

POLITECHNIKA KRAKOWSKA  
WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ

Praca doktorska

WPŁYW ZAWILGOCENIA  
MURÓW CEGLANYCH NA ICH NOŚNOŚĆ  
I ODKSZTAŁCALNOŚĆ PRZY ŚCISKANIU

mgr inż. MICHAŁ WITKOWSKI

Stypendysta w ramach projektu „*Doctus – Małopolski fundusz stypendialny dla doktorantów*” współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego (2011-2014r.).

Laureat IV edycji stypendium naukowego Miasta Krakowa dla szczególnie uzdolnionych studentów i uczestników studiów doktoranckich krakowskich uczelni wyższych i innych jednostek naukowo – badawczych (2011r.).

Promotor: dr hab. inż. PIOTR MATYSEK, prof. PK

Kraków, czerwiec 2024

*Składam najserdeczniejsze wyrazy wdzięczności promotorowi  
**Panu dr hab. inż. Piotrowi Matyskowi, prof. PK**  
za lata owocnej współpracy, za wyrozumiałość, za zaangażowanie,  
za poświęcony czas oraz za profesjonalną opiekę naukową.*

*Michał Witekowski*

## Spis treści

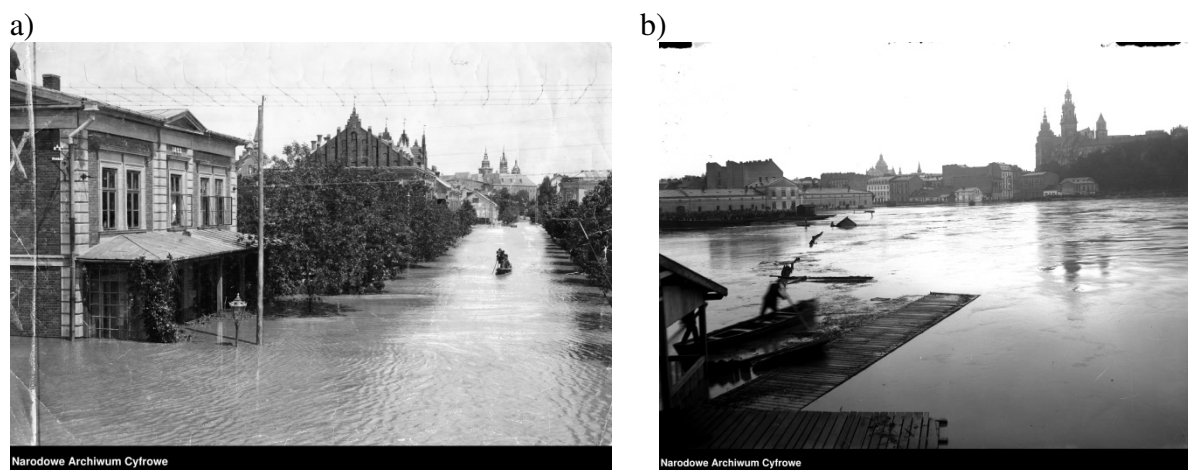
1.	Wprowadzenie .....	5
2.	Wykaz podstawowych oznaczeń i symboli .....	10
3.	Cel, tezy i zakres pracy .....	12
4.	Przegląd stanu wiedzy .....	14
4.1.	Mechanizm narastania uszkodzeń w materiałach murowych i murach wskutek ich zawilgocenia .....	14
4.2.	Badania wytrzymałościowe materiałów murowych i murów w różnych stanach zawilgocenia .....	18
4.2.1.	Badania cegieł ceramicznych .....	18
4.2.2.	Badania zapraw do murów .....	22
4.2.3.	Badania murów .....	25
4.3.	Podsumowanie dotychczasowego stanu wiedzy .....	29
4.4.	Zalecenia normowe .....	31
5.	Badania własne cegieł i zapraw oraz analiza wyników .....	33
5.1.	Badania cegieł ceramicznych z różnych okresów historycznych .....	33
5.1.1.	Charakterystyka cegieł .....	33
5.1.2.	Badania wytrzymałości na ściskanie .....	36
5.1.3.	Badania gęstości, nasiąkliwości, porowatości i struktury porów .....	39
5.1.4.	Wpływ parametrów charakteryzujących strukturę cegieł na ich wytrzymałość w stanie silnego zawilgocenia .....	45
5.1.5.	Metoda ultradźwiękowa w ocenie wytrzymałości zawilgoconych cegieł .....	51
5.1.6.	Wpływ wilgotności na twardość powierzchniową cegieł .....	57
5.2.	Badania różnych rodzajów zapraw stosowanych w konstrukcjach murowych .....	58
5.2.1.	Charakterystyka badanych zapraw .....	58
5.2.2.	Badania wytrzymałości zapraw pobranych ze spoin murów metodą stempla oraz badania uzupełniające .....	62
5.2.3.	Ocena porowatości zapraw i struktury porów .....	67
5.2.4.	Wpływ nasiąkliwości, porowatości i struktury porowatości zapraw na spadek ich wytrzymałości przy silnym zawilgoceniu .....	71
6.	Badania filarów ceglanych wyciętych z konstrukcji .....	77
6.1.	Przygotowanie filarów do badań .....	77
6.2.	Opis badań wytrzymałościowych .....	81

6.3.	Wyniki badań filarów w stanie powietrzno-suchym i mokrym .....	82
6.4.	Analiza wpływu zawilgocenia na wytrzymałość i odkształcalność murów .....	85
7.	Badania próbek rdzeniowych pobranych z murów .....	91
8.	Ocena wpływu zawilgocenia murów na ich wytrzymałość na podstawie badań próbek cegieł i zapraw pobranych z konstrukcji .....	97
8.1.	Zależności do określenia wpływu wytrzymałości cegieł i zaprawy na wytrzymałość murów.....	97
8.2.	Wytrzymałość na ściskanie murów w stanie mokrym.....	100
9.	Analiza nośności murów ceglanych w stanie silnie zawilgoconym.....	106
9.1.	Założenia analizy.....	106
9.2.	Określenie nośności zawilgoconych ścian ceglanych w budynkach istniejących .....	107
10.	Podsumowanie.....	112
10.1.	Podsumowanie badań i analiz .....	112
10.2.	Weryfikacja tez pracy.....	114
10.3.	Kierunki dalszych prac badawczych .....	115
	Bibliografia .....	117
	Streszczenie.....	124
	Summary .....	126
	Spis tabel .....	128
	Spis rysunków .....	130



## 1. Wprowadzenie

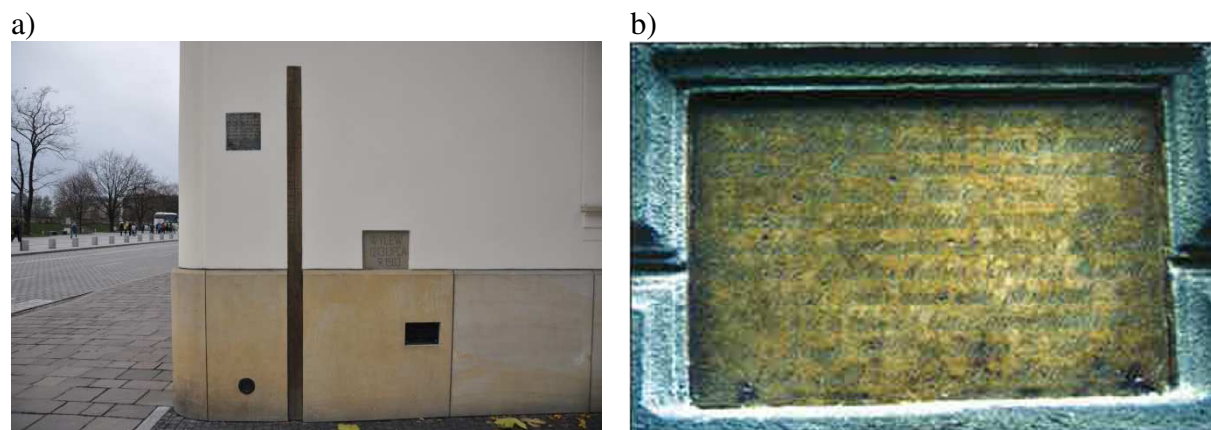
W budynkach o konstrukcji ceglanej (w tym budynkach zabytkowych) wznoszonych na przestrzeni wielu wieków z reguły nie wykonywano izolacji przeciwwodnych i przeciwwilgociowych. W związku z tym, ściany ceglane w tych obiektach mogą ulegać silnemu zawilgoceniu. Zawilgocenie występuje na skutek podciągania kapilarnego wody z gruntu. Podciąganie kapilarne w murach ceglanych może sięgać kilku metrów ponad poziom terenu. Grube mury charakteryzują się dużą chłonnością wody z gruntu i stosunkowo niewielką ilością wody odparowanej z powierzchni. Wzrost wilgotności ścian w budynkach murowych może być spowodowany również zalewaniem ścian niewłaściwie odprowadzonymi wodami opadowymi, a także kondensacją pary wodnej i mokrymi procesami budowlanymi. Niebezpieczne ze względów konstrukcyjnych są sytuacje wyjątkowe, takie jak zalanie murów (czasem wielotygodniowe) w trakcie powodzi.



Rys. 1.1 Powódź w Krakowie: a) zalana wodą ul. Wolska (obecnie ul. Piłsudskiego), na pierwszym planie budynek Akcyzy Miejskiej, Gmach Towarzystwa Gimnastycznego "Sokół" – 1903r.; b) widok Krakowa od strony Wisły, z prawej strony widoczny Wawel – 1925r.

W literaturze przedmiotu [7], [76] można znaleźć informacje, że do 2010 roku w Krakowie było ponad siedemdziesiąt osiem powodzi – rysunek 1.1. Do dziś zachowały się w wielu miastach tablice powodziowe, umieszczone na ścianach obiektów zabytkowych, wskazujące wysoki poziom zalania murów. Siedemnaście takich tablic zachowało się w Krakowie [111]. Informację o najstarszej powodzi upamiętnionej na tablicy powodziowej datowanej na 1593r., można znaleźć na murach przy Klasztorze Norbertanek znajdującym się

przy ul. T. Kościuszki w Krakowie. Kolejnymi przykładami są tablice na narożniku muru pozostałego po dawnym browarze królewskim przy placu Na Groblach wskazujące poziom wód powodziowych w latach 1813, 1876 i 1903. Podczas powodzi w 1813 roku poziom wody wynosił około 220 cm powyżej poziomu terenu – rysunek 1.2a. Z kolei na budynku nr 9 przy ul. Koletek widnieje znak umieszczony na wysokości 1,66 m nad poziomem ulicy. Do tej wysokości sięgała w tym rejonie powódź w 1813 roku – rysunek 1.2b.



Rys. 1.2 Tablice powodziowe: a) na budynku przy Placu na Groblach w Krakowie, b) znak powodziowy na budynku przy ul. Koletek w Krakowie - według [111]

Powódź mająca miejsce w 1813 roku była uważana za największą klęskę tego typu w dziejach miasta. Ostatnie duże powodzie nawiedziły Kraków w latach 1997 i 2010 [110]. Powódź z 1997 roku objęła swym zasięgiem nie tylko Polskę lecz również kraje sąsiednie i uważana była za powódź tysiąclecia. Zalanych zostało wiele miast i terenów podmiejskich. Natomiast już w 2010 roku stany wody w Wiśle przekraczały stany z 1997 roku. Ocenę obiektów budowlanych po powodzi przedstawiono w pracy [41]. Biorąc pod uwagę szybkie zmiany klimatu i związane z tym gwałtowne zjawiska atmosferyczne, można się spodziewać, że klęski powodzi będą się powtarzać z dużą częstotliwością. Przykłady bardziej lub mniej lokalnych podtopień powtarzają się w Polsce niemal każdego roku.

Mury ceglane w kontakcie z wodą mogą osiągnąć bardzo wysoki stan zawilgocenia – zmierzający do stanu pełnego nasycenia wodą. Poziom wilgotności muru zależy m.in. od: struktury cegieł, rodzaju zaprawy, czasu oddziaływania wody (wilgoci), warunków środowiskowych (temperatura, wilgotność powietrza, obecność lub brak ewentualnych izolacji), grubości muru, rodzaju i grubości warstw wykończeniowych. Pomiary w budynkach zabytkowych po powodziach wykazują wilgotności ścian ceglanych na poziomie od

kilkunastu do ponad 20% [35], [37]. *J. Jasieńko i Z. Matkowski* podali w pracy [42], że po powodzi w 1997 roku wilgotność murów w obiektach zabytkowych Wrocławia wynosiła nawet 24%. Wzrost wilgotności w stosunku do stanu przed powodzią może być co najmniej kilkukrotny.

Duże zawilgocenie murów ceglanych może wynikać również z innych sytuacji wyjątkowych takich jak zalanie konstrukcji murowej w trakcie akcji gaśniczej spowodowanej pożarem, zalanie wodami opadowymi konstrukcji murowej podczas przebudowy obiektu na skutek niewłaściwego odprowadzenia wód opadowych lub braku zabezpieczenia konstrukcji. Drastycznym przykładem jest demontaż dachów i pozostawienie odsłoniętych konstrukcji ceglanych na dłuższy czas jako niezabezpieczonych przed opadami atmosferycznymi.

Skutkiem znacznego zawilgocenia ścian ceglanych jest pogorszenie warunków eksploatacyjnych w budynkach, a także obniżenie trwałości i nośności murów.

W trakcie oceny stanu technicznego budynków, które znalazły się w stanie silnego zawilgocenia, pojawia się pytanie o wpływ zawilgocenia na nośność ścian ceglanych. Powszechne jest przekonanie, że tradycyjne konstrukcje ceglane charakteryzują się „dużymi zapasami nośności” i że obniżenie nośności na skutek dużego zawilgocenia murów nie stanowi zagrożenia bezpieczeństwa. Stwierdzenie to jest prawdziwe w odniesieniu do wielu obiektów wzniesionych w przeszłości, o czym świadczy ich dobry stan techniczny pomimo wielokrotnego narażenia na zalanie np. wskutek powodzi. Coraz częściej jednak obiekty o konstrukcji ceglanej są przebudowywane. Zmianie ulegają funkcje użytkowe obiektów. Wykonywane są nadbudowy, co związane jest ze zwiększeniem obciążeń na ściany. W trakcie przebudowy często następuje powiększenie otworów i redukcja przekroju filarów (wykonywanie witryn w ścianach parteru), co determinuje bardzo znaczący wzrost obciążeń i wyczerpania w konstrukcji ceglanej [53]. Dodatkowo należy uwzględnić fakt przyrostu ciężaru własnego konstrukcji na skutek zawilgocenia. W takich przypadkach ewentualna redukcja wytrzymałości muru na skutek silnego zawilgocenia może mieć istotne znaczenie dla bezpieczeństwa konstrukcji.

Istotne znaczenie ma wpływ silnego zawilgocenia murów na ich nośność także w sytuacjach przejściowych – w trakcie remontu budynków, kiedy może dojść do lokalnego czasowego dociążenia fragmentu konstrukcji murowej – na przykład przy wymianie stropów. Często są przypadki pozostawienia, ze względów konserwatorskich, jedynie oryginalnej ściany frontowej lub/i rozgraniczającej – część konstrukcji jest wyburzana, a na jej miejscu jest realizowana nowa struktura, z którą pozostawione ściany są docelowo łączone.

Do czasu realizacji nowej konstrukcji pozostawione ściany są stężane konstrukcją tymczasową, ale warunki ich pracy generują wysokie poziomy wyteżenia i nawet okresowe silne zwilgocenie może mieć wpływ na stan bezpieczeństwa.

W zależności od zawartości wilgoci wyróżnia się pięć stopni zawilgocenia murów – patrz tabela 1.1.

Tabela 1.1 Stopnie zawilgocenia murów wg [36]

Stopień	Wilgotność masowa [%]	Mur
I	0 - 3	o dopuszczalnej wilgotności
II	3 - 5	o podwyższonej wilgotności
III	5 - 8	średnio zawilgocony
IV	8 - 12	mocno zawilgocony
V	> 12	mokry

Pomiar zawilgocenia murów przeprowadza się różnymi metodami, które szczegółowo opisano w pracach [8], [36], [38], [42], [44], [45], [103], [104], [106], [112]. Metody te można podzielić na bezpośrednie i pośrednie. W metodach bezpośrednich wynik jest otrzymywany na podstawie bezpośredniego wskazania narzędzia pomiarowego – za jedną z najdokładniejszych metod tego typu uważana jest metoda suszarkowo-wagowa. Coraz częściej do określenia stopnia zawilgocenia murów wykorzystuje się metody pośrednie, w których ustala się określoną wielkość przeliczaną następnie na wilgotność muru. Do tej grupy metod zalicza się metody chemiczne (wskaźnikowa, karbidowa), metody elektryczne (elektrooporowa, mikrofalowa, dielektryczna), metody jądrowe (neutronowa, prześwietlanie promieniowaniem  $\gamma$ ), metody oparte na pomiarze własności cieplnych. Można również przy pomocy wybranych metod śledzić proces narastania wilgoci w murach bądź ich schnięcia.

W sytuacjach zalewania murów wodą transport wilgoci odbywa się głównie na skutek wnikania wody przez powierzchnię murów i kapilarnego podciągania. Ponieważ cegły ceramiczne i zaprawy są materiałami kapilarno-porowatymi o dominującym udziale porów otwartych, transport wilgoci może odbywać się w ścianach bardzo intensywnie. Przy braku lub niewłaściwej izolacji przeciwwilgociowej ścian woda może być podciągana na wysokość kilku metrów (A. Abdrahman [1], A. Hoła [32], J. Hoła i in. [34], J. Jasieńko i Z. Matkowski

[42], *T. Stryzewska* [99]) i obejmować całą grubość muru. Jest to zjawisko bardzo niekorzystne – proces suszenia murów jest wydłużony w czasie, co rodzi szereg niedogodności natury użytkowej (*J. Adamowski i Z. Matkowski* [2]).

Zjawisko transportu i rozkładu wilgoci w murach ceglanych zostało opisane w licznych krajowych i zagranicznych publikacjach naukowych [28], [113], [114]. Opracowywane są złożone modele obliczeniowe, które pozwalają uwzględniać na przykład zjawisko wpływu krystalizacji soli w porach materiałów murowych i degradacji ich struktury związanej z tymi procesami [47]. W dalszym ciągu jednak bazą do oceny wpływu wody na mury ceramiczne pozostają badania doświadczalne, które będą również podstawą niniejszej dysertacji.

## 2. Wykaz podstawowych oznaczeń i symboli

### Litery alfabetu łacińskiego

$A$	– pole przekroju poprzecznego ściany lub filara
$E$	– moduł sprężystości muru
$K$	– współczynnik, którego wartość zależy od rodzaju i grupy elementów murowych oraz rodzaju zaprawy murarskiej
$N_{Rd}$	– nośność muru
$P$	– siła ściskająca
$W$	– sumaryczna objętość porów
$f$	– wytrzymałość na ściskanie muru – wartość średnia
$f_b$	– znormalizowana wytrzymałość elementu murowego na ściskanie
$f_B$	– wytrzymałość na ściskanie elementów murowych – wartość średnia
$f_{DPT}$	– wytrzymałość zaprawy określona w teście DPT
$f_k$	– wytrzymałość charakterystyczna muru na ściskanie
$f_m$	– średnia wytrzymałość zaprawy murarskiej na ściskanie
$h$	– wysokość ściany ceglanej w świetle stropów
$k_a$	– stosunek cechy sprężystości muru w stanie mokrym do cechy sprężystości muru w stanie powietrzno-suchym
$k_b$	– współczynnik korekcyjny znormalizowanej wytrzymałości na ściskanie elementów murowych – stosunek wytrzymałości na ściskanie elementów murowych w stanie mokrym do wytrzymałości elementów murowych w stanie powietrzno-suchym
$k_E$	– współczynnik korekcyjny modułu sprężystości muru – stosunek modułu sprężystości muru w stanie „mokrym” do modułu sprężystości muru w stanie powietrzno-suchym
$k_{\mathcal{E}}$	– współczynnik korekcyjny odkształceń muru – stosunek odkształcenia przy maksymalnym naprężeniu w stanie „mokrym” do odkształcenia przy maksymalnym naprężeniu w stanie powietrzno-suchym
$k_{ma}$	– współczynnik korekcyjny dla muru – stosunek wytrzymałości na ściskanie muru w stanie „mokrym” do wytrzymałości muru w stanie powietrzno-suchym

- $k_B$  – współczynnik korekcyjny wytrzymałości na ściskanie cegieł z uwagi na zawilgocenie
- $k_M$  – współczynnik korekcyjny wytrzymałości na ściskanie zaprawy z uwagi na zawilgocenie
- $k_\Phi$  – stosunek współczynnika redukcyjnego muru  $\Phi$  w stanie mokrym do współczynnika redukcyjnego muru w stanie powietrzno-suchym
- $(m)$  – stan „mokry” (stan nasycenia wodą)
- $n_m$  – nasiąkliwość masowa (wagowa) materiału
- $n_o$  – nasiąkliwość objętościowa materiału
- $p$  – porowatość materiału
- $(p/s)$  – stan powietrzno-suchy
- $(s)$  – stan suchy po wysuszeniu do stałej masy

#### Litery alfabetu greckiego

- $\Phi$  – współczynnik redukcyjny uwzględniający wpływ mimośrodków, smukłości ściany i parametrów charakteryzujących odkształcalność muru na nośność ściany murowej
- $\alpha_E$  – cecha sprężystości muru
- $\delta$  – współczynnik przeliczeniowy uwzględniający wpływ „efektu skali” na wytrzymałość elementów murowych
- $\eta_w$  – współczynnik uwzględniający stan zawilgocenia na wytrzymałość elementów murowych
- $\rho_0$  – gęstość objętościowa (pozorna)
- $\rho_s$  – gęstość szkieletowa
- $v$  – prędkość fali ultradźwiękowej

### 3. Cel, tezy i zakres pracy

Podstawowym celem pracy jest określenie wpływu wysokich poziomów zawilgocenia (bliskich stanowi nasycenia wodą) na wytrzymałość i odkształcalność murów ceglanych poddanych obciążeniom ściskającym.

Celem pracy jest również opracowanie metod pozwalających na prognozowanie nośności ścian ceglanych w stanie silnie zawilgoconym.

Praca dotyczy efektów silnego zawilgocenia murów trwającego krótkotrwale (na przykład wynikającego z powodzi). Nie są przedmiotem niniejszej pracy zjawiska związane z silnym zawilgoceniem murów trwającym długotrwale takie jak na przykład: działanie mrozu, krystalizacja soli w murze.

W pracy stan silnego zawilgocenia – bliski stanowi nasycenia wodą będzie zamiennie określany jako stan „mokry”.

#### **Tezy pracy:**

##### Teza I

Silne zawilgocenie (bliskie stanowi pełnego nasycenia wodą) murów ceglanych w budynkach istniejących powoduje znaczące obniżenie wytrzymałości na ściskanie oraz zmianę parametrów charakteryzujących odkształcalność murów przy ścisaniu, co znacząco wpływa na redukcję nośności murów.

##### Teza II

Spadek wytrzymałości na ściskanie murów ceglanych na skutek ich silnego zawilgocenia można określić na podstawie badań materiałów murowych, z których mury zostały wykonane. Badania te można wykonać na niewielkich próbkach materiałów pobranych z konstrukcji, bowiem istnieje zależność pomiędzy parametrami charakteryzującymi strukturę cegieł i zapraw takich jak: gęstość pozorną, nasiąkliwość, porowatość, struktura porowatości, a spadkami wytrzymałości na ściskanie materiałów murowych spowodowanymi ich silnym zawilgoceniem, które to spadki determinują redukcję wytrzymałości murów.



### Teza III

Badania nieniszczące są pomocne w ocenie spadków wytrzymałości materiałów murowych i murów spowodowanych ich silnym zawilgoceniem i mogą być traktowane jako badania uzupełniające do badań niszczących i małoniszczących.

Praca składa się z 10 rozdziałów. Rozdział 1 to wprowadzenie, w którym przedstawiono uzasadnienie wyboru tematyki pracy. W rozdziale 2 zestawiono podstawowe symbole i oznaczenia wykorzystane w treści pracy, natomiast w rozdziale 3 podano cel, zakres oraz tezy pracy. Rozdział 4 poświęcono przeglądowi stanu wiedzy w zakresie wpływu zawilgocenia na nośność murów ceglanych – przedstawiono rozważania na temat mechanizmu narastania uszkodzeń w materiałach murowych i murach w wyniku ich silnego zawilgocenia oraz zebrano wyniki dotychczas przeprowadzonych badań doświadczalnych. W rozdziale 4 podano także zalecenia normowe w zakresie możliwości uwzględnienia zawilgocenia w ocenie wytrzymałości murów. Rozdziały 5, 6, 7 to opis i analiza wyników badań własnych. W rozdziale 5 przedstawiono wyniki badań i analizy dla cegieł oraz zapraw z różnych okresów historycznych. Rozdział 6 dotyczy natomiast badań filarów ceglanych wyciętych z murów historycznych. W rozdziale 7 dyskutowana jest możliwość określenia wpływu stanu zawilgocenia muru na jego wytrzymałość i odkształcalność na podstawie próby ściskania odwiertów rdzeniowych pobranych z murów. Rozdział 8 poświęcony jest ocenie wpływu zawilgocenia na wytrzymałość na ściskanie murów na podstawie badań cegieł i zapraw, natomiast w rozdziale 9 oszacowano spadki nośności ścian ceglanych w budynkach istniejących spowodowane nasyceniem murów wodą. Rozdział 10 stanowi podsumowanie przeprowadzonych badań i analiz obliczeniowych. W rozdziale tym podano również planowane kierunki dalszych badań oraz obszary wiedzy wymagające, zdaniem autora, badań i analiz. Na końcu pracy zamieszczono streszczenie, bibliografię oraz spis rysunków i tabel.

## 4. Przegląd stanu wiedzy

### 4.1. Mechanizm narastania uszkodzeń w materiałach murowych i murach wskutek ich zawilgocenia

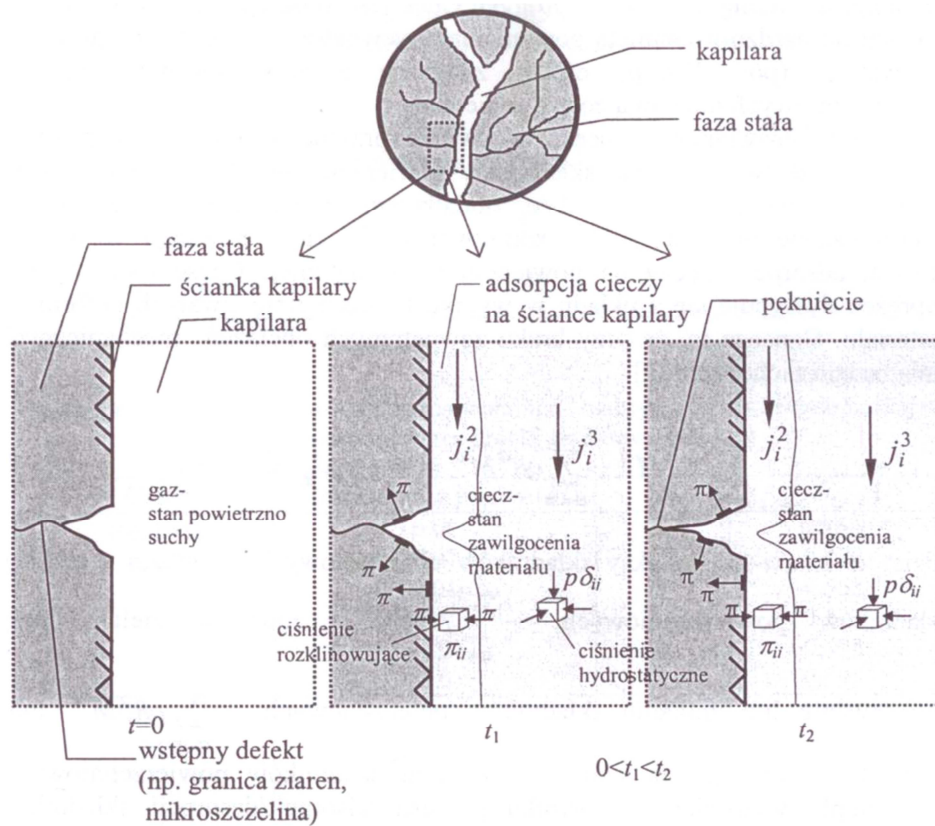
Pierwsze informacje na temat wpływu zawilgocenia na wytrzymałość na ściskanie materiałów murowych pojawiły się w pracy *I. O. Bakera* opublikowanej w 1909 roku [6]. *I. O. Baker* stwierdził, że zanurzenie cegieł ceramicznych w wodzie obniża ich wytrzymałość na ściskanie dlatego, że woda działa jak substancja nawilżająca na płaszczyźnie rozłamu.

*J. Kubik i Z. Perkowski* [51], [52] stwierdzili natomiast, że materiały kapilarno-porowate takie jak beton, ceramika, zaprawy, gips posiadają duży udział powierzchni wewnętrznej i w związku z tym jedną z podstawowych przyczyn występowania charakterystycznych dla tych materiałów procesów fizykochemicznych są niewysyczone siły powierzchniowe. Jednym z procesów mających wpływ na przyrost uszkodzeń wskutek zawilgocenia jest efekt *Rebindera*, który polega na adsorpcji cieczy na wewnętrznej powierzchni materiału i zmniejszaniu napięcia powierzchniowego. Proces ten prowadzi do powiększenia istniejących mikrospeków rozpoczynających się na ściankach porów oraz kapilar. Rezultatem tego procesu, w skali makroskopowej, jest spadek wytrzymałości oraz wzrost odkształceń materiału.

Drugi proces jest związany z narastaniem naprężeń mechanicznych w materiałach, które są zaliczane do materiałów o własnościach kruchych. W rezultacie narastania naprężeń mechanicznych w ceramice i zaprawie pojawiać się będą mikrospekowania, które rozwiną się najintensywniej w płaszczyznach prostopadłych do naprężeń głównych rozciągających. Oba procesy są zależne od siebie. W wyniku rozwoju mikrospeków ulega zmianie powierzchnia wewnętrzna materiału, przy jednoczesnym pogorszeniu cech mechanicznych.

Powstanie dodatkowych defektów w strukturze materiału i zmniejszenie napięcia powierzchniowego tłumaczy się istnieniem ciśnień rozklinowujących (pojęcie wprowadził *Dieriagin* [16] w 1939 roku). Ciśnienie rozklinowujące jest dodatkowym naprężeniem występującym w cieczy w pobliżu granicy fazowej – rysunek 4.1.

*J. Kubik i Z. Perkowski* podkreślili, że ze względu na bardzo rozwiniętą powierzchnię wewnętrzną materiałów kapilarno-porowatych efekty związane z występowaniem zjawisk powierzchniowych nie mogą zostać zaniedbane.



Rys. 4.1 Schemat graficzny efektu Rebintera – działanie ciśnień rozkalinowujących - według [51], [52]

W publikacji W. Płońskiego [83] podano, że ważną przyczyną zmniejszenia wytrzymałości pod działaniem wilgoci jest osłabienie połączeń pomiędzy kryształami siatki strukturalnej.

T. Stryzewska i współautorzy stwierdzili w [99], [100] że istotny wpływ ma zerwanie mostków krzemio-tlenowych Si-O. Przy długotrwałym działaniu wody produkowane współcześnie cegły ceramiczne, zawierające znaczne ilości dodatku popiołu lotnego, mogą charakteryzować się większą degradacją więzby krzemotlenowej. Również proces hydrolizy glinokrzemianów sprzyja utracie wytrzymałości. Na wpływ uwodnienia glinokrzemianów w ceramice wypalanej w temperaturze do 1000°C zwracał uwagę również A. J. Awgustinik [5]. Niższe temperatury wypału są charakterystyczne przede wszystkim dla cegieł ceramicznych produkowanych w przeszłości (historycznych) [43].

W dłuższym okresie czasu zmiany zachodzące w strukturze cegieł i zapraw w wyniku oddziaływania wody mogą skutkować wzrostem ich porowatości. Wynika to z wypłukiwania składników ze struktury materiałów. Z drugiej strony podczas długotrwałego nasycenia

murów wodą dochodzi do krystalizacji soli w ceglach i zaprawie oraz do powstania dodatkowych naprężeń wewnętrznych (*T. Stryszewska* [99], *M. Koniorczyk* [47], *J. Kubik i in.* [48], [49], [50]). Na te zjawiska nakłada się w konstrukcjach wystawionych na oddziaływanie ujemnych temperatur także proces uszkodzeń struktury materiałów murowych wynikający z cyklicznego zamrażania i rozmrażania wody w murze.

*A. M. Nevill* stwierdził [78], że woda powoduje zmniejszenie tarcia pomiędzy poszczególnymi elementami struktury materiału przemieszczającymi się pod wpływem obciążenia przykładanego do badanego elementu, co powoduje zwiększenie odkształceń i zniszczenie materiału przy niższych poziomach obciążenia.

Na wzrost pod wpływem obciążenia ściskającego ciśnienia w porach materiałów wypełnionych wodą zwrócili uwagę *E. Franzoni i in.* [25]. Im mniejsze średnice porów tym większe ciśnienie, co może prowadzić do wzrostu uszkodzeń wewnętrznych.

Stwierdzenia te są istotne w analizie badań materiałów pod wpływem obciążeń doraźnych, których dotyczy także niniejsza praca doktorska.

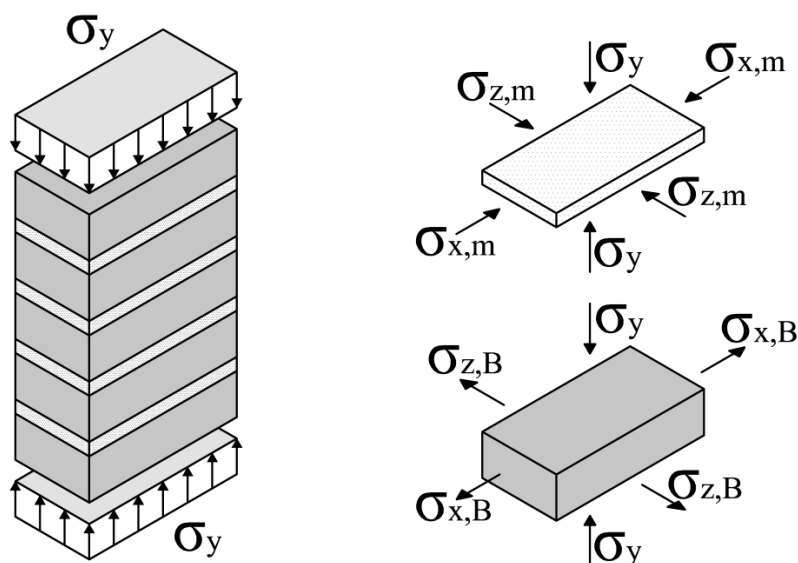
Obniżenie wytrzymałości i zwiększenie odkształcalności cegieł i zaprawy jest ważnym, ale nie jedynym elementem wpływającym na degradację cech mechanicznych murów pod wpływem wody. *P. Bouška i in.* [14] wymieniają następujące skutki silnego zawilgocenia murów:

- redukcja wytrzymałości elementów murowych,
- redukcja wytrzymałości słabych zapraw,
- wymywanie cząstek zaprawy z muru,
- degradacja murów spowodowana czynnikami biologicznymi,
- zmniejszeniem spójności murów,
- zmiana izolacyjności termicznej murów.

W dłuższym okresie czasu silne zawilgocenie może prowadzić do degradacji budynków historycznych (*J. Hoła* [33], *J. Kubik* [49]).

Można założyć, że silne zawilgocenie ma także istotny wpływ na interakcję cegieł i spoin w ściskanym murze. *H. Hilsdorf* [30] badając odkształcenia w murach ceglanych poddanych ściskaniu doszedł do wniosku, że różnica w odkształcalnościach poprzecznych cegieł i zaprawy w spoinach, przy jednoczesnym działaniu sił adhezji i tarcia, powoduje

powstanie w ceglach poprzecznych naprężeń rozciągających, które wywołują ich pękanie i decydują o wytrzymałości muru na ściskanie – rysunek 4.2.



Rys. 4.2 Model muru poddanego ściskaniu – według H. Hilsdorfa [30]

Biorąc pod uwagę wpływ wody w murze jako elementu zmniejszającego tarcie na styku cegła/zaprawa, można wnioskować o redukcji naprężeń rozciągających w ceglach. Z drugiej jednak strony woda wpływa na osłabienie materiałów murowych i zwiększenie ich odkształcalności. Zwiększenie odkształcalności zaprawy w spoinach determinuje z kolei wzrost poprzecznych naprężeń rozciągających w ceglach. Nieliczne badania wytrzymałości połączeń cegła zaprawa pokazują istotny wpływ zawilgocenia (*N. Sathiparan i in.* [94]), ale zagadnienie to jest dotychczas słabo rozpoznane.

Osobnym problemem są, jak już wspomniano powyżej, zjawiska związane z krystalizacją soli w strukturze murów oraz okresowe działanie mrozu, który powoduje zamarzanie wody w porach materiałów murowych. Powyższe zjawiska istotnie wpływają na mechanizm narastania uszkodzeń i w dłuższym okresie czasu skutkują obniżeniem wytrzymałości murów. Zagadnienia krystalizacji soli w materiałach murowych i przyrostu naprężeń wewnętrznych z tym związanych omówione zostały w pracach [24], [47] natomiast uszkodzenia na skutek mrozu przedstawione zostały w [100], [101], [102].

Jak pokazuje praktyka, niebezpieczna może być również faza nagłego suszenia ścian, generująca skurcz i powodująca powstanie mikropęknięć wpływających na spadek wytrzymałości murów [2], [26].

Zjawiska występujące przy długotrwałym (wieloletnim) nasyceniu murów wodą nie podlegają analizie w niniejszej pracy, która dotyczy skutków sytuacji związanych z nagłym zawilgoceniem murów ceglanych, kiedy mury z fazy ustabilizowanej powietrzno-suchej pod wpływem nagłego zalania wodą przechodzą w stan mokry.

## 4.2. Badania wytrzymałościowe materiałów murowych i murów w różnych stanach zawilgocenia

### 4.2.1. Badania cegieł ceramicznych

Pierwsze badania wpływu zawilgocenia na wytrzymałość cegieł przeprowadził *I. O. Baker* [6]. Wykonano serię 30 testów na ceglach pobranych z budynków z 10 miejscowości w USA. Cegły zanurzano w wodzie na jeden tydzień, a następnie badano ich wytrzymałość na ściskanie. Dla prawie wszystkich cegieł (z wyjątkiem dwóch) uzyskano spadek wytrzymałości na ściskanie. Mokre cegły miały średnią wytrzymałość o 15% niższą niż cegły w stanie powietrzno-suchym.

*P. Schubert, S. Schmidt* [95] w 1989 roku przygotowali komentarz do projektu normy Eurokod 6. Normy niemieckie DIN zalecały przed badaniem wytrzymałościowym, sezonowanie cegieł do stanu powietrzno–suchego. *P. Schubert i S. Schmidt* cytują w swojej pracy zależność:

$$\beta_{D,1} = k_{1,n}\beta_{D,n} \quad (1)$$

w której:

$\beta_{D,1}$  – wytrzymałość na ściskanie elementu murowego w stanie powietrzno-suchym,

$\beta_{D,n}$  – wytrzymałość na ściskanie elementu murowego w stanie mokrym,

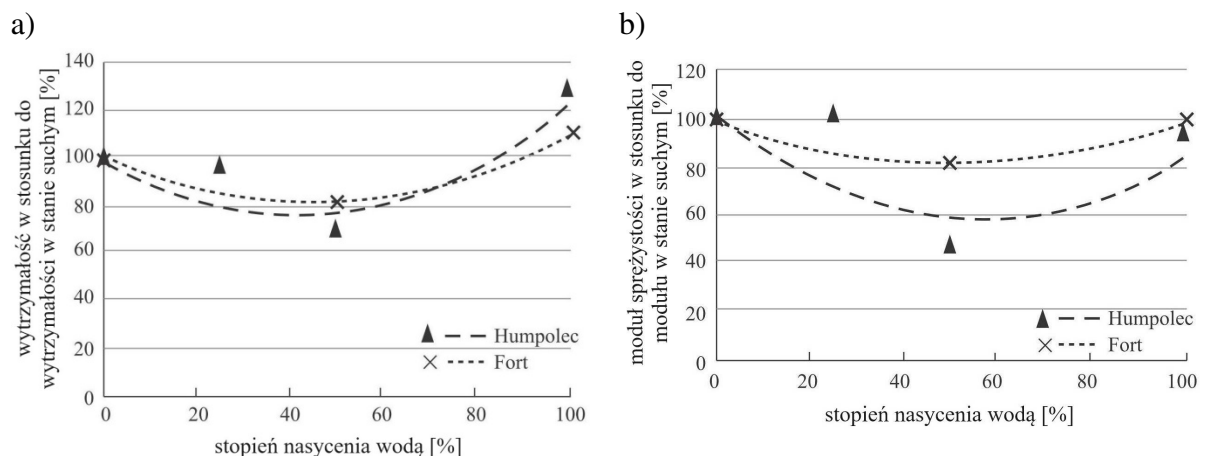
$k_{1,n}$  – współczynnik konwersji.

Zaproponowany współczynnik  $k_{1,n}$  wynosił dla cegieł 1,1, natomiast dla wszystkich innych elementów murowych 1,2. *P. Schubert i S. Schmidt* zwrócili uwagę, iż wartości współczynnika konwersji  $k_{1,n}$ , w badaniach niemieckich, nie są udokumentowane doświadczalnie. Przeprowadzili badania na ceglach ceramicznych, elementach silikatowych, z betonu lekkiego oraz z betonu komórkowego. Dla każdego rodzaju materiału przebadano po 5 elementów. Stwierdzono, że nie jest możliwe podanie wiarygodnego współczynnika

konwersji dla cegieł ceramicznych ze względu na niewielką bazę wyników badań doświadczalnych.

*A.M. Amade, J.V. Martin, J. Colville* w 2004 roku [3] przeprowadzili badania na ceglach ceramicznych drażonych i uzyskali stosunek wytrzymałości na ściskanie cegieł w stanie mokrym ( $f_B^{(m)}$ ) do wytrzymałości w stanie powietrzno-suchym ( $f_B^{(p/s)}$ ) równy 0,90.

*J. Witzany, T. Cejka, R. Zigler* [109] zrealizowali badania historycznych cegieł ceramicznych na próbkach rdzeniowych o średnicy 35 mm i wysokości 70 mm. Badania cegieł pochodzących z XVII wieku oraz z początku XX wieku pokazały wpływ wilgotności na wytrzymałość na ściskanie i moduł sprężystości cegieł. Stosunek wytrzymałości na ściskanie rdzeni ceglanych o różnych stopniach wilgotności do wytrzymałości próbek wysuszonych do stałej masy wahał się w przedziale od 0,75 do 1,25 – rysunek 4.3.



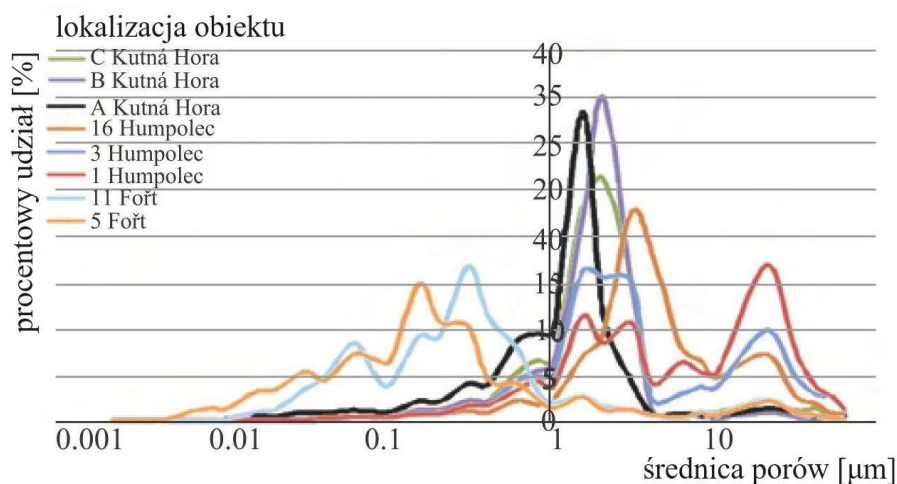
Rys. 4.3 Badania historycznych cegieł na rdzeniach o średnicy 35mm i wysokości 70mm:

a) wykres zależności zmiany wytrzymałości na ściskanie cegieł a poziom nasycenia wodą,

b) wykres zależności zmiany modułu sprężystości cegieł

a poziom nasycenia wodą – według [109]

Analizowano także dystrybucję porów w strukturze historycznych cegieł ceramicznych – rysunek 4.4. Badania pokazały, że wpływ wilgotności jest większy w ceglach o przeważającej średnicy porów z zakresu  $0,01 \div 1,0\mu\text{m}$  w porównaniu do cegieł, w których dominują pory o średnicy z zakresu  $1,0 \div 10,0\mu\text{m}$ . Stwierdzono, że zmiana wytrzymałości na ściskanie nie zależy tylko od stopnia nasycenia porów, ale także od ich rozmiaru i częstotliwości występowania.



Rys. 4.4 Wykres procentowego udziału porów (w zależności od ich średnicy) w strukturze historycznych cegieł ceramicznych - według [109]

*T. Stryzewska* [100] wykonała badania wpływu zawilgocenia na wytrzymałość na ściskanie cegieł. Badania przeprowadzono na dwóch rodzajach cegieł ceramicznych zwykłych o istotnie zróżnicowanych właściwościach mechanicznych i fizycznych oraz na jednym rodzaju cegły klinkierowej. Wszystkie cegły zostały wyprodukowane wspólnie. Cegły sezonowano w wodzie co najmniej 50 dni. Uzyskano następujące stosunki wytrzymałości w stanie nasycenia wodą do wytrzymałości w stanie wysuszonym:

- cegły ceramiczne zwykłe: 0,91 oraz 0,89,
- cegły klinkierowe: 0,93.

*T. Stryzewska* przeprowadziła także badania twardości powierzchniowej cegieł przy użyciu węgelnika Brinella o średnicy 5mm. Uzyskano spadki siły nacisku spowodowane silnym zawilgoceniem cegieł w zakresie od 0,78 do 0,89.

Informacje o badaniach cegieł w stanie mokrym znaleźć można w pracach [59], [77] i [94]. *T. Martins, J. Fernandez i H. Varum* [59] badali cegły charakteryzujące się bardzo niską wytrzymałością na ściskanie, które spotyka się w masywnych ścianach historycznych budynków. Spadek wytrzymałości cegieł w stanie „mokrym” w stosunku do stanu powietrzno-suchego wynosił 18%.

Cegły o niskiej wytrzymałości testowali również *T. Nagarajan i in.* [77]. Średnia wytrzymałość na ściskanie cegieł w stanie mokrym była od 9% do 23% niższa niż wytrzymałość na ściskanie cegieł w stanie powietrzno-suchym.



Spadek wytrzymałości o 15% uzyskali natomiast w swoich badaniach *N. Sathiparan* i *U. Rumeshkumar* [94].

Badania cegieł o niskiej nasiąkliwości (około 10%) wykonali *D.V. Bompa* i *A.Y. Elghazani* [12]. W stanie powietrzno-suchym wytrzymałość na ściskanie określona na całych ceglach była równa 15,5 MPa, a w stanie nasycenia wodą 15,6 MPa. Nie zanotowano więc spadku wytrzymałości cegieł w stanie „mokrym”.

Podsumowanie wyników dotychczasowych badań cegieł ceramicznych zestawiono w tabeli 4.1.

Tabela 4.1 Badania wpływu nasycenia wodą na wytrzymałość na ściskanie cegieł ceramicznych – przegląd stanu wiedzy

Autor	Rok publ.	Rodzaj elementu badawczego	Sposób realizacji stanu wysokiego zawilgocenia	Wilgotność masowa		$f_B^{(m)} / f_B^{(p/s)}$ lub $f_B^{(m)} / f_B^{(s)}$
				stan suchy, pow./suchy	stan mokry	
				[%]	[%]	
I. O. Baker [6]	1909	połówki cegieł pobrane z 10 budynków	zanurzone w wodzie przez 1 tydzień	(p/s) bd.	bd.	<b>0,85</b>
A.M. Amade; J.V. Martin; J. Colville [3]	2004	połówki cegieł drażonych	bd.	(p/s) bd.	bd.	<b>0,90</b>
J. Witzany; T. Cejka; R. Zigler [109]	2010	rdzenie z historycznych cegieł $\varnothing 35\text{mm}$ , $h=70\text{mm}$	bd.	(s)	bd.	<b>1,10</b>
			bd.	(s)	bd.	<b>1,25</b>
T. Nagarajan i in. [77]	2014	całe cegły	zanurzone w wodzie przez 1 dzień	(p/s) bd.	10,71	<b>0,91</b>
					13,33	<b>0,93</b>
					18,52	<b>0,77</b>
T. Stryszewska; [100]	2014	kostki o boku 65mm	zanurzone w wodzie ponad 50dni	(s)	28,06	<b>0,91</b>
			zanurzone w wodzie ponad 50dni	(s)	14,26	<b>0,89</b>

Ciąg dalszy tabeli 4.1:

T. Martins; J. Fernández; H.Varum [59]	2018	kostki	zanurzone w wodzie przez 24 godziny	(p/s) bd.	bd.	<b>0,82</b>
N. Sathiparan; U. Rumeskumar [94]	2018	całe cegły	zanurzone w wodzie przez 24 godziny	2,53	13,35	<b>0,85</b>
D. V. Bompa; A. Y. Elghazouli [12]	2020	całe cegły	zanurzone w wodzie	2,54	10,80	<b>1,01</b>
Oznaczenia:						
$f_B^{(m)}$ – średnia wytrzymałość na ściskanie cegieł ceramicznych w stanie „mokrym”						
$f_B^{(p/s)}$ – średnia wytrzymałość na ściskanie cegieł ceramicznych w stanie powietrzno – suchym						
$f_B^{(s)}$ – średnia wytrzymałość na ściskanie cegieł ceramicznych w stanie suchym						
bd. – brak danych						
(p/s)/bd. – stan powietrzno-suchy – brak danych szczegółowych na temat wilgotności w %						
(s) – wysuszone do stałej masy						

#### 4.2.2. Badania zapraw do murów

Wytrzymałość na ściskanie zaprawy cementowej o stosunku 1:1,2 (cement : piasek) w stanie suchym i mokrym zbadał w 1964 roku *S. E. Pihlajavaara* [82]. Stan wysokiej wilgotności zrealizowano na dwa sposoby:

- część próbek zaprawy sezonowano w wodzie przez 110 dni w temperaturze  $20 \div 22^\circ\text{C}$ ,
- pozostałe próbki umieszczono w pomieszczeniu o wilgotności względnej 97% i temperaturze  $20 \div 22^\circ\text{C}$  również na okres 110 dni.

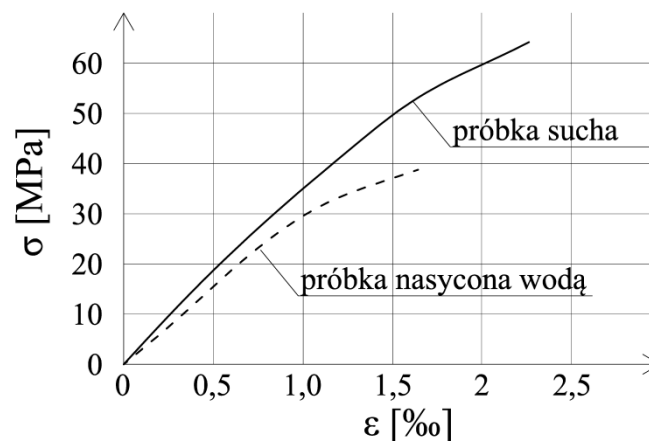
Po 110 dniach zbadano 3 próbki, a pozostałe wysuszone w temperaturze  $105^\circ\text{C}$  do stałej masy i poddano badaniom. Następnie pozostałe próbki włożono do wody i nawilżono do czasu osiągnięcia całkowitego nasycenia. Suszenie i nawilżanie powtórzono jeszcze dwukrotnie. Stosunek wytrzymałości zaprawy w stanie „mokrym” ( $f_M^{(m)}$ ) do wytrzymałości do wytrzymałości w stanie suchym ( $f_M^{(s)}$ ) wyniósł 0,69.

*A.M. Amade, J.V. Martin, J. Colville* [3] przeprowadzili badania na zaprawie cementowej i cementowo-wapiennej. Zaprawa cementowa charakteryzowała się proporcjami: 1:2 (cement : piasek) i była przygotowana na cemencie portlandzkim. Zaprawa cementowo-

wapienna była przygotowana w proporcjach: 1:2,25:0,5 (cement : piasek : wapno). Dla zaprawy cementowej uzyskano stosunek  $f_M^{(m)}/f_M^{(p/s)} = 0,90$ , a dla zaprawy cementowo-wapiennej  $f_M^{(m)}/f_M^{(p/s)} = 0,74$ .

J. Kubik i Z. Perkowski w pracach [51], [52], [80], [81] opisali badania wpływu zawilgocenia na wytrzymałość na ściskanie próbek wykonanych z zaprawy cementowej o stosunku wody, cementu i piasku w proporcji 1:2:6. Wszystkie próbki po 24 godzinach od momentu zarobienia były przechowywane w wodzie (w temperaturze pokojowej  $20\pm 3^\circ\text{C}$ ) przez okres 28, 62 i 316 dni. Po ustalonym czasie próbki zostały wysuszone do stałej masy, po czym część próbek została ponownie nasączona wodą. Próbki osiągnęły odpowiednio średnią wilgotność w stanie „mokrym” 7,7%; 8,1%; 6,3%. Następnie próbki poddano zginaniu, a uzyskane po ich złamaniu połówki jednoosiowemu ściskaniu. Stosunek wytrzymałości na ściskanie w stanie mokrym do wytrzymałości na ściskanie w stanie powietrzno-suchym wyniósł odpowiednio 0,59; 0,52; 0,63.

Na rysunku 4.5 przedstawiono zmiany zależności naprężenie-odkształcenie dla wybranej serii próbek przechowywanych w wodzie przez 316 dni – moduł sprężystości zapraw w stanie mokrym jest wyraźnie mniejszy niż zapraw w stanie suchym.



Rys. 4.5 Zmiany zależności naprężenie-odkształcenie dla wybranej serii próbek zaprawy w próbie ściskania – według [52]

Badania zaprawy wapiennej prowadzili natomiast T. Martins i in. [59]. Badano zaprawę z wapna hydratyzowanego i piasku wykonaną w proporcjach 1:2. Wytrzymałość na ściskanie zaprawy w stanie powietrzno-suchym wynosiła 0,72MPa, natomiast w stanie mokrym 0,46MPa. Spadek wytrzymałości był więc bardzo znaczący ( $f_M^{(m)}/f_M^{(p/s)} = 0,64$ ).

Zaprawę wapienną na spoiwie hydraulicznym badali *D.V. Bompa i A.Y. Elghazani* [12]. Zaprawa przygotowana została w proporcjach 1:3. W stanie mokrym wilgotność masowa zaprawy była równa 10,8%. W tym stanie zaprawa miała wytrzymałość 0,59MPa, natomiast w stanie powietrzno-suchym 1,29MPa. Stosunek wytrzymałości na ściskanie zaprawy w stanie mokrym do wytrzymałości na ściskanie w stanie powietrzno-suchym wyniósł 0,46.

Szerokie badania zapraw cementowych opisano w pracy [94]. Do badań przygotowano zaprawy o zróżnicowanych proporcjach cement : piasek (1:3; 1:5; 1:7). Nasiąkliwość zapraw zawierała się w granicach od 4,3% do 6,7% - najmniejszą nasiąkliwość miała zaprawa przygotowana w proporcji 1:3, natomiast największą zaprawa, w której proporcja składników wynosiła 1:7. Wytrzymałość na ściskanie zapraw w stanie mokrym była w każdym przypadku mniejsza niż wytrzymałość w stanie powietrzno-suchym. Proporcje tych wytrzymałości wynosiły odpowiednio 0,98, 0,97 i 0,84 – największy spadek wytrzymałości odnotowano dla najłabszej zaprawy.

W tabeli 4.2. przedstawiono podsumowanie badań zapraw.

Tabela 4.2 Badania wpływu nasycenia wodą na wytrzymałość na ściskanie zaprawy – podsumowanie stanu wiedzy

Autor/ publikacja	Rok publ.	Rodzaj zaprawy	Rodzaj elementu badawczego	Sposób realizacji stanu wysokiego zawilgocenia	Wilgotność masowa		$f_M^{(m)}/$ $f_M^{(p/s)}$ lub $f_M^{(m)}/$ $f_M^{(s)}$
					stan suchy(s), pow./ suchy (p/s)	stan mokry	
					[%]	[%]	
S. E. Pihlajavaara [82]	1964	cementowa	bd.	suszenie i zanurzenie w wodzie – proces wielokrotny	(s)	bd.	<b>0,69</b>
A.M. Amade; J.V. Martin; J. Colville [3]	2004	cem. - wap.	bd.	bd.	bd.	bd.	<b>0,74</b>
		cementowa	bd.	bd.	bd.	bd.	<b>0,90</b>
J. Kubik, Z. Perkowski [51]; [52], [81]	2003- 2005	cementowa	połówki beleczek	zanurzenie w wodzie po 62 dniach od wykonania	bd.	8,1	<b>0,52</b>
		cementowa	o wymiarach 40x40x80mm	zanurzenie w wodzie po 316 dniach od wykonania	bd.	6,3	<b>0,63</b>

Ciąg dalszy tabeli 4.2:

Z. Perkowski [80]	2007	cementowa	połówki beleczek o wymiarach 40x40x80mm	zanurzenie w wodzie po 28 dniach od wykonania	(s)	7,7	<b>0,59</b>
T. Martins; J. Fernández; H.Varum [59]	2018	wapienna <sup>(1)</sup>		zanurzenie w wodzie przez 24 godziny	bd.	bd.	<b>0,64</b>
N. Sathiparan; U. Rumeskumar [94]	2018	cementowa (3 rodzaje)	kostki 150x150x150 mm	zanurzenie w wodzie przez 24 godziny	0,69	4,29	<b>0,98</b>
					0,85	5,41	<b>0,97</b>
					1,37	6,72	<b>0,84</b>
D. V. Bompa; A. Y. Elghazouli [12]	2020	wapienna <sup>(2)</sup>	kostki 50x50x50mm	zanurzone w wodzie	2,54	10,8	<b>0,46</b>
Oznaczenia:							
$f_M^{(m)}$ – średnia wytrzymałość na ściskanie zaprawy w stanie mokrym							
$f_M^{(p/s)}$ – średnia wytrzymałość na ściskanie zaprawy w stanie powietrzno-suchym							
$f_M^{(s)}$ – średnia wytrzymałość na ściskanie zaprawy w stanie suchym							
bd. – brak danych szczegółowych na temat wilgotności w %							
(s) – próbki wysuszone do stałej masy							
<sup>(1)</sup> – wapno hydratyzowane jako spoiwo zaprawy							
<sup>(2)</sup> – wapno hydrauliczne jako spoiwo zaprawy							

#### 4.2.3. Badania murów

Badania przeprowadzone przez *P. Bouška i in.* [14] na temat wpływu wilgotności na wytrzymałość konstrukcji murowych opublikowano w 2003 roku - po pamiętnej powodzi, która miała miejsce w Czechach. Przeprowadzono badania na 6 filarach ceglanych o wymiarach 45 x 45 x 140cm. Trzy z nich były przykryte folią i regularnie moczone przez okres 2 miesięcy (osiągnięto wilgotność masową równą 15,05%). Pozostałe trzy filary, pozostawione w laboratorium, w dniu badania charakteryzowały się wilgotność masową 3,02%. Podczas próby ściskania filarów rejestrowano wartości ich odkształceń podłużnych oraz poprzecznych.

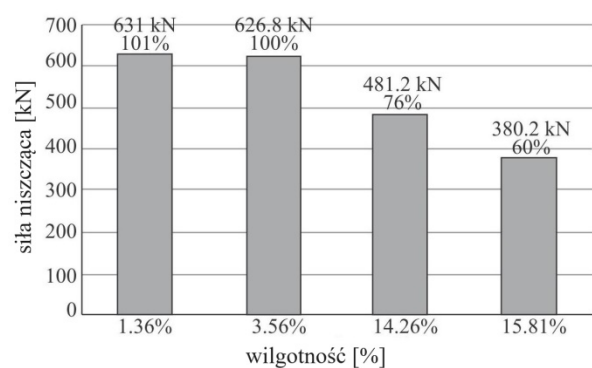
Stosunek wytrzymałości filarów na zaprawie wapiennej w stanie „mokrym” do wytrzymałości w stanie powietrzno-suchym wyniósł 71%. Zauważono wzrost odkształceń poprzecznych filarów badanych w stanie „mokrym” w stosunku do badań w stanie powietrzno-suchym. Autorzy stwierdzili, że zasób wiedzy w tej dziedzinie jest bardzo mały i istnieje konieczność dalszych badań.

A.M. Amade i in. [3] przygotowali po 8 filarów murowych dla każdego rodzaju zaprawy. Badano filary na zaprawie cementowej i cementowo-wapiennej. Elementy próbne murów sezonowano w laboratorium przez okres  $90 \div 97$  dni. Następnie 4 z nich umieszczono w pomieszczeniu z systemem rotacyjnych zraszaczy na okres 48 godzin. Dla filarów murowych na zaprawie cementowej uzyskano stosunek wytrzymałości na ściskanie w stanie mokrym ( $f^{(m)}$ ) do wytrzymałości w stanie powietrzno-suchym ( $f^{(p/s)}$ ) równy 0,86. W zakresie modułu sprężystości stosunek ten wyniósł  $E^{(m)}/E^{(p/s)} = 0,86$ .

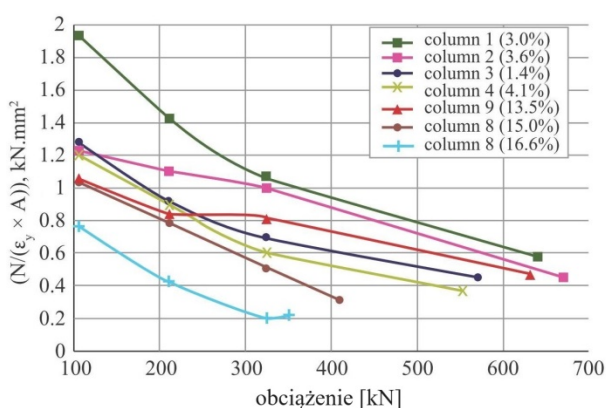
Natomiast w przypadku filarów na zaprawie cementowo-wapiennej uzyskano  $f^{(m)}/f^{(p/s)} = 0,80$  oraz  $E^{(m)}/E^{(p/s)} = 0,92$ .

J. Witzany i in. [109] przeprowadzili badania doświadczalne, które pokazały znaczny spadek wytrzymałości filarów murowych w stanie silnie zawilgoconym. Filary murowe o przekroju 450 x 450 mm wykonano z cegieł ceramicznych na zaprawie wapiennej. W zakresie niskich wilgotności (do 3,5%) różnic w wytrzymałości na ściskanie murów nie zaobserwowano. Największy spadek wytrzymałości na ściskanie odnotowano, gdy mury miały największą wilgotność, czyli w stanie pełnego nasycenia wodą – spadek wytrzymałości wyniósł 40% - rysunek 4.6.

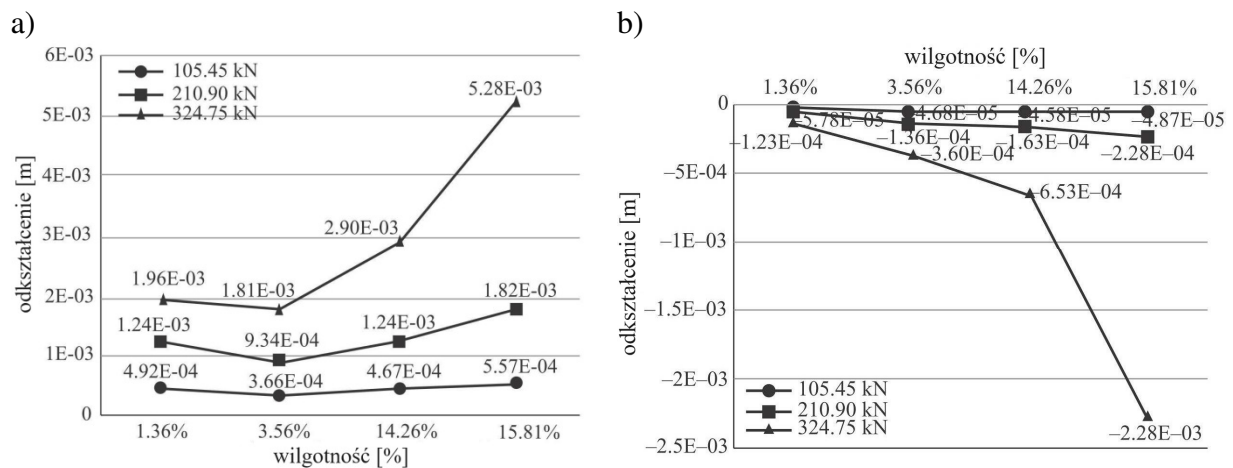
Badania pokazały również wpływ wzrastającej wilgotności w murze na wzrost odkształcalności murów ceglanych – wzrost odkształcalności odnotowano zarówno w kierunku pionowym jak i poziomym – rysunek 4.7, rysunek 4.8.



Rys. 4.6 Badania filarów murowych w różnych stanach wilgotności – wartości sił niszczących – według [109]



Rys. 4.7 Wykres zależności między sztywnością murów a siłą ściskającą – filary w różnych stanach zawilgożenia – według [109]



Rys. 4.8 Wykres zależności między odkształceniami, a zawilgoceniem dla różnych poziomów obciążenia: a) odkształcenia pionowe, b) odkształcenia poziome – według [109]

Badania murów z cegieł o niskiej wytrzymałości wykonanych na zaprawach wapiennych przeprowadzili w Portugalii *T. Martins i in.* [59]. Użyte materiały były tożsame z wykorzystywanymi do wznoszenia budynków w portugalskich miastach w XIX wieku i w pierwszej połowie XX wieku. Badano mury w stanie powietrzno-suchym i nasycone wodą. Stan nasycenia uzyskiwano poprzez całkowite zanurzenie murów w zbiornikach wypełnionych wodą. Wytrzymałości na ściskanie murów w stanie mokrym była o 15% niższa od wytrzymałości murów w stanie powietrzno-suchym.

Interesujące badania murów ceglanych na zaprawach cementowych opisane zostały w pracy [94]. Badania przeprowadzono na pryzmach ceglanych złożonych z 3 warstw cegieł i spoin. Do murowania pryzm ceglanych zastosowano zaprawy trzech rodzajów. Pryzmy murowe przed badaniem były częściowo zanurzone przez 24 godziny - uzyskano stan nasycenia wodą na poziomie 13%. Średnia wytrzymałość na ściskanie pryzm murowych z stanie mokrym była od 8% do 24% niższa niż pryzm murowych w stanie powietrzno-suchym. Stan powietrzno-suchy odpowiadał zawilgoceniu około 2,3%.

Badania pryzm ceglanych przeprowadzono również we Włoszech (*C. Gentilini i in.* [27]). Pryzmy wykonano z materiałów o wysokiej wytrzymałości – cegły charakteryzowały się wytrzymałością na ściskanie równą 37MPa, natomiast wytrzymałość na ściskanie zaprawy wynosiła 19MPa. Analizowano różnicę wytrzymałości pryzm wysuszonych do stałej masy oraz pryzm przez 1 tydzień zanurzonych w wodzie na głębokość

3cm. Niestety w pracy [27] nie podano stanu wilgotności próbek nasycanych wodą. W efekcie uzyskano 6% spadek wytrzymałości na ściskanie murów spowodowany zawilgoceniem, natomiast moduł sprężystości murów praktycznie nie uległ zmianie.

Mury ze współczesnych cegieł o niskiej nasiąkliwości badali *D.V. Bompa i Y.A. Elghazani* [12]. Ścianki murowe złożone z 5 warstw cegieł i spoin wykonywane były na zaprawie wapiennej. Elementy próbne murów zanurzane były w wodzie na 3/5 wysokości. Pozostałe warstwy murów uległy zawilgoceniu przez kapilarne podciąganie. Nie uzyskano wyraźnej różnicy w wilgotności części murów zanurzonych i zawilgoconych na skutek kapilarnego podciągania. Wytrzymałość średnia na ściskanie murów w stanie suchym wynosiła 4,28MPa natomiast w stanie „mokrym” 4,24MPa. Wilgotność masowa muru w stanie „mokrym” wynosiła 10%. Nie zarejestrowano więc spadku wytrzymałości murów spowodowanego zawilgoceniem. Natomiast w badaniach tych uzyskano spadek wartości modułu sprężystości muru w stanie mokrym o około 12%.

Podsumowanie wyników dotychczasowych badań murów ceglanych w różnych stadiach zawilgocenia zestawiono w tabeli 4.3.

Tabela 4.3 Badania wpływu nasycenia murów ceglanych wodą na ich wytrzymałość na ściskanie – przegląd stanu wiedzy

Autor/ publikacja	Rok publ.	Rodzaj muru	Sposób realizacji stanu wysokiego zawilgocenia muru	Wilgotność masowa muru		$f^{(m)}/$ $f^{(p/s)}$
				stan powietrzno- suchy	stan mokry	
				[%]	[%]	
P. Bouška, T. Klečka, D. Pume [14]	2003	filary ceglane na zaprawie wapiennej	zanurzenie w wodzie przez 2 miesiące	3,02	15,05	<b>0,71</b>
J. Witzany; T. Cejka; R. Zigler [109]	2010	filary ceglane na zaprawie wapiennej	bd.	3,50	14,26	<b>0,76</b>
			bd.	3,50	15,81	<b>0,60</b>
A.M. Amade; J.V. Martin; J. Colville [3]	2004	filary ceglane na zaprawie cem. – wap. (cegła drażona)	48 godzin w pomieszczeniu z systemem zraszaczy	bd.	bd.	<b>0,80</b>
		filary ceglane na zaprawie cementowej (cegła drażona)		bd.	bd.	<b>0,86</b>



Ciąg dalszy tabeli 4.3:

C. Gentilini; E.Franzoni; G.Granziani; S. Bandini [27]	2015	pryzmy murowe ceglane na zaprawie cementowej	zanurzenie w wodzie na głębokość 30mm przez 1 tydzień	bd.	bd.	<b>0,94</b>
T. Martins; J. Fernández; H.Varum [59]	2018	pryzmy murowe z cegieł niskiej wytrzymałości na zaprawach wapiennych	zanurzenie w zbiorniku z wodą przez 24 godziny	bd.	bd.	<b>0,85</b>
N. Sathiparan; U. Rumeskumar [94]	2018	pryzmy murowe ceglane na zaprawach cementowych	zanurzenie przez 24 godziny	2,3	ok.13	<b>0,76- 0,92</b>
D. V. Bompa; A. Y. Elghazouli [12]	2020	ścianki murowe o wysokości 5 warstw murowych – zaprawa wapienna	zanurzenie w wodzie na 3/5 wysokości	0,1	ok.10	<b>0,99</b>
Oznaczenia:						
$f^{(m)}$ – średnia wytrzymałość na ściskanie murów ceglanych w stanie mokrym						
$f^{(p/s)}$ – średnia wytrzymałość na ściskanie murów ceglanych w stanie suchym						
bd. – brak danych						

### 4.3. Podsumowanie dotychczasowego stanu wiedzy

Z dotychczasowych badań wynika, że stosunki wytrzymałości na ściskanie cegieł ceramicznych w stanie „mokrym” do wytrzymałości w stanie powietrzno-suchym ( $f_B^{(m)}/f_B^{(p/s)}$ ) zawierają się w przedziale od 0,75 do 1,25. Pomijając badania prowadzone na małych próbkach cegieł - rdzeniach o średnicy 35mm i wysokości 70mm, które zaprezentowane zostały w [109], stosunki te wynoszą od 0,77 do 1,01 (średnio 0,88). Zdecydowana większość badań cegieł opisanych w rozdziale 4.2.1 i podsumowanych w tabeli 4.1 dotyczyła cegieł współcześnie produkowanych. Jedynie w pracach [6] i [109] badaniom podlegały cegły z obiektów historycznych, ale dla tych przypadków nie przeprowadzono badań murów wykonanych z tych cegieł. Należy zauważyć, że badaniom wytrzymałościowym cegieł w różnych stanach wilgotności nie towarzyszyły zwykle badania innych parametrów takich jak porowatość i struktura porowatości, które mogą być przydatne w analizie zagadnienia. Cegły do XIX wieku produkowane były według odmiennych technologii niż współcześnie. Odmienny był zarówno sposób przygotowania surowca do produkcji cegieł, sposób ich

formowania oraz wypału [15], [43], [61], [69]. Z tego powodu trudno odnieść wyniki badań prowadzonych na współcześnie prowadzonym materiale do konstrukcji historycznych.

Podobne wnioski można wyciągnąć z zestawienia wyników badań zapraw. Wytrzymałości na ściskanie zapraw w stanie mokrym były, bez względu na rodzaj zaprawy, mniejsze niż wytrzymałości w stanie powietrzno-suchym. Stosunek wytrzymałości zapraw cementowych w stanie mokrym do wytrzymałości w stanie suchym zawierał się w przedziale od 0,52 do 0,98. W przypadku zapraw cementowo-wapiennych uzyskano stosunek wytrzymałości równy 0,74. Największy spadek wytrzymałości uzyskano w przypadku zapraw wapiennych:  $f_M^{(m)}/f_M^{(p/s)}=0,46\div 0,64$ . Należy zauważyć, że wszystkie dotychczas prezentowane wyniki badań dotyczą zapraw przygotowanych w laboratorium. Brak jest natomiast doniesień o badaniach w stanie „mokrym” zapraw pobranych ze spoin istniejących murów, a zaprawy takie mogą mieć zdecydowanie różne właściwości od zapraw przygotowanych w laboratorium i badanych na próbkach normowych.

Ostatnią grupą badań opisaną w niniejszym rozdziale są badania murów ceglanych. Wartości stosunków wytrzymałości murów w stanie mokrym do wytrzymałości murów w stanie suchym ( $f^{(m)}/f^{(p/s)}$ ) uzyskane w dotychczasowych badaniach wynoszą:

- mury na zaprawie wapiennej: 0,60 ÷ 0,99,
- mury na zaprawie cementowo-wapiennej: 0,80,
- mury na zaprawie cementowej: 0,76 ÷ 0,94.

Należy zwrócić uwagę, że badania prowadzono na różnych rodzajach elementów próbnych – filarach, ściankach, pryzmach. W każdym przypadku, niezależnie od rodzaju elementu próbnego, odnotowano spadek wytrzymałości na ściskanie murów w stanie „mokrym” w stosunku do stanu powietrzno-suchego. Największe spadki wytrzymałości odnotowano w przypadku murów na zaprawach wapiennych – spadki te wynoszą nawet 40% i wskazują na wagę problemu.

Podsumowując można stwierdzić, że przeprowadzono dotychczas stosunkowo niewiele badań wpływu zawilgocenia na wytrzymałość na ściskanie i odkształcalność konstrukcji murowych. Liczba doniesień o badaniach tego typu w ostatnich latach uległa zwiększeniu, co świadczy o aktualności analizowanego problemu. W literaturze przedmiotu brak jest opracowania podsumowującego jednostkowe badania prowadzone w różnych krajach. Brak jest również badań na oryginalnych próbkach materiałów murowych i murów pobranych

z konstrukcji historycznych. Tymczasem mury w obiektach historycznych charakteryzują się specyficznymi właściwościami wynikający ze stosowanych w przeszłości technologii wznoszenia konstrukcji – szczegółowo będzie o tym jeszcze mowa w następnych rozdziałach niniejszej pracy doktorskiej, w której analizowane będą wyniki badań własnych.

Jak wynika z zaprezentowanego stanu wiedzy, brakuje również badań pokazujących jakie parametry charakteryzujące materiały murowe i mury mają wpływ na obserwowane w badaniach spadki wytrzymałości na skutek silnego zawilgocenia.

#### 4.4. Zalecenia normowe

Aktualnie obowiązująca norma dla konstrukcji murowych PN-EN 1996-1-1 [87] nie podaje zaleceń w zakresie określenia wpływu wilgotności na wytrzymałość murów. Zależności takich nie podawała także poprzednio obowiązująca polska norma PN-B-03002:2007 [84].

Informacje na temat wpływu wilgotności na wytrzymałość elementów murowych można natomiast znaleźć w normie PN-EN 772-1 [89]. Norma ta podaje sposób wyznaczenia znormalizowanej wytrzymałości na ściskanie elementów murowych wg poniższej zależności:

$$f_b = \eta_w \delta f_B \quad (2)$$

w której:

- $f_B$  – średnia wytrzymałość na ściskanie badanych elementów murowych,
- $\eta_w$  – współczynnik uwzględniający stan zawilgocenia badanych elementów murowych,
- $\delta$  – współczynnik przeliczeniowy uwzględniający wpływ „efektu skali” elementów murowych.

Zgodnie normą PN-EN 772-1 [89] współczynnik  $\eta_w$  dla elementów murowych nasyconych wodą (sezonowanie przez zanurzenie) należy przyjmować równy 1,2, a dla elementów w stanie powietrzno-suchym równy 1,0. Oznacza to, że badając elementy murowe w stanie mokrym można się spodziewać około 20% spadku wytrzymałości na ściskanie. Dla elementów murowych wysuszonych do stałej masy współczynnik  $\eta_w$  wynosi 0,8.

Norma PN-EN 772-1 [89] nie rozróżnia wartości współczynników  $\eta_w$  ze względu na rodzaj materiału elementu murowego (np. cegła ceramiczna, elementy murowe silikatowe, elementy murowe z betonu kruszywowego, elementy murowe z autoklawizowanego betonu komórkowego).

Zgodnie z normą PN-EN 1996-1-1 [87] wytrzymałość charakterystyczną muru ( $f_k$ ) wykonanego na zaprawie zwykłej można wyznaczyć z zależności:

$$f_k = K f_b^{0.70} f_m^{0.30} \quad (3)$$

w której:

$K$  – współczynnik, którego wartość zależy od rodzaju i grupy elementów murowych oraz zaprawy – na przykład  $K=0,55$  dla murów z elementów ceramicznych grupy 1 do której zaliczają się cegły,

$f_b$  – znormalizowana wytrzymałość elementu murowego (cegły) na ściskanie,

$f_m$  – średnia wytrzymałość zaprawy murarskiej na ściskanie.

Zakładając jak w normie PN-EN 772-1 [89], że:

$$f_b^{(p/s)} = 1,2 f_b^{(m)} \quad (4)$$

można na podstawie zależności (3) określić spadek wytrzymałości muru ze względu na spadek wytrzymałości cegieł spowodowany ich nasyceniem wodą – spadek ten wynosi 12%.

Określony z wykorzystaniem wzoru normowego (3) spadek wytrzymałości muru nie uwzględnia wytrzymałość zaprawy w stanie mokrym. Między innymi z tego powodu, wartość 12% należy traktować z dużą ostrożnością i odnosić przede wszystkim do murów wznoszonych wspólnie dla których obowiązuje norma PN-EN 1996-1-1 [87].

## 5. Badania własne cegieł i zapraw oraz analiza wyników

### 5.1. Badania cegieł ceramicznych z różnych okresów historycznych

#### 5.1.1. Charakterystyka cegieł

Badania prowadzono na ceglach historycznych oraz ceglach produkowanych współcześnie. Charakterystyki cegieł zestawiono w tabeli 5.1. Widok badanych cegieł przedstawiono na rysunku 5.1. Cegły lub fragmenty cegieł pobierano z budynków historycznych Krakowa i Wrocławia w trakcie prowadzonych prac eksperckich. Cegły pobierano albo z fragmentów wyburzanych konstrukcji, albo w czasie wycinania otworów w murach. Ze względów konserwatorskich pobieranie z konstrukcji całych cegieł lub połówek cegieł do badań nie zawsze było możliwe. Z tego powodu badania niektórych cegieł prowadzono na mniejszych elementach – wycinanych z fragmentów pozyskanego materiału historycznego.

a)



b)



c)



d)



Ciąg dalszy rysunku na następnej stronie.

e)



f)



g)



h)



Rys. 5.1 Przykłady cegieł wykorzystanych w badaniach własnych: a) cegła b1 – palcówka, b) cegły b2 – saskie, c) cegły b3 – lata 70-te XIX wieku, d) cegły b4 – ostatnia dekada XIX wieku, e) cegły b5 – ostatnia dekada XIX wieku, f) cegły b6 – przełom XIX i XX wieku, g) cegła b7 – przełom XIX i XX wieku, h) cegły b8 – produkowane współcześnie

Jako zasadę przyjęto, że najmniejszy wymiar elementu próbnego z cegieł nie powinien być mniejszy niż 40 mm. Wpływ wielkości elementów badawczych na wyniki badań wytrzymałościowych cegieł szczegółowo był analizowany w pracy [69], której autor niniejszej dysertacji jest współautorem. W krajowej literaturze przedmiotu zagadnienia te omówiono w pracy [70]. Próbki przygotowywano w taki sposób, aby z tej samej cegły pozyskać próbkę do badań wytrzymałościowych w stanie powietrzno-suchym i w stanie „mokrym”.

Łącznie do badań przygotowano 7 rodzajów cegieł historycznych oraz 1 rodzaj cegły współczesnej. Wymiary cegieł, których pobranie w całości nie było możliwe ustalano na podstawie pomiarów uzupełniających prowadzonych w licu murów.

Tabela 5.1 Charakterystyka badanych cegieł ceramicznych

Oznaczenie cegieł	Rodzaj cegieł	Sposób wytwarzania	Wymiary	Masa
			[mm]	[kg]
b1	cegły historyczne „palcówki” XIV / XV w. Kraków	formowanie ręczne	241÷282 x 110÷147 x 59÷95	4,24 (*)
b2	cegły historyczne „saskie” przełom XVII i XVIII w. Kraków	formowanie ręczne	236÷255 x 122÷137 x 45÷60	2,5
b3	cegły historyczne lata 70-te XIX w. Kraków	(-)	285÷303 x 142÷153 x 67÷69	5,1
b4	cegły historyczne ostatnia dekada XIX w. Kraków	produkcja maszynowa	292÷305 x 140÷145,0 x 67÷68,5	4,9
b5	cegły historyczne ostatnia dekada XIX w. Wrocław	produkcja maszynowa	252÷260 x 115÷126 x 65÷70	4,1
b6	cegły historyczne przełom XIX i XX w. Kraków	produkcja maszynowa	273÷290 x 130÷142 x 63÷67	4,1
b7	cegły historyczne przełom XIX i XX w. Kraków	produkcja maszynowa	287÷293 x 137÷145 x 63÷67	4,6
b8	cegły współczesne 2009r.	produkcja maszynowa	235÷237 x 113,5÷114,0 x 71÷74	3,5
Oznaczenia:				
(*) – z przeliczenia – na podstawie badań próbek wyciętych				
(-) – brak danych				

Zwraca uwagę znaczna różnorodność w zakresie wymiarów, imperfekcji geometrycznych oraz masy badanych cegieł.

Najmniejsze cegły pochodziły z przełomu XVII i XVIII wieku. Cegły te miały również największe imperfekcje geometryczne. Natomiast cegły XIX-wieczne formowane maszynowo charakteryzowały się zdecydowanie większą jednorodnością kształtu.



### 5.1.2. Badania wytrzymałości na ściskanie

Badania wytrzymałości na ściskanie cegieł przeprowadzono zgodnie z procedurą podaną w normie PN-EN 772-1:2011 [89]. Przykłady elementów próbnych przygotowanych do badań wytrzymałościowych przedstawiono na rysunku 5.2.

a)



b)



c)



Rys. 5.2 Przykłady elementów przygotowanych do badań wytrzymałościowych cegieł:  
 a) walce (odwierty)  $\varnothing 50\text{mm}$ ,  $h=50\text{mm}$  – cegły b1, b) kostki 60mm – cegły b3,  
 c) półówki cegieł – cegły b4

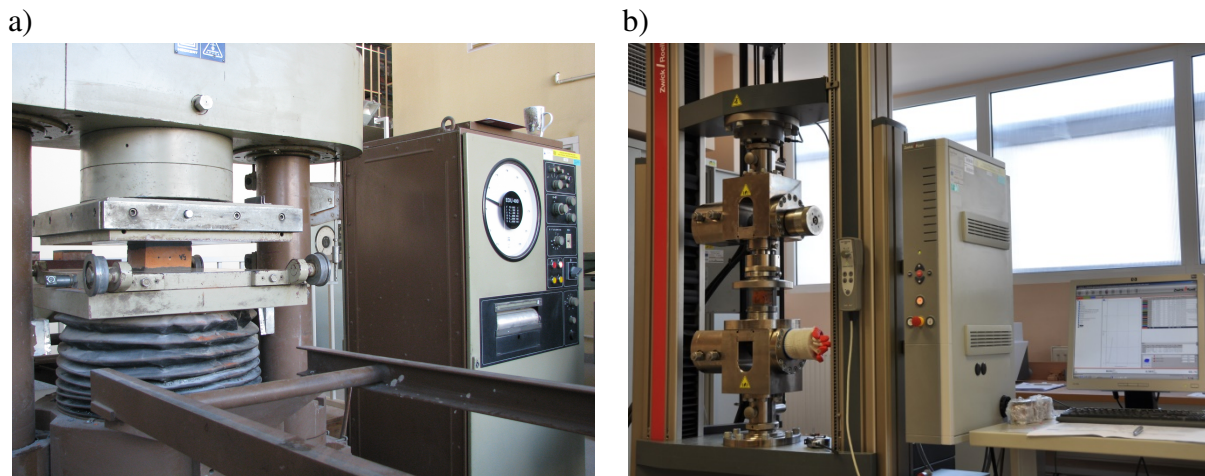
Szczególną uwagę zwrócono na staranne przygotowanie powierzchni wspornych, przez które było realizowane przekazanie siły obciążającej w badaniu wytrzymałościowym.

Sezonowanie próbek do stanu powietrzno-suchego przeprowadzono w badaniach zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 772-1 [89]. Stosowano sezonowanie przez zanurzenie w wodzie. W pierwszym etapie próbki zanurzano w wodzie na 1/3 wysokości, następnie zalewano próbki całkowicie wodą i przechowywano przez okres 7 dni. Próbki cegieł wyciągano z wody bezpośrednio przed badaniem wytrzymałościowym i pozwolono im na ociekanie przez 15 do 20 minut, następnie zabezpieczano je przed wysychaniem i kierowano



do badań wytrzymałościowych. Wilgotność wszystkich cegieł sezonowanych w laboratorium do stanu powietrzno-suchego nie przekraczała 1%.

Mniejsze próbki badano w maszynie wytrzymałościowej Zwick Roell Z100 natomiast próbki o większych wymiarach w maszynie EDU 400 oraz Zwick Z1600. Widok próbek na stanowiskach badawczych przedstawiono na rysunku 5.3. Wszystkie próbki były badane w takim kierunku w jakim działa obciążenie ściskające w murze.



Rys. 5.3 Badania wytrzymałości na ściskanie cegieł – widok stanowisk badawczych:  
a) badanie w maszynie EDU 400, b) badanie w maszynie Zwick Roell Z100

Wyniki badań cegieł ceramicznych zebrano w tabeli 5.2. Współczynnik  $k_B$  określa stosunek wytrzymałości na ściskanie cegieł w stanie „mokrym” do wytrzymałości na ściskanie cegieł w stanie powietrzno-suchym.

W niemal wszystkich przypadkach średnia wytrzymałość na ściskanie cegieł w stanie „mokrym” była mniejsza niż w stanie powietrzno-suchym. Wyjątek stanowiły cegły XIX-wieczne pochodzące z budynku zlokalizowanego we Wrocławiu (cegły b5).

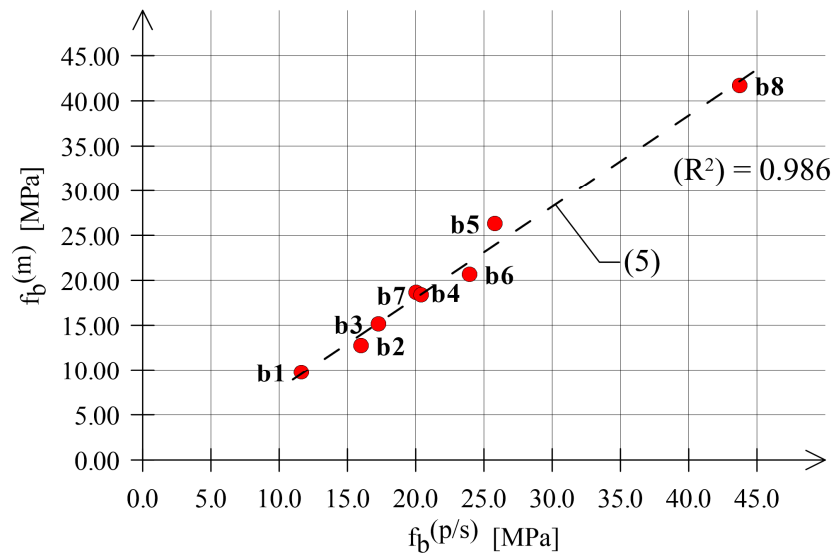
Stosunek wytrzymałości na ściskanie cegieł w stanie mokrym do wytrzymałości na ściskanie cegieł w stanie powietrzno-suchym zawierał się w przedziale  $0,80 \div 1,02$ . Średnio ze wszystkich testów prowadzonych na ceglach historycznych (b1 ÷ b7), wytrzymałość na ściskanie cegieł w stanie mokrym wyniosła 0,89 wytrzymałości w stanie powietrzno-suchym. Dla cegieł produkowanych współcześnie (b8), wytrzymałość na ściskanie w stanie „mokrym” wyniosła 0,95 wytrzymałości w stanie suchym.

Należy zwrócić uwagę na duże rozrzuty wytrzymałości badanych cegieł historycznych. Współczynniki zmienności wytrzymałości na ściskanie cegieł wielokrotnie przekraczają wartości uzyskane dla cegieł współczesnych.

Tabela 5.2 Wyniki badań wytrzymałościowych cegieł ceramicznych – badania własne

Oznaczn. cegieł	Rodzaj cegieł	Rodzaj elementu badawczego	Liczba elementów próbnych do badań		Wytrzymałość na ściskanie		$k_B = \frac{f_B^{(m)}}{f_B^{(p/s)}}$	Współczynnik zmienności	
			w stanie pow./suchym	w stanie mokrym	$f_B^{(p/s)}$	$f_B^{(m)}$		$v_B^{(p/s)}$	$v_B^{(m)}$
			[szt.]	[szt.]	[MPa]	[MPa]		[%]	[%]
b1	cegły historyczne „palcówki” XIV / XV w. Kraków	walce (odwiarty) $\phi 50\text{mm}$ ; $h=50\text{mm}$	5	5	13,2	11,1	<b>0,84</b>	50,6	30,2
b2	cegły historyczne „saskie” przełom XVII i XVIII w. Kraków	kostki 45mm	6	6	18,0	14,4	<b>0,80</b>	24,7	18,3
b3	cegły historyczne lata 70-te XIX w. Kraków	kostki 60mm	6	6	17,6	15,5	<b>0,88</b>	24,7	17,4
b4	cegły historyczne ostatnia dekada XIX w. Kraków	połówki cegieł	6	6	23,8	22,2	<b>0,93</b>	13,7	13,5
b5	cegły historyczne ostatnia dekada XIX w. Wrocław	kostki 60mm	5	5	26,3	26,9	<b>1,02</b>	33,4	42,3
b6	cegły historyczne przełom XIX i XX w. Kraków	połówki cegieł	7	7	28,3	24,4	<b>0,86</b>	24,9	23,9
b7	cegły historyczne przełom XIX i XX w. Kraków	kostki 60mm	18 po 2 z każdej cegły	18 po 2 z każdej cegły	22,9	20,7	<b>0,90</b>	28,9	33,9
b8	cegły współczesne 2009r.	połówki cegieł	6	6	47,3	45,1	<b>0,95</b>	6,0	5,9
Oznaczenia:									
$f_B^{(p/s)}$ – średnia wytrzymałość na ściskanie badanych cegieł w stanie powietrzno-suchym									
$f_B^{(m)}$ – średnia wytrzymałość na ściskanie badanych cegieł w stanie mokrym									
$v_B^{(p/s)}$ – współczynnik zmienności wytrzymałości badanych cegieł w stanie powietrzno-suchym									
$v_B^{(m)}$ – współczynnik zmienności badanych cegieł w stanie „mokrym”									

Zależność pomiędzy wytrzymałościami cegieł w stanie „mokrym” i powietrzno-suchym przedstawiono na rysunku 5.4. Ponieważ w badaniach stosowane były różne pod względem geometrii elementy próbne wartości z badań przeliczono stosując współczynnik  $\delta$  uwzględniający wpływ „efektu skali” zgodnie z normą PN-EN 772-1 [89].



Rys. 5.4 Zależność pomiędzy znormalizowaną wytrzymałością na ściskanie cegieł w stanie powietrzno-suchym ( $f_b^{(p/s)}$ ) a znormalizowaną wytrzymałością na ściskanie cegieł w stanie mokrym ( $f_b^{(m)}$ )

Z aproksymacji wyników badań własnych wynika zależność:

$$f_b^{(m)} = 1,017f_b^{(p/s)} - 2,301 \quad (5)$$

w której:

$f_b^{(p/s)}$  – znormalizowana wytrzymałość na ściskanie cegieł badanych w stanie powietrzno-suchym [MPa],

$f_b^{(m)}$  – znormalizowana wytrzymałość na ściskanie cegieł nasyconych wodą [MPa].

Zwraca uwagę wysoka wartość współczynnika  $R^2$ , co świadczy o dobrej korelacji. Zależność (5) pozwala na prognozowanie wytrzymałości na ściskanie cegieł w stanie „mokrym” na podstawie wytrzymałości na ściskanie cegieł w stanie powietrzno-suchym. Na jej podstawie można więc wyliczyć spadek wytrzymałości cegieł nasyconych wodą. Należy podkreślić, że baza wyników na podstawie której zaproponowano zależność (5) nie obejmuje cegieł niskiej wytrzymałości (mniejszej niż 10MPa). Z tych powodów stosowanie zależności (5) powinno być zweryfikowane dalszymi badaniami.

### 5.1.3. Badania gęstości, nasiąkliwości, porowatości i struktury porów

W tabeli 5.3 przedstawiono wyniki badań gęstości objętościowej, nasiąkliwości oraz porowatości cegieł. Gęstość objętościową ( $\rho_o$ ) oraz nasiąkliwość masową ( $n_m$ ) określono na

regularnych próbkach cegieł. Do badań nasiąkliwości masowej stosowano wodę w temperaturze pokojowej.

Gęstość objętościowa (pozorna)  $\rho_o$  wyraża masę jednostki objętości suchego materiału wraz z zawartymi w niej porami:

$$\rho_o = \frac{m_s}{V_o} \left[ \frac{g}{cm^3} \right] \quad (6)$$

w której:

$m_s$  – masa próbki materiału suchego [g],

$V_o$  – objętość próbki materiału zawierającego pory [ $cm^3$ ].

Wartość nasiąkliwości masowej ( $n_m$ ) wyrażoną w procentach obliczano zgodnie z zależnością:

$$n_m = \frac{m_n - m_s}{m_s} 100 [\% mas] \quad (7)$$

w której:

$m_n$  – masa próbki materiału nasyconego wodą [g],

$m_s$  – masa próbki materiału suchego [g].

Na podstawie nasiąkliwości masowej, przy przyjęciu gęstości wody  $\rho_w=1g/cm^3$  wyliczono nasiąkliwość objętościową:

$$n_o = n_m \rho_o [\% obj.] \quad (8)$$

Próbki cegieł suszono do stałej masy w temperaturze co najmniej 70°C, natomiast nasączenie próbek wodą odbywało się zgodnie z procedurą podaną w poprzednim rozdziale. Nasiąkliwość masowa cegieł jest utożsamiana w normach europejskich z absorpcją wody – w niniejszej pracy będzie konsekwencje stosowane pojęcie nasiąkliwości materiału.

Porowatość cegieł badano z wykorzystaniem piknomietru helowego Quantachrome Ultracyc 1200e – rysunek 5.5. Przed badaniem próbki suszono do stałej masy. Widok próbek wyciętych z cegieł i przygotowanych do badań w piknometrze przedstawiono na rysunku 5.6.

W badaniach zastosowano medium pomiarowe w postaci helu. Porowatość otwartą, określona w piknometrze helowym, wyrażoną w procentach obliczano zgodnie z zależnością:

$$p = 1 - \frac{\rho_o}{\rho_s} [\%] \quad (9)$$

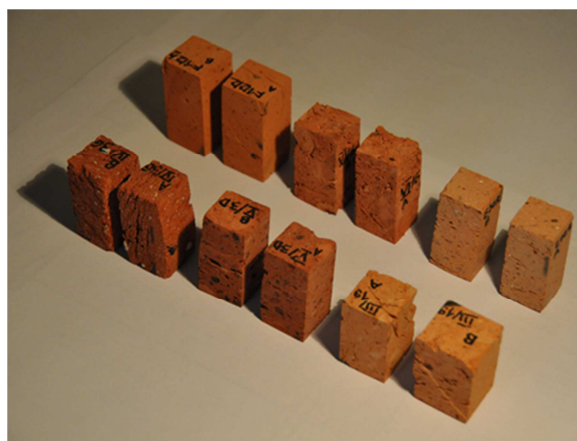
w której:

$\rho_o$  – gęstość objętościowa (pozorna) [g/cm<sup>3</sup>],

$\rho_s$  – gęstość szkieletowa pozbawiona porów otwartych [g/cm<sup>3</sup>].



Rys. 5.5 Piknometr helowy Quantachrome Ultrapyc 1200e do oceny porowatości cegieł ceramicznych



Rys. 5.6 Widok elementów próbnych przygotowanych do badań porowatości cegieł ceramicznych

Tabela 5.3 Wyniki badań gęstości objętościowej, nasiąkliwości oraz porowatości cegieł ceramicznych

Oznaczenie cegieł	Rodzaj cegieł	Gęstość objętościowa (pozorna)	Nasiąkliwość		Gęstość szkieletowa	Porowatość otwarta
			masowa	objętościowa		
		[g/cm <sup>3</sup> ]	[% mas.]	[% obj.]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[%]
b1	cegły historyczne „palcówki” XIV / XV w. Kraków	1,67	17,8	29,7	2,75	39,3
b2	cegły historyczne „saskie” przełom XVII i XVIII w. Kraków	1,58	19,8	31,3	2,74	42,3
b3	cegły historyczne lata 70-te XIX w. Kraków	1,73	15,0	26,0	2,68	35,4

Ciąg dalszy tabeli 5.3:

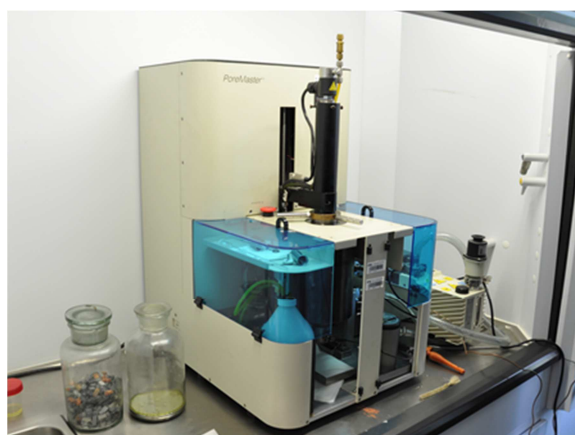
b4	cegły historyczne ostatnia dekada XIX w. Kraków	1,71	15,6	26,7	(-)	(-)
b5	cegły historyczne ostatnia dekada XIX w. Wrocław	2,00	9,6	19,2	2,64	24,2
b6	cegły historyczne przełom XIX i XX w. Kraków	1,66	16,3	27,1	2,70	38,5
b7	cegły historyczne przełom XIX i XX w. Kraków	1,73	16,8	29,1	2,70	35,9
b8	cegły współczesne 2009r.	1,81	12,8	23,2	2,55	29,0
Oznaczenia:						
(-) – nie oznaczono						

Jak wynika z tabeli 5.3 badane cegły wyraźnie różniły się zarówno nasiąkliwością jak również porowatością. Nasiąkliwość masowa cegieł zawierała się w przedziale od 9,6% do 19,8%, natomiast porowatość była w granicach od 26,4% do 40,6%. Wyniki te pokazują, że badania objęły szeroki pod względem materiałowym zakres cegieł ceramicznych.

Strukturę porowatości cegieł ustalano w porozymetrze rtęciowym Quantachrome PoreMaster 60. Widok próbek przed badaniem przedstawiono na rysunku 5.7 a stanowisko badawcze na rysunku 5.8.

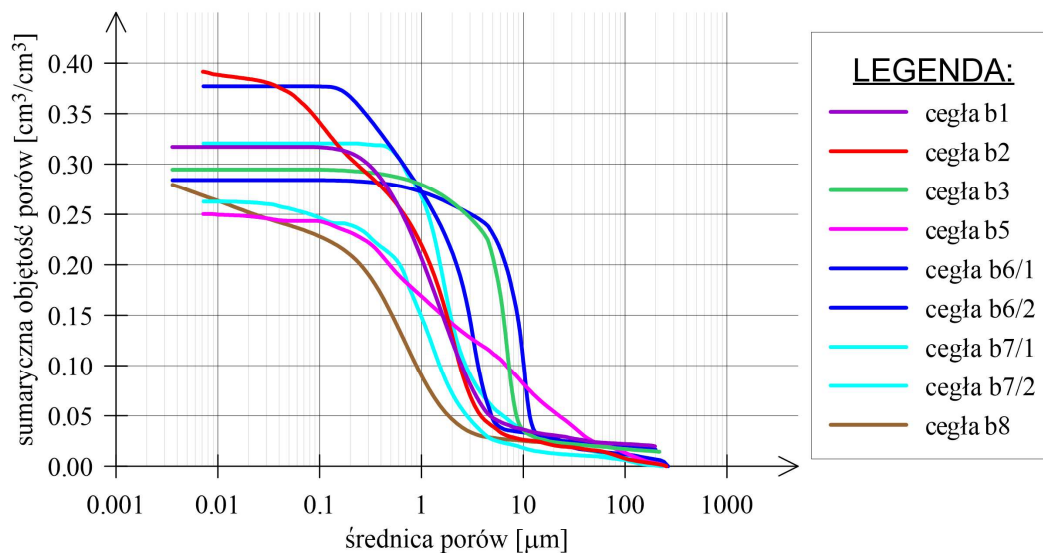


Rys. 5.7 Widok elementów wyciętych z cegieł i przygotowanych do badań w porozymetrze rtęciowym

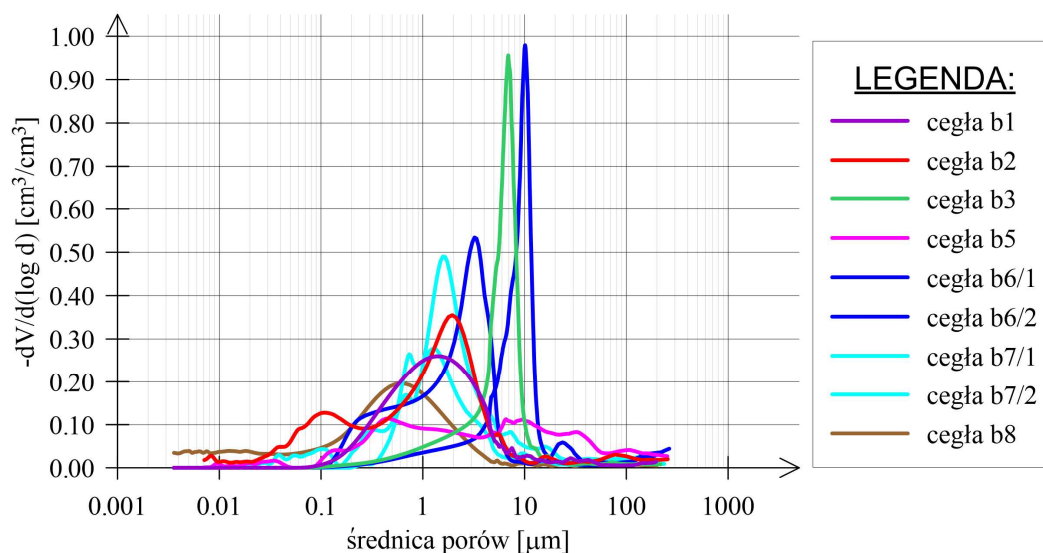


Rys. 5.8 Badania struktury porowatości cegieł w porozymetrze rtęciowym – widok stanowiska badawczego

W rezultacie badań struktury porowatości cegieł otrzymano krzywe sumacyjne i krzywe populacyjne rozkładu wielkości porów otwartych, które zestawiono odpowiednio na rysunkach 5.9 i 5.10. Na podstawie uzyskanych krzywych populacyjnych dokonano kategoryzacji porów otwartych badanych cegieł ceramicznych w zależności od średnicy porów. Uzyskane wyniki zestawiono w tabeli 5.4.



Rys. 5.9 Krzywe sumacyjne rozkładu wielkości porów w cegłach ceramicznych – badania struktury porowatości



Rys. 5.10 Krzywe populacyjne rozkładu wielkości porów cegieł ceramicznych – badania struktury porowatości



Tabela 5.4 Kategoryzacja porów badanych cegieł ceramicznych –  
w zależności od średnicy porów

przedział wielkości średnic porów [μm]	Rodzaj cegły					
	b1		b2		b3	
	W* [cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]	[%]	W* [cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]	[%]	W* [cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]	[%]
<0,01	0,0000	0,00	0,0030	0,77	0,0000	0,00
0,01-0,1	0,0003	0,09	0,0473	12,09	0,0000	0,00
0,1-0,5	0,0457	14,41	0,0739	18,88	0,0062	2,09
0,5-1,0	0,0646	20,37	0,0477	12,18	0,0089	3,01
1,0-5,0	0,1584	49,96	0,1800	45,97	0,0716	24,29
5,0-10	0,0118	3,71	0,0134	3,42	0,1724	58,52
10-100	0,0143	4,51	0,0185	4,73	0,0186	6,30
>100	0,0220	6,95	0,0077	1,96	0,0170	5,78
V <sub>porów</sub> **	<b>0,3171</b>	<b>100,0</b>	<b>0,3915</b>	<b>100,0</b>	<b>0,2946</b>	<b>100,0</b>
przedział wielkości średnic porów [μm]	Rodzaj cegły					
	b5		b6/1		b6/2	
	W* [cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]	[%]	W* [cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]	[%]	W* [cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]	[%]
<0,01	0,0006	0,2	0,0000	0,0	0,0000	0,0
0,01-0,1	0,0065	2,6	0,0002	0,0	0,0000	0,0
0,1-0,5	0,0445	17,8	0,0598	15,9	0,0044	1,5
0,5-1,0	0,0297	11,9	0,0445	11,8	0,0074	2,6
1,0-5,0	0,0566	22,6	0,2259	59,9	0,0414	14,6
5,0-10	0,0304	12,2	0,0134	3,5	0,1267	44,6
10-100	0,0684	27,3	0,0216	5,7	0,0834	29,4
>100	0,0134	5,3	0,0118	3,1	0,0208	7,3
V <sub>porów</sub> **	<b>0,2502</b>	<b>100,0</b>	<b>0,3772</b>	<b>100,0</b>	<b>0,2842</b>	<b>100,0</b>
przedział wielkości średnic porów [μm]	Rodzaj cegły					
	b7/1		b7/2		b8	
	W* [cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]	[%]	W* [cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]	[%]	W* [cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]	[%]
<0,01	0,0000	0,0	0,0000	0,0	0,0159	5,7
0,01-0,1	0,0000	0,0	0,0162	6,2	0,0356	12,7
0,1-0,5	0,0057	1,8	0,0361	13,8	0,0753	27,0
0,5-1,0	0,0470	14,7	0,0618	23,5	0,0623	22,3
1,0-5,0	0,2092	65,2	0,1221	46,5	0,0623	22,3
5,0-10	0,0224	7,0	0,0084	3,2	0,0029	1,0
10-100	0,0276	8,6	0,0119	4,5	0,0076	2,7
>100	0,0086	2,7	0,0061	2,3	0,0176	6,3
V <sub>porów</sub> **	<b>0,3206</b>	<b>100,0</b>	<b>0,2626</b>	<b>100,0</b>	<b>0,2795</b>	<b>100,0</b>
Oznaczenia:						
W*	– sumaryczna objętość porów [cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]					
V <sub>porów</sub> **	– całkowita objętość porów [cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]					
	– kolorem żółtym zaznaczono największe przedziały wielkości średnic porów					



Analizując wykresy na rysunkach 5.9 i 5.10 oraz dane przedstawione w tabeli 5.4 należy stwierdzić, że badane cegły charakteryzowały się bardzo zróżnicowaną ilością i strukturą porów. Najmniejszą sumaryczną objętością porów, określoną w porozymetrze rtęciowym, cechowały się cegły b5, a największą cegły b2 (historyczne - saskie).

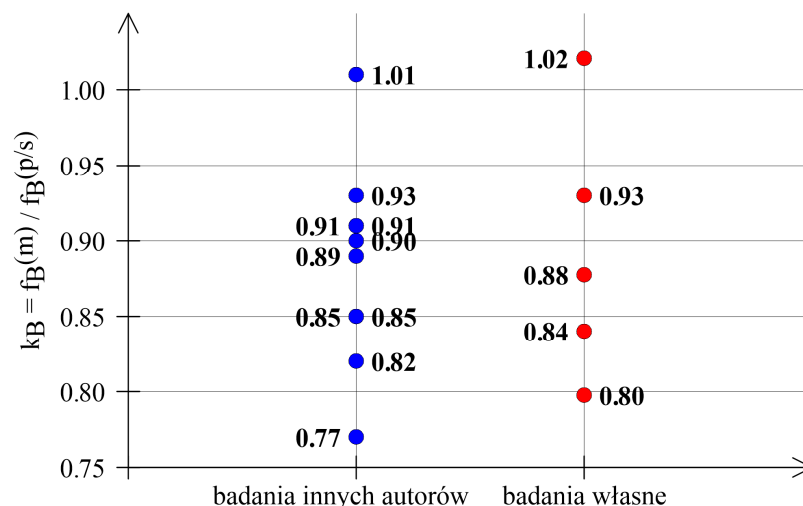
W przypadku większości badanych cegieł najwięcej w strukturze ceramiki było porów o średnicach z przedziału  $1,0 \div 5,0\mu\text{m}$  i  $5,0 \div 10,0\mu\text{m}$ . Wyjątek stanowiły cegły historyczne b5 i cegły współczesne b8 cechujące się największą ilością porów w przedziale innych średnic porów.

W przypadku większości cegieł w strukturze ceramiki istnieje jeden przedział średnic porów, których udział w całkowitej ilości porów jest zdecydowanie największy. Jedynie w ceglach historycznych b5 i ceglach współczesnych b8 procentowe udziały porów danych średnic są rozłożone bardziej równomiernie, cegły te charakteryzowały się również najmniejszą nasiąkliwością odpowiednio 9,6% i 12,8% oraz największą wartością współczynnika  $k_B$ .

#### **5.1.4. Wpływ parametrów charakteryzujących strukturę cegieł na ich wytrzymałość w stanie silnego zawilgocenia**

Zestawienie wyników badań własnych przedstawionych w rozdziale 5.1.2 z wynikami prezentowanymi w literaturze przedmiotu podano na rysunku 5.11.

W zestawieniu wartości współczynnika  $k_B$  charakteryzującego stosunek wytrzymałości na ściskanie cegieł w stanie „mokrym” do wytrzymałości na ściskanie cegieł w stanie powietrzno-suchym wykorzystano dane z tabel 4.1 i 5.2. Jak wynika z porównania wyników badań przeprowadzonych na próbkach o wymiarze co najmniej 40mm przedział wartości współczynnika  $k_B$  uzyskany w badaniach własnych ( $0,80 \div 1,02$ ) jest zbliżony do wynikającego z przeglądu literatury przedmiotu ( $0,77 \div 1,01$ ). Jest to efektem szerokiego zakresu badań własnych, który obejmował cegły wykonane w różnych okresach historycznych, według różnych technologii formowania i wypału.

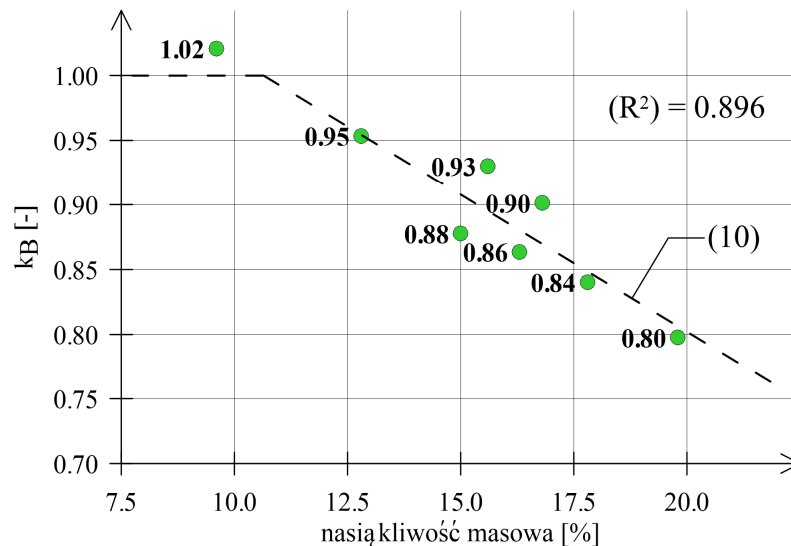


Rys. 5.11 Porównanie wyników badań cegieł ceramicznych w zakresie współczynnika  $k_B$

W odniesieniu do nasiąkliwości różnice te są również widoczne. Z zestawienia wyników badań nasiąkliwości cegieł historycznych produkowanych w przeszłości w różnych krajach europejskich wynika przedział wartości od 6% do 32% (*F.M. Fernandes, P.B. Lourenco, F. Castro* [23]). W Polsce badania nasiąkliwości cegieł produkowanych w XX wieku prowadzili między innymi *G. Rutkowska i P. Kijanka* [92] – nasiąkliwość masowa cegieł wynosiła od 9,4% do 23,8%. Cegły produkowane współcześnie badała natomiast *T. Stryzewska* [99] uzyskując ich nasiąkliwość masową z przedziału 14,3% - 28,1%.

W badaniach własnych nasiąkliwość cegieł wynosiła od 9,6% do 19,8%, co zawiera się w przedziale danych uzyskiwanych w naszym kraju. Natomiast można się spodziewać, że w jednostkowych badaniach mogą wystąpić cegły o nieco większej nasiąkliwości.

Na rysunku 5.12 przedstawiono wykres zależności pomiędzy współczynnikiem  $k_B$  a nasiąkliwością cegieł wynikającą z badań własnych. Z wykresu wynika, że im większa nasiąkliwość cegieł, tym wartość stosunku wytrzymałości cegieł badanych w stanie „mokrym” do wytrzymałości cegieł badanych w stanie powietrzno-suchym jest mniejsza.



Rys. 5.12 Zależność pomiędzy nasiąkliwością a spadkiem wytrzymałości na ściskanie cegieł wynikającym z ich nasycenia wodą

Z aproksymacji wyników badań wynika zależność:

$$k_B = f_B^{(m)} / f_B^{(p/s)} = -0,02115n_m + 1,225 \quad (10)$$

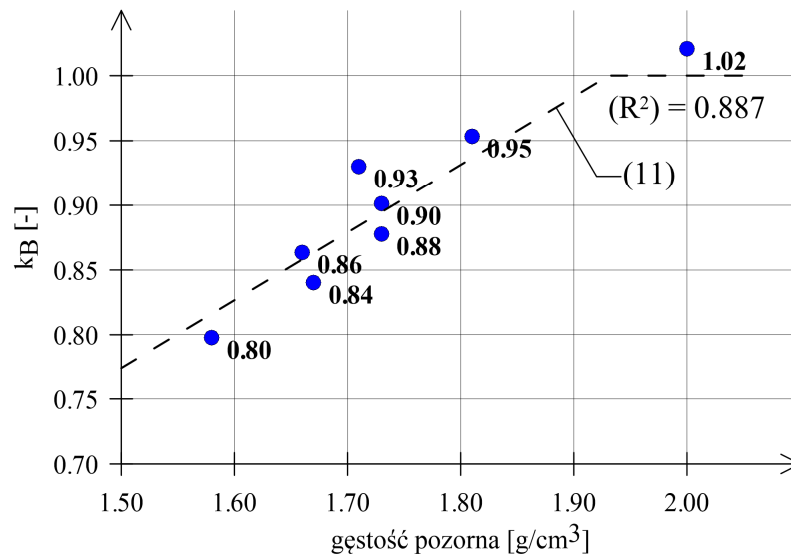
w której:

$n_m$  – nasiąkliwość masowa cegieł [%].

Zwraca uwagę dobre dopasowanie funkcji (10) do wyników badań doświadczalnych – współczynnik  $R^2=0,896$ .

Zgodnie z zależnością (10), dla cegieł o nasiąkliwości mniejszej niż 10,6% spadek wytrzymałości elementów badanych w stanie „mokrym” w stosunku do elementów badanych w stanie powietrzno-suchym nie wystąpi. Potwierdzają to wyniki badań *D.V. Bompa i A.Y. Elghazouli* [12], w których dla cegieł o nasiąkliwości 10,8% spadku wytrzymałości również nie stwierdzono.

Zależność pomiędzy wartością współczynnika  $k_B$  a gęstością objętościową (pozorną) przedstawiono na rysunku 5.13. Jak należało się spodziewać, im mniejsza gęstość pozorna cegieł, tym wartość stosunku wytrzymałości cegieł badanych w stanie „mokrym” do wytrzymałości cegieł badanych w stanie powietrzno-suchym jest mniejsza.



Rys. 5.13 Zależność pomiędzy gęstością pozorną cegieł a spadkiem wytrzymałości na ściskanie cegieł wynikającym z ich nasycenia wodą

Z aproksymacji wyników badań funkcją liniową wynika zależność:

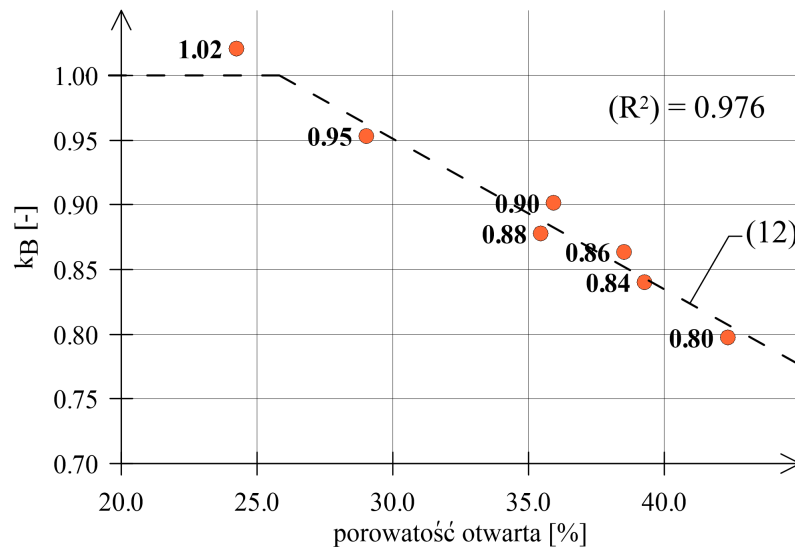
$$k_B = f_B^{(m)} / f_B^{(p/s)} = 0,524\rho_0 - 0,012 \quad (11)$$

w której:

$\rho_0$  – gęstość pozorną [g/cm<sup>3</sup>].

Zwraca uwagę również w tym przypadku dobre dopasowanie funkcji aproksymacyjnej do wyników badań doświadczalnych ( $R^2=0,887$ ).

Najlepszą korelację pomiędzy wynikami badań doświadczalnych i funkcją aproksymacyjną uzyskano analizując porowatość cegieł ( $p$ ) – rysunek 5.14.



Rys. 5.14 Zależność wartości współczynnika  $k_B$  od porowatości cegieł wyznaczonej w piknometrze helowym

Zależność  $k_B(p)$  ma postać

$$k_B = f_B^{(m)} / f_B^{(p/s)} = -0,01166p + 1,301 \quad (12)$$

w której:

$p$  – porowatość otwarta [%].

Podsumowując można stwierdzić, że na podstawie badań własnych wykazano istnienie zależności pomiędzy współczynnikiem  $k_B$  określającym spadek wytrzymałości na ściskanie cegieł na skutek ich silnego zawilgocenia a gęstością pozorną, nasiąkliwością oraz porowatością otwartą. Najwyższy współczynnik determinacji ( $R^2=0,976$ ) charakteryzuje zależność pomiędzy współczynnikiem  $k_B$  a porowatością wyznaczoną w piknometrze helowym.

Należy podkreślić, że zależności, o których mowa powyżej, a więc wzory (10), (11) i (12) uzyskano z badań zróżnicowanego materiału – cegieł pochodzących z różnych okresów historycznych, które charakteryzowały się bardzo zróżnicowanymi właściwościami.

Charakterystyczne dla struktury cegieł historycznych oprócz struktury porowatości jest znaczna liczba wtrąceń. „Gołym okiem” w przekrojach cegieł historycznych widoczne są ziarna i wtrącenia o znacznych rozmiarach (na przykład ziarna grubego piasku, żwirku, margla, węgla drzewnego). Niejednokrotnie wymiar tych inkluzji przekracza 10mm. Widoczne są również liczne zarysowania i ubytki struktury ceramiki, która jest bardzo

niejednorodna w swej masie. Widok przykładowych przekrojów badanych cegieł historycznych przedstawiono na rysunku 5.15.

a)



b)



c)



d)



e)

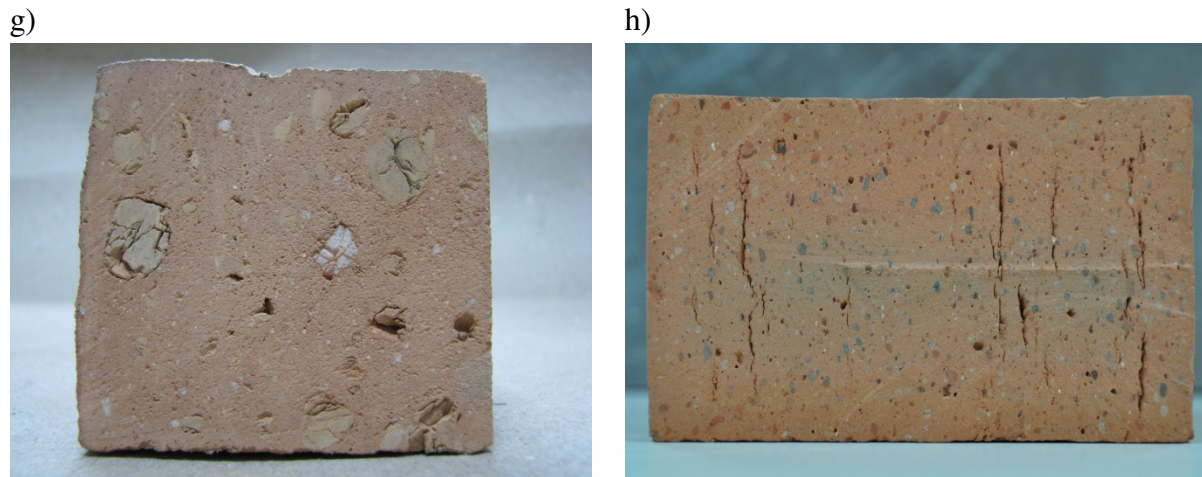


f)



Ciąg dalszy rysunku na następnej stronie.





Rys. 5.15 Widok struktur ceramicznych w przekrojach cegieł – przykłady:  
 a) historyczna b1, b) historyczna b2, c) historyczna b3, d) historyczna b5,  
 e) historyczna b6, f) historyczna b6, g) historyczna b7, h) współczesna b8

W odróżnieniu od cegieł historycznych, cegły produkowane współcześnie mają o wiele bardziej jednolitą strukturę. Puste przestrzenie znacznych rozmiarów i duże inkluzje praktycznie w nich nie występują, natomiast w ceglach współczesnych obserwowane są rysy technologiczne będące efektem zastosowanego materiału wyjściowego oraz sposobu wypału. Opisane powyżej różnice w strukturach cegieł mają istotny wpływ między innymi na ich nasiąkliwość oraz porowatość i w konsekwencji na ich podatność na destrukcyjne oddziaływanie wody.

W dotychczasowych analizach rozważano spadek wytrzymałości na ściskanie cegieł w stanie „mokrym” w stosunku do stanu powietrzno-suchego wyrażony stosunkiem  $f_B^{(m)}/f_B^{(p/s)}$ . Gdyby rozpatrywać odwrotny stosunek tych wartości, czyli  $f_B^{(p/s)}/f_B^{(m)}$  to na podstawie badań własnych można go określić w przedziale od 0,98 do 1,25. Licząc znormalizowaną wytrzymałość na ściskanie cegieł z zależności (2), przy uwzględnieniu współczynnika  $\eta_w = 1,2$  można zawyżyć znormalizowaną wytrzymałość na ściskanie cegieł o kilkanaście procent – dotyczy to cegieł, dla których silne zawilgocenie nie powoduje istotnego spadku wytrzymałości ( $f_B^{(p/s)}/f_B^{(m)}$  równe około 1,0). Stosowanie jednej wartości współczynnika  $\eta_w$  nie jest w związku z tym uzasadnione.

### 5.1.5. Metoda ultradźwiękowa w ocenie wytrzymałości zawilgoconych cegieł

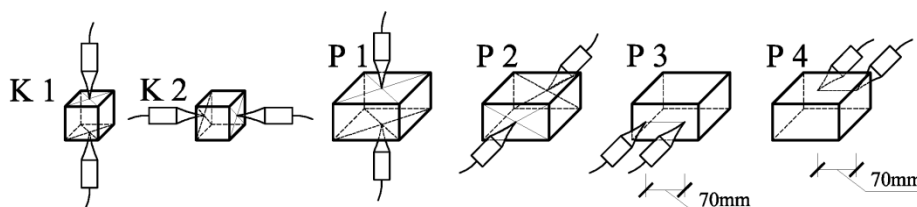
W badaniach istniejących konstrukcji murowych stosowanych jest aktualnie wiele metod nieniszczących i małoniszczących. Stosowanie tych metod jest wymagane w badaniach

obiektów historycznych bowiem umożliwia to ograniczenie do minimum uszkodzeń konstrukcji ceglanej związanych z pobieraniem próbek do badań wytrzymałościowych. Wytyczne w zakresie doboru metod diagnostycznych znaleźć można w zaleceniach UIC [107]. Od wielu lat podejmowane są próby zastosowania w badaniach murów ceglanych sklerometrów, penetrometrów różnych typów, metody ultradźwiękowej, pomiarów laserowych, pomiarów typu impact-echo, a także poduszek ciśnieniowych i mikroodwiertów. Wykonuje się też do pozyskania danych mogących mieć wpływ na nośność murów takie urządzenia jak georadar, tomograf, kamery termowizyjne, wideoskopy. Szereg informacji w tym zakresie znaleźć można w pracach [4], [11], [13], [18], [39], [61], [91], [98], [105], [108].

Na możliwości wykorzystania badań ultradźwiękowych w ocenie parametrów cegieł zwracali uwagę między innymi *L. Runkiewicz i W. Rodzik* [91], *N. Stawiska i B. Stawiski* [97], *L. Binda* [11], *P. Matysek* [61].

Autor niniejszej dysertacji przeprowadził badania ultradźwiękowe dla trzech rodzajów cegieł historycznych b4, b6 oraz b7. Cegły pochodziły z budynków wzniesionych w XIX wieku. Badania cegieł b4 i b7 prowadzono na połówkach cegieł, natomiast testy na ceglach b6 wykonano na kostkach o boku 60mm, których płaszczyzny wsporne były szlifowane, a pozostałe przecięte.

Badania połówek cegieł prowadzono metodą bezpośrednią prostopadłe do oryginalnych płaszczyzn wspornych i równoległe do płaszczyzn wozówkowych oraz metodą pośrednią na przeciętej płaszczyźnie główkowej i płaszczyźnie oryginalnej. Płaszczyzny te oznaczono odpowiednio od P1 do P4. Badania kostek o boku 60mm wykonano metodą bezpośrednią prostopadłe do szlifowanych płaszczyzn wspornych oraz w kierunku równoległym do płaszczyzn wspornych – oznaczenia odpowiednio K1 i K2. Sposób realizacji badań ultradźwiękowych podano na rysunku 5.16.



Rys. 5.16 Metoda przeprowadzania badań ultradźwiękowych cegieł



Do badań użyto betonoskopu ultradźwiękowego PUNDIT LAB firmy Proceq – rysunek 5.17. Czas przejścia fali ultradźwiękowej mierzono przy użyciu głowic eksponentalnych z częstotliwością 54kHz. Baza pomiarowa w metodzie pośredniej wynosiła 70mm. Wielkość bazy została ustalona na podstawie wytycznych podanych w pracy [97]. Badania w stanie „mokrym” przeprowadzono na tych samych elementach próbnych oraz w tych samych miejscach pomiarowych, co elementy próbne badane w stanie suchym. Metoda nasycenia cegieł wodą była identyczna do opisanej w rozdziale 5.1.2. Nasiąkliwość masowa badanych cegieł wynosiła (zgodnie z tabelą 5.3): 15,6% dla cegieł b4, 16,3% dla cegieł b6 i 16,8% dla cegieł b7.



Rys. 5.17 Stanowisko do badań ultradźwiękowych

Natomiast stan suchy cegieł uzyskiwano przez sezonowanie próbek do stanu powietrzno-suchego zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 772-1 [89] w sposób analogiczny jak w rozdziale 5.1.2.

Po przeprowadzeniu badań ultradźwiękowych wykonano badania wytrzymałościowe cegieł. W tabeli 5.5 zamieszczono wyniki badań ultradźwiękowych.

Tabela 5.5 Wyniki badań ultradźwiękowych dla cegieł badanych w różnych stanach wilgotności

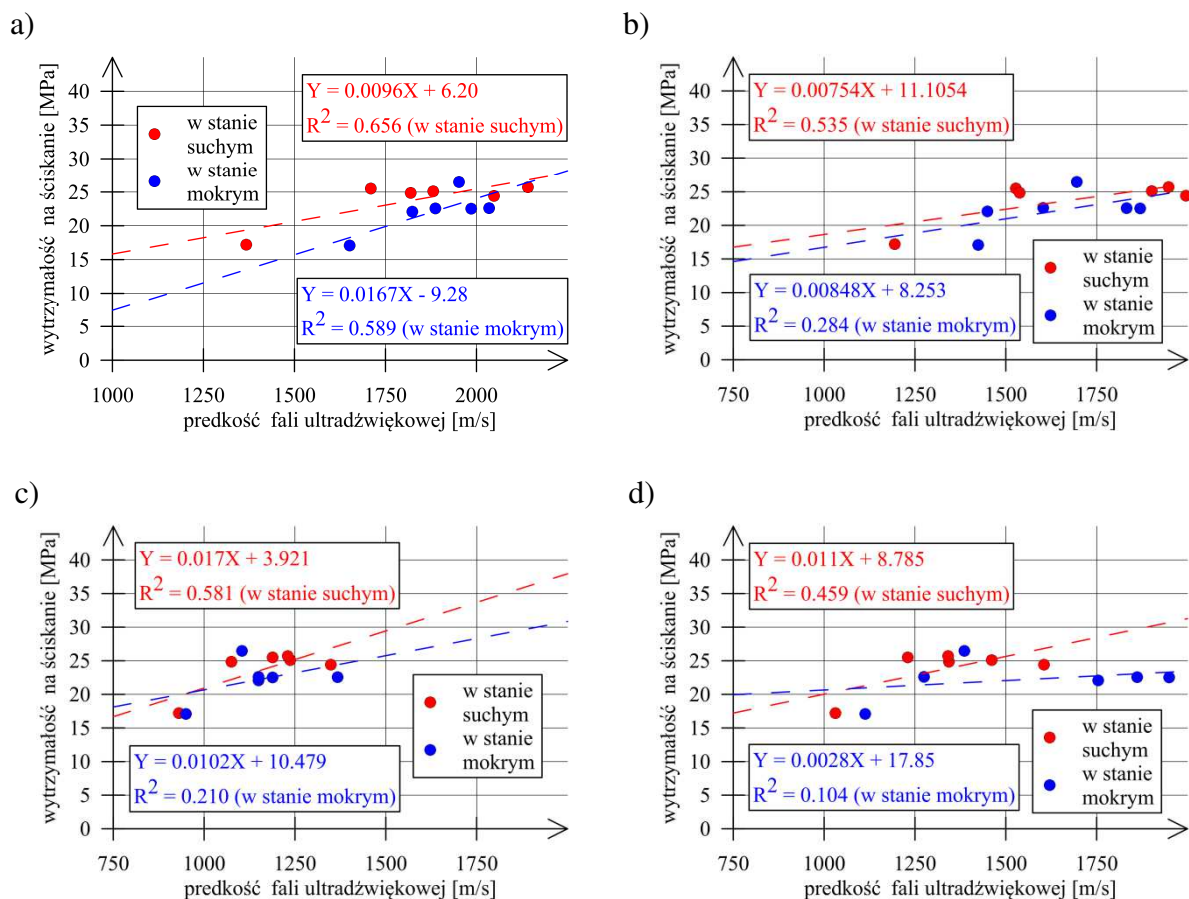
Metoda badania		bezpośrednia				pośrednia	
Element próbny		kostki		połówki			
Sposób badania		K 1	K 2	P 1	P 2	P 3	P 4
Rodzaj badanych cegieł		cegły b7		cegły b4			
Średnia prędkość fali ultradźwiękowej [m/s]	w stanie powietrzno-suchym $v^{(s)}$	2202	1715	1827	1729	1175	1308
	w stanie mokrym $v^{(m)}$	2167	1720	1889	1645	1151	1557
$v^{(m)} / v^{(s)} =$		<b>0,98</b>	<b>1,00</b>	<b>1,03</b>	<b>0,95</b>	<b>0,98</b>	<b>1,19</b>
Współczynnik zmienności [%]	w stanie powietrzno-suchym	25,1	35,9	7,5	11,4	9,2	9,5
	w stanie mokrym	19,9	29,2	7,3	11,4	11,7	22,1
Rodzaj badanych cegieł				cegły b6			
Średnia prędkość fali ultradźwiękowej [m/s]	w stanie powietrzno-suchym $v^{(s)}$	-	-	-	1581	1056	1034
	w stanie mokrym $v^{(m)}$	-	-	-	1498	1025	1237
$v^{(m)} / v^{(s)} =$		-	-	-	<b>0,95</b>	<b>0,97</b>	<b>1,20</b>
Współczynnik zmienności [%]	w stanie powietrzno-suchym	-	-	-	9,4	14,7	15,9
	w stanie mokrym	-	-	-	8,7	15,4	28,7
Oznaczenia:							
K 1		– kostki badane prostopadle do szlifowanej płaszczyzny wspornej					
K 2		– kostki badane na płaszczyźnie przeciętej, równoległe do płaszczyzny wspornej					
P 1		– połówki cegieł badane prostopadle do oryginalnej płaszczyzny wspornej					
P 2		– połówki cegieł badane równoległe do płaszczyzn wozówkowych					
P 3		– połówki cegieł badane pośrednio na główkowej płaszczyźnie przeciętej					
P 4		– połówki cegieł badane pośrednio na główkowej płaszczyźnie oryginalnej					

Dla cegieł badanych w stanie „mokrym” można było się spodziewać większych prędkości fal ultradźwiękowych w odniesieniu do elementów badanych w stanie powietrzno-suchym. Woda w porach, zastępująca powietrze, zwiększa bowiem prędkość fal ultradźwiękowych.

Badania dla większości przypadków pokazały, że stosunek prędkości fali ultradźwiękowej na elementach próbnych badanych w stanie „mokrym” w odniesieniu do prędkości fali ultradźwiękowej na elementach próbnych badanych w stanie powietrzno-suchym zawiera się w przedziale  $0,95 \div 1,03$ , a więc maksymalna różnica nie przekracza 5%. Biorąc pod uwagę rozrzuty prędkości fal można stwierdzić, że różnice są zanedbywalnie małe.

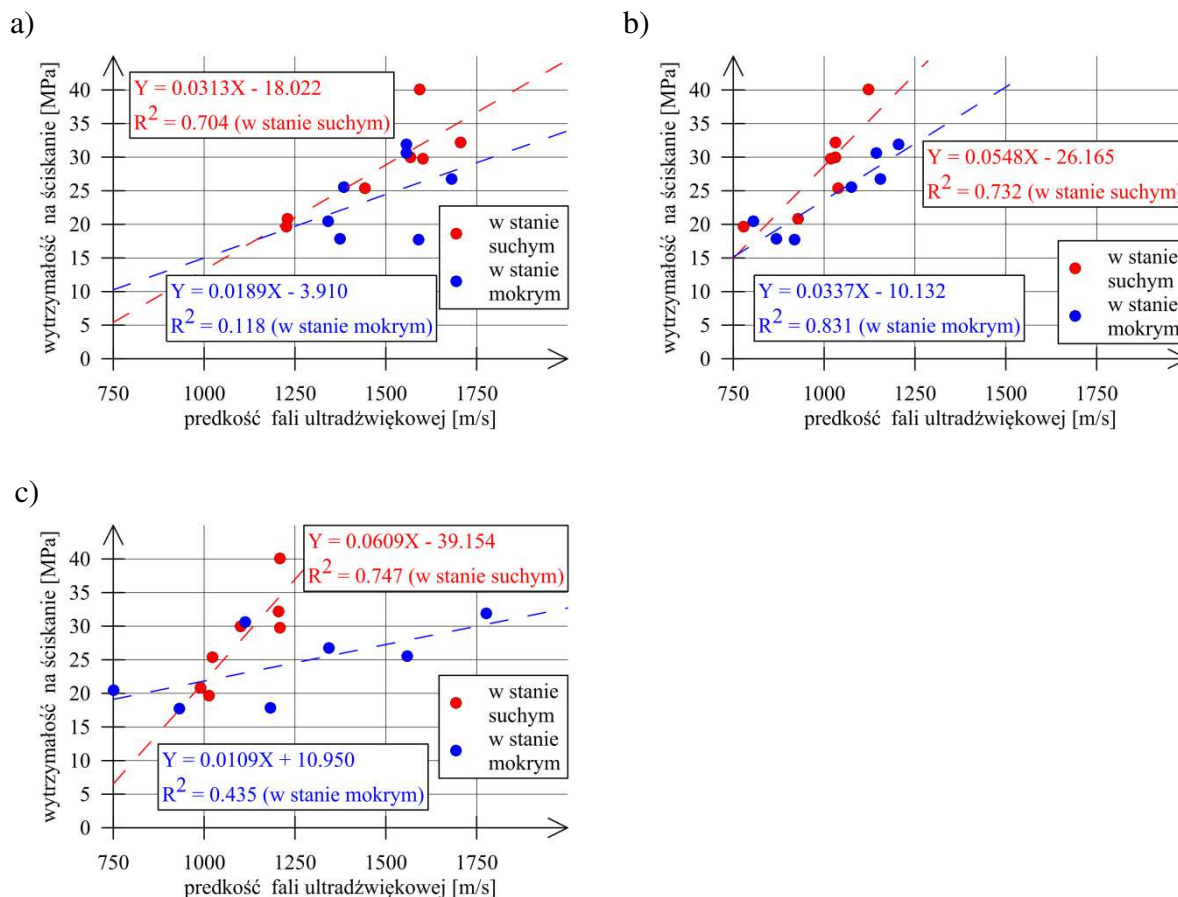
Jedynie dla połówek cegieł badanych pośrednio na główkowej płaszczyźnie oryginalnej (płaszczyzna P4) uzyskano stosunek prędkości fal równy 1,19 (b4) oraz 1,20 (b6), co wydaje się rekomendować ten sposób badań ultradźwiękowych. Wymaga to jeszcze jednak potwierdzenia na szerszej populacji cegieł.

Na rysunkach 5.18 i 5.19 zamieszczono wykresy zależności prędkości fali ultradźwiękowej od wytrzymałości na ściskanie cegieł ceramicznych.



Rys. 5.18 Zależność pomiędzy prędkością fali ultradźwiękowej a wytrzymałością na ściskanie cegieł b4: a) sposób badania P1, b) sposób badania P2, c) sposób badania P3, d) sposób badania P4

Uwaga: „Y” we wzorach podanych na wykresach oznacza wytrzymałość na ściskanie [MPa], natomiast „X” prędkość fali ultradźwiękowej [m/s].



Rys. 5.19 Zależność pomiędzy prędkością fali ultradźwiękowej a wytrzymałością na ściskanie cegieł b6: a) sposób badania P2, b) sposób badania P3, c) sposób badania P4

Uwaga: „Y” we wzorach podanych na wykresach oznacza wytrzymałość na ściskanie [MPa], natomiast „X” prędkość fali ultradźwiękowej [m/s].

Z wykresów na rysunkach 5.18 i 5.19 wynika w zasadzie, że im większa wytrzymałość na ściskanie cegieł tym większa pomierzona prędkość fali ultradźwiękowej. Należy zauważyć jednak, że rozrzuty wyników badań są w niektórych przypadkach bardzo duże.

Powyższe wyniki wskazują, że prowadzenie badań metodą ultradźwiękową w istniejących konstrukcjach murowych może być przydatne do oszacowania wytrzymałości na ściskanie cegieł. Należy zaznaczyć, że ze względu na znaczną różnorodność struktur ceglanych, o czym była już mowa w poprzednich rozdziałach, uzyskanie zadowalających wyników stosowania metody ultradźwiękowej wymaga opracowania indywidualnych funkcji korelacji. Dodatkowo badania ultradźwiękowe mogą być przeprowadzone in situ na ceglach jedynie w warstwach licowych murów, co powoduje, że metoda ta może być stosowana jako uzupełniająca do badań niszczących i małoniszczących – w celu ograniczenia uszkodzeń powodowanych pobieraniem próbek.

Dalszych badań wymaga określenie wpływu na uzyskiwane wyniki takich parametrów jak na przykład obecność spoin i sposób przygotowania powierzchni cegieł.

#### 5.1.6. Wpływ wilgotności na twardość powierzchniową cegieł

Badanie twardości przeprowadzono na 18 kostkach o boku 60mm wyciętych z 9 cegieł b7. Badanie twardości zostało przeprowadzone na kostkach wyciętych z tych samych cegieł, z których przygotowywane były próbki do badań wytrzymałościowych. Badanie przeprowadzono w maszynie wytrzymałościowej ZWICK/ROELL Z100 (rysunek 5.20). Rejestrowano siłę nacisku wgłębnika Brinella (kulka o średnicy 5mm) potrzebną do powstania zagłębienia 0,5mm oraz 1,0mm. W rezultacie otrzymano wyniki dla głębokości penetracji 0,5mm i dla głębokości penetracji 1,0mm. Wszystkie próby zostały przeprowadzone dwukrotnie. Pierwsza seria dla elementów badanych w stanie powietrzno-suchym oraz druga dla tych samych elementów badanych w stanie „mokrym” (sezonowanie przez zanurzenie w wodzie trwało 14 dni). Cegły w stanie powietrzno-suchym charakteryzowały się wilgotnością nie przekraczającą 1%.



Rys. 5.20 Maszyna wytrzymałościowa ZWICK/ROELL Z100 przygotowana do badania twardości powierzchniowej cegieł.

Wyniki badań twardości powierzchniowej cegieł w różnych stanach wilgotności przedstawiono w tabeli 5.6. Dodatkowo w tabeli 5.6 zamieszczono rezultaty badań twardości powierzchniowej cegieł przedstawione w pracy [68], której autor niniejszej dysertacji był współautorem.

Tabela 5.6 Wyniki badań twardości powierzchniowej cegieł w różnych stanach wilgotności

	Sposób badania	Cegły historyczne b7		Cegły współczesne [68]
		Wyniki dla drogi wgłębnika		
		0,5mm	1,0mm	1,0mm
Siła nacisku [N]	w stanie powietrzno-suchym $P^{(p/s)}$	1070	2324	2057
	w stanie mokrym $P^{(m)}$	902	1998	1749
$P^{(m)} / P^{(p/s)} =$		<b>0,84</b>	<b>0,86</b>	<b>0,85</b>
Współczynnik zmienności [%]	w stanie powietrzno-suchym	21,7	21,5	18,1
	w stanie mokrym	27,1	21,8	19,3

Z tabeli 5.6 wynika, że w stanie nasycenia woda twardość powierzchniowa cegieł jest niższa niż w stanie powietrzno-suchym. Spadki siły wynoszą dla cegieł b7 odpowiednio 16% i 14%. Dla tych cegieł spadek wytrzymałości w próbie bezpośredniego ściskania wyniósł 10%. Dla cegieł współczesnych spadek twardości powierzchniowej wyniósł 15% przy zarejestrowanym spadku wytrzymałości na ściskanie 9%.

T. Stryżewska w pracy [100] uzyskała także obniżenie twardości powierzchniowej cegieł w stanie „mokrym”. Dla dwóch rodzajów cegieł ceramicznych produkowanych współcześnie przy głębokości penetracji 0,5mm stwierdzono spadki wynoszące 19% i 22%. Dla głębokości penetracji 1,0mm uzyskano natomiast spadki siły równe 15% oraz 11%.

Rozszerzenie bazy wyników badań doświadczalnych pozwoli w przyszłości na zweryfikowanie zależności pomiędzy twardością powierzchniową cegieł a spadkiem wytrzymałości cegieł spowodowanym silnym zawilgoceniem. Korelacja taka ma znaczenie dla metod nieniszczących bazujących na pomiarze twardości powierzchniowej cegieł – na przykład metod sklerometrycznych.

## 5.2. Badania różnych rodzajów zapraw stosowanych w konstrukcjach murowych

### 5.2.1. Charakterystyka badanych zapraw

Zaprawy, które przeznaczono do badań laboratoryjnych można zakwalifikować do dwóch grup. Pierwszą grupę stanowiły zaprawy pobrane ze spoin murów istniejących, natomiast drugą grupę zaprawy przygotowane w laboratorium.



Łącznie do badań przeznaczono cztery rodzaje zapraw pobranych z budynków zrealizowanych w XIX wieku i pierwszej połowie XX wieku oraz dwie zaprawy przygotowane w laboratorium. Dodatkowo w laboratorium przygotowano jedną zaprawę do badań wstępnych.

Zaprawy ze spoin murów pobierane były w trakcie robót remontowych lub wyburzeniowych prowadzonych w istniejących budynkach. Większe fragmenty spoin wspornych odspajano od cegieł, a następnie cięto piłą diamentową na regularne prostopadłości, które były przeznaczone do badań wytrzymałościowych. Etap przygotowania próbek zapraw historycznych przedstawiono na rysunku 5.21.

a)



b)



c)



Ciąg dalszy rysunku na następnej stronie.

d)



e)



Rys. 5.21 Etapy przygotowania prostokątnych próbek zapraw historycznych do badań:

- a) odspajanie spoin wspornych od cegieł, b) widok odspojonych spoin wspornych,
- c) zaprawy ze spoin wspornych murów przygotowane do cięcia na elementy próbne,
- d) elementy próbne po cięciu, e) elementy próbne przygotowane do badań wytrzymałościowych

W procesie wycinania próbek zwracano uwagę na to, aby z tego samego fragmentu spoiny uzyskać próbkę do badań zaprawy w stanie powietrzno-suchym i w stanie mokrym. Podobną zasadę stosowano do próbek zapraw przygotowywanych w laboratorium (zgodnie z normą PN-EN 1015-11 [85]) – każdą beleczkę 40x40x160mm łamano w teście trójpunktowego zginania a następnie jedną część beleczki badano w stanie powietrzno-suchym a drugą część w stanie „mokrym”. Z odspojonych fragmentów spoin oraz z połówek beleczek normowych pobierano również próbki do oceny porowatości zapraw oraz struktury ich porowatości. Charakterystykę badanych zapraw przedstawiono w tabeli 5.7.

Stosunek spoiwa do kruszywa zapraw pobranych z budynków istniejących ustalono w laboratorium na podstawie badań chemicznych poprzez rozpuszczenie próbek materiału w 15% kwasie solnym. W każdym przypadku stosunek spoiwa do kruszywa oznacza proporcje wagowe. Ze względu na zastosowaną metodę podane w tabeli 5.7 stosunki spoiwa do kruszywa zapraw historycznych należy traktować jako orientacyjne.



Tabela 5.7 Charakterystyka badanych zapraw

Oznaczenie zapraw	Rodzaj zapraw	Stosunek spoiwa do kruszywa (stosunek wagowy)	Rodzaj próbek	Gęstość objętościowa (pozorna) [g/cm <sup>3</sup> ]	Nasiąkliwość	
					masowa	objętościowa
					[% mas.]	[% obj.]
m1	zaprawa historyczna pobrana ze spoin przełom XIX i XX w. Kraków	1/4,1	prostopadłościenne do testów DPT	1,55	13,5	20,9
m2	zaprawa historyczna pobrana ze spoin przełom XIX i XX w. Kraków	1/2,6	prostopadłościenne do testów DPT	1,70	11,5	19,6
m3	zaprawa historyczna pobrana ze spoin lata 30-te XX w. Kraków	1/4,7	prostopadłościenne do testów DPT	1,59	14,1	22,4
m4	zaprawa historyczna pobrana ze spoin lata 30-te XX w. Kraków	1/3,1	prostopadłościenne do testów DPT	1,62	16,0	25,9
m5 <sup>(1)</sup>	zaprawa wykonana w laboratorium cem.-wap.	1:1:8 (*)	beleczki normowe	1,81	14,5	26,2
m6	systemowa cem.-wap. Porotherm	(-)	beleczki normowe	1,91	11,8	22,5
m7	zaprawa wykonana w laboratorium cem.-wap.	1:1:8 (*)	beleczki normowe	1,84	13,8	25,3
Oznaczenia:						
<sup>(1)</sup> – zaprawa do badań wstępnych						
(*) – cement : wapno : piasek (wagowo)						
(-) – brak danych						

Grubość spoin w murach, z których pobierano próbki zapraw wynosiła:

- dla murów na zaprawie m1 - 16 mm ÷ 29 mm,
- dla murów na zaprawie m2 - 19 mm ÷ 26 mm,
- dla murów na zaprawie m3 - 16 mm ÷ 22 mm,
- dla murów na zaprawie m4 - 18 mm ÷ 28 mm.

Grubość spoin w murach historycznych była więc zdecydowanie większa niż w murach wznoszonych współcześnie, dla których norma PN-EN 1996-1-1 [87] podaje dopuszczalny przedział grubości 6 – 15mm.

Gęstość objętościowa (pozorna) zapraw historycznych pobranych z konstrukcji zawierała się w przedziale 1,55÷1,70 [g/cm<sup>3</sup>], a zapraw wykonanych w laboratorium w zakresie 1,81÷1,91 [g/cm<sup>3</sup>]. Nasiąkliwość masowa zapraw wynosiła od 11,5% do 16% a więc była większa niż podawana dla zapraw współczesnych – patrz rozdział 4.2.2. Gęstość pozorną i nasiąkliwość masową określono zgodnie z procedurami i wzorami podanymi w rozdziale 5.1.3.

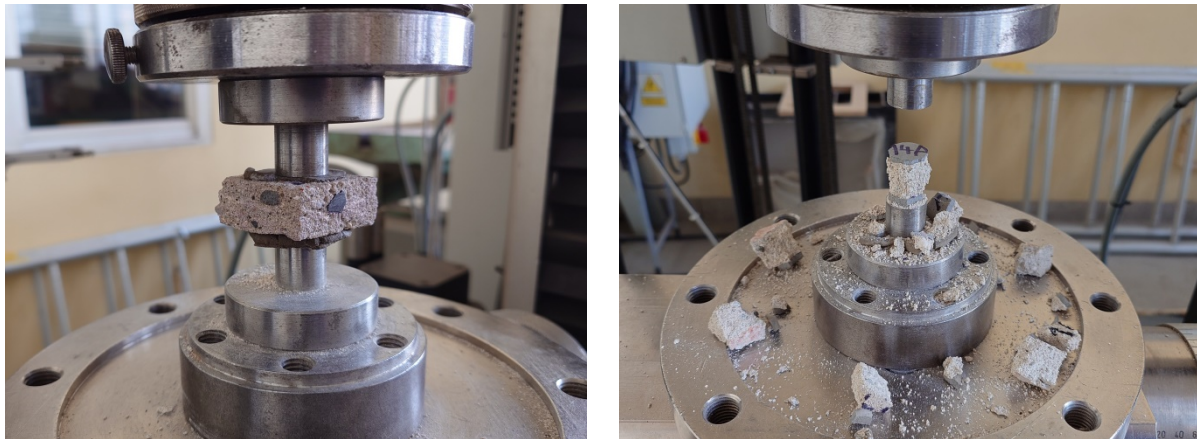
### **5.2.2. Badania wytrzymałości zapraw pobranych ze spoin murów metodą stempla oraz badania uzupełniające**

Ze spoin murów ceglanych nie było możliwości wycięcia próbek o wymiarach umożliwiających przygotowanie próbek normowych 40x40x160mm zgodnie z normą PN-EN 1015-11 [85], ponieważ grubość spoin w tych murach wynosiła od 16mm do 29mm. W związku z tym zdecydowano badania porównawcze wytrzymałości na ściskanie zapraw w stanie powietrzno-suchym i „mokrym” przeprowadzić metodą stempla - powszechnie znaną w literaturze jako metoda DPT (double punch test) - zgodnie z normą DIN 18555-9 [17].

Próbki zapraw stosowane w tej metodzie mają wysokość równą grubości spoin wspornych, natomiast wymiar ich kwadratowych podstaw zawiera się w przedziale od 40mm do 50mm. Metoda ta jest szeroko stosowana w badaniach wytrzymałościowych zapraw w budynkach istniejących [19], [29], [55], [56], [66], [107]. Porównanie wyników badań uzyskiwanych metodą DPT z rezultatami innych testów podano w [55], [56].

Obciążenie ściskające jest przykładane do próbki przez stalowe stemple o średnicy 20mm – w związku z tym próbka jest obciążana w środkowej części - z dala od przycinanych krawędzi. Lokalne obciążenie próbek powoduje powstanie w próbkach złożonego stanu naprężeń (*L. Pelà i in.* [79], *P. Matysek i in.* [57], [66]). Wartość poprzecznych naprężeń ściskających zależy między innymi od wysokości próbek oraz ograniczenia odkształceń na styku próbek ze stemplami stalowymi.

Widok próbek zaprawy w teście DPT przedstawiono na rysunku 5.22. Ponieważ powierzchnie przez które do próbek zaprawy miało być przykładane obciążenie nie były równe i równoległe, próbki przed próbą ściskania wyrównano zaprawą szybkowiązącą. Norma DIN 18555-9 [17] zaleca wyrównywanie próbek gipsem, ale ze względu na nasączenie próbek zaprawy wodą przez zamoczenie zdecydowano się na „kapslowanie” przy użyciu zaprawy szybkowiąjącej.



Rys. 5.22 Widok próbek zaprawy w teście DPT: próbka w trakcie badania i próbka po badaniu.

Stan nasycenia wodą próbek zaprawy uzyskiwano przez zanurzenie w wodzie w sposób analogiczny jak w przypadku badanych cegieł ceramicznych. W pierwszym etapie próbki zanurzano w wodzie na 1/3 wysokości, następnie zalewano próbki całkowicie i przechowywano w wodzie przez okres 7 dni. Próbki wyciągano z wody bezpośrednio przed badaniem wytrzymałościowym i pozwolono im na ociekanie przez 15 do 20 minut. Następnie zabezpieczano je przed wysychaniem i kierowano do badań wytrzymałościowych. W stanie powietrzno-suchym wilgotność zapraw sezonowanych w laboratorium nie przekraczała 1,3%.

Ponieważ badane próbki miały różną wysokość, wyniki dodatkowo przeliczono z wykorzystaniem zależności podanej w pracy [56]:

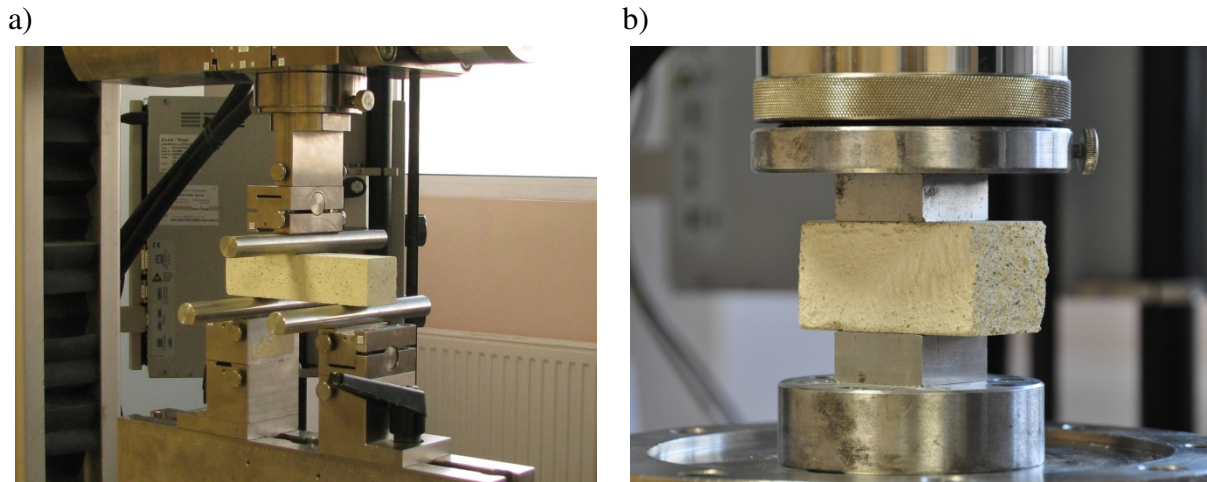
$$f_m = \frac{f_{DPT}}{1,24 \left( \frac{t_2}{\varnothing_s} \right)^{-0,69}} \quad (13)$$

w której:

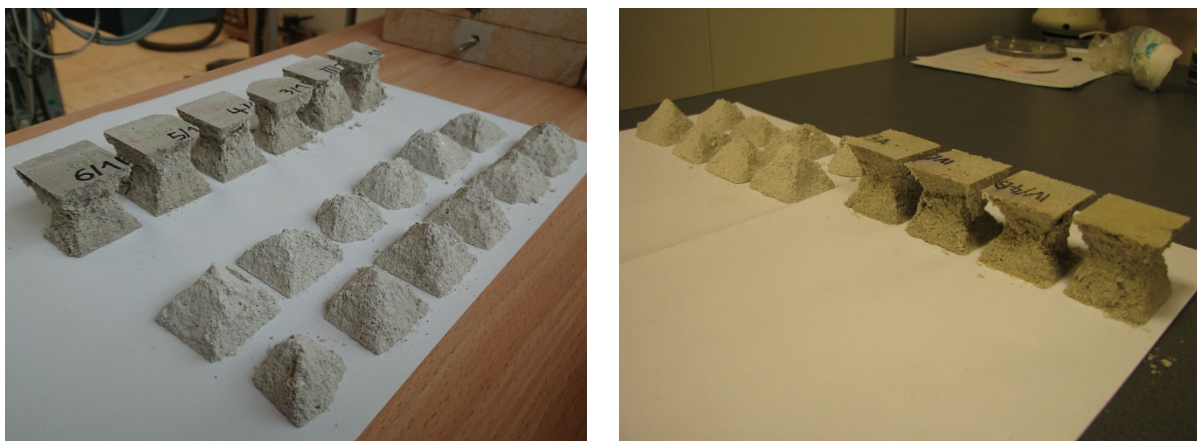
- $f_m$  – wytrzymałość zaprawy w standardowym teście na próbkach o boku 40mm,
- $f_{DPT}$  – wytrzymałość zaprawy określona w teście DPT,
- $t_2$  – całkowita wysokość próbki w teście DPT,
- $\varnothing_s$  – średnica stempla (w badaniach równa 20mm).

Z zależności (13) wynika, że wytrzymałość zaprawy określona w teście DPT na próbkach o wysokości całkowitej 27mm jest w przybliżeniu równa wytrzymałości na ściskanie określonej na standardowych próbkach o wymiarze 40mm.

Próbki normowe (belecзки) z zapraw wykonanych w laboratorium sezonowano w analogiczny sposób jak próbki do testów DPT. Widok próbek na stanowiskach badawczych przedstawiono na rysunku 5.23. Wszystkie próbki zapraw badano w maszynie wytrzymałościowej Zwick Roell Z100. Badania prowadzono zgodnie z normą PN-EN 1015-11 [85]. Widok próbek po badaniu wytrzymałości na ściskanie w stanie powietrzno-suchym i „mokrym” przedstawiono na rysunku 5.24.



Rys. 5.23 Badania wytrzymałości zapraw – widok stanowisk badawczych:  
a) próba trójpunktowego zginania, b) próba ściskania połówek beleczek normowych



Rys. 5.24 Badania wytrzymałości zapraw – widok przykładowych próbek po badaniu wytrzymałości na ściskanie w stanie powietrzno-suchym i „mokrym”

Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu zapraw m5, m6 i m7 wynosiła odpowiednio 1,89 MPa, 1,67 MPa, 2,25 MPa. Badania zapraw z próbie trójpunktowego zginania prowadzono w stanie powietrzno-suchym. Badania zapraw wykonano po czterech miesiącach ich sezonowania. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie zapraw w stanie powietrzno-suchym

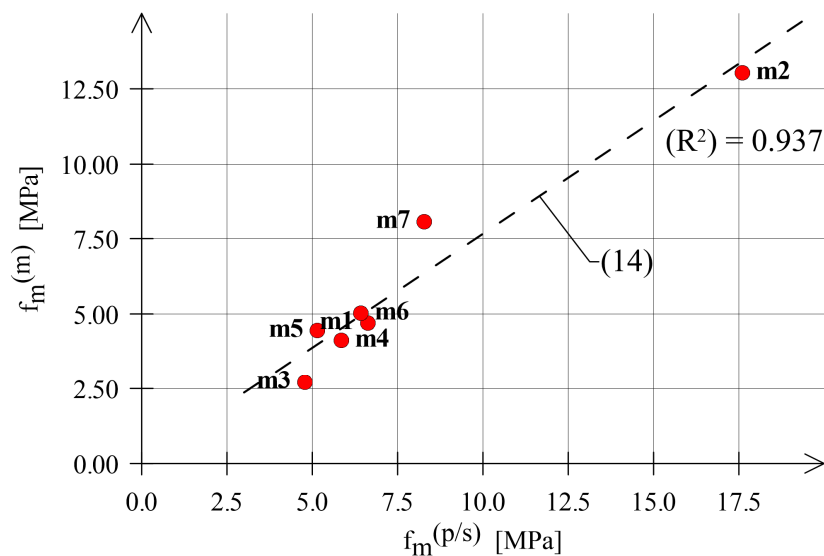
i „mokrym” zestawiono w tabeli 5.8. Współczynnik  $k_m$  określa stosunek wytrzymałości na ściskanie zapraw w stanie „mokrym” do wytrzymałości na ściskanie zapraw w stanie powietrzno-suchym.

Tabela 5.8 Wyniki badań wytrzymałościowych zapraw

Oznaczenie zapraw	Rodzaj zapraw	Rodzaj próbek	Liczba elementów próbnych do badań		Wytrzymałość na ściskanie		$k_m = \frac{f_m^{(m)}}{f_m^{(p/s)}}$	Współczynnik zmienności	
			w stanie pow./suchym	w stanie mokrym	$f_m^{(p/s)}$	$f_m^{(m)}$		$v_m^{(p/s)}$	$v_m^{(m)}$
			[szt.]	[szt.]	[MPa]	[MPa]		[%]	[%]
m1	zaprawa historyczna pobrana ze spoin przełom XIX i XX w. Kraków	prostokątne do testów DPT	7	7	6,6	4,7	<b>0,71</b>	18,1	35,3
m2	zaprawa historyczna pobrana ze spoin przełom XIX i XX w. Kraków	prostokątne do testów DPT	6	6	17,6	13,0	<b>0,74</b>	9,1	16,0
m3	zaprawa historyczna pobrana ze spoin lata 30-te XX w. Kraków	prostokątne do testów DPT	8	8	4,8	2,7	<b>0,57</b>	17,4	22,3
m4	zaprawa historyczna pobrana ze spoin lata 30-te XX w. Kraków	prostokątne do testów DPT	6	6	5,9	4,1	<b>0,70</b>	34,9	17,7
m5 <sup>(1)</sup>	zaprawa wykonana w laboratorium cem.-wap.	belecзки normowe	4	4	5,1	4,4	<b>0,86</b>	11,7	4,3
m6	systemowa zaprawa cem.-wap. Porotherm	belecзки normowe	5	5	6,4	5,0	<b>0,78</b>	6,9	10,7
m7	zaprawa wykonana w laboratorium cem.-wap.	belecзки normowe	6	6	8,3	8,1	<b>0,97</b>	3,4	3,7
Oznaczenia:									
<sup>(1)</sup> – zaprawa do badań wstępnych									
$f_m^{(p/s)}$ – średnia wytrzymałość na ściskanie badanych zapraw w stanie powietrzno-suchym									
$f_m^{(m)}$ – średnia wytrzymałość na ściskanie badanych zapraw w stanie „mokrym”									
$v_m^{(p/s)}$ – współczynnik zmienności badanych zapraw w stanie powietrzno-suchym									
$v_m^{(m)}$ – współczynnik zmienności badanych zapraw w stanie „mokrym”									

W przypadku wszystkich badanych zapraw średnia wytrzymałość na ściskanie w stanie „mokrym” była mniejsza niż w stanie powietrzno-suchym. Ponieważ przeliczono wyniki uzyskane w teście DPT na wytrzymałość określoną na próbkach normowych w dalszej części rozdziału stosowane będzie oznaczenie  $k_m$ .

Jak wynika z zestawienia wyników badań stosunek wytrzymałości na ściskanie zapraw w stanie „mokrym” do wytrzymałości na ściskanie w stanie powietrzno-suchym zawierał się w przedziale  $0,57 \div 0,97$ . Dla zapraw historycznych pobranych z konstrukcji powyższy stosunek zawierał się w przedziale  $0,57 \div 0,74$ , a dla zapraw wykonanych w laboratorium  $0,78 \div 0,97$ . Średnio ze wszystkich testów prowadzonych na zaprawach historycznych pobranych z konstrukcji wytrzymałość na ściskanie w stanie „mokrym” wyniosła 0,68 wytrzymałości w stanie powietrzno-suchym. Dla zapraw wykonanych w laboratorium uzyskano wartość 0,87. Zależność pomiędzy wytrzymałością na ściskanie zapraw w stanie „mokrym” i wytrzymałością zapraw w stanie powietrzno-suchym przedstawiono na rysunku 5.25.



Rys. 5.25 Zależność pomiędzy wytrzymałością na ściskanie zapraw badanych w stanie powietrzno-suchym a wytrzymałością na ściskanie zapraw nasyconych wodą

Z aproksymacji wyników badań wynika liniowa zależność:

$$f_m^{(m)} = 0,756f_m^{(p/s)} + 0,095 \quad (14)$$

w której:

$f_m^{(p/s)}$  – wytrzymałość na ściskanie zapraw badanych w stanie powietrzno-suchym [MPa],

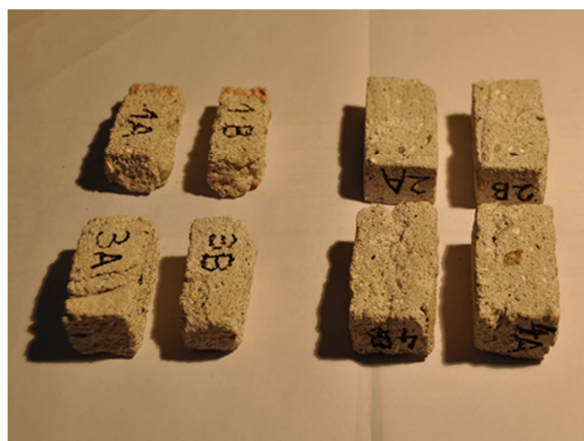
$f_m^{(m)}$  – wytrzymałość na ściskanie zapraw badanych w stanie nasycenia wodą [MPa].



Wartość współczynnika  $R^2$  ( $=0,937$ ) wskazuje, wzór (14) może być przydatny do prognozowania wytrzymałości na ściskanie zapraw w stanie „mokrym” na podstawie wytrzymałości zapraw w stanie powietrzno-suchym. Dla potwierdzenia zależności (14) w szerszym zakresie wytrzymałości konieczne są dodatkowe badania zapraw – przede wszystkim zapraw o wytrzymałości mniejszej niż 4,0MPa. Wstępna ocena na podstawie badań wykonanych przez *T. Martinsa i innych* [59] oraz *D.V. Bompe i A.Y. Elghazouliego* [12] wskazuje, że wzór (14) dla zapraw wapiennych o bardzo niskiej wytrzymałości może dawać nieco zawyżone wartości  $f_m^{(m)}$ . Ze wzoru (14) uzyskuje się wartości  $f_m^{(m)}$  równe 0,64MPa [59] i 1,07MPa [12] a w badaniach zaprawy miały wytrzymałość odpowiednio 0,46MPa i 0,59MPa. Należy jednak podkreślić, że procedury badań przedstawione w pracach [59] i [12] nie były identyczne z zastosowanymi w niniejszej dysertacji.

### 5.2.3. Ocena porowatości zapraw i struktury porów

Porowatość zapraw badano w takim samym urządzeniu jak cegły - w piknometrze helowym Quantachrome Ultrapyc 1200e. Przed badaniem próbki suszono do stałej masy. Widok próbek przygotowanych do badań w piknometrze helowym przedstawiono na rysunku 5.26, natomiast wyniki badań zestawiono w tabeli 5.9. Porowatość otwartą określoną w piknometrze helowym obliczano w sposób analogiczny jak w przypadku cegieł ceramicznych.



Rys. 5.26 Przykłady elementów próbnych zaprawy przygotowanych do badań porowatości



Rys. 5.27 Widok próbek zapraw przygotowanych do badań w porozymetrze rtęciowym – ocena struktury porów

Tabela 5.9 Wyniki badań porowatości zapraw

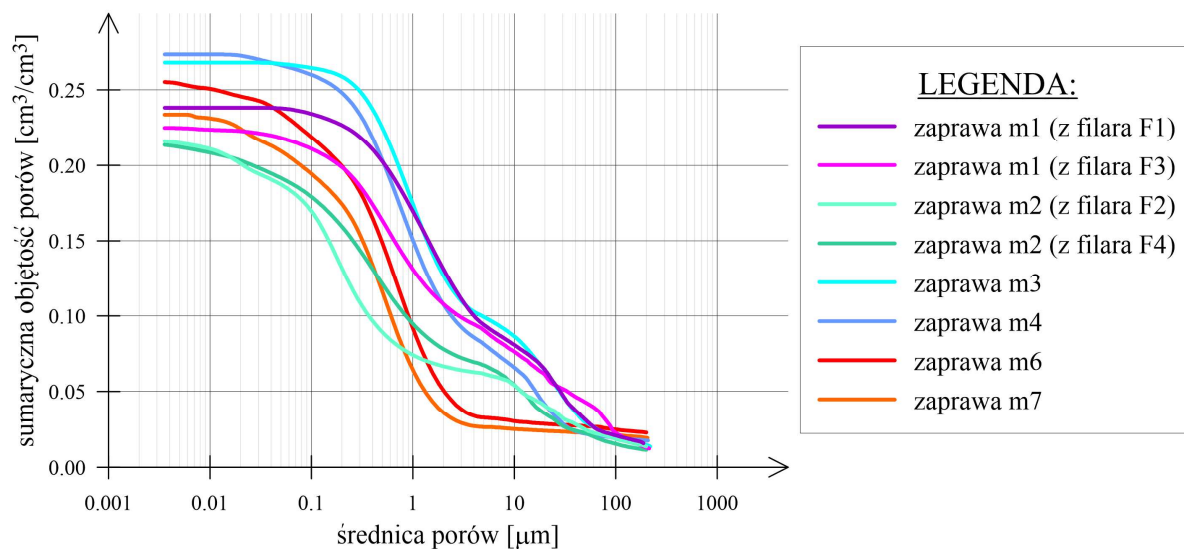
Rodzaj zaprawy	Gęstość objętościowa (pozorna)	Gęstość szkieletowa	Porowatość otwarta
	[g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[%]
m1	1,55	2,75	43,6
m2	1,70	2,68	36,6
m3	1,59	2,64	39,7
m4	1,62	2,66	39,1
m5	1,81	(-)	(-)
m6	1,91	2,58	26,1
m7	1,84	2,62	29,9

Jak wynika z tabeli 5.9 porowatość otwarta zapraw historycznych pobranych z konstrukcji zawierała się w przedziale 36,6 ÷ 43,6%. Porowatość zapraw wykonanych w laboratorium była wyraźnie mniejsza niż zapraw historycznych i zawierała się w zakresie wartości 26,1 ÷ 29,9%.

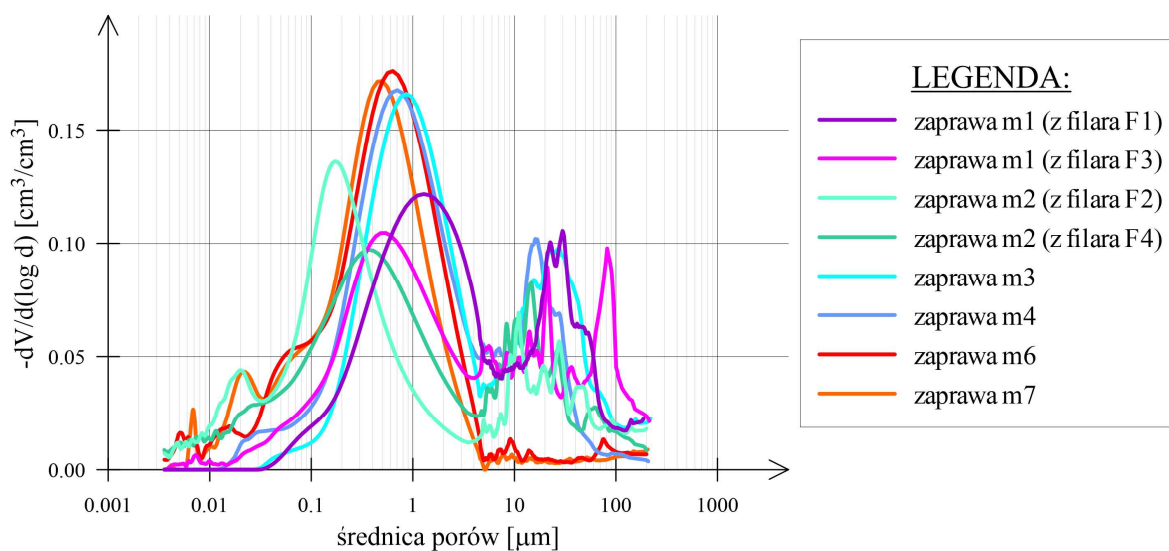
Strukturę porowatości zapraw ustalano tak, jak w przypadku cegieł ceramicznych w porozymetrze rtęciowym Quantachrome PoreMaster 60. Widok próbek zapraw przed badaniem przedstawiono na rysunku 5.27.

Krzywe sumacyjne i krzywe populacyjne rozkładu wielkości porów otwartych uzyskane jako rezultat badań struktury porowatości, podano odpowiednio na rysunkach 5.28 i 5.29. Na podstawie uzyskanych krzywych populacyjnych dokonano kategoryzacji porów badanych zapraw w zależności od średnicy porów. Uzyskane wyniki zestawiono w tabeli 5.10. Dla zapraw m1 i m2 przygotowano próbki uwzględniając każdy z badanych filarów murowych, o których będzie mowa w kolejnym rozdziale niniejszej pracy.





Rys. 5.28 Krzywe sumacyjne rozkładu wielkości porów badanych zapraw



Rys. 5.29 Krzywe populacyjne rozkładu wielkości porów zapraw

Tabela 5.10 Kategoryzacja porów badanych zapraw w zależności od średnicy porów

przedział wielkości średnic porów [μm]	Rodzaj zaprawy					
	m1 (z filara F1)		m1 (z filara F3)		m2 (z filara F2)	
	W* [cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]	[%]	W* [cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]	[%]	W* [cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]	[%]
<0,01	0,0000	0,00	0,0012	0,55	0,0051	2,36
0,01-0,1	0,0041	1,72	0,0126	5,59	0,0414	19,15
0,1-1,0	0,0645	27,07	0,0801	35,60	0,0954	44,14
1,0-10	0,0888	37,28	0,0548	24,35	0,0202	9,34
10-100	0,0600	25,19	0,0537	23,89	0,0356	16,47
>100	0,0208	8,74	0,0225	10,02	0,0185	8,54
V <sub>porów</sub> **	<b>0,2382</b>	<b>100,0</b>	<b>0,2249</b>	<b>100,0</b>	<b>0,2161</b>	<b>100,0</b>
przedział wielkości średnic porów [μm]	Rodzaj zaprawy					
	m2 (z filara F4)		m3		m4	
	W* [cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]	[%]	W* [cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]	[%]	W* [cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]	[%]
<0,01	0,0052	2,4	0,0000	0,0	0,0000	0,0
0,01-0,1	0,0294	13,7	0,0035	1,3	0,0134	4,9
0,1-1,0	0,0842	39,4	0,0898	33,5	0,1094	40,0
1,0-10	0,0406	19,0	0,0882	32,9	0,0848	31,0
10-100	0,0389	18,2	0,0664	24,8	0,0463	16,9
>100	0,0153	7,2	0,0200	7,5	0,0194	7,1
V <sub>porów</sub> **	<b>0,2137</b>	<b>100,0</b>	<b>0,2679</b>	<b>100,0</b>	<b>0,2733</b>	<b>100,0</b>
przedział wielkości średnic porów [μm]	Rodzaj zaprawy					
	m6		m7			
	W* [cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]	[%]	W* [cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]	[%]		
<0,01	0,0046	1,8	0,0026	1,1		
0,01-0,1	0,0318	12,5	0,0367	15,7		
0,1-1,0	0,1267	49,7	0,1300	55,6		
1,0-10	0,0619	24,3	0,0394	16,9		
10-100	0,0054	2,1	0,0039	1,7		
>100	0,0248	9,7	0,0212	9,1		
V <sub>porów</sub> **	<b>0,2552</b>	<b>100,0</b>	<b>0,2337</b>	<b>100,0</b>		
Oznaczenia:						
W*	– sumaryczna objętość porów [cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]					
V <sub>porów</sub> **	– całkowita objętość porów [cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]					
	– kolorem żółtym zaznaczono największe przedziały wielkości średnic porów					

Największą sumaryczną objętością porów określoną na podstawie badań w porozymetrze rtęciowym cechowały się zaprawy historyczne m3 i m4, a więc zaprawy o najniższej wytrzymałości na ściskanie. W przypadku niemal wszystkich zapraw największy udział w strukturze miały pory o średnicy 0,1÷10μm. Cechą charakterystyczną zapraw historycznych jest znaczący udział w strukturze materiału dużych porów o średnicach

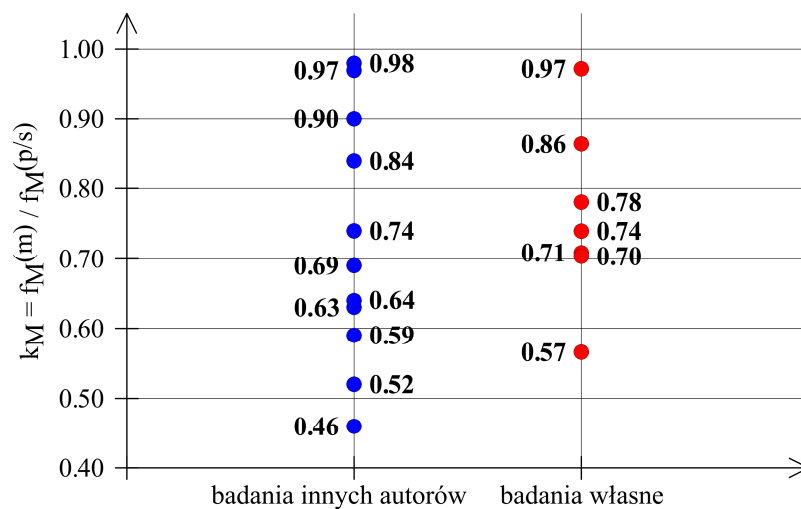
powyżej  $10\mu\text{m}$  ( $24,0\% \div 33,91\%$ ). W zaprawach wykonanych w laboratorium udział tego typu porów był znacząco mniejszy ( $11,8\%$  i  $10,8\%$ ).

Stwierdzone różnice w porowatościach zapraw są zgodne z oczekiwaniami, bowiem skład zapraw historycznych różni się zdecydowanie od zapraw współczesnych [74], [75]. W przeszłości stosowano bowiem szereg dodatków organicznych i nieorganicznych, które aktualnie nie są używane. Dodatkowo na własności zapraw pobranych z budynków istniejących miały wpływ oddziaływania środowiskowe, w wyniku których dochodziło na przykład do wypłukiwania niektórych składników ze struktury spoin, co spowodowało większą porowatość materiałów zapraw.

#### **5.2.4. Wpływ nasiąkliwości, porowatości i struktury porowatości zapraw na spadek ich wytrzymałości przy silnym zawilgoceniu**

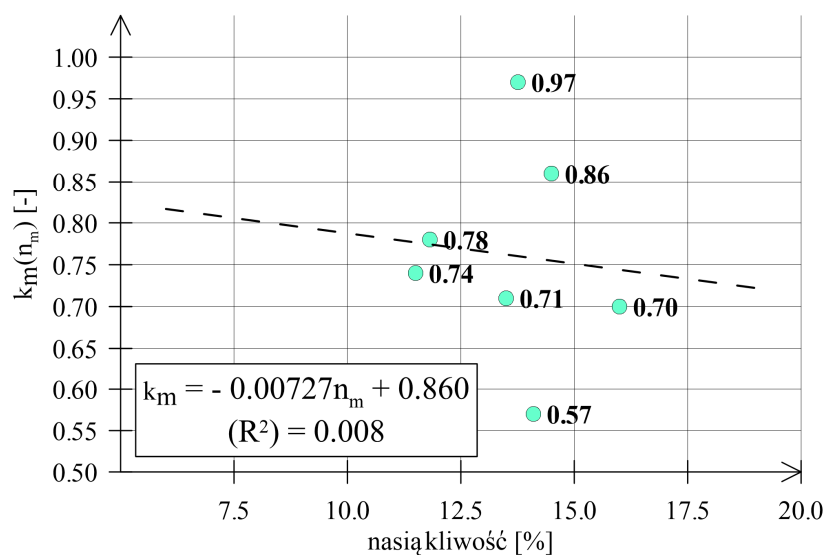
Zestawienie wyników własnych badań zapraw z wynikami prezentowanymi w literaturze przedmiotu podano na rysunku 5.30. W zestawieniu wartości współczynnika  $k_M$  charakteryzującego stosunek wytrzymałości na ściskanie zapraw w stanie mokrym do wytrzymałości na ściskanie zapraw w stanie suchym wykorzystano dane z tabeli 4.2 oraz tabeli 5.8. Ponieważ badania zapraw opisane w literaturze przedmiotu prowadzone były według różnych procedur zastosowano oznaczenie  $k_M$  (dla badań własnych  $k_M = k_m$ ).

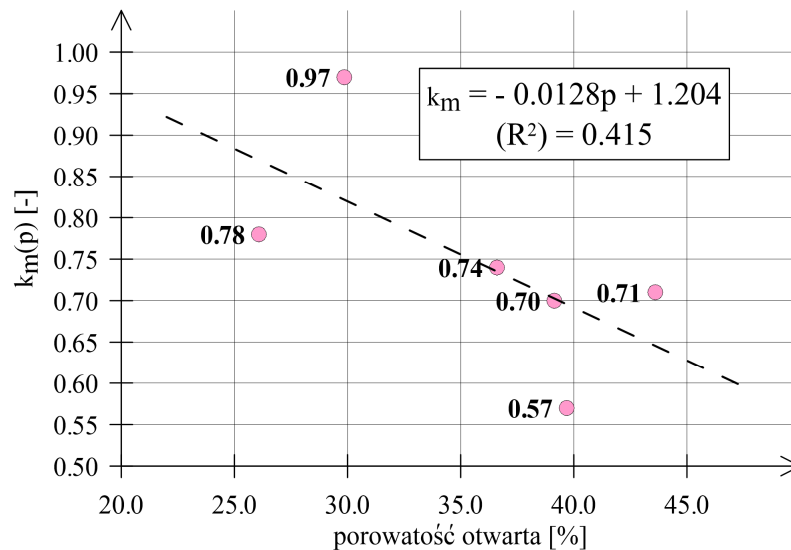
Jak wynika z porównania wyników badań zapraw przedział wartości współczynnika  $k_M$  uzyskany w badaniach własnych ( $0,57 \div 0,97$ ) jest podobny jak wynikający z przeglądu literatury przedmiotu ( $0,46 \div 0,98$ ). Należy podkreślić, że badania własne obejmowały zaprawy z różnych okresów historycznych pobrane z konstrukcji, podczas gdy dane z literatury przedmiotu dotyczą wyłącznie zapraw wykonanych w laboratorium.



Rys. 5.30 Porównanie wyników badań zapraw

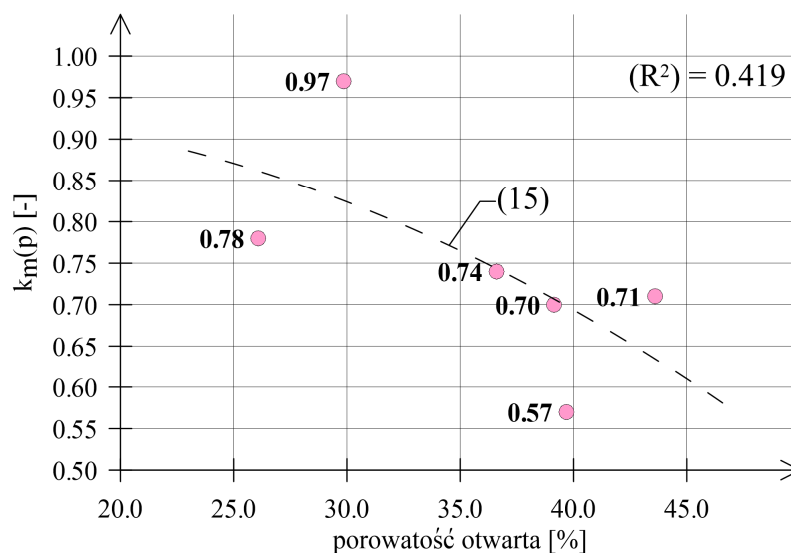
Zależności pomiędzy  $k_m(n_m)$  i  $k_m(p)$  przedstawiono na rysunku 5.31 i 5.32. W przeciwieństwie do cegieł trudno stwierdzić wyraźne relacje liniowe wiążące spadek wytrzymałości na ściszenie zapraw z ich nasiąkliwością masową czy porowatością - współczynniki determinacji  $R^2$  wynoszą odpowiednio  $R^2=0,008$  i  $R^2=0,415$ .

Rys. 5.31 Zależność  $k_m(n_m)$



Rys. 5.32 Zależność  $k_m(p)$  – aproksymacja funkcją liniową

Zastosowanie wielomianu drugiego stopnia również nie daje lepszego dopasowania funkcji aproksymującej wyniki badań i wiążącej spadek wytrzymałości na ściskanie zapraw w stanie mokrym z ich porowatością ( $R^2=0,419$ ) – patrz zależność (15). Funkcja ta została przedstawiona na rysunku 5.33.



Rys. 5.33 Zależność  $k_m(p)$  – aproksymacja funkcją w postaci wielomianu drugiego stopnia

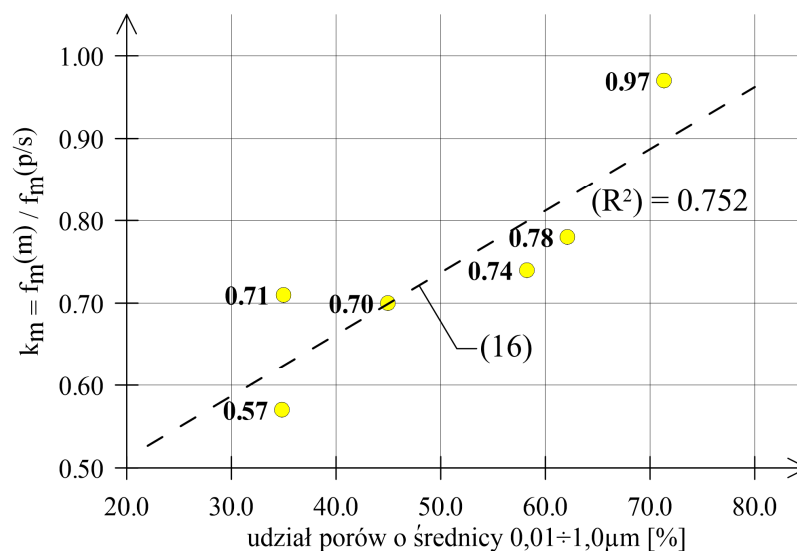
Z aproksymacji wyników badań wielomianem drugiego stopnia wynika zależność:

$$k_m = -0,0002472p^2 + 0,00427p + 0,918 \quad (15)$$

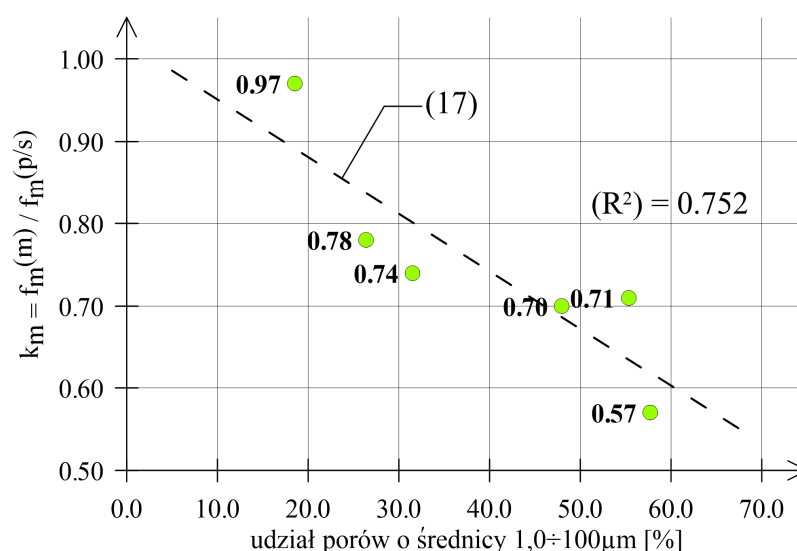
w której:

$p$  – porowatość [%].

Na rysunkach 5.34 i 5.35 przedstawiono wykresy zależności pomiędzy współczynnikiem  $k_m$  a procentową ilością porów w zaprawach odpowiednio o średnicy  $0,01 \div 1,0\mu\text{m}$  oraz o średnicy  $1,0 \div 100\mu\text{m}$ .



Rys. 5.34 Zależność pomiędzy ilością porów o średnicy  $0,01 \div 1,0\mu\text{m}$  a spadkiem wytrzymałości na ściskanie zapraw wynikającym z ich nasycenia wodą – aproksymacja funkcją liniową



Rys. 5.35 Zależność pomiędzy ilością porów o średnicy  $1,0 \div 100\mu\text{m}$  a spadkiem wytrzymałości na ściskanie zapraw wynikającym z ich nasycenia wodą – aproksymacja funkcją liniową

Funkcje liniowe aproksymujące wyniki badań mają postać:

$$k_m = f_m^{(m)} / f_m^{(p/s)} = 0,00751u_{0,01-1,0} + 0,361 \quad (16)$$

$$k_m = f_m^{(m)} / f_m^{(p/s)} = -0,00696u_{1,0-100} + 1,021 \quad (17)$$

w których:

$u_{0,01-1,0}$  – procentowy udział w zaprawie porów o średnicy  $0,01 \div 1,0 \mu\text{m}$ ,

$u_{1,0-100}$  – procentowy udział w zaprawie porów o średnicy  $1,0 \div 100 \mu\text{m}$ .

Otrzymano dość dobre dopasowanie funkcji (16) i (17) do wyników badań doświadczalnych (w obu przypadkach  $R^2$  jest równe 0.752).

Z zależności (16) wynika, że im większy udział porów o średnicach z zakresu  $0,01 \div 1,0 \mu\text{m}$  tym spadek wytrzymałości na ściskanie zapraw wynikający z ich nasycenia wodą jest mniejszy. Natomiast z zależności (17) otrzymano relację, że im większy udział porów o średnicach z zakresu  $1,0 \div 100 \mu\text{m}$  tym spadek wytrzymałości na ściskanie zapraw wynikający z ich nasycenia wodą jest większy.

Natomiast lepszą aproksymację wyników badań niż funkcją liniową uzyskuje się stosując wielomiany drugiego stopnia (rysunek 5.36 i rysunek 5.37) w postaci:

$$k_m = f_m^{(m)} / f_m^{(p/s)} = 0,0002812u_{0,01-1,0}^2 - 0,02153p + 1,058 \quad (18)$$

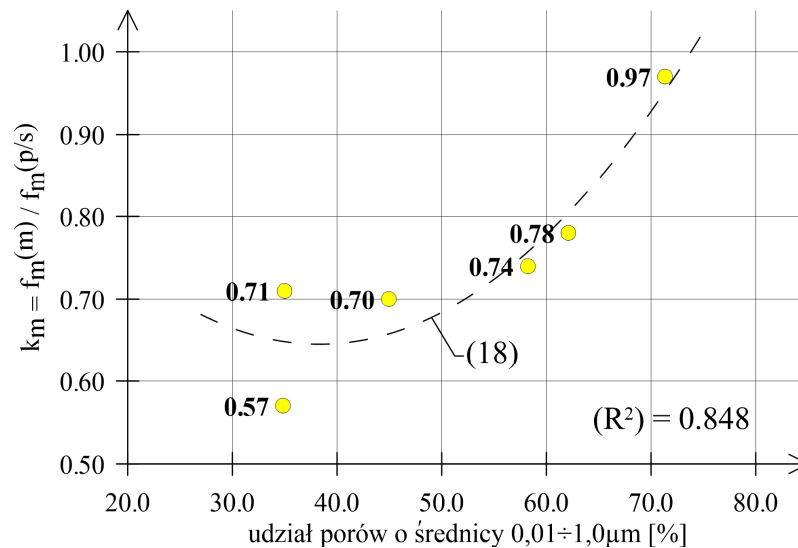
$$k_m = f_m^{(m)} / f_m^{(p/s)} = 0,0002246u_{0,01-1,0}^2 - 0,02446p + 1,311 \quad (19)$$

w których:

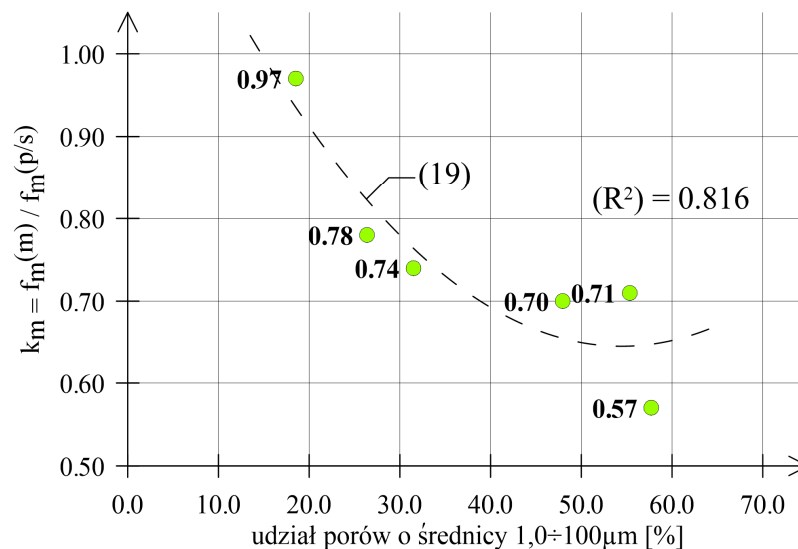
$u_{0,01-1,0}$  – procentowy udział w zaprawie porów o średnicy  $0,01 \div 1,0 \mu\text{m}$ ,

$u_{1,0-100}$  – procentowy udział w zaprawie porów o średnicy  $1,0 \div 100 \mu\text{m}$ .

Dla funkcji (18)  $R^2$  wynosi 0,848 oraz dla funkcji (19)  $R^2$  jest równe 0,816.



Rys. 5.36 Zależność pomiędzy ilością porów o średnicy  $0,01 \div 1,0[\mu\text{m}]$  a spadkiem wytrzymałości na ściskanie zapraw wynikającym z ich nasycenia wodą – aproksymacja wielomianem drugiego stopnia



Rys. 5.37 Zależność pomiędzy ilością porów o średnicy  $1,0 \div 100[\mu\text{m}]$  a spadkiem wytrzymałości na ściskanie zapraw wynikającym z ich nasycenia wodą – aproksymacja wielomianem drugiego stopnia

Z zależności (18) wynika, że w zaprawach, w których ilość porów o średnicy  $0,01 \div 1,0\mu\text{m}$  przekracza 74% spadek wytrzymałości na ściskanie w wyniku ich nasycenia wodą nie wystąpi.



## 6. Badania filarów ceglanych wyciętych z konstrukcji

### 6.1. Przygotowanie filarów do badań

Filary murowe pobrano ze ścian wewnętrznych budynku powstałego na przełomie XIX i XX wieku na terenie Koszar Arcyksięcia Rudolfa w Krakowie. Historię powstania tego założenia o charakterze militarnym opisano w pracy [40]. Koszary były częścią Twierdzy Kraków sukcesywnie realizowanej od połowy XIX wieku. Przez kilkadziesiąt lat zrealizowano na terenie dzisiejszego kampusu Politechniki Krakowskiej szereg budynków o konstrukcji murowej. Budynek, z którego pobrano materiał do badań zrealizowano jako obiekt o dwóch kondygnacjach nadziemnych. Widok budynku przedstawiono na rysunku 6.1. W założeniu była to działownia, która w późniejszym terminie pełniła różne funkcje.

W trakcie prac wyburzeniowych prowadzonych w związku z przebudową obiektu ze ścian wycięto filary o przekroju około 30 x 30cm. Filary wycinano za pomocą piły tarczowej (technika diamentowa) – rysunek 6.2. Jako zasadę przyjęto, że ze tej samej ściany pozyskiwano filary do badań wytrzymałościowych w stanie powietrzno-suchym i w stanie „mokrym”. Łącznie pobrano ze ścian 10 filarów. Pozyskane filary murowe zostały zabezpieczone i przetransportowane do laboratorium. Filary sezonowano przez 6 miesięcy w temperaturze  $19^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  i wilgotności  $60\% \pm 5\%$ . Ponieważ dolne i górne powierzchnie nie były równe wykonano od dołu oraz od góry warstwy z zaprawy cementowej. Przed badaniami dokonano oznaczenia filarów oraz pomiarów cegieł i spoin występujących w strukturze murów. Widok filarów przedstawiono na rysunku 6.3.



Rys. 6.1 Budynek, z którego pobrano materiał do badań



Rys. 6.2 Etap wycinania filarów murowych

Filar F1/1.



Filar F1/2.



Filar F2/1.



Filar F2/2.



Filar F3/2.



Filar F3/1.



Filar F4/3.



Filar F4/1.



Filar F2/3.



Filar F4/2.



Rys. 6.3 Widok filarów murowych przeznaczonych do badań

Ściany, z których wycinano filary, były tynkowane. Po wycięciu filarów nie usuwano z nich tynków, aby działaniami dynamicznymi nie uszkadzać struktury murów historycznych. Tynki jednak nacięto przy dolnej i górnej krawędzi w taki sposób, aby obciążenie pionowe nie było przekazywane bezpośrednio na warstwy tynków. Nie docinano również filarów do tej samej wysokości, gdyż obawiano się ich uszkodzenia. Należy zwrócić jednak uwagę, że filary danej grupy, badane w stanie powietrzno-suchym i mokrym miały tą samą wysokość.

Dodatkowe 2 filary przeznaczone zostały do sprawdzenia sposobu sezonowania murów do stanu „mokrego”. Charakterystykę filarów murowych przedstawiono w tabelicy 6.1.

Ze ścian, z których wycinano filary, pobrano do badań także cegły i fragmenty spoin przeznaczone do badań materiałowych. W rozdziałach 5.1.1 i 5.2.1 cegły i zaprawy te oznaczono odpowiednio b6 oraz m1, m2 zaprawy podzielono na dwa rodzaje, bowiem już wstępna ocena wykazała, że zaprawy w poszczególnych ścianach różnią się między sobą.

Tabela 6.1 Charakterystyka filarów murowych

Nr filara	Przeznaczenie do badań	Liczba warstw murowych	Wysokość po „wyprawieniu” zaprawą cementową	Wymiary przekroju poprzecznego
		[szt.]	[mm]	[cm]
F1/1	stan powietrzno-suchy	7	652	29 x 30
F1/2	stan mokry (*)	7	676	29 x 29
F2/1	stan powietrzno-suchy	8	709	29,5 x 30
F2/2	stan mokry (*)	8	707	29,5 x 30
F2/3	stan mokry (**)	6	584	29,5 x 31
F3/2	stan powietrzno-suchy	8	690	29 x 29
F3/1	stan mokry (*)	8	699	29 x 29
F4/3	stan powietrzno-suchy	5	488	29,5 x 31
F4/1	stan mokry (*)	5	485	28,5 x 29
F4/2	stan mokry (**)	6	576	27,5 x 29,5
Oznaczenia:				
(*) – nasycenie wodą poprzez użycie chłonnych mat bawełnianych				
(**) – nasycenie poprzez zanurzenie w wodzie				

Z każdej pary jeden filar był badany w stanie powietrzno–suchym, a drugi w stanie nasycenia wodą (w stanie „mokrym”). Ze względu na historyczny charakter badanych filarów murowych, zdecydowano się zrealizować stan wysokiej wilgotności poprzez zastosowanie chłonnych mat bawełnianych przykładanych do filara na stanowisku przeznaczonym do badań wytrzymałościowych. Obawiano się bowiem, że podczas wielokrotnego transportu uszkodzona zostanie struktura muru.

Proces realizacji stanu wysokiej wilgotności składał się z dwóch etapów (rysunek 6.4):

- etap 1 (1-7 dni):
  - zanurzenie w wodzie do wysokości 1÷2cm pierwszej warstwy muru,



- pomiar intensywności podciągania kapilarnego (odczyty z podziałki umieszczonej na murze),
- pomiar temperatury oraz wilgotności względnej otoczenia,
- etap 2 (7-14 dni):
- okrycie filara matami bawełnianymi o wysokiej chłonności wody,
- zabezpieczenie filara przed wysychaniem folią PCV,
- zapewnienie dopływu wody do mat bawełnianych, aby utrzymać je w stanie mokrym.

W powyższy sposób nasycono wodą filary F1/2, F2/2, F3/1, F4/1.

Dodatkowo zbadano również dwa filary (F2/3, F4/2) w stanie nasycenia wodą realizując ten stan w odmienny sposób (rysunek 6.5) – po etapie 1 (kapilarnego podciągania) filary w etapie 2 zanurzano całkowicie w zbiorniku wody.

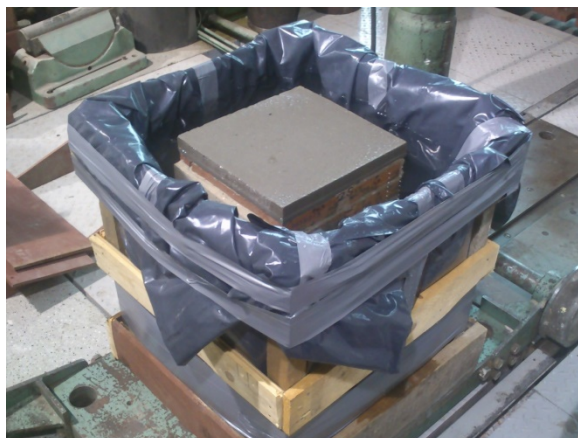
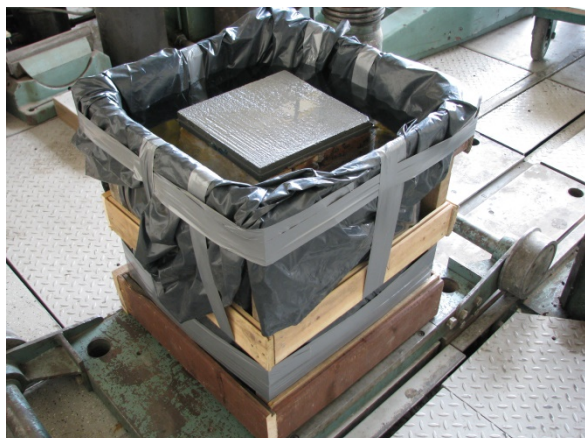
a)



b)



Rys. 6.4 Sezonowanie murów do stanu „mokrego”: a) etap nr 1 (kapilarne podciąganie),  
b) etap nr 2 – nasycenie muru wodą przez mokre maty bawełniane



Rys. 6.5 Sezonowanie murów do stanu mokrego przez zanurzenie w wodzie

## 6.2. Opis badań wytrzymałościowych

Badania filarów wykonano przy użyciu maszyny wytrzymałościowej DB-600. Prowadzono pomiar: siły, przemieszczeń poziomych, przemieszczeń pionowych. Przemieszczenia mierzono za pomocą czujników LVDT. Przemieszczenia mierzono bezpośrednio na murze (2 czujniki do pomiaru odkształceń pionowych i 2 czujniki do pomiaru odkształceń poziomych) oraz pomiędzy płytami dociskowymi maszyny wytrzymałościowej (4 czujniki). Filary wstępnie obciążano śledząc przemieszczenia rejestrowane na czterech czujnikach LVDT i ewentualnie dokonywano korekty ustawienia filarów celem zminimalizowania efektu nieosiowego ściskania. Baza pomiarowa czujników na murze była równa 180mm. Obciążenie zwiększano jednostajnie tak, aby zniszczenie elementu próbnego nastąpiło w przedziale 15 ÷ 30 min od rozpoczęcia obciążania. Widok filara na stanowisku badawczym przedstawiono na rysunku 6.6.



Rys. 6.6 Widok filara F1/2 na stanowisku badawczym

Filary obciążano do zniszczenia rejestrując postaci zarysowań. Po badaniach wytrzymałościowych pobierano próbki cegieł oraz zaprawy (rysunek 6.7) z warstw muru. Próbki były pobierane z zewnętrznej części oraz z wewnętrznej części filarów, celem określania stopnia wilgotności filarów w dniu badania. Wilgotność określono metodą suszarkowo-wagową. Z każdego filara pobrano co najmniej 7 fragmentów cegieł i zapraw do oceny stopnia zawilgocenia murów.



Rys. 6.7 Fragmenty cegieł i zapraw pobrane z filara do oceny stopnia wilgotności muru

### 6.3. Wyniki badań filarów w stanie powietrzno-suchym i mokrym

Łącznie wykonano badania 10 filarów ceglanych pobranych z konstrukcji budynku historycznego. Wyniki badań wytrzymałościowych zestawiono w tabeli 6.2. Stosunek wytrzymałości na ściskanie murów w stanie „mokrym” do wytrzymałości na ściskanie murów w stanie powietrzno-suchym określono za pomocą współczynnika redukcyjnego  $k_{ma}$ . W tabeli 6.2 podano również wilgotność masową cegieł i zapraw określoną na próbkach pobranych po badaniach wytrzymałościowych filarów.

Ponieważ smukłości filarów F2/3 i F4/2 były inne niż filarów bazowych, wyniki przeliczono stosując współczynniki korekcyjne 0,9 i 1,1 wynikające z badań *W. Krefelda* przedstawionych w pracy [61].

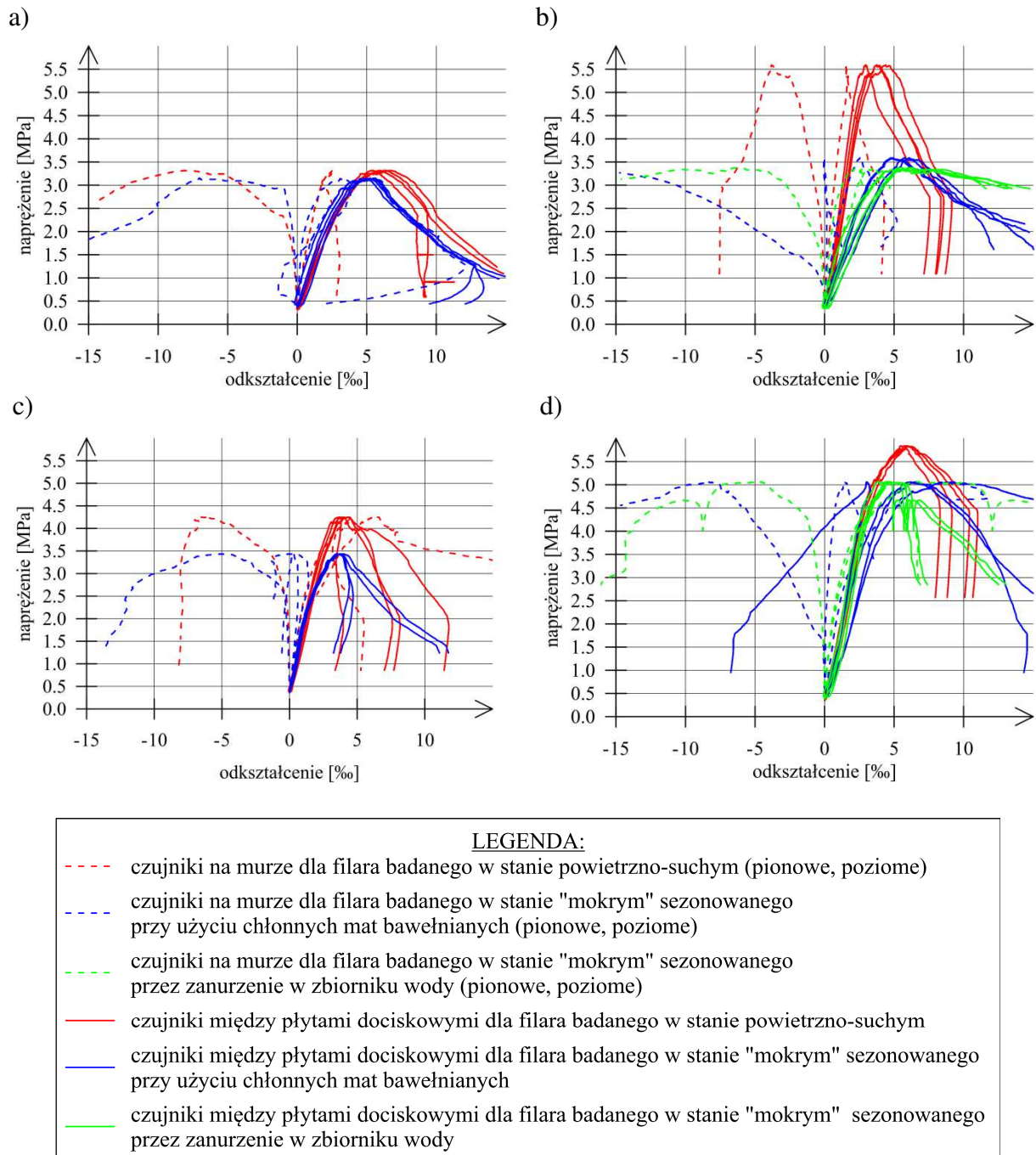
Tabela 6.2 Wyniki badań wytrzymałościowych prowadzonych na filarach

Nr filara	Sposób badania	Wytrzymałość na ściskanie	Stosunek $k_{ma} = f^{(m)} / f^{(p/s)}$	Wyniki badań wilgotności masowej materiałów murowych pobranych z filarów murowych (***)	
				cegły	zaprawy
		[MPa]	[-]	[%]	[%]
F1/1	w stanie suchym	3,3	0,95	0,8	1,0
F1/2	w stanie mokrym (*)	3,1		16,9	10,8
F2/1	w stanie suchym	5,6		0,1	0,9
F2/2	w stanie mokrym (*)	3,6	0,64	14,6	9,6
F2/3	w stanie mokrym (**)	3,4 (3,1)	0,60 (0,55)	13,2	10,7
F3/2	w stanie suchym	4,2	0,81	0,2	0,6
F3/1	w stanie mokrym (*)	3,4		17,0	12,1
F4/3	w stanie suchym	5,8		0,4	1,7
F4/1	w stanie mokrym (*)	5,1	0,87	13,9	9,9
F4/2	w stanie mokrym (**)	5,1 (5,6)	0,87 (0,97)	14,2	10,3
Oznaczenia:					
$f^{(p/s)}$ – wytrzymałość na ściskanie badanych filarów w stanie powietrzno-suchym					
$f^{(m)}$ – wytrzymałość na ściskanie badanych filarów w stanie mokrym					
(*) – sposób realizacji stanu wysokiej wilgotności przy użyciu chłonnych mat bawełnianych					
(**) – sposób realizacji stanu wysokiej wilgotności przez zanurzenie w wodzie					
(***) – próbki pobrano oraz zważono bezzwłocznie po badaniu wytrzymałościowym					
(...) – wartości po przeliczeniu z uwagi na różnicę smukłości filarów					

Stosunek wytrzymałości murów w stanie „mokrym” do wytrzymałości murów w stanie powietrzno-suchym  $f^{(m)}/f^{(p/s)}$  dla czterech par filarów zawierał się w przedziale  $0,64 \div 0,95$  (średnio 0,80). Uwzględniając badania filarów sezonowanych przez zanurzenie w wodzie stosunek  $f^{(m)}/f^{(p/s)}$  miał nieco szerszy zakres od  $0,55 \div 0,97$ .

Na rysunku 6.8 zestawiono wykresy zależności  $\sigma$ - $\varepsilon$  uzyskane z pomiarów na powierzchniach bocznych filarów oraz pomiędzy płytami dociskowymi. Szczególnie znaczące różnice odkształceń między elementem próbnym badanym w stanie powietrzno-suchym oraz elementem próbnym badanym w stanie „mokrym” zaobserwowano dla pary filarów F2 (rysunek 6.8b), w których na znacznej wysokości występowała nieprzewiązana spoina pionowa.



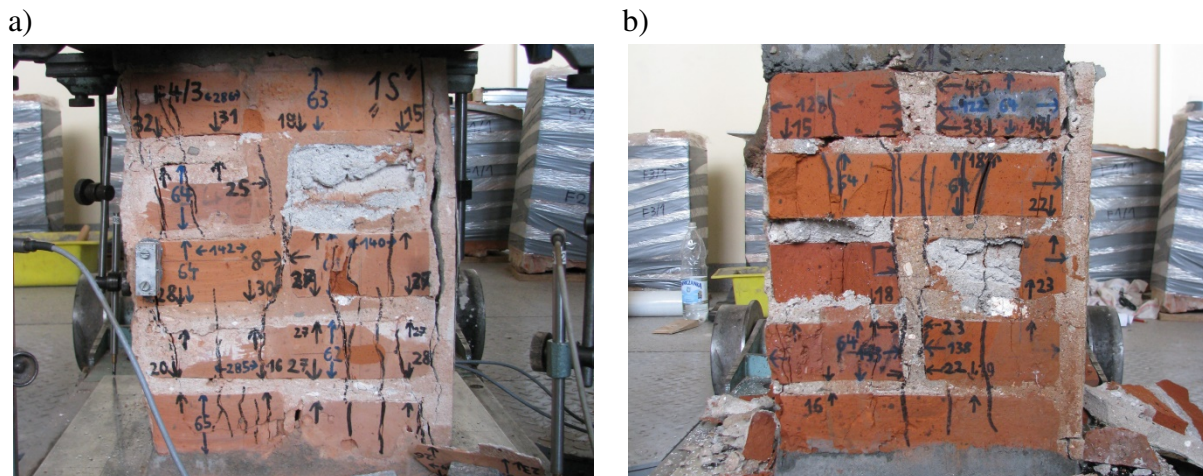


Rys. 6.8 Wykres zależności naprężenie – odkształcenie dla pary filarów: a) F1/1 i F1/2, b) F2/1, F2/2 oraz F2/3, c) F3/2 i F3/1, d) F4/3, F4/1 oraz F4/2

Liczba czujników mocowanych do filarów była stosunkowo niewielka, bowiem instalowano je jedynie na płaszczyznach, na których nie było tynków. Odczyty na tych czujnikach znacząco się różniły, co było spowodowane znaczną niejednorodnością struktury wewnętrznej muru. Do analizy wyników pomiarów prowadzonych czujnikami LVDT mocowanymi do filarów należy podchodzić więc, zdaniem autora, z dużą ostrożnością.



Obserwowano typowe formy zniszczenia elementów próbnych – rysunek 6.9. W murach pojawiały się typowe zarysowania pionowe cegieł i spoin, które przy wzroście obciążenia ściskającego rozwijały się na wysokości kilku warstw murowych i prowadziły do zniszczenia filarów. W trakcie badań obserwowano przy wysokich poziomach obciążenia „wyciskanie” wody z materiałów murowych – zarówno z cegieł jak i spoin.



Rys. 6.9 Typowe formy zniszczenia filarów: a) filar F4/3 badany w stanie powietrzno-suchym, b) filar F4/1 badany w stanie „mokrym”

Wilgotność masowa próbek cegieł pobranych z filarów po badaniu wynosiła od 13,2% do 17,0% (średnio 15,0%), natomiast zapraw od 9,6% do 12,1% (średnio 10,6%). Biorąc pod uwagę nasiąkliwość masową materiałów (patrz tabela 5.1 i tabela 5.7) można stwierdzić, że cegły i zaprawa w trakcie badań filarów były w stanie pełnego nasycenia wodą (stan mokry).

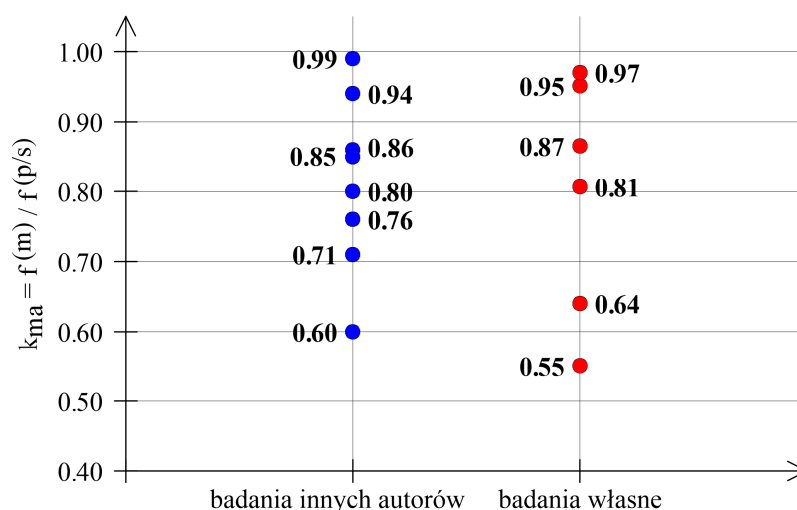
#### 6.4. Analiza wpływu zawilgocenia na wytrzymałość i odkształcalność murów

Z zestawienia podanego w tabeli 6.2 wynika, że wytrzymałość na ściskanie murów określona w badaniach filarów w stanie „mokrym” w każdym przypadku była niższa od wytrzymałości na ściskanie murów uzyskanej z badań filarów w stanie powietrzno-suchym. Wartość współczynnika  $k_{ma}$  określającego relację wytrzymałości muru w stanie „mokrym” do wytrzymałości muru w stanie powietrzno-suchym zawierała się w granicach od 0,55 do 0,97. Dla murów na słabszej zaprawie (filary F1 i F3) spadek ten wynosił średnio 0,88, natomiast dla murów na zaprawie mocniejszej (filary F2 i F4) był równy średnio 0,76. Dla filarów o większej smukłości spadek wytrzymałości na skutek zawilgocenia był wyraźnie większy niż dla filarów o mniejszej smukłości. Największą redukcję siły niszczącej i co za tym idzie

wytrzymałości muru na ściskanie uzyskano dla filarów F2, które charakteryzowały się specyficzną strukturą wewnętrzną – przewiązana była w nich co 5 warstwa murowa. Wskazuje to, że mury o takiej budowie mogą być bardziej podatne na wpływ zawilgocenia. Zagadnienie to wymaga szerszych badań, ponieważ tego typu konstrukcje były w przeszłości także stosowane.

Porównując wyniki badań filarów, w których proces nasączania wodą był prowadzony różnymi metodami można stwierdzić, że niezależnie od zastosowanej metody (nasączanie za pomocą chłonnych mat bawełnianych lub zanurzanie w wodzie) osiągnęto podobny efekt w zakresie zawilgocenia materiałów murowych. Obie metody można więc uznać za odpowiednie w badaniach wpływu silnego zawilgocenia na wytrzymałość murów poddanych ściskaniu.

Zestawienie wyników badań własnych z rezultatami innych autorów przedstawionymi w rozdziale 4 podano na rysunku 6.10.

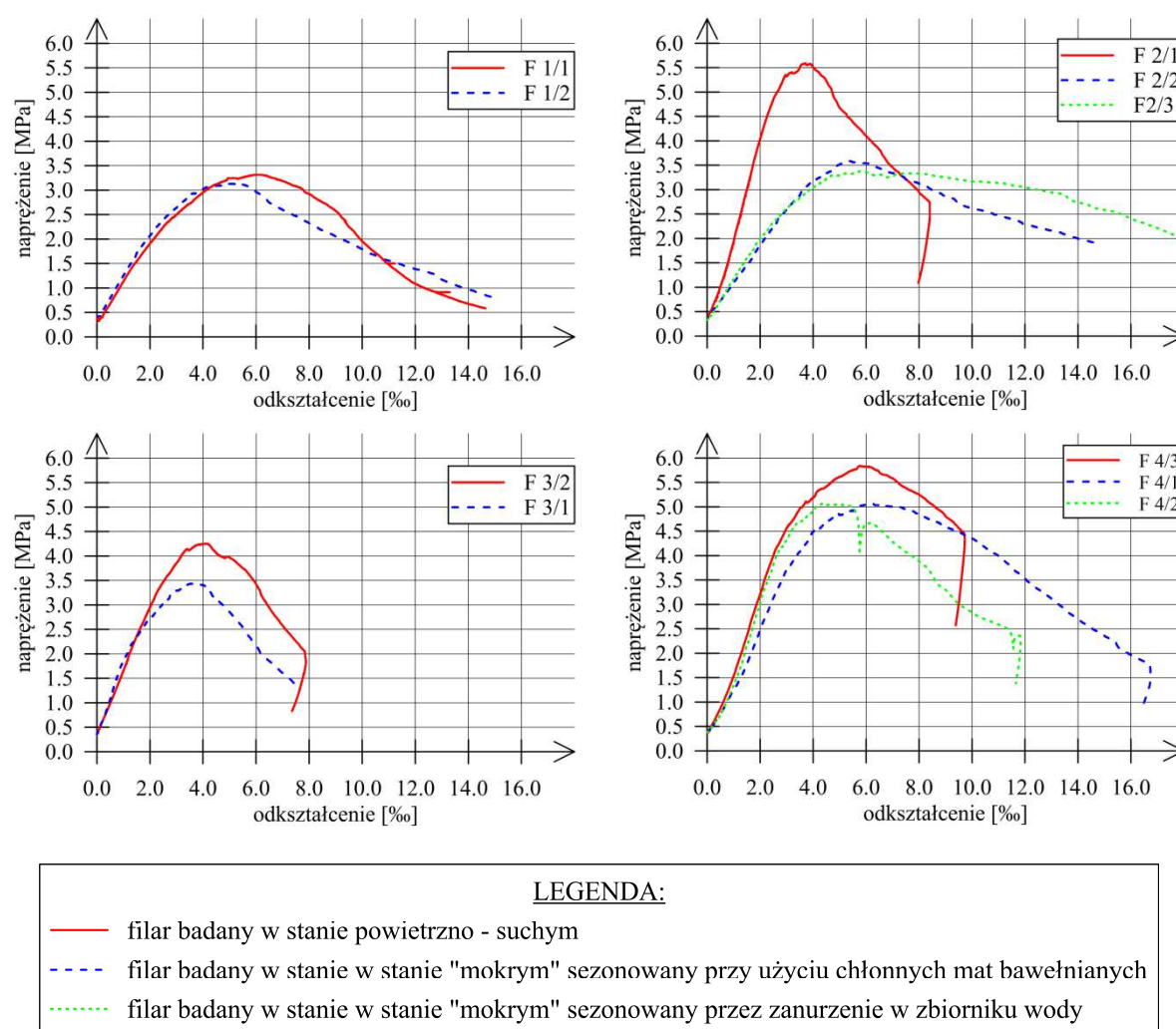


Rys. 6.10 Porównanie wyników badań własnych przeprowadzonych na filarach ceglanych z wynikami badań innych autorów

Z podanego zestawienia można wnioskować, że rezultaty badań własnych bardzo dobrze wpisują się w zakres wyników dotychczas opublikowanych w literaturze przedmiotu. Można zauważyć, że przedział wartości współczynnika  $k_{ma}$  jest znaczny i przyjęcie jednej wartości dla wszystkich murów ceglanych byłoby dużym uproszczeniem.

Z przeprowadzonych badań można również wnioskować o wpływie silnego zawilgocenia muru na jego odkształcalność przy ściskaniu - ilustrują to zjawisko wykresy przedstawione na rysunku 6.11. Wartości odkształceń pionowych podane na wykresach

uzyskano z uśrednienia odczytów prowadzonych na czterech czujnikach LVDT mierzących przemieszczenia na całej wysokości filarów. Nie zaobserwowano jednoznacznej relacji opisującej wpływ zawilgocenia na odkształcalność badanych murów. Dla filarów F2 i F4 moduły sprężystości muru były większe w stanie powietrzno-suchym w porównaniu do stanu „mokrego”, natomiast w filarach F1 i F3 zaobserwowano relację odwrotną. Podobny wniosek można wyprowadzić analizując odkształcenia przy maksymalnym naprężeniu ściskającym. Dla części filarów odkształcenia te były większe w badaniach elementów próbnych w stanie „mokrym” a dla pozostałych filarów większe były odkształcenia pionowe elementów w stanie powietrzno-suchym.



Rys. 6.11 Zależności naprężenie-odkształcenie dla badanych filarów ceglanych

Największy wpływ nasycenia muru wodą na jego odkształcalność przy ściskaniu stwierdzono dla filarów F2, w których strukturze występowały nieprzewiązane warstwy

mur. Redukcja modułu sprężystości muru wynosiła w tym przypadku ponad 44%, natomiast odkształcenia pionowe muru przy maksymalnym naprężeniu ściskającym były większe o około 50%. Moduł sprężystości muru określono jako sieczny biorąc pod uwagę odkształcenia przy naprężeniu ok. 0,1 i 0,33 wytrzymałości muru na ściskanie. Szczegółowe porównanie parametrów charakteryzujących odkształcalność filarów przy ściskaniu zamieszczono w tabeli 6.3.

Tabela 6.3 Parametry charakteryzujące odkształcalność muru przy ściskaniu  
– z pomiarów na 4 czujnikach LVDT

Nr filara	Stan w trakcie badań	Moduł sprężystości E	Stosunek $k_E = E^{(m)} / E^{(p/s)}$	Odształcenie przy maksymalnym naprężeniu $\mathcal{E}$	Stosunek $k_{\mathcal{E}} = \mathcal{E}^{(m)} / \mathcal{E}^{(p/s)}$
		[GPa]	[-]	[%o]	[-]
F1/1	w stanie suchym	0,89	1,03	6,21	0,86
F1/2	w stanie mokrym (*)	0,92		5,34	
F2/1	w stanie suchym	1,64		3,71	
F2/2	w stanie mokrym (*)	0,73	0,45	5,41	1,46
F2/3	w stanie mokrym (**)	0,88	0,54	5,92	1,60
F3/2	w stanie suchym	1,29	1,13	4,02	0,95
F3/1	w stanie mokrym (*)	1,46		3,80	
F4/3	w stanie suchym	1,31		5,82	
F4/1	w stanie mokrym (*)	0,97	0,74	6,28	1,08
F 4/2	w stanie mokrym (**)	1,14	0,87	4,45	0,76
Oznaczenia:					
(*) – sposób realizacji stanu wysokiej wilgotności przy użyciu chłonnych mat bawełnianych					
(**) – sposób realizacji stanu wysokiej wilgotności przez zanurzenie w wodzie					

Uwaga: Zastosowany sposób pomiaru odkształceń pionowych muru przy ściskaniu nie jest zgodny z wytycznymi normowymi podanymi w [86]. Wynika to z niejednorodności struktury badanych murów historycznych. Defekty uniemożliwiały w wielu przypadkach mocowanie czujników o wymaganej normą bazie. Z tego powodu wartość modułów sprężystości murów i odkształceń przy maksymalnym naprężeniu ściskającym podane w tabeli 6.3 nie należy odnosić do wartości normowych.

Duże spadki modułów sprężystości murów były rejestrowane w badaniach innych autorów – szczególnie dla murów na zaprawach wapiennych. *J. Witzany i in.* [109] uzyskali ponad dwukrotnie mniejsze moduły sprężystości murów w stanie mokrym w stosunku do stanu powietrzno-suchego. Kilkunastoprocentowe spadki modułów sprężystości murów w stanie mokrym odnotowali też w badaniach doświadczalnych *D.V. Bompia i Y.A. Elghazani* [12] oraz *A.M. Amade i in.* [3]. Natomiast *C. Gentilini i in.* [27] nie stwierdzili obniżenia modułu sprężystości muru ceglanego na skutek nasycenia muru ceglanego wodą. Jak wynika z przeprowadzonych badań własnych oraz badań innych autorów zmiana modułu sprężystości murów na skutek nasycenia wodą może być znacząca – współczynnik  $k_E$  zawiera się w granicach od ok. 0,5 do 1,13.

W analizach konstrukcji murowych stosowana jest również miara odkształcalności w postaci cechy sprężystości muru – rozumianej jako stosunek modułu sprężystości muru do jego wytrzymałości na ściskanie. Wartości cech sprężystości murów uzyskane w badaniach własnych przedstawiono w tabeli 6.4.

Tabela 6.4 Zmiana cechy sprężystości muru wywołana silnym zawilgoceniem (stan nasycenia wodą)

Nr filara	Stan w trakcie badań	Cecha sprężystości muru [-]	$k_\alpha = \alpha_E^{(m)} / \alpha_E^{(p/s)}$ [-]
F1/1	w stanie suchym	270	1,10
F1/2	w stanie mokrym (*)	297	
F2/1	w stanie suchym	293	0,83
F2/2	w stanie mokrym (*)	203	
F2/3	w stanie mokrym (**)	283	
F3/1	w stanie suchym	307	1,40
F3/2	w stanie mokrym (*)	430	
F4/3	w stanie suchym	226	0,87
F4/1	w stanie mokrym (*)	190	
F4/2	w stanie mokrym (**)	204	
Oznaczenia:			
(*) – sposób realizacji stanu wysokiej wilgotności przy użyciu chłonnych mat bawełnianych			
(**) – sposób realizacji stanu wysokiej wilgotności przez zanurzenie w wodzie			

Z wyjątkiem filarów F3 zmiana cechy sprężystości murów spowodowana silnym zawilgoceniem mieści się w przedziale wartości  $(0,8 \div 1,1)$  wynikającym z dotychczas przeprowadzonych nielicznych badań w tym zakresie – patrz rozdział 4. Jedynie dla filarów F3 uzyskano znaczący wzrost cechy sprężystości na skutek silnego zawilgocenia.

## 7. Badania próbek rdzeniowych pobranych z murów

Badania parametrów wytrzymałościowych murów z wykorzystaniem odwiertów rdzeniowych wycinanych z istniejących konstrukcji prowadzone są ze zwiększoną intensywnością od co najmniej kilkunastu lat. Najczęściej badania wykonywane są na odwiertach o średnicy 150mm (*C. Billelo i in.* [9], *J. Segura i in.* [96], *P. Matysek* [60], [61], [64], [71], [72], [73]). Taki sposób do oceny wytrzymałości na ściskanie muru zaleca norma UIC [107]. Próbkę rdzeniową ściska się w tym samym kierunku w jakim jest obciążona w murze. Zaletą tej metody jest z jednej strony ograniczenie uszkodzeń spowodowanych pobieraniem próbek, a z drugiej prowadzenie badań na oryginalnym materiale pobranym z konstrukcji – oryginalnym zarówno materiałowo jak i geometrycznie (oryginalny układ cegieł i spoin).

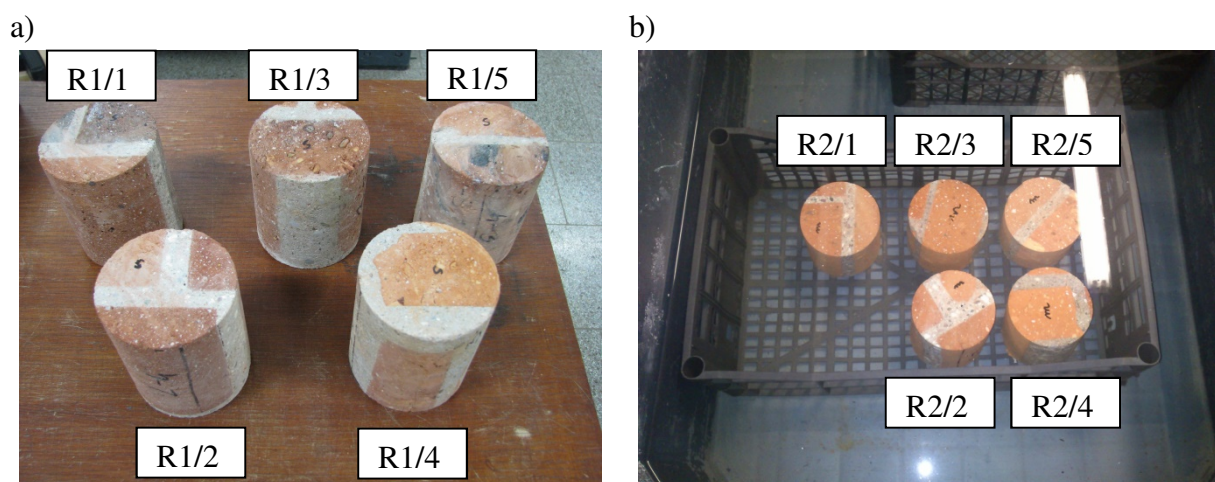
W przypadku konstrukcji murowych o charakterze zabytkowym, w których do minimum należy ograniczyć uszkodzenia murów spowodowane wycinaniem rdzeni, podejmowane są próby oceny wytrzymałości murów na podstawie badań odwiertów o średnicy 100mm (*P. Matysek i in.* [67], *P. Matysek i J. Seręga* [65], *J. Segura i in.* [96]). Dotychczasowe badania wskazują, że istnieje ścisła zależność pomiędzy wynikami badań rdzeni o średnicy 100mm a wytrzymałością muru na ściskanie. Uzasadnione jest więc, zdaniem autora, przeprowadzenie badań na odwiertach rdzeniowych muru w stanie „mokrym” celem określenia wpływu zawilgocenia na parametry wytrzymałościowe muru. Podkreślić należy, że metodę badań na próbkach rdzeniowych małych średnic można zaliczyć do metod stosunkowo małoszczących i wykorzystywać w analizie obiektów istniejących w tym także obiektów o charakterze historycznym.

Elementy próbne (rysunek 7.1) o średnicy 100mm, których badania przedstawiono w niniejszym rozdziale, pobrano z muru oporowego zrealizowanego w pierwszej połowie XX wieku. Ponieważ mur oporowy narażony był okresowo na silne zawilgocenie w analizie prowadzonej w ramach prac eksperckich ustalano między innymi wpływ silnego zawilgocenia muru na parametry wytrzymałościowe muru. Z czterech miejsc badawczych pobrano odwierty rdzeniowe – 5 odwiertów zostało przeznaczonych do badań w stanie powietrzno-suchym, a 5 do badań w stanie „mokrym”. Każda para odwiertów rdzeniowych badanych w stanie powietrzno-suchym i mokrym miała taki sam układ spoin.



Elementy próbne przeznaczone do badań w stanie powietrzno-suchym suszono do stałej masy i sezonowano do stanu powietrzno-suchego analogicznie jak cegły – patrz opis w rozdziale 5. Elementy próbne przeznaczone do badań w stanie „mokrym” sezonowano przez zanurzenie w wodzie przez okres 19 dni. Po 19 dniach zanurzenia w wodzie wilgotność próbek wynosiła 12,2%.

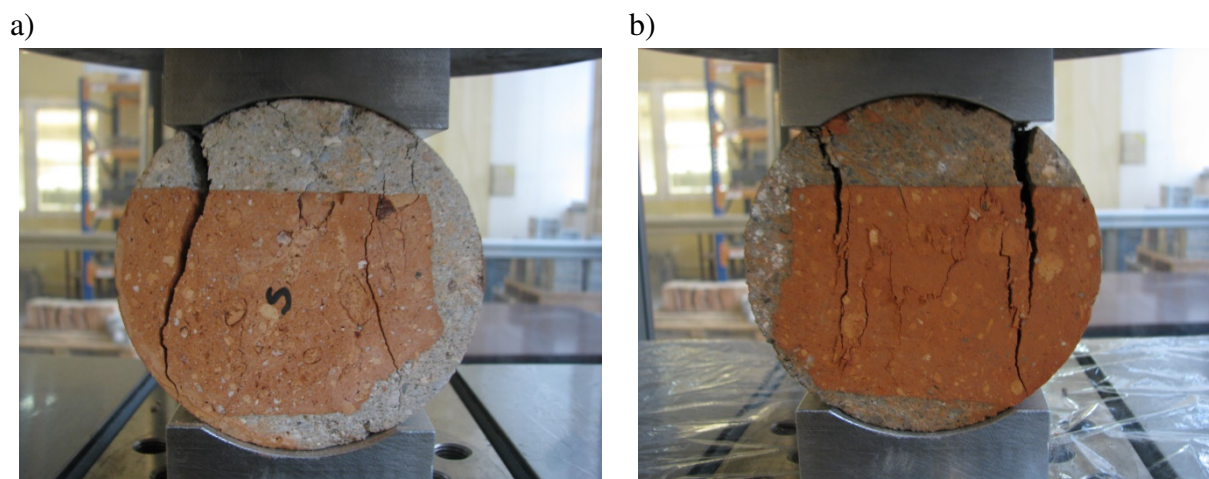
Próbki ściskano za pośrednictwem specjalnych przekładek stalowych – widok próbek przedstawiono na rysunku 7.2. Próbę ściskania wykonano na maszynie wytrzymałościowej Zwick Z1600. Czas obciążania próbki do zniszczenia zawierał się w przedziale od 15 minut do 30 minut.



Rys. 7.1 Odwierty rdzeniowe o średnicy 100mm przeznaczone do badań: a) w stanie powietrzno-suchym, b) w stanie „mokrym”

Kierunek obciążania próbek był zgodny z kierunkiem działania obciążenia ściskającego w murze. Obserwowano typowe formy zniszczenia (rysunek 7.2) zarówno dla badań prowadzonych na próbkach w stanie powietrzno-suchym jak i w stanie mokrym propagacja uszkodzeń rozpoczynała się w miejscu styku przekładek stalowych i próbek muru. Rysy rozwijały się następnie w kierunku środka próbki.





Rys. 7.2 Formy zniszczenia odwiertów rdzeniowych muru w badaniach wytrzymałościowych: a) element próbny zbadany w stanie powietrzno-suchym, b) element próbny zbadany w stanie mokrym

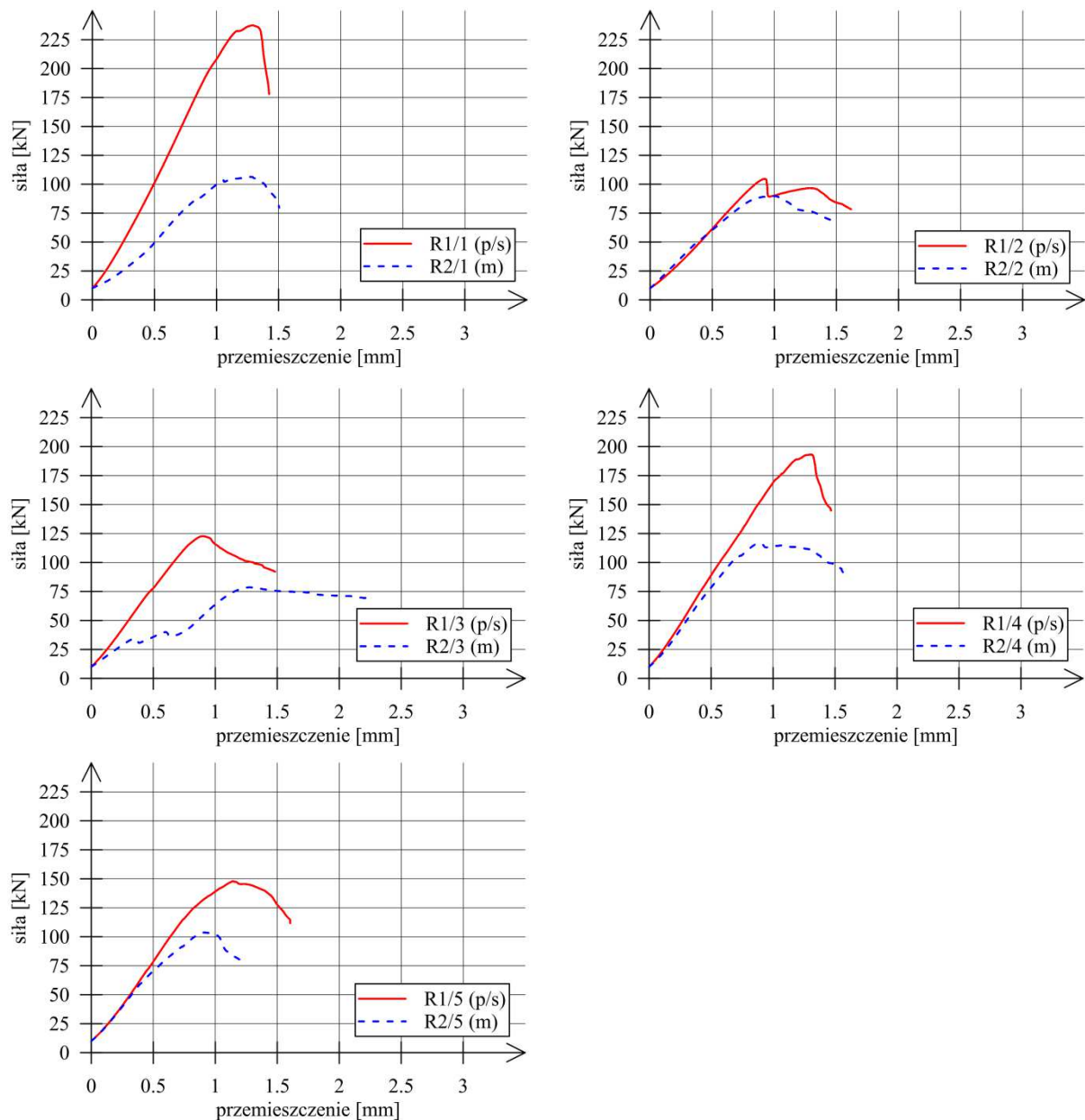
Wyniki badań przeprowadzonych na próbkach rdzeniowych muru zestawiono w tabeli 7.1.

Tabela 7.1 Badania wytrzymałościowe odwiertów rdzeniowych muru w stanie powietrzno-suchym i „mokrym”

Nr próbki	Siła [kN]	Wartość średnia siły [kN]	Współczynnik zmienności [-]
Badania w stanie powietrzno-suchym			
R1/1	237,4	161,2	0,335
R1/2	104,6		
R1/3	122,7		
R1/4	193,1		
R1/5	148,0		
Badania w stanie „mokrym”			
R2/1	106,3 (0,45)	98,9 (0,61)	0,15
R2/2	89,7 (0,86)		
R2/3	78,6 (0,65)		
R2/4	116,4 (0,60)		
R2/5	103,6 (0,70)		
wartości w nawiasach (..) oznaczają stosunek maksymalnej siły dla próbki w stanie „mokrym” do maksymalnej siły dla próbki w stanie powietrzno-suchym			

Dla odwiertów rdzeniowych badanych w stanie powietrzno-suchym uzyskano średnią siłę niszczącą równą 161,2kN, przy współczynniku zmienności równym 33,5%. Dla odwiertów rdzeniowych badanych w stanie „mokrym” uzyskano średnią siłę niszczącą = 98,9kN, przy współczynniku zmienności równym 15,0%. Duże rozrzuty wyników wynikały ze zróżnicowanego układu cegła/spoiny w poszczególnych próbkach rdzeniowych. Natomiast uzasadnione jest porównanie wyników badań poszczególnych par odwiertów, ponieważ w danej parze układ cegła/spoiny był taki sam. Stosunek siły niszczącej dla elementów badanych w stanie nasycenia wodą do siły niszczącej elementów badanych w stanie powietrzno-suchym zawierał się w przedziale:  $0,45 \div 0,86$ . Średni stosunek sił niszczących próbki w stanie mokrym do sił niszczących próbek w stanie powietrzno-suchym wyniósł 0,61. Odnotowano więc prawie 40% spadek ściskających sił niszczących spowodowany silnym zawilgoceniem muru. Takie wielkości redukcji wytrzymałości na ściskanie murów były również rejestrowane w badaniach opisanych w poprzednich rozdziałach. Wskazuje to na możliwości prognozowania spadków wytrzymałości murów w stanach nasycenia wodą na podstawie badań próbek rdzeniowych pobranych z konstrukcji.

Na rysunku 7.3 pokazano zależność siła - przemieszczenie dla poszczególnych par odwiertów rdzeniowych badanych w różnych stanach wilgotności. W czterech przypadkach na pięć odkształcenia próbek w stanie „mokrym” były większe niż w stanie powietrzno-suchym.



Rys. 7.3 Wykresy zależności siła-przemieszczenie dla poszczególnych par odwiertów rdzeniowych badanych w różnych stanach wilgotności (p/s – w stanie powietrzno-suchym, m – w stanie „mokrym”)

Wykresy przedstawione na rysunku 7.3 pokazują wprawdzie, że zawilgocenie próbki rdzeniowej muru ma wpływ na jej odkształcalność, ale na ich podstawie nie można określić parametrów takich jak na przykład moduł sprężystości muru, czy odkształcenie muru przy maksymalnym naprężeniu. Wynika to nie tylko ze sposobu pomiaru przemieszczeń (zapis przemieszczeń płyty dociskowej maszyny) ale również, ze złożonego stanu naprężeń występującego w próbce rdzeniowej przy ściskaniu. Problematyka oceny parametrów odkształceniowych muru na podstawie badań próbek rdzeniowych jest testowana przez

różnych badaczy (*C. Billelo i in.* [9], *J. Segura i in.* [96]), ale dotychczasowe wyniki wskazują na dość ograniczone możliwości metody w tym zakresie.

## **8. Ocena wpływu zawilgocenia murów na ich wytrzymałość na podstawie badań próbek cegieł i zapraw pobranych z konstrukcji**

### **8.1. Zależności do określenia wpływu wytrzymałości cegieł i zaprawy na wytrzymałość murów**

Od co najmniej 100 lat poszukiwana jest zależność pomiędzy wytrzymałością muru na ściskanie a wytrzymałością materiałów, z których składa się mur, czyli cegieł i zaprawy. Najczęściej zależności tej poszukiwano na drodze badań doświadczalnych – ściskano do zniszczenia filary i ściany murowe o różnym przekroju i wysokości oraz cegły i zaprawy używane do wykonania muru. Metoda badań eksperymentalnych w tym zakresie jest w dalszym ciągu podstawowym narzędziem ustalania wytrzymałości na ściskanie muru na podstawie wytrzymałości elementów murowych i zapraw. Podsumowanie badań w tym zakresie można znaleźć między innymi w pracach *S. Sahlina* [93], *P. Matyska* [61].

Zależności pomiędzy wytrzymałością na ściskanie muru a parametrami mechanicznymi jego komponentów poszukiwano również analizując różne modele muru. Podstawowe znaczenie miał w tym względzie model Hilsdorfa przedstawiony w pracach [30], [31] a opisany po krótkce w rozdziale 4.1. Późniejsze modele murów i określane na ich podstawie zależności wykorzystywały w analizach Metodę Elementów Skończonych. Tego typu prace, niezwykle ciekawe, opisują mechanizm niszczenia muru przy ściskaniu na poziomie jego struktury cegły/spoiny (*C.L. Khoo i in.* [46], *P. Probst* [90], *P.B. Lourenco* [54], *L. Małyszko* [58], *Ł. Drobiec* [20] i [21], *P. Bilko* [10]). Jak dotychczas wyniki analiz wykorzystujących modele MES i wzory wyprowadzane na ich podstawie nie znalazły szerszego zastosowania w praktyce ze względu na nieznajomość parametrów oraz współczynników występujących w tych modelach i wzorach.

W tabeli 8.1 zestawiono niektóre wzory służące w przeszłości do określenia wytrzymałości na ściskanie muru na podstawie wytrzymałości cegieł i zaprawy.

Tabela 8.1 Wybrane zależności do określenia wytrzymałości na ściskanie murów ceglanych na podstawie wytrzymałości na ściskanie cegieł i zaprawy – według [61]

H. Krüger 1917	$f = f_B \frac{(6 + 0,1f_M)}{12 + \frac{5h}{t}}$
L.J Oniszczyk 1939	$f = Af_B \left( 1 - \frac{0,2}{0,3 + \frac{f_M}{f_B}} \right)$
O. Graff 1952	$f = f_B \frac{(4 + 0,1f_M)}{16 + \frac{3h}{t}} + a$
O. Bröcker 1961	$f = \sqrt[3]{f_M \sqrt{f_B}}$
A.W. Hendry i M.H. Malek 1986	$f = 1,242f_B^{0,531} f_M^{0,208}$ dla ścian gr. 1/2 cegły $f = 0,334f_B^{0,778} f_M^{0,234}$ dla ścian gr. 1 cegły
Oznaczenia:	
$f_B$	– wytrzymałość na ściskanie cegieł
$f_M$	– wytrzymałość na ściskanie zaprawy
$h/t$	– smukłość badanego filara ceglanego
$a, A$	– współczynniki

Porównania badanych w tabeli 8.1 zależności można znaleźć między innymi w pracach *P. Matyska* [61], [62], [63] oraz *S. Sahlina* [93]. Przez wiele dziesięcioleci stosowana była w Polsce zależność opracowana przez L. J. Oniszczyka. Zależność ta wyprowadzona i modyfikowana w oparciu o szerokie badania doświadczalne była stosowana powszechnie do oceny wytrzymałości muru w obiektach istniejących. Znaczne różnice w wartościach wytrzymałości murów określone na podstawie poszczególnych zależności wynikają między innymi z różnych metod badawczych do oceny wytrzymałości murów, cegieł i zapraw stosowanych w różnych krajach.

Wprowadzenie norm europejskich ujednoliciło metody badań materiałów murowych i pozwoliło na przeprowadzenie analiz na dużej liczbie wyników. Dlatego w dalszej części pracy jedną z podstawowych zależności do oceny wytrzymałości muru będzie zależność potęgowa podana w normie EN 1996-1-1 [22] i za nią w normie PN-EN 1996-1-1 [87]. Zależność ta ma postać:

$$f_k = K f_b^\alpha f_m^\beta \quad (20)$$

w której:

- $f_k$  – charakterystyczna wytrzymałość na ściskanie muru
- $K, \alpha, \beta$  – współczynnik dobierany na podstawie rodzaju i grupy elementów murowych oraz rodzaju zaprawy murarskiej
- $f_b$  – znormalizowana wytrzymałość elementu murowego na ściskanie,
- $f_m$  – średnia wytrzymałość zaprawy murarskiej na ściskanie.

Dla murów na zaprawach zwykłych i lekkich  $\alpha = 0,7$ ,  $\beta = 0,3$  i wzór (20) przybiera postać:

$$f_k = K f_b^{0,70} f_m^{0,30} \quad (21)$$

Zależność (21) była już analizowana w rozdziale 4.4. Dla murów z elementów ceramicznych grupy 1, do których zalicza się cegły pełne, wartość współczynnika K zgodnie z normą [22] jest równa 0,55, natomiast zgodnie z polską normą [87] K wynosi 0,45. Dla murów ze spoiną podłużną wartości wytrzymałości murów ceglanych określone na podstawie zależności (21) należy zredukować o 20%.

Zależność eksponentyjną podano również w załączniku krajowym niemieckiej wersji Eurokodu 6.

$$f_k = 0,95 f_b^{0,585} f_m^{0,162} \quad (22)$$

O ile jednak zależność (21) podana w EN 1996-1-1 dotyczy murów z różnych elementów murowych, to zależność zamieszczona w niemieckim załączniku krajowym została skalibrowana wyłącznie na podstawie badań murów ceglanych.

W pracy [72] przedstawiono analizę możliwości zastosowania wzorów potęgowych, przyjętych w normie europejskiej do oceny wytrzymałości na ściskanie murów w obiektach istniejących. Z badań prowadzonych na filarach ceglanych wyciętych z istniejących

konstrukcji murowych opublikowanych w pracy [72], której doktorant był współautorem, wynika zależność:

$$f = 0,66f_b^{0.5}f_m^{0.25} \quad (23)$$

w której:

$f$  – średnia wytrzymałość na ściskanie muru.

Po uwzględnieniu relacji pomiędzy  $f_k$  i  $f$  jak podano w nowej wersji normy PN-EN 1996-1-1:2023-08 [88] ( $f/f_k = 1,2$ ) wzór (23) przyjmuje postać:

$$f_k = 0,55f_b^{0.5}f_m^{0.25} \quad (24)$$

We wszystkich przytoczonych powyżej wzorach potęgowych służących do określenia wytrzymałości na ściskanie murów ceglanych wartość współczynnika potęgowego  $\alpha$  jest zdecydowanie większa niż współczynnika  $\beta$ . Oznacza to, że wytrzymałość na ściskanie cegieł ma znacznie większy wpływ na wytrzymałość murów niż wytrzymałość zapraw.

## 8.2. Wytrzymałość na ściskanie murów w stanie mokrym

Z analizy zależności potęgowej (20), przy założeniu takich samych współczynników  $\alpha$  i  $\beta$  dla stanu powietrzno-suchego i „mokrego”, można wyprowadzić wzór do oceny spadku wytrzymałości na ściskanie muru ceglanoego wyrażonego współczynnikiem  $k_{ma}$  na podstawie spadków wytrzymałości cegieł i zaprawy spowodowanych silnym zawilgoceniem tych materiałów (wyrażonych odpowiednio współczynnikami  $k_b$  i  $k_m$ ). Wzór ten po przekształceniach przyjmuje postać:

$$k_{ma} = k_b^\alpha k_m^\beta \quad (25)$$

Zależność w podobnej postaci uzyskać można analizując wzory (21), (22), (23), przy czym ostateczne postaci wzorów na wartość współczynnika  $k_{ma}$  będą uwzględniały konkretne wartości współczynników potęgowych  $\alpha$  i  $\beta$ :

$$k_{ma} = k_b^{0,7} k_m^{0,3} \quad (26)$$



$$k_{ma} = k_b^{0,585} k_m^{0,162} \quad (27)$$

$$k_{ma} = k_b^{0,5} k_m^{0,25} \quad (28)$$

W tabeli 8.2 porównano wartości współczynnika  $k_{ma}$  uzyskane dla różnych wartości współczynników  $\alpha$  i  $\beta$  wynikających ze wzorów potęgowych (26), (27), (28).

Tabela 8.2 Wartości współczynnika  $k_{ma}$  określającego spadek wytrzymałości na ściskanie muru spowodowany jego silnym zawilgoceniem

Założenia		$k_{ma}$		
$k_b$	$k_m$	$\alpha = 0,7; \beta = 0,3$	$\alpha = 0,585; \beta = 0,162$	$\alpha = 0,5; \beta = 0,25$
0,95	0,90	0,93	0,95	0,95
0,90	0,90	0,90	0,92	0,92
0,85	0,90	0,86	0,89	0,90
0,80	0,90	0,83	0,86	0,87
0,75	0,90	0,79	0,83	0,84
0,95	0,80	0,90	0,94	0,92
0,90	0,80	0,87	0,91	0,90
0,85	0,80	0,83	0,88	0,87
0,80	0,80	0,80	0,85	0,85
0,75	0,80	0,76	0,82	0,82
0,95	0,70	0,87	0,92	0,89
0,90	0,70	0,83	0,89	0,87
0,85	0,70	0,80	0,86	0,84
0,80	0,70	0,77	0,83	0,82
0,75	0,70	0,73	0,80	0,79
0,95	0,60	0,83	0,89	0,86
0,90	0,60	0,80	0,87	0,83
0,85	0,60	0,77	0,84	0,81
0,80	0,60	0,73	0,81	0,79
0,75	0,60	0,70	0,78	0,76

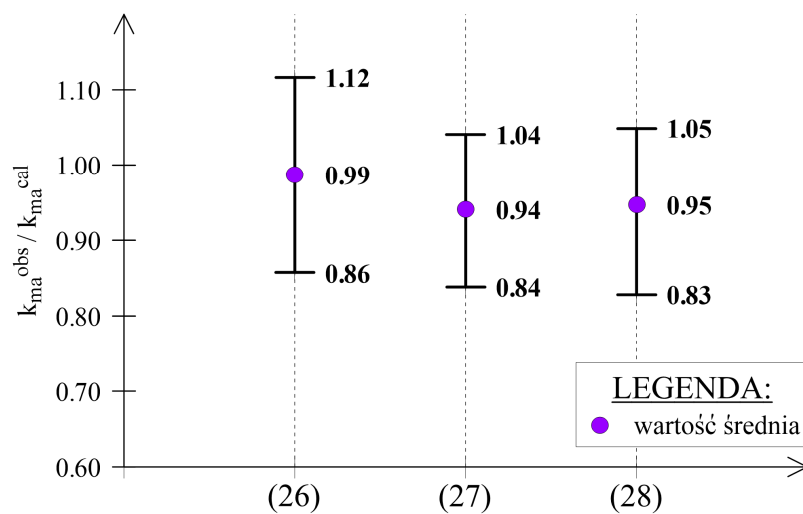
W tabeli 8.2 uwzględniono zakresy wartości współczynników  $k_b$  i  $k_m$  wynikające z danych zamieszczonych w rozdziale 5. Z podanego zestawienia można wnioskować, że spadki wytrzymałości na ściskanie murów ceglanych spowodowane jego silnym zawilgoceniem określone na podstawie analizowanych wzorów mogą wynosić od kilku do nawet 30%.

Odniesienie rezultatów obliczeń wartości współczynnika  $k_{ma}$  do wyników badań doświadczalnych zestawiono w tabeli 8.3.

Tabela 8.3 Porównanie rezultatów badań doświadczalnych z wynikami obliczeń

Badania	$k_{ma}^{cal}$								
	$k_b$	$k_m$	$k_{ma}^{obs}$	obliczenia					
				$\alpha = 0,7; \beta = 0,3$	$\alpha = 0,585; \beta = 0,162$	$\alpha = 0,5; \beta = 0,25$			
[3]	0,90	0,74	0,80	0,85 (0,94)	0,90 (0,89)	0,88 (0,91)			
[3]	0,90	0,90	0,86	0,90 (0,96)	0,92 (0,93)	0,92 (0,93)			
[59]	0,82	0,64	0,85	0,76 (1,12)	0,83 (1,03)	0,81 (1,05)			
[94]	0,85	0,98	0,76	0,89 (0,86)	0,91 (0,84)	0,92 (0,83)			
[94]	0,85	0,97	0,83	0,88 (0,94)	0,90 (0,92)	0,91 (0,91)			
[94]	0,85	0,84	0,92	0,85 (1,09)	0,88 (1,04)	0,88 (1,04)			
badania własne	0,86	0,71	0,88	0,81 (1,08)	0,87 (1,01)	0,85 (1,03)			
badania własne	0,86	0,74	0,75	0,82 (0,92)	0,87 (0,86)	0,86 (0,88)			
Wartość średnia $k_{ma}^{obs} / k_{ma}^{cal}$ :				(0,99)	(0,94)	(0,95)			
Uwaga: w nawiasach podano wartości $k_{ma}^{obs} / k_{ma}^{cal}$									

Jak wynika z tabeli 8.3 oraz rysunku 8.1 korelacja wyników obliczeń z wynikami badań doświadczalnych w zakresie współczynnika  $k_{ma}$  jest bardzo dobra. Różnice nie przekraczają 17%.



Rys. 8.1 Porównanie wartości współczynnika  $k_{ma}$  uzyskanych ze wzorów (26), (27), (28) oraz na podstawie badań doświadczalnych

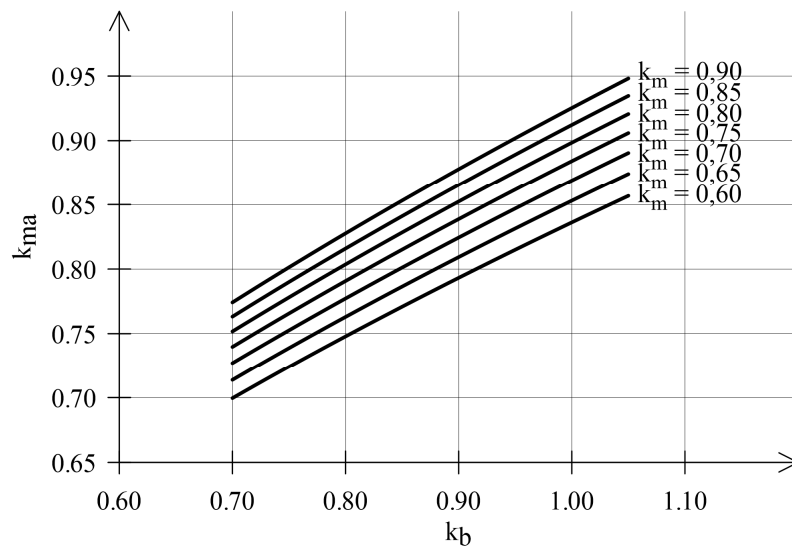
Dodatkowo przeprowadzono analizę wzorów potęgowych, aby uzyskać możliwie najlepszą korelację wyników obliczeń z wynikami badań doświadczalnych. Na podstawie analizy wyprowadzono zależność:

$$k_{ma} = 0,95k_b^{0,5}k_m^{0,25} \quad (29)$$

Rezultaty obliczeń współczynnika redukcyjnego  $k_{ma}$  określonego ze wzoru (29) przedstawiono na rysunku 8.2. Wyniki obliczeń na podstawie zależności (29) nie różnią się więcej niż 13% od wyników badań doświadczalnych – patrz tabela 8.4.

Tabela 8.4 Porównanie wyników badań z rezultatami obliczeń na podstawie wzoru (29)

Badania				Obliczenia ze wzoru (29) $k_{ma}^{cal}$	$k_{ma}^{obs}/k_{ma}^{cal}$
	$k_b$	$k_m$	$k_{ma}^{obs}$		
[3]	0,90	0,74	0,80	0,84	0,95
[3]	0,90	0,90	0,86	0,87	0,99
[59]	0,82	0,64	0,85	0,77	1,10
[94]	0,85	0,98	0,76	0,87	0,87
[94]	0,85	0,97	0,83	0,87	0,95
[94]	0,85	0,84	0,92	0,84	1,10
badania własne	0,86	0,71	0,88	0,81	1,09
badania własne	0,86	0,74	0,75	0,82	0,92
Wartość średnia:				0,84	0,996



Rys. 8.2 Wartość współczynnika redukcyjnego  $k_{ma}$  pokazującego spadek wytrzymałości na ściskanie muru spowodowany jego silnym zawilgoceniem

Zależność (29) można stosować, zdaniem autora, do oszacowania redukcji wytrzymałości na ściskanie murów ceglanych nasyconych wodą na podstawie spadków wytrzymałości cegieł i zaprawy, występujących w rozpatrywanym murze.

Jak wynika z tabeli 8.4 rezultaty niektórych badań mogą różnić się ponad 10% (jeden przypadek) od wyników obliczeń na podstawie wzoru (29). Wynika to z faktu, że wytrzymałość na ściskanie murów ceglanych zależy nie tylko od wytrzymałości cegieł i zapraw, lecz również od innych czynników takich jak na przykład jakość i sposób wykonania muru w tym grubość spoin i stopień ich wypełnienia, a także rodzaj zastosowanego wiązania murarskiego.

Ze wzorów (24) i (29) wynika zależność pozwalająca określić wprost wytrzymałość murów w stanie „mokrym”:

$$f_k^{(m)} = 0,523(f_b^{(m)})^{0,5}(f_m^{(m)})^{0,25} \quad (30)$$

Porównanie zależności (30) z wynikami badań własnych przedstawiono w tabeli 8.5

Tabela 8.5 Porównanie wyników obliczeń na podstawie zależności (30) i (31) z rezultatami badań własnych

$f_k^{(m)}$ ze wzoru (30) lub (31) [MPa]	$f_k^{(m) (obs)}$ [MPa]
3,4 (3,1)	3,1
	3,6
4,4 (4,1)	3,4
	5,1
(...) ze wzoru (31)	

Zgodność wyników obliczeń z badaniami jest zadowalająca.

Biorąc pod uwagę większą niejednorodność murów historycznych można założyć większy stosunek pomiędzy wytrzymałością średnią muru a wytrzymałością charakterystyczną (na przykład równy 1,3) i wówczas:

$$f_k^{(m)} = 0,483(f_b^{(m)})^{0,5}(f_m^{(m)})^{0,25} \quad (31)$$

Wartości  $f_k^{(m)}$  określone ze wzoru (31) podano w tabeli 8.5 w nawiasach.

Należy podkreślić również, że wzory (29), (30) i (31) zostały opracowane przede wszystkim na podstawie badań murów na zaprawach o wytrzymałości większej niż 1,0MPa. Badań murów w stanie mokrym na bardzo słabych zaprawach przeprowadzono dotąd bardzo niewiele. Problemem jest określenie wytrzymałości na ściskanie słabych zapraw wapiennych w stanie mokrym. Zaprawy te bowiem w stanie mokrym mogą ulegać rozmiękaniu - ich wytrzymałość na ściskanie w tym stanie jest bliska zeru. Dla takich murów przyjąć można, że ich wytrzymałość w stanie mokrym będzie równa wytrzymałości muru na świeżej zaprawie lub mokrym piasku, którą zgodnie z [62] i [84] określić można z zależności:

$$f_k^{(m)} = 0,1f_b^{(m)} \quad (32)$$

Wzór (32) traktować należy jako wstępne oszacowanie – zagadnienie oceny wytrzymałości na ściskanie murów na bardzo słabych zaprawach wapiennych w stanie mokrym wymaga dalszych badań.

## 9. Analiza nośności murów ceglanych w stanie silnie zawilgoconym

### 9.1. Założenia analizy

Mury ceglane w budynkach istniejących charakteryzują się z reguły znaczną grubością – minimalna grubość ścian konstrukcyjnych wynosi zwykle 1,5 cegły, co przy standardowym formacie cegieł 250 x 120 x 65mm oznacza grubości 380mm. W XIX wieku stosowane były cegły o większych wymiarach (patrz Tabela 5.1) i z tego powodu minimalna grubość ścian konstrukcyjnych w kamienicach mieszczańskich wynosi od 400 do 450mm. Ściany w kondygnacjach piwnic lub parteru miały z zasady znacznie większą grubość. Typowy układ ścian w XIX wiecznych budynkach mieszkalnych przedstawiono w tabeli 9.1.

Tabela 9.1 Grubości ścian w XIX wiecznych budynkach mieszkalnych w Krakowie

	1884 ul. Gertrudy	1887 ul. Krowoderska	ostatnie 10-lecie XIX w. ul. Straszewskiego	1936 ul. Pułaskiego
Piwnica	3 c (90)	2,5 c (75)	3 c (90)	2 c (55)
Parter	2,5 c (75)	2 c (60)	2,5 c (75)	2 c (55)
I piętro	2 c (60)	1,5 c (45)	2 c (60)	1,5 c (42)
II piętro	1,5 c (45)	1,5 c (45)	1,5 c (45)	1,5 c (42)
III piętro	1,5 c (45)			1,5 c (42)
Uwagi:				
3c; 2,5c; 2c; 1,5c oznaczają odpowiednio ścianę grubości 3; 2,5; 2; 1,5 cegły				

Jednocześnie stosowano zasadę, aby wysokość ścian w budynkach nie była większa niż dwunastokrotność ich grubości. Z reguły stosunek wysokość ścian w świetle stropów do ich grubości w kondygnacjach parteru i piwnicy, które najbardziej narażone są na silne zawilgocenie, nie przekracza wartości 10. Z tego powodu w dalszej części rozważane będą ściany ceglane o stosunkowo niewielkich smukłościach – z przedziału od 4 do 10.

W typowych rozwiązaniach budynków ceglanych wznoszonych w przeszłości znaczna grubość murów determinowała dominujący udział ciężaru własnego w całości obciążeń przekazywanych na ścianę. Powoduje to, że całkowity mimośród obciążenia w murach niższych kondygnacji ma niewielką wartość. Do dalszych analiz przyjęto, że całkowita

wartość mimośrodowo obciążenia pionowego ( $e$ ) będzie zawierała się w granicach od 0,05t do 0,20t, gdzie t oznaczono grubość ściany.

Rozważane będzie nośność ścian ceglanych z uwagi na obciążenia pionowe – w dalszej części pracy oznaczana jako  $N_{Rd}$ . Obciążenia poziome są traktowane jako drugorzędne - ich udział można uwzględnić w analizie ścian przez zadanie dodatkowego mimośrodowo obciążenia – z tego powodu przyjęto górną granicę stosunku  $e/t$  równą 0,20.

Rozpatrywana będzie sytuacja, w której ściana ceglana uległa silnemu zawilgoceniu (bliskiemu stanowi całkowitego nasycenia wodą) i jej charakterystyki wytrzymałościowe uległy zmianie. Biorąc pod uwagę wyniki zamieszczone w poprzednich rozdziałach pracy przyjęto, że na skutek silnego zawilgocenia wytrzymałość na ściskanie muru będzie stanowić od 0,6 do 1,0 wytrzymałości w stanie powietrzno-suchym, natomiast moduł sprężystości muru w stanie „mokrym” będzie w granicach od 0,5 do 1,0 modułu sprężystości w stanie powietrzno-suchym. Ze zmiany modułów sprężystości murów wynika zmiana cech sprężystości murów w na skutek zawilgocenia w granicach od około 0,8 do 1,1.

## 9.2. Określenie nośności zawilgoconych ścian ceglanych w budynkach istniejących

Nośność ścian murowych obciążonych głównie pionowo określać można z zależności:

$$N_{Rd} = \Phi A f \quad (33)$$

w której:

- $\Phi$  – współczynnik redukcyjny zależny od smukłości ściany, wielkości mimośrodków obciążenia, modułu sprężystości muru oraz ew. pełzania muru,
- $A$  – pole przekroju poprzecznego ściany,
- $f$  – wytrzymałość muru ceglano na ściskanie.

Oznaczając nośność muru w stanie silnie zawilgoconym jako  $N_{Rd}^{(m)}$  zapisać można zależność (33) w postaci:

$$N_{Rd}^{(m)} = \Phi^{(m)} A^{(m)} f^{(m)} \quad (34)$$



Stąd redukcja nośności muru spowodowana jego silnym zawilgoceniem będzie równa:

$$k_N = \frac{N_{Rd}^{(m)}}{N_{Rd}^{(p-s)}} = \frac{\Phi^{(m)}}{\Phi^{(p-s)}} \frac{A^{(m)}}{A^{(p-s)}} \frac{f^{(m)}}{f^{(p-s)}} \quad (35)$$

Ponieważ charakterystyki geometryczne nie ulegają przy zawilgoceniu muru istotnym zmianom wzór (35) zapisać można w postaci:

$$k_N = k_\Phi k_{ma} \quad (36)$$

w której:

$$k_\Phi = \Phi^{(m)} / \Phi^{(p-s)};$$

$$k_{ma} = f^{(m)} / f^{(p-s)}$$

Sposób wyznaczania współczynników redukcyjnych  $\Phi$  podano w nowej wersji normy PN-EN 1996-1-1:2023-08 [88]. Współczynnik redukcyjny można wyznaczać z zależności:

$$\Phi_m = \begin{cases} A_1 - \frac{\lambda^2}{2,58A_1} & \text{gdy } \lambda < 1,14A_1 \\ 0,65 \frac{A_1^3}{\lambda^2} & \text{gdy } \lambda \geq 1,14A_1 \end{cases} \quad (37)$$

w której:

$$A_1 = 1 - 2 \frac{e_m}{t};$$

$$\lambda = \frac{h}{t} \sqrt{\frac{f}{E}}$$

$h, t$  – odpowiednio wysokość i grubość ściany

Zmiana wartości współczynnika redukcyjnego  $\Phi$  w stanie „mokrym” wynika ze zmiany cechy sprężystości muru na skutek jego zawilgocenia.

W tabeli 9.2 przedstawiono wartości  $k_\Phi$  dla przedziału wartości cechy sprężystości muru 250 – 750.

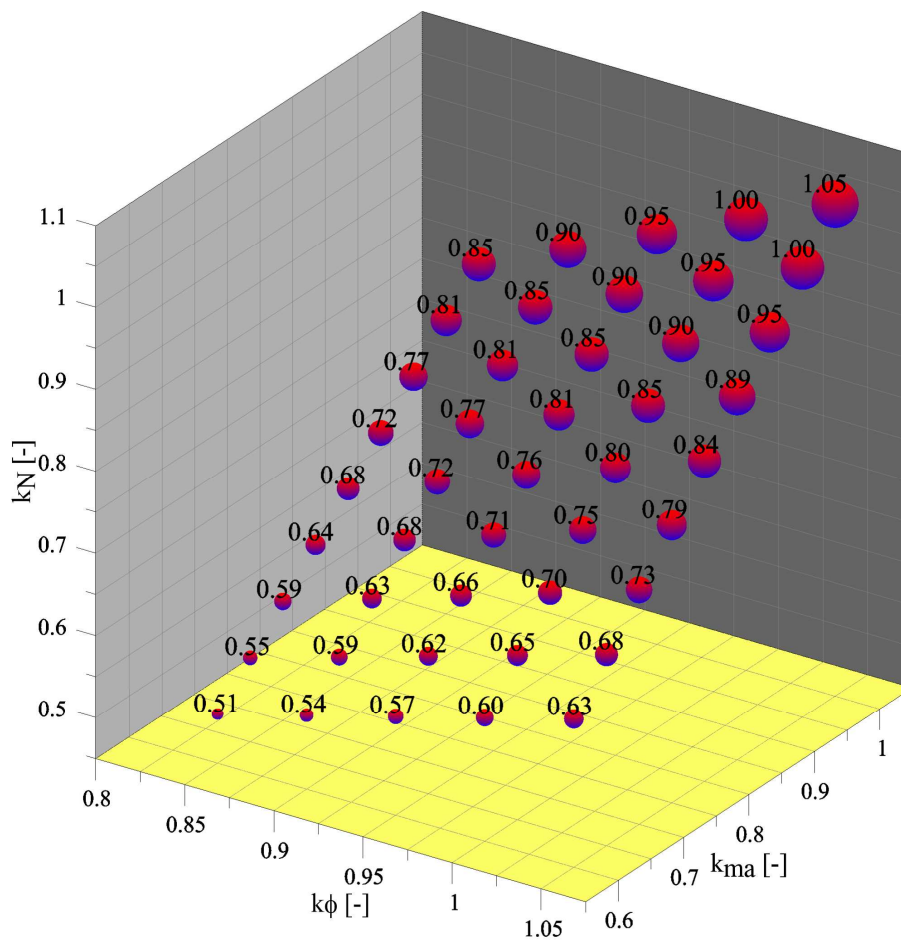
Tabela 9.2 Wartości współczynnika  $k_{\phi}$ 

$k_{\alpha}$	$h/t=4$		$h/t=10$	
	$e/t=0,05$	$e/t=0,20$	$e/t=0,05$	$e/t=0,20$
$\alpha^{(p-s)} = 250$				
0,80	0,99	0,98	0,94	0,82
0,85	0,99	0,99	0,96	0,87
0,90	1,00	0,99	0,97	0,92
0,95	1,00	1,00	0,99	0,96
1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1,05	1,00	1,00	1,01	1,04
1,10	1,00	1,01	1,02	1,07
$\alpha^{(p-s)} = 500$				
0,80	1,00	0,99	0,97	0,93
0,85	1,00	0,99	0,98	0,95
0,90	1,00	1,00	0,99	0,97
0,95	1,00	1,00	0,99	0,99
1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1,05	1,00	1,00	1,01	1,01
1,10	1,00	1,00	1,01	1,02
$\alpha^{(p-s)} = 750$				
0,80	1,00	0,99	0,98	0,96
0,85	1,00	1,00	0,99	0,97
0,90	1,00	1,00	0,99	0,98
0,95	1,00	1,00	1,00	0,99
1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1,05	1,00	1,00	1,00	1,01
1,10	1,00	1,00	1,01	1,02

Wartości współczynnika  $k_{\phi}$  zawierają się w granicach od 0,82 do 1,05. Wynika stąd, że w ścianach ceglanych wpływ silnego zawilgocenia na efekty reprezentowane przez współczynnik redukcyjny  $\Phi_m$  nie przekracza 18%. W ścianach krępych, których smukłość nie przekracza 6 efekt ten będzie zanedbywalnie mały (nie większy od 5%). Łączny efekt silnego zawilgocenia na nośność ścian ceglanych, określony ze wzoru (36), podano w tabeli 9.3 i przedstawiono na rysunku 9.1.

Tabela 9.3 Zmiana nośności murów ceglanych na skutek ich silnego zawilgocenia (wyrażona współczynnikiem  $k_N$ )

$k_{ma}$ [-]	$k_\phi$ [-]				
	0,85	0,90	0,95	1,00	1,05
0,60	0,51	0,54	0,57	0,60	0,63
0,65	0,55	0,59	0,62	0,65	0,68
0,70	0,60	0,63	0,67	0,70	0,74
0,75	0,64	0,68	0,71	0,75	0,79
0,80	0,68	0,72	0,76	0,80	0,84
0,85	0,72	0,77	0,81	0,85	0,89
0,90	0,77	0,81	0,86	0,90	0,95
0,95	0,81	0,86	0,90	0,95	1,00
1,00	0,85	0,90	0,95	1,00	1,05



Rys. 9.1 Efekt silnego zawilgocenia na nośność ścian ceglanych (wyrażony współczynnikiem  $k_N$ )

W skrajnych przypadkach redukcja nośności ścian ceglanych może wynosić nawet 49%. Efekt silnego zawilgocenia na nośność ścian ceglanych nie może być więc pomijany w wielu przypadkach analizowanych konstrukcji. Dotyczy to przede wszystkim murów na słabych zaprawach wapiennych, w których należy się spodziewać największej redukcji wytrzymałości murów.

W murach krępych, często występujących w konstrukcji budynków historycznych, efekty II rzędu mogą być zaniedbane. Redukcja nośności takich murów wynika przede wszystkim z redukcji wytrzymałości na ściskanie, którą można oszacować z zależności podanych w rozdziałach 5 i 8 na podstawie badań cegieł i zaprawy. Można również redukcję wytrzymałości na ściskanie muru określić na podstawie badań próbek muru wyciętych z konstrukcji (patrz rozdział 6 i 7). Należy zaznaczyć, że ze względu specyfikę konstrukcji ceglanych w budynkach historycznych, badania, o których mowa powyżej, powinny być uzupełnione testami in situ umożliwiającymi ocenę stopnia niejednorodności analizowanej konstrukcji - także w aspekcie rozkładu wilgotności.

## 10. Podsumowanie

### 10.1. Podsumowanie badań i analiz

W niniejszej pracy na podstawie studiów literatury przedmiotu zebrano i przeanalizowano wyniki dotychczasowych badań doświadczalnych wpływu silnego zawilgocenia na wytrzymałość na ściskanie i odkształcalność konstrukcji ceglanych. Niniejsza praca stanowi w tym zakresie podsumowanie nielicznych wyników badań doświadczalnych dostępnych w literaturze przedmiotu.

Celem rozszerzenia i uzupełnienia bazy dotychczasowych badań, autor dysertacji przeprowadził badania własne na materiałach murowych oraz próbkach muru pobranych z istniejących konstrukcji oraz porównawczo na materiałach murowych współcześnie produkowanych i wykorzystywanych do wznoszenia konstrukcji. Badaniom poddano cegły i zaprawy oraz mury z różnych okresów historycznych. Dotychczas badań doświadczalnych w tak szerokim zakresie na oryginalnych materiałach historycznych nie przeprowadzono. Ze względu na specyfikę konstrukcji ceglanych wznoszonych w przeszłości, które zdecydowanie różnią się od realizowanych obecnie badania tego typu mają podstawowe znaczenie w analizach obiektów historycznych. Specyfika konstrukcji historycznych polega na odmiennych właściwościach materiałów murowych wykonywanych w przeszłości oraz na odmiennych sposobach realizacji konstrukcji. Należy również podkreślić, że pozyskane w trakcie prac eksperckich materiały sprzed kilkudziesięciu czy kilkuset lat zawierały także historię oddziaływań środowiskowych czego brak materiałom murowym produkowanym współcześnie i kierowanym do testów laboratoryjnych.

Zbadano szeroki zakres cegieł ceramicznych różniących się wymiarami, masą, wytrzymałością na ściskanie oraz parametrami charakteryzującymi strukturę ceramiki. Badaniom poddano cegły pochodzące z okresu od przełomu XIV i XV wieku (cegły palcówki) do XXI wieku (cegły współczesne). Badano więc cegły, których sposób wytwarzania na przestrzeni wieków różnił się zdecydowanie. Zaproponowano zależności pomiędzy spadkiem wytrzymałości cegieł spowodowanym ich silnym zawilgoceniem, a ich gęstością pozorną, nasiąkliwością i porowatością. Podobne analizy przeprowadzono dla zapraw stosowanych w murach ceglanych. Jak wykazano w pracy zależności takie mogą mieć praktyczne znaczenie przy ocenie wytrzymałości murów ceglanych znajdujących się w stanie

nasycenia wodą - umożliwiając bowiem oszacowanie ich wytrzymałości na ściskanie na podstawie badań niewielkich próbek cegieł i zapraw pobranych z konstrukcji ceglanej.

Podjęto również próbę zastosowania metod nieniszczących do oceny wpływu zawilgocenia na parametry cegieł ceramicznych. Badano cegły, ponieważ parametry wytrzymałościowe cegieł mają zdecydowanie większy wpływ na wytrzymałość murów niż parametry zapraw. Ze względu na dość ograniczony zakres badań traktować je należy jako pilotażowe. Zastosowano metodę ultradźwiękowa oraz badania twardości powierzchniowej cegieł. Uzyskano efekt wpływu silnego zawilgocenia ceramiki na twardość powierzchniową cegieł. Natomiast wyniki badań ultradźwiękowych nie dały jednoznacznych rezultatów – większe prędkości fal dla cegieł w stanie mokrym uzyskano jedynie dla pomiarów metodą pośrednią na oryginalnych główkowych powierzchniach cegieł. Testy te umożliwiły wyciągnięcie wniosków, co do kierunków dalszych badań w tym zakresie.

Badania filarów murowych wyciętych z konstrukcji istniejącej, przeprowadzone przez autora, pokazały spadek wytrzymałości na ściskanie oraz wzrost odkształcalności murów w stanie silnego zawilgocenia. Spadek wytrzymałości badanych murów historycznych wynosił od kilku do ponad 40%. Łącznie zbadano 10 filarów murowych pobranych z konstrukcji ceglanej wzniesionej ponad 120 lat temu. Sezonowanie filarów do stanu mokrego realizowano różnymi sposobami, co pozwoliło na wyciągnięcie wniosków na temat skuteczności tych metod. Obie zastosowane metody sezonowania murów do stanu mokrego dały zbliżony efekt w zakresie nasycenia materiału wodą.

Spadek wytrzymałości murów ceglanych uzyskano również w badaniach na próbkach rdzeniowych muru o średnicy 100mm wyciętych z istniejącej konstrukcji historycznej. Metodę badań na próbkach rdzeniowych muru o średnicy 100mm można zaliczyć do metod małoniszczących czyli takich jakie są zalecane z uwagi na wymagania konserwatorskie.

Przeprowadzone badania doświadczalne oraz analizy obliczeniowe pozwoliły na zaproponowanie zależności mogących służyć w praktyce do oceny nośności murów ceglanych znajdujących się w stanie silnego zawilgocenia. Zaproponowane zależności mogą być wykorzystywane do prognozowania efektów silnego nasycenia murów wodą, które może wystąpić w sytuacjach wyjątkowych na przykład na skutek powodzi.

## 10.2. Weryfikacja tez pracy

### Teza I

Wyniki przeprowadzonych badań i analiz obliczeniowych w pełni potwierdziły tezę pierwszą - wykazano, że redukcja wytrzymałości na ściskanie murów ceglanych na skutek ich silnego zawilgocenia (w stanie nasycenia wodą) może wynosić nawet 40%, natomiast redukcja nośności ścian może dochodzić do 50%. Badania wykazały również, że zmianie na skutek silnego zawilgocenia muru ulegają parametry charakteryzujące jego odkształcalność. Redukcja wytrzymałości na ściskanie murów i co za tym idzie nośności ścian ceglanych, spowodowana ich silnym zawilgoceniem, zależy od wielu czynników związanych z właściwościami cegieł i zapraw oraz strukturą murów.

### Teza II

W badaniach wytrzymałościowych cegieł pochodzących z różnych okresów historycznych uzyskano w 7 przypadkach na 8 spadek ich wytrzymałości na ściskanie w stanie silnie zawilgoconym w stosunku do wytrzymałości na ściskanie w stanie powietrzno-suchym - maksymalny spadek wytrzymałości wynosił 20%. W badaniach cegieł uzyskano również bardzo dobrą korelację pomiędzy spadkiem wytrzymałości na ściskanie cegieł na skutek ich silnego zawilgocenia, a parametrami charakteryzującymi strukturę ceramiki – najlepszą korelację uzyskano pomiędzy spadkiem wytrzymałości a porowatością cegieł. Wskazuje to, że ocenę wpływu silnego zawilgocenia na wytrzymałość cegieł można prowadzić na stosunkowo niewielkich próbkach pobranych z murów co znakomicie ogranicza uszkodzenia konstrukcji historycznych spowodowane koniecznością pobrania próbek do badań.

Spadki wytrzymałości na ściskanie na skutek silnego zawilgocenia stwierdzono również w badaniach wszystkich rodzajów zapraw – największy spadek wytrzymałości był równy 43%. Natomiast korelacje pomiędzy spadkiem wytrzymałości na ściskanie zapraw w stanie „mokrym” a parametrami takimi jak gęstość pozorna, porowatość, nasiąkliwość, czy struktura porowatości zapraw okazały się nieco gorsze niż w przypadku cegieł. W związku z tym prognozowanie redukcji wytrzymałości zapraw w stanie silnego zawilgocenia w oparciu o te parametry może być obarczone większym błędem. Teza druga znalazła więc niepełne potwierdzenie. W przypadku zapraw ocena spadku wytrzymałości wskutek silnego zawilgocenia powinna opierać się wprost na badaniach wytrzymałościowych fragmentów spoin wyciętych z konstrukcji.



W badaniach uzyskano zależności pomiędzy wytrzymałościami na ściskanie cegieł i zapraw w stanie powietrzno-suchym a ich wytrzymałością w stanie „mokrym”, co pozwala na prognozowanie spadków wytrzymałości materiałów murowych w sytuacjach ich silnego zawilgocenia.

Na podstawie badań cegieł i zapraw w stanie mokrym można oszacować wytrzymałość na ściskanie muru. Zaproponowane w pracy zależności pozwalają na oszacowania wytrzymałości muru w stanie mokrym z dokładnością  $\pm 13\%$ . Poziomą dokładność oszacowania spowodowany jest wpływem innych czynników determinujących wytrzymałość na ściskanie murów, które są związane przede wszystkim ze sposobem i jakością wykonania konstrukcji murowej.

### Teza III

W badaniach nieniszczących cegieł zastosowano metodę ultradźwiękową oraz pomiar twardości powierzchniowej cegieł. Wyraźny wzrost prędkości fal ultradźwiękowych o około 20% uzyskano jedynie w badaniach metodą pośrednią na główkowych powierzchniach cegieł – w pozostałych przypadkach różnice w prędkościach fal ultradźwiękowych w ceglach w stanie powietrzno-suchym i „mokrym” nie przekraczały 5%.

Badania wykazały natomiast jednoznacznie wpływ silnego zawilgocenia cegieł na ich twardość powierzchniową. Spadek twardości powierzchniowej badanych cegieł w stanie „mokrym” wyniósł średnio 15%. Wskazuje to na możliwość zastosowania metod opartych na pomiarze twardości powierzchniowej cegieł w ocenie wpływu zawilgocenia na ich wytrzymałość na ściskanie.

Badania cegieł metodami nieniszczącymi przeprowadzono jedynie w laboratorium (brak badań in situ). Z uwagi na ten fakt oraz ograniczony materiałowo zakres badań cegieł należy uznać, że teza III została potwierdzona jedynie częściowo.

### **10.3. Kierunki dalszych prac badawczych**

Studia literaturowe oraz wyniki badań własnych i ich analiza pozwalają na sformułowanie kierunków prac badawczych, które powinny być, zdaniem autora, prowadzone w przyszłości w zakresie wpływu silnego zawilgocenia na nośność i odkształcalność murów ceglanych:

- rozszerzenie bazy wyników badań wytrzymałościowych murów w stanie „mokrym” szczególnie w zakresie murów na słabych zaprawach wapiennych oraz murów

charakteryzujących się niską jakością wykonania, celem weryfikacji zależności podanych w niniejszej pracy,

- badania in situ ścian ceglanych w stanie „mokrym” pod kątem zastosowania metod nieniszczących do oceny wpływu zawilgocenia na wytrzymałość materiałów murowych i murów - badania pilotażowe przedstawione w niniejszej pracy wskazały na przydatność metod opartych na pomiarze twardości powierzchniowej cegieł,
- badania materiałów murowych na małych próbkach pobranych z konstrukcji ceglanych z wykorzystaniem współczesnych metod pomiarowych – na przykład badania pod mikroskopem elektronowym celem określenia dodatkowych parametrów mogących mieć wpływ na zachowanie materiałów murowych pod obciążeniem w stanie silnego zawilgocenia,
- opracowanie modeli murów w skali mikro (na poziomie struktury cegły / spoiny) pozwalających na śledzenie zmian naprężeń i odkształceń w murze spowodowanych zmianą charakterystyk materiałowych komponentów muru oraz zmianą charakterystyk ich połączeń, a także badania parametrów koniecznych do analizy muru z wykorzystaniem opracowanych modeli teoretycznych.

## Bibliografia

- 1 Abdrahaman A. *Dynamika podciągania kapilarnego w murach budowlanych*. Przegląd Budowlany 9/2010, str. 46-48.
- 2 Adamowski J., Matkowski Z. *Problemy zawilgocenia oraz osuszania budynków po powodzi*. Materiały budowlane 7/2010, str. 98-102.
- 3 Amade A.M., Martin J.V., Colville J. *The effect of moisture on compressive strength and modulus of brick masonry*. International Brick and Block Masonry Conference Amsterdam, 2004.
- 4 Atkinson R.H., Noland J.L., Kingsley G.R. *Application of NDE to Masonry Structures*. Conservation of Historic Brick Structures, Donhead Publishing Ltd, 1998.
- 5 Awgustinik A. J. *Ceramika*. Arkady, Warszawa 1980.
- 6 Baker Ira Osborn. *A Treatise on Masonry Construction*. John Wiley & Sons, New York, 1909.
- 7 Bielański A. K. *Materiały do historii powodzi w dorzeczu Górnej Wisły*. Politechnika Krakowska, 1997.
- 8 Biernat K., Hoła J., Matkowski Z., Schabowicz K. *Tomograficzna metoda oceny stopnia zawilgocenia murów ceglanych*. Problemy remontowe w budownictwie ogólnym i obiektach zabytkowych, DWE, 2006, str. 192-199.
- 9 Bilello C., Brencich A., Di Paola M., Sterpi E. *Compressive Strength of Solid Clay Brickwork: Calibration of Experimental Tests*. Proc. of 7th International Masonry Conference, London 2006.
- 10 Bilko P. *Analiza numeryczna mechanizmów niszczenia w ścianach murowych*. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska 2013.
- 11 Binda L. *Learning from failure – Long-term behaviour of heavy masonry structures*. WIT Press, Southampton, Boston 2008.
- 12 Bompa D.V., Elghazouli A.Y. *Compressive behaviour of fired-clay brick and lime mortar masonry components in dry and wet conditions*. Materials and Structures 53-60/2020, str. 1 -21.
- 13 Borozovsky J., Zach J. *Non-destructive testing of solid brick compression strength in structures*. IV Conferencia Panamericana de END Buenos Aires – October 2007, <http://www.ndt.net/article/panndt2007/papers/1.pdf>.
- 14 Bouška P., Klečka T., Pume D. *Experimental Investigation of load bearing capacity of wet masonry*. XLIX Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Łądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB “Krynica 2003”, str. 125-130.
- 15 Cultrone G., Sebastian E., Elert K., de la Torre M.J., Cazalla O., Rodriguez-Navarro C. *Influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks*. J. Eur. Ceram. Soc. 24/2004, str. 547–564.
- 16 Dieriagin B. V. *A theory of interaction of particles in presence of elastic double layers*.

- Acta Phys.-Cim. SSSR, vol. 10.3/1939, str. 333-346.
- 17 DIN 18555-9:1999. *Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln – Teil 9, Festmörtel: Bestimmung der Fugendruckfestigkeit*. DIN. Berlin 1999.
  - 18 Dormany A., Orban Z. *The relationship between compressive strength and sonic velocity depending on moisture content in case of historical masonry*. Acta Technica Jaurinensis vol. 16 no. 2, 2023, str. 75-82.
  - 19 Drdácký M. *Non-standard testing of mechanical characteristics of historic mortars*. International Journal of Architectural Heritage, (2011) 5, str. 383-394.
  - 20 Drobiec Ł. *Analiza murów z cegły pełnej ze zbrojeniem w spoinach wspornych*. Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska 2004.
  - 21 Drobiec Ł., Šlivinskas T. *Wyznaczenie powierzchni zniszczenia zaprawy i cegły na podstawie badań w złożonym stanie naprężenia*. Materiały Budowlane 12/2016, str. 22-24.
  - 22 EN 1996-1-1. *Eurocode 6: Design of masonry structures - Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures*.
  - 23 Fernandes F.M., Lourenco P.B., Castro F. *Ancient clay bricks: manufacture and properties*. In: Bostenaru Dan M; Prikryl R; Török Á. *Materials, Technologies and Practice. Historic Heritage Structures*, Springer 2010, str. 29-48.
  - 24 Foraboschi P., Vanin A. *Experimental investigation on bricks from historical Venetian buildings subjected to moisture and salt crystallization*. Engineering Failure Analysis, 45 /2014, str. 185–203.
  - 25 Franzoni E., Gentilini C., Graziani G., Bandini S. *Compressive behaviour of brick masonry triplets in wet and dry conditions*. Construction and Building Materials 82, May 2015, str. 45-52.
  - 26 Frössel F. *Osuszanie murów i renowacja piwnic*. Wydawnictwo Polcen. Warszawa 2007.
  - 27 Gentilini C., Franzoni E., Graziani G., Bandini S. *Mechanical properties of fired-clay brick masonry models in moist and dry conditions*. Key Engineering Materials 624/2015, str. 307-312.
  - 28 Hall C., Hoff W. D. *Water transport in brick, stone and concrete*. London, New York, 2002.
  - 29 Henzel J., Karl S. *Determination of strength of mortar in the joints of masonry by compression tests on small specimens*. Darmstadt Concrete (1987), str. 123 – 136.
  - 30 Hilsdorf H. *Investigation into the failure mechanism of brick masonry loaded in axial compression*. Proceedings of International Conference on Masonry Structural Systems, Texas, 1967.
  - 31 Hilsdorf H. *Untersuchungen über die Grundlagen der Mauerwerkfestigkeit*. Bericht nr. 40, Materialprüfungsamt für das Bauwesen der Technischen Hochschule München, 1965.
  - 32 Hoła A. *The moisture condition of the brick walls in the basements of a medieval monastery*. MATEC Web of Conferences 174, 01012 (2018).
  - 33 Hoła J. *Degradacja budynków zabytkowych wskutek nadmiernego zawilgocenia –*

- wybrane problemy. *Budownictwo i Architektura* 17(1), 2018, str. 133–148.
- 34 Hoła J., Gorzelańczyk T., Matkowski Z. *Badania wilgotnościowe murów ceglanych budynku dworca kolejowego*. *Materiały Budowlane* 3/2011, str. 35-36.
  - 35 Hoła J., Matkowski Z. *Przyczyny i skutki nadmiernego zawilgocenia murów ceglanych na przykładzie obiektów zabytkowych*. *Materiały Budowlane* 03/2009, str. 14-17.
  - 36 Hoła J., Matkowski Z. *Wybrane problemy dotyczące zabezpieczeń przeciwwilgociowych ścian w istniejących obiektach murowanych*. XXIV Konferencja Naukowo – Techniczna Awarie Budowlane, Szczecin-Międzyzdroje, 26-29 maja 2009, str. 73-92.
  - 37 Hoła J., Matkowski Z., Hoła A. *Ocena stanu wilgotnościowego murów i sklepień po akcji gaśniczej w zabytkowym kościele p.w. św. Katarzyny w Gdańsku*. *Czasopismo Techniczne Politechniki Krakowskiej z. 2-B/2009*, str. 131-138.
  - 38 Hoła J., Matkowski Z., Schabowicz K. *Tomografia impedancyjna w badaniach zawilgoconych murów ceglanych*. *Czasopismo Techniczne Politechniki Krakowskiej*, 1-B/2007, str. 73-81.
  - 39 Hoła J., Schabowicz K. *Diagnostyka obiektów budowlanych*. *Materiały Budowlane* 5/2015, str. 3-7.
  - 40 Janczykowski J. *Atlas Twierdzy Kraków - Koszary Arcyksięcia Rudolfa, Seria 1, Tom 6*. Urząd Miasta Krakowa. Oddz. Ochrony Zabytków, Kraków, 1996.
  - 41 Janiszewska-Kuropatwa E. *Obiekty budowlane po powodzi*. 56 Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Kielce-Krynica 2010, str. 207-214.
  - 42 Jasieńko J., Matkowski Z. *Zasolenie i zawilgocenie murów ceglanych w obiektach zabytkowych – diagnostyka, metodyka badań, techniki rehabilitacji*. *Wiadomości Konserwatorskie* 14/2003, str. 43-48.
  - 43 Kaczmarczyk S., Rawicki Z. *Zagadnienia materiałowe w rewaloryzacji budowli zabytkowych*. V Konferencja Naukowo-Techniczna REW-INŻ. 2000, str. 127-139.
  - 44 Karyś J. *Pomiary wilgoci w budynkach po powodzi*. *Materiały Budowlane* 07/2010, str. 94-96.
  - 45 Karyś J., Zwierzyński K. *Specyfika pomiaru wilgotności przegród metodami elektrycznymi*. *Materiały Budowlane* 10/2006, str. 60-61.
  - 46 Khoo C. L., Hendry A. W. *Biaxial compression - tension strength tests on clay pipes*. The British Ceramic Research Association Note 180/1972.
  - 47 Koniorczyk M. *Transport i krystalizacja soli w materiałach budowlanych*. Politechnika Łódzka, Zeszyt naukowy Nr 1150, Łódź 2013.
  - 48 Kubik J. *Przepływy wilgoci w materiałach budowlanych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole, 2000.
  - 49 Kubik J. *Trwałość zabytków*. Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN – Sekcja Fizyki Budowli, Łódź, 2006.
  - 50 Kubik J., Kucharczyk A. *Ocena zawilgocenia kościoła Franciszkanów w Opolu*. *Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce*, Tom III, 2008.
  - 51 Kubik J., Perkowski Z. *Narastanie uszkodzeń w materiałach porowatych*. *Studia*

- i Monografie, z.178, OW Politechniki Opolskiej, Opole, 2005.
- 52 Kubik J., Perkowski Z. *Spadek wytrzymałości materiałów kapilarno-porowatych w wyniku efektu Rebindera*. L Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Tom 2, Krynica-Warszawa 2004, str. 101-108.
  - 53 Ligęza W., Matysek P., Płachecki M. *Analiza przyczyn katastrofy ściany nośnej przy adaptacji zabytkowego obiektu przemysłowego*. Przegląd Budowlany, 12/2009, str. 37.
  - 54 Lourenco P.B. *Computational strategies for masonry structures*. PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft university Press, The Netherlands, 1996.
  - 55 Łątka D., Matysek P. *Assessment of the compressive strength of lime mortar in the joints of brick walls-case study*. MATEC Web of Conferences 163/2018.
  - 56 Łątka D., Matysek P. *Determination of Mortar Strength in Historical Brick Masonry Using the Penetrometer Test and Double Punch Test*. Materials 2020 13(12).
  - 57 Łątka D., Seręga S., Matysek P. *Estimation of mortar compressive strength based on specimens extracted from masonry bed joints*. In: R. Aguilar et al. (Eds.): Structural Analysis of Historical Constructions. RILEM Bookseries 18 (2019).
  - 58 Małyszko L. *Modelowanie zniszczenia w konstrukcjach murowych z uwzględnieniem anizotropii*. Rozprawa habilitacyjna, Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego, Olsztyn 2005.
  - 59 Martins T., Fernández J., Varum H. *Influence of Moisture on the Mechanical Properties of Load-Bearing Adobe Masonry Walls*. International Journal of Architectural Heritage, 2018.
  - 60 Matysek P. *Compressive strength of brick masonry in existing buildings – research on samples cut from the structures*. Proc. of the 16th International Brick Block Masonry Conference, Padwa, 2016.
  - 61 Matysek P. *Identyfikacja wytrzymałości na ściskanie i odkształcalności murów ceglanych w obiektach istniejących*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2014.
  - 62 Matysek P. *Ocena wytrzymałości murów na podstawie badań próbek cegieł i zapraw pobranych z konstrukcji*. Materiały Budowlane 12/2023, str. 2-5.
  - 63 Matysek P. *Uwagi o szacowaniu wytrzymałości na ściskanie murów zabytkowych na podstawie wytrzymałości cegieł i zaprawy*. Materiały Budowlane 9/2010, str. 44-45.
  - 64 Matysek P. *Wytrzymałość na ściskanie murów w istniejących budynkach – ocena na podstawie badań próbek rdzeniowych*. Materiały Budowlane 10/2015, str. 124-126.
  - 65 Matysek P., Seręga S. *Assessment of brick masonry strength using tests on core samples cut from the structures*. Proc. of the 17th International Brick/Block Masonry Conference, Kraków, 2020.
  - 66 Matysek P., Seręga S., Kańka S. *Determination of the mortar strength using double punch testing*. Procedia Engineering. (2017) 193, str. 104 – 111.
  - 67 Matysek P., Stryzewska T., Kańka S. *Experimental research of masonry compressive strength in the Auschwitz II - Birkenau former death camp buildings*. Engineering Failure Analysis, Volume 68, October 2016, str. 263-274.

- 68 Matysek P., Stryzewska T., Kańka S., Witkowski M. *The influence of water saturation on mechanical properties of ceramic bricks – tests on 19th-century and contemporary bricks*. *Materiales de Construcción*. Vol. 66, Iss. 323 (2016).
- 69 Matysek P., Witkowski M. *A comparative study on the compressive strength of bricks from different historical periods*. *International Journal of Architectural Heritage Conservation, Analysis and Restoration*. Volume 10, Issue 4, 2016.
- 70 Matysek P., Witkowski M. *Badania porównawcze wytrzymałości na ściskanie cegieł ceramicznych*. *Inżynieria i Budownictwo* 11/2011, str. 618-621.
- 71 Matysek P., Witkowski M. *Badania wytrzymałości i odkształcalności XIX-wiecznych murów ceglanych*. *Materiały XXVI Konferencji Naukowo-Technicznej Awarie Budowlane, Szczecin-Międzyzdroje 2013*, str. 183-190.
- 72 Matysek P., Witkowski M. *Compressive tests of historical brick masonry – case study of the Archduke Rudolf Caserns buildings in Cracow*. *International Journal of Architectural Heritage : Conservation, Analysis, and Restoration*, 2019.
- 73 Matysek P., Witkowski M. *Wytrzymałość na ściskanie XIX murów ceglanych*. *Materiały Budowlane* 04/2014, str. 103-104.
- 74 Middendorf B., Hughes J. J., Callebaut K., Baronio G., Papayianni I. *Investigative methods for the characterisation of historic mortars—Part 1: Mineralogical characterisation*. *Materials and Structures* 38/2005, str. 761-769.
- 75 Middendorf B. *Physico-mechanical and microstructural characteristics of historic and restoration mortars based on gypsum: Current knowledge and perspective*. *Geological Society London Special Publications*, 01/2002, str. 165-176.
- 76 Mleczek F. *"High water marks" - projekt kartowania znaków wielkiej wody w OpenStreetMap*. Praca Magisterska wykonana pod kierunkiem dr inż. Roberta Szczepanka. Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kosciuszki, 2016.
- 77 Nagarajan T., Viswanathan S., Ravi S., Srinivas V., Narayanan P. *Experimental approach to investigate the behaviour of brick masonry for different mortar ratios*. *International Conference on Advances in Engineering and Technology (ICAET'2014)*, Singapore, 29-30 March 2014.
- 78 Neville A.M. *Properties of concrete*. London: Pitman Publishing (1973).
- 79 Pelà L., Benedetti A., Marastoni D. *Interpretation of experimental tests on small specimens of historical mortars*. *Structural Analysis of Historical Constructions - Jerzy Jasieńko (ed.)*, 2012 DWE, Wrocław, Poland, str. 716-723.
- 80 Perkowski Z. *Ocena nośności zbrojonych beleczek z zaprawy cementowej w różnych stanach zawilgocenia*. *Roczniki Inżynierii Budowlanej – zeszyt 7/2007*. Komisja Inżynierii Budowlanej Oddział Polskiej Akademii Nauk w Katowicach.
- 81 Perkowski Z. *Oslabienie wytrzymałości materiałów kapilarno-porowatych w wyniku zawilgocenia*. *Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Budownictwo* z. 101, 2003, str. 311-318.
- 82 Pihlajavaara S.E. *On the interrelation of the moisture content and the strength of mature concrete, and its reversibility*. The State Institute for Technical Research. Helsinki, 1964.

- 83 Płoński W. *Problemy wilgoci w przegrodach budowlanych*. Arkady, Warszawa, 1968.
- 84 PN-B-03002:2007. *Konstrukcje murowe - Projektowanie i obliczanie*.
- 85 PN-EN 1015-11:2001. *Metody badań zapraw do murów -- Część 11: Określenie wytrzymałości na zginanie i ściskanie stwardniałej zaprawy*.
- 86 PN-EN 1052-1:2000. *Metody badań murów - Określenie wytrzymałości na ściskanie*.
- 87 PN-EN 1996-1-1:2010. *Eurokod 6 - Projektowanie konstrukcji murowych - Część 1-1: Reguły ogólne dla zbrojonych i niezbrojonych konstrukcji murowych*.
- 88 PN-EN 1996-1-1:2023-08. *Eurokod 6 - Projektowanie konstrukcji murowych - Część 1-1: Reguły ogólne dla zbrojonych i niezbrojonych konstrukcji murowych*.
- 89 PN-EN 772-1:2011. *Metody badań elementów murowych. Część 1: Określanie wytrzymałości na ściskanie*. 2011.
- 90 Probst P. *Ein Beitrag zum Bruchmechanismus von zentrisch gedrückttem Mauerwerk*. Dissertation, Technische Universität München, 1981.
- 91 Runkiewicz L., Rodzik W. *Badania nieniszczące wytrzymałości murowanych obiektów zabytkowych*. *Inżynieria i Budownictwo* 2/1990, str. 50-52.
- 92 Rutkowska G., Kijanka P. *Analiza porównawcza wybranych cech technicznych cegieł pełnych na przykładach budynków jednorodzinnych*. *Acta Scientiarum Polonorum, Architectura* 9(2)/2010, str. 35-44.
- 93 Sahlin S. *Structural masonry*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 1971.
- 94 Sathiparan N., Rumeskumar U. *Effect of moisture condition on mechanical behavior of low strength brick masonry*. *Journal of Building Engineering* 17/2018, str. 23 – 31.
- 95 Schubert P., Schmidt St. *Zum Einfluss des Feuchtegehaltes von Mauersteinen (Influence of the moisture content of the masonry units on their compressive strength)*. *Kurzbericht / Institut für Bauforschung Aachen (IBAC), Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH), 2 (1989), Nr. 12*.
- 96 Segura J., Pela L., Roca P., Cabane A. *Experimental analysis of the size effect on the compressive behaviour of cylindrical samples core-drilled from existing brick masonry*. *Construction and Building Materials*, Vol. 228, 2019.
- 97 Stawiska N., Stawiski B. *Rewaloryzacja murów w obiektach zabytkowych*. *Wiadomości Konserwatorskie* 18/2005, str. 18-22.
- 98 Stawiski B. *Ultradźwiękowe badania betonów i zapraw głowicami punktowymi*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2009.
- 99 Stryszewska T. *Charakterystyka czynników determinujących trwałość murów ceglanych*. *Monografie Politechniki Krakowskiej, Seria Inżynieria Lądowa*, Kraków 2017.
- 100 Stryszewska T. *Wpływ pełnego nasycenia wodą na wybrane właściwości fizyko - mechaniczne cegły ceramicznej*. *Materiały Ceramiczne* T. 66, nr. 1, (2014), str. 81-87.
- 101 Stryszewska T., Kańka S. *Characterization of factors determining the durability of brick masonry*. *Brick and Block Masonry - From Historical to Sustainable Masonry*. *Proceedings of the 17th International Brick/Block Masonry Conference (17thIB2MaC 2020)*, Kraków, Poland, 5-8 July 2020.



- 102 Stryszewska T., Kańska S. *Woda jako główny czynnik procesów degradacji cegły ceramicznej*. Materiały Budowlane 9/2022, str. 80-83.
- 103 Suchorab Z. *Pomiary terenowe wilgotności murów z wykorzystaniem powierzchniowych sond TDR*. Materiały Budowlane 04/2011, str. 22-24.
- 104 Suchorab Z., Pavlík Z., Černý R. *Zastosowanie techniki pomiarowej TDR w badaniach terenowych przy wykorzystaniu sond powierzchniowych*. Budownictwo i Architektura 8 (2011), str. 97-106.
- 105 Tkacz P. *Ocena wytrzymałości na ściskanie konstrukcji murowych z uwzględnieniem badań in situ*. Rozprawa doktorska, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, 2015.
- 106 Trochonowicz M. *Wilgoć w obiektach budowlanych. Problematyka badań wilgotnościowych*. Budownictwo i Architektura 7 (2010), str. 131-144.
- 107 UIC 778-3R. *Recommendations for the inspection, assessment and maintenance of masonry arch bridges. Final draft*. International Union of Railways, 2008.
- 108 Visser H., Gervais A. *Measuring Moisture Content in the Gothic Brick Masonry of the Lübecker Ratsbierkeller. Comparison of Neutron, Radar, Microwave, and Gravimetric Methods*. Conservation of Historic Brick Structures. Edited by Baer N., Fitz S., Livingstone R.A., Donhead, 1998, str.381-392.
- 109 Witzany J., Cejka T., Zigler R. *The effect of moisture on significant mechanical characteristics of masonry*. Engineering Structures And Technologies 2010, 2(3): str. 79-85.
- 110 Wojciechowski W., współpraca: Solak P., Banaś B., Dzierżak A. *Raport po powodzi z maja i czerwca 2010r.* Urząd Miasta Krakowa, Kraków, 2010.
- 111 Wojciechowski W. *Taki Kraków - Tablice powodziowe*. Broszura edukacyjna. Referat Ochrony Przed Powodzią. Wydział Bezpieczeństwa Zarządzania Kryzysowego Urzędu Miasta Krakowa. Wydanie III poprawione.
- 112 Wójcik R. *Pomiary wilgotności przegród budowlanych*. Materiały Budowlane 08/2002, str. 42-43.
- 113 Wyrwał J. *Ruch wilgoci w porowatych materiałach i przegrodach budowlanych*. Komitet Redakcyjny Wydawnictw Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Opolu. 1989.
- 114 Wyrwał J., Świrska J. *Problemy zawilgocenia przegród budowlanych*. Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, Studia z zakresu Inżynierii nr 44, 1998.

## **WPŁYW ZAWILGOCENIA MURÓW CEGLANYCH NA ICH NOŚNOŚĆ I ODKSZTAŁCALNOŚĆ PRZY ŚCISKANIU**

### **Streszczenie**

Niniejsza praca dotyczy oceny wpływu silnego zawilgocenia murów ceglanych na ich nośność i odkształcalność przy ściskaniu. Zagadnienie to jest istotne w analizie konstrukcji ceglanych, które na skutek różnych zdarzeń znalazły się w stanach bliskich stanowi pełnego nasycenia murów wodą. Jednym z takich zdarzeń są powodzie, które na skutek zmian klimatu występują coraz częściej i niosą ze sobą coraz więcej zagrożeń.

W pierwszej części pracy dokonano przeglądu dotychczasowego stanu wiedzy na temat wpływu zawilgocenia na wytrzymałość i odkształcalność materiałów murowych (cegła, zapraw) oraz murów. Z dokonanego zestawienia wynika, że dotychczas przeprowadzono niewiele badań w tym zakresie, chociaż w ostatnich latach liczba publikacji naukowych na temat wpływu silnego zawilgocenia murów na ich nośność wyraźnie się zwiększyła. Dotychczas przeprowadzone i opublikowane badania dotyczyły prawie wyłącznie murów ceglanych wykonanych ze współcześnie produkowanych materiałów murowych. Trudno wyniki takich badań odnieść do konstrukcji wzniesionych kilkadziesiąt czy kilkaset lat temu, które charakteryzują się specyficznymi właściwościami zarówno w zakresie materiałowym jak również technologii wykonania.

W zasadniczej części pracy przedstawiono wyniki badań własnych, które przeprowadzono na oryginalnych ceglach, zaprawach i murach pobranych z konstrukcji budynków istniejących w tym budynków historycznych.

Oprócz badań wytrzymałościowych cegła i zapraw w różnych stanach wilgotności, wykonano również badania cech charakteryzujących strukturę ceramiki i zapraw, takich jak nasiąkliwość, porowatość, struktura porów. Przeprowadzone badania pozwoliły na opracowanie zależności wiążących te cechy ze zmianą wytrzymałości materiałów murowych na skutek ich silnego zawilgocenia.

Jako uzupełniające do badań zasadniczych zrealizowano badania nieniszczące cegieł (badania ultradźwiękowe, badania twardości powierzchniowej) testując możliwości zastosowania tego typu badań do oceny wpływu zawilgocenia na wytrzymałość cegieł.

Największy zakres, z prezentowanych w pracy, miały testy wytrzymałościowe na filarach murowych wyciętych z konstrukcji budynku historycznego. Badania te wykazały znaczący spadek wytrzymałości na ściskanie murów w stanie silnego zawilgocenia w stosunku do murów w stanie powietrzno-suchym - spadek wytrzymałości badanych murów historycznych wynosił od kilku do ponad 40%. Około 40% spadki wytrzymałości na ściskanie murów w stanie nasycenia uzyskano także w badaniach próbek rdzeniowych murów wyciętych z konstrukcji istniejących.

Ostatnia część pracy poświęcona została określeniu wpływu silnego zawilgocenia murów na nośność ścian ceglanych, co ma duże znaczenie w analizach budynków istniejących o konstrukcji ceglanej. Wykazano, że spadki nośności ścian ceglanych mogą w pewnych przypadkach przekraczać 40% - redukcji nośności ścian w takim wymiarze nie można pomijać w ocenach stanu technicznego i nośności konstrukcji budynków.

Biorąc pod uwagę wyniki badań własnych zaproponowano zależności do określania wytrzymałości na ściskanie murów w stanie mokrym na podstawie próbek cegieł i zapraw pobranych z konstrukcji. Niewielkie wymiary próbek potrzebnych do przeprowadzenia tych badań sprawiają, że zaproponowana metoda może zostać zastosowana w obiektach historycznych, w których uszkodzenia konstrukcji, ze względów konserwatorskich, powinny zostać ograniczone do minimum.

Słowa kluczowe: mur ceglany, wilgotność muru, wytrzymałość na ściskanie muru, odkształcalność muru, nośność konstrukcji ceglanej

## **THE EFFECT OF MOISTURE IN BRICK MASONRY ON THEIR LOAD-BEARING CAPACITY AND DEFORMABILITY UNDER COMPRESSION**

### **Summary**

The presented work concerns the assessment of the influence of strong moisture in brick masonry on their load-bearing capacity and deformability under compression. This issue is important in the analysis of brick structures which, as a result of various events, are in wet state. One such event are floods. Because of climate changes, floods are becoming more frequent and pose more and more threats nowadays.

The first part of the work reviews the current state of knowledge on the impact of moisture on the strength and deformability of ceramic bricks, mortars, and masonry. The comparison shows that so far little research has been carried out in this area, although in recent years the number of scientific publications on the impact of high moisture in masonry on their load-bearing capacity has significantly increased. The research carried out and published so far concerned almost exclusively brick masonry made of modernly produced bricks and mortars. It is difficult to apply the results of such research to structures built several dozen or several hundred years ago, which are characterized by specific properties both in terms of materials and methods of erecting structures.

The main part of the work presents the results of own research, which was performed on original bricks, mortars and masonry samples taken from existing buildings (including historical buildings).

In addition to strength tests of bricks and mortars in various moisture states, tests were also carried out on the properties characterizing the structure of ceramics and mortars, such as water absorption, porosity, pore diameter distribution. The conducted research allowed for the development of relationships linking these properties with changes in the strength of masonry materials as a result of their high moisture content.

As a supplement to the basic tests, non-destructive tests of bricks were performed (ultrasound tests, surface hardness tests). The possibilities of using these type of tests to assess the impact of moisture on the strength of bricks were investigated.

The tests with the largest scope of those presented in this work were strength tests on masonry columns cut from the structure of historical buildings. These tests showed a significant decrease in the compressive strength of masonry in a wet state compared to masonry in an air-dry state - the decrease in the strength of the tested masonry ranged from a few to over 40%. Approximately 40% decreases in the compressive strength of masonry in the wet state were also obtained in tests of masonry core samples taken from existing structures.

The last part of the work was devoted to determining the impact of strong moisture on the load-bearing capacity of brick walls, which is of great importance in the analysis of existing brick buildings. It has been shown that decreases in the load-bearing capacity of brick walls may in some cases exceed 40% - a reduction in the load-bearing capacity of brick walls of this size cannot be ignored in the assessment of the technical condition and load-bearing capacity of building structures.

Taking into account the results of research, relationships were proposed to determine the masonry compressive strength in a wet state based on tests of brick and mortar samples taken from the structure. The small dimensions of the samples needed to carry out these tests mean that the proposed method can be used in historical buildings where damage to the structure, for conservation reasons, should be limited to a minimum.

Keywords: brick wall, moisture of masonry, masonry compressive strength, deformability of masonry, load-bearing capacity of the brick structures

## Spis tabel

Tabela 1.1	Stopnie zawilgocenia murów wg [36].....	8
Tabela 4.1	Badania wpływu nasycenia wodą na wytrzymałość na ściskanie cegieł ceramicznych – przegląd stanu wiedzy.....	21
Tabela 4.2	Badania wpływu nasycenia wodą na wytrzymałość na ściskanie zaprawy – podsumowanie stanu wiedzy .....	24
Tabela 4.3	Badania wpływu nasycenia murów ceglanych wodą na ich wytrzymałość na ściskanie – przegląd stanu wiedzy .....	28
Tabela 5.1	Charakterystyka badanych cegieł ceramicznych.....	35
Tabela 5.2	Wyniki badań wytrzymałościowych cegieł ceramicznych – badania własne.....	38
Tabela 5.3	Wyniki badań gęstości objętościowej, nasiąkliwości oraz porowatości cegieł ceramicznych .....	41
Tabela 5.4	Kategoryzacja porów badanych cegieł ceramicznych – w zależności od średnicy porów .....	44
Tabela 5.5	Wyniki badań ultradźwiękowych dla cegieł badanych w różnych stanach wilgotności .....	54
Tabela 5.6	Wyniki badań twardości powierzchniowej cegieł w różnych stanach wilgotności .....	58
Tabela 5.7	Charakterystyka badanych zapraw .....	61
Tabela 5.8	Wyniki badań wytrzymałościowych zapraw .....	65
Tabela 5.9	Wyniki badań porowatości zapraw .....	68
Tabela 5.10	Kategoryzacja porów badanych zapraw w zależności od średnicy porów.....	70
Tabela 6.1	Charakterystyka filarów murowych .....	79
Tabela 6.2	Wyniki badań wytrzymałościowych prowadzonych na filarach.....	83
Tabela 6.3	Parametry charakteryzujące odkształcalność muru przy ścisaniu – z pomiarów na 4 czujnikach LVDT.....	88
Tabela 6.4	Zmiana cechy sprężystości muru wywołana silnym zawilgoceniem (stan nasycenia wodą) .....	89
Tabela 7.1	Badania wytrzymałościowe odwiertów rdzeniowych muru w stanie powietrzno-suchym i „mokrym” .....	93
Tabela 8.1	Wybrane zależności do określenia wytrzymałości na ściskanie murów ceglanych na podstawie wytrzymałości na ściskanie cegieł i zaprawy – według [61] .....	98
Tabela 8.2	Wartości współczynnika $k_{ma}$ określającego spadek wytrzymałości na ściskanie muru spowodowany jego silnym zawilgoceniem .....	101
Tabela 8.3	Porównanie rezultatów badań doświadczalnych z wynikami obliczeń.....	102
Tabela 8.4	Porównanie wyników badań z rezultatami obliczeń na podstawie wzoru (29).....	103
Tabela 8.5	Porównanie wyników obliczeń na podstawie zależności (30) i (31) z rezultatami badań własnych .....	105
Tabela 9.1	Grubości ścian w XIX wiecznych budynkach mieszkalnych w Krakowie.....	106
Tabela 9.2	Wartości współczynnika $k_{\phi}$ .....	109

Tabela 9.3	Zmiana nośności murów ceglanych na skutek ich silnego zawilgocenia (wyrażona współczynnikiem $k_N$ ) .....	110
------------	---	-----

## Spis rysunków

Rys. 1.1	Powódź w Krakowie: a) zalana wodą ul. Wolska (obecnie ul. Piłsudskiego), na pierwszym planie budynek Akcyzy Miejskiej, Gmach Towarzystwa Gimnastycznego "Sokół" – 1903r.; b) widok Krakowa od strony Wisły, z prawej strony widoczny Wawel – 1925r. ....	5
Rys. 1.2	Tablice powodziowe: a) na budynku przy Placu na Groblach w Krakowie, b) znak powodziowy na budynku przy ul. Koletek w Krakowie - według [111].....	6
Rys. 4.1	Schemat graficzny efektu Rebintera – działanie ciśnień rozklinowujących - według [51], [52] .....	15
Rys. 4.2	Model muru poddanego ścisłaniu – według H. Hilsdorfa [30].....	17
Rys. 4.3	Badania historycznych cegieł na rdzeniach o średnicy 35mm i wysokości 70mm: a) wykres zależności zmiana wytrzymałości na ścisłanie cegieł a poziom nasycenia wodą, b) wykres zależności zmiana modułu sprężystości cegieł a poziom nasycenia wodą – według [109].....	19
Rys. 4.4	Wykres procentowego udziału porów (w zależności od ich średnicy) w strukturze historycznych cegieł ceramicznych - według [109] .....	20
Rys. 4.5	Zmiany zależności naprężenie-odkształcenie dla wybranej serii próbek zaprawy w próbie ścisłania – według [52] .....	23
Rys. 4.6	Badania filarów murowych w różnych stanach wilgotności – wartości sił niszczących – według [109].....	26
Rys. 4.7	Wykres zależności między sztywnością murów a siłą ścisłającą – filary w różnych stanach zawilgocenia – według [109] .....	26
Rys. 4.8	Wykres zależności między odkształceniami, a zawilgoceniem dla różnych poziomów obciążenia: a) odkształcenia pionowe, b) odkształcenia poziome – według [109].....	27
Rys. 5.1	Przykłady cegieł wykorzystanych w badaniach własnych: a) cegła b1 – palcówka, b) cegły b2 – saskie, c) cegły b3 – lata 70-te XIX wieku, d) cegły b4 – ostatnia dekada XIX wieku, e) cegły b5 – ostatnia dekada XIX wieku, f) cegły b6 – przełom XIX i XX wieku, g) cegła b7 – przełom XIX i XX wieku, h) cegły b8 – produkowane współcześnie .....	34
Rys. 5.2	Przykłady elementów przygotowanych do badań wytrzymałościowych cegieł: a) walce (odwierty) $\varnothing 50\text{mm}$ , $h=50\text{mm}$ – cegły b1, b) kostki 60mm – cegły b3, c) połówki cegieł – cegły b4 .....	36
Rys. 5.3	Badania wytrzymałości na ścisłanie cegieł – widok stanowisk badawczych: a) badanie w maszynie EDU 400, b) badanie w maszynie Zwick Roell Z100 .....	37
Rys. 5.4	Zależność pomiędzy znormalizowaną wytrzymałością na ścisłanie cegieł w stanie powietrzno-suchym ( $f_b^{(p/s)}$ ) a znormalizowaną wytrzymałością na ścisłanie cegieł w stanie mokrym ( $f_b^{(m)}$ ).....	39
Rys. 5.5	Piknometr helowy Quantachrome Ultrapyc 1200e do oceny porowatości cegieł ceramicznych .....	41
Rys. 5.6	Widok elementów próbných przygotowanych do badań porowatości cegieł ceramicznych .....	41



Rys. 5.7	Widok elementów wyciętych z cegieł i przygotowanych do badań w porozymetrze rtęciowym .....	42
Rys. 5.8	Badania struktury porowatości cegieł w porozymetrze rtęciowym – widok stanowiska badawczego .....	42
Rys. 5.9	Krzywe sumacyjne rozkładu wielkości porów w ceglach ceramicznych – badania struktury porowatości .....	43
Rys. 5.10	Krzywe populacyjne rozkładu wielkości porów cegieł ceramicznych – badania struktury porowatości .....	43
Rys. 5.11	Porównanie wyników badań cegieł ceramicznych w zakresie współczynnika $k_B$ .....	46
Rys. 5.12	Zależność pomiędzy nasiąkliwością a spadkiem wytrzymałości na ściskanie cegieł wynikającym z ich nasycenia wodą .....	47
Rys. 5.13	Zależność pomiędzy gęstością pozorną cegieł a spadkiem wytrzymałości na ściskanie cegieł wynikającym z ich nasycenia wodą .....	48
Rys. 5.14	Zależność wartości współczynnika $k_B$ od porowatości cegieł wyznaczonej w piknometrze helowym .....	49
Rys. 5.15	Widok struktur ceramicznych w przekrojach cegieł – przykłady: a) historyczna b1, b) historyczna b2, c) historyczna b3, d) historyczna b5, e) historyczna b6, f) historyczna b6, g) historyczna b7, h) współczesna b8 .....	51
Rys. 5.16	Metoda przeprowadzania badań ultradźwiękowych cegieł .....	52
Rys. 5.17	Stanowisko do badań ultradźwiękowych .....	53
Rys. 5.18	Zależność pomiędzy prędkością fali ultradźwiękowej a wytrzymałością na ściskanie cegieł b4: a) sposób badania P1, b) sposób badania P2, c) sposób badania P3, d) sposób badania P4 .....	55
Rys. 5.19	Zależność pomiędzy prędkością fali ultradźwiękowej a wytrzymałością na ściskanie cegieł b6: a) sposób badania P2, b) sposób badania P3, c) sposób badania P4 .....	56
Rys. 5.20	Maszyna wytrzymałościowa ZWICK/ROELL Z100 przygotowana do badania twardości powierzchniowej cegieł .....	57
Rys. 5.21	Etapy przygotowania prostopadłościennych próbek zapraw historycznych do badań: a) odspajanie spoin wspornych od cegieł, b) widok odspojonych spoin wspornych, c) zaprawy ze spoin wspornych murów przygotowane do cięcia na elementy próbne, d) elementy próbne po cięciu, e) elementy próbne przygotowane do badań wytrzymałościowych .....	60
Rys. 5.22	Widok próbek zaprawy w teście DPT: próbka w trakcie badania i próbka po badaniu .....	63
Rys. 5.23	Badania wytrzymałości zapraw – widok stanowisk badawczych: a) próba trójpunktowego zginania, b) próba ściskania połówek beleczek normowych .....	64
Rys. 5.24	Badania wytrzymałości zapraw – widok przykładowych próbek po badaniu wytrzymałości na ściskanie w stanie powietrzno-suchym i „mokrym” .....	64
Rys. 5.25	Zależność pomiędzy wytrzymałością na ściskanie zapraw badanych w stanie powietrzno-suchym a wytrzymałością na ściskanie zapraw nasyconych wodą .....	66
Rys. 5.26	Przykłady elementów próbnych zaprawy przygotowanych do badań porowatości .....	67
Rys. 5.27	Widok próbek zapraw przygotowanych do badań w porozymetrze rtęciowym – ocena struktury porów .....	67

Rys. 5.28	Krzywe sumacyjne rozkładu wielkości porów badanych zapraw.....	69
Rys. 5.29	Krzywe populacyjne rozkładu wielkości porów zapraw .....	69
Rys. 5.30	Porównanie wyników badań zapraw.....	72
Rys. 5.31	Zależność $k_m(n_m)$ .....	72
Rys. 5.32	Zależność $k_m(p)$ – aproksymacja funkcją liniową.....	73
Rys. 5.33	Zależność $k_m(p)$ – aproksymacja funkcją w postaci wielomianu drugiego stopnia.....	73
Rys. 5.34	Zależność pomiędzy ilością porów o średnicy $0,01 \div 1,0\mu\text{m}$ a spadkiem wytrzymałości na ściskanie zapraw wynikającym z ich nasycenia wodą – aproksymacja funkcją liniową .....	74
Rys. 5.35	Zależność pomiędzy ilością porów o średnicy $1,0 \div 100\mu\text{m}$ a spadkiem wytrzymałości na ściskanie zapraw wynikającym z ich nasycenia wodą – aproksymacja funkcją liniową .....	74
Rys. 5.36	Zależność pomiędzy ilością porów o średnicy $0,01 \div 1,0[\mu\text{m}]$ a spadkiem wytrzymałości na ściskanie zapraw wynikającym z ich nasycenia wodą – aproksymacja wielomianem drugiego stopnia.....	76
Rys. 5.37	Zależność pomiędzy ilością porów o średnicy $1,0 \div 100[\mu\text{m}]$ a spadkiem wytrzymałości na ściskanie zapraw wynikającym z ich nasycenia wodą – aproksymacja wielomianem drugiego stopnia.....	76
Rys. 6.1	Budynek, z którego pobrano materiał do badań .....	77
Rys. 6.2	Etap wycinania filarów murowych .....	77
Rys. 6.3	Widok filarów murowych przeznaczonych do badań.....	78
Rys. 6.4	Sezonowanie murów do stanu „mokrego”: a) etap nr 1 (kapilarne podciąganie), b) etap nr 2 – nasycenie muru wodą przez mokre maty bawełniane .....	80
Rys. 6.5	Sezonowanie murów do stanu mokrego przez zanurzenie w wodzie.....	80
Rys. 6.6	Widok filara F1/2 na stanowisku badawczym .....	81
Rys. 6.7	Fragmenty cegieł i zapraw pobrane z filara do oceny stopnia wilgotności muru.....	82
Rys. 6.8	Wykres zależności naprężenie – odkształcenie dla pary filarów: a) F1/1 i F1/2, b) F2/1, F2/2 oraz F2/3, c) F3/2 i F3/1, d) F4/3, F4/1 oraz F4/2.....	84
Rys. 6.9	Typowe formy zniszczenia filarów: a) filar F4/3 badany w stanie powietrzno-suchym, b) filar F4/1 badany w stanie „mokrym”.....	85
Rys. 6.10	Porównanie wyników badań własnych przeprowadzonych na filarach ceglanych z wynikami badań innych autorów .....	86
Rys. 6.11	Zależności naprężenie-odkształcenie dla badanych filarów ceglanych.....	87
Rys. 7.1	Odwierty rdzeniowe o średnicy 100mm przeznaczone do badań: a) w stanie powietrzno-suchym, b) w stanie „mokrym” .....	92
Rys. 7.2	Formy zniszczenia odwiertów rdzeniowych muru w badaniach wytrzymałościowych: a) element próbny zbadany w stanie powietrzno-suchym, b) element próbny zbadany w stanie mokrym.....	93
Rys. 7.3	Wykresy zależności siła-przemieszczenie dla poszczególnych par odwiertów rdzeniowych badanych w różnych stanach wilgotności (p/s – w stanie powietrzno-suchym, m – w stanie „mokrym”).....	95
Rys. 8.1	Porównanie wartości współczynnika $k_{ma}$ uzyskanych ze wzorów (26), (27), (28) oraz na podstawie badań doświadczalnych .....	102

Rys. 8.2	Wartość współczynnika redukcyjnego $k_{ma}$ pokazującego spadek wytrzymałości na ściskanie muru spowodowany jego silnym zawilgoceniem .....	104
Rys. 9.1	Efekt silnego zawilgocenia na nośność ścian ceglanych (wyrażony współczynnikiem $k_N$ ) .....	110