XXIV awarie budowlane
XXIV Konferencja Naukowo-Techniczna
Szczecin-Międzyzdroje, 26-29 maja 2009

Prof. dr hab. inż. JERZY HOŁA, *jerzy.hola@pwr.wroc.pl*
Dr inż. ZYGMUNT MATKOWSKI, *zygmunt.matkowski@pwr.wroc.pl*
Politechnika Wrocławska

WYBRANE PROBLEMY DOTYCZĄCE ZABEZPIECZEŃ PRZECIWWILGOCIOWYCH ŚCIAN W ISTNIEJĄCYCH OBIEKTACH MUROWANYCH

SOME CHOSEN PROBLEMS CONCERNING DAMP-PROOFING OF THE EXISTING BRICK BUILDINGS

Streszczenie W pracy przedstawiono wybrane, ale zdaniem autorów istotne, problemy dotyczące zabezpieczeń przeciwwilgociowych ścian w istniejących obiektach murowanych. Omówiono problemy związane z badaniami wilgotności murów różnymi metodami. Przedstawiono problemy związane przede wszystkim z realizacją poziomych zabezpieczeń przeciwwilgociowych w murach grubych metodami iniekcyjnymi. W celach poglądowych zamieszczono dwa schematy kompleksowego zabezpieczenia przeciwwilgociowego ściany zewnętrznej murowanej.

Abstract The paper presents, relevant in the authors' opinion, chosen problems concerning damp insulation in the existing brick buildings. Issues connected with testing dampness in brickwork walls by means of various methods have been discussed. Above all, problems with fixing horizontal damp insulation in thick walls using injection methods have been pointed out. To illustrate this, two diagrams showing complex damp-proofing of an external brickwork wall have been included.

1. Wstęp

Zdecydowana większość obiektów o ścianach murowanych z cegły ceramicznej, wybudowanych na terenach dzisiejszej Polski do 1945 roku i niemal 100% takich obiektów wzniesionych do 1920 roku nie ma w ogóle lub ma nieskuteczne izolacje przeciwwilgociowe. Dotyczy to głównie poziomych izolacji przeciwwilgociowych. Typowe, w rozumieniu współczesnym, izolacje poziome zaczęto wykonywać na terenach Polski dopiero w latach dwudziestych ubiegłego wieku. Brak skutecznych poziomych i pionowych zabezpieczeń przeciwwilgociowych w istniejących obiektach murowanych jest najczęstszą przyczyną zawilgocenia ścian. Nadmierne długotrwałe zawilgocenie murów w połączeniu z dużym zasoleniem powoduje ich destrukcję, szczególnie w strefie przypowierzchniowej. W tablicy 1 podano przyjmowane w literaturze stopnie zawilgocenia, a w tablicy 2 stopnie zasolenia murów ceglanych [1, 2, 8, 17].

Tablica 1. Stopnie zawilgocenia murów w zależności od wartości wilgotności masowej [1,17]

Stopień	Wilgotność masowa U_m [%]	Klasyfikacja zawilgocenia
I	0–3	mur o dopuszczalnej wilgotności
II	3–5	mur o podwyższonej wilgotności
III	5–8	mur średnio zawilgocony
IV	8–12	mur mocno zawilgocony
V	>12	mur mokry

Tablica 2. Stopnie zasolenia murów ceglanych [8]

Rodzaj soli	Zawartość soli w % (masowo)		
Chlorki	< 0.2	0.2–0.5	> 0.5
Azotany	< 0.1	0.1–0.3	> 0.3
Siarczany	< 0.5	0.5–1.5	> 1.5
Klasyfikacja stopnia zasolenia	niski	średni	wysoki

Wykonanie skutecznego zabezpieczenia przeciwwilgociowego ścian istniejących obiektów murowanych przed działaniem wody gruntowej ma istotne znaczenie z uwagi na trwałość, przywrócenie walorów użytkowych obiektu, jak też ze względów ekonomicznych.

Przed przystąpieniem do zaprojektowania, a następnie realizacji zabezpieczeń przeciwwilgociowych w istniejącym obiekcie niezbędne jest wykonanie specjalistycznych badań wilgotności oraz jej rozkładów na grubości i wysokości ścian, a także badań rodzaju i stężenia soli w murach. Wyniki tych badań mają istotny wpływ na wybór odpowiedniej metody zabezpieczenia przeciwwilgociowego oraz sposobu postępowania z nadmiernym zasoleniem. Powinny też stanowić punkt odniesienia dla analogicznych badań kontrolnych wilgotności wykonywanych w późniejszym okresie, w celu oceny skuteczności działania wykonanych zabezpieczeń i oceny szybkości wysychania murów.

W niniejszej pracy zwrócono uwagę na wybrane, ale zdaniem autorów istotne problemy związane z badaniami wilgotności murów ceglanych. Zwrócono także uwagę na problemy związane przede wszystkim z realizacją poziomych zabezpieczeń przeciwwilgociowych metodami iniekcyjnymi, w murach grubych obiektów istniejących. Ponadto zamieszczono dwa poglądowe schematy kompleksowego zabezpieczenia przeciwwilgociowego ściany murowanej w obiekcie istniejącym, w sytuacjach gdy można ją odkopać i gdy nie można jej odkopać od zewnątrz.

2. Krótkie omówienie przyczyn i skutków zawilgocenia murów

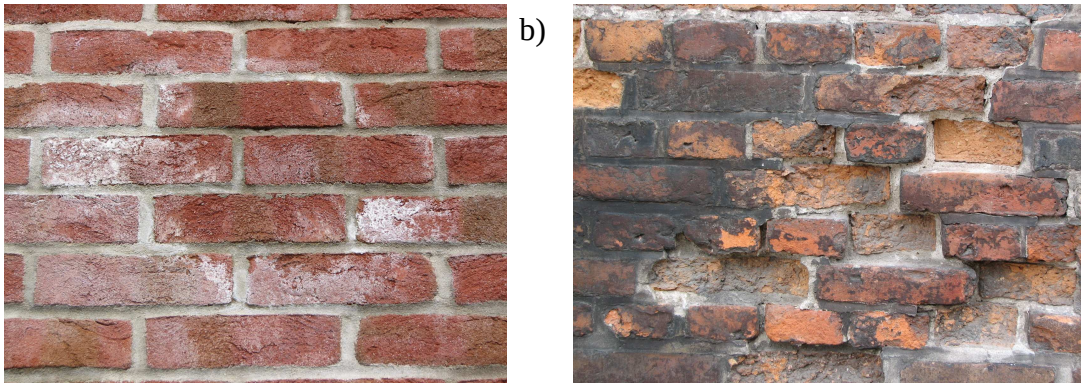
Woda we wszystkich jej postaciach: pary, cieczy i lodu jest największym wrogiem wielu materiałów i konstrukcji, zwłaszcza obiektów murowanych. Zawilgocenie struktury murów stanowi pierwsze ogniwo procesu ich niszczenia, zwłaszcza gdy woda zawiera szkodliwe lub agresywne domieszki, na przykład sole rozpuszczalne. Wówczas mogą zachodzić wewnątrz muru i na jego powierzchni negatywne procesy fizyczne, chemiczne lub biologiczne, występujące często we wzajemnym powiązaniu.

W przypadku braku izolacji przeciwwilgociowych stopień zawilgocenia murów zależy od wielu czynników, między innymi od: ukształtowania terenu, rodzaju i uwarstwienia gruntu w otoczeniu i pod obiektem, poziomu wody gruntowej i zmian w czasie tego poziomu, usytuowania i poziomu posadowienia obiektu, jak również od właściwości fizyko-chemicznych materiałów, z których wykonane są mury. W wielu przypadkach podciąganie kapilarne wody z gruntu w murach może sięgać kilku metrów ponad poziom terenu.

Zbyt duże zawilgocenie ma wpływ na obniżenie parametrów wytrzymałościowych zarówno cegły jak i zaprawy oraz na zmniejszenie trwałości murów i na pogorszenie warunków eksploatacyjnych w obiekcie. Zgromadzona woda w murach stwarza niekorzystny mikroklimat w pomieszczeniach, pogarsza właściwości termoizolacyjne i akustyczne przegród, przyczynia się do stopniowej destrukcji muru, odspajania tynków i powłok malarskich. Duża wilgotność ścian oraz duża wilgotność względna powietrza wewnątrz pomieszczeń, podwyższona także w wyniku braku odpowiedniej wentylacji, sprzyjają rozwojowi grzybów domowych właściwych i grzybów pleśniowych, mających negatywny wpływ na zdrowie ludzi.

Mury mokre i mocno zawilgocone oraz zasolone narażone są na przyspieszoną destrukcję spowodowaną korozją mrozową (rys. 1). Niebezpieczne może się okazać również zbyt szybkie osuszenie takich murów. Przy wysychaniu muru następuje stopniowa dehydratacja poszczególnych składników. W wyniku tego powstaje zjawisko skurczu przyczyniające się do powstania zbyt dużych naprężeń skurczowych, w rezultacie których dochodzi do pękania, rozwarstwiania, odpadania i łuszczenia tynków i polichromii.

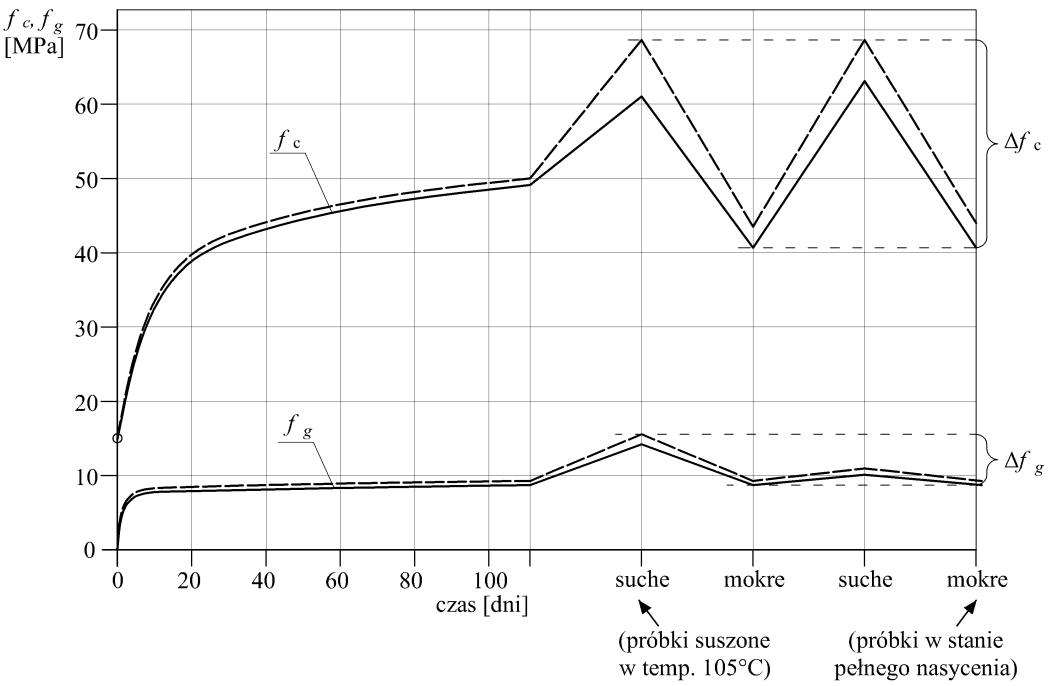
a) b)



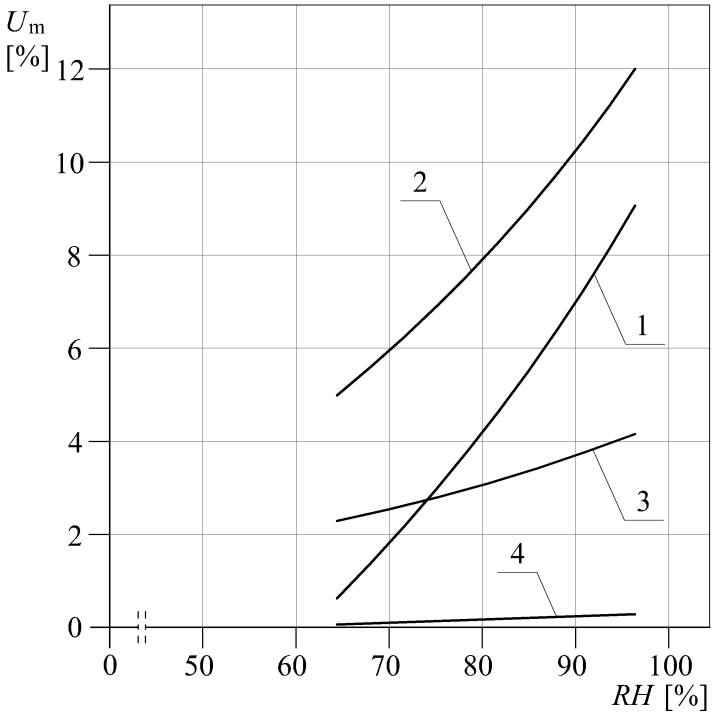
Rys. 1. Przykładowy widok muru ceglanego: a) zawilgoconego i zasolonego, b) uszkodzonego wskutek korozji mrozowej

Ważnym skutkiem nadmiernego zawilgocenia ścian jest obniżenie wytrzymałości na ściskanie zarówno cegły, jak i zaprawy. Szczególnie zaprawa wapienna, wykonana na spoiwie „powietrznym”, a nie hydraulicznym, pod wpływem dużego zawilgocenia traci swoje własności konstrukcyjne. Wg [16,24] spadek wytrzymałości na ściskanie następuje przede wszystkim wskutek częściowego rozpuszczenia się więzi między kryształkami sieci strukturalnej. Więzi te częściowo rozpuszczają się, po czym rozpuszczone związki wytrącają się z powrotem w porach. W rezultacie masa materiału nie zmienia się, a wytrzymałość na ściskanie stopniowo maleje. Zjawisko to jest częściowo odwracalne i po wysuszeniu materiał odzyskuje wytrzymałość zbliżoną do wytrzymałości w stanie suchym, ale pod warunkiem, że w międzyczasie nie doszło do destrukcji spowodowanej korozją mrozowa. Spadek wytrzymałości spowodowany zawilgoceniem charakteryzuje współczynnik rozmiękczenia, oznaczony jako stosunek wytrzymałości na ściskanie materiału w stanie nasycenia wodą do wytrzymałości w stanie suchym. Dla większości materiałów kapilarno-porowatych współczynnik ten zawiera się w przedziale 0,6–0,9. Przykładowo na rysunku 2 przedstawiono wpływ zawilgocenia na wytrzymałość na ściskanie i zginanie zaprawy cementowej [15], której współczynnik rozmiękczenia, wyznaczony z tego rysunku, wynosi około 0,64.

W obiektach murowanych poważny problem stanowią zazwyczaj rozpuszczalne w wodzie sole, gromadzące się w murach w wyniku zachodzącego przez długi czas transportu kapilarnego wody z gruntu [1, 2, 19]. Obecność soli w murach powoduje zwiększenie zdolności higroskopijnego wchłaniania wilgoci. Wzrost zawilgocenia murów wskutek sorpcji wilgoci z powietrza, może być w przypadku mocno zasolonych murów porównywalny z zawilgoceniem spowodowanym innymi przyczynami. Przykładowo na rysunku 3 przedstawiono zależność wilgotności masowej muru, zawierającego różnego rodzaju sole, od wilgotności względnej powietrza.



Rys. 2. Zależność wytrzymałości na ściskanie i zginanie zaprawy cementowej w stanie suchym i mokrym [15]



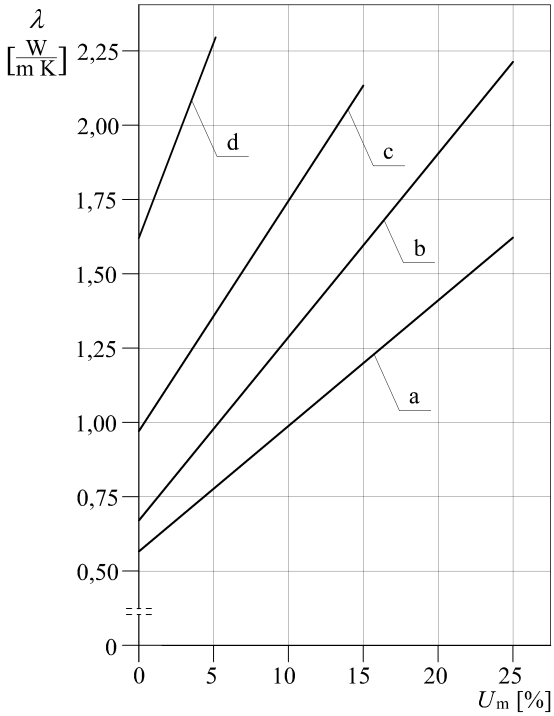
Rys. 3. Wzrost wilgotności masowej muru ceglanego spowodowany sorpcją wilgoci z powietrza w zależności od wilgotności względnej powietrza i rodzaju i stężenia soli w murze: 1-NaCL, 28 mg/g, 2 – $Ca(OH_3)_2$, 100 mg/g, 3 – $MgSO_4$, 56 mg/g, 4 – mur nie zawierający soli

Szkodliwe oddziaływanie soli, głównie chlorków, azotanów i siarczanów, objawia się wykwitami, przebarwieniami oraz krystalizacją w przypowierzchniowej strefie muru i na powierzchni. Proces krystalizacji powoduje zwiększenie objętości soli i powstanie między innymi znacznego ciśnienia krystalizacyjnego (tablica 3) w przypowierzchniowej strefie muru, przez co powstają naprężenia rozciągające powodujące destrukcję muru. Ma to istotny wpływ na zmniejszenie jego trwałości.

Tablica 3. Ciśnienie krystalizacyjne, w MPa, wybranych soli [17]

Sól	Objętość molowa [cm^3/mol]	Ciśnienie krystalizacyjne w [MPa] dla			
		$C/C_s = 2$		$C/C_s = 10$	
CaSO4 (anhydryt)	46,00	33,5	39,8	112,0	132,5
CaSO4x2H2O (gips)	54,00	2,2	33,5	93,8	111,0
NaCl (sól kuchenna)	27,85	55,4	65,4	184,5	219,0
Na2SO4 (siarczan sodu bezwodny)	53	29,2	34,5	97,0	115,0
Na2SO4x10H2O (sól glauberska)	220	7,2	8,3	23,4	22,7
MgSO4x7H2O (sól gorzka)	147	10,5	12,5	35,0	42,5

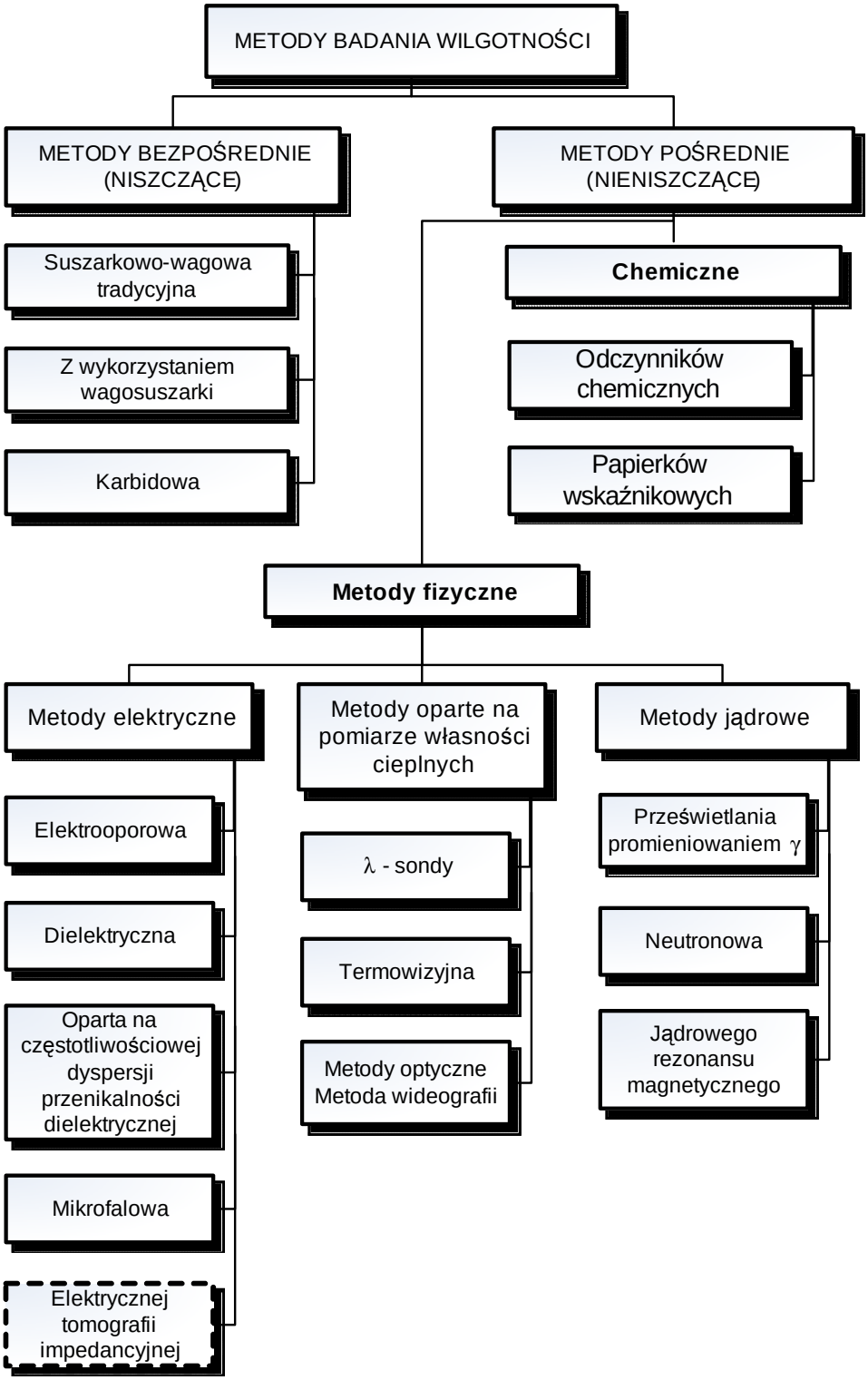
Nadmierne zawilgocenie murów wpływa także ujemnie na ich własności cieplne. Szczególnie ważne jest to w zewnętrznych przegrodach budowlanych. Wilgotność w istotny sposób wpływa na wartość współczynnika przewodności cieplnej λ materiału (rys. 4). Tłumaczy się to istnieniem tzw. mostków cieplnych, powstających na skutek wypełnienia porów wodą [4]. Warto w tym miejscu wyjaśnić, że wg [15,21] współczynnik przewodności cieplnej suchego powietrza w porach rośnie ze wzrostem średnicy porów i wynosi przykładowo w temperaturze 0°C – 0,025 W/m·K przy średnicy 0,1 mm i 0,031 W/m·K przy średnicy 2 mm. W przypadku zawilgocenia materiałów kapilarno-porowatych, część przestrzeni porów wypełniona zostaje wodą, której współczynnik λ wynosi 0,58 W/m·K, a zatem jest około dwudziestokrotnie wyższy od współczynnika przewodności cieplnej powietrza.



Rys. 4. Wpływ zawilgocenia na przewodność cieplną wybranych materiałów budowlanych [15, 24]: a – cegła ceramiczna o gęstości 1694 kg/m^3, b – cegła ceramiczna o gęstości 1807 kg/m^3, c – wapień o gęstości 1942 kg/m^3, d – cegła klinkierowa

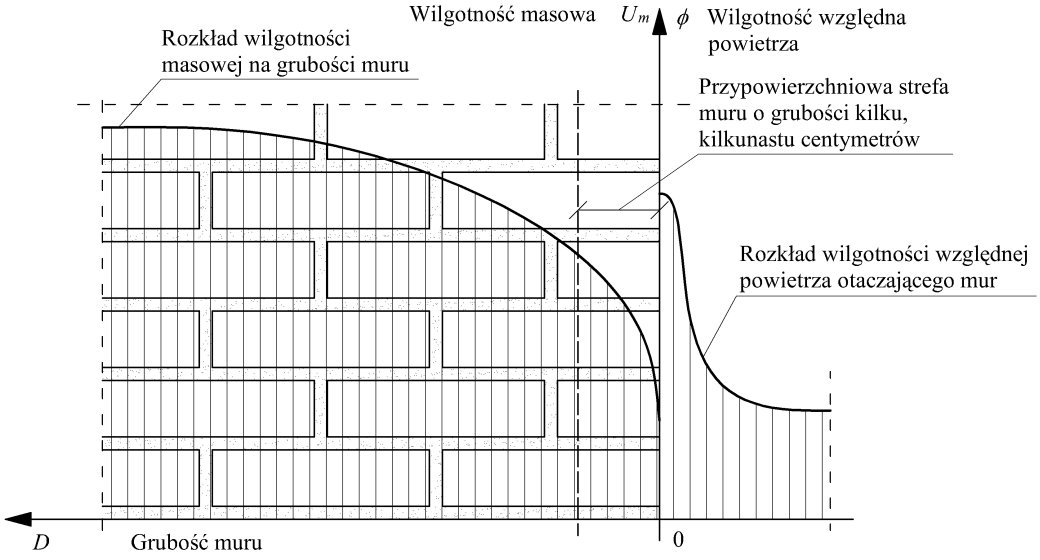
3. Problemy związane z badaniem wilgotności murów

Chociaż istnieje wiele metod badania wilgotności murów ceglanych to aktualnie nie ma jednej uniwersalnej metody, która może być zastosowana w różnych warunkach pomiarowych. Każda z metod posiada swoje zalety, wady i uwarunkowania pozwalające na zastosowanie jej tylko w danych okolicznościach. Ogólny podział metod badania wilgotności murów ilustruje schemat pokazany na rysunku 5.



Rys. 5. Ogólny podział metod badania wilgotności murów

Główne problemy, z jakimi spotykamy się obecnie w badaniach wilgotności murów to:
– brak metody pozwalającej określić przestrzenny rozkład wilgotności w murze bez konieczności pobierania próbek; obecnie jest to problem podstawowy, szczególnie ważny w odniesieniu do murów grubych,
– zdecydowana większość dostępnych metod badawczych pozwala na punktowe określenie wilgotności; możliwe jest uzyskanie jedynie rozkładów dyskretnych, na przykład metodą bezpośrednią suszarkowo-wagową;
– w przypadku zastosowania metod pośrednich istnieje możliwość określenia wilgotności na powierzchni muru lub w jego strefie przypowierzchniowej tylko do głębokości kilku lub kilkunastu centymetrów; jest to problem zasadniczy w przypadku murów grubych, gdyż wilgotność we wnętrzu muru jest z reguły o kilka procent wyższa niż przy powierzchni (rys. 6),
– niszczący charakter metod wymagających pobrania próbek; w wielu przypadkach, szczególnie w obiektach historycznych, próbek w ogóle nie można pobrać, gdyż służby konserwatorskie nie wyrażają na to zgody, w takich przypadkach należy stosować jedynie metody nieniszczące.



Rys. 6. Typowy rozkład wilgotności masowej na grubości muru

Jak wynika z rysunku 5 badania wilgotności murów przeprowadza się stosując metody bezpośrednie oraz pośrednie. Metodami bezpośrednimi, wymagającymi pobierania próbek materiału, są: tradycyjna metoda suszarkowo-wagowa oraz metoda suszarkowo-wagowa z wykorzystaniem urządzenia zwanego wagosuszarką. Metodami pośrednimi, nie wymagającymi pobierania próbek wilgotnego materiału, są metody nieniszczące.

Metoda suszarkowo-wagowa jest metodą podstawową, najbardziej dokładną i wiarygodną. Rezultaty uzyskane tą metodą powinny stanowić poziom odniesienia dla wyników uzyskanych innymi metodami. W metodzie tej pobiera się próbki materiału, następnie umieszcza się je w hermetycznych pojemnikach i dostarcza do laboratorium. Tam waży się je w stanie zawilgoconym i następnie suszy w suszarce laboratoryjnej w temperaturze 105°C do stałej masy. Następnie oblicza się na przykład wilgotność masową badanego materiału ze wzorów (1) i (2):

- odniesioną do masy materiału suchego

$$U_m = \frac{m_w - m_s}{m_s} x100\% \tag{1}$$

- odniesioną do masy materiału zawilgoconego

$$U'_m = \frac{m_w - m_s}{m_w} x100\% \qquad (2)$$

gdzie: m_w – masa próbki wilgotnej, kg,
m_s – masa próbki suchej, kg.

W metodzie suszarkowo-wagowej bardzo ważnym i niedocenianym problemem jest sposób pobierania próbek, szczególnie w murach grubych i bardzo grubych. Chodzi o to, że nie należy pobierać zwiercin uzyskiwanych w trakcie wykonywania otworów wiertarką udarowo-obrotową, bowiem w czasie wiercenia końcówka wiertła nagrzewa się i następuje proces odparowania wody. Wg badań autorów, z tego powodu następuje zaniżenie pomierzonej wartości wilgotności masowej nawet o kilka %. Zaniżenie to jest uzależnione od zawartości wody w próbce, szybkości wiercenia i ilości obrotów wiertarki. Dlatego próbki powinny być pobierane ręcznie, za pomocą „dorników" rurowych wkładanych w nie do końca nawiercony otwór lub wycinane wiertarką za pomocą wiertła koronkowego. Taki sposób pobierania próbek jest pracochłonny, ale pozwala uzyskać wiarygodne rezultaty.

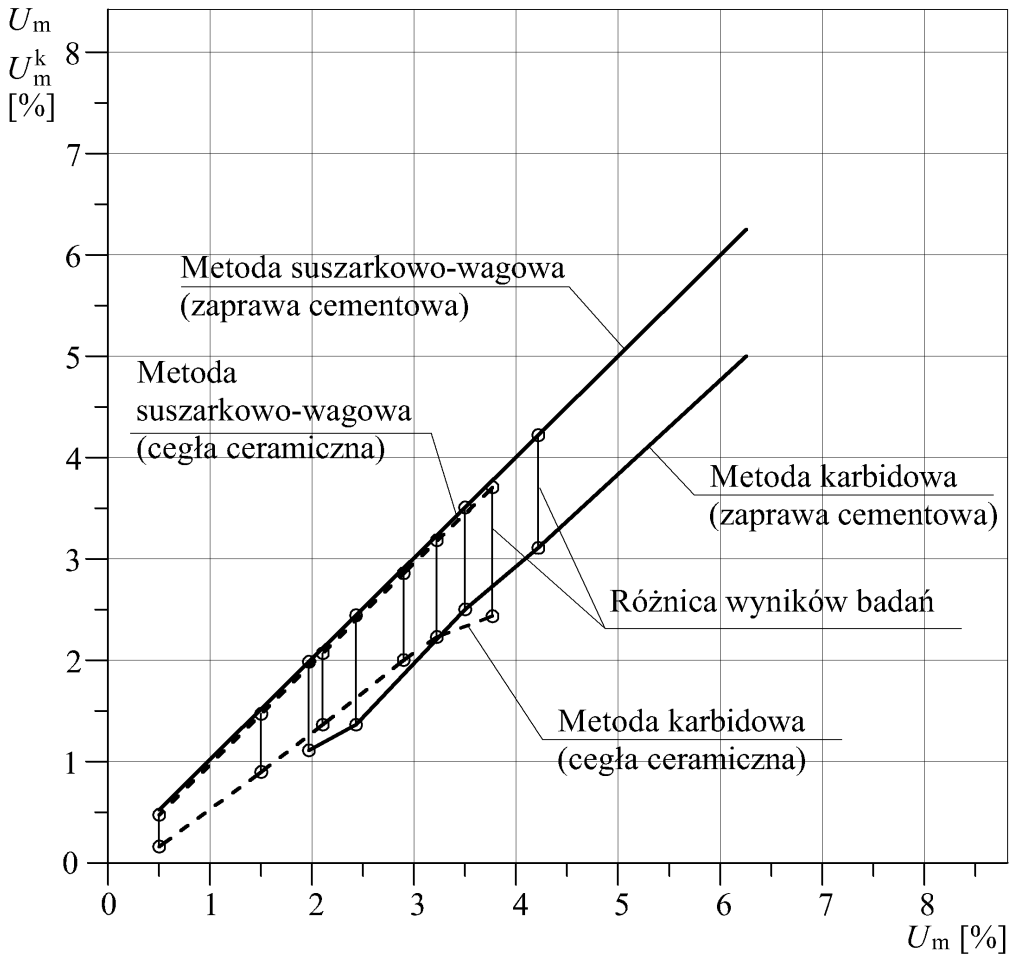
Określenie wilgotności masowej muru za pomocą urządzenia zwanego wagosuszarką jest tak samo dokładne jak w tradycyjnej metodzie suszarkowo-wagowej. Przewaga wago-suszarki polega na tym, że próbek nie trzeba dostarczać do laboratorium, gdyż proces suszenia następuje w samym urządzeniu. Proces ten trwa kilka lub kilkanaście minut i po tym czasie otrzymujemy ostateczny wynik pomiaru.

Inną metodą, w której występuje konieczność pobierania próbek jest metoda karbidowa, znana w krajach zachodnich pod nazwą CM. W zasadzie powinno się ją zaliczyć do metod pośrednich, gdyż bezpośrednio mierzona jest inna wielkość niż wilgotność masowa. Metoda ta polega na odważeniu odpowiedniej porcji materiału z pobranej próbki i umieszczeniu jej w hermetycznym pojemniku zaopatrzonym w manometr wraz z fiolką zawierającą ściśle określoną ilość węglika wapnia. Po silnym potrząśnięciu pojemnika następuję zbicie fiolki i woda zawarta w badanym materiale reaguje z karbidem. W wyniku tej reakcji powstaje acetylen, który wywiera ciśnienie na ścianki pojemnika. Im większa zawartość wody w próbce tym ciśnienie wewnątrz pojemnika jest większe. Odczytując na manometrze wartość tego ciśnienia, z odpowiednich tablic określa się wilgotność masową materiału. Z doświadczeń autorów wynika, że w przypadku niskiego i średniego zawilgocenia badanego materiału wyniki uzyskiwane metodą karbidową są niższe od wyników uzyskanych metodą suszarkowo-wagową, co obrazuje rysunek 7. Spowodowane jest to nieprzereagowaniem całej ilości wody zawartej w materiale z karbidem.

Nieniszcząca ocena wilgotności materiałów budowlanych polega na pośrednim określeniu tej wielkości poprzez pomiar innej cechy fizycznej bądź chemicznej wilgotnego materiału [12]. Wielkość mierzonej cechy uzależniona jest od wilgotności materiału i może być wskaźnikiem ilości wody zawartej w danym materiale.

Spośród metod nieniszczących w praktyce najczęściej stosowane są metody elektryczne. Mierniki wykorzystywane w tych metodach wskazują bezpośrednio wilgotność masową materiału lub wielkość bezwymiarową, na podstawie której wyznacza się wilgotność za pomocą odpowiednich nomogramów lub wzorów. Mierniki wskazujące wielkość bezwymiarową wymagają większej uwagi, zaangażowania i zrozumienia osób posługującymi się nimi. Posługując się miernikami wskazującymi bezpośrednio wilgotność masową, nie można bezkrytycznie wierzyć we wskazanie urządzenia. Należy wziąć pod uwagę fakt, że na wskazanie to, poza zawartością wilgoci wpływają jeszcze inne czynniki takie na przykład jak: rodzaj

materiału i jego gęstość, porowatość, a przede wszystkim rodzaj i stężenie soli. Wpływ zasolenia na wyniki badań wilgotności masowej, na przykładzie stwardniałej zaprawy cementowej, obrazuje tablica 4.



U_m - wilgotność masowa określona metodą suszarkowo-wagową,

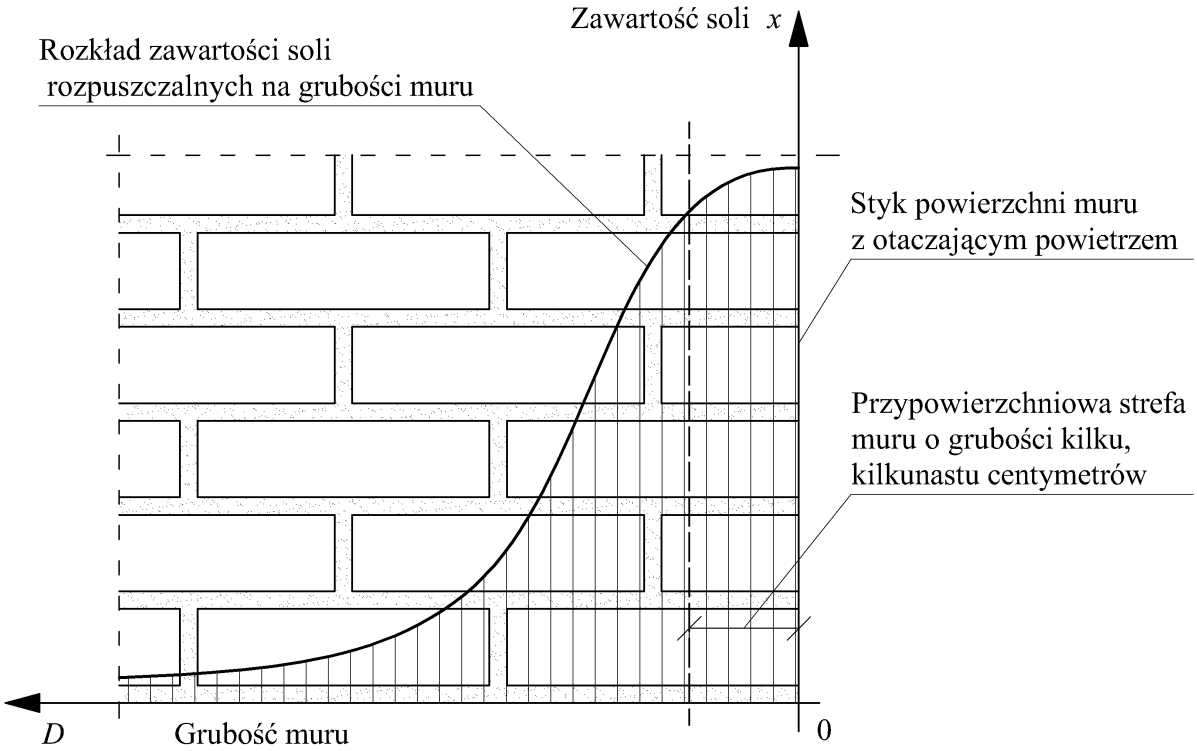
U_m^k - wilgotność masowa określona metodą karbidową.

Rys. 7. Porównanie wyników badań wilgotności masowej otrzymanych metodą suszarkowo-wagową i karbidową

Tablica 4. Wpływ zasolenia na wyniki badań wilgotności masowej stwardniałej zaprawy cementowej [11]

Lp.	Metoda pomiaru	Wilgotność masowa (określona metodą suszarkowo-wagową) U_m [%]	Stężenie soli [%]			Wilgotność masowa określona metodami nieniszczącymi dla krzywej regresji jak dla czystej wody U_m [%]
			Cl^-	SO_3^{2-}	NH_4^+	
1	pojemnościowa	5,3	0,1	0,1	0,03	6,1–6,3
2	pojemnościowa	5,3	0,3	0,3	0,05	7,4–8,4
3	pojemnościowa	5,3	0,5	0,5	0,01	13,2–14,4
4	karbidowa	5,4	0,1	0,1	0,03	5,6–5,9
5	karbidowa	5,4	0,3	0,3	0,05	6,8–7,0
6	karbidowa	5,4	0,5	0,5	0,01	9,3–10,8
7	opornościowa	5,4	0,1	0,1	0,03	7,1–9,3
8	opornościowa	5,4	0,3	0,3	0,05	9,8–12,1
9	opornościowa	5,4	0,5	0,5	0,01	14,1–14,2

Biorąc pod uwagę fakt, że zawartość soli przy powierzchni muru jest największa (rys. 8) oraz, że metodami nieniszczącymi z reguły określamy wilgotność masową w przypowierzchniowej strefie muru, problemu wpływu zasolenia na wyniki pomiarów wilgotności nie należy bagatelizować.



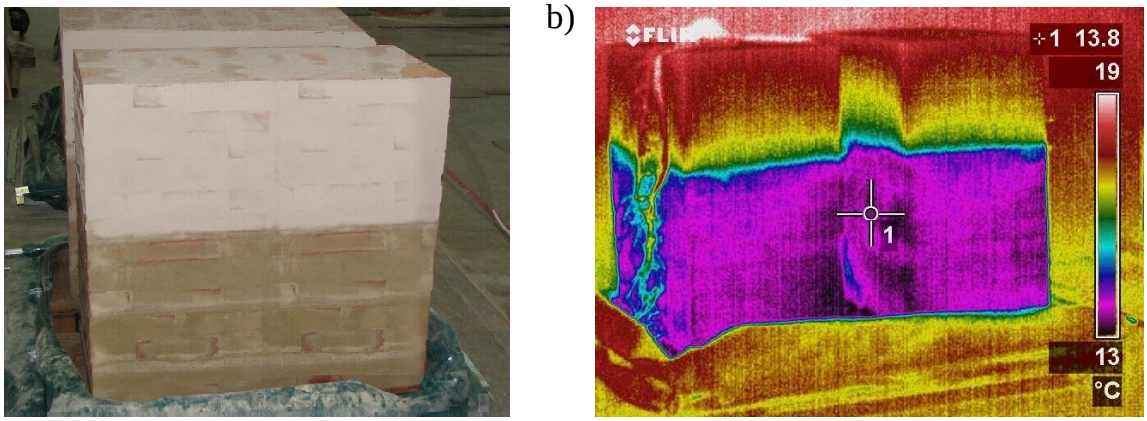
Rys. 8. Rozkład zawartości soli rozpuszczalnych na grubości muru

Stosując metody elektryczne należy wziąć pod uwagę to, że ich dokładność jest mniejsza od metody suszarkowo-wagowej i karbidowej. Dlatego też, wyniki uzyskane za pomocą tych metod należy traktować jako jakościowe, a nie ilościowe. Można zwiększyć dokładność pomiarów, posługując się wyznaczonymi wcześniej krzywymi skalowania. Należy wówczas dobrać odpowiednią krzywą skalowania dla danego materiału i miernika z grupy tzw. „hipotetycznych" krzywych skalowania. Metodykę postępowania przy doborze „hipotetycznych" krzywych skalowania podano między innymi w [3].

Istotnym mankamentem metod elektrycznych i stosowanych w tej metodzie mierników dielektrycznych i mikrofalowych jest brak możliwości precyzyjnego określenia obszaru muru, który odpowiedzialny jest za wskazanie miernika. O ile w miernikach elektrooporowych jest to stosunkowo proste do określenia, bo przepływ prądu zachodzi między elektrodami, o tyle w miernikach dielektrycznych i mikrofalowych nie „widzimy" obszaru muru, który ma wpływ na wskazanie miernika.

Od kilku lat, do lokalizacji miejsc zawilgoconych stosowana jest metoda termowizyjna. Metoda ta bazuje na pomiarze temperatury w promieniowaniu podczerwonym. Istotnym ograniczeniem tej metody poza wysoką ceną urządzenia pomiarowego jest to, że otrzymane rezultaty odnoszą się tylko do powierzchni. Na rysunku 9 przedstawiono przykładowo widok zawilgoconego murowanego elementu w świetle widzialnym i w podczerwieni. Miejsca ciemne (kolor fioletowy na rysunku b) oznaczone jako (1) są zawilgocone i mają niższą temperaturę o około 3°C w stosunku do miejsc suchych (kolor biały na rysunku b).

a) b)

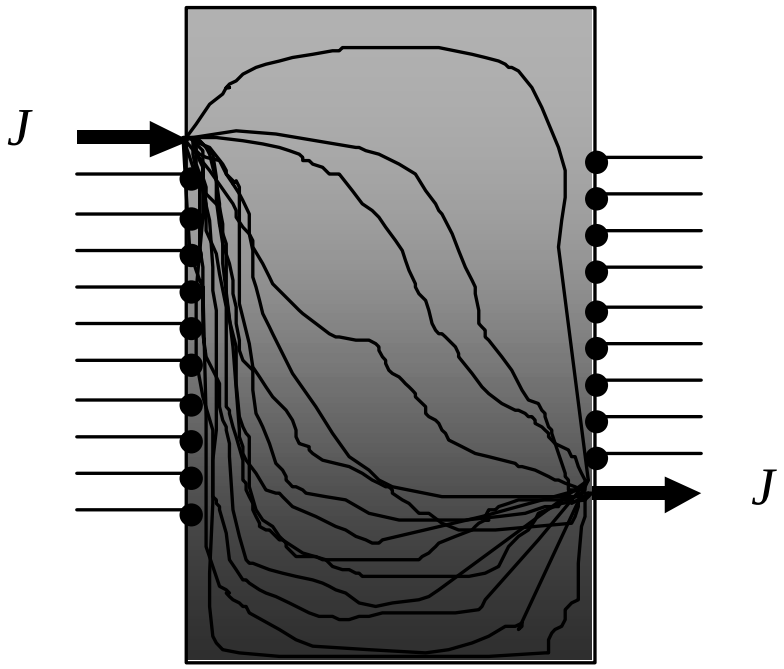


Rys. 9. Widok zawilgoconego muru: a) w świetle widzialnym, b) w podczerwieni

Jak już wcześniej powiedziano, głównym problemem który obecnie występuje w badaniach wilgotności murów jest brak metody pozwalającej na określenie przestrzennego rozkładu wilgotności na grubości muru, bez konieczności pobierania próbek. Opracowanie takiej metody sprawiłoby, że „obraz" rozkładu zawilgocenia wewnątrz muru mógłby być archiwizowany na nośniku informatycznym i porównywany z kolejnymi uzyskiwanymi w dowolnym czasie wynikami badań wilgotności. Metoda byłaby więc bardzo przydatna do kontroli jakości i skuteczności działania zabezpieczeń przeciwwilgociowych, a także skuteczności przyśpieszonego osuszania szczególnie murów grubych, po wykonaniu w nich zabezpieczeń przeciwwilgociowych. Nadzieję na to rokuje, rozwijana w ostatnim czasie, nieniszcząca metoda elektrycznej tomografii impedancyjnej.

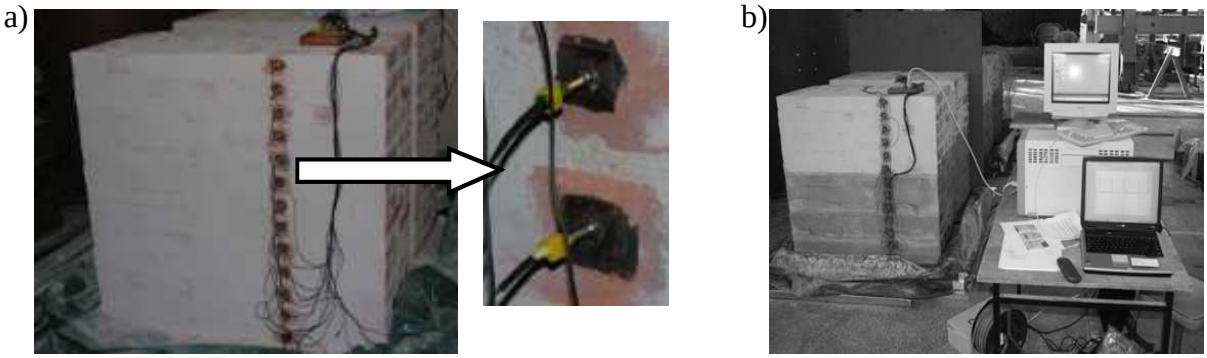
Metoda elektrycznej tomografii impedancyjnej w swoim założeniu ma umożliwić uzyskanie przestrzennego rozkładu wilgotności w murze, na podstawie pomiarów elektrycznych właściwości muru. Metoda ta jest aplikacją ogólnego algorytmu tomografii impedancyjnej do tworzenia obrazu 3D. Jest to technika tworzenia obrazu rozkładu konduktywności wnętrza danego obiektu na podstawie pomiarów rozkładu potencjału na jego powierzchni. Informacja o rozkładzie konduktywności uzyskiwana jest przez wielokrotny pomiar potencjałów na powierzchni obiektu, przy zmiennym położeniu elektrod pobudzających. Podstawowym problemem w tej metodzie jest ustalenie na drodze eksperymentalnej zależności rozkładu konduktywności i wilgotności przy znanej i określonej budowie wewnętrznej badanego elementu. Mur ceglany jako element przestrzenny może być poddany badaniom przez system pomiarowy, którego czujniki (sondy) umieszczone są na przeciwległych powierzchniach ściany. Na rysunku 10 pokazano poglądowo badany obiekt oraz przepływ prądu między elektrodami, dla wybranego kąta projekcji. Obszary ciemniejsze obiektu oznaczają większą przewodność.

Badania pilotażowe pomiaru wilgotności, za pomocą metody elektrycznej tomografii impedancyjnej przeprowadzono, w latach 2007 – 2008, symulacyjnie oraz w warunkach laboratoryjnych na murach widocznych na rysunku 11. Badania te wykonano w Instytucie Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, wspólnie z Instytutem Elektrotechniki w Warszawie, w ramach projektu badawczego 4T07E0529 finansowanego przez MNiSzW.



Rys. 10. Przepływ prądu przez obiekt o niejednorodnej przewodności [18, 23]

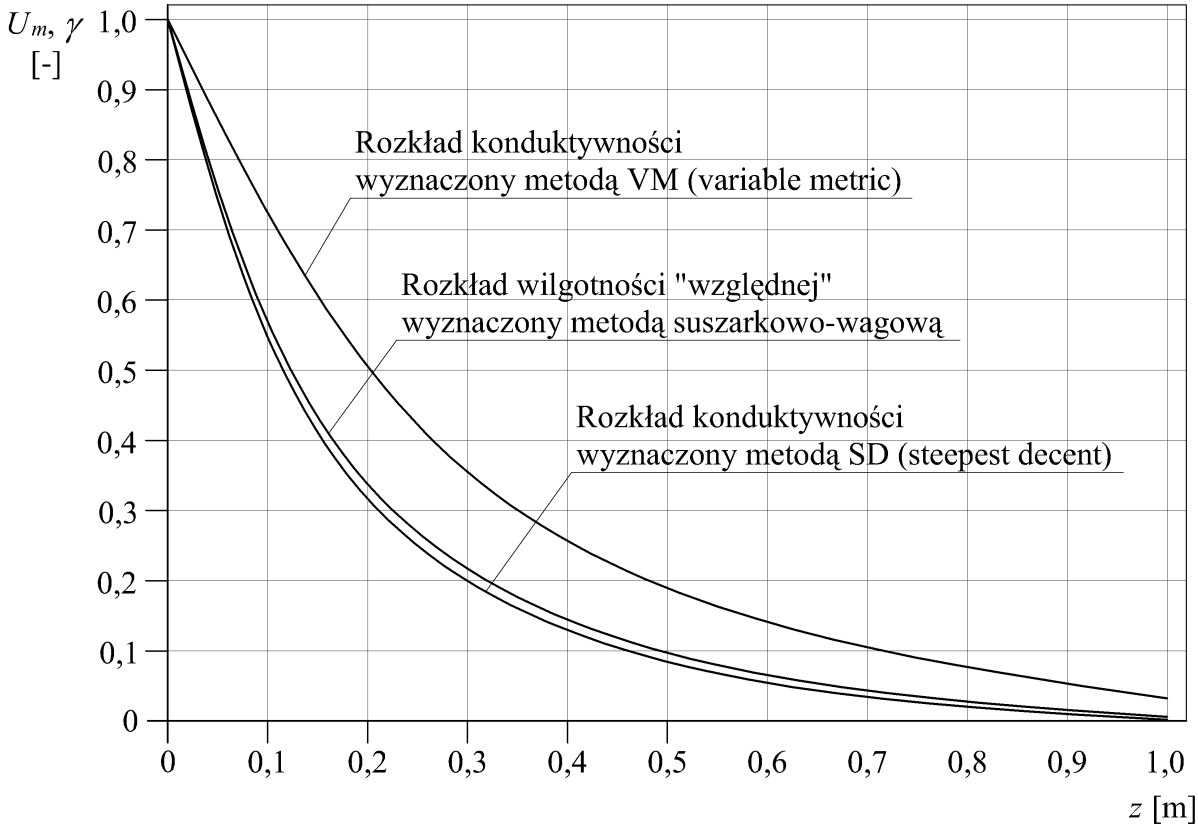
W ramach tego projektu skonstruowano modelowy system elektrycznego tomografu impedancyjnego, sondy pomiarowe, opracowano między innymi system zbierania danych pomiarowych, opracowano model matematyczny i numeryczny rozkładu pola elektrycznego w murze, rozwiązano zagadnienia polegające na znalezieniu rozkładu potencjału wewnątrz badanego elementu i na przetworzeniu informacji brzegowej na obraz wnętrza obszaru badanego, opracowano algorytmy i programy komputerowe stanowiące oprogramowanie zbudowanego tomografu.



Rys. 11. Badania wilgotności murów metodą elektrycznej tomografii impedancyjnej: a) widok elementu próbnego z przyklejonymi sondami, b) widok stanowiska badawczego

Na rysunku 12 przedstawiono w układzie porównawczym uzyskane przykładowe rezultaty przeprowadzonych badań, w postaci względnych rozkładów wilgotności U_m (uzyskanych metodą suszarkowo-wagową) i konduktywności γ na wysokości (z) badanych murów. Na osi pionowej tego rysunku podano wartości względne wilgotności i konduktywności w odniesieniu do ich maksymalnych wartości. Dotychczas wykonane prace badawcze wykazały przydatność metody elektrycznej tomografii impedancyjnej do pomiarów zawilgocenia murów ceglanych. Aby metoda mogła być stosowana w skali technicznej niezbędne jest skonstruowa-

nie, na bazie zdobytych doświadczeń i przeprowadzonych eksperymentów, prototypowej aparatury pomiarowej.



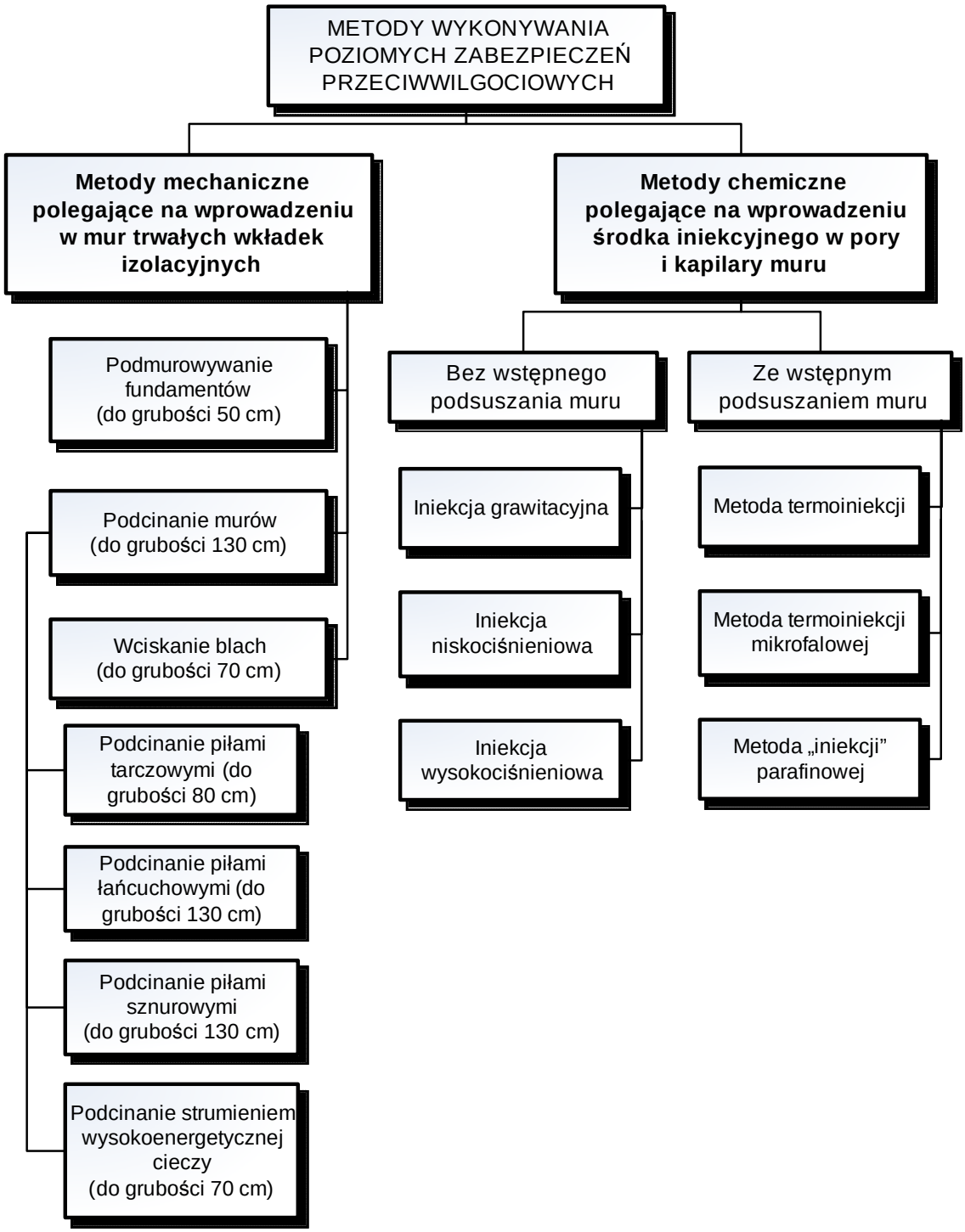
Rys. 12. Porównanie względnych rozkładów wilgotności i konduktywności na wysokości badanego muru [6]

W zakończeniu tego punktu należy podkreślić, że konsekwencją przede wszystkim niedoszacowania „rzeczywistej” wilgotności muru, z powodów zasygnalizowanych wyżej, może być w skrajnym przypadku niewłaściwy wybór metody wykonania zabezpieczenia przeciwwilgociowego i w efekcie nieskuteczność działania zabezpieczenia.

4. Wybrane problemy i spostrzeżenia związane z wykonaniem skutecznych zabezpieczeń przeciwwilgociowych

Wykonanie skutecznego zabezpieczenia przeciwwilgociowego ścian w istniejących obiektach murowanych, w których brak jest odpowiednich izolacji przeciwwilgociowych lub istniejące izolacje są nieskuteczne, jest jednym z najtrudniejszych i najbardziej kosztownych zadań jakie spotyka się podczas robót remontowych. Szczególnie trudne jest wykonanie poziomych zabezpieczeń przeciwwilgociowych w grubych murach ceglanych o grubości ponad 1,0 m i bardzo grubych o grubości większej niż 2,0 m. Mury ceglane o tej grubości występują w wielu obiektach historycznych.

Na rysunku 13 przedstawiono ogólny podział metod wykonywania poziomych zabezpieczeń przeciwwilgociowych w ścianach murowanych obiektów istniejących.

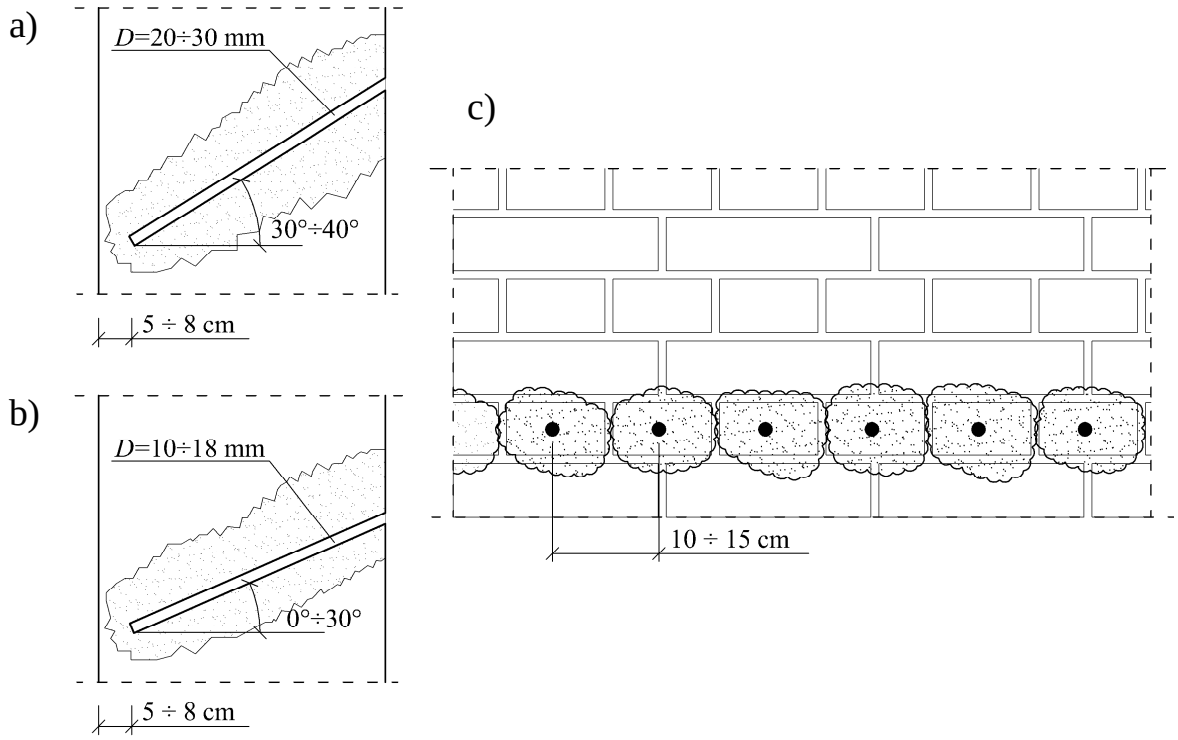


Rys. 13. Ogólny podział metod wykonywania poziomych zabezpieczeń przeciwwilgociowych ścian murowanych w obiektach istniejących

Dla większości metod mechanicznych, opisanych szczegółowo między innymi w [10, 22], podstawowym problemem jest zbyt gruby mur wymagający podcięcia. Jedynie metody podcinania murów piłami mechanicznymi „sznurowymi" i „łańcuchowymi" nadają się do stosowania w murach o grubości przekraczającej 1,0 m. W przypadku ich stosowania, aby nie doprowadzić do powstania w podcinanych ścianach uszkodzeń w postaci zarysowań i pęknięć, należy wcześniej zaprojektować sposób cięcia. Długość i kolejność cięć poszczególnych odcinków ścian należy ustalić na podstawie analizy statyczno-wytrzymałościowej. W wyciętą w murze szczelinę o wysokości kilku centymetrów wprowadza się odcinkami, na zakład, trwałą wkładkę przeciwwilgo-

ciową z tworzyw sztucznych lub bitumicznych, wypełniając ubytki muru w linii cięcia zaprawą wodoszczelną. Stosowanie metod podcinania jest bardzo problematyczne w murach warstwowych, gdyż przy piłowaniu obsypuje się zasypka lub gruz wypełniający „środek" muru. Metody podcinania piłami mechanicznymi są także mało przydatne w murach ceglanych zawierających wtrącenia „kamienne", między innymi z uwagi na szybkie zużywanie się pił.

Jeśli chodzi o metody chemiczne, to praktycznie wszystkie z wymienionych na rysunku 13 nadają się do wykonywania poziomych zabezpieczeń przeciwwilgociowych, w murach grubych i bardzo grubych. Metody te najogólniej mówiąc polegają na nawierceniu w murze nachylonych pod pewnym kątem do poziomu otworów o średnicy od 10 do 30 mm, ułożonych w jednym lub dwóch rzędach i wprowadzeniu w te otwory grawitacyjnie lub ciśnieniowo płynnego preparatu iniekcyjnego hydrofobowego lub uszczelniającego (rys. 14).



Rys. 14. Pozioma przepona przeciwwilgociowa wykonana w murze: a) metodą iniekcji grawitacyjnej, b) metodą iniekcji ciśnieniowej, c) widok przepony w licu muru

Najczęściej stosuje się środki iniekcyjne na bazie: krzemianów alkalicznych, alkalicznych silikonów metylowych, mieszaniny alkalicznych roztworów krzemianowych i alkalicznych silikonów metylowych, krzemowodorów i silikanów oligomerycznych, krzemowodorów rozpuszczalnych w wodzie, mikroemulsji silikonowych, parafin [17,20].

Warto wyjaśnić, że płynne preparaty hydrofobowe, wykazujące zdolność penetracji w strukturę składników muru, hydrofobizują ścianki kapilar i porów. Powodują zmianę kapilarnego kąta zwilżania i tym samym blokują transport wody. Z kolei płynne preparaty uszczelniające zawierają w swoim składzie substancje mineralne o bardzo dużym stopniu rozdrobnienia, na przykład cement, pyły krzemionkowe. Osadzające się w porach i kapilarach substraty powstałe w wyniku reakcji iniektu z wodą zawartą w kapilarach i dwutlenku węgla zawartego w powietrzu zamykają kapilary i tym samym uniemożliwiają dalszy transport wody.

Chcąc uzyskać możliwie najlepszy efekt szczelnej przepony, zastosowany sposób wprowadzenia preparatu musi uwzględniać zarówno własności samego preparatu, jak też budowę muru, jego stan techniczny, porowatość i wilgotność cegły i zaprawy. Jak już wcześniej

wspomniano, w murach historycznych o znacznej grubości bardzo często występują niejednorodności w budowie. W przeszłości bardzo często murowano tylko zewnętrzne fragmenty ścian, a w środek dawano wszelkiego rodzaju zasypki, gruz, itp. Mury takie są najtrudniejszymi do wykonania w nich poziomej przepony przeciwwilgociowej. Nawet wtedy, gdy mur wykonany jest z cegły na całej swojej grubości należy liczyć się z występowaniem wewnętrznych kawern i pustek. Warto wcześniej wykonać wiercenia kontrolne i zastosować endoskop, za pomocą którego można ustalić rzeczywistą budowę muru.

Jeżeli struktura muru zawiera dużo wolnych przestrzeni, na przykład w postaci pustych spoin pionowych, lub jest warstwowa, bezpośrednie wprowadzanie preparatów iniekcyjnych nie daje gwarancji właściwego rozchodzenia się iniektu. Dlatego też, po wykonaniu otworów iniekcyjnych, należy wprowadzić w nie niskoskurczliwe zaprawy trasowe, aplikowane ciśnieniowo, a następnie ponownie rozwiercić otwory i dopiero wtedy wprowadzić preparat iniekcyjny.

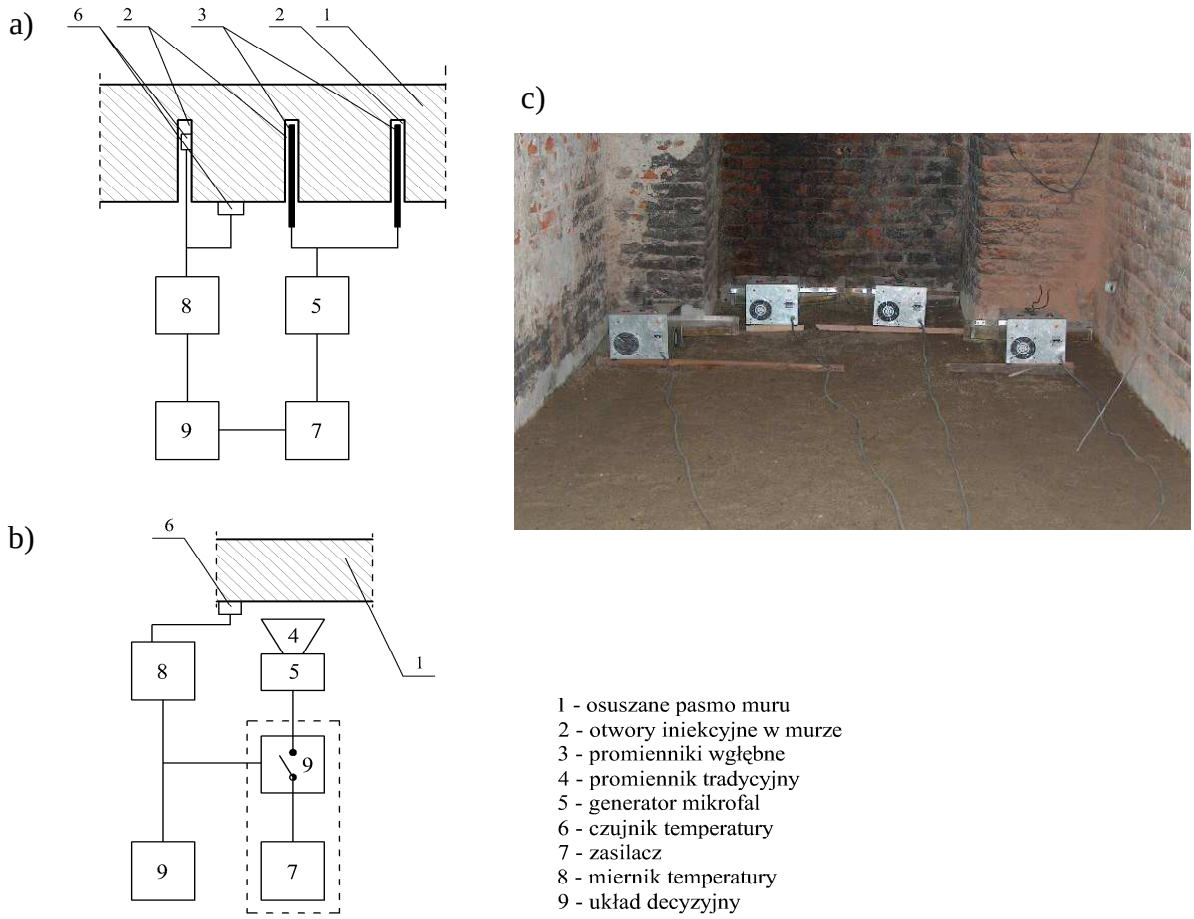
W wyniku wywiercenia otworów iniekcyjnych następuje czasowe zmniejszenie nośności murów. Zmniejszenie przekroju poprzecznego muru po wykonaniu jednego lub dwóch rzędów otworów o średnicy 30 mm co 15 cm wynosi około 20–25% w zależności od długości otworów i grubości ściany. Z reguły ściany murowane mają duży zapas nośności, ale w przypadku murów zarysowanych i popękanych, wykonanych z użyciem zaprawy wapiennej, takie zmniejszenie przekroju może być niebezpieczne. W takim przypadku należy wiercić otwory i sukcesywnie wypełniać je zaprawami trasowymi.

Przy wierceniach o długości przekraczającej 1,0 m (z jednej strony muru), koniecznym jest wykonywanie otworów ze specjalnych stolików. Stoliki te eliminują możliwość nierównoległego wykonywania otworów względem płaszczyzny poziomej i umożliwiają zachowanie jednakowego kąta nachylenia wszystkich otworów. Warunki te nie są możliwe do spełnienia przy tzw. „wierceniu z ręki”, ciężkimi, często górniczymi wiertłami.

Trudności z wprowadzeniem niezbędnej ilości preparatu iniekcyjnego do muru, zapewniającej wykonanie szczelnej przepony poziomej pojawiają się wtedy, gdy w murze zbyt duża ilość porów i kapilar wypełniona jest wodą. Aby uzyskać szczelną przeponę, przynajmniej około 50% porów i kapilar powinno być puste, co odpowiada wilgotności masowej około 8–12%. Dlatego bardzo ważne są w tej sytuacji badania wilgotności muru. Należy zadbać o „prawidłowy” pomiar wilgotności masowej, uwzględniając uwagi podane w punkcie 3 niniejszej pracy.

Gdy wilgotność masowa muru przekracza podany wyżej poziom warto zastosować metodę ze wstępnym podsuszaniem iniekowanej strefy muru [10,13,20], na przykład metodę termo iniekcji mikrofalowej (rys. 15). Temperatura podgrzewanego muru, mierzona na jego powierzchni nie powinna przekraczać 80°C. Iniekcję powinno wykonywać się od razu po zakończeniu podsuszania, gdy mur jest jeszcze ciepły. Preparat ogrzewa się wtedy w murze i zmniejsza się jego lepkość. Lepsza jest wówczas jego penetracja w kapilary i pory cegły i zaprawy. Podczas stygnięcia muru maleje również prężność pary wodnej w kapilarach, przez co tworzy się korzystny gradient ciśnień cząstkowych i wprowadzony preparat iniekcyjny jest „zasysany” do kapilar o małej średnicy.

Aplikowania preparatów iniekcyjnych dokonuje się zazwyczaj sposobem bezciśnieniowego wlewania w nawiercone w murze otwory lub niskociśnieniowo, za pomocą specjalnych pomp, stosując ciśnienie w zakresie od 0,15–0,35 MPa. Należy przestrzegać zasady, aby aplikowane ciśnienie nie było większe od 1/3 wytrzymałości najsłabszego elementu muru.



Rys.15. Osuszanie mikrofalowe iniekowanej strefy muru: a) promiennikami wgłębnymi, b) promiennikami tradycyjnymi, c) widok promienników tradycyjnych na tle osuszanego muru (fot. C. Magott)

Należy ewidencjonować ilość dostarczanego do każdego otworu preparatu iniekcyjnego. Tylko w ten sposób można wychwycić „ucieczkę” preparatu iniekcyjnego, na przykład w niewypełnione wewnętrzne pustki i kawerny w murze, lub zlokalizować fragmenty muru „nie przyjmujące” preparatu iniekcyjnego.

W murach grubych i bardzo grubych dobre rezultaty daje stosowanie aplikatorów o boczno-czołowym wypływie iniektu i długości równej długości wywierconego otworu. Pozwala to na obniżenie ciśnienia podawanego preparatu iniekcyjnego i umożliwia bardziej równomierne jego rozchodzenie się w murze.

Po wykonaniu iniekcji muru należy ponownie, w sposób ciśnieniowy, wypełniać otwory zaprawą niskoskurczową, pozostawiając u wylotu otworu „menisk” wklęsły głębokości około 1,5 cm licząc od lica ściany. Pozwala to na późniejsze uzupełnienia konserwatorskie lica.

Po wykonaniu poziomych i pionowych zabezpieczeń przeciwwilgociowych w zawilgoconych murach pozostaje problem pozostałej w murze wilgoci. W przypadku murów grubych, mokrych i mocno zawilgoconych, czas ich naturalnego wysychania, po prawidłowym wykonaniu tych zabezpieczeń, może wynosić od kilku do kilkunastu lat [3]. Czas ten warunkowany jest istnieniem skutecznie działającej wentylacji w pomieszczeniach obiektu. Można go skrócić, stosując mechaniczne osuszenie [3, 5, 9, 14]. Koszt osuszenia mechanicznego może być znaczny i jest zależny od grubości i od stopnia zawilgocenia muru.

Alternatywą dla przyśpieszonego mechanicznego osuszenia może być tynk charakteryzujący się wysoką przepuszczalnością pary wodnej, dużą powierzchnią rozwiniętą i dużą porowatością. Warunki te spełnia tynk renowacyjny, „wyprowadzający” wilgoć z muru do pomieszczenia

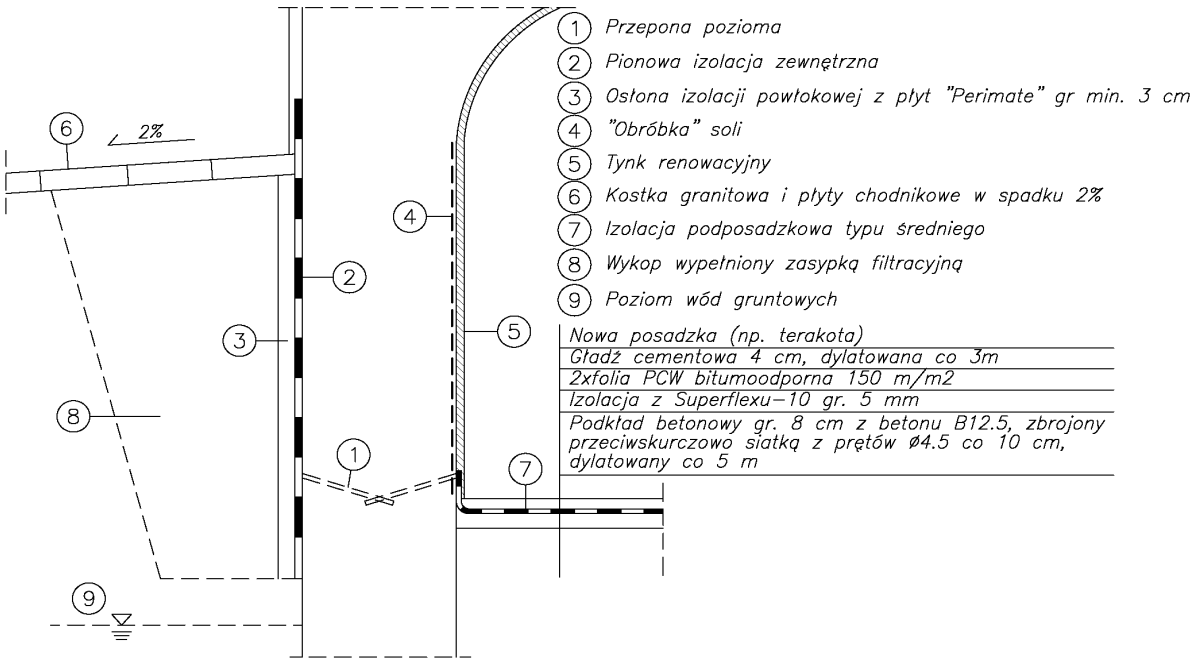
i pozwalający na swobodne krystalizowanie się wewnątrz jego porów soli [8]. W ten sposób nie powstają na powierzchni muru wykwity solne szpecące wygląd ścian. Ponieważ tynki te „wyprowadzają” wilgoć z muru do pomieszczeń w których się znajdują, ich wykonanie wiąże się z równoczesnym rozwiązaniem problemu skutecznej wentylacji tych pomieszczeń.

W przeszłości przed ułożeniem tynku na silnie zasolonych murach preferowano wykonanie chemicznej „obróbki soli”. Związkami chemicznymi dokonywano neutralizacji lub przekształcenia soli z łatwo rozpuszczalnych w sole trudno rozpuszczalne albo nierozpuszczalne. Często stosowano w tym celu sześciufluorokrzemian ołowiowy, albo chlorek baru, lub wodorotlenek baru [5]. Ze względu na trujący charakter środków na bazie ołowiu i baru, obecnie preferowane jest przede wszystkim stosowanie tynków renowacyjnych magazynujących w swojej strukturze wykrystalizowane sole. Nic nie stoi na przeszkodzie, aby ułożenie tych tynków poprzedzić mechanicznymi zabiegami, polegającymi na ręcznym usunięciu wykwitów solnych i ewentualnym zastosowaniu kompresów odsalających, zwiększającymi trwałość tynku.

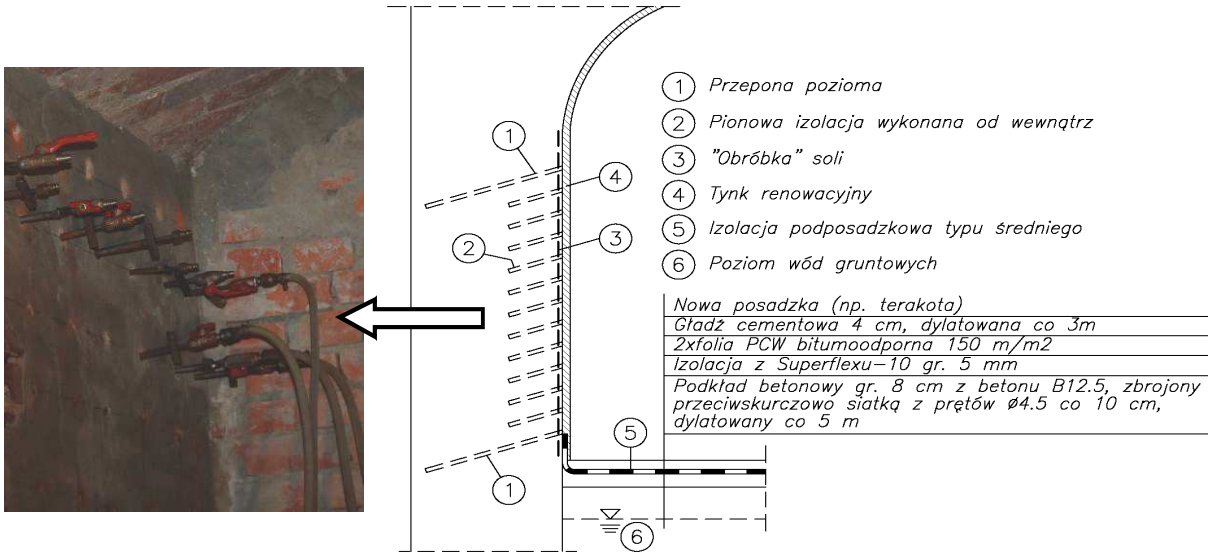
Jeśli ze względów konserwatorskich nie można na powierzchni ściany ułożyć tynku renowacyjnego, bo trzeba zachować lico ceglane ściany, należy wybrać istniejącą zaprawę w spoinach na głębokość 2–3 cm i wyspoinować mur zaprawą renowacyjną o dużej porowatości. Po zapełnieniu porów tej zaprawy wykrystalizowanymi solami, należy powtórzyć zabieg „wymiany” zaprawy w spoinach.

Jak wcześniej powiedziano, wykonanie skutecznego poziomego zabezpieczenia przeciwwilgociowego ścian murowanych w obiektach istniejących jest jednym z najtrudniejszych i najbardziej kosztownych zadań remontowych. Trudne jest też wykonanie skutecznego pionowego zabezpieczenia przeciwwilgociowego ścian w takich obiektach, zwłaszcza wtedy, gdy z różnych względów nie można odkopać zewnętrznej powierzchni ściany.

Przykładowo, na rysunkach 16 i 17 pokazano poglądowe schematy kompleksowego zabezpieczenia przeciwwilgociowego ściany murowanej, w przypadku, gdy ścianę tę można odkopać od zewnątrz (rys. 16) i gdy brak jest możliwości jej odkopania od zewnątrz (rys. 17).



Rys.16. Poglądowy schemat kompleksowego zabezpieczenia przeciwwilgociowego murowanej ściany zewnętrznej, którą można odkopać od zewnątrz [1, 2]



Rys.17. Poglądowy schemat kompleksowego zabezpieczenia przeciwwilgociowego murowanej ściany zewnętrznej, której nie można odkopać od zewnątrz [1, 2] (fot. C. Magott)

Odkopanie ścian zewnętrznych wiąże się z czasowym lub trwałym zmniejszeniem nośności fundamentów, w wyniku zmniejszenia naziomu. Aby zmniejszyć ryzyko uszkodzenia obiektu wykop należy wykonywać odcinkami, pamiętając o odpowiednim jego zabezpieczeniu.

Podczas wykonywania zabezpieczeń przeciwwilgociowych w obiektach istniejących należy liczyć się także ze zmniejszeniem nośności fundamentów, w wyniku obniżenia poziomu posadzki w piwnicach. Taki przypadek występuje wtedy, gdy zmieniana jest funkcja piwnic i występuje potrzeba zwiększenia wysokości pomieszczeń piwnicznych. Należy wówczas sprawdzić nośność istniejącego fundamentu przy zmniejszonym naziomie.

Przy wykonywaniu na zewnętrznej powierzchni ścian zewnętrznych izolacji pionowych z mas bitumicznych lub mikrozapraw uszczelniających na bazie cementu bezwzględnie należy sprawdzić stan i nośność podłoża na odrywanie. Materiały te mogą być układane tylko na odpowiednio przygotowanym i „nośnym" podłożu.

5. Podsumowanie

Podczas realizacji zabezpieczeń przeciwwilgociowych ścian murowanych w obiektach istniejących napotykamy na szereg problemów, których prawidłowe rozwiązanie decyduje w dużej mierze o skuteczności działania wykonanych zabezpieczeń.

W pracy zasygnalizowano wiele takich problemów, począwszy od tych które występują obecnie w badaniach wilgotności murów różnymi metodami. Uznano, że warto o nich wiedzieć, bo przecież na bazie rezultatów badań wilgotnościowych podejmowane są ważne decyzje w kwestii wyboru odpowiedniej metody zabezpieczenia przeciwwilgociowego.

Jeśli chodzi natomiast o problemy związane bezpośrednio z wykonaniem skutecznych zabezpieczeń przeciwwilgociowych, to skupiono się przede wszystkim na poziomych zabezpieczeniach w murach grubych realizowanych obecnie najczęściej metodami iniekcyjnymi.

Należy mieć nadzieje, że zapoznanie się z przedstawionymi w niniejszej pracy problemami i spostrzeżeniami przyczyni się do bardziej świadomej realizacji jednych z najtrudniejszych i najbardziej kosztownych robót remontowych.

Literatura

1. Adamowski J., Hoła J., Matkowski Z.: Problemy remontowe zawilgoconych monumentalnych obiektów barokowych, Renowacje i Zabytki, nr 1 (13), 2005.
2. Adamowski J., Hoła J., Matkowski Z.: Probleme und Lösungen beim Feuchtigkeitsschutz des Mauerwerks von Baudenkmalern am Beispiel zweier grosser Barockbauten in Wrocław, Bautechnik, 2005.
3. Adamowski J., Hoła J., Matkowski Z.: Osuszanie i renowacja budynków zalanych wodą. XXII Ogólnopolska Konferencja „Warsztat Pracy Projektanta", Szczyrk 2007.
4. Cammerer J.S.: Izolacje ciepłochronne w przemyśle. Arkady, Warszawa 1967.
5. Frossel F.: Osuszanie murów i renowacja piwnic. Polcen, Warszawa 2007.
6. Hoła J., Matkowski Z., Schabowicz K.: Investigation of rising damp in brick walls using impedance tomography. Modern building materials, structures and techniques. The 9th International Conference. Vilnius 2007.
7. Hoła J., Matkowski Z., Schabowicz K.: New Method of Investigation of Rising Damp in Brick Walls by means of Impedance Tomography. e-Journal of Nondestructive Testing&Ultrasonics, vol. 13, nr 11. 2008.
8. Instrukcja WTA. Merkblatt 2-9-04/D Sanierputzsysteme.
9. Karyś J., Marszałek K.: Bezinwazyjne osuszanie obiektów budowlanych. XLIV Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZiTB, Krynica 1998.
10. Karyś J.: Sposoby osuszania budynków. W: Ochrona budynków przed korozją biologiczną. Arkady, Warszawa 2001.
11. Karyś J., Zwierzyński K.: Pomiar wilgotności przegród budowlanych metodami elektrycznymi-wybrane problemy. V Warsztaty Rzeczoznawcy Mykologiczno-Budowlanego. PSMB, Wrocław 2006.
12. Matkowski Z., Pawlonka A.: Analiza nieniszczących metod badania wilgotności betonu. Praca doktorska, Politechnika Wrocławska, 1982,
13. Olifierowicz J.: Doświadczenia ze stosowania metod elektrofizycznych, iniekcyjnych i termoiniekcyjnych do osuszania murów, XLIV Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 1998.
14. Pieniążek Zb. i in.: Analiza i ocena skuteczności stosowanych metod osuszania ścian. Inżynieria i Budownictwo, nr 9, 1995.
15. Płoński W.: Problemy wilgoci w przegrodach budowlanych, Arkady, Warszawa 1968.
16. Rebinder P.A.: Fizyko-chimiczeskaja mechanika kak osnova zakreplenija gruntov v dorożnom stroitelstwie o proizvodstvie stroitelnych materiałov na osnove gruntov. MGU. Moskwa 1961.
17. Rokiel M.: Hydroizolacje w budownictwie. Poradnik. Dom Wydawniczy Medium, Warszawa 2006.
18. Sikora J., Wójtowisz S., Nita K., Filipowicz F., Biernat K.: The system for impedancje Tomography for Measuring the Distribution of Moisture In Walls. VII International Workshop Computational Problems of Electrical Engineering. Odessa 2006.
19. Skibiński S.: Sole rozpuszczalne w wodzie. Renowacje nr 10, 2000.
20. Styrczula K., Magott C.: Osuszanie, wykonywanie izolacji przeciwwilgociowych i przeciwwodnych oraz zabezpieczanie konstrukcji murowych przed korozją biologiczną. XXII Ogólnopolska Konferencja „Warsztat Pracy Projektanta". Szczyrk 2007.
21. Wójcik R.: Metody osuszania murów. Izolacje nr 9, 2000
22. Wójcik R.: Ochrona budynków przed wilgocią i wodą gruntową. W: Budownictwo ogólne, Fizyka budowli, rozdz. 11, Arkady, Warszawa 2006.
23. Wójtowicz S, Hoła J., Biernat K., Grzywacz T., Sikora J.: Rozproszony system akwizycji i przetwarzania danych w tomografii impedancyjnej. 35 Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących. Szczyrk, 2006.
24. Wyrwał, J. Świrska J.: Problemy zawilgocenia przegród budowlanych. Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, Studia z zakresu Inżynierii nr 44, 1998.