

PROBLEMY CIEPLNO-WILGOTNOŚCIOWE PRZY RENOWACJI ŚCIAN BUDYNKÓW Z MURU PRUSKIEGO

Jan Radoń, Hartwig Künzel

Akademia Rolnicza w Krakowie,

Instytut Fraunhofera Fizyki Budowli w Holzkirchen, Niemcy

Streszczenie. Budynki z muru pruskiego stanowią znaczną część zabytkowej architektury w wielu krajach europejskich. Ich stan techniczny i użytkowy, zwłaszcza na obszarach wiejskich, jest przeważnie niezadowolający. W Instytucie Fraunhofera Fizyki Budowli w Holzkirchen (Niemcy) przeprowadzono w ostatnich 15 latach wiele badań tego rodzaju budowli. Różnorodne systemy ramowe i wypełnienia badano laboratoryjnie oraz w warunkach oddziaływania rzeczywistego klimatu. Procesy ciepłne i wilgotnościowe, zachodzące w badanych komponentach, symulowano również obliczeniowo za pomocą, wszechstronnie zweryfikowanego, programu komputerowego WUFI[®]. Badania pozwoliły na określenie podstawowych problemów występujących przy termomodernizacji istniejących obiektów. Renowacja musi być kompromisem między koniecznością zachowania zabytkowego charakteru budynków a doprowadzeniem ich do współczesnych standardów cieplnych i użytkowych. Na podstawie wieloletnich badań sformułowano propozycje możliwych rozwiązań, spełniających te wymagania.

Słowa kluczowe: mur pruski, renowacja, izolacja termiczna, wilgoć

WSTĘP

Budynki ze ścianami o konstrukcji tzw. muru pruskiego stanowią znaczącą część zabytkowej architektury w wielu europejskich krajach. Szacuje się, że w samych Niemczech występuje 2,2 miliona takich budowli, natomiast w Polsce liczba ta jest oceniana na około 150 tysięcy. Stan techniczny i użytkowy tych budynków, zwłaszcza na obszarach wiejskich, jest niezadowolający. Prowadzi to często do wyburzania zabytkowych

Adres do korespondencji – Corresponding author: Jan Radoń, Akademia Rolnicza w Krakowie, Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji, Katedra Budownictwa Wiejskiego, al. Mickiewicza 24–28, 30-059 Kraków, e-mail: jradon@ar.krakow.pl
Hartwig Künzel, Fraunhofer Institut für Bauphysik, Fraunhoferstrasse 10, D 83626 Valley, Germany, e-mail: kuenzel@hoki.ibp.fhg.de

obiektów i wznoszenia w ich miejsce nowych budynków. Taki proces transformacji wiejskiego krajobrazu w ostatnich latach znacznie się nasilił. Istnieje pilna potrzeba wykonania inwentaryzacji istniejącej jeszcze architektury oraz opracowania metod i sposobów dostosowania budynków z muru pruskiego do współczesnych wymagań użytkowych.

METODYKA BADAŃ

W Instytucie Fraunhofera Fizyki Budowli w Holzkirchen (Niemcy) od piętnastu lat prowadzi się intensywne badania naukowe nad budownictwem z muru pruskiego. W tym czasie przebadano kilka systemów ramowych i ich wypełnień, zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i poddanych działaniu rzeczywistego klimatu. Przepływy ciepła i wilgoci w badanych komponentach analizowano również teoretycznie za pomocą, wszechstronnie zweryfikowanego programu komputerowego WUFI®. Program ten powstał przy współpracy Katedry Budownictwa Wiejskiego Akademii Rolniczej w Krakowie.

Wyniki badań eksperymentalnych i obliczeń teoretycznych pozwoliły na określenie podstawowych problemów związanych z termomodernizacją i doprowadzeniem budynków mieszkalnych i użyteczności publicznej do współczesnych standardów. Przy renowacji budynków z muru pruskiego musi zostać zachowany rozsądny kompromis pomiędzy utrzymaniem zabytkowego charakteru budowli z jednej strony a osiągnięciem komfortu cieplnego, poprzez docieplenie ścian zewnętrznych, z drugiej strony. Nieprofesjonalnie przeprowadzone prace budowlane czy błędne zastosowanie izolacji cieplnej może wywołać wzrost zawilgoceń i szkody budowlane. Na podstawie zarówno wyników długoletnich badań laboratoryjnych, jak i analiz obliczeniowych opracowano i przedstawiono możliwe do zastosowania z technicznego punktu widzenia zalecenia, dotyczące prac modernizacyjnych.

WYNIKI BADAŃ I Dyskusja

Negatywną cechą niemal wszystkich zabytkowych ścian zewnętrznych wykonanych w technologii muru pruskiego jest ich niedostateczna izolacyjność cieplna. Na podstawie niemieckiej normy DIN 4108-4 [1981] oraz polskiej PN-EN-ISO 6946 [1999] oszacowano i zestawiono wartości współczynnika przewodzenia ciepła i oporu cieplnego dla niektórych materiałów, stanowiących tradycyjne wypełnienie muru pruskiego (tab. 1). Według badań niemieckich, aby na wewnętrznej powierzchni ściany nie następowało okresowe wykraplanie pary wodnej, opór cieplny przegrody musi posiadać minimalną wartość $1 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ [WTA 1997]. Z wymienionych w tabeli 1 materiałów tylko wypełnienie z betonu komórkowego, który jest nowszym materiałem, spełnia ten warunek. Oznacza to, że w większości przypadków w niesprzyjających warunkach pogodowych może dochodzić do okresowego zawilgacania powierzchni. Innym źródłem zawilgacania przegród jest zacinający deszcz, padający na zewnętrzne elewacje. Mała grubość muru oraz brak powłok izolacyjnych powodują, że wilgoć łatwo wyparowywuje i w przegro-

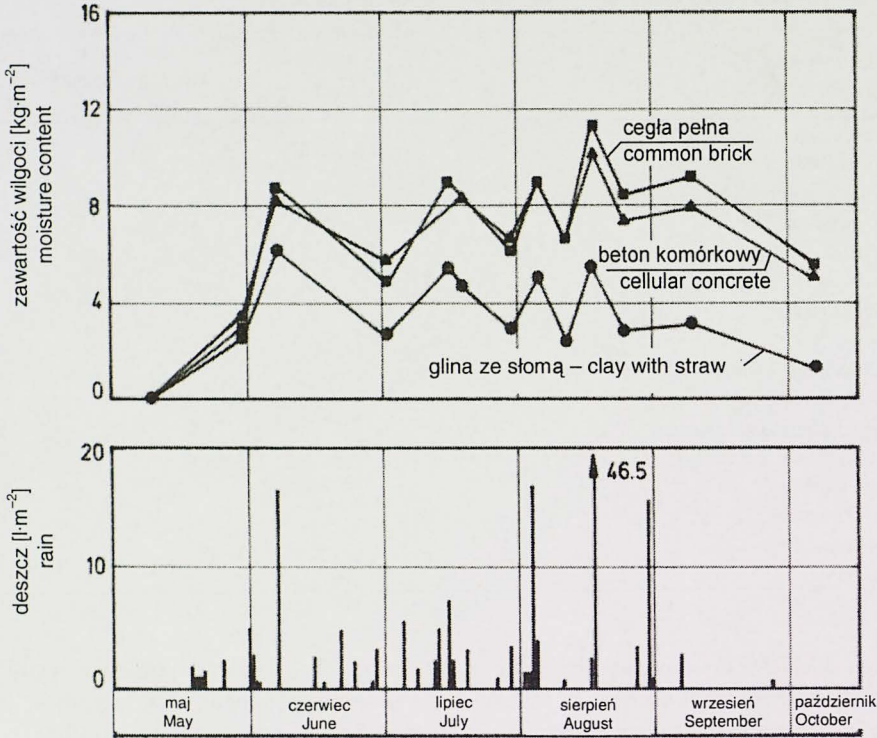
Tabela 1. Ciepłne parametry ścian z muru pruskiego o grubości 14 cm
 Table 1. Heat parameters of half-timbered walls of 14 cm thickness

Materiał wypełniający Filling material	λ [W·(m·K) ⁻¹]	Opór cieplny Thermal resistance [m ² ·K·W ⁻¹]
Kamień (piaskowiec) Stone (Sandstone)	2,3	0,1
Skąła porowata pochodzenia wulkanicznego Porous, volcanic rock	0,5	0,3
Cegła pełna Common burnt brick	0,7	0,2
Gлина ze słomą Clay with straw	0,5	0,3
Gлина z wiórami lub trocinami Clay with sawdust or shavings	0,2–0,3	0,5–0,7
Wapienno-gliniana zaprawa murarska Lime-clay mason's mortar	0,2	0,5
Beton komórkowy Cellular concrete	0,12–0,14	1,0–1,2
Drewno (ramy) Wood (frame)	0,13–0,2	0,7–1,1

dzie nie dochodzi do ciągłego przyrostu zawilgocenia. Na rysunku 1 pokazano wyniki pomiarów zawilgocenia elementów ściennych o różnym wypełnieniu, umieszczonych na elewacji zachodniej, oraz opad deszczu w okresie pomiarowym maj–październik 1999.

Zapewnienie warunku higienicznego, tj. zarówno braku wykrapiania na wewnętrznej powierzchni przegród, jak i doprowadzenie ich izolacyjności cieplnej do współczesnych standardów, a więc również ograniczenia strat ciepła, wymaga wykonania docieplenia ścian zewnętrznych. Z uwagi na zabytkowy charakter wielu budynków izolacja termiczna musi być umieszczana od strony wewnętrznej. Rozwiązanie takie, jak powszechnie wiadomo, nie jest poprawne z punktu widzenia fizyki budowli. Duży opór cieplny izolacji termicznej powoduje znaczny spadek temperatury muru od strony wewnętrznej i podnosi ryzyko wystąpienia wykrapiania wgłębnego dyfundującej pary wodnej.

Na rysunku 2 pokazano wyniki symulacji obliczeniowej zmian zawartości wilgoci w drewnie w murze pruskim ocieplonym wełną mineralną o różnych grubościach. Obliczenia przeprowadzono za pomocą programu komputerowego WUFI [Künzel i in. 2003] dla typowych warunków pogodowych w Holzkirchen. Utrzymywanie się wilgotności masowej w drewnie powyżej 20% w dłuższych okresach prowadzi do korozji biologicznej [Künzel 1996]. Jak widać na rysunku 2, wielkość zawilgocenia i czas jego występowania znacząco wzrastają przy izolacji termicznej o większej grubości. Jedynie przy grubości wełny mineralnej poniżej 3 cm wilgotność pozostaje na bezpiecznym poziomie.

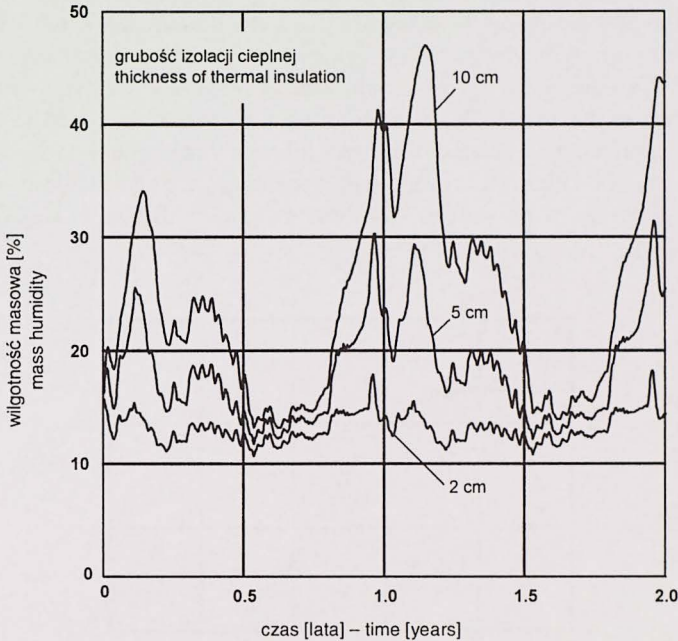


Rys. 1. Przebieg zawilgocenia elementów ściennych o różnym wypełnieniu na elewacji zachodniej (górny diagram) oraz opad deszczu (diagram dolny) w okresie pomiarowym maj–październik 1999 rok

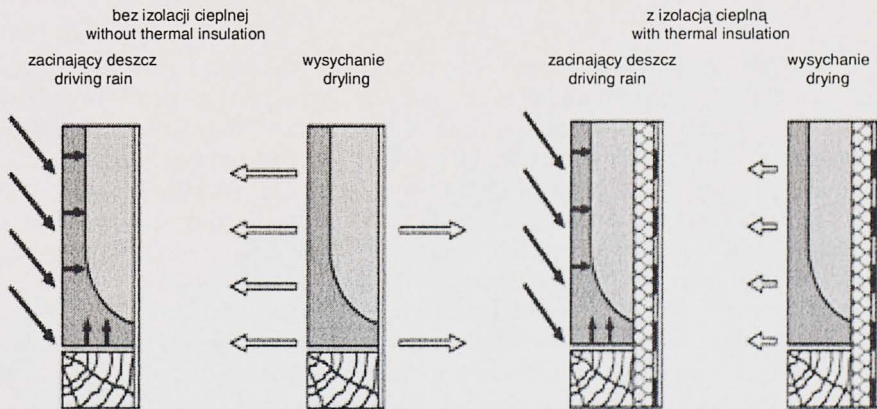
Fig. 1. Moisture pattern of wall elements with deferent fillings on west façade (upper diagram) and rain (lower diagram) during measurement period May–October 1999

Aby zmniejszyć wielkość dyfuzji i ograniczyć wykraplanie, można zastosować paroizolację. Rozwiązanie takie zmienia jednak warunki wysychania przegrody, ponieważ wysychanie nie może następować do wnętrza budynku (rys. 3). Należy więc szukać rozwiązania kompromisowego, tzn. takiego, które spowoduje zmniejszenie przepływu dyfuzyjnego i umożliwi choćby częściowe wysychanie do wewnątrz.

Rozwiązaniem takim jest zastosowanie paroizolacji o mniejszym oporze dyfuzyjnym. Zalecenia WTA [1997] podają, że dyfuzyjnie równoważna grubość warstwy powietrza powinna zawierać się w granicach 0,5–2 m (równoważny opór stojącej warstwy powietrza o grubości 1 m wynosi $1,97 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$). Wartości te wyznaczono głównie na podstawie analizy dyfuzji pary wodnej, stąd stosując to rozwiązanie, należy maksymalnie zminimalizować inne źródła zawilgocenia, jak np. wpływ zacinającego deszczu.

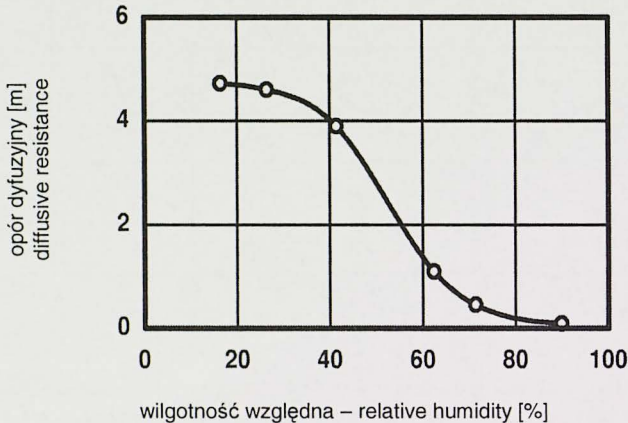


Rys. 2. Zmiany wilgotności masowej drewna (ram) przy różnych grubościach izolacji cieplnej od wewnątrz w okresie 2 lat uzyskane za pomocą programu komputerowego WUFI dla typowych warunków pogodowych w Holzkirchen
 Fig. 2. Mass-moisture fluctuations of frame wood by different thickness of heat insulation during 2 years, obtained by computer programme WUFI by typical weather conditions in Holzkirchen



Rys. 3. Zawilgacanie zacinającym deszczem i wysychanie muru pruskiego nieocieplonego (tradycyjnego) oraz muru z izolacją cieplną od środka
 Fig. 3. Moistening by driving rain and drying of half timbered wall, without and with thermal insulation at inner side

W świetle opisanych uwarunkowań optymalnym rozwiązaniem wydaje się zastosowanie tzw. wilgotnościowej folii adaptacyjnej [Künzel i Radoń 2004]. Jej działanie polega na zmianie oporu dyfuzyjnego folii w zależności od wilgotności otoczenia (rys. 4). Niska wilgotność pomieszczeń ogrzewanych w zimie powoduje wzrost oporu i zmniejszenie przepływu dyfuzyjnego. W lecie wilgotność wewnątrz budynku jest znacznie wyższa, co przy obniżonym oporze dyfuzyjnym folii stwarza warunki do wysychania do wewnątrz (rys. 5). Dodatkowym czynnikiem wspierającym wysychanie jest zjawisko tzw. odwróconej dyfuzji pary wodnej, które występuje przy nagrzaniu się powierzchni zewnętrznej ściany powyżej temperatury wewnętrznej powietrza.

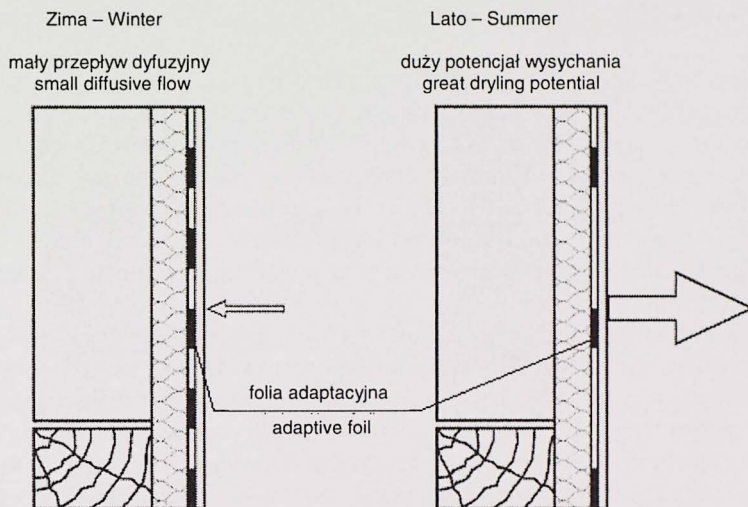


Rys. 4. Zmiana oporu dyfuzyjnego (wyrażonego jako ekwiwalentna grubość warstwy powietrza S_d) folii wilgotnościowo-adaptacyjnej w zależności od otaczającej wilgotności

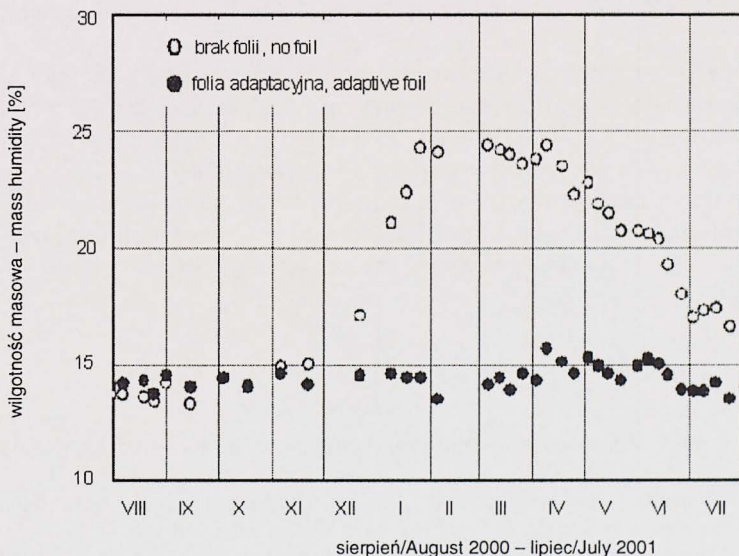
Fig. 4. Variation of diffuse resistance (expressed as equivalent air-layer thickness S_d) of moisture-adaptive foil depending on surrounding humidity

Dla sprawdzenia koncepcji opisanego rozwiązania wykonano stosowne badania eksperymentalne. Długoterminowe pomiary różnych systemów ścian poddanych działaniu rzeczywistego klimatu przeprowadzono w Holzkirchen (Niemcy). Zastosowano rozwiązania bez folii i z zastosowaniem folii adaptacyjnej. Wyniki pomiarów dla ściany na elewacji północnej z wypełnieniem ceglany pokazano na rysunku 6. Zgodnie z oczekiwaniami ramy drewniane w ścianie pozbawionej paroizolacji ulegały znacznie większemu zawilgoceniu w miesiącach zimowych. Wilgotność drewna w przegrodzie z wilgotnościową folią adaptacyjną utrzymywała się przez cały okres poniżej niebezpiecznej dla drewna granicy wilgotności masowej, wynoszącej 20%.

Na koniec należy zaznaczyć, że przeprowadzona analiza nie stanowi pełnego rozwiązania zagadnienia izolacji termicznej muru pruskiego. Umieszczenie warstwy ocieplającej od wewnątrz powoduje, że znajdujące się od strony zewnętrznej ramy drewniane znajdują się w strefie niższej temperatury niż w ścianie nieocieplonej. Powoduje to dodatkowe zagrożenie związane z przemarzaniem drewna. Stąd możliwa grubość izolacji termicznej musi być dodatkowo ograniczona. Zakłada się, że w warunkach klimatycznych Niemiec i Polski grubość ta wynosi maksymalnie 5–6 cm [Essmann i in. 2005].



Rys. 5. Działanie wilgotnościowej folii adaptacyjnej w okresie zimowym i letnim
 Fig. 5. Function of moisture-adaptive foil during winter and summer time



Rys. 6. Wyniki pomiarów wilgotności drewna ram w murze pruskim bez paraizolacji i z zastosowaniem wilgotnościowej folii adaptacyjnej
 Fig. 6. Measurement results of wood frame moisture in half-timber wall without and with application of moisture-adaptive foil

PODSUMOWANIE

Istniejące budynki z muru pruskiego mają bardzo niską izolacyjność cieplną przegród zewnętrznych. Wysokie zużycie ciepła jest ważnym czynnikiem powodującym, że obiekty takie są nieopłacalne w eksploatacji. Z uwagi na zabytkowy charakter wielu budynków konieczne jest zachowanie oryginalnej, charakterystycznej dla tego typu budownictwa elewacji. Powoduje to konieczność zastosowania izolacji termicznej od wewnętrznej strony ścian zewnętrznych. Takie rozwiązanie powoduje określone problemy wilgotnościowe, polegające na wykraplaniu wglębnym dyfundującej przez przegrodę pary wodnej.

Jak wykazały obliczenia, grubość warstwy izolacyjnej ma zasadniczy wpływ na zawilgocenie przegrody, w tym drewnianych ram konstrukcyjnych. Tylko niewielka grubość warstwy izolacyjnej (do ok. 3 cm) nie powoduje przekroczenia krytycznej dla trwałości drewna wilgotności masowej, która wynosi 20%. Spełnienie, choćby częściowe, wymagań ochrony cieplnej wymaga zastosowania znacznie większych grubości.

Wielkość dyfuzji można zmniejszyć przez zastosowanie paroizolacji po wewnętrznej stronie przegród. Tym samym jednak zostaje ograniczona możliwość wysychania przegrody do wnętrza budynku. Jak wykazały badania, mur pruski w stanie nieocieplonym efektywnie wysycha z wilgoci z zacinającego deszczu. Aby częściowo zachować możliwość wysychania do wnętrza budynku, konieczne jest zastosowanie paraizolacji o ograniczonym oporze dyfuzyjnym (wartości dyfuzyjnie równoważnej warstwy powietrza z przedziału 0,5–2 m). Wtedy dyfuzja jest dostatecznie ograniczona, natomiast przegroda w stanach wysokiego zawilgocenia może również wysychać do wnętrza budynku.

Najbardziej efektywnym rozwiązaniem jest zastosowanie tzw. wilgotnościowej folii adaptacyjnej, posiadającej zmienny opór dyfuzyjny w zależności od wilgotności otoczenia. Długoterminowe badania systemów z taką folią nie wykazały występowania warunków wilgotnościowych szkodliwych dla trwałości konstrukcji.

Problemem dotychczas nierozwiązanym pozostaje konieczność ograniczenia grubości izolacji termicznej ze względu na przemarzanie drewna ram konstrukcyjnych. Dopóki to zagadnienie nie zostanie rozwiązane, grubość izolacji termicznej może wynosić co najwyżej 5–6 cm.

PIŚMIENNICTWO

- DIN 4108, Teil 4. 1981. Wärmeschutz im Hochbau. Wärme- und feuchteschutztechnische Kennwerte.
- Essmann F., Gänssmantel J., Geburtig G., 2005. Energetische Sanierung von Fachwerkhäusern. Die richtige Anwendung der EnEV. Fraunhofer IRB, Verlag Stuttgart.
- Künzel H. 1996. Der Feuchtehaushalt von Holz-Fachwerkwänden. Bauforschung für die Praxis, Band 23. Fraunhofer IRB, Verlag Stuttgart.
- Künzel H., Radoń J., 2004. Paroizolacja wspierająca wysychanie. Zalety stosowania w nowym i modernizacji starego budownictwa. *Warstwy* 4 (37), 98–103.
- Künzel H., Radoń J., Holm A., Schmidt T., Zirkelbach D., 2003. WUFI-pro, Handbuch. IBP, Holzkirchen.

PN-EN-ISO 6946. 1999,. Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła. Metoda obliczania.

WTA-Merkblatt 8-1-96, 1997. Bauphysikalische Anforderungen an Fachwerkfassaden.

HEAT AND MOISTURE PROBLEMS BY RENOVATION OF WALLS OF HALF-TIMBERED HOUSES

Abstract. Half-timbered houses are constituents of old architecture in many European countries. The technical state of most structures, especially in rural areas, is unsatisfactory or poor. At the Fraunhofer-Institute for Building Physics in Holzkirchen (Germany) a series of scientific investigations on half-timbered houses were carried out during the last 15 years. Various frame and filling systems were tested in the laboratory and under the impact of natural climate. Heat and moisture processes in the tested components were also calculated using the extensively validated hygrothermal simulation tool WUFI[®]. The investigations defined the basic problems of energetic improvement of existing buildings. The renovation must be a compromise between the need for monument protection on one side and heat insulation and thermal comfort requirements on the other side. The feasible, technical solutions meeting mentioned requirements, have been proposed as a result of long term research.

Key words: half timbered house, renovation, heat insulation, moisture

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 30.05.2006