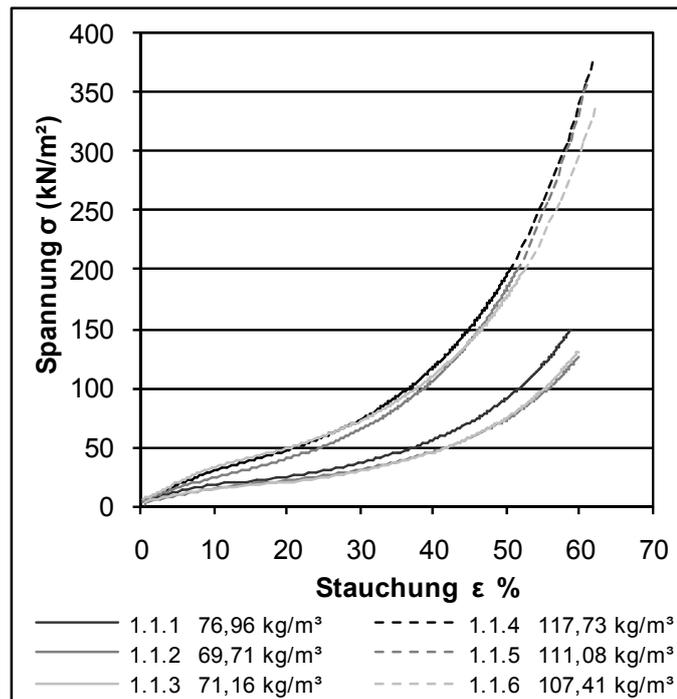


Abbildung 4-1: Spannungs-Stauchungsdiagramm Kleinballen flach liegend ohne seitliche Einspannung

Das Spannungs-Stauchungsdiagramm (Abbildung 4-1) zeigt die ermittelten Kennlinien über den gesamten Messbereich. Deutlich ist die Ähnlichkeit der Kurven eines Dichtebereiches untereinander aber auch zwischen den beiden Dichtebereichen zu erkennen. Auffällig ist, dass die Kurven bei den dichten Ballen deutlich steiler, der Elastizitätsmodul also höher ist als bei den lockeren Ballen.

Bei den dichten Ballen ist zunächst bis ca. 25 kN/m² ein annähernd lineares Verhalten erkennbar. Über diesen Bereich hinaus gewinnen die Proben bis zum Ende des gemessenen Bereiches zunehmend an Steifigkeit.

Bei den lockeren Ballen ist es schwer einen linearen Bereich zu erkennen. Die Steifigkeit nimmt deutlich langsamer zu als bei den dichten Ballen.

Für das Bauen mit Strohballen ist nicht der gesamte Teil des erstellten Kennlinienfeldes relevant. Daher wird in Abbildung 4-2 der relevante Ausschnitt dargestellt.

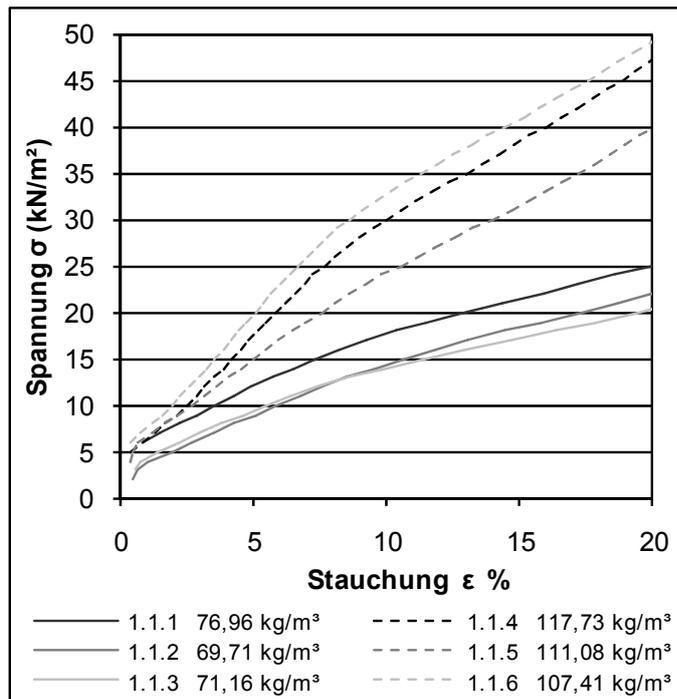


Abbildung 4-2: Spannungs-Stauchungsdiagramm Kleinballen flach liegend ohne seitliche Einspannung (Ausschnitt)

Bei der Betrachtung des Ausschnittes wird deutlich, dass der linear-elastische Bereich nicht im Nullpunkt des Koordinatensystems beginnt, sondern ihm ein „Aussteifen“ der Ballen voran geht. Dass die einzelnen Kennlinien nicht im Koordinatenursprung beginnen, resultiert aus der beschriebenen Anfangskraft von 1,7 kN.

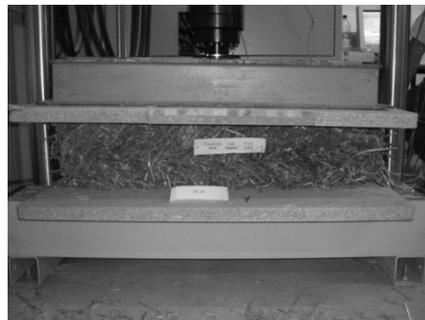


Abbildung 4-3: Ballen 1.1.5 bei einer Spannung von ca. 130 kN/m²

4.2 Relaxationstests an Einzelballen

Es wurden je drei flach liegende, seitlich eingespannte, unverputzte Weizenballen nach dem unter 2.4.2 beschriebenen Verfahren einem Relaxationstest bei einer Startspannung von 20, 20 und 60 kN/m² unterzogen. Alle Tests fanden im Keller des FEB statt. Tabelle 4-2 listet physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse auf. [2] zeigt alle ermittelten Kennlinien über den gesamten Messbereich, Abbildung Abbildung 4-5 zeigt die gemittelten Kennlinien der bei gleicher Spannung untersuchten Proben.

Tabelle 4-2: Physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse HD-Weizenballen flach liegend mit seitlicher Einspannung.

Probennummer	Abmessungen (m)			u (g/g)	ρ_{tr} (kg/m ³)	σ_{R24} (%)	σ_{R120} (%)	σ_{R480} (%)
	l	b	h					
20 kN/m ² 1.3.3.1	0,813	0,360	0,480	0,146	92,56	81,50	/	70,55
20 kN/m ² 1.3.3.2	0,845	0,360	0,480	0,125	89,22	80,70	/	70,35
20 kN/m ² 1.3.3.3	0,836	0,360	0,480	0,125	89,223	83,000	/	71,23
Ø 20 kN/m²	0,831	0,360	0,480	0,130	90,92	81,73	/	70,71
40 kN/m ² 1.3.1.1	0,803	0,360	0,480	0,130	101,03	78,00	69,50	59,77
40 kN/m ² 1.3.1.2	0,812	0,360	0,480	0,125	90,064	77,000	66,66	46,14
40 kN/m ² 1.3.1.3	0,861	0,360	0,480	0,120	91,83	76,00	64,23	44,83
Ø 40 kN/m²	0,825	0,360	0,480	0,125	94,24	77,00	66,80	50,24
60 kN/m ² 1.3.2.1	0,846	0,360	0,480	0,113	93,436	79,000	/	61,91
60 kN/m ² 1.3.2.2	0,850	0,360	0,480	0,238	86,801	74,000	/	56,73
60 kN/m ² 1.3.2.3	0,832	0,360	0,480	0,121	93,44	74,00	/	58,32
Ø 60 kN/m²	0,843	0,360	0,480	0,155	91,22	77,00	/	58,99

u: Massespezifischer Feuchtegehalt; ρ_{tr} : Trockendichte; σ_{R24} : Restspannung nach 24 Stunden; σ_{R120} : Restspannung nach 120 Stunden; σ_{R480} : Restspannung nach 480 Stunden; Ø Mittelwert aus den betreffenden Werten

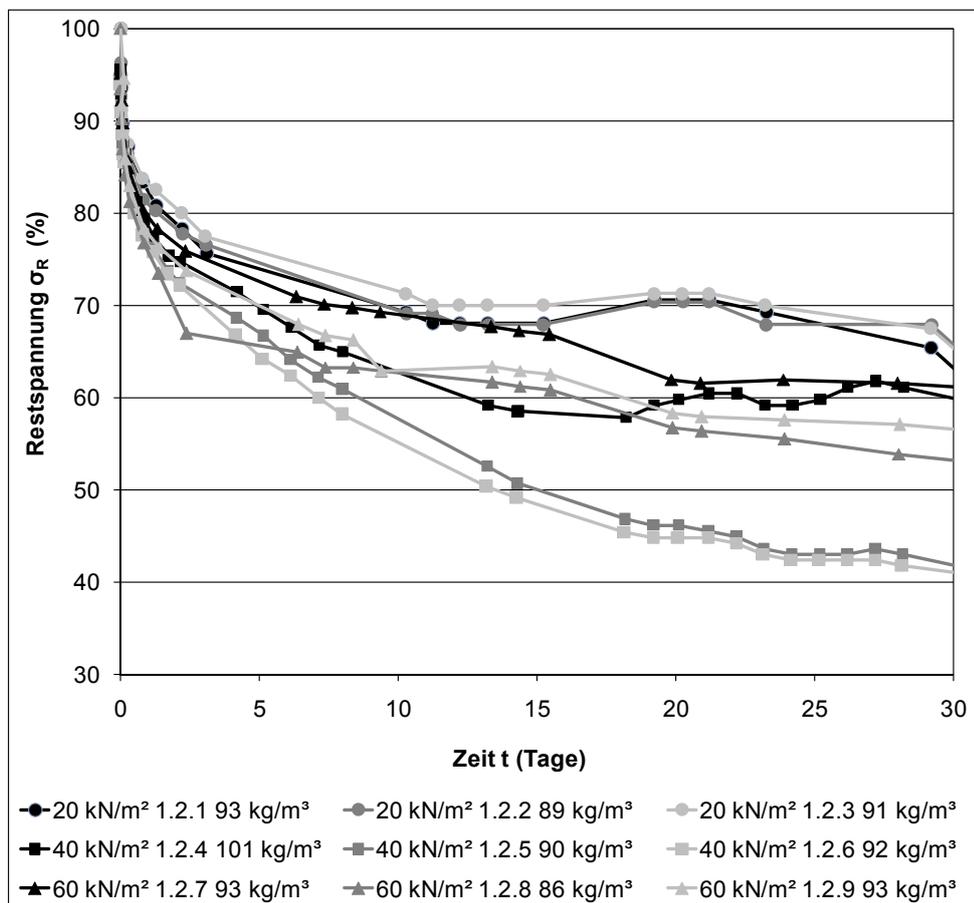


Abbildung 4-4: Relaxationsdiagramm flach liegender HD-Weizenballen mit seitlicher Einspannung $\sigma_s = 20, 40$ und 60 kN/m^2

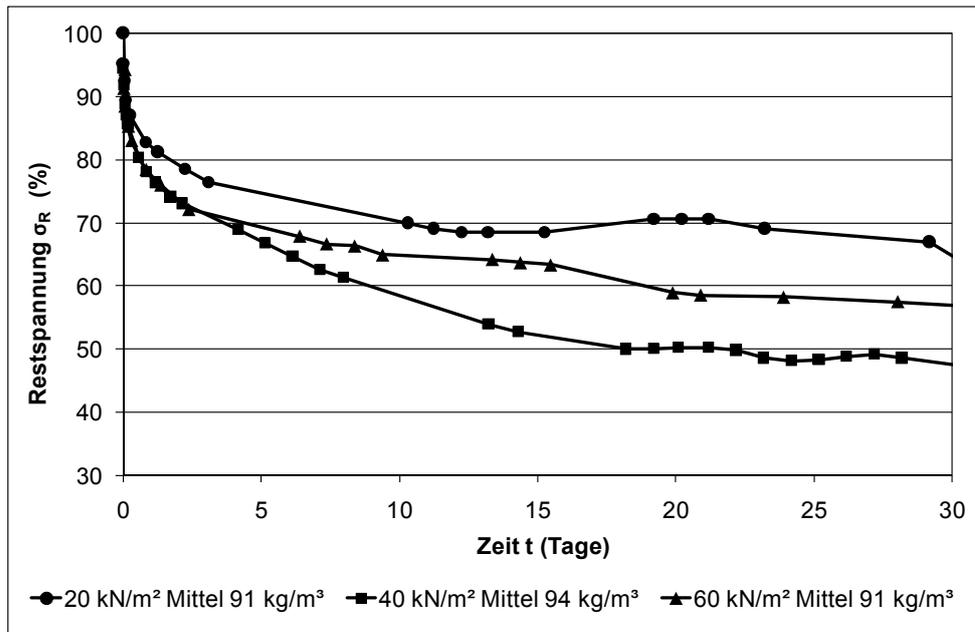


Abbildung 4-5: Relaxationsverhalten flach liegender HD-Weizenballen in Abhängigkeit von der Startspannung

[2] zeigt dass anhand der durchgeführten Tests keine eindeutige Tendenz zur Abhängigkeit des Relaxationsverhaltens von der Startspannung festgestellt werden konnte. Im Bereich 40 und 60 kN/m² weisen die hochkant liegenden Probengruppen eine höhere Restspannung auf, im Bereich 10 und 20 kN/m² die flach liegenden.

Dass die Restspannung mit zunehmender Startspannung zunächst sinkt scheint evident: Eine höhere Startspannung induziert eine höhere Relaxation (die 20 kN/m²-Kennlinie liegt über der 40 kN/m²-Kennlinie). Das Abnehmen der Relaxation bei weiter steigenden Dichten kann mit der zunehmenden Anfangsstauchung erklärt werden. Ab einem gewissen Punkt ist der Ballen so stark (vor) komprimiert, dass die Relaxation geringer wird (die 60 kN/m²-Kennlinie liegt über der 40 kN/m²-Kennlinie).

4.3 Relaxationstest an Einzelballen mit Simulation eines Garnauffalls bzw. eines Wasserschadens

Es wurde je ein Relaxationstest an flach liegenden Weizenballen mit Simulation eines Garnauffalls und eines Wasserschadens wie unter 2.4.4 beschrieben getestet. Tabelle 4-2 listet physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse auf. [2] zeigt die ermittelten Kennlinien.

Tabelle 4-3: Physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse HD-Weizenballen flach liegend mit seitlicher Einspannung

Probennummer	Abmessungen (m)			u (g/g)	ρ_{tr} (kg/m ³)	σ_{R24} (%)
	l	b	h			
1.3	0,839	0,480	0,360	0,118	89,47	62,80
1.4	0,852	0,480	0,360	0,140	89,41	64,95

u: Massespezifischer Feuchtegehalt; ρ_{tr} : Trockendichte; σ_{R24} : Restspannung nach 24 Stunden

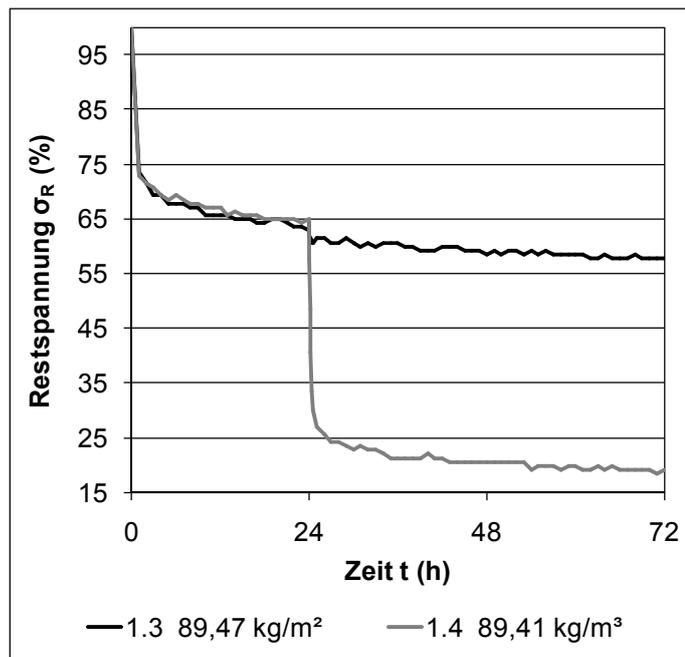


Abbildung 4-6: Einfluss eines Garnaufalls und eines Wasserschadens auf das Relaxationsverhalten flach liegender eingespannter HD-Weizenballen

Wie aus [2] ersichtlich ist, hat der simulierte Garnaufall nur marginalen Einfluss auf das Relaxationsverhalten des Ballens. Die Restspannung sinkt spontan um lediglich 1,43%. Der simulierte Wasserschaden beeinflusst das Relaxationsverhalten jedoch erheblich. Die Spannung bricht spontan auf ca. 25% der Startspannung ein und stabilisiert sich in der Folge auf niedrigem Niveau. Es wird vermutet, dass das krustierte Lignin in den Zellen der Strohhalme unter dem Einfluss des Wassers wieder flexibel wird und der Ballen dadurch elastischer wird und nachgibt

4.4 Kriechtests an Einzelballen

Die Tests zum Kriechverhalten von Einzelballen wurden wie unter 2.4.3 beschrieben an drei flach liegenden HD-Ballen mit seitlicher Einspannung durchgeführt. Tabelle 4-4 listet physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse auf. [2] zeigt die ermittelten Kennlinien über den gesamten Messbereich.

Tabelle 4-4: Physikalische Balleneigenschaften und Stauchungen flach liegender HD-Ballen

Probennummer	Abmessungen (m)			u (g/g)	ρ_{tr} (kg/m ³)	σ (kN/m ²)	ϵ_{K20} (%)	ϵ_{G20} (%)
	l	b	h					
1.5.1	0,80	0,36	0,48	0,12	97,58	60	11,20	34,88
1.5.2	0,80	0,36	0,48	0,12	91,48	60	7,36	35,66
1.5.3	0,81	0,36	0,48	0,13	87,46	60	5,87	36,55
Ø 60 kN/m ³	0,80	0,36	0,48	0,12	92,17	60	7,65	35,99

u: Massespezifischer Feuchtegehalt; ρ_{tr} : Trockendichte; σ : Testspannung; ϵ_{K20} : Kriechstauchung nach 20 Tagen; ϵ_{G20} : Gesamtstauchung nach 20 Tagen; Ø Mittelwert aus den betreffenden Werten.

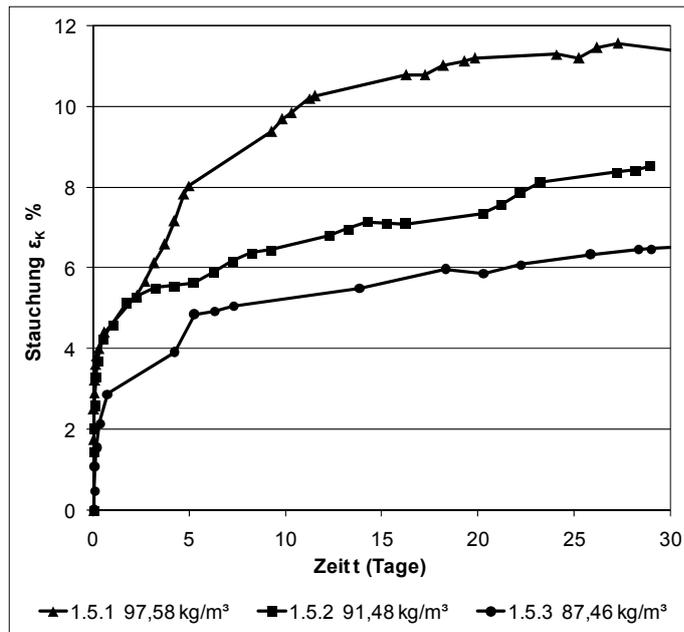


Abbildung 4-7: Kriechverhalten seitlich eingespannter flach liegender HD-Weizenballen bei einer Spannung von 60 kN/m²

Innerhalb des ersten Tages unterliegen die Ballen einer sehr hohen Kriechverformung, die sich im weiteren Verlauf der Messung mehr und mehr abschwächt jedoch nicht zum Erliegen kommt. Abbildung 4-7 kann ebenso entnommen werden, dass die Kriechverformung mit steigender Dichte zunimmt. Jedoch sinkt die Gesamtstauchung mit steigender Dichte (siehe Tabelle 4-4). Weniger dichte Ballen unterliegen also einer höheren Anfangsstauchung, weisen jedoch später eine geringere Kriechverformung auf als dichtere Ballen. Die Annahme, bei dichten weniger dichten Ballen würde die Kriechverformung durch die höhere Anfangsstauchung vorweggenommen, liegt nahe.

4.5 Kriechtest an einem Einzelballen mit Simulation eines Wasserschadens

Unter 4.3 wurde beschrieben, welchen Einfluss ein Wasserschaden auf die Relaxation von verputzten und unverputzten HD-Weizenballen hat. Es wurde festgestellt, dass die Spannung spontan drastisch einbricht. Es stellte sich die Frage, inwieweit sich dieser Spannungsabfall auf das Kriechverhalten auswirkt. Konkret ging es um die Frage, ob die Standsicherheit lasttragender Strohballenkonstruktionen im Fall eines Wasserschadens gefährdet ist.

Dazu wurde in [2] der unter 2.4.4 beschriebene Test entwickelt, bei dem zunächst eine Spannung von 40 kN/m² aufgebracht wird. Diese Spannung entspricht der Vorkomprimierung einer Wand. Nach dem Aufbringen der Spannung wird die Relaxation über 24 Stunden aufgezeichnet und der Ballen danach 10 cm unter Wasser gesetzt. Daraus resultiert, wie unter 4.3 beschrieben, ein spontanes Absinken der Spannung (Relaxation). Durch den Prüfstand wird eine Last von 20 kN/m² (=50% der Startspannung) simuliert. Sobald die Restspannung unter 20 kN/m² (50%) fällt, beginnt der Ballen zu kriechen. Diese Kriechverformung ist in Abbildung 4-8 dargestellt. Es kommt spontan zu einer Kriechverformung, die sich im weiteren Verlauf des Tests mehr und mehr abschwächt und 28 Stunden nach dem Zugeben des Wassers etwa 0,8% beträgt. Dieses Ergebnis legt den Schluss nahe, dass aus einem Wasserschaden kein spontanes Versagen einer Last tragenden Konstruktion aus Strohballen resultiert.

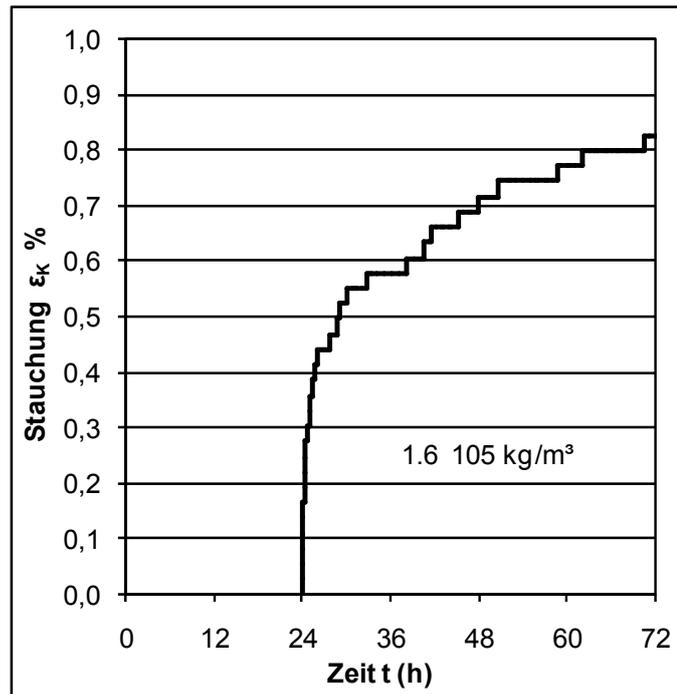


Abbildung 4-8: Kriechverformung flach und hochkant liegender seitlich eingespannter HD-Weizenballen unter Wassereinfluss

4.6 Tests zum elasto-mechanischen Verhalten von unverputzten und verputzten Strohballenwänden

Es wurde je ein Spannungs-Stauchungstest und je ein Relaxationstest an einer verputzten und einer unverputzten Wand aus flach liegenden acht Testreihen an Wänden durchgeführt. Relevante Werte sind in Tabelle 4-5 dargestellt.

Tabelle 4-5: Kennwerte zum elasto-mechanischen Verhalten der untersuchten Wände

Wandtest Nr.	Ballen-lagen	Höhe unbelastet (m)	ρ_{tr} (kg/m ³)	ϵ_{40} (%)	E-Modul (kN/m ²)	ϵ_p (%)	σ_{R24} (%)	σ_{R480} (%)
unverputzt	7	2,46	95	9,1	417	-0,8	72,2	53,6
verputzt	6	2,17	104	0,02	265900	0,00	89,4	34,4

ρ_{tr} : Durchschnittliche Trockendichte. Da die relative Luftfeuchte und Temperatur der Ballen verfügbar sind, wurde die Trockendichte mit dem durchschnittlichen Feuchtegehalt von 0,128 aller gemessenen Weizenballen berechnet; ϵ_{40} : Stauchung bei einer Spannung von 40 kN/m²; ϵ_p : Nullpunktverschiebung; σ_{R24} : Restspannung nach 24 Stunden; σ_{R480} : Restspannung nach 480 Stunden;

4.6.1 Zum Spannungs-Stauchungsverhalten der untersuchten Wandkonstruktionen

[2] zeigt das Spannungs-Stauchungsverhalten der untersuchten Wände. Die fast senkrecht verlaufende Kennlinie gehört zu der verputzten Strohballenwand. Sie wies einen Elastizitätsmodul von über 2 GN/m² auf und wurde bei einer Spannung von 40 kN/m² um 0,314 mm gestaucht. Hier muss kritisch angemerkt werden, dass die verwendeten Wegaufnehmer für so kleine Wege nicht ausgelegt sind. Es kann jedoch festgestellt werden, dass die Verformung der Wand bei 40 kN/m² ohne Hilfsmittel

nicht wahrnehmbar war und dass der Putz nicht brach, also kein Versagen der Wand eintrat. Die Ergebnisse der Tests an verputzten Wänden von [3], der Elastizitätsmodule zwischen 29 und 89 MN/m² registrierte, legen den Schluss nahe, dass die in dieser Dissertation verwendeten Wegnehmer für die kleinen Stauchungen bei verputzten Wänden tatsächlich ungeeignet waren.

Die Spannungs- Stauchungskennlinie der unverputzten Wand weist über weite Bereiche einen fast linearen Verlauf auf. Sie wurde bei einer Spannung von 40 kN/m² um 9,1% gestaucht und wies ein Elastizitätsmodul von 417 kN/m² auf. Die Ergebnisse dieses Tests korrespondieren mit denen von [4], der bei Wänden aus flach liegenden Strohballen bei Spannungen um 34 kN/m² Stauchungen von 7-8% dokumentierte.

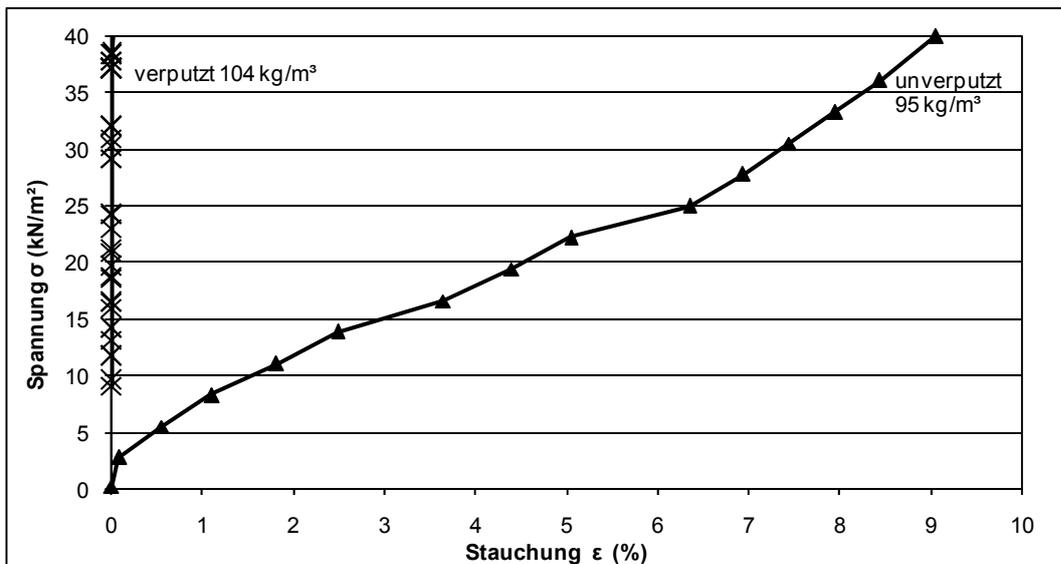


Abbildung 4-9: Spannungs-Stauchungskennlinien der untersuchten Wände

4.6.2 Zum Relaxationsverhalten der untersuchten Wandkonstruktionen

[2] zeigt das Relaxationsverhalten der untersuchten Wände bei einer Startspannung von 40 kN/m². Besonders die Kennlinie der verputzten Wand weist hohe Schwankungen auf. Dies wird auf klimatische Einflüsse zurückgeführt. Alle Tests fanden im Außenklima statt. Ob das Klima die Messtechnik oder das Verhalten der Wand selbst beeinflusste, konnte nicht untersucht werden. Die Kennlinie der verputzten Wand liegt aufgrund einer Fehlfunktion des Datenloggers nur unvollständig vor. Es fällt auf, dass die verputzte Wand einer höheren Relaxation unterliegt als die unverputzte.

Der Grund für die Relaxationstests war die Ermittlung einer Vorspannung, die durch Relaxation nicht unter den Wert der Maximalspannung im späteren Belastungsfall fällt.

Unter der Prämisse, dass die Wände nach dem Vorspannen verputzt werden, wird aufgrund der vorliegenden Ergebnisse folgende Vorspannung für Maximalspannungen um 40 kN/m² empfohlen:

Für Strohballenwände aus flach liegenden Strohballen:

$$\sigma_v = \sigma_{\max} \cdot 2$$

Dabei ist: σ_v : Vorspannung (kN/m²)

σ_{\max} : Maximalspannung im Belastungsfall (kN/m²)

Für die Praxis stellt es sich praktikabler dar, anstatt einer Vorspannung eine Vorkomprimierung anzugeben. Für eine Maximalspannung im Belastungsfall von 20 kN/m² ergibt sich aus dem Spannungs-Stauchungstest der unverputzten Wand und der oben genannten Empfehlungen für Wände aus flach liegenden Ballen eine Vorkompression von 12,01% Wandhöhe (entsprechend einer Vorspannung von ca. 40 kN/m² bei Wänden aus flach liegenden Strohballen).

Für Wände aus flach liegenden HD-Weizenballen ab einer Trockendichte von 92 kg/m³ wird vorgeschlagen:

$$\varepsilon_v = h_0 \cdot 14\%$$

Dabei ist:

ε_v : Vorkomprimierung (m)

h_0 : Ausgangshöhe der Wand (m)

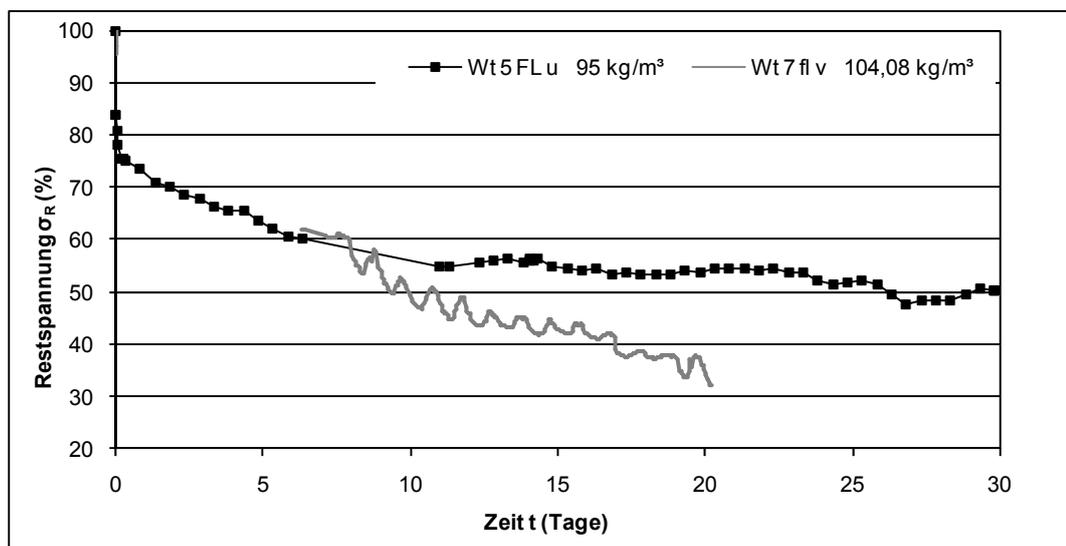


Abbildung 4-10: Relaxationskennlinien der untersuchten Strohballenwände

5 Ansätze zum Nachweis Last- bzw. selbsttragender Konstruktionen

Grundsätzlich können zwei Ansätze für den Standsicherheitsnachweis unterschieden werden.

Der in Amerika praktizierte Ansatz betrachtet eine Strohballenwand als Sandwichkonstruktion aus den Putzschichten als beidseitige harte Schale und den Strohballen als weichen Kern, der eine Verbindung zwischen den Schalen herstellt und sie so stabilisiert. Folglich wird in [5] S. 248 ff die Tragfähigkeit von Wänden aus Strohballen in Abhängigkeit von der Putzart angegeben. Je belastbarer der Putz, umso belastbarer die Wand. Dabei spielt der Abstand zwischen den Putzschalen, also die Dicke der Strohballen und deren Orientierung keine Rolle. Es ist daher sinnvoll, die Tragfähigkeit so beurteilter Wände nicht mit einer Maximalspannung (kN/m²) sondern mit einer maximalen Linienlast (kN/m) anzugeben.

Wie in 4.6.2 dargestellt, unterlag die verputzte Strohballenwand einer höheren Relaxation als die unverputzte. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass es aufgrund des höheren E-Moduls der verputzten Wände selbst dann nicht zu einem relevanten Kriechen kommt, wenn die Restspannung durch die Relaxation unter die durch die Auflast aktuell induzierte Spannung fällt. Die Relaxation kann bei dem Ansatz den Putz als tragendes Element mit zu berücksichtigen folglich vernachlässigt werden.

Dementsprechend spielt bei solchen Systemen auch die Vorspannung eine untergeordnete Rolle. In [5] wird festgelegt, dass die Vorspannung mindestens der späteren Maximallast entsprechen muss. Eine Vorspannung kann entfallen, wenn das fertige Dach mindestens 28 Tage auf der Wand aufliegt, bevor diese verputzt wird. Die Relaxation wird hier also nicht berücksichtigt.

Der Nachweisansatz welcher diesem Projekt zugrunde liegt, blendet die Wirkung des Putzes aus, da Putze in der deutschen Baupraxis nicht als lasttragende Elemente vorgesehen sind.

Ohne die Wirkung des Putzes gewinnen Vorspannung und Relaxation an Relevanz, da ein nicht zu vernachlässigendes Kriechen zu erwarten ist, sobald die Vorspannung durch die Relaxation unter die tatsächliche Spannung fällt. Die Vorspannung muss also so gewählt werden, dass sie im Betrieb des Gebäudes nicht unter die tatsächliche Spannung fällt. Die Tragfähigkeit solchermaßen beurteilter Wände wird sinnvoller Weise als Maximalspannung in kN/m^2 angegeben.

Ihren Merkmalen entsprechend können die Nachweisansätze *Nachweis über den Putz* und *Nachweis über die Vorspannung* genannt werden.

5.1 Nachweis über den Putz

In dem in [5] abgedruckten Entwurf für das den Anhang *Straw Bale Construction* des *California Building Code* wird für Lehmverputzte Wände eine maximal zulässige Tragfähigkeit von $4,37 \text{ kN/m}$ angegeben.

Im Rahmen dieses Projektes wurde eine Wand wie oben beschrieben bis auf 40 kN/m^2 , entsprechend $19,2 \text{ kN/m}$ belastet. Es wird die Beaufschlagung dieses Wertes mit einem Sicherheitsbeiwert von 2,0 vorgeschlagen. Damit ergibt sich eine maximale Linienlast von $9,6 \text{ kN/m}$.

Wird von einem Gebäude ausgegangen, bei welchem das Dach auf den Traufseiten und einer Mittelwand aufliegt, ergibt sich nach dem California Code eine maximale Spannweite (von Außenwand zu Mittelwand) von $1,23 \text{ m}$, nach den im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Tests eine maximale Spannweite von $3,42 \text{ m}$.

Dabei wurden folgende Annahmen zugrunde gelegt: Dachüberstand traufseitig: $0,5 \text{ m}$, Flächenlast Dachüberstand inkl. Schneelast: $1,91 \text{ kN/m}^2$, Flächenlast Dach über Innenraum inkl. Schneelast: $3,18 \text{ kN/m}^2$

5.2 Nachweis über Vorspannung

Im Rahmen dieses Projektes wurden unverputzte Kleinballen bis über 300 kN/m^2 belastet ohne dass ein klassisches Bauteilversagen eintrat. Des Weiteren wurde eine Wand aus Strohballen bis 40 kN/m^2 belastet ohne dass ein Versagen eintrat. Wie oben beschrieben muss bei dieser Spannung mit einem Spannungsabbau von 50% gerechnet werden. Es verbleibt eine nutzbare Spannung von 20 kN/m^2 entsprechend einer Linienlast von $9,6 \text{ kN/m}$. Von der Beaufschlagung mit einem Sicherheitsbeiwert wird abgesehen, da durch das Aufbringen der Vorspannung bewiesen wurde, dass die Wand der 2-Fachen Maximalspannung stand hält.

Wird von einem Gebäude ausgegangen, bei welchem das Dach auf den Traufseiten und einer Mittelwand aufliegt, ergibt sich maximale Spannweite (von Außenwand zu Mittelwand) von 3,42 m. Dabei wurden folgende Annahmen zugrunde gelegt: Dachüberstand traufseitig: 0,5 m, Flächenlast Dachüberstand inkl. Schneelast: 1,91 kN/m², Flächenlast Dach über Innenraum inkl. Schneelast: 3,18 kN/m²

6 Schlussfolgerungen

Es konnte gezeigt werden, dass für lasttragende Strohballenkonstruktionen statische Nachweise geführt werden können. Bei den gewählten Dachlasten sind die möglichen Spannweiten jedoch gering. Bei Anwendung des Verfahrens *Nachweis über den Putz* kann der Anwendungsbereich lasttragender Strohballenkonstruktionen durch eine Verstärkung des Putzes erreicht werden (andere Materialien, Armierungen). Jedoch stellt sich hier die Frage, inwieweit in diesem Fall noch von lasttragendem Strohballenbau gesprochen werden kann. Als weitere Möglichkeit die zulässige Linienlast zu erhöhen sei die Reduzierung des Sicherheitsbeiwertes genannt.

Bei Anwendung des Verfahrens *Nachweis über die Vorspannung* kann der Anwendungsbereich durch eine Erhöhung der Vorspannung oder durch breitere Wände vergrößert werden. Ungelöst bleibt jedoch die Frage, wie Vorspannungen in der geforderten Größenordnung auf der Baustelle effizient aufgebracht werden sollen

7 Literatur

- [2] B. Krick, *Untersuchung von Strohballen und Strohballenkonstruktionen hinsichtlich ihrer Anwendung für ein energiesparendes Bauen unter besonderer Berücksichtigung der lasttragenden Bauweise*, Dissertation an der Universität Kassel: Kassel University Press, 2008.
- [3] M. F. Grandsaert, *A Compression Test of Plastered Straw-Bale Walls*, University at Boulder, USA, 1999.
- [4] G. Bou-Ali, *Straw bales and Straw bale wall systems*, University of Arisona, USA, 1993
- [5] B. King, *Design of Straw Bale Buildings, The State of the Art*, Green Building Press, San Rafael, CA, USA, 2006
- [6] M. Minke/ F. Mahlke, *Der Strohballenbau, ein Konstruktionshandbuch*, ÖkobuchVerlag, Staufen, 2004

A 3 Gebäudetypp

1 Zusammenfassung

Auf Basis der Ergebnisse durchgeführten Arbeiten in Magdeburg und Kassel wurden zwei lasttragende Gebäudetyppen statisch beurteilt. Eines aus Kleinballen und eines aus Großballen. (Detaillierte Aufstellung siehe Anhang Projektteil A3). Dabei konnte das lasttragende Gebäude aus Kleinballen auf Basis der durchgeführten Untersuchungen nicht als standsicher nachgewiesen werden. Aufgrund gewählter Bauteilaufbauten und Spannweiten und Öffnungsverteilung ergaben sich

Maximalspannungen über dem zulässigen Bereich. Der Haustyp ließe sich durch weitere Last- und Spannweitenreduktion in den zulässigen Bereich bringen. Sinnvoller als jedoch das ohnehin schon sehr reduzierte Gebäude zu beschneiden sind weitere Belastungstests, die gezielt an Prüfnormen und die jeweiligen Anforderungen angepasst werden.

Das lasttragende Großballengebäude hingegen wurde im Zuge der statischen Nachweisarbeit hinsichtlich Öffnungsanteil, Lastannahmen und Spannweiten mehrfach modifiziert, sodass zulässige Maximalspannungen, Schlankheiten und Randbedingungen im Sinne eines Gebrauchstauglichkeitsnachweises eingehalten werden.

B Hygrothermische Eigenschaften von Strohballen und Strohballenbauteilen

B 1 Voruntersuchungen durch das Zentrum für Umweltbewusstes Bauen in Kassel

Zentrum für Umweltbewusstes Bauen e.V. (ZUB)
an der Universität Kassel
Gottschalkstr. 28a, D- 34127 Kassel
Tel. 0561-804 3189
Dr.-Ing. Frank Otto, Dipl.- Ing. Marc Klatecki



1 Einleitung

Die vorliegende Forschungsarbeit befasst sich mit dem hygrothermischen und biohygrothermischen Verhalten von Bauteilen aus Strohballen.

Auf der Grundlage hygrothermischer Simulationsberechnungen wird der Feuchteschutz ausgewählter Bauteile bewertet.

Ziel der Arbeit ist die Lokalisierung von Bauteilen mit ausreichendem Feuchteschutz und Bewertung von Wand-, Decken- und Dachkonstruktionen sowie die Klärung einer möglichen Schimmelpilzgefährdung an ausgewählten Punkten innerhalb der Konstruktionen.

Die Arbeit beinhaltet eine Literaturrecherche zur Einbeziehung vorliegender Untersuchungsergebnisse über den Feuchteschutz von Konstruktionen und zur Vervollständigung der Materialkenngrößen in der Datenbank des verwendeten Simulationsprogramms, um Simulationsrechnungen durchführen zu können.

2 Physikalische Grundlagen

2.1 Relative Luftfeuchte

Luft kann abhängig von ihrer Temperatur und dem herrschenden Gesamtdruck nur eine begrenzte Menge Wasser in Form von Dampf aufnehmen. Die Wasserdampfkonzentration in der Luft wird mit c , die maximal mögliche Konzentration mit c_s gekennzeichnet und in g/m^3 oder kg/m^3 angegeben. In Tabelle 2.1 ist die maximale Konzentration in Abhängigkeit von der Lufttemperatur angegeben.

Tabelle 2-1: Wasserdampfkonzentration in der Luft im Sättigungszustand in Abhängigkeit von der Temperatur [1]

θ [°C]	c_s [g/m ³]	θ [°C]	c_s [g/m ³]	θ [°C]	c_s [g/m ³]
-15	1,39	± 0	4,85	+ 15	12,8
-14	1,52	+ 1	5,20	+ 16	13,7
-13	1,65	+ 2	5,57	+ 17	14,5
-12	1,80	+ 3	5,95	+ 18	15,4
-11	1,96	+ 4	6,36	+ 19	16,3
-10	2,14	± 5	6,79	+ 20	17,3
- 9	2,33	+ 6	7,25	+ 21	18,3
- 8	2,53	+ 7	7,74	+ 22	19,4
- 7	2,75	+ 8	8,26	+ 23	20,6
- 6	2,98	+ 9	8,81	+ 24	21,8
- 5	3,23	+10	9,39	+ 25	23,0
- 4	3,50	+11	10,0	+ 26	24,4
- 3	3,81	+12	10,7	+ 27	25,8
- 2	4,14	+13	11,3	+ 28	27,2
- 1	4,49	+14	12,1	+ 29	28,8

Es ist allgemein üblich, die Luftfeuchtigkeit als relative Luftfeuchte ϕ anzugeben. Dieser Wert wird üblicherweise in Prozent angegeben und beschreibt das Verhältnis aus vorhandener Wasserdampfkonzentration c zur maximal möglichen c_s [1].

Zur Ermittlung der Wasserdampfmenge wird im Allgemeinen der Wasserdampfpartialdruck verwendet. Aufgrund der Anwendbarkeit der "idealen Gasgleichung" (1) besteht eine Proportionalität zwischen der Wasserdampfkonzentration c und dem Wasserdampfpartialdruck p . Aus diesem Zusammenhang lässt sich die Gleichung (2) ableiten.

$$p = c \cdot R_D \cdot T \quad (1)$$

Mit:

R_D [J/(kg·K)] Gaskonstante für Wasserdampf

c [kg/m³] Wasserdampfkonzentration

T [K] Temperatur

$$\phi = \frac{p}{p_s} \quad (2)$$

Durch Umformung von Gleichung (2) kann der Wasserdampfpartialdruck in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte und vom Wasserdampf-sättigungsdruck berechnet werden (3).

$$p = \phi \cdot p_s \quad (3)$$

Mit:

p_s [Pa] Wasserdampf-sättigungsdruck

ϕ [-] relative Luftfeuchte

Der Wasserdampf-sättigungsdruck ergibt sich gemäß [1] zu:

$$p_s = a \cdot \left(b + \frac{\theta}{100}\right)^n \quad (4)$$

Mit:

θ [°C] Temperatur

Die Parameter a, b und n sind in der Tabelle 2.2 angegeben.

Tabelle 2-2: Werte der Konstanten a, b, und n angegeben für verschiedene Temperaturbereiche [2]

Konstante	Temperaturbereich für	
	$0^\circ\text{C} \leq \theta \leq 30^\circ\text{C}$	$-20^\circ\text{C} \leq \theta < 0^\circ\text{C}$
a	288,68	4,689
b	1,098	1,486
n	8,02	12,30

In Bild 2.1 wird der Wasserdampfgehalt der Luft in Abhängigkeit von der Temperatur und der relativen Luftfeuchte dargestellt (sog. Carrier-Diagramm).

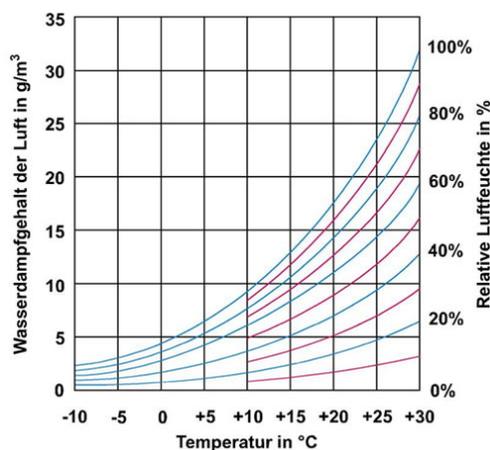


Bild 2-1: Carrier Diagramm [1]

2.2 Baustofffeuchte

Die in einem Baustoff enthaltene Wassermenge (auch Feuchte genannt) kann entweder als volumenbezogener Wassergehalt u_v oder als massebezogener Wassergehalt u_m angegeben werden [1].

$$u_m = \frac{m_W}{m_M} = \frac{\rho_W \cdot V_W}{\rho_M \cdot V_M} \quad (5)$$

$$u_v = \frac{V_W}{V_M} \quad (6)$$

Beide Wassergehalte sind dimensionslos und werden in der Regel in Prozent angegeben. Mit den Rohdichten des Wassers ρ_W und des trockenen Baustoffs ρ_M gilt folgende Beziehung:

$$u_m = \frac{\rho_W}{\rho_M} \cdot u_v \quad (7)$$

Man unterscheidet hygroskopische und nicht hygroskopische Baustoffe. Ein trockener hygroskopischer Baustoff nimmt solange Wasserdampf aus der Luft auf, bis er einen Ausgleichszustand bei der jeweiligen Umgebungsbedingung erreicht hat. Da die Wasserdampfsorption in erster Linie von der umgebenden relativen Luftfeuchte abhängt, wird die hygroskopische Feuchtespeicherung von Baustoffen in Form von Sorptionskurven dargestellt [3]. Der geringe Einfluss der Temperatur auf die Materialspeicherfähigkeit wird vernachlässigt. Die Materialeigenschaften werden bei konstanter Temperatur ermittelt. Deshalb wird die Abhängigkeit der Materialfeuchte von der relativer Luftfeuchte auch als Sorptionsisotherme bezeichnet.

Bei der Speicherung von Feuchte bzw. Wasser in einem porösen, hygroskopischen Baustoff unterscheidet man zwischen drei Wassergehaltsbereichen:

- hygroskopischer Bereich
- Kapillarkondensationsbereich
- Übersättigungsbereich

Die zu den drei Wassergehaltsbereichen zugehörigen Speichermechanismen werden in Bild 2.2 dargestellt:

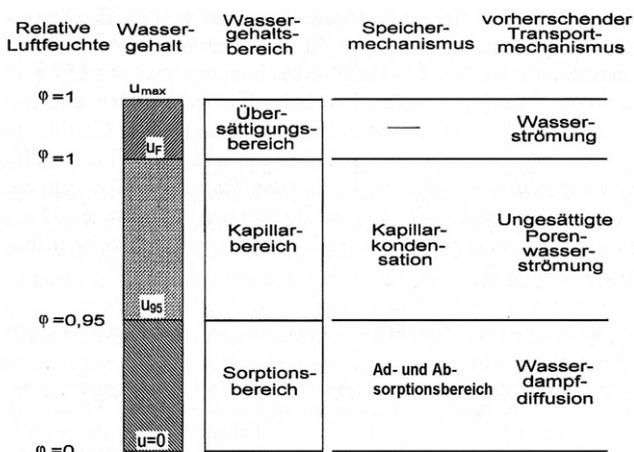


Bild 2-2: Wassergehaltsbereiche in einem porösen, hygroskopischen Baustoff [1]

In Bild 2-3 sind die Verläufe von Sorptionsisothermen für drei in ihrer Hygroskopizität sehr unterschiedliche Baustoffe dargestellt.

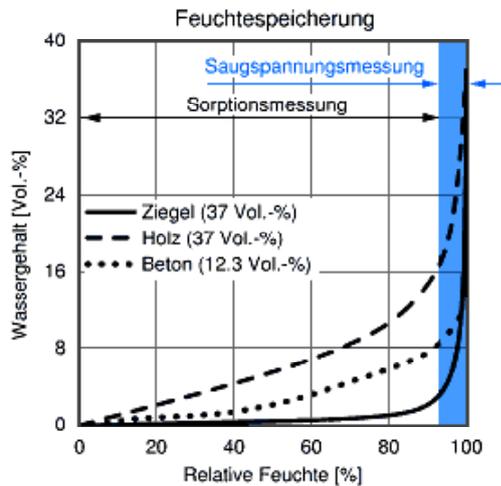


Bild 2-3: Feuchtespeicherfunktionen verschiedener Materialien [3]

Die Feuchtespeicherfunktion wird durch Lagerung der Baustoffproben bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen im Labor bestimmt. Bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von ca. 95% ist die obere Grenze des Verfahrens erreicht, da eine höhere Luftfeuchte aufgrund der unvermeidbaren Regelungsschwankungen in den Klimakammern zu einer Tauwasserbildung auf den Proben führen würde. Bei höheren relativen Luftfeuchten bis zur freien Wassersättigung, im sog. überhygroskopischen Bereich, wird deshalb die Saugspannungsmessung angewendet. Hier werden die Baustoffproben zunächst durch Wasserlagerung frei, d.h. drucklos gesättigt. Im Anschluss daran wird das Wasser in mehreren Druckstufen bis max. 100 Bar entfernt. Dabei stellt sich bei jeder Druckstufe ein definierter Wassergehalt ein. Die Saugspannungsmessung ergibt den Wassergehalt im überhygroskopischen Bereich (dargestellt im blau hinterlegten Bereich in Bild 2-3), der nahtlos an die Sorptionsisotherme anschließt. Im Falle von grobporigen, mineralischen Baustoffen ist der überhygroskopische Wassergehaltsbereich größer als der hygroskopische. Für genaue Analysen kann deshalb auf Saugspannungsmessungen nicht verzichtet werden. Im Falle von feinporigen Materialien, wie z.B. Beton, ist die Sorptionsfeuchte bei 93% r.F. bereits so hoch, dass der Verlauf im überhygroskopischen Bereich bis zur freien Wassersättigung ohne Genauigkeitsverlust extrapolierbar ist. Auch bei Holz und Holzwerkstoffen reicht eine Extrapolation bis zur freien Wassersättigung in der Regel aus.

Nicht hygroskopische Baustoffe lagern ohne Taupunkttemperaturunterschreitung kein Wasser ein. Bei Umgebungsbedingungen unter 100% relativer Luftfeuchte trocknen sie vollständig aus [3].

Definition charakteristischer Feuchtwerte in Baustoffen:

u_{\max} : maximaler Wassergehalt.

Entspricht der Sättigung aller dem Wasser zugänglichen Hohlräume.

u_{kr} : kritischer Wassergehalt.

Beschreibt die Grenze, ab der die Leistungsfähigkeit für Flüssigwassertransport in einem trocknenden Baustoff so weit abgesunken ist, dass eine Wasserverdunstung an der Oberfläche nicht mehr befriedigt werden kann. Ab diesem Punkt sinkt die Baustofffeuchte in Oberflächennähe in kurzer Zeit stark ab und die Verdunstung geht stark zurück [1].

Bei zunehmender Durchfeuchtung eines porösen Stoffes können sechs verschiedene Stadien unterschieden werden. Diese werden nachfolgend in Bild 2-4 dargestellt.

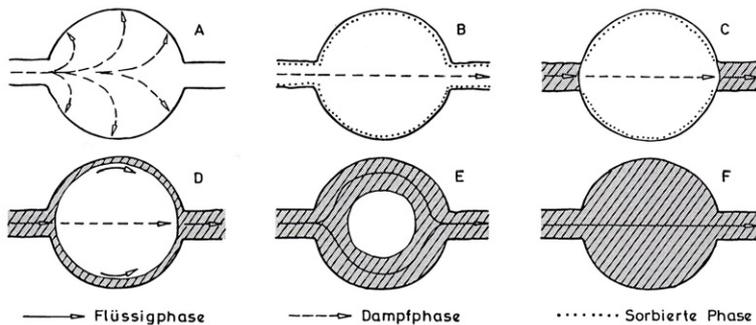


Bild 2-4: Wassertransport und -speicherung in porösen Baustoffen [1]

Bei trockenen Baustoffen, Stadium A, wird der gesamte in die Poren eindringende Wasserdampf an den Wänden absorbiert.

Ist der Porenraum dann durchgehend mit einer oder mehreren Molekülschichten benetzt, kann ab diesem Zeitpunkt Wasserdampf durch die Poren diffundieren, Stadium B.

Bei Stadium C sind die Porenengpässe durch einsetzende Kapillarkondensation mit flüssigem Wasser gefüllt. In den größeren Poren ist allerdings die Sorbatschicht auf den Wandungen noch so dünn, dass ein Transport innerhalb des Porenraumes nach wie vor nur durch Diffusion erfolgt.

Im Stadium D ist die Dicke der Sorbatschicht durch nachströmenden Wasserdampf soweit angewachsen, dass in ihr neben der Wasserdampfdiffusion ein Flüssigwassertransport nennenswerten Ausmaßes stattfindet (Oberflächendiffusion). Da ab diesem Punkt ein kontinuierlicher Flüssigwassertransport möglich ist, ist die Leistungsfähigkeit für Wassertransport gegenüber den vorhergehenden Stadien deutlich größer.

Stadium E ist dadurch gekennzeichnet, dass bereits soviel Wasser in den Erweiterungen der Poren enthalten ist, dass sich eine wirksame ungesättigte Strömung einstellen kann. Die in der Porenerweiterung enthaltene Luftblase kann als im Wasser frei schwimmend angesehen werden.

Im Stadium F ist der gesamte Porenraum mit flüssigem Wasser gesättigt.

2.3 Feuchtetransportmechanismen

Ein Feuchtetransport in porösen Baustoffen erfolgt im Wesentlichen durch:

- Dampfdiffusion
- Oberflächendiffusion
- Kapillarleitung

In Baustoffen, die kein starres Porengefüge besitzen (z.B. Kunststoffe), findet aufgrund der Anlagerung von Wassermolekülen an die polymeren Makromoleküle darüber hinaus die sog. Lösungsdiffusion statt [3].

Weitere Transportphänomene, wie z.B. die Wanderung von Wassermolekülen durch elektrische Felder, Osmose oder Sickerströmung im nicht wassergesättigten Porenraum, sind bislang nur begrenzt modellierbar. Da sie bei der vorliegenden Fragestellung keine Rolle spielen, bleiben diese Transportphänomene unberücksichtigt.

Nachfolgend soll das Zusammenspiel der o.g. dominierenden Feuchtetransportphänomene anhand einer Zylinderkapillare in einem Wandausschnitt erläutert werden, siehe Bild 2-5.

Auf beiden Seiten der betrachteten Kapillare sollen bauübliche Randbedingungen für den Winterfall herrschen, d.h. der Dampfdruck sei innen höher als außen und die relative Luftfeuchte sei außen höher als innen. Ist der Baustoff ausreichend trocken oder nicht hygroskopisch, findet ausschließlich eine Wasserdampfdiffusion entsprechend dem Dampfdruckgefälle von innen nach außen statt [3].

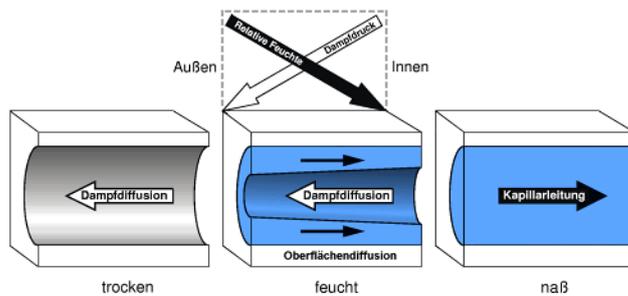


Bild 2-5: Feuchtetransport in einer Zylinderkapillare im Winter bei unterschiedlichen Wassergehalten [3]

Ab einem Schwellwert der hygroskopischen Feuchte im Baustoff (ab ca. 60% relativer Luftfeuchte), kann Wasser im Sorbatfilm entlang der Porenwandung fließen. Dann findet neben der Dampfdiffusion auch die sog. Oberflächendiffusion statt.

Im Sorbatfilm fließt Wasser an der inneren Oberfläche infolge der Oberflächendiffusion entgegen des Wasserdampfdruckgefälles vom höheren Wassergehalt hin zum niedrigeren Wassergehalt. Die treibende Kraft für die Oberflächendiffusion ist daher der Wassergehalt des Stoffs, der abhängig von der relativen Luftfeuchte ist. Bei der Oberflächendiffusion handelt es sich um einen Flüssigkeitstransport und nicht um eine Dampfdiffusion. Es ist allerdings dennoch häufig zweckmäßig, die Oberflächendiffusion der Dampfdiffusion zuzuschlagen. Ein solches Vorgehen führt zu ähnlichen Rechenergebnissen wie die strikte Trennung beider Transportphänomene, wenn in der betrachteten Bauteilschicht keine großen Temperaturgradienten auftreten [3].

Steigt die Feuchte im Material über den hygroskopischen Bereich hinaus, beispielsweise infolge von Schlagregen oder einer Überflutung, kommt es bei hohen Wassergehalten zur sog. Kapillarleitung. Hier ist die treibende Kraft der kapillare Unterdruck, der sich aufgrund der Oberflächenspannung des Wassers im Meniskus an der Grenzfläche zwischen Porenluft, flüssigem Wasser und Porenwandung bildet. Der kapillare Unterdruck ist abhängig vom Porenradius. Über dem Meniskus stellt sich ein Gleichgewicht zwischen Kapillardruck und relativer Luftfeuchte ein. Damit ist es möglich, der treibenden Kraft, in der flüssigen Phase eine definierte relative Luftfeuchte in der Dampfphase zuzuordnen. Deshalb kann alternativ zum kapillaren Unterdruck auch die relative Feuchte als Transportpotential für die Kapillarleitung verwendet werden [3].

Durch das Beispiel wird deutlich, dass die Transportrichtungen von Dampfdiffusion und Flüssigkeitstransport auch gegenläufig gerichtet sein können.

3 Literaturrecherche

3.1 Untersuchungsergebnisse

In einer feuchtetechnischen Untersuchung [4] wird eine mit einem Wetterschutz versehene Strohballenwand rechnerisch untersucht. Diese Wandkonstruktion besteht von außen nach innen aus (Konstruktion 1):

- 30 mm Holzfassade
- 40 mm Luftschicht
- 30 mm Lehmputz
- 460 mm Strohballen
- 30 mm Lehmputz

Ergänzend zu der hygrothermischen Berechnung wird an der kritischen Stelle (8 cm von der äußeren Bauteiloberfläche) eine biohygrothermische Bewertung mit dem Programm WUFI-Bio 2.0 durchgeführt.

Da das Programm keine konvektiven Strömungen berechnen kann, wird ein separater Wetterschutz bei der Simulation nicht berücksichtigt und die Temperatur und die relative Luftfeuchte näherungsweise ohne zeitliche Verzögerung in der Luftschicht hinter der Fassade in Ansatz gebracht [3].

Die Simulation wird für einen Zeitraum von 5 Jahren durchgeführt und als äußere Randbedingungen werden Holzkirchener Klimadaten und als innere Wohnraumverhältnisse mit normaler Feuchtelast herangezogen.

Die Berechnung zeigt, dass sich nur geringe Wassergehalte in der Wandkonstruktion einstellen. Diese schwanken jahreszeitlich im Innenputz zwischen 0,8 und 1,2 Vol.-% und im Außenputz zwischen 1,5 und 3 Vol.-%. Im Strohballenbereich liegen sie knapp unter bis leicht über 1 Vol.-%. Der Grund für diese Wassergehalte ist eine relativ diffusionsoffene Konstruktion und ein wirksamer Schlagregenschutz mit einer diffusionsoffenen vorgehängten Holzfassade.

Im äußeren Bereich des Strohballens ergeben sich im Winter und Frühjahr hohe relative Luftfeuchten bei moderaten Temperaturen. Bei Strohballen muss davon ausgegangen werden, dass, sofern die Strohballen vor dem Einbau nicht gereinigt und sterilisiert werden, ausreichend keimungsfähige Sporen in den Wandaufbau mit eingebracht werden. Durch die Einstufung von Stroh in die Substratgruppe I (biologisch gut verwertbares Substrat), zeigt sich wiederholt ein deutliches Pilzwachstum.

In der feuchtetechnischen Untersuchung [5] werden zwei Wandkonstruktionen betrachtet. Hierbei werden die gleichen Randbedingungen wie in [4] angesetzt. Die Konstruktionen unterscheiden sich jedoch.

Der Aufbau der ersten Konstruktion entspricht der Konstruktion in [4]. Das zweite Bauteil (Konstruktion 2) ist wie folgt, von außen nach innen, aufgebaut:

- 22 mm Lärchenschalung
- 40 mm Luftschicht
- 19 mm Holzweichfaser
- 350 mm Strohballen
- 15 mm OSB (Dichte 595 kg/m³)

- 30 mm Luftschicht
- 12,5 mm Gipskarton

Die Berechnungsergebnisse der zwei Konstruktionen zeigen, dass durch den höheren Diffusionswiderstand der OSB-Platte und durch die außen angebrachte Holzfaserplatte die Temperaturen innerhalb der Konstruktion 2 deutlich höher sind als bei der Konstruktion 1. Hierdurch ergeben sich in der Konstruktion geringere Luftfeuchten und es kommt an der kritischen Stelle (5 cm in dem Strohballe) zu keinem Schimmelpilzwachstum.

Im Auftrag des Österreichischen Ökologieinstituts für angewandte Umweltforschung und dem Arch. DI Johannes Kislinger vom Architekturbüro „AH3“, wird in [6] das Wachstum von Schimmelpilzen auf Stroh und Strohänden untersucht.

An unterschiedlichen Bauteilen werden das hygrothermische Verhalten und das Risiko von Schimmelpilzbildung untersucht. Explizit werden die Randbedingungen, die zu Schimmelpilzwachstum führen, im Labor bestimmt sowie die Abgasung von MVOC (Microbially Volatile Organic Compounds) bei schimmelpilzbefallenen Strohdämmungen und das hygrothermische Verhalten von Bauteilen mit einer Strohballedämmung untersucht.

Bei der experimentellen Untersuchung zur Modellierung des Schimmelpilzwachstums wird eine visuelle Beobachtung des Wachstums vorgenommen. Hierbei stellt sich heraus, dass weder die Substratgruppe 0 noch die Substratgruppe I nach Sedlbauer [7] ohne Modifikation anwendbar ist. Beim Vergleich der Untersuchungsergebnisse des sichtbaren Schimmelpilzwachstum mit Substratgruppe I zeigt sich, dass das Isoplethenmodell Substratgruppe I nach [7] zum Teil geringere Zeiten bis zum Auftreten vom sichtbaren Schimmelpilzwachstum aufweist. Beim Vergleich der Untersuchungsergebnisse mit dem Isoplethenmodell Substratgruppe 0 stimmen die Zeiten zum Teil überein. In den

Bild 3-1 bis 3.3 sind die Ergebnisse der Untersuchung dargestellt.

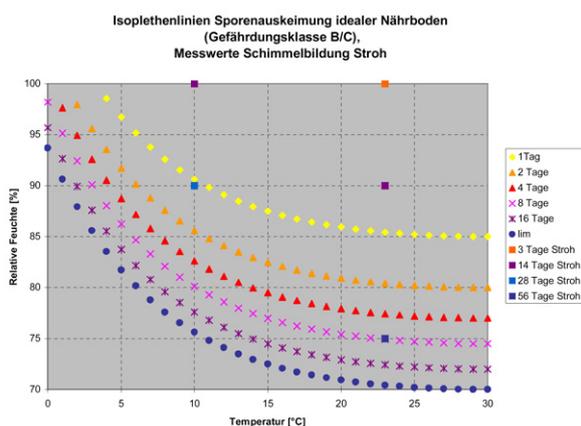


Bild 3-1: Isoplethenlinie der Sporenauskeimung bei idealem Nährboden [7]

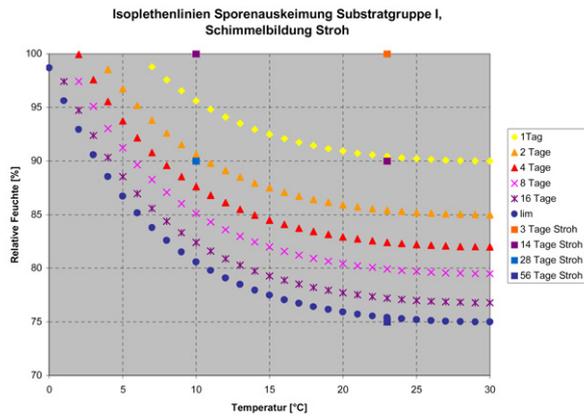


Bild 3-2: Isoplethennlinie der Sporenauskeimung bei Substratgruppe I [7]

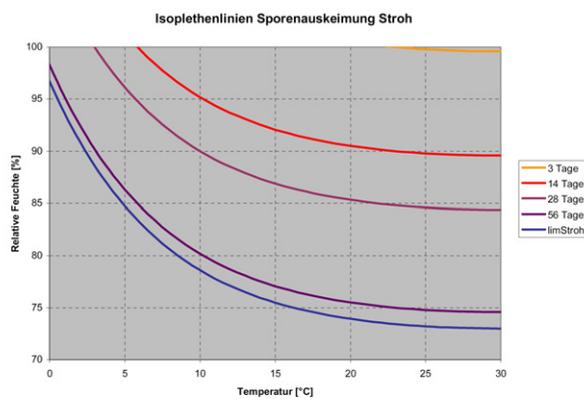


Bild 3-3: Isoplethennlinie der Sporenauskeimung für Stroh [7]

Bei der weitergehenden Untersuchung wird eine hygrothermische Untersuchung an acht Wandaufbauten durchgeführt. In Tabelle 3-1 sind die untersuchten Wandaufbauten mit den übernommenen Beschreibungen aus [6] zusammengestellt.

Tabelle 3-1: Wandaufbauten der untersuchten Konstruktionen aus [6]

Bauteil	Schichtdicke [cm]	Aufbau
1	1,25	Gipskartonplatte
	3,0	Installationsebene, Flachsdämmung
	1,25	OSB-Platte ($\mu = 650$, $\lambda = 0,13$)
	36,0	Stroh/Steher Holz massiv
	1,6	DWD (Holzfaserplatte)
		Hinterlüftung
		Diffusionsoffene Fassadenschalung
2	1,25	Gipskartonplatte
	3,0	Installationsebene, Flachsdämmung
	1,25	OSB-Platte
	36,0	Stroh/Steher Holz massiv ($\mu = 1$)
	1,6	DWD (Holzfaserplatte)
		Hinterlüftung
		Diffusionsoffene Fassadenschalung
3	1,25	Gipskartonplatte
	3,0	Installationsebene, Flachsdämmung
	1,25	OSB-Platte
	36,0	Stroh/Steher Holz massiv
	1,6	DWD (Holzfaserplatte)
		Hinterlüftung
		Diffusionsoffene Fassadenschalung
4	1,5	Lehmputz
	1,8	OSB-Platte ($\mu = 650$, $\lambda = 0,13$)
	35,0	Stroh/Steher Holz massiv
	1,6	DWD (Holzfaserplatte)
		Hinterlüftung
		Diffusionsoffene Fassadenschalung
5	1,5	Gipsfaserplatte
	1,8	OSB-Platte
	35,0	Stroh/Steher Holz massiv
	1,6	DWD (Holzfaserplatte)
		Hinterlüftung
		Diffusionsoffene Fassadenschalung
6	1,5	Lehmputz
	12,0	Kreuzlagenholz
	36,0	Stroh/Steher Holz massiv
	1,6	DWD-Platte (Holzfaserplatte)
		Lehmputz
7	1,5	Lehmputz
	12,0	Kreuzlagenholz
	36,0	Stroh/Steher Holz massiv
	5,0	Holzwoleleichtbauplatte
		Oberputz auf Grundputz
8	1,5	Lehmputz
	5,0	Holzwoleleichtbauplatte
	2,5	OSB-Platte
	49,0	Stroh/Steher Holz massiv
	1,6	DWD-Platte
	1,2	Putzträger Verotec
		Silikatputz

Die materialspezifischen Eigenschaften basieren auf den Eintragungen in der Programmdatenbank oder werden aus Messergebnissen entwickelt. Eine detaillierte Aufstellung aller Materialkenngrößen ist der Tabelle 3-2 zu entnehmen.

Tabelle 3-2: Verwendete Materialdaten in [6]

Baustoff	ρ [kg/m ³]	Ψ [m ³ /m ³]	c_p [J/(kg·K)]	λ [W/(m·K)]	μ [-]
Lehmputz, dreilagig	1514	0,4	850	0,7	11,3
Lehmputz ($\mu = 30$)	1514	0,4	850	0,7	30,0
Kalkputz, einlagig	1600	0,3	850	0,7	7,0
Kalkzementputz	1900	0,24	850	0,8	19,0
Stroh	100	0,9	2000	0,045	1,3
Kalksandstein	1900	0,29	850	1,0	28,0
Weichfaserplatte	528	0,8	2000	0,1	12,0
OSB-Platte	595	0,9	1500	0,13	165,0
Gipskartonplatte	850	0,65	850	0,2	8,3
Holzbauplatte (Fichte)	455	0,73	1500	0,09	130,0
Holzschalung	427	0,66	2500	0,12	188,0
PE-Folie	130	0,001	2300	2,3	sd = 2 m
Unterspannbahn	130	0,001	2300	2,3	sd = 0,2 m
Dachbahn V13	2400	0,001	1000	0,5	sd = 100 m

Bei den Simulationen werden für das Außenklima die klimatischen Bedingungen von Holzkirchen angesetzt, die vergleichsweise strenge klimatische Bedingungen darstellen. Im Innenbereich wird mit einer normalen Feuchtelast simuliert. Die Temperatur schwankt zwischen 21°C im Winter und 23°C im Sommer und die relative Luftfeuchte zwischen 50 % r.F. und 60 % r.F.

Alle Simulationen werden mit Randbedingungen einer verschatteten Südfassade und einen Simulationszeitraum von 2 Jahren durchgeführt.

Alle hinterlüfteten Konstruktionen bieten einen ausreichenden Schutz gegen Schimmelpilzbildung. Die mit Schlagregen belasteten Konstruktionen hingegen nicht. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in der

Tabelle 3-3 zusammengefasst.

Tabelle 3-3: Ergebnisse der hygrothermischen Simulationen aus [6]

Fall	mögliche Schimmelpilzbildung nach		Ort der Schimmelpilz- bildung	Bewertung
	Isoplethenmodell Stroh aus [6]	Isoplethenmodell, idealer Nährboden aus [6]		
1	-	-	-	Schimmelbildung kann bei fachgerechtem Einbau sicher ausgeschlossen werden
1b	-	-	-	
1c	-	-	-	
2	-	bis 16 Tage	Stroh, Grenzschrift außen	Kurzfristige, geringe Schimmelbildung nach Einbau nicht auszuschließen
3	-	-	-	Schimmelbildung kann bei fachgerechtem Einbau sicher ausgeschlossen werden
4	nach 28 Tagen	nach einem Tag	Stroh, Grenzschrift außen	mäßige Schimmelbildung durch Schlagregen, ohne weitere Untersuchungen nicht empfehlenswert
5	nach 28 Tagen	nach zwei Tagen	Stroh, Grenzschrift außen	Schimmelbildung in relevantem Ausmaß, Feuchteakkumulation im Bauteil, ohne weitere Untersuchungen nicht empfehlenswert
6	-	-	-	Schimmelbildung kann bei fachgerechtem Einbau sicher ausgeschlossen werden

3.2 Materialkennwerte

Für die bauaufsichtliche Zulassung von Stroh als Baustoff beim Deutschen Institut für Bautechnik (DiBT) werden am Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. in München verschiedene Untersuchungen durchgeführt [8]. Der Bemessungswert der Strohballenprobe mit einer Rohdichte von 90 kg/m^3 wird zu $0,045 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ bestimmt [10].

In [9] werden weitere Untersuchungen vorgenommen. Dabei werden die Abmessungen und die Beschaffenheit, die Dimensionsstabilität, die Wasserdampfdurchlässigkeit, die Wärmeleitfähigkeit und die Bezugsfeuchte bestimmt. Die Wärmeleitfähigkeit und die diffusionsäquivalente Luftschichtdicke μ können Tabelle 3-4 entnommen werden.

Tabelle 3-4: Untersuchungsergebnisse des Forschungsinstituts für Wärmeschutz e.V. [9]

Rohdichte [kg/m ³]	Wärmeleitfähigkeit trocken $\lambda_{10, tr}$ [W/(m·K)]	μ [-]
81	0,067	2

In den Untersuchungen [4] und [5] werden in Laboruntersuchungen feuchtetechnische Kennwerte von Lehmputz ermittelt. Die Kennwerte sind Tabelle 3-5 ausgewiesen.

Tabelle 3-5: Ergebnisse der Laboruntersuchungen an Lehmputz aus [4], [5]

Eigenschaft		Mittelwert
Rohdichte	[kg/m ³]	1514
Reindichte	[kg/m ³]	2630
Diffusionswiderstandszahl μ (23-0/50)	-	11,3
Diffusionswiderstandszahl μ (23-50/93)	-	9,6
Wasseraufnahmekoeffizient w_1	[kg/m ² √h]	2,8
Bezugsfeuchtegehalt bei 23°C und 65 % r. F.	[Vol. %]	1,3
Bezugsfeuchtegehalt bei 23°C und 80 % r. F.	[Vol. %]	1,88
Bezugsfeuchtegehalt bei 23°C und 93 % r. F.	[Vol. %]	2,54
freie Wassersättigung	[Vol. %]	29,4
Kapillartransportkoeffizient für Saugen	D_{wo} [m ² /s]	$2,0 \cdot 10^{-10}$
	D_{wf} [m ² /s]	$7,7 \cdot 10^{-8}$
Kapillartransportkoeffizient für Weiterverteilung	D_{wo} [m ² /s]	$7,0 \cdot 10^{-10}$
	D_{wf} [m ² /s]	$8,0 \cdot 10^{-5}$

3.3 Hygrothermische Simulationen

Durch den Einsatz von komplexen Simulationsprogrammen zur Untersuchung des feuchtetechnischen Verhaltens von Bauteilen, kann eine realitätsnahe Bewertung des sich unter natürlichen Randbedingungen einstellenden Wassergehalts vorgenommen werden. Soll die Gebrauchstauglichkeit von Bauteilen überprüft werden, reicht ein formaler Nachweis, wie ihn das Glaserverfahren gemäß DIN 4108-3 [10] darstellt, nicht aus. Unter praktischen Bedingungen zu erwartende Wassergehalte müssen ermittelt und kritisch beurteilt werden.

Für die Bestimmung der sich im Laufe eines Jahres in Außenwänden und Dächern einstellenden Materialfeuchten wird das Simulationsprogramm WUFI-Pro 4.1 "Wärme- und Feuchte instationär" [11] eingesetzt. Die Berechnungsansätze berücksichtigen den gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport in eindimensionalen mehrschichtigen Bauteilen. Dabei wird die beiderseitige Abhängigkeit von Wärmeleitung und Feuchtstrom auf iterativem Wege innerhalb des numerischen Verfahrens berücksichtigt. Das dem Programm zugrunde liegende Berechnungsmodell berücksichtigt den Wassertransport infolge Wasserdampfdiffusion und Kapillarleitung sowie die Feuchtespeicherung.

Bei den Berechnungen des Wärmetransports werden folgende Transportmechanismen und Einflussgrößen berücksichtigt:

- Wärmeleitung
- Enthalpieströme durch Dampfdiffusion mit Phasenwechsel (z.B. Abkühlungseffekt durch Verdunstung des aufgenommenen Regenwassers)
- kurzwellige Sonnenstrahlung
- langwellige nächtliche Abstrahlung

Bei der Berechnung des Feuchtetransports finden folgende Transportmechanismen Berücksichtigung:

Dampftransport:

- Dampfdiffusion
- Lösungsdiffusion

Flüssigkeitstransport:

- Kapillarleitung
- Oberflächendiffusion

Neben den verwendeten Transportmodellen gibt es noch weitere Transportmechanismen, die keine Berücksichtigung finden. Im Einzelnen handelt es sich um

- durch Schwerkraft bedingte Sickerströmungen
- hydraulische Strömungen aufgrund von Gesamtdruckunterschieden
- elektrokinetische und osmotische Effekte
- gegenseitige Einflüsse von Salz- und Wassertransport
- Enthalpieströme durch Transport flüssigen Wassers im Temperaturgefälle (Oberflächenabkühlung eines Bauteils durch kaltes Regenwasser)
- konvektiven Wärme- und Feuchtetransport
- Eisbildung

3.4 Biohygrothermische Simulation

In [7] wird ein biohygrothermisches Verfahren beschrieben, das die Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf Basis der drei wesentlichen Wachstumsvoraussetzungen (Feuchte, Temperatur und Substrat) bei instationären Randbedingungen ermöglicht. Die wesentlichen Merkmale werden in [12] erläutert. Die Ermittlung des Pilzwachstums erfolgt durch den Vergleich des Wassergehalts in einer Modell-Pilzspore mit dem Grenzwassergehalt, ab dem die Spore auszukeimen und zu wachsen beginnen würde.

Um den Einfluss des Substrats, also des Untergrunds oder ggf. eventueller Untergrundverunreinigungen, auf die Schimmelpilzbildung berücksichtigen zu können, werden Isoplethensysteme für unterschiedliche Substratgruppen vorgeschlagen, die aus experimentellen Untersuchungen abgeleitet wurden. Dazu erfolgte in [7] eine Festlegung von Substratgruppen, denen unterschiedliche Untergründe zugeordnet werden:

Substratgruppe 0: Optimaler Nährboden (z.B. Vollmedien); diese Isoplethensysteme besitzen die anspruchlosesten Wachstumsvoraussetzungen, also die niedrigsten Werte für die relative Luftfeuchte. Sie bilden für alle in Gebäuden auftretenden Schimmelpilze die absolute Wachstumsgrenze.

Substratgruppe I: Biologisch verwertbare Substrate, wie z.B. Tapeten, Gipskarton, Bauprodukte aus gut abbaubaren Rohstoffen, beispielsweise Materialien für dauerelastische Fugen oder stark verschmutztes Material.

Substratgruppe II: Baustoffe mit porigem Gefüge, wie z.B. Putze, mineralische Baustoffe, manche Hölzer sowie Dämmstoffe, die nicht unter Substratgruppe I fallen.

Jeder Substratgruppe ist ein Isoplethensystem zugeordnet, welches das Schimmelpilzwachstum in Abhängigkeit von Temperatur und Feuchte beschreibt.

4 Untersuchungsmethodik

Das hygrothermische Verhalten von Stroh als Dämmstoff wird an den in Kapitel 5.1 festgelegten homogenen Konstruktionen untersucht.

Im Nachgang wird mit dem Programm WUFI-Bio 2.0 [7] das Risiko von Schimmelpilzwachstum an kritischen Stellen in den Konstruktionen untersucht. Dieses geschieht für die Klimabedingungen, die in der äußeren Grenzschicht der Strohballendämmung und in 5 cm Tiefe nach den Berechnungen herrschen.

Um die Temperaturen eines unbeheizten Dachraumes zu bestimmen, wird das thermische Verhalten eines Modellgebäudes systematisch untersucht und beurteilt. Dabei wird ein zu untersuchendes (reales) Objekt in ein vereinfachtes Modell abstrahiert, welches die wesentlichen wärmetechnisch wirksamen Bestandteile abbildet. Aus den Simulationsergebnissen des vereinfachten Modells lassen sich Aussagen für konkrete Objekte und klimatische Bedingungen, die in einem unbeheizten Dachraum herrschen ableiten. Mit Hilfe dieser Ergebnisse lässt sich eine Klimadatei, bei dem die Temperaturen des Dachraums mit einfließen erstellen. Die Simulationsrechnungen werden mit Hilfe des Programms HAUSer, das auf [14] basiert und stetig dem aktuellen Stand der Wissenschaft angepasst wurde, durchgeführt.

5 Berechnungsgrundlage und Festlegungen

5.1 Untersuchte Konstruktionen

In Abstimmung mit dem Fachverband Strohballenbau Deutschland e.V. (FASBA) werden für die Untersuchung praxisrelevante Bauteile ausgewählt. Im Einzelnen werden folgende Bauteiltypen betrachtet:

- Außenwände aus lasttragenden Strohballen
- mit Strohballen ertüchtigte Außenwände
- geneigte Dachkonstruktionen
- Flachdachkonstruktionen
- Geschossdecken

In Tabelle 5-1 sind die untersuchten Bauteile beschrieben.

Tabelle 5-1: Beschreibung der untersuchten Bauteile

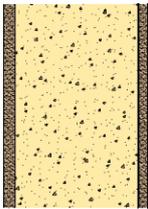
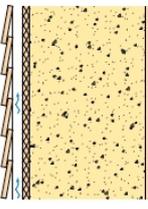
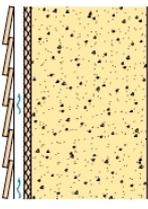
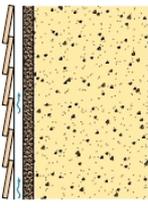
Bauteil	Bauteilskizze	Schichtdicke [cm]	Aufbau
1.1		3 36 3	Lehmputz dreilagig Strohballen Lehmputz dreilagig
1.1.2	-	3 36 3	Lehmputz dreilagig Strohballen Lehmputz dreilagig ($\mu = 30$)
1.1.3	-	3 36 1,5	Lehmputz dreilagig Strohballen Holzwerkstoffplatte (OSB)
1.1.4	-	3 2,2 36 3	Lehmputz dreilagig auf Schilfmatte als Putzträger Holzfaserplatte Strohballen Lehmputz dreilagig
1.1.5	-	3 2,2 36 1,5	Stülpschalung Lattung mit Luftraum Holzfaserplatte Strohballen Holzwerkstoffplatte (OSB)
1.1.5a		3 2,2 36 1,5	Stülpschalung Lattung mit Luftraum Holzfaserplatte Strohballen Gipskartonbauplatte
1.1.5b		3 2,2 36 1,5 2	Stülpschalung Lattung mit Luftraum Holzfaserplatte Strohballen Holzwerkstoffplatte (OSB) Lehmbauplatte
1.2		3 3 36 3	Stülpschalung Lattung mit Luftraum Lehmputz dreilagig Strohballen Lehmputz dreilagig
1.2.2	-	3 3 36 3	Stülpschalung Lattung mit Luftraum Lehmputz dreilagig Strohballen Lehmputz dreilagig ($\mu = 30$)

Tabelle 5.1: Fortsetzung

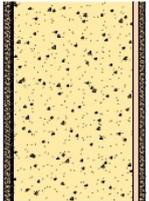
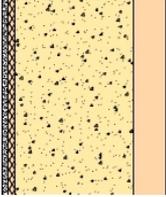
Bauteil	Bauteilskizze	Schichtdicke [cm]	Aufbau
1.2.3	-	3 3 2,2 36 1,5	Stülp Schalung Lattung mit Luftraum Lehmputz dreilagig Holzfaserplatte Strohballen Holzwerkstoffplatte (OSB)
1.2.4	-	3 3 2,2 36 3	Stülp Schalung Lattung mit Luftraum Lehmputz dreilagig Holzfaserplatte Strohballen Lehmputz dreilagig
1.3.1		1,5 2,2 36 1,5 2	Kalkputz einlagig Holzfaserplatte Strohballen Holzwerkstoffplatte (OSB) Lehmputzplatte
1.3.2	-	1,5 2,2 36 1,5	Kalkputz einlagig Holzfaserplatte Strohballen Holzwerkstoffplatte (OSB)
1.3.4		3 2,2 36 1,5 2	Lehmputz dreilagig auf Schilfmatte als Putzträger Holzfaserplatte Strohballen Holzwerkstoffplatte (OSB) Lehmputzplatte
1.4		1,5 2,2 36 10	Kalkputz einlagig Holzfaserplatte Strohballen Holzbauplatte aus Fichte
1.4.1	-	1,5 36 10	Kalkputz einlagig Strohballen Holzbauplatte aus Fichte

Tabelle 5.1: Fortsetzung

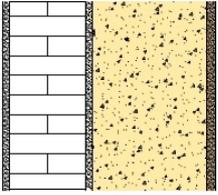
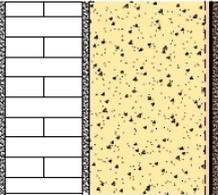
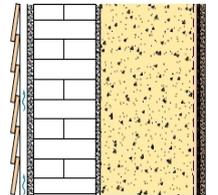
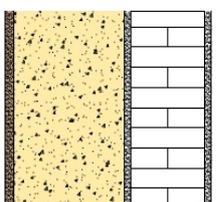
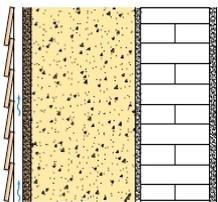
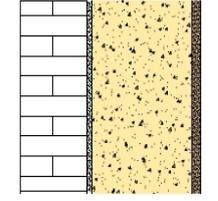
Bauteil	Bauteilskizze	Schichtdicke [cm]	Aufbau
2.1		2 24 2 36 3	Kalkzementputz Mauerwerk Kalkzementputz Strohballen Lehmputz dreilagig
2.2		2 24 2 36 $s_d = 2m$ 1,3 3	Kalkzementputz Mauerwerk Kalkzementputz Strohballen Dampfbremse Holzschalung Lehmputz dreilagig auf Schilfmatte als Putzträger
2.3		3 2 24 2 36 $s_d = 2m$ 1,3 3	Stülpschalung Lattung mit Luftraum Kalkzementputz Mauerwerk Kalkzementputz Strohballen Dampfbremse Holzschalung Lehmputz dreilagig auf Schilfmatte als Putzträger
2.4		3 36 2 24 2	Lehmputz dreilagig Strohballen Kalkzementputz Mauerwerk Kalkzementputz
2.5		3 3 36 2 24 2 24	Stülpschalung Lattung mit Luftraum Lehmputz dreilagig Strohballen Kalkzementputz Mauerwerk Kalkzementputz Mauerwerk
2.6		24 2 36 3	Mauerwerk Kalkzementputz Strohballen Lehmputz dreilagig

Tabelle 5.1: Fortsetzung

Bauteil	Bauteilskizze	Schichtdicke [cm]	Aufbau
3.1		2,2 4 2 36 2	Dachziegel Lattung 4/6 cm Konterlattung 2/4 cm Holzfaserplatte Luftschicht Lehmputz Strohballen Lehmputz
3.2	-	2,2 2 36 2	Dachziegel Lattung 4/6 cm Konterlattung 2/4 cm Holzfaserplatte Lehmputz Strohballen Lehmputz
3.3		2,2 36 2	Dachziegel Lattung 4/6 cm Konterlattung 2/4 cm Holzfaserplatte Strohballen Lehmputz
3.4		2,2 36 2	Dachziegel Lattung 4/6 cm Konterlattung 2/4 cm Holzfaserplatte Strohballen Holzwerkstoffplatte (OSB)
3.5	-	$s_d = 0,2m$ 2 36 2	Dachziegel Lattung 4/6 cm Konterlattung 2/4 cm Unterspannbahn Lehmputz Strohballen Lehmputz

Tabelle 5.1: Fortsetzung

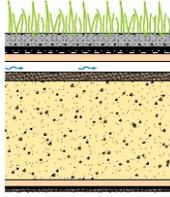
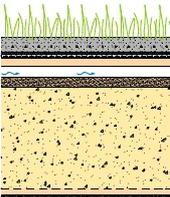
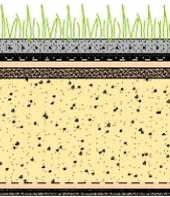
Bauteil	Bauteilskizze	Schichtdicke [cm]	Aufbau
4.1		2,8 4 2 36 2,2 2	Vegetation Substratschicht Dränageschicht Wurzelschutzbahn Schutzvlies Dachhaut Schalung Luftschicht Lehmputz Strohballen Schalung Lehmputz auf Schilfrohrmatte
4.2		2,8 4 2 36 $s_d = 2m$ 2,2 2	Vegetation Substratschicht Dränageschicht Wurzelschutzbahn Schutzvlies Dachhaut Schalung Luftschicht Lehmputz Strohballen Dampfbremse Schalung Lehmputz auf Schilfrohrmatte
4.3		2,8 2 36 $s_d = 2m$ 2,2 2	Vegetation Substratschicht Dränageschicht Wurzelschutzbahn Schutzvlies Dachhaut Schalung Lehmputz Strohballen Dampfbremse Schalung Lehmputz auf Schilfrohrmatte

Tabelle 5.1: Fortsetzung

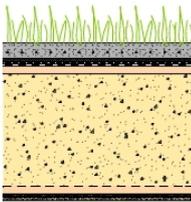
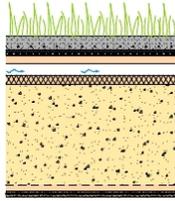
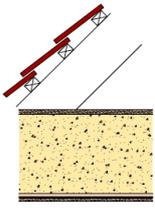
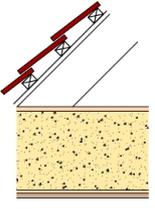
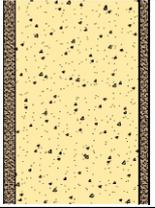
Bauteil	Bauteilskizze	Schichtdicke [cm]	Aufbau
4.4		2,8 36 $s_d = 2m$ 2,2 2	Vegetation Substratschicht Dränageschicht Wurzelschutzbahn Schutzvlies Dachhaut Schalung Strohballen Dampfbremse Schalung Lehmputz auf Schilfrohrmatte
4.5		2,8 4 2,2 36 $s_d = 2m$ 2,2 2	Vegetation Substratschicht Dränageschicht Wurzelschutzbahn Schutzvlies Dachhaut Nut und Federplatte Luftschicht Holzfaserplatte Strohballen Dampfbremse Schalung Lehmputz auf Schilfrohrmatte

Tabelle 5.1: Fortsetzung

Bauteil	Bauteilskizze	Schichtdicke [cm]	Aufbau
5.1		2 36 2,2 2	Lehmputz Strohballen Schalung Lehmputz auf Schilfrohrmatte
5.2	-	2 36 $s_d = 2m$ 2,2 2	Lehmputz Strohballen Dampfbremse Schalung Lehmbauplatte
5.3		2,2 36 $s_d = 2m$ 2,2 2	Weichfaserplatte Strohballen Dampfbremse Schalung Lehmbauplatte
6.1		3 85 3	Lehmputz dreilagig Strohballen Lehmputz dreilagig
6.2	-	3 2,2 85 1,5	Stülpchalung Lattung mit Luftraum Weichfaserplatte Strohballen Holzwerkstoffplatte (OSB)

5.2 Materialkennwerte

Bei den hygrothermischen Simulationen werden die Materialkennwerte aus der Programmdatei entnommen. Fehlende Materialkennwerte, wie z.B. Stroh und Lehmputz, werden auf der Grundlage vorliegender Untersuchungsergebnisse abgebildet.

Für Stroh wird auf die Untersuchungen [8] und [9] zurückgegriffen. Die in Ansatz gebrachten Materialkennwerte sind in Tabelle 5-2 wiedergegeben.

Tabelle 5-2: Verwendete Materialkennwerte für die Strohballendämmung

Rohdichte	[kg/m ³]	100,0
Porosität	[m ³ /m ³]	0,9
Wärmekapazität	[J/kgK]	2000,0
Wärmeleitfähigkeit	[W/mK]	0,045
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	1,3

Die Feuchtespeicherfunktion des Strohs wird auf Grundlage von Holz auf die in Ansatz gebrachte Rohdichte umgerechnet und neu generiert, siehe Bild 5-1. Die Werte für Saugen und Weiterverteilung werden aufgrund der großen Abstände zwischen den Halmen des Strohs vernachlässigt.

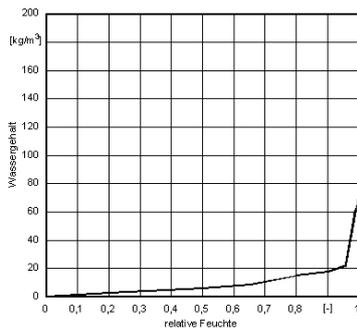


Bild 5-1: Verwendete Feuchtespeicherfunktion für Stroh

Bei dem Lehmputz finden die Messwerte des Fraunhoferinstituts für Bauphysik [3,4] Verwendung. Die in Ansatz gebrachten Materialkennwerte können Tabelle 5-3 entnommen werden.

Tabelle 5-3: Materialkennwerte des Lehmputzes

Rohdichte	[kg/m ³]	1514,0
Porosität	[m ³ /m ³]	0,4
Wärmekapazität	[J/kgK]	850,0
Wärmeleitfähigkeit	[W/mK]	0,7
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	11,3

Die Feuchtespeicherfunktion wird anhand der Untersuchungsergebnisse der Ausgleichsfeuchten aus [3,4] entwickelt, siehe Bild 5-2.

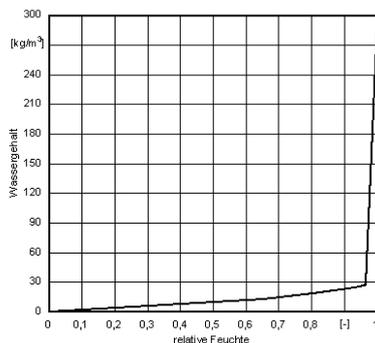


Bild 5-2: Verwendete Feuchtespeicherfunktion für Lehmputz

Alle anderen Materialkennwerte werden unverändert der Programm-Datenbank entnommen. Diese sind in Tabelle 5-4 zusammengestellt. Für die Holzschalung wird Fichtenholz in Ansatz gebracht.

Tabelle 5-4: Verwendete Materialkennwerte aus der Programm-Datenbank.

Baustoff	ρ [kg/m ³]	Ψ [m ³ /m ³]	c_p [J/(kg·K)]	λ [W/(m·K)]	μ [-]
Kalkputz, einlagig	1600	0,3	850	0,7	7,0
Kalkzementputz	1900	0,24	850	0,8	19,0
Stroh	100	0,9	2000	0,045	1,3
Kalksandstein	1900	0,29	850	1,0	28,0
Holzfaserverplatte	300	0,8	1500	0,05	12,5
OSB-Platte	595	0,9	1500	0,13	165,0
Gipskartonplatte	850	0,65	850	0,2	8,3
Holzbauplatte	455	0,73	1500	0,09	130,0
Fichte	427	0,66	2500	0,12	188,0
PE-Folie	130	0,001	2300	2,3	sd = 2 m
Unterspannbahn	130	0,001	2300	2,3	sd = 0,2 m
Dachbahn V13	2400	0,001	1000	0,5	sd = 100 m

5.3 Verwendete Randbedingungen

5.3.1 Außenklima

Das Programm verwendet für die Simulationen Stundenmittelwerte für Außenlufttemperatur, Außenluftfeuchte, Sonneneinstrahlung, Niederschlag, Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Raumlufttemperatur und Raumluftfeuchte.

Für die Bewertung von Außenbauteilen steht der Klimadatensatz „ibp 1991“ [14] zur Verfügung. Die Durchschnittsjahrestemperatur beträgt bei diesem Klimadatensatz 6,4°C. Die minimale Jahrestemperatur tritt mit -21,2°C im Dezember auf und die maximale mit 31,4°C im August. Die minimale relative Luftfeuchte beträgt 28% und die maximale 100%. Den Jahresverlauf der Temperatur zeigt Bild 5-3 und der Verlauf der relativen Luftfeuchte Bild 5-4.

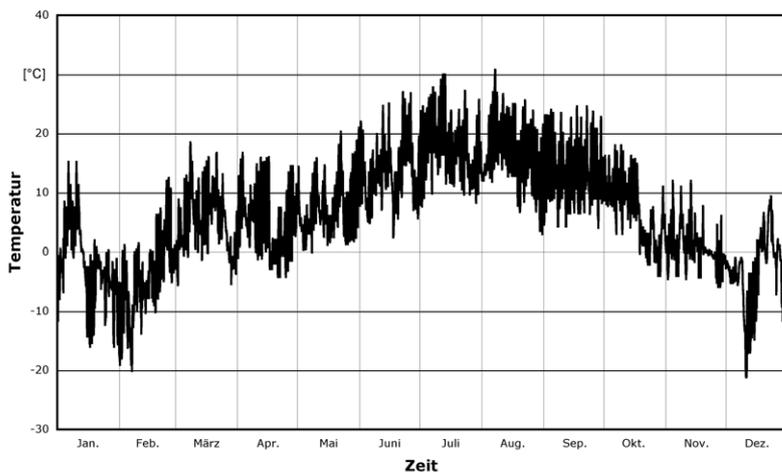


Bild 5-3: Jahrestemperaturverlauf des Klimadatensatzes „ibp1991“

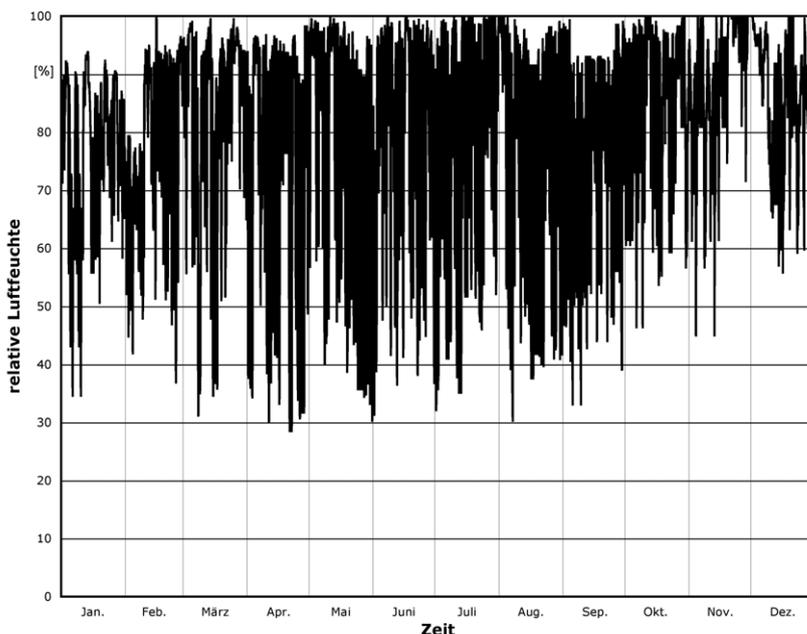


Bild 5-4: Jahresverlauf der relativen Luftfeuchte des Klimadatensatzes „ibp1991“

Die Summe des Normalregens lag im Jahr 1991 in Holzkirchen bei 1867 mm/a. Die Schlagregensumme ist in Bild 5.5 orientierungsabhängig dargestellt. Hierbei ist auffällig, dass eine

westorientierte Wand mit ca. 1200 mm/a die höchste Schlagregenbelastung zu verzeichnen hat. Wohingegen eine Ostorientierte Wand mit ca. 30 mm/a die niedrigste Belastung aufweist.

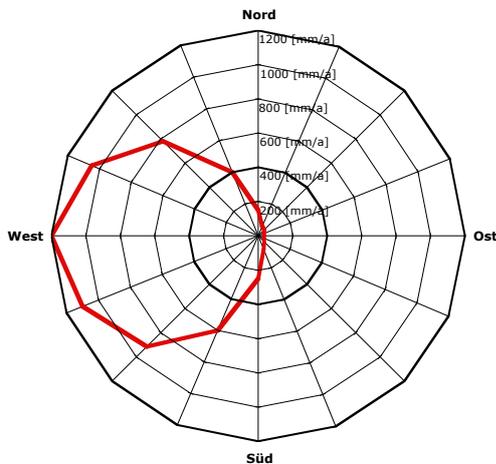


Bild 5-5: Jahresschlagregensumme in Abhängigkeit von der Orientierung

In Bild 5-6 ist die Strahlungsintensität des Standortes Holzkirchen dargestellt. Hier ist ersichtlich, dass der Tagesmaximalwert der Globalstrahlung mit ca. 1000 W/m² im Mai auftritt und der Tagesminimalwert mit ca. 50 W/m² im Dezember.

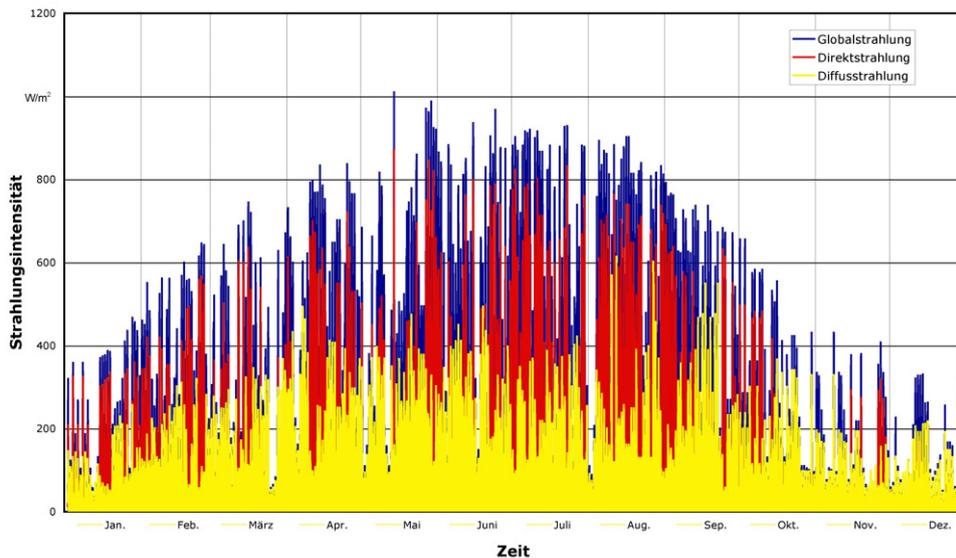


Bild 5-6: Strahlungsintensität für den Standort Holzkirchen „ip 1991“

5.3.2 Innenklima

Bei den Wohnräumen wird eine normale Feuchtelast vorausgesetzt. Dies entspricht einem sinusförmigen Verlauf der Temperatur zwischen 22 °C im Juni und 20 °C im Dezember sowie einer Feuchte zwischen 60 % im August und 40 % im Februar. Die Amplitude der Raumlufttemperatur beträgt 1K, die um einen Mittelwert von 21 °C schwankt. Die Amplitude der Raumluftfeuchte beträgt 10 %. Diese schwingt um den Jahresmittelwert von 50 %. Die grafischen Verläufe der Raumlufttemperatur und der relativen Raumluftfeuchte können den Bildern 5.7 und 5.8 entnommen werden.

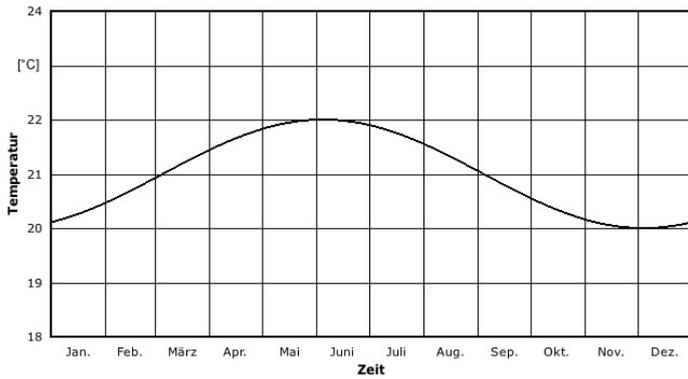


Bild 5-7: Jahresverlauf der in Ansatz gebrachten Raumlufttemperatur

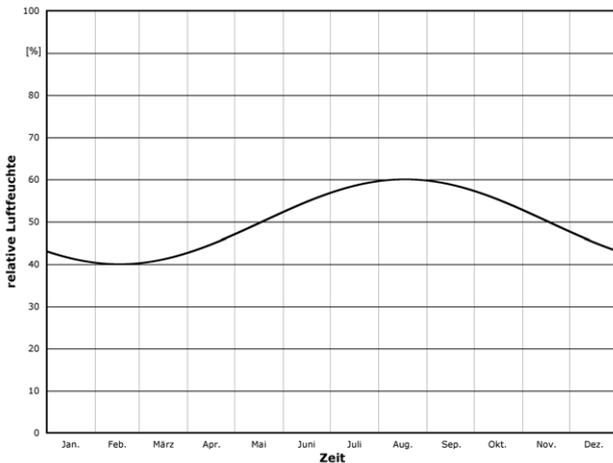


Bild 5-8: Jahresverlauf der in Ansatz gebrachten relativen Raumluftfeuchte

5.3.3 Festlegung der Basisorientierung

Um bei der Bewertung den höchsten Wassergehalt in der Strohballendämmung zu erhalten, wird der Einfluss der Bauteilorientierung auf das hygrothermische Verhalten nachfolgend anhand des in Kapitel 5.1 beschriebenen Bauteils 1.1 untersucht. Bild 5-9 zeigt die Verläufe des gemittelten Wassergehaltes in der Strohballendämmung abhängig von den Haupthimmelsrichtungen. Es zeigt sich, dass die Orientierung den Wassergehalt im Jahresverlauf stark beeinflusst. Für diese großen Schwankungen ist die unterschiedliche Schlagregenbelastung verantwortlich.

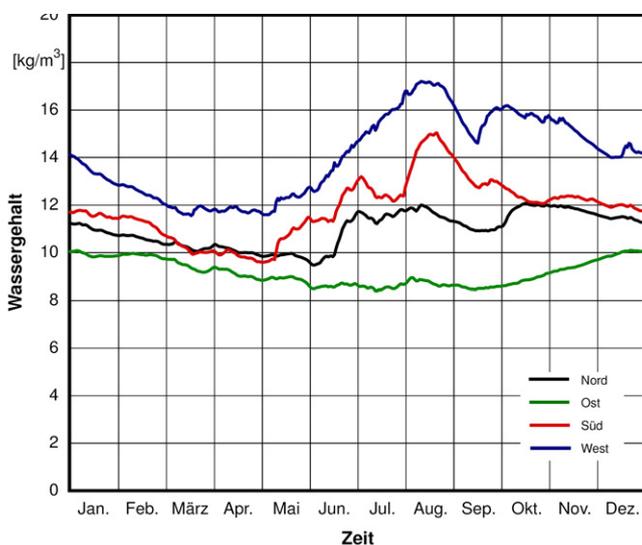


Bild 5-9: Verlauf des Wassergehalts in der Strohballendämmung in Abhängigkeit von der Orientierung

Da sich in der Strohballendämmung bei der westorientierten Wand der höchste Wassergehalt einstellt, wird für alle weiteren rechnerischen Betrachtungen die Westorientierung gewählt.

Für die Dachkonstruktionen wird ebenfalls ein westorientiertes 50° geneigtes Dach verwendet, auch wenn hier der schlechteste Fall aufgrund der geringen solaren Einstrahlung die Nordorientierung wäre, da somit ein Vergleich der Ergebnisse gewährleistet ist.

5.3.4 Wärmeübergang

Das Programm berechnet die senkrecht auftreffende Strahlungsleistung aus den Daten in der Klimadatei, multipliziert sie - falls sie positiv ist - mit der kurzwelligen Strahlung und stellt das Ergebnis als Wärmequelle an der Oberfläche in Rechnung. Falls aus den Klimadaten eine negative Strahlungsleistung folgt, wird sie mit der langwelligen Strahlungsemissionszahl multipliziert.

Die Höhe der kurzwelligen Strahlungsabsorption ergibt sich aus der Farbe der Bauteiloberfläche. Beim langwelligen Strahlungsaustausch ist die Strahlungsemissionszahl maßgebend. Für nichtmetallische Bauteiloberflächen liegt die langwellige Strahlungsabsorption meist bei etwa 0,9. Das Programm bestimmt die langwellige Strahlung automatisch aus dem für die kurzwellige Absorptivität ausgewählten Oberflächentyp oder benutzt für beide benutzereigene Eingaben [11].

Die verwendeten Wärmeübergangskoeffizienten sind in Tabelle 5-5 dargestellt.

Tabelle 5-5: Verwendete Wärmeübergangskoeffizienten

Bauteil	Wärmeübergangskoeffizient	
	außen [m ² K/W]	innen [m ² K/W]
Außenwand	0,0588	0,125
Dach	0,0526	0,125

Die verwendete Regenwasserabsorptionszahl, die nach der Hilfe des Programms [11] einen brauchbaren Ausgangswert darstellt beläuft sich auf 0,70.

In der unten aufgeführten Tabelle 5-6 sind die verwendeten typischen Strahlungskennwerte dargestellt.

Tabelle 5-6: Verwendete Strahlungskennwerte

	kurzwellige Strahlungsabsorption	langwellige Strahlungsabsorption
heller Putz	0,4	0,9
weißer Putz	0,2	0,9
dunkler Putz	0,6	0,9
heller Kalksandstein	0,4	0,9
rote Dachziegel	0,67	0,9
Dachbegrünung	0,7	0,9

Bei den Simulationen werden die Strahlungskennwerte für hellen Putz in Ansatz gebracht.

5.4 Bewertung der obersten Geschossdecke zu unbeheiztem Dachraum

Für die Bewertung des Feuchtetransports in Geschossdecken zu unbeheizten Dachräumen werden die Raumlufttemperaturen und Raumluftfeuchten im unbeheizten Bereich benötigt. Diese ergeben sich in Wesentlichen aus dem Außenklima, dem Aufbau des Bauteils und dem Luftaustausch mit der Außenluft. Die benötigten Werte werden anhand von thermischen Simulationsrechnungen für das in

Bild 5.10 dargestellte Reihemittelhaus ermittelt. Die beheizte Nettogrundfläche beträgt 159,9 m². Die Flächen der Außenbauteile sind in Tabelle 5-7 aufgeführt.

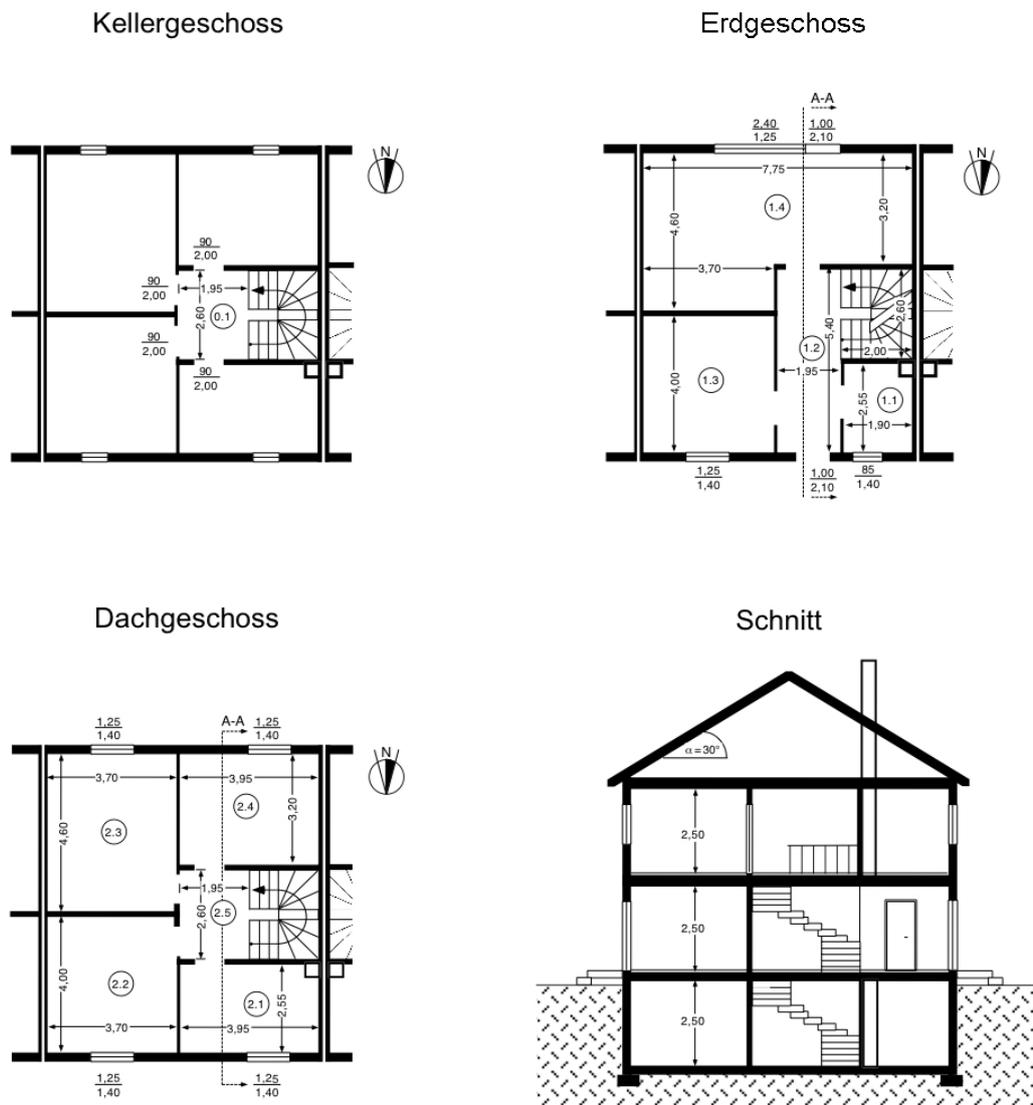


Bild 5-10: Darstellung des für die Simulationsrechnung herangezogenen Reihemittelhauses

Tabelle 5-7: Flächen der Außenbauteile für das Reihemittelhaus

Bauteil	Orientierung	Fläche [m ²]
Kellerboden	-	79,6
Außenwände	Nord	38,3
	Süd	38,2
Fenster	Nord	7,7
	Süd	9,9
Haustür	Nord	2,1
Oberste Geschoßdecke	-	79,6
Dach	Nord	46,0
	Süd	46,0

Die in Ansatz gebrachten Bauteilaufbauten sind in der Tabelle 5-8 zusammengestellt.

Tabelle 5-8: Verwendete Bauteilaufbauten

Bauteil	Baustoff	Dicke d [m]	Dichte ρ [kg/m ³]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)]	Spez. Wärmespeicherfähigkeit c_p [J/(kg·K)]
Außenwand	Schalung				
	Luftschicht				
	Holzfaserverplatte	0,022			
	Strohballen	0,36	100	0,045	2000
	Holzwerkstoffplatte (OSB)	0,015	595	0,13	1500
Geschoßdecke	Nut-Feder-Platten	0,015			
	Strohballen	0,36	100	0,045	2000
	Lehmputz	0,02	1514	0,7	850
Dach	Dachziegel				
	Lattung				
	Konterlattung				
	Holzfaserverplatte	0,022			
	Strohballen	0,36	100	0,045	2000
	Lehmputz	0,02	1514	0,7	850
Oberste Geschoßdecke	Lehmputz	0,02			
	Strohballen	0,36	100	0,045	2000
	Schalung	0,022	455	0,12	1500
	Lehmputz	0,02	1514	0,7	850
Fußboden gg. Erdreich	Estrich	0,05	2000	1,4	
	Dämmstoff	0,04	15	0,04	
	Stahlbeton	0,16	2300	2,3	
	Dämmstoff	0,08	15	0,04	
Fenster	Verglasung (70%) Rahmen (30%)	$U_g = 1,2 \text{ W/(m}^2\text{K)}; g = 0,58$ $U_f = 1,4 \text{ W/(m}^2\text{K)}$			

Anhand der thermischen Gebäudesimulation können für den unbeheizten Dachraum die in Bild 5-11 dargestellten Temperaturen ermittelt werden.

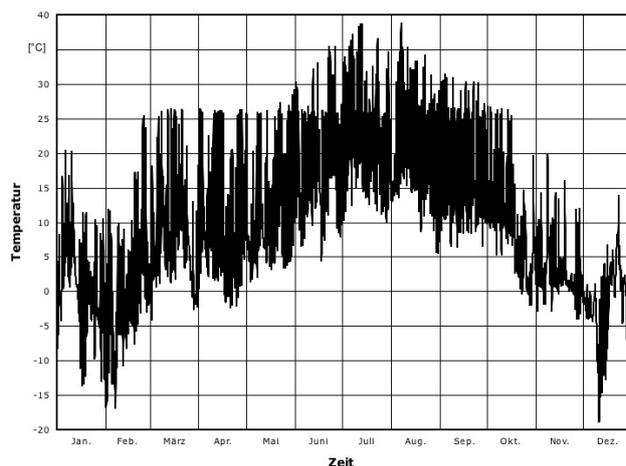


Bild 5-11: Temperaturen im Dachraum

Es wird davon ausgegangen, dass bei dem unbeheizten Dachraum annähernd die gleiche Wasserdampfkonzentration wie im Außenbereich herrscht. Aufgrund dieser Annahme werden die relativen Luftfeuchten nach Formel (2) und (4) auf die im Dachraum vorliegende Temperatur umgerechnet. In Bild 5-12 sind die ermittelten relativen Luftfeuchten im Dachraum im Jahresverlauf dargestellt.

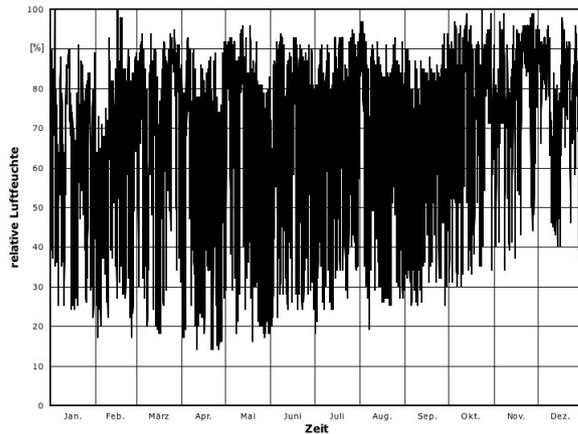


Bild 5-12: Jahresverlauf der relative Luftfeuchte im Dachraum

6 Bewertungskriterien

Allgemeingültige Kriterien für die Beurteilung des Feuchteschutzes von Bauteilen aus Strohballen stehen derzeit noch nicht zur Verfügung. Erst die Festlegung von modellkonformen Kriterien auf der Grundlage von langjährigen Beobachtungen ermöglicht die Schaffung von geeigneten Bewertungskriterien.

Als Kriterium bietet sich das prognostizierte Schimmelpilzwachstum in den Strohballen an [3,4].

Analog zu [3,4] erfolgt die Bauteilbewertung anhand des Schimmelpilzwachstums der Ergebnisse für einen Referenzpunkt in 5 cm Tiefe. Da das Programm jedoch nur für eine Bauteiloberflächenbewertung ausgelegt ist, kann sich eine Konstruktion mit geringem Schimmelpilzwachstum in der Realität dennoch als tauglich erweisen. Aus diesem Grund wird ein geringes Wachstum, hier bis 150 mm in Laufe eines Jahres, als „gegebenenfalls geeignet“ eingestuft. Schimmelpilzwachstum oberhalb von 150 mm wird als nicht geeignet eingestuft.

7 Untersuchungsergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die untersuchten Konstruktionen untersucht und bewertet. Hierfür werden auszugsweise die Ergebnisse in Diagrammen und Tabellen dargestellt. Zusätzlich wird auf die genauen Ergebnisse im Anhang Bezug genommen.

7.1 Darstellung der Untersuchungsergebnisse

Die feuchtetechnische Untersuchung von Strohballen wird anhand der in Kapitel 5.1 beschriebenen Bauteile durchgeführt.

Bei der Bauteilsimulation werden über die Schichtdicke gemittelte sowie lokale Wassergehalte im eingeschwungenen Zustand für jeden Zeitschritt ermittelt. Aus den 8760 Einzelwerten werden für die für die Charakterisierung des Feuchteschutzes der Bauteile der sich im Jahresverlauf einstellende maximale und minimale gemittelte Wassergehalt der Strohballenschichte sowie der maximale und minimale lokale Wassergehalt und dem hieraus resultierenden Schimmelpilzwachstum für die festgelegten Referenzpunkte tabellarisch zusammengestellt.

In den folgenden Kapiteln werden die jeweiligen Konstruktionen anhand ihres Wassergehalts verglichen. Die Skalierung der grafischen Darstellung variiert zur besseren Übersicht zwischen 120 kg/m³ bei dem maximalen lokalen Wassergehalt und 20 kg/m³ bei dem über den Strohballen maximal gemittelten Wassergehalt.

Die Tabelle 7-1 zeigt beispielhaft die gewählte Form der Ergebnisdarstellung. Bei der tabellarischen Darstellung wird zur besseren Übersicht für die äußere Grenzschicht zwischen Stroh und der äußeren Schicht die Bezeichnung „Monitor 1“ und für den Punkt in 5 cm Tiefe in der Strohballendämmung „Monitor 2“ gewählt.

Tabelle 7-1: Gewählte Darstellungsform der Untersuchungsergebnisse der hygrothermischen Simulationen

Bauteil	gemittelter Wassergehalt		lokaler Wassergehalt				Schimmelpilzwachstum	
	U _{min} [kg/m ³]	U _{max} [kg/m ³]	Monitor 1		Monitor 2		Monitor 1 [mm]	Monitor 2 [mm]
	U _{min} [kg/m ³]	U _{max} [kg/m ³]	U _{min} [kg/m ³]	U _{max} [kg/m ³]	U _{min} [kg/m ³]	U _{max} [kg/m ³]		
2.1	13,02	18,21	66,83	112,48	17,65	21,26	1266,90	818,10

Im Anhang sind die detaillierten Ergebnisse des eingeschwungenen Zustands für jede Konstruktionen im Jahresverlauf dargestellt. Hierbei zeigt Bild 1.1 das Bauteil und Bild 1.2 den gemittelten Wassergehalt in der Strohballendämmung. In den Bildern 1.3 und 1.4 ist der lokale Wassergehalt in der Strohballendämmung in der äußeren Grenzschicht und in 5 cm Tiefe ausgehend von der Trennebene zwischen Stroh und Putz abgebildet und in 1.5 und 1.6 das dazugehörige Schimmelpilzwachstum. Im Bild 1.7 und in der nebenstehenden Tabelle sind die monatliche Wasseraufnahme und die Abgabe tabellarisch und in einem Diagramm abgebildet.

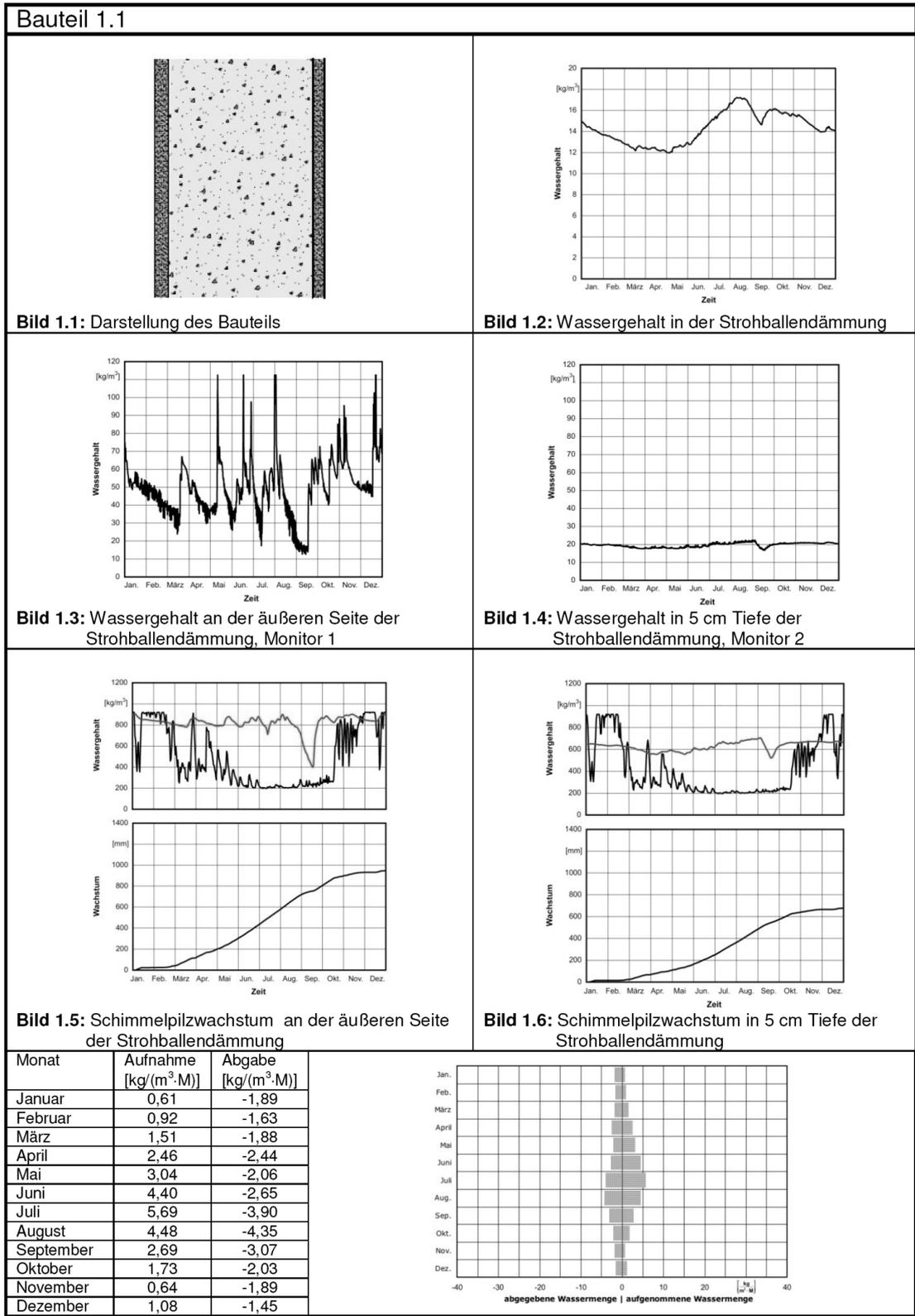


Bild 7-1: Ergebnisdarstellung im Anhang

7.2 Außenwände

In der Tabelle 7.2 sind die Ergebnisse der Untersuchungen dargestellt. Bei den Bauteilen 1.1 bis 1.1.4 wird der äußere lokale Wassergehalt stark von der Regenbelastung der Konstruktion beeinflusst. Der Wassergehalt erreicht teilweise den freien Wassergehalt, siehe Konstruktion 1.1.4. Der lokale Wassergehalt in 5 cm Tiefe liegt zwischen $16,6 \text{ kg/m}^3$ und $22,3 \text{ kg/m}^3$. Die Konstruktionen ähneln sich in ihrem hygrothermischen Verhalten. Dieses spiegelt sich auch bei dem Schimmelpilzwachstum wieder. Hier ist erkennbar, dass bis auf Konstruktion 1.1.4 die Tendenz des Schimmelpilzwachstums gleich ist. Die Konstruktionen mit der höheren diffusionsäquivalenten Luftschichtdicke auf der Innenseite der Konstruktion haben jedoch ein geringeres Schimmelpilzwachstum in 5 cm Tiefe. Der gemittelte Wassergehalt der Konstruktionen schwankt zwischen $5,1 \text{ kg/m}^3$ und $17,99 \text{ kg/m}^3$. Hierbei ist erkennbar, dass die Konstruktion 1.1.4 mit der Holzfaserplatte auf der äußeren Seite der Strohballendämmung die geringste Schwankung aufweist.

Der gemittelte Wassergehalt schwankt bei den Bauteilen 1.3.1 bis 1.4 ohne Wetterschutz zwischen $9,3 \text{ kg/m}^3$ und maximal $16,29 \text{ kg/m}^3$. Der lokale Wassergehalt im äußeren Punkt der Strohballendämmung variiert zwischen $5,64 \text{ kg/m}^3$ und $48,2 \text{ kg/m}^3$ und in 5 cm Tiefe zwischen $11,08 \text{ kg/m}^3$ und $112,48 \text{ kg/m}^3$. Am äußeren Referenzpunkt beträgt das Schimmelpilzwachstum am Ende des Jahres zwischen ca. $481,1 \text{ mm}$ und maximal $906,5 \text{ mm}$, am inneren zwischen $58,1 \text{ mm}$ und maximal $488,4 \text{ mm}$.

Bei den Konstruktionen mit Wetterschutz, Bauteil 1.1.5 bis 1.2.4, liegen die äußeren lokalen Wassergehalte zwischen $5,89 \text{ kg/m}^3$ und $112,48 \text{ kg/m}^3$ und in 5 cm Tiefe zwischen $7,51 \text{ kg/m}^3$ und $17,65 \text{ kg/m}^3$. Der gemittelte Wassergehalt schwankt zwischen $7,2 \text{ kg/m}^3$ und $11,07 \text{ kg/m}^3$. An der äußeren Stelle der Strohballendämmung beträgt das Schimmelpilzwachstum am Ende des Jahres zwischen $481,1 \text{ mm}$ und maximal $906,5 \text{ mm}$ und in 5 cm Tiefe zwischen 0 und maximal $58,1 \text{ mm}$.

In der unten aufgeführten Tabelle sind die Ergebnisse der Wandkonstruktionen zusammen gefasst.

Tabelle 7-2: Untersuchungsergebnisse der Wandkonstruktionen

Bauteil	gemittelter Wassergehalt		lokaler Wassergehalt				Schimmelpilzwachstum	
	U_{\min} [kg/m ³]	U_{\max} [kg/m ³]	Monitor 1		Monitor 2		Monitor 1 [mm]	Monitor 2 [mm]
			U_{\min} [kg/m ³]	U_{\max} [kg/m ³]	U_{\min} [kg/m ³]	U_{\max} [kg/m ³]		
1.1	11,53	17,22	12,64	112,48	16,65	22,32	945,70	676,80
1.1.2	11,35	17,30	12,63	112,48	16,64	22,32	945,10	671,10
1.1.3	10,79	17,99	13,12	112,48	17,03	22,40	947,10	651,00
1.1.4	12,66	15,49	17,94	112,48	17,84	20,59	1021,70	651,50
1.1.5	7,20	8,10	6,75	17,83	7,51	12,94	18,20	0
1.1.5a	6,96	9,52	9,51	20,47	8,99	15,52	21,70	0
1.1.5b	6,88	9,44	9,39	20,31	8,88	15,36	19,00	0
1.2	9,36	11,07	8,98	39,61	10,97	17,65	167,90	41,10
1.2.2	9,41	10,69	9,69	39,17	11,17	17,52	192,90	43,20
1.2.3	7,68	9,18	9,88	20,45	9,75	14,83	56,90	0
1.2.4	9,59	10,75	12,94	39,34	12,68	16,88	260,40	58,10
1.3.1	9,30	13,74	11,20	63,14	13,23	18,52	481,10	185,60
1.3.2	9,30	13,79	11,31	62,02	13,26	18,65	487,40	195,30
1.3.4	11,99	16,29	11,85	112,48	18,41	112,48	906,50	1051,00
1.4	9,92	13,73	5,89	112,48	11,08	59,69	605,20	488,40
1.4.1	9,80	14,57	10,07	63,08	12,56	18,80	609,50	254,80
1.5.1	13,69	15,99	15,27	112,48	37,52	47,37	961,60	1024,40
1.5.2	13,94	15,80	15,69	112,48	49,87	58,77	965,90	1068,30

Von Mitte August bis Mitte September ist bei den Konstruktionen 1.1, 1.1.2, 1.1.3, 1.1.4 und 1.3.4 (ohne Wetterschutz) an beiden Monitorpositionen durch starke Solarstrahlung und geringe Regenbelastung ein Abfall des lokalen und gemittelten Wassergehaltes zu erkennen. In den Bildern 7.2 und 7.3 sind die lokalen Wassergehalte im Jahresverlauf zur Verdeutlichung dargestellt.

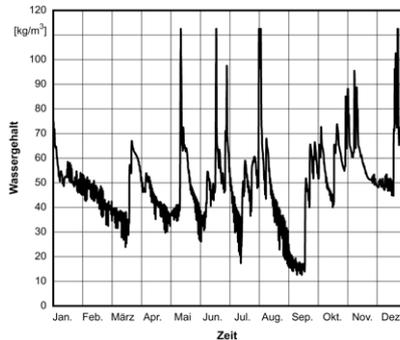


Bild 7-2: Lokaler Wassergehalt in der äußeren Grenzschicht der Strohballendämmung der Konstruktion 1.1, „Monitor 1“

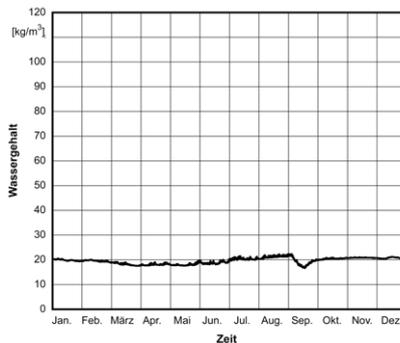


Bild 7-3: Lokaler Wassergehalt bei der Konstruktion 1.1, „Monitor 2“

Der gemittelte Wassergehalt in der Strohballendämmung unterliegt überwiegend den Schwankungen der Raumlufttemperatur und der Raumluftfeuchte. Ab Mitte August ist ein starker Abfall aufgrund der intensiven Solarstrahlung und geringerer Regenbelastung auch hier erkennbar. Die Feuchteabnahme erreicht Mitte September ihren Tiefpunkt, siehe Bild 7-4, steigt aber danach wieder an.

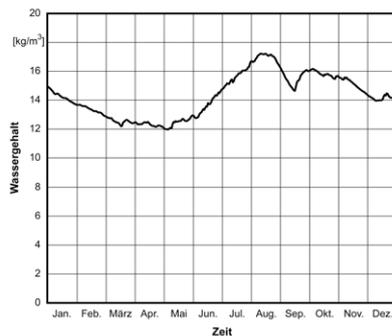


Bild 7-4: Gemittelter Wassergehalt in der Strohballendämmung bei den Konstruktionen 1.1- 1.1.4

In den warmen Monaten Mai bis August lagern die Konstruktionen Wasser ein und geben es in der übrigen Zeit des Jahres vermehrt ab. In den kälteren Monaten wie z.B. November bis Februar beläuft sich die maximale Wasserabnahme in der Strohballendämmung auf ca. 1 kg/m^3 . Allgemein ist erkennbar, dass die Wasseraufnahme bzw. -abgabe in den einzelnen Monaten 5 kg/m^3 beträgt, lediglich im Juli werden darüber hinaus ca. $5,7 \text{ kg/m}^3$ aufgenommen. Die Konstruktion 1.1.4 und 1.3.4 hingegen haben aufgrund der geringeren Temperaturen in der Strohballendämmung einen größeren

Schwankungsbereich der Wasseraufnahme und -abgabe zu verzeichnen. In den Monaten März, Juni, Juli, September, Oktober und Dezember lagert sich in den Konstruktionen mehr Wasser ein als abgegeben wird. In den restlichen Monaten gleichen sich die Wassermengen wieder aus und es entsteht ein Gleichgewicht zwischen Aufnahme und Abgabe.

Das Schimmelpilzwachstum ist in den wärmeren Monaten März bis Oktober am größten. Im Januar kommt es in den äußeren Grenzschichten der Konstruktionen ebenfalls zu einem kurzzeitigen Schimmelpilzwachstum, danach stoppt das Wachstum aufgrund der niedrigen Temperaturen und setzt erst wieder Ende Februar ein. Den Verlauf des Schimmelpilzwachstums der Konstruktion 1.1 in der äußeren Grenzschicht der Strohballendämmung und in 5 cm Tiefe findet sich Bild 7-5. In 5 cm Tiefe (Monitor 2) ist ein geringeres Schimmelpilzwachstum zu verzeichnen, jedoch ist der Verlauf vergleichbar mit dem in der Grenzschicht.

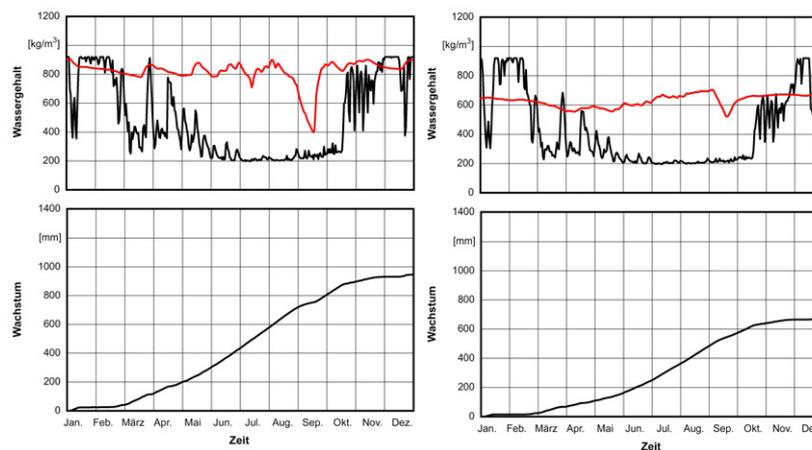


Bild 7-5: Schimmelpilzwachstum der Konstruktion 1.1, links in der äußeren Grenzschicht der Strohballendämmung (Monitor 1) und rechts in 5 cm Tiefe (Monitor 2)

Die Schwankungen des Wassergehaltes an der äußeren Grenzschicht der Strohballendämmung sind bei den Konstruktionen 1.3.1, 1.3.2, 1.4 und 1.4.1 geringer als bei Konstruktion 1.1. In den kalten Monaten von November bis Februar steigt sie aufgrund der niedrigen Temperaturen und der damit verbundenen hohen relativen Luftfeuchte an. Ein Einfluss der Regenbelastung ist durch die geringere Saugfähigkeit des Kalkputzes nicht erkennbar.

Bei den Konstruktionen 1.1.5, 1.1.5a und 1.1.5b ist der lokale Wassergehalt in der Strohballendämmung durch das Aufbringen einer zusätzlichen „Überdämmung“ in Form einer Holzfaserplatte in der äußeren Grenzschicht gering (siehe Bilder 7.6 und 7.7), in 5 cm Tiefe ist jedoch durch die höheren Temperaturen in der Dämmebene ein geringerer lokaler Wassergehalt vorhanden.

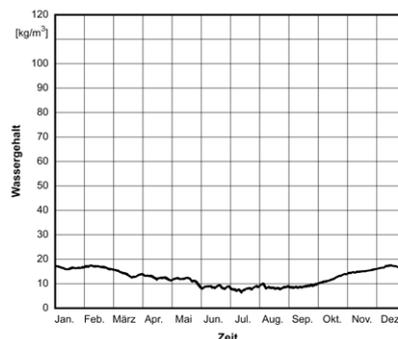


Bild 7-6: Lokaler Wassergehalt in der äußeren Grenzschicht der Strohballendämmung bei der Konstruktion 1.1.5, „Monitor 1“

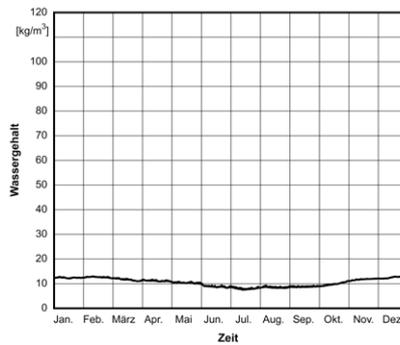


Bild 7-7: Lokaler Wassergehalt in 5 cm Tiefe der Strohballenschicht bei der Konstruktion 1.1.5, „Monitor 2“

Durch die geringeren Wassergehalte - im Gegensatz zu den Konstruktionen ohne Wetterschutz - kommt es in den Referenzpunkten zu keiner oder zu geringer Schimmelpilzbildung. Die Schimmelpilzbildung tritt nur in der äußeren Grenzschicht auf, siehe Bild 7-8.

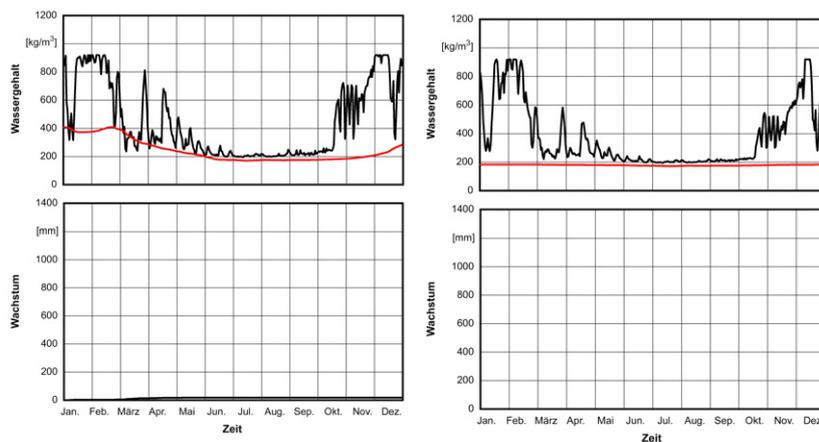


Bild 7-8: Schimmelpilzgefährdung der Konstruktion 1.1.5, links in der äußeren Grenzschicht (Monitor 1) und rechts in 5 cm Tiefe (Monitor 2“)

In den Monaten Juni, Juli, August und September nehmen diese Konstruktionen maximal 3 kg/m^3 Wasser auf, das sie im restlichen Jahr wieder abgeben.

Die Konstruktionen 1.2 bis 1.2.4 mit Wetterschutz ohne außenseitige „Überdämmung“ haben aufgrund der geringeren Temperaturen einen höheren lokalen und gemittelten Wassergehalt. Dadurch kommt es in den Monaten Februar bis Juli auch zu einer stärkeren Schimmelpilzbildung als bei den „überdämmten“ Konstruktionen. Zu erkennen ist auch die geringere Wasseraufnahme bzw. -abgabe.

7.3 Mit Strohballen ertüchtigte Außenwände

Bei den Wandkonstruktionen mit eingebauter Innendämmung (Bauteile 2.1, 2.2 und 2.6) schwankt der gemittelte Wassergehalt zwischen $11,74 \text{ kg/m}^3$ und $19,45 \text{ kg/m}^3$. Der lokale Wassergehalt am Referenzpunkt 1 schwankt zwischen $18,52 \text{ kg/m}^3$ und $112,48 \text{ kg/m}^3$ und am Referenzpunkt 2 zwischen $16,99 \text{ kg/m}^3$ und $22,03 \text{ kg/m}^3$. In der äußeren Grenzschicht beträgt das Schimmelpilzwachstum bei den Bauteilen 2.1 und 2.2 etwa 1250 mm am Jahresende und bei Konstruktion 2.6 nur etwa 1000 mm.

Der gemittelte Wassergehalt in der Strohballendämmung schwankt bei den Bauteilen 2.4 und 2.5 zwischen $7,34 \text{ kg/m}^3$ und $17,34 \text{ kg/m}^3$, der lokale im äußeren Bezugspunkt zwischen $8,17 \text{ kg/m}^3$ und $112,48 \text{ kg/m}^3$ und im Bezugspunkt in 5 cm Tiefe zwischen $8,56 \text{ kg/m}^3$ und $22,04 \text{ kg/m}^3$. Das Schimmelpilzwachstum liegt bei Konstruktion 2.4 bei „Monitor 1“ bei 947,8 mm, bei Bauteil 2.5 bei 80,8 mm. Bei „Monitor 2“ erreicht es 792,8 mm und bei 2.5 215,7 mm.

Tabelle 7-3: Untersuchungsergebnisse der mit Strohballen ertüchtigten Außenwände

Bauteil	gemittelter Wassergehalt		lokaler Wassergehalt				Schimmelpilzwachstum	
	U_{\min} [kg/m ³]	U_{\max} [kg/m ³]	Monitor 1		Monitor 2		Monitor 1 [mm]	Monitor 2 [mm]
			U_{\min} [kg/m ³]	U_{\max} [kg/m ³]	U_{\min} [kg/m ³]	U_{\max} [kg/m ³]		
2.1	13,02	18,21	66,83	112,48	17,65	21,26	1266,90	818,10
2.2	12,26	19,45	68,60	112,48	17,34	22,03	1244,30	689,30
2.3	8,20	11,24	14,93	35,65	13,65	16,57	315,30	15,80
2.4	11,25	17,34	12,99	112,48	15,88	22,04	947,80	792,80
2.5	7,34	9,10	8,17	36,22	8,56	15,92	80,80	215,70
2.6	11,74	14,60	18,52	76,61	16,99	19,84	999,80	520,40

Die Konstruktionen 2.1, 2.2 und 2.6 haben keinen vorgelagerten Wetterschutz. Der gemittelte Wassergehalt in der Strohballendämmung ist bei Konstruktion 2.1 mit der innenseitigen Dampfbremse am höchsten und liegt zwischen 12,26 kg/m³ und 19,45 kg/m³, siehe Bild 7-9. Dieser hohe Wassergehalt resultiert aus dem hohen Wassergehalt in der Kalkzementputzschicht, die bereits bei normalen Feuchtebedingungen hohe Werte aufweist. Das gleiche Phänomen zeigt Konstruktion 2.2, jedoch ist der Wassergehalt in der Strohballendämmung geringer als bei Konstruktion 2.1, da hier die Möglichkeit der Austrocknung nach innen besteht. Konstruktion 2.6, mit zusätzlicher Putzschicht zwischen Strohballendämmung und Kalksandsteinmauerwerk, weist einen geringeren Wassergehalt auf. Bei allen drei Konstruktionen ist ein hohes Schimmelpilzwachstum, durch die hohen lokalen Wassergehalte sowohl in der Grenzschicht als auch in 5 cm Tiefe zu erwarten, siehe hierzu beispielhaft Bild 7-10. Die Wasseraufnahme der Konstruktionen beschränkt sich auf die warmen Monate Mai bis September, in denen es zu einer deutlichen Wasseraufnahme kommt.

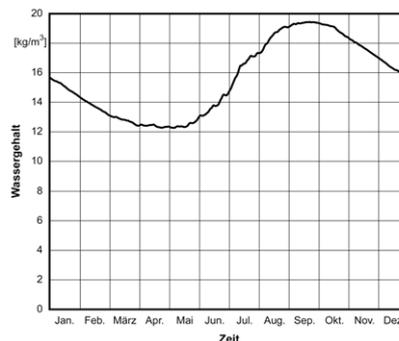


Bild 7-9: Gemittelter Wassergehalt in der Strohballendämmung der Konstruktion 2.2

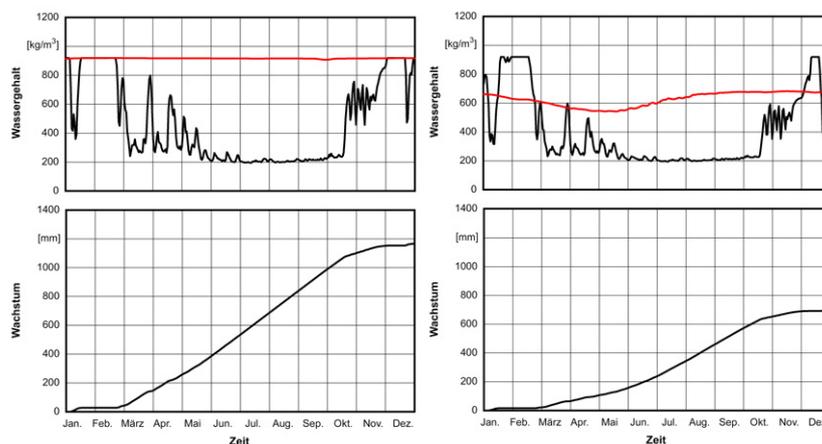


Bild 7-10: Schimmelgefährdung der Konstruktion 2.1, links an der äußeren Grenzschicht (Monitor 1) und rechts in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung (Monitor 2)

Die Konstruktion 2.3 weist aufgrund ihres Wetterschutzes einen deutlich niedrigeren lokalen und gemittelten Wassergehalt in der Strohballendämmung auf. Das Schimmelpilzwachstum ist deutlich

geringer als bei den Konstruktionen mit vorgesetztem Wetterschutz. In 5 cm Tiefe kommt es sogar lediglich zu 15 mm Schimmelpilzbildung. Zusätzlich ist erkennbar, dass die Konstruktion nur geringe Wassermengen aufnimmt und wieder abgibt.

Die Konstruktion 2.4 ist eine mit Strohballen ertüchtigte Außenwand mit einem vorgelagerten Wetterschutz. Sie ist an der äußeren Grenzschicht stark durch Schlagregen belastet und es sind hohe temporäre Schwankungen des lokalen Wassergehalts erkennbar. Jedoch ist auch bei diesen Konstruktionen ein starker Abfall des gemittelten und lokalen Wassergehalts von Mitte August bis Mitte September durch die hohe Solarstrahlung und die geringe Schlagregenbelastung zu verzeichnen. Diese Schlagregenbelastung spiegelt sich auch im Schimmelpilzwachstum wieder. In den Monaten März bis November ist im äußeren Bereich ein hohes Schimmelpilzwachstum vorhanden. Hier kommt es zu einem Wachstum von bis zu 950 mm. In 5 cm Tiefe sind keine starken Schwankungen des lokalen Wassergehaltes mehr erkennbar. Der lokale Wassergehalt verläuft hier zwischen $15,88 \text{ kg/m}^3$ und $22,04 \text{ kg/m}^3$. Das Wachstum des Schimmelpilzes findet in den gleichen Monaten wie in der äußeren Grenzschicht statt, jedoch ist hier, durch die geringeren Temperaturen und den geringeren Wassergehalt das Wachstum nicht so ausgeprägt und hat am Jahresende ca. 800 mm erreicht, siehe Bild 7-11. In den Monaten Mai bis Oktober nimmt die Konstruktion mehr Wasser auf als sie abgibt.

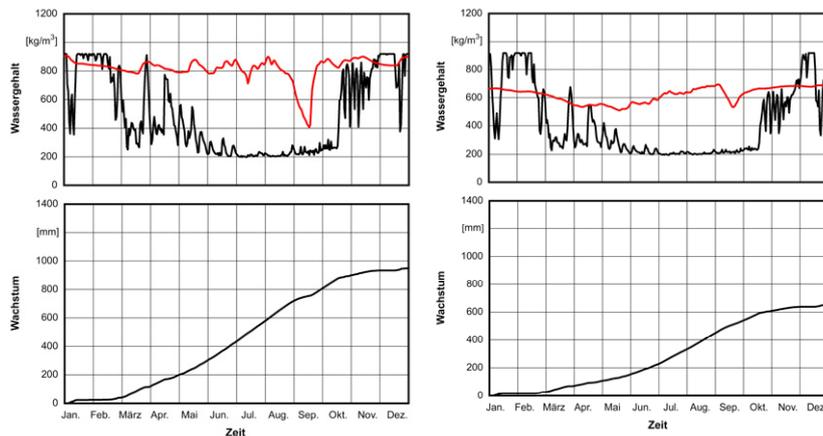


Bild 7-11: Schimmelpilzgefährdung der Konstruktion 2.4, links an der äußeren Grenzschicht (Monitor 1) und rechts in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung (Monitor 2)

Durch einen wirksamen Wetterschutz ist der lokale Wassergehalt an der äußeren Grenzschicht der Strohballendämmung bei Konstruktion 2.5 deutlich geringer als bei Konstruktion 2.4. Auf Grund dieses niedrigeren Wassergehaltes kommt es hier zu einer wesentlich geringeren Schimmelpilzbildung, siehe Bild 7-12. Am Ende des Jahres beträgt diese ca. 80 mm. Innerhalb der Strohballendämmung bewegt sich der lokale Wassergehalt zwischen $8,56 \text{ kg/m}^3$ und $15,92 \text{ kg/m}^3$, im Gegensatz zu $8,17 \text{ kg/m}^3$ und $36,22 \text{ kg/m}^3$ im äußeren Randbereich. Durch höhere Temperaturen in der Konstruktion ergibt sich in 5 cm Tiefe ein höheres Schimmelpilzwachstum als an der äußeren Grenzschicht der Strohballendämmung. In 5 cm Tiefe beläuft sich diese auf ca. 215 mm und in der äußeren Grenzschicht auf ca. 80 mm. Der gemittelte Wassergehalt in der Strohballendämmung beträgt zwischen $7,34 \text{ kg/m}^3$ und $9,1 \text{ kg/m}^3$, und hat im Juli seinen niedrigsten Wert. Von Juli bis Dezember nimmt die Konstruktion mehr Wasser auf, als sie abgibt. Jedoch übersteigt die Wasseraufnahme bzw. -abgabe selten 1 kg/m^3 .

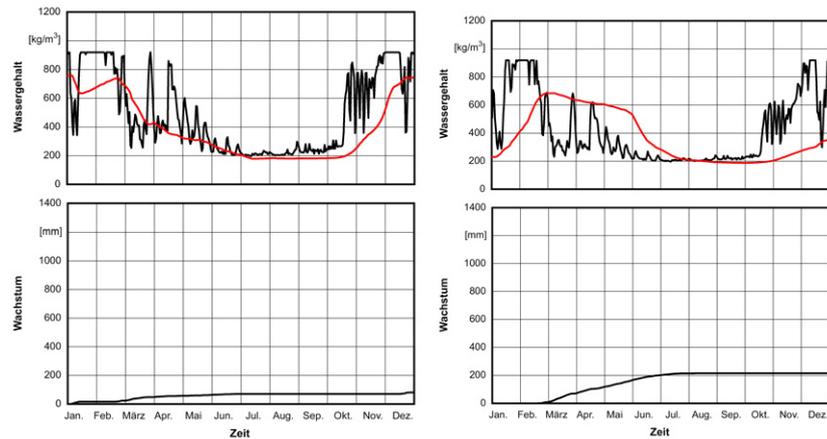


Bild 7-12: Schimmelgefährdung der Konstruktion 2.5, links an der äußeren Grenzschicht (Monitor 1) und rechts in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung (Monitor 2)

7.4 Geneigte Dächer

Der gemittelte Wassergehalt der Dachkonstruktionen schwankt zwischen $6,94 \text{ kg/m}^3$ und $11,18 \text{ kg/m}^3$, der lokale Wassergehalt an der Strohballendämmung zwischen $9,35 \text{ kg/m}^3$ und $40,92 \text{ kg/m}^3$ und in 5 cm Tiefe zwischen $9,6 \text{ kg/m}^3$ und $21,65 \text{ kg/m}^3$.

An der Strohballendämmung beträgt das Schimmelpilzwachstum am Ende des Jahres zwischen ca. 20,6 mm und maximal 305 mm und innerhalb der Strohballendämmung zwischen (Monitor 2) ca. 60 mm und maximal 72,3 mm. Demgegenüber tritt bei Bauteil 3.4 kein Schimmelpilzwachstum auf.

Tabelle 7-4: Untersuchungsergebnisse der Dachkonstruktionen

Bauteil	gemittelter Wassergehalt		lokaler Wassergehalt				Schimmelpilzwachstum	
	U_{\min} [kg/m^3]	U_{\max} [kg/m^3]	Monitor 1		Monitor 2		Monitor 1 [mm]	Monitor 2 [mm]
			U_{\min} [kg/m^3]	U_{\max} [kg/m^3]	U_{\min} [kg/m^3]	U_{\max} [kg/m^3]		
3.1	9,80	10,82	11,85	37,40	12,08	17,40	232,50	60,40
3.2	9,89	10,96	11,66	38,25	17,55	17,55	241,60	67,00
3.3	8,79	10,39	10,67	21,85	10,86	21,65	76,10	72,30
3.4	6,94	9,51	9,35	20,37	9,60	19,95	20,60	0
3.5	10,29	11,18	10,10	40,92	12,01	17,80	304,20	105,10

Die betrachteten Dachkonstruktionen 3.1 bis 3.4 unterliegen durch ihren ausliegenden Schutz gegen Regen in Form der Dacheindeckung nur geringen Schwankungen bei den lokalen Wassergehalten. Jedoch steigt in den kalten Monaten von November bis Februar der Wassergehalt in der äußeren Grenzschicht stark an. In 5 cm Tiefe ist der Einfluss nur noch gering. In den milderen und warmen Monaten von März bis Oktober sind moderate Wassergehalte in den Konstruktionen zu verzeichnen. Exemplarisch sind in den Bildern 7.13 und 7.14 die lokalen Wassergehalte in der Strohballendämmung der Konstruktion 3.1 dargestellt.

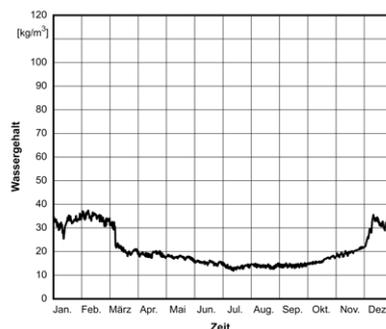


Bild 7-13: Lokaler Wassergehalt an der äußeren Grenzschicht (Monitor 1) der Strohballendämmung der Konstruktion 3.1

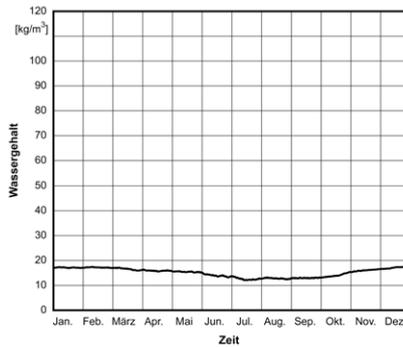


Bild 7-14: Lokaler Wassergehalt in 5 cm Tiefe (Monitor 2) in der Strohballendämmung der Konstruktion 3.1

Der gemittelte Wassergehalt in der Strohballendämmung bewegt sich über das ganze Jahr hinweg auf einem gleichmäßigen Niveau. Nur bei Konstruktion 3.4 ist ein sinusförmiger Verlauf, der sich ähnlich dem Innenklima verhält, zu verzeichnen. Hier ist der gemittelte Wassergehalt in der Strohballendämmung in den kälteren Monaten auch deutlich geringer, vergleiche hierzu die Bilder 7.15 und 7.16.

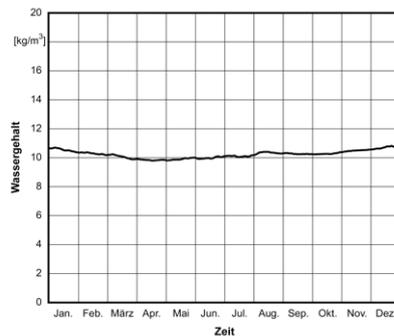


Bild 7-15: Gemittelter Wassergehalt in der Strohballendämmung der Konstruktion 3.1

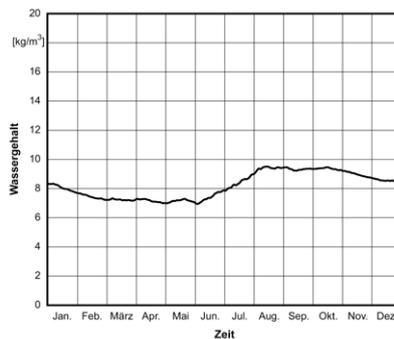


Bild 7-16: Gemittelter Wassergehalt in der Strohballendämmung der Konstruktion 3.4

In der milderen Übergangszeit März bis Mitte Juni, in der die Wassergehalte in den Referenzpunkten bei Konstruktion 3.1 bis 3.3 größer sind als bei Konstruktion 3.4 (siehe Bild 7.17), kommt es zu Schimmelpilzwachstum. Lediglich bei Konstruktion 3.4 kommt es in 5 cm Tiefe in der Strohballendämmung zu keiner Schimmelpilzbildung. In dieser Konstruktion sind die Wassergehalte durch die innen aufgebraute OSB-Platte in der Strohballendämmung auch deutlich geringer als bei den anderen, siehe Bilder 7.17 und 7.18. Das Risiko einer Schimmelpilzbildung ist jedoch bei den Konstruktionen 3.1 bis 3.3 gering und dadurch können sich diese Konstruktionen bei weitergehenden Untersuchungen als tauglich erweisen.

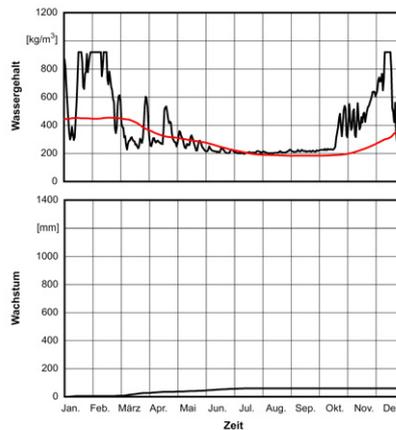


Bild 7-17: Schimmelpilzwachstum in 5 cm Tiefe in der Strohballendämmung der Konstruktion 3.1

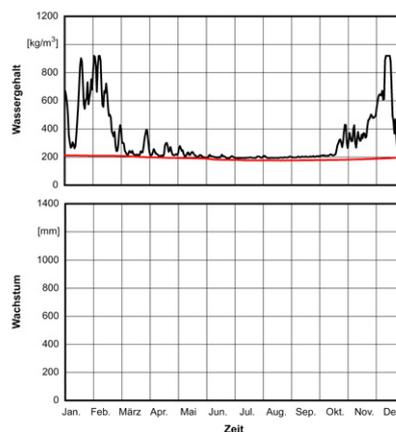


Bild 7-18: Schimmelpilzwachstum in 5 cm Tiefe in der Strohballendämmung der Konstruktion 3.4

Alle Konstruktionen lagern in den Monaten Februar, Juni, Juli und September bis November mehr Wasser in der Strohballendämmung ein als sie abgeben. Jedoch liegt die maximale Wasseraufnahme bzw. -abgabe bei maximal $3,94 \text{ kg/m}^3$.

Die Konstruktion 3.5, die einzige Konstruktion mit einer fehlenden „Überdämmung“ auf der Außenseite in Form einer Holzfaserplatte, verzeichnet in der Strohballendämmung und den Referenzpunkten niedrigere Temperaturen. Durch diese kommt es in der Konstruktion zu höheren Wassergehalten als bei dem Bauteil 3.2, die auf der Außenseite eine „Überdämmung“ in Form einer Holzfaserplatte haben. Besonders in der äußeren Grenzschiicht sind die höheren lokalen Wassergehalte ersichtlich. Hier kommt es beispielsweise bei der Konstruktion 3.5 im Februar und im Dezember zu Wassergehalten bis zu 41 kg/m^3 , siehe Bild 7-19.

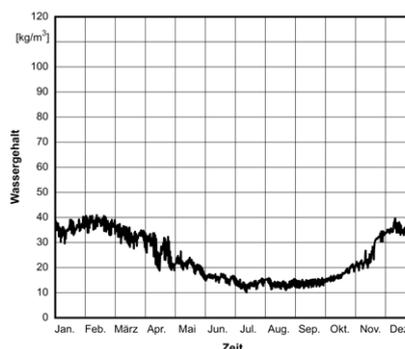


Bild 7-19: Lokaler Wassergehalt in der äußeren Grenzschiicht der Strohdämmung der Konstruktion 3.5

7.5 Flachdächer

Bei den Flachdachkonstruktionen schwanken die gemittelten Wassergehalte in der Strohballendämmung zwischen $7,89 \text{ kg/m}^3$ und maximal $14,01 \text{ kg/m}^3$. Der lokale Wassergehalt an der äußeren Grenzschicht der Strohballendämmung schwankt zwischen $5,64 \text{ kg/m}^3$ und $48,2 \text{ kg/m}^3$ und in 5 cm Tiefe zwischen $7,24 \text{ kg/m}^3$ und $16,62 \text{ kg/m}^3$. Bei der Strohballendämmung beträgt das Schimmelpilzwachstum am Jahresende außen zwischen ca. 73,0 mm und maximal 167,6 und innerhalb der Strohballendämmung zwischen ca. 4,7 mm und maximal 30,8 mm, wohingegen bei Bauteil 4.4 allein an Monitorposition 2 kein Schimmelpilzwachstum auftritt.

Tabelle 7-5: Untersuchungsergebnisse der Flachdachkonstruktionen

Bauteil	gemittelter Wassergehalt		lokaler Wassergehalt				Schimmelpilzwachstum	
	U_{\min} [kg/m ³]	U_{\max} [kg/m ³]	Monitor 1		Monitor 2		Monitor 1 [mm]	Monitor 2 [mm]
			U_{\min} [kg/m ³]	U_{\max} [kg/m ³]	U_{\min} [kg/m ³]	U_{\max} [kg/m ³]		
4.1	12,50	13,55	6,63	27,64	7,88	15,50	126,30	4,70
4.2	12,29	14,00	6,48	25,74	7,83	15,65	110,20	7,22
4.3	12,52	14,01	5,96	34,26	7,63	15,72	137,40	10,70
4.4	12,97	13,85	5,64	48,20	7,24	16,62	167,60	30,80
4.5	7,89	10,80	7,86	18,56	8,70	14,77	73,00	0

Die Flachdachkonstruktionen haben aufgrund der aufliegenden Dachbegrünung und Substratschicht eine Dämpfung der Temperaturschwankung in der Strohballendämmung. Infolge der geringen Temperaturen kommt es in der kalten Jahreszeit zu hohen lokalen Wassergehalten, siehe Bild 7.20, jedoch bleibt der gemittelte Wassergehalt relativ konstant und schwankt mit einer kleinen Amplitude um die $13,5 \text{ kg/m}^3$, siehe Bild 7-20. Einzige Ausnahme bildet die Konstruktion 4.5, die durch ihre Weichfaserplatte einen geringeren Wassergehalt sowohl in den lokal betrachteten Positionen als auch im gemittelten aufweist, siehe Bilder 7.20 und 7.21.

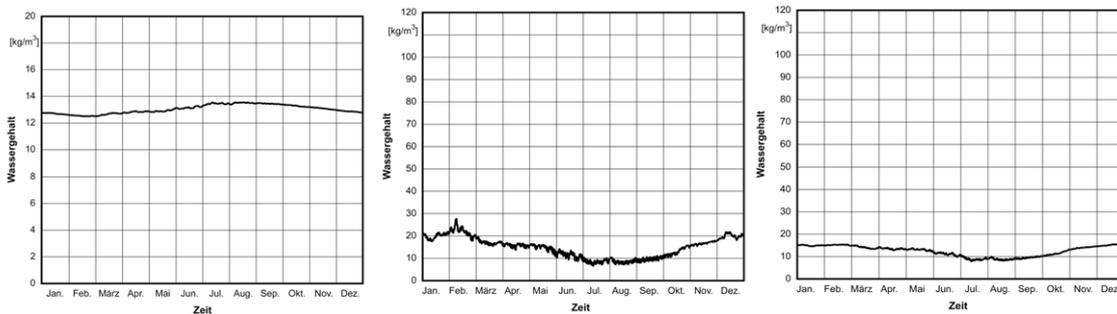


Bild 7-20: Gemittelter Wassergehalt in der Strohballendämmung der Konstruktion 4.1 (links); Lokaler Wassergehalt der Konstruktion in der äußeren Grenzschicht (mitte) und in 5 cm Tiefe (rechts)

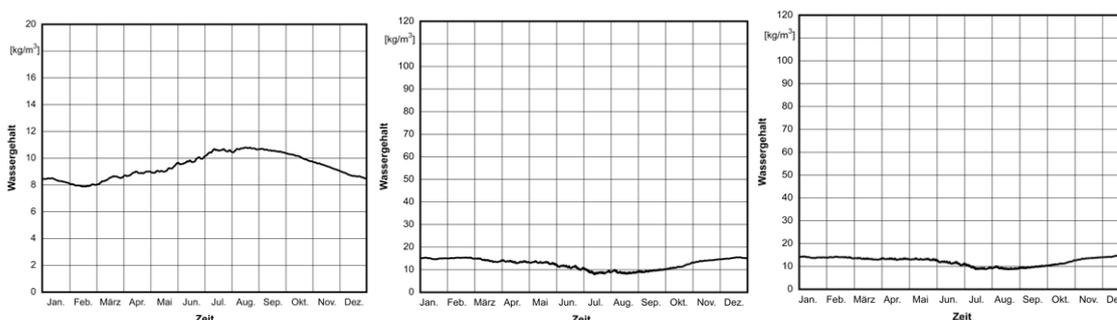


Bild 7-21: Gemittelter Wassergehalt in der Strohballendämmung der Konstruktion 4.5 (links); Lokaler Wassergehalt der Konstruktion in der äußeren Grenzschicht (mitte) und in 5 cm Tiefe (rechts)

Bis auf Konstruktion 4.5 kommt es bei allen Konstruktionen in den äußeren Bereichen der Strohballendämmung in den Monaten Februar bis Ende Mai zu Schimmelpilzwachstum mit Werten zwischen 110 mm und 167 mm. In diesem Zeitraum kommt es auch in 5 cm Tiefe zu Schimmelpilzwachstum, mit maximal 30 mm. Bei Konstruktion 4.5 ist das Schimmelpilzwachstum deutlich geringer ausgeprägt. So kommt es in der äußeren Grenzschicht zu 73 mm und in 5 cm Tiefe zu keinem Schimmelpilzwachstum.

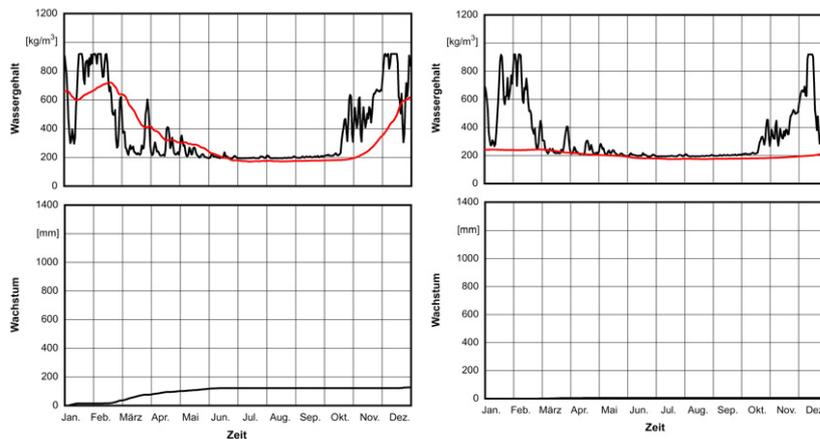


Bild 7-22: Schimmelpilzwachstum der Konstruktion 4.1; links in äußerer Grenzschicht und rechts in 5 cm Tiefe in der Strohballendämmung

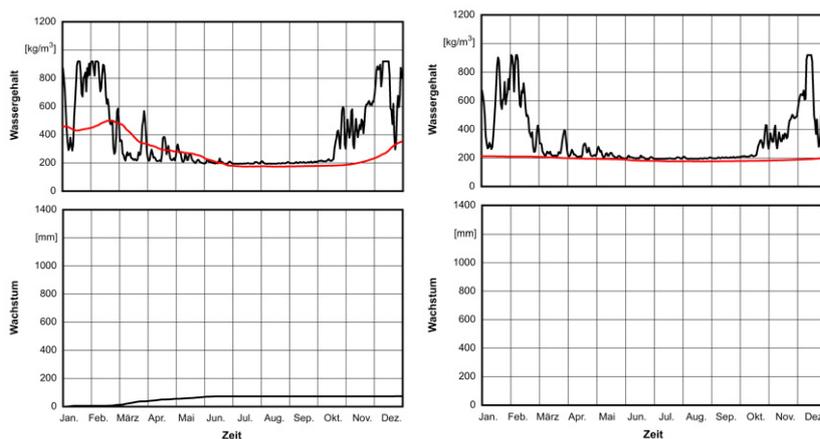


Bild 7-23: Schimmelpilzwachstum der Konstruktion 4.5; links in äußerer Grenzschicht und rechts in 5 cm Tiefe in der Strohballendämmung

Die Konstruktionen haben das ganze Jahr über nur eine geringe Wasseraufnahme bzw. -abnahme zu verzeichnen, die bei den Konstruktionen 4.1 bis 4.4 bei maximal $2,5 \text{ kg/m}^3$ und bei Konstruktion 4.5 bei $3,5 \text{ kg/m}^3$ liegt.

7.6 Geschossdecken

Bei den Deckenkonstruktionen schwanken die gemittelten Wassergehalte in der Strohballendämmung außen zwischen $5,32 \text{ kg/m}^3$ und maximal $14,95 \text{ kg/m}^3$. Der lokale Wassergehalt der Strohballendämmung schwankt außen zwischen $4,95 \text{ kg/m}^3$ und $19,13 \text{ kg/m}^3$ und in 5 cm Tiefe zwischen $5,30 \text{ kg/m}^3$ und $19,13 \text{ kg/m}^3$. Am Ende des Jahres kommt es im Randbereich der Strohballendämmung nur zu geringer Schimmelpilzbildung und in 5 cm Tiefe zu keiner.

Tabelle 7-6: Untersuchungsergebnisse der Deckenkonstruktionen

Bauteil	gemittelter Wassergehalt		lokaler Wassergehalt				Schimmelpilzwachstum	
	U _{min} [kg/m ³]	U _{max} [kg/m ³]	Monitor 1		Monitor 2		Monitor 1 [mm]	Monitor 2 [mm]
			U _{min} [kg/m ³]	U _{max} [kg/m ³]	U _{min} [kg/m ³]	U _{max} [kg/m ³]		
5.1	5,53	14,95	5,09	19,13	5,49	19,13	4,24	0
5.2	5,32	14,94	4,95	18,26	5,30	12,79	1,96	0
5.3	5,38	14,90	5,25	15,72	5,35	15,79	0	0

In den Deckenkonstruktionen sind die Wassergehalte aufgrund hoher Temperaturen infolge unbeheizter Dachräume sowohl in den Referenzpunkten als auch in der gesamten Strohballendämmung gering.

7.7 Außenwände aus Großballen

Die Ergebnisse der Wandkonstruktionen aus Großballen zeigen, dass sich an den Referenzpunkten („Monitor 1“ Übergang Strohballenrand Putzschicht, „Monitor 2“ 5 cm Abstand von Putzschicht) ein höheres Schimmelpilzwachstum einstellt. Der gemittelte Wassergehalt schwankt bei Konstruktion 6.1 zwischen 14,47 kg/m³ und 16,17 kg/m³ und bei Konstruktion 6.2 zwischen 8,05 kg/m³ und 8,7 kg/m³. Die lokalen Wassergehalte schwanken bei Konstruktion 6.1 in der äußeren Grenzschicht zwischen 15,27 kg/m³ und 112,48 kg/m³ und bei 6.2 zwischen 10,54 kg/m³ und 18,16 kg/m³. In 5 cm Tiefe variieren die Werte bei Konstruktion 6.1 zwischen 37,52 kg/m³ und 47,37 kg/m³ und bei Konstruktion 6.2 zwischen 11,42 kg/m³ und 16,29 kg/m³. Das Schimmelpilzwachstum ist bei der Konstruktion 6.1 ohne Wetterschutz am größten und setzt sich bis ans Jahresende bis zu einem Wert von ca. 945 mm in der Grenzschicht und bei ca. 678 mm in 5 cm Tiefe fort. Bei der Konstruktion mit Wetterschutz ist ein Schimmelpilzwachstum von ca. 29 mm in der Grenzschicht und ca. 6 mm in 5 cm Tiefe zu verzeichnen.

Tabelle 7-7: Untersuchungsergebnisse der Wandkonstruktion aus Großballen

Bauteil	gemittelter Wassergehalt		lokaler Wassergehalt				Schimmelpilzwachstum	
	U _{min} [kg/m ³]	U _{max} [kg/m ³]	Monitor 1		Monitor 2		Monitor 1 [mm]	Monitor 2 [mm]
			U _{min} [kg/m ³]	U _{max} [kg/m ³]	U _{min} [kg/m ³]	U _{max} [kg/m ³]		
6.1	14,47	16,17	15,27	112,48	37,52	47,37	945,65	676,80
6.2	8,05	8,70	10,54	18,16	11,42	16,29	29,46	6,40

Bei Wänden aus Strohballen kommt es bei Großballen zu einem höheren Schimmelpilzwachstum als bei Kleinballen.

Die Temperaturen in den lokal betrachteten Punkten liegen bei Großballen deutlich unter den Temperaturen der 36 cm dicken Kleinballen. Somit kommt es zu einem höheren lokalen und gemittelten Wassergehalt in der Strohballendämmung. Durch diese höheren Wassergehalte kommt es lokal auch zu mehr Schimmelpilzwachstum, siehe Bild 7-24. So hat die Konstruktion 6.1 in der äußeren Grenzschicht ein Schimmelpilzwachstum von ca. 945 mm und in 5 cm Tiefe von 676 mm. Die Konstruktion 6.2 mit Wetterschutz hat ein deutlich niedrigeres Wachstum zu verzeichnen und erweist sich zukünftig möglicherweise als geeignet.

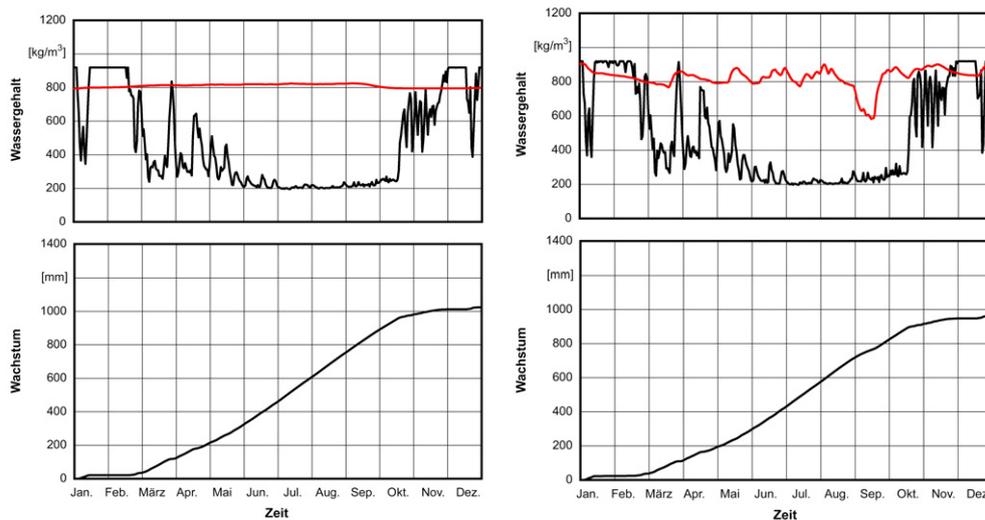


Bild 7-24: Schimmelpilzwachstum der Konstruktion 6.1, links in der äußeren Grenzsicht und rechts in 5 cm Tiefe in der Strohballendämmung

7.8 Einfluss der Einbaufeuchte

Bei Konstruktion 1.1.5a ist erkennbar, dass sich der gemittelte Wassergehalt nach 2 Jahren im Ausgleich befindet, jedoch der lokale Wassergehalt erst nach 4 Jahren. Das anfängliche Schimmelpilzwachstum durch die erhöhte Anfangsfeuchte trifft nur in 5 cm Tiefe in der Strohballendämmung auf. Hier kommt es zu keinem weiteren Wachstum. Bei Konstruktion 1.1 kommt es hingegen in den Referenzpunkten in der Strohballendämmung zu weiterem Wachstum. Der gemittelte und der lokale Wassergehalt ist bei Konstruktion 1.1 nach 2 Jahren im eingeschwungenen Zustand.

Tabelle 7-8: Untersuchungsergebnisse der Langzeitbewertung

Bauteil	Jahr	gemittelter Wassergehalt		lokaler Wassergehalt				Schimmelpilzwachstum	
		u _{min} [kg/m ³]	u _{max} [kg/m ³]	Monitor 1		Monitor 2		Monitor 1 [mm]	Monitor 2 [mm]
				u _{min} [kg/m ³]	u _{max} [kg/m ³]	u _{min} [kg/m ³]	u _{max} [kg/m ³]		
1.1	1.a	5,23	15,21	12,67	112,48	14,69	22,33	921,84	698,38
	2.a	5,10	15,19	12,63	112,48	16,64	22,32	1867,21	1375,74
	3.a	5,10	15,19	12,63	112,48	16,64	22,32	2812,58	2053,07
	4.a	5,10	15,19	12,63	112,48	16,64	22,32	3757,93	2730,68
1.1.5a	1.a	8,50	15,00	8,28	28,54	9,75	20,10	96,05	54,97
	2.a	7,15	9,10	6,88	19,10	7,67	13,98	118,33	54,97
	3.a	7,11	9,09	6,75	17,88	7,52	13,01	139,34	54,97
	4.a	7,11	9,09	6,75	17,83	7,51	12,94	160,33	54,97

Bei den Konstruktionen 1.1 und 1.1.5a zeigt sich, dass sich Schimmelpilzwachstum im Ausgleichzustand im Jahreszyklus wiederholt. Bei der Betrachtung des ersten Jahres fällt jedoch auf, dass sich der Anfangsfeuchtegehalt bzw. die sich in der Konstruktion befindliche Baufeuchte auf das Schimmelpilzwachstum deutlich auswirkt. So ist bei Konstruktion 1.1 erkennbar, dass die Einbaufeuchte niedriger ist als die Ausgleichsfeuchte in den folgenden Jahren. Bei Konstruktion 1.1.5a hingegen kommt es im ersten Jahr zu stärkerem Schimmelpilzwachstum als in den folgenden, siehe Bilder 7.25 und 7.26.

Bei einer anfänglichen, hohen Baufeuchte kann es somit zu Schimmelpilzwachstum kommen. Daher muss bei der Errichtung von Bauwerken darauf geachtet werden, dass der Anfangsfeuchtegehalt in der Bauphase nicht zu hoch ist.

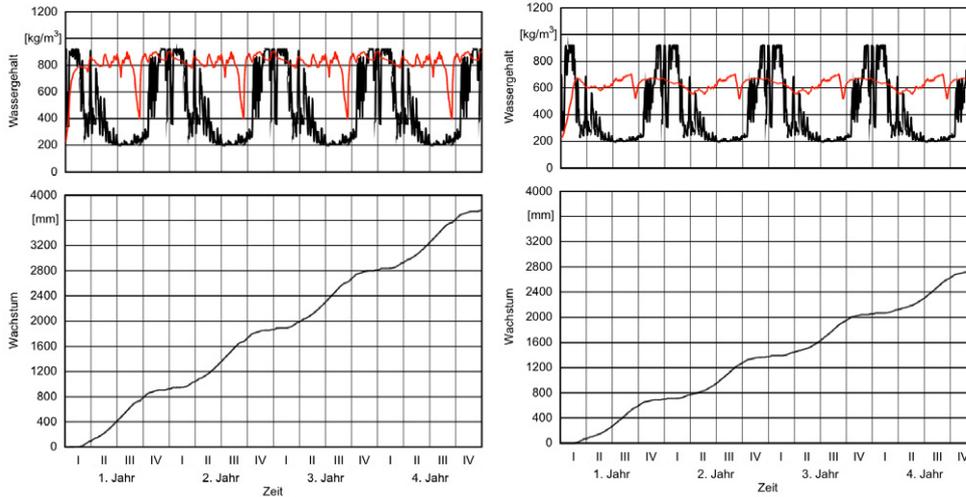


Bild 7-25: Schimmelpilzwachstum bei der Konstruktion 1.1 über einen Zeitraum von 4 Jahren (links Schichtgrenze zum Außenputz, rechts 5 cm Tiefe)

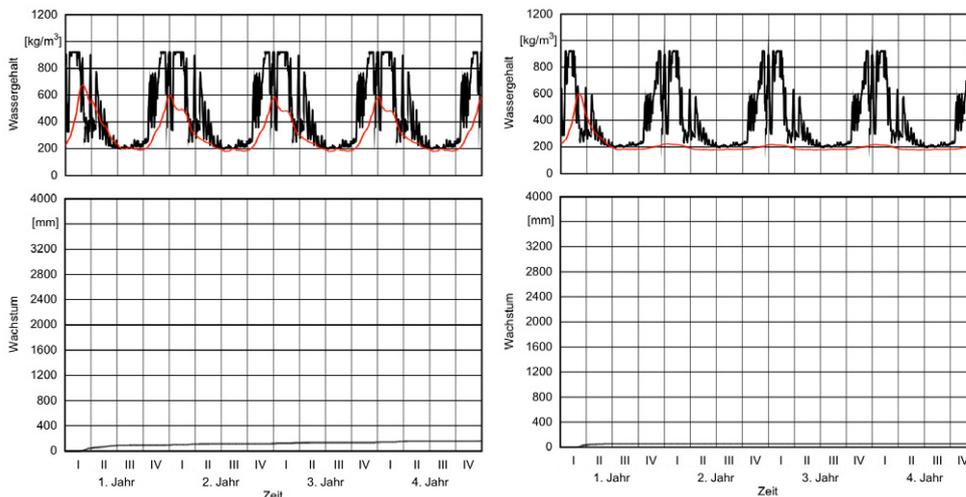


Bild 7-26: Schimmelpilzwachstum bei der Konstruktion 1.1.5a über einen Zeitraum von 4 Jahren (links Schichtgrenze zum Außenputz, rechts 5 cm Tiefe)

7.9 Bewertung der Untersuchungsergebnisse

Um eine Bewertung des Feuchteschutzes der untersuchten Bauteile vornehmen zu können, ist es notwendig, Bewertungskriterien herzuleiten, siehe Kapitel 6.

Bei der vorliegenden Arbeit wird auf das Bewertungskriterium aus [3], [4] zurückgegriffen sowie eine Erweiterung vorgenommen. Liegt keine Schimmelpilzwachstum vor, wird die Konstruktion wie bei [3], [4] als geeignet eingestuft.

Bei einer Schimmelpilzbildung bis 150 mm im Jahr besteht bei genauer Betrachtung die Möglichkeit, dass sich die Konstruktion unter baupraktischen Bedingungen als geeignet erweist. Die Ergebnisse mit den jeweiligen Bewertungen sind in der Tabelle 7-9 zusammengefasst.

Tabelle 7-9: Bewertung der Konstruktionen

Bauteil	Schimmelpilzwachstum in Monitorposition 2 [mm]	Bewertung
1.1	676,8	nicht geeignet
1.1.2	671,1	nicht geeignet
1.1.3	651,0	nicht geeignet
1.1.4	651,5	nicht geeignet
1.1.5	0	geeignet
1.1.5a	0	geeignet
1.1.5b	0	geeignet
1.2	41,1	ggfs. geeignet
1.2.2	43,2	ggfs. geeignet
1.2.3	0	geeignet
1.2.4	58,1	ggfs. geeignet
1.3.1	185,6	nicht geeignet
1.3.2	195,3	nicht geeignet
1.3.4	1016,8	nicht geeignet
1.4	488,4	nicht geeignet
1.4.1	254,8	nicht geeignet
1.5.1	1024,4	nicht geeignet
1.5.2	1068,3	nicht geeignet
2.1	818,1	nicht geeignet
2.2	689,3	ggfs. geeignet
2.3	15,8	ggfs. geeignet
2.4	792,8	nicht geeignet
2.5	215,7	nicht geeignet
2.6	520,4	ggfs. geeignet
3.1	60,4	ggfs. geeignet
3.2	67,0	ggfs. geeignet
3.3	72,3	ggfs. geeignet
3.4	0	geeignet
3.5	105,1	ggfs. geeignet
4.1	4,7	ggfs. geeignet
4.2	7,22	ggfs. geeignet
4.3	10,7	ggfs. geeignet
4.4	30,8	ggfs. geeignet
4.5	0	geeignet
5.1	0	geeignet
5.2	0	geeignet
5.3	0	geeignet
6.1	676,8	nicht geeignet
6.2	6,4	ggfs. geeignet

Die Wandkonstruktionen ohne ausreichenden Regenschutz sind aufgrund der hohen Wassergehalte ungeeignet. Es treten zu hohe Wachstumsraten bei den Schimmelpilzen auf. Die Konstruktionen mit einer zusätzlichen außenseitigen „Überdämmung“ mittels einer Holzfaserplatte weisen demgegenüber ein geringeres Schimmelwachstum auf, da die Konstruktionen durch die höheren Temperaturen weniger gute Voraussetzungen für dessen Wachstum bieten.

Die Konstruktionen mit einer Innendämmung aus Strohballen ohne außenliegenden Wetterschutz verzeichnen allesamt eine hohes lokales Schimmelpilzwachstum und hohe gemittelte und lokale Wassergehalte.

Bei Konstruktionen mit Wetterschutz kommt es zu geringeren lokalen und gemittelten Wassergehalten in der Strohballendämmung. Durch diese geringeren Wassergehalte kommt es in der Folge zum geringeren Wachstum von Schimmelpilz.

Die Konstruktionen ohne Wetterschutz sind durch das hohe Schimmelpilzwachstum nicht für die Praxis geeignet. Bei Konstruktionen mit Wetterschutz kommt es in 5 cm Tiefe lediglich zu geringer Schimmelpilzbildung. Diese Konstruktionen könnten sich zukünftig in der Praxis bewähren.

Die mit Strohballen ertüchtigten Kalksandstein-Konstruktionen erweisen sich aufgrund ihres hohen Schimmelpilzwachstums in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung als ungeeignet.

Bei den Konstruktionen mit einer äußeren „Überdämmung“ der Strohballenschicht kommt es zwar zu einer Schimmelpilzbildung in den Referenzpunkten, jedoch zu keinen kritischen hohen Wert. Die Konstruktion mit einer innenliegenden Dampfbremse in Form einer OSB-Platte bleibt sogar schimmelpilzfrei.

Bei allen Wandkonstruktionen bei denen die Strohballendämmung einer freien Bewitterung ausgesetzt ist, kommt es ab Mitte August bis Mitte September sowohl beim gemittelten als auch beim lokalen Wassergehalt zu einer Abnahme durch die intensive Solarstrahlung und die geringe Schlagregenbelastung.

Bei Verwendung von unbehandeltem Lehmputz auf der Außenseite stellt sich ein höherer Wassergehalt ein als bei Konstruktionen mit einem wasserabweisenden Putz.

Die **Dachkonstruktionen** mit einer äußeren „Überdämmung“ könnten sich bei weiteren Untersuchungen als zulässige Konstruktionen erweisen, jedoch um Schimmelpilzwachstum vollends auszuschließen, sollte eine Dampfbremse auf der Innenseite aufgebracht werden.

Die Konstruktionen 4.1 bis 4.4 der **Flachdachkonstruktionen** haben nur wenig Schimmelpilzwachstum in der Monitorposition 2 zu verzeichnen, wohingegen die Konstruktion 4.5 frei von Schimmelpilzwachstum ist. Die Konstruktionen 4.1 bis 4.4 könnten sich dennoch in der Praxis als zuverlässige Konstruktionen bewehren, jedoch kann bei Überdämmung von außen eine Schimmelpilzbildung in der Konstruktion vollständig ausgeschlossen werden.

Die **Deckenkonstruktionen** zu unbeheizten Dachräumen sind hohen Temperaturen aber geringen Luftfeuchten ausgesetzt. Durch diese sind geringe Wassergehalte in der Strohballendämmung vorhanden, die wenig Voraussetzungen für Schimmelpilzwachstum in der Strohballendämmung bieten. Alle Konstruktionen sind geeignet.

Die **Wandkonstruktionen aus Großballen** erweisen sich nur bedingt als tauglich. Bei Konstruktionen die mit einem Wetterschutz versehen sind, kommt es zu einer intensiveren Schimmelpilzbildung als bei den Wänden aus Kleinballen, da die Temperaturen im äußeren Bereich niedriger sind und es somit zu einem höheren Wassergehalt kommt.

Bei hohen Baufeuchten kann es zu Schimmelpilzwachstum kommen. Daher muss bei der Errichtung von Bauwerken darauf geachtet werden, dass der Anfangsfeuchtegehalt in der Bauphase nicht zu hoch ist.

Die monatliche Wasserbilanz der Bauteile zeigt, dass ein Nachweis mit dem Glaserverfahren [DIN 4108-3] nicht möglich ist In vielen Fällen nehmen die Konstruktionen in den warmen Monaten Wasser auf, wohingegen beim Glaserverfahren in den warmen Monaten die Verdunstung erfolgt.

8 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit zum Forschungsbericht „Grundlagen zur bauaufsichtlichen Anerkennung der Strohballenbauweise – Weiterentwicklung der lasttragenden Konstruktion und Optimierung des Feuchteschutzes“ wird das hygrothermische und biohygrothermische Verhalten von Bauteilen aus Strohballen untersucht. Die Berechnungen werden mit dem Programm WUFI 4.1 durchgeführt und die Bewertung mit WUFI-Bio 2.0 vorgenommen.

Im Auftrag des Österreichischen Ökologieinstituts für angewandte Umweltforschung wird in [6] das Wachstum von Schimmelpilzen auf Stroh und Strohwänden untersucht. Bei den Simulationen stellte sich heraus, dass alle ausreichend Schlagregen geschützten eine ausreichende Sicherheit gegen Schimmelpilzbildung bieten.

In [3] und [4] werden zwei unterschiedliche Konstruktionen mit einem Wetterschutz untersucht. Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass durch Anordnung einer raumseitigen Dampfbremse (hier eine OSB-Platte) in Kombination mit einer außen angebrachten Holzfaserplatte das feuchtetechnische Verhalten gegenüber einer Strohballenwand mit Innen- und Außenputz und Holzschalung deutlich verbessert werden kann. An einem kritischen Referenzpunkt innerhalb der Strohschicht tritt kein Schimmelpilzwachstum auf.

Für das Außenklima wird der Klimadatensatz „ibp 1991“ verwendet. Die Klimabedingungen innerhalb des Gebäudes entsprechen Wohnraumverhältnisse mit normaler Feuchtelast. Alle Bauteile sind westorientiert. Fehlende Materialkenngrößen werden aus [9, 10] ergänzt. Die Bewertung des Feuchteschutzes erfolgt anhand der Schimmelpilzwachstumsrate, die mit dem Programm WUFI 4.1 ermittelt wird. Maßgebend sind 2 Referenzpunkte: Monitor 1 und Monitor 2. Hierbei handelt es sich um die äußere Grenzschicht sowie einen Punkt im Abstand von 5 cm vom äußeren Rand der Strohballendämmung.

Für Wände, Dächer, Decken und Flachdachkonstruktionen werden systematische hygrothermische Simulationen durchgeführt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Wandkonstruktionen ohne ausreichenden Regenschutz aufgrund ihrer hohen Wasseraufnahme ohne zusätzliche Maßnahmen ungeeignet sind. Die Konstruktionen mit einer zusätzlichen außenseitigen „Überdämmung“ durch eine Holzfaserplatte weisen demgegenüber nur ein geringeres Schimmelwachstum auf.

Bei den Wandkonstruktionen mit vorgesetzter Holzfaserplatte und vorgesetzter Schalung kommt es in den Referenzpunkten der Strohballendämmung zu keiner oder nur geringer Schimmelpilzbildung.

Alle Konstruktionen mit einer Innendämmung aus Strohballen ohne außenliegendem Wetterschutz verzeichnen hohe gemittelte und lokale Wassergehalte sowie ein hohes lokales Schimmelpilzwachstum. Bei Konstruktionen mit Wetterschutz kommt es zu geringen lokalen und gemittelten Wassergehalten in der Strohballendämmung. Hieraus resultiert ein geringes Wachstum von Schimmelpilz. Bei Konstruktionen mit Wetterschutz kommt es in 5 cm Tiefe zu sehr geringer Schimmelpilzbildung. Derartige Bauteile könnten sich deshalb durchaus in der Praxis bewähren.

Die betrachteten mit Strohballen ertüchtigten Mauerwerkskonstruktionen eignen sich aufgrund ihres hohen Schimmelpilzwachstum in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung nicht.

Die Dachkonstruktionen mit einer zusätzlichen Holzfaserplatte auf der Außenseite könnten sich, obwohl ein geringes Schimmelpilzwachstum zu verzeichnen ist, in der Praxis als tauglich erweisen. Für einen ausreichenden Feuchteschutz ist eine Dampfbremse auf der Innenseite erforderlich.

Die Flachdachkonstruktionen haben nur ein geringes Schimmelpilzwachstum in Monitorposition 2 zu verzeichnen. Die Konstruktionen könnten im praktischen Einsatz sich dennoch als geeignet und zuverlässig herausstellen. Durch Aufbringen einer äußeren Holzfaserplatte kann Schimmelpilzbildung in der Konstruktion vollständig ausgeschlossen werden.

Die Deckenkonstruktionen unter unbeheizten Dachräumen unterliegen nicht den strengen Bedingungen des Außenklimas. Da sich im Dachgeschoss höhere Lufttemperaturen als außen einstellen ergeben sich so geringe Wassergehalte in den betrachteten Bauteilen, dass praktisch keine Schimmelpilzbildung erfolgt. Alle Konstruktionen erweisen sich als geeignet.

Die Wandkonstruktionen aus Großballen sind nur bedingt tauglich. Bei den Konstruktionen, die mit einem Wetterschutz versehen sind, kommt es zu einer höheren Schimmelpilzbildung als bei Wandkonstruktionen aus Kleinballen, da die Temperaturen im Außenbereich geringer sind und es somit zu höheren Wassergehalten kommt. Schimmelpilzfreie Konstruktionen aus Kleinballen weisen bei Verwendung von Großballen Schimmelpilzbildung auf.

Bei hohen Einbaufeuchten kann es während des Trocknungsprozesses zu Schimmelpilzwachstum kommen. Daher muss bei der Errichtung von Bauwerken darauf geachtet werden, dass der Anfangsfeuchtegehalt in der Bauphase nicht zu hoch ist, um Schimmelpilzbildung zu vermeiden.

In der Fortführung der Arbeit sollten messtechnische Untersuchungen an realen Objekten durchgeführt werden. Hierbei sollte anhand von Wetteraufzeichnungen das hygrothermische Verhalten genauer untersucht werden. Weiterhin muss der Einfluss von Lehmputz auf das biohygrische Verhalten auf Stroh untersucht werden.

Grundlage der biohygrothermischen Bewertung ist die Einstufung von Stroh in eine Substratklasse. Die derzeit verfügbaren Substratklassen beschreiben das tatsächliche Verhalten von Stroh nur unzureichend. Ziel weiterer Untersuchungen muss die systematische Bestimmung von Isoplethen für Stroh sein sowie die Verifizierung von Rechenergebnissen mit gemessenen Daten.

Derzeit ist es nicht möglich, Bauteile zu bewerten, die geringe Schimmelpilzwachstumsraten aufweisen. Belastbare Kriterien müssen durch Messungen unter natürlichen Randbedingungen und Weiterentwicklung der Bewertungsmodelle entwickelt werden. Die Schaffung von Bewertungskriterien sollte die zentrale Aufgabe zukünftiger Forschungsvorhaben sein.

9 Literaturverzeichnis

- [1] Klopfer, H.; Lutz, P.; Jenisch, R.; Freymuth, H.; Petzold, K.; Stohrer, M.; Fischer, H. M.; Richter, E.: Lehrbuch der Bauphysik: Schall, Wärme, Feuchte, Licht, Brand, Klima. 5. überarb. Aufl. Teubner Verlag Stuttgart, 2002.
- [2] DIN 4108-5:1981-08, Wärmeschutz im Hochbau – Teil 5: Berechnungsverfahren
- [3] Fraunhofer-Institut für Bauphysik: Feuchtetransport durch Bauteile - Rechnerische Simulation mit Hilfe des Modells WUFI Verfügbar: http://www.hoki.ibp.fhg.de/wufi/grundl_ueberblick.html, Abgerufen am 14.4.2008.
- [4] Dr.-Ing. Krus, M.; Dipl.-Ing. Saur, A.: Untersuchungsbericht IBP-Bericht RKB-13/2005: Feuchtetechnische Untersuchung an einer Wandkonstruktion aus Holzständerwerk mit Strohballenausfachung, Holzkirchen Oktober 2005.

- [5] Dr.-Ing. Krus, M.; Dipl.-Ing. Saur, A.: Untersuchungsbericht IBP-Bericht RKB-09/2005: Feuchtetechnische Untersuchung an einer Wandkonstruktion aus Holzständerwerk mit Strohballenausfachung, Holzkirchen August 2005.
- [6] Dipl.-Ing. Ziegler, T.; Dipl.-Ing. Dr. Gann, M.: Österreicherisches Ökologieinstitut für angewandte Umweltforschung: Wachstum von Schimmelpilzen auf Stroh und Strohwänden, Wien Februar 2004.
- [7] Sedlbauer, K.: Beurteilung von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen. Dissertation Universität Stuttgart (2001).
- [8] Dipl.-Ing. Albrecht, W.; Armstrong, S.: Prüfzeugnis P-BAY08-.2-01/03 des FIW München: Getreidestrohballen, Gräfeling 2003.
- [9] Dipl.-Phys. Sieber, S. C.; Forster, P.: Untersuchungsbericht L1-20/2004 des FIW München: Prüfungen an „Baustrohballen“, Gräfeling 2004.
- [10] DIN V 4108-4: 2004-07, Wärmeschutz und Energieeinsparung von Gebäuden – Teil 4: Wärme- und feuchtetechnische Bemessungswerte.
- [11] Künzel H.M: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation Universität Stuttgart (1994).
- [12] Sedlbauer, K.: Beurteilung von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen – Erläuterung der Methode und Anwendungsbeispiele. Bauphysik 24 (2002), H. 3, S. 167-176.
- [13] Hauser, G.: Rechnerische Vorherbestimmung des Wärmeverhaltens großer Bauten. Dissertation Universität Stuttgart (1977).
- [14] Künzel, H.M. und Schmidt, Th.: Auswahl und Aufbereitung von meteorologischen Datensätzen für Feuchtetransportberechnungen. Tagungsband 10. Bauklimatisches Symposium, Dresden 1999, S. 637-647.

Anhang Projektteil B1 ZUB Hygrothermik

1 Wandkonstruktionen

Bauteil 1.1

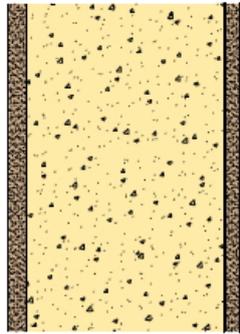


Bild 1.1: Darstellung des Bauteils

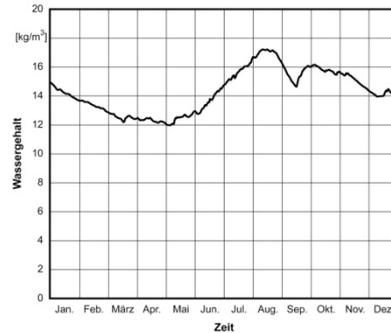


Bild 1.2: Wassergehalt in der Strohballendämmung

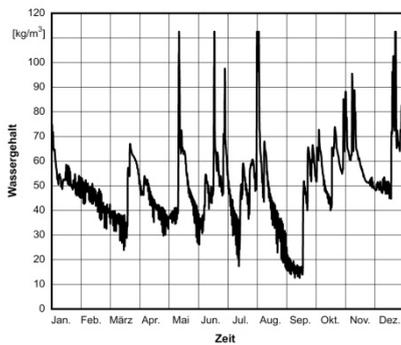


Bild 1.3: Wassergehalt an der äußeren Seite der Strohballendämmung, Monitor 1

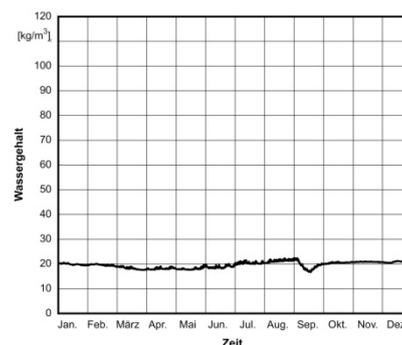


Bild 1.4: Wassergehalt in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung, Monitor 2

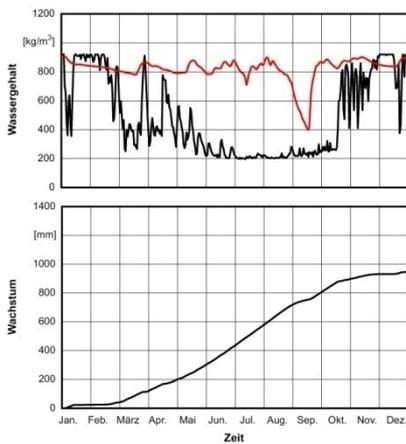


Bild 1.5: Schimmelpilzwachstum an der äußeren Seite der Strohballendämmung

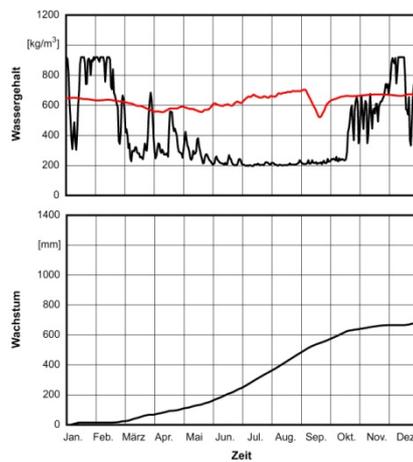
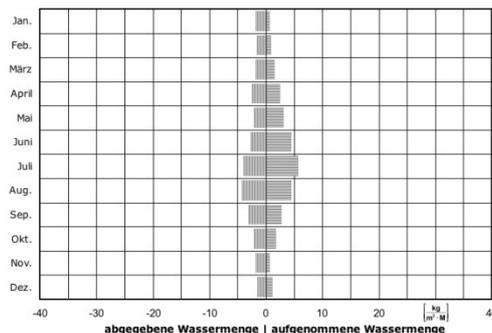


Bild 1.6: Schimmelpilzwachstum in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung

Monat	Aufnahme [kg/(m ³ .M)]	Abgabe [kg/(m ³ .M)]
Januar	0,61	-1,89
Februar	0,92	-1,63
März	1,51	-1,88
April	2,46	-2,44
Mai	3,04	-2,06
Juni	4,40	-2,65
Juli	5,69	-3,90
August	4,48	-4,35
September	2,69	-3,07
Oktober	1,73	-2,03
November	0,64	-1,89
Dezember	1,08	-1,45



Bauteil 1.1.2

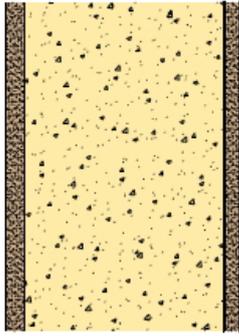


Bild 2.1: Darstellung des Bauteils

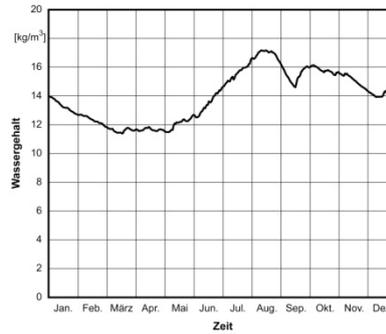


Bild 2.2: Wassergehalt in der Strohballendämmung

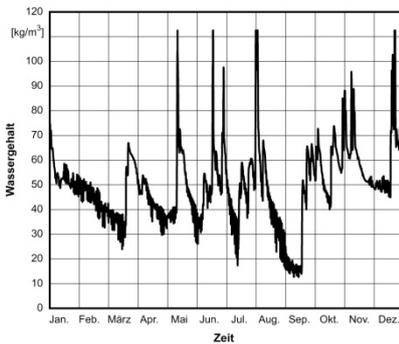


Bild 2.3: Wassergehalt an der äußeren Seite der Strohballendämmung, Monitor 1

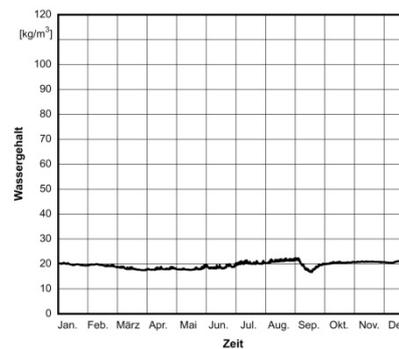


Bild 2.4: Wassergehalt in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung, Monitor 2

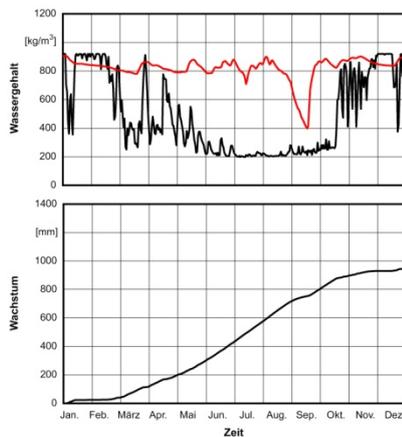


Bild 2.5: Schimmelpilzwachstum an der äußeren Seite der Strohballendämmung

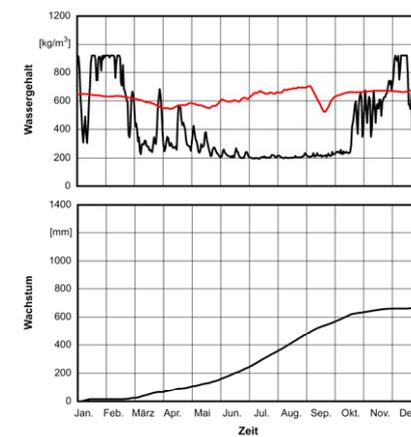
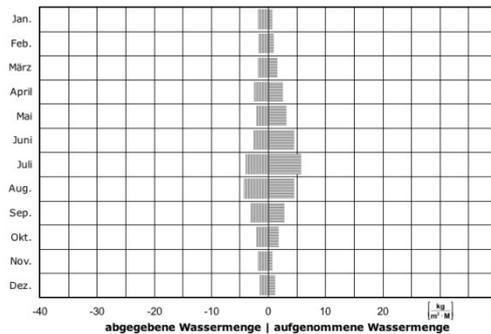


Bild 2.6: Schimmelpilzwachstum in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung

Monat	Aufnahme [kg/(m ³ ·M)]	Abgabe [kg/(m ³ ·M)]
Januar	0,57	-1,90
Februar	0,90	-1,67
März	1,53	-1,85
April	2,47	-2,42
Mai	3,05	-2,03
Juni	4,41	-2,64
Juli	5,70	-3,90
August	4,49	-4,35
September	2,69	-3,07
Oktober	1,73	-2,03
November	0,64	-1,89
Dezember	1,06	-1,48



Bauteil 1.1.3

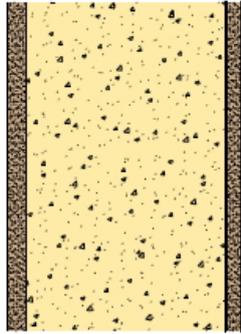


Bild 3.1: Darstellung des Bauteils

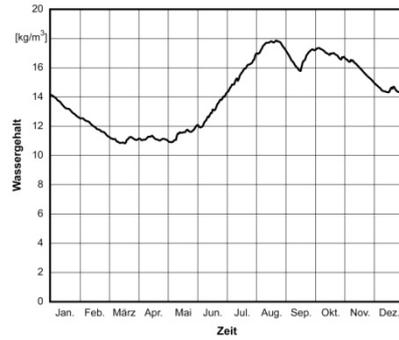


Bild 3.2: Wassergehalt in der Strohballendämmung

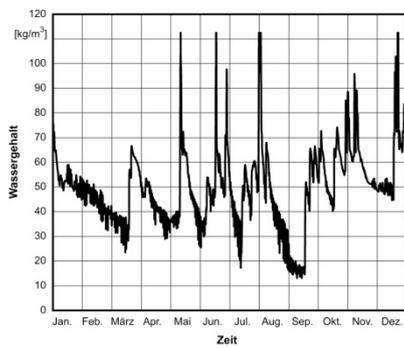


Bild 3.3: Wassergehalt an der äußeren Seite der Strohballendämmung, Monitor 1

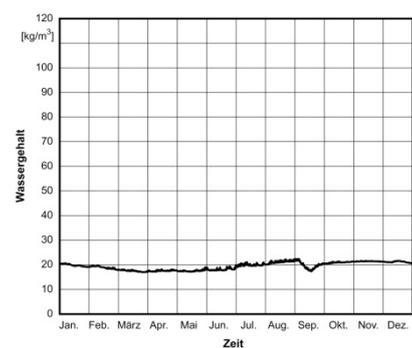


Bild 3.4: Wassergehalt in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung, Monitor 2

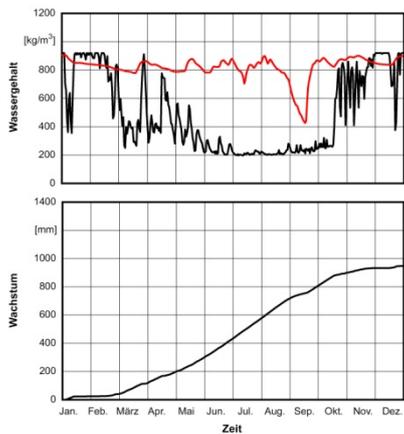


Bild 3.5: Schimmelpilzwachstum an der äußeren Seite der Strohballendämmung

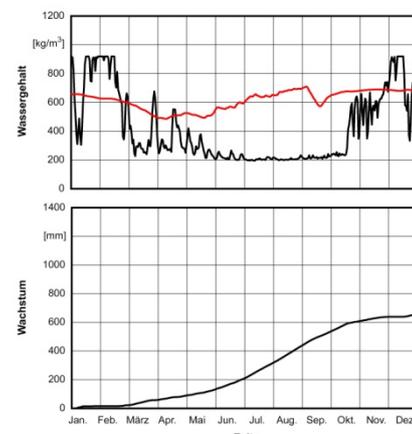
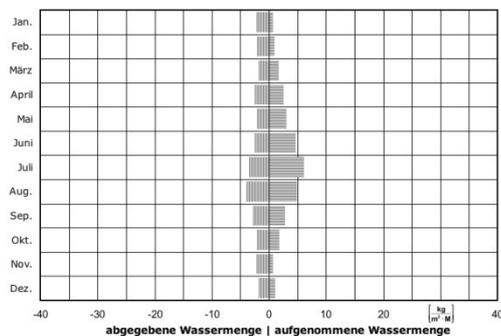


Bild 3.6: Schimmelpilzwachstum in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung

Monat	Aufnahme [kg/(m ³ ·M)]	Abgabe [kg/(m ³ ·M)]
Januar	0,56	-2,20
Februar	0,89	-2,06
März	1,56	-1,88
April	2,46	-2,43
Mai	3,01	-2,07
Juni	4,50	-2,46
Juli	5,98	-3,49
August	4,74	-3,99
September	2,74	-2,86
Oktober	1,69	-2,12
November	0,58	-2,25
Dezember	0,98	-1,89



Bauteil 1.1.4

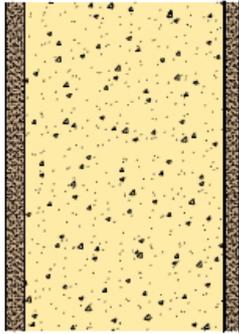


Bild 4.1: Darstellung des Bauteils

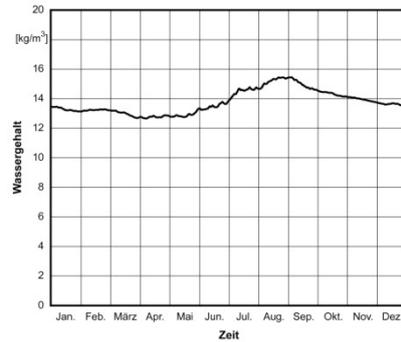


Bild 4.2: Wassergehalt in der Strohballendämmung

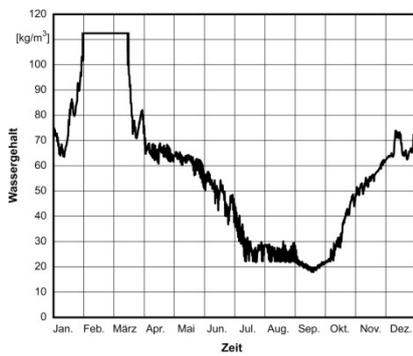


Bild 4.3: Wassergehalt an der äußeren Seite der Strohballendämmung, Monitor 1

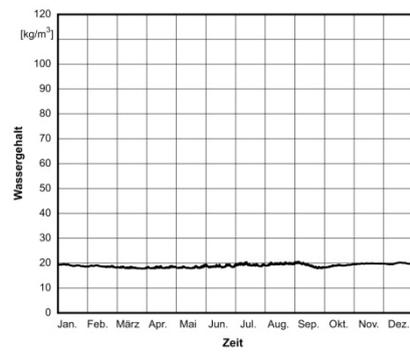


Bild 4.4: Wassergehalt in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung, Monitor 2

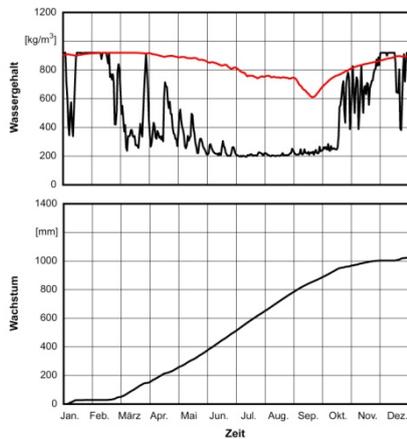


Bild 4.5: Schimmelpilzwachstum an der äußeren Seite der Strohballendämmung

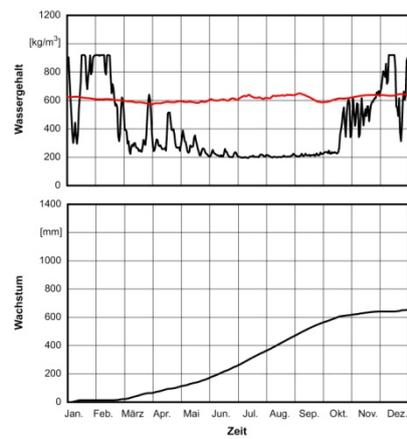
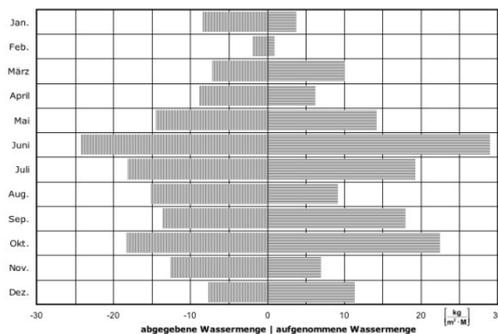


Bild 4.6: Schimmelpilzwachstum in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung

Monat	Aufnahme [kg/(m ³ ·M)]	Abgabe [kg/(m ³ ·M)]
Januar	3,72	-8,38
Februar	0,88	-1,89
März	10,07	-7,20
April	6,16	-8,88
Mai	14,17	-14,53
Juni	28,91	-24,27
Juli	19,15	-18,16
August	9,12	-15,16
September	17,88	-13,64
Oktober	22,35	-18,32
November	6,93	-12,57
Dezember	11,32	-7,66



Bauteil 1.1.5

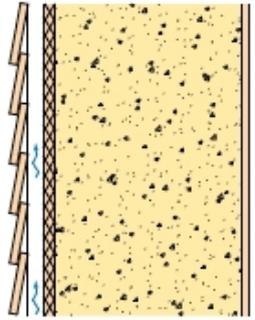


Bild 5.1: Darstellung des Bauteils

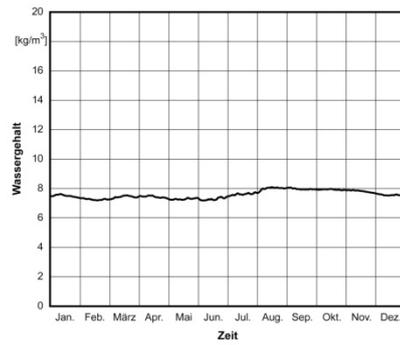


Bild 5.2: Wassergehalt in der Strohballendämmung

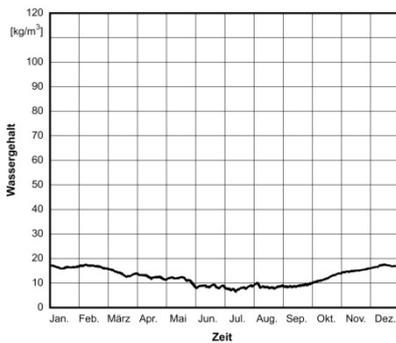


Bild 5.3: Wassergehalt an der äußeren Seite der Strohballendämmung, Monitor 1

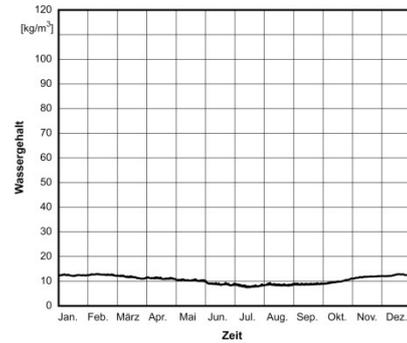


Bild 5.4: Wassergehalt in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung, Monitor 2

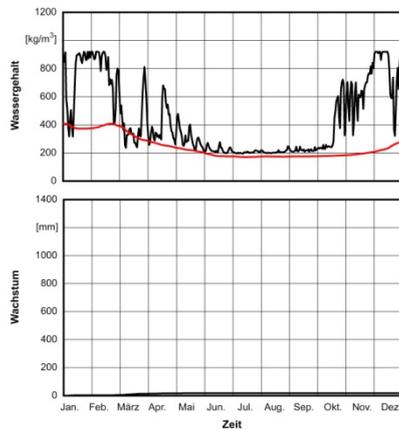


Bild 5.5: Schimmelpilzwachstum an der äußeren Seite der Strohballendämmung

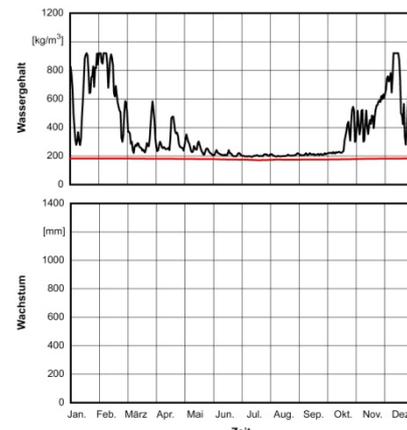
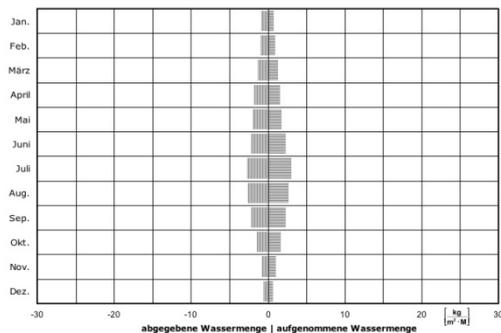


Bild 5.6: Schimmelpilzwachstum in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung

Monat	Aufnahme [kg/(m ³ ·M)]	Abgabe [kg/(m ³ ·M)]
Januar	0,67	-0,87
Februar	0,87	-0,93
März	1,23	-1,32
April	1,53	-1,78
Mai	1,73	-1,95
Juni	2,25	-2,14
Juli	2,94	-2,68
August	2,61	-2,65
September	2,24	-2,12
Oktober	1,56	-1,38
November	0,94	-0,76
Dezember	0,56	-0,57



Bauteil 1.1.5a

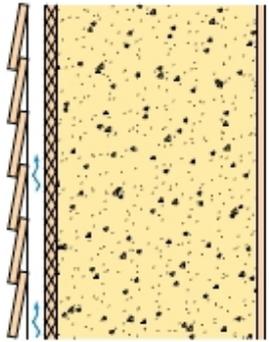


Bild 6.1: Darstellung des Bauteils

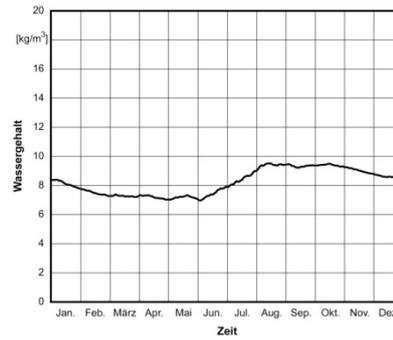


Bild 6.2: Wassergehalt in der Strohballedämmung

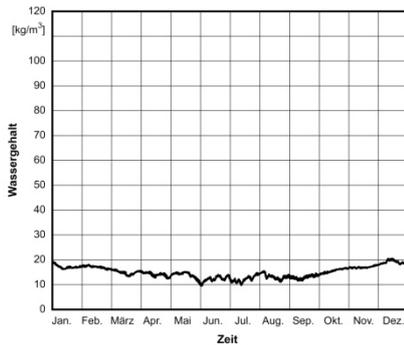


Bild 6.3: Wassergehalt an der äußeren Seite der Strohballedämmung, Monitor 1

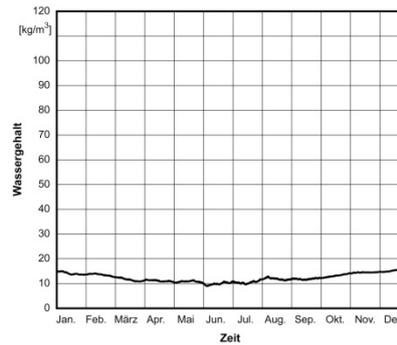


Bild 6.4: Wassergehalt in 5 cm Tiefe der Strohballedämmung, Monitor 2

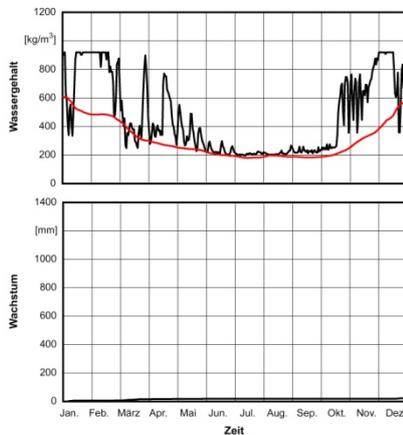


Bild 6.5: Schimmelpilzwachstum an der äußeren Seite der Strohballedämmung

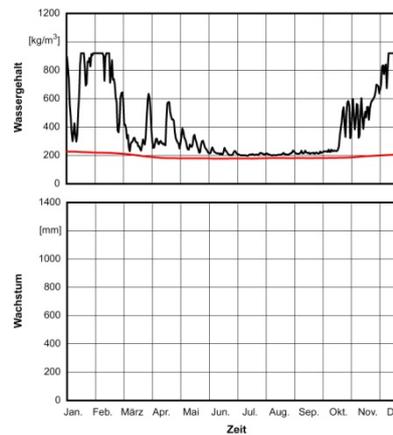
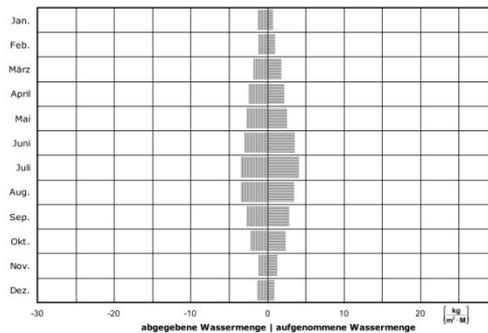


Bild 6.6: Schimmelpilzwachstum in 5 cm Tiefe der Strohballedämmung

Monat	Aufnahme [kg/(m ³ ·M)]	Abgabe [kg/(m ³ ·M)]
Januar	0,68	-1,20
Februar	0,96	-1,12
März	1,80	-1,77
April	2,14	-2,39
Mai	2,55	-2,73
Juni	3,52	-3,01
Juli	4,10	-3,43
August	3,40	-3,46
September	2,77	-2,69
Oktober	2,32	-2,20
November	1,26	-1,14
Dezember	0,92	-1,29



Bauteil 1.1.5b

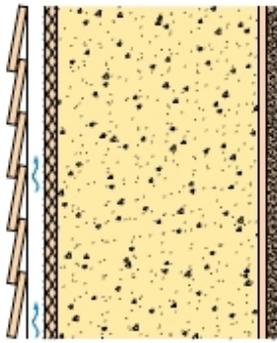


Bild 7.1: Darstellung des Bauteils

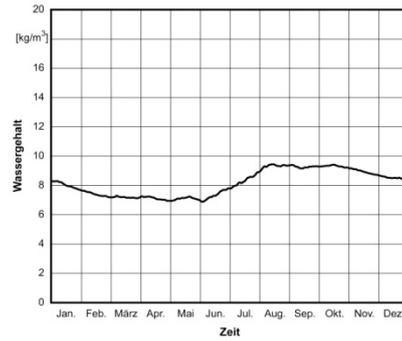


Bild 7.2: Wassergehalt in der Strohballendämmung

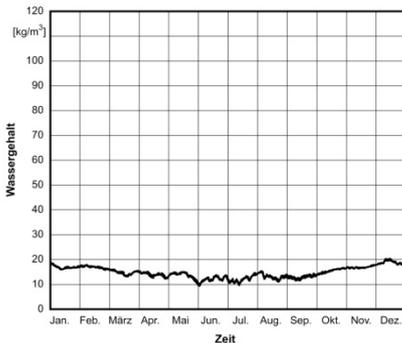


Bild 7.3: Wassergehalt an der äußeren Seite der Strohballendämmung, Monitor 1

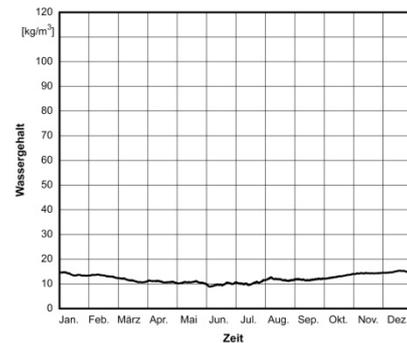


Bild 7.4: Wassergehalt in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung, Monitor 2

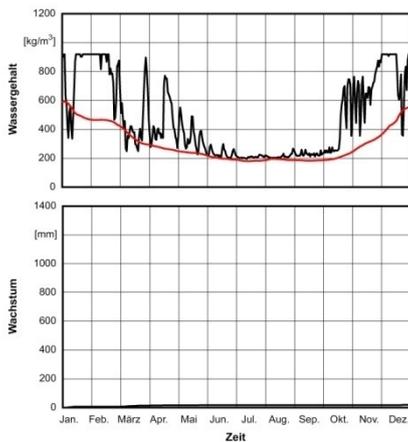


Bild 7.5: Schimmelpilzwachstum an der äußeren Seite der Strohballendämmung

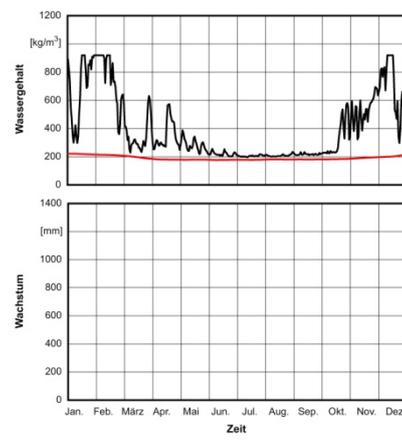
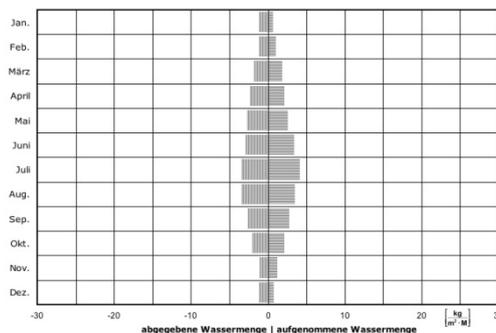


Bild 7.6: Schimmelpilzwachstum in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung

Monat	Aufnahme [kg/(m ³ ·M)]	Abgabe [kg/(m ³ ·M)]
Januar	0,64	-1,14
Februar	0,96	-1,12
März	1,78	-1,74
April	2,10	-2,33
Mai	2,52	-2,68
Juni	3,38	-2,88
Juli	4,10	-3,40
August	3,41	-3,45
September	2,66	-2,60
Oktober	2,10	-2,03
November	1,17	-1,02
Dezember	0,69	-1,11



Bauteil 1.2

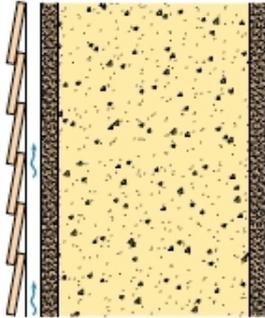


Bild 8.1: Darstellung des Bauteils

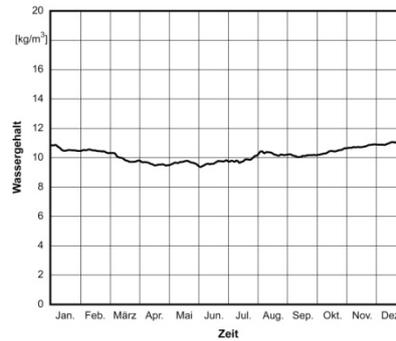


Bild 8.2: Wassergehalt in der Strohballendämmung

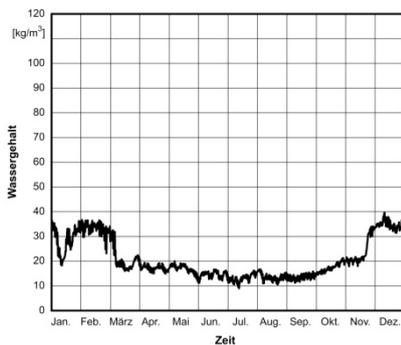


Bild 8.3: Wassergehalt an der äußeren Seite der Strohballendämmung, Monitor 1

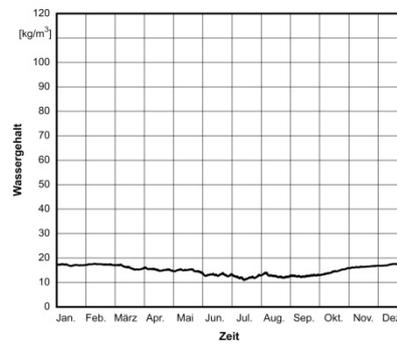


Bild 8.4: Wassergehalt in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung, Monitor 2

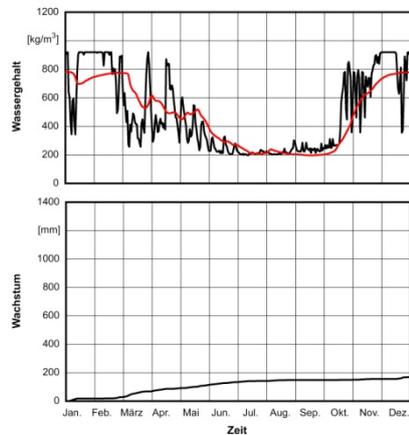


Bild 8.5: Schimmelpilzwachstum an der äußeren Seite der Strohballendämmung

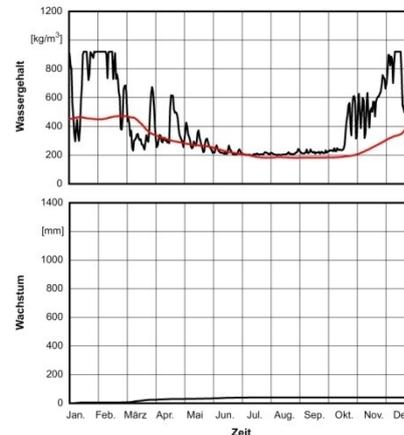
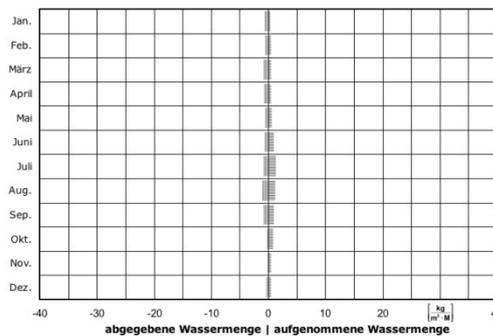


Bild 8.6: Schimmelpilzwachstum in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung

Monat	Aufnahme [kg/(m ³ ·M)]	Abgabe [kg/(m ³ ·M)]
Januar	0,23	-0,63
Februar	0,34	-0,46
März	0,31	-0,85
April	0,40	-0,72
Mai	0,55	-0,48
Juni	0,86	-0,57
Juli	1,21	-0,90
August	1,08	-1,00
September	0,81	-0,85
Oktober	0,70	-0,22
November	0,42	-0,16
Dezember	0,33	-0,38



Bauteil 1.2.2

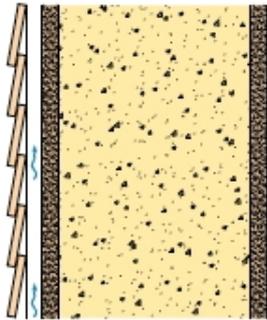


Bild 9.1: Darstellung des Bauteils

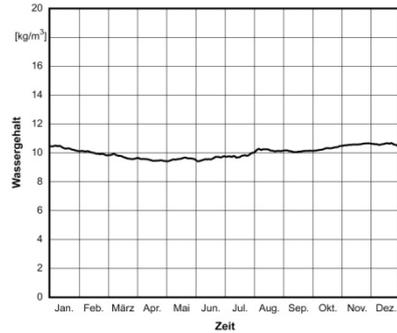


Bild 9.2: Wassergehalt in der Strohballendämmung

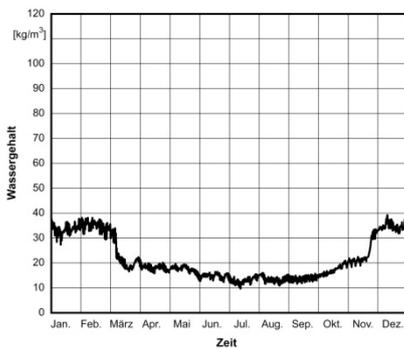


Bild 9.3: Wassergehalt an der äußeren Seite der Strohballendämmung, Monitor 1

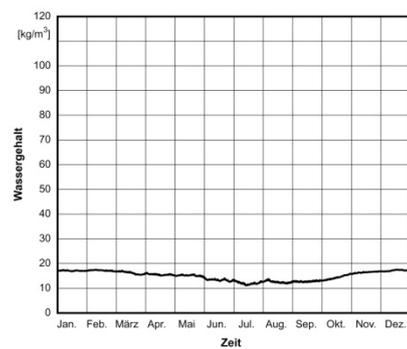


Bild 9.4: Wassergehalt in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung, Monitor 2

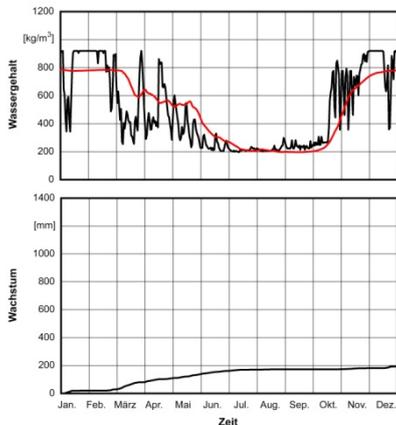


Bild 9.5: Schimmelpilzwachstum an der äußeren Seite der Strohballendämmung

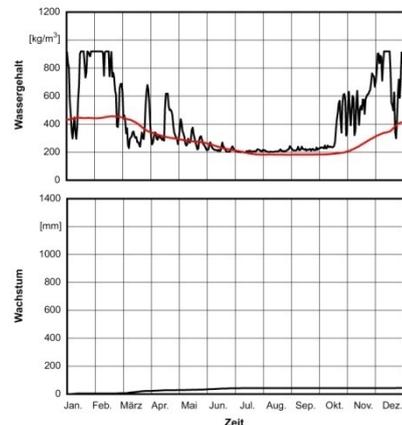
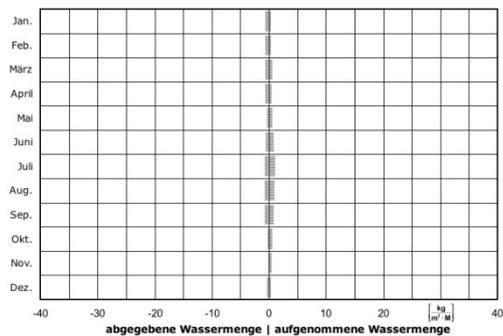


Bild 9.6: Schimmelpilzwachstum in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung

Monat	Aufnahme [kg/(m ³ ·M)]	Abgabe [kg/(m ³ ·M)]
Januar	0,29	-0,66
Februar	0,30	-0,57
März	0,44	-0,67
April	0,40	-0,58
Mai	0,53	-0,39
Juni	0,69	-0,52
Juli	0,95	-0,69
August	0,89	-0,75
September	0,71	-0,72
Oktober	0,53	-0,20
November	0,33	-0,15
Dezember	0,24	-0,41



Bauteil 1.2.3

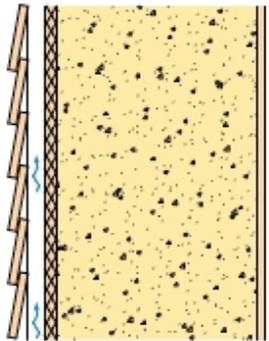


Bild 10.1: Darstellung des Bauteils

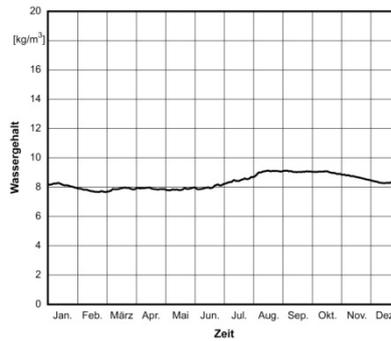


Bild 10.2: Wassergehalt in der Strohballendämmung

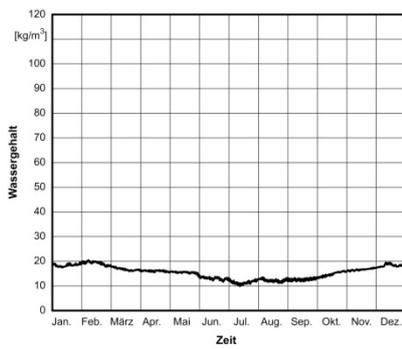


Bild 10.3: Wassergehalt an der äußeren Seite der Strohballendämmung, Monitor 1

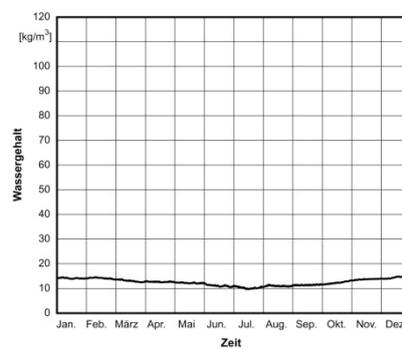


Bild 10.4: Wassergehalt in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung, Monitor 2

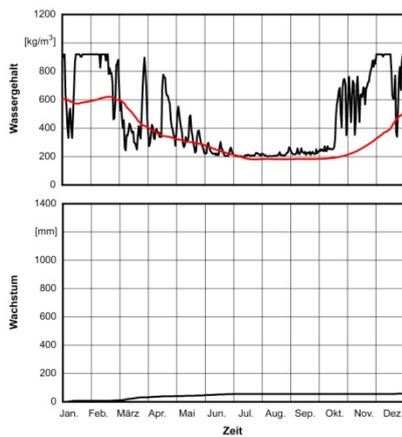


Bild 10.5: Schimmelpilzwachstum an der äußeren Seite der Strohballendämmung

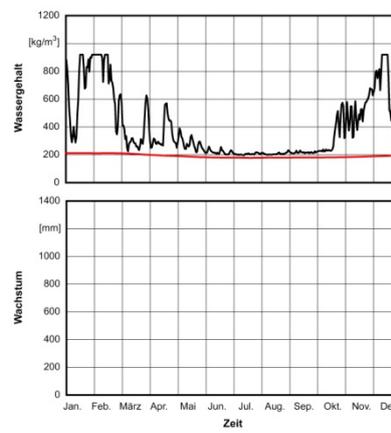
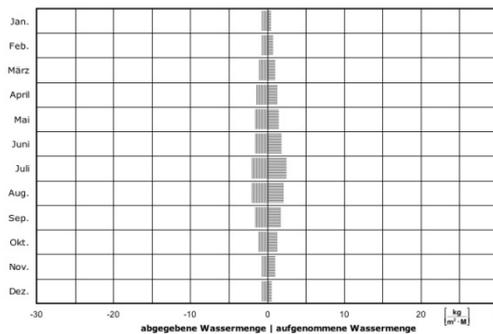


Bild 10.6: Schimmelpilzwachstum in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung

Monat	Aufnahme [kg/(m ³ ·M)]	Abgabe [kg/(m ³ ·M)]
Januar	0,45	-0,68
Februar	0,66	-0,72
März	0,94	-1,07
April	1,20	-1,43
Mai	1,38	-1,58
Juni	1,79	-1,63
Juli	2,41	-2,08
August	2,08	-2,07
September	1,69	-1,63
Oktober	1,28	-1,14
November	0,92	-0,67
Dezember	0,54	-0,66



Bauteil 1.2.4

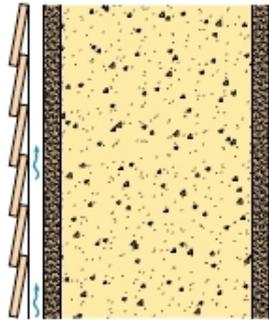


Bild 11.1: Darstellung des Bauteils

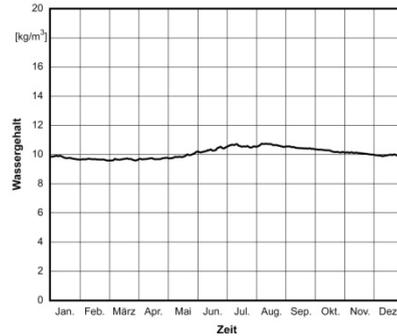


Bild 11.2: Wassergehalt in der Strohballendämmung

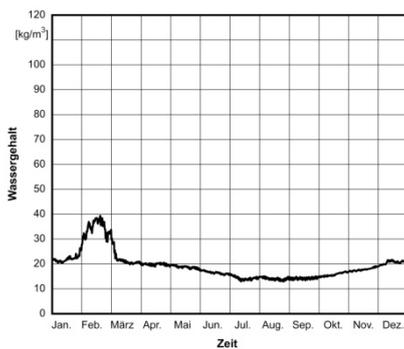


Bild 11.3: Wassergehalt an der äußeren Seite der Strohballendämmung, Monitor 1

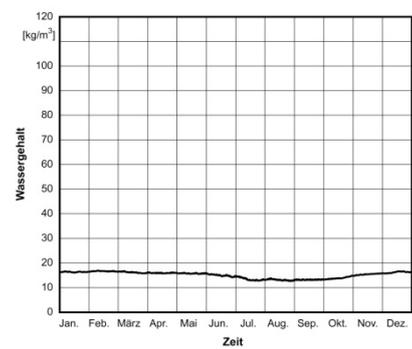


Bild 11.4: Wassergehalt in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung, Monitor 2

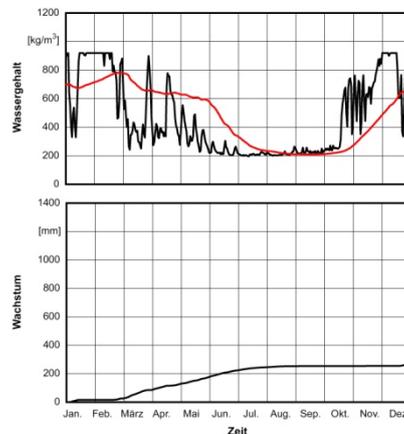


Bild 11.5: Schimmelpilzwachstum an der äußeren Seite der Strohballendämmung

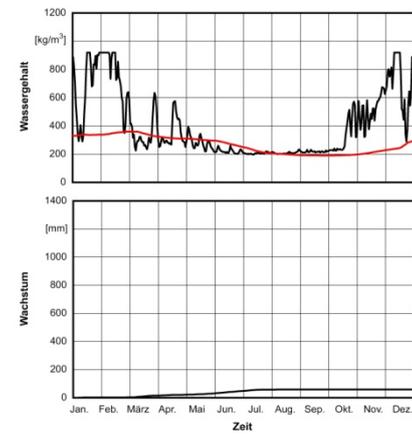
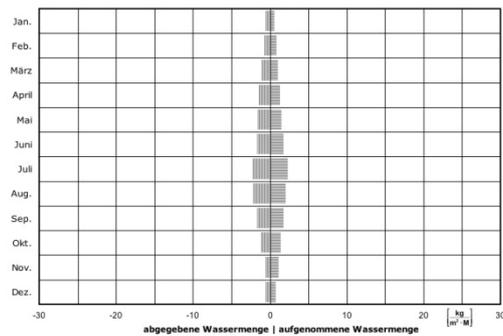


Bild 11.6: Schimmelpilzwachstum in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung

Monat	Aufnahme [kg/(m ³ ·M)]	Abgabe [kg/(m ³ ·M)]
Januar	0,54	-0,63
Februar	0,77	-0,66
März	0,93	-1,09
April	1,21	-1,43
Mai	1,40	-1,60
Juni	1,67	-1,72
Juli	2,24	-2,24
August	2,00	-2,18
September	1,73	-1,70
Oktober	1,33	-1,11
November	1,03	-0,60
Dezember	0,70	-0,63



Bauteil 1.3.1

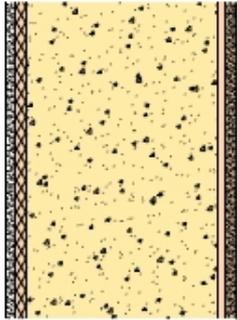


Bild 12.1: Darstellung des Bauteils

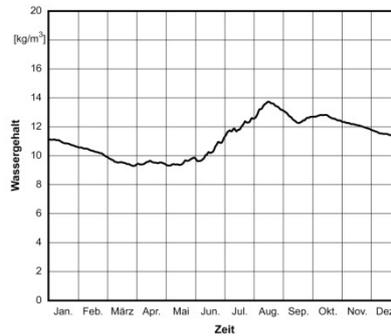


Bild 12.2: Wassergehalt in der Strohballendämmung

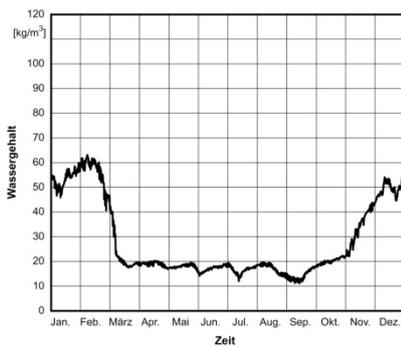


Bild 12.3: Wassergehalt an der äußeren Seite der Strohballendämmung, Monitor 1

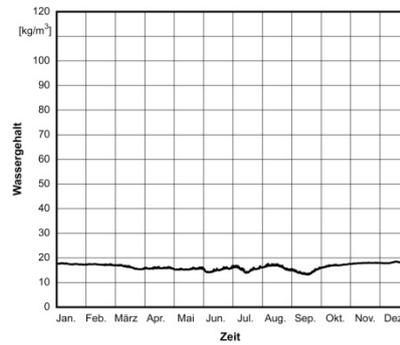


Bild 12.4: Wassergehalt in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung, Monitor 2

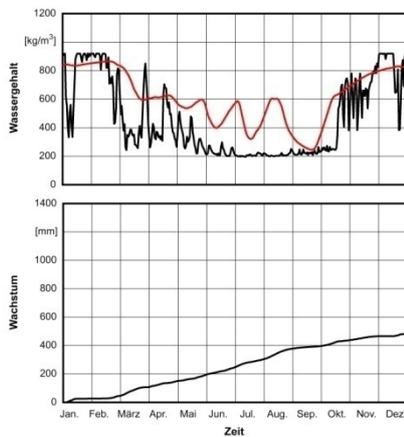


Bild 12.5: Schimmelpilzwachstum an der äußeren Seite der Strohballendämmung

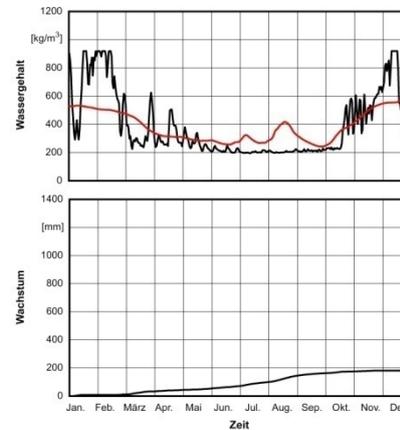
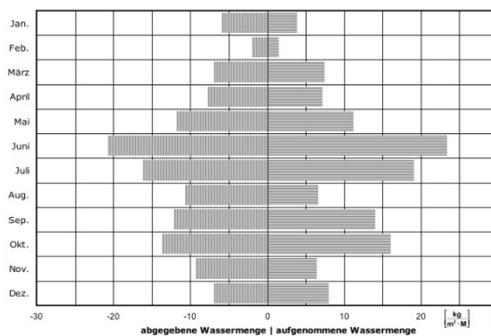


Bild 12.6: Schimmelpilzwachstum in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung

Monat	Aufnahme [kg/(m ³ ·M)]	Abgabe [kg/(m ³ ·M)]
Januar	3,79	-5,92
Februar	1,40	-1,96
März	7,33	-6,92
April	7,13	-7,74
Mai	11,09	-11,80
Juni	23,28	-20,72
Juli	19,02	-16,15
August	6,57	-10,69
September	14,01	-12,10
Oktober	16,03	-13,68
November	6,37	-9,32
Dezember	7,89	-6,91



Bauteil 1.3.2

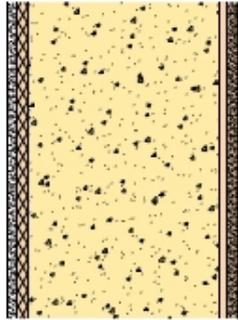


Bild 13.1: Darstellung des Bauteils

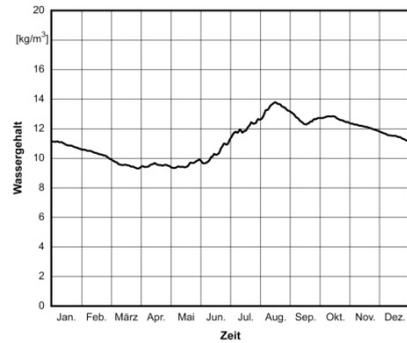


Bild 13.2: Wassergehalt in der Strohballendämmung

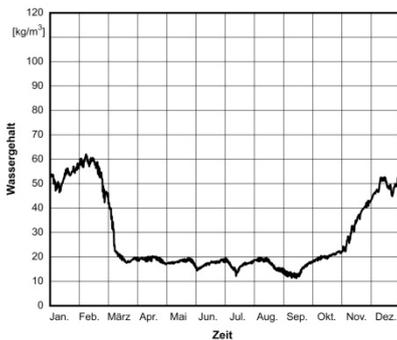


Bild 13.3: Wassergehalt an der äußeren Seite der Strohballendämmung, Monitor 1

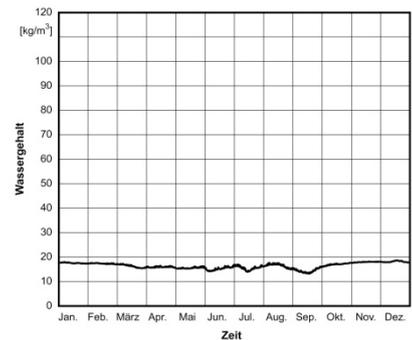


Bild 13.4: Wassergehalt in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung, Monitor 2

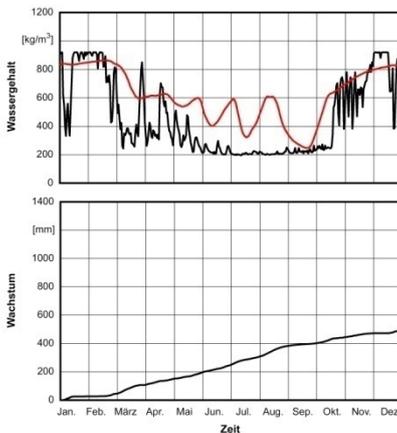


Bild 13.5: Schimmelpilzwachstum an der äußeren Seite der Strohballendämmung

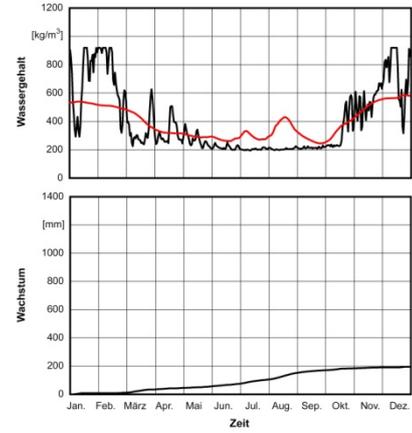
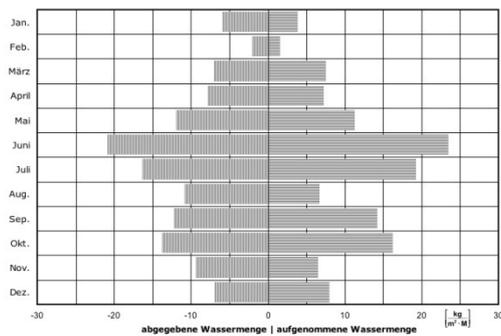


Bild 13.6: Schimmelpilzwachstum in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung

Monat	Aufnahme [kg/(m ³ ·M)]	Abgabe [kg/(m ³ ·M)]
Januar	3,82	-5,95
Februar	1,48	-2,04
März	7,46	-7,03
April	7,18	-7,82
Mai	11,20	-11,92
Juni	23,44	-20,87
Juli	19,23	-16,35
August	6,65	-10,83
September	14,15	-12,22
Oktober	16,21	-13,83
November	6,43	-9,40
Dezember	7,96	-6,94



Bauteil 1.3.4

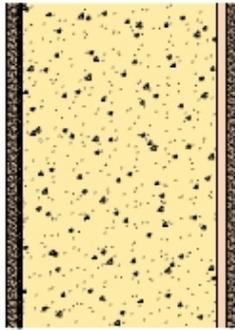


Bild 14.1: Darstellung des Bauteils

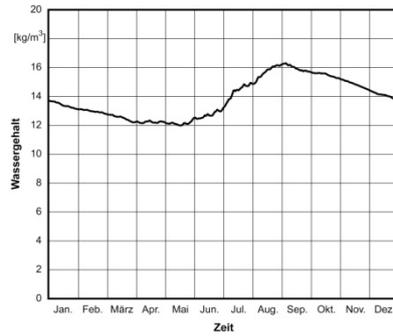


Bild 14.2: Wassergehalt in der Strohballendämmung

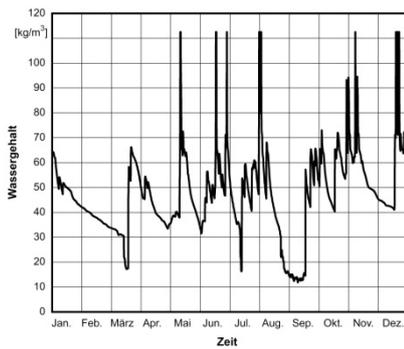


Bild 14.3: Wassergehalt an der äußeren Seite der Strohballendämmung, Monitor 1

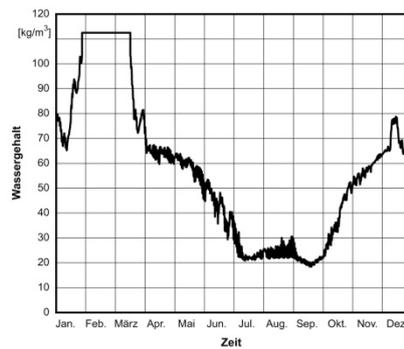


Bild 14.4: Wassergehalt in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung, Monitor 2

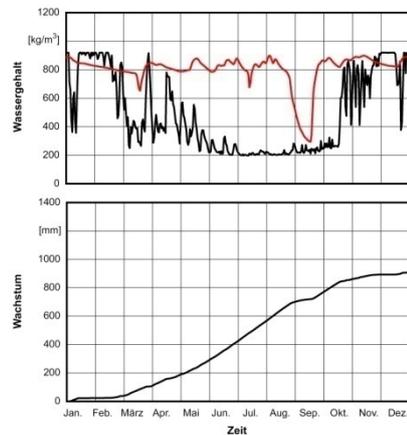


Bild 14.5: Schimmelpilzwachstum an der äußeren Seite der Strohballendämmung

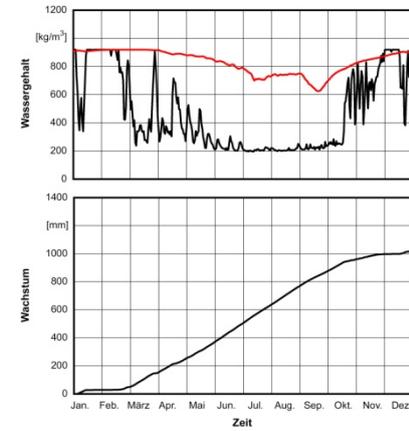
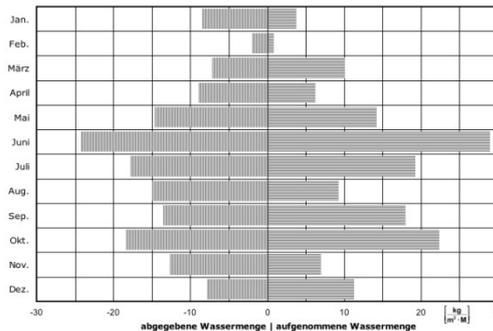


Bild 14.6: Schimmelpilzwachstum in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung

Monat	Aufnahme [kg/(m ³ ·M)]	Abgabe [kg/(m ³ ·M)]
Januar	3,72	-8,52
Februar	0,78	-1,97
März	10,07	-7,19
April	6,15	-8,95
Mai	14,16	-14,61
Juni	28,94	-24,19
Juli	19,22	-17,84
August	9,21	-14,95
September	17,91	-13,55
Oktober	22,33	-18,36
November	6,89	-12,72
Dezember	11,26	-7,79



Bauteil 1.4

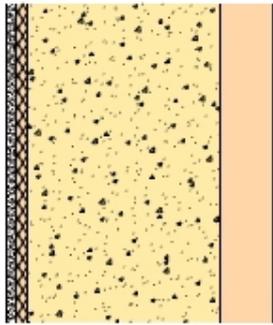


Bild 15.1: Darstellung des Bauteils

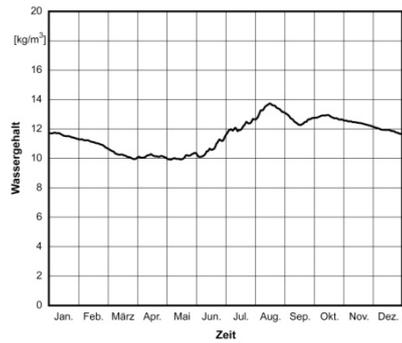


Bild 15.2: Wassergehalt in der Strohballendämmung

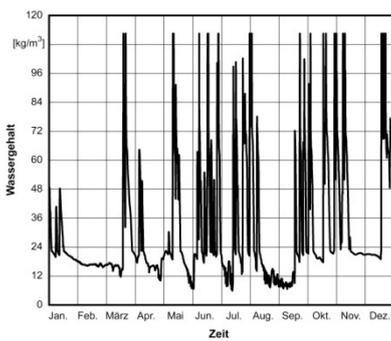


Bild 15.3: Wassergehalt an der äußeren Seite der Strohballendämmung, Monitor 1

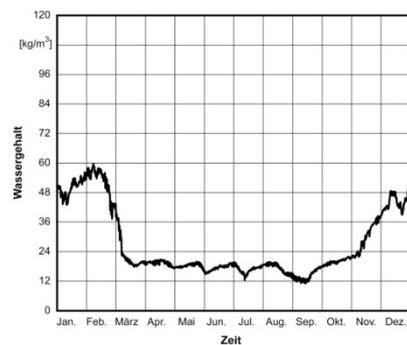


Bild 15.4: Wassergehalt in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung, Monitor 2

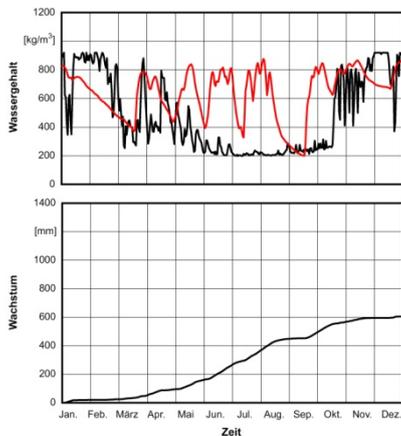


Bild 15.5: Schimmelpilzwachstum an der äußeren Seite der Strohballendämmung

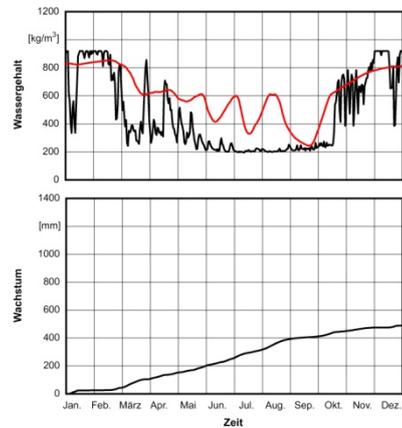
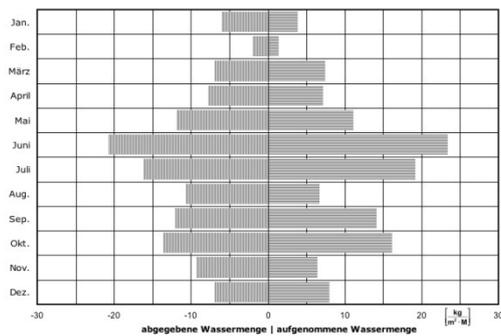


Bild 15.6: Schimmelpilzwachstum in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung

Monat	Aufnahme [kg/(m ³ ·M)]	Abgabe [kg/(m ³ ·M)]
Januar	3,84	-5,96
Februar	1,37	-2,01
März	7,33	-6,95
April	7,10	-7,78
Mai	11,07	-11,85
Juni	23,28	-20,74
Juli	19,06	-16,17
August	6,60	-10,67
September	14,08	-12,05
Oktober	16,07	-13,64
November	6,37	-9,32
Dezember	7,91	-6,96



Bauteil 1.4.1

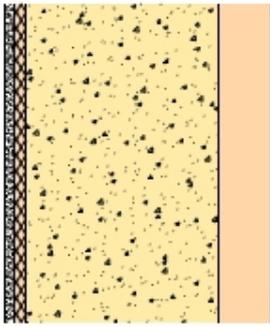


Bild 16.1: Darstellung des Bauteils

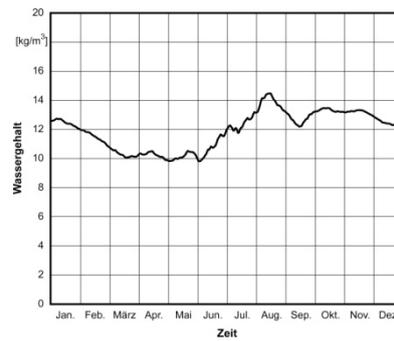


Bild 16.2: Wassergehalt in der Strohballendämmung

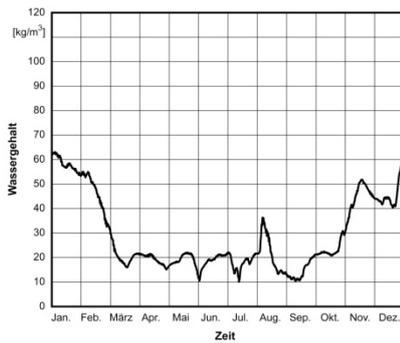


Bild 16.3: Wassergehalt an der äußeren Seite der Strohballendämmung, Monitor 1

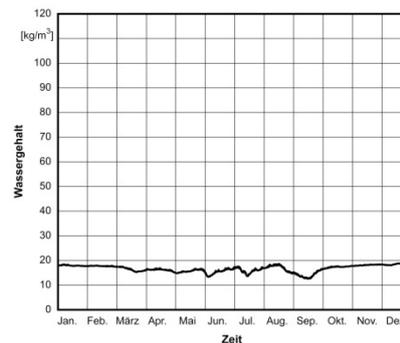


Bild 16.4: Wassergehalt in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung, Monitor 2

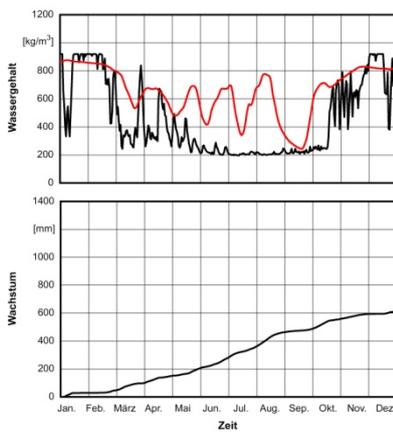


Bild 16.5: Schimmelpilzwachstum an der äußeren Seite der Strohballendämmung

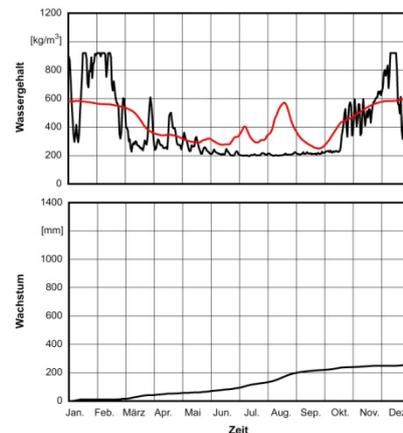
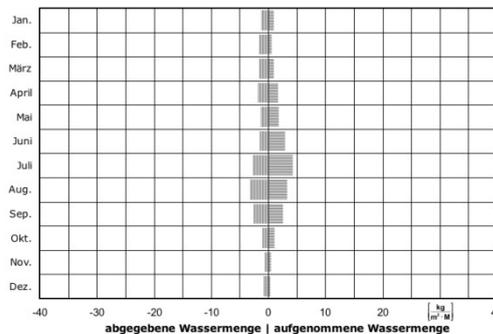


Bild 16.6: Schimmelpilzwachstum in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung

Monat	Aufnahme [kg/(m ³ ·M)]	Abgabe [kg/(m ³ ·M)]
Januar	0,82	-1,18
Februar	0,53	-1,62
März	0,89	-1,62
April	1,60	-1,87
Mai	1,74	-1,40
Juni	2,88	-1,43
Juli	4,15	-2,65
August	3,25	-3,15
September	2,45	-2,54
Oktober	0,99	-0,98
November	0,41	-0,67
Dezember	0,24	-0,84



2 Mit Strohballen ertüchtigte Außenwände

Bauteil 2.1

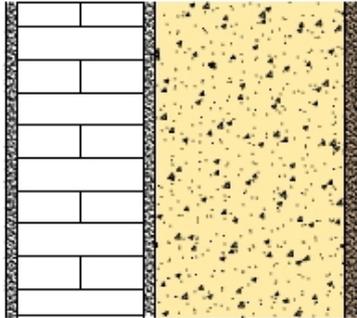


Bild 21.1: Darstellung des Bauteils

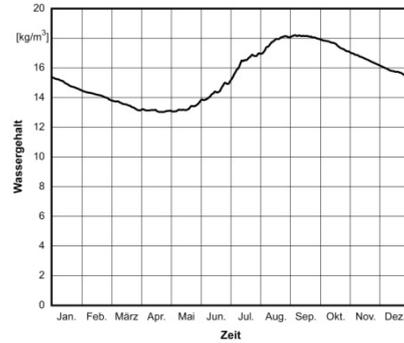


Bild 21.2: Wassergehalt in der Strohballendämmung

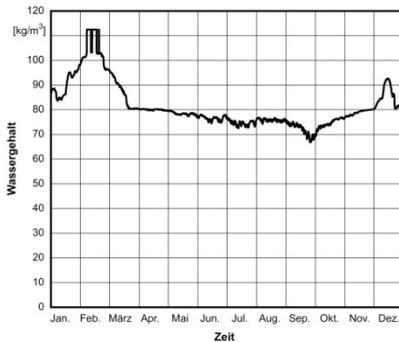


Bild 21.3: Wassergehalt an der äußeren Seite der Strohballendämmung, Monitor 1

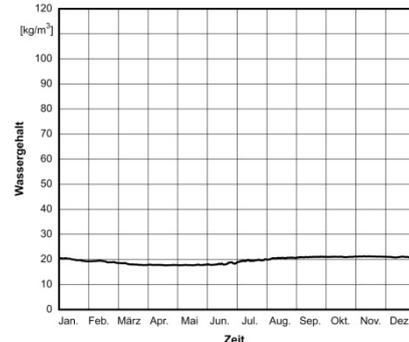


Bild 21.4: Wassergehalt in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung, Monitor 2

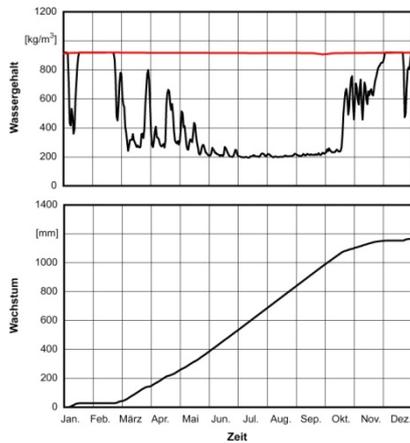


Bild 21.5: Schimmelpilzwachstum an der äußeren Seite der Strohballendämmung

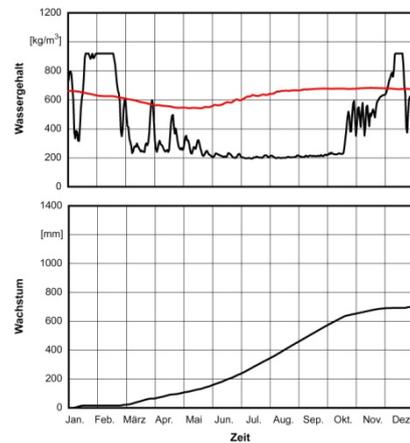
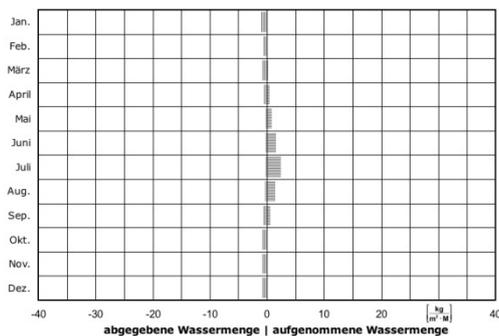


Bild 21.6: Schimmelpilzwachstum in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung

Monat	Aufnahme [kg/(m³·M)]	Abgabe [kg/(m³·M)]
Januar	0,01	-0,93
Februar	0,01	-0,61
März	0,09	-0,83
April	0,42	-0,45
Mai	0,77	-0,21
Juni	1,53	-0,26
Juli	2,30	-0,24
August	1,38	-0,31
September	0,46	-0,56
Oktober	0,05	-0,91
November	0,02	-0,91
Dezember	0,03	-0,84



Bauteil 2.2

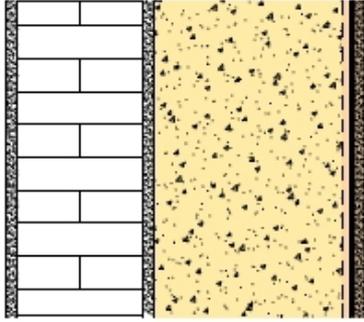


Bild 22.1: Darstellung des Bauteils

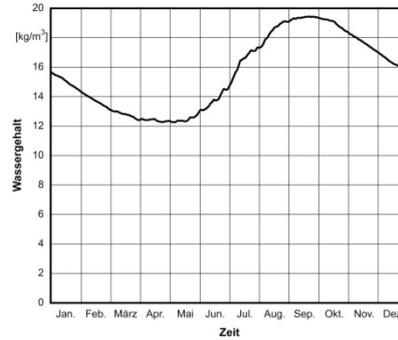


Bild 22.2: Wassergehalt in der Strohballendämmung

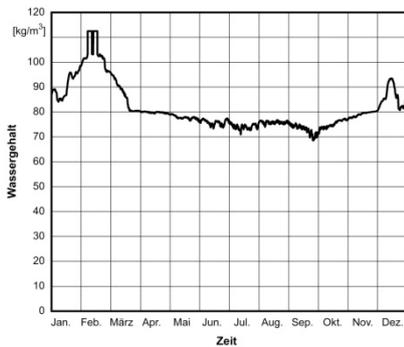


Bild 22.3: Wassergehalt an der äußeren Seite der Strohballendämmung, Monitor 1

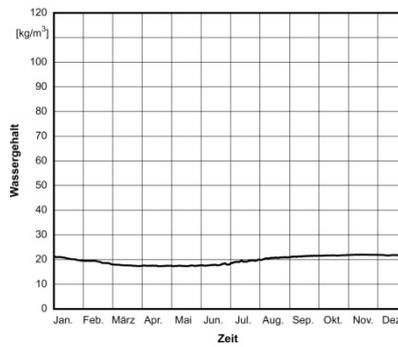


Bild 22.4: Wassergehalt in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung, Monitor 2

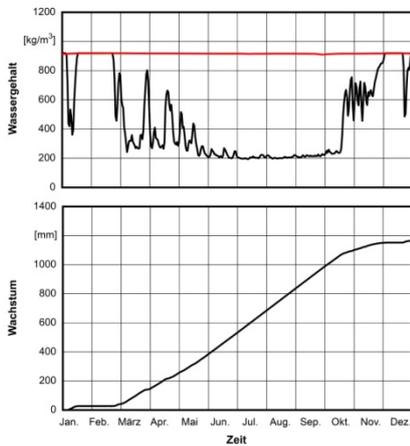


Bild 22.5: Schimmelpilzwachstum an der äußeren Seite der Strohballendämmung

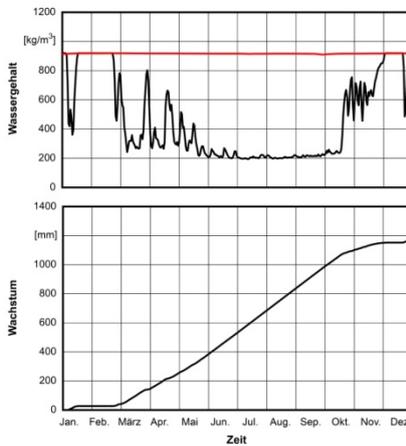
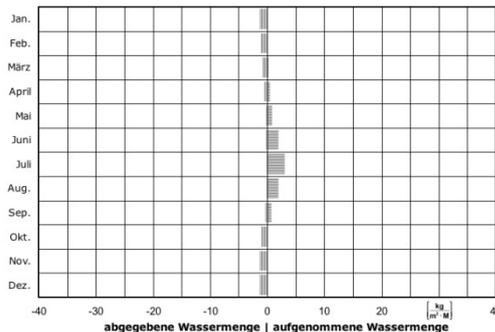


Bild 22.6: Schimmelpilzwachstum in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung

Monat	Aufnahme [kg/(m ³ ·M)]	Abgabe [kg/(m ³ ·M)]
Januar	0,00	-1,34
Februar	0,00	-1,15
März	0,09	-0,88
April	0,41	-0,48
Mai	0,76	-0,25
Juni	1,83	-0,19
Juli	2,97	-0,11
August	1,90	-0,16
September	0,65	-0,35
Oktober	0,05	-1,03
November	0,00	-1,34
Dezember	0,00	-1,38



Bauteil 2.3

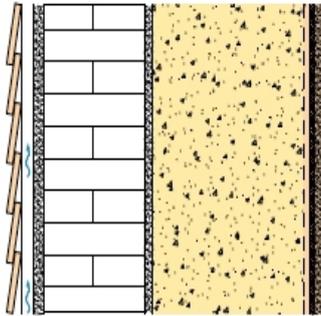


Bild 23.1: Darstellung des Bauteils

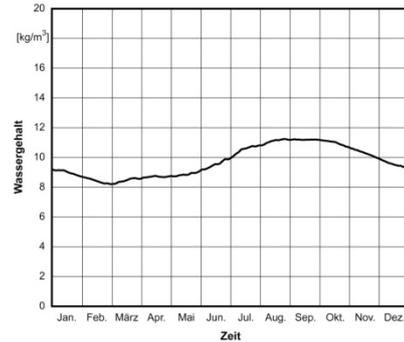


Bild 23.2: Wassergehalt in der Strohballendämmung

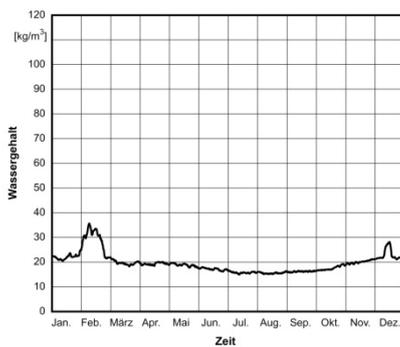


Bild 23.3: Wassergehalt an der äußeren Seite der Strohballendämmung, Monitor 1

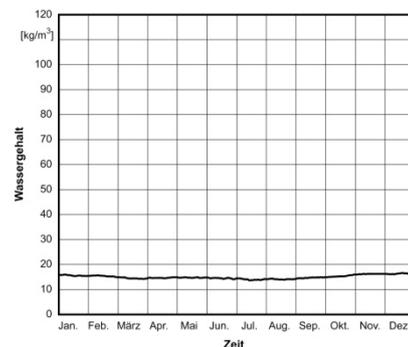


Bild 23.4: Wassergehalt in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung, Monitor 2

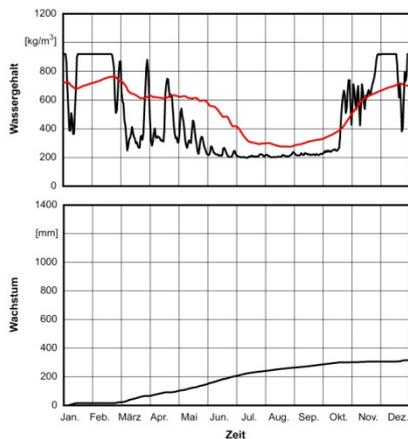


Bild 23.5: Schimmelpilzwachstum an der äußeren Seite der Strohballendämmung

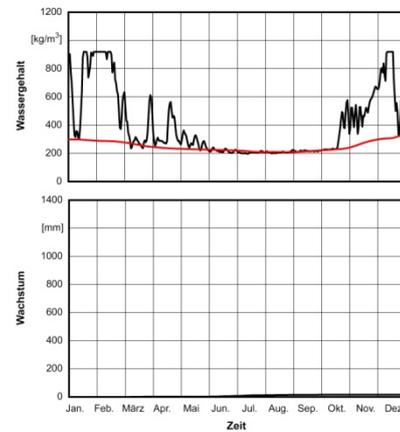
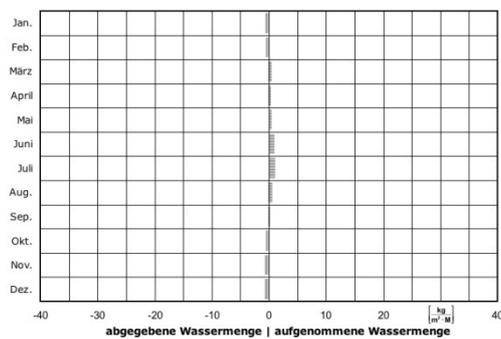


Bild 23.6: Schimmelpilzwachstum in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung

Monat	Aufnahme [kg/(m ³ ·M)]	Abgabe [kg/(m ³ ·M)]
Januar	0,04	-0,57
Februar	0,02	-0,50
März	0,42	-0,09
April	0,27	-0,10
Mai	0,39	-0,06
Juni	0,87	-0,05
Juli	0,96	-0,03
August	0,46	-0,09
September	0,17	-0,16
Oktober	0,00	-0,50
November	0,00	-0,74
Dezember	0,01	-0,73



Bauteil 2.4

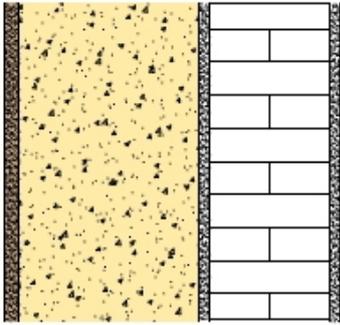


Bild 24.1: Darstellung des Bauteils

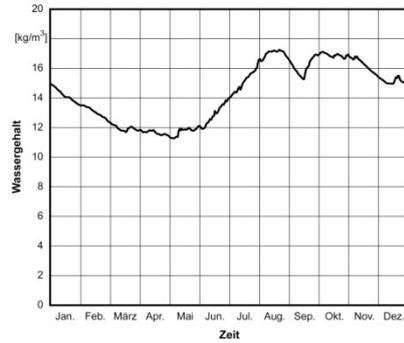


Bild 24.2: Wassergehalt in der Strohballendämmung

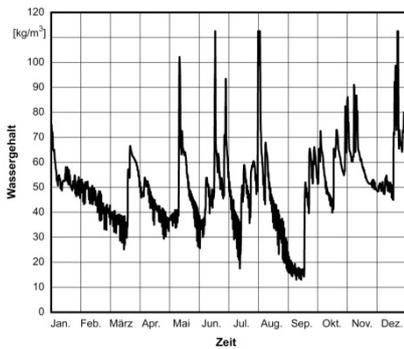


Bild 24.3: Wassergehalt an der äußeren Seite der Strohballendämmung, Monitor 1

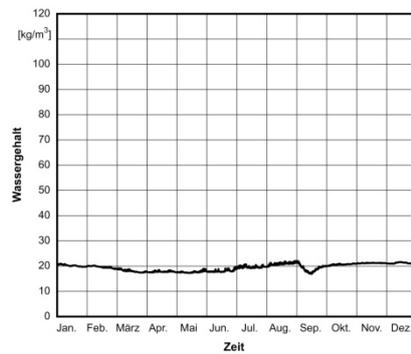


Bild 24.4: Wassergehalt in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung, Monitor 2

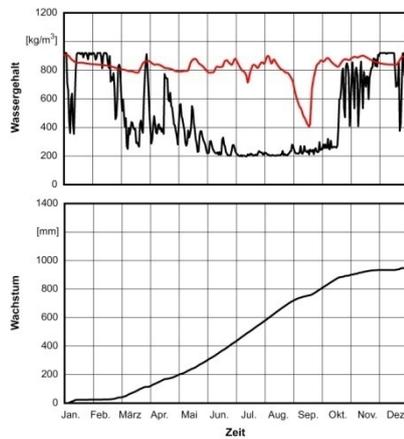


Bild 24.5: Schimmelpilzwachstum an der äußeren Seite der Strohballendämmung

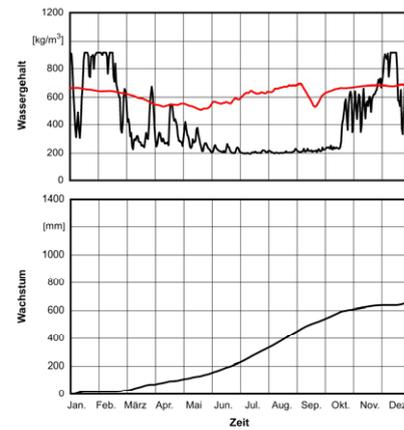
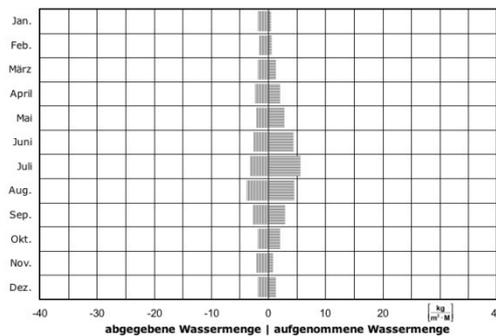


Bild 24.6: Schimmelpilzwachstum in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung

Monat	Aufnahme [kg/(m ³ ·M)]	Abgabe [kg/(m ³ ·M)]
Januar	0,37	-1,83
Februar	0,51	-1,57
März	1,18	-1,84
April	1,98	-2,29
Mai	2,70	-2,08
Juni	4,34	-2,62
Juli	5,49	-3,26
August	4,41	-3,75
September	2,86	-2,68
Oktober	1,93	-1,85
November	0,70	-2,14
Dezember	1,27	-1,82



Bauteil 2.5

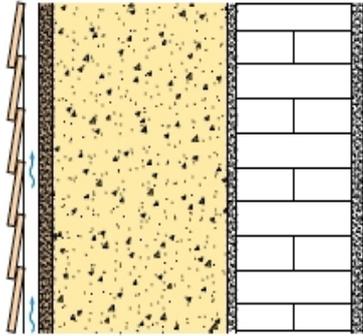


Bild 25.1: Darstellung des Bauteils

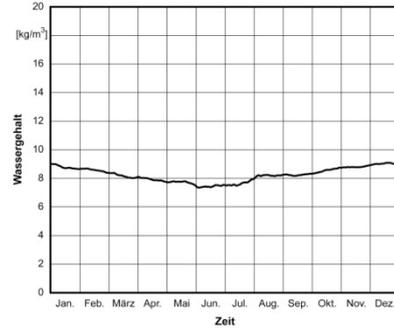


Bild 25.2: Wassergehalt in der Strohballendämmung

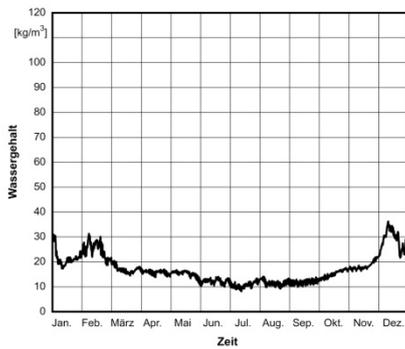


Bild 25.3: Wassergehalt an der äußeren Seite der Strohballendämmung, Monitor 1

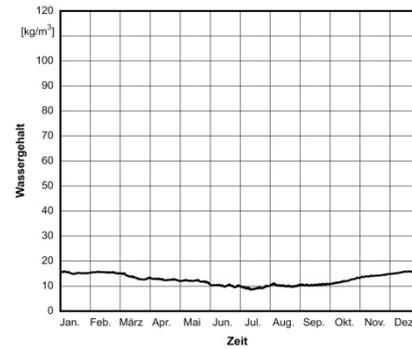


Bild 25.4: Wassergehalt in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung, Monitor 2

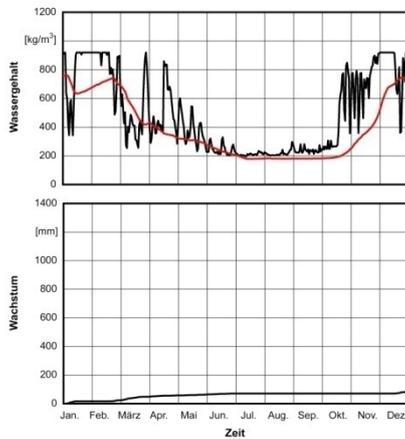


Bild 25.5: Schimmelpilzwachstum an der äußeren Seite der Strohballendämmung

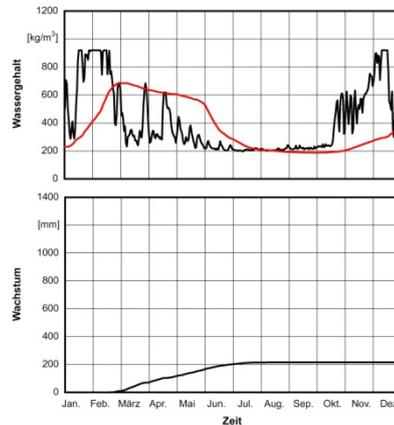
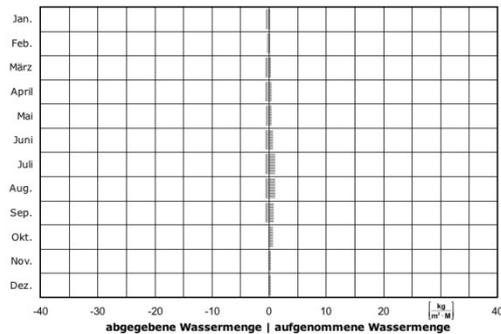


Bild 25.6: Schimmelpilzwachstum in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung

Monat	Aufnahme [kg/(m ³ ·M)]	Abgabe [kg/(m ³ ·M)]
Januar	0,13	-0,47
Februar	0,09	-0,35
März	0,29	-0,64
April	0,36	-0,64
Mai	0,33	-0,53
Juni	0,56	-0,59
Juli	1,01	-0,61
August	0,93	-0,63
September	0,72	-0,64
Oktober	0,56	-0,13
November	0,30	-0,14
Dezember	0,25	-0,16



Bauteil 2.6

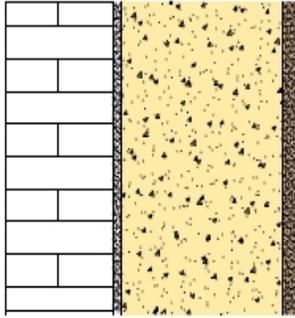


Bild 26.1: Darstellung des Bauteils

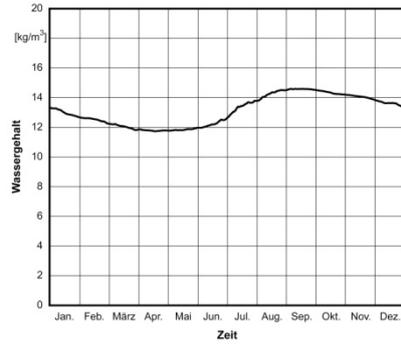


Bild 26.2: Wassergehalt in der Strohballendämmung

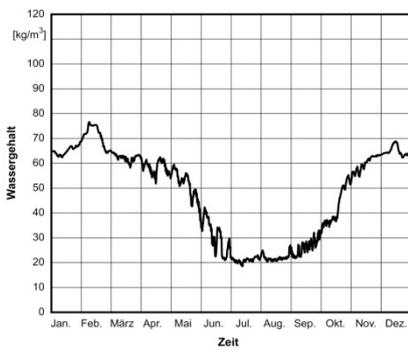


Bild 26.3: Wassergehalt an der äußeren Seite der Strohballendämmung, Monitor 1

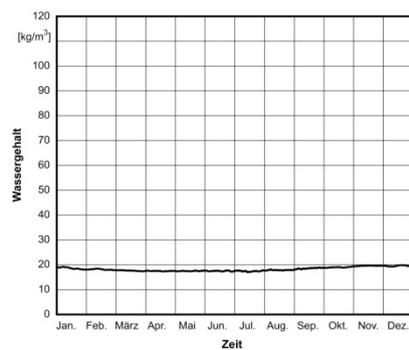


Bild 26.4: Wassergehalt in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung, Monitor 2

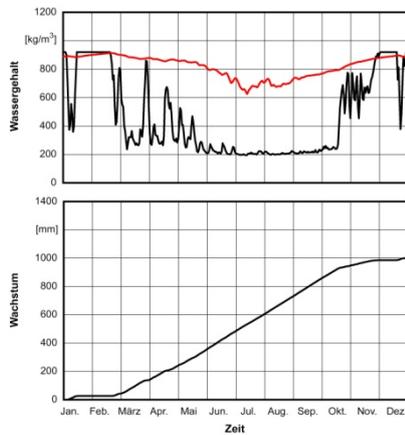


Bild 26.5: Schimmelpilzwachstum an der äußeren Seite der Strohballendämmung

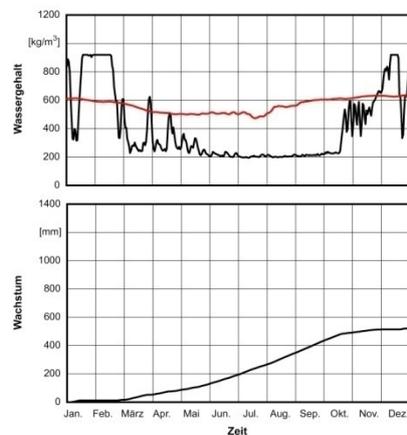
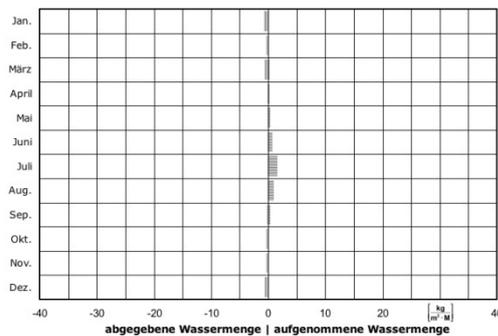


Bild 26.6: Schimmelpilzwachstum in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung

Monat	Aufnahme [kg/(m ³ ·M)]	Abgabe [kg/(m ³ ·M)]
Januar	0,03	-0,71
Februar	0,03	-0,41
März	0,10	-0,57
April	0,13	-0,16
Mai	0,23	-0,08
Juni	0,64	-0,08
Juli	1,42	-0,14
August	0,88	-0,18
September	0,25	-0,21
Oktober	0,01	-0,34
November	0,01	-0,34
Dezember	0,05	-0,57



3. Dachkonstruktionen

Bauteil 3.1



Bild 27.1: Darstellung des Bauteils

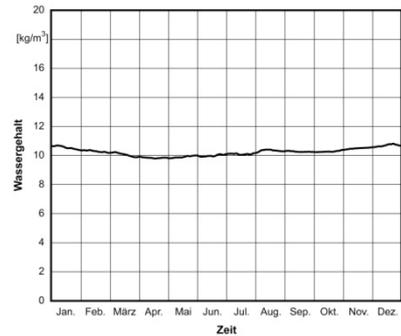


Bild 27.2: Wassergehalt in der Strohballendämmung

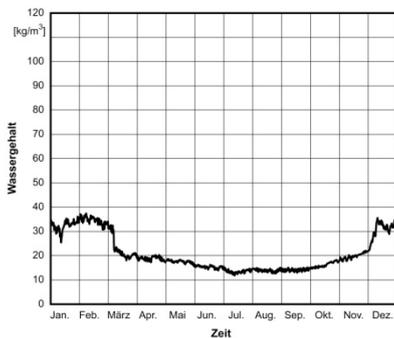


Bild 27.3: Wassergehalt an der äußeren Seite der Strohballendämmung, Monitor 1

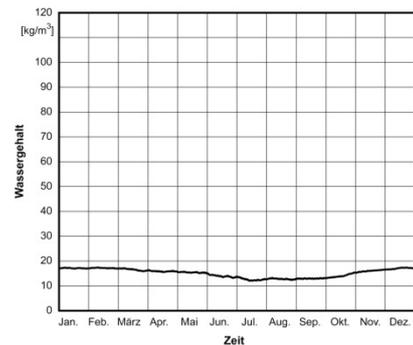


Bild 27.4: Wassergehalt in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung, Monitor 2

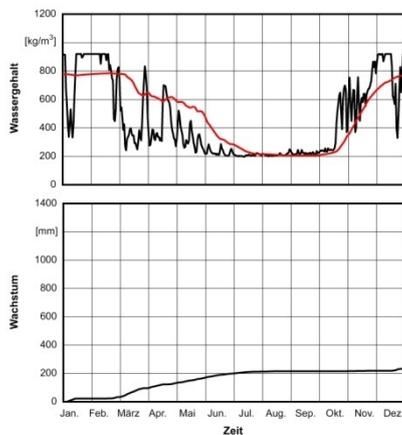


Bild 27.5: Schimmelpilzwachstum an der äußeren Seite der Strohballendämmung

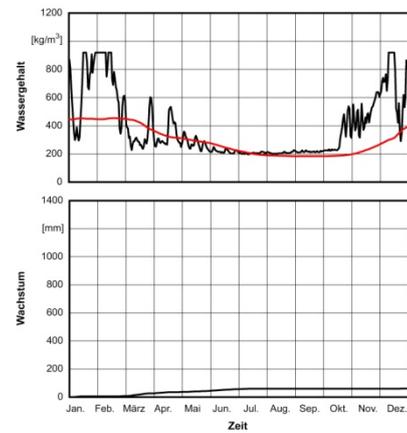
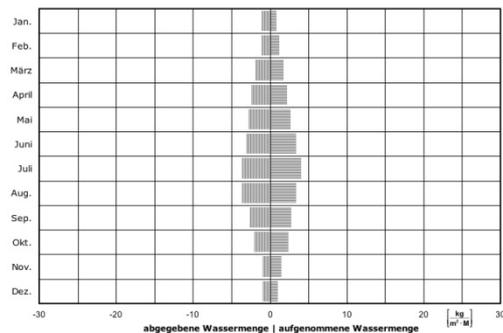


Bild 27.6: Schimmelpilzwachstum in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung

Monat	Aufnahme [kg/(m ³ ·M)]	Abgabe [kg/(m ³ ·M)]
Januar	0,77	-1,09
Februar	1,15	-1,05
März	1,67	-1,90
April	2,11	-2,43
Mai	2,59	-2,81
Juni	3,30	-3,11
Juli	3,94	-3,64
August	3,31	-3,59
September	2,70	-2,59
Oktober	2,29	-2,03
November	1,46	-0,96
Dezember	0,94	-1,00



Bauteil 3.2

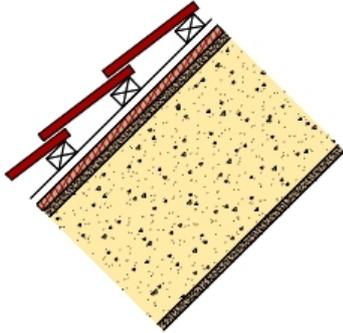


Bild 28.1: Darstellung des Bauteils

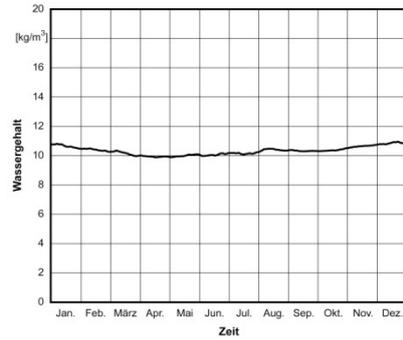


Bild 28.2: Wassergehalt in der Strohballendämmung

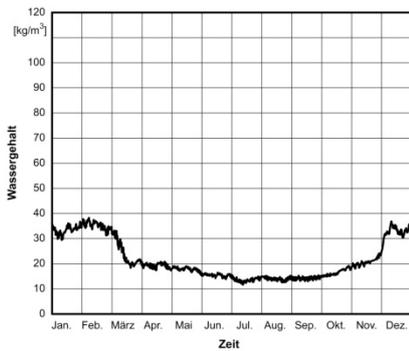


Bild 28.3: Wassergehalt an der äußeren Seite der Strohballendämmung, Monitor 1

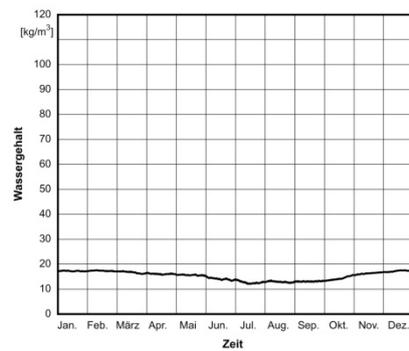


Bild 28.4: Wassergehalt in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung, Monitor 2

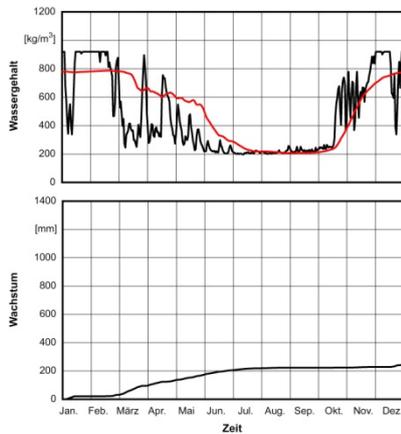


Bild 28.5: Schimmelpilzwachstum an der äußeren Seite der Strohballendämmung

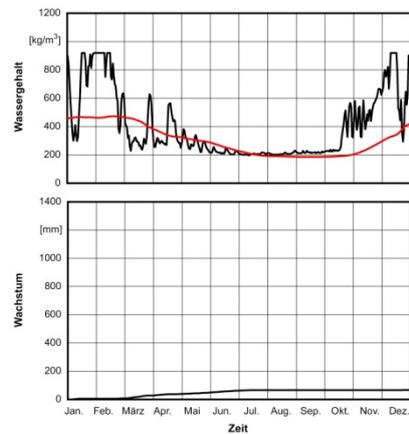
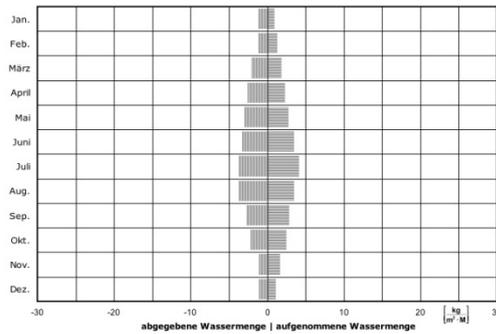


Bild 28.6: Schimmelpilzwachstum in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung

Monat	Aufnahme [kg/(m ³ ·M)]	Abgabe [kg/(m ³ ·M)]
Januar	0,83	-1,17
Februar	1,25	-1,16
März	1,77	-2,02
April	2,23	-2,53
Mai	2,73	-2,95
Juni	3,42	-3,23
Juli	4,06	-3,76
August	3,40	-3,67
September	2,78	-2,67
Oktober	2,43	-2,16
November	1,56	-1,06
Dezember	1,02	-1,09



Bauteil 3.3



Bild 29.1: Darstellung des Bauteils

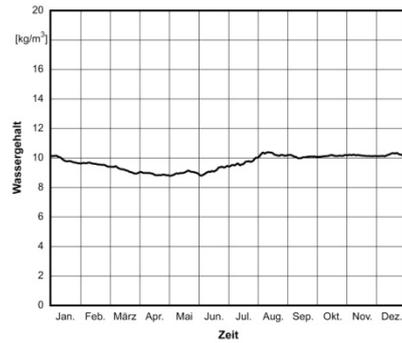


Bild 29.2: Wassergehalt in der Strohballendämmung

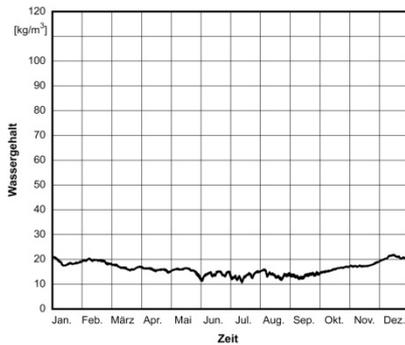


Bild 29.3: Wassergehalt an der äußeren Seite der Strohballendämmung, Monitor 1

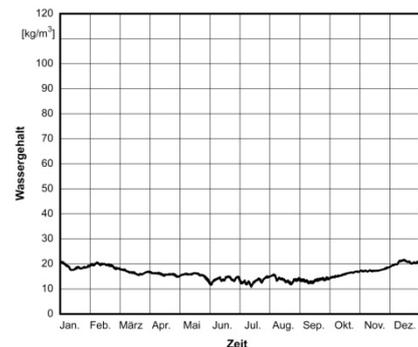


Bild 29.4: Wassergehalt in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung, Monitor 2

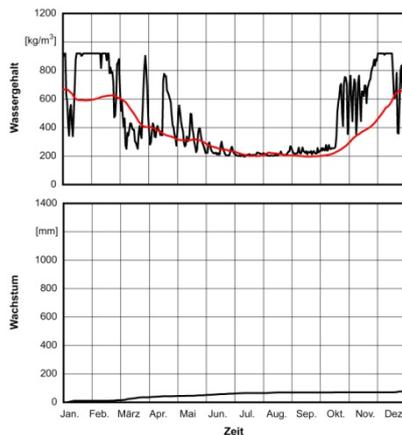


Bild 29.5: Schimmelpilzwachstum an der äußeren Seite der Strohballendämmung

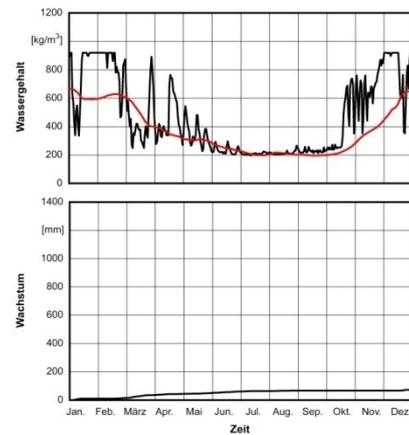
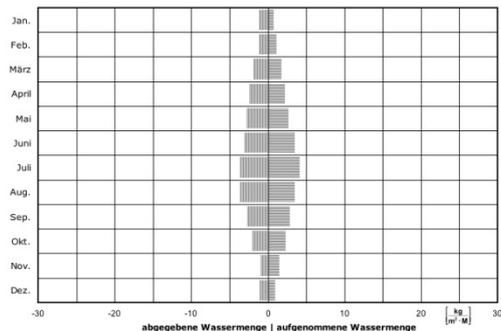


Bild 29.6: Schimmelpilzwachstum in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung

Monat	Aufnahme [kg/(m ³ ·M)]	Abgabe [kg/(m ³ ·M)]
Januar	0,72	-1,14
Februar	1,08	-1,10
März	1,73	-1,91
April	2,16	-2,45
Mai	2,62	-2,81
Juni	3,40	-3,07
Juli	4,10	-3,64
August	3,43	-3,63
September	2,76	-2,69
Oktober	2,28	-2,05
November	1,38	-0,98
Dezember	0,85	-1,03



Bauteil 3.4

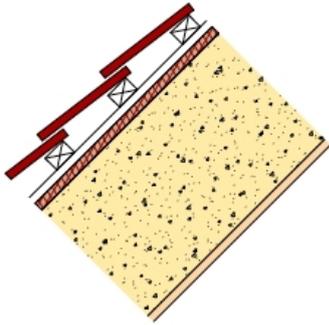


Bild 30.1: Darstellung des Bauteils

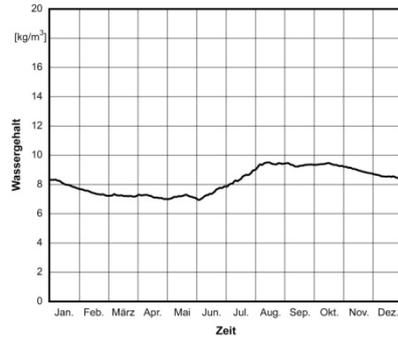


Bild 30.2: Wassergehalt in der Strohballendämmung

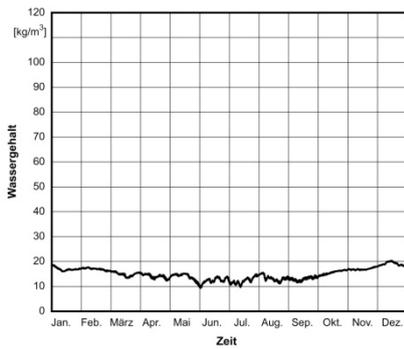


Bild 30.3: Wassergehalt an der äußeren Seite der Strohballendämmung, Monitor 1

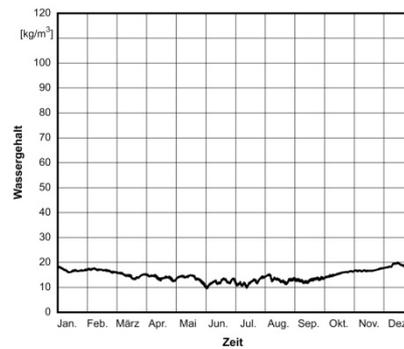


Bild 30.4: Wassergehalt in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung, Monitor 2

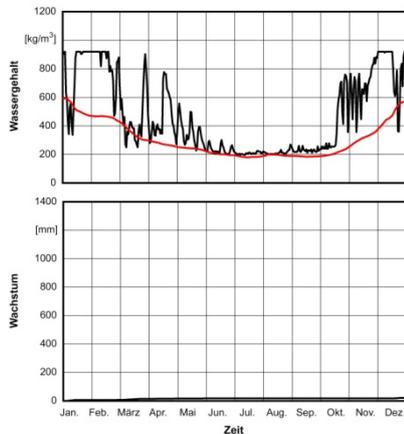


Bild 30.5: Schimmelpilzwachstum an der äußeren Seite der Strohballendämmung

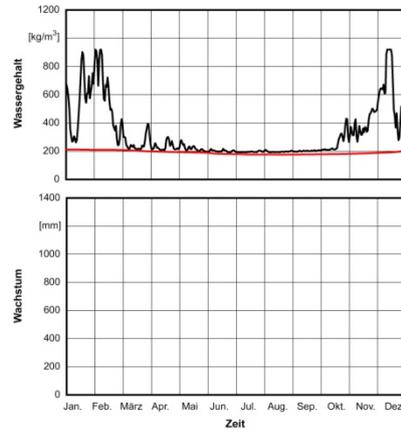
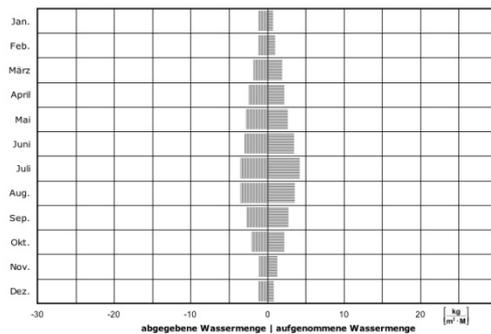


Bild 30.6: Schimmelpilzwachstum in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung

Monat	Aufnahme [kg/(m ³ ·M)]	Abgabe [kg/(m ³ ·M)]
Januar	0,67	-1,17
Februar	1,00	-1,15
März	1,83	-1,81
April	2,16	-2,40
Mai	2,59	-2,77
Juni	3,46	-2,98
Juli	4,21	-3,52
August	3,50	-3,56
September	2,75	-2,68
Oktober	2,19	-2,10
November	1,25	-1,07
Dezember	0,74	-1,15



Bauteil 3.5

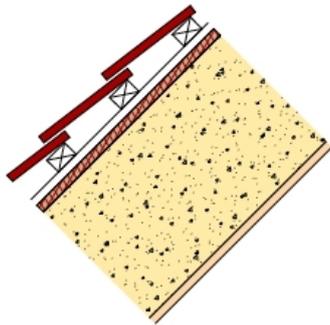


Bild 31.1: Darstellung des Bauteils

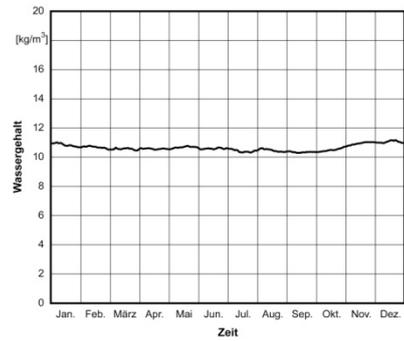


Bild 31.2: Wassergehalt in der Strohballendämmung

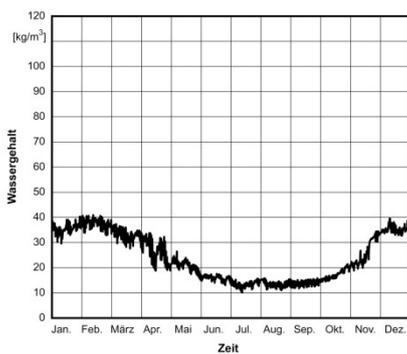


Bild 31.3: Wassergehalt an der äußeren Seite der Strohballendämmung, Monitor 1

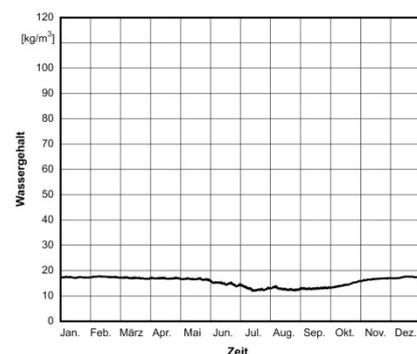


Bild 31.4: Wassergehalt in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung, Monitor 2

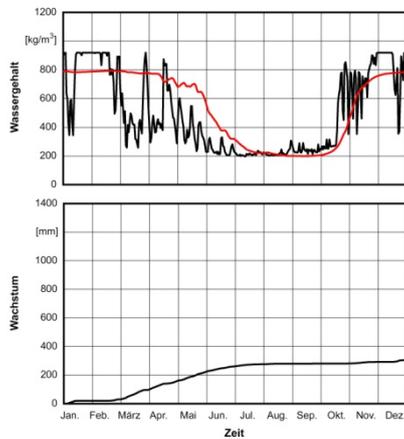


Bild 31.5: Schimmelpilzwachstum an der äußeren Seite der Strohballendämmung

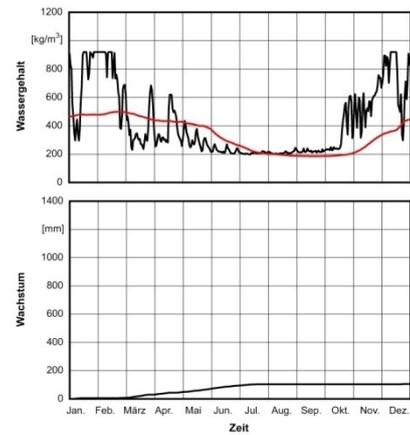
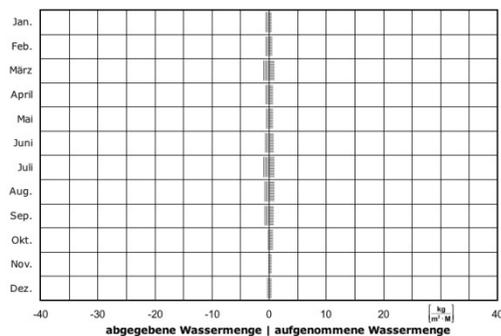


Bild 31.6: Schimmelpilzwachstum in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung

Monat	Aufnahme [kg/(m ³ ·M)]	Abgabe [kg/(m ³ ·M)]
Januar	0,37	-0,66
Februar	0,44	-0,57
März	0,88	-0,95
April	0,65	-0,56
Mai	0,57	-0,44
Juni	0,69	-0,78
Juli	0,83	-0,98
August	0,84	-0,92
September	0,78	-0,81
Oktober	0,61	-0,24
November	0,43	-0,12
Dezember	0,34	-0,40



4. Flachdachkonstruktionen

Bauteil 4.1

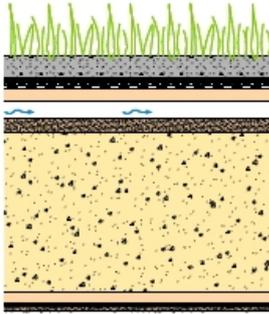


Bild 32.1: Darstellung des Bauteils

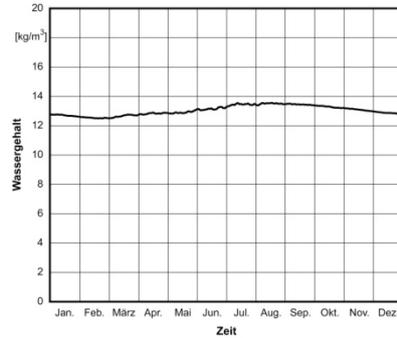


Bild 32.2: Wassergehalt in der Strohballendämmung

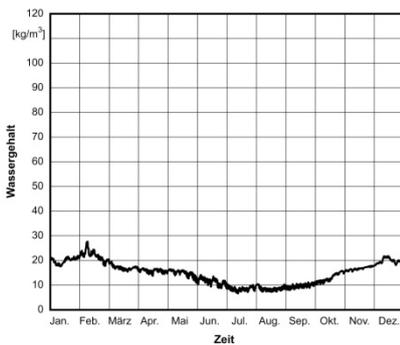


Bild 32.3: Wassergehalt an der äußeren Seite der Strohballendämmung, Monitor 1

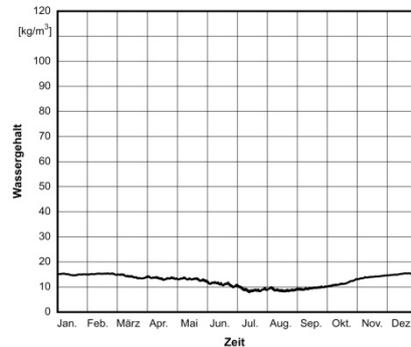


Bild 32.4: Wassergehalt in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung, Monitor 2

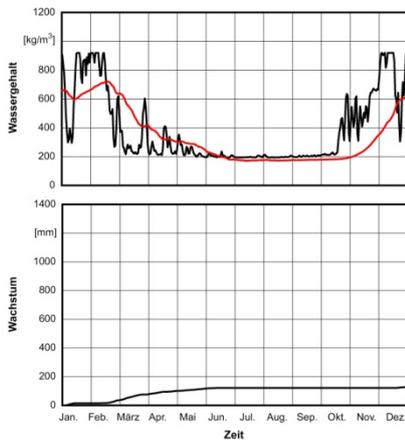


Bild 32.5: Schimmelpilzwachstum an der äußeren Seite der Strohballendämmung

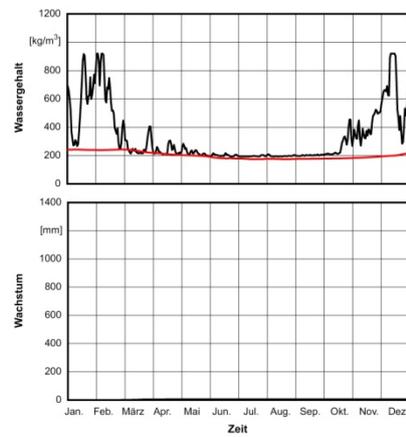
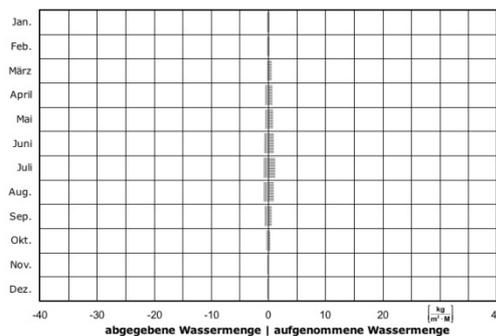


Bild 32.6: Schimmelpilzwachstum in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung

Monat	Aufnahme [kg/(m ³ ·M)]	Abgabe [kg/(m ³ ·M)]
Januar	4,69	-5,11
Februar	0,29	-0,36
März	0,55	-0,65
April	0,85	-0,90
Mai	1,21	-0,92
Juni	1,84	-1,37
Juli	2,15	-1,69
August	1,80	-1,82
September	1,13	-1,36
Oktober	0,89	-0,85
November	0,38	-0,81
Dezember	0,76	-0,71



Bauteil 4.2

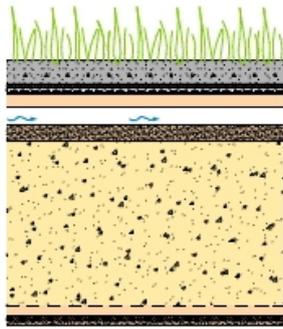


Bild 33.1: Darstellung des Bauteils

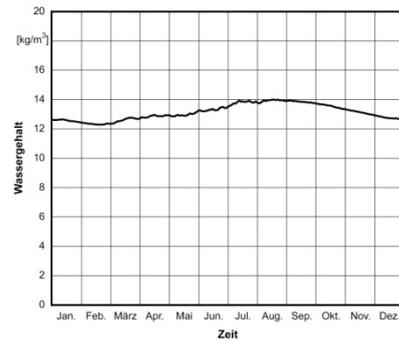


Bild 33.2: Wassergehalt in der Strohballendämmung

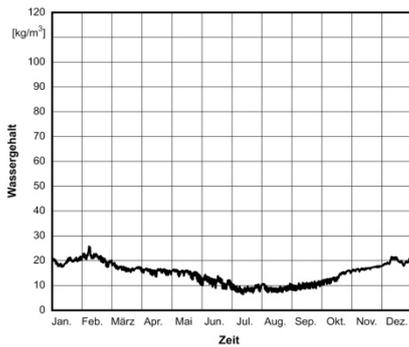


Bild 33.3: Wassergehalt an der äußeren Seite der Strohballendämmung, Monitor 1

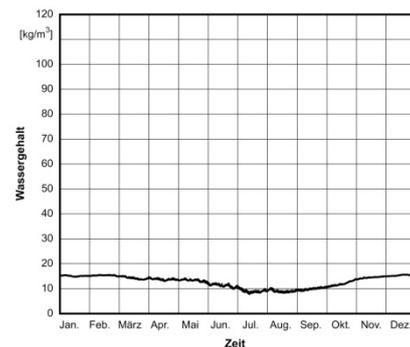


Bild 33.4: Wassergehalt in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung, Monitor 2

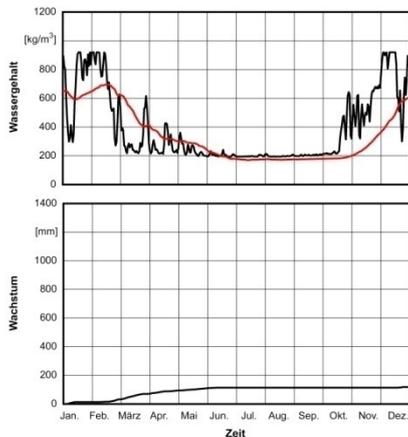


Bild 33.5: Schimmelpilzwachstum an der äußeren Seite der Strohballendämmung

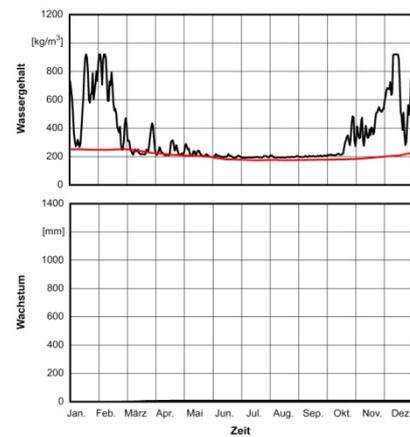
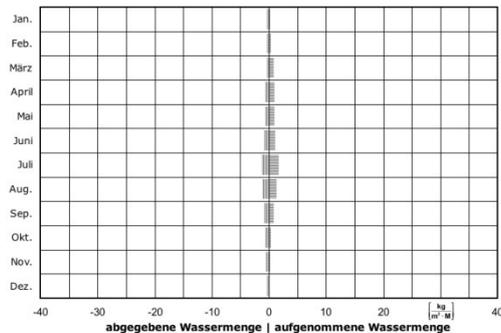


Bild 33.6: Schimmelpilzwachstum in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung

Monat	Aufnahme [kg/(m ³ ·M)]	Abgabe [kg/(m ³ ·M)]
Januar	5,51	-5,93
Februar	0,29	-0,36
März	0,55	-0,65
April	0,85	-0,90
Mai	1,21	-0,92
Juni	1,84	-1,37
Juli	2,15	-1,69
August	1,80	-1,82
September	1,13	-1,36
Oktober	0,89	-0,85
November	0,38	-0,81
Dezember	0,76	-0,71



Bauteil 4.3

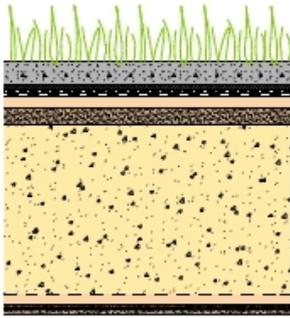


Bild 34.1: Darstellung des Bauteils

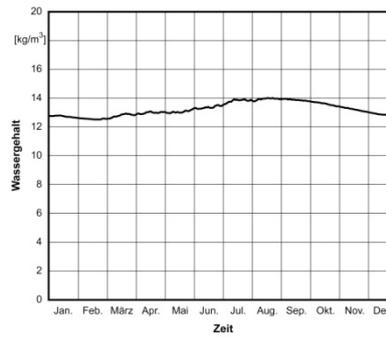


Bild 34.2: Wassergehalt in der Strohballendämmung

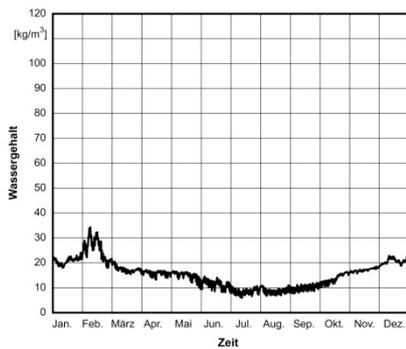


Bild 34.3: Wassergehalt an der äußeren Seite der Strohballendämmung, Monitor 1

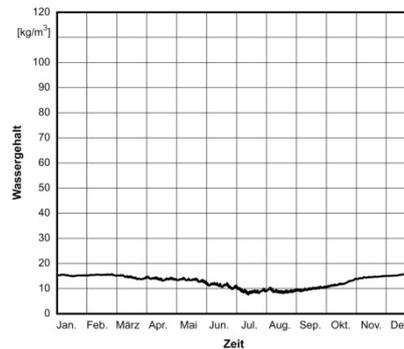


Bild 34.4: Wassergehalt in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung, Monitor 2

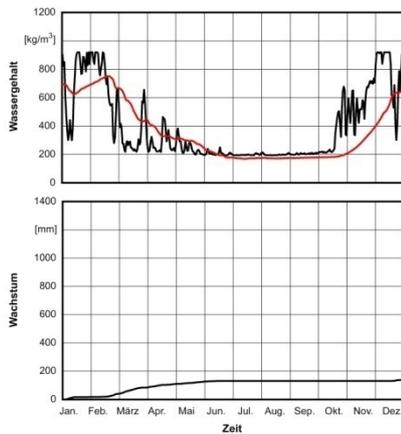


Bild 34.5: Schimmelpilzwachstum an der äußeren Seite der Strohballendämmung

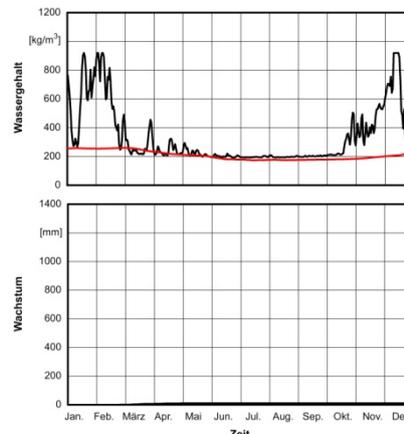
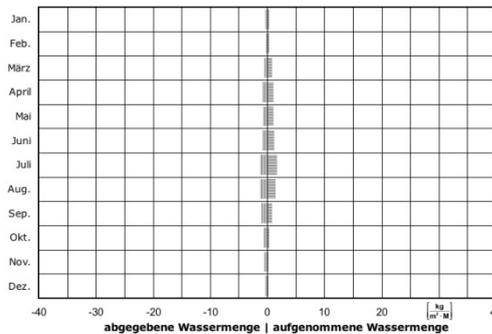


Bild 34.6: Schimmelpilzwachstum in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung

Monat	Aufnahme [kg/(m ³ ·M)]	Abgabe [kg/(m ³ ·M)]
Januar	5,13	-5,55
Februar	0,29	-0,36
März	0,55	-0,65
April	0,85	-0,90
Mai	1,21	-0,92
Juni	1,84	-1,37
Juli	2,15	-1,69
August	1,80	-1,82
September	1,13	-1,36
Oktober	0,89	-0,85
November	0,38	-0,81
Dezember	0,76	-0,71



Bauteil 4.4

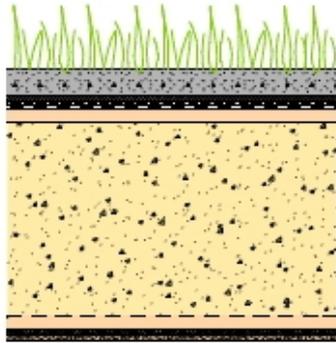


Bild 35.1: Darstellung des Bauteils

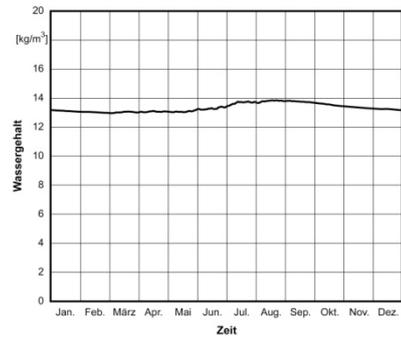


Bild 35.2: Wassergehalt in der Strohballendämmung

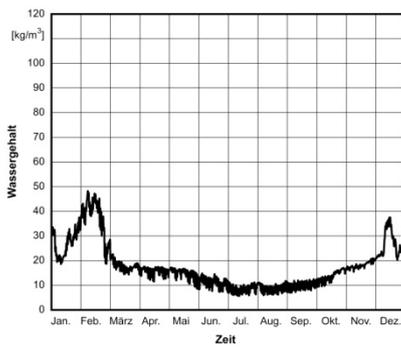


Bild 35.3: Wassergehalt an der äußeren Seite der Strohballendämmung, Monitor 1

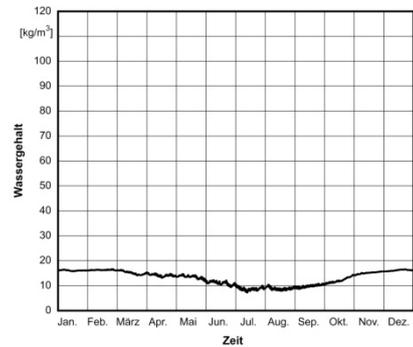


Bild 35.4: Wassergehalt in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung, Monitor 2

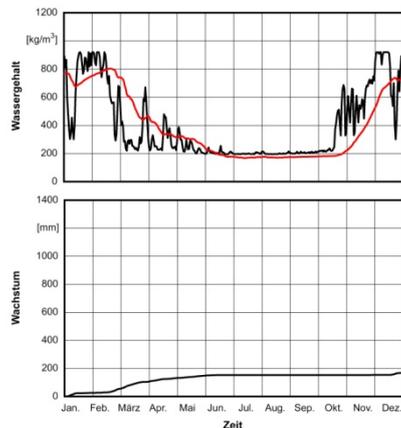


Bild 35.5: Schimmelpilzwachstum an der äußeren Seite der Strohballendämmung

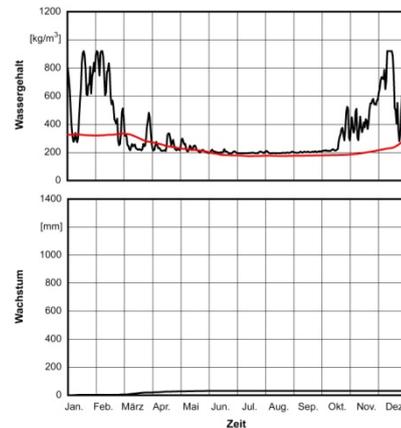
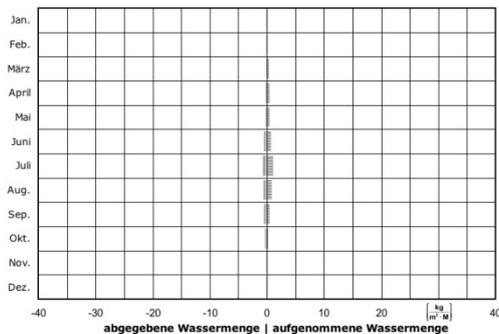


Bild 35.6: Schimmelpilzwachstum in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung

Monat	Aufnahme [kg/(m ³ ·M)]	Abgabe [kg/(m ³ ·M)]
Januar	3,52	-3,94
Februar	0,29	-0,36
März	0,55	-0,65
April	0,85	-0,90
Mai	1,21	-0,92
Juni	1,84	-1,37
Juli	2,15	-1,69
August	1,80	-1,82
September	1,13	-1,36
Oktober	0,89	-0,85
November	0,38	-0,81
Dezember	0,76	-0,71



Bauteil 4.5

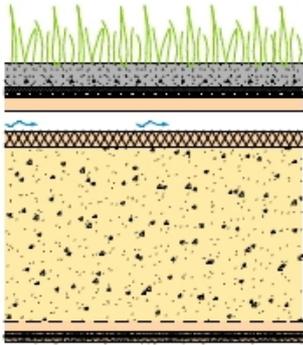


Bild 36.1: Darstellung des Bauteils

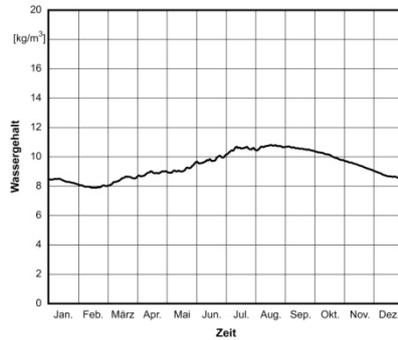


Bild 36.2: Wassergehalt in der Strohballendämmung

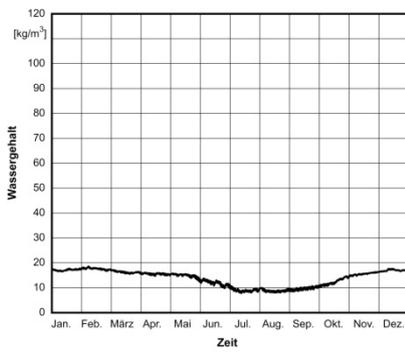


Bild 36.3: Wassergehalt an der äußeren Seite der Strohballendämmung, Monitor 1

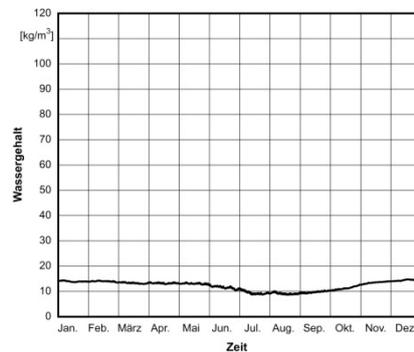


Bild 36.4: Wassergehalt in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung, Monitor 2

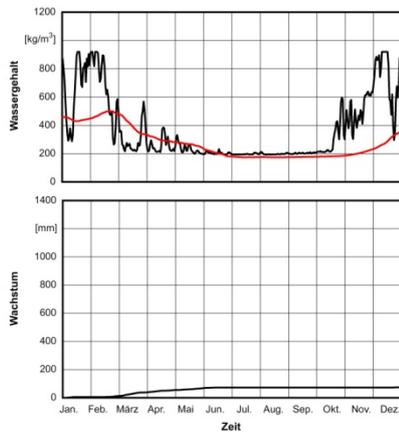


Bild 36.5: Schimmelpilzwachstum an der äußeren Seite der Strohballendämmung

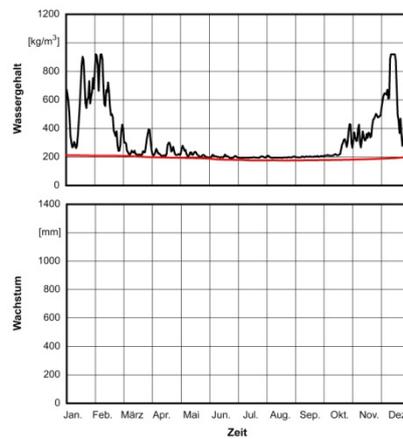
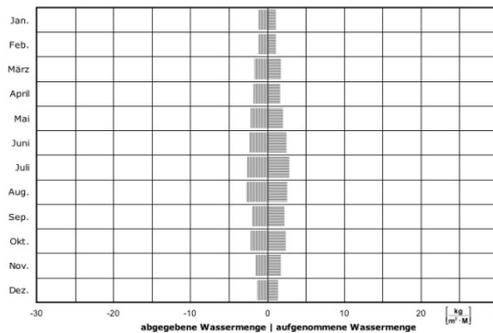


Bild 36.6: Schimmelpilzwachstum in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung

Monat	Aufnahme [kg/(m ³ ·M)]	Abgabe [kg/(m ³ ·M)]
Januar	1,03	-1,19
Februar	1,07	-1,13
März	1,68	-1,68
April	1,58	-1,82
Mai	1,94	-2,13
Juni	2,46	-2,33
Juli	2,81	-2,66
August	2,55	-2,73
September	2,15	-1,99
Oktober	2,37	-2,18
November	1,71	-1,54
Dezember	1,37	-1,37



5. Deckenkonstruktionen

Bauteil 5.1

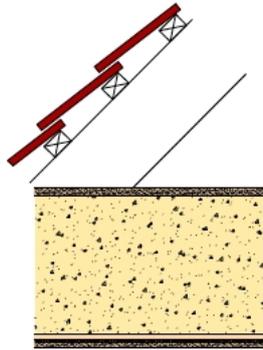


Bild 37.1: Darstellung des Bauteils

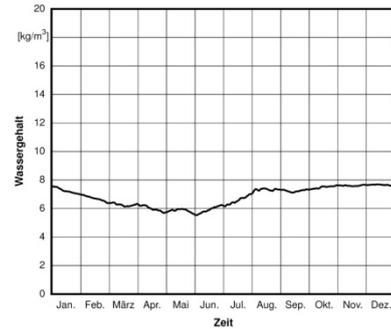


Bild 37.2: Wassergehalt in der Strohballendämmung

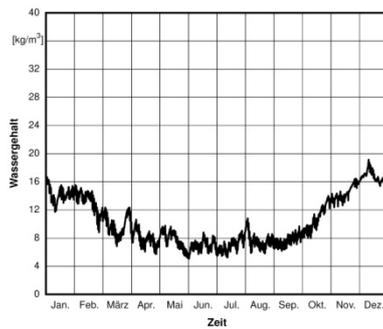


Bild 37.3: Wassergehalt an der äußeren Seite der Strohballendämmung, Monitor 1

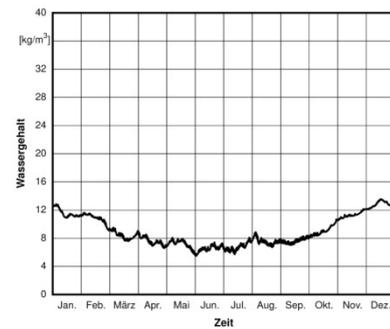


Bild 37.4: Wassergehalt in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung, Monitor 2

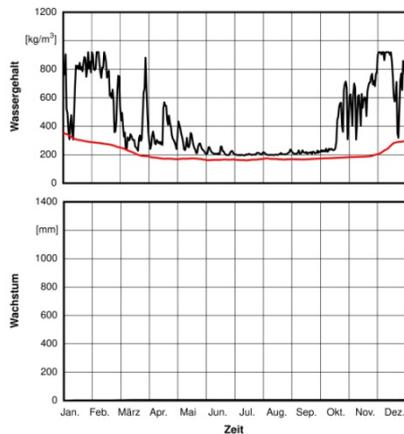


Bild 37.5: Schimmelpilzwachstum an der äußeren Seite der Strohballendämmung

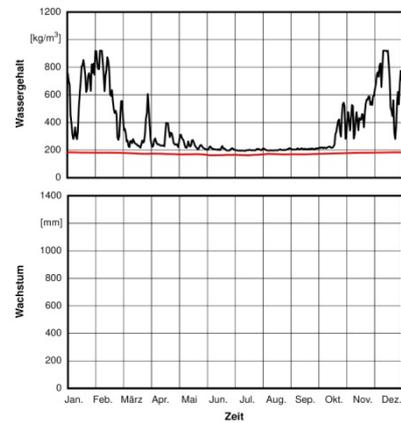
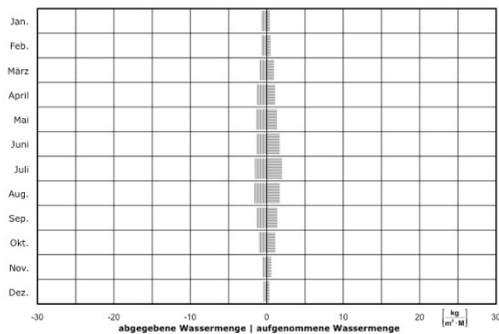


Bild 37.6: Schimmelpilzwachstum in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung

Monat	Aufnahme [kg/(m³·M)]	Abgabe [kg/(m³·M)]
Januar	0,40	-0,73
Februar	0,51	-0,71
März	0,94	-0,95
April	1,09	-1,32
Mai	1,34	-1,41
Juni	1,68	-1,35
Juli	2,00	-1,56
August	1,70	-1,65
September	1,38	-1,34
Oktober	1,11	-1,04
November	0,58	-0,55
Dezember	0,35	-0,46



Bauteil 5.2

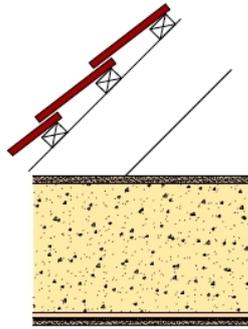


Bild 38.1: Darstellung des Bauteils

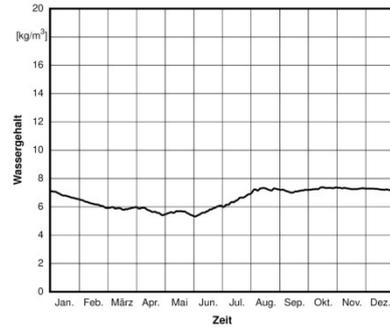


Bild 38.2: Wassergehalt in der Strohballendämmung

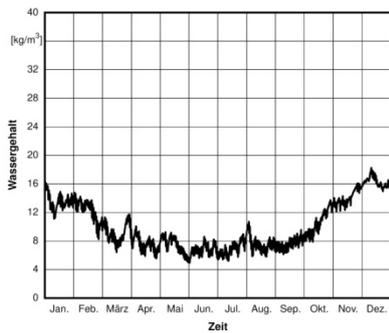


Bild 38.3: Wassergehalt an der äußeren Seite der Strohballendämmung, Monitor 1

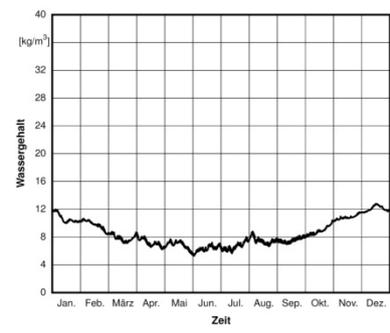


Bild 38.4: Wassergehalt in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung, Monitor 2

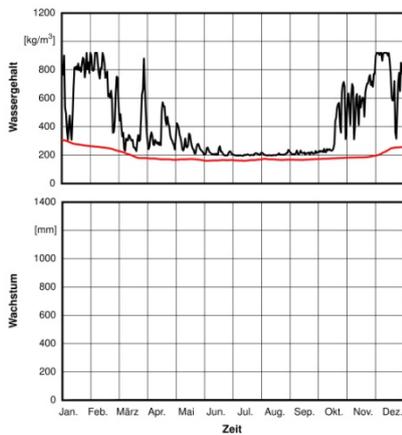


Bild 38.5: Schimmelpilzwachstum an der äußeren Seite der Strohballendämmung

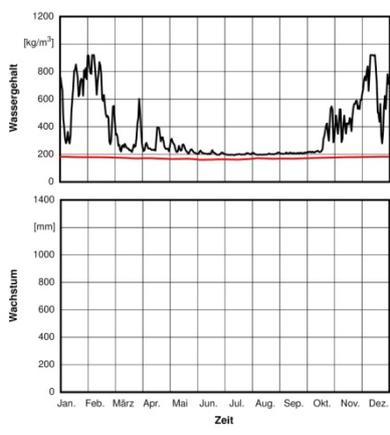
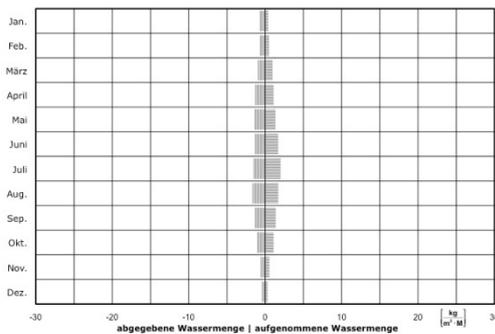


Bild 38.6: Schimmelpilzwachstum in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung

Monat	Aufnahme [kg/(m ³ ·M)]	Abgabe [kg/(m ³ ·M)]
Januar	0,40	-0,74
Februar	0,51	-0,71
März	0,97	-0,93
April	1,11	-1,31
Mai	1,35	-1,41
Juni	1,70	-1,35
Juli	2,02	-1,57
August	1,71	-1,66
September	1,38	-1,35
Oktober	1,10	-1,05
November	0,55	-0,57
Dezember	0,33	-0,48



Bauteil 5.3

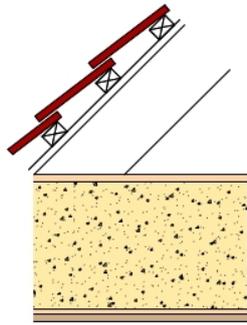


Bild 39.1: Darstellung des Bauteils

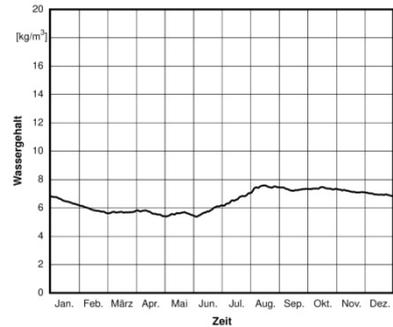


Bild 39.2: Wassergehalt in der Strohballendämmung

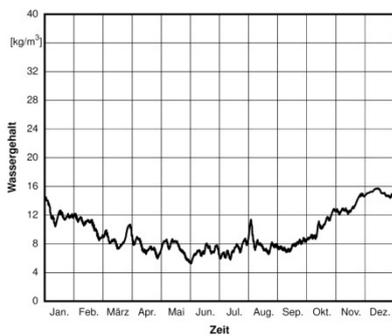


Bild 39.3: Wassergehalt an der äußeren Seite der Strohballendämmung, Monitor 1

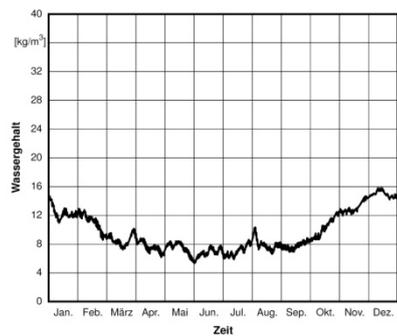


Bild 39.4: Wassergehalt in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung, Monitor 2

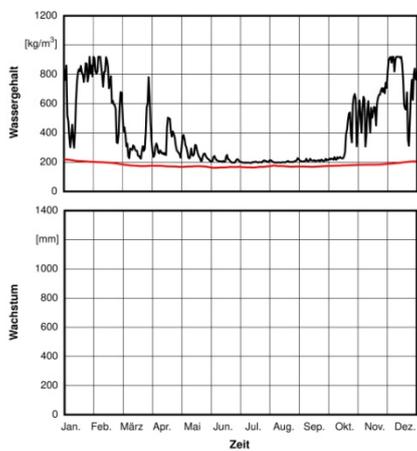


Bild 39.5: Schimmelpilzwachstum an der äußeren Seite der Strohballendämmung

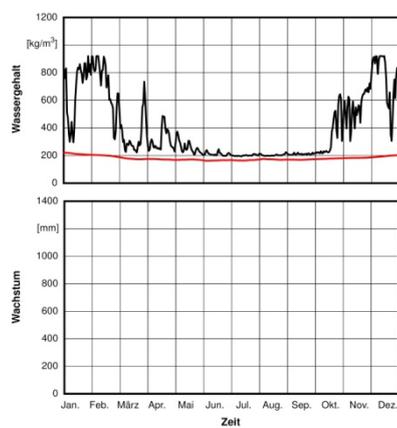
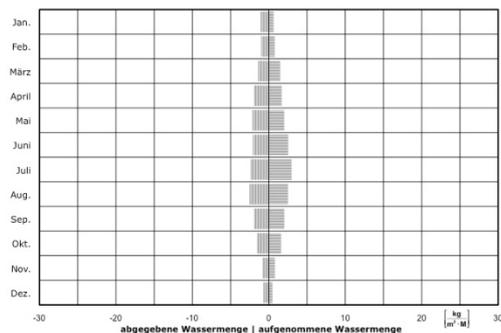


Bild 39.6: Schimmelpilzwachstum in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung

Monat	Aufnahme [kg/(m ³ ·M)]	Abgabe [kg/(m ³ ·M)]
Januar	0,63	-1,06
Februar	0,78	-1,00
März	1,49	-1,38
April	1,69	-1,95
Mai	2,01	-2,13
Juni	2,54	-2,09
Juli	2,97	-2,40
August	2,51	-2,51
September	2,02	-1,94
Oktober	1,61	-1,54
November	0,80	-0,83
Dezember	0,48	-0,71



6. Wandkonstruktionen mit dickerer Dämmung

Bauteil 6.1

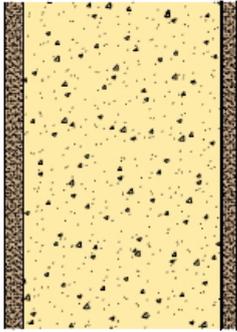


Bild 17.1: Darstellung des Bauteils

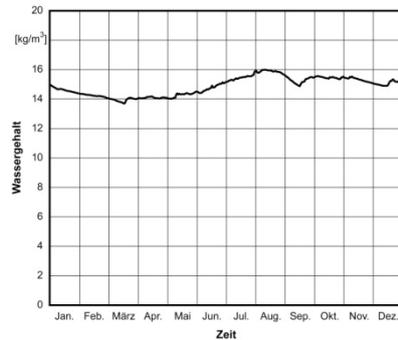


Bild 17.2: Wassergehalt in der Strohballendämmung

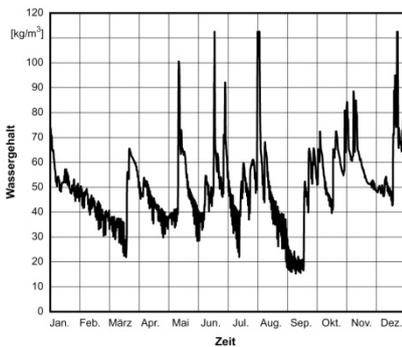


Bild 17.3: Wassergehalt an der äußeren Seite der Strohballendämmung, Monitor 1

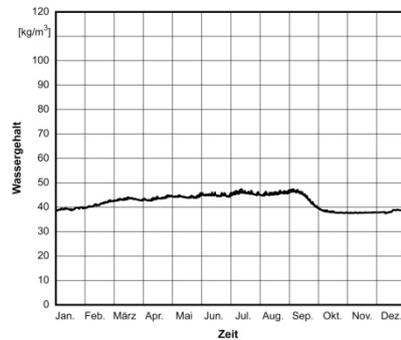


Bild 17.4: Wassergehalt in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung, Monitor 2

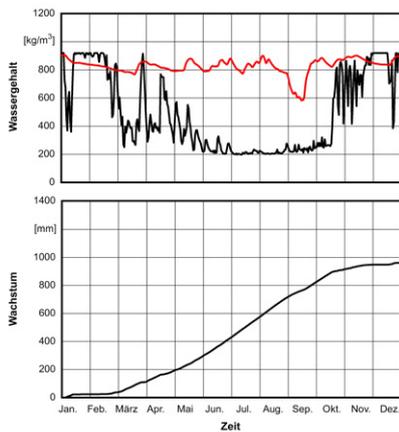


Bild 17.5: Schimmelpilzwachstum an der äußeren Seite der Strohballendämmung

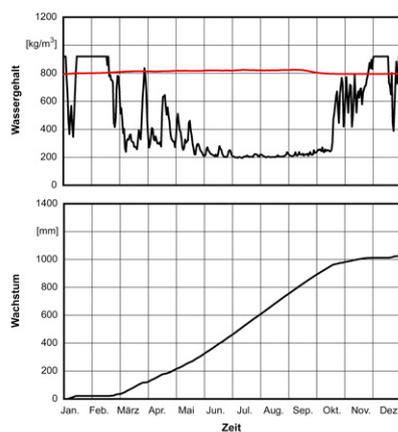
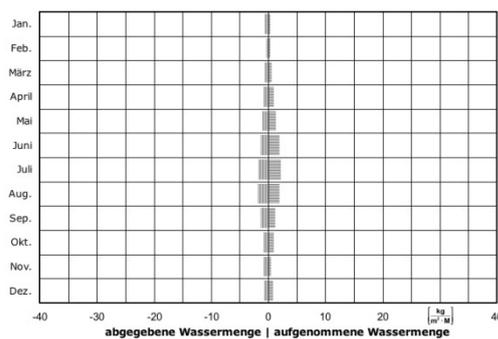


Bild 17.6: Schimmelpilzwachstum in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung

Monat	Aufnahme [kg/(m ³ ·M)]	Abgabe [kg/(m ³ ·M)]
Januar	0,19	-0,61
Februar	0,29	-0,36
März	0,55	-0,65
April	0,85	-0,90
Mai	1,21	-0,92
Juni	1,84	-1,37
Juli	2,15	-1,69
August	1,80	-1,82
September	1,13	-1,36
Oktober	0,89	-0,85
November	0,38	-0,81
Dezember	0,76	-0,71



Bauteil 6.2

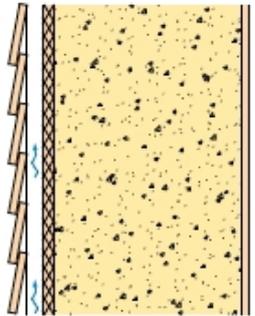


Bild 18.1: Darstellung des Bauteils

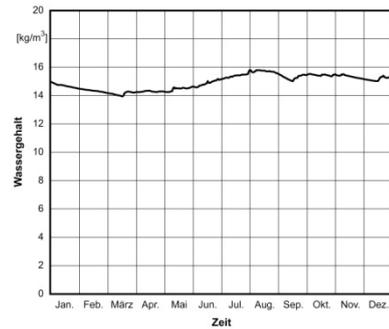


Bild 18.2: Wassergehalt in der Strohballendämmung

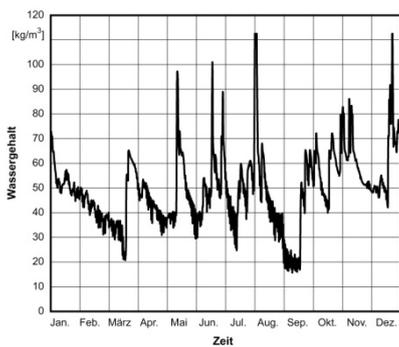


Bild 18.3: Wassergehalt an der äußeren Seite der Strohballendämmung, Monitor 1

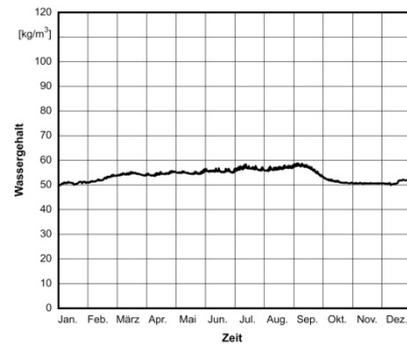


Bild 18.4: Wassergehalt in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung, Monitor 2

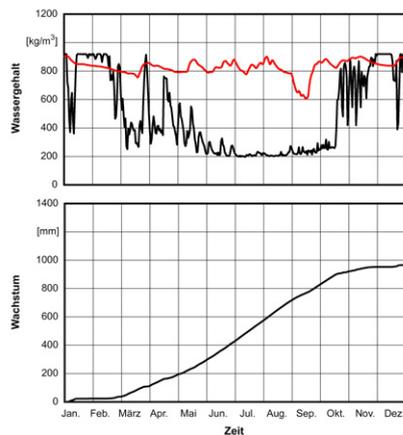


Bild 18.5: Schimmelpilzwachstum an der äußeren Seite der Strohballendämmung

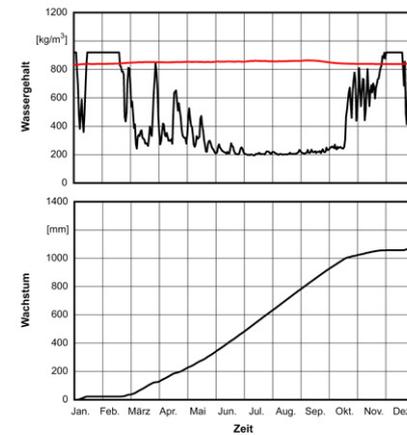
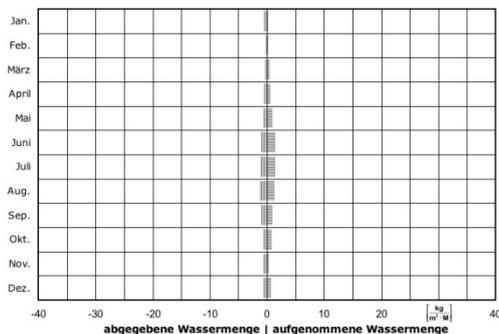


Bild 18.6: Schimmelpilzwachstum in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung

Monat	Aufnahme [kg/(m ³ ·M)]	Abgabe [kg/(m ³ ·M)]
Januar	0,10	-0,54
Februar	0,17	-0,20
März	0,41	-0,43
April	0,51	-0,52
Mai	0,84	-0,61
Juni	1,32	-0,94
Juli	1,38	-1,06
August	1,20	-1,23
September	0,80	-0,95
Oktober	0,68	-0,67
November	0,30	-0,64
Dezember	0,66	-0,59



7. Langzeituntersuchungen

Langzeituntersuchungen Bauteil 1.1

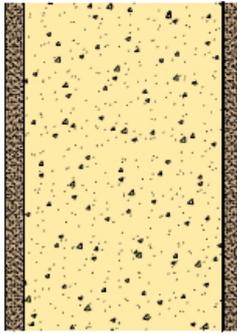


Bild 19.1: Darstellung des Bauteils

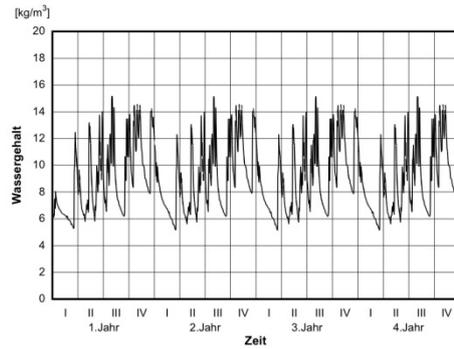


Bild 19.2: Wassergehalt in der Strohballendämmung

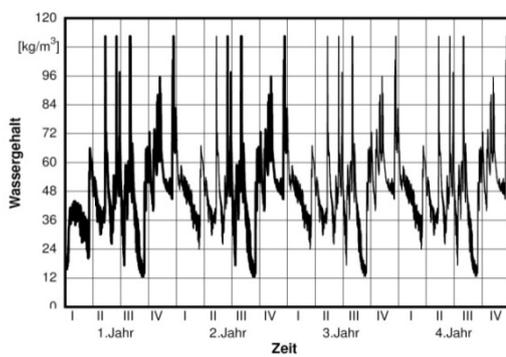


Bild 19.3: Wassergehalt an der äußeren Seite der Strohballendämmung, Monitor 1

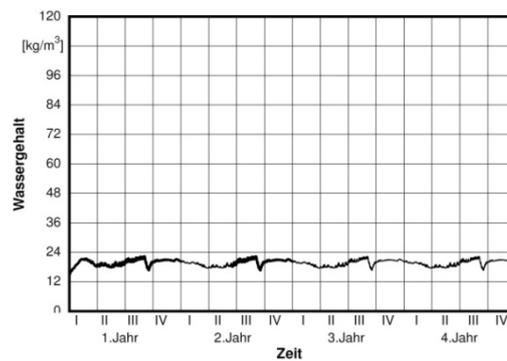


Bild 19.4: Wassergehalt in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung, Monitor 2

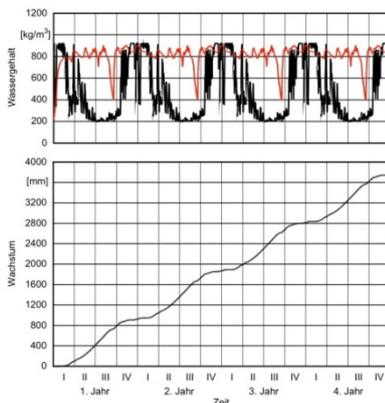


Bild 19.5: Schimmelpilzwachstum an der äußeren Seite der Strohballendämmung

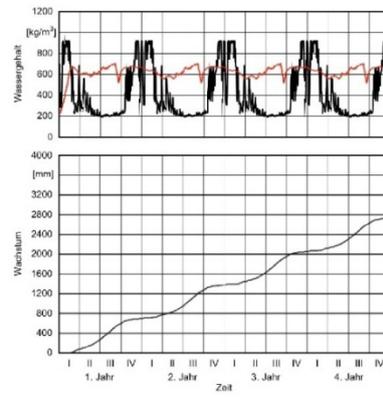
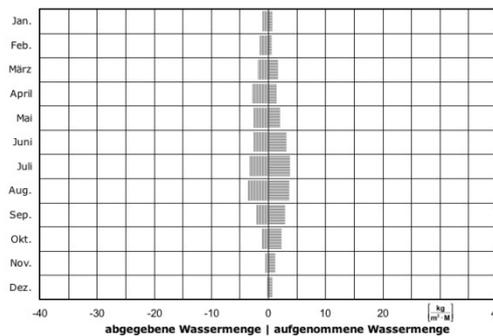


Bild 19.6: Schimmelpilzwachstum in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung

Monat	Aufnahme [kg/(m ³ ·M)]	Abgabe [kg/(m ³ ·M)]
Januar	0,55	-0,98
Februar	0,49	-1,51
März	1,65	-1,81
April	1,41	-2,80
Mai	1,92	-2,62
Juni	3,04	-2,58
Juli	3,71	-3,30
August	3,53	-3,54
September	2,78	-2,13
Oktober	2,18	-1,09
November	1,12	-0,44
Dezember	0,66	-0,24



Langzeituntersuchungen Bauteil 1.1.5a

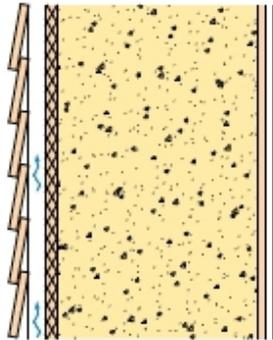


Bild 20.1: Darstellung des Bauteils

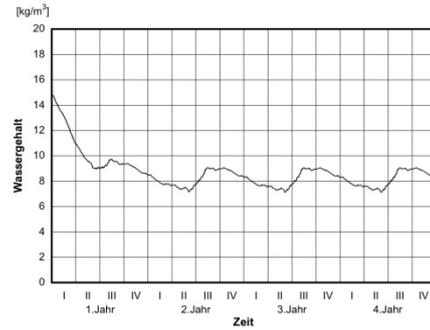


Bild 20.2: Wassergehalt in der Strohballendämmung

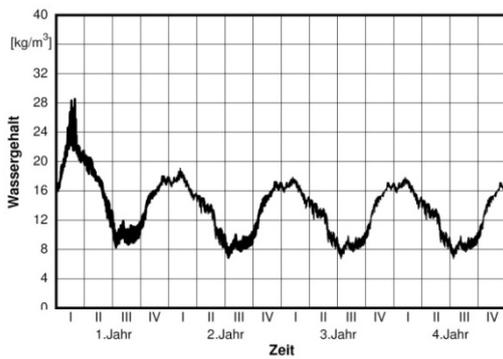


Bild 20.3: Wassergehalt an der äußeren Seite der Strohballendämmung, Monitor 1

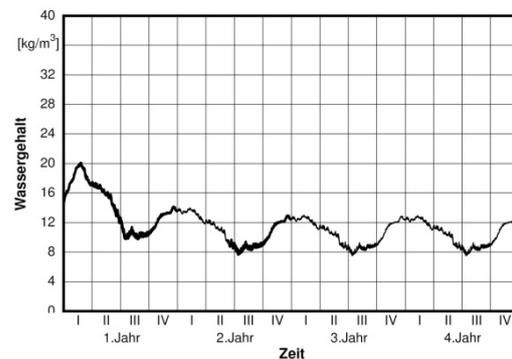


Bild 20.4: Wassergehalt in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung, Monitor 2

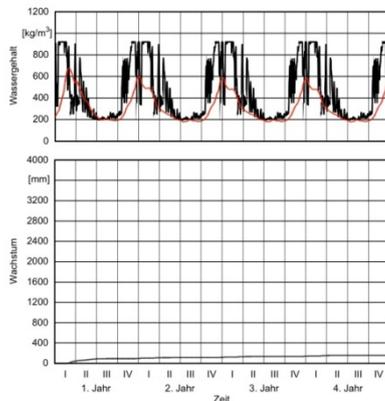


Bild 20.5: Schimmelpilzwachstum an der äußeren Seite der Strohballendämmung

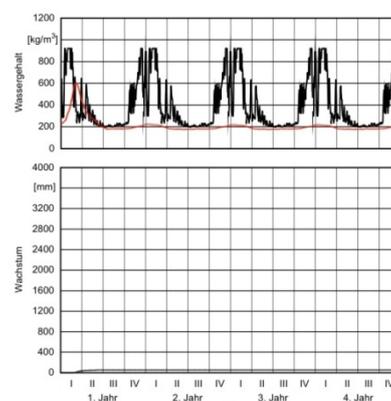
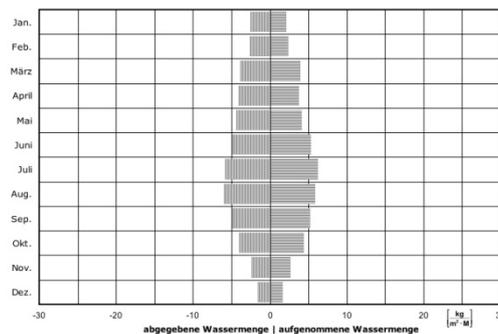


Bild 20.6: Schimmelpilzwachstum in 5 cm Tiefe der Strohballendämmung

Monat	Aufnahme [kg/(m³·M)]	Abgabe [kg/(m³·M)]
Januar	2,06	-2,52
Februar	2,34	-2,64
März	3,92	-3,90
April	3,73	-4,08
Mai	4,12	-4,32
Juni	5,23	-4,93
Juli	6,21	-5,83
August	5,81	-5,97
September	5,16	-4,89
Oktober	4,31	-3,99
November	2,57	-2,41
Dezember	1,64	-1,61



B 2 Untersuchungen des Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Holzkirchen

IBP-Bericht HTB-10/2008

Fraunhofer Institut für Bauphysik Holzkirchen
Fraunhoferstr. 10, D- 83626 Valley, Tel. 08024-643-0
Projektbereich B2: Hygrothermisches Verhalten und Mikrobiologie
Dr. rer. nat. Cornelia Fitz
Dr.-Ing. M. Krus
Dr. rer. nat. Wolfgang Hofbauer
Dipl.-Biol. Nicole Krueger

durchgeführt im Auftrag des Fachverband Strohballenbau Deutschland e.V.

1 Zusammenfassung

Für die Untersuchung der Gebrauchstauglichkeit einer Dämmung aus Strohballen wurden an einem bestehenden Gebäude auf dem Freigelände des IBP mit westorientierter Fassade entsprechende Wandflächen aufgebaut. Im Innern der Halle wird im Winterhalbjahr ein Klima von ca. 20 °C und 50 % r. F. aufrechterhalten. Die Wandflächen sind außenseitig der Witterung ausgesetzt, wobei sich das Holzkirchner Klima durch eine relativ hohe Schlagregenbelastung auszeichnet. An den Versuchsf lächen werden über einen Zeitraum von 24 Monaten Untersuchungen durchgeführt, die zum einen zur praxisnahen Beurteilung der Funktionsfähigkeit der gewählten Aufbauten dienen und zum anderen der Validierung von WUFI-Berechnungen.

Für die Untersuchungen wurden 2 Wandaufbauten erstellt, die beide innenseitig einen Lehmputz besitzen und als Dämmung Strohballen. Außenseitig wurde auf der einen Wand ein Lehmputz und auf der anderen Wand ein Kalkputz angebracht. Für die feuchtetechnische Beurteilung und als Grundlage der Berechnungen wurden alle notwendigen hygrothermischen Materialkennwerte der beiden verwendeten Putzsysteme bestimmt. Die Materialuntersuchungen ergaben für Lehm- bzw. Kalkputz typische Werte, wobei besonders zu erwähnen ist, dass beide Putze einen für die Anwendung als Außenputz außergewöhnlich hohen Wasseraufnahmekoeffizienten besitzen.

Zu Beginn des Jahres 2007 kam es aufgrund von Regen zu einer Aufweichung des Lehmputzes mit stellenweiser Auswaschung und in der Folge rutschte beim Orkan Kyrill die Hälfte der Lehmputzwand ab. In Absprache mit dem Auftraggeber wird daraufhin der Fassadenteil mit einer diffusionsoffenen Unterspannbahn abgehängt, um den Regenschutz sicherzustellen und ein Austrocknen zu ermöglichen. Im Juni 2007 wird die Versuchsf läche mit einer Schalung aus ungehobelten Lärchenbrettern versehen. Die Kalkputzf läche weist bereits kurz nach Fertigstellung im oberen Bereich feine Risse auf.

Die an den Versuchswänden durchgeführten Messungen ergeben an der dunkleren Lehmputzf läche tagsüber um 5 bis 10 K höhere Temperaturen als beim Kalkputz. Die 5 cm hinter dem Außenputz im Stroh gemessenen Luftfeuchten liegen zwischen 80 und 95 %. Die Feuchte in der Lehmputzvariante ist um etwa 5 % geringer als in der Kalkputzvariante. Nach dem Abrutschen des Lehmputzes wird diese Versuchsf läche mit einer diffusionsoffenen Unterspannbahn abgehängt mit der Folge einer starken Austrocknung der Lehmputzvariante. Die gemessenen Feuchten bei der Kalkputzvariante zeigen bei der weiteren Messung einen leichten Anstieg. Die Werte liegen am Ende des Messzeitraumes bei der Kalkputzvariante zwischen 90 und 100 % r. F. Nach Anbringung der Verschalung an der Lehmputzwand steigen die gemessenen Luftfeuchten wieder an, allerdings nur auf Werte, die zwischen 55 und 70 % r. F. schwanken.

Durch aufwendige Messreihen erfolgte die Erstellung von Isoplethenbereichen für Strohballen, wie sie beim Erstellen von realen Konstruktionen Anwendung finden, sowie für den Lehmputz-Strohballen-Verbund. Aufgrund der Messungen wird bestätigt, dass das Stroh sowohl der Ballen als auch im Verbund mit Lehmputz ein für Schimmelpilze leicht verwertbares Substrat darstellt. In der Einbausituation sollte das Material mittelfristig (über mehrere Tage) bei z.B. 25°C Umgebungstemperatur keinen relativen Luftfeuchten über 75% ausgesetzt sein. Im kälteren Bereich verhält sich das reine Ballenstroh etwas günstiger, als im Verbund mit Lehmputz.

Bezüglich der mikrobiologischen Untersuchungen ist festzustellen, dass das Ballenstroh mit einer gewissen Hintergrundkeimzahl an Pilzsporen bzw. Bakterien zum Einsatz kommt. Für das Material und die Herstellungsart ist diese jedoch als natürlich und nicht ungewöhnlich zu betrachten. Unmittelbar nach dem Verputzen kann eine leichte Zunahme der Keimzahlen beobachtet werden, was sich durch

die zusätzliche Verfügbarkeit von Wasser erklärt, die durch den nassen Putz eingebracht wird. Insofern das Ballenstroh austrocknen kann und keinen weiteren Feuchtebelastungen ausgesetzt ist, reduziert sich anschließend diese Keimzahl im Laufe der Zeit. Für die Untersuchung des Langzeitverhaltens in einem realen Wandaufbau wurden zwei Versuchswände erstellt, eine außenseitig mit Lehmputz versehen („Lehmputzwand“) sowie eine mit einem Kalkputz an der Außenseite („Kalkputzwand“), und nach zwei Jahren Freibewitterung beprobt und mikrobiologisch untersucht. Leider wurde der außenseitige Lehmputz infolge eines Starkregens abgewaschen, worauf das Stroh eine Zeit lediglich mit einer Folie abgedeckt war und anschließend eine Lärchenbeplankung als außenseitiger Abschluss angebracht wurde. Im Rahmen der mikrobiologischen Untersuchungen wurde für diese Versuchswand (Lehmputzwand) eine leichte Abnahme der Keimzahlen festgestellt. Diese Abnahme kann jedoch aufgrund der Ereignisse nicht als allgemeingültig für eine außenseitig lehmverputzte Strohballenwand interpretiert werden. Bei der zweiten Versuchswand (Kalkputzwand) war bereits bei der Probennahme eine Vernässung festzustellen, in der mikrobiologischen Untersuchung zeigte sich eine entsprechende deutliche Zunahme der Keimzahlen.

Die für die Wandkonstruktion mit außenseitigem Kalkputz mit den im Freilandversuch im Stroh etwa 5 cm hinter dem Kalkputz gemessenen Verläufe der Temperatur und relativen Luftfeuchte wurden genutzt um die WUFI® - Berechnungen zu validieren. Mit Hilfe des Schimmelpilzprognosemodells ergibt sich bei Verwendung der gemessenen Temperatur- und Feuchteverläufe sowie der Rechenergebnisse für diese Stelle ein deutliches Schimmelpilzwachstum, was mit dem bei der Probennahme vorgefundenen Zustand übereinstimmt. Die über einen Zeitraum von 5 Jahren für den Holzkirchner Standort durchgeführten Berechnungen zeigen im äußeren Bereich des Strohballens sehr hohe relative Luftfeuchten von ganzjährig oberhalb 95 %. Der Grund für dieses ungünstige Verhalten des untersuchten Wandaufbaus ist der mit $5 \text{ kg/m}^2\sqrt{\text{h}}$ äußerst hohe Wasseraufnahmekoeffizient des verwendeten Kalkputzes. Die Berechnung einer zusätzlichen Variante mit hydrophobem Anstrich ergibt wesentlich geringere Luftfeuchten und deutlich geringeres Schimmelpilzwachstum, wobei durch Verwendung eines dunklen hydrophoben Anstriches die Situation weiter verbessert werden kann.

Abschließend ist festzustellen, dass die eingesetzten Wandaufbauten für das Holzkirchner Klima mit seinem starken Schlagregen nicht geeignet waren und die Aussagefähigkeit der Untersuchungen deshalb stark eingeschränkt ist. Die nach der Validierung durchgeführten zusätzlichen Berechnungen zeigen aber, dass es grundsätzlich möglich ist Strohballen sicher als Baustoff im Rahmen des Strohballenbaus einzusetzen. Es muss jedoch darauf geachtet werden, dass z. B. durch einen diffusionsoffeneren und wasserabweisenden Putz oder eine entsprechende Verschalung kritische Feuchtezustände ausgeschlossen werden. Hilfreich wäre in diesem Zusammenhang auch eine diffusionsdichtere Innenbeschichtung.

2 Einleitung

Zur Beurteilung der Funktionsfähigkeit von Baustoffen ist die Kenntnis des Wärme- und Feuchtehaushalts im Anwendungsfall unabdingbar. Da es sich in diesem Falle bei Stroh um einen Dämmstoff aus nachwachsenden Rohstoffen handelt, ist hierbei das Risiko eines mikrobiellen Bewuchses von besonderem Interesse.

Voruntersuchungen haben gezeigt, dass bei den zu beurteilenden Konstruktionen mit Stroh als Dämmstoff die alleinige rechnerische Beurteilung mit WUFI- Bio, das für die Anwendung im Innenraum entwickelt wurde, keine belastbaren Aussagen zur Gebrauchstauglichkeit erlaubt. Es wurde deshalb beschlossen die Funktionsfähigkeit messtechnisch im Freigelände des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP), Holzkirchen, zu untersuchen.

3 Beschreibung des Untersuchungsumfangs und Begründung der Methodik

Auf dem Freigelände des IBP wurde eine Strohballenversuchswand errichtet und außenseitig mit einem Lehmputz sowie einem Kalkputz versehen. Temperatur- und Feuchtemessungen im Stroh werden über einen Zeitraum von 2 Jahren durchgeführt und dienen zur Validierung der rechnerischen Untersuchungen. Im Anschluss an die Freibewitterung soll das langfristige hygrothermische Verhalten berechnet werden. Dafür müssen auch die hygrothermischen Materialkennwerte der eingesetzten Putze bestimmt werden. Zusätzlich werden Messungen zur Erstellung eines Isoplethensystems für Strohballen durchgeführt und mit dem biohygrothermischen Modell versucht das Schimmelpilzrisiko rechnerisch zu ermitteln.

Zur Ermittlung der realen mikrobiologischen Verhältnisse werden Untersuchungen zu Keimzahlen des Ballenstrohs durchgeführt. Dazu werden Keimzahlen von unverbautem Stroh (Ausgangskeimzahlen), des Strohs nach Aufbringung eines Lehmputzes sowie des Strohs unmittelbar hinter dem Außenputz der Versuchswände (Lehmputzwand, Kalkputzwand) nach Ablauf der Messungen herangezogen.

4 Laboruntersuchungen am Lehmputz und Kalkputz

4.1 Zielsetzung der Untersuchung

Die feuchtetechnischen Materialkennwerte beschreiben den Feuchtetransport im Material sowie die dort ablaufenden Speichervorgänge. Für die vorgesehenen Berechnungen mit dem Programm WUFI® ist die Kenntnis der nachfolgend aufgeführten Materialkennwerte erforderlich:

- Rohdichte, Reindichte, Porosität
- Wasserdampfdurchlässigkeit
- Wasseraufnahmekoeffizient
- Sorptionsfeuchte
- freie Wassersättigung und Trocknungsverlauf zur Ermittlung der Kapillartransportkoeffizienten

4.2 Prüfverfahren

Für die Bestimmung der erforderlichen Materialkennwerte werden sowohl normierte Prüfverfahren, als auch am IBP entwickelte Verfahren eingesetzt. Nachfolgend werden die einzelnen Kennwerte und Prüfverfahren erläutert.

Rohdichte

Als Rohdichte, ρ , bezeichnet man die Dichte eines porösen Festkörpers, die definiert ist als das Verhältnis von Masse der trockenen Festsubstanz und dem eingenommenen Raumvolumen, bestehend aus Feststoff inklusive Porenraum der Materialprobe [kg/m^3]. Die Trockenmasse wird durch Trocknung auf Gewichtskonstanz bei einer definierten Temperatur ermittelt. Die jeweilige Trocknungstemperatur richtet sich nach der Art des Materials und variiert zwischen 40 °C und 105 °C.

Reindichte

Das Porenvolumen eines Stoffes wird mit Hilfe des Heliumpyknometers bestimmt. Im Messgerät sind zwei Kammern vorhanden, eine davon mit variablem Volumen. Zu Messbeginn wird das Volumen der unbefüllten Probenkammer auf die Größe der Vergleichskammer eingestellt. Dazu wird mit Hilfe von Hubkolben in beide zuvor evakuierte Kammern die gleiche Menge Helium eingebracht und das Volumen der veränderlichen Kammer so eingestellt, dass in beiden Kammern der gleiche Druck vorliegt. Helium wird deshalb verwendet, weil es ein inertes Gas ist und einen extrem kleinen Molekulardurchmesser besitzt, so dass es sicher alle zugänglichen Hohlräume einer Probe füllt. Anschließend wird die Probenkammer mit dem Prüfgut befüllt, wieder evakuiert und dann die gleiche Menge Helium wie vorher eingebracht. Um in beiden Kammern nun den gleichen Druck zu erreichen, muss das Volumen der Prüfkammer um das Volumen des reinen Feststoffes des Prüfgutes vergrößert werden. Dividiert man die Masse der Probe durch das so bestimmte Reinvolumen, erhält man die Reindichte.

Porosität

Die Porosität, Φ [m^3/m^3], berechnet sich über das Substanzvolumen aus Rohdichte und Reindichte. Sie beschreibt den gesamten, zur Verfügung stehenden Porenraum.

$$\Phi = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_m}$$

ρ_d [kg/m^3] Rohdichte

ρ_m [kg/m^3] Reindichte

Φ [m^3/m^3] Porosität

Diffusionswiderstandszahl

Die Diffusionswiderstandszahl beschreibt den Wasserdampfdiffusionswiderstand eines Materials im Vergleich zu einer Luftschicht gleicher Dicke. Die Diffusionswiderstandszahl von Luft ist dementsprechend gleich 1, wogegen die der Baumaterialien meist deutlich höher liegt.

Für die Bundesrepublik Deutschland ist die Durchführung der Messung von Dampfdiffusionskoeffizienten gemäß DIN EN ISO 12572 [1] genormt. Dabei wird nach Trockenbereichsverfahren für einen Feuchtigkeitsbereich zwischen 0 bis 50 % r.F., allgemein als "dry-cup"-Verfahren bekannt, und Feuchtbereichsverfahren für einen Feuchtigkeitsbereich zwischen 50 bis 100 % r.F. ("wet-cup") unterschieden. Die Messung erfolgt unter isothermen Bedingungen.

Eine plattenförmige Probe des zu prüfenden Materials wird als oberer Abschluss auf ein Gefäß aufgesetzt und dampfdicht mit dem Gefäßrand verbunden. Im Gefäß wird durch ein Trocknungsmittel oder eine gesättigte Salzlösung eine konstante relative Luftfeuchtigkeit eingestellt. Die Gefäße werden in einen Klimaraum mit konstanter Temperatur und Luftfeuchte gebracht. Unter dem Einfluss des Wasserdampfpartialdruckgefälles zwischen den an die Probenoberfläche angrenzenden Lufträumen diffundiert Wasserdampf durch die Proben hindurch. Nach Einstellen eines stationären Diffusionsstromes ergibt sich eine pro Zeiteinheit konstante Gewichtsänderung des Messgefäßes, welche dem Diffusionsstrom entspricht.

Wasseraufnahmekoeffizienten

Der Wasseraufnahmekoeffizient beschreibt die Feuchteaufnahme eines Materials über die Benetzungsfläche. Bei Materialien mit zeitlich konstanter Porenstruktur erfolgt die Wasseraufnahme stets linear mit der Wurzel der Zeit.

Zur Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten nach DIN EN ISO 15148 [2] werden die Proben an den Seitenflächen abgedichtet und mit der Saugfläche nach unten 2 bis 10 mm tief in ein Wasserbad eingetaucht. Die Proben werden vor dem Eintauchen in das Wasserbad und dann in bestimmten Zeitabständen gewogen. Vor der zweiten und den folgenden Wägungen wird an der Saugfläche oberflächlich anhaftendes Wasser mit einem feuchten Schwammtuch entfernt. Trägt man die flächenbezogene Wasseraufnahme über der Wurzel der Zeit auf, ergibt sich für die meisten mineralischen Baustoffe eine Gerade. Aus der Steigung der Geraden kann der Wasseraufnahmekoeffizient (w -Wert) ermittelt werden. Ergibt sich keine mit der Wurzel der Zeit lineare Wasseraufnahme, wird der w -Wert aus der Wasseraufnahme nach 24 Stunden ermittelt.

Freie Wasseraufnahme

Die freie Wasseraufnahme ist die gewichts- oder volumenbezogene Menge an Wasser, die ein Material bei Wasserlagerung ohne zusätzliche äußere Kräfte (Überdruck oder Vakuum) aufnimmt. Sie liegt aufgrund eingeschlossener Luftporen stets unterhalb der Menge, die das Material aufgrund seiner offenen Porosität aufnehmen könnte.

Zur Bestimmung der freien Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck gemäß DIN 52103 werden entsprechend vorbereitete und gewogene Prüfkörper in ein Wasserbad, gefüllt mit Leitungswasser, auf einen Gitterrost gelegt. Die Prüfkörper werden zunächst für 1 Stunde nur bis zur Hälfte eingetaucht. Dann werden sie mit 20 mm \pm 5 mm Wasser überdeckt und in regelmäßigen Zeitintervallen gewogen.

Oberflächlich anhaftendes Wasser wird mit einem feuchten Schwammtuch entfernt. Die freie Wasseraufnahme ist beendet, wenn Gewichtskonstanz erreicht ist, d. h. dass der Prüfkörper sein Gewicht in 24 Stunden um nicht mehr als 0,1 M.-% ändert.

Trocknungsversuch

Der Wasseraufnahmekoeffizienten (w -Wert) kann nur die Wasseraufnahme beschreiben. Der Flüssigtransport beim Trocknungsvorgang läuft im Allgemeinen deutlich langsamer ab. Für diesen Transportvorgang existiert kein Kennwert vergleichbar dem w -Wert. Aus diesem Grund muss zusätzlich ein Trocknungsversuch durchgeführt werden. Dazu werden gesättigte fünfseitig abgedichtete Proben in einem Klimaraum bei konstanten Randbedingungen (23 °C und 50 % r. F.) über die freie Seite getrocknet und durch Wägung der zeitliche Gewichtsverlauf ermittelt.

Feuchtespeicherfunktion und Sorptionsfeuchte

Die Feuchtespeicherfunktion beschreibt den Wassergehalt eines Baustoffes im Gleichgewicht mit den jeweiligen Randbedingungen. Bei der Bestimmung der Speichereigenschaften muss zwischen dem Sorptionsfeuchtebereich und dem Kapillarwasserbereich unterschieden werden.

Im Sorptionsfeuchtebereich gibt es ein allgemein angewandtes, sehr einfaches Verfahren. Die Probe wird in einem über einer Salzlösung oder mit Hilfe eines Klimaschranks eingestellten Klima gelagert und der Ausgleichsfeuchtegehalt durch Wiegen der Probe ermittelt. Durch schrittweises Variieren der relativen Luftfeuchte von relativ niedrigen (< 50 % r.F.) zu hohen Feuchten (bis 95 % r.F.) erhält man die Adsorptionsisotherme bzw. bei umgekehrter Vorgehensweise die Desorptionsisotherme. Messungen oberhalb von 95 % r.F. sollten nicht durchgeführt werden, da in diesem Bereich bei hygroskopischen mineralischen Baustoffen die Sorptionsisotherme extrem steil ist. Kleine nicht auszu-schließende Schwankungen der relativen Luftfeuchte (z.B. durch Temperaturschwankungen) bewirken nämlich bereits sehr große Änderungen der Sorptionsfeuchte. Das Messverfahren ist innerhalb der DIN EN ISO 12571 [1] normiert.

4.3 Ergebnisse

Die Bestimmung der hygrothermischen Materialkennwerte erfolgt an Rückstellproben, die während der Erstellung der Versuchswand angefertigt worden sind. Die Lehmputzproben sind in Absprache mit dem Auftraggeber vom Innenputz entnommen worden. Vom Kalkputz existieren Scheiben und Prismen. Die Werte für den Lehmputz sind in Tabelle 10-1, die für den Kalkputz in Tabelle 10-2 zusammengestellt. Die beiden Putze haben beinahe dieselbe Rohdichte. Die Porosität des Lehmputzes liegt bei 34 Vol.-%, die des Kalkputzes bei 31 %. Die Wasserdampfdurchlässigkeit der beiden Materialien ist im Trockenbereich nahezu identisch, allerdings ist im Feuchtbereich der Lehmputz deutlich diffusionsoffener. Der Wasseraufnahmekoeffizient des Lehmputzes beträgt $4,6 \text{ kg/m}^2\sqrt{\text{h}}$ (1 Stunden-Wert), der des Kalkputzes liegt bei $5,0 \text{ kg/m}^2\sqrt{\text{h}}$ (1 Stunden-Wert) und ist somit etwas höher. Die Kalkputzprobe ist im Gegensatz zur Lehmputzprobe nach etwa 1 Stunde durchfeuchtet, da die Putzprobe nur etwa eine Dicke von 20 mm hat. Die Lehmputzprobe ist 30 -50 mm dick und nach 24 Stunden noch nicht durchfeuchtet. Betrachtet man die Sorptionsfeuchten der beiden Putze, erkennt man, dass der Lehmputz deutlich höhere Werte aufweist als der Kalkputz. Die freie Wassersättigung des Lehmputzes liegt mit 35 Vol.-% geringfügig über der ermittelten Porosität von 34 Vol.-%, was sich mit Inhomogenitäten im Material erklären lässt und im Bereich der Messunsicherheit liegen.

Von den Strohballen wurde die Rohdichte sowie die Sorptionsisotherme bestimmt. Die Werte sind in Tabelle 10-3 zusammengefasst.

5 Bestimmung des Isoplethensystems für Strohballen

5.1 Zielsetzung der Untersuchung

Ausgangssituation

Im Zusammenhang mit Baustoffen ist die Problematik unerwünschten mikrobiologischen Befalles (Schimmelwachstum) mit großen Unsicherheiten behaftet. Daher besteht ein großes Interesse an Daten, die den sicheren Einsatzbereich von Bauprodukten bei unterschiedlichen Temperaturen und relativen Feuchten hinreichend definieren. Zur Darstellung des Verhaltens von Baustoffen unter unterschiedlichen Kombinationen von Temperatur und Luftfeuchte in Bezug zur Resistenz gegenüber dem Befall durch Schimmelpilze eignen sich besonders so genannte Isoplethensysteme [4]; [7].

Unter Isoplethen im hier verwendeten Sinn, sind Kurven gleicher Auskeimzeit bzw. gleichen Wachstums von Schimmelpilzen, bei unterschiedlichen Temperaturen und Luftfechtigkeiten, zu verstehen. Mit ihrer Hilfe lässt sich die Schadenstoleranz verschiedener Materialien gegenüber Schimmelpilzen eingrenzen. Grundlage für die Isoplethenbestimmung ist der LIM 0 (LIM: Lowest Isopleth of Mould), der für verschiedenste Pilze auf Vollmedium bestimmt wurde und der generell die unterste Grenze für Schimmelpilzwachstum in Bezug zu Baumaterialien darstellt.

Mit dem verwendeten Messprinzip können Messdaten gewonnen werden, auf deren Basis material-spezifische Isoplethenbereiche abgeleitet werden, die die materialspezifischen Minimalbedingungen umgrenzen. Diese geben „Bandbreiten“ einer potentiellen Anfälligkeit der untersuchten Baustoffe gegenüber Pilzwachstum im Vergleich wieder. Je mehr Daten von unterschiedlichen Kombinationen von relativer Luftfeuchte und Temperatur gemessen werden, desto enger können die Isoplethenbereiche definiert werden. Sobald eine ausreichende Datenbasis „Materialspezifische Isoplethen“ vorliegt, kann diese Grundlage für hygrothermische Berechnungen sein.

Das Verhalten von Stroh und einem Strohlehmputzverbund gegenüber Feuchte und seine Resistenz gegenüber dem Befall durch Schimmelpilze soll untersucht werden, da bisher grundlegende Daten zum Verhalten dieser Stoffe unter der gesamten Breite der möglichen Randbedingungen fehlen. Insbesondere bestehen bisher keine detaillierten Auswertungen hinsichtlich des Isoplethenmodells [4],[5]. Mit der verwendeten Prüfeinrichtung ist es möglich, die Randbedingungen sehr genau zu erfassen und zu kontrollieren, schließlich können aus den gemessenen Daten Isoplethenbereiche abgeleitet und errechnet werden [7]. Darüber hinaus können die gewonnenen Daten auch für die Ermittlung des Schimmelpilzrisikos und die Beurteilung von Sanierungsmaßnahmen mit Hilfe eines neu entwickelten Berechnungsverfahrens [6] herangezogen werden.

5.2 Prüfverfahren

Prüfkörper

Zur Bestimmung der materialspezifischen Isoplethenbereiche wurden Prüfkörper mit Abmessungen von ca. 5 x 5 cm² in der Fläche und einer Dicke von ca. 2,5 - 5 cm gestaltet. Beim Strohlehmputz-Verbund wurden die Prüfkörper mit den notwendigen Abmessungen aus dem Materialverbund herausgearbeitet. Das Verbundmaterial sowie das reine Stroh wurden in spezielle Körbchen aus rost-freiem Edelstahlgitter gepackt, die die Prüfkörper aufnehmen. Dadurch ist gewährleistet, dass die verschiedenen Materialien unter gleichen Bedingungen getestet werden können. Je Testansatz (Test-

Klimate, siehe Tabelle 10-4) wurden jeweils drei Parallelen je untersuchtem Material angelegt, deren Beobachtungsergebnisse gemittelt wurden. Für die Durchführung der Prüfung sind dem Stroh und dem Lehmputz-Verbund jeweils 36 Versuchsproben entnommen worden.

Sterilisation

Da vorgesehen ist, dass die Prüfkörper mit einer spezifischen Sporensuspension materialrelevanter Pilze (siehe Tabelle 10-5) beimpft werden, wurde eine vorherige Gamma-Sterilisation der Prüfkörper durchgeführt. Gamma-Strahlung eignet sich am Besten zur Sterilisation der Prüfkörper im Rahmen dieses Projektes, da dadurch Beeinflussungen von Materialeigenschaften, z.B. durch hohe Temperaturen und / oder Feuchte (wie bei der Autoklavierung), ausgeschlossen werden können.

Test-Klimate

Während der Testphase wurden die Prüfkörper in einzelnen Inkubationseinheiten kontrollierten Bedingungen ausgesetzt (12 verschiedene Klimate; Tabelle 10-4). Die Test-Klimate (Kombinationen von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit) sind so ausgewählt, dass sie möglichst den gesamten Feuchtigkeitsbereich abdecken, in dem potentiell ein Wachstum der verwendeten Prüfpilze an den unterschiedlichen Materialien erwartet werden könnte. Die Untersuchungsbedingungen umfassen eine niedrige Temperatur (in Anlehnung an einen Kellerraum) und eine hohe Temperatur (in Anlehnung an einen beheizten Wohnraum) und verschiedene hohe Luftfeuchtigkeiten wie sie zum Beispiel in einem Bad oder einer Küche bzw. nach einem Wasserschaden auftreten können. In einem weiteren Schritt können anschließend die jeweiligen materialspezifischen Isoplethenbereiche durch Folgemessungen weiter präzisiert werden. Eine Beschränkung auf ausgewählte Klimate ist erforderlich, um den Untersuchungsumfang auf ein sinnvolles Maß zu reduzieren.

Prüfpilze

Die Prüfkörper wurden in den Inkubationseinheiten für mindestens 48 Stunden auf die jeweiligen Untersuchungsbedingungen vorkonditioniert und anschließend, um eine Pilzbelastung aus der Umgebung zu simulieren, gezielt mit materialrelevanten Mikroorganismen (siehe Tabelle 10-5) beimpft.

Die Beimpfung erfolgte mit ausgewählten bauteilrelevanten Pilzen und einer Hefe (10 verschiedene Arten, Tabelle 10-5) unter sterilen Bedingungen (Sterilwerkbank). Dazu wurden auf die Prüfkörper mittels Pipette, an drei verschiedenen Punkten, jeweils 20 µl der Pilzsporensuspensionen aufgebracht. Es wurden in erster Linie Arten berücksichtigt, die potentiell auf einer möglichst großen Bandbreite von Materialien wachsen können, als auch Arten die bei den verschiedensten, mikroklimatischen Randbedingungen ihr Optimum haben. Von besonderem Interesse sind relativ trockenheitstolerante Pilzarten, da diese die Anfälligkeitsgrenzen des Materials besonders gut definieren.

Messungen/Kontrolle

Die bei den unterschiedlichen Klimaten inkubierten Prüfkörper wurden anfangs täglich, später jeden zweiten bzw. dritten Tag und anschließend bis zum Untersuchungsende (100 Tage nach der Überimpfung) wöchentlich mikroskopisch (Auflichtmikroskop) kontrolliert und tabellarisch mittels einer eigens entwickelten Schätzskala (7 Stufen, Tabelle 10-6) dokumentiert und fotografiert. Die Gesamtlaufzeit der Versuchsreihe betrug 100 Tage, da nach dieser Zeitspanne erfahrungsgemäß nicht

mehr mit dem Auskeimen von Sporen aus der Impfsuspension zu rechnen ist [4]. Über eigens installierte Messfühler, die an einen Messlogger angeschlossen sind, werden die Messklimata aufgezeichnet, um die Konstanz der Randbedingungen zu überwachen und zu dokumentieren.

Messprinzip

In Bild 10-1 wird der grundsätzliche Aufbau des Messprinzips schematisch wiedergegeben. Ein kontrollierter, gereinigter Luftstrom durchfließt eine Waschflasche mit destilliertem Wasser in einem Taupunktbad, wodurch sich die Luft bei der vorgegebenen Temperatur zu 100% wassergesättigt. Anschließend wird diese wassergesättigte Luft in der jeweiligen Inkubationseinheit auf die gewünschte Temperatur im Brutschrank erwärmt. Auf diese Weise sind konstante Bedingungen bezüglich Luftfeuchtigkeit und Temperatur gewährleistet.

5.3 Ergebnisse

Prüfergebnisse

Im durchgeführten Langzeitversuch konnten zahlreiche Messdaten gewonnen werden. Diese wurden unter verschiedenen Gesichtspunkten ausgewertet und bearbeitet.

Bewuchsverlauf

Diagramm 10-1 bis Diagramm 10-4 zeigen den Bewuchsverlauf auf beiden Materialien bei zwei ausgewählten Klimaten (25°C, 95% rH; 10°C, 95% rH). Diese Bedingungen wurden für die Darstellung ausgewählt, weil sie die extremsten Klimata darstellen mit den für Schimmelpilzwachstum günstigsten Verhältnissen. Die Materialien weisen unterschiedliche Zeitpunkte auf, an denen Bewuchs sichtbar wird. Insgesamt zeigt sich, dass bei der höheren Temperatur (25°C) das Wachstum innerhalb relativ kurzer Zeit nach der Aufimpfung beginnen kann, während bei der niedrigeren Temperatur (10°C) der Beginn des Wachstums vergleichsweise mehrere Wochen nach hinten verschoben ist.

Die höchsten Bewuchsklassen treten bei den hohen Luftfeuchtigkeiten auf. Für die Ermittlung der Isoplethenbereiche wurden ausschließlich Bewuchsklassen berücksichtigt, die größer oder gleich 3 sind, weil bei niedrigeren Bewuchsklassen nicht auszuschließen ist, dass evtl. abgestorbene Pilzsporen den auskeimenden Schimmelpilzen als Nahrungsgrundlage dienen und so ein geringes Mycelwachstum ermöglichen.

Bild 10-2 und Bild 10-3 zeigen die Oberflächen der Prüfkörper während des Versuchsverlaufs.

Isoplethenbereiche

Die Isoplethenbereiche der untersuchten Materialien sind in Diagramm 10-5 und Diagramm 10-6 dargestellt. Die Grenzisoplethe für das jeweilige Material liegt im schraffierten Bereich. Oberhalb des schraffierten Bereiches ist Pilzwachstum wahrscheinlich, unterhalb des schraffierten Bereiches ist mit keinem Pilzwachstum zu rechnen.

Die Grenzisoplethen des Strohs und des Stroh-Lehmputz-Verbundes liegen nahe dem LIM 0, und liegt zwischen Baustoffklasse I (mikrobiologisch gut verwertbare Baustoffe), entsprechend [8], das heißt, sie neigen schon bei relativ niedrigen Luftfeuchten dazu von Schimmelpilzen bewachsen zu werden. Es wird darauf hingewiesen, dass die dargestellten Isoplethensysteme/-bereiche ausschließlich auf den erzielten Messwerten beruhen. Durch zusätzliche Messdaten können die Resistenz- bzw. Anfälligkeitsbereiche verfeinert werden.

6 Messtechnische Untersuchungen an einer Versuchswand

6.1 Zielsetzung der Untersuchung

An einem bestehenden Gebäude auf dem Freigelände des IBP mit westorientierter Fassade werden Wandflächen mit zwei unterschiedlichen Wandaufbauten mit Strohballendämmung versehen. Im Innern der Halle wird im Winterhalbjahr ein Klima von ca. 20 „C und 50 % r. F. aufrechterhalten.

Die Wandflächen sind außenseitig der Witterung ausgesetzt, wobei sich das Holzkirchner Klima durch eine relativ hohe Schlagregenbelastung auszeichnet. An den Versuchsflächen werden über einen Zeitraum von 24 Monaten folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Ermittlung des zeitlichen Verlaufs der Temperatur im äußeren Bereich der Strohballen durch den Einbau von Pt100 Messfühlern.
- Ermittlung des zeitlichen Verlaufs der Luftfeuchte im äußeren Bereich der Strohballen durch Einbau von Luftfeuchtemessfühlern.
- Optisch auftretende Effekte, wie z. B. Rissbildungen werden außerdem fotografisch dokumentiert.
- Bestimmung der Materialfeuchte durch Probennahme nach Fertigstellung im Oktober 2006 und im April 2008.

Die gemessenen Temperatur- und Feuchteverläufe dienen zur Validierung der WUFI-Berechnungen.

6.2 Aufbau der Versuchswand

Der Aufbau der Versuchswand erfolgte im Zeitraum vom 5. bis 29. September 2006. Im Folgenden werden die einzelnen Arbeitsgänge beschrieben:

In zwei Holzrahmen mit den Abmessungen 250 cm x 100 cm x 60 cm werden Strohballen in Presspassung eingebracht. Jedes Element wird mit sechs Strohballen ausgefüllt (Bild 10-4). Die Ballenstöße werden mit losem Stroh innen und außen nachgestopft um eine relativ ebene Oberfläche zu schaffen (Bild 10-5). Die Temperatur- und Feuchtesensoren werden in einen Strohballen eingelegt und zwar so, dass sie etwa 5 cm tief (von außen betrachtet) im Stroh liegen. Nach dem Aufstellen der beiden Elemente befinden sich die Sensoren in ca. 110 mm Höhe, ungefähr in der Mitte der Flächen.

Auf der Innenseite werden beide Wandelemente mit einem Lehmputz versehen. Der Putz wird in drei Lagen ausgeführt. Auf der Außenseite wird ein Element mit Kalkputz, das andere mit Lehmputz verputzt. Die Kalkputzvariante wird zunächst mit einer Ausgleichschicht versehen. Als zweite Lage wird ein Kalkunterputz mit einer Körnung von 0 – 4 mm aufgezogen, die dritte Lage besteht aus einem Kalkputz mit einer Körnung von 0 – 1 mm. Die Variante mit Lehmputz außen wird in vier Schichten ausgeführt, einer Ausgleichsschicht, zwei Zwischenputzlagen und einem Außenlehmputz, dem 3 Vol.-% Tapetenkleister zugesetzt werden. In Bild 10-6, Bild 10-7 und Bild 10-8 sind einzelne Arbeitsschritte festgehalten. Während der Putzarbeiten und nach Fertigstellung der Außenputze werden die Wandflächen mit einem Wetterschutz versehen (Bild 10-9), der 6 Wochen nach Aufbringen der letzten Putzlage, am 15. November 2006, abgebaut wird.

Parallel zum Aufbau der Wandflächen wird ein Muster in der Größe eines Strohballens (Bild 10-10) mit beidseitigem Lehmputz hergestellt, um daran eine erste Probennahme zur Bestimmung der Materialfeuchte durchzuführen. Zusätzlich werden Proben für die biologischen Untersuchungen entnommen.

Nach Entfernung des Wetterschutzes im November 2006 folgt eine relativ trockene Wetterperiode, ohne nennenswerten Regen. Erst zu Beginn des Jahres 2007 kommt es zu größeren Schlagregenereignissen und die äußere Lehmschicht wird weich und ist an einzelnen Stellen ausgewaschen (Bild 10-11). Am 18. Januar 2007, beim Orkan Kyrill, rutscht die Hälfte der Lehmputzwand ab (Bild 10-12).

In Absprache mit dem Auftraggeber wird daraufhin der Fassadenteil mit einer diffusionsoffenen Unterspannbahn abgehängt, um den Regenschutz sicherzustellen und ein Austrocknen zu ermöglichen. Im Juni 2007 wird die Versuchsfläche mit einer Schalung aus ungehobelten Lärchenbrettern versehen (Bild 10-13).

Die Kalkputzfläche weist bereits kurz nach Fertigstellung im oberen Bereich feine Risse auf, die nach Regen besonders gut zu erkennen sind (Bild 10-11). Im April 2007 tritt ein horizontal verlaufender Riss im unteren Teil der Fläche im Bereich eines Ballenstoßes auf.

6.3 Ergebnisse

6.3.1 Temperatur- und Feuchteverlauf

Die gemessenen Temperatur- und Feuchteverläufe werden exemplarisch für verschiedene Zeiträume grafisch dargestellt. Ab dem Zeitpunkt der Bewitterung sind die Schlagregensmengen mit aufgetragen. Diagramm 10-7 zeigt die Periode nach der Fertigstellung der Versuchsflächen, als die Flächen noch durch den Wetterschutz vor Regen geschützt sind. Die Temperaturverläufe für Kalk- und Lehmputz sind beinahe identisch und liegen zwischen 5 und 20 °C. Die täglichen Schwankungen betragen an einem sonnigen Tag etwa 10 °; hier ist zu beachten, dass durch den Wetterschutz keine direkte Sonneneinstrahlung auf die Wandflächen möglich war. Die gemessenen Feuchteverläufe im Stroh liegen zwischen 80 und 95 %. Die Feuchte in der Lehmputzvariante ist um etwa 5 % geringer als in der Kalkputzvariante.

Sobald der Wetterschutz am 15. November 2006 abgebaut ist (Diagramm 10-8), zeigen sich Unterschiede in den Temperaturverläufen. Die dunklere Lehmputzfläche erreicht tagsüber um 5 bis 10 K höhere Temperaturen. Im dargestellten Zeitraum ist kaum Schlagregen aufgetreten, wie im Diagramm unten dargestellt ist. Betrachtet man die Feuchteverläufe, ist eine geringe Trocknungstendenz für beide Varianten zu erkennen. Im weiteren Verlauf (Diagramm 10-9) unterscheiden sich die Feuchteverläufe von Lehm- und Kalkputz nur geringfügig. Der Messausfall vom 4. bis 11. Januar wurde durch einen Stromausfall während der Weihnachtsschließung hervorgerufen. In der Nacht vom 18. auf den 19. Januar 2007 rutscht die äußere Lage des Lehmputzes durch Einwirkung des Orkans Kyrill ab. Die Versuchsfläche mit Lehmputz wird deshalb mit einer diffusionsoffenen Unterspannbahn abgehängt und unterliegt nicht mehr der Bewitterung. Diagramm 10-10 zeigt die Auswirkung des Abhängens. Zum einen sind die Temperaturen hinter der dunklen Unterspannbahn höher als beim Kalkputz, und zum anderen kommt es zu einer deutlichen Austrocknung der Lehmputzvariante. Die gemessenen Feuchten bei der Kalkputzvariante zeigen einen leichten Anstieg im dargestellten Zeitraum.

Am 29. Juni 2007 wurde die Lehmputzvariante mit einer Holzschalung versehen. Die Auswirkung auf die Temperatur- und Feuchteverläufe zeigt Diagramm 10-11. Die gemessenen Temperaturen verlaufen bei beiden Wandflächen ähnlich, allerdings ist der Unterschied zwischen Tag und Nacht beim Lehm geringer, da die Luftschicht zwischen Holzschalung und Wand puffernd wirkt. Bei beiden Varianten kann eine steigende Tendenz in der Feuchte festgestellt werden. Die Werte liegen bei der Kalkputzvariante zwischen 95 und 100 % r. F., bei der Lehmputzvariante zwischen 60 und 70 % r. F. Betrachtet man einen ähnlichen Zeitraum im Sommer 2008 (Diagramm 10-12) zeigen sich ähnliche Verhältnisse. Die Feuchtwerte liegen beim Lehmputz zwischen 60 und 70 % r. F. und beim Kalkputz zwischen 90 und 100 % r. F. und zeigen eine größere Amplitude zwischen Tag und Nacht.

Bedauerlicherweise ist ein direkter Vergleich beider Varianten nach zweijähriger Bewitterung aufgrund der erfolgten Umbaumaßnahmen nicht mehr möglich. Das Abhängen der Lehmputzfläche über einen

Zeitraum von 6 Monaten führte zu einer Trocknung, die unter natürlichen Witterungseinflüssen so nicht gegeben ist.

6.3.2 Materialfeuchte

Die Materialfeuchtebestimmung zu Beginn der Messperiode wird an einem Muster (vergl. Bild 10-10), das parallel zur Versuchswand mit identischem Aufbau angefertigt wurde, durchgeführt. Die Probenahme erfolgt 7 Tage nach Fertigstellung, am 6. Oktober 2006. Dazu werden mit einer Kernbohrmaschine Proben entnommen und das Feuchteprofil durch Trocknung bei 40 °C mit trockener Umluft ermittelt. Die Ergebnisse sind in Diagramm 10-13 dargestellt. Die Lehmputzschichten außen und innen weisen eine Feuchte von ca. 1 bis 1,5 M.-% auf, die entnommenen Strohproben liefern Feuchten zwischen 10 und 13 M.-%. Erwartungsgemäß werden die größten Feuchten direkt hinter der Putzschicht erhalten. Im Gegensatz zu den Versuchsf lächen wurde das Muster im klimatisierten Gebäude gelagert, weshalb ein direkter Vergleich mit den gemessenen Feuchten an der Versuchswand nicht möglich ist.

Eine weitere Probennahme an den Wänden erfolgte nach der Winterperiode am 28. April 2008. An beiden Versuchsf lächen wurden in 80 cm und 180 cm Höhe Proben entnommen. Die Ergebnisse sind in Diagramm 10-14 und Diagramm 10-15 zusammengestellt. Die Lehmputzschicht außen besitzt eine Feuchte von ca. 1 M.-%, das dahinterliegende Stroh eine Feuchte von ca. 10 M.-%, was in etwa einer relativen Luftfeuchte von 60 % entspricht. Beim Kalkputz liegt die Feuchte der äußeren Putzschicht zwischen 6 und 7 M.-%, die Feuchte im Stroh liegt bei 20 bis 28 M.-% und entspricht 85 bis 90 % r. F.

Betrachtet man die gemessenen Feuchteverläufe zum Zeitpunkt der Probennahme, Diagramm 10-16, kann für die Kalkputzvariante eine gute Übereinstimmung festgestellt werden. Der gemessene Feuchteverlauf im Stroh liegt zwischen 80 und 100 % r. F. Für den Lehmputz liegen die Werte zwischen 65 und 75 % r. F. und somit etwas höher als gravimetrisch ermittelt wurde.

7 Biologische Untersuchungen an einer Versuchswand

7.1 Zielsetzung der Untersuchungen

Um Aufschluss über die vorliegende Menge an keimfähigen Verbreitungseinheiten (in Bezug zur Masse des Materials) zu erhalten wird die Gesamtkeimzahl durch das Ansetzen von Kulturen auf Selektivmedien unter Verwendung einer Verdünnungsreihe ermittelt. Zur qualitativen (taxonomischen) Analyse des festgestellten Aufwuchses am Material erfolgt im Anschluss an die Ermittlung der Gesamtkeimzahl eine taxonomische Differenzierung der gefundenen Mikroorganismen.

Parallel dazu durchgeführte mikroskopische Untersuchungen von Stichproben des Ausgangsmaterials sollen zusätzlich Aufschluss über den mikrobiologischen Zustand des Strohs geben. Bei dieser Untersuchung werden auch Mikroorganismen berücksichtigt, die nicht mehr keimfähig sind, bzw. als Parasiten nur das lebende Material angreifen.

Für vergleichenden Untersuchungen werden Keimzahlen bzw. mikroskopische Präparate von unverbautem Stroh (Ausgangsmaterial), des Strohs nach Aufbringung eines Lehmputzes sowie des Strohs unmittelbar hinter dem Außenputz der Versuchswände (Lehmputzwand, Kalkputzwand) nach Ablauf der Messungen herangezogen.

Für die Untersuchungen zu den Ausgangskeimzahlen standen mehrere unverbaute Strohballen zur Verfügung. Um für Aufschlüsse des Strohs unmittelbar nach dem Verputzen die Versuchswände nicht zu beschädigen wurde hierfür ein spezieller Prüfkörper erstellt (Bild 10-14).

7.2 Prüfverfahren

Stichprobenhafte mikroskopische Materialuntersuchung an Ausbauproben

Von unverbauten Strohballen (Ausgangsmaterial) wurden an 10 verschiedenen Stellen stichprobenhaft Materialproben entnommen und mikroskopisch auf Schimmelpilzbefall untersucht.

Aus dem verputzten Prüfkörper wurden an mehreren Stellen Löcher in den Putz gebohrt und direkt hinter dem Putz Strohproben zur mikroskopisch/mikrobiologischen Untersuchung entnommen (Bild 10-14).

Aus den beiden Strohballenversuchswänden (Lehmputzwand und Kalkputzwand) wurden nach der abgelaufenen Versuchszeit jeweils zwei Bohrungen (eine auf 80 cm Höhe und eine auf 180 cm Höhe) durchgeführt und ebenfalls direkt hinter dem Putz Strohproben zur mikroskopischen Untersuchung entnommen (Bild 10-15).

Gesamtkeimzahlbestimmung über Verdünnungsreihe

Aus den Stichproben bzw. Ausbauproben des Strohs wurden jeweils Mischproben von 0,5 g hergestellt. Die in den Mischproben vorhandenen Keime wurden in 20 ml Schwemmmittel suspendiert. Die so gewonnene Lösung wurde in 2 Verdünnungsstufen (jeweils 1:10) auf verschiedenen differenzierenden Nährmedien (Selektivmedien) ausplattiert. Die so aufbereiteten Proben wurden in Anzuchtschalen 1 Woche lang bei 24 °C inkubiert. Die Anzahl der KBE (Kolonie bildenden Einheiten) wurden nach der Inkubationsdauer ausgezählt. Die KBE der Pilze wurde auf einem Spezialmedium für xerophile Arten ermittelt (DG18), da bei einem trockenen Substrat wie Stroh davon ausgegangen werden kann, dass dort vorwiegend xerophile Arten vorkommen. Zusätzlich wurden die Pilze zu Differenzierungszwecken auch auf Malzextrak-Agar (MEA, Vollmedium) angezchtet. Die KBE der

Bakterien wurden auf üblichem Plate Count Agar (PCA) ausgezählt. Zur Keimzahlbestimmung wurden die Anzuchtschalen zuerst mit dem unbewaffneten Auge und anschließend mittels eines Stereomikroskopes bzw. im Bedarfsfall mittels eines Transmissionsmikroskopes untersucht. Zur Auswertung kamen dabei jeweils die Schalen mit Nährmedien, bei denen die Keimzahlen zwischen 10 und 100 Kolonien lagen. Wenn das bei beiden Verdünnungsstufen der Fall war, wurde ein Mittelwert gebildet.

Taxonomische Differenzierung von festgestelltem Befall

Durch die Reinzucht und den Vergleich mit Stämmen aus der ausführlichen Kulturensammlung des Institutes wurden Hauptverursacher des Befalls festgestellt und taxonomisch differenziert. Die taxonomische Zuordnung kann zusätzliche Auskunft über die ökophysiologischen Randbedingungen geben.

7.3 Ergebnisse

7.3.1 Keimgehalt des Ausgangsmaterials

Stichprobenhafte mikroskopische Materialuntersuchung an Ausbauproben des Ausgangsmaterials

Makroskopisch, visuell stellt sich das Material an einzelnen Stellen der unverbauten Strohballen leicht fleckig dar. Keine der Proben zeigte zum Zeitpunkt der Probennahme ein aktives Wachstum von Schimmelpilzen und keine für das bezeichnete Material (Getreidestroh), unübliche Beschaffenheiten, Mängel oder Besonderheiten. Es fand sich kein Hinweis für bestehende Feuchtigkeit im Stroh.

Auf verschiedenen Proben konnte an einzelnen Halmen früheres, zum Zeitpunkt der Probennahme inaktives, Wachstum von Pilzen festgestellt werden. Bei den materialassoziierte Pilzfäden (Hyphen) bzw. Pilz-Verbreitungsorganen (Sporen) handelt es sich vorwiegend um Pflanzenparasiten (Bild 10-16 bis Bild 10-19), die die lebende Pflanze am Feld befallen (s. Bild 10-19) und mit dem Tod der Wirtspflanze absterben.

Gesamtkeimzahlbestimmung über Verdünnungsreihe des Ausgangsmaterials

In Tabelle 10-7 sind die ermittelten Gesamtkeimzahlen für Bakterien und Pilze der homogenisierten Stichproben des Ausgangsmaterials (unverbaute Strohballen) dargestellt. Die festgestellte Anzahl der KBE von Pilzen (Tabelle 10-7) der Proben aus dem Ausgangsmaterial (Strohballen) liegt in der Größenordnung einer allgemeinen Hintergrundkonzentration von Hausstaub in Wohnungen ohne bekannte Schimmelpilzschäden [9]

Taxonomische Differenzierung von festgestelltem Befall des Ausgangsmaterials

Es wurden mehr als 15 verschiedene Formen (Taxa) von keimfähigen Mikroorganismen am Ausgangsmaterial identifiziert (Tabelle 10-8). Neben verschiedenen Bakterien sind vor allem die Pilze *Wallemia sebi*, *Aspergillus restrictus* und *Chaetomium globosum* dominant.

7.3.2 Keimgehalt nach dem Verputzen

Stichprobenhafte Materialuntersuchung an Ausbauproben des Prüfkörpers

Das Material der entnommenen Proben des Prüfkörpers ist leicht fleckig und weist deutliche Reste von anhaftendem Lehm auf. Aktives Wachstum von Schimmelpilzen oder andere Auffälligkeiten konnten makroskopisch nicht beobachtet werden. Wie bei den Proben aus den unverbauten Strohballen konnten auf einzelnen Halmen Pilzfäden und Pilz-Verbreitungsorgane festgestellt werden, bei denen es sich ebenfalls vorwiegend um Pflanzenparasiten handelt (Bild 10-20 und Bild 10-21).

Gesamtkeimzahlbestimmung über Verdünnungsreihe an Material des Prüfkörpers

Die Anzahl der KBE der Proben aus dem verputzten Prüfkörper (Tabelle 10-9) sind deutlich höher als die Anzahl der KBE der Proben aus dem Ausgangsmaterial (Strohballen). Dies erscheint nicht ungewöhnlich, da durch den feuchten Putz zusätzlich Feuchtigkeit bereitgestellt wird. Darüber hinaus werden vermutlich auch Mikroorganismen eingebracht, die natürlicherweise im Lehm, also im Boden vorkommen und durch das Aufbringen des Putzes in Kontakt mit dem Stroh kommen.

Taxonomische Differenzierung von festgestelltem Befall an Material des Prüfkörpers

Im Vergleich zum Ausgangsmaterial (unverbaute Strohballen) wurde eine reduzierte Diversität festgestellt (Tabelle 10-10). Neben Bakterien überwiegen vor allem Arten aus der Gattung *Penicillium* sowie *Wallemia sebi*.

7.3.3 Keimgehalt nach Bewitterung

Stichprobenhafte Materialuntersuchung an Ausbauproben der Versuchswände

Beim entnommenen Material zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den Proben der Lehmputzwand und der Kalkputzwand.

Die Proben der Lehmputzwand waren hell und relativ trocken und wiesen kein visuell erkennbares aktives Wachstum von Schimmelpilzen und keine Auffälligkeiten auf. Auf einzelnen Halmen konnten wiederum Pflanzenparasiten festgestellt werden und Reste von anhaftendem Lehm (Bild 10-22 und Bild 10-23).

Die Proben der Kalkputzwand waren deutlich schwärzlich, braun verfärbt und feucht. Unter dem Auflichtmikroskop konnte neben anhaftenden Kalkpartikeln aktives Schimmelpilzwachstum beobachtet werden (Bild 10-24 und Bild 10-25).

Gesamtkeimzahlbestimmung über Verdünnungsreihe an Material von den Versuchswänden

Die ermittelten Werte (KBE) sind in Tabelle 10-11 und Tabelle 10-12 dargestellt. Auffällig bei beiden Wänden ist, dass die Werte der weiter oben gewonnen Proben deutlich niedriger ausfallen, als die Werte der weiter unten gewonnen Proben. Hintergrund dafür könnte ggf. der Schwerkraft folgende, nach unten wandernde Feuchtigkeit sein. Darüber hinaus wurde während der Wintermonate beobachtet, dass Schnee an die Versuchswände geweht wurde und dort über längere Zeit verblieben ist und somit ggf. auch auf diese Weise Feuchtigkeit in die unteren Bereiche eindringen konnte.

Ein Vergleich der KBE-Zahlen zeigt, dass deutlich unterschiedliche Werte erreicht werden. Die Werte der Proben aus der Lehmputzwand sind etwas niedriger als die Werte der Proben aus dem verputzten Prüfkörper (unmittelbar nach dem Verputzen). Die bei dieser Untersuchung gefundenen Werte können auf Grund der oben geschilderten Umstände (Abwaschen des Putzes bei Starkniederschlag, Abdeckung durch eine Plane sowie nachträgliche Beplankung) keine allgemeinen Rückschlüsse auf die Bauweise mit außenseitigem Lehmverputz zulassen.

Die Werte der Proben der Kalkputz-Versuchswand sind wesentlich höher. Das lässt sich auf die festgestellte Durchnässung des Strohs zurückführen. Zusätzlich wurde eine Rissbildung (ggf.

Eindringen von Niederschlag, siehe oben) beobachtet. Laut Auskunft des Auftraggebers würde bei dieser Bauweise im Normalfall ein Dachüberstand als Witterungsschutz konzipiert.

Taxonomische Differenzierung von festgestelltem Befall an Material von den Versuchswänden

Die Diversität und Artenzusammensetzung, die nach Freibewitterung im Stroh der Lehmplatzwand festgestellt wurden, unterschieden sich nicht grundsätzlich von den Daten des Ausgangsmaterials. Auffällig ist eine Zunahme von trockenheitsresistenteren Arten, wie *Eurotium* spp. und *Penicillium chrysogenum* (Tabelle 10-13).

Bei der Kalkputzwand hingegen ist eine deutliche Zunahme der Diversität im Vergleich zu den Ausgangsdaten zu beobachten (Tabelle 10-14). Zahlreiche verschiedene Arten der Gattung *Aspergillus* treten auf, dominant vor allem *Aspergillus niger* und *Aspergillus versicolor*. Auffällig ist das Vorkommen von *Mucor plumbeus*, eine Art mit vergleichsweise hohen Feuchteansprüchen. Bemerkenswert ist auch das vereinzelte Auftreten von *Stachybotrys chartarum* (potenter Mykotoxinerzeuger).

7.4 Diskussion und Schlussfolgerungen

Vergleich der Anzahl der KBE

Bezug zu Isoplethensystem

Bekanntermaßen handelt es sich bei Getreidestroh um ein gutes Substrat für zahlreiche Mikroorganismen [10], [11]. Auch durch die vorliegenden Untersuchungen der Isoplethenbereiche wird dies bestätigt. Das untersuchte Ballenstroh ist nach [8] in die Substratgruppe I einzuordnen (biologisch leicht verwertbare Baustoffe). Um eine Schädigung des Materials zu verhindern müssen die kritischen Isoplethenbereiche (Temperatur- und Feuchtigkeitsbedingungen) vermieden werden. Da es Hinweise gibt, dass bestimmte Lehmart eine antiseptische Wirkung besitzen [12] wurden für den, in der Konstruktion verwendeten, Lehm-Strohballen-Verbund ebenfalls Isoplethenbereiche untersucht. Für den verwendeten Lehmplatz konnte jedoch keine Befallsverzögernde Wirkung festgestellt werden.

Hintergrundkeimzahl

Bedingt durch Art und Herstellung ist beim realen Einsatz von Stroh als Baustoff/Dämmmaterial davon auszugehen, dass dieser natürlicherweise vorkommende Mikroorganismen aufweist. Die Anzahl der im Ausgangsmaterial (Strohballen) gefundenen KBE ist in Quantität und Qualität (Artenzusammensetzung) für das Material als typisch anzusehen. Im Wesentlichen können die ermittelten Keimzahlen bzw. die gefundene Artenzusammensetzung mit einer produkttypischen Pilzflora von Futtermitteln, wie z.B. Hafer [13], [14] verglichen werden.

Es sind jedoch für nachhaltige Baumaterialien natürlichen Ursprungs, wie Strohballen, noch keine ausführlichen Hintergrundkeimzahlen ermittelt worden.

Die gefundene Anzahl der KBE der Proben an Schimmelpilzen liegt im Bereich der Größenordnung der allgemeinen Hintergrundkonzentration von Hausstaub in Wohnungen ohne bekannte Schimmelpilzschäden (siehe Tabelle 10-15) [9]. Der 1. Beurteilungswert entspricht der oberen Grenze der durchschnittlichen Hintergrundkonzentration, die in der Regel von unbelasteten Staubproben nicht überschritten wird.

Der 2. Beurteilungswert liegt dreifach höher als der 1. Beurteilungswert und dient als Richtwert. Dieser 2. Beurteilungswert ist nicht statistisch abgesichert. Er stellt vielmehr einen Schätzwert dar.

Keimzahl nach Verputzen

Unmittelbar nach dem Verputzen kann im Stroh des speziell angefertigten Prüfkörpers eine höhere Anzahl an KBE festgestellt werden, als im unverbauten Stroh. Die Ursache dafür liegt vermutlich im Eintrag von Feuchtigkeit und ggf. zusätzlichen Mikroorganismen mit dem aufgetragenen feuchten Lehmputz. Im Vergleich zum Ausgangsmaterial (unverbaute Strohballen) wurde eine etwas geringere Diversität beobachtet. Für bestimmte Lehmarten wurde eine antiseptische Eigenschaft experimentell ermittelt [12]. Dies konnte für den verwendeten Lehmputz jedoch nicht bestätigt werden.

Freibewitterung

Die gefundene Anzahl der KBE der Proben nach Freibewitterung an Schimmelpilzen zeigt in Diagramm 10-17 deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Probenahmestellen. Die bei dieser Untersuchung festgestellte Anzahl der KBE von Bakterien verhält sich analog zur Anzahl der KBE von Schimmelpilzen (vgl. Diagramm 10-18), allerdings erwartungsgemäß in höheren Größenordnungen, besonders bei feuchten Materialien.

Im Vergleich zu den unmittelbar nach dem Verputzen festgestellten Keimzahlen ist die Anzahl der KBE der Proben aus der Lehmputzwand nach Bewitterung etwas niedriger. Bei der Betrachtung dieser Zahlen muss jedoch die Tatsache berücksichtigt werden, dass die Lehmputzwand nach der Ablösung des Lehmputzes infolge eines Starkregens eine Zeit lang durch eine Folie abgedeckt wurde und dadurch die Möglichkeit für das Stroh bestand nach anfänglicher erhöhter Feuchtigkeit abzutrocknen. In der Folge wurde die Folie durch eine Holzbeplankung aus sägerauen Lärchenbrettern ersetzt. Infolge dieser nicht kalkulierbaren und abschätzbaren Unsicherheiten können daher die ermittelten Zahlen für die ursprünglich außenseitig lehmverputzte Versuchswand nicht verallgemeinert werden.

Die Anzahl der KBE der Proben aus der Kalkputzwand nach Bewitterung ist sehr hoch. Dies ist nicht verwunderlich, da das Strohmaterial bei der Probenahme augenscheinlich durchnässt war und daher gute Bedingungen für mikrobielles Wachstum herrschten. Bei der Kalkputzwand ist darüber hinaus auch eine deutliche Zunahme der Diversität im Vergleich zu den Ausgangsdaten zu beobachten.

Prinzipiell können die Ergebnisse der Versuchswände in einen Kontext mit anderen Untersuchungen an Ausbauproben gebracht werden [15] [17]. Insbesondere in der taxonomischen Analyse zeigen die Ergebnisse eine in weiten Teilen übereinstimmende mikrobielle Flora, die als typisch für Strohballen angesehen werden kann. Gegebenenfalls könnte eine zusätzliche Konservierung mit für den Innenraum unbedenklichen Stoffen den Baustoff Strohballen für kurzfristige Feuchteextreme zusätzlich schützen bzw. könnte ein Konzept für biologische Schädlingsbekämpfung entworfen werden [16]. Dazu müssten jedoch realitätsnahe Untersuchungen unternommen werden.

8 Rechnerische Untersuchungen

Für den Wandaufbau mit außenseitigem Kalkputz soll das Feuchteverhalten und daraus abgeleitet das Schimmelpilzrisiko rechnerisch untersucht werden. Voraussetzung für die Berechnungen ist die Kenntnis der bauphysikalischen Standardkennwerte der eingesetzten Materialien (siehe Kapitel 3). Die Kapillartransportkoeffizienten der verwendeten Putze können aufgrund deren geringen Dicken nicht direkt messtechnisch bestimmt werden sondern müssen rechnerisch aus Standardkennwerten oder einem zusätzlichen Laborversuch (Trocknungsversuch) approximiert werden.

Die Berechnung wird zunächst durch den Vergleich der Rechenergebnisse mit den an der Wand ermittelten Messergebnissen für einen geeigneten Zeitraum validiert. Im Anschluss daran erfolgt die Berechnung des langfristigen Verhaltens des Wandaufbaus.

8.1 Grundlagen der Berechnungen

Für die rechnerische Untersuchung von gekoppelten Wärme- und Feuchtetransportvorgängen wird am IBP das erprobte, eindimensionale Simulations-Programm WUFI[®] verwendet. Bisherige Beschreibungen des Feuchtetransportverhaltens von Baustoffen mit Hilfe dieser Verfahren haben eine gute Übereinstimmung zwischen rechnerischer Aussage und praktischer Untersuchung am Objekt ergeben [18]-[24].

In [25] wurde ein biohygrothermisches Verfahren entwickelt, das die Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf Basis der drei wesentlichen Wachstumsvoraussetzungen (Feuchte, Temperatur und Substrat) von Schimmelpilzen bei instationären Randbedingungen ermöglicht. Die wesentlichen Merkmale werden in [26] erläutert. Die Bewertung einer möglichen Schimmelpilzbildung erfolgt dabei durch den Vergleich des instationär ermittelten Wassergehalts in einer Pilzspore mit dem Grenzwassergehalt, ab dem die Spore auszukeimen und zu wachsen vermag. Dies bedeutet, dass eine längerfristige Überschreitung dieses stark temperaturabhängigen Grenzwassergehalts Schimmelpilzbildung anzeigt.

Um den Einfluss des Substrats, also des Untergrundes oder ggf. eventueller Untergrundverunreinigungen, auf die Schimmelpilzbildung berücksichtigen zu können, werden Isoplethensysteme für unterschiedliche Substratgruppen vorgeschlagen, die aus experimentellen Untersuchungen abgeleitet wurden. Dazu erfolgte in [25] eine Definition von Substratgruppen, denen unterschiedliche Untergründe zugeordnet werden:

Substratgruppe 0: Optimaler Nährboden (z.B. Vollmedien); diese Isoplethensysteme besitzen daher die anspruchlosesten Wachstumsvoraussetzungen, also die niedrigsten Werte für die relative Feuchte. Sie bilden für alle in Gebäuden auftretenden Schimmelpilze die absolute Wachstumsgrenze.

Substratgruppe I: Biologisch verwertbare Substrate, wie z.B. Tapeten, Gipskarton, Bauprodukte aus gut abbaubaren Rohstoffen, Materialien für dauerelastische Fugen, stark verschmutztes Material.

Substratgruppe II: Baustoffe mit porigem Gefüge, wie z.B. Putze, mineralische Baustoffe, manche Hölzer sowie Dämmstoffe, die nicht unter Substratgruppe I fallen.

Jeder Substratgruppe ist ein Isoplethensystem zugeordnet, welches das Schimmelpilzwachstum in Abhängigkeit von Temperatur und Feuchte beschreibt. In Bild 10-26 ist für diese Substratgruppen das Isoplethensystem für Keimung (oben) und Myzelwachstum (unten) dargestellt.

8.2 Bauteilaufbauen

Der Wandaufbau wurde entsprechend dem in Kapitel 5.2 aufgeführten Aufbau implementiert. Da es sich um eine eindimensionale Berechnung des Feuchtehaushalts im Regelquerschnitt handelt, muss bei der Eingabe von über dem gesamten Querschnitt gleich bleibenden Schichtdicken ausgegangen werden. Aufgrund der Inhomogenität der Strohballeoberfläche variieren die Putzdicken allerdings sehr stark. Die bei der Probennahme entnommenen Bohrkerne weisen für den Kalkputz Dicken von ca. 2,5 bis 6 cm auf. Für die Berechnungen wurde von einer mittleren Schichtdicke des Kalkaußenputzes von 4,5 cm und des innenseitigen Lehmputzes von 5 cm ausgegangen. Die mittlere Schichtdicke der Strohballedämmung wurde mit 34,5 cm geringfügig dünner als der Holzrahmen angesetzt. Bild 10-27 zeigt eine Ansicht des implementierten Schichtaufbaus mit Angabe der Schichtdicken und des Gitteraufbaus.

8.3 Baustoffkennwerte

Die nicht bei uns gemessenen Kennwerte für den Strohballe wie Wärmeleitfähigkeit und Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl stammen aus [27]. Da davon ausgegangen werden kann, dass der Flüssigtransport im Strohballe so gering ist, dass er nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf den Feuchtehaushalt des Wandaufbaus hat, werden in den Berechnungen die Flüssigtransportkoeffizienten für Saugen und Weiterverteilen nicht berücksichtigt.

Für den Lehminnenputz und den Kalkaußenputz wurden die in Kapitel 3.3 aufgelisteten bauphysikalischen Standardkennwerte verwendet. Dabei ist aber zu berücksichtigen, dass, wie in Kapitel 5.2 beschrieben, der Kalkaußenputz aus drei unterschiedliche Schichten aufgebaut wurde. Die Materialkennwerte wurden aber nicht an jeder einzelnen Schicht bestimmt, sondern am Gesamtaufbau mittlere Kennwerte.

Der Wasseraufnahmekoeffizient beschreibt nur die Wasseraufnahme eines Baustoffes über die Oberfläche, nicht aber die Verteilung des Wassers innerhalb des Materials. Mit Hilfe von Kapillartransportkoeffizienten, deren messtechnische Bestimmung aber einen hohen apparatetechnischen Aufwand bedeutet [28] oder aufgrund der zur Verfügung stehenden Materialdicke nicht möglich ist, lassen sich für die Wasseraufnahme die Feuchteverteilungen berechnen. Diese für hygrothermische Berechnungen wesentlichen Transportkoeffizienten können mit guter Näherung auch aus Standardstoffkennwerten (der w -Wert, der freien Wassersättigung und dem Bezugsfeuchtegehalt) approximiert werden [29]. Die auf diese Weise ermittelten Kapillartransportkoeffizienten für den Saugvorgang sind ebenfalls in den Tabelle 10-1 und Tabelle 10-2 aufgeführt.

Für die Flüssigtransportkoeffizienten der Weiterverteilung bzw. der Trocknung stehen keine bauphysikalischen Standardkennwerte zur Verfügung anhand derer der Kennwert approximiert werden kann. Hierzu muss ein zusätzlicher Trocknungsversuch durchgeführt werden, wie in Kapitel 3.3 beschrieben. Bei der Trocknung eines wassergesättigten porösen Baustoffes stellen sich nach Krischer [23] unterschiedliche Trocknungsphasen ein. Solange der Kapillartransport groß genug ist, um die an der Oberfläche verdunstende Wassermenge aus dem Inneren der Probe nachzuführen, muss die Verdunstung bei konstanten äußeren Klimarandbedingungen an der Oberfläche nahezu konstant bleiben. In diesem ersten Abschnitt der Trocknung ist die Trocknungsgeschwindigkeit nur abhängig von den äußeren Bedingungen. Die Eigenschaften des Baustoffes haben keinen Einfluss auf die Trocknungsgeschwindigkeit. Diese Trocknungsperiode ermöglicht somit die genaue Ermittlung der bei der Trocknung vorliegenden Wärme- bzw. Feuchteübergangskoeffizienten. Da der Kapillartransport im Baustoff mit sinkendem Wassergehalt stark zurückgeht, wird zu einem bestimmten Zeitpunkt die an die Oberfläche transportierte Flüssigkeitsmenge nicht mehr ausreichen, um die Anfangstrocknungsgeschwindigkeit aufrechtzuerhalten. Dies führt dazu, dass man in diesem Trocknungsabschnitt eine stetig sinkende Trocknungsgeschwindigkeit beobachtet. Der Trocknungsverlauf ist hier, außer von den Klimarandbedingungen, auch von der Diffusionswiderstandszahl und den Flüssigtransportkoeffizienten für die Weiterverteilung abhängig.

Für die rechnerische Ermittlung der Transportkoeffizienten wird mit Hilfe von WUFI der Trocknungsversuch nachgerechnet, wobei durch Variation des Kapillartransportkoeffizienten der berechnete Trocknungsverlauf an den gemessenen angefügt wird. Eine ausführliche Beschreibung der Vorgehensweise ist in [30] aufgeführt.

Diagramm 10-19 zeigt am Beispiel des Kalkputzes die auf diese Weise erreichte Übereinstimmung von Rechnung und Messung. Die rechnerische Anpassung zeigte aber auch, dass die Zeit während der Vorbehandlung und des Trocknungsversuches nicht nur zu einer Verfestigung des Putzes geführt hat, sondern auch den Diffusionswiderstand leicht erhöht hat. Die in aufgelistete Tabelle 10-2 Diffusionswiderstandszahl für den Trockenbereich, die an noch relativ jungem Putz ermittelt wurde, hat sich gemäß dieser Anpassung auf einen Wert von 18 erhöht. Bei den folgenden Berechnungen wird dieser Wert zugrunde gelegt.

8.4 Programmparameter und Simulationseinstellungen

8.5 Validierung der Berechnung

Für die Validierung der Berechnungen werden die an der Versuchswand mit Kalkputz ermittelten Messwerte herangezogen. Als Zeitraum wird die erste Jahreshälfte 2007 verwendet, da zum Einen die Berechnungen erst nach Entfernen des Regenschutzes Sinn machen und zum Anderen in dieser Periode keine nennenswerten Messausfälle stattfanden. Der außenseitige Wärmeübergangswiderstand wird mit $0,0588 \text{ [m}^2\text{K/W]}$ und der Wärmeübergangswiderstand der Innenoberfläche entsprechend DIN 4108 Teil 4 zu $0,13 \text{ [m}^2\text{K/W]}$ angesetzt. Als Innenklima werden die in der Versuchshalle gemessenen und in

Diagramm 10-20 dargestellten Klimadaten (blaue Kurven) verwendet. Im gleichen Bild sind als rote Kurve die gemessenen Außentemperaturen und –luftfeuchten aufgeführt. Der zeitweise starke Abfall der Raumlufffeuchte ist im erhöhten Luftwechsel durch die Undichtheiten der Halle bei starkem

Außenwind begründet. Diagramm 10-21 zeigt den in diesem Zeitraum aufgetretenen Schlagregen sowie die solare Einstrahlung auf die Fassade.

Der Anfangsfeuchtegehalt in den einzelnen Materialien wird entsprechend der Ausgleichsfeuchte bei 80 % relativer Luftfeuchte angenommen, da die Feuchteverteilung zu Beginn dieser Periode nicht bestimmt wurde. Die mit dem eingebauten Fühler etwa 5 cm hinter dem Kalkputz gemessenen Verläufe der Temperatur und Luftfeuchte dienen der Validierung der Berechnung. Sie sind in Diagramm 10-22 den für diese Tiefe berechneten Verläufen gegenübergestellt. Für den gesamten Zeitraum ergibt sich eine gute Übereinstimmung der berechneten Temperatur mit der gemessenen, mit starken Tageschwankungen. Betrachtet man die Verläufe der relativen Luftfeuchte fällt auf, dass nach einer anfänglichen Abweichung, die in der Unkenntnis der Anfangsfeuchteverteilung des Wandaufbaus begründet ist, der Verlauf von der Tendenz her sehr gut mit der Messung übereinstimmt. Allerdings zeigt die Rechnung eine wesentlich geringer ausgeprägte Tagesschwankung. Da davon auszugehen ist, dass das Stroh mit seiner hohen Sorptionsfeuchte und Diffusionsoffenheit Luftfeuchteschwankungen sehr schnell ausgleichen wird, sind die gemessenen starken Feuchteschwankungen auf Diffusionswiderstände im Messkopf (als Regenschutz) zurückzuführen, sodass kurzfristige Temperaturschwankungen derartige Feuchteschwankungen im Luftvolumen des Messfühlers bewirken.

Berechnet man unter Zugrundelegung der gemessenen Feuchte- und Temperaturverläufe und der Substratgruppe 0 (entsprechend den Ergebnissen aus Kapitel 4.3), ergibt sich ein deutliches Wachstum in dieser Periode (siehe Diagramm 10-23 links). Bei Verwendung der berechneten Verläufe ergibt sich ein sehr ähnliches Wachstum, wie aus Diagramm 10-23 rechts ersichtlich. Dies stimmt mit den in Kapitel 6.3.3 aufgeführten biologischen Untersuchungen überein, die ebenfalls ein deutliches mikrobielles Wachstum in dieser Tiefe belegen.

8.6 Ergebnisse

8.7 Berechnung des langfristigen Verhaltens

Nachdem gemäß den dargestellten Ergebnissen die Validierung erfolgreich ist, kann auch bei der Berechnung des langfristigen Verhaltens dieses Wandaufbaus von realitätsnahen aussagekräftigen Ergebnissen ausgegangen werden.

Als äußere Randbedingungen für die Berechnungen dienen Holzkirchner Klimadaten (s. Diagramm 10-24). Innen herrschen Wohnraumverhältnisse mit normaler Feuchtelast, dies entspricht einem sinusförmigen Verlauf der Temperatur zwischen 22 °C im Juni und 20 °C im Dezember sowie einer Feuchte zwischen 60 % im August und 40 % im Februar. Für den außenseitigen und innenseitigen Wärmeübergangswiderstand werden dieselben Werten wie bei der Validierungsberechnung verwendet. Ebenfalls wird auch hierbei der Anfangsfeuchtegehalt in den einzelnen Materialien entsprechend der Ausgleichsfeuchte bei 80 % relativer Luftfeuchte angesetzt. Die Berechnungen werden beginnend im Januar über einen Zeitraum von fünf Jahren durchgeführt.

8.8 Diskussion und Schlussfolgerungen

8.9 Berechnungsergebnisse

Ausgehend von einem Anfangsfeuchtegehalt in den einzelnen Materialien entsprechend einer Ausgleichsfeuchte bei 80 % relativer Luftfeuchte, schwankt der Gesamtwassergehalt (s. Diagramm 10-25) in der berechneten Konstruktion jahreszeitlich bedingt um etwa 5 kg/m^2 um einen Mittelwert der im ersten Jahr bei etwa $7,5 \text{ kg/m}^2$ liegt und sich im 5. Jahr auf etwa 12 kg/m^2 erhöht mit weiter steigender Tendenz. Die niedrigsten Gesamtwassergehalte liegen dabei im Winter vor und die höchsten in der Sommerperiode.

In Diagramm 10-26 ist der Verlauf des Wassergehalts im Lehmputz und im Kalkputz über einen Zeitraum von 5 Jahren dargestellt. Der Wassergehalt für den innenseitig liegenden Lehmputz liegt erwartungsgemäß mit um die 7 kg/m^3 (0,7 Vol.-%) sehr niedrig und zeigt die üblichen jahreszeitlichen Schwankungen. Der Kalkputz, der direkt dem Außenklima ausgesetzt ist, zeigt sehr starke Feuchtegehaltsschwankungen, die mit 10 kg/m^3 (1 Vol.-%) von relativ trocken bis auf sehr hohe Werte von bis 200 kg/m^3 (20 Vol.-%) schwanken. Auch hier werden die höchsten Werte jeweils im Sommer erreicht und es ist eine mit der Zeit leicht steigende Tendenz zu erkennen.

Diagramm 10-27 zeigt den zeitlichen Verlauf des Wassergehalts in der Strohdämmung. Hier schwankt der mittlere Wassergehalt nur geringfügig mit jahreszeitlichen Unterschieden von unter 5 kg/m^3 , die mit den Jahren abnehmen. Allerdings zeigt sich eine deutliche Zunahme des Wassergehalts, die über die berechneten 5 Jahre hinausgehen wird.

Für die Ermittlung des Schimmelpilzwachstumsrisikos wird der zeitliche Verlauf der Temperatur und Oberflächenluftfeuchte benötigt. Die durchgeführten Berechnungen zeigen, dass in Bezug auf das Schimmelpilzwachstum die kritischste Stelle im Strohballen nahe des äußeren Kalkputzes liegt. Für die biohygrothermische Beurteilung wurden die Rechenwerte für 2 cm hinter dem Kalkputz verwendet. Die in den Diagramm 10-28 und Diagramm 10-29 dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf diese Stelle. Aus Diagramm 10-28 ist zu erkennen, dass nach dem 1. Jahr an dieser Stelle die relativen Luftfeuchten ständig oberhalb von 95 % r.F. liegen mit nur geringen jahreszeitlichen Schwankungen.

Daraus ergibt sich das in Diagramm 10-29 abgebildete mit Hilfe des biohygrothermischen Modells berechnete Schimmelpilzwachstum, wobei auch hier, entsprechend den Ergebnissen aus Kapitel 4.3, Substratgruppe 0 angesetzt wird. Wie aufgrund der ständig vorliegenden hohen Luftfeuchten an dieser Stelle zu erwarten, wird ein massives Schimmelpilzwachstum berechnet.

Ein wesentlicher Grund für das sehr ungünstige Verhalten dieses Wandaufbaus liegt wahrscheinlich in dem mit $5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ äußerst hohen Wasseraufnahmekoeffizient des verwendeten Kalkputzes. Um diesen Einfluss zu untersuchen wurde zusätzlich eine Variante mit hydrophobem Anstrich berechnet. Diagramm 10-30 zeigt den sich nach dieser Maßnahme ergebenden Feuchteverlauf für die gleiche Stelle wie in Diagramm 10-28. Man erkennt, dass sich wesentlich geringere Luftfeuchten ergeben, die nur noch im Winter und Frühjahr 80 % r.F. überschreiten. Damit ergibt sich das in Diagramm 31 abgebildete deutlich geringere Schimmelpilzwachstum.

Durch Verwendung eines dunklen (Absorptionszahl 0,7) Anstriches lässt sich, wie aus Diagramm 10-32 und Diagramm 10-33 erkennbar, die Situation noch deutlich verbessern. Hierbei ergibt sich rechnerisch nur im ersten Jahr ein starkes Wachstum, das in den Folgejahren deutlich geringer ausfällt. Bei Verwendung der Substratklasse I würde sich dagegen in den Folgejahren kein merkliches Wachstum ergeben (nicht dargestellt).

8.10 Diskussion und Schlussfolgerungen

Durch den Vergleich der mit WUFI® berechneten Ergebnisse für die Wandkonstruktion mit außen-seitigem Kalkputz mit den im Freilandversuch im Stroh etwa 5 cm hinter dem Kalkputz gemessenen Verläufe der Temperatur und relativen Luftfeuchte konnten die Berechnungen validiert werden. Unter Zugrundelegung der Rechenergebnisse für diese Stelle ergibt sich mit Hilfe des Schimmelpilzprognosemodells ein deutliches Schimmelpilzwachstum, was ebenfalls mit dem bei der Probennahme vorgefundenen Zustand übereinstimmt. Damit ist die Annahme berechtigt, dass mehrjährige Berechnungen für diesen Wandaufbau die Feuchtesituation ebenfalls realitätsnah wiedergeben wird.

Die über einen Zeitraum von 5 Jahren für den Holzkirchner Standort durchgeführten Berechnungen zeigen, dass sich bei dem untersuchten Wandaufbau in der Strohdämmung mittlere Wassergehalte ergeben, die jahreszeitlich schwankend nach 5 Jahren 2 Vol.-% erreichen mit weiter steigender Tendenz. Damit ist davon auszugehen, dass sich die Dämmeigenschaften des Stroh langfristig verschlechtern.

Im äußeren Bereich des Strohballens ergeben sich aber sehr hohe relative Luftfeuchten von ganzjährig oberhalb 95 %. Dies ist bei üblichen Wandaufbauten in Bezug auf das Schimmelpilzrisiko unerheblich, da es sich um konvektiv geschlossene Systeme handelt und somit ein Sporeneintrag ausgeschlossen ist. Beim Einsatz von Strohballen ist dagegen davon auszugehen, dass, sofern die Strohballen vor dem Einbau nicht gereinigt und sterilisiert werden, ausreichend keimungsfähige Sporen in den Wandaufbau eingebracht werden. Hinzu kommt, dass das Stroh der Substratgruppe 0 (biologisch sehr gut verwertbares Substrat) zuzuordnen ist. Wendet man hier das Schimmelpilzprognosetool WUFI®-Bio an, zeigt es erwartungsgemäß ein sehr deutliches Pilzwachstum an.

Der Grund für dieses ungünstige Verhalten des untersuchten Wandaufbaus liegt zum Einen in der Wahl des Innen- und Außenputzes. Der innenseitige Lehmputz ist relativ diffusionsoffen, der außen-seitige Kalkputz ist dagegen etwas diffusionsdichter. Aus bauphysikalischer Sicht sollte aber der Diffusionswiderstand des Wandaufbaus von innen nach außen abnehmen. Einen noch größeren Einfluss hat der mit $5 \text{ kg/m}^2\cdot\text{h}$ äußerst hohe Wasseraufnahmekoeffizient des verwendeten Kalkputzes.

Die Berechnung einer zusätzlichen Variante mit hydrophobem Anstrich ergibt wesentlich geringere Luftfeuchten und deutlich geringeres Schimmelpilzwachstum, wobei durch Verwendung eines dunklen hydrophoben Anstriches die Situation weiter verbessert werden kann.

9 Literatur

- [1] DIN EN ISO 12572: Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Bau- und Dämmstoffen. Ausgabe: September 2001.
- [2] DIN EN ISO 15148: Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen. März 2003.
- [3] DIN EN ISO 12571: Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften. Ausgabe: April 2000.
- [4] Ayerst, G.: The effect of moisture and temperature on growth and spore germination in some fungi. *Journal of Stored Products Research* (1969), H.5, S. 127.141.
- [5] Sedlbauer, K.: Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen. Dissertation Universität Stuttgart. (2001)
- [6] Sedlbauer, K.; Krus, M.: Schimmelpilze in Gebäuden – biohygrothermische Berechnungen und Gegenmaßnahmen. *Bauphysik-Kalender 2003*, Ernst und Sohn Verlag, Berlin, S. 435-531.
- [7] Hofbauer, W.; Breuer, K.; Tschakner, A.; Krus, M.; Sedlbauer, K.; Schoch, T.: Vergleichende Untersuchung zum Schimmelpilzwachstum auf verschiedenen Baustoffoberflächen – material-spezifische Wachstumsisoplethen. *IBP-Mitteilung 32* (2005), Nr. 457, IRB Stuttgart.
- [8] Sedlbauer, K.; Zillig, W.; Krus, M.: Isoplethensysteme ermöglichen eine Abschätzung von Schimmelpilzbildung. *IBP-Mitteilung 28* (2001), Nr. 388, IRB Stuttgart.
- [9] Trautmann, C.; Gabrio, T.; Dill, I.; Weidner, U.: Hintergrundkonzentrationen von Schimmelpilzen in Hausstaub. *Bundesgesundheitsblatt – Gesundheitsforschung – Gesundheitsschutz*. 48: 29-35 (2005).
- [10] Summers, M. (2006): Moisture and Decomposition in Straw: Implications for Straw bale Construction. In: King, B. (Hrsg.): *Design of Straw Bale Buildings: The State of the Art*. Green Building Press: 162-172.
- [11] Wieland, H. (2004): Mikrobielle Empfindlichkeit von Bau-Strohballen. Fachverband Strohballenbau Deutschland e.V.: 1-6.
- [12] Petkewich, R. (2008): Healing clays. ACS meeting news: Scientists probe antibacterial mechanism of natural clays. *Chemical engineering news* 86/17, www.cen-online.org: 48-49.
- [13] Sommer, W. & Abramowski, B. (2001): Beurteilung von Hafer in der Pferdehaltung. Sonderuntersuchung der Landwirtschaftskammer Westfalen-Lippe. Landwirtschaftskammer Westfalen-Lippe: 1-6.
- [14] Adler, A. (2002): Qualität von Futterkonserven und mikrobielle Kontamination. 8. Alpenländisches Expertenforum, 9. – 10. April 2002, Tagungsband, Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, Gumpenstein: 17-25.
- [15] Prüfbericht BBH-16/2005: Untersuchungen in Zusammenhang mit der hygrothermisch-biologischen Beurteilung der Einsatzmöglichkeit von Strohballen als Dämmstoff. Mikrobiologische Laboruntersuchungen von Ausbauproben. Fraunhofer-Institut für Bauphysik: 1-11.

- [16] Meisser, M. (2001): Pflanzen. Konservierung von Feuchtheu. AGRARForschung 8/2: 87-92.
- [17] Sterflinger, K. (2005): Mikrobiologische Begleitanalysen. In: Wimmer, R. (Hrsg.): S-House: Innovative Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen am Beispiel eines Büro- und Ausstellungsgedäudes. BMVIT, Abteilung für Energie- und Umwelttechnologie: 136-144.
- [18] Holm, A. und Künzel, H.M. (1998): Feuchte- und Temperaturbelastung von Mineralwollplatten in Wärmedämmverbundsystemen. wksb 43, H. 41, S. 2-6.
- [19] Krus, M., Künzel, H.M. (1996): Vergleich experimenteller und rechnerischer Ergebnisse anhand des Austrocknungsverhaltens von Ziegelwänden. Internationals Symposium of CIB W67 Energy and Mass Flow in the Life Cycle of Buildings. Wien, 4.-10. August 1996, S. 493-498.
- [20] Krus, M., Künzel, H.M., Kießl, K. (1996): Feuchtetransportvorgänge in Stein und Mauerwerk. Bauforschung für die Praxis, Band 25, IRB-Verlag Stuttgart.
- [21] Künzel, H.M. (1999): Praktische Beurteilung des Feuchteverhaltens von Bauteilen durch moderne Rechenverfahren. WTA-Schriftenreihe, Heft 18, Aedificatio Verlag.
- [22] Künzel, H.M., Krus, M. (1995): Beurteilung des Feuchteverhaltens von Natursteinfassaden durch Kombination von rechnerischen und experimentellen Untersuchungsmethoden. Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen 1, H. 1, S. 5-19.
- [23] Künzel, H.M., Kießl, K., Krus, M. (1995): Feuchtemigration und langfristige Feuchteverteilung in exponierten Natursteinmauern. Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen 1, H. 4, S. 267-279
- [24] Künzel, H.M. und Kießl, K. (1998): Feuchte- und Wärmeschutz von Sichtmauerwerk mit und ohne Fassadenhydrophobierung. Mauerwerksbau aktuell 98, S. D.50-D.56. Werner-Verlag, Düsseldorf 1998.
- [25] Sedlbauer, K.: Beurteilung von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen. Dissertation Universität Stuttgart (2001).
- [26] Sedlbauer, K.: Beurteilung von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen – Erläuterung der Methode und Anwendungsbeispiele. Bauphysik 24 (2002), H. 3, S. 167 – 176.
- [27] Untersuchungsbericht L1-20/2004 des FIW München: Prüfungen an „Baustrohballen“, Gräfelfing 2004.
- [28] Krus, M.: Feuchtetransport- und Speicherkoefizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Messtechniken. Diss. Universität Stuttgart (1995).
- [29] Krus, Holm: Ermittlung der Kapillartransportkoefizienten mineralischer Baustoffe aus dem w-Wert; Bauinstandsetzen 3 (1997), H.1, S. 219-234.
- [30] Holm, Krus: Bestimmung des Transportkoefizienten für die Weiterverteilung aus einfachen Trocknungsversuchen und rechnerischer Anpassung; Bauinstandsetzen 4 (1998), H.1, S. 33-52.

10 Anhang

10.1 Bilder

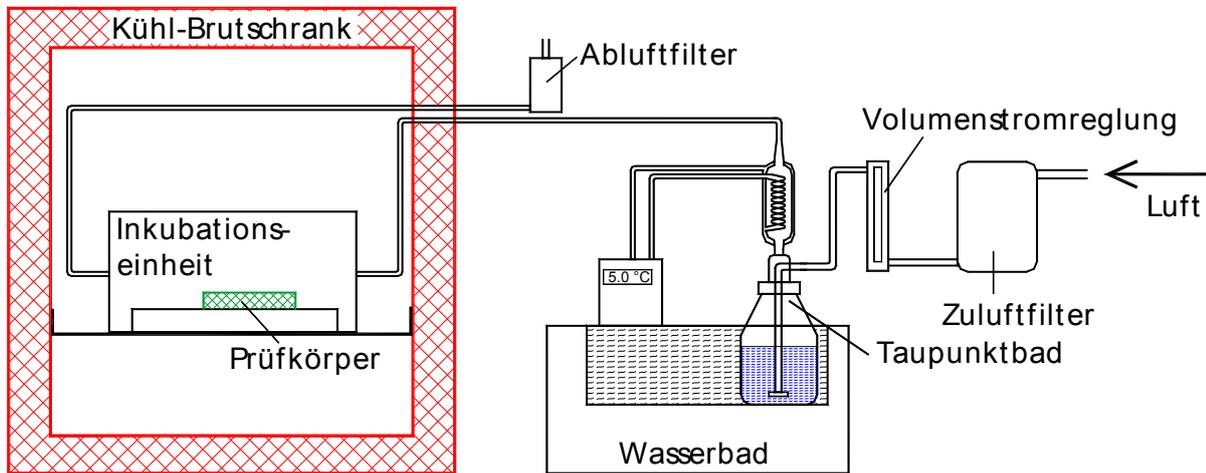


Bild 10-1: Grundprinzip des Versuchsaufbaus.



Bild 10-2: Das Stroh aus der Inkubationseinheit 2.3 (25°C, 95%) nach Ablauf der Beobachtungsdauer, Pilzwachstum über den gesamten Prüfkörper verteilt sichtbar.



Bild 10-3: Der Stroh-Lehmputz-Verbund aus der Inkubationseinheit 2.3 (25°C, 95%) nach Ablauf der Beobachtungsdauer, Pilzwachstum über den gesamten Prüfkörper verteilt sichtbar.



Bild 10-4: Holzrahmen mit Strohballendämmung beim Einbau in das Versuchsgebäude.



Bild 10-5: Stopfen der Ballenstöße.



Bild 10-6: Aufbringen der ersten Lehmputzschicht außen.



Bild 10-7: Aufbringen der ersten Kalkputzschicht außen.



Bild 10-8: Auftragen der letzten Lehmputzschicht außen.



Bild 10-9: Wetterschutz während der Putzarbeiten.



Bild 10-10: Muster vom Wandaufbau zur Durchführung von Probennahmen.



Bild 10-11: Lehmputzfläche (links) mit Auswaschungen, Kalkputzfläche (rechts) mit Rissen im oberen Teil.



Bild 10-12: Fotografische Ansicht des abgerutschten Lehmputzes im Januar 2007.



Bild 10-13: Mit Lärchenholz verschalte Versuchswand im Juni 2007.



Bild 10-14: Probennahme aus dem verputzten Prüfkörper



Bild 10-15: Probennahme aus der Strohballenversuchswand



Bild 10-16: Befallener Getreidehalm aus dem Strohballen (Ausgangsmaterial) im Auflichtmikroskop.

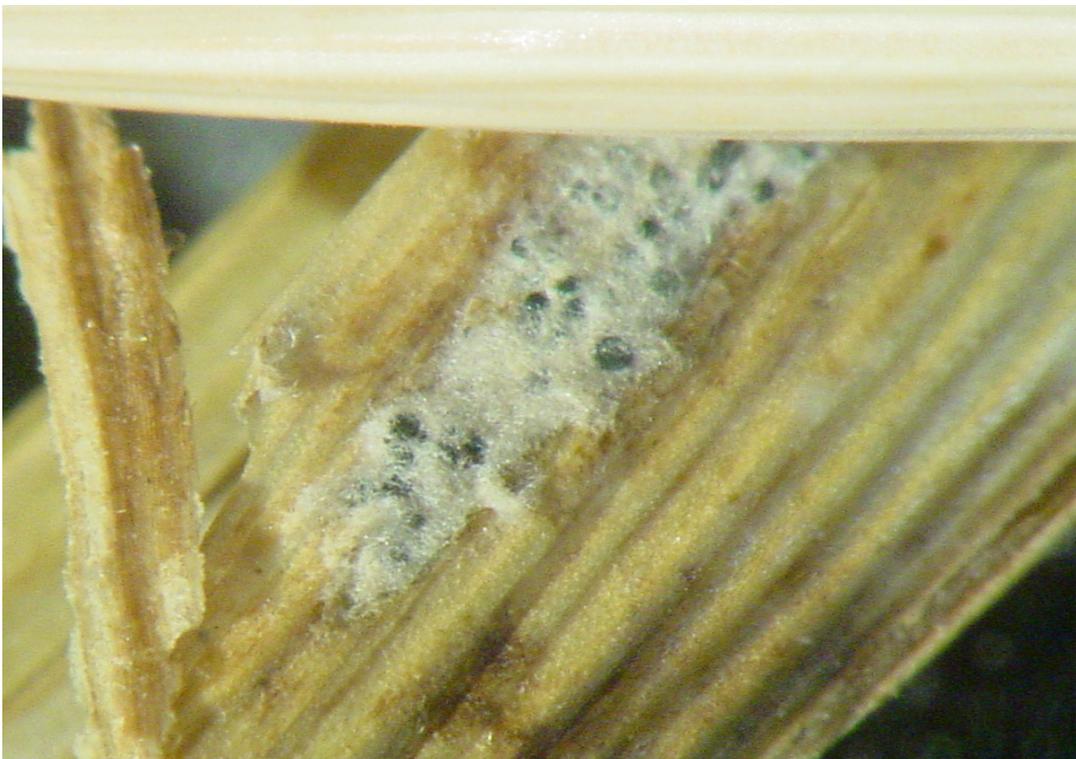


Bild 10-17: Befallener Getreidehalm im Durchlichtmikroskop (aus dem Ausgangsmaterial)

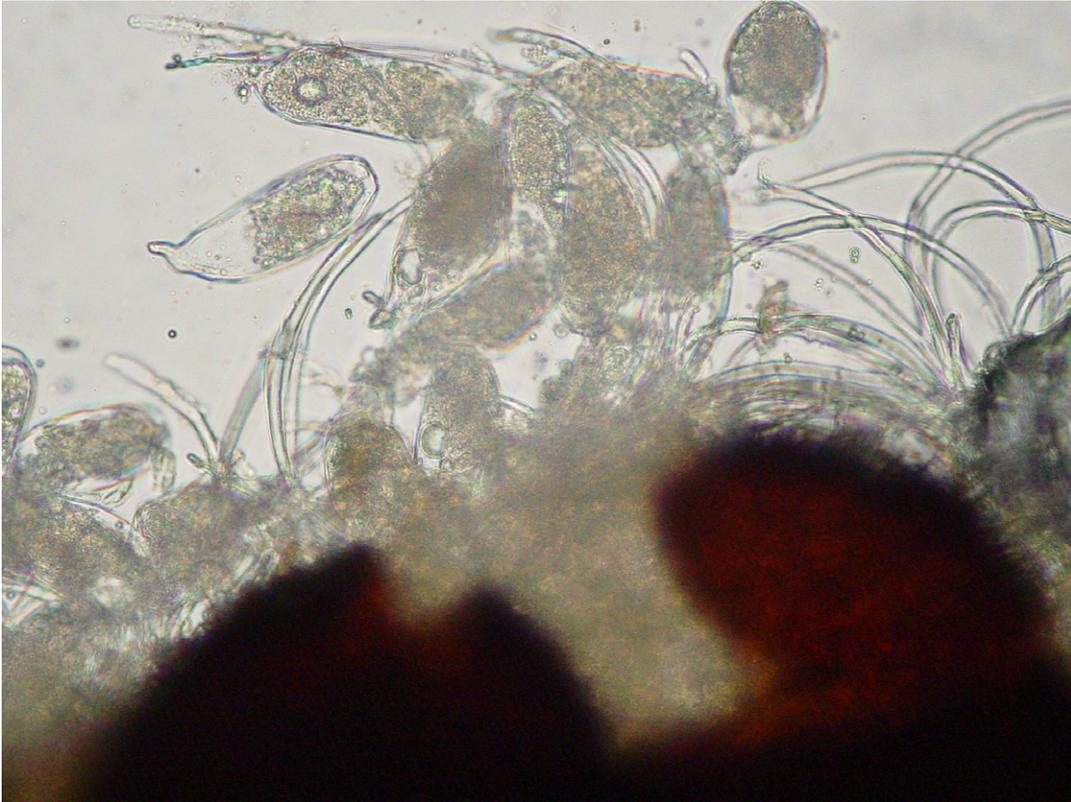


Bild 10-18: Sporen von Chaetomium sp. von Probe 10 (aus dem Ausgangsmaterial)

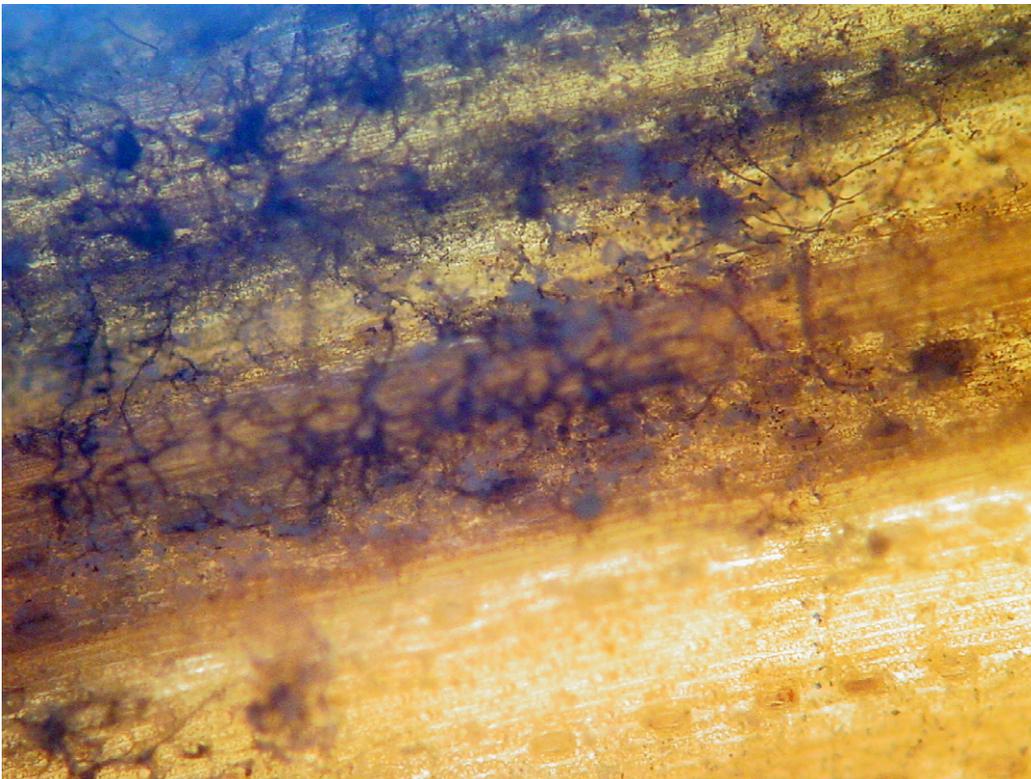


Bild 10-19: Dunkle Pilzhyphen auf Strohalm (Pflanzenparasit).



Bild 10-20: Pilz- und Lehmreste an Getreidehalm im Auflichtmikroskop (verputzter Prüfkörper)

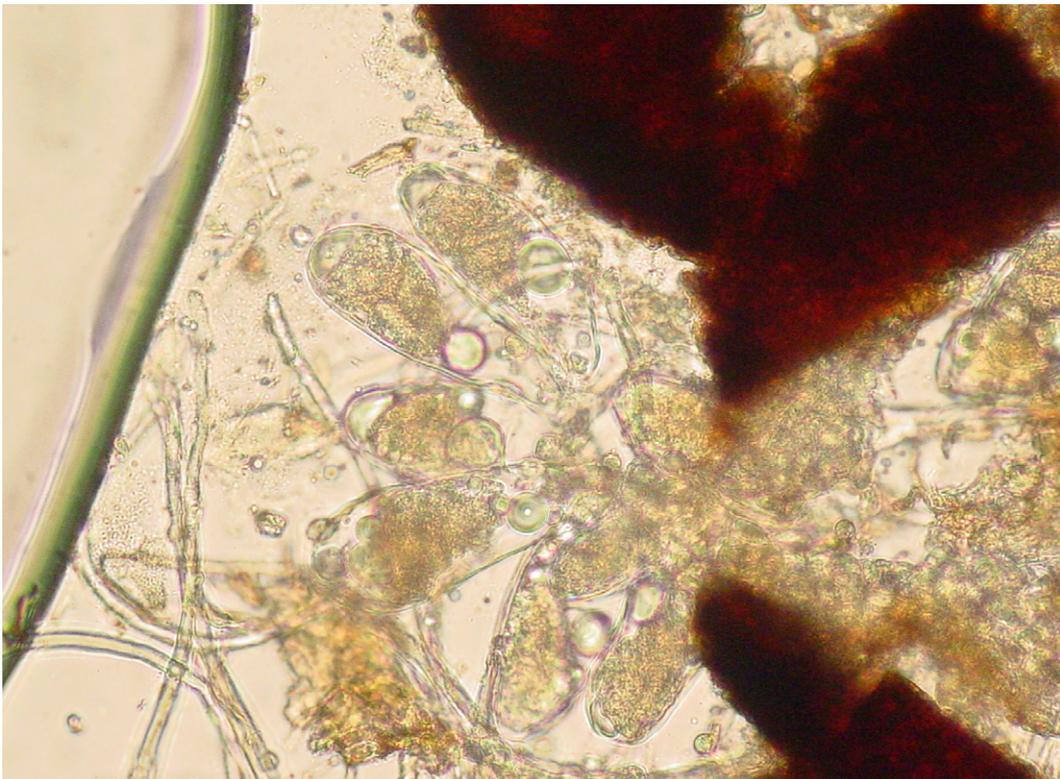


Bild 10-21: Fruchtkörper und Sporenbehälter (Asci) von *Chaetomium sp.*



Bild 10-22: Pilzreste an Getreidehalm von einer Strohprobe der Lehmputzwand im Auflichtmikroskop



Bild 10-23: Hyphen eines Pflanzenparasiten und Sporen von *Alternaria* sp. auf einem Halm aus der Lehmputzwand.



Bild 10-24: Hyphen eines Saprophyten auf einem Halm aus der Kalkputzwand im Auflichtmikroskop

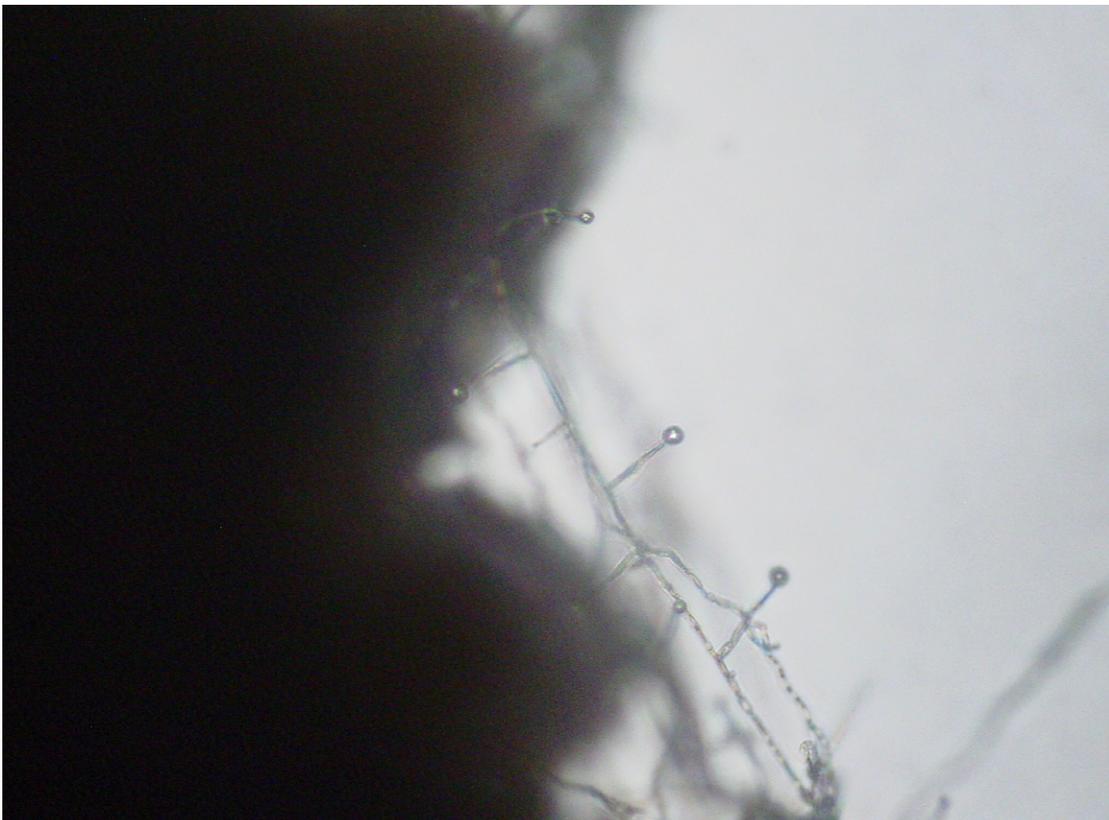


Bild 10-25: Hyphen und Sporen von *Mucor* sp. auf einem Halm der Kalkputzwand im Durchlichtmikroskop.

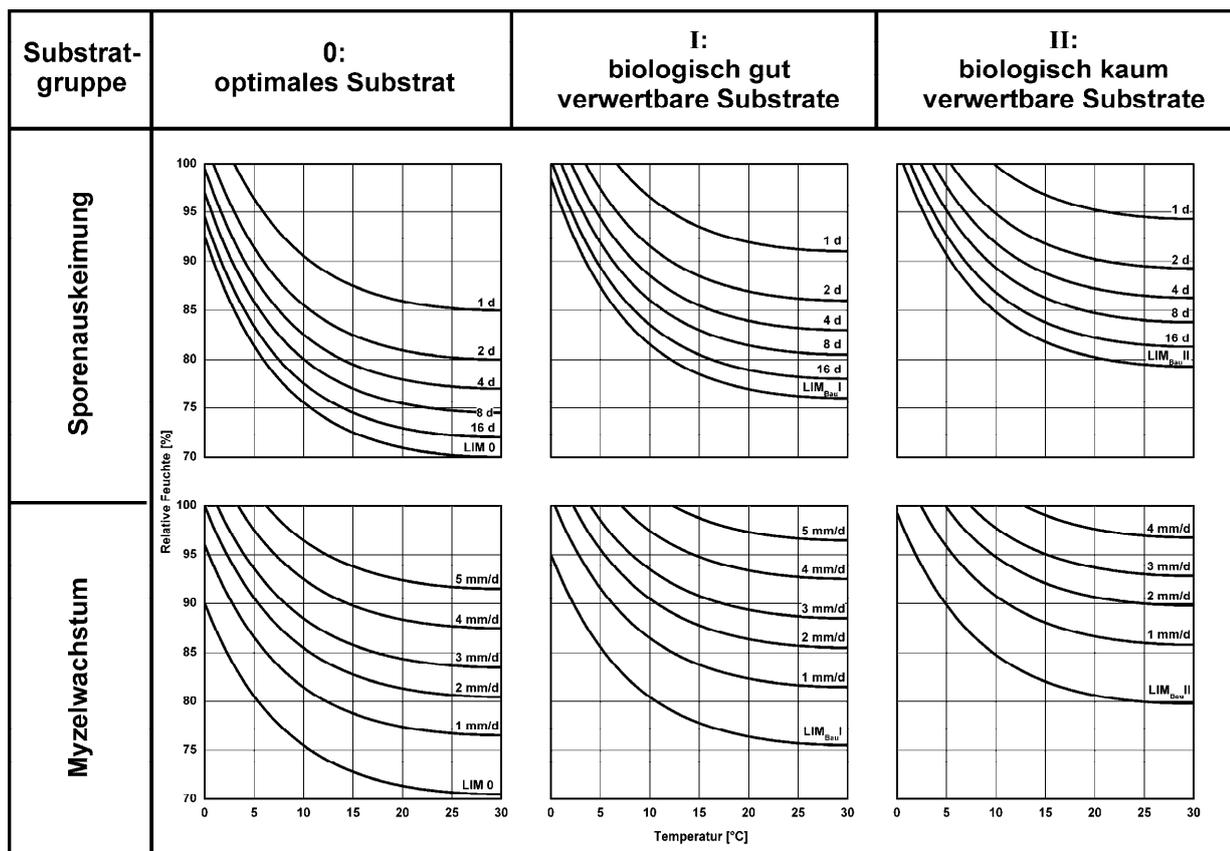
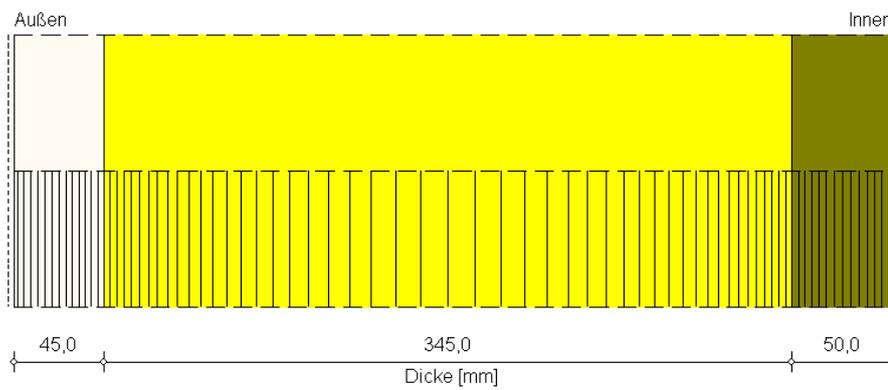


Bild 10-26: Verallgemeinertes Isoplethensystem der Substratgruppen 0, I und II für Sporenauskeimung (oben) und Myzelwachstum (unten) nach [8], das für alle im Bau auftretende Pilze gilt. Die oben angegebenen Werte charakterisieren die Zeitdauer, nach welcher eine Keimung abgeschlossen ist, die unteren Werte in mm/d das zu erwartende Wachstum. LIM bedeutet: Lowest Isoleth for Mould.

Bauteilaufbau

Variante:



Materialien :

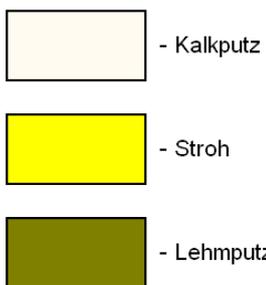


Bild 10-27: Für die Berechnungen implementierter Wandaufbau mit Angabe der Schichtdicken und des Gitteraufbaus.

10.2 Diagramme

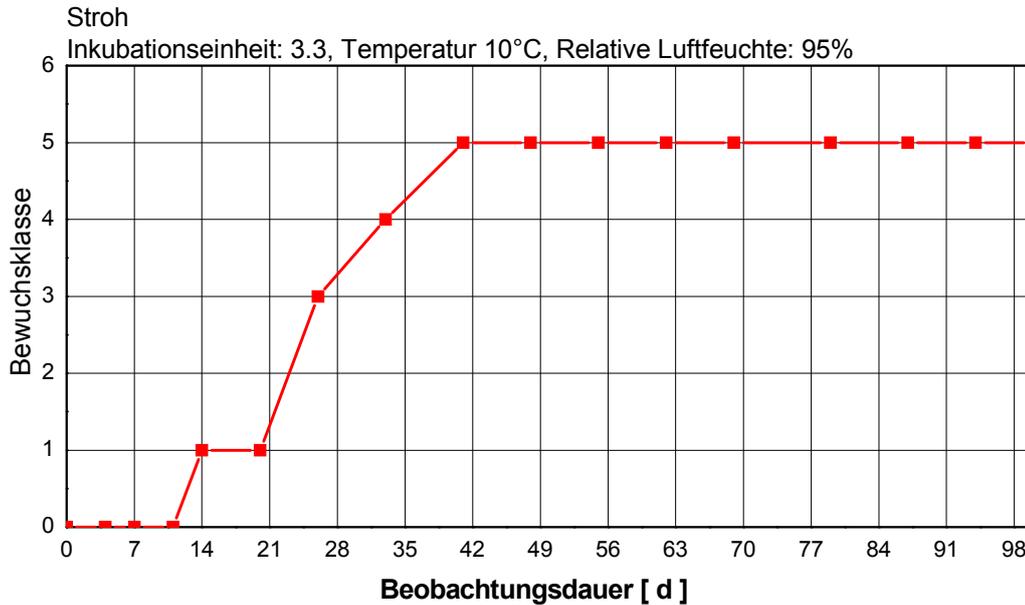


Diagramm 10-1: Im Verlauf der Beobachtungsdauer (100 Tage) konnte bei einer Temperatur von 10°C und bei Luftfeuchten von 95% (wie in der gezeigten Graphik) bis 75% ein Wachstum von Mikroorganismen auf den Prüfkörpern beobachtet werden, zur Bildung von vegetativen Verbreitungsstadien (Kleistothecien) kam es aber nicht.

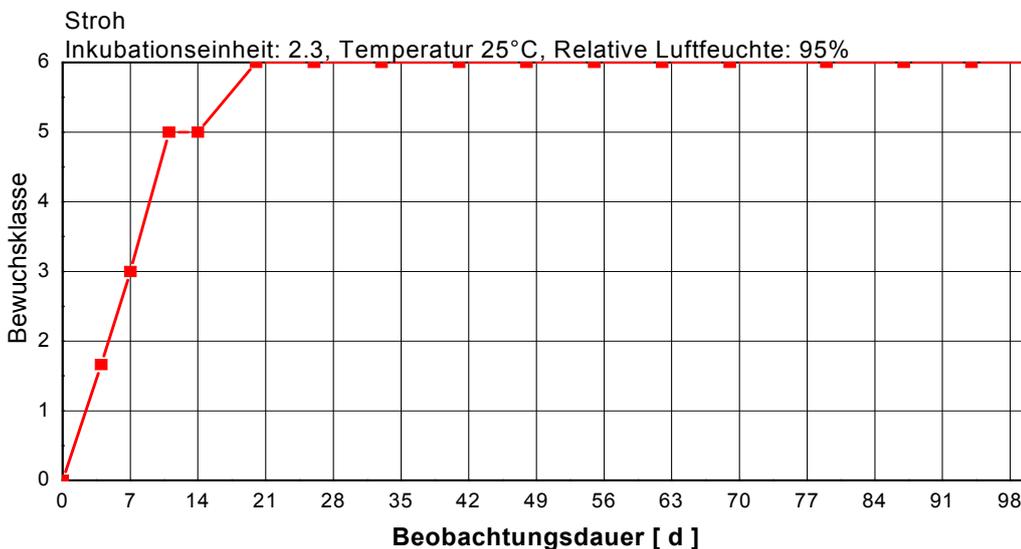


Diagramm 10-2: Im Verlauf der Beobachtungsdauer (100 Tage) konnte bei einer Temperatur von 25°C und bei Luftfeuchten von 95% (wie in der gezeigten Graphik) bis 75% ein Wachstum von Mikroorganismen auf den Prüfkörpern beobachtet werden. Zur Bildung von vegetativen Verbreitungsstadien (Kleistothecien) kam es bei den Luftfeuchten von 95% bis 85%.

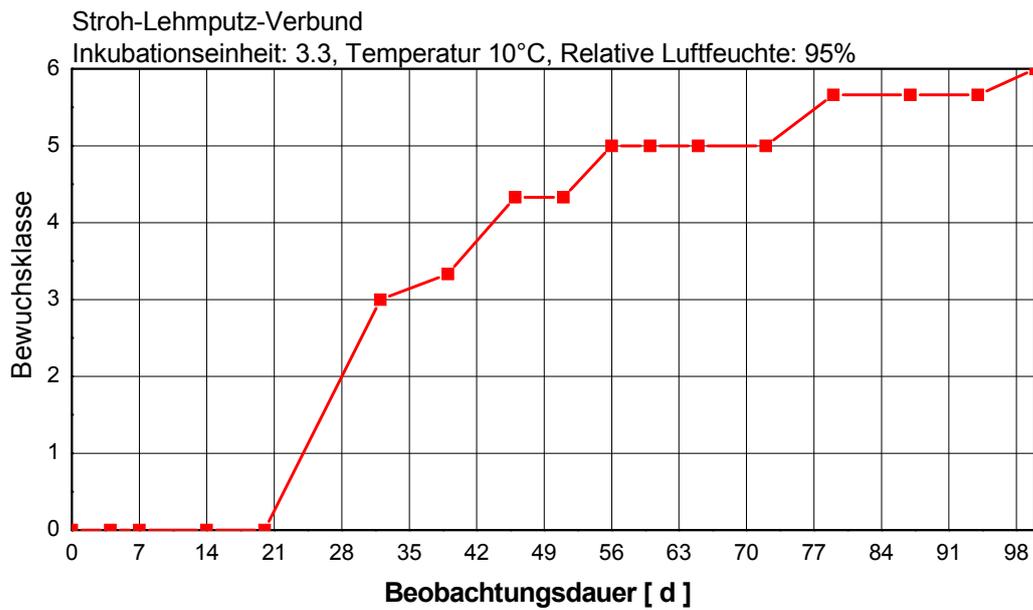


Diagramm 10-3: Verlauf der Entwicklung von Pilzbewuchs während der Beobachtungsdauer (100 Tage) bei einer Temperatur von 10°C und einer Luftfeuchten von 95%. Es konnte Wachstum von Mikroorganismen auf den Prüfkörpern bis zur Stufe 6 beobachtet werden.

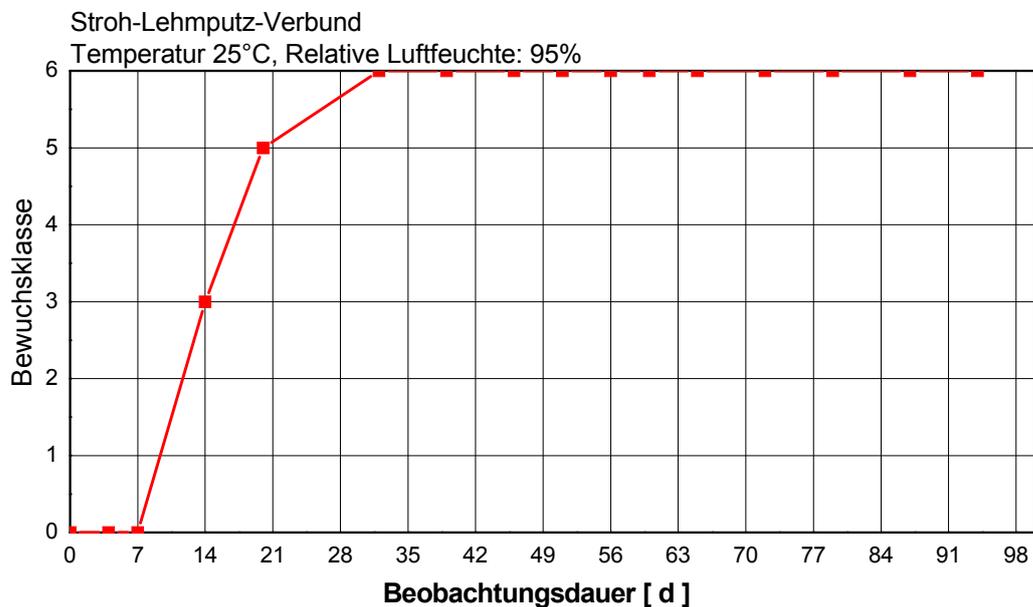


Diagramm 10-4: Verlauf der Entwicklung von Pilzbewuchs während der Beobachtungsdauer (100 Tage) bei einer Temperatur von 25°C und bei einer Luftfeuchte von 95%. Es konnte Wachstum von Mikroorganismen auf den Prüfkörpern bis zur Stufe 6 beobachtet werden.

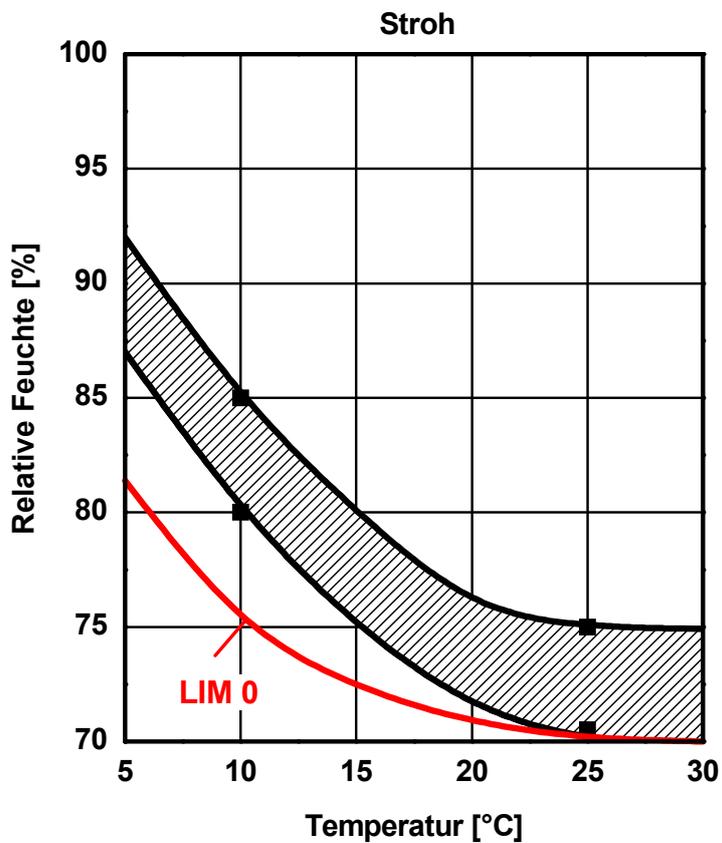


Diagramm 10-5: Im Versuchsverlauf konnte unterhalb der schraffierten Fläche kein Schimmelpilzwachstum auf dem Material, sondern lediglich an der Aufimpfungsstelle beobachtet werden. Innerhalb der schraffierten Fläche liegt die Schimmelisoplethe, bei der das Wachstum auf den gesamten Prüfkörper übergeht.

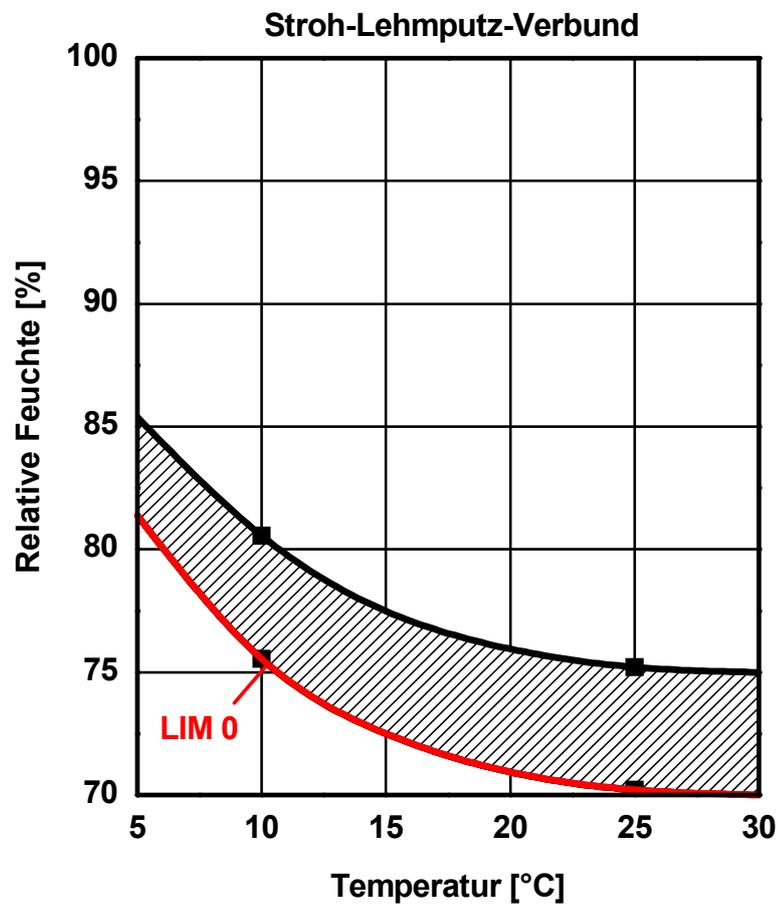


Diagramm 10-6: Darstellung der gemessenen Daten zur Eingrenzung von Isoplethenbereichen. Innerhalb der schraffierten Fläche liegt die Grenzisoplethe für den untersuchten Stroh-Lehmputz-Verbund.

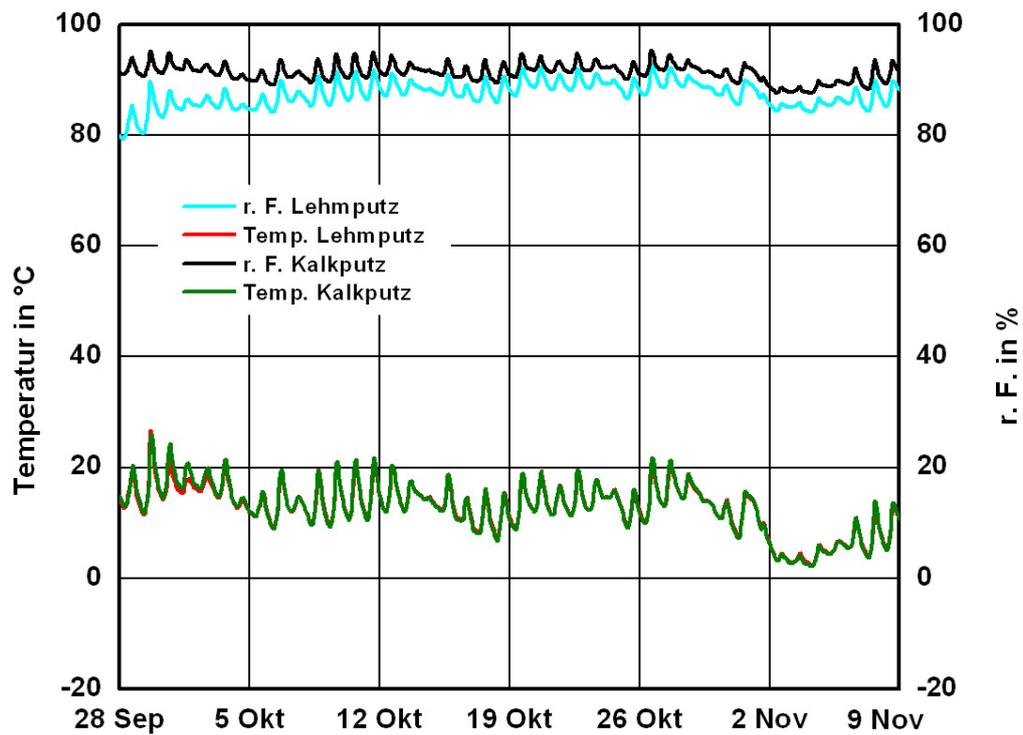


Diagramm 10-7: Gemessene Temperatur- und Feuchteverläufe für den Zeitraum vom 28. September bis 9. November 2006 (nach Fertigstellung mit Regenschutz).

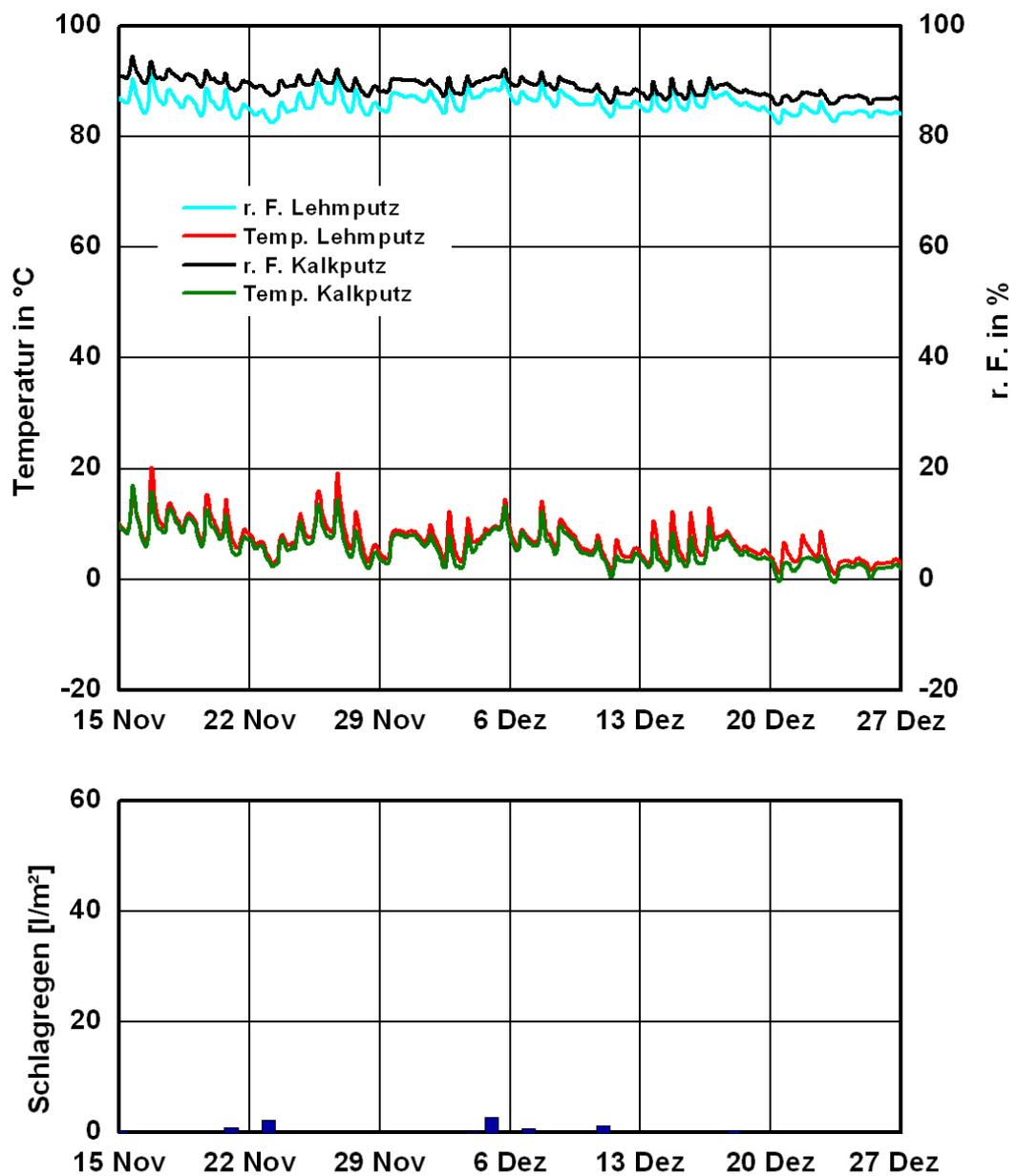


Diagramm 10-8: Gemessene Temperatur- und Feuchteverläufe sowie Schlagregen für den Zeitraum vom 15. November bis 27. Dezember 2007 (Regenschutz entfernt).

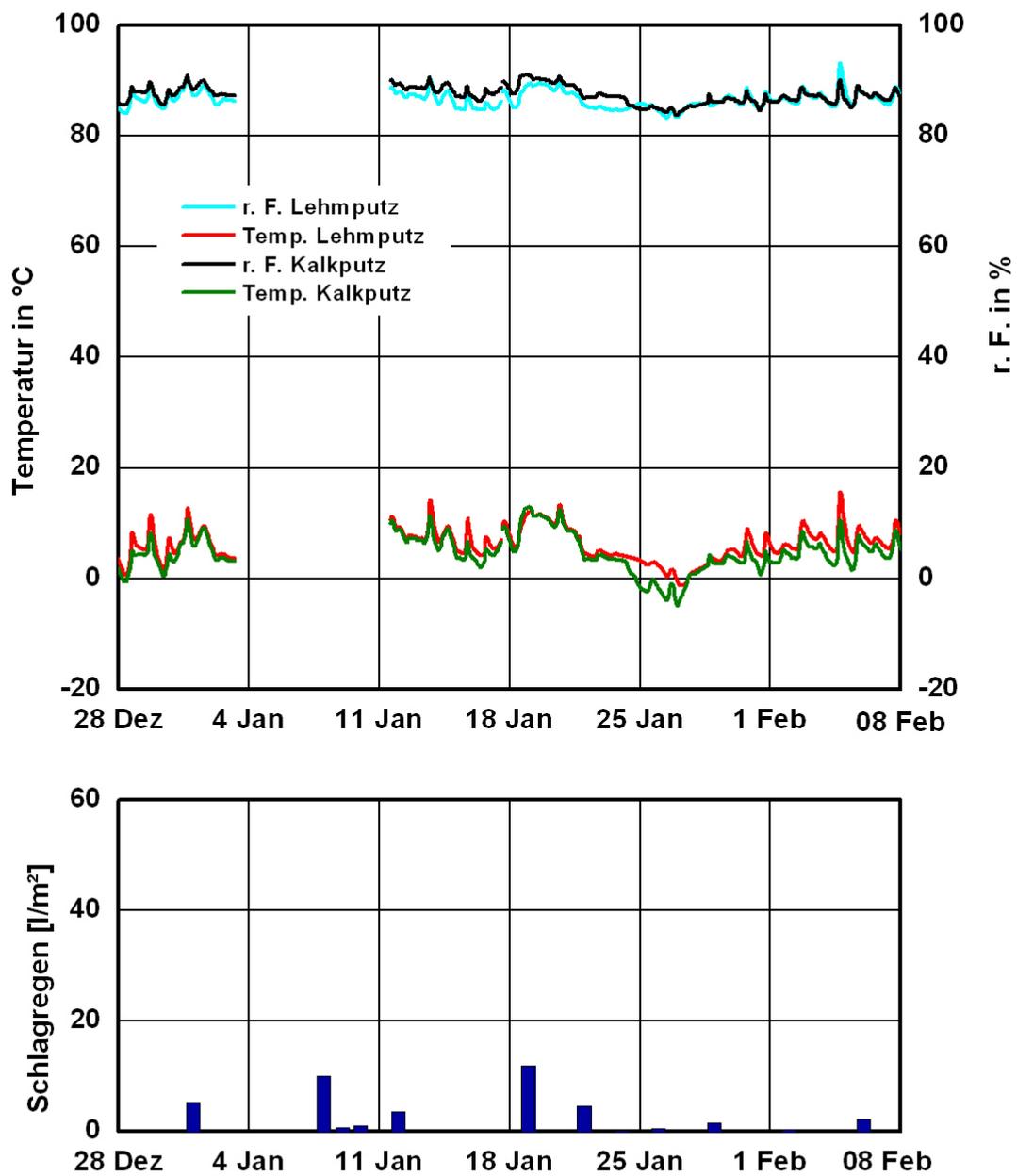


Diagramm 10-9: Gemessene Temperatur- und Feuchteverläufe sowie Schlagregen für den Zeitraum vom 28. Dezember 2006 bis 8. Februar 2007.

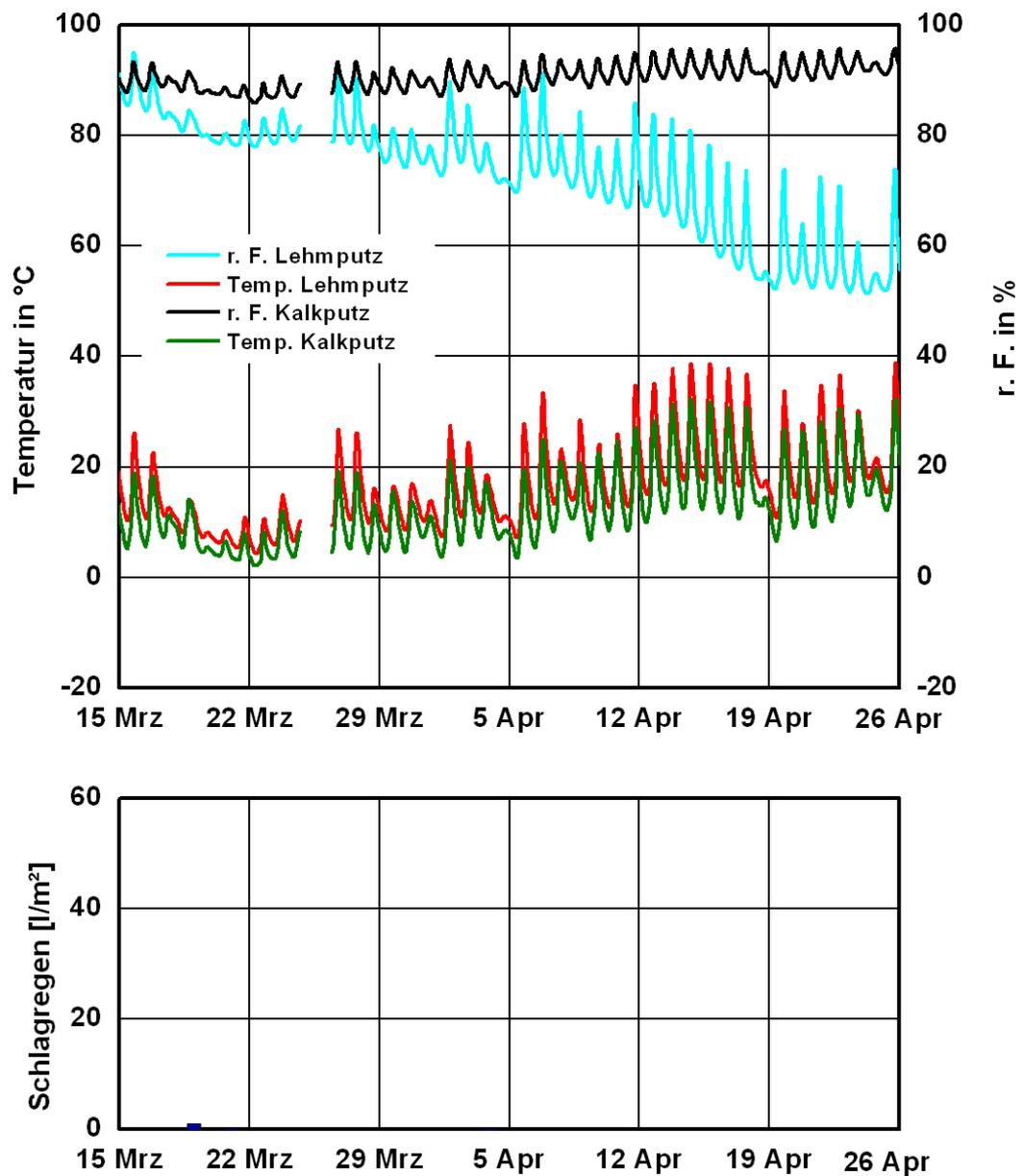


Diagramm 10-10: Gemessene Temperatur- und Feuchteverläufe sowie Schlagregen für den Zeitraum vom 15. März 2007 bis 26. April 2007.

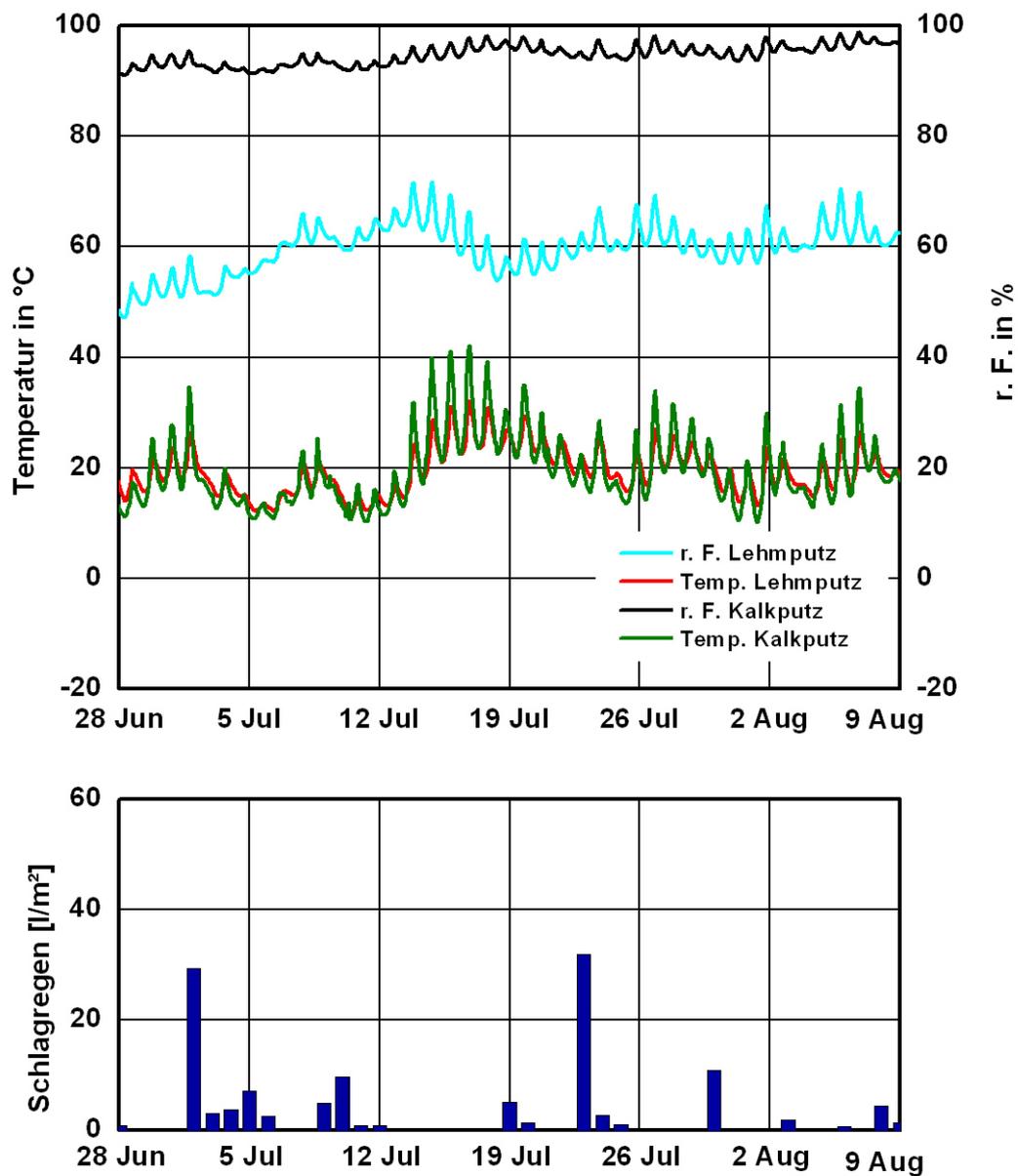


Diagramm 10-11: Gemessene Temperatur- und Feuchteverläufe sowie Schlagregen für den Zeitraum vom 28. Juni bis 9. August 2007.

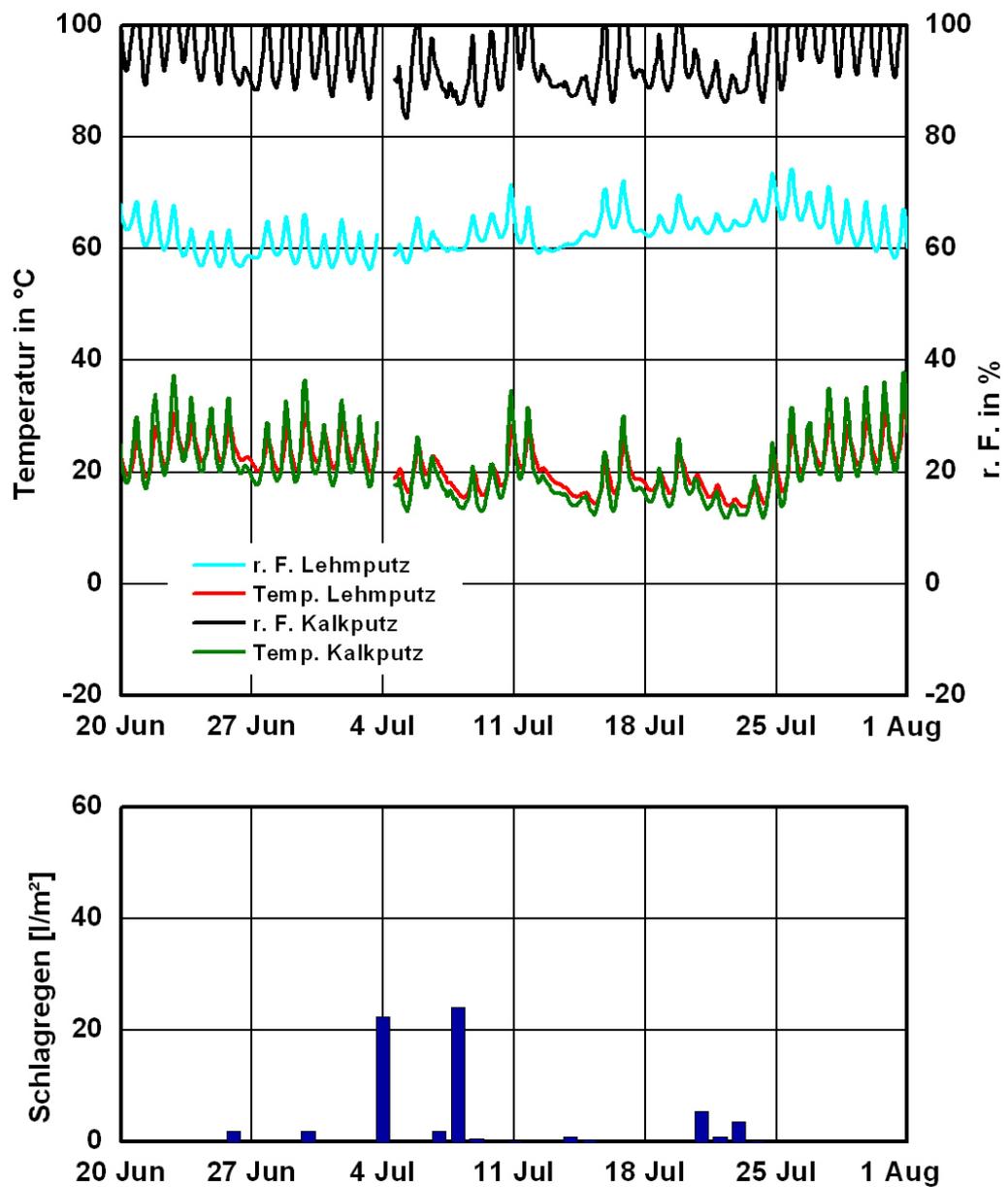


Diagramm 10-12: Gemessene Temperatur- und Feuchteverläufe sowie Schlagregen für den Zeitraum vom 20. Juni bis 1. August 2008.

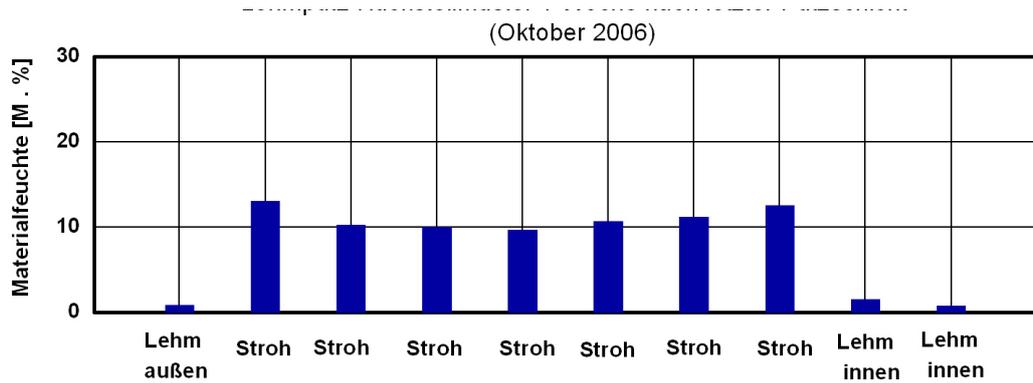


Diagramm 10-13: Gravimetrisch bestimmter Feuchtegehalt im Muster am 6. Oktober 2006.

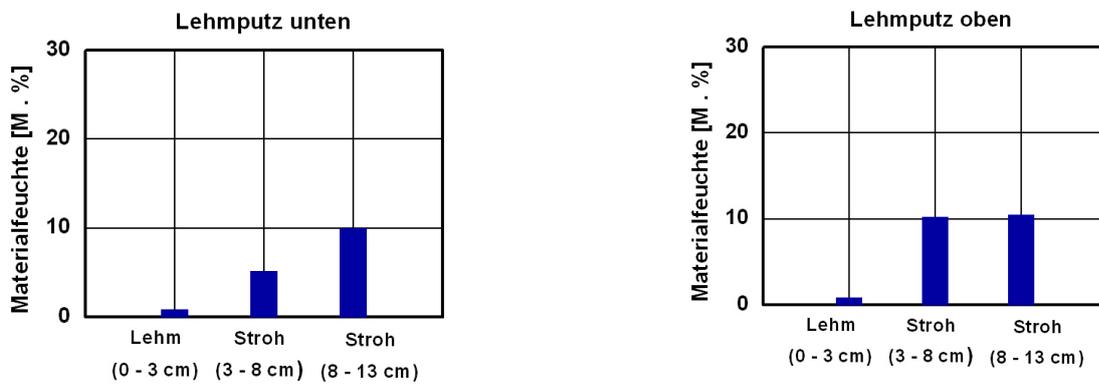


Diagramm 10-14: Gravimetrisch bestimmter Feuchtegehalt der Wandfläche mit Lehmputz am 28. April 2008; ; links: Entnahme in 180 cm Höhe; rechts: Entnahme in 80 cm Höhe.

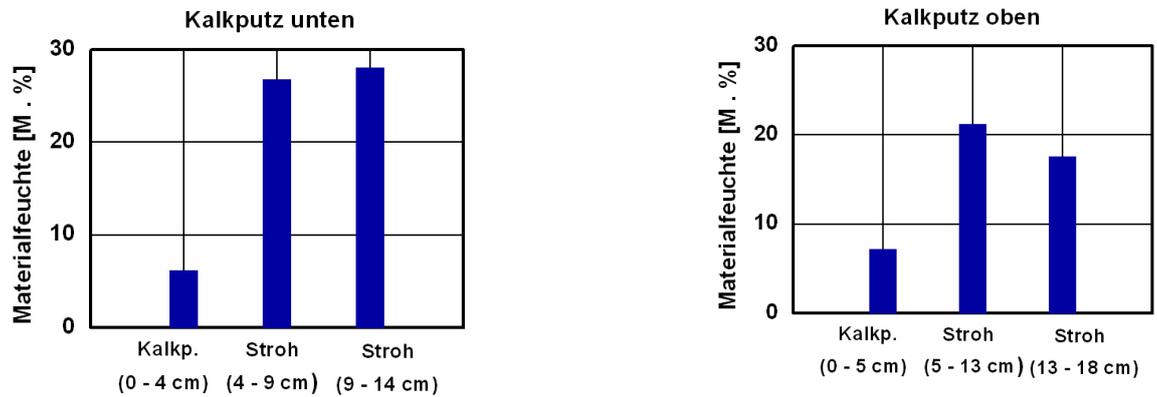


Diagramm 10-15: Gravimetrisch bestimmter Feuchtegehalt der Wandfläche mit Kalkputz am 28. April 2008, links: Entnahme in 180 cm Höhe; rechts: Entnahme in 80 cm Höhe;.

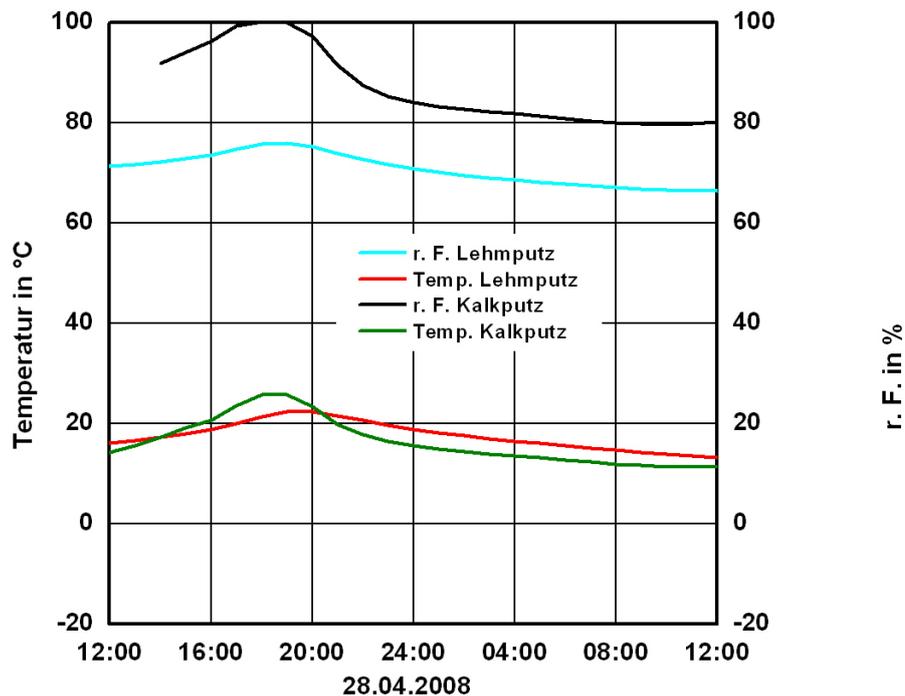


Diagramm 10-16: Gemessene Temperatur- und Feuchteverläufe für den Zeitpunkt der Probennahme (28. April 2008).

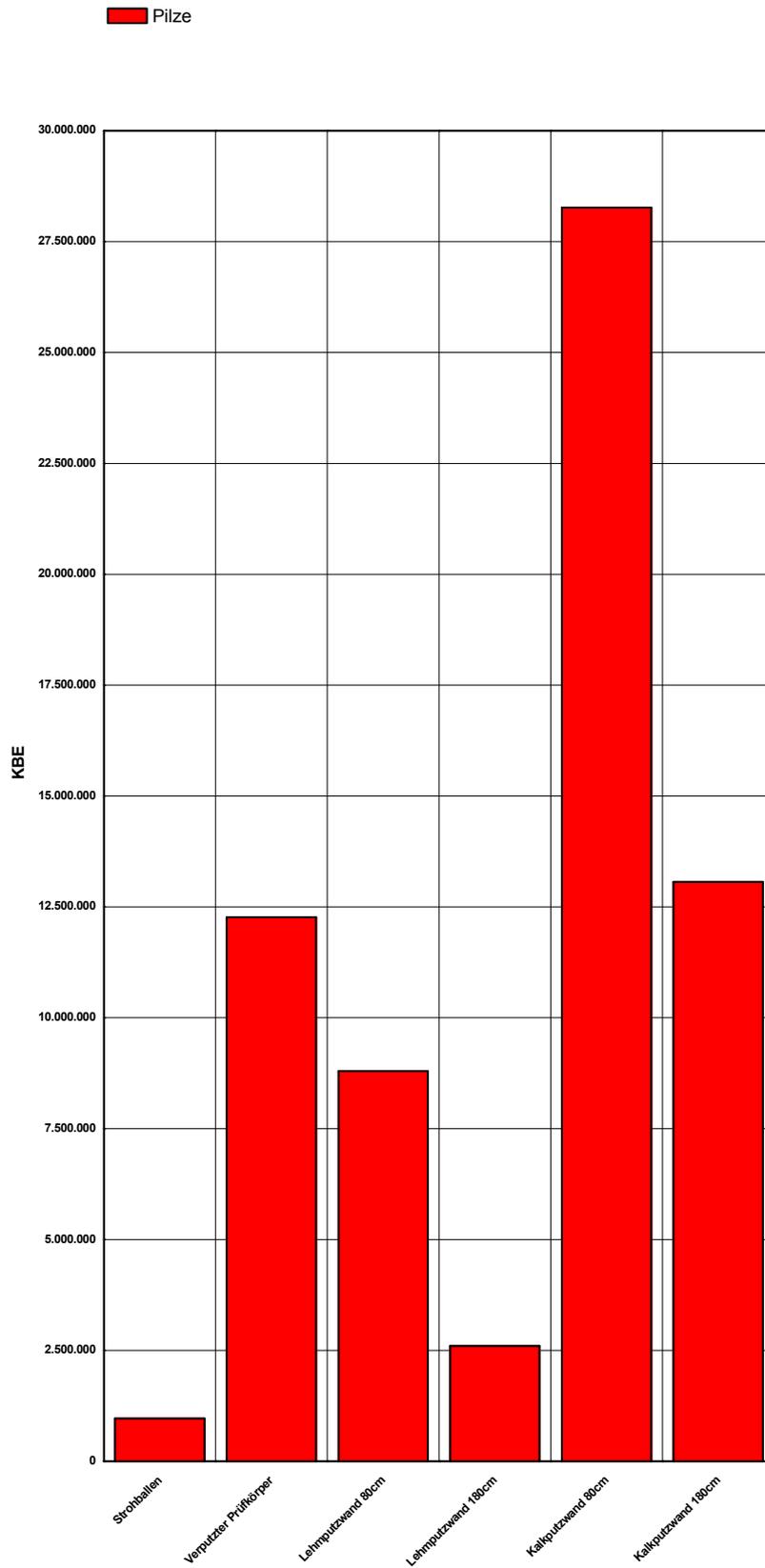


Diagramm 10-17: KBE an Pilzen der verschiedenen Strohproben

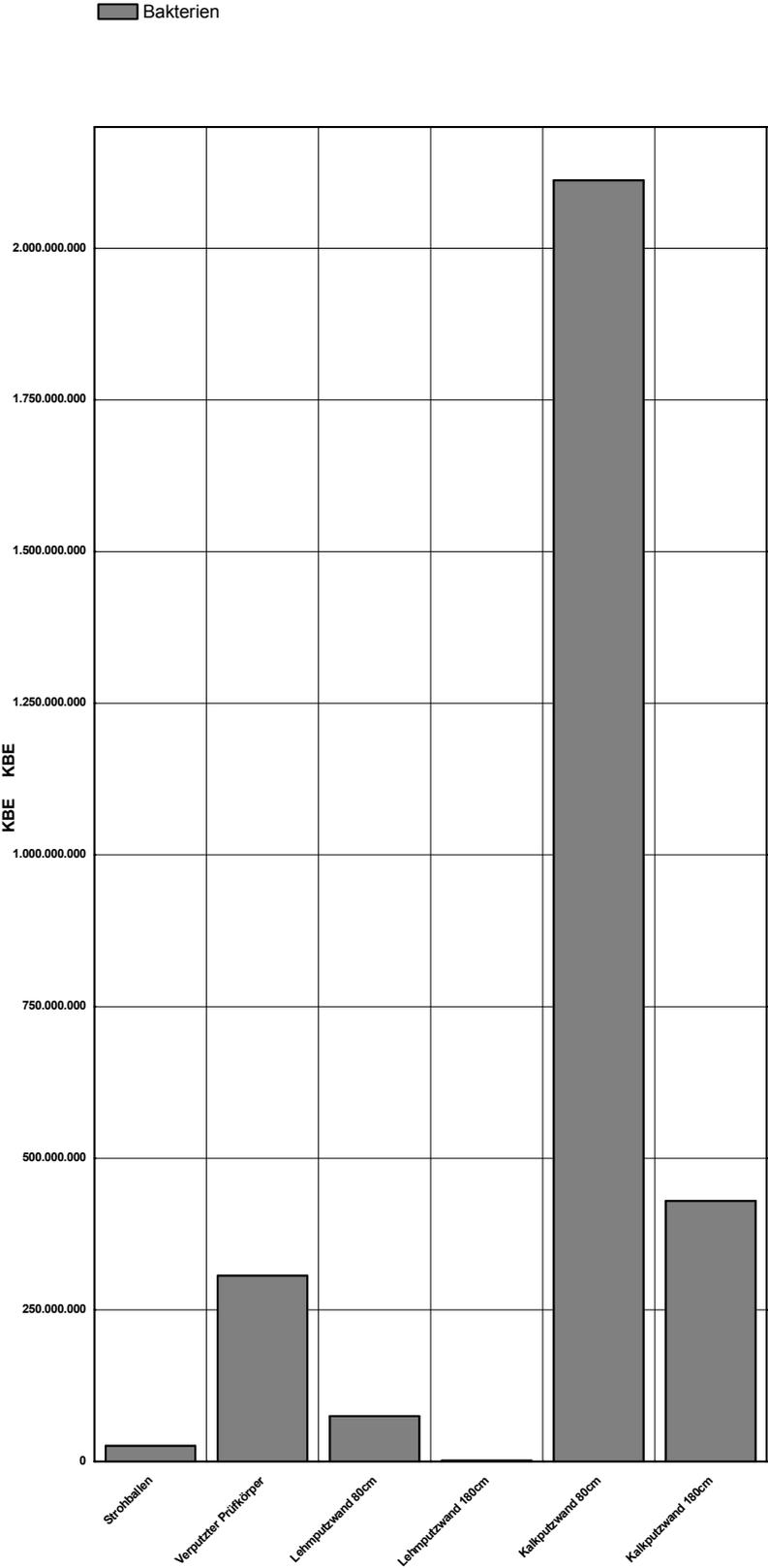


Diagramm 10-18: KBE an Bakterien der verschiedenen Strohproben

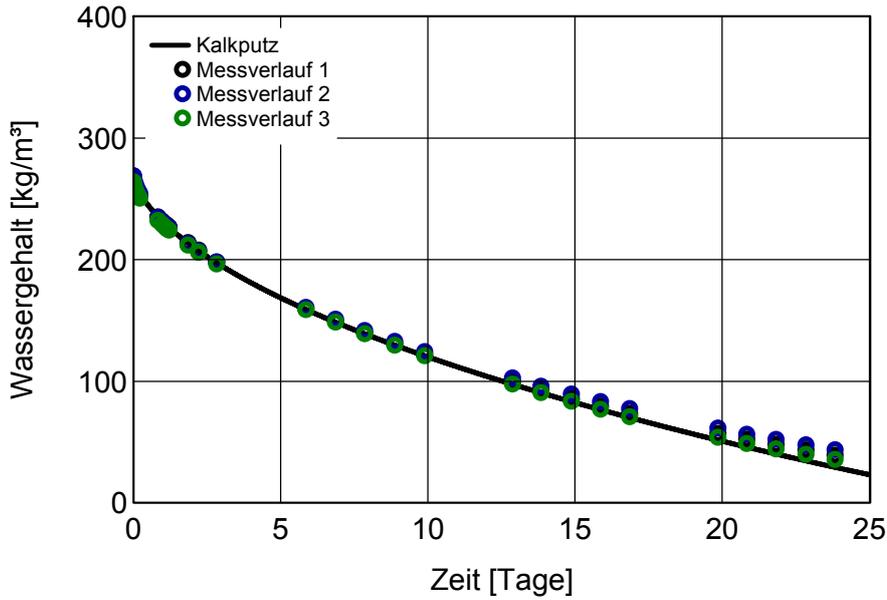


Diagramm 10-19: Trocknungsverlauf anfangs gesättigter Proben des Kalkputzes bei einseitiger Austrocknung bei 23 °C und 50 % rel. Luftfeuchte. Die Messergebnisse sind als Punkte dargestellt, die Rechenergebnisse als durchgezogene Linie.

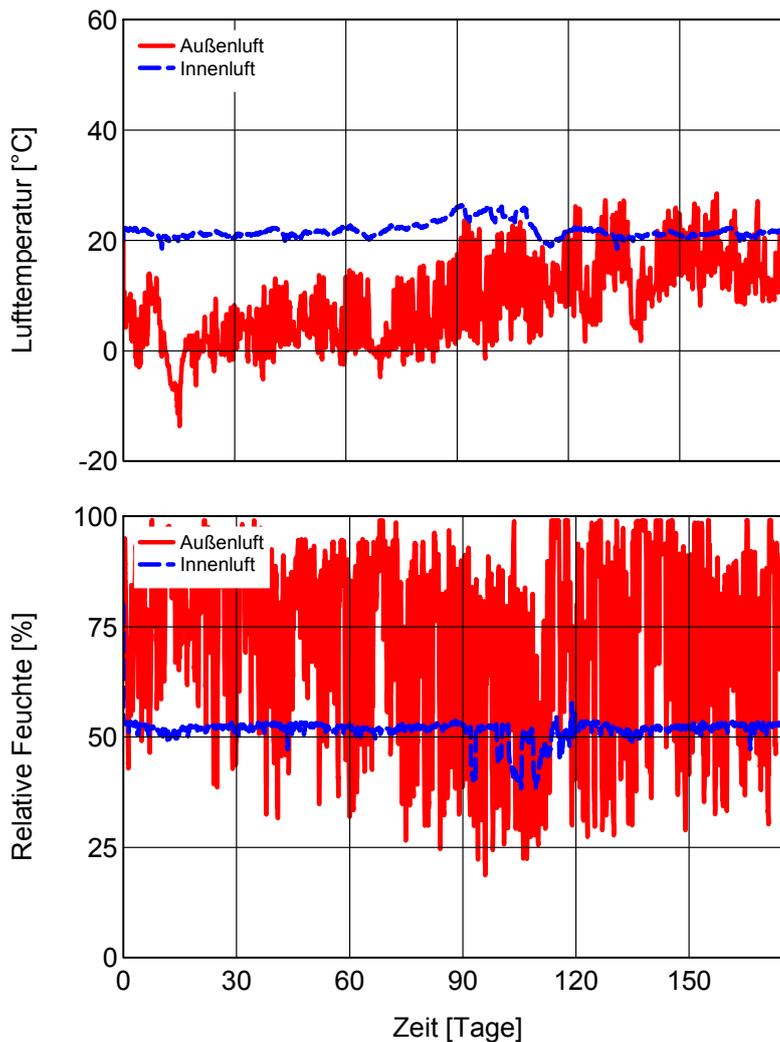


Diagramm 10-20: Darstellung des Verlaufs der Temperatur (oben) und der relativen Feuchte (unten) des Innenklimas der Versuchshalle (blaue Linien) und des Außenklimas (rote Linien).

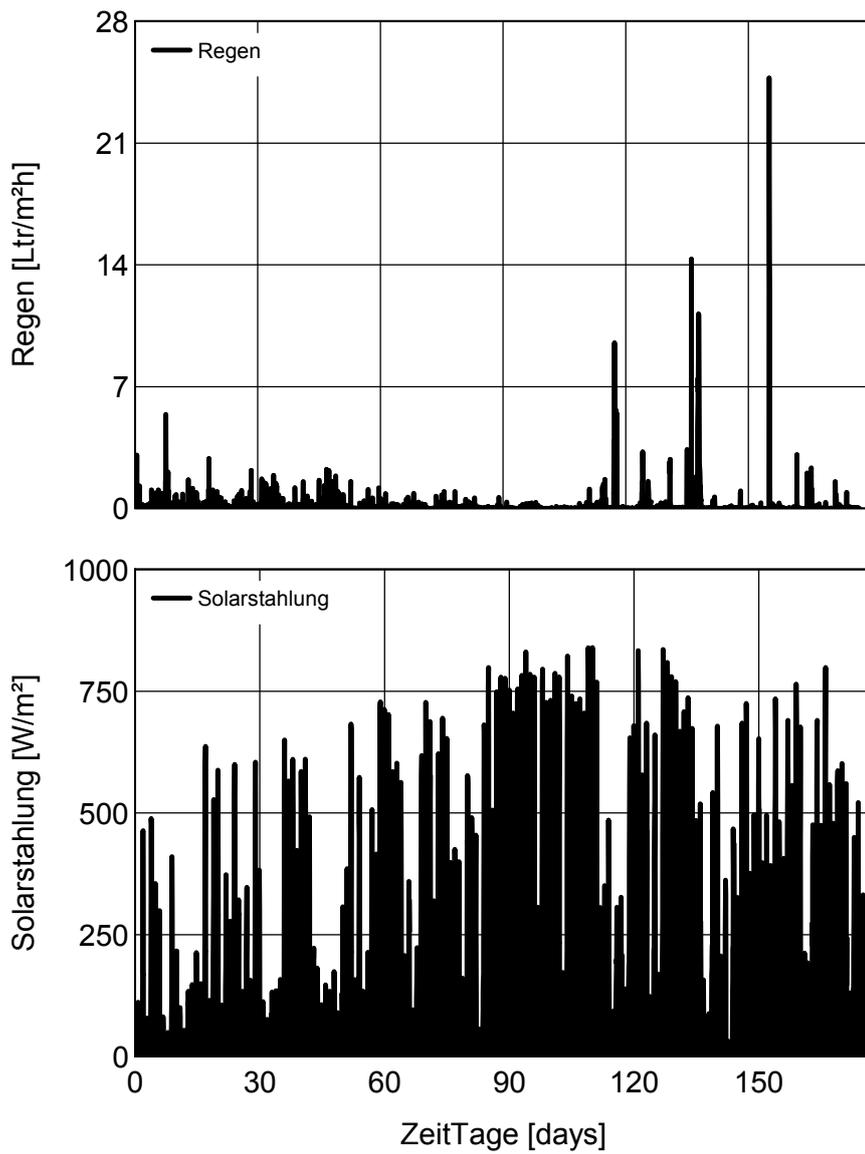


Diagramm 10-21: Darstellung des Verlaufs des Schlagregens (oben) und der solaren Weststrahlung (un-
ten).

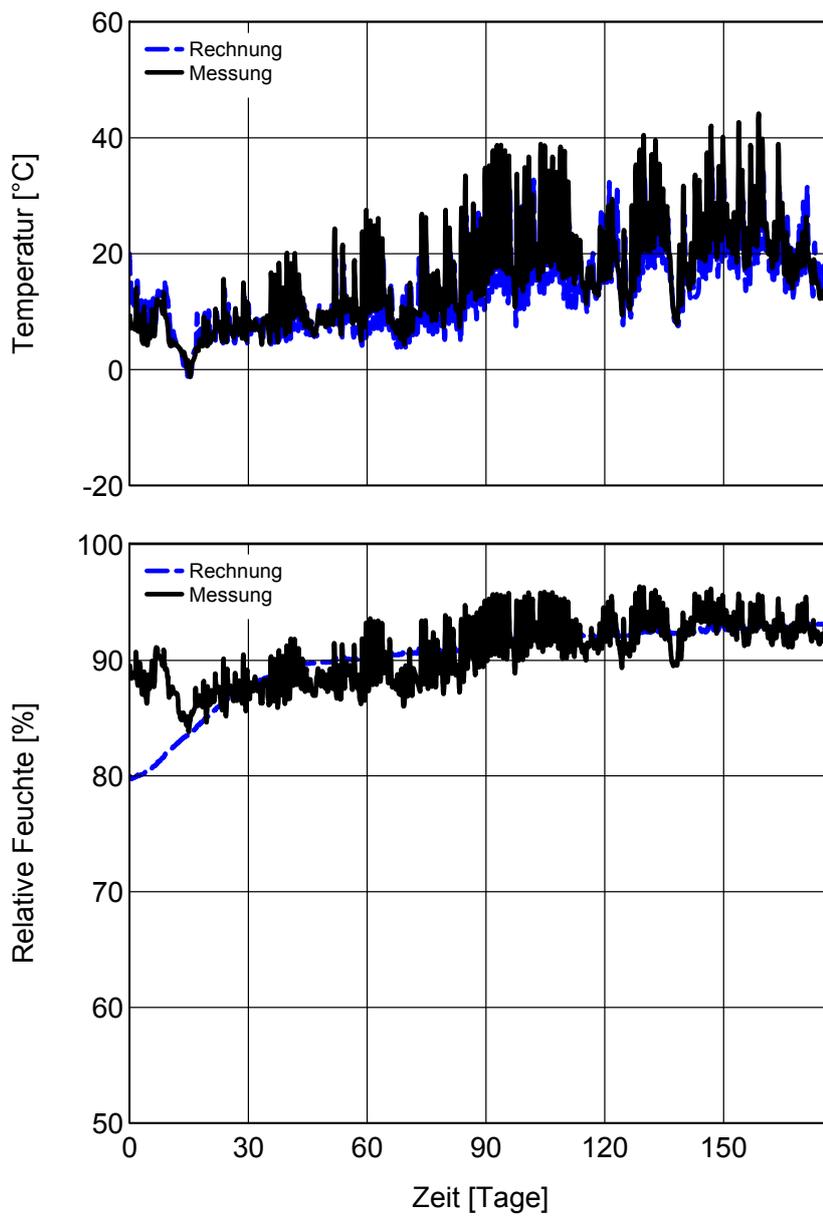


Diagramm 10-22: Gegenüberstellung des Verlaufs der Temperatur (oben) und der relativen Feuchte (unten) der Messung (schwarze Linien) und der Rechnung (blaue Linien).

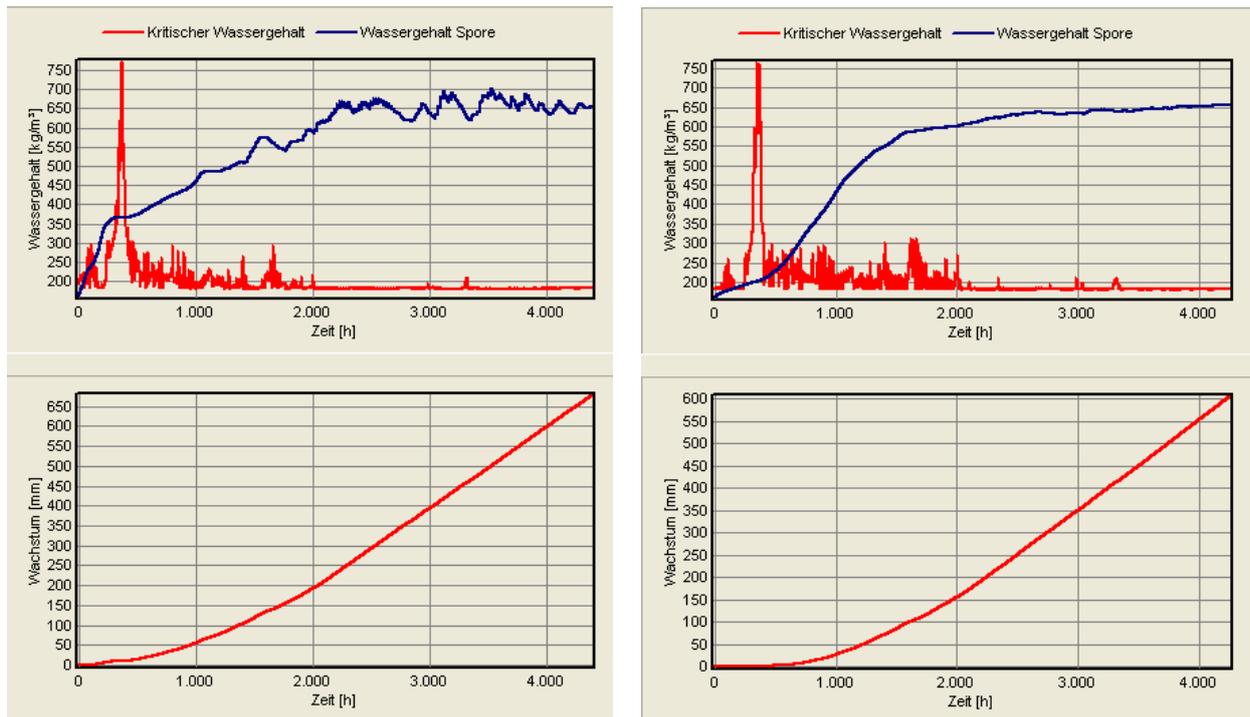


Diagramm 10-23: Ergebnis des biohygrothermischen Modells bei Verwendung der Messwerte (links) und der berechneten Werte (rechts).

Oben: Berechneter Verlauf des Wassergehaltes in der Spore (blau dargestellt) und entsprechender Grenzwassergehalt (rot).

Unten: Berechneter Verlauf des Myzelwachstums.

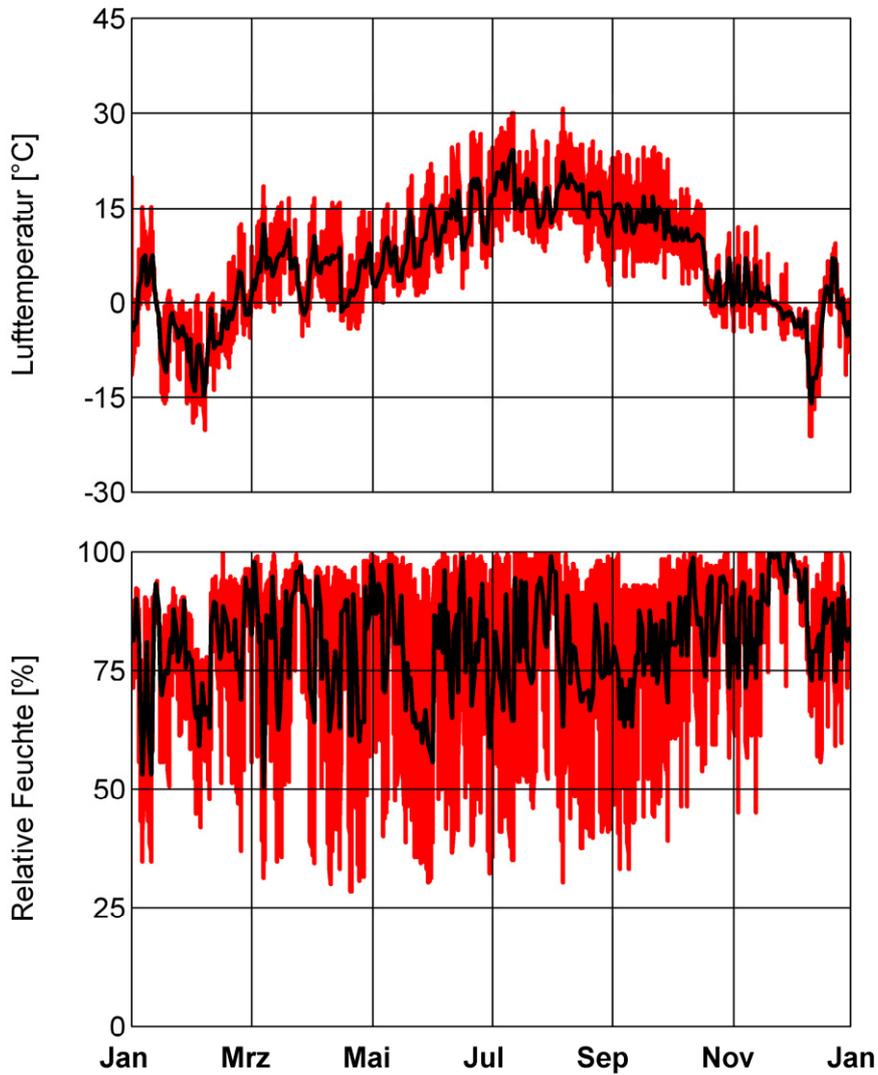


Diagramm 10-24: Darstellung des Verlaufs der Temperatur (oben) und relativen Feuchte (unten) der Außenluft in Holzkirchen. Mit eingezeichnet ist zur Veranschaulichung auch der jeweilige Tagesmittel (schwarze Linie).

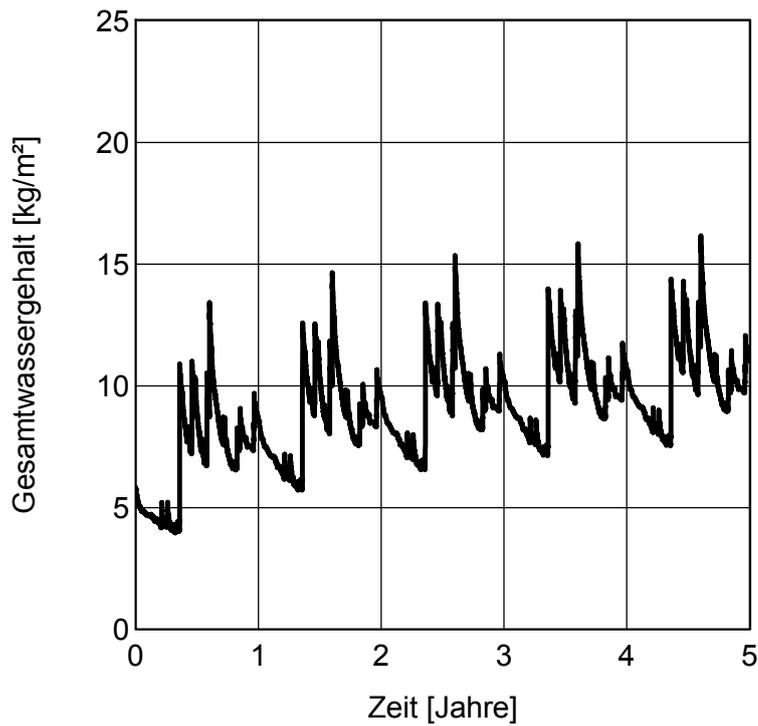


Diagramm 10-25: Darstellung des zeitlichen Verlaufs des Gesamtwassergehalts des Wandaufbaus.

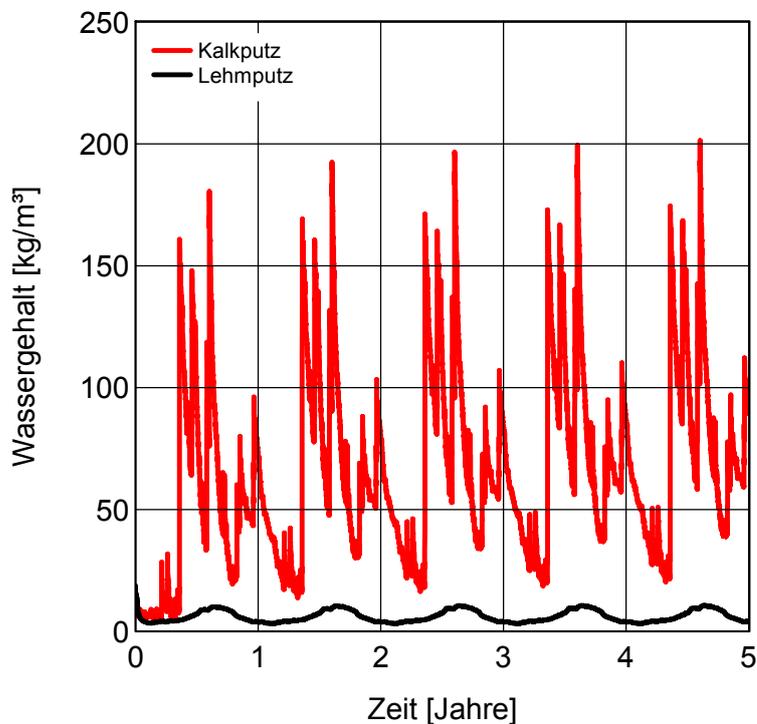


Diagramm 10-26: Zeitlicher Verlauf des Wassergehalts im Lehmputz (schwarze Linie) und im Kalkputz (rote Linie)

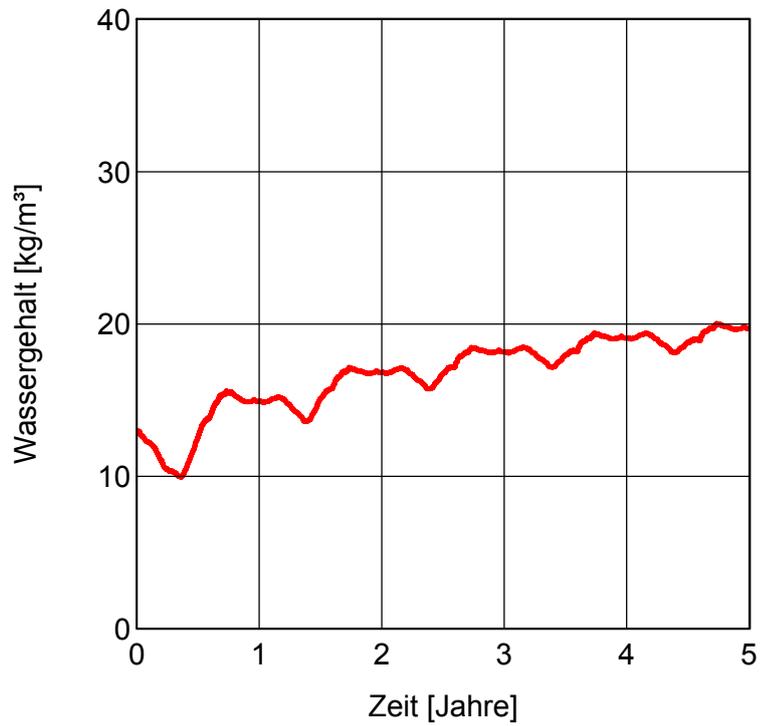


Diagramm 10-27: Zeitlicher Verlauf des Wassergehalts in der Strohdämmung für den Wandaufbau.

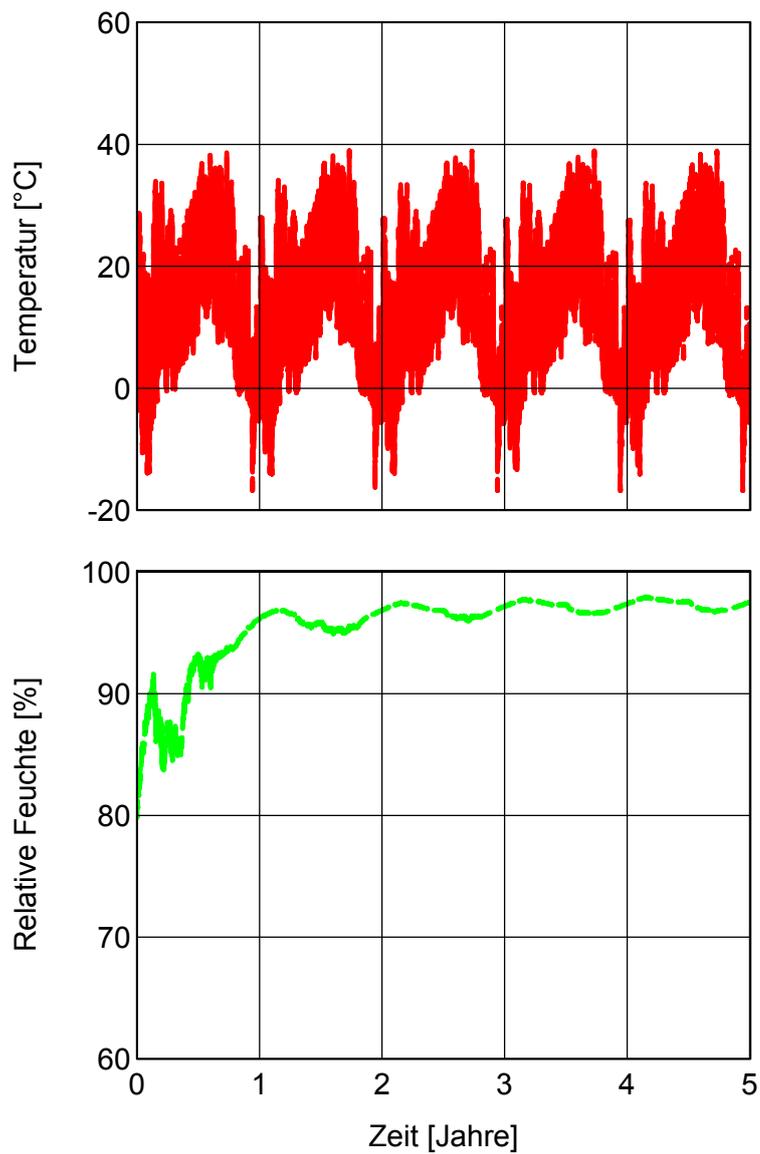


Diagramm 10-28: Zeitlicher Verlauf der Temperatur und Luftfeuchte 2 cm hinter dem Kalkputz.

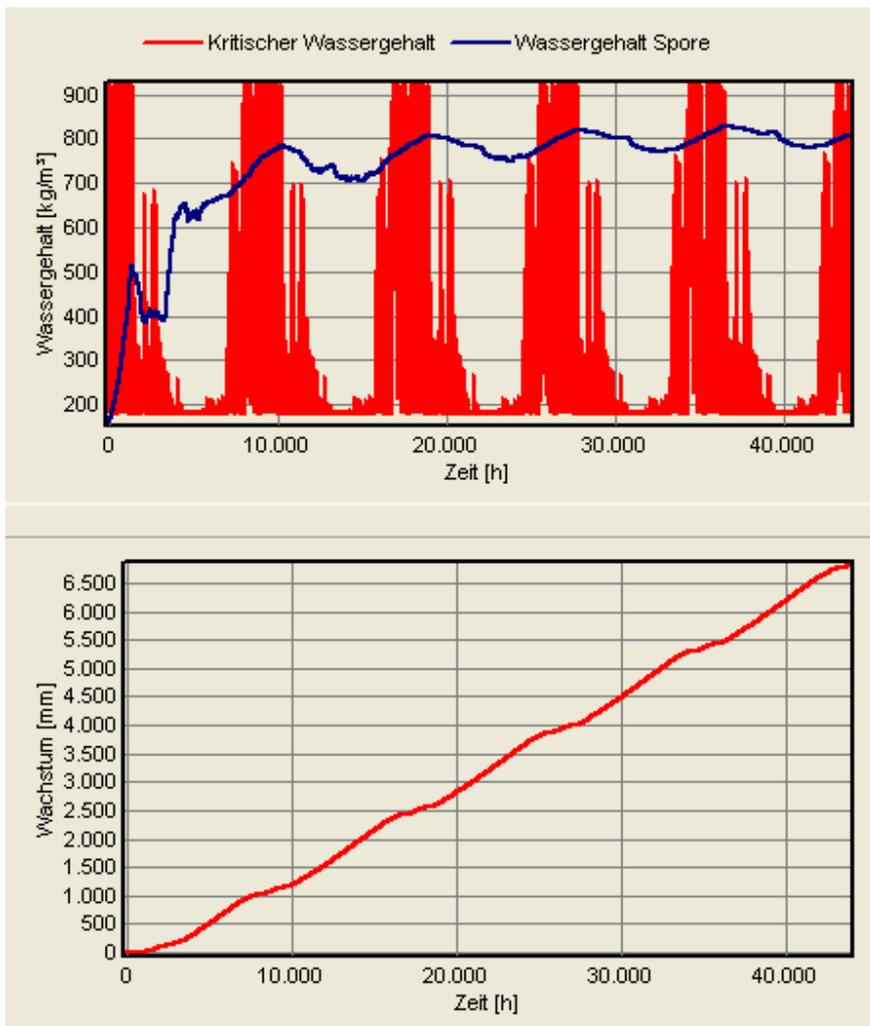


Diagramm 10-29: Ergebnis des biohygrothermischen Modells für den Wandaufbau.

Oben: Berechneter Verlauf des Wassergehaltes in der Spore (blau dargestellt) und entsprechender Grenzwassergehalt (rot).

Unten: Berechneter Verlauf des Myzelwachstums.

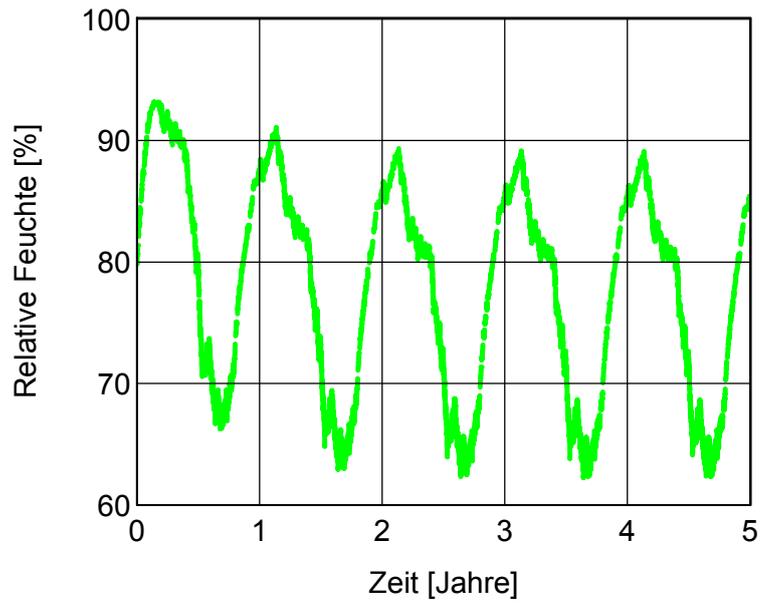


Diagramm 10-30: Zeitlicher Verlauf der Temperatur und Luftfeuchte 2 cm hinter dem Kalkputz bei Verwendung eines außenseitigen hydrophoben Anstrichs.

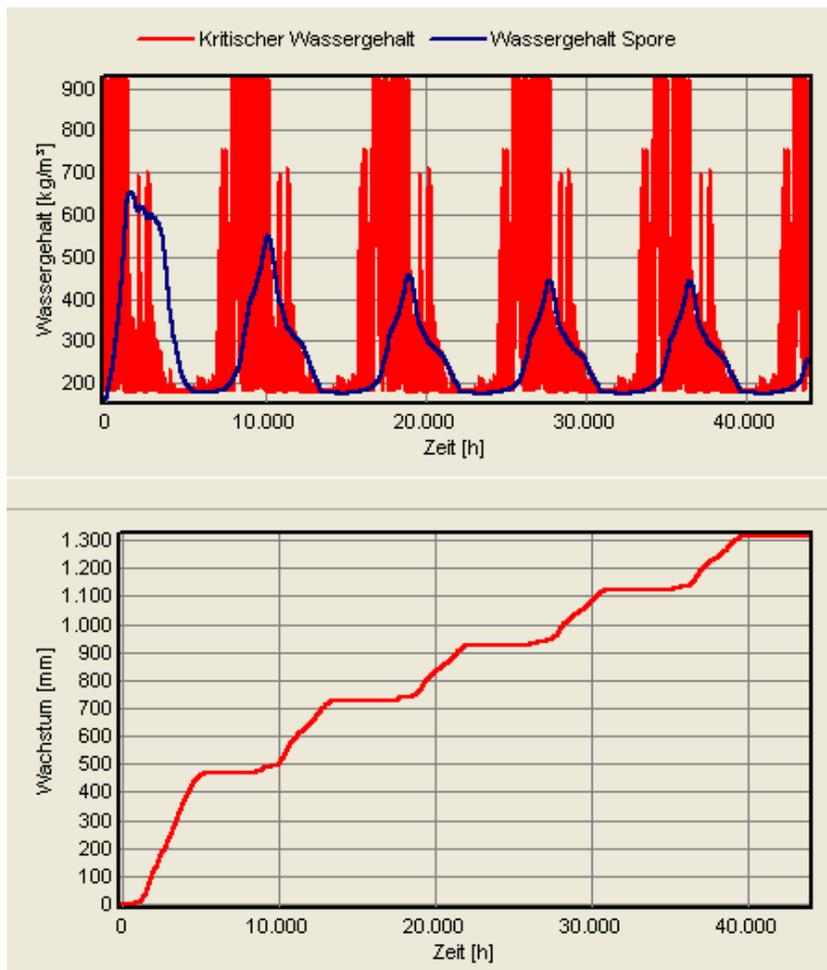


Diagramm 10-31: Ergebnis des biohygrothermischen Modells für den Wandaufbau bei Verwendung eines außenseitigen hydrophoben Anstrichs.

Oben: Berechneter Verlauf des Wassergehaltes in der Spore (blau dargestellt) und entsprechender Grenzwassergehalt (rot).

Unten: Berechneter Verlauf des Myzelwachstums.

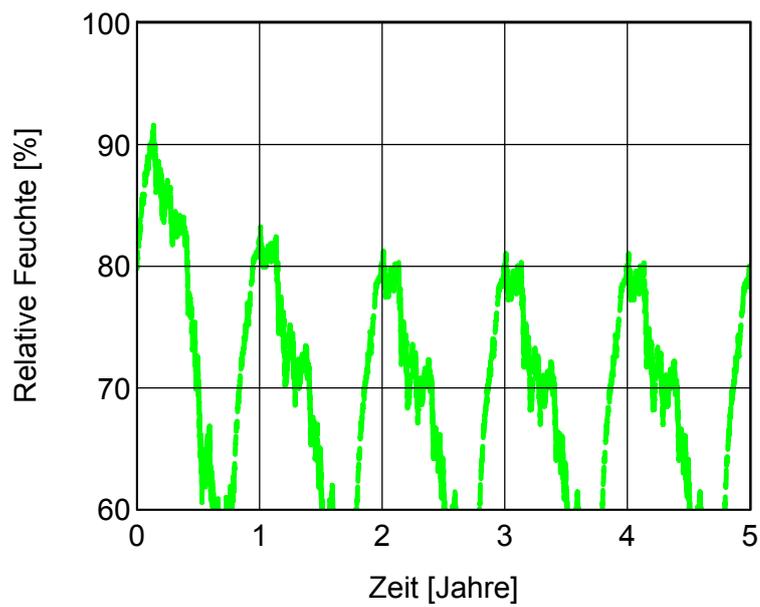


Diagramm 10-32: Zeitlicher Verlauf der Temperatur und Luftfeuchte 2 cm hinter dem Kalkputz bei Verwendung eines außenseitigen dunklen hydrophoben Anstrichs.

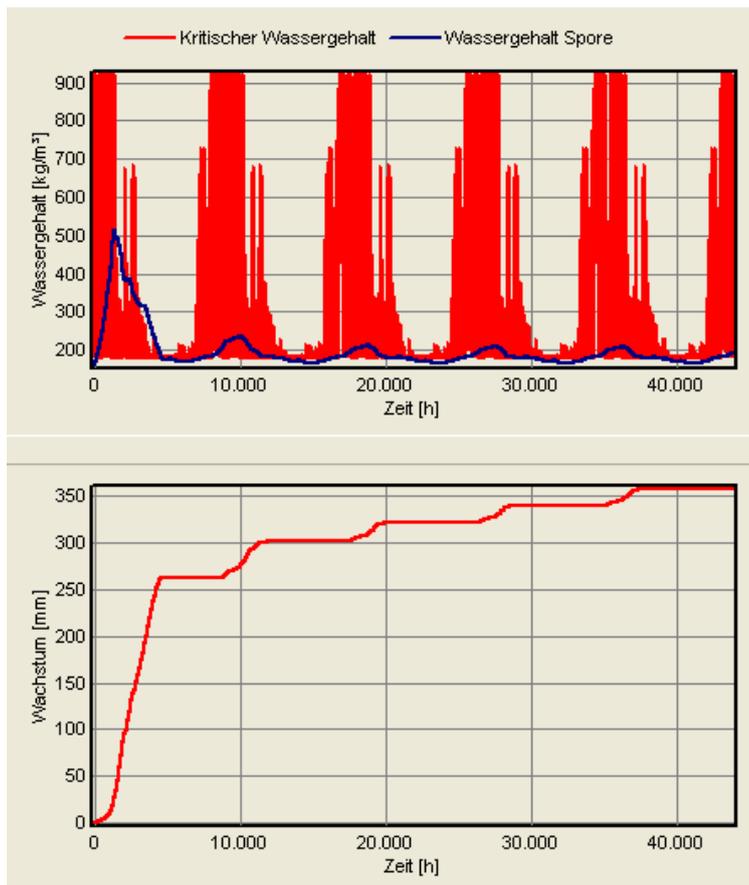


Diagramm 10-33: Ergebnis des biohygrothermischen Modells für den Wandaufbau bei Verwendung eines außenseitigen dunklen hydrophoben Anstrichs.

Oben: Berechneter Verlauf des Wassergehaltes in der Spore (blau dargestellt) und entsprechender Grenzwassergehalt (rot).

Unten: Berechneter Verlauf des Myzelwachstums.

10.3 Tabellen

Tabelle 10-1: Hygrothermische Materialkennwerte des eingesetzten Lehminnenputzes

Probe Nr.	Eigenschaft	Einheit	Ergebnis	
			Einzelwerte	Mittelwert
H956_1 H956_2 H956_3	Rohdichte 40 °C, trockene Luft	kg/m ³	1755 1878 1761	1798
H956_12 H956_13 H956_14 H956_15	Reindichte	kg/m ³	2701 2702 2699 2723	2707
	Porosität	Vol.-%		34
H956_1 H956_2 H956_3	Diffusionswiderstands- zahl μ (23-0/50)	-	14,2 15,2 13,6	14,3
H956_1 H956_2 H956_3	Diffusionswiderstands- zahl μ (23-50/93)	-	8,9 9,3 8,0	8,7
H956_1 H956_2 H956_3	Wasseraufnahme- koeffizient w_1	kg/m ² √h	5,6 3,7 4,6	4,6
H956_1 H956_2 H956_3	Wasseraufnahme- koeffizient w_{24}	kg/m ² √h	1,5 2,0 2,7	2,1
H956_S7 H956_S8 H956_S9	Bezugsfeuchtegehalt bei 23°C u. 65 % r.F.	Vol.-%	1,44 1,50 1,66	1,53
H956_S1 H956_S2 H956_S3	Bezugsfeuchtegehalt bei 23°C u. 80 % r.F.	Vol.-%	1,77 2,05 1,81	1,88
H956_S4 H956_S5 H956_S6	Bezugsfeuchtegehalt bei 23°C u. 93 % r.F.	Vol.-%	2,88 2,83 3,02	2,91
H956_1 H956_2 H956_3	freie Wassersättigung	Vol.-%	36,6 35,7 33,0	35,1
	Kapillartransport- koeffizient für Saugen	D_{W0} [m ² /s] D_{Wf} [m ² /s]		$2,0 \cdot 10^{-10}$ $2,4 \cdot 10^{-8}$
	Kapillartransport- koeffizient für Trocknen	D_{W0} [m ² /s] D_{Wf} [m ² /s]		$2,5 \cdot 10^{-9}$ $5,0 \cdot 10^{-7}$

Tabelle 10-2: Hygrothermische Materialkennwerte des Kalkputzes

Probe Nr.	Eigenschaft	Einheit	Ergebnis	
			Einzelwerte	Mittelwert
H956_K4 H956_K5 H956_K6	Rohdichte 40 °C, trockene Luft	kg/m ³	1811 1805 1796	1804
H956_10d H956_20d H956_30d H956_40d	Reindichte	kg/m ³	2608 2616 2617 2634	2619
	Porosität	Vol.-%		31,1
H956_K1 H956_K2 H956_K3	Diffusionswider- standszahl μ (23-0/50)	-	15,5 14,4 13,8	14,6
H956_K1 H956_K2 H956_K3	Diffusionswider- standszahl μ (23-50/93)	-	14,5 13,6 12,8	13,6
H956_K1 H956_K2 H956_K3	Wasseraufnahme- koeffizient w_1	kg/m ² √h	5,0 5,1 1,0*	5,0
H956_K1 H956_K2 H956_K3	Wasseraufnahme- koeffizient w_{24}	kg/m ² √h		durch- feuchtet
H956_K10 H956_K11 H956_K12	Bezugsfeuchtege- halt bei 23°C u. 65 % r.F.	Vol.-%	0,96 0,82 0,76	0,85
H956_K13 H956_K14 H956_K15	Bezugsfeuchtege- halt bei 23°C u. 80 % r.F.	Vol.-%	1,14 1,06 0,99	1,07
H956_K16 H956_K17 H956_K18	Bezugsfeuchtege- halt bei 23°C u. 93 % r.F.	Vol.-%	2,04 2,03 1,85	1,97
H956_K7 H956_K8 H956_K9	freie Wassersätti- gung	Vol.-%	28,3 28,8 27,9	28,3
	Kapillartransport- koeffizient für Sau- gen	D_{w0} [m ² /s] D_{wf} [m ² /s]		$2,0 \cdot 10^{-10}$ $2,4 \cdot 10^{-7}$
	Kapillartransport- koeffizient für Trocknen	D_{w0} [m ² /s] D_{wf} [m ² /s]		$1,0 \cdot 10^{-11}$ $1,0 \cdot 10^{-11}$

*) bei Mittelwertbildung nicht berücksichtigt.

Tabelle 10-3: Kennwerte des Strohs.

Probe Nr.	Eigenschaft	Einheit	Ergebnis	
			Einzelwert e	Mittelwert
ganzer Bal- len	Rohdichte lufttrocken	kg/m ³	90	90
H925_21 H925_22 H925_23	Bezugsfeuchtege- halt bei 23°C u. 65 % r.F.	Vol. %	1,18 1,19 1,24	1,21
H925_24 H925_25 H925_26	Bezugsfeuchtege- halt bei 23°C u. 80 % r.F.	Vol. %	1,79 1,78 1,84	1,80
H925_27 H925_28 H925_29	Bezugsfeuchtege- halt bei 23°C u. 93 % r.F.	Vol. %	2,45 2,55 2,54	2,51

Tabelle 10-4: Untersuchungsbedingungen in den einzelnen Klimaboxen

Isothermschrank	Inkubationseinheit	Relative Luftfeuchte [%]	Temperatur [°C]
1	1.1	70	10
1	1.2	75	10
1	1.3	80	10
2	2.1	85	25
2	2.2	90	25
2	2.3	95	25
3	3.1	85	10
3	3.2	90	10
3	3.3	95	10
4	4.1	70	25
4	4.2	75	25
4	4.3	80	25

Tabelle 10-5: verwendete Sporensuspensionen

Art	Besonderheit
<i>Aspergillus versicolor</i>	Trockenheitstolerant
<i>Eurotium rubrum</i>	Trockenheitstolerant
<i>Penicillium chrysogenum</i>	Trockenheitstolerant
<i>Aureobasidium pullulans</i>	häufiger Luftkeim
<i>Cladosporium cladosporioides</i>	häufiger Luftkeim
<i>Ulocladium atrum</i>	häufiger Luftkeim
<i>Chaetomium globosum</i>	bei Feuchteschäden typisch
<i>Scopulariopsis brevicaulis</i>	bei Feuchteschäden typisch
<i>Mucor plumbeus</i>	bei Feuchteschäden typisch
<i>Rhodotorula mucilaginosa</i>	Hefe

Tabelle 10-6: Bewertung des Pilzwachstums

Bewertung	Ausprägung
0	Kein Wachstum
1	Schwaches Wachstum an Aufimpfungsstelle
2	deutliches Wachstum an Aufimpfungsstelle
3	Sporenbildung (vegetativ) an Aufimpfungsstelle
4	Wachstum auch auf Probenmaterial (ursprüngliche Materialoberfläche), nur Mycelwachstum
5	Wachstum und Sporenbildung (vegetativ) auf Probenmaterial (ursprüngliche Materialoberfläche)
6	Wachstum und Bildung von generativen Verbreitungsstadien (Kleistothecien) auf Probenmaterial (ursprüngliche Materialoberfläche)

Tabelle 10-7: Koloniebildende Einheiten des Ausgangsmaterials (Strohballen)

Koloniebildende Einheiten (KBE) Bakterien pro g trockenes Material	Koloniebildende Einheiten (KBE) Pilze pro g trockenes Material
$2,6 \cdot 10^7$	$9,7 \cdot 10^5$

Tabelle 10-8: Häufigkeiten der in Anzuchtschalen vorgefunden Mikroorganismen des Ausgangsmaterials (Strohballen)

Vorkommen	Taxon
Häufige und dominante Formen	Bakterien <i>Wallemia sebi</i> Sterile Mycelien <i>Chaetomium globosum</i> <i>Aspergillus restrictus</i>
Akzessorische Arten	<i>Aspergillus</i> sp. <i>Aspergillus versicolor</i> <i>Cladosporium cladosporioides</i> <i>Cladosporium herbarum</i> <i>Eurotium</i> sp. <i>Geotrichum candidum</i> Hefen <i>Penicillium brevicompactum</i> <i>Penicillium chrysogenum</i> <i>Penicillium</i> sp. <i>Streptomyces</i> spp.

Tabelle 10-9: Koloniebildende Einheiten des verputzten Prüfkörpers

Koloniebildende Einheiten (KBE) Bakterien pro g trockenes Material	Koloniebildende Einheiten (KBE) Pilze pro g trockenes Material
$3,1 \cdot 10^8$	$1,2 \cdot 10^7$

Tabelle 10-10: Häufigkeiten der in Anzuchtschalen vorgefunden Mikroorganismen des verputzten Prüfkörpers

Vorkommen	Taxon
Häufige und dominante Formen	Bakterien <i>Penicillium brevicompactum</i> <i>Penicillium chrysogenum</i> Steriles Mycel Streptomyces <i>Wallemia sebi</i>
Akzessorische Arten	<i>Aspergillus restrictus</i> <i>Cladosporium cladosporioides</i> <i>Cladosporium herbarum</i> <i>Geotrichum candidum</i> Hefen <i>Penicillium compactum</i> <i>Penicillium</i> sp.

Tabelle 10-11: Koloniebildende Einheiten der Strohproben der Lehmputzwand

Probennahmestelle	Koloniebildende Einheiten (KBE) Bakterien pro g trockenes Material	Koloniebildende Einheiten (KBE) Pilze pro g trockenes Material
Lehmputzwand (Probe 1 : 80cm)	$7,5 \cdot 10^7$	$8,8 \cdot 10^6$
Lehmputzwand (Probe 2 : 180cm)	$1,6 \cdot 10^6$	$2,6 \cdot 10^6$

Tabelle 10-12: Koloniebildende Einheiten der Strohproben der Kalkputzwand

Probennahmestelle	Koloniebildende Einheiten (KBE) Bakterien pro g trockenes Material	Koloniebildende Einheiten (KBE) Pilze pro g trockenes Material
Kalkputzwand (Probe 3: 80cm)	$2,1 \cdot 10^9$	$2,8 \cdot 10^7$
Kalkputzwand (Probe 4: 180cm)	$4,3 \cdot 10^8$	$1,3 \cdot 10^7$

Tabelle 10-13: Häufigkeiten der in Anzuchtschalen vorgefunden Mikroorganismen der Lehmputzwand

Vorkommen	Lehmputzwand 1 (80cm)	Lehmputzwand 2 (180cm)
	Taxon	Taxon
Häufige und dominante Arten	Bakterien <i>Acremonium kiliense</i> <i>Aspergillus restrictus</i> Dematiaceae indet. <i>Scopulariopsis fusca</i> Streptomyces <i>Wallemia sebi</i> Steriles Mycel.	Bakterien <i>Eurotium herbariorum</i> Streptomyces <i>Wallemia sebi</i> Steriles Mycel
Akzessorische Arten	<i>Acremonium sp.</i> <i>Aspergillus versicolor</i> <i>Penicillium chrysogenum</i> <i>Penicillium sp.</i> <i>Scopulariopsis brevicaulis</i> <i>Scopulariopsis candida</i>	<i>Acremonium kiliense</i> <i>Acremonium sp.</i> <i>Aspergillus restrictus</i> <i>Aspergillus versicolor</i> <i>Eurotium sp.</i> <i>Penicillium chrysogenum</i> <i>Scopulariopsis candida</i>

Tabelle 10-14: Häufigkeiten der in Anzuchtschalen vorgefunden Mikroorganismen der Kalkputzwand

Vorkommen	Kalkputzwand 3 (80cm)	Kalkputzwand 4 (180cm)
	Taxon	Taxon
Häufige und dominante Arten	Bakterien <i>Acremonium strictum</i> <i>Aspergillus restrictus</i> <i>Emericella</i> sp. Hefe <i>Mucor plumbeus</i> <i>Penicillium chrysogenum</i> <i>Scopulariopsis fusca</i> Sterile Mycelien <i>Streptomyces</i>	Bakterien <i>Aspergillus niger</i> <i>Aspergillus versicolor</i> <i>Aureobasidium pullulans</i> Dematiaceae indet. Sterile Mycelien <i>Scopulariopsis brevicaulis</i> <i>Streptomyces</i> <i>Paecilomyces</i> sp. <i>Vertillium</i> sp.
Akzessorische Arten	<i>Aspergillus fumigatus</i> <i>Aspergillus versicolor</i> <i>Chaetomium globosum</i> <i>Emericella nidulans</i> <i>Epicoccum purpureum</i> <i>Paecilomyces</i> sp. <i>Penicillium brevicompactum</i> <i>Penicillium</i> sp. <i>Scopulariopsis brevicaulis</i> <i>Scopulariopsis candida</i> <i>Scopulariopsis</i> sp. <i>Stachybotris chartarum</i> <i>Verticillium daliae</i> <i>Wallemia sebi</i>	<i>Acremonium strictum</i> <i>Aspergillus fumigatus</i> <i>Aspergillus</i> sp. <i>Aspergillus restrictus</i> <i>Eurotium herbariorum</i> <i>Mucor plumbeus</i> <i>Scopulariopsis brevicaulis</i> <i>Scopulariopsis fusca</i> <i>Verticillium daliae</i> <i>Verticillum</i> sp. <i>Wallemia sebi</i>

Tabelle 10-15: Bewertungshilfe für kultivierbare Pilze im Teppichbodenstaub [6]. Gesamt-KBE ohne *Alternaria*, *Aureobasidium*, *Cladosporium*, Hefen, sterile Mycelien.

Beurteilungswert	Keimzahl [KBE/g]
1. Beurteilungswert [KBE/g]	300.000
2. Beurteilungswert [KBE/g]	900.000

10.4 Zeichnungen der Wände

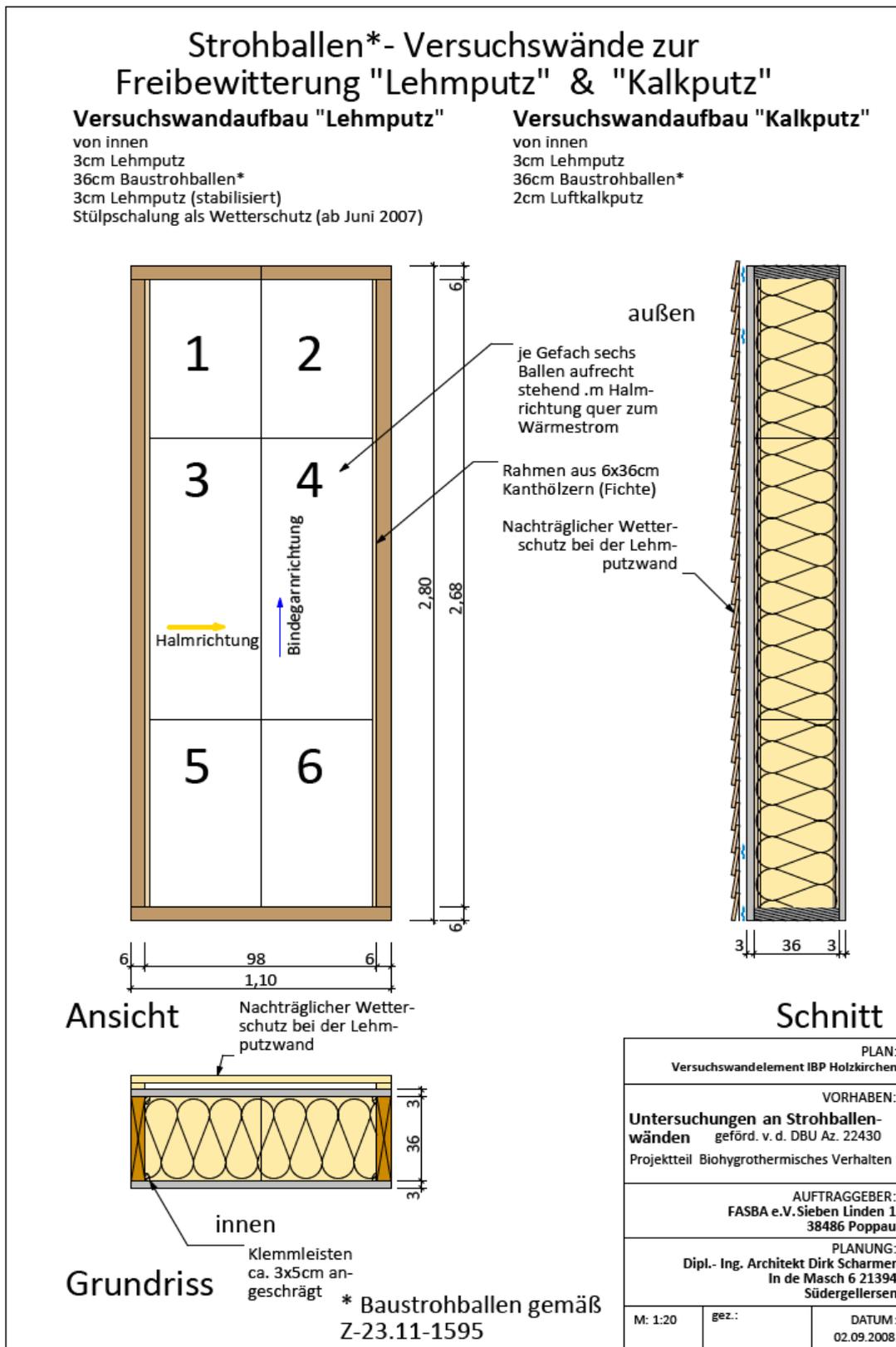


Bild 10-28 Zeichnungen der Versuchswandelemente

B 3 Messtechnik an realisierten Gebäuden

von
Dipl.- Ing. Architekt Dirk Scharmer
In de Masch 6
21394 Südergellersen
Tel. 04131-727804
Email: info@wand4.de



1 Zusammenfassung

Auf Grund der guten biologischen Verwertbarkeit von Stroh liegt der größte Qualitätssicherungsbedarf im Bereich der Überwachung der Temperatur- und Feuchtebedingungen bei der Herstellung und Verarbeitung von Strohballen, sowie während des Einsatzes der Strohballen als Dämmung.

Für den Einsatz auf dem Acker bzw. bei der Lagerung des Strohs beim Landwirt wurde ein bestehendes digitales Messgerät so modifiziert, dass es im Inneren von Strohballen, bzw. Strohballenwänden in einer definierten Tiefe mit Hilfe einer Stechlanze Temperatur und relativer Luftfeuchte messen bzw. über einen längeren Zeitraum erfassen und zwischenspeichern kann. Beide im Rahmen dieses Projekts erstellten Geräte haben sich in mehreren Herstell- und Verarbeitungssituationen bewährt, sodass diese Geräte zukünftig vom FASBA für den Einsatz empfohlen werden können.

Für die Überwachung der Temperatur- und Feuchtebedingungen im Inneren von Strohballenwänden von gebauten Häusern wurde ein bereits in Zusammenarbeit mit dem FASBA entwickeltes Messsystem mit internetfähigem Datenlogger weiteroptimiert und ergänzt. Dabei wurde insbesondere das Internetportal zum Abruf und zur Auswertung der Messdaten soweit verbessert, dass es zur wissenschaftlichen Auswertung und bauaufsichtlichen Anerkennung dienen kann. Das Internetportal kann mit üblichen Internetbrowsern genutzt über einen rechteabhängigen Nutzerlogin aufgerufen werden. Zur Erhöhung der Messgenauigkeit werden in Klimakammern kalibrierte Sensoren eingesetzt, die über den Datenlogger individuelle Messwertkorrekturfaktoren erhalten. Über einen zentralen Server ist eine Fernkontrolle der Messsysteme möglich, sodass Ausfälle der Anlagen nicht unbemerkt bleiben. Das Messsystem wurde im Rahmen dieses Projekt an zwei Strohballenbauten eingebaut und in Betrieb genommen. Über das Internetportal sind mittlerweile die Messdaten von sechs Gebäuden einsehbar.

2 Abbildungen

2.1 Handmessgeräte für den Baustelleneinsatz

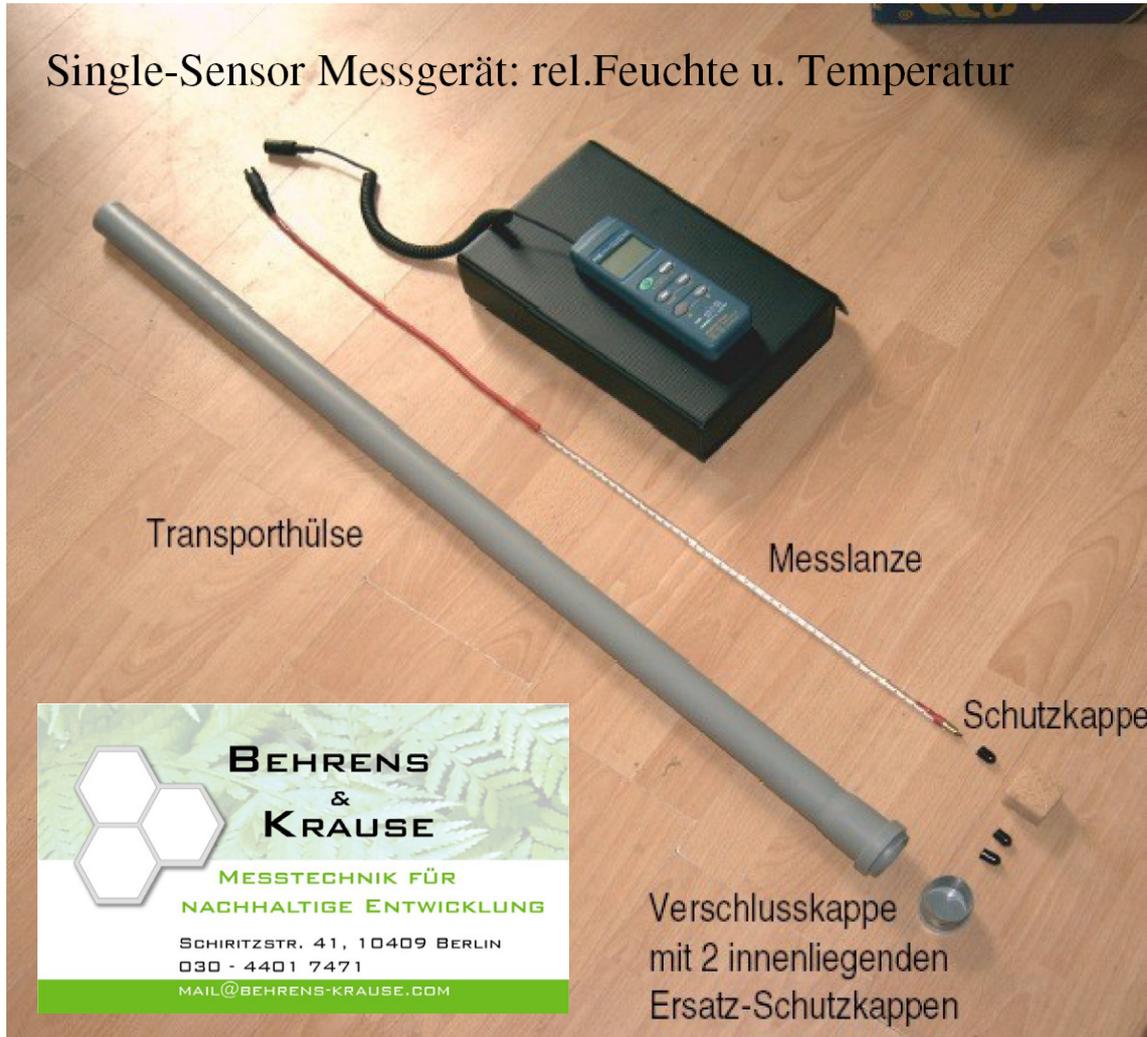


Abbildung 2-1 Mobiles Messsystem

2.2 Feuchte- Temperaturmesssystem mit internetfähigem Datenlogger



Abbildung 2-2 Kombisensor

Internetfähiger Datenlogger Modell **B1**



Abbildung 2-3 Datenloggerraussenansicht

2.3 Internetportal für Messdaten

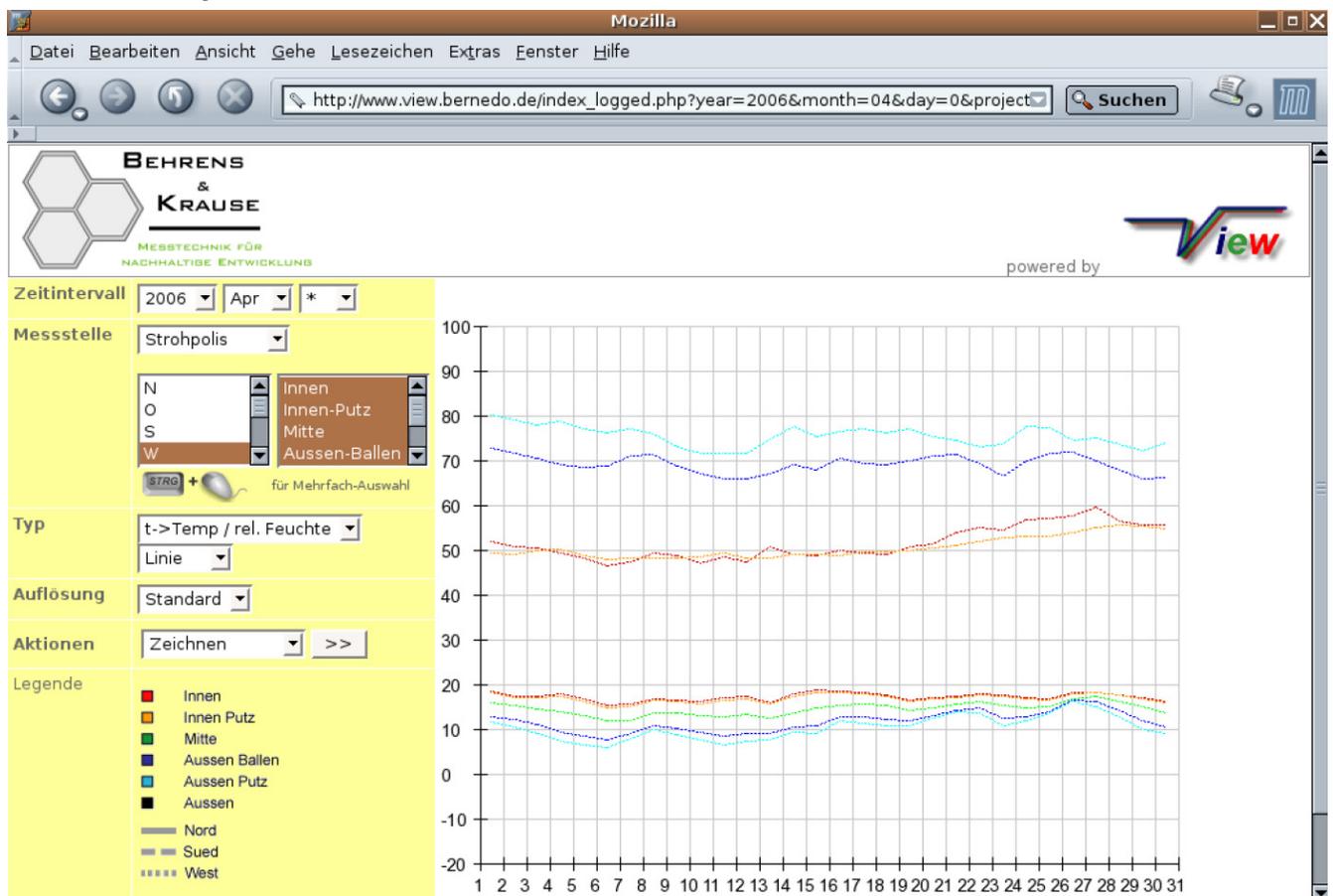


Abbildung 2-4 Screenshot des Messdaten- Internetportals

C Bautechnische Nachweise

von
Dipl.- Ing. Architekt Dirk Scharmer
In de Masch 6
21394 Südergellersen
Tel. 04131-727804
Email: info@wand4.de



C 1 Brandschutz

1 Zusammenfassung

1. Für die Erweiterung eines anerkannten Anwendungsbereiches wurden verschiedene Baustoff- und Bauteiltests durchgeführt. Mit einem Feuerwiderstandstest an einer dünn (max. 1cm) lehmverputzten Strohballenständerwand mit hochkantigen Strohballen (Wanddicke ca. 35cm) wird die Klassifizierung „Feuerhemmend“ F-30 nach DIN 4102 für diese Konstruktionsart erreicht. Bislang wurden nur Tests an stärkeren, mit liegenden Ballen ausgefachten Wänden mit dickeren Lehmputz (3-5cm) durchgeführt.

2. Mit einem weiteren Feuerwiderstandstest an einer lehmverputzten lasttragenden Wand (Wanddicke ca. 54cm) wird die Klassifizierung „Feuerhemmend“ F-30 nach DIN 4102 für diese Konstruktionsart erreicht. Bislang wurde weltweit kein Test mit einer Belastung während der Beflammung durchgeführt.

3. Mit einer Prüfung des Brandverhaltens von dünn (d=8mm) lehmverputzten Strohballenbauteilen mittel „Single-Burning-Item“- Test können in dieser Art endbehandelte Strohballenbauteile als schwerentflammbar B1 nach DIN 4102, bzw. B nach DIN EN 13501 klassifiziert werden. Bislang kann der Baustoff Stroh nur in die Baustoffklasse normalentflammbar B2 nach DIN 4102 bzw. E nach DIN EN 13501 eingeordnet werden. Durch die geringfügige Oberflächenbearbeitung wird der den Anwendungsbereich nun erheblich erweitert. Im Gegensatz zu dem in Deutschland bislang üblichen Brandschachtversuchs nach DIN 4102 bietet der international gängige „Single- Burning- Item“- Test (SBI) nach EN 13823 die Möglichkeit eine höhere Baustoffklassifizierung nur durch oberflächliche Beschichtung zu erreichen. Es wurden drei SBI- Tests und 6 Kleinbrennertests (DIN EN 11925) absolviert.

Die Durchführung der Prüfungen erfolgte durch das
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (IBMB) /
Materialprüfungsanstalt für das Bauwesen (MPA)
Beethovenstr. 52, 38106 Braunschweig, Tel. 0531-5400
Dipl. Ing. Christian Maertins/ Dipl.- Ing. Nicole Bollmohr



Abb.: 1 (l.) Benjamin Krick frisiert die lasttragende Wand in der Aufbauhalterung



Abb.: 2 (r.) Aufbauteam v.l.n.r: Till Moritz Hahn¹, Britta Imhoff², Burkard Rüger, Stefan Ohnesorg, Günther Schmidt³, Benjamin Krick, René Werner¹, Dirk Scharmer, Steffen Knöfler (nicht im Bild) (Firmen: ¹Die Holzwerker, ²Stroh unlimited, ³AKKA)



Abb.: 3 (l.) Erster SBI- Test nach EN 13823 am 30.05.07

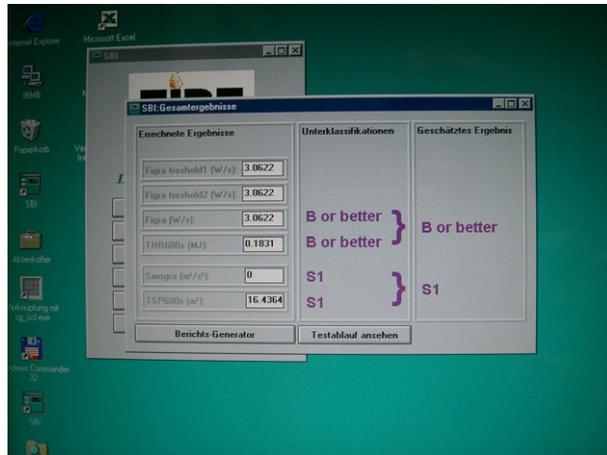


Abb.: 4 (r.) Vorläufiges Ergebnis des ersten Tests



Abb.: 5 (l.) Herstellung der Wandecke für den SBI- Test



Abb.: 6 (r.) 5-8mm Putzdicke

C 2 Wärmeschutz

1 Zusammenfassung

1. Es wurden Wärmeleitfähigkeitsmessungen nach EN 12667 an Ballen mit normalen und höheren Rohdichten durchgeführt, mit dem Ziel ggf. unterschiedliche Bemessungswerte beispielsweise für lasttragende Wände mit Ballen sehr hoher Dichte bereitstellen zu können. Bislang existieren nur Werte für relativ geringe Rohdichte von bis zu 95 kg/m^3 .

2. Es wurden Wärmeleitfähigkeitsmessungen nach EN 12667 an Stroh in trockenem Zustand und in feuchtem Klima ($23^\circ\text{C}/80\%rF$) zur Feststellung der Wärmedämmeigenschaften von Stroh unter feuchten Bedingungen durchgeführt. Bislang wird zur Festsetzung des Bemessungswertes der Wärmeleitfähigkeit ein Aufschlag von 20% auf den Trockenmesswert vorgenommen um einer anzunehmenden Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit unter feuchten Bedingungen Rechnung zu tragen.

3. Es wurden Wärmeleitfähigkeitsmessungen nach EN 12667 an Stroh mit unterschiedlichen Halmrichtungen durchgeführt mit dem Ziel festzustellen, inwieweit die Faserrichtung des Materials einen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit hat.

Die Durchführung der Prüfungen erfolgte durch das

Forschungsinstitut für Wärmeschutz München e.V. (FIW)

Sachbearbeiter: Dipl.- Ing. S. Sieber

Lochhamer Schlag 4

82166 Gräfelfing

Te. 089-85800-0

2 Ergebnisse

2.1 Lambdamessungen verschiedene Rohdichten, Materialfeuchten und Halmrichtungen

Ergebnisse Prüfbericht 2006					
Untersuchungsbericht vom 06.12.2006	Probe	1	2	3	4
		Weizen	Roggen	Weizen	Roggen
		in Halmrichtung		quer zur Halmrichtung	
Trockenrohddichte	Kg/m ³	105	115	93	93
Rohddichte 23°C/80% r.F.	Kg/m ³	120	-	93	93
$\Lambda_{10, tr}$	W/m·K	0,067	0,082	0,0439	0,0422
$\Lambda_{10 (23/80)}$	W/m·K	0,08	-	0,0472	0,0465
Umrechnungsfaktor $F_{m,(23/80)=}$ für den Feuchtegehalt gemäß EN ISO 10456		1,194	-	1,075	1,10

Tabelle 2-1: Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsmessungen

Ergebnisse 2008					
Prüfbericht- Nr.		F.2-909/08 F.2-605/08		F.2-714/08 F.2-916/08	
		Weizen		Weizen	
		in Halmrichtung		quer zur Halmrichtung	
Trockenrohddichte	Kg/m ³	116		97,2	
Rohddichte 23°C/80% r.F.	Kg/m ³	133		109	
$\Lambda_{10, tr}$	W/m·K	0,065		0,0397	
$\Lambda_{10 (23/80)}$	W/m·K	0,0715		0,0469	
Umrechnungsfaktor $F_{m,(23/80)=}$ für den Feuchtegehalt gemäß EN ISO 10456	-	1,1		1,181	

Tabelle 2-2: Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsmessungen

2.2 Messung des Wärmedurchlasswiderstands nach DIN EN 1934

Ergebnisse		
Wärmedurchgangskoeffizient	W/(m ² ·K)	0,178
Wärmeleitfähigkeit der Wand im trockenen Zustand	W/m·K	0,072
Wärmeleitfähigkeit des Strohballenanteils (berechnet)	W/m·K	0,065

Tabelle 2-3: Ergebnisse der Wärmeleitdurchlasswiderstandmessung

C 3 Schallschutz

3 Zusammenfassung

Ursprünglich waren zwei Prüfungen der Luftschalldämmung an Strohballenwänden lasttragender und nicht- lasttragender Konstruktionsart nach DIN EN ISO 140-3 zur Feststellung des Schalldämmwertes für bauaufsichtliche Verfahren vorgesehen. Es konnte jedoch, wegen unerwartet gestiegenem Aufwand und Kosten nur eine Prüfung mit zwei Messungen an einer lehmverputzten Holzständerwand mit Strohballendämmung realisiert werden. Die Durchführung erfolgte am:

Institut für Akustik und Bauphysik (IAB)

(amtlich anerkannte Güte- und Eignungsprüfstelle im bauaufsichtlichen Genehmigungsverfahren)

Prof. Dr. Ernst- Jo. Völker, Sachbearbeiter Dipl.- Ing. W. Teuber

Kiesweg 22

61440 Oberursel

Tel. 06171-75031

Strohballenständerwand d=356mm mit Lehmputz jeweils d=10mm

Zunächst wurde die Wand von d=356mm mit Putzstärken von jeweils 10mm Lehmputz gemessen. Die Messung der Luftschalldämmung im Wandprüfstand ohne Nebenwege nach DIN EN ISO 140-1 ergab das bewertete Laborschalldämmmaß von

$R_{w,P}=45\text{dB}$.

Bei Beurteilung nach DIN 4109 (abzüglich Vorhaltemaß von 2dB) ergibt dies den Rechenwert von

$R_{w,R}=43\text{dB}$.

Strohballenständerwand d=356mm mit Lehmputz d=10mm und d=20mm

Anschließend wurde auf einer Seite eine Lage Putz mit einer Stärke von 10mm aufgebracht. Die Messung der Luftschalldämmung der Wand mit den Putzstärken 10mm im Prüfraum und 20mm im Messraum im Wandprüfstand ohne Nebenwege nach DIN EN ISO 140-1 ergab das bewertete Laborschalldämmmaß von

$R_{w,P}=46\text{dB}$.

Bei Beurteilung nach DIN 4109 (abzüglich Vorhaltemaß von 2dB) ergibt dies den Rechenwert von

$R_{w,R}=44\text{dB}$.

Die Luftschalldämmung der geprüften Wand liegt im unteren Bereich der Erwartungen und ließ sich durch Entkopplungen der Wandständer von den Putzschichten mittels Holzweichfaserstreifen und der einseitigen Verdopplung der Putzstärke auf 20mm nicht wie erhofft verbessern. Die geprüfte Wandkonstruktion mit max. **$R_{w,R}=44\text{dB}$** lässt sich gemäß DIN 4109 für Wohnhäuser in den Lärmpegelbereichen I (>35 dB) bis IV (>40dB) einsetzen. Die notwendige Luftschalldämmung einer Wohnungstrennwand von $R'_{w}>53\text{ dB}$ wird deutlich unterschritten.

Betrachtet man die Luftschalldämmung über die einzelnen Frequenzen ist ein Einbruch bei ca. 200 Hz zu erkennen. Im Rahmen der Berechnungsmethodik des bewerteten Schalldämmmaßes (Einzahlwert) der DIN EN ISO 717-1 führt dieser Einbruch, der auf Resonanzen der Wandschalen resultieren dürfte zu einem relativ geringen Wert. Das gemessene Luftschalldämmmaß bei höheren Frequenzen steigt ab 500Hz rapide bis auf $R>80\text{ dB}$ an.

Ein eigenständiges allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis auf Basis der Messungen ist nach Aussage des durchführenden Prüfinstituts aus baurechtlichen Gründen nicht möglich.

Ausblick: Gelingt es, das den Einbruch des Luftschalldämmmaßes bei ca. 200 Hz z.B. durch andere Bekleidungsvarianten zu verringern sind deutliche Verbesserungen des bewerteten Luftschalldämmmaßes $R'w$ zu erwarten, zumindest die Verwendbarkeit im Lärmpegelbereich V (>45 dB) dürfte nachweisbar sein.

Anhang

1 Anhang Projektteil A 3 Lasttragender Haustyp: Statische Beurteilungen



von Prof. Dr.-Ing. I. Danielewicz
Hochschule Magdeburg- Stendal
Breitscheidstr. 2, D- 39114 Magdeburg
Tel. 0391- 886 4170

Anhang Projektteil A 3 Lasttragender Haustyp: Beurteilung der Standsicherheit lasttragender Haustyp „Kleinballen“

1 Berechnungsgrundlagen

1.1 Gebäudebeschreibung

Die nachfolgenden Ausführungen behandeln die Standsicherheit eines Gebäude in lasttragenden Strohballenbauweise aus Kleinballen.

Das Gebäude ist mit einem konventionellen Holz-Sparrendach mit unten liegender Kehlbalkenlage eingedeckt. Die Dachflächen bilden in ihren Ebenen Scheiben, die an der Traufe auf einem umlaufenden Holzrähm der Wandkrone aufliegen.

Die Wände bestehen aus gepressten Strohballen, die zu einem Trockenmauerwerk, im Versatz vermauert wurden. Sie werden beidseitig mit Lehmputz verputzt. Die Wände nehmen die Lasten aus dem Holzdach, Eigengewicht und Wind bzw. Schnee auf. Die Wandöffnungen sind durch Holzkonstruktionen überbrückt. Die Wände ruhen auf einer wandbreiten Holzschwelle, und 30 cm breiten Massivfundamenten.

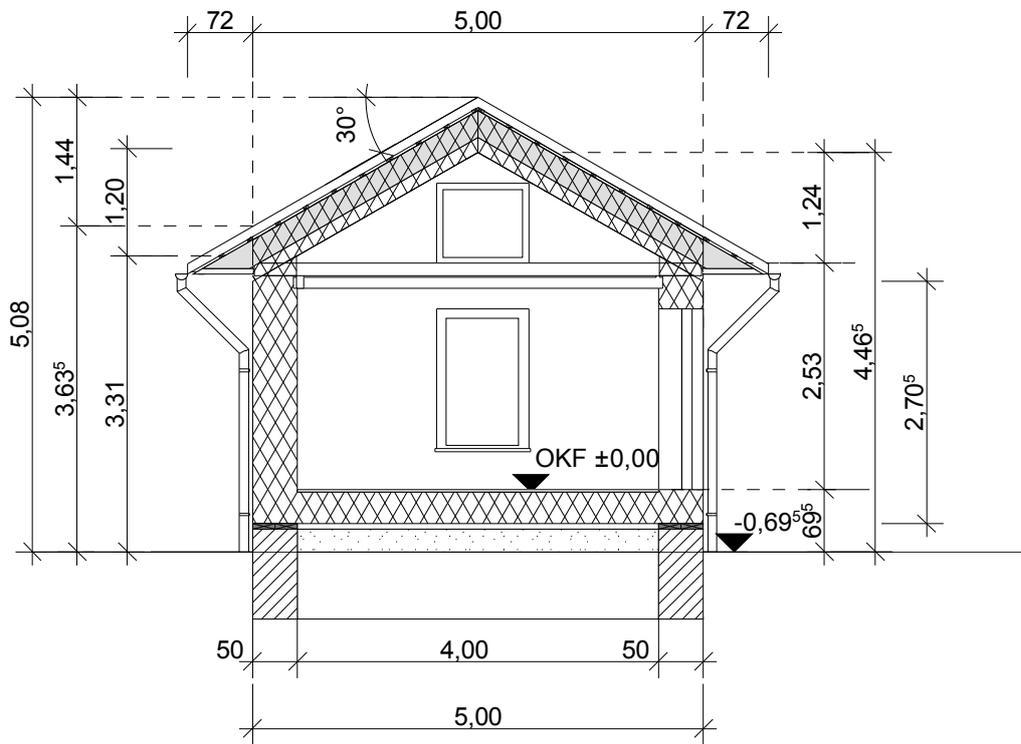
Die verwendeten Ballen haben Abmessungen von $b \times h \times l = 45 \times 35 \times 85-100$ cm und eine Rohdichte von ca. 100 kg/m^3 . Sie werden vor dem Dachaufbau mittels Spanngurte leicht vorgespannt. Im weiteren sind sie miteinander mittels Holzspieße verbunden (vgl. Baubeschreibung).

Der Nachweis der Standsicherheit der Strohballen-Wände wird auf der Grundlage von:
an der HS-Magdeburg (FH) durchgeführten Versuche an Strohballen (Kap. 5)
an der Universität Kassel durchgeführten Versuche an Strohballen (Kap. 5)
und in Anlehnung an die Californian Building Bode (CBC) (Kap. 4)
im Kapitel 6 geführt.

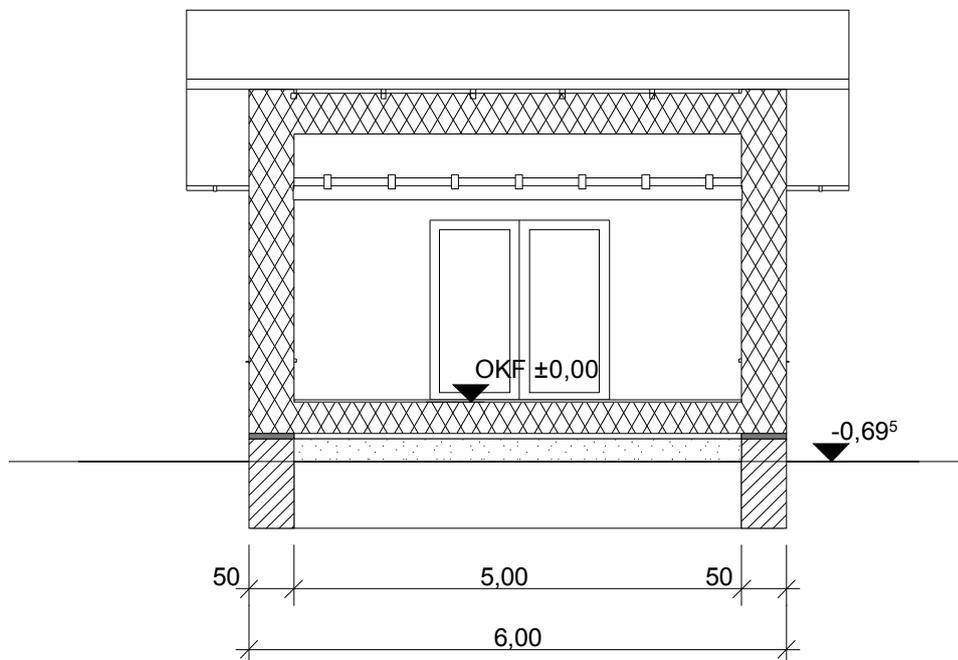
1.2 Normen und Vorschriften

DIN 1055–3	Einwirkungen auf Tragwerke, Eigen und Nutzlasten für Hochbauten 2006-3
DIN 1055–4	Einwirkungen auf Tragwerke, Windlasten, 2006-3
DIN 1055–5	Einwirkungen auf Tragwerke, Schnee- und Eislasten, 2005-6
DIN 1053-1	Mauerwerk, Ausführung und Bemessung
CBC	California Building Code, Appendix L: Strow Bale Construction 4/26/06, Entwurf (Kapitel 4.1)
Z-23.11-1595	Zulassungsbescheid
P-3154/4694-MPA BS	Prüfzeugnis MPA Braunschweig

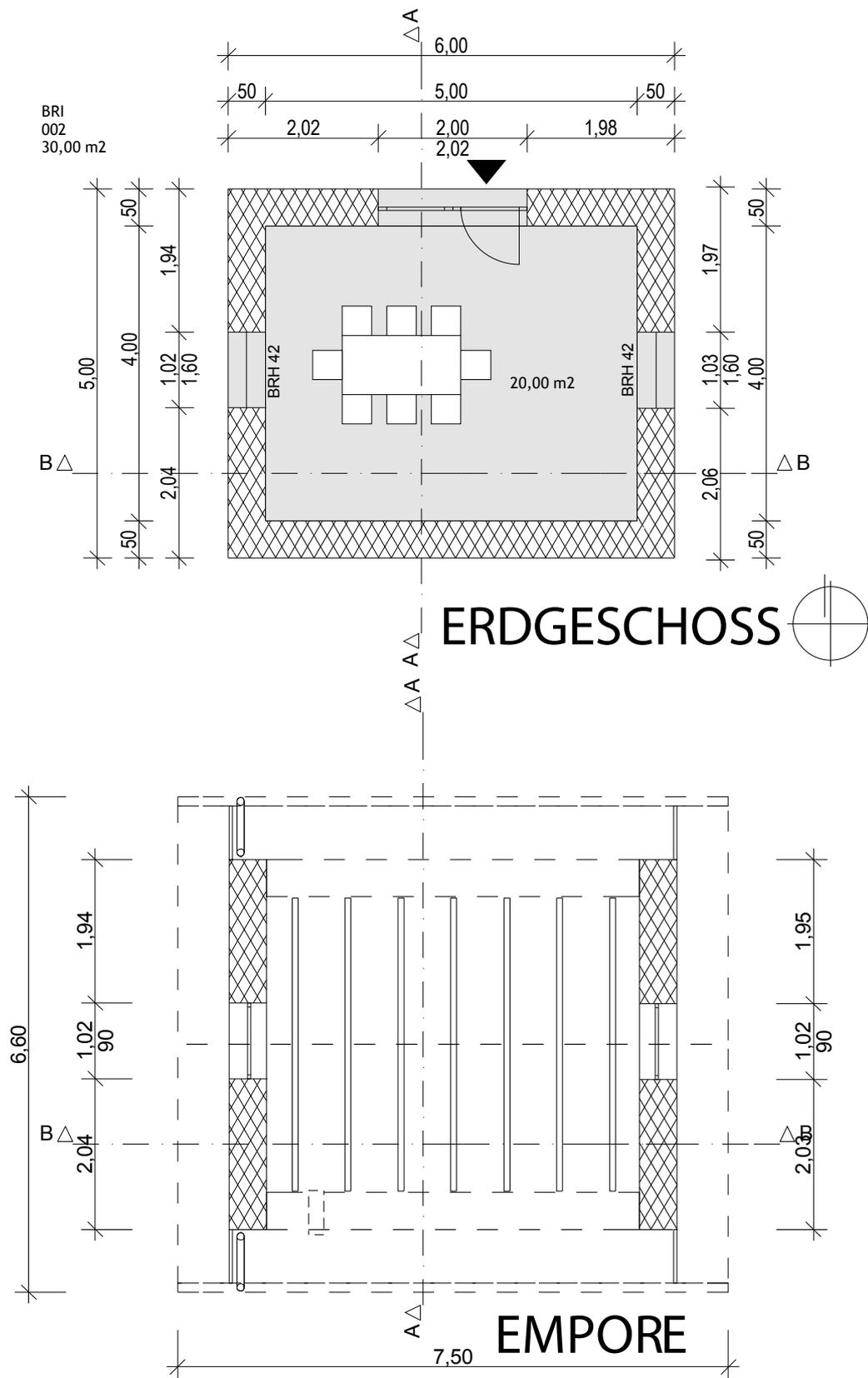
1.3 Gebäudeskizzen



SCHNITT A-A



SCHNITT B-B



2 Einwirkungen auf die Wände

2.1 Dachlasten

Eindeckung Betondachsteine Längsfalz hoch $g = 0,55 \text{ kN/m}^2$		
$A = 7,5\text{m} \times 6,6 \text{ m} \times 1/\cos 30^\circ = 57 \text{ m}^2$		
$G = 0,55 \times 57 = 31,2 \text{ kN}$		<u>31,2 kN</u>
	Dachdeckung	31,2 kN
Sparren mit Holzstegen $d = 4 \text{ cm}$, 35 cm hoch, 9 Stück $a 75 \text{ cm}$		
$G = 0,35\text{m} \times 6,6\text{m} \times 1/\cos 30^\circ \times 0,04 \text{ cm} \times 6 \text{ kN/m}^3 =$		5,8 kN
Verkleidung unten 16 mm Holzschalung		
$G = 4\text{m} \times 1 / \cos 30^\circ \times 0,016\text{m} \times 5\text{m} \times 6 \text{ kN/m}^3 =$		2,2 kN
Dachlatten		
$G = 2 \times 12 \text{ St} \times 0,04 \times 0,06 \times 7,5 \text{ m} \times 6 \text{ kN/m}^3 =$		2,6 kN
Rähm aus Bohlen $4/24 \text{ cm}$ und $45/4 \text{ cm}$ umlaufend		
$G = (0,24\text{m} + 0,45 \text{ m} + 0,24) \times 0,04\text{m} \times 2(5,5+4,5) \times 6 \text{ kN/m}^3 =$		4,5 kN
Stroh in Dachschrägen $h = 35 \text{ cm}$		
Die Rohdichte Stroh beträgt 100 kg/m^3		
$G = 5\text{m} \times 6 \text{ m} \times 1/\cos 30^\circ \times 0,35\text{m} \times 1 \text{ kN/m}^3 =$		<u>12,1 kN</u>
	Holz	27,2 kN
Giebel (Verputzt $2 \times 3 \text{ cm}$)		
$2 \times G = 2 \times 5\text{m} \times 1,20\text{m} \times 0,45 \text{ m} \times \frac{1}{2} \times 1 \text{ kN/m}^3 =$		2,7 kN
$2 \times G = 2 \times 2 \times 5\text{m} \times 1,20\text{m} \times \frac{1}{2} \times 0,6 \text{ kN/m}^3 =$		<u>7,2 kN</u>
	2 Giebel	9,9 kN

Schneelast

Schneelastzone II

Dachneigung 30 Grad

$s = 0,68 \text{ kN/m}^2$

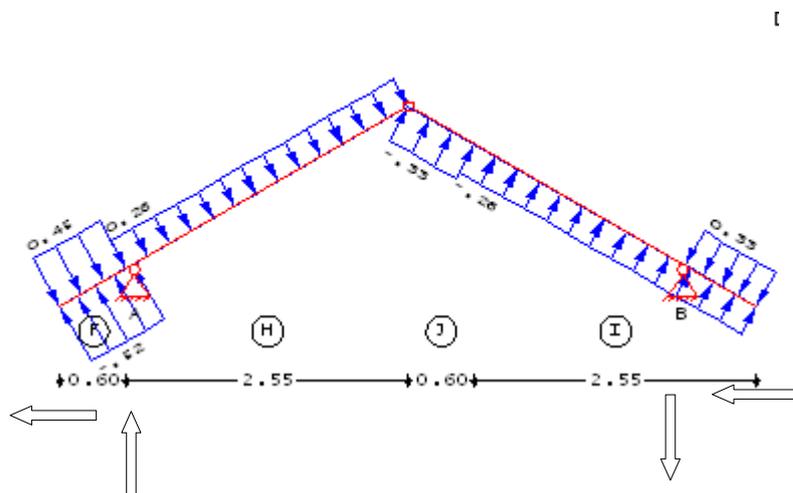
$S = 7,5 \text{ m} \times 6,6 \text{ m} \times 0,68 =$

33,66 kN

Windlast

Zone 2, Binnenland,

Dachneigung 30 Grad



$a_h = 0,38 \text{ kN/m}$

$a_v = 0,13 \text{ kN/m}$

$b_h = 0,33 \text{ kN/m}$

$b_v = 0,18 \text{ kN/m}$

$\max V_{\text{Wind}} = 0,38 \times 7,5 =$

bzw. „0“ auf das Gebäude

2,85 kN / Wand

$\max H_{\text{Wind}} = (0,13 + 0,18) \times 7,5 =$

2,36 kN

2.2 Wandlasten

Giebel EG wurde bereits bei der Dachlast berücksichtigt.

Wandeigengewicht

unverputzt

$$G = 0,45\text{m} \times 2,7\text{ m} \times 1,0\text{ kN/m}^2 = 1,21\text{ kN/m}$$

Putz ca. 3-4 cm beidseitig

$$G = 0,6\text{ kN/m}^2 \times 2 \times 2,7\text{ m} = \underline{3,24\text{ kN/m}}$$

$$\text{Summe} \quad \underline{\underline{4,45\text{ kN/m}}}$$

Windlast

Winddruck je m² Wand

$$w = 0,5 \times 0,8 = 0,4\text{ kN/m}^2 \text{ Wandfläche} \quad \underline{\underline{0,4\text{ kN/m}^2}}$$

Windlast auf senkrechte Wände (Sog und Druck)

$$W1 = 0,5 \times (0,5 + 0,8) \times 2,7\text{m} \times 6\text{m} = 10,53\text{ kN}$$

Windlast an der Wandkrone (Sog und Druck, für aussteifende Wände)

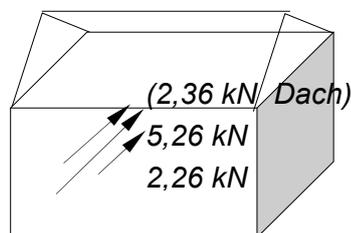
$$Wk = 0,5 \times 10,53 = \underline{\underline{5,26\text{ kN}}}$$

Schiefstellung

Es wird von einer Schiefstellung von 1:50 ausgegangen.

Ersatzkraft für Schiefstellung

$$H = \frac{(31,2 + 27,2 + 9,9) / 50 + ((6 + 6 + 4 + 4 + 2) \times 4,45\text{ kN/m}) / 50/2}{2} = \underline{\underline{2,26\text{ kN}}}$$



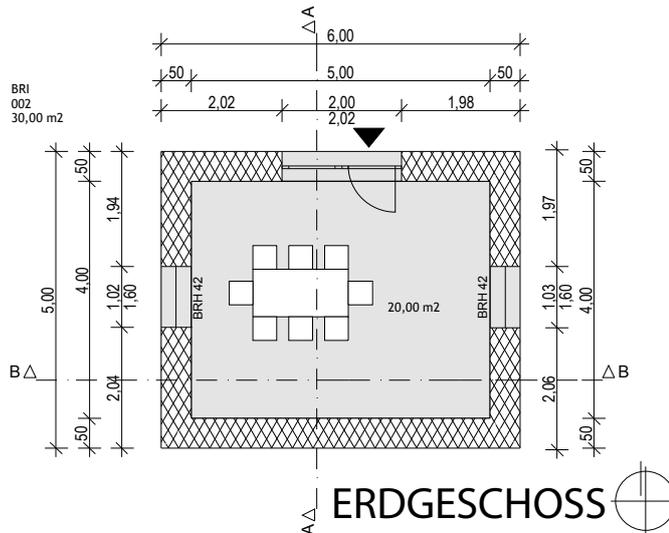
$$\text{Summe } H = 9,88$$

3 Beanspruchung der Wände

Die Strohballenwände werden auf Druck, Schub und geringfügig auf Biegung (infolge Windlast) beansprucht. Nachstehend werden die maximalen Beanspruchungen der Wände ermittelt.

3.1 Druckbeanspruchung

Die am stärksten druckbeanspruchte Wand ist die Südwand



Belastung	Dachdeckung	$31,2 \times 0,5 =$	15,6 kN
	Holzbauteile	$27,2 \times 0,5 =$	13,6 kN
	Schneelast	$33,66 \times 0,5 =$	<u>16,8 kN</u>
	Summe		46,0 kN

Linienlast am Wandkopf	$46,0 / 4m =$	11,5 kN/m
Linienlast am Wandfuß	$11,5 + 4,45 =$	16 kN/m

Druckspannungen, ermittelt ohne tragende Mitwirkung des Putzes:

Druckspannung am Wandkopf	$11,5 / 0,45 =$	25,5 kN/m²
Druckspannung am Wandfuß	$16 / 0,45 =$	35,6 kN/m²

3.2 Schubbeanspruchung

Die größte Schubbeanspruchung entsteht in der Ost- bzw. Westwand

$$\text{H-Last aus Wind und Schiefstellung } H = 9,88\text{kN}/2 = 5,0 \text{ kN}$$

Aufteilung auf die Wandabschnitte entsprechend ihren Längen

$$H_{2,55\text{m}} = 5 \times 2,55 / (2,55 + 1,42) = 3,2 \text{ kN}$$

$$H_{1,42\text{m}} = 1,8 \text{ kN}$$

Linien-Schubkraft

$$h = 5 / (2,55 + 1,42) = 1,26 \text{ kN/m} = 1,3 \text{ kN/m}$$

Schubslankheit

$$\lambda_{2,55} = 2,7 / 2,55 \cong 1,1$$

$$\lambda_{1,42} = 2,7 / 1,42 \cong 1,9$$

Schubspannung

$$\tau_{2,55} = 3,2 / (0,45 \times 2,55) = 2,78 \text{ kN/m}^2$$

$$\tau_{1,42} = 1,5 \times 1,8 / (0,45 \times 1,42) = 4,22 \text{ kN/m}^2$$

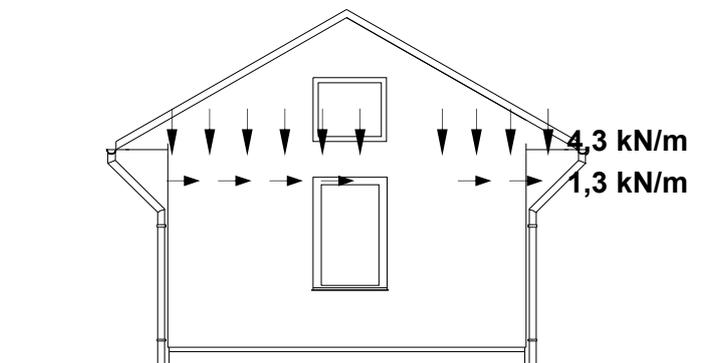
Zugehörige Druckkraft / Druckspannung der Ostwand

Der Ostwand wird durch den Giebel sowie 1/8 des Dachgewichtes belastet. (9 Sparren, wobei der jeweils letzte bündig mit Wandaußenseite abschließt)

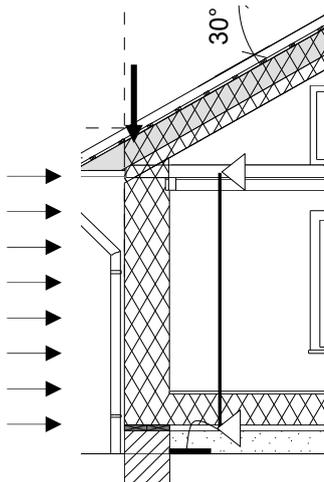
$$\text{Dach/Giebel } N = 1/8 \times (31,2 + 27,2) + 9,92 = 17,2 \text{ kN}$$

$$\text{Wandkopf } n = 17,2 / (1,42 + 2,25) = 4,3 \text{ kN/m}$$

$$\text{Wandfuß } n = 4,33 + 4,45 = 8,8 \text{ kN/m}$$



3.3 Biegung senkrecht zur Wandebene



Schlankheit der Wand $\lambda < 2,7/0,45 = 6,06$ (unverputzt)
 $\lambda < 2,7/0,50 = 5,40$ (verputzt)

Winddruck $q = 0,4 \text{ kN/m}^2$
 Biegemoment $M = 0,4 \times 2,7^2/8 = 0,4 \text{ kNm/m}$
 Normalkraft in Wandm $2,7 \text{ m}$ $N_{\min} = 4,45 \times 2,7/2 + 4,3 = 10,30 \text{ kN/m}$

Ausmitte in Wandmitte $e = 0,4/10,3 = 0,039 = 45\text{cm}/12,8 = d/13$
 Klaffende Fuge stellt sich nicht ein, (auch nicht unter alleiniger Wirkung des Wandeigengewichts).

Maximale **Druckspannung in Wandmitte** (Querschnittsrand außen):
 $\text{Max } \sigma = \frac{1}{2} \times (25,5 + 35,6) + 6 \times 0,4/0,45^2 = 30,6 + 11,9 = \mathbf{42,5 \text{ kN/m}^2}$
 (unter G, Wind und Schnee), (entspricht einer Linienlast von $42,5 \times 0,45 = 19,1 \text{ kN/m}$)

4 Festlegungen des „California Building Code“

Nachstehend werden die für das Bauvorhaben relevante Ausschnitte aus der Kalifornischen Bemessungsnorm (Normentwurf):

„California Building Code“ (CBC) Appendix L: Straw Bale Construction 4/26/06, zitiert

4.1 Anforderungen an Strohballen

Section L 103 Strohballen

L 103.3 Bindegarn

Ballen sollen mit PE-Garnen gebunden sein **erfüllt**

L103.5 Rohdichte

Die Rohdichte der Ballen soll den Wert 92 kg/m^3 nicht unterschreiten. **erfüllt**

4.2 Anwendbarkeitsgrenzen

Section L105 Structure

L 105.5 Wandhöhe (Schlankheit)

Wandschlankheit der Lasttragenden und nicht Lasttragenden Wänden ist auf das Verhältnis $h / d = 6$ zu begrenzen. Eine höhere Schlankheit ist nur dann zulässig, wenn vom Tragwerksplaner dann eine ausreichende Sicherheit gegen das Beulen aus der Wandebene nachgewiesen wird. **erfüllt**

L 105.6 Anordnung der Strohballen

Bei Strohballenwänden mit unbewehrtem Putz sollen die Ballen so angeordnet werden, dass die Bindegarne sie in der vertikalen Ebene umschließen. **erfüllt**

L 105.7 Vorspannung der Wände

L 105.7.1 Eine Vorspannung der Wände ist nicht erforderlich:

a) für nicht tragende Wände

b) für aussteifende Wände ohne Vertikallasten

c) für Wände, die vertikale Lasten des Daches aufnehmen, wenn die gesamte ständige Dachlast mindestens 28 Tage vor dem Aufbringen des Putzes eingeleitet wird. Die Norm-Schneelast soll 80 kg/m^2 nicht überschreiten. Die Einleitung von vertikalen Deckenlasten ist ohne Vorspannung der Wände nicht zulässig. **erfüllt**

L 105.7.2 Vorspannung der Wände

Alle Wände, die vertikale Lasten aufnehmen (außer Wänden nach L 105.7.1) müssen für die Höhe der erwarteten Gebrauchslasten vorgespannt werden. **nicht erfüllt**

L105.9 Putz

L105.9.1 Grundsätzlichen

Die zulässigen Putzarten sind in Tabelle L105-A genannt. (darunter auch Lehmputz).

Gipsputze sind nicht zulässig.

erfüllt

Die zulässige Belastung der lehmverputzten Wände mit unbewehrtem Putz richtet sich nach Tabelle L105-A für Vertikallasten und nach Tabelle L105-B für Schubkräfte

Wände mit beidseitigem unbewehrter Lehmputz (A)

zulässige Vertikalkraft $v = 300 \text{ Pfund/Fuß} = 4,2 \text{ kN/m Wand}$ **nicht erfüllt**

zulässige Horizontalkraft $h = 100 \text{ Pfund/Fuß} = 1,2 \text{ kN/m Wand}$ **nicht erfüllt**

L105.9.2 Die Zulässigen Unebenheiten der Wände sind wie folgt begrenzt:

- a) innerhalb einer Geraden von 610 mm soll die Unebenheit der Oberfläche einer nicht verputzten Strohballenwand den Wert von 19 mm nicht überschreiten
- b) innerhalb einer Geraden von 2438 mm soll die Unebenheit der Oberfläche einer verputzten Strohballenwand den Wert von 64 mm nicht überschreiten
- c) der Versatz der Oberflächen zweier grenzenden Ballen soll 19 mm nicht überschreiten.

erfüllt

5 Elastomechanischen Eigenschaften der Strohballen

Zur elastomechanischen Eigenschaften der Strohballen liegen zwei verwertbare experimentelle Untersuchungsergebnisse vor.

1. Versuche an der Hochschule Magdeburg-Stendal in Magdeburg FB Bauwesen Großballen $b \times h \times l = 85 \times 48 \times 185 \text{ cm}$, Gerste mit Rohdichte von 123 kg/m^3
2. Versuche an der Universität Kassel - Zentrum für umweltbewusstes Bauen (**ZUB**) Kleinballen $b \times h \times l = 85 \times 48 \times 185 \text{ cm}$, Weizen der Rohdichte 80 und 130 kg/m^3

Beide Versuchsreihen wurden im Rahmen des von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Forschungsvorhabens

„Grundlagen zur bauaufsichtlichen Anerkennung der Strohballenbauweise- Weiterentwicklung der lasttragenden Konstruktionsart und Optimierung der bauphysikalischen Performance“

durchgeführt.

Im Rahmen der Forschungsvorhaben wurden zahlreiche Versuche an Klein- und Großballen durchgeführt. Die für das hier behandelte Gebäude relevanten Ergebnisse werden nachstehend wiedergegeben.

5.1 Druckfestigkeit der Strohballen und Druckversagen

Das Druckverhalten von Strohballen wurde in beiden Versuchsreihen an mehreren Proben untersucht. Es zeigte sich, dass das Verhalten vor allem Rohdichteabhängig ist. Die Strohart spielt hierbei eine untergeordnete Rolle.

Die Ballen wurden in den Versuchen bis zu einer Stauchung von 50 % belastet. Hierbei wurden bei niedrigen Rohdichten (um 80 kg/m^3) Spannungen von 200 kN/m^2 erreicht, bei größeren Rohdichten Spannungen von bis zur 800 kN/m^2 . Dieser Spannungs- und Stauchungsbereich ist zwar nicht praxisrelevant, belegt jedoch das sehr duktile Druckverhalten der Strohballen. Ähnlich wichtig ist die Erkenntnis, dass die Erntegarne aus Polyethylen, mit denen die Strohballen gebunden werden, in keinem einzigen Versuch versagten. Alle Versuche wurden ohne das Erreichen eines Versagens der Ballen (nach Erreichen der Grenzdehnung) abgebrochen.

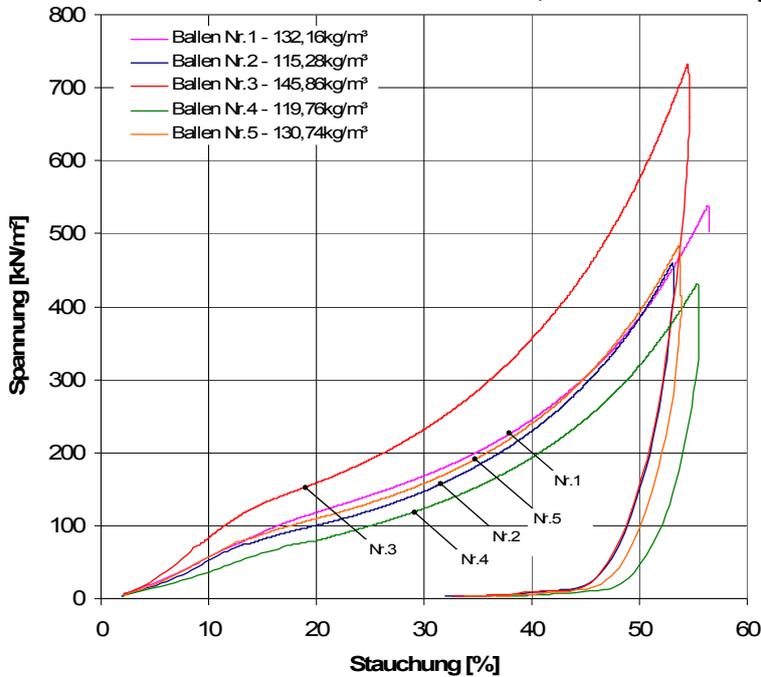
Im weiteren wurden in beiden Versuchsreihen Druckversuche an unverputzten Strohballenwänden durchgeführt. Darüber hinaus wurden in Magdeburg Schubversuche an unverputzten Wänden sowie Druck und Schubversuche an beidseitig Lehmverputzten Wänden durchgeführt. Die Versuchsergebnisse können den Folgeseiten entnommen werden. Die Wandgeometrie ist bei den einzelnen Ergebnissen angegeben.

5.1.1 Druckversuche an der Hochschule Magdeburg-Stendal (FH)

Druckversuche an Einzelballen

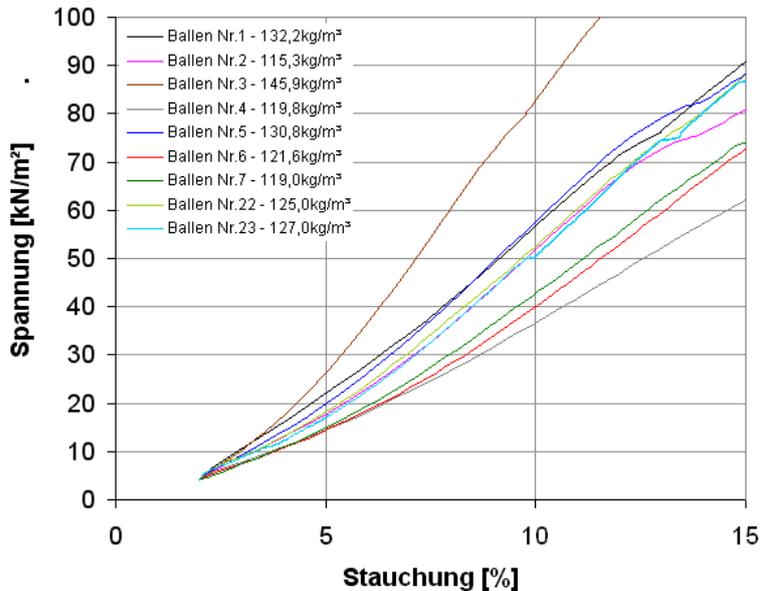
Spannungs-Dehnungs-Beziehung für Strohballen

Großballen b/h/l = 80/48/180cm, Hochschule Magdeburg-Stendal (FH)



Spannungs-Dehnungs-Beziehung für Strohballen $\epsilon < 15\%$

Großballen b/h/l = 80/48/180cm, Hochschule Magdeburg-Stendal (FH)



Druckversuche an unverputzten und verputzten Strohballenwänden - Magdeburg

Die Magdeburger Untersuchungen wurden an vorgespannten Strohballenwänden durchgeführt. Die Vorspannung wurde mit Hilfe von jeweils 4 Spannstahlstäben mit einem Durchmesser von 12 mm eingeleitet. Diese Stäbe wurden im Wandquerschnitt angeordnet (Abstand zur Wandoberfläche betrug ca. 20 cm). Die Vorspannung führte bei der Wand 1 zu einer Stauchung von 23 % bei der Wand 2 von 16 %. Die Wandabmessungen betragen:

Wand 1 b/l/h = 87 cm/ 190 cm / 250 cm (ohne Holzbauteile) Dichte 130 kg/m³

Wand 2 b/l/h = 87 cm/ 190 cm / 271 cm (ohne Holzbauteile) Dichte 126 kg/m³

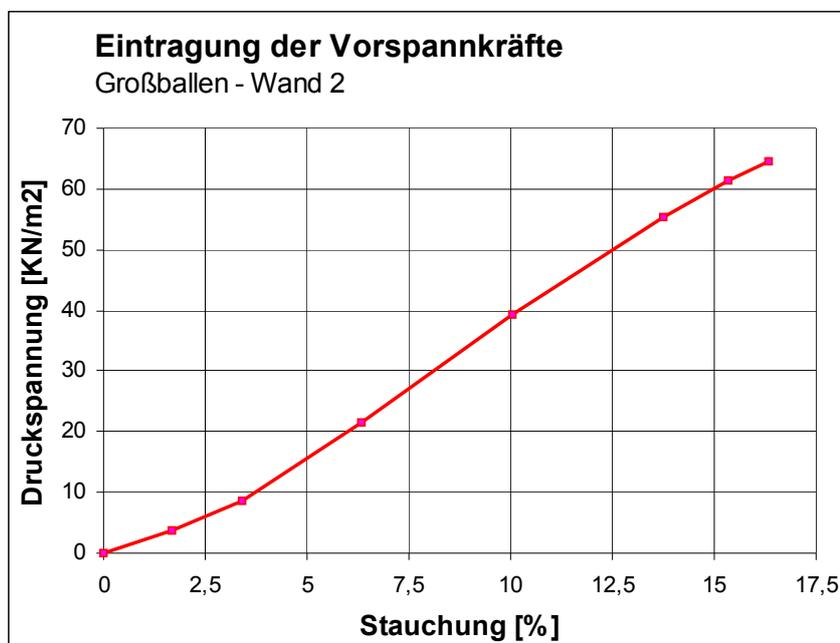
Schlankheit nach Vorspannung: $\lambda_1 = 326/85 = 3,8$ $\lambda_2 = 271/87 = 3,1$

Schlankheit vor Vorspannung $\lambda_1 = 325/85 = 3,8$ $\lambda_2 = 321/85 = 3,8$

Die Druckversuche an vorgespannten Wänden eignen sich nur bedingt zur Beurteilung des Tragverhaltens der nicht vorgespannten Wände, wie sie im untersuchten Gebäude eingesetzt werden. Aussagekräftiger sind die während des Vorspannens der Wände gemachten Erfahrungen. Auf dieser Grundlage kann festgestellt werden, dass:

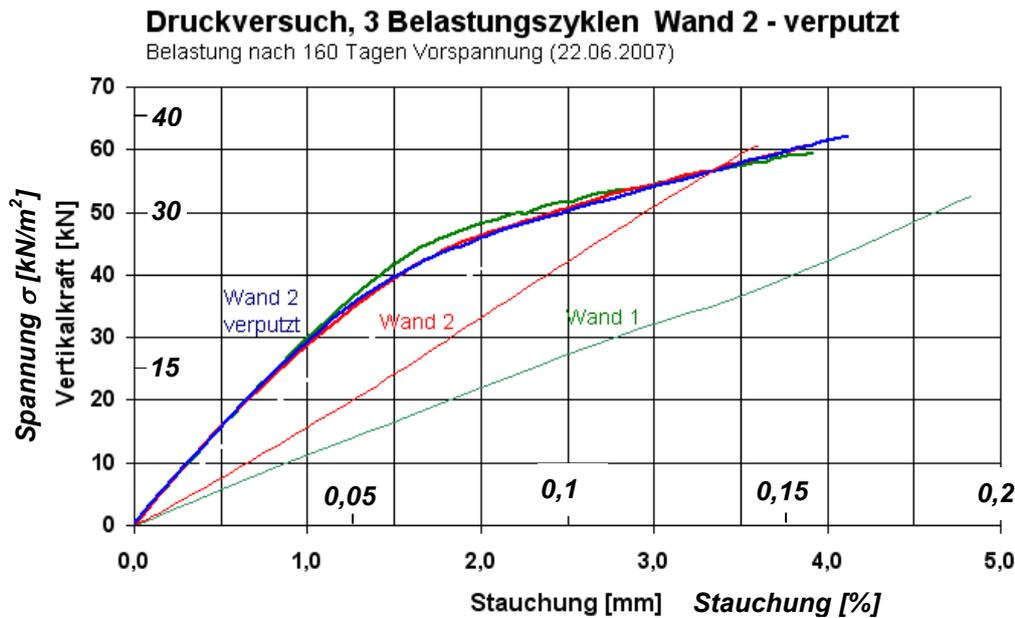
- die Einleitung von Druckspannungen über 80 kN/m² möglich ist
- unter Lasten, die zu einer Stauchung von mehr als 10 % kann die Inhomogenität des Baustoffes Strohballen zur Verformungen aus der Wandebene führen. Diese Verformung kann durch entsprechendes Vorspannen weitestgehend korrigiert werden.

Das nachstehende Bild zeigt das Verhalten der Wand 2 während der Einleitung einer Vorspannkraft von 110 kN.

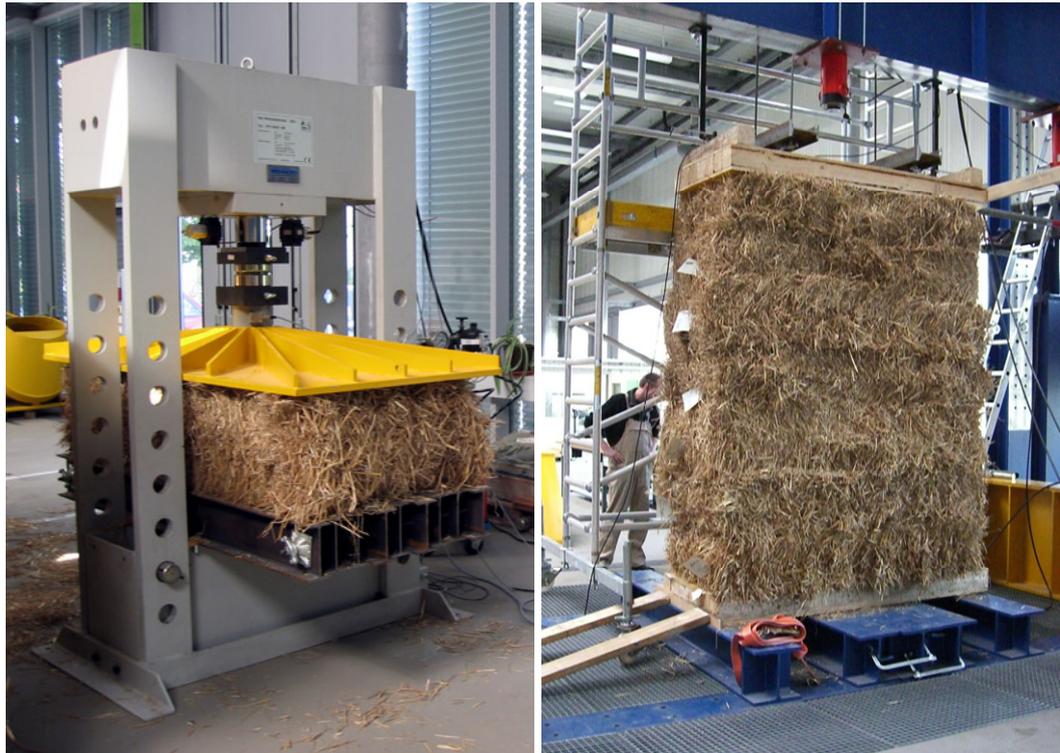


Arbeitslinie der Strohballenwand – Eintragung der Vorspannkraft von 110 kN

Nach Abschluss der relaxationsbedingten Verluste der Vorspannkraft, wurde die Wände erneut Druckbelastet. Die Linie „Wand 1“ und „Wand 2“ des nachfolgenden Bildes zeigt das Druckverhalten der Wand bei Belastung unterhalb der Vorspannkraft. Die Linie „Wand 2 verputzt“ zeigt die Wand 2 unter einer Druckbelastung, die über die Vorspannung hinaus reicht. Die versteifende Wirkung des Putzes ist zu erkennen. Die Wände wiesen (nach der Vorspannung) folgende Abmessungen auf:



Das obige Bild zeigt einen Ausschnitt des gesamten gemessenen Druckbereiches der Wände. Die unverputzte Wand 1 wurde bis zur einer Spannung von 85 kN/m² belastet, die unverputzte Wand 2 bis 45 kN/m². Die Tragreserven der Wände wurden nicht ausgeschöpft.



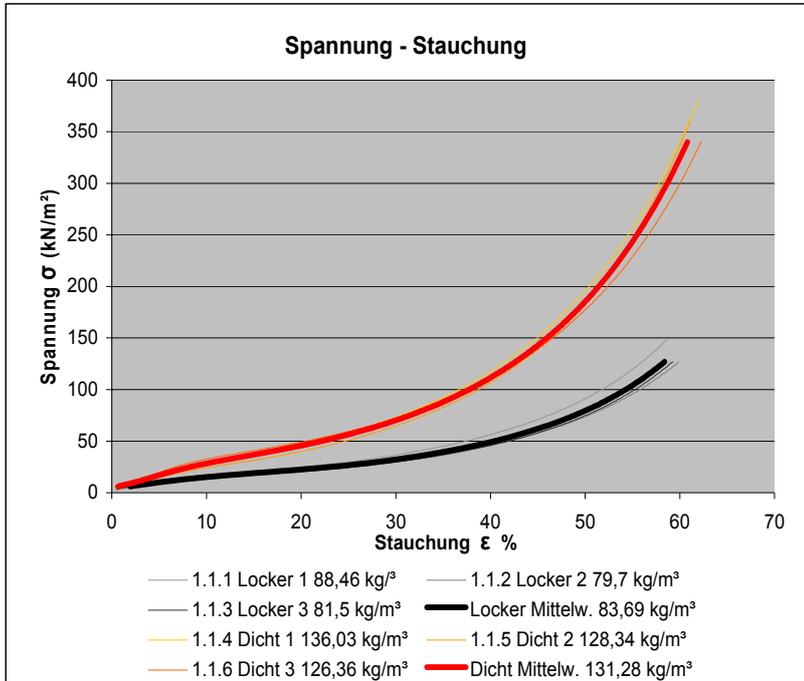
Druckversuche an Einzelballen (links) und Strohballenwänden (rechts)



Versuchstand für Druck- und Schubversuche an verputzten Strohballenwänden

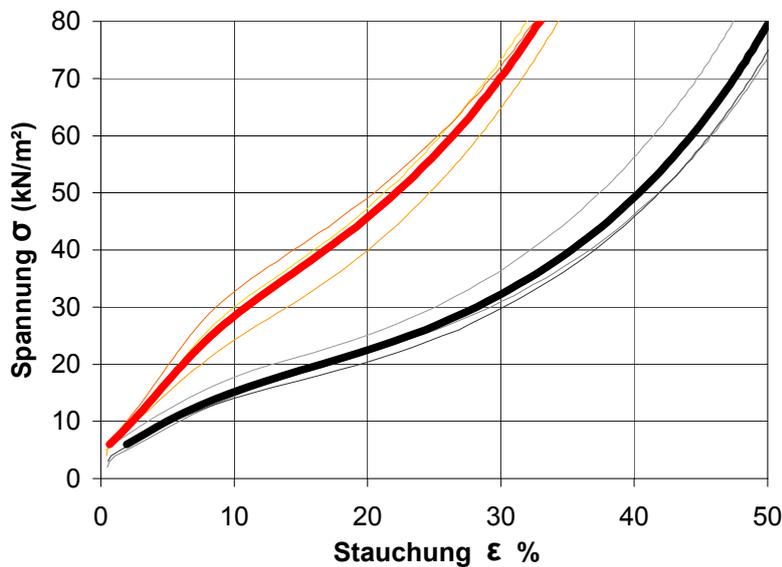
5.1.2 Druckversuche an Kleinballen im ZUB an der Universität Kassel.

Im Zentrum für umweltbewusstes Bauen der Universität Kassel wurden Belastungsversuche an Kleinballen durchgeführt. Einige repräsentative Ergebnisse sind nachstehend dargestellt.



Spannungs-Dehnungs-Beziehung für Einzel-Strohballen

Mittelwerte aus jeweils 3 Versuchen, Kleinballen b/h/l = 45/37/80cm



Spannungs-Dehnungs-Beziehung für Strohballen (Ausschnitt)

Mittelwerte aus jeweils 3 Versuchen

Druckversuche an Strohballenwänden aus Kleinballen – ZUB, Universität Kassel

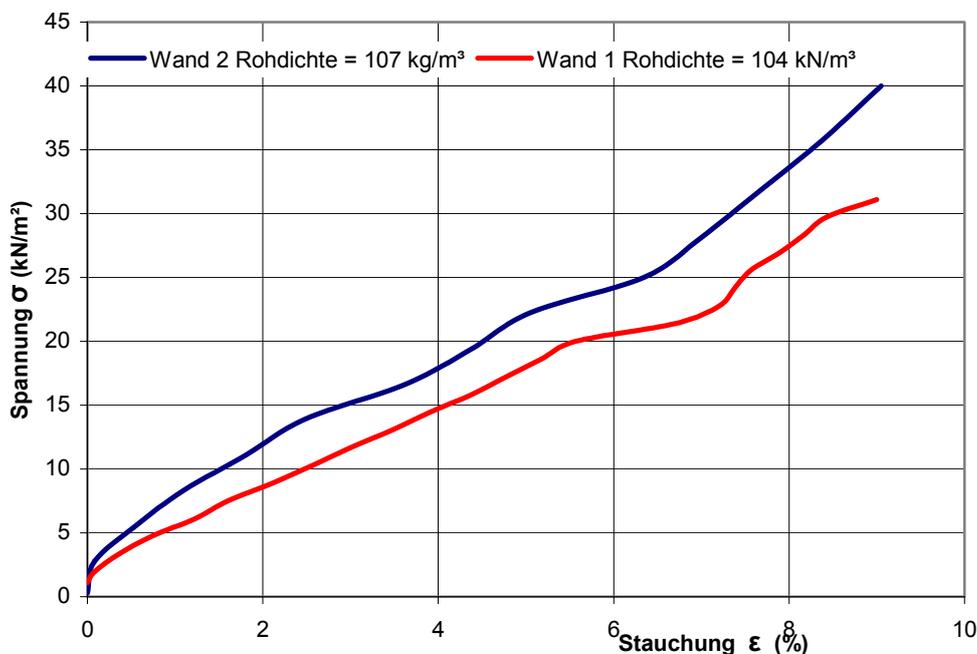
Nach Abschluss der Versuche an Einzelballen wurden in Kassel zwei Strohballenwände auf Druck belastet. Die Wände wiesen folgende Abmessungen auf.

B/h 45 cm / 300 cm / 300 cm Schlankheit $\lambda_1 = 300/45 = 6,7$

Die Wände wurden in einer seitlichen, U-förmigen Führung hergestellt und dann belastet. In jede zweite horizontale Fuge wurde eine Holzbohle eingelegt. Durch die Bohrungen in der Holzbohle wurden vertikale Holzstifte, 2 je Strohballen, mit einer Länge von 60 bis 100 cm in die Ballen eingeschlagen. Diese „Vernagelung“, zusammen mit den Holzbohlen lieferte eine Aussteifung, welche die Wand gegen eine horizontale Verschiebungen aus der Wandebene sicherte.

Arbeitslinie der Strohballenwände unter Druck

Wände aus Kleinballen - ZUB UNI Kassel



Bei der Wand 1 gelang es eine Druckspannung von 30 kN/m² aufzubringen, bei der Wand 2 eine Spannung von 40 kN/m². Die erreichten Werte ergeben als Linienlast $v = 13,5$ kN/m und $v = 18$ kN/m .



Belastungseinrichtung für Einzelballenversuche (l) und für Wandversuche (r) ZUB

5.2 Querkrafttragfähigkeit in Wandrichtung- Scheibenschub

Zweck Einschätzung der Eignung der Strohballenwände zur Gebäudeaussteifung wurden an der Hochschule Magdeburg-Stendal Schubversuche an unverputzten und später an verputzten Wänden durchgeführt. Die Wände wurden in ihren Ebenen horizontal am Wandkopf (Rähm) belastet. Während des Querkraftversuches wirkte in den Wänden noch eine Vorspannkraft von: $P_{\text{Wand 1}} = \text{XXX kN}$ und $P_{\text{Wand 2}} = \text{XXX kN}$

Wand 1 b/l/h = 87 cm/ 190 cm / 250 cm (ohne Holzbauteile) Dichte 130 kg/m^3

Wand 2 b/l/h = 87 cm/ 190 cm / 271 cm (ohne Holzbauteile) Dichte 126 kg/m^3

Schubslankheit $\lambda_1 = 250/190 = 1,3$ $\lambda_2 = 270/190 = 1,4$

Die aufgenommenen Kraft-Verschiebung- Relationen sind in nachstehenden Bildern dargestellt.

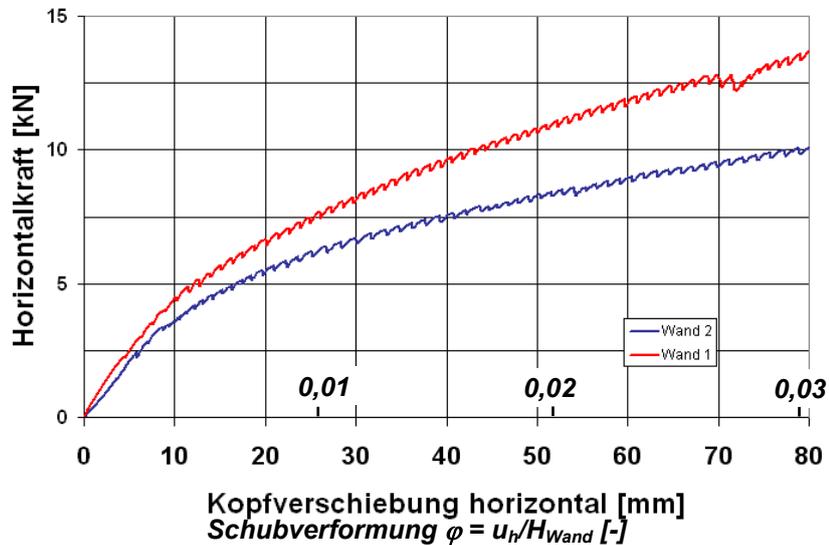
Bei den unverputzten Wänden ist eine näherungsweise bilineare Kraft-Verschiebung - Beziehung mit einem Übergang bei etwa 10 mm Verschiebung zu beobachten. Für den ersten, für die Bemessung relevanten Bereich, lässt sich ein Schubmodul von $G = (H/A) \times \varphi = 4 \text{ kN} \times 1/260 / (1,8 \times 0,85) = 8,5 \text{ kN/m}^2$ und eine Schubspannung von $\tau = 4 \text{ kN} / 1,8 \times 0,85 = 2,6 \text{ kN/m}^2$ angeben.

Der Beitrag der innenliegenden Vorspann-Stahlstäbe ($4 \times d_s = 16 \text{ mm}$) ist nicht getrennt erfasst worden. Deren Wirkung ist jedoch vergleichbar mit der Wirkung der sonst in Strohballenwänden üblicherweise angesetzten Holzspieße /Holznägeln ($l = 80\text{-}100 \text{ cm}$ $d_s = 2 \text{ cm}$).

Schubversuch Wand 1 und 2

unverputzte Wände aus Großballen – HS-Magdeburg

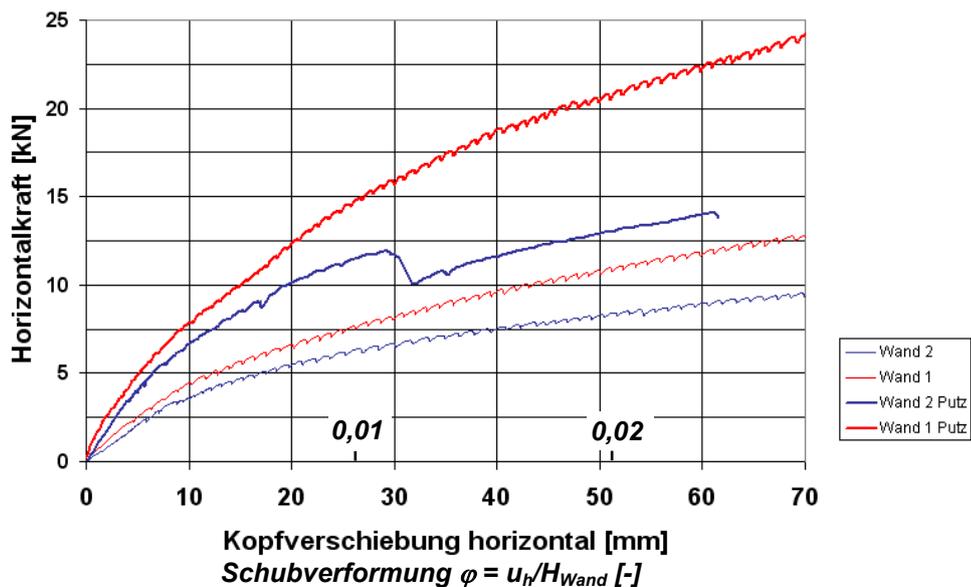
$b/l/h = 87/190/250-270$

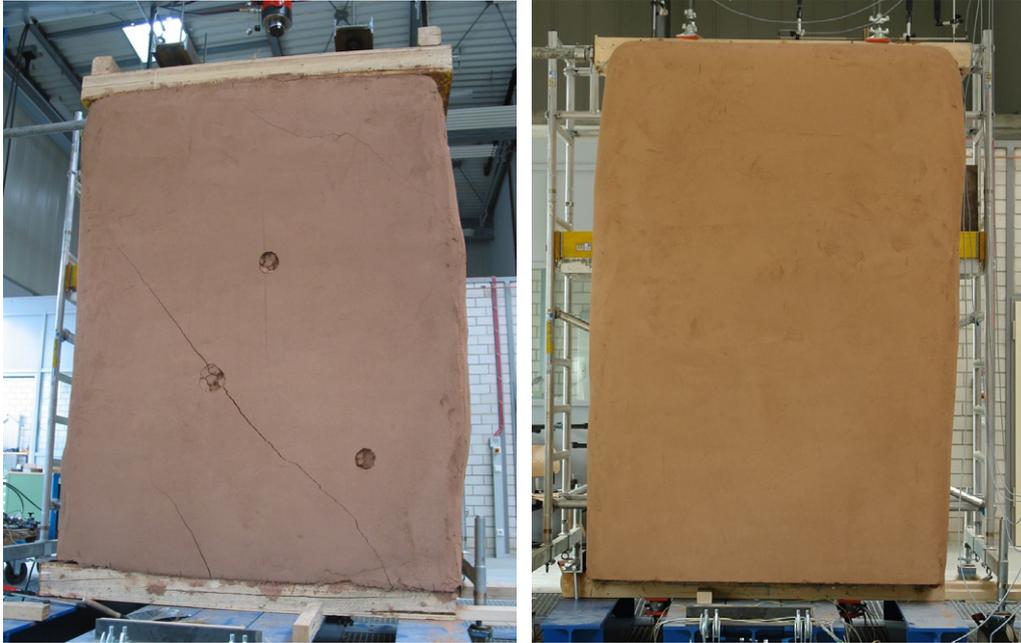


Bei den Schubversuchen an verputzten Wänden wurden die bereits unter Druckbelastung getesteten Wände verwendet. In dem für ein Wohngebäude relevanten Verformungsbereich (Kopfverschiebung bis 10 mm) ist die Traglast der Wand durch die Mitwirkung des Putzes mit einer aufnehmbaren Kraft von $F_H = 7,5$ kN beinahe verdoppelt worden. Es war ein duktiler Verhalten, mit einem typischen Schadensbild bei hohen Schubverformungen zu beobachten.

Schubversuche an verputzten Wänden

$b/l/h = 87/190/250-270$





Wand 2 (l) und Wand 1 (r) nach Schubversuch.

In Wand 1 wurden der Putz nicht richtig beim Lastabtrag aktiviert. Der Putz konnte auf Grund des schmal ausgebildeten Rähms und Schwelle ($b = 40 \text{ cm}$) an diese Holzbauteile nicht richtig angeschlossen werden, es kam zur Ablösung in der Fuge. Trotz des mangelhaft ausgeführten Anschlusses wurde bei beiden Wänden die schon erwähnte Verdoppelung der Schubkraft registriert.

6 Nachweis der Standsicherheit des Gebäudes

6.1 Nachweis gemäß “California Building Code“(CBC)

Die Beurteilung der Tragfähigkeit der Strohballenwände in Anlehnung an die Regelungen der Kalifornischen Norm (Kap. 4) CBC-Appendix L:Strow Bale Construction 4/26/06 hat den Vorteil, dass die in dieser Norm angegebenen zulässigen Spannungen bereits erforderlichen Sicherheiten beinhalten. Der Nachweis ist, ähnlich wie die Nachweise nach den deutschen Normen der alten Generation, über den Vergleich der Gebrauchsspannungen mit den zulässigen Werte zu führen.

Unglücklicherweise beziehen sich die in der CBC angegebenen zulässigen Belastungen auf die Tragfähigkeit der Putzschichten. Das Stroh dient hier lediglich als Putzträger, Abstandhalter und Knickaussteifung der lastabtragenden Putzschichten. Das Stroh / Strohballen wird lasttragend gar nicht berücksichtigt. Dies erklärt auch die Einheiten, in denen die zulässigen Wandlasten angegeben werden: [kN je Meter Wandlänge] und nicht [kN/m² Wandquerschnitt].

Der Standsicherheitsnachweis für das untersuchte Gebäude nach CBC kann auf Grund der Höhe der eingeleiteten Lasten nicht erbracht werden.

Vorhandene Vertikalkraft je m Wandlänge	V_{\max}	= 16 kN/m
Zulässige Vertikalkraft je m Wandlänge	V_{zul}	= 4,2 kN/m
Vorhandene Horizontalkraft je m Wandlänge	h_{\max}	= 1,3 kN/m
Zulässige Horizontalkraft je m Wandlänge	h_{zul}	= 1,2 kN/m

6.2 Nachweis auf der Grundlage der Ergebnisse von Belastungsversuchen

Die in Versuchsergebnissen angegebenen Druck- und Schubfestigkeiten beinhalten keine Sicherheitsreserven. Die Untersuchungen wurden grundsätzlich an unverputzten Ballen durchgeführt. Da die Mitwirkung des Putzes bei Lastabtrag an zahlreiche Bedingungen gekoppelt ist, die nicht untersucht wurden (Bewehrung des Putzes, Abstützung der Putzschalen an Rähm und Schwelle, Verbindung mit den Strohballen e.c.t.) wird dieser bei Lastabtrag nicht angesetzt. Die Untersuchungen an verputzten Ballen dienen der wirklichkeitsnahen Beurteilung der Gebrauchseigenschaften der Strohballenwände.

6.3 Magdeburger Versuche an Großballen

6.3.3 Aufnahme der Vertikallast - Einzelballen:

Untersuchte Druckbelastung	$\max v = 400 \text{ kN/m}^2 \times 0,85 = 340 \text{ kN/m}$
Maximale Wandlast untersuchtes Gebäude	$\text{vorh } v = 16 \text{ kN/m}$
Sicherheit gegen Gebrauchslast	$\gamma = 340/16 = 21$

Fazit: Die Sicherheit gegen Druckversagen der Ballen ist ausreichend.

6.3.4 Aufnahme der Vertikallast Wandelemente:

Einleitung d. Druckbelastung Versuch	$\max v = 65 \text{ kN/m}^2 \times 0,85 = 55 \text{ kN/m}$
Maximale Wandlast untersuchtes Gebäude	$\text{vorh } v = 16 \text{ kN/m}$
Sicherheit gegen Gebrauchslast	$\gamma = 55/16 = 3,43$

Es ist zu berücksichtigen, dass:

- die untersuchte Wandschlankheiten bei $\lambda = 3,5 - 3,8$ lagen, die Schlankheit des untersuchten Gebäudes bei $\lambda = 6$ liegt.
- Vorspannung mittels in Wandquerschnitt liegenden Zugglieder erfolgte, in dem untersuchten Gebäude die Zugglieder an der Wandoberfläche angeordnet werden sollen.

Fazit: Die Magdeburger Wand-Untersuchungen sind für das untersuchte Gebäude nicht verwertbar.

6.3.5 Aufnahme der Horizontallasten aus Wind

Untersuchte H-Last bei 10 mm Kopfverschiebung	
unverputzt 4 kN/1,85	$h = 2,16 \text{ kN/m}$
verputzt 7,5 kN/1,85	$h = 4,05 \text{ kN/m}$
Maximale Wandlast untersuchtes Gebäude	$\text{vorh } h = 1,3 \text{ kN/m}$
Sicherheit gegen Gebrauchslast	$\gamma = 2,16/1,3 = 1,67 \quad \gamma_{\text{Putz}} = 4,05/1,3 = 3,1$

Fazit: Die Schubfestigkeit der unverputzten Wände ist nicht ausreichend,
Zur Aussteifung sind zusätzliche Tragelemente vorzusehen.

6.4 Kasseler Versuche an Kleinballen

6.4.6 Aufnahme der Vertikallast - Einzelballen:

Untersuchte Druckbelastung

interpoliert für $\rho_0 = 100 \text{ kg/m}^3$

$$\max v = 230 \text{ kN/m}^2 \times 0,45 = 104 \text{ kN/m}$$

Maximale Wandlast untersuchtes Gebäude $\text{vorh } v = 16 \text{ kN/m}$

Sicherheit gegen Gebrauchslast $\gamma = 104/16 = 6,5$

Fazit: Die Sicherheit gegen Druckversagen der Ballen ist ausreichend.

6.4.7 Aufnahme der Vertikallast Wandelemente:

Einleitung d. Druckbelastung Versuch

$$\max v = 35 \text{ kN/m}^2 \times 0,45 = 15,7 \text{ kN/m}$$

Maximale Wandlast untersuchtes Gebäude $\text{vorh } v = 16 \text{ kN/m}$

Sicherheit gegen Gebrauchslast $\gamma = 15,7/16 = 1$

Es ist zu berücksichtigen, dass:

- die Lasteinleitung auf Grund von großen Verformungen abgebrochen werden musste.
- während der Lasteinleitung (2. Wand) die Wandkrone horizontal unverschieblich gehalten wurde. Diese Halterung liegt unter realen Bedingungen nicht vor.

Fazit: Eine ausreichende Standsicherheit der Wände unter Vertikalbelastung lässt sich auf der Grundlage der Kasseler Versuche nicht nachweisen.

6.4.8 Aufnahme der Horizontallasten aus Wind

Es sind keine Schubversuche hinreichend dokumentiert.

7 Schlussfolgerung

Die Standsicherheit der Strohballenwände des untersuchten Gebäudes lässt sich auf der Grundlage der heute vorliegenden Kenntnisse nicht nachweisen.

MD. 24.12.2007

Dr. I. Danielewicz

Anhang Projektteil A 3 Lasttragender Haustyp: Beurteilung der Standsicherheit lasttragender Haustyp „Großballen“

1 Berechnungsgrundlagen

1.1 Gebäudebeschreibung

Die nachfolgenden Ausführungen behandeln die Standsicherheitsnachweise eines Mustergebäudes „Lasttragender Haustyp für das DBU Projekt 22430 Strohballenbau“. Es handelt sich hierbei um ein eineinhalb geschossiges Gebäude in Mischbauweise, in der lasttragende Wände aus Strohballen mit einer Holzständerkonstruktion kombiniert werden.

Das Gebäude ist mit einem konventionellen Holz-Sparrendach mit Kehlbalkenlage eingedeckt. Die Dachflächen bilden in ihren Ebenen Scheiben, die an der Traufe auf einem umlaufenden Holzrähm der Wandkrone aufliegen.

Die Außenwände bestehen aus gepressten Stroh-Großballen mit Abmessungen $b \times h \times l = 90 \times 50 \times 200$ cm. Die Strohballen werden übereinander gestapelt und mit Hilfe von innen liegenden Zugstangen aus Stahl (Spannstahl) dauerhaft, zentrisch zu Wandelementen vorgespannt. Die Vorspannkraft wird im Rahmen der Bemessung quantifiziert. Die Wände nehmen nur die Vertikallasten aus dem Holzdach, dem Wind bzw. Schnee, sowie Eigengewicht auf. Sie werden beidseitig mit Lehmputz verputzt. Die Putzschichten sichern lediglich die Dauerhaftigkeit und den Brandschutz der Wände, sie haben keine tragende Funktion.

Die Wände sind auf Steifenfundamenten flach gegründet.

Die Zwischendecke ist als Holzbalkenkonstruktion ausgebildet und liegt auf den Holzständern der Innenwände und auf den Außenwänden auf. Die Deckenbalken sind als Einfeldträger ausgebildet und laufen somit nicht über die gesamte Gebäudebreite durch. Die Holzbalkendecke ist als Deckenscheibe nach DIN 1052 ausgebildet und mit den Außenwänden und Ständer zug- und schubfest verbunden.

Die Aussteifung des Gebäudes erfolgt über die Dach- bzw. Deckenscheibe und Holzständerwerke der Innenwände. Die horizontalen Lasten aus Wind und Schiefstellung belasten die Außenwände in ihren Ebenen nicht, sie werden in beiden Richtungen durch die Holzkonstruktionen aufgenommen.

Die nachstehenden Ausführungen behandeln die Tragfähigkeit der Strohballenwände. Die Holzbauteile werden hier nicht bemessen. Entsprechende Nachweise gem. DIN 1052 müssen gesondert geführt werden.

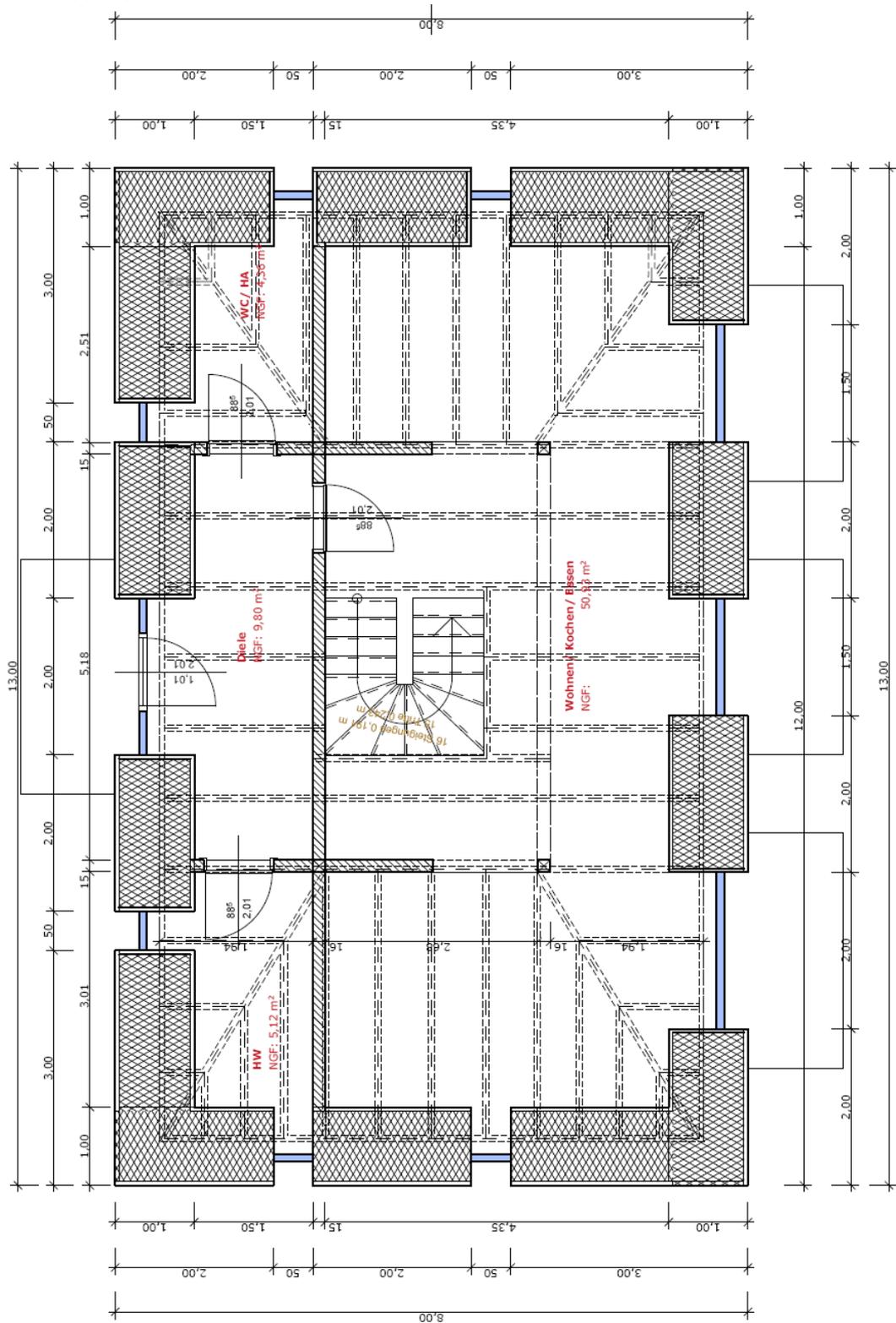
Zur lasttragenden Verwendung von Strohballen gibt es in Deutschland zurzeit keine Technischen Vorschriften. Daher erfolgt die Einschätzung der Standsicherheit der Strohballenwände auf der Grundlage von Belastungsversuchen, die an der Hochschule Magdeburg- Stendal (FH) in den Jahren 2005-2007 im Rahmen eines Forschungsvorhaben durchgeführten wurden. Das Heranziehen der Regelungen des „Californian Building Code [CBC]“ zu Beurteilung der Standsicherheit kann (anders als es ursprünglich geplant wurde) nicht erfolgen, da dort stets Bemessung für einen Verbundquerschnitt; Stroh+ tragende Putzschichten geführt wird.

1.2 Normen und Vorschriften

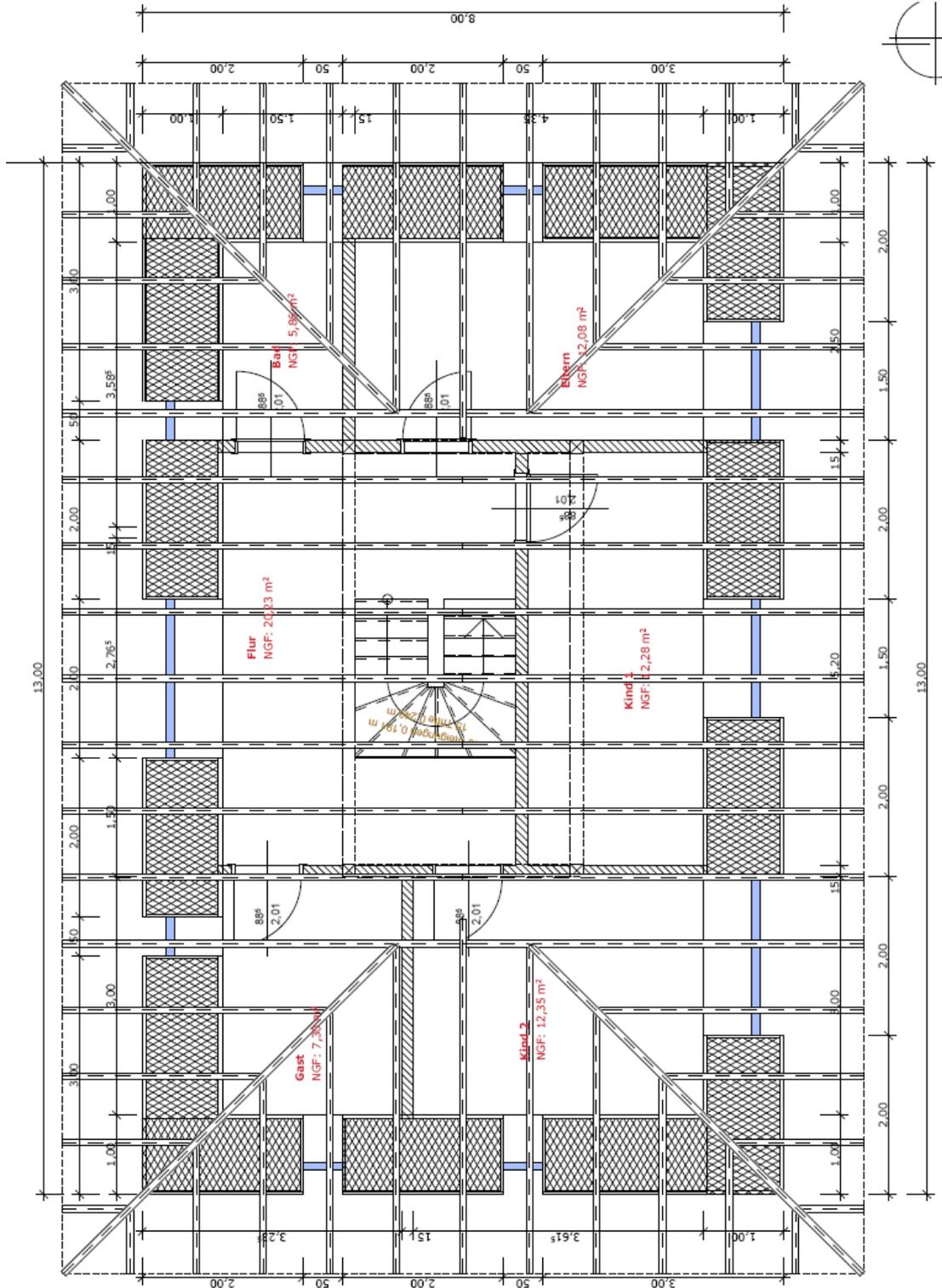
DIN 1055–3	Einwirkungen auf Tragwerke, Eigen und Nutzlasten für Hochbauten 2006-3
DIN 1055–4	Einwirkungen auf Tragwerke, Windlasten, 2006-3
DIN 1055–5	Einwirkungen auf Tragwerke, Schnee- und Eislasten, 2005-6
DIN 1053-1	Mauerwerk, Ausführung und Bemessung
CBC	California Building Code, Appendix L: Straw Bale Construction 4/26/06, Entwurf (Kapitel 4.1)
Z-23.11-1595	Zulassungsbescheid
P-3154/4694-MPA BS	Prüfzeugnis MPA Braunschweig

1.3 Gebäudeskizzen

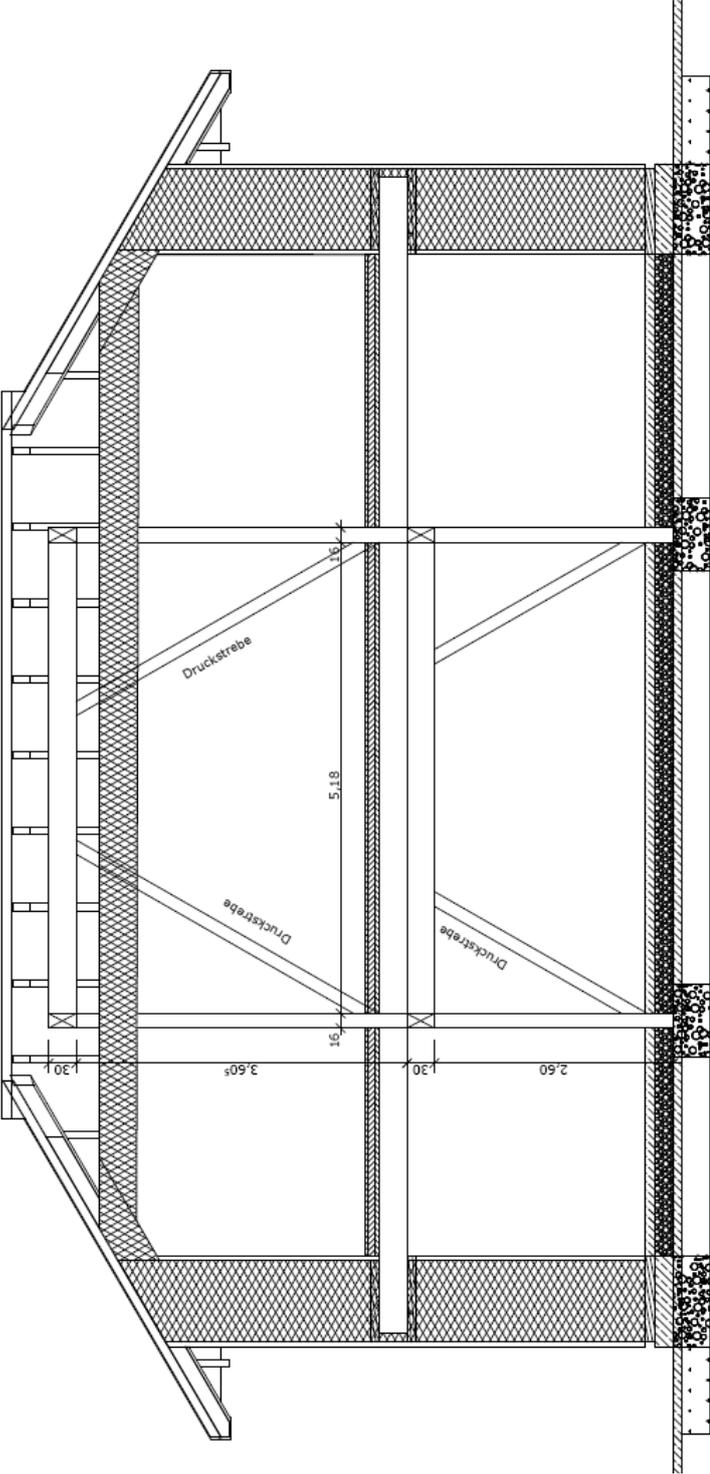
Grundriss EG



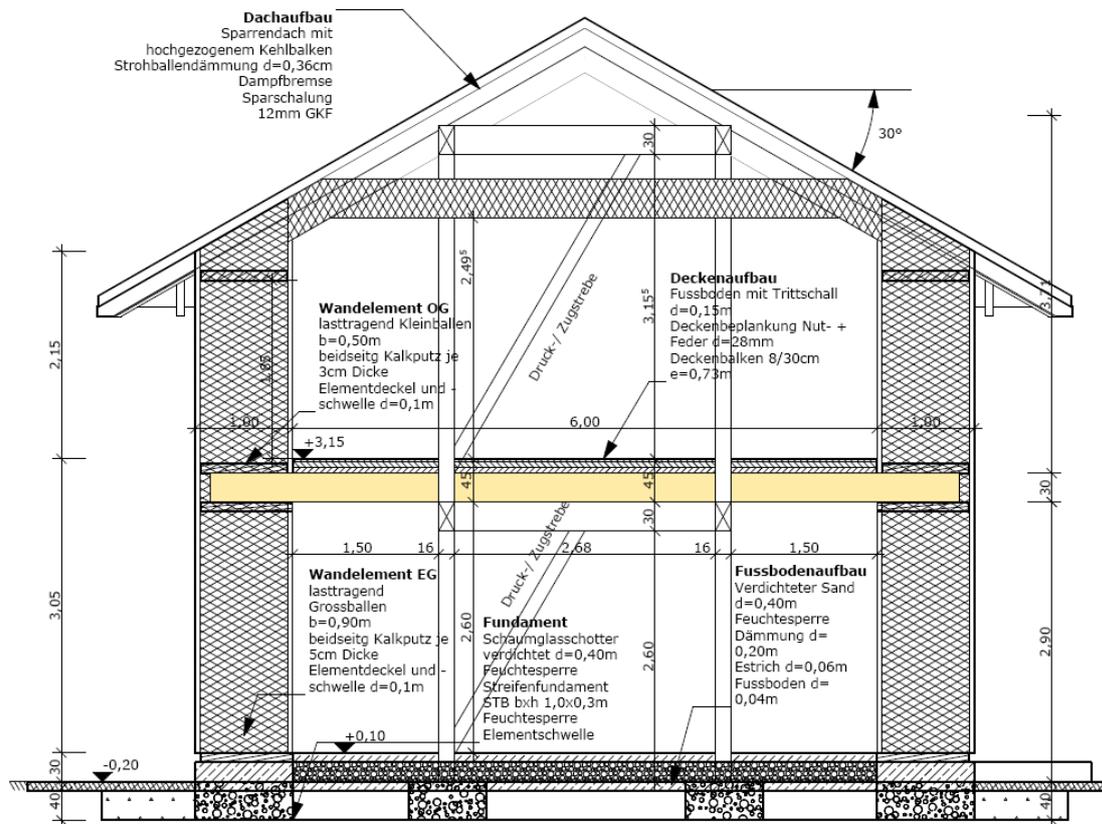
Grundriss OG



Längsschnitt



Querschnitt



Perspektivische Darstellung



2 Einwirkungen auf die Strohballenwände

Ermittlung für lfdm Traufe der Längswand

2.1 Dachlasten

Eindeckung Betondachsteine Längsfalz hoch $g = 0,55 \text{ kN/m}^2$

Bei Dachneigung von 30° $g_{\perp} = 0,64 \text{ kN/m}^2$

$$g_{\text{Traufe}} = g_{\perp} \times l = 0,64 \text{ kN/m}^2 \times \frac{1}{2} \times 10 \text{ m}$$

3,18 kN/m

Dachdeckung

3,18 kN/m

Sparren $d = 4 \text{ cm}$, $h = 35 \text{ cm}$ hoch, $a = 90 \text{ cm}$

$$g_{\text{Traufe}} = 0,35 \text{ m} \times 0,04 \text{ m} \times 6 \text{ kN/m}^3 \times 5 \text{ m} \times \cos 30^\circ \times 0,9 \text{ m}$$

0,44 kN /m

Verkleidung unten 20 mm Holzschalung

$$g_{\text{Traufe}} = 3 \text{ m} \times 0,016 \text{ m} \times 6 \text{ kN/m}^3 =$$

0,29 kN/m

Gipskartonplatten 12,5 mm x 3m

0,33 kN/m

Stroh in Dachschrägen einschließlich über Rähm

$h = 35 \text{ cm}$, mit Rohdichte Stroh von 90 kg/m^3

$$g_{\text{Traufe}} = 1,05 \times (\frac{1}{2} \times 6,0 + 0,50) \text{ m} \times 0,35 \text{ m} \times 0,9 \text{ kN/m}^3 =$$

1,16 kN/m

Holz und Stroh

2,22 kN/m

Summe Dach Wandkrone OG

5,40 kN/m

Schneelast

Schneelastzone II

Dachneigung 30 Grad

$$s = 0,68 \text{ kN/m}^2$$

$$s_{\text{Traufe}} = 5 \text{ m} \times 0,68 \text{ kN/m}^2 =$$

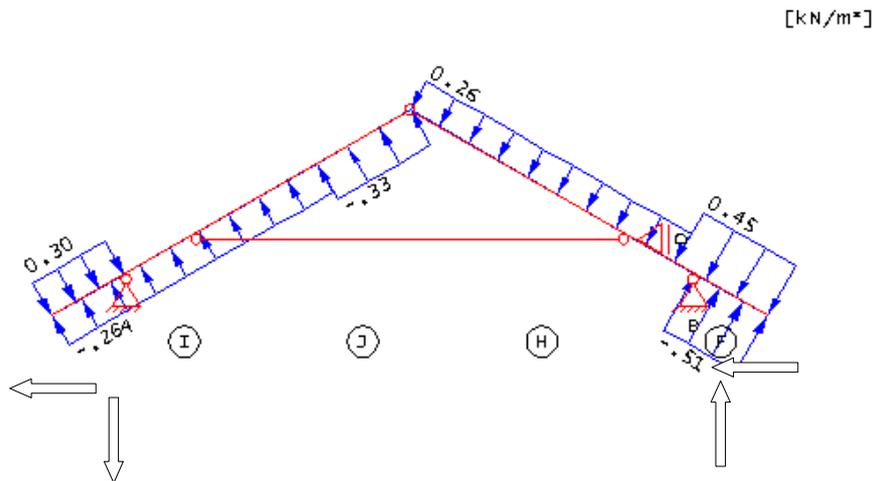
3,40 kN/m

Windlast auf Dach

Zone 2, Binnenland,

Dachneigung 30 Grad

Böengeschwindigkeitsdruck $q = 0,65 \text{ kN/m}^2$



$$a_h = -1,57 \text{ kN/m}$$

$$a_v = -0,6 \text{ kN/m}$$

$$b_h = 1,48 \text{ kN/m}$$

$$b_v = 0,56 \text{ kN/m}$$

vertikal:

$$\max q_{\text{Wind}} =$$

$$\mathbf{0,56 \text{ kN/m}}$$

abhebende Kräfte sind nicht maßgebend

horizontale Kräfte werden von Holzkonstruktion aufgenommen

2.2 Wandlasten

Wandeigengewicht d = 100 cm, OG

Stroh d = 90 cm, mit Rohdichte von 130 kg/m³ unverputzt
 $g_{1m^2} = 0,9m \times 1,3kN/m^3 = 1,17 kN/m^2$ $1,3 \times (2,15-0,2)m =$ 2,28 kN/m

Schwelle /Rähm o+u je 10 cm Holz
 $g = 2 \times 0,1 \times 0,9 m \times 6 kN/m^3 =$ 1,08 kN/m

Putz mit Rohdichte 15 kN/m³ 5 cm beidseitig
 $g = 15 kN/m^3 \times 0,05 m \times 2 \times 2,15m$ 3,22 kN/m

Summe Wand im OG **6,58 kN/m**

Wandeigengewicht d = 100 cm, EG

d = 90 cm, mit Rohdichte Stroh von 130 kg/m³ unverputzt
 $g_{1m^2} = 0,9m \times 1,3kN/m^3 = 1,17 kN/m^2$ $1,17 \times 2,50m =$ 2,92 kN/m

Schwelle und Rähm je 10 cm Holz
 $g = 2 \times 0,1 \times 0,9 \times 6 kN/m^3 =$ 1,08 kN/m

Putz mit Rohdichte 15 kN/m³, 5 cm außen 5 cm innen
 $g = 15 kN/m^3 \times 0,06 m \times 2,7m$ 4,05 kN/m

Summe Wandfuss **8,05 kN/m**

Windlast auf Wand

Zone 2, Binnenland, Dachneigung 30 Grad
Böengeschwindigkeitsdruck $q = 0,65 kN/m^2$
 $\max c_p$ Wand = 0,8 bzw. -0,8 (außerhalb Ecke)
 $\max q_{Wind} = 0,8 * 0,65 =$ **0,52 kN/m²**

2.3 Deckenlasten

Eigengewicht der Holzbalkendecke 1,5 kN/m²
Stroh und Putz Wandbereich pauschal 0,8 kN/m
Lasteinzugsbreite maximal $l = \frac{1}{2} \times (2,44m + 0,16) = 1,30m$
Belastung ständig = $1,5 kN/m^2 \times 1,3 + 0,8 =$ 2,75 kN/m

Nutzlast (für Weiterleitung) Kategorie A1 nach DIN 1055-3
 $q = 1,5 kN/m^2 \times \frac{1}{2} \times (1,44 + 0,16) =$ 1,20 kN/m

Summe Decke **3,95 kN/m**

3 Beanspruchung der Strohballenwände

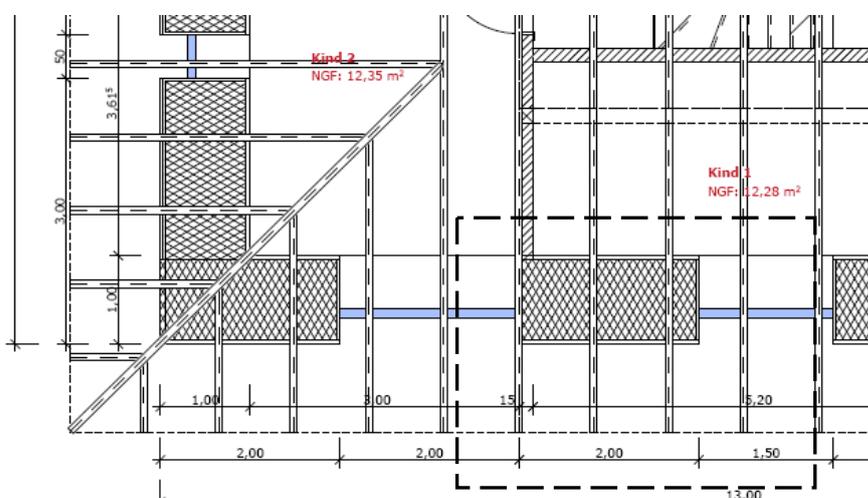
Die Strohballenwände werden auf Druck, und geringfügig auf Biegung (infolge Windlast) beansprucht. Nachstehend werden die maximalen Beanspruchungen der Wände ermittelt.

3.1 Wand im OG

Belastung

Der am stärksten beanspruchte Wandabschnitt im OG: Südseite $l = 2\text{m}$ zwischen Wandöffnungen mit $b = 2,0\text{m}$ und $b = 1,5\text{m}$

Lasteinzugsbreite $l = \frac{1}{2} \times 2\text{m} + 2,0\text{m} + \frac{1}{2} \times 1,5\text{m} = 3,75\text{m}$



Wandkopf

Belastung	Dacheigengewicht	5,40 kN/m	
	Schnee+Wind voll	3,96 kN/m	
Wandlast	ständig:	$5,4 \text{ kN/m} \times 3,75/2\text{m} =$	10,125 kN/m
	veränderlich:	$3,96 \text{ kN/m} \times 3,75/2 =$	<u>7,42 kN/m</u>
	Summe:		17,55 kN/m

Wandfuß	ständig:	$10,125 \text{ kN/m} + 6,58 \text{ kN/m}$	16,70 kN/m
	Veränderlich:		<u>7,42 kN/m</u>
	Summe:		24,125 kN/m

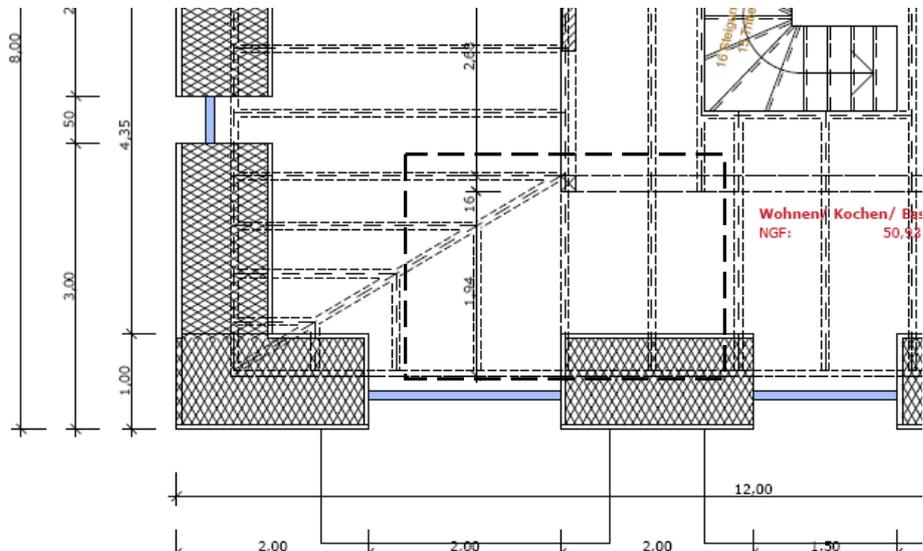
Spannungen in Strohballen

Druckspannung am Wandkopf	$= 17,55 / 0,9 =$	19,5 kN/m ²
Druckspannung am Wandfuß	$= 24,12 / 0,9 =$	26,8 kN/m ²
Druckspannung in Wandmitte (einschl. Wind)	$n = 20,8 \text{ kN/m}$	
	$m_{\text{Wind}} = 0,48 \text{ kNm/m}; 20,8/0,9 \pm 6 \times 0,48/0,9^2 =$	26,7/19,55 kN/m ²

3.2 Wand im EG

Belastung

Es wird die gleiche Wand mit Lasteinzugsbreite $l = 3,75\text{m}$ betrachtet;



Wandkopf

Belastung

Dach und Wand OG 16,7 kN/m

Decke $2,75\text{kN/m} \times 3,75/2 = 5,16 \text{ kN/m}$

Schnee Wind voll 7,42 kN/m

Nutzlast Decke $1,2\text{kN/m} \times 3,75/2 = 2,25 \text{ kN/m}$

Wandlast	ständig:	$16,7 + 5,16 =$	21,86 kN/m
	veränderlich:	$7,42 + 2,25 =$	<u>9,67 kN/m</u>
	Summe:		31,53 kN/m

Wandfuß

ständig: $21,86 \text{ kN/m} + 8,05 \text{ kN/m}$

29,91 kN/m

Veränderlich:

9,67 kN/m

Summe:

39,58 kN/m

Spannungen in Strohballen

Druckspannung am Wandkopf = $31,53 / 0,9 =$

35,0 kN/m²

Druckspannung am Wandfuß = $39,58 / 0,9 =$

44,0 kN/m²

Druckspannung in Wandmitte (einschl. Wind) =

$n = 35,6 \text{ kN/m} \quad m_{\text{Wind}} = 0,76 \text{ kNm/m}; \quad 35,6/0,9 \pm 6 \times 0,76/0,9^2 =$

45,1/33,9 kN/m²

4 Elastomechanischen Eigenschaften der Strohballen

Zur elastomechanischen Eigenschaften der Strohballen und Wänden aus Strohballen liegen zwei verwertbare experimentelle Untersuchungsergebnisse vor:

3. Versuche an der Hochschule Magdeburg-Stendal in Magdeburg FB Bauwesen Großballen $b \times h \times l = 85 \times 48 \times 185 \text{ cm}$, Gerste mit Rohdichte von 123 kg/m^2
4. Versuche an der Universität Kassel - Zentrum für umweltbewusstes Bauen (ZUB) Kleinballen $b \times h \times l = 85 \times 48 \times 185 \text{ cm}$, Weizen der Rohdichte 80 und 130 kg/m^2

Beide Versuchsreihen wurden im Rahmen des von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Forschungsvorhabens

„Grundlagen zur bauaufsichtlichen Anerkennung der Strohballenbauweise- Weiterentwicklung der lasttragenden Konstruktionsart und Optimierung der bauphysikalischen Performance“

durchgeführt.

Nachstehend werden nur Versuchsergebnisse wiedergeben, die für den Nachweis der Standsicherheit des Mustergebäudes relevant sind. Da die unter 2. erwähnten Versuche an nicht vorgespannten Wänden durchgeführt wurden und relativ niedrige Wandbelastungen abdecken, bleiben hier unbeachtet.

4.1 Druckfestigkeit und Druckversagen von Einzel-Strohballen

Parameter der untersuchten Ballen

Getreideart	Gerste
Ballenabmessungen $b / h / l$	80cm / 48cm / 180cm
Ballenrohichte	126 kg/m^3
Anzahl der Bindegarne	4
Ballenlage	liegend, d.h. Umreifung mit Bindegarnen in vertikaler Ebene

Kurzzeit-Druckversuche

zentrische Drucktragfähigkeit	bis 450 kN/m^2 geprüft
zugehörige Stauchung	um 50%
Versagensart des Ballens	keins (Versuchsabbruch bei 50 % Stauchung)
Garnversagen	in keinem Versuch aufgetreten
Versagensart bei Garnausfall	tritt kein Versagen ein
E-Modul bei 40 kN/m^2 Druck	um 750 kN/m^2

Dauerstandsversuche an Einzelballen

Relaxationsversuche an Ballen wie zuvor beschrieben

Beobachtungszeitraum	35 Tage
Spannungsverlust von $\sigma_{T=0}$	um 50 %
bei $\varepsilon = 10\%$ und $\varepsilon = 20\%$	Abklingen des Spannungsverlustes innerhalb T
Anfangsspannung	126 kN/m ² bzw. 46 kN/m ²

4.2 Druckversuche an vorgespannten Wandelementen

Parameter der untersuchten Wandelemente

Strohballen	wie unter 4.1 beschreiben	
Wandhöhe (vorgespannt)	Wand 1	Wand 2
	250 cm bzw.	271 cm
Schlankheit	2,9	3,1
Anfangsvorspannung	169 kN	114 kN
Anfangsspannung	113 kN/m ²	79 kN/m ²
Stauchung	23,5%	16 %

Versuchsergebnisse der Dauerstandsversuche

Relaxationsverluste in 80 Tagen	ca. 55 %
Empfehlung für Vorspannung	2,0 bis 2,5-fache Gebrauchslast
	Stauchung der Strohballen auf 20% begrenzen

Versuchsergebnisse der Kurzzeitdruckversuche

für äußere Druckkraft, die geringer ist als die zum Belastungszeitpunkt vorhandene Vorspannung gilt:

- eine lineare Kraft-Setzungs-Beziehung
- Elastizitätsmodul der Wand zw. 15 MN/m² und 30 MN/m²
- vertikale Setzung der Wandkrone unter Gebrauchslast im Millimeterbereich
- kein Knicken, Ausbeulen, keine visuell wahrnehmbaren Verformungen der Wand

für äußere Druckkraft, die höher ist als die aktuelle Vorspannkraft gilt:

- die Setzungen der Wand nehmen linear aber überproportional zu
- die Belastung konnte den 1,6-fachen Wert der aktuellen Vorspannung erreichen

Anmerkung

- eine Grenzlast (Zusammenbrechen der Wand) konnte auf Grund der immer stärkeren Schiefstellung und Auslenkung des Rähms, die aus ungleichmäßigen Verformungen der einzelnen Strohballen folgte, nicht ermittelt werden.
- der Rähm wurde horizontal nicht gehalten

4.3 Druckversuche an vorgespannten und verputzten Wänden

Untersucht wurde eine Wand (Wand 2)

Versuchsergebnisse der Kurzzeitdruckversuche

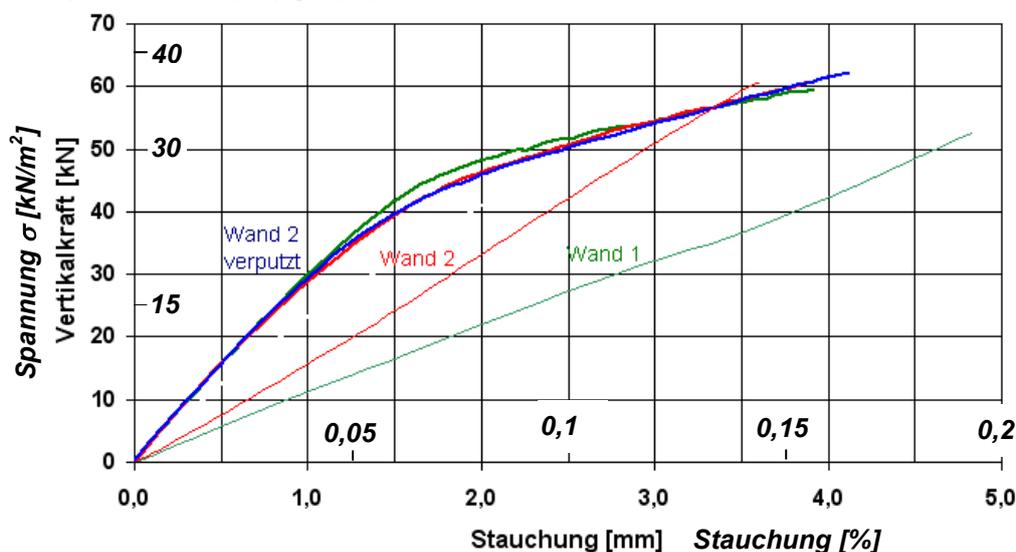
für äußere Druckkraft, die geringer ist als die aktuelle Vorspannkraft gilt:

- eine lineare Kraft-Setzungs-Beziehung
- Elastizitätsmodul der Wand um 50 MN/m^2
- vertikale Setzung der Wandkrone unter Gebrauchslast halbiert im Vergleich zur unverputzten Wand
- kein Knicken, Ausbeulen, keine visuell wahrnehmbaren Verformungen
- kein Abplatzen /Reißen der Putzschichten

für äußere Druckkraft, die größer ist als die aktuelle Vorspannkraft gilt:

- Bei Überschreiten der vorh. Vorspannung ein Abflachen der Kraft-Setzungs-Beziehung, jedoch nur durch größere Setzungszunahme zu beobachten.

**Kraft-Setzung-Beziehungen für die nicht verputzte Wand 1 und 2
sowie für die verputzte Wand 2**



4.4 Schubversuche an Wänden

Die Schubfestigkeit der Strohballenwände wird zurzeit nicht angesetzt, daher entfällt hier die Ergebniswiedergabe.

5 Beurteilung der Standsicherheit der Strohballenwände des Mustergebäudes.

Für die Bemessung von Strohballenwänden existieren zurzeit keine Bemessungsalgorithmen. Ein probabilistisches Verfahren mit Aussagen zum Sicherheitsindex, Zuverlässigkeit bzw. Versagenswahrscheinlichkeit von Strohballenwänden (wie es im Massivbau oder Stahlbau üblich ist) kann entwickelt werden, wenn genügend statistisch abgesichertes Datenmaterial vorliegt.

Die Bemessung der Strohballenwände kann zurzeit nur auf der Grundlage des Vergleiches zwischen den in Versuchen aufgetragenen Beanspruchungen mit denen der geplanten Einbausituation erfolgen. Der Vergleich erfolgt auf dem Niveau der Gebrauchslasten.

5.1.9 Aufnahme der Vertikallast durch Einzelballen:

Untersuchte Druckbelastung	max. $\sigma = 450 \text{ kN/m}^2 \times 0,85 = 360 \text{ kN/m}$
Maximale Wandlast im Mustergebäude	vorh. $\sigma = 44 \text{ kN/m}$
Sicherheit gegen Gebrauchslast	$\gamma = 360/44 = 8,1$
Fazit: Die Sicherheit gegen Druckversagen der Einzelballen ist ausreichend.	

5.1.10 Aufnahme der Vertikallast durch Wandelemente:

Gebrauchslasten:

Die Aufnahme einer Vertikalkraft in der Höhe der vorhandenen Vorspannkraft kann als durch Versuche abgesichert betrachtet werden. Ein Knicken, Beulen oder Druckversagen kann ausgeschlossen werden. Ein Abplatzen der Putzschichten sowie Schäden am Ausbau sind hierbei nicht zu befürchten.

Aufgrund der relaxationsbedingten Verlusten der Vorspannkraft, soll die Anfangsvorspannung um Faktor 2-2,5 über der erwarteten Gebrauchslast liegen. Aus den vorstehenden Ausführungen ergibt sich ein folgender Vorschlag für die Dimensionierung der Erdgeschosswände des Mustergebäudes:

Schlankheit der Wände im Mustergebäude	$< 2,60/0,9 = 2,9$	
Schlankheit der untersuchten Wände	$< 2,9-3,1$	(vergleichbar)
Rohdichte der Ballen ohne Vorspannung	$\rho \geq 130 \text{ kg/m}^3$	
Maximale Wandlast im Mustergebäude	39,59 kN/m	einschl. Stroh und Putz EG
- ohne Stroh und Schwellen	35,39 kN/m	(= 39,59-2,92-1,08)
- erforderliche Vorspannung	88,50 kN/m	(= 2,5 x 35,39 kN/m)
- Anfangsspannung	98,00 kN/m ²	(=88,5 / 0,9)
- erforderliche Stauchung der Wände	18-19%	
Maximale Anfangsspannung in Versuchen	113 kN/m ² und 79 kN/m ²	
Zugehörige Stauchung	23,5 % bzw. 16 %	

Tragfähigkeit:

Die Aufnahme von äußeren Vertikallasten, die weit über der aktuellen Vorspannkraft liegen, wurde versuchstechnisch nur an einer Wand abgesichert.

Die maximale Druckbelastung der Wände wird während des Vorspannens realisiert. Hierbei wird die 2,5-fache planmäßige Gebrauchslast aufgebracht. Diese Belastung läßt sich zum Teil auch nach dem Verlust der Vorspannkraft aufbringen, (im durchgeführten Wandversuch wurden 160% der noch vorhandenen Vorspannkraft realisiert. Somit kann (für diesen Versuch) eine Sicherheit gegen Versagen infolge Druckbelastung von $\gamma = 1,6$ als gesichert angesehen werden.

Um kriechbedingte Verformungen der Wand aus ihrer Ebene zu reduzieren (Anwachsen der Lastausmitte) werden Wände, die während des Vorspannens meßbare Verformungen aus der Wandebene aufweisen aussortiert oder neu gesetzt. Somit ist die Qualitätskontrolle bei Auswahl der Strohballen und deren Zusammenbau ein wesentlicher Faktor zur Erhöhung der Tragfähigkeit. Dieser läßt sich jedoch schwer quantifizieren.

Zusätzliche Tragfähigkeitsreserve bieten die beidseitigen Putzschichten. Diese wurden beim Lastabtrag rechnerisch nicht angesetzt. Aus den zuvor erwähnten Versuchen ist jedoch eine lasttragende Wirkung deutlich zu erkennen.

Die Sicherheit gegen das Versagen der Wände ist nach Auffassung des Aufstellers gegeben, kann jedoch nicht quantifiziert werden.

5.1.11 Aufnahme der Horizontallasten aus Wind

Die Wandscheiben übernehmen keine aussteifende Funktion. Die Gebäudeaussteifung erfolgt über Dach- und Deckenscheibe sowie vertikal über Holzfachwerke in der Ebenen der Zwischenwände.

6 Schlussfolgerung

Die **Gebrauchstauglichkeit** der Strohballenwände des Mustergebäudes ist bei Beachtung der Ausführungen des Kapitels 1.1 und 5 gegeben.

Die **Standsicherheit** der Strohballenwände des Mustergebäudes ist bei Beachtung der Ausführungen des Kapitels 1.1 und 5 nach Auffassung des Aufstellers gegeben, kann jedoch nicht quantifiziert werden.

2 Anhang Projektteil C Bautechnische Nachweise: Prüfberichte und allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis

von
Dipl.- Ing. Architekt Dirk Scharmer
In de Masch 6
21394 Südergellersen
Tel. 04131-727804
Email: info@wand4.de



Inhaltsverzeichnis

Anhang Bautechnische Nachweise: Brandschutz.....	347
1 Feuerwiderstandstests an Strohballenwänden	347
1.1 Feuerwiderstandstest an einer lehmverputzten Holzständerwand mit Strohballendämmung: Prüfbericht	347
1.1.1 Allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis	369
1.2 Feuerwiderstandstest an einer lehmverputzten lasttragenden Strohballenwand: Prüfbericht 380	
2 Brandverhalten von Strohballenwänden	401
2.1 Brandverhalten nach DIN EN 13823 („Single-Burning-Item“- Test): Prüfbericht	401
2.2 Klassifizierungsbericht nach DIN EN 13501-1: 2007.....	414
2.1 Brandverhalten nach DIN EN 11925-2 („Brennbarkeits“- Test): Prüfbericht	420
Anhang Bautechnische Nachweise: Wärmeschutz.....	429
1 Wärmeleitfähigkeitstests an Stroh: Prüfberichte	429
2 Wärmedurchlasswiderstand einer lehmverputzten Holzständerwand mit Strohdämmung: Prüfbericht.....	448
Anhang Bautechnische Nachweise: Schallschutz.....	460
3 Schallschutzmessung einer Strohballenwand: Prüfbericht	460

Anhang Bautechnische Nachweise: Brandschutz

7 Feuerwiderstandstests an Strohballenwänden

7.1 Feuerwiderstandstest an einer lehmverputzten Holzständerwand mit Strohballendämmung: Prüfbericht

Prüfbericht

nach DIN EN 1365-1 in Verbindung mit DIN EN 1363-1

Dokumentnummer:	(3066/490/07) – CM vom 21.04.2008
Auftraggeber:	Fachverband Strohballenbau Deutschland e.V. Sieben Linden 1 D 38486 Bandau
Auftrag vom:	17.04.2007
Auftragszeichen:	Hr. Scharmer
Auftragseingang:	17.04.2007
Inhalt des Auftrags:	Prüfung einer etwa 376 mm dicken, tragenden, raumabschließenden und wärmedämmenden Wandkonstruktion mit einer Strohballendämmung auf Brandverhalten zur Ermittlung der Feuerwiderstandsdauer bei einseitiger Brandbeanspruchung
Prüfungsgrundlage:	DIN EN 1365-1 : 1999-10 in Verbindung mit DIN EN 1363-1 : 1999-10
Probeneingang:	23. KW 2007
Probennahme:	Angaben über eine amtliche Entnahme liegen der Prüfanstalt nicht vor.
Probenkennzeichnung:	keine
Prüftermin:	13.06.2007

Dieser Prüfbericht umfasst 8 Seiten inkl. Deckblatt und 13 Anlagen.



Dieser Prüfbericht darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge oder Kürzungen bedürfen der schriftlichen Genehmigung der MPA Braunschweig. Dokumente ohne Unterschrift und Stempel haben keine Gültigkeit. Das Deckblatt und die Unterschriftenseite dieses Dokuments sind mit dem Stempel der MPA Braunschweig versehen. Das Probenmaterial ist verbraucht. Die Akkreditierungen gelten für die in den aktuellen Urkunden aufgeführten Prüfverfahren. Die Liste der akkreditierten Bereiche ist auf Anforderung erhältlich.

Materialprüfanstalt (MPA)
für das Bauwesen
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

Fon +49 (0)531-391-5400
Fax +49 (0)531-391-5900
info@mpa.tu-bs.de
www.mpa.tu-bs.de

Norddeutsche LB Hannover
106 020 050 BLZ 250 500 00
Swift-Code: NOLADE 2H
USt.-ID-Nr. DE183500654
Steuer-Nr.: 14/201/22859
IBAN: DE5825050000106020050

Notified body (0761-CPD)
Die MPA Braunschweig ist für Prüfung, Überwachung, Inspektion und Zertifizierung bauaufsichtlich anerkannt und notifiziert. Die MPA Braunschweig ist als Prüf- und Kalibrierlaboratorium nach ISO/IEC 17025 und als Inspektionsstelle nach ISO/IEC 17020 akkreditiert.

1 Allgemeines

Auftragsgemäß sollte eine tragende, raumabschließende, wärmedämmende Wandkonstruktion mit einer Strohballendämmung auf Brandverhalten nach DIN EN 1365-1 : 1999-10 in Verbindung mit DIN EN 1363-1 : 1999-10 zur Ermittlung der Feuerwiderstandsdauer bei einseitiger Brandbeanspruchung geprüft werden. Die Wand bestand im Wesentlichen aus:

- einer tragenden Holzständerkonstruktion mit Strohballendämmung „Baustrohballen“ in den Gefachen,
- einer symmetrisch aufgetragenen 8 mm dicken Putzschicht.

Dieser Prüfbericht beschreibt ausführlich das Montageverfahren, die Prüfbedingungen und die Ergebnisse, die mit dem hier beschriebenen spezifischen Bauteil erzielt wurden, nachdem dieses nach dem in DIN EN 1365-1 : 1999-10 in Verbindung mit DIN EN 1363-1 : 1999-10 dargestellten Verfahren geprüft wurde. Jede wesentliche Abweichung hinsichtlich Größe, konstruktiver Einzelheiten, Belastungen, Spannungszustände, Randbedingungen außer den Abweichungen, die im betreffenden Prüfverfahren für den direkten Anwendungsbereich zulässig sind, ist nicht durch diesen Prüfbericht abgedeckt.

Auf Grund der Eigenart der Prüfungen der Feuerwiderstandsdauer und den daraus folgenden Schwierigkeiten bei der Quantifizierung der Unsicherheit bei der Messung der Feuerwiderstandsdauer ist es nicht möglich, einen festgelegten Genauigkeitsgrad des Ergebnisses anzugeben.

Die Materialprüfanstalt Braunschweig war an der Auswahl des Probekörpers nicht beteiligt.

2 Beschreibung der geprüften Konstruktion

Die etwa 376 mm dicke Wandkonstruktion wurde in einem Prüfraum der Prüfanstalt (Norm-Tragkonstruktion entsprechend DIN EN 1363-1 : 1999-10, Abschnitt 7.2.2.1) als zweiseitig gehaltene Wand errichtet und hatte die Abmessungen von Breite x Höhe = 3000 mm x 3220 mm.

Die Wandkonstruktion (Breite x Höhe = 3000 mm x 3220 mm) bestand im Wesentlichen aus einem Holzständerwerk mit Strohballendämmung „Baustrohballen“ (allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-23.11-1595 vom 10.02.2006) und einem beidseitig angeordneten Lehmputz gemäß Lehmbauregeln (Fertigputzmischung der Firma „Claytec“).

Als Schwell- bzw. Rähmholz wurde jeweils ein 3000 mm langer Holzbalken $b \times d = 360 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ angeordnet.

Als Ständer wurden in einem maximalen Achsabstand von 1040 mm jeweils 3100 mm lange Holzständer $b \times d = 360 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ verwendet. Jeder Holzständer wurde mit jeweils zwei Schrauben (Würth Assy SK 8 x 200 mm) an dem Schwell- sowie an dem Rähmholz befestigt.

Am Ständerwerk wurde auf der beflamten Seite eine Aufleistung ($b \times d = 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$) angeordnet. Auf eine Aufleistung der unbeflammten Seite wurde für den Brandversuch von Seiten des Auftraggebers verzichtet (siehe Anlage 1.2).

Die Gefache zwischen den Holzständern wurden mit einer etwa 360 mm dicken Strohballendämmung „Baustrohballen“ ausgefüllt. Die Dämmung war durch strammes Einpassen in den Gefachen gegen Herausfallen gesichert. Horizontale stumpf gestoßene Fugen untereinander waren dicht geschlossen und mit losem Stroh dicht verstopft. Auf der beflamten Seite wurden Stahl-Windrispenbänder über Kreuz angeordnet und mit Nägeln auf der Holzkonstruktion befestigt.

Auf der Außen- sowie auf der Innenseite wurde jeweils eine etwa 8 mm dicke Lehmputzschicht in den Strohungrund eingearbeitet. Im Bereich der Holzunterkonstruktion wurde verrödelttes Schilfrohr als Putzträger aufgenagelt (siehe Anlage 1.2 und 3.1).

Weitere Einzelheiten zum Aufbau der Wandkonstruktion sind der Anlage 1.2 zu diesem Prüfbericht zu entnehmen.

3 Probekörper- und Baustoffkennwerte

Zum Zeitpunkt der Prüfung entsprachen die Festigkeit und der Feuchtegehalt des Probekörpers annähernd dem Zustand, der bei der üblichen Verwendung zu erwarten ist.

Für die geprüfte Konstruktion und die bei ihr verwendeten Baustoffe gelten die in Anlage 1.3 zusammengestellten Angaben hinsichtlich der Baustoffklassifizierungen, der Flächengewichte, der Rohdichten sowie der Feuchtigkeitsgehalte.

4 Prüfanordnung und -durchführung

Fachkräfte des Auftraggebers bauten den in Abschnitt 2 beschriebenen Probekörper als zweiseitig gehaltene Wand vor die lichte Öffnung einer Wandbrandkammer als vertikalen Raumabschluss ein.

Der ca. 10 mm breite Spalt zwischen Prüfraumen und Probekörper der beiden freien vertikalen Ränder war mit Mineralwolle (Baustoffklasse A, Schmelzpunkt $\geq 1000 \text{ °C}$) verschlossen.

15 Minuten vor Beginn der Brandprüfung wurde die Prüfwand mit einer Streckenlast zentrisch belastet und betrug nach Vorgabe des Auftraggebers $q = 37,88 \text{ kN/m}$.

Die Brandkammer wurde nach der Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) gemäß DIN EN 1363-1 : 1999-10, Abschnitt 5.1.1, beflammt. Zur Messung der Brandraumtemperaturen dienten 6 Stück Platten-Thermometer („Plates“) entsprechend DIN EN 1363-1 : 1999-10, Abschnitt 4.5.1.1.

Im Brandraum lag bei der Brandprüfung im oberen Bereich des Probekörpers ein statischer Überdruck gemäß DIN EN 1363-1 : 1999-10 vor.

Zur Messung der Temperaturen auf der unbeflammten Seite des Probekörpers dienten Thermoelemente gemäß DIN EN 1363-1, Abschnitt 4.5.1.2.

Die Lage der Temperatur- und Verformungsmessstellen zeigt die Anlage 1.2 zu diesem Prüfbericht.

Die vertikale Stauchung des Probekörpers wurde entsprechend DIN EN 1365-1 : 1999-10, Abschnitt 9.3.1, gemessen.

Die horizontale Durchbiegung des Probekörpers wurde entsprechend DIN EN 1365-1 : 1999-10, Abschnitt 9.3.2, in der Mitte der Prüfwand und 50 mm vom freien Rand entfernt gemessen.

Die Darstellung der Prüfeinrichtung, die Lage der Ofen-Thermoelemente und der Druckmessstellen zeigt die Anlage 1.1 zu diesem Prüfbericht.

5 Prüfergebnisse und Beobachtungen

Die während der Prüfung auf der unbeflammten Seite des Probekörpers ermittelten Temperaturerhöhungen über die Anfangstemperatur, die Temperaturen in der Brandkammer, der Differenzdruck, die Umgebungstemperatur sowie die Verformungen des Probekörpers sind in den Anlagen 2.1 bis 2.8 grafisch dargestellt.

Die Beobachtungen während der Brandprüfung sind aus der Anlage 2.9 zu ersehen.

6 Zusammenfassung der Prüfergebnisse und Leistungskriterien nach DIN EN 1365-1 : 1999-10 in Verbindung mit DIN EN 1363-1 : 1999-10

Am 13.06.2007 wurde eine 376 mm dicke, tragende, raumabschließende und wärmedämmende Wandkonstruktion mit einer Strohballendämmung ohne durchgehende horizontale Fugen auf Brandverhalten nach DIN EN 1365-1 : 1999-10 in Verbindung mit DIN EN 1363-1 : 1999-10 zur Ermittlung der Feuerwiderstandsdauer bei einseitiger Brandbeanspruchung geprüft.

Die Zusammenfassung der Prüfergebnisse und Leistungskriterien nach DIN EN 1365-1 : 1999-10 in Verbindung mit DIN EN 1363-1 : 1999-10 für tragende, raumabschließende, wärmedämmende Wände bei einseitiger Brandbeanspruchung sind in der Tabelle 1 zu diesem Prüfbericht dargestellt.

Tabelle 1: Prüfergebnisse und Leistungskriterien nach DIN EN 1365-1 : 1999-10 in Verbindung mit DIN EN 1363-1 : 1999-10 für tragende, raumabschließende, wärmedämmende Wände bei einseitiger Brandbeanspruchung.

Zeile	Normbezug Angaben nach DIN EN 1363-1: 1999-10 Abschnitt	Anforderungen		Prüfergebnisse		
				Beschreibung	Probekörper 1 2-seitig gehalten Decken- und Bodenanschluss	
1	11.1	Tragfähigkeit	Grenzwert der vertikalen Stauchung	Der Grenzwert wurde überschritten nach	- min.	
2			Grenzwert der vertikalen Stauchungsgeschwindigkeit	Der Grenzwert wurde überschritten nach	- min.	
3	11.2	Raumabschluss, d.h. Vermeidung von:	Entzündung des Wattebausches	Entzündung des Wattebausches erfolgte nach:	48 min. ¹⁾	
4			Auftreten von Spalten	Das Durchdringen einer Spaltlehre erfolgte nach:	48 min. ¹⁾	
5			Flammen auf der unbelamten Seite	Anhaltende Flammenbildung trat auf nach:	- min.	
6	11.3	Wärmedämmung, d.h. Temperaturerhöhungen auf der unbelamten Seite über die Anfangstemperatur:	Prüfdauer in Minuten:	30	53	
7			max. festgestellte Temperaturerhöhung: Mittelwert in K:	14	37	
8			max. zu Einzelwert $\Delta T = 180$ K	max. festgestellte Temperaturerhöhung: Einzelwert in K:	49 [15]	52 [15]
9	5.6	Sonstige Angaben	Umgebungstemperatur bei Beginn der Prüfung im Labor	25°C		
10			Die Umgebungstemperatur stieg/sank während der Prüfung um max.	2 K		
11	5.2.2.1		Druck im Brandraum	siehe Anlage 2.8 ²⁾		
12	10.4.4		Prüfdauer in Minuten:	53		
13			Durchbiegung in Wandmitte	2,6 mm		
14			Durchbiegung am freien Rand	-		

¹⁾ Durchbrand.

²⁾ Trotz der Abweichungen (Über-/ Unterschreitung) von den nach DIN EN 1363-1, Abschnitt 5.2 definierten Kriterien kann die Prüfung als gültig angesehen werden, da auf Grund des Abbrandes der Konstruktion die Druckdifferenz während der Prüfung nicht exakt zu steuern war.

7 Schlussfolgerungen auf der Grundlage von DIN EN 1365-1 : 1999-10 in Verbindung mit DIN EN 1363-1 : 1999-10 und Empfehlungen

In der nachfolgenden Tabelle 2 sind die wichtigsten Prüfergebnisse unter Berücksichtigung der Leistungskriterien nach DIN EN 1365-1 : 1999-10 in Verbindung mit DIN EN 1363-1 : 1999-10 zusammengefasst.

Tabelle 2: Zusammenstellung der Leistungskriterien

	Kriterien nach Norm	Versagen nach [Minuten]:
R	Tragfähigkeit	≥ 53 ¹⁾
E	Raumabschluss (anhaltende Flammenbildung, Wattedausch, Spaltlehre)	48
I	Wärmedämmung	48

¹⁾ Prüfung wurde in Absprache mit dem Auftraggeber beendet. In der 53 Minute wurden die Brenner abgeschaltet. In der 56 Minute wurde die Belastung heruntergekommen.

Auf Grund der vorliegenden Prüfergebnisse nach DIN EN 1365-2 : 2000-02 in Verbindung mit DIN EN 1363-1 : 1999-10 (siehe Tabelle 1 und 2) kann empfohlen werden, die geprüfte Wandkonstruktion hinsichtlich des Tragverhaltens, des Raumabschlusses und der Wärmedämmung, bei zentrischer Belastung von $q = 37,88 \text{ kN/m}$ und einseitiger Brandbeanspruchung von der Wandinnenseite in die Feuerwiderstandsklasse **REI 45** nach DIN EN 13 501-2 : 2008-01 einzustufen.

8 Direkter Anwendungsbereich nach DIN EN 1365-1 : 1999-10, Abschnitt 13

Die Ergebnisse der Brandprüfung sind direkt auf ähnliche Ausführungen anwendbar, bei denen eine oder mehrere der nachstehend aufgeführten Veränderungen vorgenommen wurden, und bei denen die Ausführung hinsichtlich ihrer Steifigkeit und Festigkeit weiterhin die Anforderungen der entsprechenden Bemessungsnorm erfüllt.

Änderungen gegenüber der geprüften Konstruktion	Bewertung
a) Reduzierung der Höhe der Wand	zulässig ≤ 3,22 m
b) Vergrößerung der Wanddicke	zulässig ≥ 376 mm
c) Vergrößerung der Dicke von zugehörigen Materialien	zulässig
d) Reduzierung der Längenmaße von Platten oder Paneelen, jedoch nicht der Dicke	zulässig
e) Reduzierung der Ständerabstände	zulässig ≤ 1040 mm

Änderungen gegenüber der geprüften Konstruktion	Bewertung
f) Reduzierung der Abstände von Befestigungen	zulässig
h) Reduzierung der aufgetragenen Last	zulässig
i) Verbreiterung, vorausgesetzt, der Probekörper wurde mit Originalbreite oder einer Breite von 3 m geprüft, wobei die größere Abmessung maßgebend ist	zulässig

Rohling
ORR Dr. Ing. Rohling
Leiterin der Prüfstelle



i. A. *Bollmohr*
Dipl.-Ing. Bollmohr
Sachbearbeiterin

Braunschweig, 21.04.2008

Verzeichnis der Anlagen

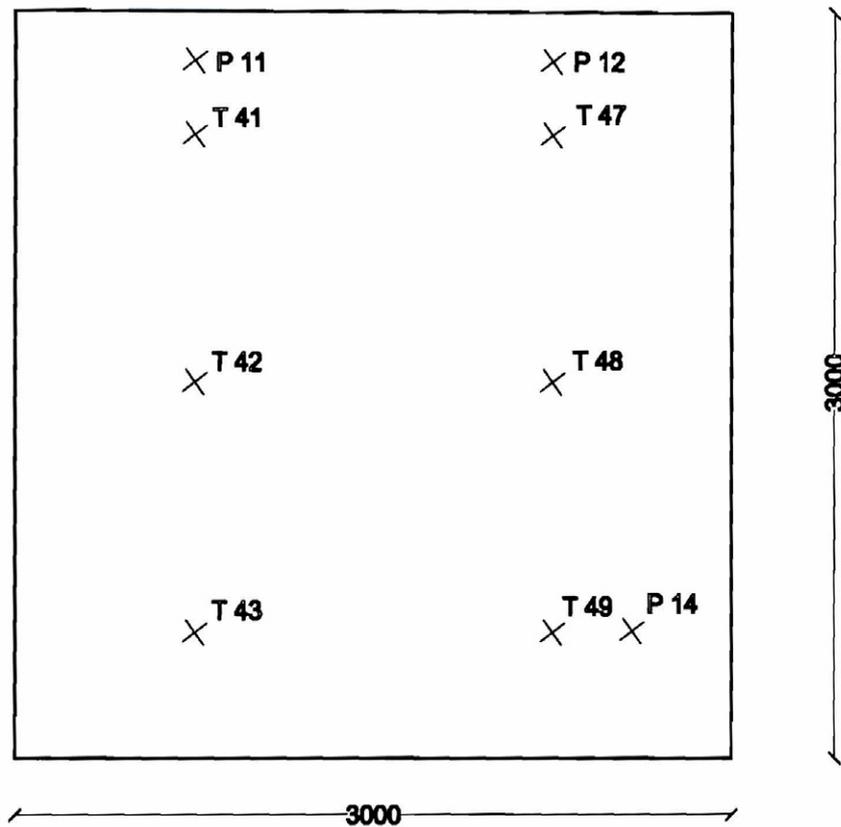
Anlage	1.1	:	Anordnung der Ofen-Thermoelemente und Druckmessstellen
Anlage	1.2	:	Konstruktiver Aufbau des Probekörpers (Messstellenanordnung)
Anlage	1.3	:	Baustoffkennwerte
Anlage	2.1	:	Temperaturen im Brandraum
Anlagen	2.2 – 2.5	:	Temperaturen am Prüfkörper
Anlage	2.6	:	Umgebungstemperatur
Anlage	2.7	:	Verformung
Anlage	2.8	:	Differenzdruck
Anlage	2.9	:	Beobachtungen
Anlage	3.1	:	Fotodokumentation

Die Zeichnung der geprüften Konstruktion wurde vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt und die Angaben beim Aufbau des Probekörpers von der Prüfanstalt verifiziert.

Wandbrandhaus: Kammer 5

T41 – T43 und T47 – T49: Platten-Thermoelemente mit Messstellen aus Ni-Cr/Ni-Al-Draht (TypK)

P11 – P14: Druckmesskopf



**Anordnung der Ofen-Thermoelemente
und Druckmessstellen**

Materialprüfanstalt für das Bauwesen
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

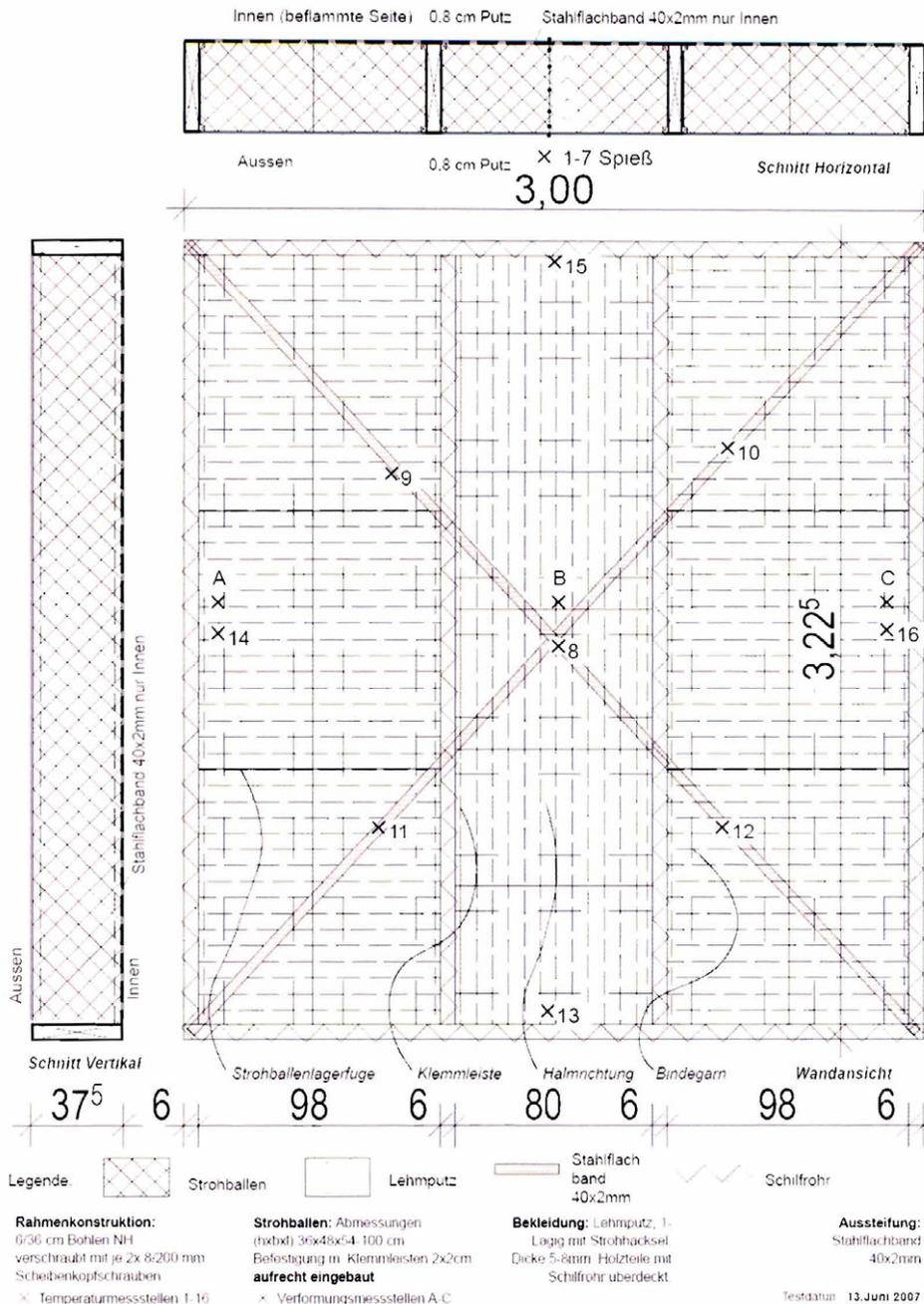
Anlage 1.1 zum
Prüfbericht

Nr. (3066/490/07) – CM

Wandbrandhaus: Kammer 5

Messstellen:

- 1 – 7 : In der Wand
- 8 - 12 : Mittelwert auf der Wand
- 13 – 16: auf der Wand
- 17 : Umgebungstemperatur
- A – C : Verformung



**Konstruktiver Aufbau des Probekörpers
(Messstellenanordnung)**

Materialprüfanstalt für das Bauwesen
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

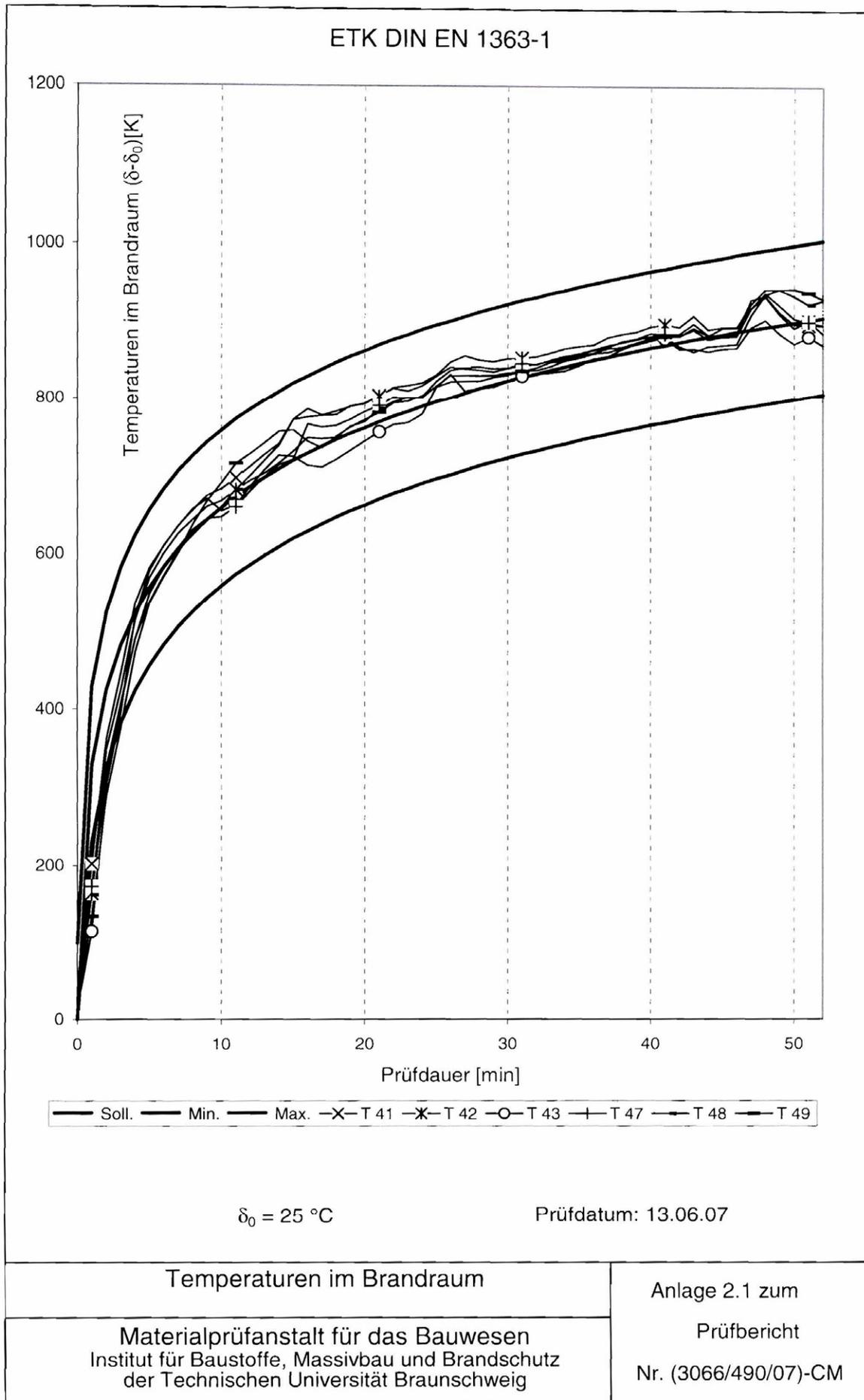
Anlage 1.2 zum
Prüfbericht
Nr. (3066/490/07) – CM

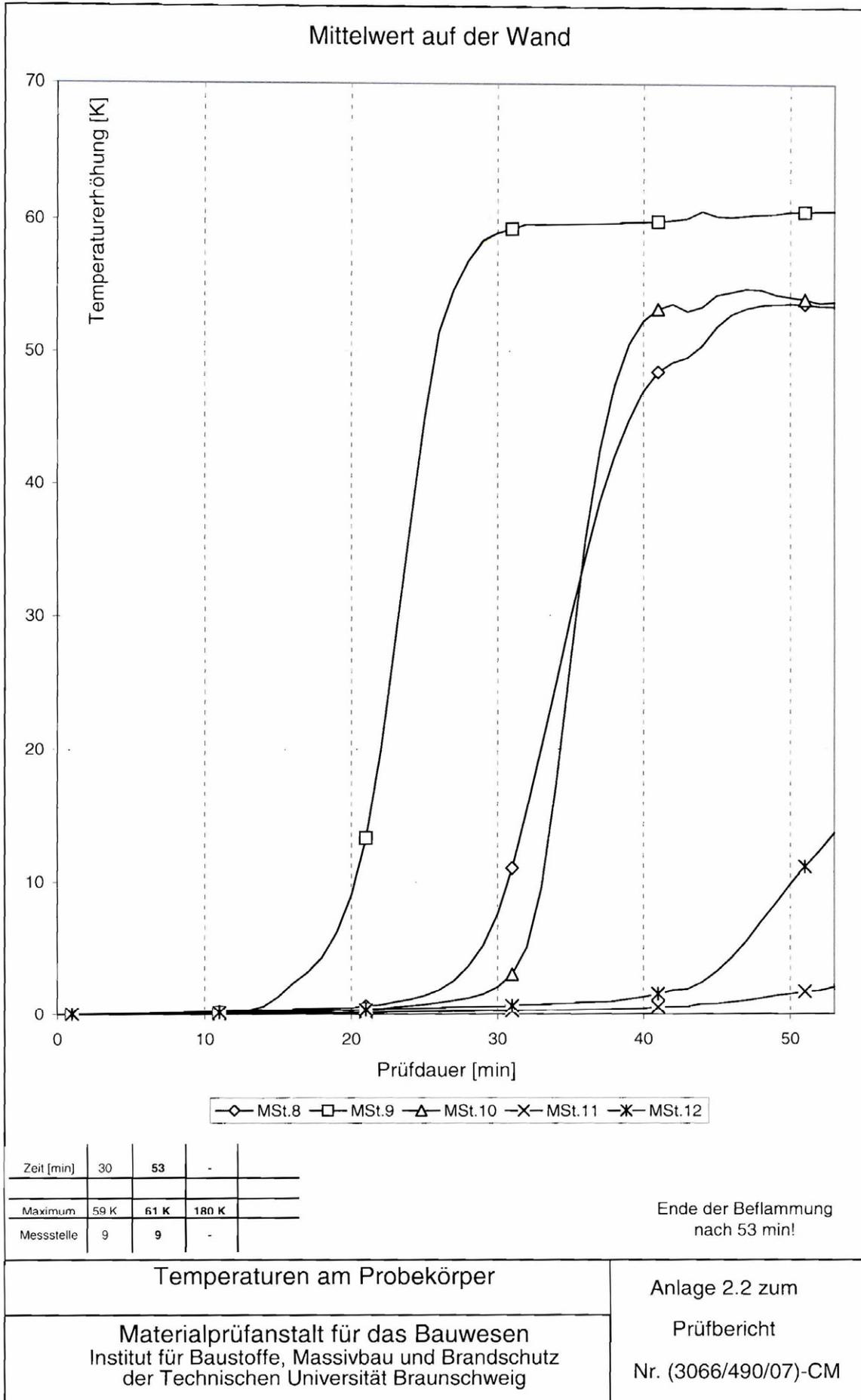
Baustoffbezeichnung	Herstellerfirma	Nenndicke bzw. Breite/ Höhe	im Einbauzustand		Feuchtig- keitsge- halt	Baustoffklassifi- zierung Prüfzeichen
			Flächen- gewicht	Roh- dichte		
		mm	kg/m ²	kg/m ³	Gew.-%	
Wärmedämmstoff aus Strohballen „Baustrohballen“	Fachverband Strohballenbau, Bandau	350	-	107,00	-	abZ: Z-23.11-1595 ^{3) 2)} B2: normalentflammbar gem. DIN 4102-1
Lehmputz gemäß Lehm- bauregeln (Fertigputzmischung)	Claytec, Viersen	≥ 8 mm	-	-	-	A1: nichtbrennbar gem. DIN 4102-4
Bauschnittholz (S 10) nach DIN 1052-3 bzw. DIN 4074-1	-	60/360 20/20	-	510	10,60	B2: normalentflammbar gem. DIN 4102-4
Stahlbauteile Stahlflachband ¹⁾	-	40 x 2	-	-	-	A1: nichtbrennbar gem. DIN 4102-4
Baustoffkennwerte					Anlage 1.3 zum Prüfbericht Nr. (3066/490/07) – CM	
Materialprüfanstalt für das Bauwesen Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig						

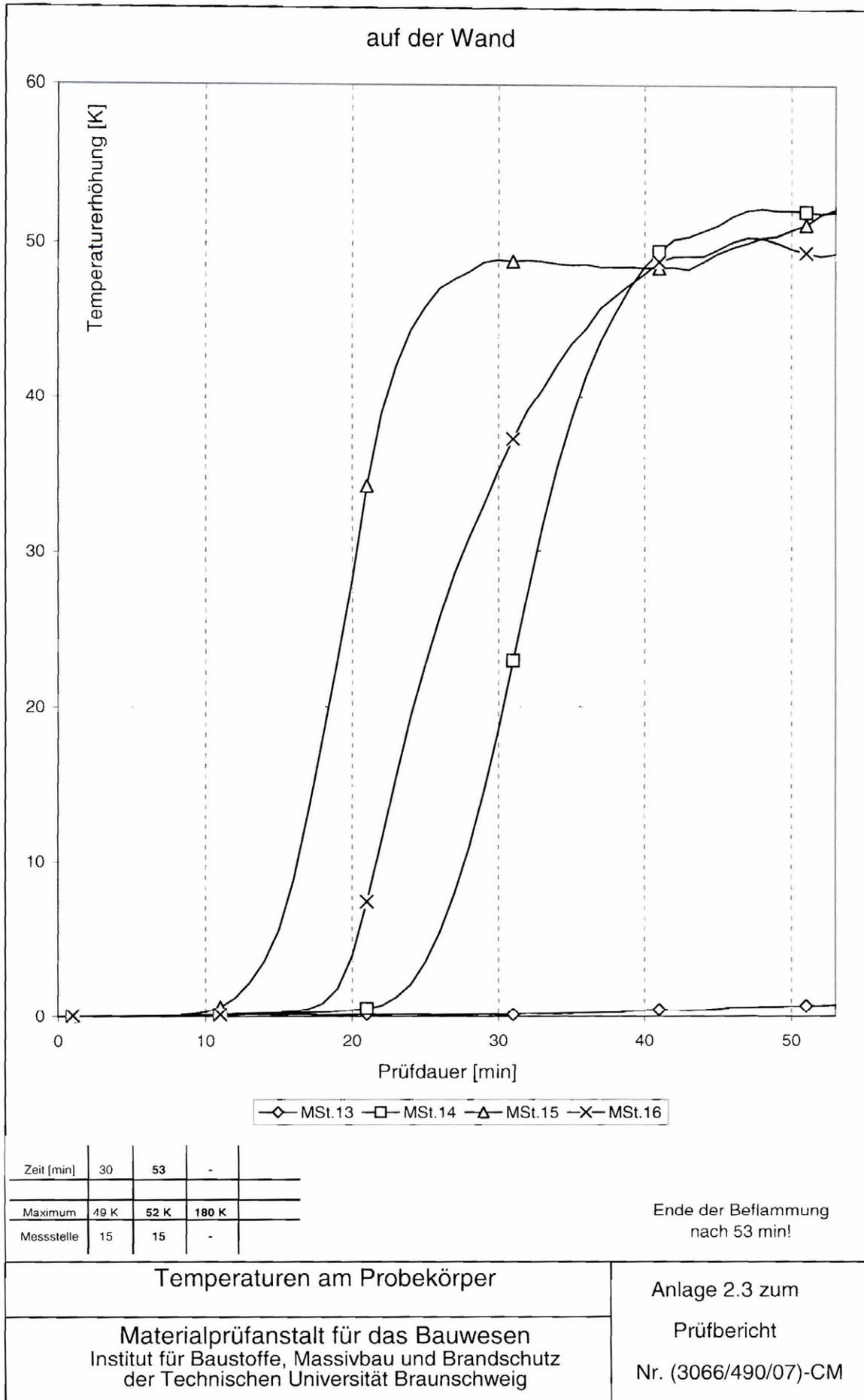
¹⁾ Es liegen keine Herstellerangaben vor.

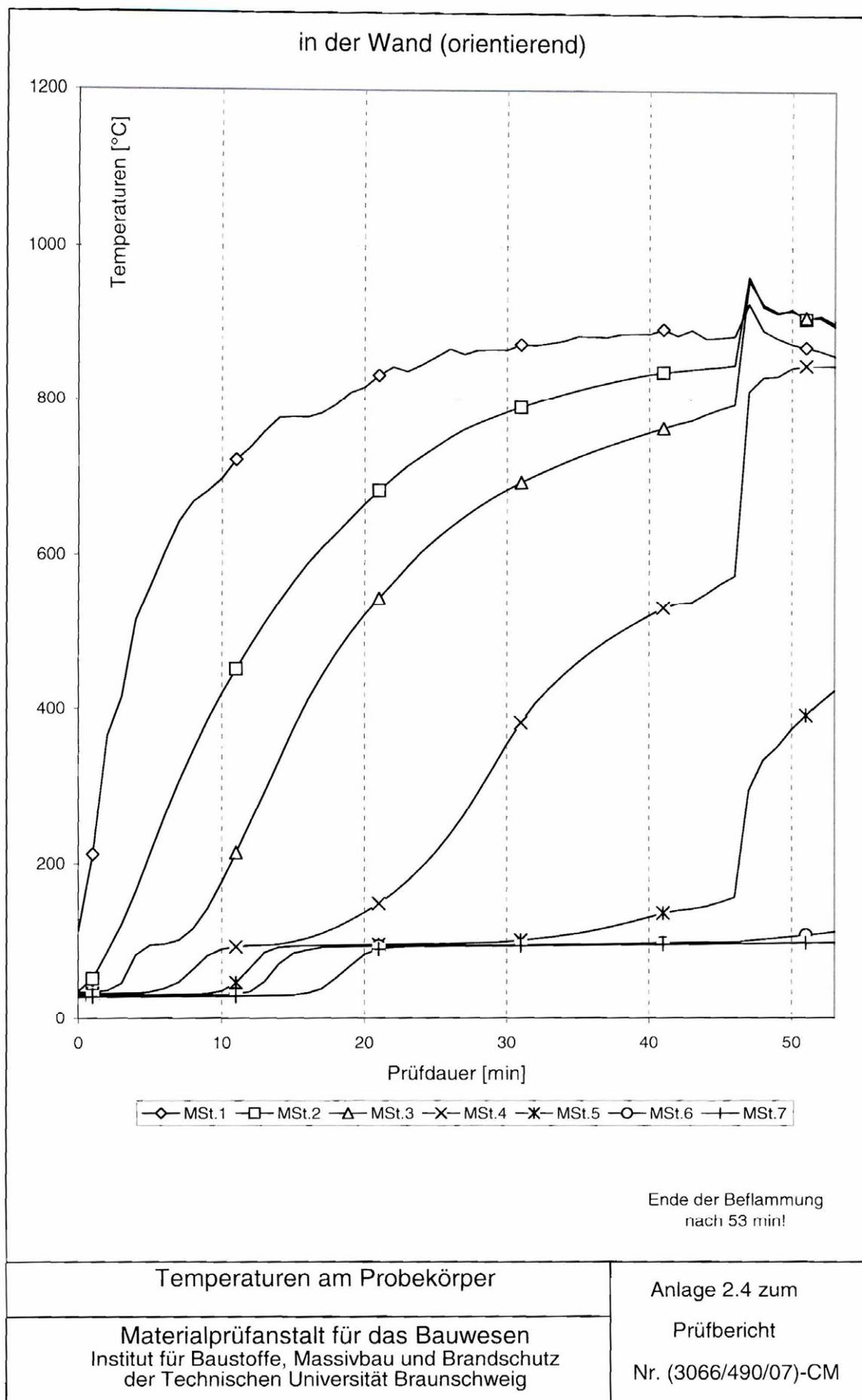
²⁾ abZ = allgemeine bauaufsichtliche Zulassung

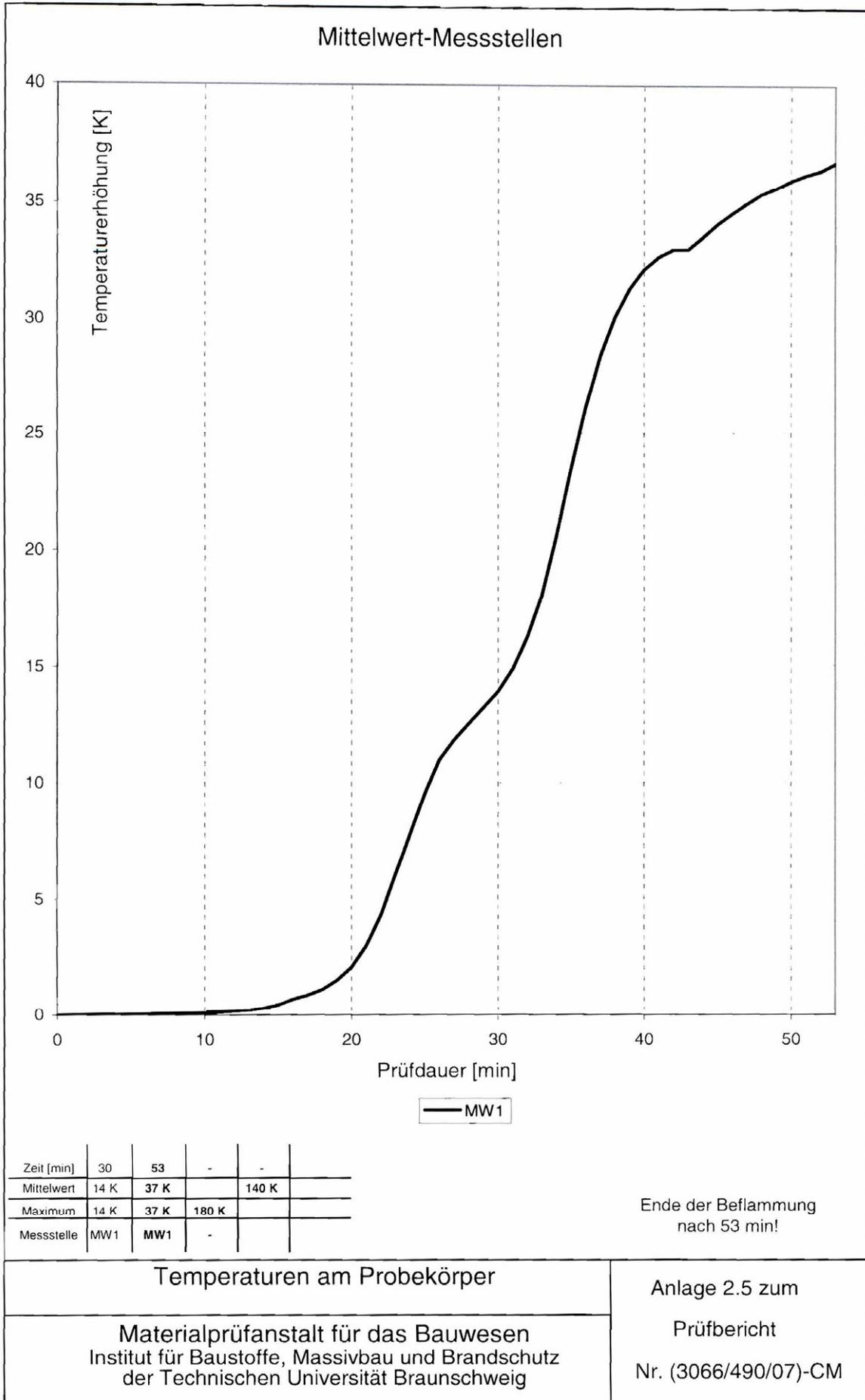
³⁾ In Verbindung mit der 8 mm Lehmputzschicht erfüllt die Strohballenoberfläche „Baustrohballen“ die Kriterien eines schwerentflammbaren Baustoffs (Klassifizierung B-s1,d0), siehe auch Klassifizierungsbericht K-3305/558/07-MPA BS.

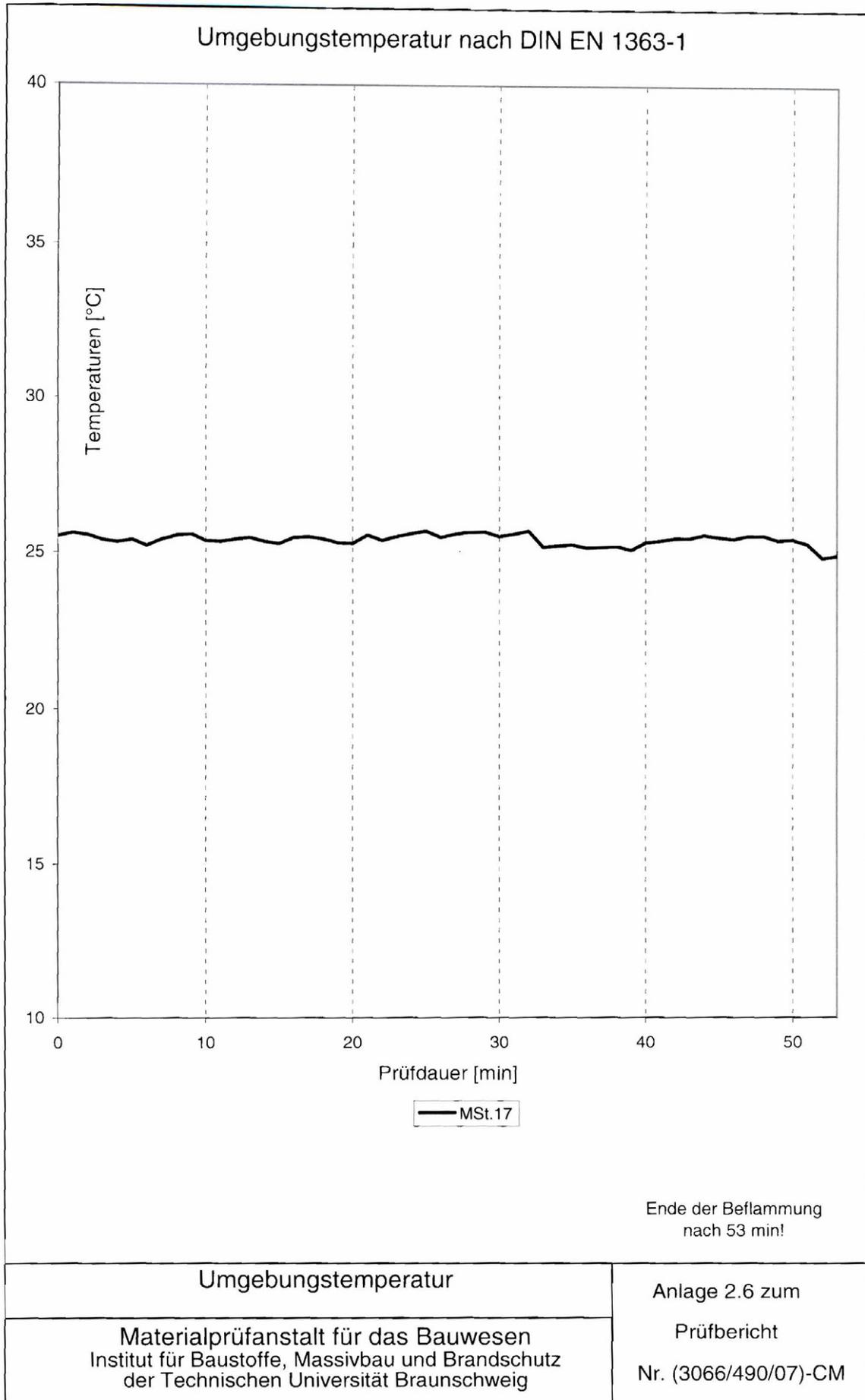


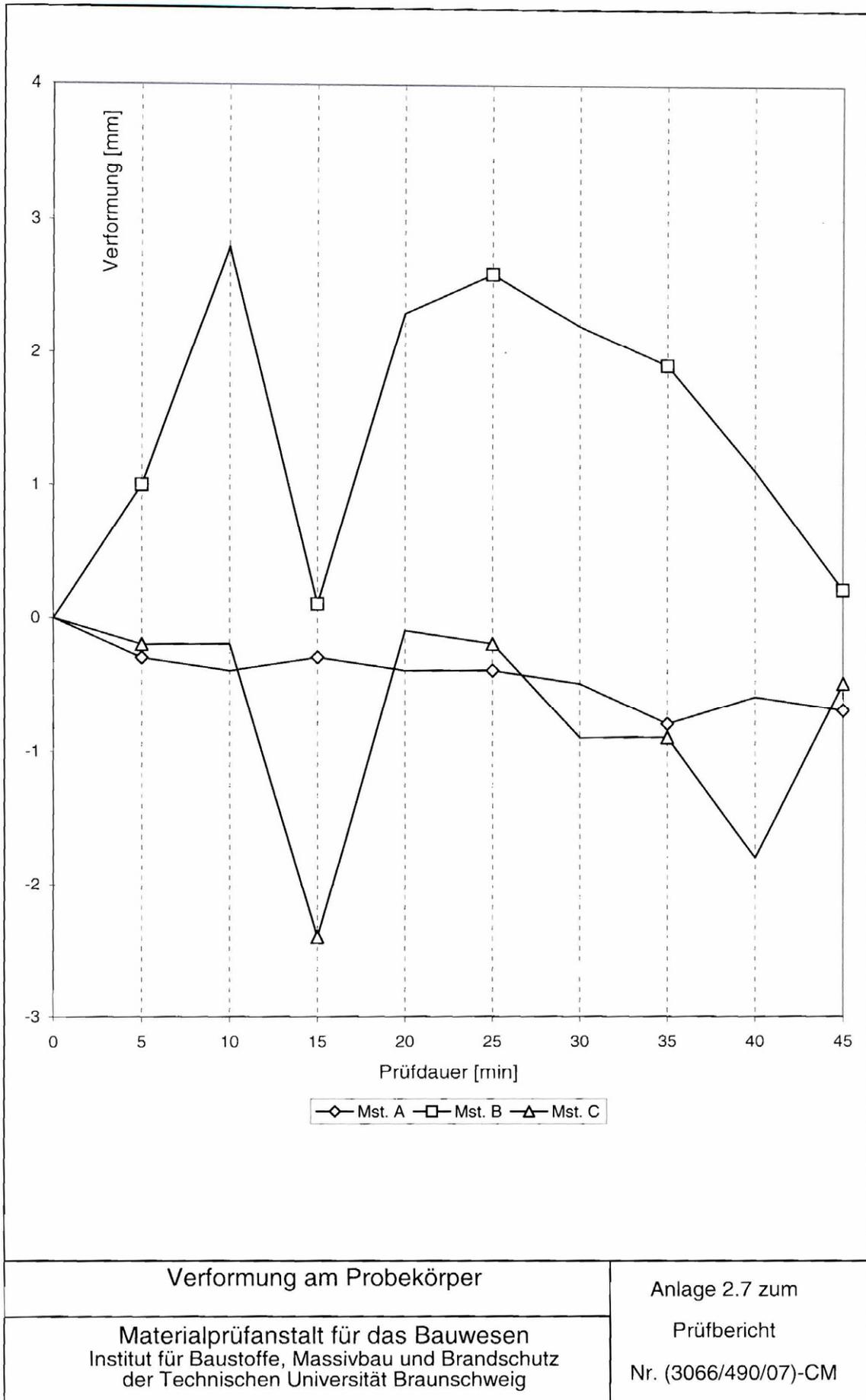


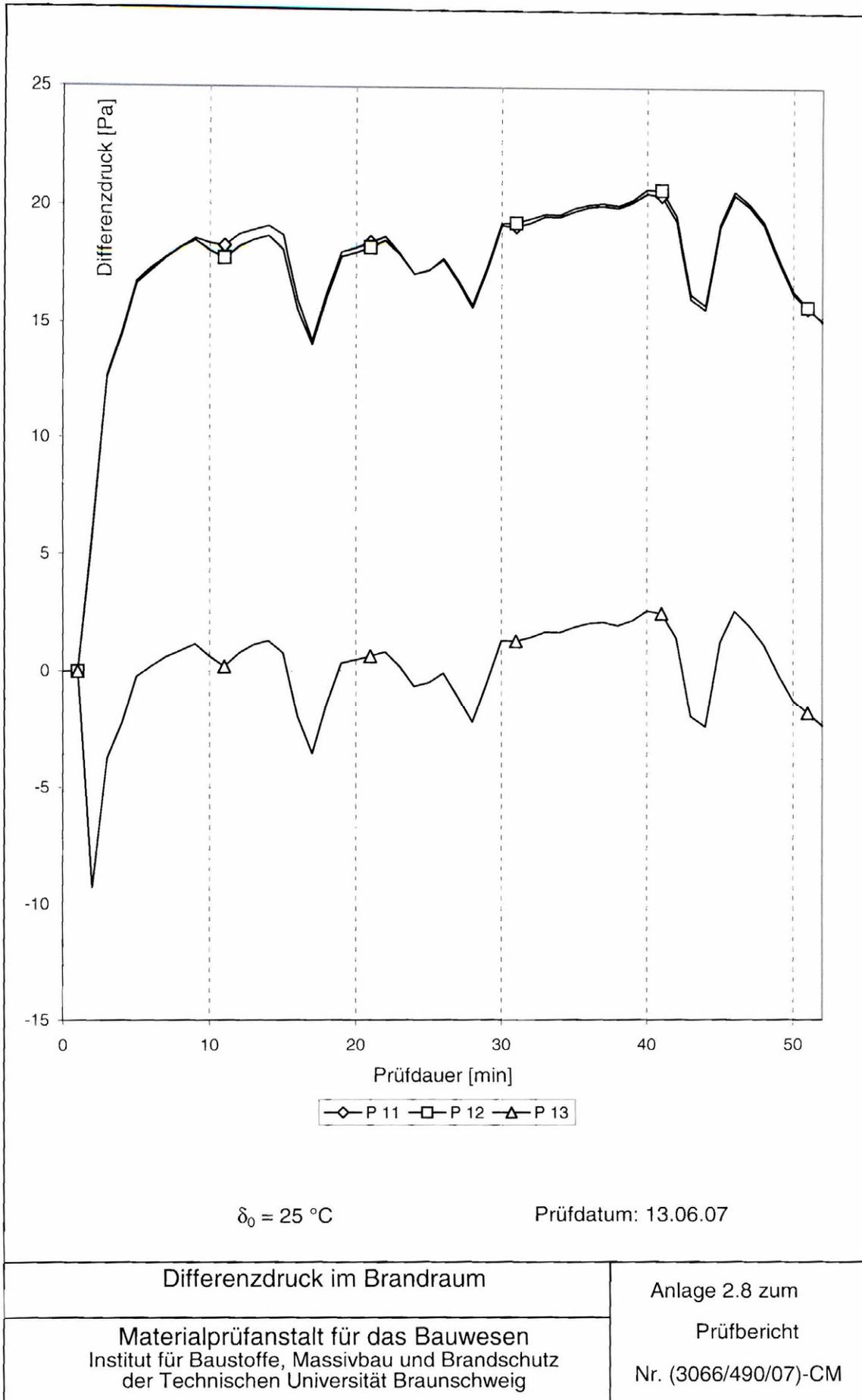












Prüf- dauer (min)	Seite (*)	Beobachtungen während der Brandprüfung am 13.06.2007
15 Min vor BV	-	Last aufgebracht: 110 kN insgesamt; 55 kN je Presse.
1	F	Die Putzschicht verfärbt sich leicht dunkel.
7	F	Es bilden sich Risse an den Holzständern.
7	A	Rissbildung und Austritt geringer Mengen Rauch auf der unbeflammten Seite.
11	F	Der Putz bröselt zum Teil ab. An der Wand gibt es Ausbeulungen und es bilden sich weitere Risse.
22	F	Die Putzschicht ist zum Teil abgefallen.
22	A	Die Rauchentwicklung hat wieder nachgelassen.
40	A	Die Vorstellwand wurde vorgefahren. Es ist keine Verformungsmessung mehr möglich.
48	A	Durchbrand im Bereich des oberen Rähms.
52	A	Weiterer Durchbrand im Bereich des oberen Rähms.
53		Ende der Beflammung.
56		Die Last wurde herunter genommen.

*) F: beflamnte Seite
A: unbeflammte Seite

Beobachtungen	Anlage 2.9 zum Prüfbericht
Materialprüfanstalt für das Bauwesen Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig	Nr. (3066/490/07) – CM



Abbildung 1: Herstellung der Wandkonstruktion



Abbildung 2: Während des Brandversuchs

Fotodokumentation

Materialprüfanstalt für das Bauwesen
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

Anlage 3.1 zum
Prüfbericht
Nr. (3066/490/07) – CM

7.1.12 Allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis

Allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis

Prüfzeugnis Nummer:

P-3048/817/08-MPA BS

Gegenstand:

Tragende, raumabschließende Außenwandkonstruktion der Feuerwiderstandklasse F 30 gemäß DIN 4102-2 : 1977-09 bei einseitiger Brandbeanspruchung

Antragsteller:

Fachverband Strohballenbau Deutschland e. V.
Sieben Linden 1

D - 38486 Bandau

Ausstellungsdatum:

24. Juni 2008

Geltungsdauer bis:

24. Juni 2013

Aufgrund dieses allgemeinen bauaufsichtlichen Prüfzeugnisses ist der obengenannte Gegenstand im Sinne der Landesbauordnung des jeweiligen Bundeslandes anwendbar.

Dieses allgemeine bauaufsichtliche Prüfzeugnis umfasst 8 Seiten und 1 Anlage.



Dieses allgemeine bauaufsichtliche Prüfzeugnis darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge oder Kürzungen bedürfen der schriftlichen Genehmigung der MPA Braunschweig. Dokumente ohne Unterschrift und Stempel haben keine Gültigkeit. Jede Seite dieses allgemeinen bauaufsichtlichen Prüfzeugnisses ist mit dem Dienstsiegel der MPA Braunschweig versehen.

Materialprüfanstalt (MPA)
für das Bauwesen
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

Fon +49 (0)531-391-5400
Fax +49 (0)531-391-5900
info@mpa.tu-bs.de
www.mpa.tu-bs.de

Norddeutsche LB Hannover
106 020 050 BLZ 250 500 00
Swift-Code: NOLADE 2H
USt.-ID-Nr. DE183500654
Steuer-Nr.: 14/201/22859
IBAN: DE5825050000106020050

Notified body (0761-CPD)
Die MPA Braunschweig ist für Prüfung, Überwachung, Inspektion und Zertifizierung bauaufsichtlich anerkannt und notifiziert. Die MPA Braunschweig ist als Prüf- und Kalibrierlaboratorium nach ISO/IEC 17025 und als Inspektionsstelle nach ISO/IEC 17020 akkreditiert.

1 Gegenstand und Anwendungsbereich

1.1 Gegenstand

- 1.1.1 Das allgemeine bauaufsichtliche Prüfzeugnis (abP) gilt für die Herstellung und Anwendung von tragenden, raumabschließenden Außenwandkonstruktionen die bei einseitiger Brandbeanspruchung der Feuerwiderstandsklasse F 30, Benennung (Kurzbezeichnung) F 30-B nach DIN 4102-2 : 1977-09) angehören.

Das allgemeine bauaufsichtliche Prüfzeugnis für die Bauart wird auf Grundlage der Angaben in der Bauregelliste (BRL) A, Teil 3, lfd. Nr. 2.1, in der jeweils gültigen Fassung erteilt.

- 1.1.2 Die tragende, raumabschließende Außenwandkonstruktion muss aus einem Holzständerwerk mit dazwischen angebrachter Wärmedämmung aus „Baustrohballen“ und beidseitig aufgetragenen Lehmputz bestehen. Details sind dem Abschnitt 2 zu diesem allgemeinen bauaufsichtlichen Prüfzeugnis zu entnehmen.

1.2 Anwendungsbereich

- 1.2.1 Die Außenwandkonstruktion muss mit den aussteifenden Bauteilen kraftschlüssig (druck- und zugfest) entsprechend den Bestimmungen von DIN 1052 verbunden werden und bei einem Wandanschluss hinsichtlich der Konstruktionsdetails die Randbedingungen von DIN 4102-4 : 1994-03, Bild 42 erfüllen.
- 1.2.2 Die aussteifenden und unterstützenden Bauteile der Außenwand müssen in ihrer aussteifenden und unterstützenden Wirkung mindestens der Feuerwiderstandsklasse F 30 angehören.
- 1.2.3 Die Wandkonstruktion darf mit beliebigen Wandbreiten und mit Wandhöhen ≤ 3 m ausgeführt werden, wenn die statischen Randbedingungen entsprechend Abschnitt 2.1.1 eingehalten werden.
- 1.2.4 Übliche Anstriche oder Beschichtungen bis zu 0,5 mm Dicke sowie zusätzliche Bekleidungen (Bekleidungen aus Stahlblech ausgenommen) sind erlaubt. Dampfsperren (z. B. PE-Folien) beeinflussen die Feuerwiderstandsklassifizierung nicht.
- 1.2.5 Hinsichtlich der Außenwandbekleidung und der Ausbildung der Dachanschlüsse sind die Anforderungen der jeweiligen Landesbauordnung einzuhalten.
- 1.2.6 Durch die Wände dürfen vereinzelt elektrische Leitungen durchgeführt werden, wenn der verbleibende Lochquerschnitt mit Gips oder mit Mörtel nach DIN 18 550-2 vollständig verschlossen wird.

Für die Durchführung von gebündelten elektrischen Leitungen sind Abschottungen erforderlich deren Feuerwiderstandsklasse durch Prüfungen nach DIN 4102-9 : 1990-05 nachzuweisen ist; es sind weitere Eignungsnachweise, z. B. im Rahmen der Erteilung einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung, erforderlich.

-) Dieses allgemeine bauaufsichtliche Prüfzeugnis enthält durch datierte und undatierte Verweisungen Festlegungen aus anderen Publikationen. Die Verweisungen sind an den jeweiligen Stellen im Text zitiert, und die Publikationen sind auf Seite 7 aufgeführt. Bei datierten Verweisungen müssen spätere Änderungen oder Überarbeitungen dieser Publikationen bei diesem allgemeinen bauaufsichtlichen Prüfzeugnis berücksichtigt werden. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe der in Bezug genommenen Publikationen.



- 1.2.7 Für die Durchführung von Rohrleitungen sind Abschottungen erforderlich deren Feuerwiderstandsklasse durch Prüfungen nach DIN 4102-11 : 1985-12 nachzuweisen ist. Es sind weitere Eignungsnachweise, z. B. im Rahmen der Erteilung einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung oder eines allgemeinen bauaufsichtlichen Prüfzeugnisses, erforderlich.
- 1.2.8 Wenn in raumabschließenden Wänden mit bestimmter Feuerwiderstandsklasse Verglasungen oder Feuerschutzabschlüsse mit bestimmter Feuerwiderstandsklasse eingebaut werden sollen, ist die Eignung dieser Einbauten in Verbindung mit der Wand nach DIN 4102-5: 1977-09, bzw. DIN 4102-13: 1990-05 nachzuweisen; es sind weitere Eignungsnachweise erforderlich – z. B. im Rahmen der Erteilung einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung.
- 1.2.9 Aus den für die Bauart gültigen technischen Baubestimmungen (z.B. Bauordnung, Sonderbauvorschriften oder Richtlinien) können sich weitergehende Anforderungen oder ggf. Erleichterungen ergeben.
- 1.2.10 Aufgrund der Erklärung des Antragstellers werden in der Bauart keine Produkte verwendet, die der Gefahrstoffverordnung, der Chemikalienverbotsverordnung oder der FCKW-Halon-Verbotsverordnung unterliegen bzw. es werden die Auflagen aus den o. a. Verordnungen (insbesondere der Kennzeichnungspflicht) eingehalten.

Weiterhin erklärt der Antragsteller, dass - sofern für den Handel und das Inverkehrbringen oder die Verwendung Maßnahmen im Hinblick auf die Hygiene, den Gesundheitsschutz oder den Umweltschutz zu treffen sind - diese vom Antragsteller veranlasst bzw. in der erforderlichen Weise bekannt gemacht werden.

Daher bestand kein Anlass, die Auswirkungen der Bauprodukte im eingebauten Zustand auf die Erfüllung von Anforderungen des Gesundheits- und Umweltschutzes zu prüfen.

2 Bestimmungen für die Ausführung

2.1 Bestimmungen für die Ausführung der tragenden, raumabschließenden Außenwandkonstruktion

2.1.1 Unterkonstruktion

2.1.1.1 Holzwerkstoff und Abmessungen

Die Schwelle, Rähm und Holzrippen müssen aus Nadelnschnittholz mindestens der Sortierklasse S 10 nach DIN 1052 bzw. DIN 4074-1 mit den Abmessung von Breite x Dicke $\geq 60 \text{ mm} \times \geq 360 \text{ mm}$ bestehen. Die Befestigung der Schwelle bzw. des Rähms mit den Ständern erfolgt mit jeweils zwei Schrauben $\geq 8 \times 200 \text{ mm}$.

Stahl-Windrispenbänder mit einer Dicke von $\leq 2 \text{ mm}$, über Kreuz angeordnet, dürfen auf der Holzkonstruktion befestigt werden.

Am Ständerwerk muss auf jeder Seite der Holzständer eine Aufleistung $b \times d = 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ angeordnet werden.

Der Holzständerabstand (Achismaß) muss $d \leq 1040 \text{ mm}$ betragen.

Im Übrigen sind bei der Dimensionierung der Wandkonstruktion die Vorgaben von DIN 1052 zu berücksichtigen.



2.1.1.2 Bemessung

Die zulässige Spannung $\sigma = F / A$ in dem Holzständerquerschnitt mit den Abmessungen $b \times h \geq 60 \text{ mm} \times 360 \text{ mm}$ darf den Wert $\sigma = 5,8 \text{ N/mm}^2$ nicht überschreiten. Forderungen anderer Normen, allgemeiner bauaufsichtlicher Verwendbarkeitsnachweise oder technischer Richtlinien bleiben unberührt.

Die maximal zulässige Schlankheit der Holzständer beträgt für das Knicken in Bauteilebene $\lambda_z = 173$ sowie für das Knicken aus der Bauteilebene $\lambda_y = 29$.

2.1.2 Dämmung

Die Gefache zwischen den Holzständern müssen mit einer etwa 360 mm dicken Strohballendämmung „Baustrohballen“ entsprechend der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung Nr. Z-23.11-1595 ausgefüllt werden. Die Dämmung muss durch strammes Einpassen in den Gefachen gegen Herausfallen gesichert werden.

2.1.3 Fugen

Alle Lagerfugen zwischen den Getreidestrohballen untereinander und zwischen den Getreidestrohballen und den Holzbauteilen (Ständerwerk, Schwelle, Rähm, usw.) müssen mit Getreidestroh dicht gestopft werden.

2.1.4 Putz

Auf die Holzkonstruktion muss vorrödeltes Schilfrohr als Putzträger für den Lehmputz aufgenagelt werden.

Auf beiden Seiten der Wandkonstruktion muss eine etwa $\geq 8 \text{ mm}$ dicke Fertigputzmischung der Firma „Claytec“ oder ein $\geq 20 \text{ mm}$ dicker Lehmputz nach „Lehmbauregeln des Dachverbandes Lehm e.V.“ in den Strohungrund eingearbeitet werden.

Als Lehmputz nach „Lehmbauregeln des Dachverbandes Lehm e.V.“ muss ein Lehmputzmörtel verwendet werden, der sich aus abgemagerten Baulehm mit Zuschlägen von Sand und Pflanzenfasern zusammensetzt. Der Lehmputz muss beidseitig der Wandkonstruktion manuell in zwei Lagen aufgetragen werden. Im 1. Arbeitsgang müssen zunächst die Fugen und andere Unebenheiten mit Lehmputz aufgefüllt und anschließend eine erste Tragschicht auf die Wand aufgetragen werden. Abschließend wird der Lehmputz mit einer Dicke $\geq 20 \text{ mm}$ aufgebracht.

2.1.5 Anschlüsse umgebende Bauteile

Decken-, Fußboden- und Wandanschlüsse an klassifizierte Massivbauteile müssen gemäß DIN 4102-4 : 1994-03, Abschnitt 4.12.6.1 ausgeführt werden.

Weitere Einzelheiten zum Wandaufbau sind der Anlage 1 zu diesem allgemeinen bauaufsichtlichen Prüfzeugnis zu entnehmen.

2.2 Eigenschaften und Zusammenstellung der verwendeten Bauprodukte

Für die zu verwendenden Bauprodukte gelten die in der folgenden Tabelle 1 zusammengestellten Angaben hinsichtlich der Bezeichnung, der Materialkennwerte, der bauaufsichtlichen Benennung und des Verwendbarkeitsnachweises.



Tabelle 1: Zusammenstellung der Kennwerte der Bauprodukte

Bauprodukt/ ggf. Verwendbarkeitsnachweis	Dicke (Nennmaß) [mm]	Rohdichte (Nennwert) [kg/m ³]	Bauaufsichtliche Benennung nach BRL
Holzständer/Rähm, aus Nadelholz Sortierklasse S 10 nach DIN 1052 bzw. DIN 4074-1	≥ 60 x 360	≥ 350	normalentflammbar
Wärmedämmstoff „Baustrohballen“ nach abZ ¹⁾ NR. Z-23.11-1595	≥ 360	90-110	schwerentflammbar ²⁾
Fertigputzmischung der Firma „Claytec“	≥ 8	1600	
Lehmputz gemäß Lehmbauregeln	≥ 20	1600	

¹⁾ abZ :> Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung

²⁾ In Verbindung mit der Lehmputzschicht erfüllt die Strohballenoberfläche „Baustrohballen“ die Kriterien eines schwerentflammbaren Baustoffs (Klassifizierung B-s1,d0), siehe auch Klassifizierungsbericht K-3305/5508/07-MPA BS

3 Übereinstimmungsnachweis

Der Anwender der Bauart hat zu bestätigen, dass die Bauart entsprechend den Bestimmungen des allgemeinen bauaufsichtlichen Prüfzeugnisses ausgeführt wurde und die hierbei verwendeten Bauprodukte den Bestimmungen des allgemeinen bauaufsichtlichen Prüfzeugnisses entsprechen (Muster für diese Übereinstimmungserklärung siehe Seite 8).

4 Rechtsgrundlage

Dieses allgemeine bauaufsichtliche Prüfzeugnis wird aufgrund der §§ 25a ff der Niedersächsischen Bauordnung (NBauO) in der Fassung der Bekanntmachung vom 10. Februar 2003 (Nds. GVBl. S. 89) zuletzt geändert durch Artikel 3 des Gesetzes vom 12. Juli 2007 (Nds. GVBl. S. 324) in Verbindung mit der Bauregelliste A in der jeweils gültigen Fassung erteilt. In den Landesbauordnungen der übrigen Bundesländer sind entsprechende Rechtsgrundlagen enthalten.

5 Rechtsbehelfsbelehrung

Gegen diesen Bescheid ist der Widerspruch zulässig. Er ist innerhalb eines Monats nach Zugang dieses Bescheids schriftlich oder zur Niederschrift bei der Materialprüfanstalt für das Bauwesen, Beethovenstraße 52, 38106 Braunschweig einzulegen. Maßgeblich für die Rechtzeitigkeit des Widerspruches ist der Zeitpunkt des Eingangs der Widerspruchsschrift bei der Materialprüfanstalt für das Bauwesen, Braunschweig.

6 Allgemeine Hinweise

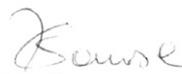
- 6.1 Das allgemeine bauaufsichtliche Prüfzeugnis ersetzt nicht die für die Durchführung von Bauvorhaben gesetzlich vorgeschriebenen Genehmigungen, Zulassungen und Bescheinigungen.



- 6.2 Das allgemeine bauaufsichtliche Prüfzeugnis wird unbeschadet der Rechte Dritter, insbesondere privater Schutzrechte, erteilt.
- 6.3 Hersteller bzw. Verreiber der Bauart haben, unbeschadet weitergehender Regelungen, dem Anwender der Bauart Kopien des allgemeinen bauaufsichtlichen Prüfzeugnisses zur Verfügung zu stellen. Der Anwender hat das allgemeine bauaufsichtliche Prüfzeugnis auf der Baustelle bereitzuhalten.
- 6.4 Das allgemeine bauaufsichtliche Prüfzeugnis darf nur vollständig vervielfältigt werden. Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf der Zustimmung der Materialprüfanstalt für das Bauwesen, Braunschweig. Texte und Zeichnungen von Werbeschriften dürfen dem allgemeinen bauaufsichtlichen Prüfzeugnis nicht widersprechen. Übersetzungen des allgemeinen bauaufsichtlichen Prüfzeugnisses müssen den Hinweis „Von der Materialprüfanstalt für das Bauwesen, Braunschweig, nicht geprüfte Übersetzung der deutschen Originalfassung“ enthalten.
- 6.5 Das allgemeine bauaufsichtliche Prüfzeugnis wird widerruflich erteilt. Das allgemeine bauaufsichtliche Prüfzeugnis kann nachträglich ergänzt und geändert werden, insbesondere, wenn neue technische Erkenntnisse dies erfordern.


ORR Dr.-Ing. Rohling
Leiterin der Prüfstelle



i. A. 
Dipl.-Ing. Krause
Sachbearbeiterin

Braunschweig, 24. Juni 2008

Verzeichnis der mitgeltenden Normen und Richtlinien siehe folgende Seite

Verzeichnis der Normen und Richtlinien

- DIN 1052 : Holzbauwerke; Berechnung und Ausführung
- DIN 4074-1 : Sortierung von Nadelholz nach der Tragfähigkeit; Nadelschnittholz
- DIN 4102-2 : Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Bauteile; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen
- DIN 4102-4 : Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile
- DIN 4102-5 : Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Feuerschutzabschlüsse, Abschlüsse in Fahrschachtwänden und gegen Feuer widerstandsfähige Verglasungen; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen
- DIN 4102-9 : Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Kabelabschottungen; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen
- DIN 4102-11 : Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Rohrummantelungen, Rohrabschottungen, Installationsschächte und -kanäle sowie Abschlüsse ihrer Revisionsöffnungen; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen
- DIN 4102-13 : Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Brandschutzverglasungen; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen
- DIN 18 550-2 : Putze aus Mörteln mit mineralischen Bindemitteln; Ausführung
Bauregelliste in der jeweils gültigen Fassung, veröffentlicht in den DIBt-Mitteilungen



Muster für
Übereinstimmungserklärung

- Name und Anschrift des Unternehmens, das die tragende Außenwand hergestellt hat
- Baustelle bzw. Gebäude:
- Datum der Herstellung:
- Feuerwiderstandsklasse F30-B

Hiermit wird bestätigt, dass die tragende Außenwand hinsichtlich aller Einzelheiten fachgerecht und unter Einhaltung aller Bestimmungen des allgemeinen bauaufsichtlichen Prüfzeugnisses Nr. P-3048/817/08-MPA BS der Materialprüfanstalt für das Bauwesen, Braunschweig, vom 24. Juni 2008 hergestellt und eingebaut wurde.

Für die nicht vom Unterzeichner selbst hergestellten Bauprodukte oder Einzelteile (z. B. Dämmung) wird dies ebenfalls bestätigt, aufgrund

- der vorhandenen Kennzeichnung der Teile entsprechend den Bestimmungen des allgemeinen bauaufsichtlichen Prüfzeugnisses^{*)}
- eigener Kontrollen^{*)}
- entsprechender schriftlicher Bestätigungen der Hersteller der Bauprodukte oder Teile, die der Unterzeichner zu seinen Akten genommen hat.^{*)}

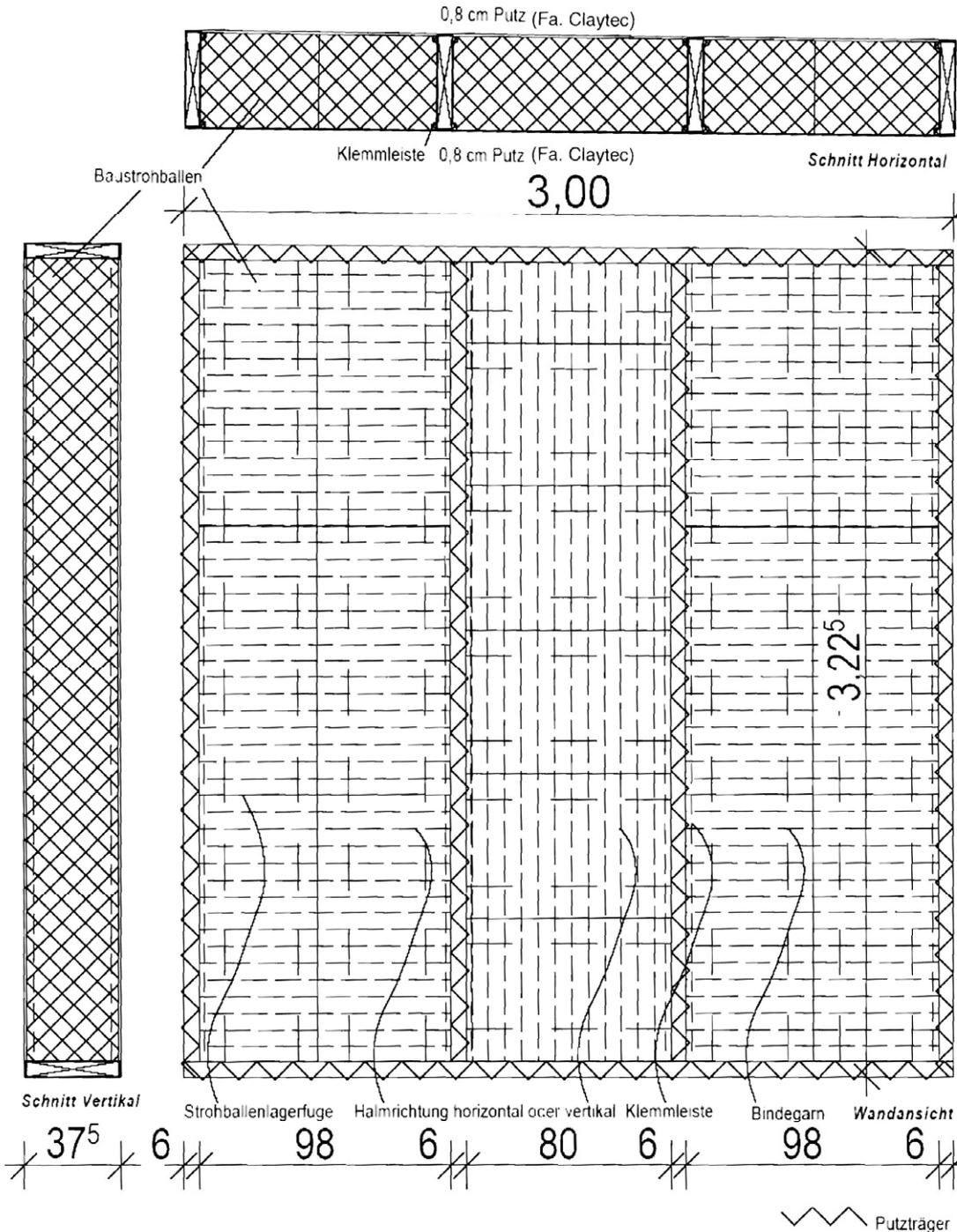
Ort, Datum

Stempel und Unterschrift

(Diese Bescheinigung ist dem Bauherrn zur Weitergabe an die zuständige Bauaufsichtsbehörde auszuhändigen.)



^{*)} Nichtzutreffendes streichen



Rahmenkonstruktion:
6/36 cm Bohlen NH
verschraubt mit je 2x 8/200 mm
Scheibenkopfschrauben

Strohballen: Abmessungen
(hxbxl) 36x48x54-100 cm
Befestigung m. Klemmleisten 2x2cm

Bekleidung: Lenmputz,
2- Lagenig mit Strohhacksel.
Dicke ≥ 2 cm Holzteile mit
Putzträger: verr. Schilfroh.

alle Maße in mm

Tragende Außenwand F 30-B
nach DIN 4102-2 : 1977-09

Ansicht und Schnitt



Anlage 1 zum
abP Nr.:
P 3048/817/08-MPA BS
vom 24. Juni 2008

7.2 Feuerwiderstandstest an einer lehmverputzten lasttragenden Strohballenwand: Prüfbericht

Prüfbericht

Dokumentnummer:	(3067/491/07) – NB vom 11.06.2008
Auftraggeber:	Fachverband Strohballenbau Deutschland e.V. Sieben Linden 1 38486 Bandau
Auftrag vom:	17.04.2007
Auftragszeichen:	Hr. Scharmer
Auftragseingang:	17.04.2007
Inhalt des Auftrags:	Prüfung einer etwa 540 mm dicken, tragenden, raumabschließenden und wärmedämmenden Strohballenwandkonstruktion auf Brandverhalten zur Ermittlung der Feuerwiderstandsdauer bei einseitiger Brandbeanspruchung
Prüfungsgrundlage:	in Anlehnung an DIN EN 1365-1 : 1999-10 in Verbindung mit DIN EN 1363-1 : 1999-10
Probeneingang:	23. KW 2007
Probennahme:	Angaben über eine amtliche Entnahme liegen der Prüfanstalt nicht vor.
Probenkennzeichnung:	keine
Prüftermin:	04.07.2007



Dieser Prüfbericht umfasst 8 Seiten inkl. Deckblatt und 11 Anlagen.

Dieser Prüfbericht darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge oder Kürzungen bedürfen der schriftlichen Genehmigung der MPA Braunschweig. Dokumente ohne Unterschrift und Stempel haben keine Gültigkeit. Das Deckblatt und die Unterschriftenseite dieses Dokuments sind mit dem Stempel der MPA Braunschweig versehen. Das Probenmaterial ist verbraucht. Die Akkreditierungen gelten für die in den aktuellen Urkunden aufgeführten Prüfverfahren. Die Liste der akkreditierten Bereiche ist auf Anforderung erhältlich.

Materialprüfanstalt (MPA)
für das Bauwesen
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

Fon +49 (0)531-391-5400
Fax +49 (0)531-391-5900
info@mpa.tu-bs.de
www.mpa.tu-bs.de

Norddeutsche LB Hannover
106 020 050 BLZ 250 500 00
Swift-Code: NOLADE 2H
USt.-ID-Nr. DE183500654
Steuer-Nr.: 14/201/22859
IBAN: DE5825050000106020050

Notified body (0761-CPD)
Die MPA Braunschweig ist für Prüfung, Überwachung, Inspektion und Zertifizierung bauaufsichtlich anerkannt und notifiziert. Die MPA Braunschweig ist als Prüf- und Kalibrierlaboratorium nach ISO/IEC 17025 und als Inspektionsstelle nach ISO/IEC 17020 akkreditiert.

1 Allgemeines

Auftragsgemäß sollte eine tragende, raumabschließende, wärmedämmende Strohballenwandkonstruktion auf Brandverhalten in Anlehnung an DIN EN 1365-1 : 1999-10 in Verbindung mit DIN EN 1363-1 : 1999-10 zur Ermittlung der Feuerwiderstandsdauer bei einseitiger Brandbeanspruchung geprüft werden. Die Wand bestand im Wesentlichen aus:

- einer tragenden Strohballenwandkonstruktion „Baustrohballen“ mit seitlich angeordneten nichttragenden Holzständern,
- einer symmetrisch aufgetragenen 30 mm dicken Putzschicht.

Dieser Prüfbericht beschreibt ausführlich das Montageverfahren, die Prüfbedingungen und die Ergebnisse, die mit dem hier beschriebenen spezifischen Bauteil erzielt wurden, nachdem dieses nach dem in Anlehnung an DIN EN 1365-1 : 1999-10 in Verbindung mit DIN EN 1363-1 : 1999-10 dargestellten Verfahren geprüft wurde. Jede wesentliche Abweichung hinsichtlich Größe, konstruktiver Einzelheiten, Belastungen, Spannungszustände, Randbedingungen außer den Abweichungen, die im betreffenden Prüfverfahren für den direkten Anwendungsbereich zulässig sind, ist nicht durch diesen Prüfbericht abgedeckt.

Auf Grund der Eigenart der Prüfungen der Feuerwiderstandsdauer und den daraus folgenden Schwierigkeiten bei der Quantifizierung der Unsicherheit bei der Messung der Feuerwiderstandsdauer ist es nicht möglich, einen festgelegten Genauigkeitsgrad des Ergebnisses anzugeben.

Die Materialprüfanstalt Braunschweig war an der Auswahl des Probekörpers nicht beteiligt.

2 Beschreibung der geprüften Konstruktion

Die etwa 540 mm dicke Wandkonstruktion wurde in einem Prüfraum der Prüfanstalt (Norm-Tragkonstruktion entsprechend DIN EN 1363-1 : 1999-10, Abschnitt 7.2.2.1) als zweiseitig gehaltene Wand errichtet.

Die Wandkonstruktion (Breite x Höhe = 3000 mm x 2600 mm) bestand im Wesentlichen aus einer tragenden Strohballenwandkonstruktion „Baustrohballen“ mit seitlich angeordneten nichttragenden Holzständern und einem beidseitig angeordneten Lehmputz gemäß Lehmbauregeln (Fertigputzmischung der Firma „Claytec“).

Als Schwell- bzw. Rähmholz wurden jeweils zwei 3000 mm lange Kanthölzer $b \times d = 78 \text{ mm} \times 78 \text{ mm}$ angeordnet. Die Strohballen und die Fußschwelle wurden mit Rundhölzern ($d \times l = 25 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$) miteinander verbunden. An der linken und rechten Wandseite wurden nichttragende Holzständer ($b \times d = 78 \text{ mm} \times 78 \text{ mm}$) zur Stabilisation der Wandkonstruktion eingestellt. Der Achsabstand der Holzständer betrug von 2860 mm. Jeder Holzständer war mit dem Schwellholz mit je zwei Würth ASSI Schrauben (Typ SK 8 x 200 mm) verbunden. Das Kopfrähm wurde so ausgesägt, dass es die Ständer umfasste und sich frei nach oben und unten bewegen konnte. Über das Kopfrähm erfolgte die Komprimierung der Wandkonstruktion und die Lasteinleitung während der Prüfung. Die Vorkomprimierung erfolgte mit 19 mm breiten Verpackungsspannbändern aus Polypropylen, die in einem Abstand von etwa 300 mm angeordnet wurden. Die Komprimierung betrug etwa 4 % der Wandhöhe.

Die tragende Wandkonstruktion bestand im Wesentlichen aus etwa 480 mm dicken Strohballen „Baustrohballen“. Die Strohballen wurden liegend im Kreuzverband angeordnet. Die stumpf gestoßenen Fugen wurden mit Stroh ausgestopft.

Auf der Außen- sowie auf der Innenseite wurde jeweils eine ca. 30 mm dicke Lehmputzschicht in zwei Arbeitsgängen aufgebracht. Im ersten Arbeitsgang wurden der Putz in den Untergrund eingearbeitet. Im anschließenden zweiten Arbeitsgang wurde die endgültige Putzdicke aufgebracht und der Putz mit einem Reibebrett glattgezogen.

Weitere Einzelheiten zum Aufbau der Wandkonstruktion sind der Anlage 1.2 zu diesem Prüfbericht zu entnehmen.

3 Probekörper- und Baustoffkennwerte

Zum Zeitpunkt der Prüfung entsprachen die Festigkeit und der Feuchtegehalt des Probekörpers annähernd dem Zustand, der bei der üblichen Verwendung zu erwarten ist.

Für die geprüfte Konstruktion und die bei ihr verwendeten Baustoffe gelten die in Anlage 1.3 zusammengestellten Angaben hinsichtlich der Baustoffklassifizierungen, der Flächengewichte, der Rohdichten sowie der Feuchtigkeitsgehalte.

4 Prüfanordnung und -durchführung

Fachkräfte des Auftraggebers bauten den in Abschnitt 2 beschriebenen Probekörper als zweiseitig gehaltene Wand vor die lichte Öffnung einer Wandbrandkammer als vertikalen Raumabschluss ein.

Der ca. 30 mm breite Spalt zwischen Prüfraumen und Probekörper der beiden freien vertikalen Ränder war mit Mineralwolle (Baustoffklasse A, Schmelzpunkt ≥ 1000 °C) verschlossen.

Es gibt derzeit für Strohballenwände keinen statischen Nachweis. Die Strohballenwand wurde wie folgt belastet: 70 Minuten vor Beginn der Brandprüfung wurde die Prüfwand für 17 Minuten mit einer zentrisch eingeleiteten Streckenlast von $q = 10$ kN/m und anschließend mit einer Streckenlast belastet, diese betrug $q = 14,5$ kN/m. Die Belastung erfolgte nach Vorgabe des Auftraggebers.

Die Brandkammer wurde nach der Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) gemäß DIN EN 1363-1 : 1999-10, Abschnitt 5.1.1, beflammt. Zur Messung der Brandraumtemperaturen dienten 6 Stück Platten-Thermometer („Plates“) entsprechend DIN EN 1363-1 : 1999-10, Abschnitt 4.5.1.1.

Im Brandraum lag bei der Brandprüfung im oberen Bereich des Probekörpers ein statischer Überdruck gemäß DIN EN 1363-1 : 1999-10 vor.

Zur Messung der Temperaturen auf der unbeflammten Seite des Probekörpers dienten Thermoelemente gemäß DIN EN 1363-1, Abschnitt 4.5.1.2.

Die Lage der Temperatur- und Verformungsmessstellen zeigt die Anlage 1.2 zu diesem Prüfbericht.

Die vertikale Stauchung des Probekörpers wurde entsprechend DIN EN 1365-1 : 1999-10, Abschnitt 9.3.1, gemessen.

Die horizontale Durchbiegung des Probekörpers wurde entsprechend DIN EN 1365-1 : 1999-10, Abschnitt 9.3.2, in der Mitte der Prüfwand und 50 mm vom freien Rand entfernt gemessen.

Die Darstellung der Prüfeinrichtung, die Lage der Ofen-Thermoelemente und der Druckmessstellen zeigt die Anlage 1.1 zu diesem Prüfbericht.

5 Prüfergebnisse und Beobachtungen

Die während der Prüfung auf der unbeflammten Seite des Probekörpers ermittelten Temperaturerhöhungen über die Anfangstemperatur, die Temperaturen in der Brandkammer, der Differenzdruck, die Umgebungstemperatur sowie die Verformungen des Probekörpers sind in den Anlagen 2.1 bis 2.6 grafisch dargestellt.

Die Beobachtungen während der Brandprüfung sind aus der Anlage 2.7 zu ersehen.

6 Zusammenfassung der Prüfergebnisse und Leistungskriterien in Anlehnung an DIN EN 1365-1 : 1999-10 in Verbindung mit DIN EN 1363-1 : 1999-10

Am 04.07.2007 wurde eine 540 mm dicke, tragende, raumabschließende und wärmedämmende Strohballenwandkonstruktion auf Brandverhalten in Anlehnung an DIN EN 1365-1 : 1999-10 in Verbindung mit DIN EN 1363-1 : 1999-10 zur Ermittlung der Feuerwiderstandsdauer bei einseitiger Brandbeanspruchung geprüft.

Die Zusammenfassung der Prüfergebnisse und Leistungskriterien in Anlehnung an DIN EN 1365-1 : 1999-10 in Verbindung mit DIN EN 1363-1 : 1999-10 für tragende, raumabschließende, wärmedämmende Wände bei einseitiger Brandbeanspruchung sind in der Tabelle 1 zu diesem Prüfbericht dargestellt.

Tabelle 1 siehe folgende Seite.

Tabelle 1: Prüfergebnisse und Leistungskriterien in Anlehnung an DIN EN 1365-1 : 1999-10 in Verbindung mit DIN EN 1363-1 : 1999-10 für tragende, raumabschließende, wärmedämmende Wände bei einseitiger Brandbeanspruchung.

Zeile	Normbezug Angaben nach DIN EN 1363-1: 1999-10 Abschnitt	Anforderungen		Prüfergebnisse		
				Beschreibung	Probekörper 1 2-seitig gehalten Decken- und Bodenanschluss	
1	11.1	Tragfähigkeit	Grenzwert der vertikalen Stauchung	Der Grenzwert wurde überschritten nach	- min.	
2			Grenzwert der vertikalen Stauchungsgeschwindigkeit	Der Grenzwert wurde überschritten nach	- min.	
3	11.2	Raumabschluss, d.h. Vermeidung von:	Entzündung des Wattebausches	Entzündung des Wattebausches erfolgte nach:	- min. ¹⁾	
4			Auftreten von Spalten	Das Durchdringen einer Spallehre erfolgte nach:	- min. ¹⁾	
5			Flammen auf der unbellamten Seite	Anhaltende Flammenbildung trat auf nach:	- min.	
6	11.3	Wärmedämmung, d.h. Temperaturerhöhungen auf der unbellamten Seite über die Anfangstemperatur:	Prüfdauer in Minuten:	30	37	
7			max. festgestellte Temperaturerhöhung: Mittelwert in K:	< 1	1	
8			max. zu Einzelwert $\Delta T = 180$ K	max. festgestellte Temperaturerhöhung: Einzelwert in K:	< 1 [Mst. 8]	2 [Mst. 8]
9	5.6	Sonstige Angaben	Umgebungstemperatur bei Beginn der Prüfung im Labor	22°C		
10			Die Umgebungstemperatur stieg/sank während der Prüfung um max.	1 K		
11	5.2.2.1		Druck im Brandraum	siehe Anlage 2.6 ²⁾		
12	10.4.4		Prüfdauer in Minuten:	37		
13			Durchbiegung in Wandmitte (bei 30 min)	99,3 mm		
14			Durchbiegung am freien Rand (bei 30 min)	158,7 mm		

¹⁾ Bestand kein Anlass zur Prüfung und wurde daher nicht durchgeführt.

²⁾ Trotz der Abweichungen (Über-/ Unterschreitung) von den nach DIN EN 1363-1, Abschnitt 5.2 definierten Kriterien kann die Prüfung als gültig angesehen werden, da auf Grund des Abbrandes der Wandkonstruktion die Druckdifferenz während der Prüfung nicht exakt zu steuern war.

7 Schlussfolgerungen in Anlehnung an DIN EN 1365-1 : 1999-10 in Verbindung mit DIN EN 1363-1 : 1999-10

In der nachfolgenden Tabelle 2 sind die wichtigsten Prüfergebnisse unter Berücksichtigung der Leistungskriterien in Anlehnung an DIN EN 1365-1 : 1999-10 in Verbindung mit DIN EN 1363-1 : 1999-10 zusammengefasst.

Tabelle 2: Zusammenstellung der Leistungskriterien

Kriterien nach Norm	Versagen nach [Minuten]:
Tragfähigkeit	37 ¹⁾
Raumabschluss (anhaltende Flammenbildung, Wattlebensch, Spaltlehre)	37 ¹⁾
Wärmedämmung	37 ¹⁾

¹⁾ Die Prüfung wurde in Absprache mit dem Auftraggeber beendet. In der 37 Minute wurde die Belastung heruntergekommen. In der 38 Minute wurden die Brenner abgeschaltet.

Auf Grund der Prüfergebnisse in Anlehnung an DIN EN 1365-1 : 1999-10 in Verbindung mit DIN EN 1363-1 : 1999-10 und fehlender statischer Nachweise kann keine Empfehlung für die geprüfte Wand ausgesprochen werden. Die Prüfergebnisse dienen der Information des Auftraggebers.

Rohling
ORR Dr. Ing. Rohling
Leiterin der Prüfstelle



Bollmohr
i. A. Dipl.-Ing. Bollmohr
Sachbearbeiterin

Braunschweig, 11.06.2008

Verzeichnis der Anlagen

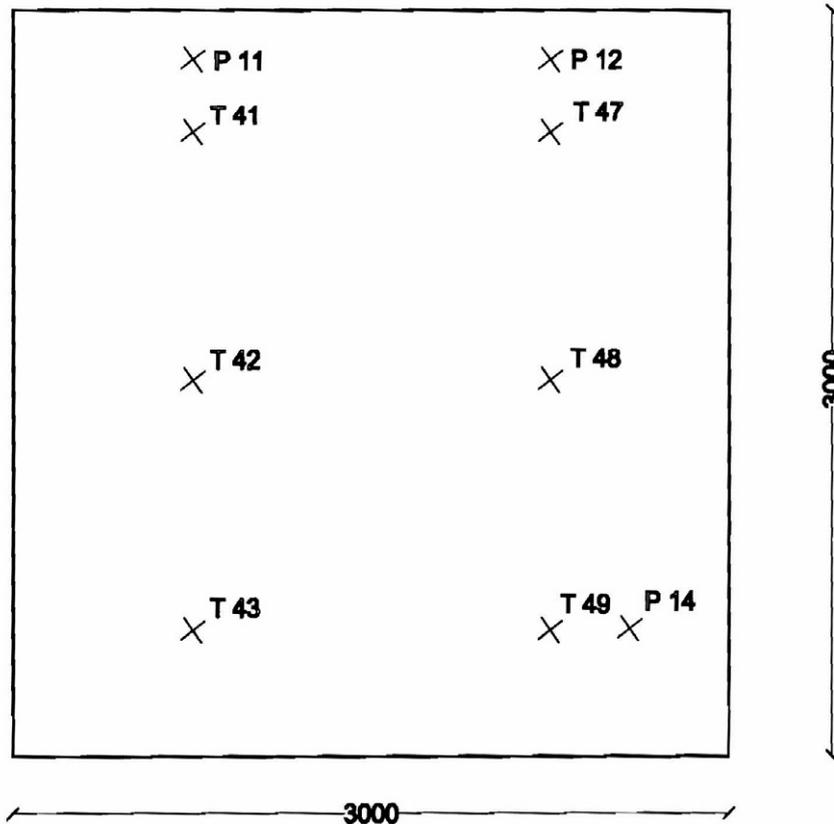
Anlage	1.1	:	Anordnung der Ofen-Thermoelemente und Druckmessstellen
Anlage	1.2	:	Konstruktiver Aufbau des Probekörpers (Messstellenanordnung)
Anlage	1.3	:	Baustoffkennwerte
Anlage	2.1	:	Temperaturen im Brandraum
Anlagen	2.2 – 2.3	:	Temperaturen am Prüfkörper
Anlage	2.4	:	Umgebungstemperatur
Anlage	2.5	:	Verformung in Wandmitte
Anlage	2.6	:	Differenzdruck
Anlage	2.7	:	Beobachtungen
Anlage	3.1	:	Fotodokumentation

Die Zeichnung der geprüften Konstruktion wurde vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt und die Angaben beim Aufbau des Probekörpers von der Prüfanstalt verifiziert.

Wandbrandhaus: Kammer 5

T41 – T43 und T47 – T49: Platten-Thermoelemente entspr. DIN EN 1363-1
mit Messstellen aus Ni-Cr/Ni-Al-Draht (TypK)

P11 – P14: Druckmesskopf



**Anordnung der Ofen-Thermoelemente
und Druckmessstellen**

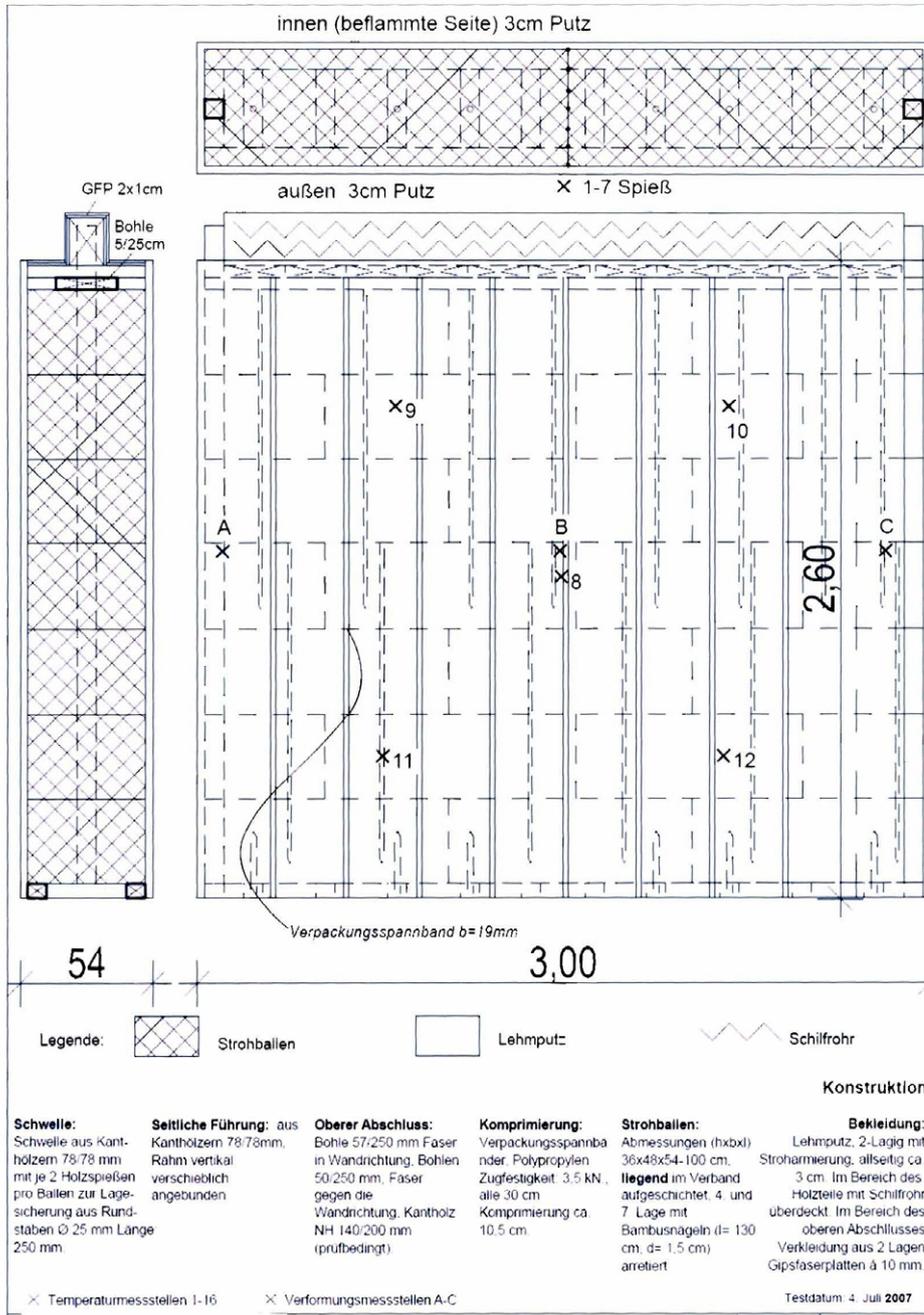
Materialprüfanstalt für das Bauwesen
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

Anlage 1.1 zum
Prüfbericht
Nr. (3067/491/07) – NB

Wandbrandhaus: Kammer 5

Messstellen:

- 1 – 7 : In der Wand
- 8 – 12 : Mittelwert auf der Wand
- 13 : Umgebungstemperatur
- A – C : Verformung



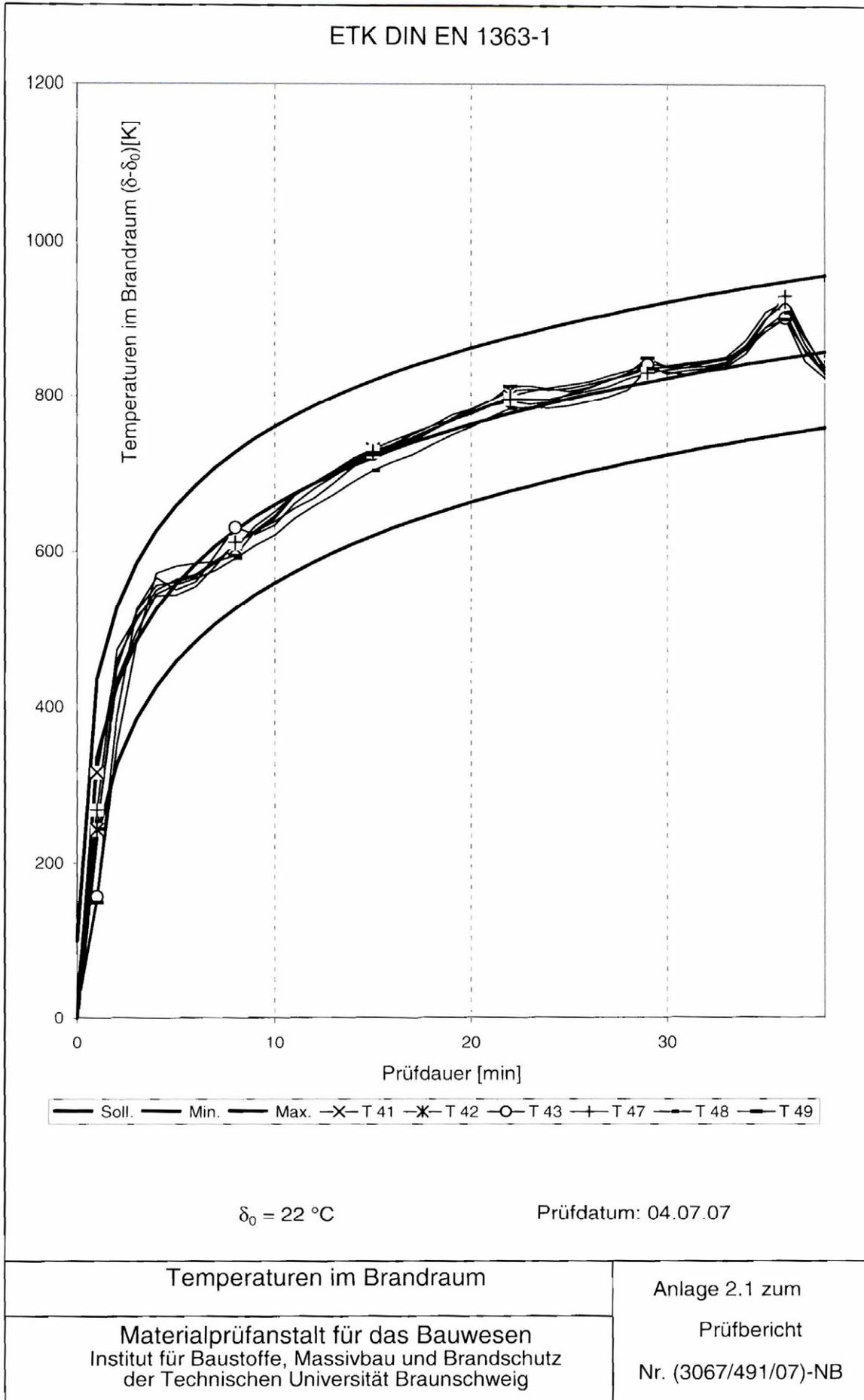
**Konstruktiver Aufbau des Probekörpers
(Messstellenanordnung)**

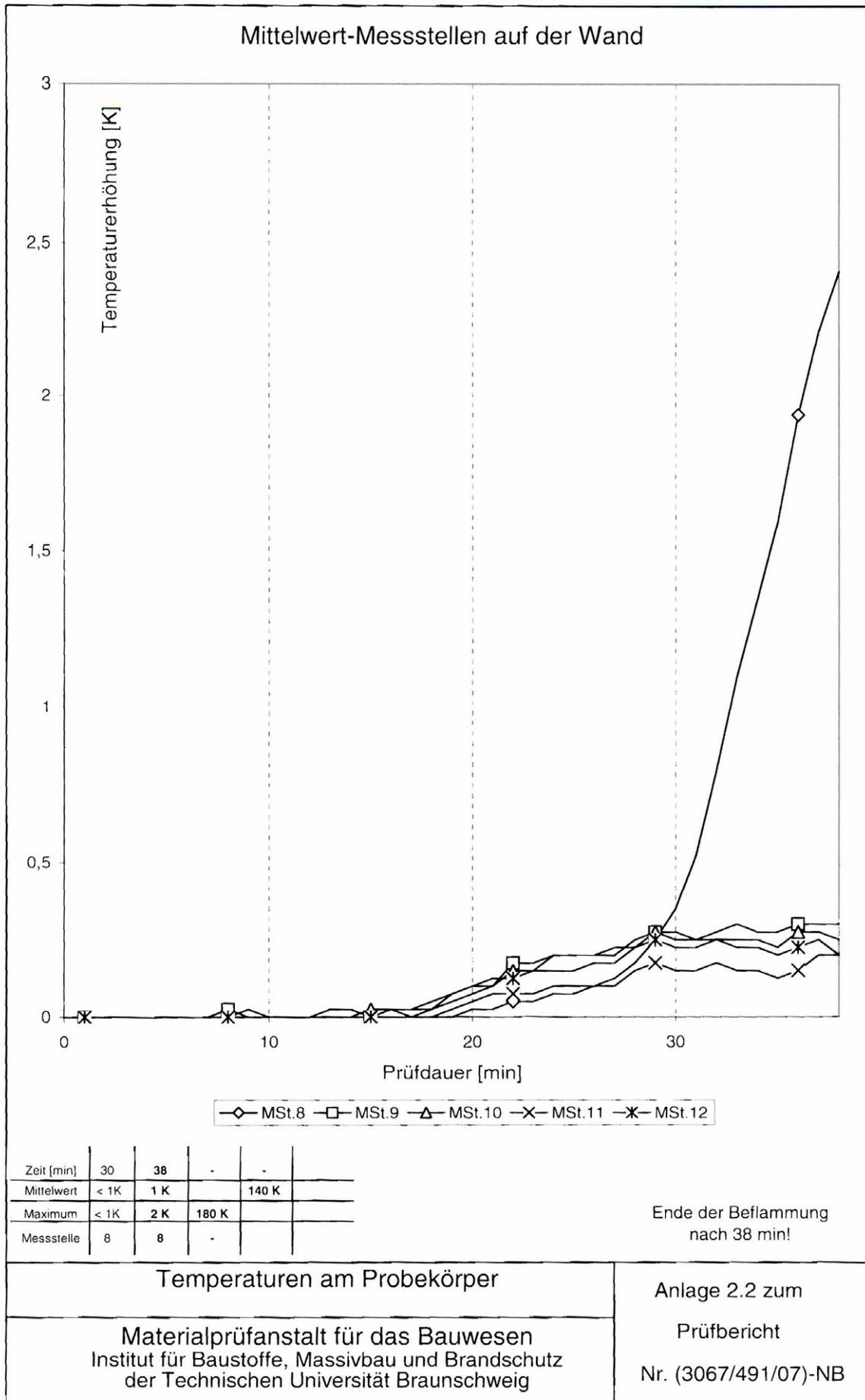
Materialprüfanstalt für das Bauwesen
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

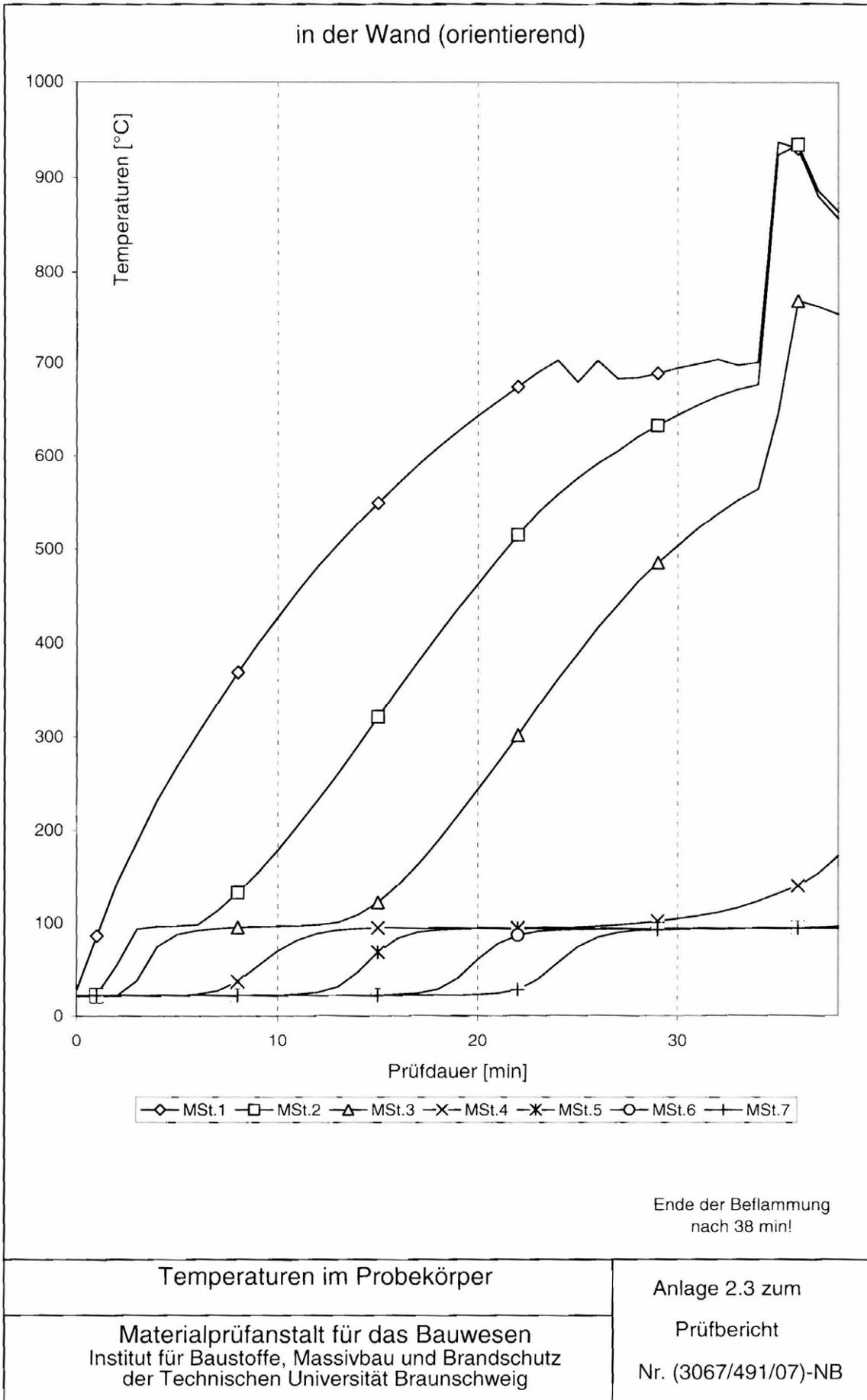
Anlage 1.2 zum
Prüfbericht

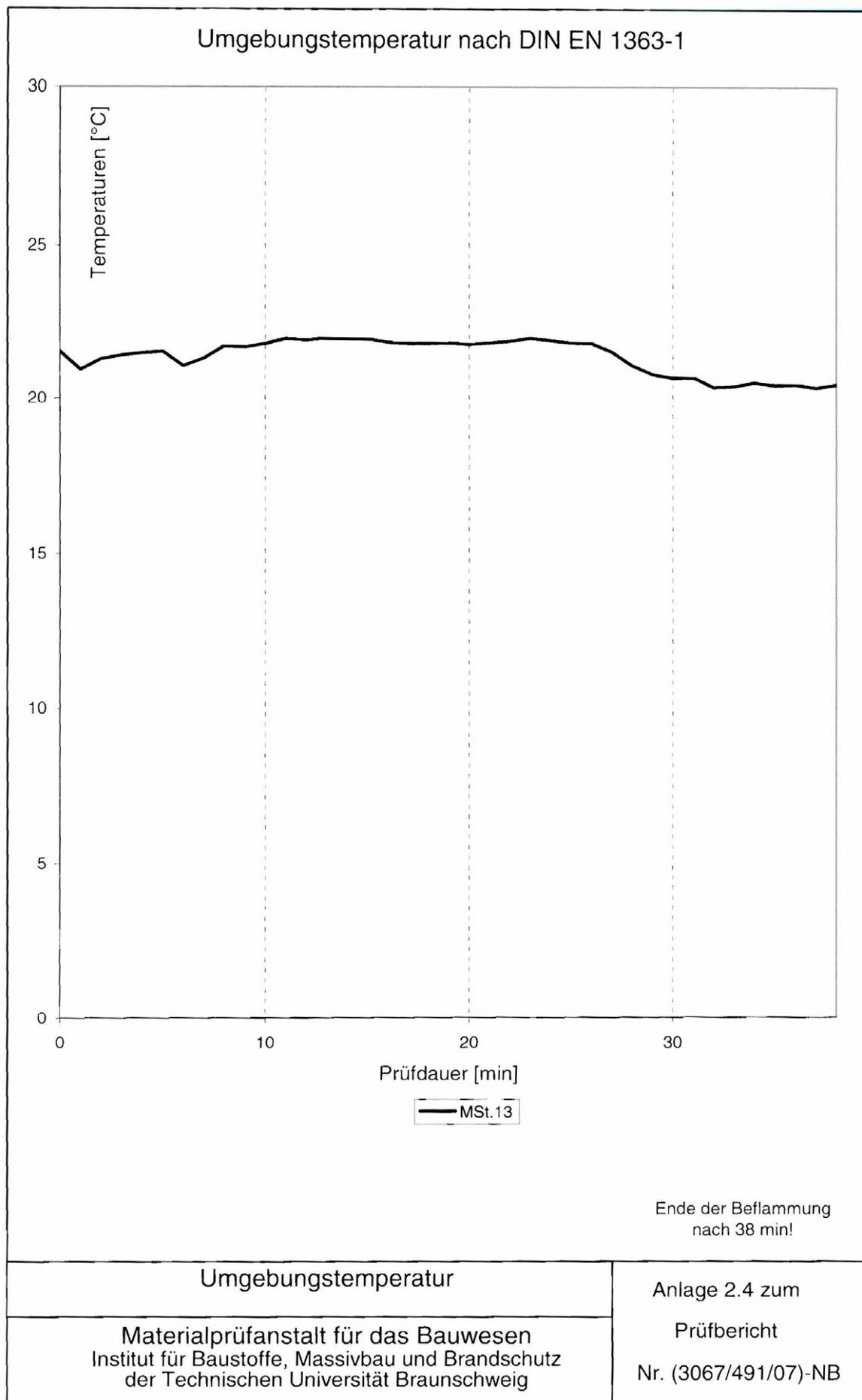
Nr. (3067/491/07) – NB

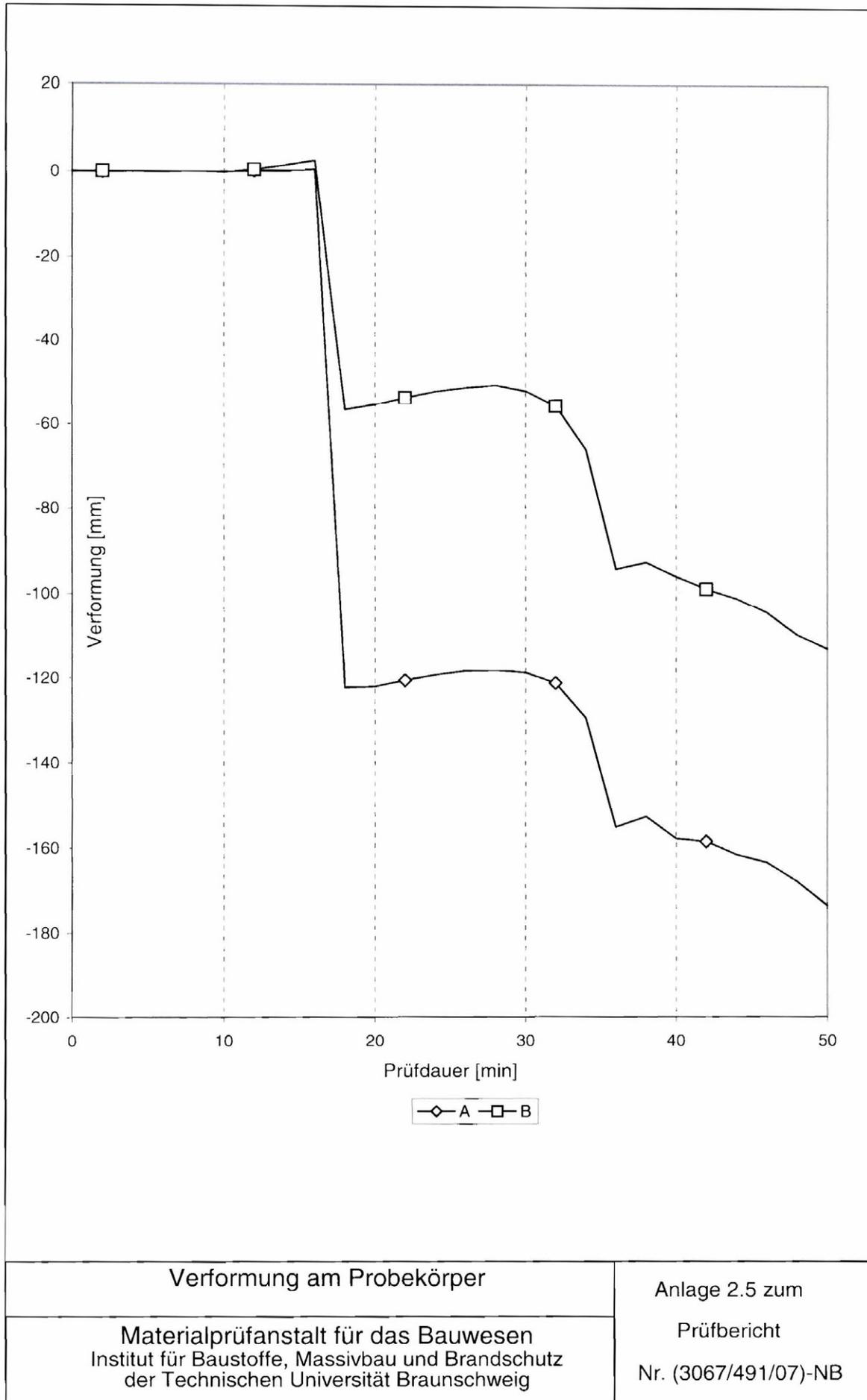
Baustoffbezeichnung	Herstellerfirma	Nennstärke bzw. Breite/Höhe	im Einbauzustand		Feuchtigkeitsgehalt	Baustoffklassifizierung Prüfzeichen
			Flächengewicht	Rohdichte		
		mm	kg/m ²	kg/m ³	Gew.-%	
Wärmedämmstoff aus Strohballen „Baustrohballen“ ¹⁾	Fachverband Strohballenbau	≥ 480	-	107,00	15	B2: normalentflammbar gem. DIN 4102-1
Lehmputz gemäß Lehmbauregeln (Fertigputzmischung der Firma „Claytec“)	Firma „Claytec“	≥ 30 mm	-	-	-	A2: nichtbrennbar gem. DIN 4102-1
Bauschnittholz (S 10) nach DIN 1052-3 bzw. DIN 4074-1	-	57/250 50/250 78/78	-	510	10,60	B2: normalentflammbar gem. DIN 4102-4
¹⁾ In Verbindung mit einer 8mm Lehmputzschicht erfüllt die Strohballenoberfläche „Baustrohballen“ die Kriterien eines schwerentflammbaren Baustoffs (Klassifizierung B-s1,d0), siehe auch Klassifizierungsbericht K-3305/558/07-MPA BS.						
Baustoffkennwerte					Anlage 1.3 zum Prüfbericht	
Materialprüfanstalt für das Bauwesen Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig					Nr. (3067/491/07) – NB	











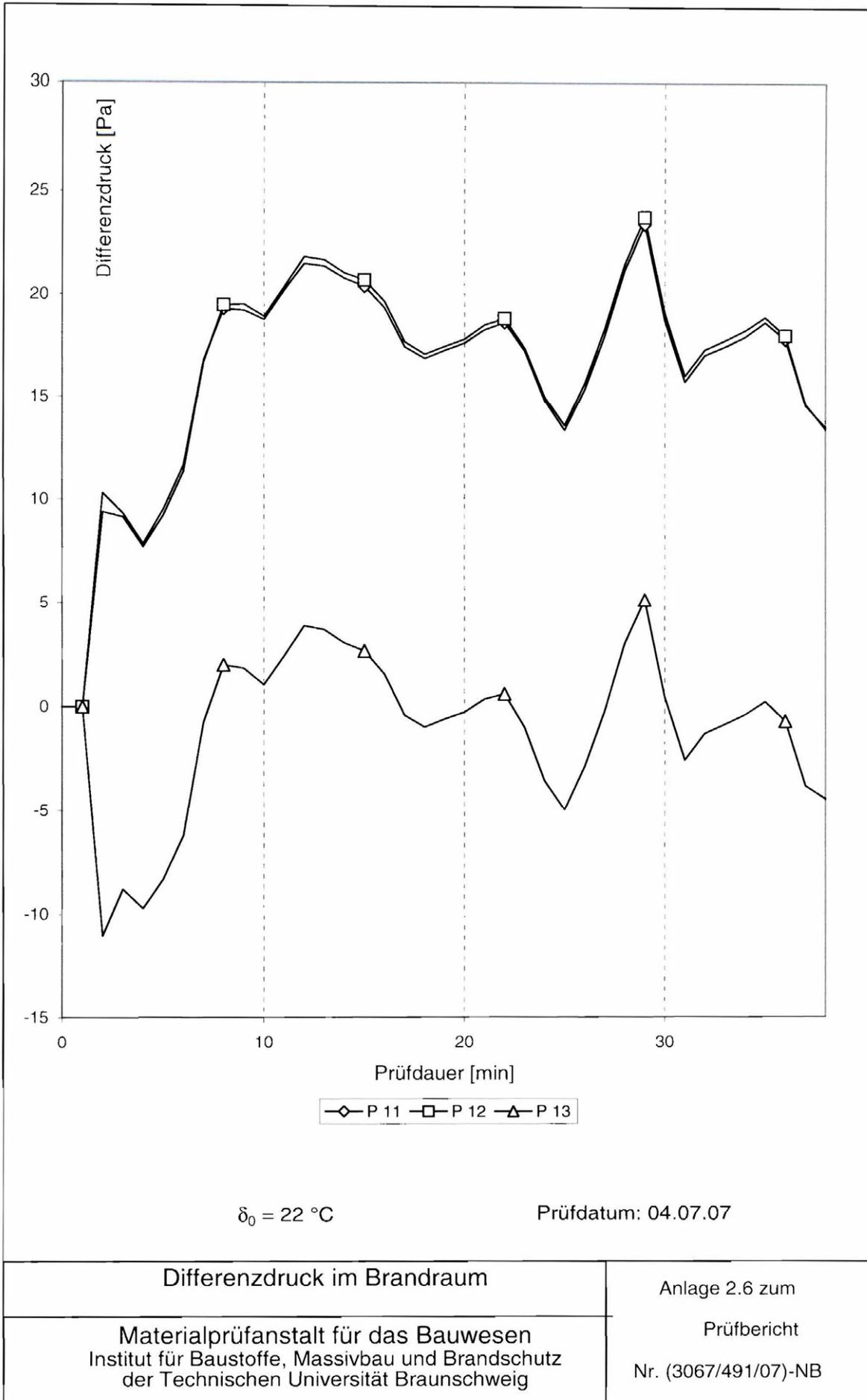
Verformung am Probekörper

Materialprüfanstalt für das Bauwesen
 Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
 der Technischen Universität Braunschweig

Anlage 2.5 zum

Prüfbericht

Nr. (3067/491/07)-NB



Prüf- dauer (min)	Seite *)	Beobachtungen während der Brandprüfung am 04.07.2007
70 Min vor BV	-	Last aufgebracht: 30 kN insgesamt.
53 Min vor BV	-	Last aufgebracht: 43,5 kN insgesamt.
2	F	Die Putzschicht verfärbt sich dunkel.
15	F	Im Bereich des Sockels sind Flammen zu erkennen.
17	A	Deutliche Risse am Anschluß Gleitständer, es entstehen schräge Risse rechts.
21	A	Es entstehen Risse in der Mitte.
24	-	Die Wand wölbt sich nach außen.
28	F	Es entstehen innen weitere Risse.
30	F	Der Putz ist zum Teil abgefallen.
35	F	Der Putz ist abgefallen.
37	-	Die Wand formt sich rechts durch. Die Belastung wird herunter genommen.
38	-	Ende der Beflammung.

*) F: beflamnte Seite

A: unbeflammte Seite

Beobachtungen	Anlage 2.7 zum Prüfbericht Nr. (3067/491/07) – NB
Materialprüfanstalt für das Bauwesen Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig	



Abb. 1: Wand während des Aufbaues (Komprimierung)

Fotodokumentation

Materialprüfanstalt für das Bauwesen
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

Anlage 3.1 zum
Prüfbericht
Nr. (3067/491/07) – NB

8 Brandverhalten von Strohballenwänden

8.1 Brandverhalten nach DIN EN 13823 („Single-Burning-Item“- Test): Prüfbericht

Prüfbericht

Dokumentnummer:	(3305/558/07-a)-Ht vom 14.11.2007
Auftraggeber:	Fachverband Strohballenbau Deutschland e. v. An der Rübekuhle 10 21335 Lüneburg
Auftrag vom:	22.05.2007
Inhalt des Auftrags:	Bestimmung des Brandverhaltens nach DIN EN 13823 (SBI-Test)
Prüfgegenstand:	Strohballenwand mit Lehmputz beschichtet
Prüfungsgrundlage:	DIN EN 11925-2
Probeneingang:	22.05.2007
Entnahme des Prüfmaterials:	durch Auftraggeber



Hinweis: Die Prüfergebnisse beziehen sich nur auf das Verhalten der Proben von einem Bauprodukt unter den speziellen Prüfbedingungen bei der Prüfung; sie sind nicht als einziges Kriterium zur Bewertung der potentiellen Brandgefahr des Bauprodukts im Anwendungsfall zu verstehen.

Dieser Prüfbericht ersetzt nicht einen gegebenenfalls notwendigen baurechtlichen / bauaufsichtlichen Nachweis nach Landesbauordnung (MBO § 17, Abs. 3).

Dieser Prüfbericht umfasst 4 Seiten inkl. Deckblatt und 8 Anlagen.

Dieser Prüfbericht darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge oder Kürzungen bedürfen der schriftlichen Genehmigung der MPA Braunschweig. Dokumente ohne Unterschrift und Stempel haben keine Gültigkeit. Das Deckblatt und die Unterschriftenseite dieses Dokuments sind mit dem Stempel der MPA Braunschweig versehen. Das Probenmaterial ist verbraucht.

Materialprüfanstalt (MPA)
für das Bauwesen
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

Fon +49 (0)531-391-5400
Fax +49 (0)531-391-5900
info@mpa.tu-bs.de
www.mpa.tu-bs.de

Norddeutsche LB Hannover
106 020 050 BLZ 250 500 00
Swift-Code: NOLADE 2H
UST-ID-Nr. DE18350654
Steuer-Nr.: 14/201/22859
IBAN: DE5825050000106020050

Notified body (0761-CPD)

Die MPA Braunschweig ist für Prüfung, Überwachung, Inspektion und Zertifizierung bauaufsichtlich anerkannt und notifiziert. Die MPA Braunschweig ist als Prüf- und Kalibrierlaboratorium nach ISO/IEC 17025 und als Inspektionsstelle nach ISO/IEC 17020 akkreditiert.

1 Einleitung

Dieser Prüfbericht beschreibt die Durchführung der Prüfungen zur thermischen Beanspruchung durch einen einzelnen brennenden Gegenstand nach DIN EN 13823 für das nachstehend beschriebene Produkte.

2 Materialbeschreibung und Materialdaten

Bei diesem Bauprodukt handelt es sich um eine aus gepressten Strohballen als wesentliche Komponente bestehende tragende Außenwand. Hierbei wird ein Bohlenständerwerk mit Strohballen ausgefacht und an der Außenseite mit einem Lehmputz der Dicke von ca. 8 mm beschichtet. Die maximale Dicke des Wandaufbaus beträgt in der baulichen Anwendung 500 mm.

Produktbeschreibung	Dicke [mm]	Flächengewicht [kg/m ²]	Dichte [kg/m ³]
Aufbau der „Lehmputz beschichteten Strohballenwand“:	ca. 28	-	-
- Lehmputz:	ca. 8	-	ca. 1800
- Strohballen:	ca. 28	-	90 - 110
- Bohlenbänder (Nadelholz):	ca. 28	-	-
- Lehmputz:	ca. 8	-	ca. 1800

Die Strohballen werden gemäß der in der Zulassung: Z-23.11-1595 gemachten Vorgaben gefertigt.

3 Probenherstellung und Probenaufbau

Die Proben wurden bereits vorgefertigt in folgenden Abmessungen vom Auftraggeber angeliefert:

- 1500 mm x 1000 mm x 280 mm (breiter Probenflügel)
- 1500 mm x 759 mm x 280 mm (schmaler Probenflügel)

Die Strohballen wurden hierbei fest und lückenlos zwischen das vorgefertigte Bohlenständerwerk gepresst. Auf die Bohlen wurde Schilfrohr als Putzträger befestigt. Abschließend wurde der Lehmputzmörtel per Hand aufgeklatscht und glattgestrichen, so dass eine ebene und fugenfreie Putzschicht mit einer Dicke von ca. 8 mm erreicht wurde.

Die beiden Teile des Prüfkörper wurden auf den Prüfwagen gestellt. Die Eckfuge wurde nun mit Lehmputz ausgefüllt und die unverputzten Außenseiten wurden mit Calciumsilikatplatten der Dicke 11 mm als rückseitigen Abschluss abgedeckt.

4 Konditionierung und Versuchsdurchführung

Die Prüfkörperteile wurden entsprechend der Norm DIN EN 13238 konditioniert.

Nach Abtrocknen des beim Einbau in den Prüfstand nachträglich zum Verschließen der Eckfuge aufgetragenen Lehmputzes wurde jeweils am Folgetag die Prüfung durchgeführt.

Produkt	Datum der Prüfungen	Anzahl der Versuche	Versuchsablaufbeschreibung	Photos der montierten Prüfkörper
„Lehmputz beschichtete Strohballenwand“	30.05.2007 09.08.2007 19.11.2007	3	Anlage 2	Anlagen 6 - 8

5 Prüfergebnisse

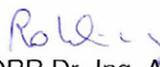
	Probe/Versuch Nr.			
	1	2	3	Mittelwerte
FIGRA _{0,2 MJ} (W/s)	0.0	0.0	0.0	0.0
FIGRA _{0,4 MJ} (W/s)	0.0	0.0	0.0	0.0
THR _{600s} (MJ)	0.2	0.1	0.0	0.1
LFS < Kante	Ja	Ja	Ja	Ja
SMOGRA (m ² /s ²)	0.0	0.0	0.0	0.0
TSP _{600s} (m ²)	16.4	9.0	17.7	14.4
Brennendes Abtropfen / Abfallen	Nein	Nein	Nein	Nein

Beobachtungen während der Prüfungen: siehe Anlage 2

Darstellungen der Messkurven: siehe in Anlage 3 HRR_{av} und THR
in Anlage 4 SPR_{av} und TSP
in Anlage 5 FIGRA und SMOGRA

6 Hinweise

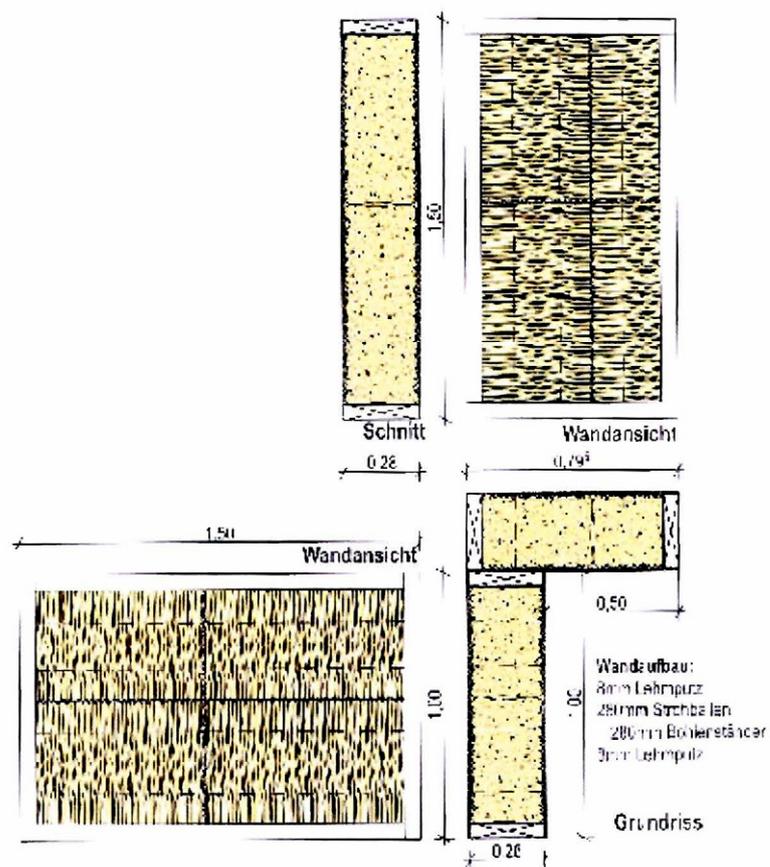
- 6.1 Die Prüfergebnisse in Abschnitt 5 gelten nur für das in Abschnitt 2 beschriebene Bauprodukt mit der Zusammensetzung und dem Aufbau wie es in den Abschnitten 2 und 3 und der Prüfanordnung wie es in Anlage 1 angegeben ist. In Verbindung mit zusätzlichen brennbaren Beschichtungen oder anderen Putzen als in Abschnitt 2 angegeben, kann das Brandverhalten so ungünstig beeinflusst werden, dass die Prüfergebnisse in Abschnitt 5 nicht mehr gelten. Das Brandverhalten in Verbindung mit zusätzlichen brennbaren Beschichtungen oder anderen Putzen ist gesondert nachzuweisen.
- 6.2 Die Prüfergebnisse beziehen sich nur auf das Verhalten der Proben von einem Bauprodukt unter den speziellen Prüfbedingungen bei der Prüfung; sie sind nicht als einziges Kriterium zur Bewertung der potentiellen Brandgefahr des Bauprodukts im Anwendungsfall zu verstehen.
- 6.3 Dieser Prüfbericht ersetzt nicht einen gegebenenfalls erforderlichen bauaufsichtlichen Nachweis nach deutschem Baurecht (Landesbauordnung).


ORR Dr.-Ing. A. Rohling
Leiterin der Prüfstelle



i. A. 
Dipl.-Phys. H. J. Herbst
Sachbearbeiter

Braunschweig, den 31.03.2008



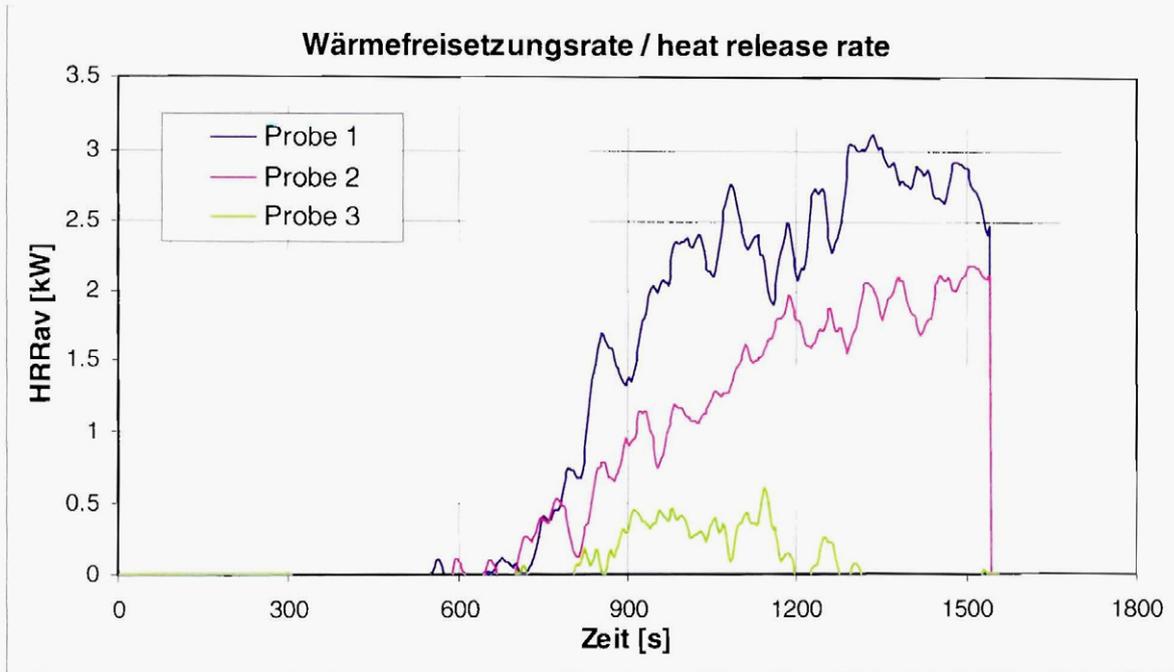
Geschnittene Darstellungen des Prüfkörpers für den SBI-Test
(Ansicht von oben und von der Seite)

Ablaufbeschreibung der Prüfung gemäß DIN EN 13823 (Strohballenwand)

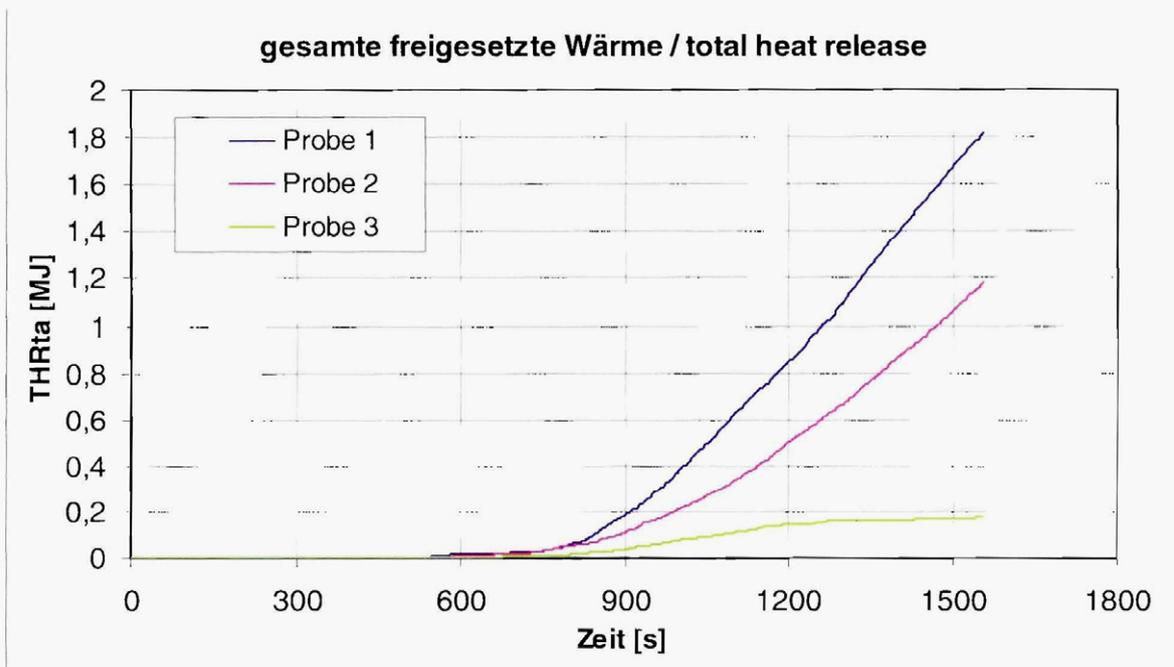
Die Ablaufbeschreibung enthält folgende Aussagen:

- visuelle Beobachtungen
- gemessene Daten

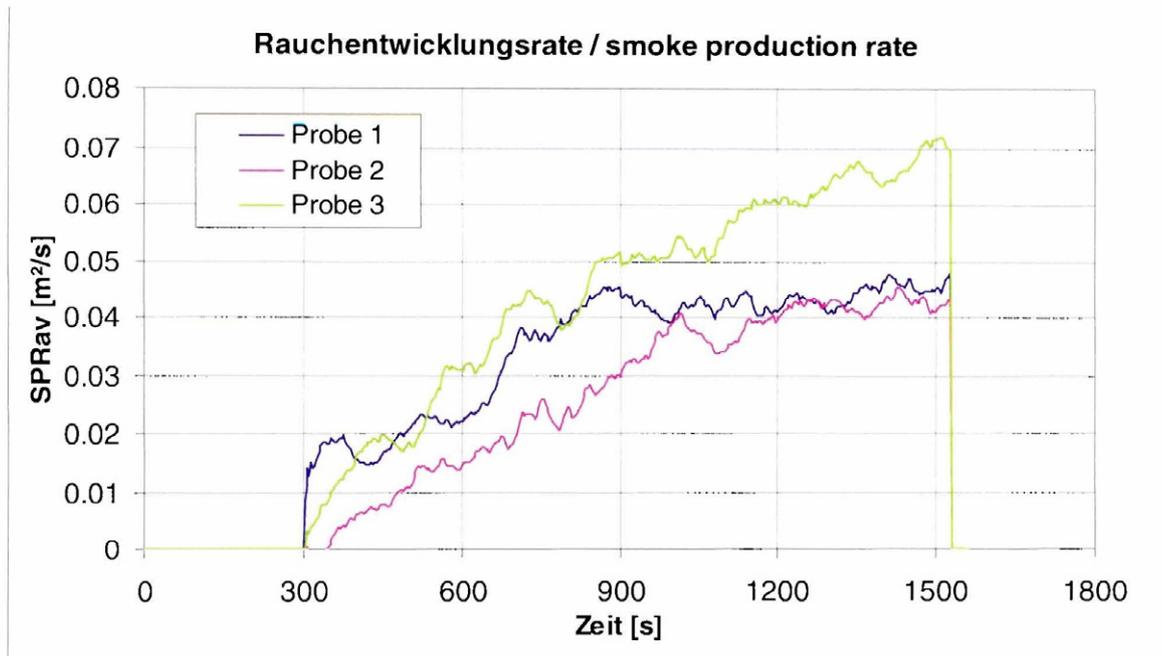
	Probe 1	Probe 2	Probe 3
1 Versuchsdatum	30.05.2007	09.08.2007	19.11.2007
Bedingungen vor Versuchsbeginn			
2 Umgebungsdruck [Pa]	101300	100800	101700
3 Relative Luftfeuchtigkeit [%H ₂ O]	39	60	45
4 Volumenstrom im Abgasrohr [m ³ /s]	0.60	0.60	0.61
5 Lichttransmission im Abgasrohr [%]	100.48	99.72	100.07
6 O ₂ -Gehalt im Abgasrohr [%]	20.95	20.95	20.95
7 CO ₂ - Gehalt im Abgasrohr [%]	0.042	0.040	0.040
9 Temperatur im Abgasrohr [°C]	21.2	27.0	16.1
Beobachtungen			
10 Brennend abfallende Probenteile FDP _(t≤10s)	Nein	Nein	Nein
11 Brennend abfallende Probenteile FDP _(t>10s)	Nein	Nein	Nein
12 Seitliche Flammenausbreitung LFS _{edge}	Nein	Nein	Nein
13 Flammenausbreitung über die gesamte Oberfläche	Nein	Nein	Nein
14 Rauch außerhalb der Abzugshaube	Nein	Nein	Nein
15 Abfallende Probenteile	Nein	Nein	Nein
16 Versagen der rückseitigen Abschlussplatten	Nein	Nein	Nein
17 Zusammenbrechen oder Deformation des Prüfkörpers	Nein	Nein	Nein
18 Gründe einer frühzeitigen Beendigung	keine	keine	keine
19 Gesamte Versuchszeit durchgeführt	Ja	Ja	Ja
20 Zeit des frühzeitigen Abbruchs [s]	-	-	-
21 Sonstige Beobachtungen	s. Bemerkungen	s. Bemerkungen	s. Bemerkungen
Bedingungen nach Versuchsende			
22 O ₂ -Gehalt im Abgasrohr [Vol%]	20.92	20.96	20.95
23 CO ₂ -Gehalt im Abgasrohr [Vol%]	0.069	0.055	0.051
24 Lichttransmission im Abgasrohr [%]	100.37	98.31	99.85



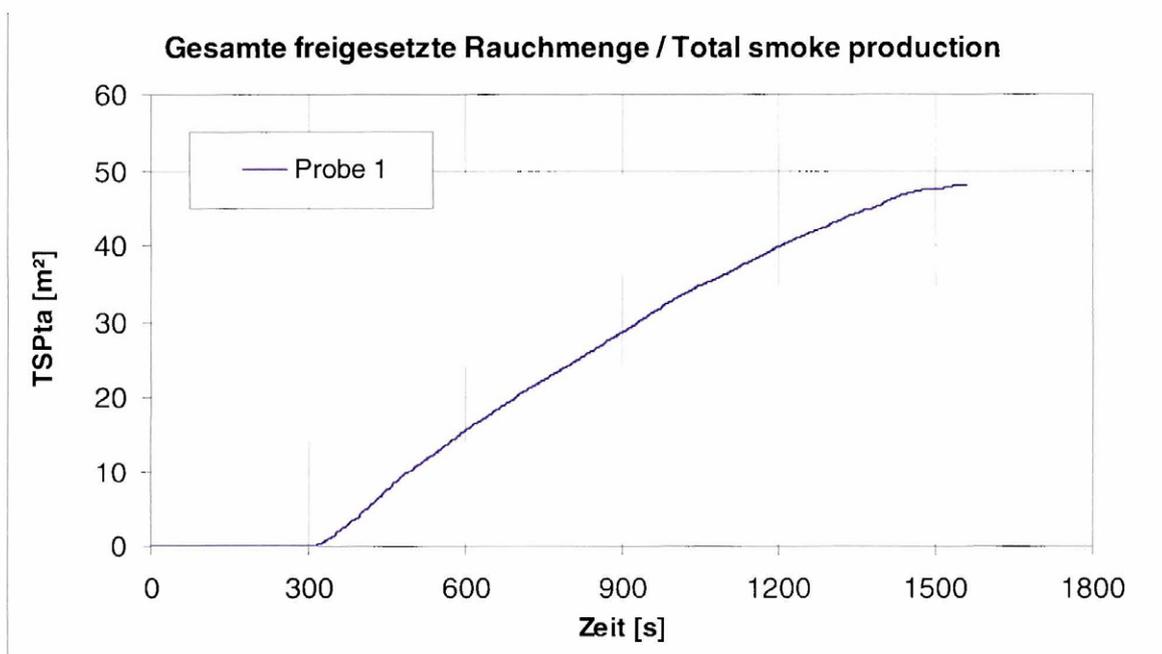
Wärmefreisetzungsrate von 3 Proben des Produkts „Strohballenwand mit Lehmputz beschichtet“



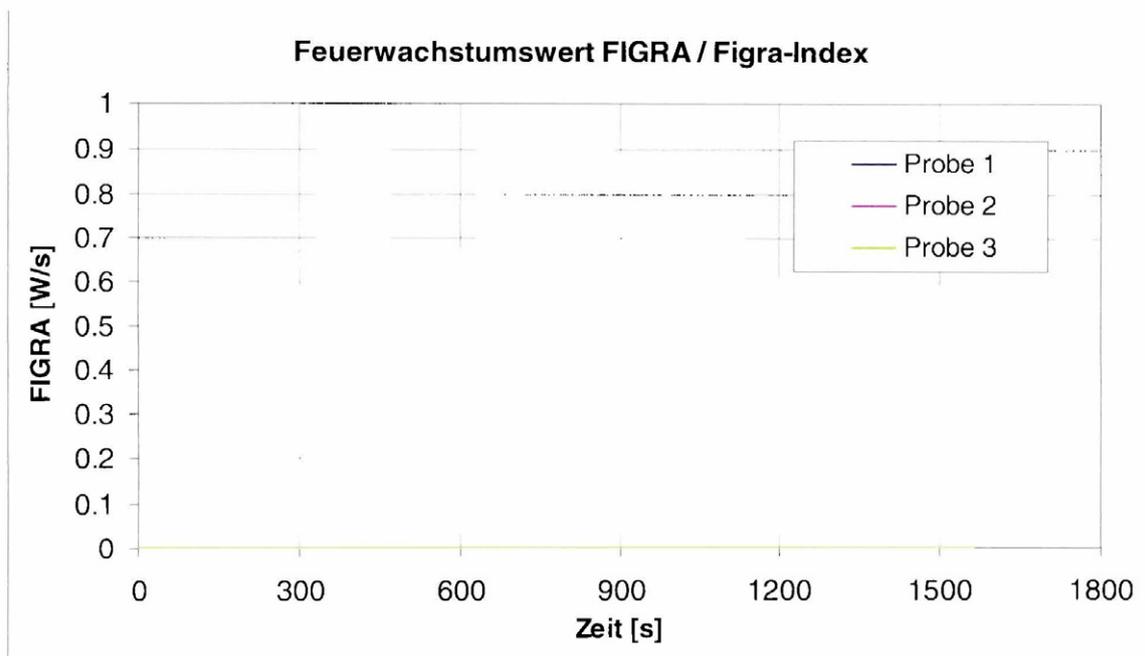
Gesamte freigesetzte Energie von 3 Proben des Produkts „Strohballenwand mit Lehmputz beschichtet“



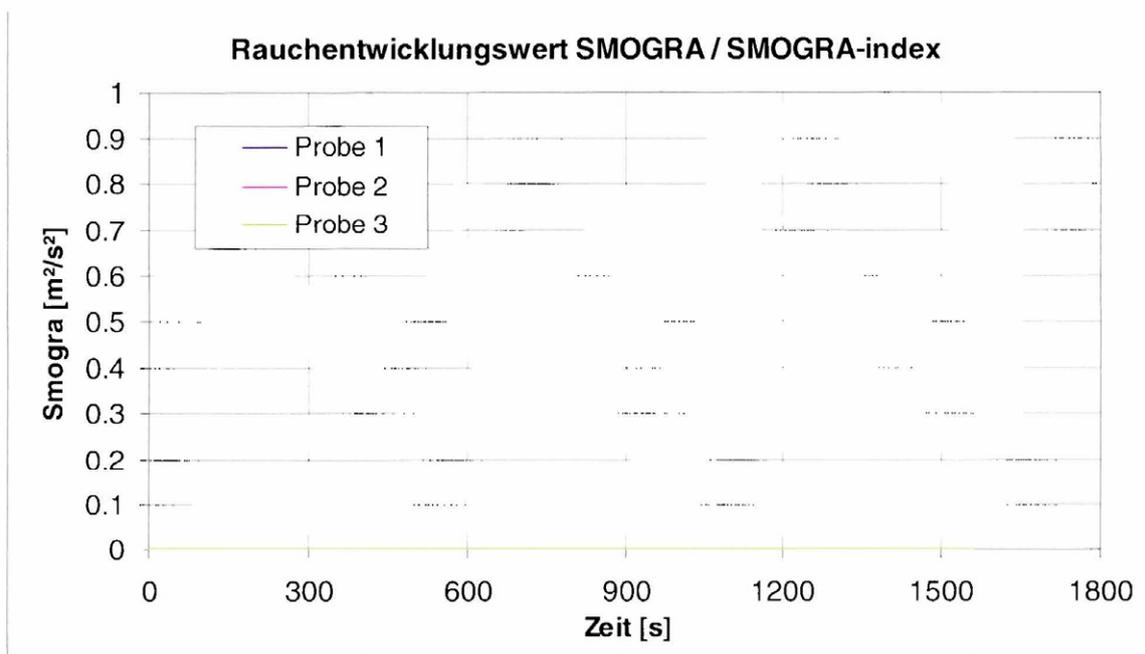
Rauchentwicklungsrates von 3 Proben des Produkts „Strohballenwand mit Lehmputz beschichtet“



Gesamte freigesetzte Rauchmengen von 3 Proben des Produkts „Strohballenwand mit Lehmputz beschichtet“



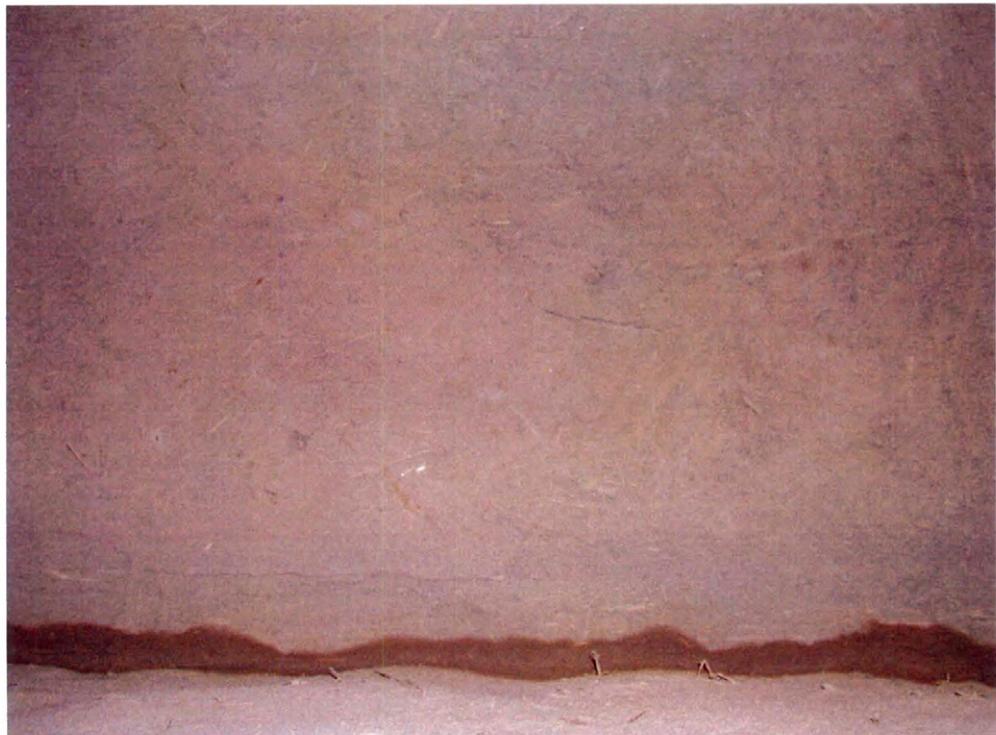
Feuerwachstumswerte FIGRA von 3 Proben des Produkts: „Strohballenwand mit Lehmputz beschichtet“



Rauchentwicklungswerte SMOGRA von 3 Proben des Produkts „ Strohballenwand mit Lehmputz beschichtet“



Befestigung des Prüfmaterials im SBI-Prüfstand, Versuch 1
Nahansicht der vertikalen Außenkante des breiten Probenflügels
(Strohballenwand mit Lehmputz beschichtet)



Befestigung des Prüfmaterials im SBI-Prüfstand, Versuch 1
Gesamtansicht der zu beflamenden Oberfläche des breiten Probenflügels
(Strohballenwand mit Lehmputz beschichtet)



Befestigung des Prüfmaterials im SBI-Prüfstand, Versuch 2
Gesamtansicht der zu beflammanden Oberfläche des breiten Probenflügels
(Strohballenwand mit Lehmputz beschichtet)



Befestigung des Prüfmaterials im SBI-Prüfstand, Versuch 2
Nahansicht der vertikalen Außenkante des breiten Probenflügels
(Strohballenwand mit Lehmputz beschichtet)



Befestigung des Prüfmaterials im SBI-Prüfstand, Versuch 3
Nahansicht der vertikalen Außenkante des breiten Probenflügels
(Strohballenwand mit Lehmputz beschichtet)



Befestigung des Prüfmaterials im SBI-Prüfstand, Versuch 3
Gesamtansicht der zu brennenden Oberfläche des breiten Probenflügels
(Strohballenwand mit Lehmputz beschichtet)

8.2 Klassifizierungsbericht nach DIN EN 13501-1: 2007

Klassifizierung des Brandverhaltens in Übereinstimmung mit DIN EN 13501-1

Nr. des Klassifizierungsberichtes: K-3305/558/07-1-MPA BS

Auftraggeber: Fachverband Strohballenbau Deutschland e. v.
An der Rübekuhle 10
21335 Lüneburg

Klassifizierungsgegenstand: Strohballenwand mit Lehmputz beschichtete

Klassifizierungsgrundlage: DIN EN 13501-1 : 2007

**Nummer der notifizierten
Prüfstelle:** 0761-CPD

Ausstellungsdatum: 31.03.2008

Hinweis: Dieser Klassifizierungsbericht gilt nicht, wenn der geprüfte Baustoff als Bauprodukt im Sinne der Landesbauordnung verwendet wird (MBO § 17, Abs. 3).

Dieser Klassifizierungsbericht ersetzt nicht einen gegebenenfalls notwendigen baurechtlichen / bauaufsichtlichen Nachweis nach Landesbauordnung.



Dieser Klassifizierungsbericht umfasst 5 Seiten.

Dieser Klassifizierungsbericht darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge oder Kürzungen bedürfen der schriftlichen Genehmigung der MPA Braunschweig. Dokumente ohne Unterschrift und Stempel haben keine Gültigkeit. Das Deckblatt und die Unterschriftenseite dieses Dokuments sind mit dem Stempel der MPA Braunschweig versehen...Das Probenmaterial ist verbraucht.

Materialprüfanstalt (MPA)
für das Bauwesen
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

Fon +49 (0)531-391-5400
Fax +49 (0)531-391-5900
info@mpa.tu-bs.de
www.mpa.tu-bs.de

Norddeutsche LB Hannover
106 020 050 BLZ 250 500 00
Swift-Code: NOLADE 2H
USt.-ID-Nr. DE183500654
Steuer-Nr.: 14/201/22859
IBAN: DE5825050000106020050

Notified body (0761-CPD)

Die MPA Braunschweig ist für Prüfung, Überwachung, Inspektion und Zertifizierung bauaufsichtlich anerkannt und notifiziert. Die MPA Braunschweig ist als Prüf- und Kalibrierlaboratorium nach ISO/IEC 17025 und als Inspektionsstelle nach ISO/IEC 17020 akkreditiert.

1 Einleitung

Dieser Klassifizierungsbericht definiert die Klassifizierung, die dem Bauprodukt „Lehmputz beschichtete Strohballenwand“ des Fachverbandes Strohballenbau Deutschland e. V. (FASBA) mit dem in EN 13501-1 : 2007 angegebenen Verfahren zugewiesen wird.

2 Angaben zum klassifizierten Bauprodukt

2.1 Art und Anwendungsbereich

Bei diesem Bauprodukt handelt es sich um eine aus gepressten Strohballen als wesentliche Komponente bestehende tragende Außenwand. Hierbei wird ein Bohlenständerwerk mit Strohballen ausgefacht und an der Außenseite mit einem Lehmputz der Dicke von ca. 8 mm beschichtet. Die maximale Dicke des Wandaufbaus beträgt in der baulichen Anwendung 500 mm.

2.2 Beschreibung des Bauproduktes

Das Bauprodukt wird in den im Abschnitt 3.1 aufgeführten Prüfberichten, die der Klassifizierung zu Grunde liegen, vollständig beschrieben.

3 Prüfbericht und Versuchsergebnisse für die Klassifizierung

3.1 Prüfberichte

Name des Prüflabors	Auftraggeber	Nummer des Prüfberichts	Prüfverfahren
MPA Braunschweig	Fachverband Strohballenbau Deutschland e. v.	3305/558/07-a	DIN EN 13823
MPA Braunschweig	Fachverband Strohballenbau Deutschland e. v.	3305/558/07-b	DIN EN ISO 11925-2

3.2 Prüfergebnisse

Prüfverfahren	Parameter	Anzahl an Prüfungen	Prüfergebnisse	
			Stet. Parameter (Mittelwert)	Diskrete Parameter
DIN EN 13823	FIGRA _{0,2 MJ}	3	0.0	-
	FIGRA _{0,4 MJ}	3	0.0	-
	THR _{600s} (MJ)	3	0.1	-
	LFS < Kante	3	-	ja
	SMOGRA (m ² /s ²)	3	0.0	-
	TSP _{600s} (m ²)	3	14.4	-
	Brennendes Abtropfen / Abfallen	3	-	nein
EN ISO 11925-2				
	Flächenbeflammung 30 s			
	Fs ≤ 150 mm	6	-	ja
	Entzündung des Filterpapiers	6	-	nein
Kantenbeflammung 30 s				
	Fs ≤ 150 mm	6	-	ja
	Entzündung des Filterpapiers	6	-	nein

4 Klassifizierung und direkter Anwendungsbereich

4.1 Grundlagen der Klassifizierung

Diese Klassifizierung wurde in Übereinstimmung mit Abschnitt 11 der DIN EN 13501-1 : 2007 durchgeführt.

4.2 Klassifizierung

Dem Bauprodukt wird folgende Brandverhaltensklasse zugeordnet:

B

Die zusätzliche Klassifizierung der Rauchentwicklung ist:

s1

Die zusätzliche Klassifizierung in Bezug auf „brennendes Abfallen / brennendes Abtropfen“ ist:

d0

Das Format der Klassifizierung des Brandverhaltens für Bauprodukte mit Ausnahme von Bodenbelägen ist:

Brandverhalten	Rauchentwicklung	Brennendes Abtropfen
B	s1	d0

Die Klassifizierung gemäß DIN EN 13501-1 : 2007 ist:

Klassifizierung des Brandverhaltens: B-s1,d0

4.3 Direkter Anwendungsbereich

Die Klassifizierung in Abschnitt 4.2 gilt nur für das in Abschnitt 2 beschriebene Bauprodukt und ist gültig für folgende Anwendungsbereiche bzw. Produktparameter:

- Schichtdicke des Lehmputzes: ≥ 8 mm
- Dichte des Lehmputzes: $1800 \text{ kg/m}^3 \pm 150 \text{ kg/m}^3$
- Dicke des Wandaufbaus: ≥ 280 mm
- Bohlenständer: Nadelholz mit Dicke ≤ 28 mm
- Rohdichte der Strohballen: $90\text{-}110 \text{ kg/m}^3$ (gemäß Zulassung: Z-23.11-1595)

Der Lehmputzmörtel entspricht den in den Lehmbauregeln des Dachverbandes Lehm, Fassung vom Mai 2002, festgelegten Bestimmungen.

5 Hinweise

- 5.1 In Verbindung mit zusätzlichen brennbaren Beschichtungen oder anderen Putzen als in Abschnitt 4.3 angegeben, kann das Brandverhalten so ungünstig beeinflusst werden, dass die Klassifizierung in Abschnitt 4.2 nicht mehr gilt. Das Brandverhalten in Verbindung mit zusätzlichen brennbaren Beschichtungen oder anderen Putzen ist gesondert nachzuweisen.
- 5.2 Dieser Klassifizierungsbericht ist keine Typenzulassung oder Produktzertifizierung und ersetzt nicht einen gegebenenfalls erforderlichen Nachweis nach deutschem Baurecht (Landesbauordnung).

Rohling
ORR Dr.-Ing. A. Rohling
Leiterin der Prüfstelle



i. A. *Hans-Joachim Herbst*
Dipl.-Phys. H. J. Herbst
Sachbearbeiter

Braunschweig, den 31.März.2008

8.3 Brandverhalten nach DIN EN 11925-2 („Brennbarkeits“- Test): Prüfbericht



Prüfbericht

Dokumentnummer: (3305/558/07-b)-Ht vom 31.03.2008

Auftraggeber: Fachverband Strohballenbau Deutschland e. v.
An der Rübekuhle 10
21335 Lüneburg
Deutschland

Auftrag vom: 22.05.2007

Inhalt des Auftrags: Prüfung des Brandverhaltens nach DIN EN ISO 1716
(Bestimmung der Verbrennungswärme)

Prüfgegenstand: Strohballenwand mit Lehmputz beschichtet

Prüfungsgrundlage: DIN EN 11925-2

Probeneingang: 22.05.2007

Entnahme des Prüfmaterials: durch Auftraggeber



Hinweis: Die Prüfergebnisse beziehen sich nur auf das Verhalten der Proben von einem Bauprodukt unter den speziellen Prüfbedingungen bei der Prüfung; sie sind nicht als einziges Kriterium zur Bewertung der potentiellen Brandgefahr des Bauprodukts im Anwendungsfall zu verstehen.

Dieser Prüfbericht ersetzt nicht einen gegebenenfalls notwendigen baurechtlichen / bauaufsichtlichen Nachweis nach Landesbauordnung (MBO § 17, Abs. 3).

Dieser Prüfbericht umfasst 4 Seiten inkl. Deckblatt und 2 Anlagen.

Dieser Prüfbericht darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge oder Kürzungen bedürfen der schriftlichen Genehmigung der MPA Braunschweig. Dokumente ohne Unterschrift und Stempel haben keine Gültigkeit. Das Deckblatt und die Unterschriftenseite dieses Dokuments sind mit dem Stempel der MPA Braunschweig versehen. Das Probenmaterial ist verbraucht.

Materialprüfanstalt (MPA)
für das Bauwesen
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

Fon +49 (0)531-391-5400
Fax +49 (0)531-391-5900
info@mpa.tu-bs.de
www.mpa.tu-bs.de

Norddeutsche LB Hannover
106 020 050 BLZ 250 500 00
Swift-Code: NOLADE 2H
USt.-ID-Nr. DE183500654
Steuer-Nr.: 14/201/22859
IBAN: DE5825050000106020050

Notified body (0761-CPD)

Die MPA Braunschweig ist für Prüfung, Überwachung, Inspektion und Zertifizierung bauaufsichtlich anerkannt und notifiziert. Die MPA Braunschweig ist als Prüf- und Kalibrierlaboratorium nach ISO/IEC 17025 und als Inspektionsstelle nach ISO/IEC 17020 akkreditiert.

1 Einleitung

Dieser Prüfbericht beschreibt für das nachstehende beschriebene Bauprodukt die Prüfungen des Brandverhaltens nach DIN EN ISO 11825-2.

2 Materialbeschreibung und Materialdaten

Bei diesem Bauprodukt handelt es sich um eine aus gepressten Strohballen als wesentliche Komponente bestehende tragende Außenwand. Hierbei wird ein Bohlenständerwerk mit Strohballen ausgefacht und an der Außenseite mit einem Lehmputz der Dicke von ca. 8 mm beschichtet. Die maximale Dicke des Wandaufbaus beträgt in der baulichen Anwendung 500 mm.

Produktbeschreibung	Dicke [mm]	Flächengewicht [kg/m ²]	Dichte [kg/m ³]
Aufbau der „Lehmputz beschichteten Strohballenwand“:	ca. 28	-	-
- Lehmputz:	ca. 8	-	ca. 1800
- Strohballen:	ca. 28	-	90 - 110
- Bohlenbänder (Nadelholz):	ca. 28	-	-
- Lehmputz:	ca. 8	-	ca. 1800

Die Strohballen werden gemäß der in der Zulassung: Z-23.11-1595 gemachten Vorgaben gefertigt.

3 Probenherstellung

Die Herstellung der Prüfkörper erfolgte am durch den Auftraggeber.

Die Strohballen wurden vom Hersteller auf die Maße 250 mm x 90 mm x 60 mm zugeschnitten. Danach wurde der Lehmputzmörtel in einer Schichtdicke von ca. 8 mm aufgetragen.

Anschließend wurden die Prüfkörper in den Klimaraum verbracht und dort bis zur Durchführung der Prüfung gelagert.

4 Konditionierung

Die Proben lagerten bis zur Prüfung im Klima nach DIN EN 13238.

5 Versuchsdurchführung

Die Prüfung erfolgte nach DIN EN ISO 11925-2.

Datum der Prüfung: 06.08.2007

Anzahl der Prüfreiheiten: je 1 für Prüffart Flächenbeflammung um 90° gedreht
je 1 für Prüffart Kantenbeflammung um 90° gedreht

Beflammungsdauer: 30 s

Aufbau des Prüfkörpers: Lehmputzmörtel auf Strohballen

6 Prüfergebnisse

Flächenbeflammung / Probe Nr.	1	2	3	4	5	6
Flamme erreicht 150 mm	nein	nein	nein	nein	nein	nein
Dauer zum Erreichen von 150 mm t_{150}	-	-	-	-	-	-
Entzündung des Filterpapiers	nein	nein	nein	nein	nein	nein
Kantenbeflammung						
Flamme erreicht 150 mm	nein	nein	nein	nein	nein	nein
Dauer zum Erreichen von 150 mm t_{150}	-	-	-	-	-	-
Entzündung des Filterpapiers	nein	nein	nein	nein	nein	nein

Beobachtungen während der Prüfungen: siehe Anlage 1
siehe Anlage 2

7 Hinweise

- 7.1 Die Prüfergebnisse in Abschnitt 6 gelten nur für das in Abschnitt 2 beschriebene Bauprodukt mit der Zusammensetzung und dem Aufbau wie es in dem Abschnitt 2 angegeben ist. In Verbindung mit zusätzlichen brennbaren Beschichtungen oder anderen Putzen als in Abschnitt 2 angegeben, kann das Brandverhalten so ungünstig beeinflusst werden, dass die Prüfergebnisse in Abschnitt 6 nicht mehr gelten. Das Brandverhalten in Verbindung mit zusätzlichen brennbaren Beschichtungen oder anderen Putzen ist gesondert nachzuweisen.
- 7.2 Wird das Bauprodukt zusätzlich mit brennbaren Schichten versehen, ist das Brandverhalten dieses Verbundes gesondert nachzuweisen.
- 7.3 Die Prüfergebnisse beziehen sich nur auf das Verhalten der Proben von einem Bauprodukt unter den speziellen Prüfbedingungen bei der Prüfung; sie sind nicht als einziges Kriterium zur Bewertung der potentiellen Brandgefahr des Bauprodukts im Anwendungsfall zu verstehen.
- 7.4 Dieser Prüfbericht ersetzt nicht einen gegebenenfalls erforderlichen bauaufsichtlichen Nachweis nach deutschem Baurecht (Landesbauordnung).

Rohling
ORR Dr.-Ing. A. Rohling
Leiterin der Prüfstelle



i. A. *Haus Jandim Herbst*
Dipl.-Phys. H. J. Herbst
Sachbearbeiter

Braunschweig, den 31. März 2008

Ablaufbeschreibung der Prüfung gemäß DIN EN ISO 11925-2

Die Ablaufbeschreibung enthält folgende Aussagen:

- visuelle Beobachtungen
- gemessene Daten

Antragsteller: Fachverband Strohballenbau Deutschland e. v.
Prüfmaterial: „Strohballenwand mit Lehmputz beschichtet“
Probenabmessung: 90 mm x 250 mm
Dicke: ca. 13 mm
Untergrund: Gipskartonplatte
Prüfdatum: 06.08.2007
Beflammungsdauer: 30 s
Brandbeanspruchung: Flächenbeflammung (um 90° gedreht)

Probe Nr.	1	2	3	4	5	6
Auftreten einer Entzündung	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Flamme erreicht 150 mm	nein	nein	nein	nein	nein	nein
Dauer zum Erreichen von 150 mm t_{150} [s]	--	--	--	--	--	--
Größte Flammenhöhe [mm]	14	14	10	12	15	15
Selbstverlöschen der Flamme [s]	30	30	30	31	32	31
Ende des Nachglimmens [s]	60	61	60	60	61	61
Flammen wurden gelöscht nach	--	--	--	--	--	--
Rauchentwicklung	gering	gering	gering	gering	gering	gering
Brennendes Abtropfen [s]	--	--	--	--	--	--
Entzündung des Filterpapiers	nein	nein	nein	nein	nein	nein

Ablaufbeschreibung der Prüfung gemäß DIN EN ISO 11925-2

Die Ablaufbeschreibung enthält folgende Aussagen:

- visuelle Beobachtungen
- gemessene Daten

Antragsteller: Fachverband Strohballenbau Deutschland e. v.
Prüfmateral: „Strohballenwand mit Lehmputz beschichtet“
Probenabmessung: 90 mm x 250 mm
Dicke: ca. 13 mm
Untergrund: Gipskartonplatte
Prüfdatum: 06.08.2007
Beflammungsdauer: 30 s
Brandbeanspruchung: Kantenbeflammung (um 90° gedreht)

Probe Nr.	1	2	3	4	5	6
Auftreten einer Entzündung	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Flamme erreicht 150 mm	nein	nein	nein	nein	nein	nein
Dauer zum Erreichen von 150 mm t ₁₅₀ [s]	--	--	--	--	--	--
Größte Flammenhöhe [mm]	110	110	120	100	110	130
Selbstverlöschen der Flamme [s]	31	30	30	31	30	31
Ende des Nachglimmens [s]	60	60	60	60	61	61
Flammen wurden gelöscht nach	--	--	--	--	--	--
Rauchentwicklung	gering	gering	gering	gering	gering	gering
Brennendes Abtropfen [s]	--	--	--	--	--	--
Entzündung des Filterpapiers	nein	nein	nein	nein	nein	nein

Ablaufbeschreibung der Prüfung gemäß DIN EN ISO 11925-2

Die Ablaufbeschreibung enthält folgende Aussagen:

- visuelle Beobachtungen
- gemessene Daten

Antragsteller: Fachverband Strohballenbau Deutschland e. v.
Prüfmaterial: „Lehmputz beschichtete Strohballenwand“
Probenabmessung: 90 mm x 250 mm
Dicke: ca. 13 mm
Untergrund: Gipskartonplatte
Prüfdatum:
Beflammungsdauer: 15 s
Brandbeanspruchung: Flächenbeflammung

Probe Nr.	1	2	3	4	5	6
Auftreten einer Entzündung	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Flamme erreicht 150 mm	nein	nein	nein	nein	nein	nein
Dauer zum Erreichen von 150 mm t_{150} [s]	--	--	--	--	--	--
Größte Flammenhöhe [mm]	--	--	--	--	--	--
Selbstverlöschen der Flamme [s]	--	--	--	--	--	--
Ende des Nachglimmens [s]	--	--	--	--	--	--
Flammen wurden gelöscht nach	--	--	--	--	--	--
Rauchentwicklung	gering	gering	gering	gering	gering	gering
Brennendes Abtropfen [s]	--	--	--	--	--	--
Entzündung des Filterpapiers	nein	nein	nein	nein	nein	nein

Ablaufbeschreibung der Prüfung gemäß DIN EN ISO 11925-2

Die Ablaufbeschreibung enthält folgende Aussagen:

- visuelle Beobachtungen
- gemessene Daten

Antragsteller: Fachverband Strohballenbau Deutschland e. v.
Prüfmaterial: „Lehmputz beschichtete Strohballenwand“
Probenabmessung: 90 mm x 250 mm
Dicke: ca. 13 mm
Untergrund: Gipskartonplatte
Prüfdatum: ???
Beflammungsdauer: 15 s
Brandbeanspruchung: Kantenbeflammung

Probe Nr.	1	2	3	4	5	6
Auftreten einer Entzündung	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Flamme erreicht 150 mm	nein	nein	nein	nein	nein	nein
Dauer zum Erreichen von 150 mm t_{150} [s]	--	--	--	--	--	--
Größte Flammenhöhe [mm]	--	--	--	--	--	--
Selbstverlöschen der Flamme [s]	--	--	--	--	--	--
Ende des Nachglimmens [s]	--	--	--	--	--	--
Flammen wurden gelöscht nach	--	--	--	--	--	--
Rauchentwicklung	mäßig	mäßig	mäßig	mäßig	mäßig	mäßig
Brennendes Abtropfen [s]	--	--	--	--	--	--
Entzündung des Filterpapiers	nein	nein	nein	nein	nein	nein

Anhang Bautechnische Nachweise: Wärmeschutz

9 Wärmeleitfähigkeitstests an Stroh: Prüfberichte



Abb.: 7 Probevorbereitung für Wärmeleitfähigkeitsmessung



Abb.: 8 Probenvorbereitung für die Lambdamessung

Untersuchungsbericht

Antragsteller:	Fachverband Strohballenbau Deutschland e.V. 38486 Poppau
Inhalt des Antrags:	Prüfungen der Wärmeleitfähigkeit an „Baustrohballen“
Herkunft der Proben:	Die Proben wurden vom Antragsteller dem FIW München übersandt. Das Material traf am 28.06.06 im FIW München ein. Eingangsnummer: 7200
Herstellwerk:	Lüneburg/Mechtersen
Bericht Nr.:	L1-06-134
Ausstellungsdatum:	06.12.06
Textseiten:	4
Anlagen:	keine

Eine auszugsweise Veröffentlichung des Prüfberichtes in Druckschriften ist nur mit schriftlicher Genehmigung des FIW München zulässig

Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München
Lochhamer Schlag 4 · 82166 Grafelfing

Telefon +49 (0)89 8 58 00 -0 · Telefax +49 (0)89 8 58 00 -
40
info@fiw-muenchen.de · www.fiw-muenchen.de

Produktbeschreibung und Probenvorbereitung

Die Strohballen wurden am 22.06.06 von einem Mitarbeiter des FIW München in Lüneburg/Mechtersen entnommen. Es handelt sich um 2 Chargen „Baustrohballen“:

- Weizen aus dem Jahr 2004
- Roggen aus dem Jahr 2005

Die Strohballen werden durch eine zweifache Schnürung zusammengehalten.

Die Prüfung erfolgte für trockene Bedingungen und bei 23°C/80% rel. Feuchte am selben Probekörper. Die Trocknung des Strohs für die $\lambda_{10^\circ,lr}$ – Messungen erfolgt bei 70°C. Die Probekörper werden anschließend bei (23±0,5)°C und (80±2)% rel. Luftfeuchte bis zur Gewichtskonstanz über mehrere Wochen gelagert. Die Gewichtskonstanz ist erreicht, wenn zwischen aufeinanderfolgenden Messungen im Abstand von 24h die Masseänderung gleichbleibend kleiner als 0,1% ist.

Probekörper für Messung in Halmrichtung:

Aus einem Strohballen wird eine ca. 10 cm dicke Scheibe herausgeschnitten. Der Strohballen ist dabei so stabilisiert, daß sich die Abmessungen der Scheibe in Längen- und Breitenrichtung nicht verändern.

Auf der Scheibe wird ein Quadrat aufgezeichnet. An den Abmessungen des Quadrats können Veränderungen am Probekörper im Zuge der weiteren Probekörpervorbereitung abgelesen und korrigiert werden. Damit bleibt die Kerndichte bei der Anpassung an das Prüfgerät unverändert.

Probekörper für die Messung quer zur Halmrichtung:

Das Stroh wurde in Rahmen 500 x 500 x 100 mm³ eingebaut. Dabei wird die Schnürung entfernt und das Stroh in den Rahmen eingelegt. Die Probe wird anschließend auf die Sollrohddichte verdichtet.

Eine auszugsweise Veröffentlichung des Prüfberichtes in Druckschriften ist nur mit schriftlicher Genehmigung des FIW München zulässig.



Prüfbericht L1-06-134
Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München
Lochhamer Schlag 4 · 82166 Grafelfing

Seite 2 von 4
Telefon +49 (0)89 8 58 00 –0 Telefax +49 (0)89 8 58 00 –
40
info@fiw-muenchen.de · www.fiw-muenchen.de

Bemerkung:

Bei der Probenvorbereitung ist auf die Nachbildung der anisotropen Struktur (Halmrichtung) je nach Prüfanforderung besonders zu achten. Die ohne Schnürung lose Struktur erschwert übliche Verfahren der Probenvorbereitung.

Um dem Produkt gerecht zu werden, wurden deshalb bestehende Probenvorbereitungs- und Prüfverfahren so angepaßt und festgelegt, daß eine systematische Reproduzierbarkeit im gleichen Institut bei gleicher Probenvorbereitung und gleichem Prüfablauf gewährleistet werden kann. Ein kritischer Umgang beim Vergleich der Werte aus anderen Quellen ist geboten.

Gräfelfing, den 06. Dezember 2006

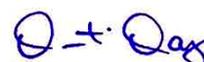
Sachgebietsleiter



Dipl.-Phys. S. Sieber



Bearbeiter



M. Mayer

Eine auszugsweise Veröffentlichung des Prüfberichtes in Druckschriften ist nur mit schriftlicher Genehmigung des FIW München zulässig

Prüfergebnisse

Die Wärmeleitfähigkeit wird mit dem Meßplattengerät (DIN 52 616) nach DIN EN 12 667 bei 10 °C sowohl in Halmrichtung, als auch quer dazu bestimmt.

Die Messungen lieferten folgende Ergebnisse:

		1	2	3	4
		Weizen	Roggen	Weizen	Roggen
		in Halmrichtung		quer zur Halmrichtung	
Trockenrohddichte	kg/m ³	105	115	93	93
Rohddichte (23°C/80%)	kg/m ³	120	-	105	104
$\lambda_{10,lr}$	W/m·K	0,0670	0,0820	0,0439	0,0422
$\lambda_{10,(23,80)}$	W/m·K	0,0800	-	0,0472	0,0465

Bestimmung der Umrechnungsfaktoren für die Feuchte nach EN ISO 10456:

Der Feuchtegehalt der Probe ist:

$$u_{23,80} = \frac{m_{23,80} - m_{23,u}}{m_{23,lr}} \quad \text{mit} \quad u_{23,lr} := 0,$$

Der Umrechnungsfaktor für den Feuchtegehalt F_m ist:

$$F_m = \frac{\lambda_{10,(23,80)}}{\lambda_{10,lr}}$$

Der massebezogene Feuchteumrechnungskoeffizient f_u ist:

$$f_u = \frac{\ln \frac{\lambda_{10,(23,80)}}{\lambda_{10,lr}}}{u_{23,80} - u_{23,u}} = \frac{\ln F_m}{u_{23,80}}$$

		1	2	3	4
		Weizen	Roggen	Weizen	Roggen
		in Halmrichtung		quer zur Halmrichtung	
Masse trocken $m_{21,lr}$	g	1844	-	2336	2329
Masse feucht $m_{23,80}$	g	2106	-	2631	2603
massebezogener Feuchtegehalt $u_{23,80}$	%	14,2	-	12,6	11,8
F_m	-	1,194	-	1,075	1,102
f_u	-	1,249	-	0,574	0,823

Eine auszugsweise Veröffentlichung des Prüfberichtes in Druckschriften ist nur mit schriftlicher Genehmigung des FIW München zulässig



Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München



Wärmeleitfähigkeit nach EN 12664

Prüfbericht Nr: F.2-589/08

Antragsteller: Fachverband Strohballenbau Deutschland e.V. FASBA, 21335 Lüneburg

Materialbezeichnung: " Baustrohballen "

Materialbeschreibung: Strohballen-Probe aus Weizenstroh, in Anlehnung an die Zulassung Z-23.11-1595 mit den Abmessungen: ca. 470 mm x 430 mm x 112 mm
 (lt. Antragsteller) Sollrohddichte lt. Angabe: 155 kg/m³
 Einbaurohddichte nach Trocknung bei 70°C: 115 kg/m³
 Herstelldatum lt. Angabe: 20.08.2007

Probenahme: Durch Mitarbeiter des Prüfinstitutes am 14.11.2007 in Lüneburg entnommen.

Prüfeinrichtung: Gerät für das Messplattenverfahren nach EN 12664: Messfläche 300 x 300 mm

Vorbereitung und Einbau: Einbaudicke: 0.1120 m Einbaumasse: 2.603 kg (nach Trocknung bei 70 °C)
 Probenfläche: 0.2021 m² Rohddichte: 115 kg/m³

Bemerkung: Für die Messung der Wärmeleitfähigkeit wurde die vom Antragsteller vorgefertigte Strohprobe nach Trocknung bei 70°C eingebaut.
 Die Wärmestromrichtung während der Messung war quer zur Halmrichtung.

Messwerte:

Versuch Nr	Wärmestromdichte W/m ²	Temperatur der Probenoberfläche		Mitteltemperatur der Probe °C	Temperaturdifferenz an der Probe K	Wärmeleitfähigkeit W/(m·K)
		warmen °C	kalten °C			
1	7.096	17.1	2.8	9.9	14.3	0.0553
2	----	----	----	----	----	----
3	----	----	----	----	----	----
4	----	----	----	----	----	----
5	----	----	----	----	----	----

Messunsicherheit: < 3%

Angaben über das Material nach der Messung bis 17.1 °C Warmseite:

Ausbaudicke: 0.1120 m Ausbaumasse: 2.603 kg
 Rohddichte: 115 kg/m³ Masseänderung: 0.0 %

Bemerkung: --

Ergebnisse:

Mitteltemperatur °C	10	---	---	---	---	---	---	---	---
Wärmeleitfähigkeit W/(m·K)	0.0553	---	---	---	---	---	---	---	---

Beurteilung: Die Messwerte der Wärmeleitfähigkeit gelten für den trockenen Zustand des geprüften Materials.

Gräfelfing, den 18.06.08

Sachgebietsleiter:

Sias
 Dipl.-Phys. S. Sieber

Prüfer:

A. Bergler
 A. Bergler



Prüfergebnisse beziehen sich nur auf Prüfgegenstände. Eine auszugsweise Veröffentlichung oder Wiedergabe des Prüfberichts ist nur mit vorheriger schriftlicher Genehmigung des FIW München zulässig.



Wärmeleitfähigkeit nach EN 12667

Prüfbericht Nr: F.2-909/08

Antragsteller: Fachverband Strohballenbau Deutschland e.V. FASBA, 21335 Lüneburg

Materialbezeichnung: " Baustrohballen "

Materialbeschreibung: Strohballen aus Weizenstroh mit den Abmessungen: ca. 970 mm x 520 mm x 360 mm
(lt. Antragsteller)

Probenahme: Durch Mitarbeiter des Prüfinstitutes am 14.11.2007 in Lüneburg entnommen.

Prüfeinrichtung: Gerät für das Messplattenverfahren nach EN 12667: Messfläche 300 x 300 mm

Vorbereitung und Einbau: Einbaudicke: 0.0750 m Einbaumasse: 2.344 kg
Probenfläche: 0.2354 m² Rohdichte: 133 kg/m³

Bemerkung: Für die Messung der Wärmeleitfähigkeit wurde aus einem Ballen ein Probekörper mit den Abmessungen: ca. 645 mm x 365 mm x 75 mm weitgehend unverändert ausgetrennt und in einen Prüfrahmen eingepasst. Der Probekörper ist identisch mit der Trockenmessung, vergl. Prüfbericht F.2-605/08. Der Probekörper wurde vor der Messung bei 23°C/80% rel. Luftfeuchte bis zur Massekonstanz gelagert. Der Feuchtegehalt $u_{23,80}$ beim Einbau: 14.0 Masse-%.

Messwerte:

Versuch Nr	Wärmestromdichte W/m ²	Temperatur der warmen kalten Probenoberfläche		Mitteltemperatur der Probe °C	Temperatur- differenz an der Probe K	Wärmeleitfähigkeit W/(m·K)
		°C	°C			
1	4.779	12.7	7.7	10.2	5.0	0.0715
2	----	----	----	----	----	----
3	----	----	----	----	----	----
4	----	----	----	----	----	----
5	----	----	----	----	----	----

Messunsicherheit: < 3%

Angaben über das Material nach der Messung bis 12.7 °C Warmseite:

Ausbaudicke: 0.0750 m Ausbaumasse: 2.344 kg
Rohdichte: 133 kg/m³ Masseänderung: 0.0 %

Bemerkung: Die Wärmestromrichtung entspricht bei dieser Messung der Halmrichtung.

Ergebnisse:

Mitteltemperatur °C	10	---	---	---	---	---	---	---	---
Wärmeleitfähigkeit W/(m·K)	0.0715	---	---	---	---	---	---	---	---

Beurteilung: Der Messwert der Wärmeleitfähigkeit gilt für den angegebenen Feuchtegehalt des geprüften Materials.

Zusammen mit dem Ergebnis der Trockenmessung, vergl. Prüfbericht F.2-605/08 ergibt sich entsprechend EN ISO 10456 ein Umrechnungsfaktor für den Feuchtegehalt $F_{m,(23/80)} = 1.100$.

Gräfelfing, den 31.07.08 Sachgebietsleiter:

S. Sieber
Dipl.-Phys. S. Sieber



Prüfer:

A. Bergler
A. Bergler

Prüfergebnisse beziehen sich nur auf Prüfgegenstände.
Eine auszugsweise Veröffentlichung oder Wiedergabe des Prüfberichts ist nur mit vorheriger schriftlicher Genehmigung des FIW München zulässig.

Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München
Lochhamer Schlag 4 · D-82166 Gräfelfing

Telefon +49 (0)89 8 58 00-0 · Telefax +49 (0)89 8 58 00-40
info@fiw-muenchen.de · www.fiw-muenchen.de



Wärmeleitfähigkeit nach EN 12667

Prüfbericht Nr: F.2-916/08

Antragsteller: Fachverband Strohballenbau Deutschland e.V. FASBA, 21335 Lüneburg

Materialbezeichnung: " Baustrohballen "

Materialbeschreibung: Strohballen aus Weizenstroh mit den Abmessungen: ca. 970 mm x 520 mm x 360 mm
(lt. Antragsteller)

Probenahme: Durch Mitarbeiter des Prüfinstitutes am 14.11.2007 in Lüneburg entnommen.

Prüfeinrichtung: Gerät für das Messplattenverfahren nach EN 12667: Messfläche 300 x 300 mm

Vorbereitung und Einbau: Einbaudicke: 0.1000 m Einbaumasse: 2.735 kg
Probenfläche: 0.2500 m² Rohdichte: 109 kg/m³

Bemerkung: Für die Messung der Wärmeleitfähigkeit wurden aus den übersandten Strohballen Strohproben entnommen und quer zur Halmrichtung in einen Prüfrahm eingeschichtet. Der Probekörper ist identisch mit der Trockenmessung, vergl. Prüfbericht F.2-714/08. Der Probekörper wurde vor der Messung bei 23°C/80% rel. Luftfeuchte bis zur Massekonstanz gelagert. Der Feuchtegehalt $u_{23,80}$ beim Einbau: 12.5 Masse-%.

Messwerte:

Versuch Nr	Wärmestromdichte W/m ²	Temperatur der		Mitteltemperatur der Probe °C	Temperatur- differenz an der Probe K	Wärmeleitfähigkeit W/(m·K)
		warmen Probenoberfläche °C	kalten °C			
1	2.446	12.7	7.5	10.1	5.2	0.0469
2	----	----	----	----	----	----
3	----	----	----	----	----	----
4	----	----	----	----	----	----
5	----	----	----	----	----	----

Messunsicherheit: < 3%

Angaben über das Material nach der Messung bis 12.7 °C Warmseite:

Ausbaudicke: 0.1000 m Ausbaumasse: 2.735 kg
Rohdichte: 109 kg/m³ Masseänderung: 0.0 %

Bemerkung: Die Wärmestromrichtung ist bei dieser Messung senkrecht zur Halmrichtung.

Ergebnisse:

Mitteltemperatur °C	10	---	---	---	---	---	---	---	---
Wärmeleitfähigkeit W/(m·K)	0.0469	---	---	---	---	---	---	---	---

Beurteilung: Der Messwert der Wärmeleitfähigkeit gilt für den angegebenen Feuchtegehalt des geprüften Materials.

Zusammen mit dem Ergebniss der Trockenmessung, vergl. Prüfbericht F.2-714/08 ergibt sich entsprechend EN ISO 10456 ein Umrechnungsfaktor für den Feuchtegehalt $F_{m,(23/80)} = 1.181$.

Gräfelfing, den 31.07.08

Sachgebietsleiter:

S. Sieber
Dipl.-Phys. S. Sieber



Prüfer:

A. Bergler
A. Bergler

Prüfergebnisse beziehen sich nur auf Prüfgegenstände. Eine auszugsweise Veröffentlichung oder Wiedergabe des Prüfberichts ist nur mit vorheriger schriftlicher Genehmigung des FIW München zulässig.

Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München
Lochhamer Schlag 4 · D-82166 Gräfelfing

Telefon +49 (0)89 8 58 00-0 · Telefax +49 (0)89 8 58 00-40
info@fiw-muenchen.de · www.fiw-muenchen.de



Wärmeleitfähigkeit nach EN 12667

Prüfbericht Nr: F.2-605/08

Antragsteller: Fachverband Strohballenbau Deutschland e.V. FASBA, 21335 Lüneburg
Materialbezeichnung: " Baustrohballen "
Materialbeschreibung: Strohhallen aus Weizenstroh mit den Abmessungen: ca. 970 mm x 520 mm x 360 mm
(lt. Antragsteller)
Probenahme: Durch Mitarbeiter des Prüfinstitutes am 14.11.2007 in Lüneburg entnommen.
Prüfeinrichtung: Gerät für das Messplattenverfahren nach EN 12667: Messfläche 300 x 300 mm
Vorbereitung und Einbau: Einbaudicke: 0,0750 m Einbaumasse: 2,055 kg
 Probenfläche: 0,2354 m² Rohdichte: 116 kg/m³
Bemerkung: Für die Messung der Wärmeleitfähigkeit wurde aus einem Ballen ein Probekörper mit den Abmessungen: ca. 645 mm x 365 mm x 75 mm weitgehend unverändert ausgetrennt und in einen Prüfrahmen eingepasst. Der Probekörper wurde vor der Messung bei 70°C getrocknet.

Messwerte:

Versuch Nr	Wärmestromdichte W/m ²	Temperatur der warmen kalten Probenoberfläche		Mitteltemperatur der Probe °C	Temperaturdifferenz an der Probe K	Wärmeleitfähigkeit W/(m·K)
		°C	°C			
1	11.957	16.8	3.0	9.9	13.8	0.0650
2	----	----	----	----	----	----
3	----	----	----	----	----	----
4	----	----	----	----	----	----
5	----	----	----	----	----	----

Messunsicherheit: < 3%

Angaben über das Material nach der Messung bis 16.8 °C Warmseite:

Ausbaudicke: 0,0750 m Ausbaumasse: 2,055 kg
 Rohdichte: 116 kg/m³ Masseänderung: 0,0 %

Bemerkung: Die Wärmestromrichtung entspricht bei dieser Messung der Halmrichtung.

Ergebnisse:

Mitteltemperatur °C	10	---	---	---	---	---	---	---	---
Wärmeleitfähigkeit W/(m·K)	0.0650	---	---	---	---	---	---	---	---

Beurteilung: Der Messwert der Wärmeleitfähigkeit gilt für den trockenen Zustand des geprüften Materials.

Gräfelfing, den 30.07.08

Sachgebietsleiter:

Dipl.-Phys. S. Steber



Prüfer:

A. Bergler

Prüfergebnisse beziehen sich nur auf Prüfgegenstände. Eine auszugsweise Veröffentlichung oder Wiedergabe des Prüfberichts ist nur mit vorheriger schriftlicher Genehmigung des FIW München zulässig.

Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München
 Lochhamer Schlag 4 · D-82166 Gräfelfing

Telefon +49 (0)89 8 58 00-0 · Telefax +49 (0)89 8 58 00-40
 info@fiw-muenchen.de · www.fiw-muenchen.de



Wärmeleitfähigkeit nach EN 12667

Prüfbericht Nr: F.2-605/08

Antragsteller: Fachverband Strohballenbau Deutschland e.V. FASBA, 21335 Lüneburg

Materialbezeichnung: " Baustrohballen "

Materialbeschreibung: Strohballen aus Weizenstroh mit den Abmessungen: ca. 970 mm x 520 mm x 360 mm
(lt. Antragsteller)

Probenahme: Durch Mitarbeiter des Prüfinstitutes am 14.11.2007 in Lüneburg entnommen.

Prüfeinrichtung: Gerät für das Messplattenverfahren nach EN 12667: Messfläche 300 x 300 mm

Vorbereitung und Einbau: Einbaudicke: 0.0750 m Einbaumasse: 2.055 kg
Probenfläche: 0.2354 m² Rohdichte: 116 kg/m³

Bemerkung: Für die Messung der Wärmeleitfähigkeit wurde aus einem Ballen ein Probekörper mit den Abmessungen: ca. 645 mm x 365 mm x 75 mm weitgehend unverändert ausgetrennt und in einen Prüfrahmen eingepasst. Der Probekörper wurde vor der Messung bei 70°C getrocknet.

Messwerte:

Versuch Nr	Wärmestromdichte W/m ²	Temperatur der Probenoberfläche		Mitteltemperatur der Probe °C	Temperaturdifferenz an der Probe K	Wärmeleitfähigkeit W/(m·K)
		warmen °C	kalten °C			
1	11.957	16.8	3.0	9.9	13.8	0.0650
2	----	----	----	----	----	----
3	----	----	----	----	----	----
4	----	----	----	----	----	----
5	----	----	----	----	----	----

Messunsicherheit: < 3%

Angaben über das Material nach der Messung bis 16.8 °C Warmseite:

Ausbaudicke: 0.0750 m Ausbaumasse: 2.055 kg
Rohdichte: 116 kg/m³ Masseänderung: 0.0 %

Bemerkung: Die Wärmestromrichtung entspricht bei dieser Messung der Halmrichtung.

Ergebnisse:

Mitteltemperatur °C	10	---	---	---	---	---	---	---	---
Wärmeleitfähigkeit W/(m·K)	0.0650	---	---	---	---	---	---	---	---

Beurteilung: Der Messwert der Wärmeleitfähigkeit gilt für den trockenen Zustand des geprüften Materials.

Gräfelfing, den 30.07.08

Sachgebietsleiter:

Dipl.-Phys. S. Sieber



Prüfer:

A. Bergler

Prüfergebnisse beziehen sich nur auf Prüfgegenstände. Eine auszugsweise Veröffentlichung oder Wiedergabe des Prüfberichts ist nur mit vorheriger schriftlicher Genehmigung des FIW München zulässig.

Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München
Lochhamer Schlag 4 · D-82166 Gräfelfing

Telefon +49 (0)89 8 58 00-0 · Telefax +49 (0)89 8 58 00-40
info@fiw-muenchen.de · www.fiw-muenchen.de

Untersuchungsbericht

Antragsteller:	Fachverband Strohballenbau Deutschland e.V. 38486 Poppau
Inhalt des Antrags:	Prüfungen der Wärmeleitfähigkeit an „Baustrohballen“
Herkunft der Proben:	Die Proben wurden vom Antragsteller dem FIW München übersandt. Das Material traf am 28.06.06 im FIW München ein. Eingangsnummer: 7200
Herstellwerk:	Lüneburg/Mechtersen
Bericht Nr.:	L1-06-134
Ausstellungsdatum:	06.12.06
Textseiten:	4
Anlagen:	keine

Eine auszugsweise Veröffentlichung des Prüfberichtes in Druckschriften ist nur mit schriftlicher Genehmigung des FIW München zulässig

Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München
Lochhamer Schlag 4 · 82166 Grafelfing

Telefon +49 (0)89 8 58 00 -0 · Telefax +49 (0)89 8 58 00 -
40
info@fiw-muenchen.de · www.fiw-muenchen.de

Produktbeschreibung und Probenvorbereitung

Die Strohballen wurden am 22.06.06 von einem Mitarbeiter des FIW München in Lüneburg/Mechtersen entnommen. Es handelt sich um 2 Chargen „Baustrohballen“:

- Weizen aus dem Jahr 2004
- Roggen aus dem Jahr 2005

Die Strohballen werden durch eine zweifache Schnürung zusammengehalten.

Die Prüfung erfolgte für trockene Bedingungen und bei 23°C/80% rel. Feuchte am selben Probekörper. Die Trocknung des Strohs für die $\lambda_{10^\circ,lr}$ – Messungen erfolgt bei 70°C. Die Probekörper werden anschließend bei (23±0,5)°C und (80±2)% rel. Luftfeuchte bis zur Gewichtskonstanz über mehrere Wochen gelagert. Die Gewichtskonstanz ist erreicht, wenn zwischen aufeinanderfolgenden Messungen im Abstand von 24h die Masseänderung gleichbleibend kleiner als 0,1% ist.

Probekörper für Messung in Halmrichtung:

Aus einem Strohballen wird eine ca. 10 cm dicke Scheibe herausgeschnitten. Der Strohballen ist dabei so stabilisiert, daß sich die Abmessungen der Scheibe in Längen- und Breitenrichtung nicht verändern.

Auf der Scheibe wird ein Quadrat aufgezeichnet. An den Abmessungen des Quadrats können Veränderungen am Probekörper im Zuge der weiteren Probekörpervorbereitung abgelesen und korrigiert werden. Damit bleibt die Kerndichte bei der Anpassung an das Prüfgerät unverändert.

Probekörper für die Messung quer zur Halmrichtung:

Das Stroh wurde in Rahmen 500 x 500 x 100 mm³ eingebaut. Dabei wird die Schnürung entfernt und das Stroh in den Rahmen eingelegt. Die Probe wird anschließend auf die Sollrohddichte verdichtet.

Eine auszugsweise Veröffentlichung des Prüfberichtes in Druckschriften ist nur mit schriftlicher Genehmigung des FIW München zulässig.



Prüfbericht L1-06-134
Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München
Lochhamer Schlag 4 · 82166 Grafelfing

Seite 2 von 4
Telefon +49 (0)89 8 58 00 -0 Telefax +49 (0)89 8 58 00 -
40
info@fiw-muenchen.de · www.fiw-muenchen.de

Bemerkung:

Bei der Probenvorbereitung ist auf die Nachbildung der anisotropen Struktur (Halmrichtung) je nach Prüfanforderung besonders zu achten. Die ohne Schnürung lose Struktur erschwert übliche Verfahren der Probenvorbereitung.

Um dem Produkt gerecht zu werden, wurden deshalb bestehende Probenvorbereitungs- und Prüfverfahren so angepaßt und festgelegt, daß eine systematische Reproduzierbarkeit im gleichen Institut bei gleicher Probenvorbereitung und gleichem Prüfablauf gewährleistet werden kann. Ein kritischer Umgang beim Vergleich der Werte aus anderen Quellen ist geboten.

Gräfelfing, den 06. Dezember 2006

Sachgebietsleiter



Dipl.-Phys. S. Sieber



Bearbeiter



M. Mayer

Eine auszugsweise Veröffentlichung des Prüfberichtes in Druckschriften ist nur mit schriftlicher Genehmigung des FIW München zulässig

Prüfbericht L1-06-134
Forschungsinstitut für Wärmeschutz e. V. München
Lochhamer Schlag 4 · 82166 Grafelfing

Seite 4 von 4
Telefon +49 (0)89 8 58 00 -0 · Telefax +49 (0)89 8 58 00 -
40
info@fiw-muenchen.de · www.fiw-muenchen.de

Prüfergebnisse

Die Wärmeleitfähigkeit wird mit dem Meßplattengerät (DIN 52 616) nach DIN EN 12 667 bei 10 °C sowohl in Halmrichtung, als auch quer dazu bestimmt.

Die Messungen lieferten folgende Ergebnisse:

		1	2	3	4
		Weizen	Roggen	Weizen	Roggen
		in Halmrichtung		quer zur Halmrichtung	
Trockenrohddichte	kg/m ³	105	115	93	93
Rohddichte (23°C/80%)	kg/m ³	120	-	105	104
$\lambda_{10,lr}$	W/m·K	0,0670	0,0820	0,0439	0,0422
$\lambda_{10,(23,80)}$	W/m·K	0,0800	-	0,0472	0,0465

Bestimmung der Umrechnungsfaktoren für die Feuchte nach EN ISO 10456:

Der Feuchtegehalt der Probe ist:

$$u_{23,80} = \frac{m_{23,80} - m_{23,u}}{m_{23,lr}} \quad \text{mit} \quad u_{23,lr} := 0,$$

Der Umrechnungsfaktor für den Feuchtegehalt F_m ist:

$$F_m = \frac{\lambda_{10,(23,80)}}{\lambda_{10,lr}}$$

Der massebezogene Feuchteumrechnungskoeffizient f_u ist:

$$f_u = \frac{\ln \frac{\lambda_{10,(23,80)}}{\lambda_{10,u}}}{u_{23,80} - u_{23,lr}} = \frac{\ln F_m}{u_{23,80}}$$

		1	2	3	4
		Weizen	Roggen	Weizen	Roggen
		in Halmrichtung		quer zur Halmrichtung	
Masse trocken $m_{21,lr}$	g	1844	-	2336	2329
Masse feucht $m_{23,80}$	g	2106	-	2631	2603
massebezogener Feuchtegehalt $u_{23,80}$	%	14,2	-	12,6	11,8
F_m	-	1,194	-	1,075	1,102
f_u	-	1,249	-	0,574	0,823

Eine auszugsweise Veröffentlichung des Prüfberichtes in Druckschriften ist nur mit schriftlicher Genehmigung des FIW München zulässig



Wärmeleitfähigkeit nach EN 12664

Prüfbericht Nr: F.2-589/08

Antragsteller: Fachverband Strohballenbau Deutschland e.V. FASBA, 21335 Lüneburg

Materialbezeichnung: " Baustrohballen "

Materialbeschreibung: (lt. Antragsteller) Strohhallen-Probe aus Weizenstroh, in Anlehnung an die Zulassung Z-23.11-1595 mit den Abmessungen: ca. 470 mm x 430 mm x 112 mm
Sollrohddichte lt. Angabe: 155 kg/m³
Einbaurohddichte nach Trocknung bei 70°C: 115 kg/m³
Herstelldatum lt. Angabe: 20.08.2007

Probenahme: Durch Mitarbeiter des Prüfinstitutes am 14.11.2007 in Lüneburg entnommen.

Prüfeinrichtung: Gerät für das Messplattenverfahren nach EN 12664: Messfläche 300 x 300 mm

Vorbereitung und Einbau: Einbaudicke: 0.1120 m Einbaumasse: 2.603 kg (nach Trocknung bei 70 °C)
Probenfläche: 0.2021 m² Rohddichte: 115 kg/m³

Bemerkung: Für die Messung der Wärmeleitfähigkeit wurde die vom Antragsteller vorgefertigte Strohhalle nach Trocknung bei 70°C eingebaut.
Die Wärmestromrichtung während der Messung war quer zur Halmrichtung.

Messwerte:

Versuch Nr	Wärmestromdichte W/m ²	Temperatur der warmen kalten Probenoberfläche		Mitteltemperatur der Probe °C	Temperatur- differenz an der Probe K	Wärmeleitfähigkeit W/(m·K)
		°C	°C			
1	7.096	17.1	2.8	9.9	14.3	0.0553
2	----	----	----	----	----	----
3	----	----	----	----	----	----
4	----	----	----	----	----	----
5	----	----	----	----	----	----

Messunsicherheit: < 3%

Angaben über das Material nach der Messung bis 17.1 °C Warmseite:

Ausbaudicke: 0.1120 m Ausbaumasse: 2.603 kg
Rohddichte: 115 kg/m³ Masseänderung: 0.0 %

Bemerkung: --

Ergebnisse:

Mitteltemperatur °C	10	---	---	---	---	---	---	---	---
Wärmeleitfähigkeit W/(m·K)	0.0553	---	---	---	---	---	---	---	---

Beurteilung: Die Messwerte der Wärmeleitfähigkeit gelten für den trockenen Zustand des geprüften Materials.

Gräfelfing, den 18.06.08 Sachgebietsleiter:
S. Sieber
Dipl.-Phys. S. Sieber



Prüfer:
A. Bergler
A. Bergler

Prüfergebnisse beziehen sich nur auf Prüfgegenstände.
Eine auszugsweise Veröffentlichung oder Wiedergabe des Prüfberichts ist nur mit vorheriger schriftlicher Genehmigung des FIW München zulässig.

Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München
Lochhamer Schlag 4 · D-82166 Gräfelfing

Telefon +49 (0)89 8 58 00-0 · Telefax +49 (0)89 8 58 00-40
info@fiw-muenchen.de · www.fiw-muenchen.de



Wärmeleitfähigkeit nach EN 12667

Prüfbericht Nr: F.2-909/08

Antragsteller: Fachverband Strohballenbau Deutschland e.V. FASBA, 21335 Lüneburg
Materialbezeichnung: " Baustrohballen "
Materialbeschreibung: Strohballen aus Weizenstroh mit den Abmessungen: ca. 970 mm x 520 mm x 360 mm
(lt. Antragsteller)
Probenahme: Durch Mitarbeiter des Prüfinstitutes am 14.11.2007 in Lüneburg entnommen.
Prüfeinrichtung: Gerät für das Messplattenverfahren nach EN 12667: Messfläche 300 x 300 mm
Vorbereitung und Einbau: Einbaudicke: 0.0750 m Einbaumasse: 2.344 kg
 Probenfläche: 0.2354 m² Rohdichte: 133 kg/m³
Bemerkung: Für die Messung der Wärmeleitfähigkeit wurde aus einem Ballen ein Probekörper mit den Abmessungen: ca. 645 mm x 365 mm x 75 mm weitgehend unverändert ausgetrennt und in einen Prüfrahmeneingepasst. Der Probekörper ist identisch mit der Trockenmessung, vergl. Prüfbericht F.2-605/08. Der Probekörper wurde vor der Messung bei 23°C/80% rel. Luftfeuchte bis zur Massekonstanz gelagert. Der Feuchtegehalt $u_{23,80}$ beim Einbau: 14.0 Masse-%.

Messwerte:

Versuch Nr	Wärmestromdichte W/m ²	Temperatur der warmen kalten Probenoberfläche		Mitteltemperatur der Probe °C	Temperatur- differenz an der Probe K	Wärmeleitfähigkeit W/(m·K)
		°C	°C			
1	4.779	12.7	7.7	10.2	5.0	0.0715
2	----	----	----	----	----	----
3	----	----	----	----	----	----
4	----	----	----	----	----	----
5	----	----	----	----	----	----

Messunsicherheit: < 3%

Angaben über das Material nach der Messung bis 12.7 °C Warmseite:

Ausbaudicke: 0.0750 m Ausbaumasse: 2.344 kg
 Rohdichte: 133 kg/m³ Masseänderung: 0.0 %

Bemerkung: Die Wärmestromrichtung entspricht bei dieser Messung der Halmrichtung.

Ergebnisse:

Mitteltemperatur °C	10	---	---	---	---	---	---	---	---
Wärmeleitfähigkeit W/(m·K)	0.0715	---	---	---	---	---	---	---	---

Beurteilung: Der Messwert der Wärmeleitfähigkeit gilt für den angegebenen Feuchtegehalt des geprüften Materials.

Zusammen mit dem Ergebnis der Trockenmessung, vergl. Prüfbericht F.2-605/08 ergibt sich entsprechend EN ISO 10456 ein Umrechnungsfaktor für den Feuchtegehalt $F_{m,(23/80)} = 1.100$.

Gräfelfing, den 31.07.08

Sachgebietsleiter:

S. Sieber
 Dipl.-Phys. S. Sieber



Prüfer:

A. Bergler
 A. Bergler

Prüfergebnisse beziehen sich nur auf Prüfgegenstände. Eine auszugsweise Veröffentlichung oder Wiedergabe des Prüfberichts ist nur mit vorheriger schriftlicher Genehmigung des FIW München zulässig.

Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München
 Lochhamer Schlag 4 · D-82166 Gräfelfing

Telefon +49 (0)89 8 58 00-0 · Telefax +49 (0)89 8 58 00-40
 info@fiw-muenchen.de · www.fiw-muenchen.de



Wärmeleitfähigkeit nach EN 12667

Prüfbericht Nr: F.2-916/08

Antragsteller: Fachverband Strohballenbau Deutschland e.V. FASBA, 21335 Lüneburg
Materialbezeichnung: " Baustrohballen "
Materialbeschreibung: Strohhallen aus Weizenstroh mit den Abmessungen: ca. 970 mm x 520 mm x 360 mm
(lt. Antragsteller)
Probenahme: Durch Mitarbeiter des Prüfinstitutes am 14.11.2007 in Lüneburg entnommen.
Prüfeinrichtung: Gerät für das Messplattenverfahren nach EN 12667: Messfläche 300 x 300 mm
Vorbereitung und Einbau: Einbaudicke: 0.1000 m Einbaumasse: 2.735 kg
 Probenfläche: 0.2500 m² Rohdichte: 109 kg/m³
Bemerkung: Für die Messung der Wärmeleitfähigkeit wurden aus den übersandten Strohhallen Strohproben entnommen und quer zur Halmrichtung in einen Prüfrahmen eingeschichtet. Der Probekörper ist identisch mit der Trockenmessung, vergl. Prüfbericht F.2-714/08. Der Probekörper wurde vor der Messung bei 23°C/80% rel. Luftfeuchte bis zur Massekonstanz gelagert. Der Feuchtegehalt $u_{23,80}$ beim Einbau: 12.5 Masse-%.

Messwerte:

Versuch	Wärmestromdichte	Temperatur der		Mitteltemperatur der Probe	Temperaturdifferenz an der Probe	Wärmeleitfähigkeit
		warmen Probenoberfläche	kalten			
Nr	W/m ²	°C	°C	°C	K	W/(m·K)
1	2.446	12.7	7.5	10.1	5.2	0.0469
2	----	----	----	----	----	----
3	----	----	----	----	----	----
4	----	----	----	----	----	----
5	----	----	----	----	----	----

Messunsicherheit: < 3%

Angaben über das Material nach der Messung bis 12.7 °C Warmseite:

Ausbaudicke: 0.1000 m Ausbaumasse: 2.735 kg
 Rohdichte: 109 kg/m³ Masseänderung: 0.0 %

Bemerkung: Die Wärmestromrichtung ist bei dieser Messung senkrecht zur Halmrichtung.

Ergebnisse:

Mitteltemperatur °C	10	---	---	---	---	---	---	---	---
Wärmeleitfähigkeit W/(m·K)	0.0469	---	---	---	---	---	---	---	---

Beurteilung: Der Messwert der Wärmeleitfähigkeit gilt für den angegebenen Feuchtegehalt des geprüften Materials.

Zusammen mit dem Ergebnis der Trockenmessung, vergl. Prüfbericht F.2-714/08 ergibt sich entsprechend EN ISO 10456 ein Umrechnungsfaktor für den Feuchtegehalt $F_{m,(23/80)} = 1.181$.

Gräfelfing, den 31.07.08

Sachgebietsleiter:

S. Sieber
 Dipl.-Phys. S. Sieber



Prüfer:

A. Bergler
 A. Bergler

Prüfergebnisse beziehen sich nur auf Prüfgegenstände. Eine auszugsweise Veröffentlichung oder Wiedergabe des Prüfberichts ist nur mit vorheriger schriftlicher Genehmigung des FIW München zulässig.

Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München
 Lochhamer Schlag 4 · D-82166 Gräfelfing

Telefon +49 (0)89 8 58 00-0 · Telefax +49 (0)89 8 58 00-40
 info@fiw-muenchen.de · www.fiw-muenchen.de



Wärmeleitfähigkeit nach EN 12667

Prüfbericht Nr: F.2-605/08

Antragsteller: Fachverband Strohballenbau Deutschland e.V. FASBA, 21335 Lüneburg

Materialbezeichnung: " Baustrohballen "

Materialbeschreibung: Strohballen aus Weizenstroh mit den Abmessungen: ca. 970 mm x 520 mm x 360 mm
(lt. Antragsteller)

Probenahme: Durch Mitarbeiter des Prüfinstitutes am 14.11.2007 in Lüneburg entnommen.

Prüfeinrichtung: Gerät für das Messplattenverfahren nach EN 12667: Messfläche 300 x 300 mm

Vorbereitung und Einbau: Einbaudicke: 0.0750 m Einbaumasse: 2.055 kg
Probenfläche: 0.2354 m² Rohdichte: 116 kg/m³

Bemerkung: Für die Messung der Wärmeleitfähigkeit wurde aus einem Ballen ein Probekörper mit den Abmessungen: ca. 645 mm x 365 mm x 75 mm weitgehend unverändert ausgetrennt und in einen Prüfrahmen eingepasst. Der Probekörper wurde vor der Messung bei 70°C getrocknet.

Messwerte:

Versuch Nr	Wärmestromdichte W/m ²	Temperatur der Probenoberfläche		Mitteltemperatur der Probe °C	Temperaturdifferenz an der Probe K	Wärmeleitfähigkeit W/(m·K)
		warmen °C	kalten °C			
1	11.957	16.8	3.0	9.9	13.8	0.0650
2	----	----	----	----	----	----
3	----	----	----	----	----	----
4	----	----	----	----	----	----
5	----	----	----	----	----	----

Messunsicherheit: < 3%

Angaben über das Material nach der Messung bis 16.8 °C Warmseite:

Ausbaudicke: 0.0750 m Ausbaumasse: 2.055 kg
Rohdichte: 116 kg/m³ Masseänderung: 0.0 %

Bemerkung: Die Wärmestromrichtung entspricht bei dieser Messung der Halmrichtung.

Ergebnisse:

Mitteltemperatur °C	10	---	---	---	---	---	---	---	---
Wärmeleitfähigkeit W/(m·K)	0.0650	---	---	---	---	---	---	---	---

Beurteilung: Der Messwert der Wärmeleitfähigkeit gilt für den trockenen Zustand des geprüften Materials.

Gräfelfing, den 30.07.08

Sachgebietsleiter:

Dipl.-Phys. S. Sieber



Prüfer:

A. Bergler

Prüfergebnisse beziehen sich nur auf Prüfgegenstände. Eine auszugsweise Veröffentlichung oder Wiedergabe des Prüfberichts ist nur mit vorheriger schriftlicher Genehmigung des FIW München zulässig.

Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München
Lochhamer Schlag 4 · D-82166 Gräfelfing

Telefon +49 (0)89 8 58 00-0 · Telefax +49 (0)89 8 58 00-40
info@fiw-muenchen.de · www.fiw-muenchen.de



Wärmeleitfähigkeit nach EN 12667

Prüfbericht Nr: F.2-714/08

Antragsteller: Fachverband Strohballenbau Deutschland e.V. FASBA, 21335 Lüneburg

Materialbezeichnung: " Baustrohballen "

Materialbeschreibung: Strohballen aus Weizenstroh mit den Abmessungen: ca. 970 mm x 520 mm x 360 mm
(lt. Antragsteller)

Probenahme: Durch Mitarbeiter des Prüfinstitutes am 14.11.2007 in Lüneburg entnommen.

Prüfeinrichtung: Gerät für das Messplattenverfahren nach EN 12667: Messfläche 300 x 300 mm

Vorbereitung und Einbau: Einbaudicke: 0.1000 m Einbaumasse: 2.431 kg
Probenfläche: 0.2500 m² Rohdichte: 97.2 kg/m³

Bemerkung: Für die Messung der Wärmeleitfähigkeit wurden aus den übersandten Strohballen Strohproben entnommen und quer zur Halmrichtung in einen Prüfrahm eingeschichtet.
Der Probekörper wurde vor der Messung bei 70°C getrocknet.

Messwerte:

Versuch Nr	Wärmestromdichte W/m ²	Temperatur der warmen kalten Probenoberfläche		Mitteltemperatur der Probe °C	Temperatur- differenz an der Probe K	Wärmeleitfähigkeit W/(m·K)
		°C	°C			
1	5.431	17.0	3.4	10.2	13.6	0.0397
2	----	----	----	----	----	----
3	----	----	----	----	----	----
4	----	----	----	----	----	----
5	----	----	----	----	----	----

Messunsicherheit: < 3%

Angaben über das Material nach der Messung bis 17 °C Warmseite:

Ausbaudicke: 0.1000 m Ausbaumasse: 2.431 kg
Rohdichte: 97.2 kg/m³ Masseänderung: 0.0 %

Bemerkung: Die Wärmestromrichtung ist bei dieser Messung senkrecht zur Halmrichtung.

Ergebnisse:

Mitteltemperatur °C	10	---	---	---	---	---	---	---	---
Wärmeleitfähigkeit W/(m·K)	0.0397	---	---	---	---	---	---	---	---

Beurteilung: Der Messwert der Wärmeleitfähigkeit gilt für den trockenen Zustand des geprüften Materials.

Gräfelfing, den 30.07.08

Sachgebietsleiter:

S. Steber
Dipl.-Phys. S. Steber



Prüfer:

A. Bergler
A. Bergler

Prüfergebnisse beziehen sich nur auf Prüfgegenstände. Eine auszugsweise Veröffentlichung oder Wiedergabe des Prüfberichts ist nur mit vorheriger schriftlicher Genehmigung des FIW München zulässig.

Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München
Lochhamer Schlag 4 · D-82166 Gräfelfing

Telefon +49 (0)89 8 58 00-0 · Telefax +49 (0)89 8 58 00-40
info@fiw-muenchen.de · www.fiw-muenchen.de

10 Wärmedurchlasswiderstand einer lehmverputzten Holzständerwand mit Strohdämmung: Prüfbericht



Abb.: 9 Prüfvorrichtung nach EN 1934



Abb.: 10 Vorbereitung der Prüfwand Messung der Wärmedurchlasswiderstand am FIW München durch Architekt Olaf Eggers und Zimmerermeister Ulrich Schmidt

UNTERSUCHUNGSBERICHT

Antragsteller:	FASBA Fachverband Strohballebau Deutschland e.V. Auf der Rübekuhle 10 21335 Lüneburg
Inhalt des Antrags:	Messung des Wärmedurchlasswiderstandes nach DIN EN 1934 im Heizkasten mit Wärmestrommesser.
Prüfkörper:	Wand aus einem Holzrahmen mit als Dämmung eingesetzten Strohballen
Bericht Nr.:	I 1-08/06
Ausstellungsdatum:	14. November 2006
Seiten inkl. Anlagen:	11
Anlagen:	5

1. Aufgabenstellung und Angaben

Für den Fachverband Strohballebaus (FASBA) in Lüneburg wird der Wärmedurchlasswiderstand einer Wand aus einem Holzrahmen mit eingesetzten Strohballen, nach DIN EN 1934¹⁾ im Heizkasten mit Wärmestrommesser geprüft.

Probennahme: Die Strohballen für die Wandfüllung wurden vom Auftraggeber an das FIW München geschickt.

Wareneingang: 7322 am 4. September 2006

Probekörper: In einen Holzrahmen werden Strohballen eingeklemmt und anschließend mit Lehm verputzt. Der Ablauf der Herstellung ist in den Anlagen dargestellt.

Länge:	1,500 m
Höhe:	1,500 m
Dicke:	0,391 m
Masse*:	308,5 kg
Rohdichte*:	350,7 kg/m ³
Flächenbezogene Masse*:	173,1 kg/m ²
Masse nach Ausbau:	308,5 kg/m ³

* im trockenen Zustand

Herstellung: Durch Mitarbeiter des FASBA am 4. September im FIW München hergestellt und am 5. September verputzt mit Lehmputz.

Trocknung: Lufttrocknung vom 5. September bis 15. September
Ofentrocknung 40°C vom 15. September bis 18. September
Ofentrocknung 70°C vom 18. September bis 9. Oktober

Abkühlzeit: 2 Tage (in Folie eingewickelt)

Einbau: 11. Oktober 2006

¹ DIN EN 1934:1998-04 „Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Messung des Wärmedurchlasswiderstandes – Heizkastenverfahren mit dem Wärmestrommesser – Mauerwerk“

Prüfergebnisse beziehen sich nur auf Prüfgegenstände. Eine auszugsweise Veröffentlichung oder eine Bezugnahme auf den Prüfbericht ist nur mit vorheriger schriftlicher Genehmigung des FIW München zulässig.

Prüfbericht I 1-08/06

Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München
Lochhamer Schlag 4 · 82166 Grafelfing

Seite 2 von 11

Telefon +49 (0)89 8 58 00 -0 · Telefax +49 (0)89 8 58 00 - 40
info@fiw-muenchen.de · www.fiw-muenchen.de

**Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V.
München**



Prüfzeitraum:	11. Oktober 2006 bis 22. Oktober 2006
Massen:	58,0 kg Holz für den Rahmen 80 kg Stroh 193 kg Lehmputz nass 22 kg Wasser 171 kg Lehmputz trocken
Prüfstand:	Heizkastenprüfstand für Wände und Fassaden
Heizkasten:	1,50 m x 2,50 m
Dicke Prüfrahmens:	0,38 m
Emissionsgrad:	0,95
Messplatte:	Nr. 190; 0,50 x 0,50 m auf der Oberfläche der Warmseite des Probekörpers
Kalibrierdatum:	11. November 2005
Thermoelemente:	Kupfer-Konstantan; Klasse 1
Anzahl:	9 auf der Messfläche 12 auf der Schutzfläche
Luftgeschwindigkeit:	Warmseite: 0,2 m/s von oben nach unten Kaltseite: 2,6 m/s von unten nach oben

 Prüfergebnisse beziehen sich nur auf Prüfgegenstände. Eine auszugsweise Veröffentlichung oder eine Bezugnahme auf den Prüfbericht ist nur mit vorheriger schriftlicher Genehmigung des FIW München zulässig.

Prüfbericht I 1-08/06

Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München
Lochamer Schlag 4 · 82166 Grafelfing

Seite 3 von 11

Telefon +49 (0)89 8 58 00 -0 · Telefax +49 (0)89 8 58 00 - 40
info@fiw-muenchen.de · www.fiw-muenchen.de

2. Ergebnisse

Ergebnis	Wert	Einheit
mittlere Lufttemperatur Warmseite	19,52	°C
mittlere Lufttemperatur Kaltseite	0,47	°C
mittlere Temperatur der Messfläche auf der Warmseite	19,22	°C
mittlere Temperatur der Schutzfläche auf der Warmseite	19,13	°C
mittlere Temperatur der Messfläche auf der Kaltseite	1,19	°C
mittlere Temperatur der Schutzfläche auf der Kaltseite	1,15	°C
mittlere Temperatur der Wärmestrom-Messplattenoberfläche auf der Warmseite	19,11	°C
mittlere Temperatur der Messplatte auf der Warmseite	19,16	°C
mittlere Temperaturdifferenz an der Wand	18,02	K
Mitteltemperatur der Wand	10,20	°C
mittlere Wärmestromdichte	3,31	W/m ²
mittlerer Wärmedurchlasswiderstand der Wand	5,45	m ² ·K/W
genormter Übergangswiderstand	0,17	m ² ·K/W
Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert)	0,178	W/(m ² ·K)
Wärmeleitfähigkeit der Wand im trockenen Zustand	0,072	W/(m·K)

Prüfergebnisse beziehen sich nur auf Prüfgegenstände. Eine auszugsweise Veröffentlichung oder eine Bezugnahme auf den Prüfbericht ist nur mit vorheriger schriftlicher Genehmigung des FIW München zulässig.

Prüfbericht I 1-08/06

Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München
Lochhamer Schlag 4 · 82166 Grafelfing

Seite 4 von 11

Telefon +49 (0)89 8 58 00 -0 · Telefax +49 (0)89 8 58 00 - 40
info@fiw-muenchen.de · www.fiw-muenchen.de

3. Beurteilung

Im trockenen Zustand weist die Wand einen gemessenen Wärmedurchlasswiderstand von

$$R_g = 5,45 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

auf. Die daraus errechnete äquivalente Wärmeleitfähigkeit des unverputzten Mauerwerks im trockenen Zustand beträgt

$$\lambda_{10, \text{tr}} = 0,072 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$$

Die angegebenen Messwerte stellen keine Bemessungswerte im Sinne der DIN 4108-4 dar. Bemessungswerte werden gesondert festgelegt und bekanntgegeben.

Unter Berücksichtigung der beiden Lehmputzschichten kann für die Strohballen in der eingebauten Halmrichtung (siehe Anlagen der Wandherstellung) die Wärmeleitfähigkeit nach den folgenden Berechnungen ermittelt werden:

Lehm: Rohdichte ca. 1800 bis 2200 kg/m³ → gewählt: 2000 kg/m³
Wärmeleitfähigkeit 0,9 bis 1,1 W/(m·K) → gewählt 1,0 W/(m·K)
171 kg Lehm entsprechen 38 kg/m² (zweiseitig)
38/2000 = 0,019 m Schichtdicke (auf jeder Seite der Wand)

Die Wärmeleitfähigkeit der Strohballen in der gewählten Halmrichtung und einschließlich des in die oberen Strohschichten geflossenen Lehm-Wasser-Gemischs kann somit zu:

$$\lambda_{10, \text{tr}} = 0,065 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$$

angegeben werden.

**Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V.
München**



4. Haftung

Die gemessenen Werte gelten nur für die angegebenen Materialien sowie deren Eigenschaften und Abmessungen. Für die durchgeführten Messungen ist der gegenwärtige Stand der Forschung maßgebend. Eine Haftung kann daher nur im Rahmen dieses Kenntnisstandes übernommen werden. Die Gewährleistung für gutachterliche Aufträge an das FIW München e.V. beschränkt sich auf die gesetzliche Haftung von 5 Jahren entsprechend den Verjährungsbestimmungen nach § 634a BGB für Bauwerke.

Gräfelfing, den 14. November 2006


Dipl.-Ing. Christoph Sprengard




Gerhard Treiber

Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V.
München



Anlagen: Herstellung der Wand am 4. und 5. September 2006 sowie Einbau der Wand in den Prüfstand am 11. Oktober 2006

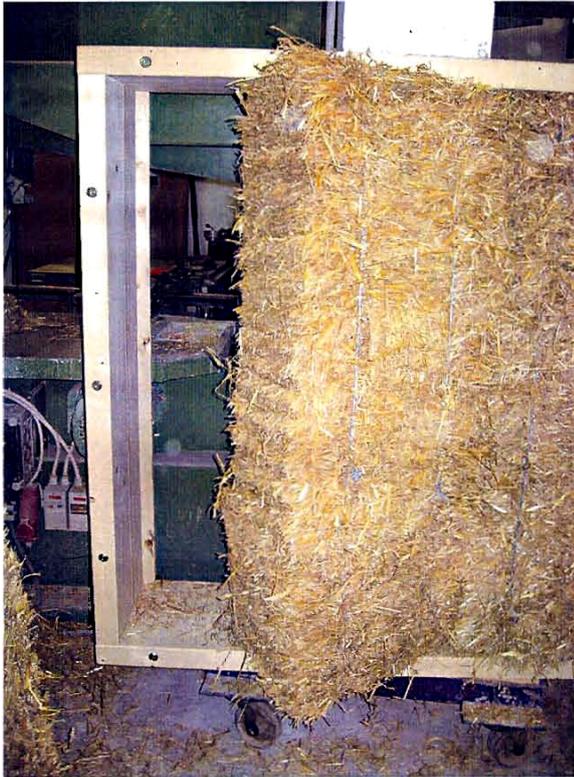


Bild 1: In einen Holzrahmen der Außenabmessungen 1,5 x 1,5 m werden Strohballen eingesetzt und gegeneinander verkeilt.



Bild 2: Durch Herstellung des Probekörpers im Liegen wird eine sehr gute Verkeilung der Ballen erreicht. Die dann noch vorhandenen Hohlräume im Bereich der Stoßstellen der Ballen werden mit losem Stroh zugestopft.



Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V.
München

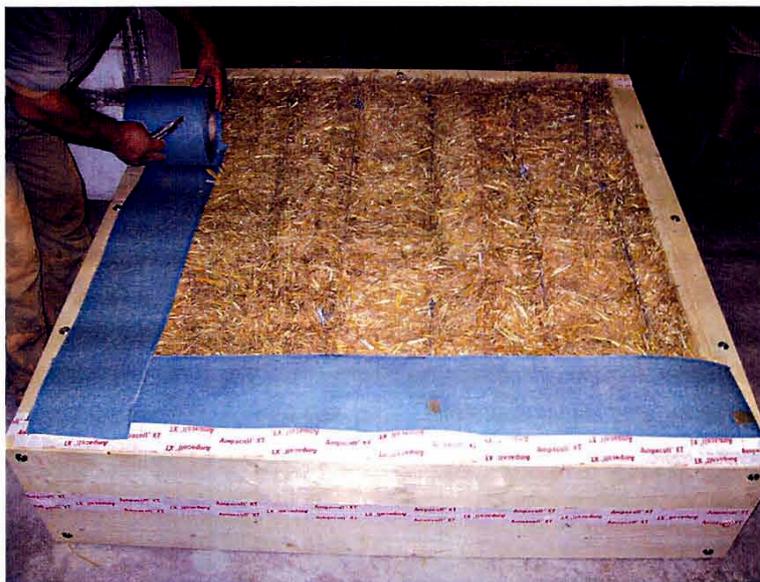


Bild 3: Verklebung der Ränder des Probekörpers mittels eines Windpapiers und Klebeband

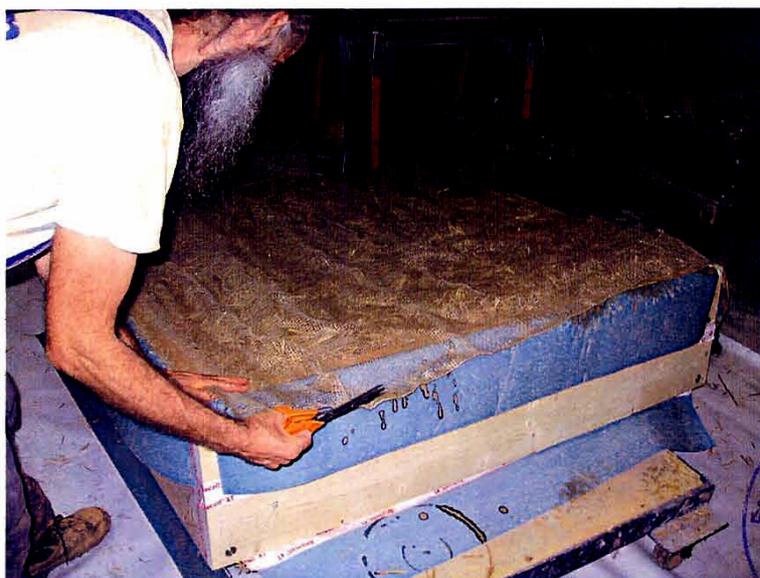


Bild 4: Einlegen eines Gewebes um die Putzhaf-
tung des Lehmes zu ver-
bessern





Bild 5: In eine erste Lage Lehmputz wird das Gewebe eingebracht und am Holzrahmen mittels Heftklammern befestigt.



Bild 6: Nachdem das Gewebe mit einer weiteren Schicht Lehmputz bedeckt wurde, wird das mit dem Klebeband befestigte Windpapier umgeklappt und angedrückt.



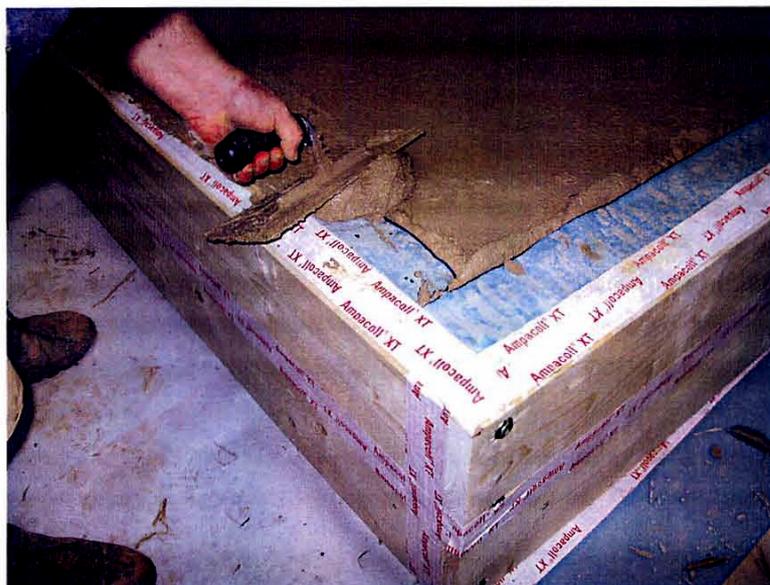


Bild 7: Auf das umgeklappte Windpapier und die restliche Wandoberfläche wird eine weitere Schicht Lehmputz aufgezogen und geglättet.

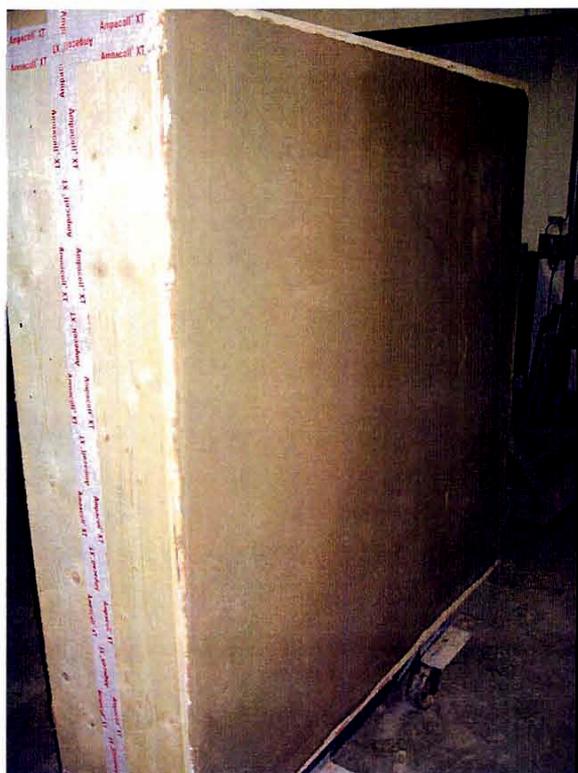


Bild 8: Die fertige Wand wird mehrere Tage luftgetrocknet. Danach erfolgt die weitere Trocknung im Trockenofen für Mauerwerk, erst einige Tage bei 40°C und dann bis zum Einbau bei 70°C.



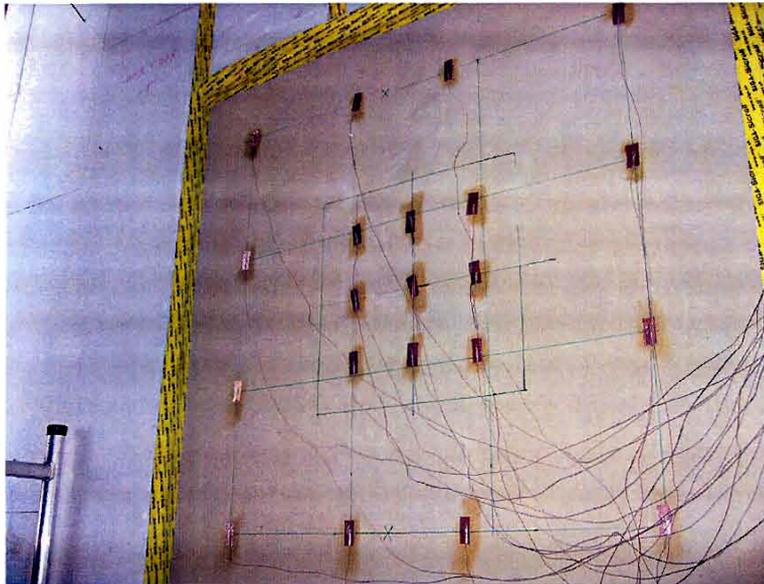


Bild 9: Beim Einbau in den Prüfstand wird auf eine gleichmäßige Verteilung der Thermoelemente und auf einen luftdichten Randanschluss Wert gelegt.



Bild 10: Auf der Warmseite wird die Mauer mit einer Wärmestrommessplatte belegt (kleines Quadrat in der Mitte). Um an allen Stellen gleiche Verhältnisse für den Wärmestrom zu gewährleisten, werden um die Messplatte Schutzplatten gleicher Dicke angeordnet (vier schwarze Rechtecke um das kleine Quadrat in der Mitte).



Anhang Bautechnische Nachweise: Schallschutz

1 Schallschutzmessung einer Strohballenwand: Prüfbericht

Anschriften

Auftraggeber:

FASBA
Fachverband Strohballenbau Deutschland e.V.
Sieben Linden 1
38486 Poppau

c/o Dirk Scharmer
In de Marsch 6
21394 Südergellersen

Tel.: 04131/ 2278649

Fax: 04131/ 2278648

Email: ds@fasba.de

Bestimmung der

Feuerwiderstandsklasse

ABP zu Brandschutz: P-3154/4694-MPA BS
Materialprüfanstalt (MPA) für das Bauwesen
Beethovenstraße 52
38106 Braunschweig

Tel.: 0531/ 391-5400

Fax: 0531/ 391-5900

Email: info@mpa.tu-bs.de

Allgemeine

bauaufsichtliche Zulassung

Wärmedämmstoff aus Strohballen
Deutsches Institut für Bautechnik
Zulassungsnr.: Z-23.11-1595 vom 2006-02-10
Kolonnenstraße 30 L
10829 Berlin

Tel.: 030/ 78730-332

Fax: 030/ 78730-320

Auftragnehmer:

IAB

Institut für Akustik und Bauphysik

Kiesweg 22

61440 Oberursel

Tel: 06171/75031

Fax: 06171/85483

E-Mail: info@iab-oberusel.de

Sachbearbeiter:

Dipl.-Ing. W. Teuber

mobil: 0171/4345821

E-Mail: teuber@iab-oberusel.de

Inhaltsverzeichnis	Seite
1. Einleitung und Aufgabenstellung	5
2. Beschreibung des Prüfstandes	5
3. Aufbau und Einbau der Strohballenwand	6
4. Messergebnisse	9
4.1. Luftschalldämmung beidseitig Lehmputz	9
4.2. Luftschalldämmung Putzschicht einseitig aufgedoppelt	10
4.3. Strömungswiderstand	11
5. Messverfahren	13
6. Zusammenfassung	14
7. Anlagen	15

Die Prüffläche beträgt damit

$$S = 12,32 \text{ m}^2$$

Das Volumen des Prüfraumes L2, genutzt als Senderraum, beträgt $V = 75,6 \text{ m}^3$; der angrenzende Empfangsraum L1 weist $V = 67,1 \text{ m}^3$ auf.

Das Schalldämmmaß wurde im Rahmen der Fertigstellung des Prüfstandes untersucht. Nach Einbringen einer doppelschaligen Massivwand der Mauerwerkstärke $2 \times 17,5 \text{ cm}$, verputzt und mittiger Trennfuge wurde der Schalldämmwert zu $R_w = 73 \text{ dB}$ bestimmt.

Der unterseitige doppelschalig aufgemauerte Sockel besitzt den rechnerisch nach DIN 4109 Beiblatt 1, Tabelle 6 bestimmten Wert $R'_w > 67 \text{ dB}$.

3. Aufbau und Einbau der Strohballenwand

Die einzelnen Schritte zum Aufbau der Wand sind zusammen mit Konstruktionen und Einzeldaten nachfolgend beschrieben.

- * Anlieferung der Strohballen (Weizenstroh) am 2008-05-19, Lagerung in trockenem Raum des IAB
- * Aufbau der Wand durch Mitarbeiter des Fachverbandes Strohballenbau im Zeitraum 2008-06-02 bis 04
- * Einbau eines umlaufenden Rahmen aus Fichtenholzbrettern mit vertikalen Ausfachungen durch 3 senkrecht stehende Bretter, Anordnung nach

Anlage 2	A59351	Ausführung der Holz- Rahmen- konstruktion
----------	--------	--

Transport der Strohballen zum Prüfraum, hierbei Bestimmung des Gewichtes jedes einzelnen Ballens

Ergebnisse in

Anlage 3 A59354 Gewicht und Verteilungsfunktion
angelieferter Strohballen

Geliefert wurden insgesamt 26 Ballen. Zwei davon wurden nicht verwendet und in gleicher Weise wie das nach Fertigstellung übrig gebliebene lose Stroh gewogen. Eingebaut wurden damit Strohballen im Gesamtgewicht 457,7 kg. Umgerechnet auf die gesamte Wandfläche (12,32 m²) entspricht dies einer flächenbezogenen Masse $m' = 37,2 \text{ kg/m}^2$.

Strohballen sind gepresst und gestopft, verbleibende Lücken mit losem Material ausgefüllt. Die Orientierung der Halme erfolgt horizontal in Richtung von einer zur gegenüberliegenden Wandseite/ Putzseite.

- * Fichtenholzbretter als Anschluss zu Seitenwänden und Sockel des Prüfstandes: 50 mm Knauf-Dämmband der Stärke 3 mm in zwei nebeneinander liegenden Streifen untergeklebt, Fugen zwischen Holzbrettern und Prüfstandswand dauerelastisch abgedichtet
- * Oberseitige Fuge, zu Deckenanschluss, der Breite 35 – 40 mm, satt mit Mineralwolle ausgestopft und beidseitig Holzbretter der Dicke 12 mm und Höhe 80 mm gegengeschraubt. Fugen zur Prüfraumdecke und Fichtenholzbretter der Strohballenwand dauerelastisch abgedichtet

Anlage 4 A59352 Fotos, Aufnahmen während des
Anbringens der Strohballen

- * Fixierung der Ballen durch Dreikantleisten, auf den Fichtenholzbrettern aufgeschraubt
- * Anbringen von Weichfaser- Streifen der Dicke 18 mm stirnseitig auf Fichtenholzbrettern, vorgesehen als Haftgrund für den Lehmputz.

Der spezifische Strömungswiderstand R_s ist definiert durch das Produkt der durchströmten Querschnittsfläche A mit dem Strömungswiderstand R , siehe auch Gleichung (2):

$$R_s = R \cdot A \quad (2)$$

R_s	$\frac{\text{Pa} \cdot \text{s}}{\text{m}}$	spezifischer Strömungswiderstand
A	m^2	Querschnittsfläche des Probenkörpers

Wenn das Material als homogen angenommen werden kann, ist der längenbezogene Strömungswiderstand r , definiert durch Gleichung (3):

$$r = \frac{R_s}{d} = \frac{\Delta p}{q_v d} \cdot A = \frac{p_1 - p_2}{q_v d} \cdot A \quad \frac{\text{Pa} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} \quad (3)$$

r	$\frac{\text{Pa} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}$	längenbezogener Strömungswiderstand
d	m	Schichtdicke

Messverfahren und Bezeichnung

Die Messung erfolgt nach DIN EN 29053-1993, Punkt 6.

Ein wechselnder Luftstrom wird durch einen Kolben erzeugt, der sich sinusförmig mit einer Frequenz von etwa 2 Hz bewegt.

Der Wechseldruck im Probenhalter wird mit einem seitlich befestigten Kondensator-Mikrofon gemessen, das mit einem Verstärker und einem Anzeigegerät verbunden ist. Das verwendete Messgerät zeigt direkt den spezifischen Strömungswiderstand an.

Materialproben

Aus dem angelieferten Material werden zylindrische Proben hergestellt, die im Durchmesser ca. 102 mm betragen. Die Prüffläche ist kreisrund und hat eine Höhe von ca 105 mm. Die Messungen erfolgten an insgesamt 3 Probekörpern. Zur Bestimmung der Dichte wurden alle Probekörper gewogen, und deren Volumen bestimmt.

Anlage 12 A 59828 Messergebnisse Strömungswiderstand

Der Strömungswiderstand R beträgt bei 9 Messung an 3 Probekörpern im Mittel:

$$\mathbf{R = 22151 \text{ Pa s/m}^3}$$

Der spezifische Strömungswiderstand Rs beträgt im Mittel:

$$\mathbf{Rs = 181 \text{ Pa s/m}}$$

Der längenbezogene Strömungswiderstand r berechnet sich bei einer Probendicke d = 105mm zu:

$$\mathbf{r = 1724 \text{ Pa s/m}^2}$$

5. Messverfahren

Das Schalldämm-Maß R errechnet sich gemäß DIN EN ISO 140-3 nach folgender Formel aus den Messwerten:

$$R = D + 10 \lg S/A$$

$$\text{mit: } A = 0,16 \times V/T$$

Dabei ist:

- D Schallpegeldifferenz zwischen Sende- und Empfangsraum je Terz (dB)
- S Fläche des trennenden Bauteils (m²)
- A Äquivalente Absorptionsfläche im Empfangsraum je Terz (m²)
- V Volumen des Empfangsraums (m³)
- T Nachhallzeit im Empfangsraum je Terz (s)

Das bewertete Schalldämm-Maß R_w wird als Einzahlwert nach DIN EN ISO 717-1 berechnet.

Zur Ermittlung der Luftschalldämmung wird Rosa Rauschen über eine Tieftonbox (50-160 Hz) bzw. Lautsprecher mit kugelförmiger Richtcharakteristik (Dodekaeder; 200-500 Hz) abgestrahlt. Der mittlere Schallpegel im Sende- und Empfangsraum wird mit einem in schräg liegenden Kreisbahnen bewegten Mikrofon und zeitlicher energetischer Mittelung gemessen. Die äquivalente Absorptionsfläche des Empfangsraums ist durch Nachhallzeitmessungen ermittelt.

Verwendung findet das Bauakustik-Messsystem Norsonic 840 (geeicht). Es ist Bestandteil des IAB als Stelle zur Erteilung allgemeiner bauaufsichtlicher Prüfzeugnisse ABP, VMPA Güteprüfstelle für den Schallschutz im Hochbau und Messstelle §26, 28 BImSchG. Das IAB nimmt an turnusmäßigen Schallschutz-Vergleichsmessungen bei der PTB in Braunschweig teil.

Strömungswiderstände sind gemessen mit der Apparatur Norsonic 915.

6. Zusammenfassung

Die Messung der Luftschalldämmung im Wandprüfstand ohne Nebenwege, Prüfstand nach DIN EN ISO 140-1, ergab an einer Strohballenwand der Stärke 356 mm, beidseitig einlagig Lehmputz, das bewertete Laborschalldämmmaß

$$R_{w,P} = 45 \text{ dB}$$

Bei Beurteilung nach DIN 4109 ergibt sich der Rechenwert (abzüglich Vorhaltemaß 2 dB) zu

$$R_{w,R} = 43 \text{ dB}$$

Nach einseitiger Aufdopplung des Lehmputzes wurden gemessen:

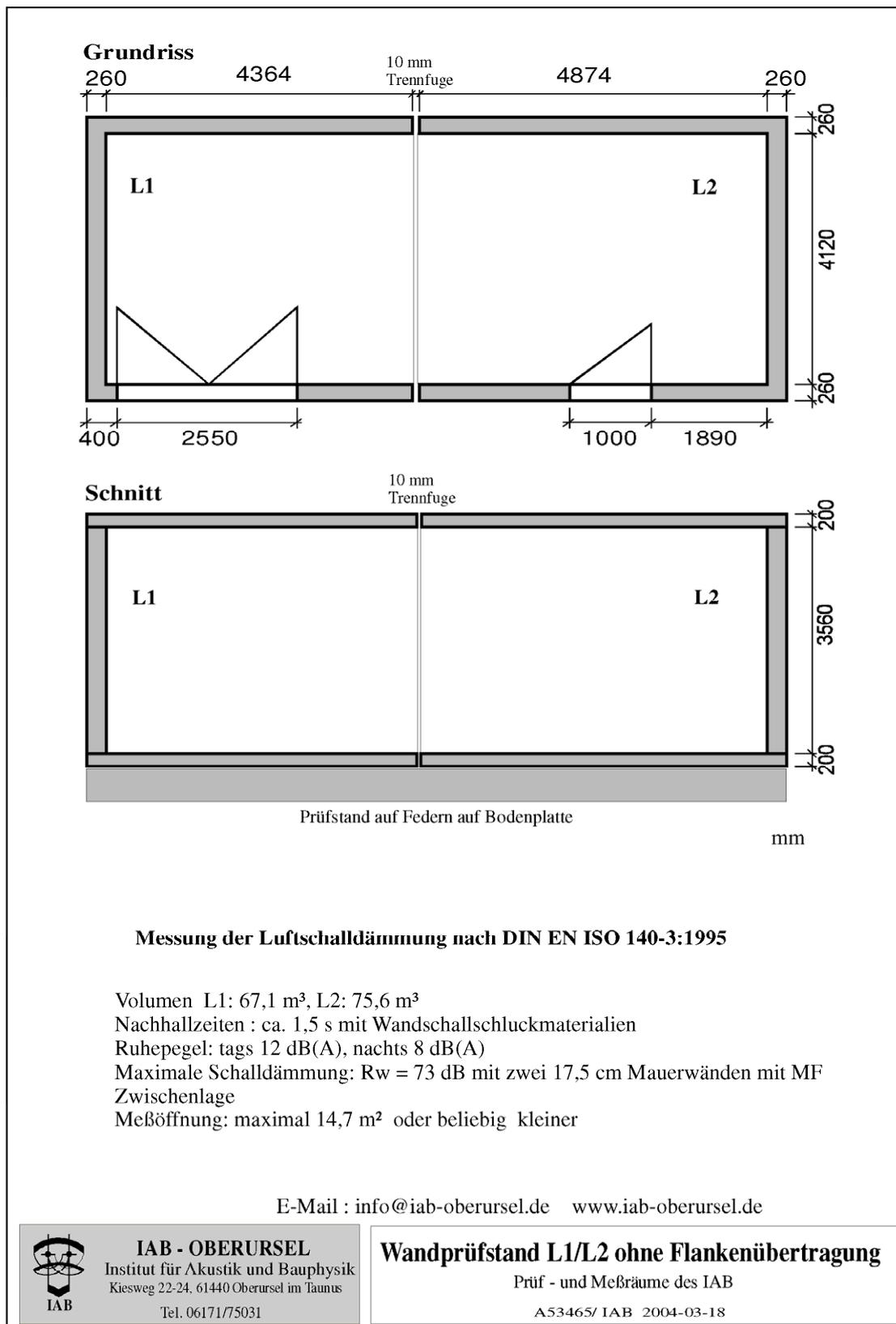
$$R_{w,P} = 46 \text{ dB}$$

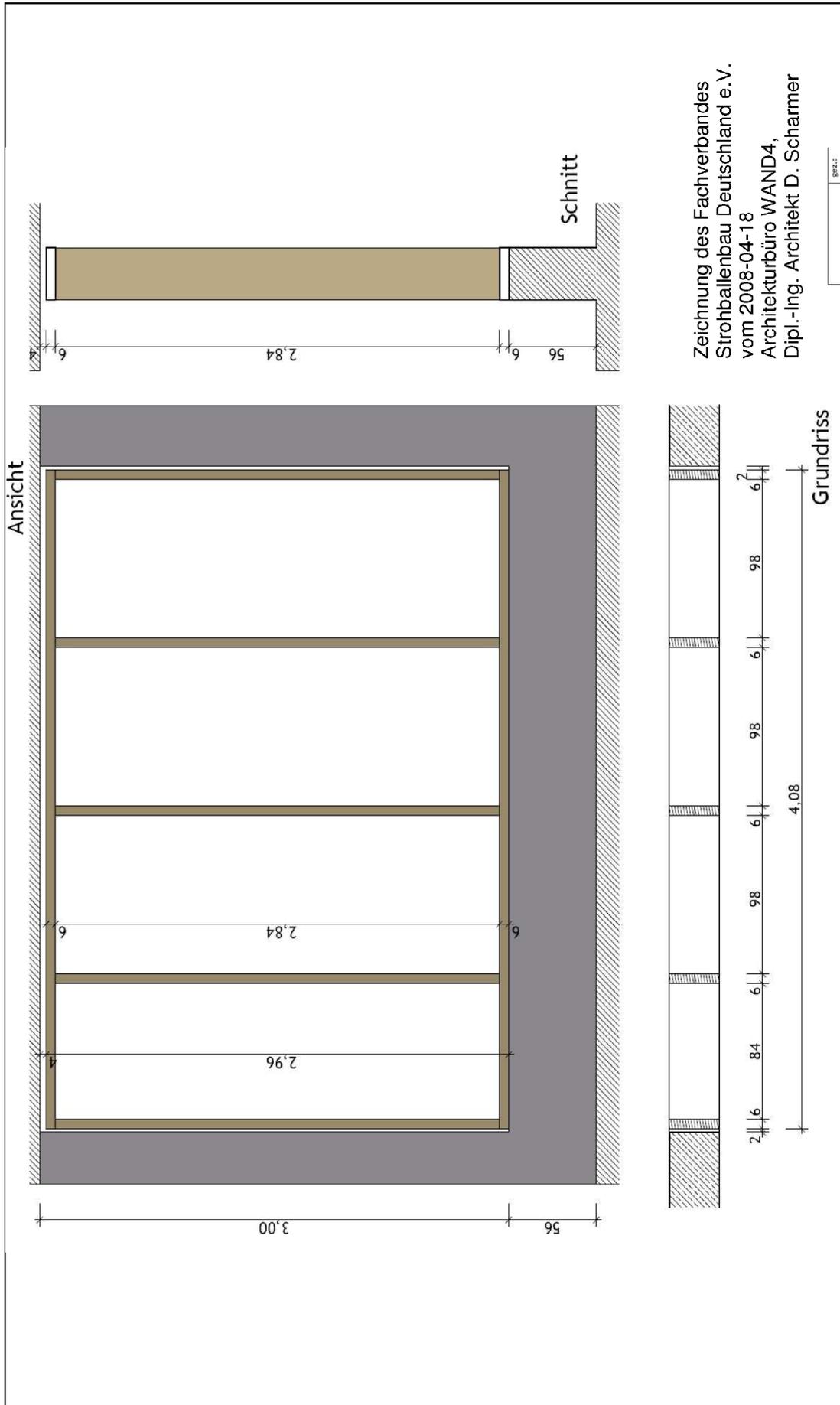
Bei Beurteilung nach DIN 4109 ergibt sich der Rechenwert (abzüglich Vorhaltemaß 2 dB) zu

$$R_{w,R} = 44 \text{ dB}$$

7. Anlagen

Anlage 1	A53465
Anlage 2	A59351
Anlage 3	A59354
Anlage 4	A59352
Anlage 5	A59353
Anlage 6	A59355
Anlage 7	B17215
Anlage 8	A59343
Anlage 9	A59509
Anlage 10	A59507
Anlage 11	A59508
Anlage 12	A59828





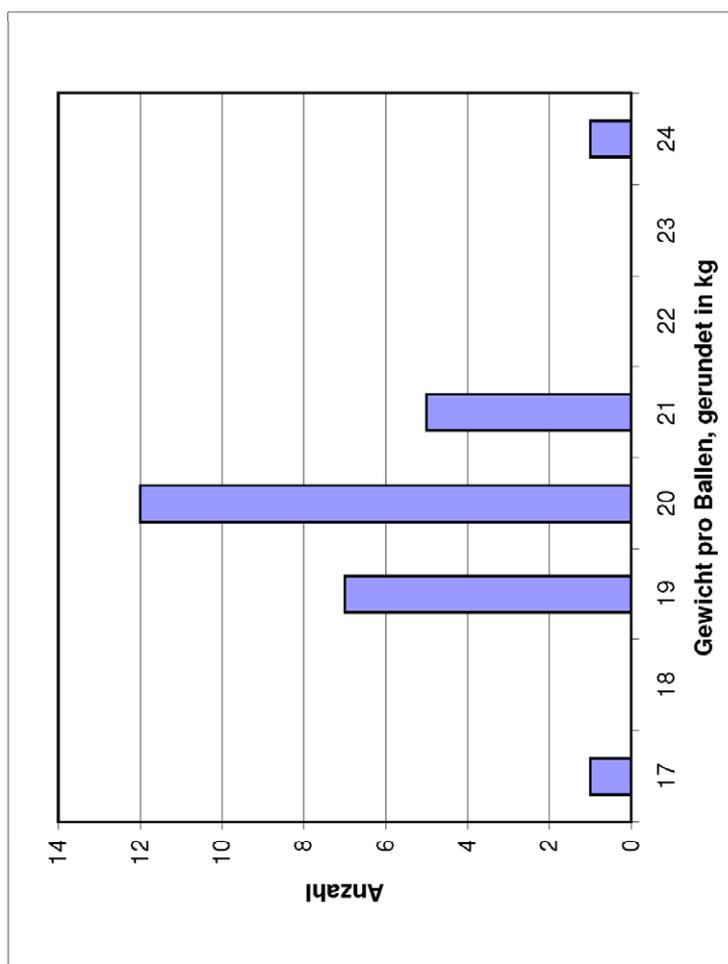
Zeichnung des Fachverbandes
Strohballenbau Deutschland e.V.
vom 2008-04-18
Architekturbüro WAND4,
Dipl.-Ing. Architekt D. Scharmer

A59351 / 3950
06 / 2008

Ausführung der Holz - Rahmenkonstruktion
Prüfung der Luftschalldämmung einer Strohballenwand
Auftraggeber: Fachverband Strohballenbau Deutschland e.V. Südergellersen

Institut für Akustik und Bauphysik
Kiesweg 22, 61440 Oberursel/Ts.
Haus 2, 23992 Zweifelhäusen
Tel.: 06171 / 7 50 31
www.iab-oberursel.de





mittleres Gewicht pro Ballen: 19,9 kg
 Standardabweichung 1,22 kg
 Gewicht verwendeter Strohballen der Wand 457,7 kg
 Wandfläche Gesamt 12,32 m²
 mittlere flächenbezogene Masse der Strohballen 37,2 kg/m²
 Wandstärke 0,3 m
 spez. Gewicht / mittl. Rohdichte 123,8 kg/m³

Gewichtsbestimmung durch Wägung am 2008-06-02



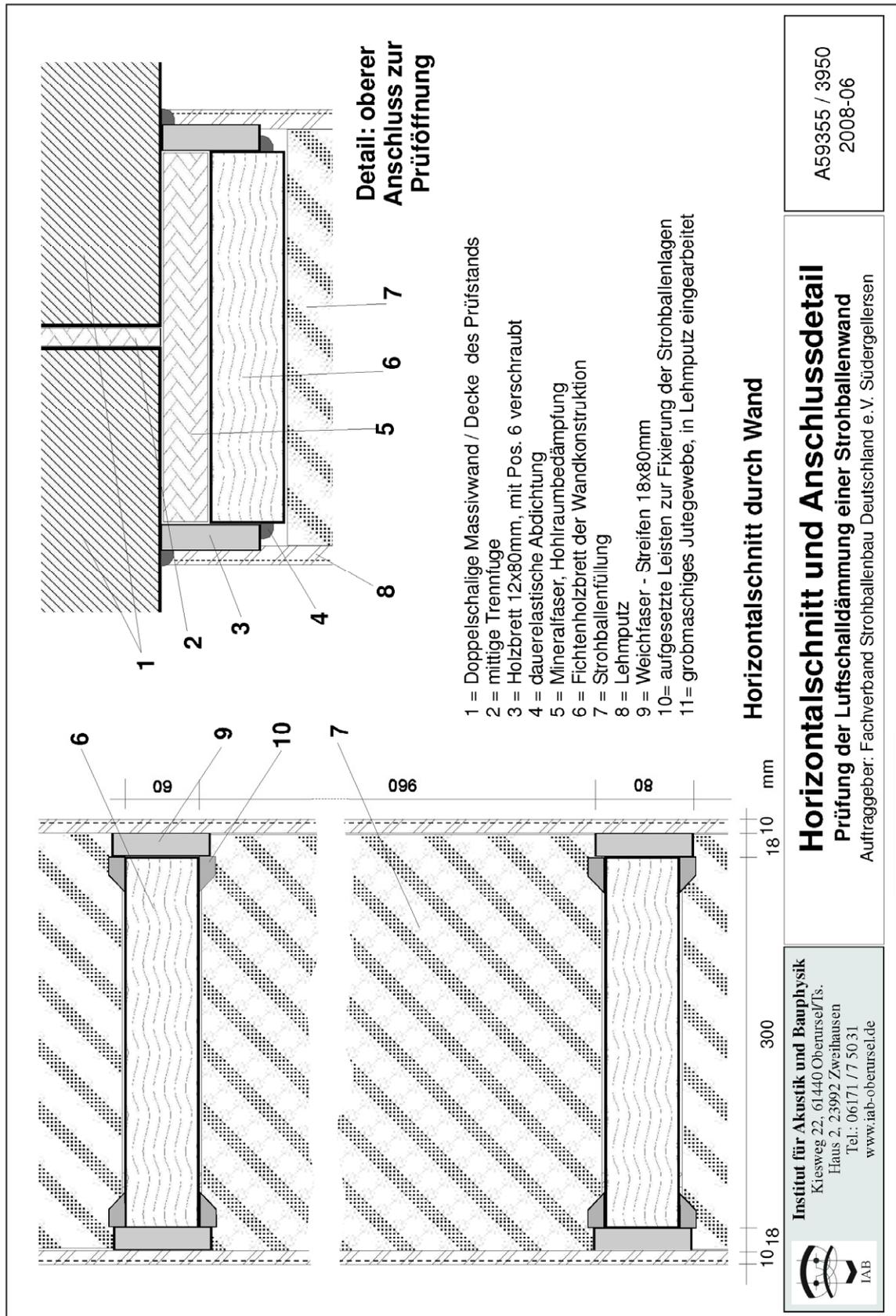
Institut für Akustik und Bauphysik
 Kiesweg 22, 61440 Oberursel/Ts.
 Haus 2, 23992 Zwietausen
 Tel.: 06171 / 7 50 31
 www.iab-oberursel.de

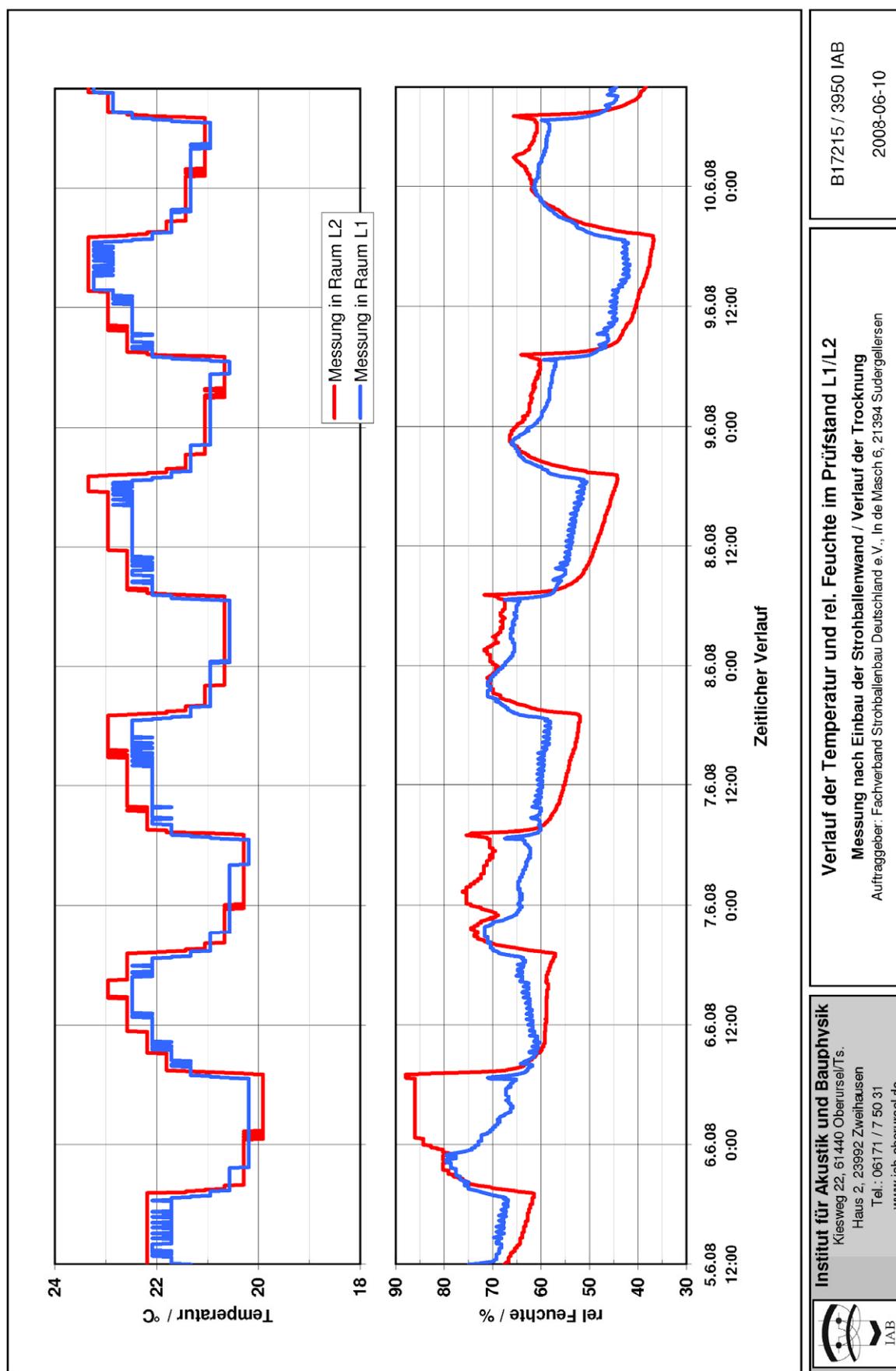
Gewicht und Verteilungsfunktion angelieferter Strohballen
 Messungen zur Bestimmung des Schalldämm - Maßes einer Strohballenwand
 Auftraggeber: Fachverband Strohballenbau Deutschland e.V. In de Masch 6; 21394
 Südergellersen

A59354 / 3950
 06 / 2008

	
<p>▼ Rahmen aus Fichtenholzbrettern der Stärke 60mm, umlaufend mit 3 vertikalen Holzverstrebungen, darin eingesetzt Strohballen, Halmrichtung von Wandfläche zu Wandfläche</p>	<p>▲ Einbringen der Ballen, Zusammendrücken, Ausfüllen und Ausstopfen verbleibender Hohlräume</p>
	
<p>▼ Fuge zwischen umlaufendem Rahmen aus Holzbrettern und Prüfstandwand – Decke: * Seiten und unten: doppelreihiges Dichtband Fa. Knauf 50mm breit * oben: Fuge 35-40mm satt mit Mineralwolle ausgestopft, beidseitig Holzbrett 12x80mm vorgesetzt * cauerelastische Abdichtung umlaufend, beidseitig zur Prüfstandwand</p>	<p>▲ Anbringen von Dreikantleisten und Weichfaserstreifen, Dicke 18mm</p>
<p>Aufnahmen am 2008-06-03</p>	
<p>Institut für Akustik und Bauphysik Kiesweg 22, 61440 Oberursel/Ts. Haus 2, 23992 Zweisimmen Tel.: 06171 77 50 31 www.iab-oberursel.de</p> 	
<p>Rahmen und Einbau der Strohballen Prüfung der Luftschalldämmung einer Strohballenwand Auftraggeber: Fachverband Strohballenbau Deutschland e.V. Südergellersen</p>	
<p>A59352 / 3950 06 / 2008</p>	

	
<p>▼ Strohballe sind zu Raumseiten bündig geschnitten, Aufbringen des Lehmputzes per Hand</p>	<p>▲ Lehmputz wird in Strohballelage eingedrückt bzw. eingerieben</p>
	
<p>▼ Den Holbalken aufgesetzte Weichfaserplatten bewirken ein Anhaften des Putzes und stabile Verbindung</p>	<p>▲ Einbringen von grobmaschigem Jutegeewebe und Glättstrich</p>
<p>Aufnahmen am 2008-06-04</p>	
 <p>Institut für Akustik und Bauphysik Kiesweg 22, 61440 Oberursel/Ts. Haus 2, 23992 Zweihausen Tel.: 06171 77 50 31 www.iab-oberursel.de</p>	
<p>Aufbringen des Lehmputzes Prüfung der Luftschalldämmung einer Strohballenwand Auftraggeber: Fachverband Strohballebau Deutschland e.V. Südergellersen</p>	
<p>A59353 / 3950 06 / 2008</p>	



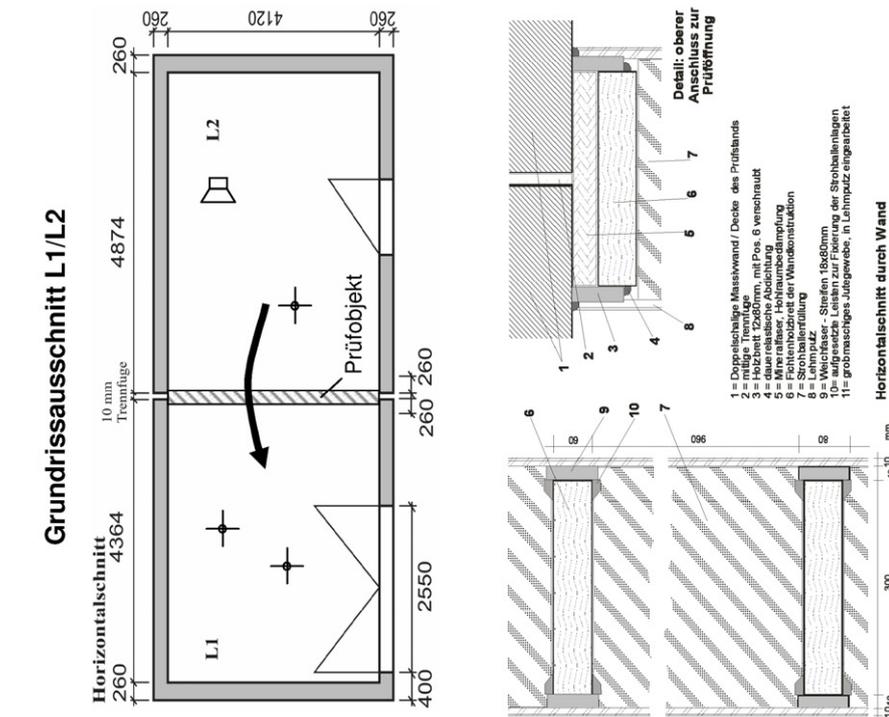


B17215 / 3950 IAB
2008-06-10

Verlauf der Temperatur und rel. Feuchte im Prüfstand L1/L2
Messung nach Einbau der Strohballenwand / Verlauf der Trocknung
 Auftraggeber: Fachverband Strohballenbau Deutschland e.V., In de Masch 6, 21394 Sudergellersen



Institut für Akustik und Bauphysik
 Kiesweg 22, 61440 Oberursel/Ts.
 Haus 2, 23992 Zweisimmen
 Tel.: 06171 / 7 50 31
 www.iab-oberursel.de



f / Hz	T / s	L_e / dB	D / dB	R / dB
50	4.13	89.1	9.1	15.9
63	2.33	77.3	22.6	26.9
80	2.80	74.6	22.2	27.3
100	2.05	75.3	25.3	29.0
125	1.85	70.9	27.8	31.1
160	1.33	68.2	30.4	32.2
200	1.09	89.3	27.7	28.7
250	1.29	86.7	28.0	29.7
315	1.13	79.7	32.0	33.1
400	1.16	73.5	37.6	38.8
500	1.26	69.0	40.7	42.3
630	1.29	61.9	46.9	48.6
800	1.31	53.1	54.0	55.8
1k	1.34	44.7	62.1	64.0
1.25k	1.34	38.4	68.4	70.3
1.6k	1.30	35.5	74.0	75.7
2k	1.26	29.1	78.5	80.1
2.5k	1.20	18.7	83.7	85.1
3.15k	1.11	15.3	86.1	87.2
4k	1.05	14.8	84.8	85.6
5k	0.90	16.6	83.3	83.4

Senderraum: IAB - Prüfstand
L2
Empfangsraum: IAB - Prüfstand
L1
Volumen V_e : 67.1 m³
Prüffläche S : 12.3 m²
Messergebnis:
Bewertetes Laborschallschutzwert - Maß
 $R_{w,P} (C, Ctr) = 45 (-2, -6) \text{ dB}$
Rechenwert nach DIN 4109:1989 Tab.11:
 $R_{w,R} (C, Ctr) = 43 (-2, -6) \text{ dB}$

Bemerkungen:
Horizontalmessung
fremdgeräuschkorrigiert

Spektrumanpassungswerte:
C = -2 dB Ctr = -6 dB
C 50-3150 = -2 dB Ctr 50-3150 = -9 dB
C 100-5000 = -1 dB Ctr 100-5000 = -6 dB
C 50-5000 = -1 dB Ctr 50-5000 = -9 dB



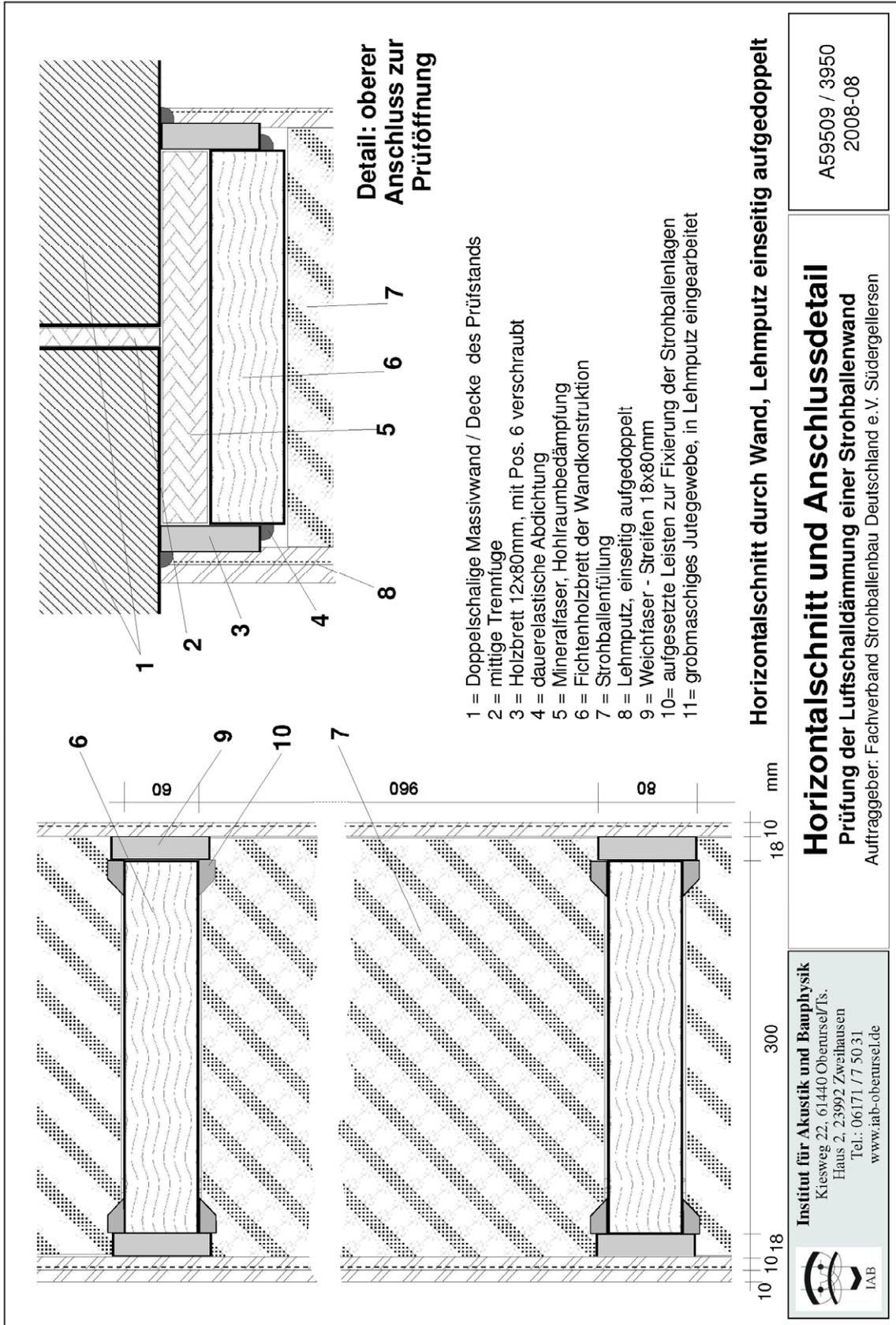
— R der untersuchten Konstruktion
--- Bezugskurve nach DIN EN ISO 717 - 1 für $R_{w,P} = 45 \text{ dB}$

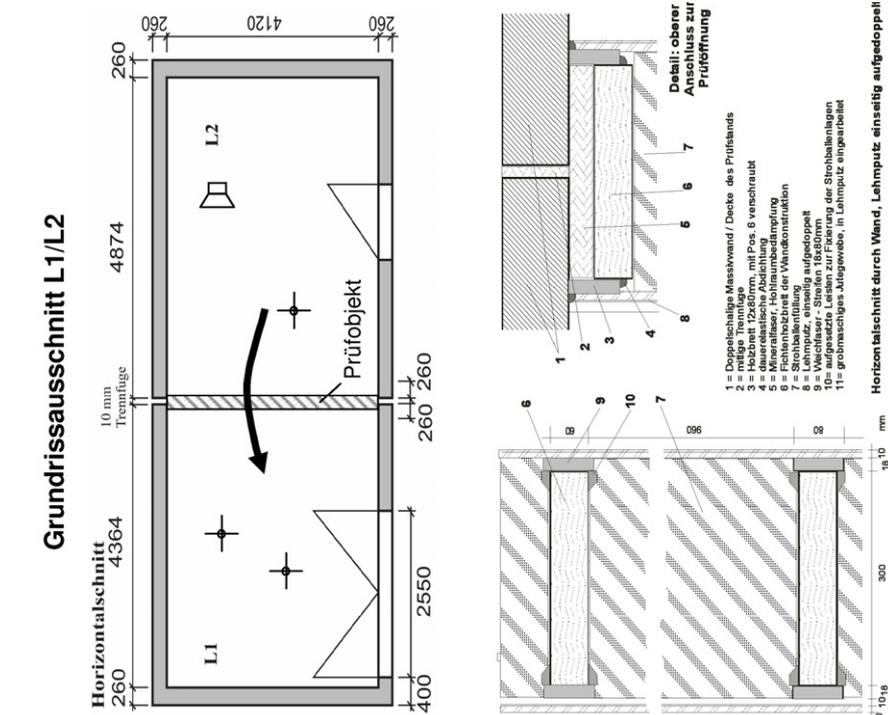
Messung vom: 2008-06-24

A59343 / 3950 IAB
2008-06-24

Luftschalldämmung einer Strohballenwand
Luftschalldämmung nach DIN EN ISO 140 - 3
Auftraggeber: Fachverband Strohballenbau Deutschland e.V., In de Masch 6, 21294 Sudergellersen

Institut für Akustik und Bauphysik
Kiesweg 22, 61440 Oberursel/Ts.
Haus 2, 23992 Zweilhausen
Tel.: 06171 / 75031 Fax: 06171 / 85483
www.iab-oberursel.de



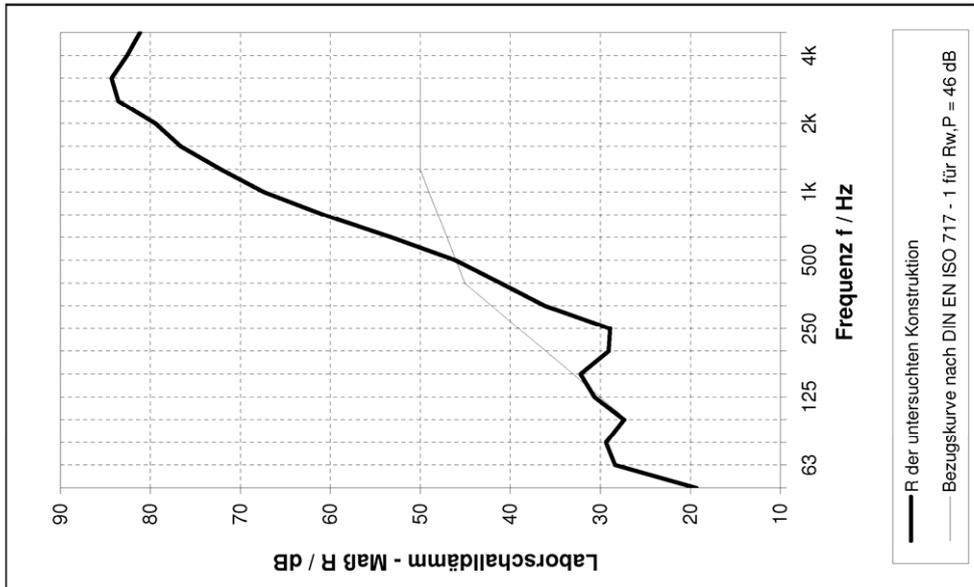


f / Hz	T / s	L _e /dB	D _l /dB	R _l /dB
50	4,59	85,1	12,1	19,3
63	2,86	70,1	23,2	28,4
80	2,51	66,7	24,8	29,4
100	2,14	70,6	22,4	27,4
125	1,93	64,4	27,2	30,7
160	1,91	62,8	28,8	32,2
200	1,54	70,5	26,6	29,1
250	1,32	67,7	26,5	28,9
315	1,49	58,6	33,8	36,1
400	1,52	51,2	38,6	41,0
500	1,65	45,6	43,3	46,1
630	1,66	38,3	50,4	53,2
800	1,66	29,4	57,9	60,7
1k	1,62	35,1	64,7	67,4
1,25k	1,57	30,5	69,6	72,2
1,6k	1,55	28,5	74,1	76,6
2k	1,50	23,7	77,1	79,4
2,5k	1,40	14,1*	81,5	83,6
3,15k	1,29	12,1*	82,6	84,3
4k	1,23	11,8*	81,1	82,6
5k	1,09	12,7*	80,2	81,2

Senderraum: IAB - Prüfstand
L2
Empfangsraum: IAB - Prüfstand
L1
Volumen V_e: 67,1 m³
Prüffläche S: 123 m²
Messergebnis:
Bewertetes Laborschallschutzwert - Maß
R_{w,P} (C, Ctr) = 46 (-2,-7) dB
Rechenwert nach DIN 4109:1989 Tab.11:
R_{w,R} (C, Ctr) = 44 (-2,-7) dB

Bemerkungen:
Horizontalmessung
fremdgeräuschkorrigiert
zweite Putzschicht auf Wandseite zu L1

Spektrumanpassungswerte:
C = -2 dB Ctr = -7 dB
C 50-3150 = -2 dB Ctr 50-3150 = -8 dB
C 100-5000 = -1 dB Ctr 100-5000 = -7 dB
C 50-5000 = -1 dB Ctr 50-5000 = -8 dB



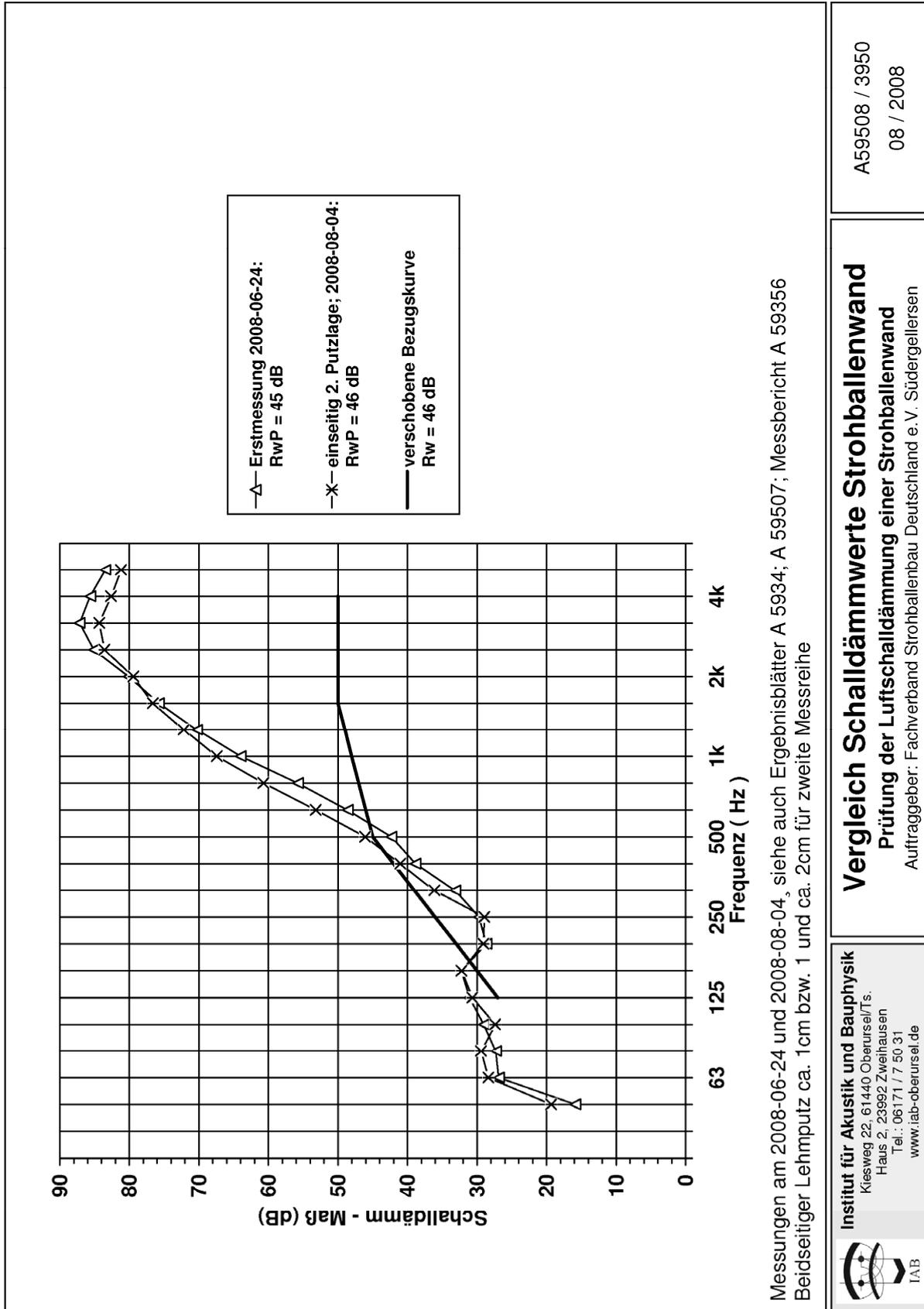
— R der untersuchten Konstruktion
--- Bezugskurve nach DIN EN ISO 717 - 1 für R_{w,P} = 46 dB

Messung vom: 2008-08-04

Institut für Akustik und Bauphysik
Kiesweg 22, 61440 Oberursel/Ts.
Haus 2, 23992 Zweilhausen
Tel.: 06171 / 75031 Fax: 06171 / 85483
www.iab-oberursel.de

A59507 / 3950 IAB
2008-08-04

Luftschalldämmung einer Strohballenwand, Putzschicht zu L1 aufgedoppelt
Luftschalldämmung nach DIN EN ISO 140 - 3
Auftraggeber: Fachverband Strohballenbau Deutschland e.V., In de Masch 6, 21294 Südergellersen



Messungen am 2008-06-24 und 2008-08-04, siehe auch Ergebnisblätter A 5934; A 59507; Messbericht A 59356
 Beidseitiger Lehmputz ca. 1cm bzw. 1 und ca. 2cm für zweite Mesreihe



Institut für Akustik und Bauphysik
 Kiesweg 22, 61440 Oberursel/Ts.
 Haus 2, 23992 Zwietausen
 Tel.: 06171 77 50 31
 www.iab-oberursel.de

Vergleich Schalldämmwerte Strohballenwand
Prüfung der Luftschalldämmung einer Strohballenwand
 Auftraggeber: Fachverband Strohballenbau Deutschland e.V. Südergellersen

A59508 / 3950
 08 / 2008

Nr	g Masse	d / mm Dicke	Durchm / mm	Vol / cm ³	Dichte kg/m ³	Rs Pa s/m spez. Str.w.
1	88,7	105	102	858,0	103,4	224
2	88,7	105	102	858,0	103,4	205
3	88,7	105	102	858,0	103,4	248
4	69,7	105	102	858,0	81,2	88
5	69,7	105	102	858,0	81,2	90
6	69,7	105	102	858,0	81,2	88
7	85,6	105	102	858,0	99,8	260
8	85,6	105	102	858,0	99,8	231
9	85,6	105	102	858,0	99,8	195
Mittel	81,3	105,0	102	858,0	94,8	181,0
pos. Abweichung / %	9	0	0	0	9	44
Standardabweichung	9	0	0	0	10	72
neg. Abweichung / %	14	0	0	0	14	51
Strömungswiderstand	22151	Pa s/m ³	längenbez.,	1724	Pa s/m ²	

Auswertung Messung Strömungswiderstand

Prüfmuster: Strohballenwand

A 59828 / 3950 10 / 2008