

Erfahrungen beim Schutz von Lehmputz auf Strohballen-Konstruktionen vor Feuchteschäden

Strohballen sind Blöcke gepressten Stroh. In Strohballenkonstruktionen werden Ballen lastabtragend oder als Wandausfächung gestapelt. Strohballengebäude haben zahlreiche ökologische Vorteile. Strohballen haben einen geringen Primärenergiegehalt (Quelle: Centre for Building Performance Research, 2010). Da Stroh zu etwa 36% aus Kohlenstoff besteht, wirken Strohballen als Kohlenstoffspeicher, über die Dauer des Lebenszyklus` des Gebäudes (Wihan, 2007). Strohballenwände sind ebenso stark isolierend, reduzieren den Energieverbrauch und die CO₂ Emissionen, die durch Heizen und Kühlen entstehen (Bigland-Pritchard, 2005). Und schließlich sind Strohballen im Falle des Rückbaus der Konstruktion unbedenklich zu entsorgen ohne Bauabfälle zu erzeugen.

Strohballenbau ist recht neu in Japan. Nach Informationen der Japan Straw Bale House Association (2009) wurde das erste Strohballenhaus in Japan 2001 in der Tochigi Präfektur fertiggestellt. Die größten Herausforderungen, denen Strohballenbauten in Japan und in vielen anderen Ländern ausgesetzt sind, bestehen in der Feuchtigkeit und der Anfälligkeit für Zersetzung durch Mikroben.

Die Innenraum- und Außenraumfeuchtigkeitszustände, sowie die im Inneren der Wand entstehenden Feuchtigkeitszustände von neun lehmverputzten Strohballenbauten in Japan wurden gemessen. Der Zweck der hier vorgestellten Studie ist, zum einen, das Potenzial für Schimmelpilzwachstum zu bewerten, zweitens Prozesse des Feuchtigkeitstransports zu klären, drittens problematische Bauweisen zu identifizieren und viertens Bauweisen vorzuschlagen, welche die innere Feuchtigkeit der Strohballenwände minimieren.

Methodik

Die neun Strohballenbauten sind hinsichtlich ihrer Bauweisen in drei Gruppen untergliedert (Abb. 1, Tabelle 1). Die erste Gruppe „A“ beinhaltet Gebäude die eine Strohballenhülle um eine Holzkonstruktion darstellen, direkt mit Lehmmaußenputz versehen sind und eine Luftschicht unterhalb der Strohballenschicht (im Sockel) aufweisen. Die zweite Gruppe „B“ beinhaltet Gebäude mit einem Gründach und innen wie außen direkt mit Lehm verputzten Strohballenwänden. Die dritte Gruppe „C“ besteht aus Gebäuden, die Regenschutz besitzen (d.h. außen verkleidet sind).

Tabelle 1: Bauliche Details

Gruppe	Gebäudename	Präfektur	Stadt	Architekt	Baufirma	Bauzeit Beginn	Ende	Beobachtungsperiode Beginn	Ende
A	Jinya	Kyoto	Kyotan	Goichi Oiwa	Takao Kobayashi	01.04.2004	30.10.2004	28.11.2006	20.07.2009
	Waraya	Yamanashi	Hokuto	Goichi Oiwa	Hideto Oshima	01.03.2004	01.08.2004	21.08.2007	04.09.2009
	Shinrinnobokujo Tango	Kyoto	Kyotango	Goichi Oiwa	Takao Kobayashi	22.10.2007	01.06.2008	01.09.2008	31.08.2009
	Furyu	Chiba	Minamiboso	Goichi Oiwa	Takao Kobayashi	01.06.2008	01.04.2009	01.02.2009	31.01.2010
	Yurikagonoie	Mie	Tsu	Masatoshi Sakamoto	Hideto Oshima	15.02.2009	31.07.2009	01.04.2010	2010.09.31
	Hareakara	Wakayama	Arita	Motoyoshi Murayama	Motoyoshi Murayama	01.06.2008	31.05.2009	Westwand 2009.06.10 Ostwand 2010.05.04	Westwand 2010.04.08 Ostwand 2010.09.17
B	Atom House	Kanagawa	Fujisawa	Mirai Tono, Koji Itonaga	Koji Itonaga	19.09.2002	20.08.2007	01.01.2009	31.12.2009
C	Waraishiya	Nigata	Myoko	Yuji Sugiyura	Yuji Sugiyura	01.07.2004	Under Construction	01.12.2009	2010.09.31
	Itayama	Aichi	Handa	Hideto Oshima	Hideto Oshima	01.03.2010	15.08.2010	23.07.2010	08.11.2010

Building practices to protect earthen plastered straw bale walls from moisture damage

Straw bales are blocks of compressed straw. In straw bale construction, bales are stacked to create bearing or infill walls.

Straw bale building has numerous ecological advantages. Straw bales are low in embodied energy (Centre for Building Performance Research, 2010). Since straw consists of approximately 36% carbon, straw bale walls function as a carbon sink, sequestering carbon during the life of the building (Wihan, 2007). Straw bale walls are also highly insulative, reducing energy use and CO₂ emissions due to heating and cooling (Bigland-Pritchard, 2005). And lastly, upon deconstruction, straw bales can safely decompose without becoming landfill.

Straw bale building is relatively new to Japan. According to the Japan Straw Bale House Association (2009), the first straw bale home in Japan was completed in 2001 in Tochigi Prefecture. The greatest challenges facing earthen plastered straw bale buildings in Japan, and many other countries with high humidity and precipitation, are moisture and the susceptibility of straw to microbial decay.

The indoor, outdoor and interstitial hygrothermal environment of nine earthen plastered straw bale structures in Japan have been monitored. The purpose of the present study is to (one) evaluate the potential for mold growth, (two) clarify moisture dynamics, (three) identify problematic building practices, and (four) propose building practices to reduce interstitial moisture in straw bale walls.

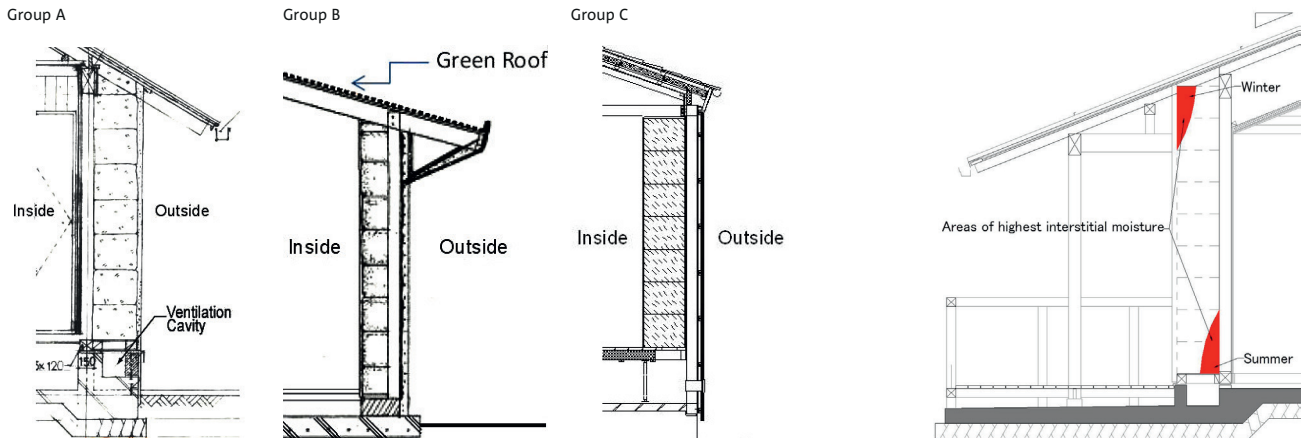
Methodology

The nine straw bale buildings are organized into three groups according to construction details (Fig. 1, Table 1). The first group “A” includes buildings consisting of straw bales surrounding a timber structure with an earthen plastered exterior finish applied directly to the bales and a ventilation chamber under the bale walls. The second group “B” includes buildings with a living roof and plastered interior and exterior finishes applied directly to the bale walls. The third group “C” consists of buildings utilizing rain screens.

T and D Corporation’s Thermo Recorder sensors monitor the indoor, outdoor and interstitial hygrothermal conditions of the

Table 1: Details of Each Building

Group	Building Name	Prefecture	City	Architect	Principle Builder	Construction Start	Finish	Observation Period Start	Finish
A	Jinya	Kyoto	Kyotan	Goichi Oiwa	Takao Kobayashi	2004/4/1	2004/10/30	2006/11/28	2009/7/20
	Waraya	Yamanashi	Hokuto	Goichi Oiwa	Hideto Oshima	2004/3/1	2004/8/1	2007/8/21	2009/9/4
	Shinrinnobokujo Tango	Kyoto	Kyotango	Goichi Oiwa	Takao Kobayashi	2007/10/22	2008/6/1	2008/9/1	2009/8/31
	Furyu	Chiba	Minamiboso	Goichi Oiwa	Takao Kobayashi	2008/6/1	2009/4/1	2009/2/1	2010/1/31
	Yurikagonoie	Mie	Tsu	Masatoshi Sakamoto	Hideto Oshima	2009/2/15	2009/7/31	2010/4/1	2010/9/31
	Hareakara	Wakayama	Arita	Motoyoshi Murayama	Motoyoshi Murayama	2008/6/1	2009/5/31	West Interstitial 2009/6/10 East Interstitial 2010/5/4	West Interstitial 2010/4/8 East Interstitial 2010/9/17
B	Atom House	Kanagawa	Fujisawa	Mirai Tono, Koji Itonaga	Koji Itonaga	2002/9/19	2007/8/20	2009/1/1	2009/12/31
C	Waraishiya	Nigata	Myoko	Yuji Sugiura	Yuji Sugiura	2004/7/1	Under Construction	2009/12/1	2010/9/31
	Itayama	Aichi	Handa	Hideto Oshima	Hideto Oshima	2010/3/1	2010/8/15	2010/7/23	2010/11/8



T und D Corporation's Thermo Rekorder Sensoren nehmen die Innenraum- und Außenraumfeuchtigkeitszustände, sowie die im Inneren der Wand entstehenden Feuchtigkeitszustände der neun Strohballenbauten auf. Diese Sensoren messen die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit, wobei die Daten stündlich von einem TR-72U Datensammler aufgezeichnet werden.

Zuerst wird, um das Potenzial für Schimmelpilzwachstum in den Strohballenwänden einschätzen zu können, der Innenwandfeuchtigkeitszustand anhand von Vorgaben zur relativen Luftfeuchtigkeit und der Temperatur bewertet. Diese Bewertungsvorgaben basieren im Wesentlichen auf folgenden Forschungsergebnissen:

1. Nach Angaben der University of California – Davis' Summers (2006), sowie Sain und Broadbent (1975), stellen relative Luftfeuchtigkeiten von 90% ein ernstes Risiko für Pilzwachstum dar. 80% relative Luftfeuchtigkeit scheint die minimale Bedingung für Schimmelpilzwachstum an Reisstroh zu sein (Sain und Broadbent, 1975). Nach 100 Tagen konstanter 80% relativer Luftfeuchtigkeit und 25 °C und 8 °C, pegeln sich die Kohlenstoffverluste bei 5 % und 2 % ein. Kohlenstoffverluste von 2 % in Strohballengebäuden gelten als unbedenklich für die Lebensdauer des Gebäudes. Darüber hinaus können auch bei weniger als 80% relativer Luftfeuchtigkeit biologische Aktivitäten einsetzen, die jedoch nicht als bedenklich für die Lebensdauer der Strohballenwand gehalten werden.
2. Bigland-Pritchard (2005) von der Sheffield University benennen die Spezies Genus *Aspergillus* als kritisch für die Strohzersetzung. Die aufgezeichnete minimale Wasseraktivität, die zum Wachstum von *Aspergillus* führt, ist 0,81 bis 0,94 auf Zellulose sowie auf Holzspänen und Tapete (was einer relativen Luftfeuchtigkeit von 81% bis 94% entspricht) (Bigland-Pritchard, 2005).
3. Nach Smith und Hill (1982) zeigen *Aspergillus restrictus* und *versicolor* Spezies ein geringes Keimwachstum unter 10 °C auf einem idealen Nährboden.
4. Nach Bigland-Pritchard's (2005) vorgeschlagenen Isokonzentrationsprofilen sind Feuchtigkeitszustände von 80% relativer Luftfeuchtigkeit und 10 °C außerhalb des Bereiches des Sporenwachstums und der Myzelbildung von hochxerophilen Schimmelpilzen (d.h. Pilzen die eine deutlich niedrigere Wasseraktivität tolerieren).

Basierend auf mehrfachen Forschungsergebnissen sind also Feuchtigkeitszustände von 80% relativer Luftfeuchtigkeit und 10 °C als sicherer Grenzbereich für Strohballenwände anerkannt. Über 80% relativer Luftfeuchtigkeit und 10 °C muss mit Pilzwachstum gerechnet werden. Bei und unter 80% relativer Luftfeuchtigkeit und 10 °C können biologische Aktivitäten entstehen, diese gelten jedoch als unbedenklich für die Lebensdauer der Gebäude. Die maximale Anzahl der aufeinanderfolgenden Stunden über diesem Grenzbereich wurde für jedes Gebäude berechnet.

Zum Zweiten wurden die Mittelwerte der relativen Luftfeuchtigkeit des Innenraums, Außenraums und des Wandinneren ermittelt, um die Prozesse des Feuchtigkeits transports zu klären.

Zum Dritten wurden Bauweisen, welche die Feuchtigkeit im Wandinneren verschlimmern identifiziert und viertens wurden in Auswertung dieser problematischen Bauweisen Vorschläge für Bauweisen gemacht, welche die Feuchtigkeit im Inneren der Strohballenwände begrenzen.

Ergebnisse und Diskussion

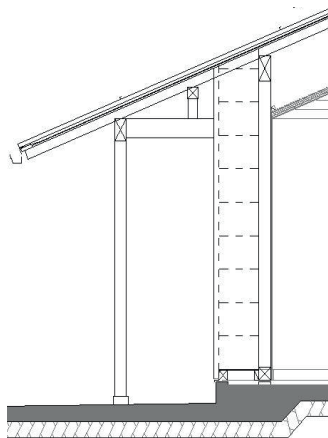
Ergebnisse des Monitorings

Tabelle 2 und Tabelle 3 fassen die Ergebnisse des Monitorings zusammen. Von den neun Gebäuden die erfasst wurden überschritten acht im Inneren der Wand die Grenze von 80% relativer Luftfeuchtigkeit und 10 °C. Die durchgehende Dauer dieser Überschreitung variiert von Gebäude zu Gebäude. Das Gebäude in Jinya überschreitet die Grenze nicht, allerdings war dort auch nur ein Sensor im Inneren der Wand installiert. Die Dauer der durchgehenden Überschreitung in Warishiya und Itayama war weniger als fünf Stunden. Beide Gebäude besitzen eine Regenschutzfassade. Zu anderen war die Dauer der durchgehenden Überschreitung der Grenze in Shinrinnobokujo Tango, Furyu und Hareakara über 1000 Stunden. Diese Gebäude haben alle direkt auf die Strohballen aufgetragenen Außenputz und Hinterlüftung im Sockelbereich unter den Ballen.

Das Maximum an Außenluftfeuchtigkeit wurde bei allen Gebäuden im Sommer gemessen, im Juli bzw. August, und reichte von 73% bis 92% RL. Die im Inneren der Wand maximal gemessene mittlere monatliche relative Luftfeuchtigkeit aller Gebäude wur-

1 Neun Strohballengebäude, die in drei Gruppen unterteilt waren
1 Nine straw bale buildings were divided into three groups

2 Typische Bereiche hoher Feuchtigkeit in den inneren Wandbereichen im Sommer und Winter
2 Typical areas of high interstitial moisture in summer and winter

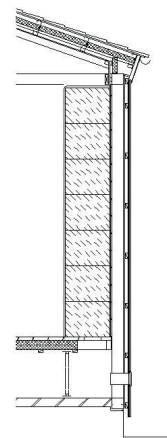


nine straw bale structures. These sensors measure temperature and relative humidity, and data is recorded at one hour intervals by TR-72U data loggers.

First, in order to evaluate the potential for mold growth in straw bale walls, the interstitial hygrothermal environment is evaluated given a relative humidity and temperature guideline. The evaluation guideline is based principally on the following research findings:

1. According to the University of California – Davis' Summers (2006) and Sain and Broadbent (1975), relative humidities of 90% represent a serious risk of fungal growth. 80% relative humidity seems to be the minimum relative humidity required to support mold growth on rice straw (Sain and Broadbent, 1975). After 100 continuous days at 80% relative humidity and 25 °C and 8 °C, carbon losses seem to plateau at 5% and 2% respectively. Carbon losses of 2% within a straw bale wall are assumed not to influence the life of the building. Moreover, below 80% relative humidity, some biological activity may be present, but is not believed to be detrimental to the life of a straw bale wall.
2. Bigland-Pritchard (2005) of Sheffield University suggests that the critical species in straw decomposition are likely to belong to the genus *Aspergillus*. The recorded minimum water activity required for growth reported for *Aspergillus* is 0.81 to 0.94 on cellulose such as woodchips and wallpaper (which corresponds to 81-94% relative humidity) (Bigland-Pritchard, 2005).
3. According to Smith and Hill (1982), *Aspergillus restrictus* and *versicolor* species show little germination and growth below 10 °C on an ideal medium.
4. According to Bigland-Pritchard's (2005) proposed isopleths, hygrothermal conditions of 80% relative humidity and 10 °C are outside of the range of spore germination and mycelium growth of highly xerophilic molds.

Thus, based on multiple research findings, hygrothermal conditions of 80% relative humidity and 10 °C are understood to be a safe guideline for straw bale walls. Above 80% relative humidity and 10 °C, mold growth is predicted. At and below 80% relative humidity and 10 °C, some biological activity may be present, but is not believed to be detrimental to the life of the building. The



maximum number of consecutive hours above the guideline is calculated for each building.

Second, in order to clarify moisture dynamics, the monthly mean relative humidity of indoor, outdoor, and interstitial sensors are calculated.

Third, problematic building practices that exacerbate interstitial moisture are identified. Fourth, in response to these problematic building practices, building practices to control interstitial moisture in straw bale walls are proposed.

Results and Discussion

Results of the Monitoring

Table 2 and Table 3 summarize the results of the monitoring. Of the nine buildings monitored, the interstitial hygrothermal environment of eight buildings surpassed the 80% relative humidity and 10 °C guideline. The number of consecutive hours the guideline was exceeded varies by building. Jinya never surpassed the guideline, but only one interstitial sensor was monitored. The number of consecutive hours Warishiya and Itayama surpassed the guideline was less than five hours. Both of these buildings utilize rain screens. On the other hand, the number of consecutive hours Shinrinnobokujo Tango, Fuyu and Hareakara surpassed the guideline was over 1000 hours. These buildings all have exterior plaster finishes applied directly to bale walls and ventilation chambers under bale walls.

The outdoor maximum monthly mean relative humidity for all buildings was recorded in summer, in either July or August, and ranged from 73% to 92%. The interstitial maximum monthly mean relative humidity for all buildings was also recorded in summer, in either July or August, and also ranged from 73% to 92%. Generally, the interstitial maximum monthly mean relative humidity is recorded in the same month as the outdoor maximum monthly mean relative humidity. For three buildings, Jinya, Waraya and Shinrinnobokujo Tango, the interstitial maximum monthly mean relative humidity is recorded one month after the outdoor maximum monthly mean relative humidity. Throughout the year, the indoor monthly mean relative humidity is the lowest for all buildings.

3 Durchgehende Veranda schützt die verputzten Strohballenwände
3 Full veranda protecting plastered bale walls

4 Regenschutz schützt die Strohballenwände
4 Rain screen protecting bale walls

Tabelle 2: Übersicht Monitoring

Gebäude	Beobachtungszeitraum		Zahl der Sensoren	Maximale zusammenhängende Stunden mit Überschreitung von 80% RL und 10°C Grenze			Innere maximale monatliche mittlere Relative Luftfeuchtigkeit (RL)			Äußere maximale monatliche mittlere RL	
	Beginn	Ende		Std	Datum	Lage	%	Datum	Lage	%	Datum
Jinya	28.11.2006	20.07.2009	3	0	NA	NA	78	Jul-07 Aug, Sep-08	Norden	85	Jul-07
Waraya	21.08.2007	04.09.2009	4	385	2009.07.31- 2009.08.16	Norden	81	Aug-08 Aug-09	Norden	89	Jul-09
Shinrinnobokujo Tango	01.09.2008	31.08.2009	11	1371	2009.07.05- 2009.08.31	Süden LI	86	Aug-09	Süden LI	82	Jul-09
Furyu	01.02.2009	31.01.2010	23	1866	2009.06.02- 2009.08.19	ELN	92	Jul-09	ELN, ELE	92	Jul-09
Yurikagonoie	01.04.2010	2010.09.31	12	76	2010.07.18- 2010.07.21	Norden LI	76	Aug-10	LI	73	Aug-10
Hareakara	Westwand 2009.06.10 Ostwand 2010.05.04	2010.04.08 2010.09.17	4	1832	2010.06.13- 2010.08.27	Osten Low	93	Jul-10	Osten Low	83	Jun-10
Atom House	01.01.2009	31.12.2009	8	570	2009.08.03- 2009.09.27	SLN	82	Aug-09	SLN, NME	82	Aug-09
Warishiya	01.12.2009	2010.09.31	5	4	2010.03.20	ME	76	Jul-10	MI	81	Jul-10
Itayama	23.07.2010	08.11.2010	9	1	2010.08.12	LE	73	Aug-10	LI	74	Aug-10

Tabelle 3: Problematische Bauweisen

Gruppe	Gebäudename	Problematische Bauweisen
A: Gebäude die eine Strohballenhülle um eine Holzkonstruktion darstellen, direkt mit Lehmaußenputz versehen sind und eine Luftschicht unterhalb der Strohballenschicht (im Sockel) aufweisen.	Jinya	Die Fensterbleche reichen nicht weit genug über die Strohballenwand, um Regenwasser von der Erosion abzuhalten.
	Waraya	Grosse Luftströme durch die Ventilationskanäle bringen Wasserdampf in die Strohballenwände, besonders im Sommer wenn der Wasserdampfdruck von außen nach innen verläuft. Außerdem unsachgemäße Perimeterdrainage auf der Nordwestseite des Gebäudes, die es dem Wasser ermöglicht sich anzusammeln.
	Shinrinnobokujo Tango	Grosse Luftströme durch die Ventilationskanäle bringen Wasserdampf in die Strohballenwände, besonders im Sommer wenn der Wasserdampfdruck von außen nach innen verläuft. Der Lehmputz auf der exponierten Westseite zeigt Erosion und die Fensterbleche reichen nicht weit genug über die Strohballenwand, um Regenwasser von der Erosion abzuhalten. Die Strohballenwand ist nicht hoch genug über dem äußeren Oberflächenlevel, um Spritzwasser vor dem Einfluss auf die verputzte Strohballenwand zu hindern.
	Furyu	Grosse Luftströme durch die Ventilationskanäle bringen Wasserdampf in die Strohballenwände, besonders im Sommer wenn der Wasserdampfdruck von außen nach innen verläuft. Heiße und feuchte Sommerluft, die durch die Ventilationskanäle eindringt, kühlt sich ab und erhöht die innere relative Luftfeuchtigkeit. Außerdem dringt aufsteigende Feuchtigkeit aus den Fundamenten in die Strohballenwände ein, da es keine Dampfsperre zwischen Fundament und Wand gibt.
	Yurikagonoie	Ebenso wie in Furyu, bringen grosse Luftströme durch die Ventilationskanäle Wasserdampf in die Strohballenwände, besonders im Sommer wenn der Wasserdampfdruck von außen nach innen verläuft. Heiße und feuchte Sommerluft, die durch die Ventilationskanäle eindringt, kühlt sich ab und erhöht die innere relative Luftfeuchtigkeit. Außerdem dringt aufsteigende Feuchtigkeit aus den Fundamenten in die Strohballenwände ein, da es keine Dampfsperre zwischen Fundament und Wand gibt. Die Lehmschicht zwischen den Strohballenwänden und dem Ventilationskanal bietet keinen ausreichenden Feuchtigkeitsschutz. Die exponierte Westwand weist Erosion auf.
B: verputzten Innen- und Außenwänden und einem Gründach	Atom House	Es gibt keine Dachentwässerung, welche die Wände vor dem Regen schützt. Ebenso keine Einläufe oder Abflüsse, anschließend an die Dachentwässerung, wodurch das Regenwasser ungehindert die Wände herunter läuft. Es gibt keine kapillarbrechende Schicht zwischen dem Außenputz und dem Sockelbereich, wodurch die Bodenfeuchtigkeit durch den Außenputz kapillar in die Strohballenwände gelangt.
	Warishiya	Die Ergebnisse scheinen eine äußere Verkleidung zum Regenschutz als effektive Bauweise zur Minderung der inneren Feuchtigkeit zu bestätigen.
C: Gebäude mit Regenschutz (d. h. äußere Verkleidung)	Itayama	Ebenso wie in Furyu, Yurikagonoie und Hareakara, bringen grosse Luftströme durch die Ventilationskanäle Wasserdampf in die Strohballenwände, besonders im Sommer wenn der Wasserdampfdruck von außen nach innen verläuft. Heiße und feuchte Sommerluft, die durch die Ventilationskanäle eindringt, kühlt sich ab und erhöht die innere relative Luftfeuchtigkeit. Außerdem dringt aufsteigende Feuchtigkeit aus den Fundamenten in die Strohballenwände ein, da es keine Dampfsperre zwischen Fundament und Wand gibt. Die Plastiksicht zwischen den Strohballenwänden und dem Ventilationskanal bietet keinen ausreichenden Feuchtigkeitsschutz. Dennoch, ebenso wie beim Gebäude Warishiya, scheinen die Ergebnisse eine äußere Verkleidung zum Regenschutz als effektive Bauweise zur Minderung der inneren Feuchtigkeit zu bestätigen.

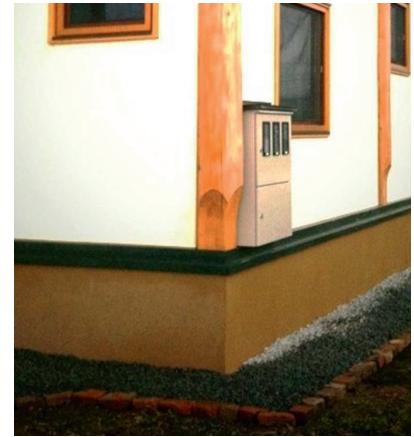
BUILDING PRACTICES TO PROTECT EARTHEN PLASTERED STRAW BALE WALLS FROM MOISTURE DAMAGE

Table 2: Monitoring Summary

Building	Observation Period		Number of Sensors Used in Monitoring	Maximum Consecutive Hours Surpassing 80% Relative Humidity and 10°C Guideline			Interstitial Maximum Monthly Mean Relative Humidity			Outdoor Maximum Monthly Mean Relative Humidity	
	Start	Finish		Hours	Date	Location	(%)	Date	Location	(%)	Date
Jinya	2006/11/28	2009/7/20	3	0	NA	NA	78	Jul-07 Aug, Sep-08	North	85	Jul-07
Waraya	2007/8/21	2009/9/4	4	385	2009/7/31- 2009/8/16	North	81	Aug-08 Aug-09	North	89	Jul-09
Shinrinnobokujo Tango	2008/9/1	2009/8/31	11	1371	2009/7/5- 2009/8/31	South LI	86	Aug-09	South LI	82	Jul-09
Furyu	2009/2/1	2010/1/31	23	1866	2009/6/2- 2009/8/19	ELN	92	Jul-09	ELN, ELE	92	Jul-09
Yurikagonoie	2010/4/1	2010/9/31	12	76	2010/7/18- 2010/7/21	North LI	76	Aug-10	LI	73	Aug-10
Hareakara	West Interstitial 2009/6/10 East Interstitial 2010/5/4	2010/4/8 2010/9/17	4	1832	2010/6/13- 2010/8/27	East Low	93	Jul-10	East Low	83	Jun-10
Atom House	2009/1/1	2009/12/31	8	570	2009/8/3- 2009/8/27	SLN	82	Aug-09	SLN, NME	82	Aug-09
Warishiya	2009/12/1	2010/9/31	5	4	2010/3/20	ME	76	Jul-10	MI	81	Jul-10
Itayama	2010/7/23	2010/11/8	9	1	2010/8/12	LE	73	Aug-10	LI	74	Aug-10

Table 3: Problematic Building Practices

Group	Building Name	Problematic Building Practices
A: Buildings consisting of straw bales surrounding a timber structure with a plastered exterior finish applied directly to the bales, and a ventilation chamber under the bale walls	Jinya	The window sill did not extend far enough from the bale wall to prevent rain water from eroding the plaster under the window.
	Waraya	Gross air leakage via the ventilation chamber allows water vapor into the bale walls, especially in summer when water vapor is likely to move from outside to inside. Also, inadequate perimeter drainage allowed water to accumulate on the northwest side of the home.
	Shinrinnobokujo Tango	Gross air leakage via the ventilation chamber allows water vapor into the bale walls, especially in summer when water vapor is likely to move from outside to inside. The earthen plaster of the exposed west wall experienced erosion, and the window sill did not extend far enough from the bale wall to prevent rain water from seriously eroding the plaster under the window. The bale wall is not raised high enough above an adjacent outside deck to prevent rain splash back from striking the plastered bale wall.
	Furyu	Gross air leakage via the ventilation chamber allows water vapor into the bale walls, especially in summer when water vapor is likely to move from outside to inside. Hot and humid summer air entering the bale wall through the ventilation chamber cools and increases the interstitial relative humidity. Also, due to the lack of a damp proof course between the foundation and bale wall, ground moisture evaporating from the foundation can enter the bale wall.
	Yurikagonoie	Similar to Furyu, gross air leakage via the ventilation chamber allows water vapor into the bale walls, especially in summer when water vapor is likely to move from outside to inside. Hot and humid summer air entering the bale wall through the ventilation chamber cools and increases the interstitial relative humidity. Also, due to the lack of a damp proof course between the foundation and bale wall, ground moisture evaporating from the foundation can enter the bale wall. The layer of earth between the bale wall and ventilation chamber did not provide a sufficient moisture barrier. The exposed west wall experienced erosion.
	Hareakara	Similar to Furyu and Yurikagonoie, gross air leakage via the ventilation chamber allows water vapor into the bale walls, especially in summer when water vapor is likely to move from outside to inside. Hot and humid summer air entering the bale wall through the ventilation chamber cools and increases the interstitial relative humidity. Also, due to the lack of a damp proof course between the foundation and bale wall, ground moisture evaporating from the foundation can enter the bale wall. The layer of Tyvek between the bale wall and ventilation chamber did not provide a sufficient moisture barrier. The steep incline on the east side of the building reduces sun and wind exposure and decreases drying.
B: Plastered interior and exterior finishes and a living roof	Atom House	There are no eaves to protect the walls from rain. There are no gutters or downspouts to facilitate roof drainage, which allows rain water to run off the roof and down the walls. There is no separation, such as a capillary break, between the exterior plaster and ground, allowing ground moisture to climb through the exterior plaster via capillary action and enter the bale wall.
C: Buildings utilizing rain screens	Warishiya	The results suggest that rain screens are an effective building practice to control interstitial moisture.
	Itayama	Similar to Furyu, Yurikagonoie and Hareakara, gross air leakage via the ventilation chamber allows water vapor into the bale walls, especially in summer when water vapor is likely to move from outside to inside. Hot and humid summer air entering the bale wall through the ventilation chamber cools and increases the interstitial relative humidity. The layer of Tyvek between the bale wall and ventilation chamber did not provide a sufficient moisture barrier. However, similar to Warishiya, the results suggest that rain screens are an effective building practice to control interstitial moisture.



de ebenso im Sommer, also im Juli und August, gemessen und betrug ebenso 73% bis 92% RL. Grundsätzlich wird die maximale mittlere monatliche relative Feuchtigkeit im gleichen Monat, wie die maximale mittlere monatliche Außenluftfeuchtigkeit gemessen. Bei drei Gebäuden, in Jinya, Waraya und Shinrinnobokujo Tango, ist die maximale mittlere monatliche relative Feuchtigkeit in der Wand einen Monat nach dem Monat mit maximaler mittlerer Außenluftfeuchtigkeit gemessen worden. Ganzjährig betrachtet ist die innere monatliche mittlere relative Luftfeuchtigkeit die niedrigste von allen Gebäuden.

Im Sommer steigt die relative Feuchtigkeit im unteren Bereich in der Wand an. Im Winter kehrt sich der Prozess um und die relative Feuchtigkeit steigt im oberen Bereich der Wand an (Fig. 2.). Tabelle 3 beschreibt die problematischen Bauweisen, die an jedem Gebäude identifiziert wurden. 10 allgemeine problematische Bauweisen (Baufehler) wurden gefunden:

1. Keine Dachrinnen bzw. Traufkanten/Dachüberstände zum Schutz der Strohballenwände vor Regen.
2. Keine Abflüsse bzw. Ableitungen für die Dachentwässerung.
3. Der Putz der exponierten Wände weist Erosion auf.
4. Die Fensterbleche reichen nicht weit genug über die Wandoberfläche, um das Regenwasser an der Erosion der Putzfläche unter den Fenstern zu hindern.
5. Die Strohballenwand ist nicht hoch genug über dem angrenzenden Außenniveau, um vor Spritzwasser im Sockelbereich geschützt zu sein.
6. Größere Luftundichtigkeiten im Bereich der Ventilationskanäle unter den Strohballen ermöglichen das Eindringen von Wasserdampf, vor allem im Sommer, wenn der Wasserdampf von außen nach innen wandert. Heiße und feuchte Sommerluft dringt in die Ballen durch die Ventilationskanäle ein, kühlt sich ab und erhöht somit die relative Luftfeuchtigkeit im Inneren der Wand.
7. Das Bodenniveau um das Gebäude steigt langsam an (Bewuchs und Verschattung), was den Zugang von Sonne und Wind reduziert und somit die ausreichende Trocknung der Sockelbereiche verhindert.
8. Unsachgemäße Sockelentwässerung (Drainage um das Gebäude) ermöglicht Wasseransammlung bzw. Wasserstau.
9. Es gibt keine Trennung, wie z.B. eine kapillar brechende Schicht, zwischen dem Außenputz und dem Boden, wodurch

die Bodenfeuchtigkeit durch den Außenputz in die Strohballenwände wandern kann

10. Das Fehlen einer Dampfsperre ermöglicht es der Bodenfeuchtigkeit von den Fundamenten in die Strohballenwände zu wandern.

Nahezu alle der problematischen Bauweisen, die in Japan ermittelt wurden, sind auch von anderen Forschern anderer Länder identifiziert worden. Einzige Ausnahme ist die Verwendung von Ventilationskanälen unter den Strohballenwänden (Fig. 1.). Dies scheint nur in Japan eine problematische Bauweise zu sein. In der Annahme, dass Ventilation die Feuchtigkeit in der Wand reduzieren würde, haben einige Architekten in Japan Strohballenwände mit einem Ventilationskanal im Sockelbereich unter den Strohballenwänden entworfen, die der Außenluft den Zugang zu den Strohballenwänden ermöglicht. Allerdings haben die Untersuchungen gezeigt, dass passive Ventilation keine erfolgreiche Maßnahme zu Feuchtigkeitskontrolle im Inneren der Strohballenwand ist, sondern eher eine Quelle zusätzlicher Feuchtigkeit in der Wand in den warmen Sommermonaten (Holzhuetter, 2010).

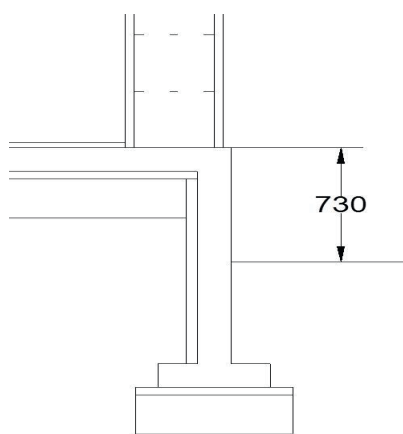
Bauweisen zur Begrenzung der Feuchtigkeit in Strohballenwänden

Als Reaktion auf die für problematisch befundenen Bauweisen, wurden folgende Bauweisen zur Begrenzung der Feuchtigkeit in Strohballenwänden vorgeschlagen:

1. Längere Traufkanten oder ganze Verandas zum Schutz der verputzten Wände vor Regen (Fig. 3.).
2. In Gebieten mit Schlagregen sollten geschlossene Innenhöfe oder Wandverkleidungen verwendet werden, um direkten Kontakt von Regen auf den verputzten Wänden zu verhindern (Fig. 4.).
3. Nutzung von Abflüssen, Einläufen und Drainage Rohren, um das Regenwasser sicher vom Gebäude wegzuleiten (Fig. 5.).
4. Um die verputzten Wände vor Spritzwasser zu schützen sollten ausreichende Sockelwände errichtet werden, um die Strohballenwände über das Bodenniveau zu heben. Außerdem verringert ein unebener Boden im Sockelbereich, das Spritzen des Regenwassers (Fig. 6.).
5. Sicherstellen, dass Fensterbänke und deren Tropfkanten ausreichend weit von den Wänden abstehen (Fig. 7.).

5 Einläufe und Abflüsse leiten das Wasser sicher ab
5 Gutters and down spouts remove water safely

6 Ausreichende Sockelmauern und richtige Umfeldgestaltung schützen die Wände vor Spritzwasser
6 Sufficient stem walls and proper landscaping protect walls from splash back



In summer, interstitial relative humidity tended to increase towards the lower portion of the wall. In winter the trend reversed with interstitial relative humidity increasing towards the upper portion of the wall (Fig. 2.).

Table 3 describes the problematic building practices identified for each building. 10 common problematic building practices were identified:

1. No eaves to protect bale walls from rain.
2. No gutters or down spouts to facilitate roof drainage.
3. The plaster of exposed walls experienced erosion.
4. The window sill did not extend far enough from the bale wall to prevent rain water from eroding the plaster under the window.
5. The bale wall is not raised high enough above an adjacent outside deck to prevent rain splash back from the deck.
6. Gross air leakage via the ventilation chamber allows water vapor to enter the bale walls, especially in summer when water vapor is likely to move from outside to inside. Hot and humid summer air entering the bale wall through the ventilation chamber cools and increases the interstitial relative humidity.
7. The ground rises steeply adjacent to the building, which reduces sun and wind exposure and decreases drying.
8. Inadequate perimeter drainage allows water to accumulate.
9. There is no separation, such as a capillary break, between the exterior plaster and ground, allowing ground moisture to climb through the exterior plaster by capillary action and enter the bale wall.
10. The lack of a damp proof course between the foundation and bale wall allowed ground moisture evaporating from the foundation to enter the bale wall.

Almost all of the problematic building practices identified in Japan have also been identified by other researchers in other countries. The one exception is the use of ventilation cavities under bale walls (Fig. 1.). This seems to be a problematic building practice particular to Japan. Assuming that ventilation would reduce interstitial moisture, some architects in Japan designed straw bale walls with a ventilation chamber under the wall, allowing outside air to enter the bale wall. However, research suggests that passive ventilation is not an effective means to control interstitial moisture in straw bale walls, but

is rather a source of interstitial moisture during warm summer months (Holzhueter, 2010).

Building Practices to Control Moisture in Straw Bale Walls

In response to the problematic building practices identified, the following building practices are proposed to control moisture in straw bale walls.

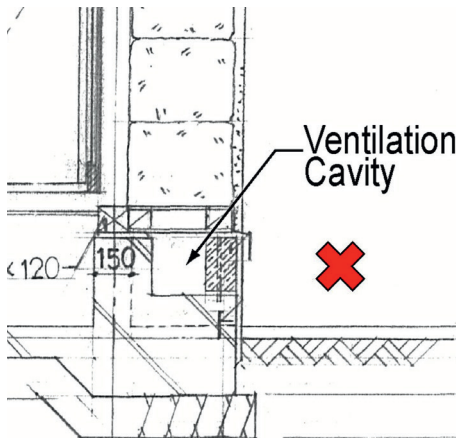
1. Lengthen eaves or use full verandas to protect plastered walls from rain (Fig. 3.).
2. In areas with wind driven rain, use enclosed patios or rain screens to eliminate direct contact of rain on plastered bale walls (Fig. 4.).
3. Use gutters, down spouts and drainage pipe to remove rain water safely away from buildings (Fig. 5.).
4. To protect plastered bale walls from splash back, use sufficient stem walls to raise bale walls above grade and use an irregular ground surface to break up rain drops (Fig. 6.).
5. Ensure window sills slope appropriately and drip edges protrude sufficiently from walls (Fig. 7.).
6. Do not ventilate bale walls (Fig. 8.). Instead, seal bale walls with an air barrier, such as a permeable plaster, to prevent air leaks.
7. Ensure good ventilation around exterior walls, free of vegetation, to increase drying (Fig. 9.).
8. Grade around a building so that surface water runs away from the building. In cases where this is not possible, use drains and swales to intercept surface and ground water. Create a network of perforated drainage pipe sloped to daylight to carry ground moisture away from buildings. Depending upon conditions, perforated drainage pipe can be installed under roof lines and next to foundations and footings.
9. Separate bale walls from foundations with a damp proof course (Fig. 10.).
10. Separate exterior plasters from foundations and ground moisture with a capillary break, such as metal flashing (Fig. 11.).

Conclusions

The hygrothermal conditions of nine earthen plastered straw bale structures in Japan were monitored. The potential for mold growth was found to vary by structure. Buildings utilizing rain screens were found to have lower interstitial relative humidity. Generally, buildings with ventilation chambers under bale

7 Tropfkanten schützen vor Lecks und Erosion

7 Drip edges protect against leaks and erosion



6. Strohballenwände sollten nicht hinterlüftet werden (Fig. 8.). Stattdessen sollten die Strohballen mit einer Luftdichtigkeitsschicht versehen werden, z.B. mit diffusionsoffenem Putz, um Luftundichtigkeiten zu vermeiden.
7. Sicherstellen einer guten Ventilation um die Außenwände, frei von Bewuchs, um das Abtrocknen (nasser Wände) zu beschleunigen (Fig. 9.).
8. Ein ebenes Gelände um das Gebäude sicherstellen, damit das Oberflächenwasser vom Gebäude weglaufen kann. Dort wo das nicht möglich ist sollten Rohre und Mulden genutzt werden, um das Oberflächen- und Grundwasser abzufangen. Anlegen eines Netzes durchlässiger Drainagerohre vom Gebäude weg, um Grundwasser vom Gebäude wegzuleiten. Abhängig von den konkreten Bedingungen können diese Rohre unter Dachkanten und an Fundamenten und Fußpunkten angelegt werden.
9. Abtrennung der Strohballenwände zu den Fundamenten mit einer Feuchtigkeitssperre (Fig. 10.).
10. Abtrennung der Außenputzschicht von den Fundamenten und der Bodenfeuchtigkeit durch eine kapillARBrechende Schicht, z.B. Metallblech (Fig. 11.).

Zusammenfassung

The hygrothermischen Bedingungen von neun lehmverputzten Strohballenbauten in Japan wurden aufgezeichnet. Das Potenzial für Schimmelpilzwachstum variiert dabei je nach Bauweise bzw. Konstruktion. Gebäude mit Verkleidung haben eine geringere relative Luftfeuchtigkeit in der Wand. Grundsätzlich haben Gebäude mit Ventilationskanälen unter den Strohballen eine höhere relative Luftfeuchtigkeit in den Wänden. Die maximale mittlere monatliche relative Luftfeuchtigkeit in der Wand wurde bei allen Gebäuden im Sommer gemessen. Im Sommer steigt die relative Feuchtigkeit im unteren Bereich in der Wand an. Im Winter kehrt sich der Prozess um und die relative Feuchtigkeit steigt im oberen Bereich der Wand an.

Zehn problematische Bauweisen wurden identifiziert. In Auswertung dessen wurden 10 Bauweisen vorgeschlagen, welche die Feuchtigkeit in den Strohballenwänden begrenzen.

Referenzen

- [1] Bigland-Pritchard, M. (2005) An assessment of the viability of strawbale wall construction in buildings in maritime temperate climates. PhD Thesis, University of Sheffield.
- [2] Centre for Building Performance Research, Victoria University of Wellington (2010) Table of embodied energy coefficients. Available Online: <http://www.victoria.ac.nz/cbpr/documents/pdfs/ee-coefficients.pdf>
- [3] Holzhuetter, K., Itonaga, K. (2010) The influence of passive ventilation on the interstitial relative humidity of a straw bale wall. Summaries of Technical Papers, Architectural Institute of Japan, pp. 543-544.
- [4] Japan Straw Bale House Association (2009) First straw bale house in Japan. Available Online: <http://www.japanstraw.com/index/main/03hatuno/03hatuno.html>
- [5] Myhrman, M., Knox, J. (1993) A brief history of hay and straw as building materials. The Last Straw, 3, 2-4.
- [6] Sain, P, Broadbent, F. E. (1975) Moisture absorption, mold growth, and decomposition of rice straw at different relative humidities. Agronomy Journal, 67.
- [7] Smith, S. L., Hill, S. T. (1982) Influence of temperature and water activity on germination and growth of aspergillus restrictus and a. versicolor. Transactions of the British Mycological Society, 79, 558-569.
- [8] Summers, M. D. (2006) Moisture and decomposition in straw: implications for straw bale construction. In: King, B. Design of Straw Bale Buildings: the State of the Art. San Rafael, CA: Green Building Press.
- [9] Wihan, J. (2007) Humidity in straw bale walls and its effect on the decomposition of straw. Master's Thesis. University of East London School of Computing and Technology.

8 Verhindere die Ventilation der inneren Wandbereiche
8 Avoid interstitial ventilation

9 Erhöhe die Austrocknung durch Sicherung einer guten Belüftung um die Außenwände
9 Increase drying by ensuring good ventilation around exterior walls

10 Dampfsperre über dem Fundament
10 Damp-proof course above foundation



walls were found to have higher interstitial relative humidity. The interstitial maximum monthly mean relative humidity for all buildings was recorded in summer. In summer, interstitial relative humidity tended to increase towards the lower portion of the wall. In winter the trend reversed with interstitial relative humidity increasing towards the upper portion of the wall. Ten problematic building practices were identified. In response, 10 building practices are proposed to control moisture in straw bale walls.

References

- [1] Bigland-Pritchard, M. (2005) An assessment of the viability of straw-bale wall construction in buildings in maritime temperate climates. PhD Thesis, University of Sheffield.
- [2] Centre for Building Performance Research, Victoria University of Wellington (2010) Table of embodied energy coefficients. Available Online: <http://www.victoria.ac.nz/cbpr/documents/pdfs/ee-coefficients.pdf>
- [3] Holzhueter, K., Itonaga, K. (2010) The influence of passive ventilation on the interstitial relative humidity of a straw bale wall. Summaries of Technical Papers, Architectural Institute of Japan, pp. 543-544.
- [4] Japan Straw Bale House Association (2009) First straw bale house in Japan. Available Online: <http://www.japanstraw.com/index/main/03hatuno/03hatuno.html>
- [5] Myhrman, M., Knox, J. (1993) A brief history of hay and straw as building materials. *The Last Straw*, 3, 2-4.
- [6] Sain, P, Broadbent, F. E. (1975) Moisture absorption, mold growth, and decomposition of rice straw at different relative humidities. *Agronomy Journal*, 67.
- [7] Smith, S. L., Hill, S. T. (1982) Influence of temperature and water activity on germination and growth of *aspergillus restrictus* and *a. versicolor*. *Transactions of the British Mycological Society*, 79, 558-569.
- [8] Summers, M. D. (2006) Moisture and decomposition in straw: implications for straw bale construction. In: King, B. *Design of Straw Bale Buildings: the State of the Art*. San Rafael, CA: Green Building Press.
- [9] Wihan, J. (2007) Humidity in straw bale walls and its effect on the decomposition of straw. Master's Thesis. University of East London School of Computing and Technology.

11 Eine kapillarbrechende Schicht verhindert das Aufsteigen von Bodenfeuchte durch die Außenputzschicht

11 A capillary break prevents ground moisture from rising through exterior plasters