

dr hab. inż. Bożena Orlik-Kozdoń, prof. PŚ.¹⁾
ORCID: 0000-0002-4905-3037

The effect of selected factors on the hygrothermic condition of walls insulated from the inside

Wpływ wybranych czynników na stan higrotermiczny ścian ocieplanych od wewnątrz

DOI: 10.15199/33.2025.04.07

Abstract: The article presents selected issues related to the hygrothermal design of insulated wall systems from the inside. The presented issues concerned the influence of specific factors on changes in the moisture content of insulated partition materials over time. These included: external environmental conditions (driving rain, orientation, location and others), internal climate (different moisture load), moisture of the existing wall and the thickness of thermal insulation and the method of defining it.

Keywords: internal warming; historical buildings; moisture content.

Streszczenie: W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia dotyczące projektowania higrotermicznego układów ściennych ocieplanych od wewnątrz. Prezentowana problematyka dotyczy wpływu określonych czynników na zmianę zawilgocenia materiałów izolowanej przegrody w czasie. Należały do nich: warunki środowiska zewnętrznego (zacinający deszcz, orientacja, lokalizacja i inne), klimat wewnętrzny (zróżnicowane obciążenie wilgocią), zawilgocenie istniejącego muru oraz grubość izolacji termicznej i sposób jej definiowania.

Słowa kluczowe: ocieplenie od wewnątrz; budynki historyczne; stan wilgotnościowy.

Insulation from the inside of the external walls has a significant impact on the profile of hygrothermal processes occurring in them and can contribute to many unfavourable phenomena. The main threats are related to condensation and increased moisture content of the components of the wall system, as well as the risk of frost damage and biological corrosion, including the development of mould on the internal surface of the partitions [1÷4]. Moisture is the main factor in these systems that limits the durability of elements and negatively affects the properties of existing and used building materials [5÷7]. The above issues become particularly important in the case of insulation systems that promote periodic interlayer condensation and increased moisture content. The scale and course of this process depend, among others, on the type and thickness of the insulator used, operating conditions, external climate parameters and others [4, 7÷9]. The lack of detailed studies and information on the impact of these factors on changes in moisture content of insulated system elements limits the possibility of assessing the quality and correctness of the solution used in the context of its future functioning. The prediction of moisture content is additionally influenced by the historical specificity of the walls and their related technical condition.

Basic design criteria for selecting the type and thickness of the insulating material

Improving energy efficiency and reducing the decarbonisation of historic buildings is possible by implementing the

Ocieplanie ścian zewnętrznych od wewnątrz wpływa na profil zachodzących w nich procesów higrotermicznych i może sprzyjać wielu niekorzystnym zjawiskom. Główne zagrożenia związane są z kondensacją międzywarstwową, wzrostem zawilgocenia komponentów układu ściennego, ryzykiem uszkodzeń mrozowych oraz korozją biologiczną, w tym rozwojem pleśni na powierzchni wewnętrznej przegród [1÷4]. Wilgoć stanowi główny czynnik, który limituje trwałość elementów i negatywnie wpływa na właściwości istniejących i zastosowanych materiałów budowlanych [5÷7]. Zagadnienia te stają się szczególnie istotne w przypadku systemów izolacyjnych, które sprzyjają okresowej kondensacji międzywarstwowej i wzrostowi zawilgocenia. Skala i przebieg tego procesu zależą m.in. od rodzaju i grubości zastosowanego izolatora, warunków eksploatacyjnych oraz parametrów klimatu zewnętrznego [4, 7÷9]. Brak szczegółowych badań i informacji wpływu tych czynników na zmianę zawilgocenia elementów izolowanego układu ogranicza możliwość oceny jakości i poprawności zastosowanego rozwiązania w kontekście jego funkcjonowania. Prognozowanie stanu wilgotnościowego implikuje dodatkowo historyczna specyfika murów i związany z nią ich stan techniczny.

Kryteria projektowe doboru rodzaju i grubości materiału izolacyjnego

Zwiększenie efektywności energetycznej i zmniejszenie dekarbonatyzacji budynków historycznych staje się możliwe przez realizację podstawowych wymagań minimalnych określonych w Warunkach Technicznych [10]:

¹⁾ Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa;
Bożena.Orlik-Kozdon@polsl.pl

basic minimum requirements specified in the Technical Conditions [10]:

- the value of the annual demand for nonrenewable primary energy EP [$\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{year})$] is lower than or equal to the maximum value calculated in accordance with the formula referred to in 329 section 1 or 3 [10],
- the partitions of the building meet the requirements for thermal insulation requirements expressed by the thermal transmittance U [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$].

Minimum requirements are considered to be met for a building subject to reconstruction if the thermal transmittance U does not exceed the permissible (limit) value U_{max} .

The so-called minimum requirements contained in 328 of the Technical Conditions [10] do not have to be met in a situation where the solution threatens the correct functioning of the wall system and is not consistent with the assumptions of conservation protection, i.e., causes damage to the value of monuments, art. 4 [11].

The criteria that should be considered the most important are related to the requirement to avoid condensation of water vapour on the surface of the partition and in its layers, 321 [10]:

1. Water vapour condensation that would allow mould fungi to grow cannot occur on the inner surface of the opaque outer partition.

2. There cannot be an increase in dampness caused by condensation of water vapour in the interior of the partition referred to in par. 1.

The first of the criteria (321 [10]) is expressed by the effective temperature factor on whose inner surface f_{Rsi} , the value of which cannot be lower than the required critical value (limit) $f_{Rsi,max}$ calculated in accordance with the Polish standard [12]. The effective value of the f_{Rsi} factor is determined mainly at the location of so-called thermal bridges.

Interlayer condensation can be calculated on the so-called Glaser method, [12]. However, this method does not allow for taking into account changes in the thermal conductivity of the material.

The results are due to moisture, which seems to be important, especially in the case of so-called capillary active materials, in which moisture transport in the liquid phase can occur and change the potential of the entire wall system.

Another unresolved problem is active membranes or intelligent foils, whose actions due to changing hygrothermal conditions cannot be taken into account here – the method uses constant material properties. The limitations of the method were clearly referred to in the standard [12], therefore, the calculation of interlayer condensation is referred to there as an estimate.

In the case of internal insulation, it is recommended to individually assess this phenomenon depending on the thermal resistance of the insulation. R. Worch [8, 9] provides three principles in analogy to traffic lights, which determine the safety of the structure in the context of the occurrence of interlayer condensation of water vapour, i.e.:

● for thermal resistance of the thermal insulation layer R below 1.0 [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$] there is no risk of water vapour condensation;

● wartość wskaźnika rocznego zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną EP [$\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})$] jest mniejsza lub równa wartości maksymalnej obliczonej zgodnie ze wzorem, o którym mowa w § 329 ust. 1 lub 3 [10];

● przegrody budynku spełniają wymagania izolacyjności cieplnej wyrażonej współczynnikiem przenikania ciepła U [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$].

Wymagania minimalne uznaje się za spełnione w budynku podlegającym przebudowie, jeżeli współczynnik przenikania ciepła U nie przekracza wartości dopuszczalnej (granicznej) U_{max} . Wymagania minimalne zawarte w § 328 Warunków Technicznych [10] nie muszą być spełnione w sytuacji, gdy rozwiązanie zagraża poprawnemu funkcjonowaniu układu ściennego oraz nie jest zgodne z założeniami ochrony konserwatorskiej, tj. *powoduje uszczerbek dla wartości zabytków*, art. 4 [11].

Kryteria, które należy uznać za najważniejsze, związane są z wymaganiami dotyczącymi uniknięcia kondensacji pary wodnej na powierzchni przegrody i w jej warstwach, § 321 [10]:

1. *Na wewnętrznej powierzchni nieprzezroczystej przegrody zewnętrznej nie może występować kondensacja pary wodnej umożliwiająca rozwój grzybów pleśniowych.*

2. *We wnętrzu przegrody, o której mowa w ust. 1., nie może występować narastające w kolejnych latach zawilgocenie spowodowane kondensacją pary wodnej.*

Pierwsze z kryteriów (§ 321 [10]) wyrażone jest efektywnym czynnikiem temperaturowym na powierzchni wewnętrznej f_{Rsi} , którego wartość nie może być mniejsza niż wymagana wartość krytyczna (graniczna) $f_{Rsi,max}$ obliczana zgodnie z [12]. Efektywna wartość f_{Rsi} wyznaczana jest przede wszystkim w miejscu tzw. mostków termicznych.

Kondensację międzywarstwową można obliczać na podstawie tzw. metody Glasera [12]. Nie pozwala ona jednak uwzględnić zmian przewodności cieplnej materiału na skutek zawilgocenia, co wydaje się istotne szczególnie w przypadku materiałów tzw. aktywnych kapilarnie, w których może występować transport wilgoci w fazie ciekłej i zmieniać potencjał całego układu ściennego. Nerozwiązanym problemem pozostają również membrany aktywne lub tzw. folie inteligentne, których działanie, na skutek zmieniających się warunków higrotermicznych, nie może być uwzględnione. W metodzie Glasera stosowane są stałe właściwości materiałów. Ograniczenia tej metody zostały wyraźnie przywołane w normie [12], dlatego obliczanie kondensacji międzywarstwowej jest tam określone jako oszacowanie.

W przypadku ocieplania przegród od wewnątrz zaleca się indywidualną ocenę tego zjawiska w zależności od oporu cieplnego izolacji R . Worch [8, 9] podaje trzy zasady, w analogii do sygnalizacji świetlnej, które decydują o bezpieczeństwie konstrukcji w kontekście wystąpienia kondensacji międzywarstwowej pary wodnej, tj.:

● w przypadku oporu cieplnego R izolacji cieplnej mniejszego od $1,0$ [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$] nie ma ryzyka związanego z wystąpieniem kondensacji pary wodnej;

● w przypadku oporu cieplnego izolacji $1,0 \leq R \leq 2,0$ [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$] należy sprawdzić ryzyko kondensacyjne oraz ochronę przed deszczem;

● for thermal resistance of the insulation layer between $1.0 \leq R \leq 2.0 \div 2.5$ [(m²·K)/W] the risk of condensation and protection against rain should be checked;

● for the thermal resistance of the insulation layer $R > 2.0 \div 2.5$ [(m²·K)/W], precise numerical analyses are required, taking into account the coupled transport of heat and moisture in the partition.

For many years, models of moisture movement in capillary-porous materials have been developed, in which diffusional transport of water vapour and capillary transport of liquids are considered together. On the background of numerous theoretical works, the Künzel model [13] should be cited. It was applied to the WUFI programme, which was used in the second part of the work [14].

The model is based on a system of non-linear, partial differential equations that describe unsteady problems of heat and moisture transport in materials with a capillary porous structure. For a one-dimensional flow, the transport equations have the form [13]:

● heat transport:

$$\frac{\delta H}{\delta T} \cdot \frac{\delta T}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta x} (\lambda \frac{\delta T}{\delta x}) + h_v \frac{\delta}{\delta x} (\frac{\delta \phi}{\mu} \cdot \frac{\delta p}{\delta x}) \quad (1)$$

● moisture transport:

$$\rho_w \frac{\delta u}{\delta \phi} \cdot \frac{\delta \phi}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta x} (\rho_w D_w \frac{\delta u}{\delta \phi} \cdot \frac{\delta \phi}{\delta x}) + \frac{\delta}{\delta x} (\frac{\delta \phi}{\mu} \cdot \frac{\delta p}{\delta x}) \quad (2)$$

where:

D_w – capillary conduction coefficient [m²/s];

H – enthalpy of moist material [J/m³];

h_v – heat of vaporization [J/kg];

p – partial pressure of water [Pa];

u – moisture content [m³/m³];

δ_o – water vapor diffusion coefficient in air [kg/m·s·Pa];

T – temperature [°C];

λ – heat conduction coefficient of moist material [W/m·K];

μ – diffusion resistance coefficient of dry material [–];

ρ_w – water density [kg/m³];

ϕ – relative humidity [–].

In its essence, the presented heat and moisture transport model includes the sorption properties of materials and their ability to redistribute moisture, as well as taking into account all elements of the external climate, including driving rain.

The influence of selected factors on the moisture content of a partition insulated from the inside

Changes in moisture content in a wall system insulated from the inside depend on, among other things, the conditions of the internal climate, i.e. the way the room is used and the moisture load, broadly understood external climate conditions, i.e. driving rain, radiation, and others, as well as the type and configuration of individual materials in the wall system. They will be analysed for a thermal insulation system based on insulating materials, which due to their structure and properties may cause a periodic increase in moisture. The calculations were carried out for a node in the form of an insulated external corner from the inside with lightweight aerated concrete, Fig. 1. Moisture changes in the layers of the system were calculated based on

● w przypadku oporu cieplnego izolacji $R > 2.0 \div 2.5$ [(m²·K)/W] wymagane są dokładne analizy numeryczne uwzględniające sprzężony transport ciepła i wilgoci w przegrodzie.

Od wielu lat opracowywane są modele ruchu wilgoci w materiałach kapilarno-porowatych, w których rozpatruje się łącznie dyfuzyjny transport pary wodnej i kapilarny transport cieczy. Na tle licznych prac teoretycznych przywołać należy model Künzela [13]. Został on zaaplikowany do programu WUFI, który wykorzystano w analizie [14]. Model bazuje na układzie nieliniowych, cząstkowych równań różniczkowych, opisujących nieustalone zagadnienia transportu ciepła i wilgoci w materiałach o strukturze kapilarno-porowatej. W przypadku przepływu jednowymiarowego równanie transportowe ma postać [13]:

● transport ciepła:

$$\frac{\delta H}{\delta T} \cdot \frac{\delta T}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta x} (\lambda \frac{\delta T}{\delta x}) + h_v \frac{\delta}{\delta x} (\frac{\delta \phi}{\mu} \cdot \frac{\delta p}{\delta x}) \quad (1)$$

● transport wilgoci:

$$\rho_w \frac{\delta u}{\delta \phi} \cdot \frac{\delta \phi}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta x} (\rho_w D_w \frac{\delta u}{\delta \phi} \cdot \frac{\delta \phi}{\delta x}) + \frac{\delta}{\delta x} (\frac{\delta \phi}{\mu} \cdot \frac{\delta p}{\delta x}) \quad (2)$$

gdzie:

D_w – współczynnik przewodzenia kapilarnego [m²/s];

H – entalpia wilgotnego materiału [J/m³];

h_v – ciepło parowania [J/kg];

p – ciśnienie cząstkowe pary wodnej [Pa];

u – zawartość wilgoci [m³/m³];

δ_o – współczynnik dyfuzji pary wodnej w powietrzu [kg/m·s·Pa];

T – temperatura [°C];

λ – współczynnik przewodzenia ciepła materiału wilgotnego [W/m·K];

μ – współczynnik oporu dyfuzyjnego suchego materiału [–];

ρ_w – gęstość wody [kg/m³];

ϕ – wilgotność względna [–].

Przedstawiony model transportu ciepła i wilgoci ujmuje właściwości sorpcyjne materiałów i ich zdolność do redystrybucji wilgoci oraz uwzględnia wszystkie elementy klimatu zewnętrznego, w tym m.in. zacinający deszcz.

Analiza stanu wilgotnościowego przegrody ocieplonej od wewnątrz

Zmiany zawartości wilgoci w ścianach ocieplonych od wewnątrz zależą m.in. od: warunków klimatu wewnętrznego, tj. sposobu eksploatacji pomieszczenia i obciążenia wilgocią; szeroko rozumianych warunków klimatu zewnętrznego, tj. zacinającego deszczu; promieniowania oraz rodzaju i konfiguracji poszczególnych materiałów w układzie ściany. Analizowano je w przypadku systemu ociepleń na bazie materiału izolacyjnego, który ze względu na swoją budowę i właściwości może powodować okresowe zwiększenie zawilgocenia.

Obliczenia prowadzono w przypadku węzła w formie naroża zewnętrznego izolowanego od wewnątrz lekkim betonem komórkowym. Zmianę zawilgocenia w warstwach tego układu obliczono na podstawie symulacji higrotermicznych w przypadku nieustalonych warunków brzegowych przy

hygrothermal simulations for unsteady boundary conditions using the WUFI 2D software [14]. Figure 1 shows a diagram of the node model with marked data reading locations. The layer arrangement with a description of material properties is given in Table 1.

Calculations were performed for the basic model with the following assumptions:

- indoor climate according to the standard normal moisture load of PN-EN 15026 [15];
- outdoor climate for the Katowice location (TRM from the climate.onebuilding.org database);
- rain load according to ASHRAE 160: rain exposure category: medium, building height < 10 m;
- no external and internal protective coating $s_d = 0$ m;
- heat transfer resistance $R_{si} = 0.13$ [(m²·K)/W], $R_{se} = 0.04$ [(m²·K)/W];
- orientation of the flat wall – north (marked N).
- the outdoor climate of 1.10.2019 at 00:00 was assumed as the initial conditions for all simulations.

All simulations were performed for three years from the start date, i.e. until 1.10.2022 at 00:00. Total simulation time: 26,284 h for each variant.

Numerical analyses of changes in moisture content for the system (Fig. 1), the results of which are shown in Figs. 2÷6 [4] were performed for the factors determining this condition and included [4]:

1) internal climatic conditions expressed by temperature T_i and relative humidity RH_i of internal air, (according to the PN-EN ISO 13788 standard for class 2 (n) and 3 (w), designation on the graphs: 13788_n (w); according to the PN-EN 15026 standard, normal and high moisture load, designation on the graphs: 15026_n (w); flat wall area – designation 1D, corner area – designation 2D.

2) external climatic conditions expressed by the temperature T_e and relative humidity RH_e of the outside air depending on the changing location of the building (changes in humidity were monitored for the climates characterising selected locations, each of which represented one of the climate zones: zone 1: Szczecin (S1), zone 2: Poznań (S2), zone 3: Katowice (S3_1), Warsaw (S3_2), zone 4: Białystok (S4), zone 5: Zakopane (S5).

3) the influence of driving rain and the orientation of the building relative to the cardinal directions. The calcu-

lacji oprogramowania WUFI 2D [14]. Na rysunku 1 pokazano schemat modelu węzła z zaznaczonymi miejscami odczytu danych. Układ warstw z opisem cech materiałowych podano w tabeli.

Obliczenia dotyczyły modelu podstawowego przy następujących założeniach:

- klimat wewnętrzny wg normy PN-EN 15026 *normalne obciążenie wilgotnością* [15];
- klimat zewnętrzny lokalizacji Katowice (TRM z bazy climate.onebuilding.org);
- obciążenie deszczem wg ASHRAE 160: kategoria ekspozycji na deszcz: średnia, wysokość budynku < 10 m;
- brak zewnętrznej i wewnętrznej powłoki ochronnej $s_d = 0$ m;
- opory przejmowania ciepła $R_{si} = 0.13$ [(m²·K)/W], $R_{se} = 0.04$ [(m²·K)/W];
- orientacja ściany płaskiej – północna (oznaczenie N);
- klimat zewnętrzny z 1.10.2019 r. o godzinie 00:00.

Wszystkie symulacje prowadzono w czasie trzech lat od daty rozpoczęcia, tj. do 1.10.2022 r. do godziny 00:00. Łączny czas prowadzenia symulacji w przypadku każdego wariantu wynosił: 26 284 h.

Analizy numeryczne zmiany zawartości wilgoci układu (wg rysunku 1), których wyniki pokazano na rysunkach 2÷6 [4], wykonano z uwzględnieniem następujących czynników warunkujących ten stan [4]:

1) wewnętrzne warunki klimatyczne wyrażone temperaturą T_i i wilgotnością względną RH_i powietrza wewnętrznego, wg normy PN-EN ISO 13788 dla klasy 2(n) i 3(w), oznaczenie na wykresach: 13788_n (w); wg normy PN-EN 15026 normalne i wysokie obciążenie wilgotnością, oznaczenie na wykresach: 15026_n (w); obszar ściany płaskiej – oznaczenie 1D, obszar naroża – oznaczenie 2D.

2) zewnętrzne warunki klimatyczne wyrażone temperaturą T_e i wilgotnością względną RH_e powietrza zewnętrznego w zależności od zmieniającej się lokalizacji budynku (zmianę zawilgocenia prze-

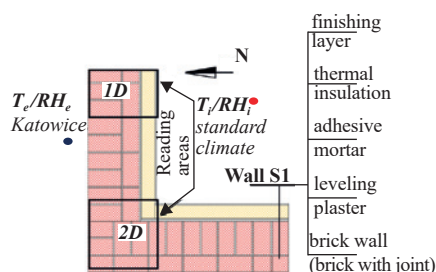


Fig. 1. Detail accepted for analysis
Rys. 1. Detal przyjęty do analizy

Technical parameters of materials for the partition
Parametry techniczne materiałów przegrody

Material	Thermal conductivity coefficient λ [W/m·K]	Diffusion resistance coefficient μ [–]	Initial moisture content W [kg/m ³]	Bulk density ρ [kg/m ³]
Historical brick (0.38 m/0.25 m)	0.600	15.0	4.5	1800
Cement-lime layer (0.01 m)	0.800	19.0	45.0	1900
System adhesive mortar (0.01 m)	0.155	15.1	12.5	833
Mineral insulation boards made of lightweight concrete (0.01 m)	0.040	4.1	8.1	115
System finishing layer (0.01 m)	0.155	15.1	12.5	833

śledzono w przypadku klimatu charakteryzującego wybrane lokalizacje, z których każda reprezentowała jedną ze stref klimatycznych: strefa 1: Szczecin (S1); strefa 2: Poznań (S2); strefa 3: Katowice (S3_1); Warszawa (S3_2); strefa 4: Białystok (S4); strefa 5: Zakopane (S5).

3) wpływ zacinającego deszczu i orientacji budynku względem stron świata; obliczenia ograniczono do

lations were limited to one location, i.e. Katowice (designation W_0 – west direction without taking into account rain).

4) influence of the moisture content of the historical bricks used; in the basic variant, the initial moisture content as in Table 1 – 4.50 [kg/m³], corresponds to the content at a relative air humidity of 80%, in variant 1 – brick mass moisture content: $u = 1\%$, in variant 2 – mass moisture content of bricks: $u = 2\%$, in variant 3 – mass moisture content of bricks: $u = 3\%$, in variant 4 – mass moisture content of bricks: $u = 4\%$, in variant 5 – mass moisture content of bricks: $u = 5\%$.

5) thickness of the brick wall and the insulation used; the following variants of wall systems were assumed for the calculations: a 38 cm thick brick wall – marked W1, insulated from the inside with insulation (with thermal conductivity of 0.04 [W/(m·K)]) of thickness:

- by 10 cm $\Rightarrow R = 2.5$ [(m²·K)/W],
- by 18 cm $\Rightarrow R = 4.5$ [(m²·K)/W],

calculations carried out for the entire insulation thickness.

Conclusions

Based on the results obtained, the following conclusions can be drawn:

- the location of the building and the external climate that represents it directly affect the level of moisture in the components of the system, with the greatest fluctuations in the amount of moisture visible for the brick (assuming no protective coating), and a similar profile of changes in moisture over time for the remaining layers with significant quantitative differences between zones (S1÷S4) and S5,
- the orientation of the partition toward the north results in a higher degree of moisture in the new layers of the insulation system and a lower level of their drying,
- driving rain increases the amount of moisture in the brick wall layer; for the case analysed in the work, moisture increased by ~200% in relation to the calculation variant in which this environmental aspect was not taken into account, this result was obtained for the orientation towards the west (for maximum values),
- for different indoor climate models representing the same level of moisture load (based on PN-EN 15025 and PN ISO 13788 standards), a similar trend of changes in moisture content over time is observed for all layers of the wall system, but with significant quantitative differences,
- installation of insulation in walls with increased moisture ($u > 3\%$) results in greater moisture content of all components

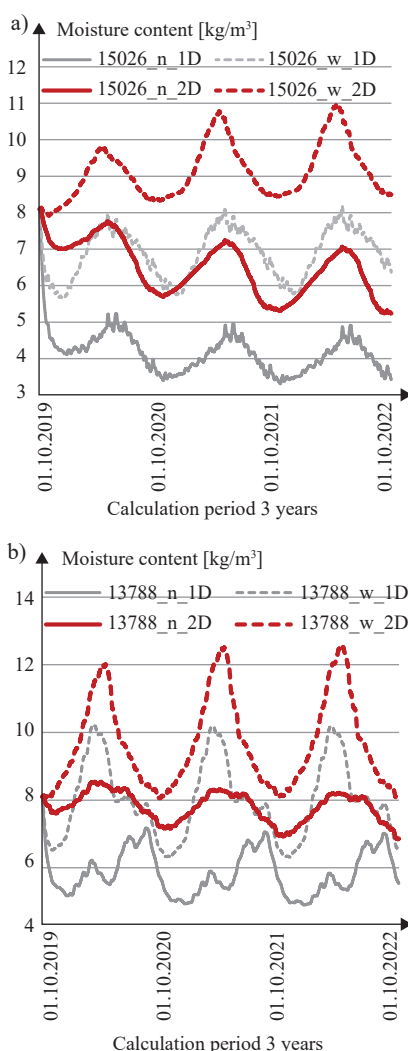


Fig. 2. Changes in the moisture content in the thermal insulation layer depending on internal climatic conditions: a) according to PN-EN 15026; b) PN-EN ISO 13788

Rys. 2. Zmiana zawartości wilgoci w warstwie izolacji termicznej w zależności od wewnętrznych warunków klimatycznych wg: a) PN-EN 15026; b) PN-EN ISO 13788

jednej lokalizacji, tj. Katowic, (oznaczenie W_0 – kierunek zachodni bez uwzględnienia deszczu).

4) wpływ zawilgocenia zastosowanej cegły historycznej; w wariancie podstawowym początkowa zawartość wilgoci jak w tabeli – 4,50 [kg/m³] odpowiada wilgotności względnej powietrza 80%; wilgotność masowa cegły w wariancie 1 – $u = 1\%$; w wariancie 2 – $u = 2\%$; w wariancie 3 – $u = 3\%$; w wariancie 4 – $u = 4\%$; w wariancie 5 – $u = 5\%$.

5) grubość muru ceglanego i zastosowanej izolacji; do obliczeń przyjęto następujące warianty układów ściennych: mur ceglany W1 grubości 38 cm – ocieplony od wewnątrz izolacją o przewodności cieplnej 0,04 [W/(m·K)] i grubości:

- 10 cm $\Rightarrow R = 2,5$ [(m²·K)/W];
- 18 cm $\Rightarrow R = 4,5$ [(m²·K)/W]; w obliczeniach uwzględniono całą grubość izolacji.

Wnioski

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono że:

- lokalizacja budynku i reprezentującą ją klimat zewnętrzny wpływają bezpośrednio na poziom zawilgocenia składowych układu, przy czym w przypadku cegły widoczne są największe wahania wilgoci (przy założeniu braku powłoki ochronnej), a w pozostałych warstwach zbliżony jest profil zmian zawilgocenia w czasie o znacznej różnicy ilościowej pomiędzy strefami S1÷S4 a S5;
- orientacja przegrody w kierunku północnym skutkuje większym stopniem zawilgocenia nowych warstw systemu ociepleniowego oraz mniejszym stopniem ich odsychania;
- zacinający deszcz zwiększa ilość wilgoci w warstwie muru ceglanego; w analizowanym przypadku zawilgocenie zwiększyło się o ~200% w porównaniu z wariantem obliczeń, w którym nie uwzględniono tego aspektu środowiskowego; wynik ten uzyskano w przypadku orientacji w kierunku zachodnim (dotyczy wartości maksymalnych);
- w przypadku różnych modeli klimatu wewnętrznego reprezentujących ten sam poziom obciążenia wilgocią (na podstawie norm PN-EN 15026; PN-EN ISO 13788) obserwuje się zbliżony trend zmiany zawartości wilgoci w czasie we wszystkich warstwach układu ściennego, ale różniący się znacznie pod względem ilości;
- wykonanie izolacji na murach o podwyższonej wilgotności ($u > 3\%$) skutkuje dużym zawilgoceniem wszystkich składowych układu ściennego, które po trzech latach eksploatacji nie odsychają do stanu początkowego (tabela);

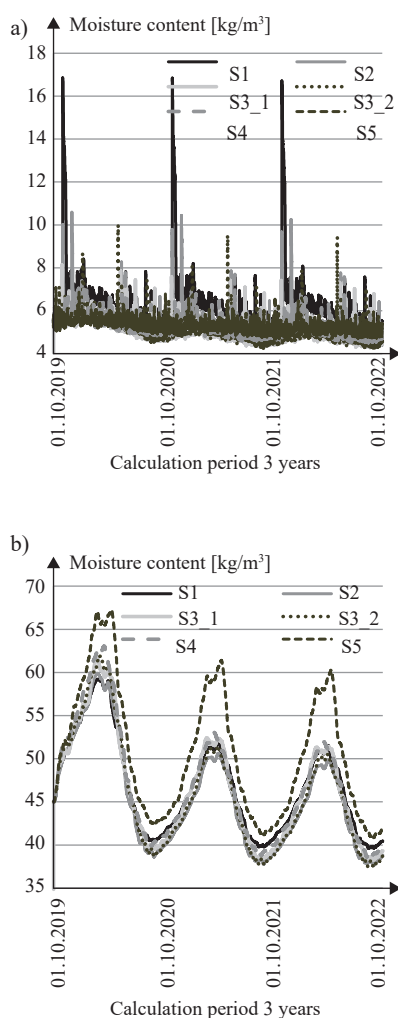


Fig. 3. Changes in moisture content depending on geographical location in the layer of: a) brick wall; b) equalizing pipe
 Rys. 3. Zmiana zawartości wilgoci, w zależności od lokalizacji geograficznej, w warstwie: a) muru z cegły; b) wyrównawczej

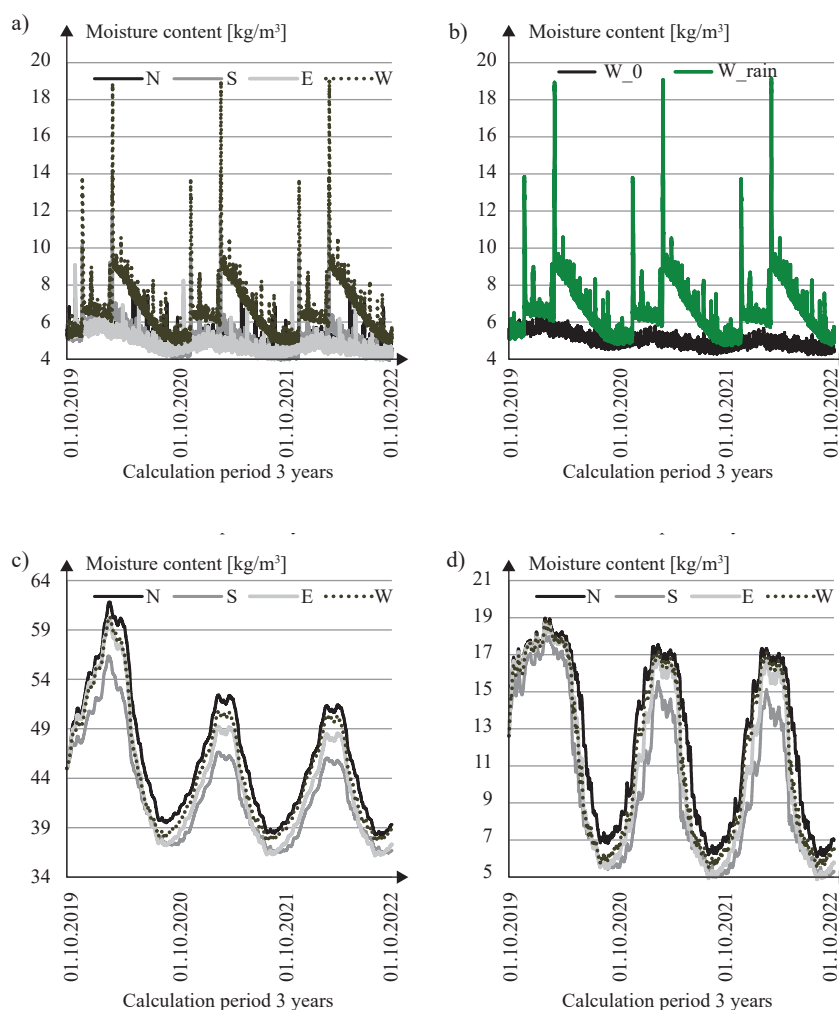


Fig. 4. Changes in moisture content depending on the orientation in the layer of: a) wall brick (taking into account rain for each direction); b) brick wall for the western direction with and without rain (W_0); c) equalizing; d) glue
 Rys. 4. Zmiana zawartości wilgoci w zależności od orientacji w warstwie: a) muru z cegły (uwzględnienie deszczu w przypadku każdego z kierunków); b) muru z cegły w przypadku kierunku zachodniego z uwzględnieniem deszczu i bez (W_0); c) wyrównawczej; d) kleju

of the wall system, which after three years of use do not dry out to the initial state, as in Table 1,

- with increasing thickness of the insulating material, the level of moisture drying decreases; the moisture content of the insulation increases towards the external environment; the calculated level of moisture content also depends on the method of defining the thickness of the layer for which the calculations are performed (section or increasing thickness); recommended division of the thickness of the materials used into 1 cm sections and carrying out individual calculations for individual layers.

No reference was made to the research results described in other articles, because the issues presented have not been discussed so far in such a broad scope. The work refers to the polish publication [7], which is the only one that deals with the subject of internal insulation. However, it does not contain such detailed analyses. A similar situation applies to the other – foreign publications in this field [1, 3, 5, 6, 8, 9],

- wraz ze wzrostem grubości materiału izolacyjnego zmniejsza się poziom odsychania wilgoci; zawilgocenie izolacji wzrasta w kierunku środowiska zewnętrznego; obliczeniowy poziom zawartej wilgoci zależy również od sposobu definiowania grubości warstwy, uwzględnionej w obliczeniach (wycinek lub grubość narastająca); zalecany podział grubości zastosowanych materiałów na wycinki o wymiarze 1 cm i prowadzenie indywidualnych obliczeń w przypadku poszczególnych warstw.

Nie odniesiono się do wyników badań opisanych w innych artykułach, ponieważ przedstawione zagadnienia nie były dotychczas poruszane w tak szerokim zakresie. W pracy przywołana została polska publikacja [7], która jako jedyna podejmuje się tematyki ociepleń od wewnątrz. Nie zawiera ona jednak tego typu szczegółowych analiz. Podobna sytuacja odnosi się do pozostałych – zagranicznych publikacji z tego zakresu [1÷3, 5, 6, 8, 9], które traktują ten temat w kontekście: opisu zjawisk fizycznych, które zachodzą w tego typu

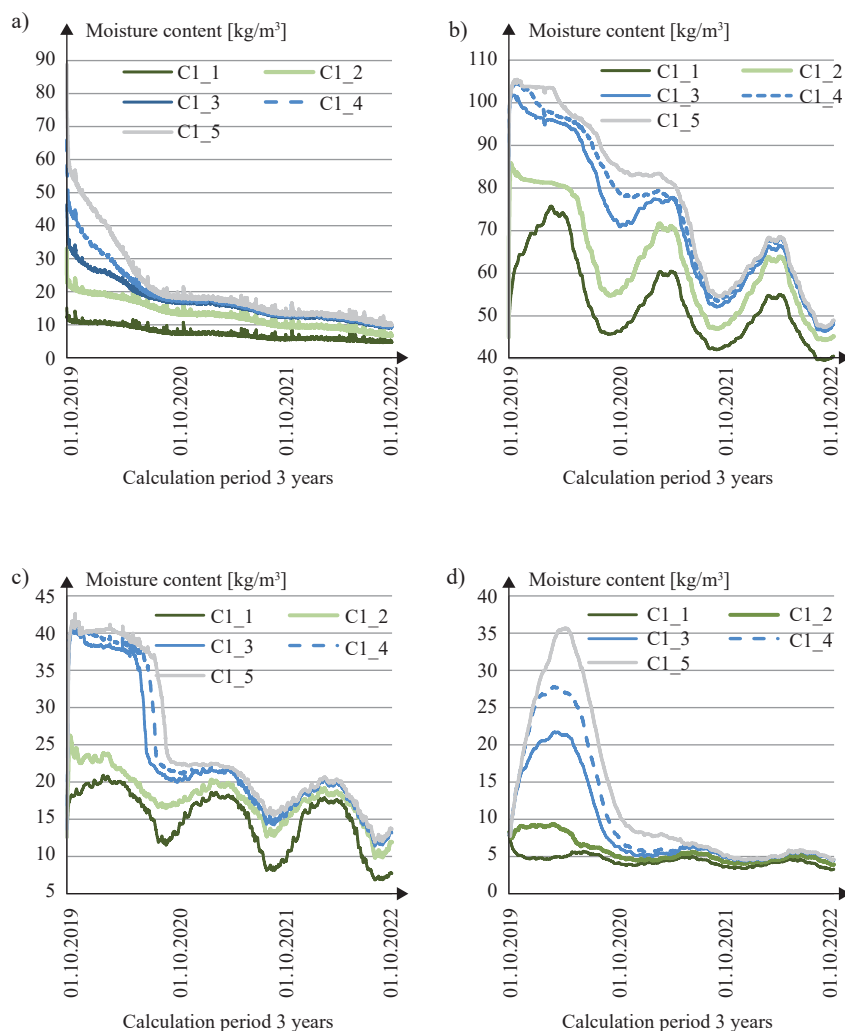


Fig. 5. Changes in the moisture content of the components of the insulated wall system depending on the moisture content of the brick: a) brick wall; b) equalizing seawall; c) glue; d) insulation

Rys. 5. Zmiana zawartości wilgoci składowych izolowanego układu ściennego w zależności od zawilgocenia cegły: a) mur z cegły; b) warstwa wyrównawcza; c) warstwa kleju; d) izolacja

which treat this topic in the context of: description of physical phenomena that occur in such partitions, technology of execution, material solutions and potential threats and design and execution errors.

Summary

The moisture status of internally insulated walls depends on many parameters, including, among others, the structure and related physical properties of building materials, sources and forms of moisture occurrence, and the climatic conditions in which the partition operates. The multitude of factors and the simultaneous complexity of their influence mean that, for both cognitive and application reasons, systematizing knowledge about their influence on the process of moisture and drying of materials in insulated wall systems is of fundamental importance.

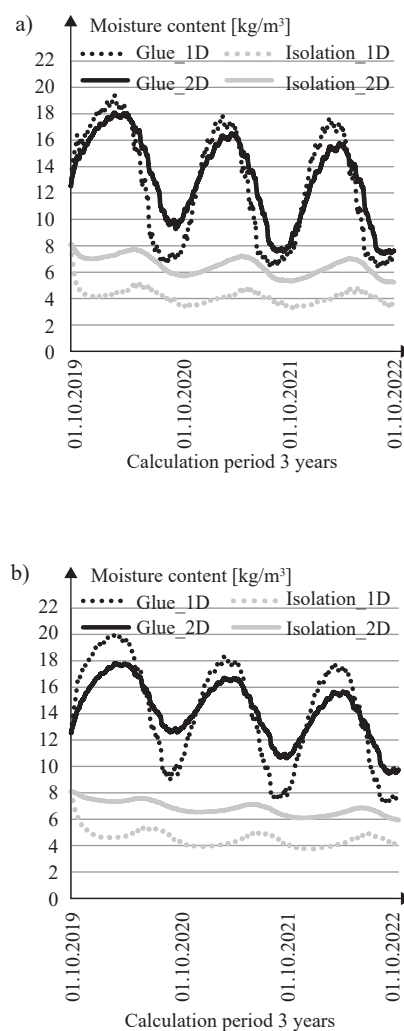


Fig. 6. Changes in moisture content for a wall with a wall thickness of 38 cm and insulation with thermal resistance: a) $R = 2.5$ [(m²·K)/W]; b) $R = 4.5$ [(m²·K)/W]

Rys. 6. Zmiany zawartości wilgoci w ścianie o grubości muru 38 cm z izolacją o oporze cieplnym: a) $R = 2,5$ [(m²·K)/W]; b) $R = 4,5$ [(m²·K)/W]

przegrodach, technologii wykonania, rozwiązań materiałowych i potencjalnych zagrożeń i błędów projektowo-wykonawczych.

Podsumowanie

Stan wilgotnościowy ścian ocieplanych od wewnątrz zależy od wielu parametrów. Należą do nich m.in. struktura i związane z nią właściwości fizyczne materiałów budowlanych, źródło i forma występowania wilgoci oraz warunki klimatyczne, w których jest eksploatowana przegroda. Mnogość czynników przy jednoczesnej złożoności ich wpływu powoduje, że zarówno ze względów poznawczych, jak i aplikacyjnych zasadniczego znaczenia nabiera usystematyzowanie wiedzy dotyczącej ich wpływu na proces zawilgocenia i wysychania materiałów w izolowanych układach ściennych.

The presented results of numerical analyses of changes in moisture content over time are a premise for re-visiting previously recommended methods of moisture diagnostics referred to in the Technical Conditions [10]. They also constitute the basis for formulating new (individual) thermal and moisture requirements for this type of thermal renovation activities in historic buildings.

Prezentowane wyniki analiz numerycznych zmiany zawartości wilgoci w czasie są przesłanką do rewizji zalecanych dotąd metod diagnostyki stanu wilgotnościowego przywołanych w Warunkach Technicznych [10]. Stanowią również podstawę do formułowania nowych (indywidualnych) wymagań cieplno-wilgotnościowych dotyczących tego typu działań termorenowacyjnych w budynkach historycznych.

Received: 27.02.2024

Revised: 28.03.2025

Published: 25.04.2025

Artykuł wpłynął do redakcji: 27.02.2024 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 28.03.2025 r.

Opublikowano: 25.04.2025 r.

Literature

- [1] Arbeiter K: Innendämmung; Auswahl, Konstruktion, Ausführung, 2014.
- [2] Muller R: Fachverband Innendämmung; Praxiandbuch Innendämmung: Planung-Konstruktion – Details – Beispiele, 2016.
- [3] Scheffler G: Bauphysik der Innendämmung, Fraunhofer Irb Stuttgart, 2015.
- [4] Orlik Koźdoń B: Prognozowanie stanu wilgotnościowego ścian ocieplanych od wewnątrz z budynkach historycznych z cegły, Monografia, 2022.
- [5] Walker R, Pavia S.: Thermal and moisture monitoring of an internally insulated historic brick wall, *Building and Environment*, 133, 2018, p. 178–186.
- [6] Zhou X, Derome D, Carmeliet J: Analysis of moisture risk in internally insulated masonry walls, *Building and Environment*, Vol. 15, March 2022.
- [7] Wójcik R: Docieplanie budynków od wewnątrz, *Medium*, 2017.
- [8] Worch A: Innendämmung – Möglichkeiten und Grenzen, *WTA Schriftenreihe*, 31, 2009. [9] Worch A.: Innendämmung von einschaligem Ziegelmauerwerk, *Bausubstanz*, 3, 2012, s. 56–61.
- [10] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. Rozporządzenie z 12 kwietnia 2002 r. (Dz.U. z 2019 r. poz. 1065), Tekst ujednolicony – uwzględniający zmiany wprowadzone (Dz.U. z 16 września 2020 r. poz. 1608).
- [11] Ustawa z 23 lipca 2003 r. o ochronie zabytków i opiece nad zabytkami, Dz. U. 2003 Nr 162 poz. 1568.
- [12] PNEN ISO 13788:2013: Ciepłno-wilgotnościowe właściwości komponentów budowlanych i elementów budynku – Temperatura powierzchni wewnętrznej konieczna do uniknięcia krytycznej wilgotności powierzchni i kondensacja międzywarstwowa – Metody obliczania.
- [13] Kunzel H.: Simultaneous heat and moisture transport in building components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters, (13) (PDF) Simultaneous heat and moisture transport in building components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters (researchgate.net).
- [14] <https://wufi.de>.
- [15] PN-EN 15026:2008: Ciepłno-wilgotnościowe właściwości użytkowe komponentów budowlanych i elementów budynku – Szacowanie przenoszenia wilgoci za pomocą symulacji komputerowej.