Jitka Hroudová
Azra Korjenic
Jiři Zach
Michael Mitterböck

DOI: 10.1002/bapi.201710030

Entwicklung eines Wärmedämmputzes mit Naturfasern und Untersuchung des Wärme- und Feuchteverhaltens

Das Hauptziel dieses Gemeinschaftsprojektes der TU Brno und TU Wien war es, geeignete Putzrezepturen (Wärmedämmputze) zu entwickeln, bei denen Fasern pflanzlicher oder tierischer Herkunft bzw. Zellulosefasern aus der Papierindustrie eingemischt werden, die ökologische Anforderungen erfüllen und günstige bauphysikalische Eigenschaften für Baukonstruktionen vorweisen. Neben den (bau-) physikalischen Untersuchungen wurden wärmetechnische und mechanische Grundeigenschaften einschließlich Feuchteverhalten ermittelt. Die Untersuchungen zeigten im Hinblick auf die mechanischen Eigenschaften und das Feuchtigkeitsverhalten sehr gute Ergebnisse. Nach der Entwicklung und Bestimmung der Materialkenndaten wurden diese in die WUFI-Datenbank integriert. Des Weiteren wurde einer der speziell entwickelten Putze (Beimengung von Schafwolle und Ziegenhaaren) unter realen Bedingungen hinsichtlich Wärmedämmeigenschaften und Feuchteverhalten analysiert und bewertet. Das neuentwickelte Putzsystem wurde bei einer realen Sanierung angewendet, die Situation in einer WUFI-Simulation nachgebildet und sowohl messtechnisch als auch rechnerisch untersucht. Die Messungen und die Simulation zeigten ein sehr positives Verhalten.

Development of a thermal insulation plaster with natural fibres and the investigation of its heat and moisture behaviour. *The main aim of this joint project of the TU Brno and TU Wien was to develop plaster recipes (heat insulation plaster) with embedded plant and animal fibres or cellulose fibres from the paper industry. This should meet the ecological requirements and performing favourable physical and mechanical characteristics of building constructions. The physical performance of the buildings, the thermal and mechanical fundamental properties and also moisture behaviour of the developed plasters were investigated. The investigations showed very good results of the mechanical properties and moisture behaviour. After development and determination the material data these were integrated into the WUFI database. Further a special developed plaster from the series (sheep wool and goat hair) was analysed and evaluated under real conditions, according to heat insulation properties and moisture behaviour. The new plaster was applied to a real refurbishment, the situation reproduced in a WUFI simulation and experimentally as calculative investigated. The simulations and the measurements showed a very positive behaviour.*

1 Einleitung

Seit einigen Jahrzehnten besteht im Bauwesen eine Nachfrage nach Materialien, die eine minimale Umweltbelastung aufweisen. Daraus resultiert ein Trend hin zu traditionellen bzw. neuen Baumaterialien, die ein optimales Mikroklima nach bauphysikalischen Standards sicherstellen und eine korrekte Entsorgung oder Wiederverwertung nach Ende der Lebensdauer ermöglichen. Die gegenwärtige Entwicklung von sogenannten „green materials“ bringt u. a. eine Rückbesinnung auf die Baumaterialien unserer Vorfahren mit sich, die ihre Funktion über viele Jahre hinweg erfüllten. Bauten, bei denen diese klassischen Naturmaterialien zur Anwendung kamen, spielten eine wichtige Rolle bei der Entstehung der ersten menschlichen Wohnstätten – heute historische Denkmäler – und können bis heute erhalten werden.

Die Nutzung von Materialien auf Basis von einfach erneuerbaren Sekundärrohstoffen hat sich im Folgenden als optimal erwiesen. Es ist allgemein anerkannt, dass Kalkputze in Gebäuden ein gutes Raumklima schaffen, welches die Gesundheit der Bewohner positiv beeinflusst [5]. Kalkbasierte Putze sind durch ihren hohen basischen pH-Wert geeignet, ein Auftreten von Schimmel auch bei höherer Feuchtelast zu verhindern und erfüllen häufig die bauphysikalischen Anforderungen.

In der Geschichte der Putze trifft man am häufigsten auf Lehm- oder Kalkmörtel [1, 2], die für ihre raumklimaregulierenden Eigenschaften bekannt sind. Kalkmörtel wurde jahrhundertelang als „Kleber“ von Gesteinsscharen in antiken Bauten und bei den ägyptischen Pyramiden eingesetzt [4]. Oft wurden für die Armierung dieser Putze Naturfasern pflanzlicher oder tierischer Herkunft verwendet. Bei den pflanzlichen Fasern handelte es sich um Schilf, Hanf, Leinen, Stroh, Heu, Sisalhanf und viele andere, je nach lokaler Verfügbarkeit [1, 3–12]. Mit dem gesellschaftlichen und technischen Fortschritt und den aufkommenden Materialwissenschaften wurden diese Putze seit den 1960er-Jahren schrittweise durch Putze auf Basis von Portlandzement ersetzt und die Naturfasern durch Glas- oder Polymerfasern (Polypropylen, Polyamid, Polyacrylonitrile u. a.) – oft aus Kosten- und Prozessgründen – substituiert [4]. Diese Fasern sind vorwiegend unverrottbar oder sehr schwer verrottbar und stellen eine große Belastung für die Umwelt dar. Die Basisrohstoffe sind vorwiegend aus nicht erneuerbaren Rohstoffen wie Erdöl [4].

Weltweit beschäftigen sich wissenschaftliche Teams mit der Entwicklung des Kalkputzmörtels, um Alternativen zu Zement als Bindemittel zu entwickeln. Dabei achten sie auf eine effektive Herstellung mittels experimenteller Messungen, um Eigenschaften und Funktionsweisen genau zu ermitteln und zu überprüfen:

- *Ashurst J.* und *Ashurst N.* erforschen Putze die speziell für den Umbau oder für die Sanierung bestimmt sind hinsichtlich eines optimalen Verhältnisses von Kalk und Zement 1:1 oder 2:1 [13].
- Das Autorenteam *Vejmelková, Koňáková, Čáchová, Keppert, Černý, Rovnaníková, Keršner* widmet sich der Erforschung und Entwicklung eines Putzmörtels unter der Verwendung von alternativen Bindemitteln, vor allem Metakaolin [14, 15].
- Laut dem Team *Arioglu* und *Acun* sind für die Sanierung von Baukonstruktionen Putze mit Metakaolin und Kalk im Verhältnis von 1:3 geeignet [16]. Zu berücksichtigen ist, dass bei diesen Putzen das Risiko der unerwünschten plastischen Schrumpfung besteht [5].

Ein bedeutender Meilenstein zur Verhinderung der Entstehung von Mikrorissen liegt im Einsatz von Armierungen bzw. Faserverstärkung von Putzmischungen. Im Bereich der Putze wurden seit Anbeginn Naturfasern zur Verstärkung und Stabilisierung, in der Zementmatrix gebunden, eingesetzt. Die Arten der verwendeten Fasern in Form von Zellstoff oder kurzen Fasern [6] sind durch lokale, einfach erreichbare Rohstoffquellen bestimmt, womit ein niedriger PEI-Wert (primäre Eingangsenergie) erreicht wird. Für die Armierung des Putzes kamen Naturfasern zum Einsatz, die aus der Landwirtschaft und Viehzucht gewonnen wurden.

Ein allgemeiner Vorteil von Naturfasern besteht in ihrer biologischen Zerlegbarkeit, den geringen Kosten, ihrer Gesundheitsunbedenklichkeit, ihren spezifischen Eigenschaften, dem CO_2-neutralen Lebenszyklus und ihrer niedrigen Dichte [4]. Naturfasern die in Putzmischungen eingebunden sind, bewirken eine Verbesserung der Frostbeständigkeit und somit eine längere Lebensdauer und eine Verbesserung des Dreipunktbiege-Verhalten. Werden die Fasern gezielt vorbehandelt, können Verbesserungen der Festigkeitscharakteristiken erreicht werden [17, 18, 19]. Die Faserbehandlung wird vor allem aufgrund des Einflusses der Adsorption des Kalziums aus den Naturfasern vorgenommen, welche eine negative Auswirkung auf die finalen Festigkeitscharakteristiken (Druckfestigkeit) haben kann. Als ideale Vorbehandlung vor dem Einbringen in die Putzmischung hat sich laut *M. Le Troëdec et al.* [18] die Behandlung der Fasern mithilfe von EDTA (Ethylendiamintetraessigsäure) bewährt. Dies führt zur Bildung eines stabilen Komplexes mit den Kationen des Kalziums und somit zur Verhinderung störender Komplexe zwischen Pektinen und Ca^{2+}-Ionen.

In der Literatur findet sich eine ganze Reihe anderer wirksamer Faserbehandlungen, z. B. kann durch eine Alkalisierung der Fasern, unter Nutzung eines Kationpolyelektrolyts des Polyethylenimins, die negative Ladung der Faseroberfläche hervorgerufen werden [13, 18].

Im Falle von Lehmputz sind *G. P. Georgiev* et al. zu dem Schluss gekommen, dass Naturfasern den Abriebwiderstand in den Putzen verbessern und somit helfen, die Entstehung von Rissen und dadurch Schimmelbildung zu vermeiden.

Um den ökologischen „Fußabdruck" der Putze zu verringern, wurden zur Herstellung neben den klassischen Materialien auch nicht traditionelle Rohstoffquellen benutzt. Für die Entwicklung der Putze wurden vor allem lokale, einfach zugängliche Rohstoffquellen gewählt. So wurde der Zement teilweise durch Kalkhydrat und alternatives Bindemittel (Metakaolin) ersetzt. Um gute Wärmedämmeigenschaften zu erhalten, wurde leichtes Gestein auf Basis von expandiertem Glas zugesetzt. Die bauphysikalische Eignung wurde anschließend sowohl im Labor als auch mithilfe einer WUFI-Simulation in einer realen Umgebung überprüft.

2 Eingangsrohstoffe und Vorbereitung der Probekörper

Für die Entwicklung neuer Wärmedämmputze wurden aufgrund von Erfahrungen und Literaturauswertungen gezielt die am besten geeigneten Eingangsrohstoffe gewählt [21, 22].

Als Grundrohstoff diente ein Leichtzuschlag aus rezykliertem Altglas auf Basis von Blähglasgranulat mit Fraktionsdurchmesser 0,25–0,5 mm, 0,5–1 mm und 1–2 mm und der chemischen Zusammensetzung gemäß Tabelle 1.

Es wurde auch eine Siebanalyse des Minerals vorgenommen, welche in Bild 1 grafisch dargestellt ist. Weitere verwendete Gesteine zur Entwicklung eines ökologischen Putzes waren expandierter magmatischer Perlit und mikrogemahlener Kalkstein.

Als Bindemittel wurde die Kombination Kalkhydrat, Zement CEM I 42,5 R und Metakaolin im Verhältnis von 2:1:1 gewählt. Im Einklang mit den Ergebnissen der Forschungsarbeiten [14, 15, 16, 21] wurden nicht nur die klassischen Bindemittel eingesetzt, sondern auch das alternative Bindemittel Metakaolin, das einen Teil des Zements ersetzen kann.

Metakaolin ist ein gemahlener, wärmeaufbereiteter geschlämmter Kaolin und trägt den Namen „Mefisto K05". Kaolin, auch als Porzellanerde, Porzellanton, Pfeiffenerde, weiße Tonerde oder in der Apotheke als Bolus alba oder Pfeifenerde bezeichnet, ist ein feines, eisenfreies, weißes Gestein, das als Hauptbestandteil Kaolinit enthält. Kaolinit ist ein Verwitterungsprodukt des Feldspats und entwickelt sich zu Kaolin „Mefisto K05" durch Ausbrennen. Kaolin wird u. a. bei der Herstellung von Papier und zur Bereitung von

Tabelle 1. Chemische Zusammensetzung des Blähglasgranulats
Table 1. Chemical composition of the light rock on the basis of expanded waste glass

Chemische Verbindung	Inhalt in Masse-%
SiO_2	71 ± 2
Al_2O_3	2 ± 0,3
Na_2O	13 ± 1
Fe_2O_3	0,5 ± 0,2
CaO	8 ± 2
MgO	2 ± 1
K_2O	1 ± 0,2
Spurenelemente	< 0,5

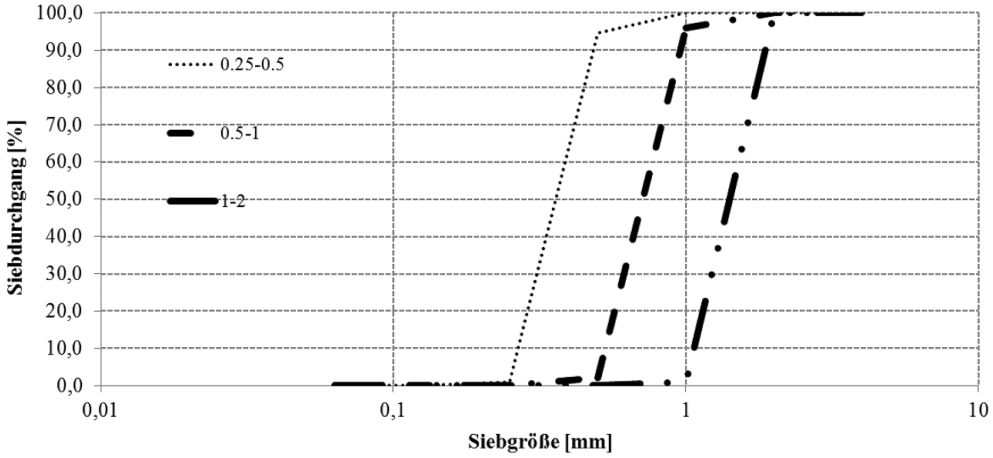

Bild 1. Siebanalyse der leichten Gesteine
Fig. 1. Sieve analysis of light rocks

Tabelle 2. Chemische Zusammensetzung des Metakaolins
Table 2. Chemical composition of the Metakaolin

Chemische Verbindung	Inhalt in Masse-%
SiO_2	58,7
Al_2O_3	38,5
Fe_2O_3	0,72
TiO_2	0,5
MgO	0,38

Porzellan verwendet. Kaolinite und weitere Rohstoffe dehydratisieren bei Temperaturen von 600 °C bis 900 °C.

Das Metakaolin hat eine positive Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften des Putzes und erhöht seine Frostbeständigkeit. In Tabelle 2 ist seine chemische Zusammensetzung angeführt.

Zur Aussteifung des Putzes wurden vier Arten von Naturfasern mit verschiedener Herkunft aus der Landwirtschaft und Industrie ausgewählt. Zum einen wurden *landwirtschaftlich hergestellte Fasern, Hanf zusammen mit der Schäbe*, und zum anderen *tierische Fasern, Ziegenhaare und Schafwolle*, gewählt. Daneben wurden noch *Zellulosefasern aus der Papierwiederverwertung* verwendet.

Die landwirtschaftlich hergestellten Hanffasern wurden nicht chemisch behandelt, sie wurden lediglich nur auf eine Länge von 2 bis 3 cm geschnitten.

Die tierischen Fasern aus Schafwolle und Ziegenhaar wurden in einem Seifenbad bei einer Temperatur von 50 °C von Schmutz, Fett und dergleichen gereinigt, gespült und anschließend unter Laborbedingungen getrocknet und danach auf die Faserlänge 2 bis 3 cm geschnitten.

Die Zellulosefasern wurden mikroskopisch untersucht und die Dicke aus dem Durchschnittswert von 30 Fasern bestimmt. Die jeweiligen Dicken sind in Tabelle 3 aufgeführt.

In Bild 2 sind die Aufnahmen der Fasern dargestellt, die mithilfe des optischen Universalmikroskops Leica DM4000 M LED aufgenommen worden sind.

Zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit des Frischmörtels und der Erhöhung der Porosität des Leichtputzes wurden chemische Zuschläge auf Basis von Zellulose, Olefinsulfonat und Natriumlaurylsulfat zugegeben.

Insgesamt wurden fünf Rezepturen ausgewählt. Die erste Rezeptur (1.M) stellt eine Referenzrezeptur ohne Faserzugabe dar und wurde aufgrund vorheriger Forschungsergebnisse an den Technischen Universitäten Brno und Wien, Fakultät für Bauwesen, ausgewählt, um gezielt einen sehr leichten Wärmedämmputz mit niedrigem Volumengewicht und niedrigem Wärmeleitfähigkeitswert zu erhalten.

Ab der zweiten bis zur fünften Rezeptur (2.M bis 5.M) wurden Naturfasern in der Menge von 0,25 bis 0,56 Masse-%, bezogen auf das Gesamtgewicht, beigemengt. Tabelle 4 zeigt eine Übersicht der Rezepturzusammensetzungen, die mit dem Ziel einen leichten Putz mit guten wärmedämmenden und verbesserten mechanischen Eigenschaften zu erhalten, zusammengestellt wurden. Die Faserbeimengung hat sich durch den umfangreichen Datenkomplex der entwickelten Proberezepturen, der durchgeführten Recherche und der durchgeführten Optimierungsprozesse entwickelt und lag im Bereich von 0,77 bis 1,73 Masse-%. Laut etlicher Fachbeiträge sind Naturfasern am wirksamsten, wenn sie im Verhältnis von 0,5 % bis idealerweise rund 1 % in das Bindemittel eingemischt werden [4, 6, 23]. Für die Entwicklung der Putze in diesem Projekt wurde die geringste Menge an spezifischen Fasern bei gerade noch ausreichender Biegezugfestigkeit gewählt. Dies geschah, um den Einfluss der Aussteifungsfasern auf die mechanischen Eigenschaften im Vergleich mit der Bezugsrezeptur (1.M) genau zu beobachten.

Die Herstellung der in Tabelle 4 genannten Rezepturen wurden in gleicher Reihenfolge durchgeführt: Zuerst

Tabelle 3. Faserdicke [µm]
Table 3. Fibre thickness [µm]

Faserart	Hanffasern	Zellulosefasern	Schafwolle	Ziegenhaare
Dicke [µm]	155,2	18,9	35,1	71,7

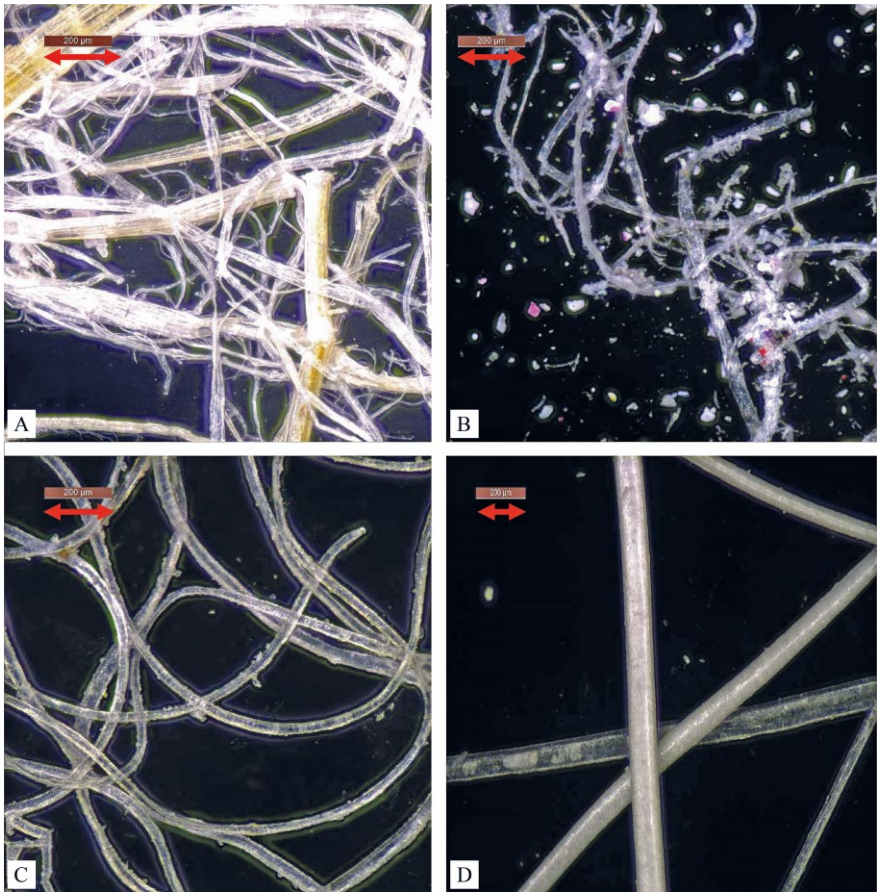

Bild 2. Mikroskopische Aufnahmen der Fasern; A – Technische Hanffasern, B – Zellulosefasern, C – Schafwolle, D – Ziegenhaare
Fig. 2. Microscopic images of fibres; A – technical hemp fibers, B – cellulose fibers, C – wool D – goat hair

Tabelle 4. Übersicht der Rezepturzusammensetzungen pro 7 kg Trockenmischung [g]
Table 4. Overview of the formula composition per 7 kg dry mixture [g]

Rezeptur/ Bestandteil	Gestein	Kalkstein	Kalkhydrat	Zement	Metakaolin	chemische Zuschläge	Fasern	Wasser
1. M-Referenz	4591	944	664	332	332	137	–	3250
2. M-Hanffasern	4591	944	664	332	332	137	28,0	3250
3. M-Zellulosefasern	4591	944	664	332	332	137	17,5	3250
4. M-Schafwolle	4591	944	664	332	332	137	30,8	3250
5. M-Ziegenhaare	4591	944	664	332	332	137	39,2	3250

wurden die Trockenbestandteile Splitt auf Basis von Kalkstein mit den jeweiligen Bindemitteln (Kalkhydrat, Zement, Metakaolin) durchmischt und danach das Wasser zusammen mit den chemischen Zuschlägen dosiert. Den Rezepturen 2 bis 5 wurden am Ende Naturfasern dosiert beigemengt.

Die Frischmörtel wurden im erhärteten Zustand verschiedener Prüfungen unterzogen. Danach wurden die Probekörper zur Ermittlung der gewünschten Putzeigenschaften vorbereitet.

Die Proben wiesen folgende Formen auf:

- Quader mit den Abmessungen 40 mm × 40 mm × 160 mm (A): 15 Proben von jeder Rezeptur,
- Quader mit den Abmessungen 300 mm × 300 mm × 50 mm (B): 3 Proben von jeder Rezeptur,
- Zylinderproben mit einem Querschnitt von 100 mm und 10 mm Dicke (C): 3 Proben von jeder Rezeptur.

Diese Probekörper wurden bei einer Temperatur von 23 °C und 50 % relative Luftfeuchte gelagert und unter Laborbedingungen konditioniert.

3 Laboruntersuchungen und Auswertungen

Am Mörtel im Frischzustand wurden folgende Eigenschaften untersucht:

- Rohdichte des Frischmörtels (gemäß EN 1015-6),
- Konsistenz des Frischmörtels (gemäß EN 1015-3),
- Luftgehaltes vom Frischmörtel (gemäß EN 1015-7).

Tabelle 5. Eigenschaften der Frischmörtel der entwickelten Putze
Table 5. Properties of the fresh mortars of the developed plaster

Eigenschaft/Rezeptur	1.M	2.M	3.M	4.M	5.M
Volumengewicht [kg·m^{-3}]	482	523	550	510	615
Luftinhalt [%]	30	21	29	29	18
Konsistenz/Ausbreitmaß [mm]	160	140	150	150	160

Am erhärteten Mörtel wurden danach folgende Eigenschaften ermittelt:
- Trockenrohdichte des erhärteten Mörtels (gemäß EN 1015-10),
- Mechanische Eigenschaften – Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit (gemäß EN 1015-11),
- Sorptionseigenschaften (gemäß EN ISO 12571),
- Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme (gemäß EN 1015-18),
- Wärmeleitfähigkeit: a) durch nicht stationäres Verfahren – mittels Heißdrahtverfahren, b) durch stationäres Verfahren mittels Plattengerät und dem Wärmestromplatten-Gerät (gemäß EN 12667, ČSN 72 701 – 3, EN ISO 8301 und EN ISO 8894-1),
- Diffusionswiderstand (gemäß EN 1015-19).

Tabelle 5 zeigt die daraus resultierenden durchschnittlichen Werte des Frischmörtels. Die Werte der Rohdichte des Frischmörtels lagen im Bereich von 510 kg·m^{-3} bis 615 kg·m^{-3}. Die niedrigste Rohdichte von 482 kg·m^{-3} wurde bei der Referenzrezeptur (1.M) experimentell bestimmt, welcher als sehr leichter Putz mit hohem Luftanteil im Frischmörtel und mit einem Ausbreitmaß von rund 160 mm bewusst gewählt wurde.

Die Auswertung des Luftgehalts in den Frischmörteln der untersuchten Putze ergaben unterschiedliche Werte: Es wurde geschlussfolgert, dass es durch die Zugabe von Naturfasern bei manchen Rezepturen zur erheblicher Reduktion des Luftinhaltes gekommen ist, vor allem bei den Rezepturen 2.M und 5.M. Diese Senkung des Luftvolumens wird den Interaktionen der chemischen Additive mit den Fasern zugeschrieben. Der höchste Luftinhalt von 29 % wurde bei den Rezepturen 3.M und 4.M. ermittelt. Den niedrigsten Wert von 18 % wies die Rezeptur 5.M auf. Dieser Wert kann mit dem am höchsten erreichten Volumengewicht im Frischzustand in engen Zusammenhang gebracht werden. Die Ausbreitmaße lagen bei allen Proben im Bereich von 140 bis 160 mm.

Die jeweiligen Probekörper wurden zum Zeitpunkt der Erhärtung unter konditionierten Laborbedingungen bei einer Temperatur von 23°C und 50 % relative Luftfeuchte gelagert. Die darauffolgenden Messungen wurden bei den erhärteten Mörtelproben nach 14 und 28 Tagen vorgenommen. Die Messergebnisse sind in Tabelle 6 aufgelistet.

Aus den experimentell ermittelten Werten des Volumengewichtes (nach 28 Tagen) konnte festgestellt werden, dass die Rezepturen mit Naturfaserzugabe höheres Volumengewicht als die Referenzrezeptur 1.M, ohne Zuschlag von Fasern, aufweisen. Da die Wärmeleitfähigkeit mit dem Volumengewicht eng im Zusammenhang steht, wies die Referenzrezeptur 1.M auch in diesem Falle nach 28 Tagen den niedrigsten Durchschnittswert der Wärmeleitfähigkeit auf. Ermittelt wurde die Wärmeleitfähigkeit durch das Heißdrahtverfahren und ergab 0,0727 W·m^{-1}·K^{-1} im laborfeuchtem Zustand und 0,0715 W·m^{-1}·K^{-1} im Trockenzustand.

Die Proben der anderen Rezepturen wiesen auch gute Wärmedämmeigenschaften auf.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von dem Volumengewicht im laborfeuchten Zustand einen ungefähr linearen Charakter mit dem Korrelationskoeffizienten von 0,99 aufweist. Im Trockenzustand wurde jedoch auch ein Einfluss der Fasern selbst nachgewiesen (siehe Diagramm in Bild 3), wobei eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit bei der Probe 4.M mit Schafwollfasern erreicht wurde.

Des Weiteren wurde auch die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Temperatur untersucht. Die dazu notwendigen Messungen wurden bei den getrockneten Plattenproben mit den Abmessungen von 300 × 300 × 50 mm mithilfe des stationären Verfahrens mit dem Plattengerät vorgenommen. Die jeweilige Auswertung ist in der Bild 4 dargestellt.

Bild 4 zeigt den Zusammenhang zwischen Wärmeleitfähigkeit und der mittleren Temperatur: Mit steigernder Temperatur erhöht sich die Wärmeleitfähigkeit! Die niedrigste Temperaturempfindlichkeit wurde bei der Rezeptur 4.M nachgewiesen.

Eine weitere bedeutende Eigenschaft, die die Wärmedämmeigenschaften in beträchtlichem Ausmaß beeinflusst, ist die Porosität der Materialien. Bei den Putzproben wurde die Ermittlung der Porosität mithilfe der Quecksilberporositätsmessung vorgenommen. Diese beruht auf der Kapillardepression des Quecksilbers (der Probekörper wird nicht benetzt, d.h. der Benetzungswinkel ist größer als 90°), wodurch das Quecksilber nur mithilfe eines Außendruckes in die Probekörperporen eindringen kann. Dieser besagte Druck muss umso größer sein, je engere

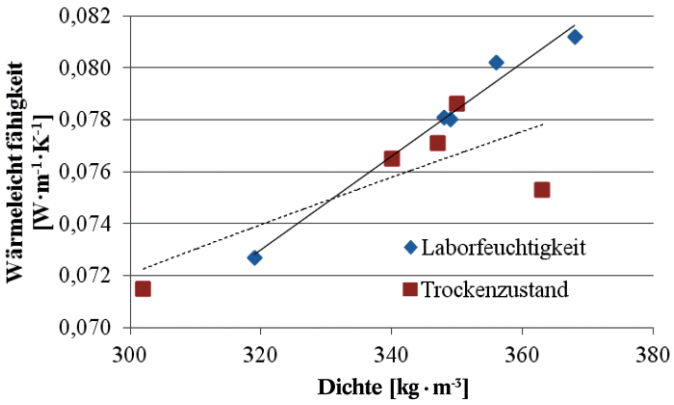

Bild 3. Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Volumengewicht
Fig. 3. Dependence of the thermal conductivity on the volume weight

Tabelle 6. Eigenschaften der entwickelten Putze, getestet am erhärteten Mörtel nach 14 und 28 Tagen
Table 6. Properties of developed plasters, tested on the hardened mortar after 14 and 28 days

Property / Mixture	1.M	2.M	3.M	4.M	5.M
Nach 14 Tagen					
Dichte [kg·m^{-3}]	319	350	362	375	350
Druckfestigkeit [N·mm^{-2}]	0,20	0,32	0,33	0,34	0,45
Biegezugfestigkeit [N·mm^{-2}]	0,12	0,26	0,22	0,23	0,31
Wärmeleitfähigkeit [W·m^{-1}·K^{-1}]	0,0738	0,0786	0,0820	0,0827	0,0785
Nach 28 Tagen					
Dichte [kg·m^{-3}]	319	349	356	368	348
Druckfestigkeit[N·mm^{-2}]	0,25	0,36	0,18	0,62	0,48
Biegezugfestigkeit [N·mm^{-2}]	0,08	0,23	0,09	0,27	0,26
Wärmeleitfähigkeit [W·m^{-1}·K^{-1}]	0,0727	0,0780	0,0802	0,0812	0,0781
Faktor des Diffusionswiderstandes [–]	8,12	9,28	9,22	8,52	7,55
Koeffizient der Kapillarabsorption (Sanierungsputz) [kg·m^{-2}]	10,05	9,75	2,25	11,25	11,50
Koeffizient der Kapillarabsorption (klassischer Putz) [kg·m^{-2}·min$^{-0,5}$]	0,38	0,30	0,05	0,30	0,43
Porosität [%]	70,70	68,31	63,11	60,99	69,74
Nach 25 Tagen im Trockenzustand					
Dichte [kg·m^{-3}]	302	340	350	363	347
Wärmeleitfähigkeit [W·m^{-1}·K^{-1}]	0,0715	0,0765	0,0786	0,0753	0,0771

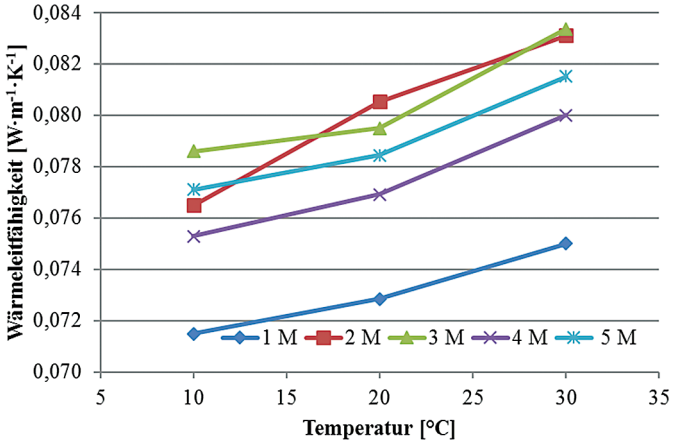

Bild 4. Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der mittleren Temperatur
Fig. 4. Dependence of the thermal conductivity on the average temperature

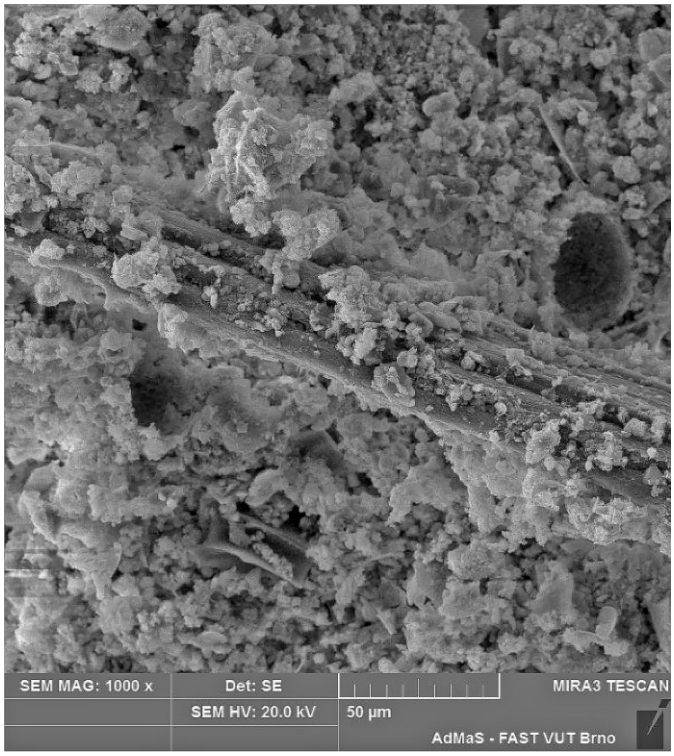

Bild 5. Mikrostruktur bei der Rezeptur 2.M mit Hanffasern
Fig. 5. Microstructure of recipe 2. M with hemp fibers

Poren befüllt werden sollen. Das jeweilige Verhältnis hat *Washburn* bereits im Jahre 1921 quantitativ mit der folgenden Formel ausgedrückt:

$$g \cdot \rho \cdot h \cdot \pi \cdot r \cdot 2 = -2 \cdot \pi \cdot r \cdot \gamma \cdot \cos\Theta \quad (1)$$

wobei g [m·s^{-2}] die Beschleunigung, ρ [g·m^{-3}] die Quecksilberdichte, h [m] die Höhe der Quecksilbersäule in der Pore, r [m] der Radius der Pore eines Rundquerschnitts, γ [N·m^{-1}] die Oberflächenspannung des Quecksilbers in der Pore und Θ der Benetzungswinkel der Porenwände mit Quecksilber sind.

Das genannte Verhältnis kann mit der folgenden Formel umschrieben werden:

$$g \cdot \rho \cdot h = -2 \cdot \gamma \cdot \cos\Theta / r \quad (2)$$

Der Radius der befüllten Pore ist dem Wert des angewandten Druckes (P [N·m^{-2}] der Gesamtdruck, unter dem Quecksilber in die Pore eindringt) umgekehrt proportional. Bei den niedrigen Drücken werden die Poren mit dem größten Radius mit Quecksilber befüllt und der Druckzuwachs ermöglicht das Eindringen des Quecksilbers in die Poren mit dem kleinerem Radius. Es wurde ermittelt, dass

Bild 6. Proben für Ermittlung des Kapillarabsorptionskoeffizienten (a) und des Diffusionswiderstandes (b)
Fig. 6. Example for determination of capillary absorption coefficient (a) and the diffusion resistance (b)

sich die Gesamtporosität bei allen Rezepturen im Bereich von 53,99 % bis 69,74 % bewegt. Konkrete Werte sind in Tabelle 6 angeführt. Im Weiteren wurde die Mikrostruktur der entwickelten Materialien untersucht bzw. eine mikroskopische Analyse mithilfe eines Rasterelektronenmikroskops TESCAN MIRA 3 XMU vorgenommen. In Bild 5 ist das Ergebnis der mikroskopischen Analyse, der Probe mit Hanffasern (Rezeptur 2.M), dargestellt.

Die Untersuchung der mechanischen Eigenschaften zeigte, dass es durch Zugabe von Naturfasern zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften kommt. Die niedrigsten Werte der Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit wurden bei der Referenzrezeptur (1. M), gefolgt von der Rezeptur 3 (mit Zellulosefasern), gemessen. Die Ursache liegt in der Eigenschaft und Form der Zellulosefasern. Die Zellulosefasern haben zu Beginn vermehrt die Feuchtigkeit aus dem Putz absorbiert, wodurch es bei der Austrocknung zur erheblichen Minderung der mechanischen Eigenschaften kam. Die besten mechanischen Eigenschaften wurden bei der Rezeptur 4.M (mit Schafwolle) bestimmt, bei der die Druckfestigkeit nach 28 Tagen 0,62 $N \cdot mm^{-2}$ und die Biegezugfestigkeit 0,27 $N \cdot mm^{-2}$ betrugen. Die Durchschnittswerte der Diffusionswiderstände der Putze bewegten sich in den Bereichen von 7,55 bis 9,28. Der höchste Diffusionswiderstand wurde bei der Rezeptur 2.M (mit technischen Hanffasern), der niedrigste Wert bei der Rezeptur 5.M (mit Ziegenhaare) ermittelt.

Durch den experimentell ermittelten Kapillarabsorptionskoeffizienten kann man schlussfolgern, dass – mit Ausnahme der Rezeptur 3.M (mit Zellulosefasern) – diese Putze kapillaraktive Materialien sind und sich auch für Umbauten bzw. Sanierungen eignen. Die vorliegenden Putzmischungen wiesen eine Porosität von 60,99 % bis 70,70 % auf. Die ermittelten Porositäten standen mit dem Trend der umgekehrt proportionalen Abhängigkeit zwischen der Porosität und dem Volumengewicht im Einklang.

Bild 6 zeigt die Proben für die Auswertung des Kapillarabsorptionskoeffizienten und des Diffusionswiderstandfaktors.

Ein weiteres Ziel des Projekts bestand darin, für weitere Forschungsarbeiten und Planungen die Materialdaten bezüglich Wärme- und Feuchtigkeitsverhalten verschiedener Rezepturen für die bauphysikalischen Simulationen zu gewinnen.

Dazu wurden die Probekörper mit den Abmessungen von 40 × 40 × 160 mm der Sorptionsprüfung gemäß EN ISO 12571 unterzogen. Die jeweilige Auswertung ist in Bild 7 ersichtlich. Zur besseren Darstellung ist hier der Bereich der relativen Feuchtigkeit nur zwischen 30 % bis 80 % enthalten. Im Rahmen der ermittelten Daten ist erkennbar, dass der Verlauf der Sorptionskurven von den verschiedenen Mischungen sehr ähnlich ist. Eine geringe Zugabe von Fasern hat also auch einen geringen Einfluss auf das Sorptionsverhalten der entwickelten leichten Wärmedämmputze.

4 Bauphysikalische Simulation des entwickelten Putzes 4.M, der bei einem realen Gebäude im Innenraum appliziert wurde

Die im Labor gewonnenen bauphysikalischen Eigenschaften des entwickelten Putzes 4.M wurden anschließend in die WUFI Datenbank integriert, um das Verhalten des Putzes bei der Anwendung an einer realen Konstruktion mit höherer Feuchtigkeitsbelastung zu untersuchen. Der Putz 4.M mit Schafwolle wies die besten wärmedämmenden sowie mechanischen Eigenschaften auf. Für die Berechnungen wurde ein Detail einer älteren Außenwand an der dieser Putz Anwendung fand, ausgewählt. Als Sanierungsmaßnahme dieser realen Mauer wurde folgende Lösung vorgeschlagen: Abschlagen des ursprünglichen Innenputzes, Applikation feuerbeständiger Wärmedämmperlitplatten und dessen ganzflächige Befestigung mit einer Spachtelmasse und anschließend die Applikation des entwickelten Putzes 4.M mit Schafwolle. Es wurde erwartet, dass der Putz bei einer geeignet gewählten Stärke die Wärmedämmeigenschaften der Konstruktion als auch den Diffusionsfluss durch die Konstruktion verbessert. Außerdem wurde erwartet, dass der gewählte Putz das eventuell vorkommende Kondensat-wasser aufnimmt und bei passendem Innenklima wieder nach innen abgibt. Die schematische Darstellung der untersuchten Wand zeigt Bild 8.

Die einzelnen Schichten der Außenwand mit ihren Dicken sind der Tabelle 7 zu entnehmen.

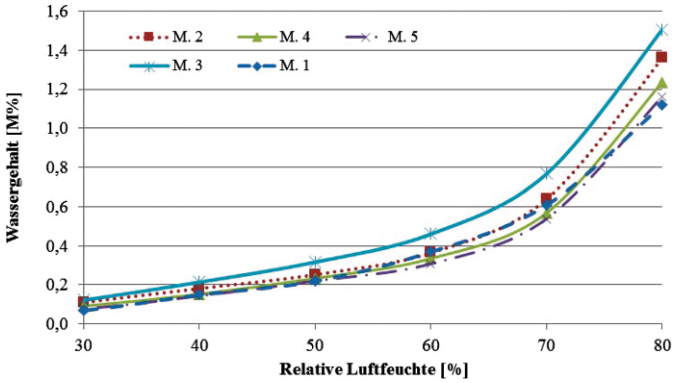

Bild 7. Sorptionskurven der einzelnen Putzrezepturen
Fig. 7. Sorption curves of the different plaster formulation

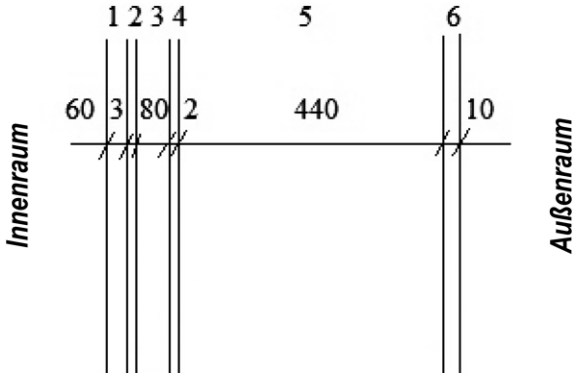

Bild 8. Aufbau des Außenmauerwerks vom Innenraum (1) zur Außenseite (6); (1- Putz 4.M, 2- Spachtel, 3-Dämmplatten STO Perlite Dämmplatte; 4-Kleber; 5-Mauerwerk; 6- feinkörniger Kalk-Zementputz)
Fig. 8. Model of the external masonry from inside (1) to outside (6); (1- plaster 4.M, 2- compound, 3-panels STO perlite insulation Board, 4-adhesive, 5-masonry, 6-fine-grained lime-cement plaster)

Das Ziel der WUFI 2D-Simulation bestand darin, die langfristige Funktionsfähigkeit des entwickelten Putzes zu untersuchen. Die Berechnungen wurden sowohl mit dem WUFI® 2D als auch mit dem Teplo 2015 Programm durchgeführt.

In Tabelle 8 sind die verwendeten Materialkenndaten der einzelnen Schichten dieser Außenwand dargestellt. Einzelne Materialkenndaten wurden den vorgeschlagenen Werten für Baumaterialien aus ČSN 73 0540-3 [34] und der Materialdatenbank des Programms WUFI 2D entnommen, die sich aus den Materialdatenblättern der jeweiligen Hersteller ergeben.

Tabelle 7. Schichtenaufbau von innen nach außen
Table 7. Layer construction from the inside to the outside

Schicht	Material	Dicke [mm]
1	Entwickelter Putz 4.M	60
2	Spachtel	3
3	Dämmplatten	80
4	Kleber	2
5	Mauerwerk	440
6	Kalk-Zementputz	10

Zur Beurteilung der Funktionsfähigkeit wurde die sanierte Wand mit dem neuentwickelten Putz umfassenden Tests unterzogen, um ihre Eigenschaften in Hinblick auf die mögliche Kondensatbildung einzuschätzen und weiterhin zu berechnen. Im Detail wurden die Wärmedämmeigenschaften, die inneren Oberflächentemperaturen, die Verteilung des Wasserdampfdruckes und der Temperatur in den jeweiligen Schichten hinsichtlich einer möglichen Entstehung von Kondensatwasser berechnet und eine Jahresbilanz erstellt [EN ISO 6946, EN ISO 13788]. Die Berechnungen wurden einerseits in einem quasistationären Zustand mittels Glaser-Verfahren sowie in einem nicht stationären Zustand mittels Berechnung eines gekoppelten Wärme- und Feuchtigkeitstransports vorgenommen.

Für das vereinfachte Verfahren nach ČSN 73 0540-3 [34] wurden die klimatischen Bedingungen der Südmähren (Brno), die aus den WUFI-Datenbank entnommen wurden, verwendet.

Für das Innenraumklima wurden die Werte aus der ČSN 73 0540-3 [34] und EN 13788 [36] sowie die in der WUFI-Datenbank definierten Gebäudenutzer verwendet, genauso wie eine durchgehende Beheizung des Innenraums während einer Heizsaison.

In Tabelle 9 ist die Auswertung der wärmetechnischen Eigenschaften, die aus dem Simulationsprogramm Teplo stammen, angeführt. Unter anderen sind noch die Parameter „Wärmedämpfung“ und „Phasenverschiebung der Temperatur“ zusammengestellt. Die Phasenverschiebung der Temperatur demonstriert die zeitliche Verzögerung der Temperaturwelle. Das ist die Zeitangabe zwischen maximaler Temperatur an der Außen- und Innenoberfläche in der Einheit Stunden. Der Wert der Wärmedämpfung der Konstruktion zeigt die Stärke und zeitliche Abfolge von der inneren hin zur

Tabelle 8. Bauphysikalische Kenndaten der einzelnen Materialien
Table 8. Buildings physical characteristics of each material

Schicht	Dichte [kg·m^{-3}]	Wärmeleitfähigkeit, Trockenzustand [W·m^{-1}·K^{-1}]	Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl [–]	Porosität [%]
1	363	0,0753	8,52	69
2	1800	0,60	60	20
3	115	0,04	8	96
4	1900	0,50	20	42
5	1800	0,60	10	24
6	1900	0,80	25	24

Tabelle 9. Wärmetechnische Eigenschaften der Konstruktion
Table 9. Thermal properties of the construction

Eigenschaft	U [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]	R [$m^2 \cdot K^1 \cdot W^{-1}$]	θ_{sim} [°C]	N_y [–]	P_{si} [h]
Wert	0,269	3,28	18,41	1774,4	22,1

äußeren Oberflächentemperatur, der Schwankungen sowie den Zeitpunkt der Veränderung des Innenraumklimas.

mit
U Wärmedurchgangskoeffizient,
R Wärmedurchgangswiderstand,
θ_{sim} minimale Oberflächentemperatur im Innenraum,
N_y Wärmedämpfung der Konstruktion,
P_{si} Phasenverschiebung der Temperatur.

Aus den in Tabelle 9 genannten Werten ist ersichtlich, dass die Konstruktion den laut ČSN 730540, Punkt 5.1 und 5.2 gesetzten Anforderungen entspricht, und zwar in Bezug auf die Höhe der Oberflächentemperatur und des Soll-Wertes für den U-Wert (der maximale U-Wert $U_{N,20}$ = 0,30 $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$).

Die Berechnung der Feuchtebilanz anhand des Glaser-Verfahrens laut ČSN 730540 zeigte, dass die Anforderungen hinsichtlich der Menge des Kondenswassers $M_{c,a}$ nicht erreicht werden konnte. Die Kondenswassermenge ergab $M_{c,a}$ = 0,857 kg/m^2 im Jahr und die Menge des verdunstenden Wassers $M_{ev,a}$ =1,571 kg/m^2 im Jahr. Kondensat bildet sich sogar ab einer Außentemperatur unter 10°C.

Ergänzend wurde eine Simulationsberechnung zum hygrothermischen Verhalten des vorliegenden Details im WUFI 2D vorgenommen. Auch hier wurden die Klimadaten für das Gebiet Südmähren (Brno) angenommen und sowohl der Einfluss des Windes als auch der Niederschlag berücksichtigt (Reduktionsfaktor = 0,7). Die Berechnung im Innenraum wurde in Anlehnung an die WTA-Empfehlung 6-2-01/E vorgenommen.

Bei der Untersuchung der Funktionsfähigkeit der Konstruktion wurde das hygrothermische Verhalten des entwickelten Putzes sowie der gesamten Konstruktion im Zeitraum von 1.10.2013 bis 9.8.2016 beobachtet. Die Auswertung des Gesamtwassergehaltes in dem Konstruktionsaufbau inkl. dem entwickelten Putz 4.M für den Beobachtungszeitraum ist in Bild 9 und Tabelle 10 dargestellt.

Es ist ersichtlich, dass es im Laufe der Zeit zu einer kontinuierlichen Austrocknung der Konstruktion kommt. Der durchschnittliche Feuchtegehalt des entwickelten Putzes liegt bei 0,29 % und der Putz weist eine Regelmäßigkeit der Feuchteaufnahme und Feuchteabgabe im Laufe der Zeit auf, der Feuchtegehalt nimmt aber insgesamt ab.

In weiterer Folge wurde eine Abschätzung der möglichen Schimmelpilzentstehung im bzw. am Konstruktionsdetail (siehe Bild 10) vorgenommen. Bei einer durchschnittlichen relativen Luftfeuchtigkeit und einer durchschnittlichen Lufttemperatur entstehen kaum Bedingungen für das Wachstum von Schimmel auf der inneren Oberfläche des Bauelements (Lim 1: biologisch zerlegbare Materialien, Lim 2: nicht biologisch zerlegbare Materialien). Aufgrund dieser Beurteilung kann man davon ausgehen, dass es unter normalen Bedingungen zu keiner schimmelbegünstigenden Situation kommt, was ein sehr positives Ergebnis darstellt.

5 Schlussfolgerung

Im Rahmen des hier beschriebenen Projektes wurden vier Rezepturen (2. bis 4.M) eines Wärmedämmputzes unter Einsatz von Naturfasern entwickelt, bei denen gute (bau-) physikalische und mechanische Eigenschaften nachgewiesen werden konnten. Zum Vergleich wurde auch eine Referenzrezeptur eines sehr leichten porösen Putzes (1.M) ohne Einsatz von Fasern verwendet. Dadurch konnte der

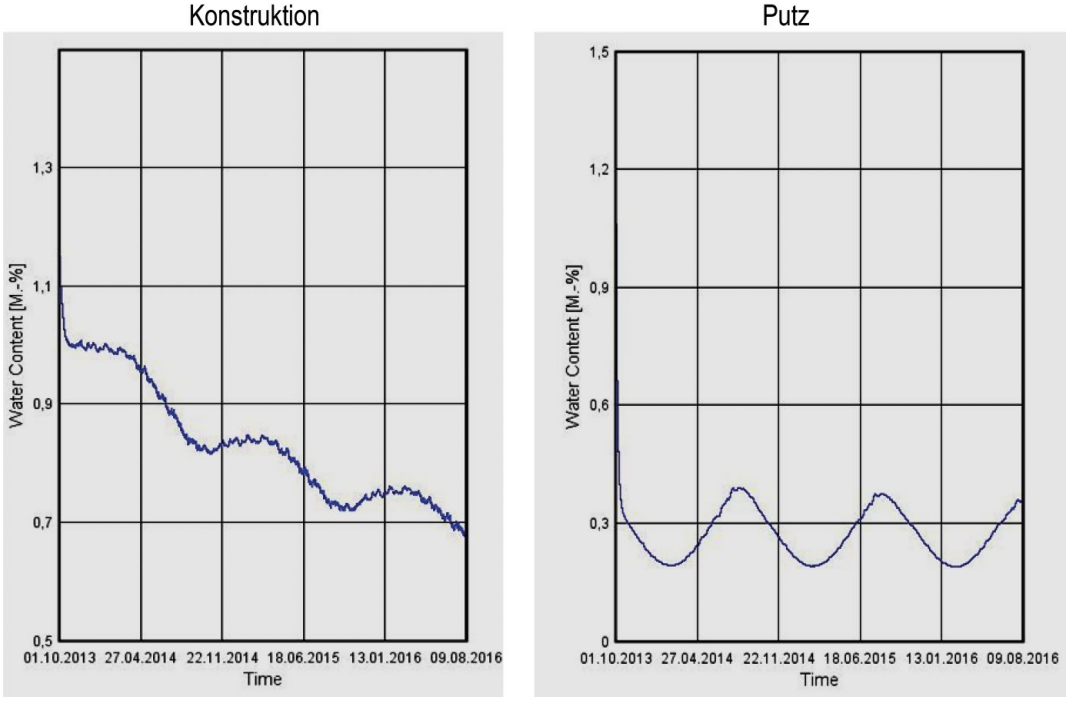

Bild 9. Verlauf des Gesamtwassergehaltes im untersuchten Konstruktionsdetail und dem entwickelten Putz 4.M
Fig. 9. Course of the total water content in studied construction detail and in developed plaster 4.M

Tabelle 10. Maximal- und Minimal- Werte des ermittelten Feuchtegehaltes im Konstruktionsdetail und im Putz 4.M in (Masse-%)
Table 10. Maximum and minimum values of the measured moisture content in construction detail and in plaster 4.M in (mass %)

Dicke des entwickelten Putzes 4.M	Werte des Feuchtegehaltes der ganzen Konstruktion		Werte des Feuchtegehaltes im Putz	
	min	max	min	max
60	0,68	1,3	0,18	0,40

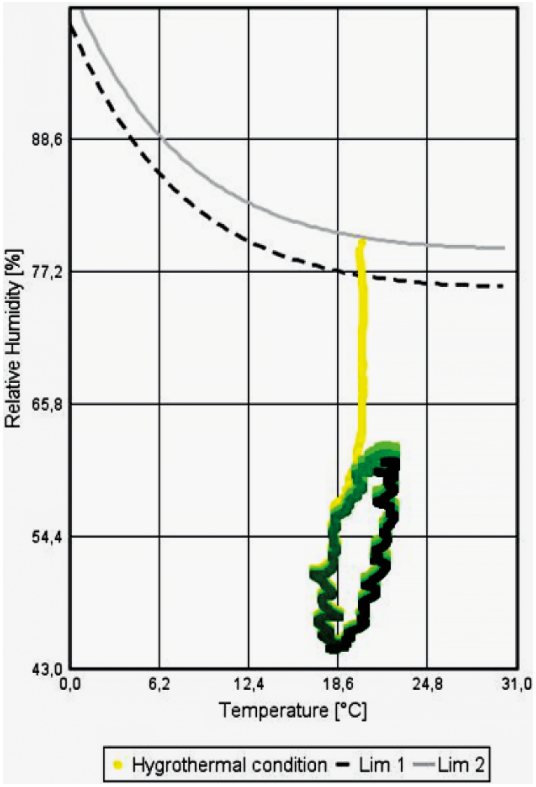

Bild 10. Beurteilung der Schimmelpilzbildung
Fig. 10. Assessment of the mold formation

Einfluss der zugeführten Fasern auf die jeweiligen bauphysikalischen und mechanischen Eigenschaften erhoben und evaluiert werden. Alle Rezepturen wiesen bei der Labormessung sehr gute Wärmedämmeigenschaften auf, wobei der Durchschnittswert der Wärmeleitfähigkeit im trockneten Zustand 0,0715 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ betrug.

Es konnten Hypothesen und Schlussfolgerungen von anderen Wissenschaftler-Innen, die sich ebenfalls mit der Entwicklung eines Putzes mit Naturfasern beschäftigten, bestätigt werden, dass es durch die Zugabe von Naturfasern zu einer Verbesserung der mechanischen Eigenschaften kommt [18, 19, 20, 31, 32, 33]. Die Naturfasern kommen im Speziellen zur Anwendung, um die plastische Verformung zu verhindern, wobei Putze auf Kalkbasis diesbezüglich besonders anfällig sind.

Da es sich um eine erste Anwendung und Analyse einer neu entwickelten Putzart unter Einsatz einfach erneuerbarer und ökologischer Fasern handelt, wird für weitere Anwendungen und Untersuchungen empfohlen, eine chemische Vorbehandlung der jeweiligen Fasern durchzuführen, siehe auch [17, 19]. Dadurch kann ein besserer Zusammenhalt der Fasern mit der Putzmatrix sichergestellt werden.

Bei der Untersuchung des Einflusses der Fasern auf das Feuchtigkeitsverhalten der Wärmedämmputze wurde festgestellt, dass die Fasern keinen negativen Einfluss auf das Sorptionsverhalten ausüben.

Die Auswertung der experimentalen Untersuchungen zeigte, dass sich von den vier ausgewählten Faserarten (technischer Hanf, Zellulosefasern, Schafwolle und Ziegenhaare) die Schafwolle und Ziegenhaare als die Fasern mit dem besten Verhalten erwiesen haben. Die Rezepturen zeigten sowohl gute Wärmedämmeigenschaften als auch gute Feuchtigkeitsverhalten. Die im Labor gewonnenen bauphysikalischen Eigenschaften des entwickelten Putzes 4.M (mit Schafwolle) weisen die besten wärmedämmenden sowie mechanischen Eigenschaften auf. Dieser wurde daher in die WUFI-Datenbank integriert, um das Verhalten des entwickelten Putzes bei der Anwendung an einer realen Konstruktion mit höherer Feuchtigkeitsbelastung zu bewerten. Für die Berechnungen wurde ein Teilstück einer älteren Außenwand, an der dieser Putz Anwendung fand, ausgewählt.

Die Simulation des hygrothermischen Verhaltens des entwickelten Schafwollfaser-Wärmedämmputzes sowie die reale Anwendung an einer Außenwandkonstruktion zeigten positive Ergebnisse. Die Anforderungen an den U-Wert wurden erfüllt. Die Berechnungen mittels Glaser-Verfahren zeigten, dass die sanierte Wand den Anforderungen an die Kondenswassermenge nicht entsprach. Die Messung der Kondenswassermenge betrug 0,857 $kg/m^2 \cdot$Jahr. Die Überprüfung einer möglichen Bildung von Schimmel wurde mit dem Berechnungsprogramm WUFI ermittelt und ergab folgende Ergebnisse: Die Bedingungen für die Entstehung von Schimmel sind nur in Extremsituationen bei einer langanhaltender relativen Luftfeuchtigkeit von über 77 % und einer Innenraumtemperatur im Bereich zwischen 18 °C bis 20 °C und unter Verwendung von biologisch abbaubaren Materialien gegeben. Die Messungen an einem realen Gebäude zeigte auch sehr positives Verhalten des neuentwickelten Putzes. Da die Anwendung noch zu kurzfristig ist und die Messungen daher nicht allgemein anwendbar sind, werden hier keine Ergebnisse präsentiert.

Danksagung

Dieser Beitrag wurde mit der Unterstützung des Projektes GACR 14-31282P „Theoretical and experimental analysis of the hygrothermal stress on the behavior of thermal insulation materials and rehabilitation materials" und des Projektes No. LO1408 „AdMaS UP – Advanced Materials, Structures and Technologies", supported by Ministry of Education, Youth and Sports under the „National Sustainability Programme I" erstellt.

Literatur

[1] *Henry, A.; Stewart, J.*: Mortars, Renders and Plasters (Practical Building Conservation). 1. English Heritage, ASHGATE, 2011.
[2] *Dai, S.; Wang, J.; Hu, Y.; Zhang, D.*: Lime-based materials and practices for surface refitting of cultural heritage; Advanced Materials Research (2010), vol. 133–134, pp. 1241–1246.

[3] *Georgiev, G. P.; Theuerkorn, W.; Krus, M.; Kilian, R.*: Cattail-reinforced clay plasters in building heritage preservation and new constructions. Vernacular Heritage and Earthen Architecture. Oct 2013, pp. 415–420.

[4] *Di Bella, G.; Fiore, V.; Galtieri, G.; Borsellino, C.; Valenza, A.*: Effects of natural fibres reinforcement in lime plasters (kenaf and sisal vs. Polypropylene). Construction and Building Materials (2014), vol. 58, pp. 159–165.

[5] *Iucolano, F.; Liguori, B.; Colella, C.*: Fibre-reinforced lime-based mortars. A possible ressource for ancienit masonry restoration. Construction and Building Materials (2013), vol. 38, pp. 785–789.

[6] *Ramesh, M.; Palanikumar, K.; Hemachandra Reddy, K.*: Mechanical property evaluation of sisal–jute–glass fiber reinforced polyester composites. Composites Part B: Engineering (2013), vol. 48, pp. 1–9.

[7] *Ashour, T.; Wieland, H.; Georg, H. O.; Bockisch, F. J.; Wu, W.*: The influence of natural reinforcement fibres on isulation values of earth plaster for straw bale buildings. Materials and Design (2010), vol. 31, pp. 4676–4685.

[8] *Bledzki, A. K.; Gassan, J.*: Composites reinforced with cellulose based fibres. Progress in Polymer Science (1999), vol. 24, pp. 221–274.

[9] *Mac Vicar, R.; Matuana, L. M.; Balatinecz, J. J.*: Aging mechanisms in cellulose fiber reinforced cement composites. Cement and Concrete Composites (1999), vol. 21, pp. 189–196.

[10] *Le Troëdec, M.; Dalmay, P.; Patapy, C.; Peyratout, C.; Smith, A.; Chotard, T.*: Mechanical properties of hemp-lime reinforced mortars: influence of the chemical treatment of fibres. Journal Composite Materials (2011), vol. 45, pp. 2235–2347.

[11] *Murherjee, P.S.; Satyanarayana, K.G.*: Structure and properties of some vegeTable fibres, part 1. Sisal fibre; Journal Material Science (1984), vol. 19, pp. 3925–3934.

[12] *John, V. M.; Cincotto, M. A.; Sjostrom, C.; Agopyan, V.; Oliveira, C.T.A.*: Durability of slag mortar reinforced with coconut fibre. Cement Concrete Composites (2005), vol. 27, pp. 565–574.

[13] *Ashurst, J.; Ashurst, N.*: Mortars, plasters & renders, English heritage technical handbook, vol. 3. Aldershot, Hants: Asghate Publishing 2005.

[14] *Vejmelková, E.; Koňáková, D.; Čáchová, M.; Keppert, M.; Černý, R.*: Effect of hydrophobization on the properties of lime-metakaolin plasters. Construction and Building Materials (2012), vol. 37, pp. 556–561.

[15] *Vejmelková, E.; Keppert, M.; Keršner, Z.; Rovnaníková, P.; Černý, R.*: Mechanical, fracture–mechanical, hydric, thermal, and durability properties of lime–metakaolin plasters for renovation of historical buildings. Construction and Building Materials (2012), vol. 31, pp. 22–28.

[16] *Arioglu, N.; Acun, S.*: A research about a method for restoration of traditional lime mortars and plasters: a staging system and approach. Buildings and Environment (2006) vol. 41, pp. 1223–1230.

[17] *Olivito, R. S.; Cevallos, O. A.; Carrozzini, A.*: Development of durable cementitious composites using sisal and flax fibers for reinforcement of masonry structure. Materials and Design (2014), vol. 57, 258–268.

[18] *Sawsen, Ch.; Fouzia, K.; Mohamed, B.; Moussa, G.*: Optimizing the formulation of flax fiber-reinforced cement composites. Construction and Building Materials (2014), vol. 54, 659–664.

[19] *Le Troëdec, M.; Peyratout, C.S.; Smith, A.; Chotard, T.*: Influence of various chemical treatments on the interactions between hemp fibres and a lime matrix. Journal of European Ceramic Society (2009), vol. 29, pp. 1861–1868.

[20] *Ramakrishna, G.; Sundararajan, T.*: Studies on the durability of natural fibres and the effect of corroded fibres on the strength of Mortar. Cement and Concrete Composits (2005) vol. 27, pp. 575–582.

[21] *Zach, J.*; *Korjenic, A.*; *Hroudová, J.*: Study of behaviour of advanced silicate materials for heating and moisture rehabilitation of buildings. Advanced Materials Research (2013), vol. 649, pp. 167–170.

[22] *Korjenic, A.; Petránek, V.; Zach, J.; Hroudova, J.*: Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources. Energy and Buildings (2011), vol. 43, pp. 2518–2523.

[23] *Sargaphuti, M.; Shah, S. P.; Vinson, K. D.*: Shrinkage Cracking and Durability Characteristics of Cellulose Fiber Reinforced Concrete. Materials Journal (1993), vol. 90, Issue 4, pp. 309–318.

[24] EN 1015-2: Methods of test for mortar for masonry – Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars. Czech Republic: CNI, 1999. 12 p.

[25] EN 1015-3: Methods of test for mortar for masonry – Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table). Czech Republic: CNI, 2000. 12 p.

[26] EN 1015-6: Methods of test for mortar for masonry – Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar. Czech Republic: CNI, 1999. 12 p.

[27] EN 1015-7 Methods of test for mortar for masonry – Part 7: Determination of air content of fresh mortar. Czech Republic: CNI, 1999. 12 p.

[28] EN 1015-10 Methods of test for mortar for masonry – Part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar. Czech Republic: CNI, 2000. 8 p.

[29] EN 1015-11 Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strentgth of hardened mortar. Czech Republic: CNI, 2000. 16 p.

[30] EN ISO 8894-1 Refractory materials – Determination of thermal conductivity – Part 1: Hot-wire methods (cross-array and resistance thermometer). Czech Republic: CSOMT, 2011. 24 p.

[31] *Zak, P.; Ashour, T.; Korjenic, A.; Korjenic, S.; Wu, W.*: The influence of natural reinforcement fibers, gypsum and cement on compressive strength of earth bricks materials. Construction and Building Materials (2016), vol. 106, pp. 179–188.

[32] *Ashour, T.; Korjenic, A.; Korjenic, S.; Wu, W.*: Thermal conductivity of unfired earth bricks reinforced by agricultural wastes with cement and gypsum. Energy and Buildings (2015), vol. 104, pp. 139–146.

[33] *Korjenic, A.; Zach, J.; Hroudova, J.*: The use of insulating materials based on natural fibers in combination with plant facades in building constructions. Energy and Buildings (2016), vol. 116, pp. 45–58.

[34] ČSN 730540-3 Thermal protection of buildings – Part 3: Design value quantities. CNI, 2005.

[35] EN ISO 6946:2008 Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation method.

[36] EN ISO 13788:2013 Hygrothermal performance of building components and building elements – Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation – Calculation methods.

Autoren dieses Beitrages:

Ing. Bc. Jitka Hroudová, Ph. D., hroudova@fce.vutbr.cz
Dr.-Ing. Jiří Zach, Ph.D., zach.j@vutbr.cz
Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering
Institute of Technology of Building Materials and Components
Veveří 331/9. CZ-602 00 Brno

Prof. Dr. Dipl.-Ing. Azra Korjenic, azra.korjenic@tuwien.ac.at
Michael Mitterböck, michael.mitterboeck@tuwien.ac.at
Technische Universität Wien, Institut für Hochbau und Technologie
Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz
Karlsplatz 13/206-2, A-1040 Wien