

POLITECHNIKA LUBELSKA
Wydział Budownictwa i Architektury

mgr inż. Marcin Kruk

ROZPRAWA DOKTORSKA

**KSZTAŁTOWANIE CECH MECHANICZNYCH MURU
Z BETONU KOMÓRKOWEGO Z UWAGI NA ZARYSOWANIE**

Promotor:

dr hab. inż. Tadeusz Ciężak, prof. PL

LUBLIN 2010

*Wszystkim, którzy okazali mi życzliwość oraz
służyli pomocą w czasie wykonywania i redagowania
niniejszej pracy, a szczególnie Promotorowi Panu
Profesorowi Tadeuszowi Ciężakowi, składam ser-
deczne podziękowania.*

Marcin Kruk

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń i symboli stosowanych w pracy	6
1. Wprowadzenie.....	8
2. Cel i zakres rozprawy.....	11
3. Obecny stan wiedzy	13
3.1. Konstrukcje murowe	14
3.2. Zarysowania w konstrukcjach murowych.....	19
3.3. Naprężenia w murze.....	24
3.4. Mury poddane rozciąganiu.....	33
3.5. Charakterystyka materiałowa elementów murowych z betonu komórkowego i zapraw murowych.....	39
3.5.1. Skurcz przy wysychaniu ε_{cs}	40
3.5.2. Wytrzymałość na ściskanie f_b	42
3.5.3. Moduł sprężystości E	42
3.5.4. Przyczepność zaprawy do elementu murowego ze względu na rozciąganie f_{tz}	43
3.5.5. Przyczepność zaprawy do elementu murowego ze względu na ścinanie f_v	44
3.5.6. Wytrzymałość elementu na rozciąganie f_{tc}	46
3.5.7. Wytrzymałość muru na ściskanie f_{mv}	47
3.5.8. Wytrzymałość na ściskanie i zginanie zapraw murarskich.....	50
3.6. Podsumowanie analizy obecnego stanu wiedzy	53

4. Badania własne	57
4.1. Program badań	57
4.2. Opis i realizacja badań oraz wyniki badań materiałowych.....	58
4.2.1. Wytypowanie betonów i zapraw do badań oraz ich zakup.....	58
4.2.2. Wyniki badań cech fizyko-technicznych betonów komórkowych	58
4.2.2.1. Skurcz przy wysychaniu ε_{cs}	58
4.2.2.2. Wytrzymałość na ściskanie f_b	60
4.2.2.3. Moduł sprężystości E	61
4.2.2.4. Wytrzymałość elementu na rozciąganie f_{tc}	63
4.2.3. Wyniki badań właściwości zapraw murarskich.....	65
4.2.4. Założenia teoretyczne przyjęte w rozprawie.....	65
4.2.5. Przygotowanie stanowisk badawczych.....	68
4.2.6. Sezonowanie elementów murowych.....	70
4.2.7. Wykonanie murów.....	71
4.2.8. Obserwacja i pomiary zmian liniowych murów	76
4.3. Wyniki badań murów wykonanych w skali 1:1	77
4.3.1. Charakter zarysowań powstałych w murach badawczych.....	77
4.3.1.1. Mury z ABK o wilgotności poautoklawizacyjnej	78
4.3.1.2. Mury z ABK o wilgotności ok. 30 % masy	82
4.3.1.3. Mury z ABK o wilgotności ok. 20 % masy	85
4.3.1.4. Mury z ABK o wilgotności ok. 10 % masy	88

4.3.2. Wyniki pomiaru odkształceń murów w czasie	90
4.3.2.1. Mury z ABK o wilgotności poautoklawizacyjnej	91
4.3.2.2. Mury z ABK o wilgotności ok. 30 % masy.....	101
4.3.2.3. Mury z ABK o wilgotności ok. 20 % masy.....	111
4.3.2.4. Mury z ABK o wilgotności ok. 10 % masy.....	121
4.3.3. Rozkład temperatury i wilgotności wewnątrz muru	130
4.4. Podsumowanie wyników przeprowadzonych badań	132
5. Dyskusja uzyskanych wyników badań	134
5.1. Opis matematyczny zjawiska.....	136
6. Podsumowanie	142
7. Wnioski	144
7.1. Wnioski końcowe.....	145
7.2. Kierunki dalszych działań.....	147
8. Literatura	148

Wykaz ważniejszych oznaczeń i symboli stosowanych w pracy

φ_{∞}	wartość graniczna współczynnika pełzania
ε_{cs}	skurcz przy wysychaniu autoklawizowanego betonu komórkowego
$\varepsilon_{h\infty}$	wartość graniczna współczynnika rozszerzalności pod wpływem wilgoci
α_T	współczynnik rozszerzalności termicznej
c_j	kąt tarcia wewnętrznego
E	moduł sprężystości
F	siła
f_b	wytrzymałość elementu na ściskanie
f_k	wytrzymałości charakterystyczna muru na ścinanie
$f_{k,PN}$	wytrzymałość charakterystyczna muru na ściskanie podana w PN-B-03002:1999
f_{mv}	wytrzymałość muru na ściskanie
f_t	wytrzymałość muru na rozciąganie osiowe
f_{tc}	wytrzymałość elementu na rozciąganie
f_{tz}	przyczepność zaprawy do elementu murowego ze względu na rozciąganie
f_v	przyczepność zaprawy do elementu murowego ze względu na ścinanie
f_{vko}	wytrzymałość charakterystyczna muru na ścinanie przy zerowym naprężeniu ściskającym ($\sigma_d=0$)
f_{vo}	średnia wartość początkowej wytrzymałości muru na ścinanie
f_x	wytrzymałość muru na rozciąganie przy zginaniu
h	wysokość pojedynczego elementu murowego

l	długość pojedynczego elementu murowego
M	moment zginający
w	wskaźnik wytrzymałości przekroju
θ	kąt między kierunkiem spoin wspornych a naprężeniem normalnym
μ	współczynnik tarcia wewnętrznego w zaprawie spoiny
ν	współczynnik zmienności, też – współczynnik odkształcalności poprzecznej
σ_d	wartość obliczeniowa naprężeń ściskających w kierunku prostopadłym do płaszczyzny ścinania, wyznaczona dla odpowiedniej kombinacji oddziaływań
ΣM_A	suma momentów siły względem punktu „A”
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	składowe naprężenia normalne
τ_R	przyswajalne naprężenie styczne
$\tau_{vcr,mv}$	naprężenia ścinające dla stanu zarysowania
$\tau_{vu,mv}$	naprężenia ścinające dla stanu zniszczenia
$\tau_{xz}, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{yx}, \tau_{zx}, \tau_{zy}$	składowe naprężenia styczne

1. Wprowadzenie

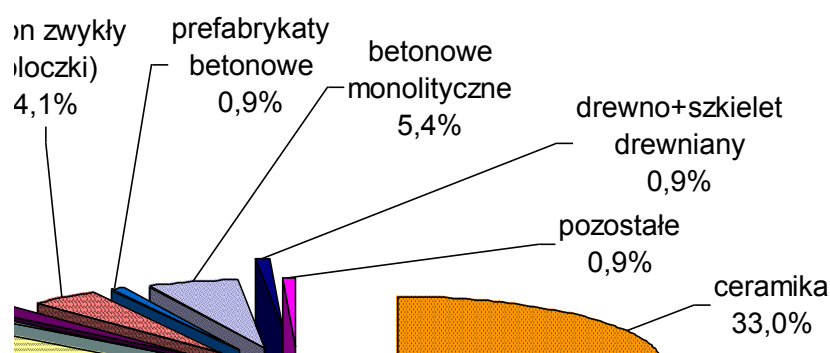
(1) Autoklawizowany beton komórkowy (ABK) jest najpopularniejszym w Polsce materiałem budowlanym do wznoszenia ścian. Proces jego wytwarzania jest przyjazny dla środowiska naturalnego, o niskim zużyciu energii i surowców, a co za tym idzie, wpisuje się w uwarunkowania zrównoważonego rozwoju [1]. Został on stworzony ponad 80 lat temu przez szwedzkiego architekta Axela Eriksona, który w odpowiedzi na grożącą całkowitą zagładę lasów w Skandynawii przez ich dalsze wycinanie, szukał innego ciepłego materiału dla budownictwa o właściwościach zbliżonych do drewna.

(2) Elementy z autoklawizowanego betonu komórkowego stosowane są w budownictwie przemysłowym, użyteczności publicznej, ale przede wszystkim mieszkaniowym. Należy podkreślić, że z tego materiału budowane są domy mieszkalne we wszystkich krajach Europy, a także na innych kontynentach w różnych strefach klimatycznych, w tym i w rejonach sejsmicznych, co świadczy o wielu zaletach tego materiału. Polska jest największym producentem tego tworzywa w Europie, gdzie udział jej wynosi około 42 % [2]. Rozwój przemysłu betonów komórkowych w kraju oraz szereg prowadzonych prac naukowo-badawczych i rozwojowych sprawiły, że inwestorzy i projektanci bardzo chętnie sięgają po ten materiał ścienny. Udział procentowy poszczególnych materiałów budowlanych na polskim rynku przedstawiono na Rys. 1-1, gdzie z betonu komórkowego wznosi się ok. 40 % ścian w Polsce [3].

(3) Materiał ten może być użyty do wznoszenia każdego rodzaju ścian zarówno w konstrukcjach nadziemnych, jak i do ścian podziemnej części budynku (pod warunkiem należytej izolacji przeciwwilgotnościowej i wypełnieniu wszystkich spoin poziomych i pionowych). Coraz większą popularność zyskuje bardzo korzystne rozwiązanie ściany zewnętrznej jednowarstwowej [4], w której beton ten pełni rolę izolacyjno-konstrukcyjną. Zaletą tego rozwiązania przegrody zewnętrznej jest wystarczająca izolacyjność cieplna, bez potrzeby dodatkowego ocieplenia przy spełnianiu wymagań bezpieczeństwa konstrukcji, bezpieczeństwa pożarowego i ochrony przed hałasem.

(4) Zarysowania w konstrukcjach murowych wykonanych z różnego rodzaju materiałów są zjawiskiem niestety dość powszechnym. Przyczyny powstawania rys są różnorodne i na ogół trudne do ustalenia, ale ich morfologia, kształt oraz przebieg w czasie mogą znacznie ułatwić ich ustalenie. Konieczność wykonywania prac remontowo-naprawczych w celu przywrócenia

obiektowi budowlanemu prawidłowych walorów eksploatacyjnych generuje zazwyczaj znaczne koszty, których poniesienie często prowadzi do sytuacji spornych. Wbrew pozorom zagadnienie zarysowania murów nie jest całkiem proste. Błędna ocena przyczyn i mechanizmów zarysowań może doprowadzić do kosztownych zabezpieczeń i wzmocnień oraz częściowego lub całkowitego wstrzymania eksploatacji budynku. Na nieuzasadnione koszty naraża także właściciela zbyt asekuracyjne zabezpieczenie. Różnorodność kształtu i przebiegu rys oraz miejsc ich występowania wiąże się z dużą liczbą czynników wywołujących powstawanie tego typu uszkodzeń. Zarysowania związane są często z wadliwym rozwiązaniem konstrukcyjnym ściany na etapie projektowania, złym doбором elementów składowych ściany, niewłaściwych parametrów tynków, jak również wystąpieniem w obiekcie nieregularnych, pionowych przemieszczeń.



Rys. 1-1 Udział w rynku poszczególnych materiałów ściennych w 2006 r.
(wg LM Budownictwo [5])

(5) Postęp techniczny w budownictwie, rosnące wymagania inwestorów i podwyższone wymagania ochrony cieplnej budynków sprawiają, że zaostrzają się wymagania dotyczące ścian w zakresie parametrów technicznych, użytkowych i estetycznych. Producenci autoklawizowanego betonu komórkowego, aby sprostać stawianym wymaganiom, oferują nową generację

wyrobów, a w wykonawstwie proponują nowe materiały i techniki do łączenia elementów w murze. W ostatnich latach rozpropagowano i wprowadzono do stosowania lekkie, bardziej ciepłochronne gęstości ABK tj. 500, 400, 300 kg/m³. Powszechnie stosowane do niedawna gęstości 700 i 600 kg/m³ są sukcesywnie zastępowane materiałem lżejszym, a tym samym o mniejszej wytrzymałości, choć wystarczającej z punktu widzenia nośności ściany. Produkcja elementów murowych o dużej dokładności wymiarów [6] pozwoliła na zastosowanie nowych technik łączenia elementów w murze tj. zaprawą popularnie zwaną klejową [7] przy grubości spoiny od 1 do 3 mm. Równolegle obok zapraw do cienkich spoin stosowane są lekkie zaprawy murarskie w tym ciepłochronne [7, 8], z których wykonywane spoiny mają grubość od 6 do 15 mm, lecz nie tworzą one mostków termicznych gdyż parametry cieplne zapraw są na poziomie parametrów cieplnych betonu komórkowego. Zaprawy klejowe, w przeciwieństwie do zapraw lekkich ciepłochronnych, w większości wytrzymałością przewyższają czasem kilkakrotnie wytrzymałość łączonego elementu murowego.

(6) Zmiany w obecnej organizacji placu budowy związanej z łatwością zakupu materiału, ukierunkowane na zmniejszenie składowisk na budowie i kupowanie na krótko przed wymurowaniem ścian, skracają czas odsychania autoklawizowanego betonu komórkowego. Tradycyjną metodę dostarczania materiału na plac budowy luzem lub w postaci pakietów zastąpiono paletyzacją wyrobów wraz z ich ofoliowaniem niepozwalającym na szybkie odsychanie materiału w trakcie składowania. Wyprawy ścian wybudowanych z elementów o wysokiej dokładności wymiarowej w większości przypadków wykonywane są z cienkowarstwowych mas tynkarskich.

(7) Powyżej ujęte zmiany w stosownictwie ABK mogą mieć wpływ na sygnalizowane niekorzystne zjawiska w postaci rys i pęknięć występujących w obiektach wznoszonych z tego materiału. Odsychanie betonu komórkowego i towarzyszący temu skurcz w murze, w okresie, gdy zaprawa uzyskała dużą wytrzymałość, przekraczając wytrzymałość elementu, mogą spowodować raptowny wzrost naprężeń rozciągających, szczególnie w pasie pod- i nadokiennym, a co za tym idzie doprowadzić do przekroczenia stanu granicznego zarysowania. Świadczyć o tym mogą występujące w ścianach rysy przebiegające w kierunku pionowym po liniach spoin lub w linii prostej na przemiennie (spoina – bloczek).

2. Cel i zakres rozprawy

(1) Celem niniejszej rozprawy jest wyjaśnienie zagadnień związanych z zarysowaniem muru z autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK) w świetle cech mechanicznych tego ustroju. Zarysowanie rozumiane jest w niniejszych rozważaniach jako stan pojawienia się rysy w murze.

(2) Bezpośrednią przyczyną zainicjowania badań przedstawionych w niniejszej rozprawie były coraz częstsze sygnały (zarówno ze strony producentów, jak i inwestorów) o niekorzystnych zjawiskach, w postaci pęknięć i rys, w ścianach obiektów realizowanych z elementów murowych z ABK. Jak wykazały kontakty z różnymi zagranicznymi ośrodkami badawczymi, zajmującymi się tematyką betonu komórkowego, podobne problemy występują również i w innych krajach. Sygnały te były motywacją do podjęcia obserwacji budynków, w których sprawdzano umiejscowienie powstałych rys i pęknięć oraz starano się znaleźć przyczynę ich powstawania. W wyniku przeprowadzonych obserwacji stwierdzono, że szereg rys i pęknięć w ścianach wynika z wad konstrukcyjno-projektowych lub wykonawczych, np.: brak zabezpieczenia styków materiałów o różnej charakterystyce (drewno – beton komórkowy), zarysowanie w linii pionowej ławy fundamentowej, brak zabezpieczenia w miejscu koncentracji naprężeń, czy wpływ nieprawidłowo rozwiązanej konstrukcji więźby dachowej.

(3) Wśród obserwowanych obiektów należy wyróżnić te, w których nie stwierdzono ani żadnych nieprawidłowości konstrukcyjnych ani wykonawczych, a w których rysy i pęknięcia powstawały. Zarysowania te można podzielić na dwie grupy tj.: pierwsza to zarysowania w postaci pajęczyny nitkowych rys na powierzchni bloczków a druga to zarysowania przechodzące przez kilka warstw elementów murowych na wysokości ściany. Oba rodzaje zarysowań powstają w pierwszym miesiącu po wbudowaniu elementu murowego, szczególnie przy wysokich temperaturach i wysokiej wilgotności betonu. Rysy takie widoczne były szczególnie na ścianach zewnętrznych, głównie elewacji południowej. Według oświadczeń właścicieli budynków, wznoszenie ścian rozpoczynano w okresie wysokich temperatur a elementy z betonu komórkowego niskich gęstości, dostarczane były ofoliowane na paletach krótko przed wmurowaniem. Analizując morfologię obu rodzajów zarysowań stwierdzono, że w pierwszym przypadku rysy przypowierzchniowe o włoskowatej szerokości ograniczają się do obszaru pojedynczych elementów murowych i sięgają do kilku centymetrów w głąb, stabilizując się po okresie około 1 roku. Drugi rodzaj zarysowań to rysy przechodzące na głębokości ca-

łego muru w postaci jednej linii w kierunku zbliżonym do pionowego. Ich rozwarcie przekraczającej czasami 1 mm. Rysy te w ścianach przebiegają w linii spoin lub w jednej linii zbliżonej do prostej naprzemiennie widocznej w spoinie i w bloczku. Okolicznością sprzyjającą ich powstawaniu jest łączenie bloczków betonu komórkowego zaprawami o wytrzymałości kilkakrotnie przekraczającej wytrzymałość elementu łączonego.

(4) Autoklawizowany beton komórkowy odznacza się szczególnymi cechami, odbiegającymi od własności innych materiałów stosowanych do budowy ścian. Ze względu na ilość porów dochodzących do 80 % objętości materiał ten posiada zdolność wiązania w swojej strukturze znacznej ilości wilgoci. Wilgoć ta pojawia się w elemencie murowym w wyniku specyficznego procesu jego wytwarzania (bezpośrednio po rozładunku z autoklawu może wynosić nawet do 40 % masy) oraz w skutek klimatycznych wpływów otoczenia. Wyżej opisane zjawisko skłania ku przyjęciu założenia, że zarysowania zarówno w postaci przypowierzchniowej siatki jak i przechodzące w linii pionowej na grubości całego elementu, powstają w wyniku wysokiej temperatury otoczenia oraz wilgotności materiału. Na powierzchni ściany występuje duży gradient temperatury i wilgoci w samym elemencie i dochodzi do gwałtownego odparowania wilgoci w porach. Zmiany te powodują zmianę objętościową, tzw. skurcz przy wysychaniu, a przy braku możliwości swobodnej pracy elementu murowego powstają naprężenia rozciągające, które mogą skutkować powstaniem zarysowań.

(5) W wyniku wstępnej analizy zaprogramowano badania, które stanowią podstawę do niniejszej rozprawy.

Tezy pracy są następujące:

- 1. Powstawanie w ścianach z autoklawizowanego betonu komórkowego rys o charakterze skurczowym związane jest bardzo znacząco z wilgotnością wmurowywanego materiału.**
- 2. Istnieje wyższe prawdopodobieństwo powstania rys w ścianach z betonu komórkowego łączonego zaprawą do cienkich spoin, której wytrzymałość na ściskanie kilkakrotnie przewyższa wytrzymałość łączonego betonu komórkowego.**
- 3. Istnieje możliwość takiego kształtowania cech mechanicznych muru z autoklawizowanego betonu komórkowego, aby zarysowania o charakterze skurczowym nie powstały.**

(6) Przy takim sformułowaniu tez propozycja przedstawiona w niniejszej rozprawie metody postępowania prowadzącego do odpowiedzi jest następująca:

1. Na podstawie analizy aktualnego stanu wiedzy zestawienie stosowanych rozwiązań opisu modelu zjawiska i ich charakterystyka, ze zwróceniem uwagi na przyjęte założenia. Porównanie wyników uzyskiwanych przy posługiwaniu się poszczególnymi rozwiązaniami. Zwrócenie uwagi na ustalenia normowe.
2. Przeprowadzenie badań własnych cech mechanicznych elementów składowych muru dla wytypowanego materiału metodą doświadczalną w zakresie m.in. wytrzymałości (na ściskanie i rozciąganie), skurczu, modułu sprężystości.
3. Wykonanie i obserwacja w warunkach poligonowych w skali naturalnej serii murów badawczych, gdzie schemat statyczny przyjęty do ich obciążenia jest pewnego rodzaju symulacją obciążeń dla strefy podokiennej w budynku dwukondygnacyjnym. W strefie środkowej tych murów wymuszone są poprzez odpowiednie jego utwierdzenie naprężenia rozciągające wynikające głównie ze skurczu materiału przy wysychaniu.
4. Dokonanie analizy porównawczej wartości uzyskanych na podstawie badań własnych oraz na podstawie prac teoretycznych. Zaproponowanie modelu przebiegu zjawiska obejmującego cechy mechaniczne muru z uwagi na zarysowanie.
5. Sformułowanie wniosków końcowych dotyczących kształtowania cech mechanicznych murów z autoklawizowanego betonu komórkowego, przy określeniu których będzie można podać warunki projektowania i wznoszenia ścian, w których nie wystąpi zarysowanie.

3. Obecny stan wiedzy

(1) Podstawowym warunkiem dla każdej konstrukcji technicznej jest zapewnienie jej dostatecznej wytrzymałości. Najpewniejszym sposobem sprawdzenia, to sprawdzenie doświadczalne. Jednak poszukiwanie w każdym oddzielnym przypadku najwłaściwszego pod kątem wytrzymałości rozwiązania na drodze eksperymentowania byłoby długotrwałe i kosztowne. Opisane w niniejszej rozprawie zjawisko zarysowania konstrukcji murowej w wyniku odkształceń termiczno-wilgotnościowych nie wpływają bezpośrednio na zagrożenia związane z nośnością konstrukcji. Bardziej zarysowania te dotyczą estetyki użytkowania, która coraz częściej staje się kluczowym elementem odbioru wzniesionej budowli.

(2) Pomimo istotnych zalet, jakie mają mury wznoszone z bloczków z autoklawizowanego betonu komórkowego (ściana jednowarstwowa, duża dokładność wymiarowa, niewypełnione spoiny pionowe, bardzo dobra izolacyjność cieplna i akustyczna, itd.), często można spotkać się z opinią o dużej ich wrażliwości na zarysowanie, szczególnie ścian zewnętrznych wykonanych z elementów betonu o niskiej gęstości.

(3) Przedstawiając w niniejszej rozprawie wyniki analizy obecnego stanu wiedzy posłużono się obowiązującą generalnie zasadą układu treści, to jest przechodząc „od ogółu do szczegółu”. W pierwszym etapie omówiono ogólną charakterystykę konstrukcji murowych, następnie ich zarysowanie i stan naprężeń. W dalszym etapie analizowano metody badań murów poddanych rozciąganiu oraz charakterystykę materiałową elementów murowych z betonu komórkowego i zapraw murowych stosowanych do tego typu betonu. Rozdział zamknięty jest podsumowaniem i sformulowaniem wniosków.

(4) W niniejszej rozprawie dla zachowania przejrzystości przedstawionego materiału zostały jedynie zaakcentowane bardzo istotne dla znajomości tematu obszary wiedzy dotyczące konstrukcji murowych. Pokrótkę zasygnalizowano między innymi badania murów poddawanych ściskaniu lub mimośrodowemu ściskaniu, murów ściskanych nieprostopadle do płaszczyzny spoin wspornych, ściskanych dwuosiowo, ścinanych w kierunku pionowym, poziomym, sprężanych, czy badania murów pracujących w złożonym stanie naprężeń. Skoncentrowano się w niniejszej rozprawie przede wszystkim na analizie stanu badań murów poddawanych rozciąganiu, bo to ten właśnie schemat obciążeń jest spójny z obserwowanymi zarysowaniami.

3.1. Konstrukcje murowe

(1) Mur jest konstrukcją wykonaną z odpowiednio połączonych kamieni naturalnych (rodzimy) lub sztucznych, przeznaczoną głównie do przenoszenia naprężeń ściskanych [9]. Zgodnie z definicją przedstawioną w Eurokodzie 6 [10] mur jest trwałym układem elementów murowych ułożonych w odpowiedni sposób i połączonych ze sobą zaprawą. Wiadomym jest, że konstrukcje murowe od kilkunastu lat przeżywają swój renesans, co widoczne jest szczególnie w budownictwie mieszkaniowym i użyteczności publicznej. Rozwój technologiczny w produkcji elementów murowych, zapraw do ich łączenia oraz proponowane przez producentów systemy budowy chociażby domów mieszkalnych, obejmujące wznoszenie budowli od fundamentów aż po dach sprawiają, że inwestorzy coraz chętniej sięgają po te właśnie roz-

wiązania murowe. Dokonując analizy obecnego stanu wiedzy nie sposób nie wymienić na wstępie poważnej publikacji na temat projektowania konstrukcji murowych autorstwa zespołu pod kierownictwem prof. Lewickiego, a dotyczącej rozszerzenia podstaw naukowych ustaleń Eurokodu 6 „Projektowanie konstrukcji murowych” [11,12]. W opracowaniu tym dokonano analizy ponad 350-ciu publikacji dotyczących konstrukcji murowych.

(2) Zasady projektowania konstrukcji murowych z uwagi na właściwości mechaniczne są jednakowe i niezależne od rodzaju materiału z jakiego są wznoszone. Warto jednak wyróżnić podstawowe rodzaje murów w zależności od rodzaju elementów murowych, z których zostały wykonane. Według Eurokodu 6 elementy murowe powinny być zgodne z jednym z poniższych rodzajów:

- elementy ceglane wg EN 771-1 [13],
- elementy silikatowe wg EN 771-2 [14],
- elementy z betonu kruszywowego (żwirowego i kruszyw lekkich) wg EN 771-3 [15],
- elementy z autoklawizowanego betonu komórkowego wg EN 771-4 [16],
- elementy ze sztucznego kamienia wg EN 771-5 [17],
- cięte elementy z kamienia naturalnego wg EN 771-6 [18].

(3) Uwzględniając powyższy podział rodzajów konstrukcji murowych wyróżnić można na potrzeby niniejszej pracy „mury z betonu komórkowego”. Mur z tego materiału, jak wspomniano w rozdziale pierwszym rozprawy, łączy w sobie dobre cechy zarówno konstrukcyjne jak i izolacyjne. Autoklawizowany beton komórkowy wyróżnia się korzystnym współczynnikiem przewodzenia ciepła. Przykładowo przy zastosowaniu zaprawy murowej do cienkich spoin dla muru jednowarstwowego o grubości 36 cm uzyskujemy współczynnik przenikania ciepła U o wartości poniżej $0,30 \text{ W/m}^2\text{K}$, bez zastosowania dociepleń przykładowo ze styropianu czy wełny mineralnej.

(4) Na podstawie przeprowadzonych pod kierownictwem Zapotocznej-Sytek badań [19, 20, 21, 117, 118, 145] można stwierdzić, iż specyfika ścian z betonu komórkowego o podwyższonej dokładności wymiarowej, wznoszonych na cienkiej spoinie (grubość od 1 do 3 mm) oraz łączonych zaprawą klejową pod względem m.in. rozkładu naprężeń jest trochę inna niż w klasycznym modelu konstrukcji murowej z cegły ceramicznej. Mianowicie, jako układ elementów murowych przewiązanych zaprawą o wytrzymałości na ściskanie przekra-

czającej kilkakrotnie wytrzymałość na ściskanie elementu, mur taki zaczyna pracować jako monolityczna tarcza.

Wiadomym jest, że bloczki z betonu komórkowego w stosunku do cegły ceramicznej są większe wymiarowo. Dla bloczków z ABK można przyjąć przykładowe wymiary 599x199x300 mm (odpowiednio długość/wysokość/szerokość przyjęta według danych jednego z producentów). Przy grubości spoiny od 1 do 3 mm i wymiarów bloczków jak powyżej, można oszacować, że spoina stanowi od 0,6 do 1,7 % powierzchni ściany. Porównując ten udział procentowy z powierzchnią muru z cegły o wymiarach 250x65x120 mm i spoinie o średniej grubości 10 mm, otrzymujemy, że spoina stanowi około 17,1 % powierzchni ściany. Czyli w płaszczyźnie muru z betonu komórkowego udział zaprawy jest mniej więcej dziesięć razy mniejszy niż w murze tradycyjnym z cegły ceramicznej. Czy to ma jakieś znaczenie? Odpowiedź brzmi „tak”. W takim układzie spoina, której praktycznie nie ma (a są wznoszone również mury bez wypełnienia spoiny pionowej zaprawą), nie spełnia swoich podstawowych funkcji, jak chociażby tradycyjna zaprawa cementowo-wapienna w murze z cegły ceramicznej, która oprócz przenoszenia obciążeń ściskających przenosi z uwagi na swoją elastyczność naprężenia wynikające z odkształceń muru.

Poniżej przedstawiono wyniki badań murów wykonanych z elementów murowych z betonu komórkowego różniących się rodzajem zaprawy oraz grubości spoiny.

(5) Duży zbiór wyników badań murów z betonu komórkowego zawarty jest w publikacjach zespołu Bodzak, Gajownik, Zapotoczna-Sytek [130, 131, 132, 133, 134]. Przebadano szereg murów ze względu na ich wytrzymałość na ściskanie oraz moduł sprężystości. Mury te wykonano z betonu komórkowego różnych gęstości i wytrzymałości dla różnej grubości spoiny i rodzaju zaprawy. Prace badawcze opisane w cytowanych publikacjach wykazują, że przy zaprawie do cienkich spoin wytrzymałość muru na ściskanie jest wyższa. Poniżej przedstawiono przykładowe wyniki oznaczenia wytrzymałości nośności muru na ściskanie na podstawie pracy badawczej zespołu Bodzak, Gajownik, Skoczek, Szostak przy konsultacji prof. Lewickiego [132] (badania wykonano w seriach po 6 murów) (Tablica 3.1-1).

Lp.	Cechy materiałowe				Grubość spoiny [mm]	Nośność muru na ściskanie [MPa]
	ABK		zaprawa			
	Gęstość [±50 kg/m³]	wytrzymałość średnia [MPa]	rodzaj	wytrzymałość na ściskanie [MPa]		
1	500	4,0	klejowa do cienkich spoin	15,5	1,2-2,4	2,36
2	500	4,0	ciepłochronna	4,8	11,0-12,8	1,99
3	600	6,0	cementowo-wapienna	9,9	13,0-14,8	3,04
4	600	6,0	klejowa do cienkich spoin	4,4	1,2-2,4	3,15

Tablica 3.1-1 Wyniki badań w zakresie oznaczenia nośności muru na ściskanie na podstawie pracy badawczej zespołu Bodzak, Gajownik, Skoczek, Szostak przy konsultacji prof. Lewickiego [132]

(6) W swoim dorobku naukowym dużą ilość badań doświadczalnych fragmentów ścian murowanych posiada prof. Kubica. W pracy habilitacyjnej [22] profesor przedstawił między innymi wyniki badań murów z betonu komórkowego na spoiny zwykłe oraz „cienkie”.

Dla ukazania różnicy cech mechanicznych murów z betonów komórkowych wykonanych przy zastosowaniu różnego rodzaju zaprawy oraz grubości spoiny zestawiono w tabeli 3.1-2 przykładowe parametry średniej wartości naprężeń ścinających dla stanu zarysowania $\tau_{\text{vcr,mv}}$ oraz zniszczenia $\tau_{\text{vu,mv}}$ uzyskane w badaniach profesora [23, 24, 25, 26, 27, 28].

(7) Omawiając przedstawione w tabeli 3.1-2 dane prof. Kubica stwierdził, że dla wszystkich zbadanych murów osiągnięcie rzeczywistego stanu zniszczenia (równoznacznego ze stanem granicznym nośności) następowało dla większych poziomów naprężeń niż notowane w chwili pojawienia się rys, niemniej różnica ta silnie zależała od typu elementów murowych, z których badane modele były wykonane.

Lp.	σ_c	Liczba modeli	$\tau_{vcr,mv}$	$\tau_{vu,mv}$
Mury z betonu komórkowego na zwykłe spoiny – zaprawa cementowa (1:3)				
1	0	10	0,221	0,313
2	0,387	2	0,664	0,777
3	0,645	2	0,762	0,894
4	0,903	2	0,836	0,986
5	1,290	2	0,882	1,072
6	2,064	2	0,984	1,039
Mury z bloczków z betonu komórkowego na „cienkie spoiny”				
7	0		0,212	0,274
8	0,250		0,282	0,386
9	0,450		0,332	0,381
10	0,900		0,423	0,614
11	1,500		0,509	0,636

Tablica 3.1-2 Średnie wartości naprężeń ścinających dla stanu zarysowania $\tau_{vcr,mv}$ oraz zniszczenia $\tau_{vu,mv}$ uzyskane w badaniach prof. Kubicy [22]

(8) W tym miejscu wskazane jest sformułowanie uwagi powszechnie znanej, że na cechy mechaniczne muru, takie jak wytrzymałość na ściskanie (także w złożonym stanie naprężeń na przykład ze ścinaniem), czy na rozciąganie, wpływają jego elementy składowe, to jest rodzaj elementu murowego oraz sposób jego powiązania (zaprawa, rodzaj spoiny lub ewentualne zbrojenie). Cechy mechaniczne muru z betonu komórkowego o tych samych cechach fizyko-technicznych materiału kształtują się inaczej przy spoinie grubej (od 6 do 15 mm) a inaczej spoinie cienkiej (od 1 do 3 mm). Ważna jest też wytrzymałość zaprawy zastosowanej. Dla zobrazowania tego stwierdzenia przedstawiono w Tablicy 3.1-3 wytrzymałość charakterystyczną muru na ściskanie według normy PN-B-03002:1999 [124] zestawione w publikacji Lewicki, Jarmontowicz, Kubica [29].

f_b [MPa]	$f_{k,PN}$ [MPa]			
	zaprawa zwykła 1 MPa	zaprawa zwykła 2 MPa	zaprawa zwykła 3 MPa	zaprawa do cienkich spoin
2,0	0,8	0,9	1,2	1,3
3,0	1,0	1,2	1,5	2,0
4,0	1,2	1,5	1,8	2,5
5,0	1,4	1,7	2,1	2,8
6,0	1,6	1,9	2,4	3,2

Tablica 3.1-3 Wartość $f_{k,PN}$ dla murów z bloczków z betonu komórkowego [29]

3.2. Zarysowania w konstrukcjach murowych

(1) Dla ułatwienia rozważań na temat zarysowań celowe jest ustalenie na wstępie określeń przy opisywaniu tego typu uszkodzeń [30]. Do określeń tych należą:

rysa – rozspojenie nie przechodzące przez całą grubość konstrukcji murowanej, np. ściany;

pęknięcie – rozspojenie przechodzące przez całą grubość konstrukcji;

rozwarcie rysy – odstęp między krawędziami mierzony prostopadłe do krawędzi rysy na powierzchni;

głębokość rysy – zasięg zarysowań w głąb muru mierzony prostopadłe do powierzchni zewnętrznej;

długość rysy – długość zarysowania na powierzchni mierzona wzdłuż przebiegu rysy;

kształt rysy – tj. kształt jej śladu na ścianie określa się opisowo, np. prosta, zakrzywiona;

położenie rysy – określa się współrzędnymi jej początku i końca;

przebieg rysy – określa się jej układ, np. pionowa, pozioma, przez spoiny, cegły, jednolita, niejednolita.

(2) Zjawisko zarysowania ścian, w budynkach nowo wznoszonych zarówno w ścianach konstrukcyjnych, jak i wypełniających (ściany działowe, ściany osłonowe), obserwowane jest od wielu lat i może być wywołane wieloma jednocześnie działającymi przyczynami. Z uwagi na przyczyny ich powstawania można wyróżnić dwie grupy, tj. zarysowania wynikające z przyczyn konstrukcyjno-projektowych oraz zarysowania wynikające z wykonawstwa. Do tych pierwszych zaliczyć można zarysowania wynikające m.in. z odkształceń stropu, błędów konstrukcji ścian, niedostateczna sztywność dachu, nierównomierne obciążenie ścian, wysychanie i kurczenie się oraz całościowe odkształcenie ścian. Do drugiej grupy zaliczamy m.in. zarysowania wynikające z niepoprawnego wykonania spoin lub użycia złej zaprawy murarskiej, niewłaściwym przewiązaniem muru (pionowe spoiny jedna nad drugą), styki elementów wykonanych z różnych materiałów konstrukcyjnych, nie zachowanie odpowiednich warunków termiczno-wilgotnościowych materiału. Przykłady zarysowań dla obu grup pokazano na rysunku 3.2-1.

(3) Mur jako element budynku projektowany jest głównie z uwagi na jego decydujący parametr, jakim jest wytrzymałość na ściskanie, który wynika z jego podstawowych właściwości, czyli pracy na ściskanie prostopadłe do układu warstw. Właściwość ta od dawna była wykorzystywana przy budowie łuków i sklepień, gdzie cegły były układane wzdłuż linii intuicyjnie zbliżonych do linii ciśnień. Niska wytrzymałość na rozciąganie w murze ma duże znaczenie przy przekroczeniu stanu granicznego zarysowania. Istotny jest tutaj opór stawiany naprężeniom ścinającym przez poszczególne składniki muru, szczególnie zaprawy w spoinie wspornej.



Rys. 3.2-1 Schematy zarysowań konstrukcji murowych.

(4) Małyszko i Orłowicz omawiając w swojej publikacji temat zarysowań i ich napraw [31] opisali przede wszystkim mechanizmy zarysowań muru w podstawowych stanach naprężeń, morfologię rys, sposoby ich monitorowania oraz zagadnienie napraw.

W praktyce dość często występuje konieczność przejmowania przez konstrukcję murową obciążeń powodujących występowanie w płaszczyźnie muru, oprócz sił normalnych, także sił stycznych. Przy założeniu płaskiego stanu naprężeń, naprężenia główne σ_x , σ_y mogą mieć różną orientację w stosunku do poziomego układu warstw i powodować pojawienie się nieprze-

widocznych naprężeń rozciągających. W przypadku różnych kątów między kierunkiem naprężeń głównych a kierunkiem spoin wspornych na układ rys wpływają słabsze na ogół warstwy spoin. Na rysunku 3.2-2 przedstawiono przykładowy układ rys w różnych stanach naprężenia i różnych kierunkach spoin, otrzymany na podstawie badań modelowych przeprowadzonych w płaskim stanie naprężenia w skali 1:2. Słabe warstwy spoin wspornych zakłócają układ rys, można jednak przyjąć, że w przedstawionych stanach naprężeń rysy są prostopadłe do kierunku rozciągania lub równoległe do ściskania [31].

Kąt θ	Rozciąganie	Ściskanie	Ściskanie z rozciąganiem
0°			
22,5°			
45°			
67,5°			
90°			

Rys. 3.2-2 Układ rys w murze w różnych stanach naprężenia i przy różnych kierunkach spoin na podstawie badań Page'a [32] i Dhanasekara [33]

(5) Zgodnie z raportem o awariach i katastrofach konstrukcji budowlanych opracowanym przez prof. Runkiewicza [34] najczęściej spotykanymi przyczynami zarysowań i spękań budynków murowych są:

- podłoże i sposób posadowienia (60-70 %),
- przeciążenie (15-20 %),
- ruchy termiczne (10-15%),
- skurcze i pęcznienie (5-8 %),
- wpływy dynamiczne i wyjątkowe (2-5 %).

(6) W konstrukcjach murowych rysy i spękania z uwagi na ich charakter podzielić można na cztery podstawowe grupy [31]:

- rysy i spękania pozorne występujące na okładzinach i wyprawach, nie sięgające elementów konstrukcyjnych,
- rysy i spękania spowodowane zmianą stateczności konstrukcji wynikające ze zmiany warunków gruntowo-wodnych, robót ziemnych, przebudowy, błędów projektowania lub wykonawstwa itp.,
- rysy i spękania związane ze zjawiskami fizyko-chemicznymi zachodzącymi w materiale ścian (skurczowe, pęcznieniowe, termiczne, wilgotnościowe itp.),
- rysy i spękania przeciążeniowe.

(7) W niniejszej rozprawie jak już wspomniano wcześniej rozważać będziemy rysy i spękania związane ze zjawiskami fizyko-chemicznymi zachodzącymi w murze z autoklawizowanego betonu komórkowego. Zjawiska te były między innymi tematem pracy doktorskiej Pielasa [35]. Dowiadujemy się, że możliwość powstania rys skurczowych w elementach z betonu komórkowego zależy od kilku składowych: charakteru zmienności pól wilgoci, charakterystyki skurczowej betonu, odkształcalności granicznej, wytrzymałości na rozciąganie oraz od stopnia ograniczenia odkształceń. Analizując możliwości powstania rys należy pamiętać, że z biegiem czasu występują tu dwie przeciwstawne sobie tendencje. Z jednej strony wytrzymałość betonu wzrasta z uwagi na jego wiek i malejącą wilgotność, a wpływ pęcznienia redukuje wielkość naprężeń skurczowych. Z drugiej strony, w miarę upływu czasu, rośnie wielkość współczynnika sprężystości, a w miarę spadku wilgotności – rośnie współczynnik odkształcalności skurczowej co prowadzi do wzrostu naprężeń. Pielas stwierdza ponadto, że redukcja

naprężeń skurczowych wywołana pęczaniem ulega, po dostatecznie długim okresie czasu, ograniczeniu w skutek czego ryzyko powstania rys może wzrosnąć.

(8) Kontynuując analizę wyników pracy doktorskiej Pielasa należy stwierdzić, że najmniejsze prawdopodobieństwo powstawania rys skurczowych jest w betonie komórkowym technologii Unipol z kruszywem piaskowym, gdyż charakteryzuje się on stosunkowo małym oporem dyfuzyjnym oraz niską wilgotnością krytyczną, dużymi odkształceniami granicznymi, małymi odkształceniami skurczowymi oraz stosunkowo dużą wytrzymałością na rozciąganie.

(9) W rozdziale tym, warto napisać jeszcze kilka słów na temat monitorowania rys. Powinno ono obejmować układ (położenie i przebieg rys na obu powierzchniach ściany), rozwarcie, głębokość i długość rysy, przesuw jej krawędzi, punkty zakończenia rozwidleń, zmiany opisanych wcześniej rys, czy odnotowanie nowopowstałych. Co do metod poniżej omówiono kilka wybranych.

Najważniejszą charakterystyką rysy jest jej rozwarcie, które można mierzyć tradycyjnie lupa podziałową. Za minimalne rozwarcie rysy jest uważana wartość (0,05-0,1) mm [36]. Wartość ta dotyczy zarówno początku, jak i końca rysy. Zmiany rozwarcia rys bada się za pomocą plomb kontrolnych (gipsowych, cementowych, stalowych, szklanych). Do dokładniejszych pomiarów można zastosować tensometr mechaniczny i nasadowy, z czujnikami indukcyjnymi lub – w wyjątkowych sytuacjach – za pomocą metody mikrofotograficznej [37]. Zmiany rozwarcia rys oraz ich układ można również inwentaryzować za pomocą fotografii na przykład cyfrowej. Natomiast głębokość rys może być zmierzona na przykład cienką blaszką z kalibracją.

(10) Podsumowując analizę literaturową w zakresie zarysowań i uwzględniając specyfikę właściwości mechanicznych muru z autoklawizowanego betonu komórkowego warto podkreślić, iż konstrukcje tego typu są w sposób szczególny podatne na zmiany temperaturowo-wilgotnościowe elementu murowego. W wyniku takich zmian obserwowane są odkształcenia betonu komórkowego w postaci skurczu lub pęcznienia, które w konsekwencji mogą być powodem zarysowań i pęknięć. Należy mieć również świadomość, iż ruchy termiczne, skurcz i pęcznienie to przyczyna około 20 % awarii budowlanych, które niekoniecznie są zagrożeniem bezpieczeństwa budowli.

Ponadto przy analizie konkretnych zarysowań w murze należy mieć świadomość, że rysy układają się wzdłuż linii głównych naprężeń w murze, co pomaga określić między innymi przyczyny ich powstawania.

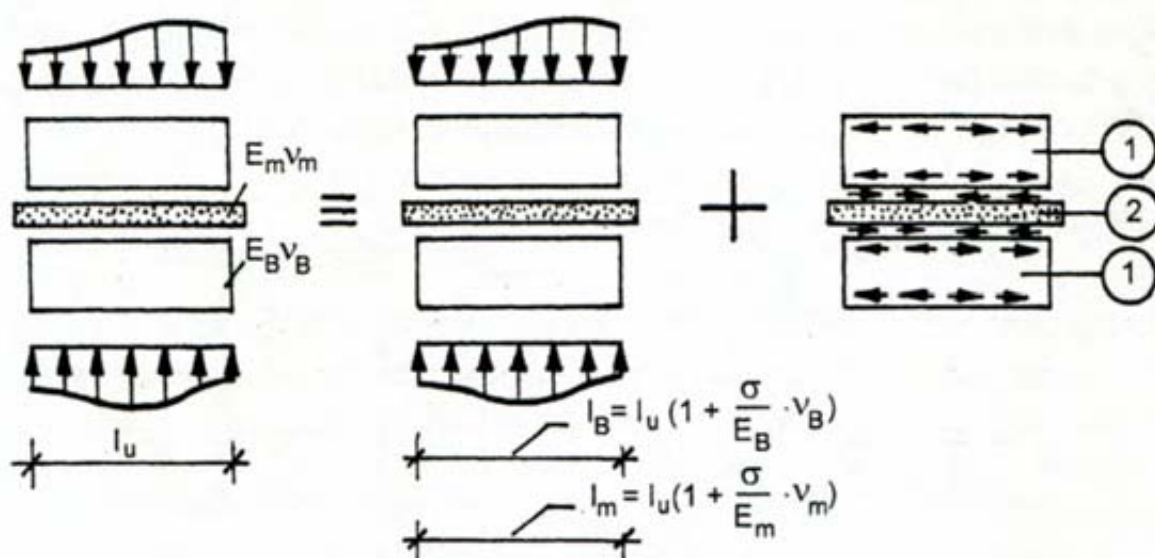
3.3. Naprężenia w murze

(1) Zarysowanie w konstrukcji budowlanej jak ogólnie wiadomo jest konsekwencją przekroczenia naprężeń granicznych wywołanych siłami zewnętrznymi. W poprzednim rozdziale skoncentrowano się na zagadnieniu zarysowań w konstrukcjach murowych pomijając po części temat stanu naprężeń wewnętrznych i obciążeń zewnętrznych muru (sygnalizując je jedynie). Rozważając podstawowy element konstrukcji murowej jakim jest ściana (mur) i zarysowania w nim powstające, nie sposób nie omówić zjawisk zachodzących wewnątrz konstrukcji, jako przyczyn zarysowania. Sposób zarysowania, czyli zniszczenia struktury materiału, wynika z układu sił działających na ośrodek. W pierwszej kolejności warto wyróżnić podstawowe schematy obciążeń siłami zewnętrznymi muru:

- ściskanie jednoosiowe,
- ściskanie mimośrodowe,
- ściskanie nieprostopadłe do płaszczyzny spoiny wspornej,
- ściskanie dwuosiowe,
- ścinanie w kierunku równoległym lub prostopadłym,
- rozciąganie osiowe,
- rozciąganie przy zginaniu prostopadłym do płaszczyzny ściany,
- rozciąganie przy zginaniu,
- mur w złożonym stanie naprężenia (np. ścinanie ze ściskaniem).

(2) Trudno tu omawiać wszystkie z wyżej wymienionych schematów obciążenia muru, natomiast uznano za celowe omówienie kilku z nich, które brano pod uwagę przy projektowaniu stanowiska badawczego murów na potrzeby zaproponowanych w niniejszej pracy badawczej badań własnych. W porównaniu z konstrukcjami stalowymi, betonowymi, żelbetowymi, czy drewnianymi konstrukcje murowe cechują się największą niejednorodnością, wykazują bardzo wyraźną anizotropię. Zachowanie się i nośność konstrukcji murowych bada się od wielu już lat praktycznie na całym świecie.

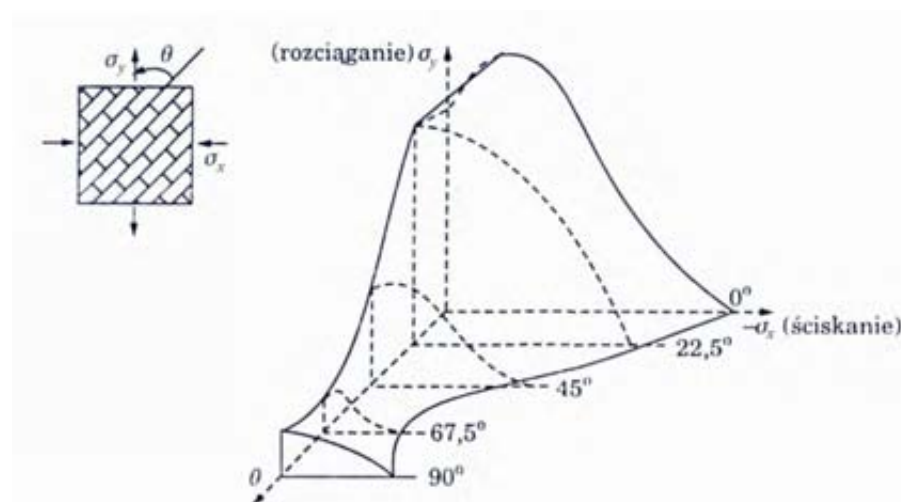
(3) Podstawowym schematem obciążenia muru jest ściskanie jednoosiowe. Modelem obrazującym powstawanie sił wewnętrznych w ściskanym murze jest przedstawiony na rysunku 3.3-1. Powstające siły wynikają z różnej odkształcalności elementów murowych i zastosowanej zaprawy, określonej przez moduł sprężystości E i jego współczynnik odkształcalności poprzecznej ν (współczynnik Poissona). Nośność zaprawy murowej w spoinie jest znacznie większa niż wynikałoby to z badań wytrzymałościowych na niezależnych próbkach, ponieważ elementy murowe są mniej odkształcalne i powodują ograniczenia odkształceń poprzecznych zaprawy w spoinie wspornej. Odkształcenia te powodują pojawienie się sił rozciągających w elementach murowych, a na skutek nierównomiernych odkształceń pionowych ściskanej zaprawy, powstają w tych elementach znaczące naprężenia ścinające. Efektem takiego stanu są pionowe rysy zarówno w elemencie jak i zaprawie [31].



Rys. 3.3-1 Model obrazujący warunki powstawania sił wewnętrznych w ściskanym murze, wynikłych z różnej odkształcalności elementów murowych i zaprawy, 1- rozciąganie poprzeczne, 2- ściskanie poprzeczne [31].

(4) Kontynuując powyższej zobrazowany stan naprężeń przy ściskaniu można stwierdzić, że im cieńsze spoiny i im mniejsza odkształcalność poprzeczna zaprawy, a także im większej wysokości są elementy murowe, tym mniej obecności zaprawy, co podwyższa wytrzymałość muru. Im mniej elementy murowe różnią się w jednej warstwie swoją wysokością i im staranniejszą są ułożone, tym większa jest wytrzymałość muru.

(5) Warstwowa, dwuskładnikowa i niejednorodna budowa muru o różnych cechach wytrzymałościowych spoin i cegieł powoduje powstawanie różnych mechanizmów zniszczenia. Możliwe jest np. zarysowanie po linii ukośnej i schodkowej wskutek rozdzielenia spoin od cegieł w wyniku rozerwania przez rozciąganie lub ścięcia w spoinach, a najprawdopodobniej wg mechanizmu łącznego, uwzględniającego też rozerwanie cegieł. Niska wytrzymałość muru na rozciąganie oraz jego kruchość sprawiają, że jest on bardzo podatny na zarysowania wywołane rozciąganiem. Ustalenie czy rysa ukośna jest wywołana ścięciem wzdłuż jej kierunku, czy też prostopadłym do niej rozciąganiem, wymaga zastosowania odpowiedniego kryterium wytrzymałościowego. Warto wspomnieć, że ze względu na warstwową budowę muru, sama znajomość naprężeń głównych nie wystarcza do określenia bezpiecznego obszaru ich wartości. W odróżnieniu od izotropowych materiałów jednorodnych istotna jest także orientacja naprężeń [31]. Na rysunku 3.2-2 przedstawiono zmianę kształtu linii granicznych określających bezpieczny obszar naprężeń przy ściskaniu z rozciąganiem w zależności od różnych wartości kąta θ między naprężeniem głównym σ_y a układem warstw uzyskanych w badaniach modelowych wg Page'a [32].



Rys. 3.3-2 Kontury graniczne określające bezpieczne wartości naprężeń przy rozciąganiu ze ściskaniem, w zależności od orientacji osi głównych względem układu warstw wg Page'a [32].

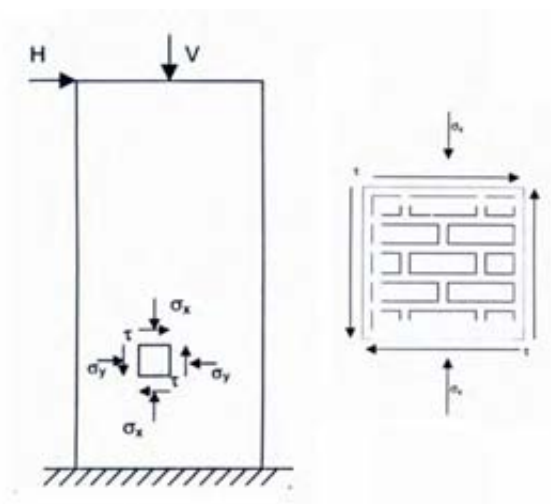
(6) Naprężenia styczne w murze powstają w połączeniu z naprężeniami normalnymi. Mechanizm zniszczenia zależy wówczas od względnego stosunku tych naprężeń i wytrzymałości spoin [31, 38, 39, 40]. Przy przewadze ściskania mechanizm zarysowania jest zbliżony do

mechanizmu przy jednoosiowym ściskaniu, a w warunkach większych naprężeń ścinających mogą się pojawić zarysowania ukośne przechodzące przez cegłę i spoiny (mocna zaprawa) lub tylko przez warstwy spoin wspornych (słaba zaprawa).

(7) W przypadku złożonego stanu naprężenia z uwagi na wyraźne występowanie anizotropii w konstrukcji murowej nie jest sprawą prostą scharakteryzować zachowanie się muru. Można posłużyć się przy opisywaniu stanu wyężenia w konstrukcji różnego rodzaju hipotezami wytrzymałościowymi, zaczynając od „klasycznych” (np. de Saint Venanta, Coulomba, Mohra) na wieloparametrowych kryteriach Druckera-Pragera, Williama-Warnke kończąc. Rozwój obliczeń numerycznych w szczególności wykorzystujących Metodę Elementów Skończonych (MES) pozwala na bardzo skomplikowane modelowanie konstrukcji wykorzystujących teorie i kryteria wyężeniowe opracowane przed kilkunastu czy kilkudziesięciu laty. Przykładem tego typu rozwiązań w odniesieniu do murów może być kryterium Gienijewa sformułowane pod koniec lat 70. [41].

(8) Próby formułowania prostych kryteriów wyężeniowych na bazie ogólnie znanych klasycznych hipotez wyężeniowych mogą jednak dawać dobre wyniki, o czym świadczą losy kryterium Manna-Müllera. Podstawą do opracowania tego kryterium była znana ogólnie zależność Coulomba-Mohra, na której podstawie określono warunki graniczne w zależności od zaistnienia danego mechanizmu zniszczenia. W latach 70. Mann i Müller weryfikowali bardzo szeroko wyniki swoich rozważań teoretycznych z rezultatami badań doświadczalnych, zarówno swoich (w Darmstademie) jak i innych (badania Schneidera-Schnella w Stuttgardzie oraz brytyjskie Hendry`ego i Sinha w Edynburgu) [42, 43, 44,].

(9) Zgodnie z teorią ścinających naprężeń niszczących według Manna-Müllera [45, 46, 47] do rozważań stanu naprężeń dla ścian murowych przyjęto tarczę obciążoną przez siły pionowe i poziome (Rys. 3.3-3). Wycinając myślowo fragment z rozważanej tarczy i zaniedbując niewielkie ściskające naprężenia normalne w kierunku równoległym do linii spoin wspornych otrzymujemy wycinek muru obciążony naprężeniami ściskającymi pionowymi oraz w obu kierunkach naprężeniami ścinającymi.



Rys. 3.3-3 Stan naprężeń w murze według Manna-Müllera [45]

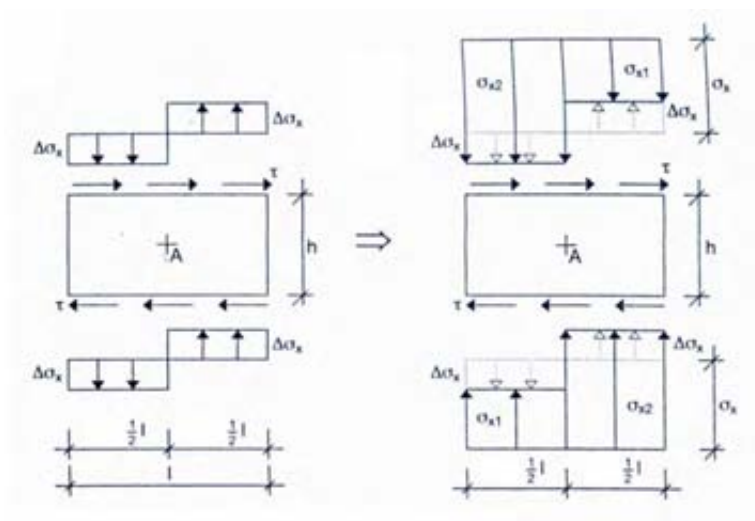
(10) Charakter niejednorodności materiału, jakim jest mur, ujęty jest w sposób istotny we właściwościach elementów murowych i zaprawy, jak również w wykształceniu spoin pionowych i wspornych. Przy założeniu, że przez spoiny pionowe nie są przenoszone ani naprężenia ściskające ani ścinające, można uznać model, w którym następuje zniesienie naprężeń stycznych w rozpatrywanej tarczy. Model ten bazuje na stanie równowagi pojedynczego elementu długości l i wysokości h . Do spełnienia stanu równowagi w elemencie murowym potrzebna jest para sił o przeciwnym zwrocie wynikających z naprężeń stycznych τ w spoinie wspornej. Może to powstać, kiedy normalne naprężenia σ_x zostaną podzielone na długości elementu, co przedstawiono na rysunku 3.3-4. W modelu tym założeniem jest, że naprężenia σ_x w połowie długości elementu są stałe, a w środku, tzn. w obszarze gdzie znajduje się spoina pionowa warstwy dolnej występuje skok naprężeń o wielkość $2\Delta\sigma_x$. Istotą tego modelu jest regularne wiązanie wozówkowe ze stałym wymiarem łączącym $l/2$.

Przy obliczeniu wielkości naprężeń $\Delta\sigma_x$, σ_{x1} i σ_{x2} odniesienie jest do $\Sigma M_A = 0$:

$$\tau \cdot l \cdot \frac{h}{2} \cdot 2 = \Delta\sigma_x \cdot \frac{l}{2} \cdot \frac{l}{4} \cdot 4 \quad (\text{Wzór 3.3-1})$$

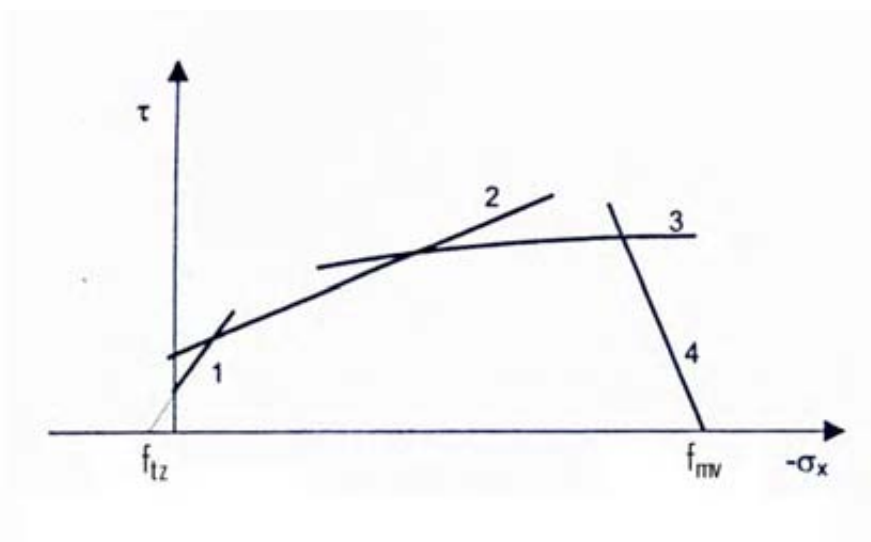
$$\Delta\sigma_x = 2 \cdot \tau \cdot \frac{h}{2} \quad (\text{Wzór 3.3-2})$$

$$\sigma_{x1,x2} = \sigma_x \pm 2 \cdot \tau \cdot \frac{h}{2} \quad (\text{Wzór 3.3-3})$$



Rys. 3.3-4 Naprężenia w pojedynczym elemencie [45]

(11) Zestawienie przyczepności dwóch komponentów muru, tj. zaprawy i elementu murowego, prowadzi do różnorodnych form zniszczenia w wyniku oddziaływujących kombinacji obciążeń sił normalnych i stycznych do powierzchni wspornych elementu. Uwzględniając przytoczone wcześniej założenia rozróżnić można w zależności od zmiany naprężeń normalnych cztery formy uszkodzenia muru. Dla każdej z tych form zniszczenia muru zgodnie z teorią Manna-Müllera określono kryteria.



Rys. 3.3-5 Krzywe graniczne według Manna/Müllera [45]

Kryterium I: Zniszczenie z powodu oderwania w spoinie wspornej – przy niewielkim obciążeniu σ_{x1} może nastąpić zniszczenie w wyniku wzrostu naprężeń normalnych rozciągających

osiągających co do wartości przyczepność zaprawy do elementu murowego f_{tz} (Rys 3.3-5, prosta „1”). Z warunku $\sigma_{xl} \leq f_{tz}$ oraz ze wzoru 3.3-3 wynika kryterium zniszczenia opisane wzorem:

$$\tau_R = (f_{tz} + \sigma_x) \cdot \frac{l}{2h} \quad (\text{Wzór 3.3-4})$$

Kryterium II: Zniszczenie spoiny wspornej z powodu tarcia – w przeciwieństwie do kryterium I występują tu wyższe naprężenia normalne σ_x w spoinie wspornej, a zniszczenie może nastąpić z powodu sił tnących. W przypadku ściskanej spoiny wspornej przy pojedynczym elemencie mogą występować zniszczenia wynikające z sił tarcia (Rys 3.3-5, prosta „2”). Uwzględniając przyczepność zaprawy do elementu murowego ze względu na ścinanie f_v w spoinie wspornej obowiązuje prawo tarcia dla maksymalnych naprężeń ścinających:

$$\tau_R = f_v + \mu \cdot \sigma_{xl} \quad (\text{Wzór 3.3-5})$$

Z definicji pomniejszonych wartości $\bar{f}_v$ dla przyczepności zaprawy do elementu murowego ze względu na ścinanie oraz $\bar{\mu}$ dla współczynnika tarcia wewnętrznego w zaprawie spoiny można wyrazić minimalne naprężenie σ_{xl} przez naprężenie średnie σ_x :

$$\bar{f}_v = f_v \cdot \frac{1}{1 + \mu \cdot \frac{2h}{l}} \quad (\text{Wzór 3.3-6})$$

$$\bar{\mu} = \mu \cdot \frac{1}{1 + \mu \cdot \frac{2h}{l}} \quad (\text{Wzór 3.3-7})$$

Z czego wynika kryterium zniszczenia opisane wzorem:

$$\tau_R = \bar{f}_v + \bar{\mu} \cdot \sigma_x \quad (\text{Wzór 3.3-8})$$

Kryterium III: Zniszczenie spoiny wspornej z powodu przekroczenia wytrzymałości na rozciąganie elementu murowego – przy dalszym wzroście obciążenia mogą pojawić się wewnątrz elementu murowego ukośne rozciągające naprężenie główne σ_I , które prowadzą do zniszczenia, kiedy wytrzymałość elementu na rozciąganie zostanie przekroczona (Rys 3.3-5,

prosta „3”). Przy ich określeniu potrzebne jest przynależne naprężenie ścinające τ_{st} w elemencie.

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + (\tau_{st})^2} \quad (\text{Wzór 3.3-9})$$

Z teoretycznych rozważań jako bazy teorii belki z elementu murowego o formacie $h/l=1/2$ wynika dla naprężenia ścinających wewnątrz elementu jako $\tau_{st}=2,5\tau$. Dokładne rozważanie z pomocą metody elementów skończonych (MES) w [48] wynika maksymalne naprężenie ścinające wewnątrz elementu jako $\tau_{st}=2,3\tau$. Zestawiając ukośne rozciągające naprężenie główne σ_1 z wytrzymałością elementu na rozciąganie f_{tc} , tak konsekwentnie dla kryterium zniszczenia zastosowanie $\tau_{st}=2,3\tau$ otrzymano:

$$\tau_R = \frac{f_{tc}}{2,3} \cdot \sqrt{1 + \frac{\sigma_x}{f_{tc}}} \quad (\text{Wzór 3.3-10})$$

Kryterium IV: Zniszczenie muru z powodu wysokiego naprężenia ściskającego – odpowiednio modelem zniszczenia według Manna-Müllera jest zapewnienie równowagi elementu murowego w stanie podwyższonych naprężeń ściskających wymaganych w połowie elementu. Przekroczenie tych naprężeń ściskających wytrzymałości muru na ściskanie prowadzi do zniszczenia (Rys 3.3-5, prosta „4”). Z tego wynika uwzględniając we wzorze 3.3-3 wytrzymałość muru na ściskanie kryterium zniszczenia jako:

$$\tau_R = (f_{mv} + \sigma_x) \cdot \frac{l}{2h} \quad (\text{Wzór 3.3-11})$$

(12) Z opisanych powyżej kryteriów zniszczenia [47] wynika, że model według Manna-Müllera przy kryterium 1, 2 i 4 dopuszcza uwzględnienie formatu elementu murowego h/l , podczas gdy dla kryterium 3 dopuszcza format elementu $h/l=1/2$. To jest do uwzględnienia, jeżeli model zniszczenia według Manna-Müllera jest przenoszony z innych formatów elementów murowych na wielkoformatowe. W rozważanym kryterium należy mieć świadomość, że dotyczy ono w głównej mierze smukłych elementów, dla których naprężenia wyznaczyć można analogicznie jak w przypadku elementów prętowych. Kryterium to dla murów z elementów o długości zbliżonej do wysokości osiąga wyniki obliczeń znacznie odbiegające od wyników uzyskanych w badaniach. Modyfikacją tego kryterium, w którym uwzględniono

sposób wiązania i wpływ kształtu elementów murowych zajmowali się Graubner i Simon [49]. Powyższą modyfikację kryterium potwierdził w swoich badaniach Schubert prowadząc doświadczenia na bloczkach betonowych [50], jednak brak jest wyczerpujących badań weryfikujących poprawność tego założenia. Dla przypadku pionowego ścinania, zakładającego zniszczenie wyłącznie przez ukośne zarysowanie elementów murowych i zaprawy, ważne kryterium przedstawił prof. Kubica w swojej monografii. Kryterium to opracowano bazując na klasycznej teorii dwuosiowego stanu naprężenia, z wykorzystaniem eliptycznej powierzchni plastyczności Hilla [22].

(13) Szeroki program badań w skali naturalnej prostokątnych fragmentów murów o wymiarach 1,0 m x 1,0 m, obciążonych dwuosiowo zrealizowano w Szwajcarii w latach osiemdziesiątych [31]. Badano mur z ceramicznych pustaków drażonych [51], z kształtek ceramicznych i wapienno-piaskowych [52] oraz z pustaków betonowych [53]. Temat zagadnień dotyczących określenia wytrzymałości na ściskanie murów niezbrojonych został szeroko omówiony przez autorów krajowych [54, 55, 56, 57] i zagranicznych [58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68], lecz warto pod koniec analizy literaturowej zasygnalizować ważniejsze prace badawcze nad konstrukcjami murowymi zbrojonymi.

(14) Obszerny program badań na temat nośności i odkształcalności ścian murowych z udziałem zbrojenia w spoinach wspornych został zrealizowany na Politechnice Śląskiej. Mury te były analizowane z uwagi na różnego rodzaju obciążenia i przy zastosowaniu różnych typów zbrojenia. Drobiec w swojej pracy [69] analizował mury obciążane osiowo w sposób równomierny w linii pionowej, dla których to schematów zaproponował model numeryczny służący do określenia wpływu zbrojenia na odkształcenia spoiny wspornej. Jednym z wniosków płynących z przeprowadzonych tutaj badań jest to, że zbrojenie murów w spoinie wspornej ogranicza odkształcenia zarówno w kierunku podłużnym jak i poprzecznym, i że wpływa korzystnie na nośność i rysoodporność muru. Wniosek ten praktycznie przekreśla możliwość stosowania w spoinach wspornych niepowiązanych ze sobą prętów podłużnych. Największy wzrost nośności i rysoodporności w porównaniu z murami niezbrojonymi uzyskano w przypadku ścian ze zbrojeniem w postaci siatek.

(15) Badaniem zbrojonych ścian murowych poddawanych ścinaniu w kierunku pionowym i poziomym zajmowali się odpowiednio Piekarczyk [70] i Jasiński [71]. Analizując wnioski prowadzonych prac badawczych nie zaprzeczalnym faktem jest, że zastosowanie stalowego

zbrojenia układanego w spoinach wspornych ma pozytywny wpływ na wytrzymałość, nośność i odkształcalność konstrukcji murowych. Potwierdza się również, że najbardziej korzystny wpływ na wytrzymałość muru ma zbrojenie poziome typu „kratownicza”. W obydwu przypadkach, tj. ścinania w kierunku pionowym jak i poziomym zbrojenie spoiny wspornej nie zmienia charakteru zarysowania i zniszczenia ścian. Przy wzroście naprężeń ściskających notuje się podwyższenie wartości naprężeń rysujących i niszczących. Zagadnienie ścinania w konstrukcjach murowych pośrednio związane jest z problematyką niniejszej rozprawy, natomiast w literaturze przedmiotu zostało przedstawione w szerokim zakresie różnych schematów pracy konstrukcji murowej. Dla zasygnalizowania tematu należałoby tu wymienić mury wypełniające ramy żelbetowe i stalowe przy różnego rodzaju obciążeniu (monotonicznym lub cyklicznym) [72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85], mury oparte na podatnych belkach [86, 87, 88, 89], czy przypadek ścinania w podporowych strefach belek murowych [90, 91, 92, 93].

(17) Podsumowując na tym etapie analizę dostępnej literatury stwierdzić należy, iż ocena nośności muru z uwagi na jego niejednorodność musi być wykonywana z uwzględnieniem decydującego mechanizmu zniszczenia. Cechy mechaniczne muru zależą od charakterystyk elementów składowych (elementy murowe plus zaprawa) oraz ich wzajemnej współpracy przy założeniu dobrej jakości wykonania. Analizowany w niniejszej rozprawie model zarysowania muru z autoklawizowanego betonu komórkowego oraz jego mechanizm zniszczenia w kierunku prostopadłym do spoin wspornych jednoznacznie wskazuje na powstające w ustroju poziome naprężenia rozciągające.

Istotne jest również to, że w wielu przypadkach zarysowanie ściany może następować między warstwą elementu murowego a zaprawy i wtedy normowa początkowa wytrzymałość na ścinanie ma charakter wytrzymałości stykowej, nie można jej określić na podstawie cech wytrzymałościowych uzyskanych z prób tylko z cegłą lub tylko z zaprawą murową. Wartość wytrzymałości początkowej na ścinanie zależy głównie od przyczepności zaprawy do elementu murowego [146].

3.4. Mury poddane rozciąganiu

(1) Kontynuując analizę zagadnienia nośności muru i jego zarysowań wyróżnionym tu obszarem wiedzy jest temat naprężeń rozciągających w konstrukcji murowej i wytrzymałości z tym

związanej, ponieważ zagadnienia te są najbliższe rozważanym w badaniach własnych modelom. Wytrzymałość muru na rozciąganie porównywalnie jak wytrzymałość muru na ściskanie jest funkcją charakterystyk fizyko-technicznych elementów składowych, choć większą rolę odgrywają tutaj wytrzymałość zaprawy oraz jej przyczepność do elementów murowych, która jest zależna z kolei od właściwości absorpcyjnych materiału elementu murowego. W przypadku wytrzymałości muru na rozciąganie ogromny wpływ ma także jakość wykonania muru (szczególnie stopień wypełnienia spoin zaprawą) oraz wpływy reologiczne, czyli skurcz i pęcznienie. To, że wpływ powyższych czynników nie powinien być ignorowany świadczyć może stanowisko szwedzkie [29, 94] prezentowane w uwagach i propozycjach zmian do Eurokodu 6.

(2) Wytrzymałość na rozciąganie ma istotne znaczenie ze względu na stan graniczny użyteczności, czyli pojawienie się zarysowań w murze. Zwykle można wyróżnić dwa rodzaje tego parametru, to jest wytrzymałość na rozciąganie osiowe f_t (Wzór 3.4-1) oraz wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu f_x (Wzór 3.4-2). Parametry te można wyznaczyć z ogólnych zależności podanych poniżej.

$$f_t = \frac{F_{\max}}{A} \quad (\text{Wzór 3.4-1})$$

gdzie:

$F_{\max}$ - maksymalna wartość siły rozciągającej
 A - pole przekroju poprzecznego

$$f_x = \frac{M}{W} \quad (\text{Wzór 3.4-2})$$

gdzie:

M - maksymalna wartość momentu zginającego
 W - wskaźnik wytrzymałości przekroju, który dla elementu o przekroju prostokątnym wyraża się zależnością:

$$W = \frac{b \cdot h^2}{k} \quad (\text{Wzór 3.4-3})$$

w której, dla materiału liniowo sprężystego $k = 6$, natomiast dla materiału podlegającego uplastycznieniu $k < 6$ [29].

(3) Analizując metodykę badania wytrzymałości muru na rozciąganie osiowe można wyróżnić wytrzymałość określaną w wyniku osiowego rozciągania oraz wytrzymałość wyznaczoną w sposób umownie nazwany „przez rozłupywanie” próbek, gdzie elementy próbne poddaje się ścisłaniu (kierunek działania siły ściskającej tworzy z płaszczyzną spoin wspornych kąt różny od 0° i 90°). Również przy oznaczaniu wytrzymałości na rozciąganie przy osiowym działaniu siły zastosowanie ma znana z wcześniejszych rozważań zależność wytrzymałości od rzeczywistego mechanizmu zniszczenia. Przykładowo dla przyjętego w rozprawie modelu, gdy obciążenie działa w kierunku równoległym do spoin wspornych, to przyjmując ogólnie, zniszczenie możliwe jest tylko w postaci rysy biegnącej w kierunku prostopadłym do tej spoiny. Należy tu jednak zaznaczyć, iż pojawiają się dwa schematy zniszczenia, w jednym rysa przebiega przez element murowy, w drugim natomiast przez spoinę przewiazaną bez zniszczenia elementu murowego. Jak wiadomo, w praktyce obciążenie zawsze przyłożone jest z pewnym niezależnym mimośrodem, który powoduje wystąpienie złożonego stanu naprężenia.

(4) W normie Eurokod 6 [10, 95, 96] nie ujęto tematu wytrzymałości muru na rozciąganie osiowe, natomiast rozważa się wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu w płaszczyźnie ściany, gdzie zniszczenie następuje w kierunku równoległym do spoin wspornych f_{xk1} lub prostopadłym f_{xk2} . Według normy dla murów wykonanych z autoklawizowanego betonu komórkowego układanych na zaprawie do cienkich spoin można przyjmować wytrzymałość muru według zaproponowanych równań:

$$f_{xk1,xk2} = 0,035 \cdot f_b \quad (\text{Wzór 3.4-4})$$

w murach z wypełnionymi spoinami pionowymi,

$$f_{xk2} = 0,025 \cdot f_b \quad (\text{Wzór 3.4-5})$$

w murach ze spoinami pionowymi niewypełnionymi.

(5) W Niemczech dość obszernie prowadzono analizy zagadnienia rozciągania muru w kierunku równoległym do płaszczyzny spoin wspornych, co znalazło odbicie w pracach Manna [97], Schuberta i Weschego [98, 99, 100], Backes'a [101] oraz przepisach normowych [102].

Zaproponowano opis matematyczny dla dwóch przypadków zniszczenia muru przy rozciąganiu w kierunku równoległym do spoiny wspólnej.

1° Dla zarysowania przebiegającego przez element murowy (Rys. 3.4-1 a)

$$f_t \cdot (h_u + t_m) \cdot 2 = f_{tc} \cdot h_u$$

$$f_t = f_{tc} \cdot \frac{h_u}{(h_u + t_m) \cdot 2} \Rightarrow 0,5 \cdot f_{tc} \cdot \frac{h_u}{h_u \cdot (1 + \frac{t_m}{h_u})}$$

$$f_t = 0,5 \cdot f_{tc} \cdot \frac{1}{1 + \frac{t_m}{h_u}} \quad (\text{Wzór 3.4-6})$$

gdzie:

- f_{tc} - wytrzymałość elementów murowych na rozciąganie,
- t_m - grubość spoiny,
- h_u - wysokość elementu murowego,

2° Dla zarysowania przebiegającego przez spoiny (Rys. 3.4-1 b)

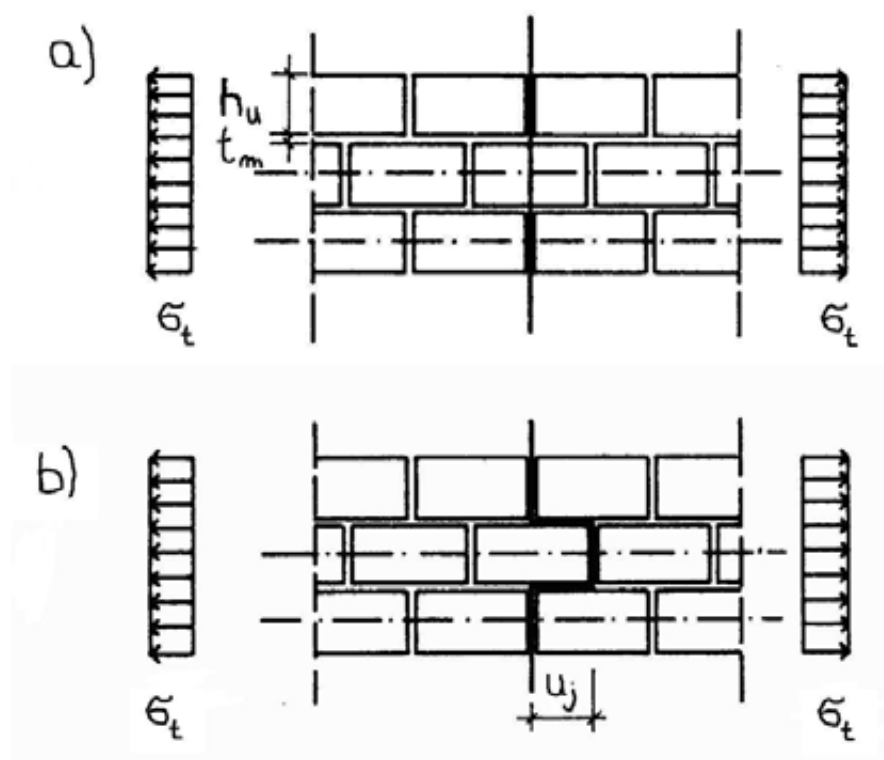
$$f_t \cdot (h_u + t_m) \cdot 2 = f_{vo} \cdot u_j \cdot 2$$

$$f_t = f_{vo} \cdot \frac{u_j \cdot 2}{(h_u + t_m) \cdot 2} \Rightarrow f_{vo} \cdot \frac{u_j}{h_u + t_m}$$

$$f_t = f_{vo} \cdot \frac{u_j}{h_u + t_m} \quad (\text{Wzór 3.4-7})$$

gdzie:

- u_j - wzajemne przesunięcie elementów murowych w murze,
- f_{vo} - średnia wartość początkowej wytrzymałości muru na ścinanie.



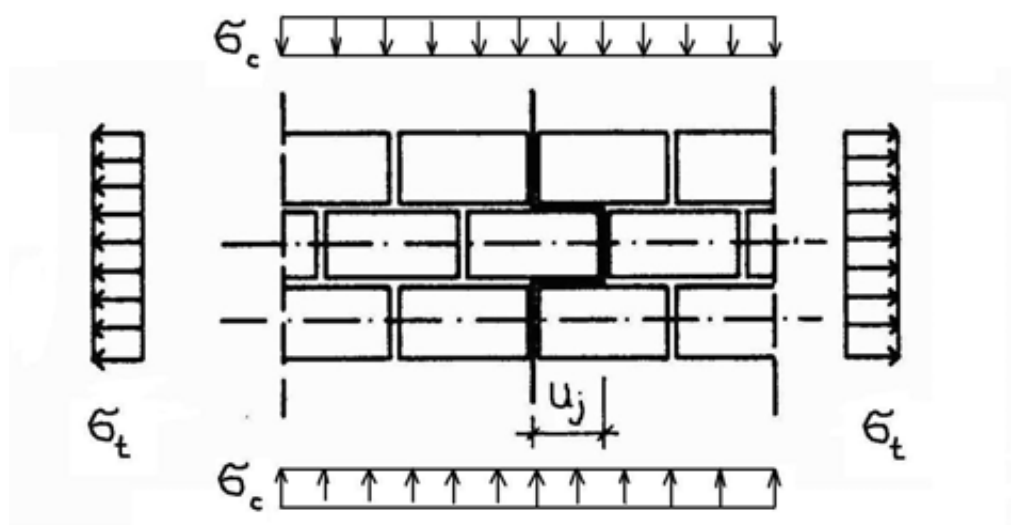
Rys. 3.4-1 Schematy zniszczenia muru poddanego rozciąganiu [98]

(6) Wzory 3.4-6 oraz 3.4-7 dotyczą wyłącznie rozciągania, natomiast gdy występują dodatkowo obciążenia wywołujące naprężenia ściskające σ_c , na przykład od ciężaru własnego ściany (Rys. 3.4-2), zależność 3.4-7 uzupełniona jest wtedy o składową iloczynu naprężenia σ_c i kąta tarcia wewnętrznego c_j , i przybiera postać:

$$f_t = f_{vo} \cdot \frac{u_j}{h_u + t_m} + c_j \cdot \sigma_c \quad (\text{Wzór 3.4-8})$$

gdzie:

- c_j - kąt tarcia wewnętrznego pomiędzy elementem murowym i zaprawą,
- σ_c - naprężenie ściskające.



Rys. 3.4-2 Schematy zniszczenia muru poddanego rozciąganiu [97]

(7) Prostota i dość uniwersalny charakter zaproponowanych we wzorach 3.4-6 do 3.4-8 zależności (brak współczynników określanych empirycznie) sprawiły, że zostały one wprowadzone do praktyki projektowej przez niemieckie przepisy normowe [103, 102] oraz literaturę przedmiotu [104]. Zagadnienie wytrzymałości muru na rozciąganie było badane w wielu ośrodkach na całym świecie. Część z nich dotyczy, tak jak przedstawione wyżej badania tak zwanego „czystego” rozciągania, część natomiast określenia wytrzymałości na rozciąganie przez „rozłupywanie”, gdzie w badaniach element poddawany jest osiowemu ścisnaniu siłą skupioną, w wyniku czego następuje „rozłupywanie” w płaszczyźnie występowania ekstremalnych naprężeń rozciągających [29]. Przykładem tego typu badań są prace amerykańskie Drysdale’a, Hamida i Heidebrehta [105]. Jednak z uwagi na charakter przyjętego w rozprawie programu badań nie zostaną tu omówione powyższe zagadnienia szczegółowo.

3.5. Charakterystyka materiałowa elementów murowych z betonu komórkowego i zapraw murowych

(1) Autoklawizowany beton komórkowy zaliczany jest do grupy betonów lekkich, tzn. betonów, których gęstość nie przekracza 1800 kg/m^3 . Betony lekkie dzielimy na: betony z wypełniaczami organicznymi (gęstość $600 \div 1500 \text{ kg/m}^3$), betony z kruszyw porowatych (gęstość $800 \div 1800 \text{ kg/m}^3$) oraz betony komórkowe (gęstość $400 \div 900 \text{ kg/m}^3$) [106]. Beton komórkowy jest lekkim sztucznym kamieniem porowatym powstałym w wyniku fizykochemicznego współdziałania między spoiwem i kruszywem w warunkach autoklawizacji wysokoprężnej w parze wodnej nasyconej o określonym ciśnieniu [107]. Jako materiał budowlany w zależności od przeznaczenia pełni funkcję zarówno konstrukcyjną jak i izolacyjną.

(2) Wyróżnia się następujące typy betonu komórkowego.

a. W zależności od rodzaju użytego spoiwa:

- ABK cementowy,
- ABK wapienny,
- ABK na spoiwie mieszanym.

b. W zależności od rodzaju użytego kruszywa:

- ABK na kruszywie piaskowym,
- ABK na kruszywie popiołowym,
- ABK na kruszywie mieszanym.

(3) Najbardziej charakterystycznymi cechami betonu komórkowego są niska gęstość oraz jego porowatość. W zależności od gęstości zmieniają się inne właściwości autoklawizowanego betonu komórkowego, takie jak:

- wytrzymałość,
- przewodność cieplna
- mrozoodporność
- nasiąkliwość
- izolacyjność akustyczna

W niniejszej rozprawie omówiono właściwości fizyczne betonu komórkowego, które mają bezpośredni wpływ na powstałe w warunkach zmian cieplno-wilgotnościowych zarysowania i pęknięcia w murze wykonanym z tego materiału.

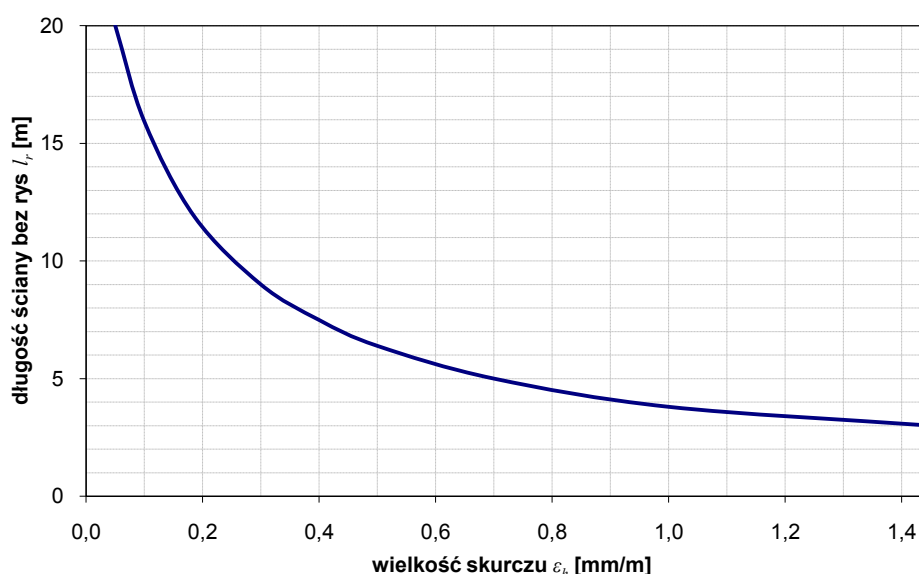
3.5.1. Skurcz przy wysychaniu ε_{cs}

(1) Zmiany objętościowe często są przyczyną uszkodzeń i prowadzą w efekcie do obniżenia wartości użytkowej budowli. Jak wiadomo, materiały budowlane pod wpływem czynników zewnętrznych (jak wilgotność czy temperatura) mogą zmieniać swój kształt i wymiary. Nie-równomierne odsychanie tworzywa może prowadzić do powstawania w przekroju elementu znacznych naprężeń, które w określonych warunkach mogą przekroczyć wytrzymałość muru na rozciąganie i spowodować powstawanie rys. Wyższe wartości ma skurcz betonu w przypadku jego wtórnego maksymalnego zawilgocenia, spowodowanego niewłaściwym zabezpieczeniem przy składowaniu materiału lub niewłaściwym zabezpieczeniem elementów przed wpływem czynników atmosferycznych w warunkach eksploatacji (np. przecieki wody przez złącza poziome w ścianach osłonowych budynków).

(2) Aby wykazać jaki praktyczny wpływ ma wartość skurczu na trwałość konstrukcji murowej w tablicy 3.5.1-1 zestawiono parametry różnych drobnowymiarowych elementów do murowania ścian [108]. Zgodnie z opracowaniem P. Schuberta [109, 110] można określić długość ściany w zależności od wartości skurczu, w której rysy nie występują. Zależność tę przedstawiono na rysunku 3.5.1-1.

Elementy murowe		$\varepsilon_{h\infty}$ [mm/m]		φ_{∞}		α_T [$10^6/K$]	
Rodzaj produktu	DIN	wartość obliczeniowa	zakres wartości	wartość obliczeniowa	zakres wartości	wartość obliczeniowa	zakres wartości
Wyroby ceramiczne	105	0	- 0,2 ... + 0,4	1	0,5 ... 1,5	6	5 ... 7
Wyroby silikatowe	106	- 0,2	- 0,1 ... - 0,4	1,5	1,0 ... 2,0	8	7 ... 9
Bloki z lekkich betonów drażnione niedrażnione	18151 18152	- 0,4	- 0,2 ... - 0,6	2	1,5 ... 2,5	10	8 ... 12
Bloki betonowe	18153	- 0,2	- 0,1 ... - 0,3	1		10	8 ... 12
Beton komórkowy	4165	- 0,2	- 0,2 ... - 0,4	1,5	1,0 ... 2,5	8	7 ... 9

Tablica 3.5.1-1 Właściwości murów wg P. Schuberta [109, 110]



Rys. 3.5.1-1 Długość ściany bez rys w zależności od wielkości skurczu [108]

(3) Z przedstawionej na powyższym wykresie zależności można zauważyć, iż przykładowo przy wartości skurczu 1 mm/m długość ściany, w której nie wystąpią zarysowania nie przekracza 4 m, natomiast przy skurczu 0,2 mm/m długość ta zwiększa się do 12 m. Wykres ten został wyznaczony na podstawie przyjętych założeń [108], tj. wysokości ściany 2,65 m, wytrzymałości na rozciąganie $0,4 \text{ MN/m}^2$, modułu sprężystości 1500 MN/m^2 oraz współczynnika rozszerzalności termicznej 0,016 %.

(4) Wymagania odnoszące się do elementów murowych m.in. w zakresie skurczu przy wysychaniu podane są w normach serii EN 771 *Wymagania dotyczące elementów murowych*, a wynikają z potrzeby spełnienia przez obiekt budowlany wymagań podstawowych, podanych w Dyrektywie 89/106 Rady Wspólnoty Europejskich. Z uwagi na znaczące różnice w metodach oznaczania skurczu przy wysychaniu parametr ten wyznaczono w niniejszej pracy na podstawie dwóch procedur badawczych, tj. wg PN-89/B-06258 [111] oraz wg PN-EN 680 [112]. W tym miejscu należy wyjaśnić temat przyjętych do badań procedur badawczych. W czasie prowadzonych badań na potrzeby niniejszej rozprawy obowiązywały równolegle dwie metody normowe dotyczące oznaczania skurczu przy wysychaniu, tj. [111] i [112]. Dlatego też metody te zostały przyjęte na potrzeby niniejszej rozprawy. Podstawową różnicą wymienione tu metody jest to, że badanie właściwości wg [112] jest w warunkach, w jakich wyrób pracuje w obiekcie budowlanym, natomiast wg [111] w warunkach umownych, czyli w warunkach wysychania betonu od pełnego zawilgocenia [113]. Obecne wydanie normy PN-EN

680:2008 dopuszcza dwie metodyki oznaczania skurczu betonu komórkowego przy wysychaniu, ogólnie ujmując łączy metodyki opisane w normach [111] i [112].

3.5.2. Wytrzymałość na ściskanie f_b

(1) Oznaczenie wytrzymałości na ściskanie betonu komórkowego, podobnie jak skurcz przy wysychaniu, można wykonywać w odniesieniu do różnych procedur badawczych. Wyróżnić tu można procedury: według normy polskiej tj. PN-89/B-06258 [111] oraz wg norm europejskich, prawie nie różniących się co do metodyki, tj. PN-EN 679 [114] oraz PN-EN 772-1 [115]. Dla prawidłowego scharakteryzowania elementów murowych z betonu komórkowego pod względem wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono badania w ramach badań własnych wg norm [111] i [114]. Procedury badawcze wg norm [114] i [115] różnią się nieznacznie, dlatego w programie badań przyjęto jedną z dwóch, tj. wg PN-EN 679, jako tę, która została opracowana głównie dla betonu komórkowego.

(2) W przypadku autoklawizowanego betonu komórkowego oznaczając wytrzymałość na ściskanie należy pamiętać, że jest ona zależna od kierunku wyrostu świeżej masy w formie, tzn. wytrzymałość określona w kierunku równoległym jest niższa od wytrzymałości określonej w kierunku prostopadłym. Na podstawie prowadzonych już wcześniej badań [107] stwierdzono, że dla materiału suchego stosunek wytrzymałości w kierunku prostopadłym do wytrzymałości w kierunku równoległym wynosi 1,25 niezależnie od technologii i gęstości betonu komórkowego. W niniejszej rozprawie powyższa informacja nie będzie uwzględniana bezpośrednio, jednak należy podczas prowadzenia obserwacji odkształceń murów, a w szczególności ich uszkodzeń, mieć tę zależność na uwadze.

3.5.3. Moduł sprężystości E

(1) W literaturze spotkać można szereg wzorów empirycznych na określenie modułu sprężystości jako funkcji wytrzymałości na ściskanie i gęstości. Mają one podobny charakter, jednak stosując je otrzymujemy różne wartości tego parametru, gdyż wyprowadzane były dla betonów komórkowych produkowanych niejednokrotnie na bazie różnych surowców i według różnych technologii. Obecnie oznaczenie modułu sprężystości wykonuje się wg normy europejskiej PN-EN 1352 [116], jednak trudno się ustosunkować do uzyskanych wyników, po-

nieważ dla elementów drobnowymiarowych nie są sprecyzowane wymagania co do wartości tego parametru.

3.5.4. Przyczepność zaprawy do elementu murowego ze względu na rozciąganie f_{tz}

(1) Podejmując cykl projektów naukowo-badawczych mających na celu poprawienie wytrzymałości muru na ścinanie w latach 2005/2006 (w ramach tematu badawczego N009 [117, 118]), przeprowadzono w Ośrodku COBRPB „Cebet” szereg testów przyczepności zaprawy do elementu murowego zarówno ze względu na rozciąganie jak i ze względu na ścinanie. W pracach tych analizowano wpływ parametrów zaprawy na wytrzymałość muru z betonu komórkowego.

(2) Badania przyczepności prowadzono dla zapraw ogólnego stosowania, ciepłochronnych oraz do cienkich spoin, w zastosowaniu do autoklawizowanego betonu komórkowego różnych gęstości (od 350 kg/m^3 do 615 kg/m^3). Określenie przyczepności ze względu na rozciąganie przeprowadzono zgodnie z normą PN-1015-12 [119]. Na potrzeby niniejszej rozprawy w tablicy 3.5.4-1 umieszczono tylko te wyniki badań, które z uwagi na rozważania modelu opisującego zjawisko zarysowania muru będą miały tutaj zastosowanie.

Charakterystyka fizyko-techniczna zapraw murarskich	Jednostka	Wyniki badań	
		zaprawa o symbolu A10/I	zaprawa o symbolu A20/II
Wytrzymałość na zginanie wg PN-EN 1015-11 [120]	MPa	3,10	4,85
Wytrzymałość na ściskanie wg PN-EN 1015-11 [120]	MPa	10,22	19,12
Przyczepność do betonu komórkowego o symbolu SC1 wg PN-EN 1015-12 [119]	MPa	0,528 ^{*)}	0,580 ^{*)}
Przyczepność do betonu komórkowego o symbolu SC2 wg PN-EN 1015-12 [119]	MPa	0,486 ^{*)}	0,496 ^{*)}

^{*)} Zerwanie wszystkich próbek miało miejsce w betonie komórkowym (model C wg [119])

Tablica 3.5.4-1 Wyniki badań zapraw murarskich w zakresie przyczepności zaprawy do elementu murowego ze względu na rozciąganie [118, 119]

(3) Przedstawione powyżej wyniki badań przyczepność zaprawy murarskiej ze względu na rozciąganie wykonano na betonie komórkowym gęstości 500. Szczegółowe parametry tego materiału przedstawiono poniżej w tablicy 3.5.4-2.

Charakterystyka fizyko-techniczna elementów murowych z betonu komórkowego	Jednostka	Wyniki badań	
		Symbol partii elementów SC1	Symbol partii elementów SC2
Gęstość brutto w stanie suchym wg PN-EN 772-13 [121]	MPa	485	460
Wytrzymałość na ściskanie w stanie suchym wg PN-EN 772-1 [115]	MPa	4,3	3,0
Wytrzymałość na ściskanie w stanie wilgotnym (6±2) % masy wg PN-EN 772-1 [115]	MPa	3,7	2,5
Wilgotność betonu w czasie badania wg PN-EN 772-10 [122]	MPa	6,1	5,7

Tablica 3.5.4-2 Wyniki badań betonu komórkowego

3.5.5. Przyczepność zaprawy do elementu murowego ze względu na ścinanie f_v

(1) Rozważając stan naprężeń w murze można wyróżnić układ, gdzie wyższe wartości naprężeń normalnych mogą spowodować zerwanie przyczepności między elementem murowym a zaprawą spoin wspornych ze względu na ścinanie. Jak już wspomniano w 3.5.4 (1) w COBRPB „Cebet” przeprowadzono szereg badań opisujących zjawisko przyczepności, w tym również ze względu na ścinanie. Przyczepność zaprawy do elementu murowego ze względu na ścinanie, inaczej wytrzymałość muru na ścinanie, oznaczana zgodnie z normą PN-EN 1052-3 [123], zależy co do wartości zarówno od parametrów zaprawy murarskiej jak i elementu nią łączonego. Obecnie parametr ten, o ile element murowy z betonu komórkowego podlega zastosowaniom konstrukcyjnym, zgodnie z PN-EN 771-4 [6] musi być deklarowany przez producenta. Norma PN-EN 998-2 [7] w załączniku C określa wymagania, co do wartości charakterystycznej wytrzymałości muru na ściskanie w zależności od rodzaju zaprawy murarskiej:

- dla zapraw ogólnego stosowania i lekkich $0,15 \text{ N/mm}^2$
- dla zapraw do cienkich spoin $0,30 \text{ N/mm}^2$

(2) W dostępnej literaturze nie znaleziono odniesienia do zależności, jakie zachodzą między wytrzymałością zaprawy i wytrzymałością elementu murowego. Wprawdzie próby ustalenia ww. zależności znajdujemy w punkcie 4.3 PN-B-03002 [124], jednak odnoszą się one głównie do zapraw zwykłych. Wzory i ograniczenia podane dla murów z bloczków z autoklawizowanego betonu komórkowego na cienkie spoiny lub zaprawy ciepłochronne nie dają wyni-

ków, które byłyby porównywalne z wynikami badań uzyskanych metodą wg [123]. Zapraw murarskich jest obecnie na rynku bardzo dużo, a ich wytrzymałości na ściskanie kształtują się od 3,0 do prawie 30,0 MPa, gdzie wytrzymałość na ściskanie elementów murowych z ABK – od 1,5 do 8,0 MPa. Nie jest więc obojętne czy mur z bloczków o wytrzymałości 1,5 MPa wykonamy na zaprawie o wytrzymałości 3,0 czy prawie 30,0 MPa.

We wrześniu 2005 roku odbyła się w Londynie konferencja dotycząca autoklawizowanego betonu komórkowego: „Autoclaved Aerated Concrete – Information and Development”. Wśród licznych referatów nieliczne odnosiły się do rozważanej tu problematyki. Wymienić tu należy referat „Test of load bearing behavior of masonry shear wells” [125], w którym omówiono badanie nośności ścian poddawanych ścinaniu. Badania prowadzone były porównawczo według normy europejskiej EN 1052-3 [123] oraz niemieckiej DIN 18555-5, przy użyciu zaprawy ogólnego stosowania i zaprawy do cienkich spoin.

(3) Polska norma PN-B-03002:2007 (nowelizacja norm PN-B-03002:1999 i PN-B-03340:1999) [126] zgodnie z Eurokodem 6 [127] rozróżnia w zależności od grubości spoiny dwa rodzaje murów, tj.: mury ze spoinami zwykłymi (na zaprawie zwykłej i ciepłochronnej) oraz ze spoinami cienkimi (na fabrycznie produkowanych zaprawach do cienkich spoin). Dla zapewnienia trwałości konstrukcji murowych projekt normy określa wymagania dla elementów murowych i zaprawy, oraz sposób dobierania tych elementów w zależności od klasy środowiska, w którym mur będzie pracować. Wytrzymałość charakterystyczna muru na ścinanie w kierunku równoległym f_{vk} do spoin przyjmuje się jako najmniejszą z wartości:

$$f_{vk} = f_{vko} + 0,4 \cdot \sigma_d \quad (\text{Wzór 3.5.5-1})$$

$$f_{vk} = 0,065 \cdot f_b \quad (\text{Wzór 3.5.5-2})$$

$$f_{vk} = 0,16 \cdot f_k \quad (\text{Wzór 3.5.5-3})$$

$$f_{vk} = \text{wartości graniczne podane tabelarycznie}^*) \quad (\text{Wzór 3.5.5-4})$$

*)
dla betonu komórkowego i zaprawy zwykłej = 0,15 MPa
dla betonu komórkowego i zaprawy ciepłochronnej = 0,10 MPa
dla betonu komórkowego i zaprawy do cienkich spoin = 0,20 MPa

(4) Na potrzeby niniejszej rozprawy zestawiono w tablicy 3.5.5-1 wartości początkowej wytrzymałości muru na ścinanie, czyli przyczepność zaprawy do betonu komórkowego ze względu na ścinanie przy zerowym obciążeniu w kierunku prostopadłym do spoiny wspornej. Parametr ten zaproponowano na podstawie zebranych doświadczeń opisanych w niniejszym punkcie rozprawy.

Rodzaj zaprawy łączonej z betonem komórkowym	Wyniki badań początkowej wytrzymałości muru na ścinanie wg PN-EN 1052-3 [123], [MPa]	
	wartość średnia f_{vo}	wartość charakterystyczna f_{vko}
Zaprawa ciepłochronna	0,16	0,13
Zaprawa do cienkich spoin	0,31	0,25

Tablica 3.5.5-1 Wyniki badań przyczepność zaprawy do betonu komórkowego ze względu na ścinanie [117,118]

3.5.6. Wytrzymałość elementu na rozciąganie f_{tc}

(1) Mimo, że w murze działają siły rozciągające, w szacowaniu wytrzymałości muru bierze się pod uwagę przede wszystkim wytrzymałość elementów na ściskanie, często z pominięciem wytrzymałości elementów murowych na rozciąganie f_{tc} . Stąd w niewielu publikacjach można znaleźć wartości wytrzymałości na rozciąganie oraz sposób doświadczalnych ich wyznaczania. W związku z tym, że trudno jest w sposób doświadczalny określić ten parametr poprzez bezpośrednie rozciąganie próbki, dlatego często badaną próbkę poddaje się obciążeniu punktowemu oznaczając wytrzymałość na rozciąganie przez rozłupywanie. Obciążenie przekazuje się przez listwę zapewniając równomierny i liniowy rozkład obciążenia, w skutek czego w próbce powstają naprężenia głównie rozciągające, a jedynie bezpośrednio pod listwami powstają naprężenia ściskające.

(2) Wartość wytrzymałości elementu na rozciąganie przez rozłupywanie wyznacza się ze wzoru:

$$f_{tc} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot h_u \cdot t_u} \quad (\text{Wzór 3.5.6-1})$$

gdzie: P siła niszcząca próbkę,

h_u wysokość próbki,

t_u grubość próbki równa długości rozłożenia obciążenia P.

(3) W przypadku autoklawizowanego betonu komórkowego wytrzymałość na rozciąganie powinna wynosić nie mniej niż 10 % wytrzymałości na ściskanie dla poszczególnych gęstości betonu komórkowego [106].

3.5.7. Wytrzymałość muru na ściskanie f_{mv}

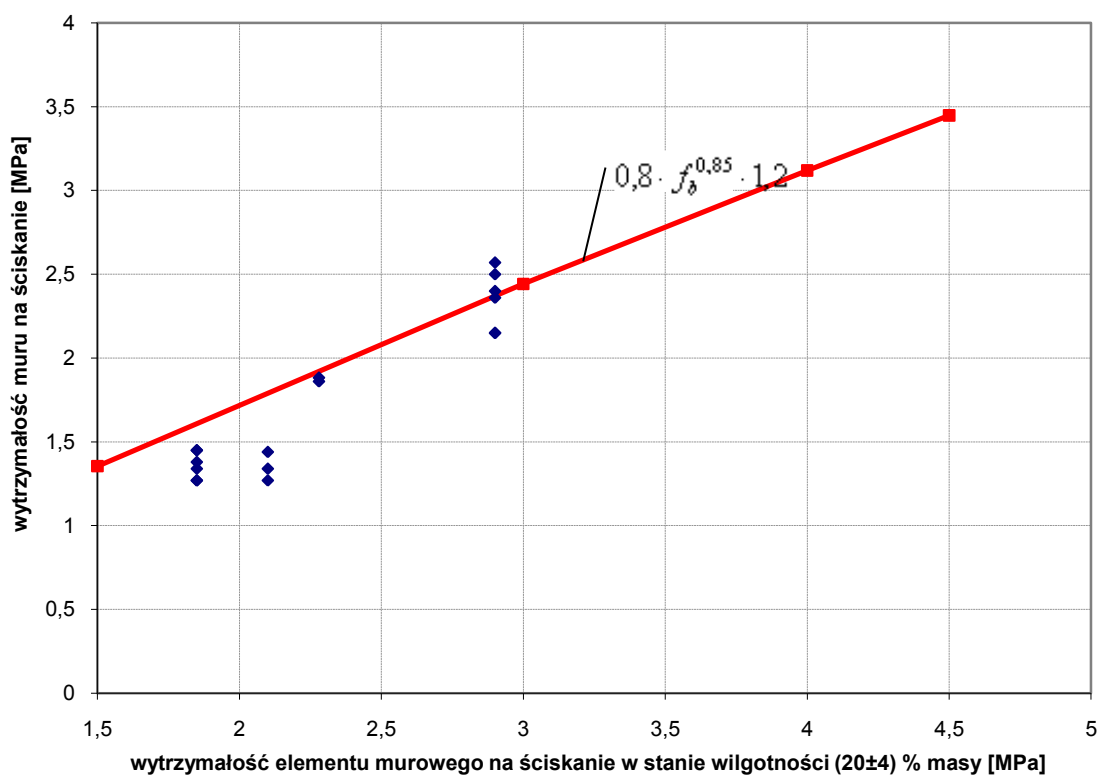
(1) Jednym z parametrów fizyko-technicznych, który bezpośrednio charakteryzuje mur pod względem konstrukcyjnym, jest jego wytrzymałość na ściskanie f_{mv} , oznaczany wg PN-EN 1052-1 [128]. W latach 1995÷1998 w Ośrodku Badawczym COBRPB „Cebet” w porozumieniu z prof. Lewickim podjęto badania murów dla określenia parametrów konstrukcji murowych z elementów z autoklawizowanego betonu komórkowego. Przestanką do podjęcia powyższych badań były różnice na niekorzyść wartości wytrzymałości charakterystycznych murów z betonu komórkowego podanych w normie PN-87/B-03002 [129] w porównaniu z wartościami wyliczonymi zgodnie z Eurokodem 6 „*Projektowanie konstrukcji murowych*” oraz podanymi w Decyzjach ITB, wydanych dla firm Ytong i Hebel [130]. Wyniki prowadzonych badań dały podstawę do wprowadzenia odpowiednich ustaleń na temat wytrzymałości charakterystycznej muru na ściskanie do projektu normy PN-B-03002.

(2) Na podstawie publikacji [131, 132, 133, 134] w tablicy 3.5.7-1 zestawiono wartości wytrzymałości muru na ściskanie f_{mv} dla murów zbliżonych swoją charakterystyką do rozważanych w niniejszej rozprawie.

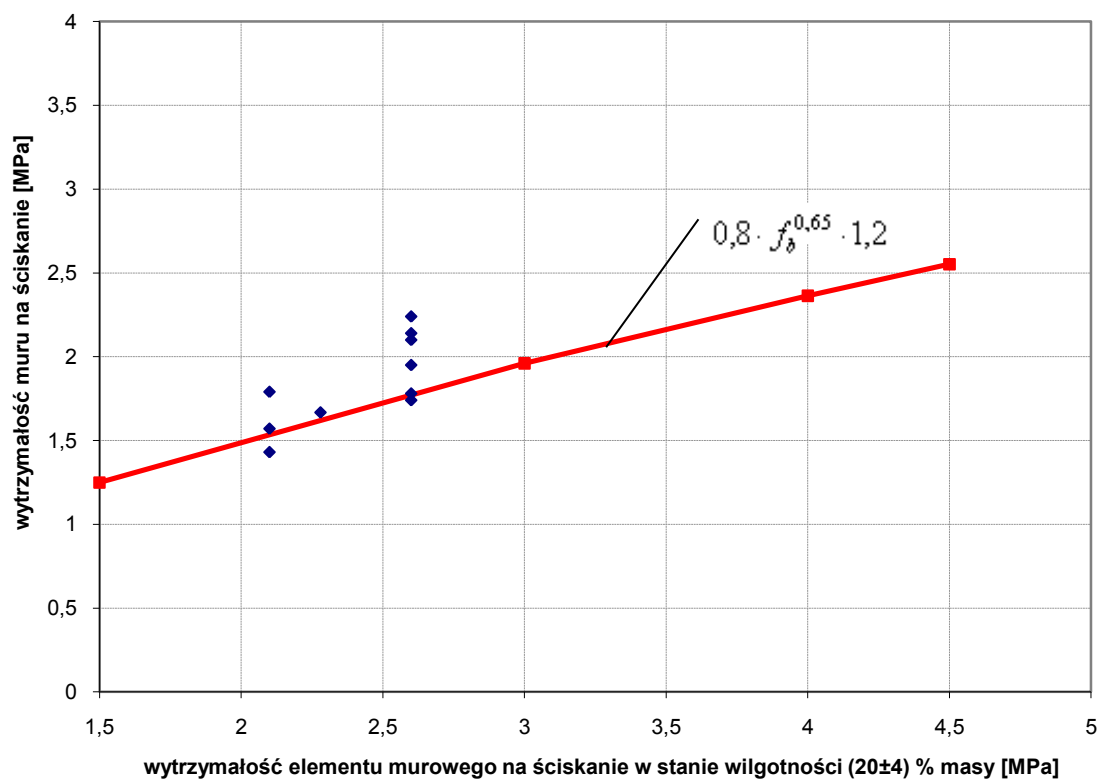
(3) Przeprowadzone badania wykazały dużą zbieżność wyników uzyskanych z wartościami obliczonymi zgodnie z zasadami podanymi w Eurokodzie 6. Dla porównania tych wyników naniesiono je na wykres, a ponadto wprowadzono funkcję odpowiadającą średniej wytrzymałości murów (gdzie wartość tej funkcji przyjęta na podstawie Eurokodu 6 została zwiększona o 20 %). Wartości wytrzymałości charakterystycznej muru uzyskane z badań są zbliżone do wartości wyliczonych zgodnie z Eurokodem 6 (Rys. 3.5.7-1 i 3.5.7-2).|

Nr tematu badawczego	Nr serii	Nr muru	Gęstość ABK w st. suchym wg PN-89/B-06258, [kg/m ³]	Wytrzymałość na ściskanie ABK przy wilgotności wmurowania wg PN-89/B-06258, [MPa]	Wytrzymałość na ściskanie ABK w st. suchym wg PN-89/B-06258 [MPa]	Wytrzymałość na ściskanie zaprawy wg PN-85/B-04500, [MPa]	Wytrzymałość muru na ściskanie obciążonego osiowo, [MPa]	Rodzaj muru
N002	I	–	515	2,28	3,9	3	1,667	*)
	II	–	515	2,28	3,9	11,00 ÷ 17,10	1,883	**)
	II	–	515	2,28	3,9	11,00 ÷ 17,10	1,861	**)
Z095	II	1	517	2,9	4,0	15,5	2,15	**)
	II	2	517	2,9	4,0	15,5	2,5	**)
	II	3	517	2,9	4,0	15,5	2,4	**)
	II	4	517	2,9	4,0	15,5	2,57	**)
	II	5	517	2,9	4,0	15,5	2,36	**)
	II	6	517	2,9	4,0	15,5	2,15	**)
	I	1	485	1,85	2,85	16,4	1,45	**)
	I	2	485	1,85	2,85	16,4	1,27	**)
	I	3	485	1,85	2,85	16,4	1,38	**)
	I	4	485	1,85	2,85	16,4	1,27	**)
	I	5	485	1,85	2,85	16,4	1,45	**)
	I	6	485	1,85	2,85	16,4	1,34	**)
	IV	1	502	2,6	4,25	4,8	2,14	*)
	IV	2	502	2,6	4,25	4,8	2,1	*)
	IV	3	502	2,6	4,25	4,8	2,24	*)
	IV	4	502	2,6	4,25	4,8	1,95	*)
	IV	5	502	2,6	4,25	4,8	1,78	*)
	IV	6	502	2,6	4,25	4,8	1,74	*)
Z043	I	1/1	444	2,1	2,8	19,5	1,44	**)
	I	1/2	444	2,1	2,8	19,5	1,27	**)
	I	1/3	444	2,1	2,8	19,5	1,34	**)
	I	1/4	444	2,1	2,8	7,3	1,79	*)
	I	1/5	444	2,1	2,8	7,3	1,43	*)
	I	1/6	444	2,1	2,8	7,3	1,57	*)
*) – mur na zaprawie ciepłochronnej								
**) – mur na zaprawie do cienkich spoin								

Tablica 3.5.7-1 Wyniki badań w zakresie oznaczenia wytrzymałości muru na ściskanie [131, 132, 133, 134]



Rys. 3.5.7-1 Wytrzymałość murów łączonych na zaprawę do cienkich spoin



Rys. 3.5.7-2 Wytrzymałość murów łączonych na zaprawę ciepłochronną

3.5.8. Wytrzymałość na ściskanie i zginanie zapraw murarskich

(1) Zgodnie z Eurokodem 6 wyróżniamy trzy rodzaje zapraw murarskich, jako ogólnego przeznaczenia (sposób zastosowania w murze), jako projektowane lub przepisane (sposób ustalenia składu) oraz te, które mogą być przygotowywane w warunkach fabrycznych (miejsce przygotowania) [10]. Niezwykle dynamiczny rozwój produkcji elementów murowych oraz rodzajów zapraw sprawił, iż powstało wiele systemów wznoszenia (konstruowania struktury) konstrukcji murowych. W szczególności dotyczy to murów z cienkimi spoinami, jednowarstwowych, murów z niewypełnionymi spoinami pionowymi, czy murów wykonywanych na zaprawie lekkiej (ciepłochronnej). Obserwacje murów wznoszonych według nowych technologii, wskazują na potrzebę zwrócenia większej uwagi na dobór parametrów fizyko-technicznych, jakimi powinna charakteryzować się zaprawa. Właściwości jakimi powinny się charakteryzować zaprawy murarskie zostały określone w normie PN-EN 998-2 [7].

(2) Omawiając zagadnienie wytrzymałości zapraw na ściskanie i zginanie oraz mając na uwadze rozważany w niniejszej pracy problem powstawania zarysowań w konstrukcji murowej, wskazane jest przypomnienie funkcji, jaką w murze pełni zaprawa. W komentarzu do Eurokodu 6 zostało to ujęte w następujący sposób [11, 135], tzn. zaprawa jest:

- „łącznikiem” – służy do połączenia elementów murowych w trwałą konstrukcję;
- „poduszką” – spełnia funkcję elastycznej matrycy, z zatopionymi w niej sztywnymi elementami, pozwalająca na unikanie koncentracji naprężeń powstających w murze w wyniku działania obciążeń zewnętrznych, a także wywołanych procesami reologicznymi w materiałach składowych muru;
- „barierą” – pełni funkcję ochrony muru przed wnikaniem do jego wnętrza wilgoci, która stanowi istotne zagrożenie dla konstrukcji murowej, ponieważ wilgotne mury mają tendencję do pęcznienia i szybkiej degradacji oraz łatwo ulegają korozji biologicznej;
- „sączkiem” – reguluje wilgotność muru, wyprowadzając wilgoć poza jego obręb (przez warstwę zaprawy a nie przez elementy murowe).

(3) Kwalifikując zaprawy z uwagi na zastosowanie w murze dzieli się je na:

- zaprawy murarskie zwykłe (dla których zgodnie z definicją w [7] „nie określa się szczególnych właściwości) – grubość spoiny 6 do 15 mm,

- zaprawy murarskie lekkie (o gęstości w stanie suchym zaprawy stwardniałej nie większej niż 1300 kg/m^3) – grubość spoiny 6 do 15 mm,
- zaprawy murarskie do cienkich spoin (z kruszywem o maksymalnej frakcji nie większej niż 2 mm) – grubość spoiny 0,5 do 3 mm.

Do spoin o grubości większej niż 3 mm i nie większej niż 6 mm mogą być stosowane zaprawy specjalne opracowane dla danego zastosowania.

(4) Badanie wytrzymałości na ściskanie i na zginanie (czyli rozciąganie przy zginaniu) stwardniałej zaprawy wykonuje się zgodnie z normą PN-EN 1015-11[120]. Wytrzymałość na ściskanie f_m oznacza się na połówkach beleczek o wymiarach 160x40x40 mm, służących do badania wytrzymałości tejże zaprawy na zginanie. Można też oznaczać wytrzymałość na elementach prostopadłościennych 70,7x40x40 mm lub 100x40x40 mm [29]. Poniżej w celach poglądowych zestawiono w tablicy 3.5.8-1 dane na temat wytrzymałości różnych rodzajów zapraw stosowanych do murów z autoklawizowanego betonu komórkowego, dostępnych na rynku (proponacje producentów).

Lp	Producent	Opis	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]
1	ALPOL [136]	AZ 116, AZ 115, Zaprawa do betonu komórkowego typ T Zaprawa do murowania na cienką spoinę ścian z bloczków betonu komórkowego. Można jej używać również do murowania innych chłonnych elementów murowych, w tym do silikatów. Grubość spoiny: od 1 do 3 mm.	≥ 10
2	ALPOL	AZ 117 Zaprawa do betonu komórkowego i silikatów biała ZIMOWA typ T Zaprawa do murowania na cienką spoinę ścian z bloczków z betonu komórkowego, cegieł i pustaków silikatowych. Do stosowania wewnątrz i na zewnątrz budynków. Grubość spoiny: od 1 do 3 mm.	≥ 15
3	ALPOL	AZ 142 Zaprawa murarska ciepła typ L Do murowania ścian z różnego rodzaju cegieł i pustaków ceramicznych, bloczków z betonu komórkowego i innych elementów murowych, wszędzie tam, gdzie istnieje potrzeba likwidacji mostków termicznych. Do stosowania wewnątrz i na zewnątrz budynków. Grubość spoiny: od 10 do 20 mm.	≥ 5

4	Atlas [137]	ATLAS KB-15 Zaprawa murarska do betonu komórkowego typ T Zaprawa murarska przeznaczona do wznoszenia murów z bloczków, kształtek i innych elementów z betonu komórkowego i gazobetonu. Nadaje się również do innych robót murarskich takich, jak wznoszenie murów z cegieł, pustaków oraz innych tego typu materiałów ceramicznych, betonowych bądź wapienno-piaskowych. Grubość spoiny: od 2 do 10 mm.	≥ 5
5	IZOBET [138]	ZMC-cM7 Zaprawa murarska cienkowarstwowa do betonu komórkowego i silikatów typ T Zaprawa murarska cementowa według projektu do cienkich spoin, do stosowania w elementach budowlanych podlegających wymaganiom konstrukcyjnym Grubość spoiny: od 1 do 3 mm.	> 7
6	INTER GRĄD [139]	Zaprawa murarska do betonu komórkowego i silikatów, według przepisu, ogólnego przeznaczenia. Grubość spoiny : od 4 do 8 mm.	$> 10 \text{ MPa}$
7	Baumit [140]	Cienkowarstwowa zaprawa do gazobetonu i silikatów typ T Cienkowarstwowa zaprawa murarska przeznaczona do stosowania w konstrukcjach murowych, w murach zewnętrznych naziemnych, później tynkowanych, oraz w murach wewnętrznych. Może być stosowana do łączenia elementów murowych ceramicznych, silikatowych, betonowych i z betonów komórkowych, spełniających wymagania w zakresie odpowiednich odchylek wymiarowych i dopuszczonych do obrotu i stosowania w budownictwie. Grubość spoiny: od 1 do 3 mm.	$> 10 \text{ MPa}$
8	Baumit	Zaprawa murarska ciepłochronna 50 Fabrycznie przygotowana, termoizolacyjna zaprawa z dodatkiem perlitu, do murowania ścian jednowarstwowych z pustaków ciepłochronnych oraz wszystkich powszechnie stosowanych cegieł i bloczków budowlanych.	$> 5 \text{ MPa}$
9	SOLBET [141]	Zaprawa SOLBET Zaprawa murarska do cienkich spoin jest przeznaczona do klejenia bloczków i płytek z betonu komórkowego, silikatów oraz różnego rodzaju cegieł. Może być stosowana zarówno do murowania jak i niwelowania nierówności. Grubość spoiny: od 1 do 3 mm.	$> 5 \text{ MPa}$

Tablica 3.5.8-1 Zestawienie wybranych rodzajów zapraw murowych dostępnych na rynku stosowanych między innymi do łączenia elementów z betonu komórkowego

3.6. Podsumowanie analizy obecnego stanu wiedzy

Przeprowadzona analiza obecnego stanu wiedzy objęła zagadnienia przede wszystkim konstrukcji murowej, zjawisk w niej zachodzących oraz kształtowania cech mechanicznych tego ustroju z uwagi na zarysowania (siły zewnętrzne działające na mur, naprężenia wewnętrzne i ich rozkład, schematy zniszczenia murów, zarysowania i pęknięcia w wyniku przekroczenia nośności itd., zagrożenie naprężeń rozciągających w murze). Mając na względzie postawione w niniejszej rozprawie tezy analiza powyższych zagadnień była ukierunkowana na problematykę związaną z wytrzymałością muru na rozciąganie w kierunku równoległym do linii spoin wspornych oraz opisem matematycznym tego zjawiska z uwzględnieniem muru wykonanego z elementów murowych z autoklawizowanego betonu komórkowego. Podjęto też dość szczegółową analizę cech fizyko-technicznych betonu komórkowego i zapraw murowych polecanych jako kompatybilnych do stosowania z tego typu elementami murowymi.

Podjęte studia literaturowe miały na celu głównie potwierdzenie ważności podjętego w niniejszej rozprawie tematu powstawania zarysowań w konstrukcjach murowych z autoklawizowanego betonu komórkowego w wyniku zmian temperaturowo-wilgotnościowych ustroju oraz wykazanie potrzeby uzupełnienia wiedzy w tym zakresie. W związku z powyższym studia te skłoniły do sformułowania następujących wniosków:

(1) Autoklawizowany beton komórkowy jest najpopularniejszym w Polsce materiałem budowlanym do wznoszenia ścian (ok. 40 % udziału w rynku materiałów budowlanych). Proces jego wytwarzania jest przyjazny dla środowiska naturalnego, o niskim zużyciu energii i surowców, a co za tym idzie, wpisuje się w uwarunkowania zrównoważonego rozwoju. Został on stworzony ponad 80 lat temu przez w odpowiedzi na grożącą całkowitą zagładę lasów w Skandynawii przez ich dalsze wycinanie, jako ciepły materiał dla budownictwa o właściwościach zbliżonych do drewna.

(2) Pojawiają się coraz częstsze sygnały (zarówno ze strony producentów, jak i inwestorów) o niekorzystnych zjawiskach, w postaci pęknięć i rys, w ścianach obiektów realizowanych z elementów murowych z autoklawizowanego betonu komórkowego. Jak wykazały kontakty z różnymi zagranicznymi ośrodkami badawczymi, zajmującymi się tą tematyką, problemy odkształceń (skurczu i pęcznienia) muru występują również i w innych krajach.

(3) Autoklawizowany beton komórkowy jest wyrobem budowlanym bardzo dobrze wpisującym się w zrównoważone budownictwo, spełniającym wyższe normy środowiskowe, dlatego zasadnym jest podjęcie próby wyjaśnienia zagadnień pozwalających zapobieganiu w praktyce niekorzystnym zjawiskom zarysowania murów wznoszonych z tego materiału.

(4) Wiadomym jest, że na cechy mechaniczne muru, w tym wytrzymałość na ściskanie i na rozciąganie, wpływają jego elementy składowe, to jest rodzaj elementu murowego oraz sposób jego powiązania, (zaprawa, rodzaj spoiny lub ewentualne zbrojenie). Cechy mechaniczne muru z betonu komórkowego o tych samych cechach fizyko-technicznych materiału kształtują się inaczej przy spoinie grubej (od 6 do 15 mm) a inaczej spoinie cienkiej (od 1 do 3 mm). Ważna jest też wytrzymałość zaprawy zastosowanej.

(5) Dla zbadanych dotychczas murów osiągnięcie rzeczywistego stanu zniszczenia (równoznacznego ze stanem granicznym nośności) następowało dla większych poziomów naprężeń niż notowane w chwili pojawienia się rys, niemniej różnica ta silnie zależała od typu elementów murowych, z których badane modele były wykonane. Stwierdzenie to pozwala przyjąć, że pojawienie się zarysowań z uwagi na odkształcenia muru (skurcz i pęcznienie) wpływa przede wszystkim na estetykę muru, a nie na jego nośność.

(6) Najważniejszą charakterystyką rysy jest jej rozwarcie, które można mierzyć tradycyjnie lupą podziałową lub za pomocą plomb kontrolnych (gipsowych, cementowych, stalowych, szklanych), czy zastosować tensometr mechaniczny i nasadowy, z czujnikami indukcyjnymi lub – w wyjątkowych sytuacjach – za pomocą metody mikrofotograficznej. Można również zmiany rozwarcia rys oraz ich układ inwentaryzować za pomocą fotografii na przykład cyfrowej. Ustalono również, że wystarczającą na potrzeby niniejszej pracy metodą pomiaru odkształceń muru jest metoda pomiaru tensometrem nasadowym.

(7) Najmniejsze prawdopodobieństwo powstawania rys skurczowych jest w betonie komórkowym technologii Unipol z kruszywem piaskowym, gdyż charakteryzuje się on stosunkowo małym oporem dyfuzyjnym oraz niską wilgotnością krytyczną, dużymi odkształceniami granicznymi, małymi odkształceniami skurczowymi oraz stosunkowo dużą wytrzymałością na rozciąganie.

(8) W porównaniu z konstrukcjami stalowymi, betonowymi, żelbetowymi, czy drewnianymi konstrukcje murowe cechują się największą niejednorodnością, wykazują bardzo wyraźną

anizotropię. Zachowanie się i nośność konstrukcji murowych bada się od wielu już lat praktycznie na całym świecie.

(10) Zastosowanie stalowego zbrojenia układanego w spoinach spornych ma pozytywny wpływ na rysoodporność, nośność i odkształcalność konstrukcji murowych. Potwierdza się również, że najbardziej korzystny wpływ na wytrzymałość muru ma zbrojenie poziome typu „kratownicza”. Przy wzroście naprężeń ściskających notuje się podwyższenie wartości naprężeń rysujących i niszczących.

(9) Ocena nośności muru z uwagi na jego niejednorodność musi być wykonywana z uwzględnieniem decydującego mechanizmu zniszczenia. Analizowany w niniejszej rozprawie model zarysowania muru z autoklawizowanego betonu komórkowego (zarysowanie w kierunku prostopadłym do spoin wspornych) oraz jego mechanizm zniszczenia w wyniku odkształceń w kierunku równoległym do spoin wspornych jednoznacznie wskazuje na powstające w ustroju poziome naprężenia rozciągające.

(11) Przy oznaczaniu wytrzymałości muru na rozciąganie przy osiowym działaniu siły w kierunku równoległym do spoin wspornych, pojawiają się dwa schematy zniszczenia, gdzie w jednym rysa przebiega przez element murowy, w drugim natomiast przez spoinę przewiazaną bez zniszczenia elementu murowego.

(12) W normie Eurokod 6 [10, 95, 96] nie podjęto zagadnienia wytrzymałości muru na osiowe rozciąganie. Przy opisie charakterystycznej wytrzymałości muru na rozciąganie przy zginaniu w powyższej normie rozważa się jedynie wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu w płaszczyźnie ściany, gdzie zniszczenie następuje w kierunku równoległym do spoin wspornych f_{xk1} lub prostopadłym f_{xk2} .

(13) Dobrym opisem matematycznym dla dwóch przypadków zniszczenia muru przy jednoosiowym rozciąganiu w kierunku równoległym do spoiny wspornej jest zaproponowany w pracach Manna [97], Schuberta i Weschego [98, 99, 100], Backes'a [101] model, który znalazł odbicie m.in. w niemieckich przepisach normowych [102]. Model ten wyróżnia dwa schematy zarysowania, tj. przebiegającego przez element murowy oraz przebiegającego przez spoiny. Proponowany tutaj opis matematyczny z uwagi na mechanizm zarysowania ma zastosowanie do zjawisk rozpatrywanych w niniejszej rozprawie.

(14) Elementy murowe z autoklawizowanego betonu komórkowego charakteryzują się stosunkowo niską gęstością materiału związaną z jego porowatością. W zależności od gęstości zmieniają się inne właściwości autoklawizowanego betonu komórkowego, takie jak: wytrzymałość, przewodność cieplna, mrozoodporność, nasiąkliwość, izolacyjność akustyczna. Natomiast znaczący wpływ na poziom poszczególnych parametrów betonu ma jego zawilgoce-
nie.

(15) Należy również zwrócić uwagę na fakt, iż wartość skurczu dla elementów z kruszywa popiołowego jest większa. Właściwość ta jest zjawiskiem naturalnym, wynikającym z właściwości popiołów lotnych. Charakterystyka ta będzie miała odniesienie w dalszych rozważaniach na temat zarysowań murów z tego materiału.

en résumé

Przeprowadzone studia literaturowe potwierdziły, iż temat murów poddawanych jednoosiowemu rozciąganiu w kierunku równoległym do spoin wspornych był podejmowany przez nieliczne ośrodki badawcze (głównie prace Manna [97], Schuberta i Weschego [98, 99, 100], Backes'a [101]), a w normie Eurokod 6 dotyczącej projektowania konstrukcji murowych [10, 95, 96] nie podjęto tego zagadnienia. Pojawiające się coraz częstsze sygnały (zarówno ze strony producentów, jak i inwestorów) o niekorzystnych zjawiskach, w postaci pęknięć i rys, w ścianach obiektów realizowanych z elementów murowych z autoklawizowanego betonu komórkowego wskazują na aktualność i potrzebę rozwiązania tego problemu. Reasumując powyższe spostrzeżenia widoczna jest potrzeba wyjaśnienia omawianego zjawiska zarysowań, szczególnie z uwagi na autoklawizowany beton komórkowy, jako popularny materiał w budownictwie, wpisujący się w uwarunkowania zrównoważonego rozwoju.

4. Badania własne

4.1. Program badań

Program badań obejmował:

- (1) Wytypowanie oraz zakup betonu komórkowego i zapraw murarskich reprezentatywnych dla polskiego rynku.
- (2) Zbadanie właściwości fizyko-technicznych zakupionych betonów w zakresie:
 - a. gęstości,
 - b. skurczu przy wysychaniu,
 - c. wytrzymałości na ściskanie,
 - d. modułu sprężystości,
 - e. wytrzymałości na rozciąganie.
- (3) Zbadanie właściwości fizyko-technicznych zakupionych zapraw w zakresie:
 - a. stałości objętości,
 - b. gęstości,
 - c. wytrzymałości na zginanie,
 - d. wytrzymałości na ściskanie,
 - e. skurczu.
- (4) Przygotowanie 16-tu stanowisk badawczych, na których będą oznaczane odkształcenia murów poddawanych osiowemu rozciąganiu w kierunku równoległym do spoin wspornych w wyniku zmian termiczno-wilgotnościowych.
- (5) Sezonowanie elementów murowych z betonu komórkowego w celu doprowadzenia do zakładanych wilgotności wmurowywanego materiału.
- (6) Wykonanie 16-tu murów z betonu komórkowego gęstości 400 i 500, różniących się między sobą:
 - a. rodzajem zastosowanego betonu komórkowego; wytworzonego z zastosowaniem jako kruszywa piasku i popiołów lotnych
 - b. stopniem zawilgocenia przy wmurowaniu
 - c. rodzajem zaprawy (do cienkich spoin, ciepłochronna)

- (7) Systematyczne obserwacje ciągłości powierzchni muru (występowanie rys i pęknięć) oraz pomiary 16-tu murów; dokumentowanie pomiarów zmian liniowych, wilgotności i temperatury powietrza oraz rozkładu temperatury i wilgotności wnętrza muru.

4.2. Opis i realizacja badań oraz wyniki badań materiałowych

4.2.1. Wytypowanie betonów i zapraw do badań oraz ich zakup

(1) Wstępne badania wykazały, iż powstawanie rys w konstrukcjach murowych zależy m.in. od charakterystyki technicznej betonu komórkowego, jego okresem sezonowania oraz rodzajem i wytrzymałością zaprawy. Wytrzymałość betonu na rozciąganie, skurcz i moduł sprężystości to cechy fizyczne, które w szczególny sposób mają wpływ na podatność muru na zarysowania. Wiadomym jest, że im większy skurcz bez możliwości kompensacji zmian długości, tym wyższe jest naprężenie rozciągające w materiale, które jest proporcjonalne do modułu sprężystości.

(2) Mając na uwadze powyższe, przed przystąpieniem do wykonania murów wytypowano reprezentatywnych dla polskiego rynku producentów autoklawizowanego betonu komórkowego i zapraw murarskich. Po wstępnym przebadaniu materiał zakupiono i sprowadzono do Ośrodka „CEBET” elementy murowe z betonu od trzech producentów oraz dwa rodzaje zaprawy. Beton od poszczególnych producentów oznaczono odpowiednio jako:

D – beton komórkowy gęstości 500 na kruszywie piaskowym,

E – beton komórkowy gęstości 500 na kruszywie popiołowym,

F – beton komórkowy gęstości 400 na kruszywie piaskowym.

4.2.2. Wyniki badań cech fizyko-technicznych betonów komórkowych

4.2.2.1. Skurcz przy wysychaniu ε_{cs}

(1) Wyniki badań własnych prowadzonych na wytypowanym materiale przedstawiono w tabelicy 4.2.2.1-1. Jak można zauważyć, wartości skurczu przy wysychaniu ε_{cs} oznaczonego wg [112] są niższe, a wynika to z tego, iż prowadzenie pomiarów zmian długości przy odsy-

chaniu według tej metody odbywa się od wilgotności 30 % masy do 6 % masy, gdzie wg [111] pomiar ten prowadzi się od pełnego zawilgocenia próbki. Z tego punktu widzenia metodą bardziej zbliżoną do warunków eksploatacyjnych murów z betonu komórkowego jest metoda wg PN-EN 680, a wartości otrzymane mogą stanowić podstawę do przyjęcia wielkości skurczu obliczeniowego mającego zastosowanie przy projektowaniu, a nie tylko do oceny jakości w obszarze międzylaboratoryjnym. Należy również pamiętać (temat zasygnalizowany w punkcie 3.5.1 (4)), że aktualne wydanie normy PN-EN 680:2008 dopuszcza dwie metodyki oznaczania skurczu betonu komórkowego przy wysychaniu, a ogólnie ujmując norma ta łączy w sobie dwie metodyki opisane w normach [111] i [112].

Charakterystyka fizyko-techniczne betonu komórkowego	Jednostka	Wyniki badań		
Symbol producenta betonu komórkowego	-	D	E	F
Rodzaj kruszywa	-	piaskowe	popiołowe	piaskowe
Gęstość w stanie suchym wg PN-89/B-06258 [111]	kg/m ³	502	484	452
Skurcz przy wysychaniu				
- wg PN-89/B-06258 [111]	mm/m	0,45	0,76	0,66
- wg PN-EN 680 [112]	mm/m	0,05	0,54	0,14

Tablica 4.2.2.1-1 Wyniki badań betonu komórkowego w zakresie skurczu przy wysychaniu

(2) Badany beton komórkowy zarówno dla partii E i F pod względem skurczu nie odpowiadał wymaganiom normy PN-89/B-06258 [111]. Należy dodać, że w normie europejskiej na elementy drobnowymiarowe PN-EN 771-4:2004 [6] nie ma sprecyzowanej wartości dopuszczalnego skurczu. Jest on natomiast podany jako wartość 0,35 mm/m w AT ITB-AT-15-2700/2001 dla elementów drobnowymiarowych [142] oraz jako wartość 0,25 mm/m w normy europejskiej dotyczącej elementów zbrojonych z betonu komórkowego [143].

(3) Należy również zwrócić uwagę na fakt, iż wartość skurczu dla elementów z kruszywa popiołowego jest większa, co widoczne jest dla wyników według obu metod. Właściwość ta jest zjawiskiem naturalnym, wynikającym z właściwości popiołów lotnych. Charakterystyka ta będzie miała odniesienie w dalszych rozważaniach na temat zarysowań murów z tego materiału.

4.2.2.2. Wytrzymałość na ściskanie f_b

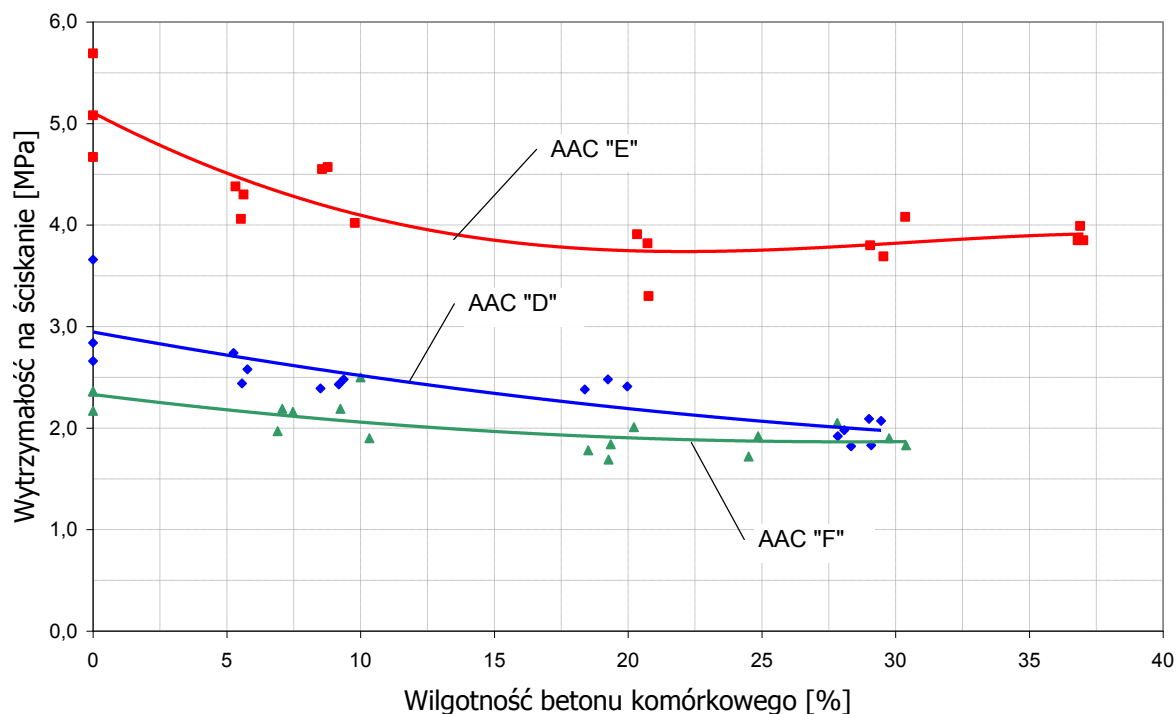
(1) Jak już wspomniano wcześniej wytrzymałość na ściskanie jest jednym z ważniejszych parametrów charakteryzujących element murowy. Na podstawie wyników zestawionych w tablicy 4.2.2.2-1 można zauważyć, że w zależności od metod otrzymane wartości różnią się. Zaniżona wartość wytrzymałości otrzymana według normy wg PN-EN 679 [114] wynika z ustalonej na potrzeby badań wilgotności materiału (6 ± 2 % masy), a zjawisko to jest prawidłowym w warunkach naturalnych dla tego betonu. Z uwagi na zmiany wartości wytrzymałości w zależności od stanu zawilgocenia betonu przeprowadzono dodatkowo w ramach badań własnych serię oznaczeń opisujących tę zależność. Wyniki przedstawiono poniżej w formie wykresu (Rys. 4.2.2.2-1).

Charakterystyka fizyko-techniczne betonu komórkowego	Jednostka	Wyniki badań		
Symbol producenta betonu komórkowego	-	D	E	F
Rodzaj kruszywa	-	piaskowe	popiołowe	piaskowe
Gęstość w stanie suchym wg PN-89/B-06258 [111]	kg/m ³	502	484	452
Wytrzymałość na ściskanie				
- w stanie suchym wg PN-89/B-06258 [111]	MPa	3,1	5,1	2,3
- w stanie 6 ± 2 % masy wg PN-EN 679 [114]	MPa	2,6	4,2	2,1

Tablica 4.2.2.2-1 Wyniki badań betonu komórkowego w zakresie wytrzymałości na ściskanie

(2) Przedstawione na rysunku 4.2.2.2-1 wartości wytrzymałości na ściskania betonu komórkowego w funkcji wilgotności tego materiału wykazują wyraźnie, że parametr ten w jest zmienny. Beton komórkowy przyjmuje zróżnicowane wartości wytrzymałości szczególnie w przedziale swojego zawilgocenia od 0 do 8 % masy. Im mniejsza wilgotność, tym wytrzymałość materiału jest większa. W przypadku betonu popiołowego „E” wytrzymałość na poziomie wspomnianego przedziału wilgotności zmienia się w zakresie 1 MPa. Kolejną ważną uwagą jest to, że przy wilgotności materiału w zakresie od 8 % masy do wilgotności poauto-klawizacyjnej wytrzymałość zmienia się również, choć w na poziomie mniejszych wartości. Uogólniając omawiane zależności można stwierdzić, że wytrzymałość betonu komórkowego przy zmianach wilgotności materiału w przedziale od 10 % w górę jest ustabilizowana. Wytrzymałość ta jest również mniejsza od wytrzymałości w stanie suchym od kilku do kilkunastu

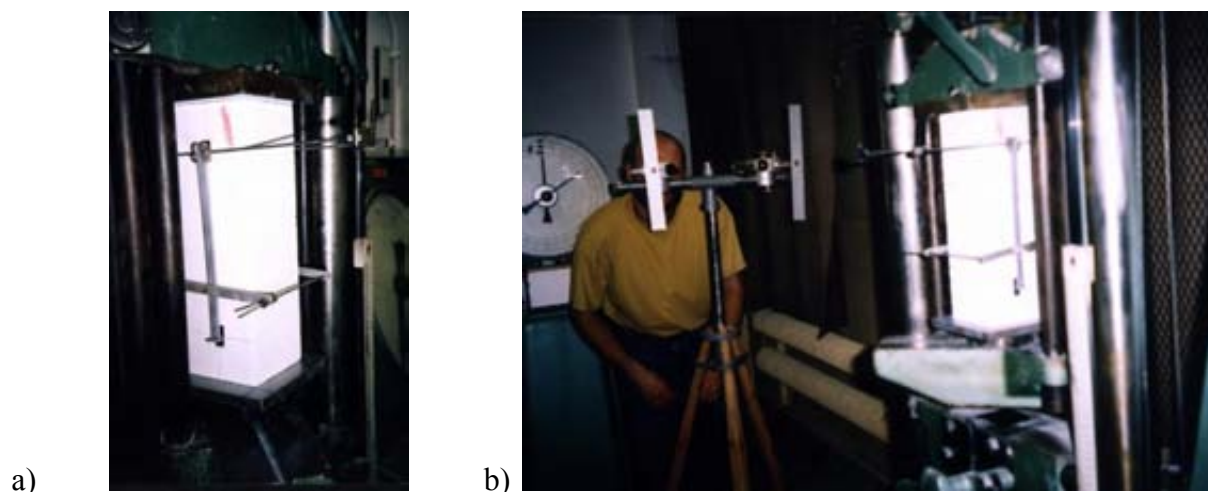
sięciu procent. Istotne jest również, że beton na kruszywie popiołowym uzyskuje o kilkadziesiąt procent wyższą wytrzymałość niż beton na kruszywie piaskowym.



Rys. 4.2.2.2-1 Wytrzymałość na ściskanie w zależności od wilgotności ABK

4.2.2.3. Moduł sprężystości E

(1) Badania w ramach pracy prowadzono zgodnie z metodyką ujętą w normie PN-EN 1352 [116]. W badaniu zastosowano tensometr lusterkowy (Rys. 4.2.2.3-1). Tensometr ten umożliwia pomiar odkształceń wzdłużnych z dokładnością $5 \cdot 10^{-6}$ mm. Dla lepszego scharakteryzowania materiału pod względem tego parametru, wykonano kilka serii pomiarów dla różnych poziomów zawilgocenia. Częściowe wyniki, tzn. dla betonu komórkowego o wilgotności (6 ± 2) % masy przedstawiono w tablicy 4.2.2.3-1, natomiast w formie wykresu ujęto wielkość modułu sprężystości dla poszczególnych asortymentów w zależności od wilgotności betonu. Jak wykazały badania moduł sprężystości zmienia się w zależności od zawilgocenia materiału, jednak trudno ustalić jakąś stałą tendencję, jak było to w przypadku wytrzymałości na ściskanie.



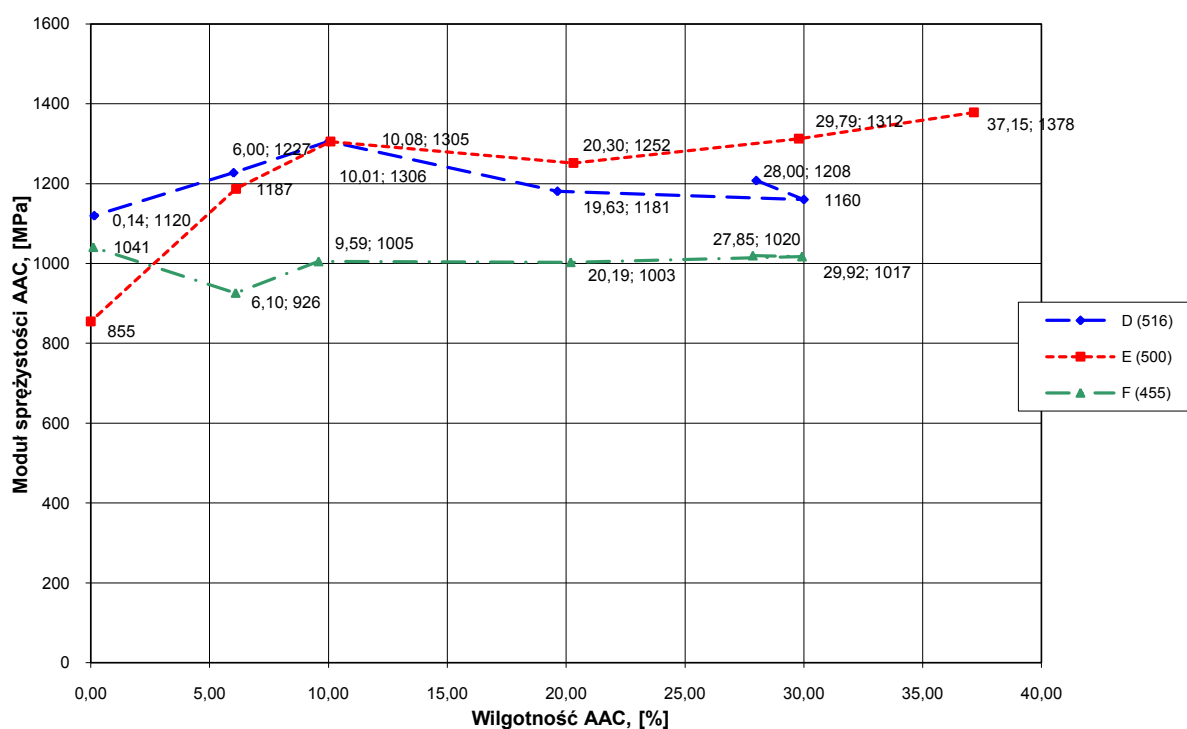
Rys. 4.2.2.3-1 Badanie zmian liniowych próbki pod wpływem naprężeń tensometrem lusterkowym:

a) próbka umieszczona w prasie uzbrojona w lusterka; b) pomiar odkształceń

Charakterystyka fizyko-techniczne betonu komórkowego	Jednostka	Wyniki badań		
Symbol producenta betonu komórkowego	-	D	E	F
Rodzaj kruszywa	-	piaskowe	popiołowe	piaskowe
Gęstość w stanie suchym wg PN-89/B-06258 [111]	kg/m ³	502	484	452
Moduł sprężystości wg PN-EN 1352 [116]	MPa	1289	1217	970

Tablica 4.2.2.3-1 Wyniki badań betonu komórkowego w zakresie modułu sprężystości

(3) Przy oznaczeniu modułu sprężystości w zależności od różnego poziomu zawilgocenia zbadano ponad 100 próbek dla każdego rodzaju betonu, co daje łącznie ponad 300 próbek (prostokątów o wymiarach 100x100x300 mm). Zgodnie danymi umieszczonymi na rysunku 4.2.2.3-1 ustalano tę cechę dla sześciu poziomów zawilgocenia materiału, tj. około 0, 6, 10, 20, 30 % masy oraz wilgotności poautoklawizacyjnej. Celem tej serii badań było ustalenie zależności modułu sprężystości od zawilgocenia, jednak otrzymane wyniki wskazują, że trudno jest tu ustalić stałe tendencje, nawet rozróżniając poszczególne rodzaje betonów. Cenną informacją jest ta, że moduł sprężystości podobnie jak wytrzymałość na ściskanie (i rozciąganie, jak zostało wykazane w punkcie 4.2.2.4) można określić jako stabilny przy wilgotności betonu komórkowego od 10% masy w górę, tj. do wilgotności poautoklawizacyjnej.



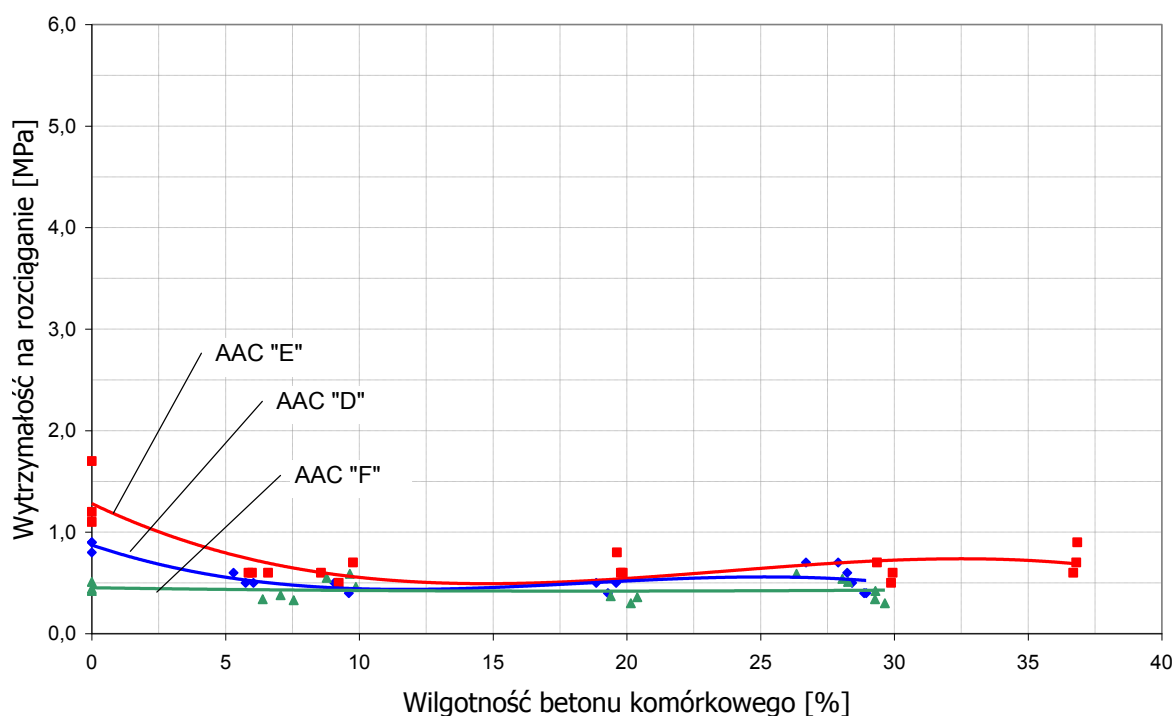
Rys. 4.2.2.3-1 Moduł sprężystości w zależności od wilgotności ABK

4.2.2.4. Wytrzymałość elementu na rozciąganie f_{tc}

(1) Oznaczenie wytrzymałości na rozciąganie wykonano zgodnie z normą PN-89/B-06258 [111] (Tablica 4.2.2.4-1). Uwzględniając zmianę tego parametru w zależności od zawilgoce-
nia podobnie jak w 4.2.2.2 wykonano serię oznaczeń przedstawionych w postaci funkcji za-
wilgoce-
nia (Rys. 4.2.2.4-1).

Charakterystyka fizyko-techniczne betonu komórkowego	Jednostka	Wyniki badań		
Symbol producenta betonu komórkowego	-	D	E	F
Rodzaj kruszywa	-	piaskowe	popiołowe	piaskowe
Gęstość w stanie suchym wg PN-89/B-06258 [111]	kg/m ³	502	484	452
Wytrzymałość na rozciąganie w stanie suchym wg PN-89/B-06258 [111]	MPa	0,9	1,3	0,5

Tablica 4.2.2.4-1 Wyniki badań betonu komórkowego w zakresie wytrzymałości na rozciąga-
nie



Rys. 4.2.2.4-1 Wytrzymałość na rozciąganie w zależności od wilgotności ABK

(2) Podobnie jak w przypadku wytrzymałości na ściskanie parametr ten w przedziale wilgotności od 0 do 8 % masy ma wyższe wartości niż przy zawilgoceniu powyżej 8 % masy. Potwierdza się, że w przedziale zawilgotnienia od 10 % do wilgotności poautoklawizacyjnej wytrzymałość betonu komórkowego tutaj na rozciąganie można uznać za stabilną (zauważalne jest to również przy module sprężystości oraz wytrzymałości na ściskanie). Z uwagi na to, że nie wykonano zbyt dużej ilości badań poszukując zależności wilgotności do wytrzymałości (dla każdego poziomu zawilgocenia po 9 próbek), trudno tu wyciągać dalekosiężne wnioski, jednak tendencja zmienności wytrzymałości potwierdza się w stosunku do opisanych w literaturze.

(3) Zestawiając wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie z badaniami wytrzymałości na ściskanie zastanawiający jest również brak zachowanej stałej proporcji, ujmowanej w literaturze jako 10 % [106] (punkt (3) 3.5.6 niniejszej rozprawy). Z otrzymanych wyników badań wynika, że wytrzymałość na rozciąganie wynosi nie 10 % wytrzymałości na rozciąganie, lecz ponad 20 % (odpowiednio dla betonu „D” 29 %, „E” 26 %, „F” 21 %). Tą relację parametrów warto ustalić w innych pracach badawczych dla większej ilości próbek.

4.2.3. Wyniki badań właściwości zapraw murarskich

(1) Zgodnie z programem badań oznaczono podstawową charakterystykę stosowanych w murach badawczych zapraw murarskich. Wyniki przedstawiono w tablicy 4.2.3-1.

Rodzaj zaprawy	Stalność objętości	Gęstość, [kg/m ³]	Wytrzymałość, [MPa]		Skurcz, [%]
			na zginanie	na ściskanie	
Zaprawa klejowa do cienkich spoin	^{*)} brak pęknięć po badaniu na plackach	nie oznaczano	3,12	13,77	nie oznaczano
Zaprawa ciepłochronna TERMOR	nie oznaczano	698	1,58	5,34	0,281

^{*)} oznaczanie wg procedury badawczej Cebet

Tablica 4.2.3-1 Wyniki badań zapraw w zakresie skurczu oraz wytrzymałości po 28 dniach

4.2.4. Założenia teoretyczne przyjęte w rozprawie

(1) W materiałach konstrukcyjnych ze względu na właściwości wytrzymałościowe wyróżnić można cztery kategorie: sprężyste, plastyczne, sprężysto-plastyczne i kruche [144]. Podstawowe konstrukcje murowe jak ściany, słupy, filarki, są zaprojektowane jako elementy, w których decydujące znaczenie ma wytrzymałość na ściskanie. Jak już wcześniej wspomniano w przypadku omawianych zarysowań muru duże znaczenie ma jego wytrzymałość na rozciąganie. Składniki muru, tj.: element murowy oraz zaprawa, charakteryzują się niezdolnością do odkształceń plastycznych, czyli po przekroczeniu granicy sprężystości pojawiają się niepożądane odkształcenia trwałe, co jest praktycznie równoznaczne ze zniszczeniem spójności części materiału (osiągnięciem stanu granicznego zniszczenia).

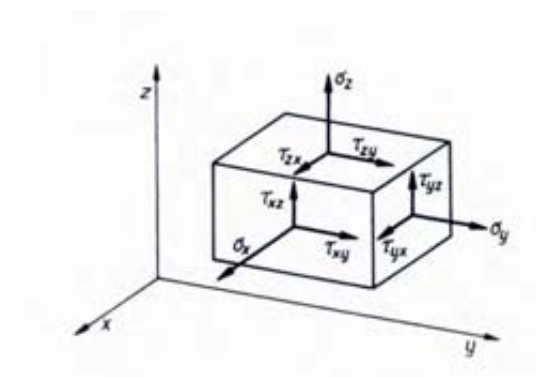
(2) Z uwagi na występowanie anizotropii w konstrukcji murowej jej scharakteryzowanie pod względem rozkładu naprężeń nie jest proste. Ocena nośności muru z uwagi na jego niejednorodność musi być wykonywana z uwzględnieniem decydującego mechanizmu zniszczenia. W przypadku pojawienia się w murze naprężeń rozciągających w kierunku równoległym do spoin wspornych wytrzymałość muru na rozciąganie jest funkcją charakterystyk materiałowych

elementów składowych, ale przede wszystkim ważna jest wytrzymałość na ścinanie na styku elementu murowego z zaprawą.

(3) Na podstawie analizy obecnego stanu wiedzy oraz doświadczeń badaczy takich jak Mann, Müller, Schubert, Lewicki czy Kubica stwierdzić można, że przy próbie opisu złożonych zjawisk w konstrukcjach murowych dobre wyniki mogą dawać czasami próby formułowania prostych kryteriów wytrzymałościowych i modeli zniszczenia. Przyjmując ten tok rozumowania wprowadzono do programu badań i analizy rozważanego zjawiska kilka podstawowych założeń:

- W badanym murze w wyniku zmian temperaturowo-wilgotnościowych zachodzących głównie z autoklawizowanym betonem komórkowym, przy jego utwardzeniu na końcach (zgodnie z rys. 4.2.5-1), powstają naprężenia wyłącznie rozciągające w kierunku równoległym do spoin wspornych. Założenie to potwierdzić może rzeczywisty mechanizm zniszczenia znany z wcześniejszych rozważań (rozdz. 3.4 (3)).
- Analizując stan naprężeń i odkształceń w murze badawczym poddawany zmianom wilgotności i temperatury przyjęto dla uproszczenia rozważań, że siły zewnętrzne, działające na badany mur, wynikające z obciążenia w kierunku pionowym, są znikomo małe, natomiast głównym obciążeniem dla rozpatrywanej konstrukcji jest rozciągające w kierunku równoległym do spoin wspornych.
- Mimo iż odkształcalność zaprawy i elementu murowego jest różna, co dość dobrze tłumaczy nieco odmienny mechanizm zniszczenia i charakter zarysowań w murze od występującego w kruchych jednorodnych materiałach izotropowych, do analizy otrzymanych w niniejszej rozprawie wyników badań zarysowań i odkształceń murów przyjęto dwa niezależne modele opisujące charakter pracy ustroju. Pierwszy to mur jako konstrukcja anizotropowa, natomiast drugi przy założeniu muru jako konstrukcji izotropowej (monolitycznej) podlegającej prawu proporcjonalności Hooke'a.
- Przy założeniu struktury muru jako materiału anizotropowego, celowe jest dokonanie analizy naprężeń rozciągających powstających w obserwowanych murach, na podstawie wzorów przedstawionych m.in. przez Schuberta i Weschego (opis rozważanych przypadków zniszczenia muru przy rozciąganiu został przedstawiony w rozdziale 3.4 (p. (5),(6) niniejszej rozprawy).

(3) Zgodnie z teorią stanu naprężeń, aby wyznaczyć naprężenie w danym punkcie, konieczne jest przeprowadzenie przez niego myślowego przekroju i wyodrębnienie rozpatrywanego punktu w najbliższym sąsiedztwie [144]. W przestrzennym stanie naprężenia każdej orientacji przekroju odpowiada pewne naprężenie, dlatego do każdej płaszczyzny przekroju należy przyłożyć naprężenie, zastępujące działanie otoczenia. Na rysunku 4.2.4-1 przedstawiono teoretyczny element prostopadłościenny, wyodrębniony w najbliższym sąsiedztwie rozpatrywanego punktu, z wyszczególnieniem składowych normalnych i stycznych występujących naprężeń.



Rys. 4.2.4-1 Składowe normalne i styczne występujących naprężeń

(4) W niniejszej rozprawie do rozważań wyężenia materiału przejęto oznaczenia zgodne z rysunkiem 4.2.4-1, gdzie jeżeli zwrot osi zewnętrznej, normalnej do rozpatrywanego przekroju jest dodatni i zwrot składowego wektora naprężenia jest zgodny z dodatnim zwrotem odpowiedniej osi układu, to naprężenie uważa się za dodatnie. Za dodatnie uważa się również naprężenie, wówczas gdy oś zewnętrzna normalna do przekroju ma zwrot ujemny, a zwrot wektora naprężenia składowego jest zgodny z ujemnym zwrotem odpowiedniej osi układu. W pozostałych przypadkach przyjmuje się zwrot ujemny.

(5) Znając oznaczone na podstawie badań odkształcenie muru w kierunku równoległym do spoin wspornych celowe jest podjęcie próby wyznaczenia naprężeń normalnych na podstawie prawa proporcjonalności Hooke’a, tzn.:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (\text{Wzór 4.2.4-1})$$

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad (\text{Wzór 4.2.4-2})$$

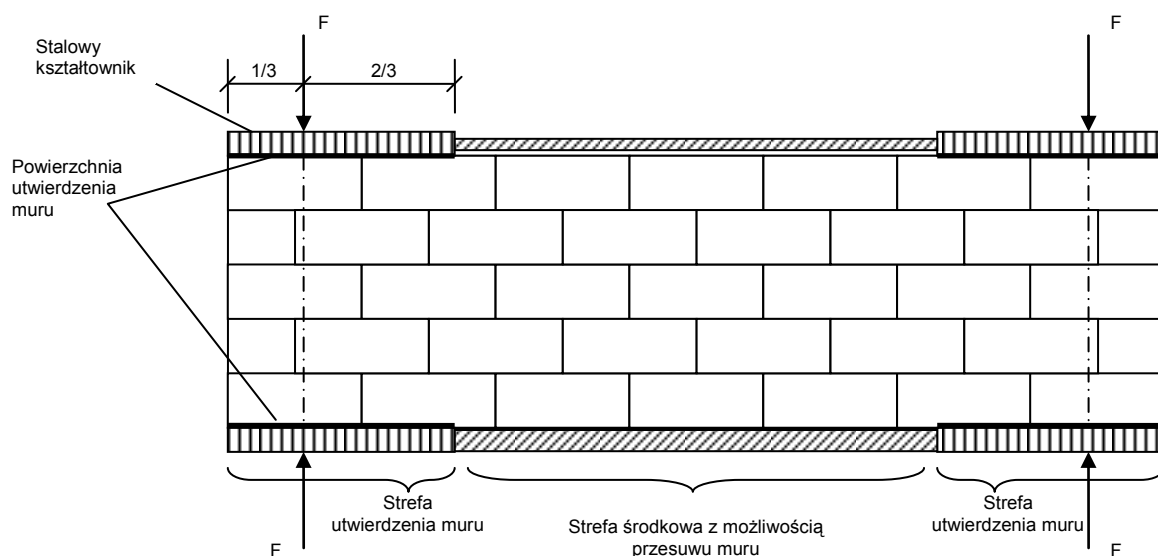
4.2.5. Przygotowanie stanowisk badawczych

(1) Prace związane z przygotowaniem stanowisk badawczych do prowadzenia rejestracji odkształceń murów rozpoczęto od podsumowania dotychczasowych obserwacji murów wykonanych w ramach prac wstępnych dotyczących badań podatności na zarysowania ustrojów ściennych wykonanych z lekkich odmian betonu komórkowego [145].

(2) Podstawowym założeniem przy zaprojektowaniu schematu obciążenia muru badawczego było takie jego obciążenie, aby umożliwiło ono obserwację naprężeń rozciągających w kierunku równoległym do spoin wspornych, osiągnięcie naprężeń granicznych, które w określonych warunkach fizycznych mogą doprowadzić do powstania zarysowania muru lub jego pęknięcia. Przyjęcie takiego schematu statycznego ustroju, umożliwi wymuszenie naprężeń rozciągających w strefie środkowej muru w całym jego przekroju.

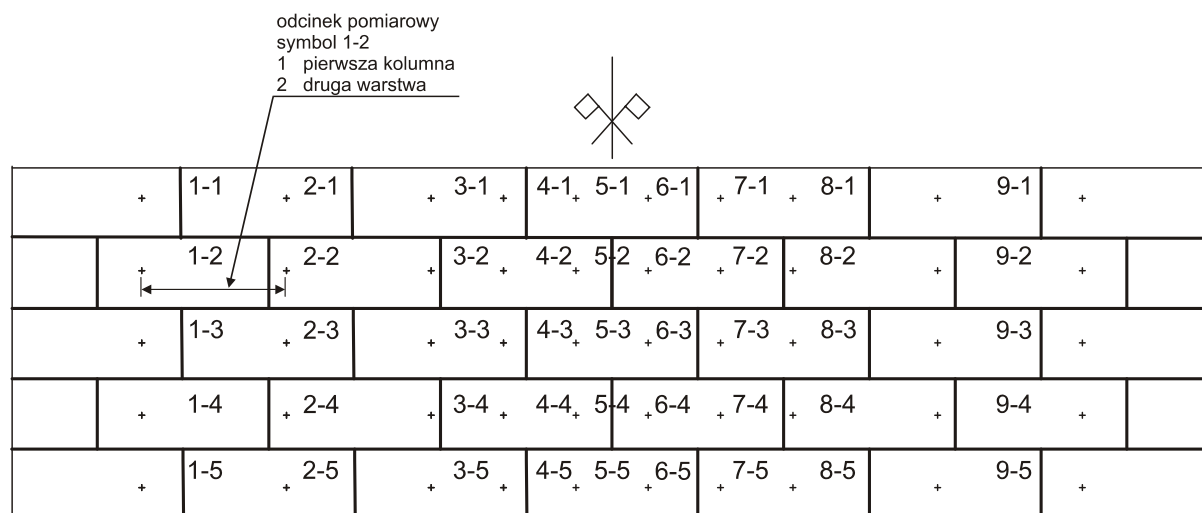
Dodatkowym założeniem było stworzenie takich warunków pracy ustroju, aby były one zbliżone do warunków naturalnych, w jakich pracuje mur w obiekcie budowlanym. Miejscami, w których często powstają zarysowania w konstrukcjach murowych są podokienniki i nadproża, dlatego uznano, że układ naprężeń wywołany przez obciążenie na stanowiskach badawczych powinien być zbliżony do schematu przedstawionego na rysunku 4.2.5-1.

(3) Podsumowując założenia wynikające z wcześniej prowadzonych prac uznano, że stanowiska badawcze zostaną wykonane dla murów o długości 4,20 m, wysokości 1,25 m i grubości 0,24 m. Dokładne wymiary stanowisk badawczych dostosowano do rzeczywistych wymiarów wynikających z grubości spoiny, którą były łączone elementy murowe z autoklawizowanego betonu komórkowego. Schemat obciążenia jest pewnego rodzaju symulacją obciążeń dla strefy podokiennej w budynku dwukondygnacyjnym, gdzie teoretyczna szerokość otworu okiennego wynosi ok. 2,10 m (Rys. 4.2.5-1). Strefa podokienna opisana jest jako strefa środkowa z możliwością przesuwu. Mur badawczy obciążono zgodnie ze schematem siłą F , która co do wartości zbliżona jest do obciążenia, jakie wywiera przykładowy ciężar jednej kondygnacji wzniesionej ponad teoretyczny pas podokienny. Do obciążenia wliczono ciężar obliczeniowy ściany z betonu komórkowego oraz stropu żelbetowego przy rozpiętości jego podparcia ok. 6 m.



Rys. 4.2.5-1 Schemat obciążenia muru badawczego

(4) Obciążenie skupione w postaci siły F przyłożone jest punktowo do kształtowników stalowych w odległości $1/3$ od lica muru, gdzie pośrednio poprzez powierzchnię utwardzenia wywiera nacisk w skrajnych odcinkach muru na odcinku ok. 1 m. Do powierzchni kształtowników w strefie utwardzenia muru dla zwiększenia przyczepności na płaszczyźnie styku przyspawano poprzecznie do tetrycznego kierunku przesuwu muru pręty stalowe $\phi 2$ mm. Powyższe utwardzenie muru pozwala na wywołanie naprężeń rozciągających w kierunku równoległym do spoin wspornych dla strefy środkowej muru przy zakładanych zmianach termiczno-wilgotnościowych w ustroju. Układ naprężeń związany zarówno z obciążeniem wywieranym przez siłę F jak i wpływem warunków atmosferycznych jest zbliżony do tego, który występuje w budynkach. W strefie środkowej, gdzie istnieje możliwość przesuwu względem podkładu w kierunku równoległym do spoin wspornych (rys. 4.2.5-2), po wykonaniu murów została umieszczona siatka punktów pomiarowych (zwanych dalej reperami) umożliwiającą pomiar odkształceń na powierzchni muru. Na podstawie doświadczeń z prac wstępnych [145] przyjęto rozkład reperów oraz poszczególnych odcinków pomiarowych wraz z ich opisem jak na rysunku 4.2.5-2.



Rys. 4.2.5-2 Rozmieszczenie bloczków w murze i usytuowanie reperów

(5) Dla każdego stanowiska badawczego przyjęto 9 kolumn pomiarowych, po 5 odcinków pomiarowych w jednej kolumnie, co daje łącznie 45 odcinków pomiarowych na jednym murze. Odcinki te miały dwa zakresy długości: 250 mm i 500 mm. Część z tych odcinków pomiarowych przecina spoinę pionową. Stanowiska badawcze zostały usytuowane w taki sposób, aby jedna z powierzchni muru była od strony nasłonecznionej (południowej) i zawierała umieszczono siatkę reperów. Pomiary wykonywano tensometrami nasadowymi z możliwością odczytu przy pomiarze odkształceń z dokładnością do 0,001 mm.

(6) Dla każdego stanowiska wykonano dodatkowo specjalny „daszek” ze styropianu pełniący dwie główne funkcje, tj. zabezpieczenie muru przed deszczem oraz zabezpieczenie stalowej konstrukcji przed nagraniem. Opady deszczu na niezabezpieczony od górnej części mur spowodowałyby jego nadmierne zawilgocenie, co było by błędem wykonawczym, natomiast nagrzanie konstrukcji stalowej (ramy) mogłoby spowodować jej wydłużenie, a co za tym idzie zniszczenie muru. Daszek był dopasowany co do wielkości w taki sposób, aby nie przysłaniał od promieni słonecznych badanego muru.

4.2.6. Sezonowanie elementów murowych

(1) Przed przystąpieniem do wykonania poszczególnych murów badawczych elementy murowe z autoklawizowanego betonu komórkowego były monitorowane od momentu wyjścia z autoklawu do ich wmurowania, co było bardzo ważne w dalszych etapach prac. Początkowa

wilgotność betonu komórkowego (wilgotność poautoklawizacyjna) badana była w okresie nie dłuższym niż 48 godzin od wyładunku z autoklawu. Na terenie zakładu produkcyjnego po paletyzacji zgodnie z cyklem produkcyjnym beton komórkowy był szczelnie zafoliowany. Uwzględniając paletyzację ze szczelnym foliowaniem można przyjąć, że otrzymany wynik odpowiadał wilgotności poautoklawizacyjnej. Wilgotność betonu komórkowego w momencie jego wmurowania, uznawana jest za jeden z istotnych czynników wpływających na powstawanie rys. W celu określenia właściwego momentu do wzniesienia odpowiednich murów badawczych, wilgotność elementów murowych podczas sezonowania była systematycznie sprawdzana metodą wagową. Elementy murowe sezonowane były w hali w sposób przedstawiony na rysunku 4.2.6-1.

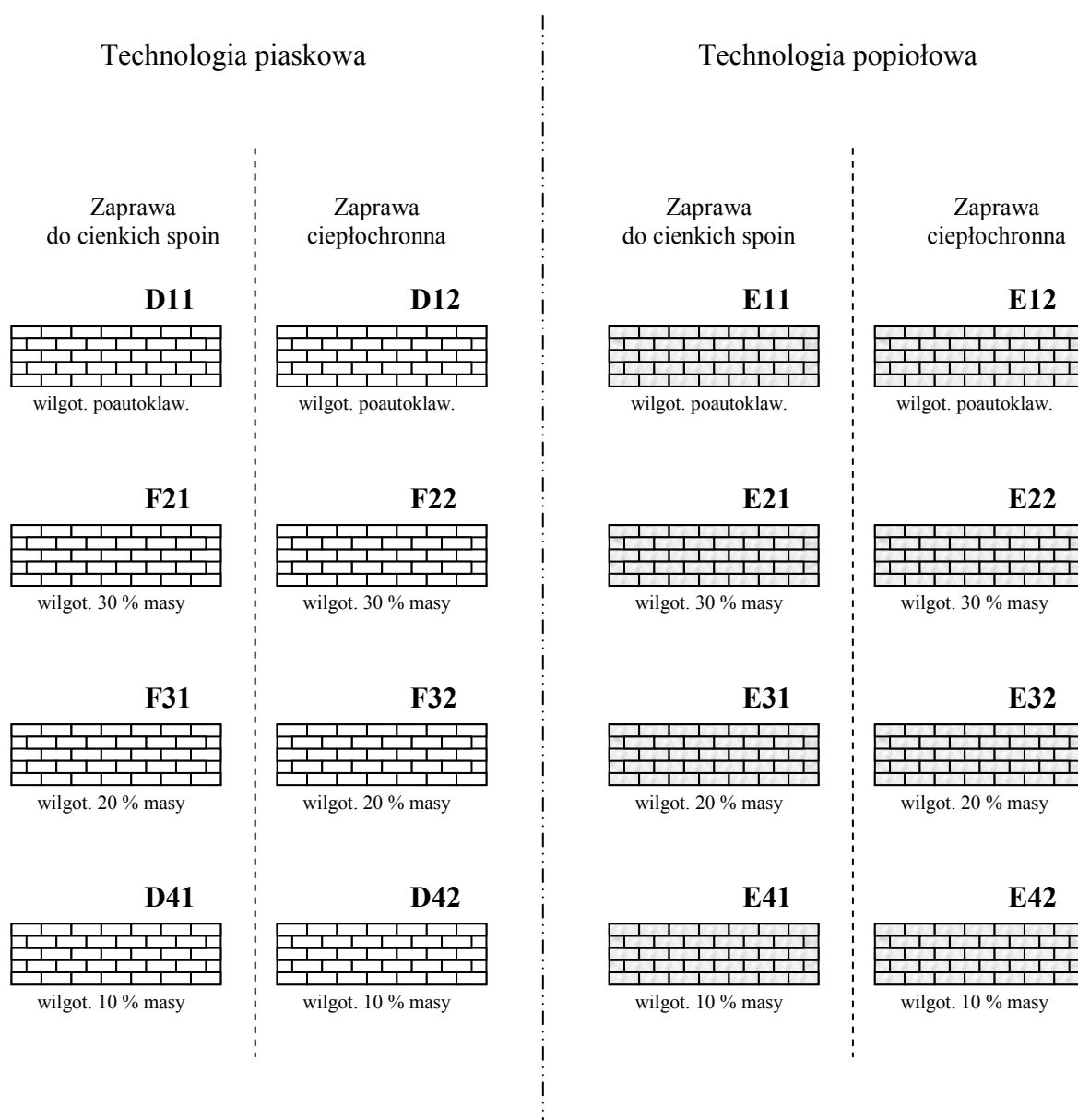


Rys. 4.2.6-1 Suszenie (sezonowanie) elementów murowych z betonu komórkowego przed wmurowaniem

4.2.7. Wykonanie murów

(1) Badane mury można podzielić wg technologii betonu komórkowego na dwie podstawowe grupy: technologii piaskowej (8 murów) i technologii popiołowej (8 murów). W każdej z tych grup wykonano mury na dwóch rodzajach zapraw: zaprawa do cienkich spoin (4 mury) i za-

prawa ciepłochronna (4 mury). Dla każdej podgrupy 4 murów wykonano mury w różnych wilgotnościach betonu komórkowego przy jego wmurowaniu tj. poautoklawizacyjnej, 30 %, 20 %, 10 %. Każdy z murów oznaczono odpowiednim symbolem składającym się z trzech znaków. Pierwszym znakiem jest litera oznaczająca producenta betonu komórkowego (producenti D, E i F), na drugim cyfra od 1 do 4 oznaczająca odpowiednio wilgotność betonu komórkowego przy wmurowaniu (tj. 1 – wilgotność poautoklawizacyjna, 2 – wilgotność 30 % masy, 3 – wilgotność 20 % masy, 4 – wilgotność 10 % masy. Trzecim znakiem jest również cyfra, ale w zakresie od 1 do 2 i oznacza rodzaj zaprawy (1 – zaprawa do cienkich spoin, 2 – zaprawa ciepłochronna). Powyższy układ murów przedstawiono na schemacie poniżej.



Rys. 4.2.7-1 Zestawienie rodzajów murów badawczych

(2) Mury zgodnie z opisem w 4.2.5 wzniesiono na poligonie w nasłonecznionym miejscu w taki sposób, aby płaszczyzna ściany była prostopadła do kierunku północ – południe. Takie usytuowanie pozwala na pełne nasłonecznienie w ciągu dnia jednej z płaszczyzn muru. Wzniesione mury przedstawiono na rysunkach poniżej.



Rys. 4.2.7-2 Mury badawcze o symbolach D11, D12, E11, E12, E21



Rys. 4.2.7-3 Mury badawcze o symbolach E22, E31, E32, D41, D42

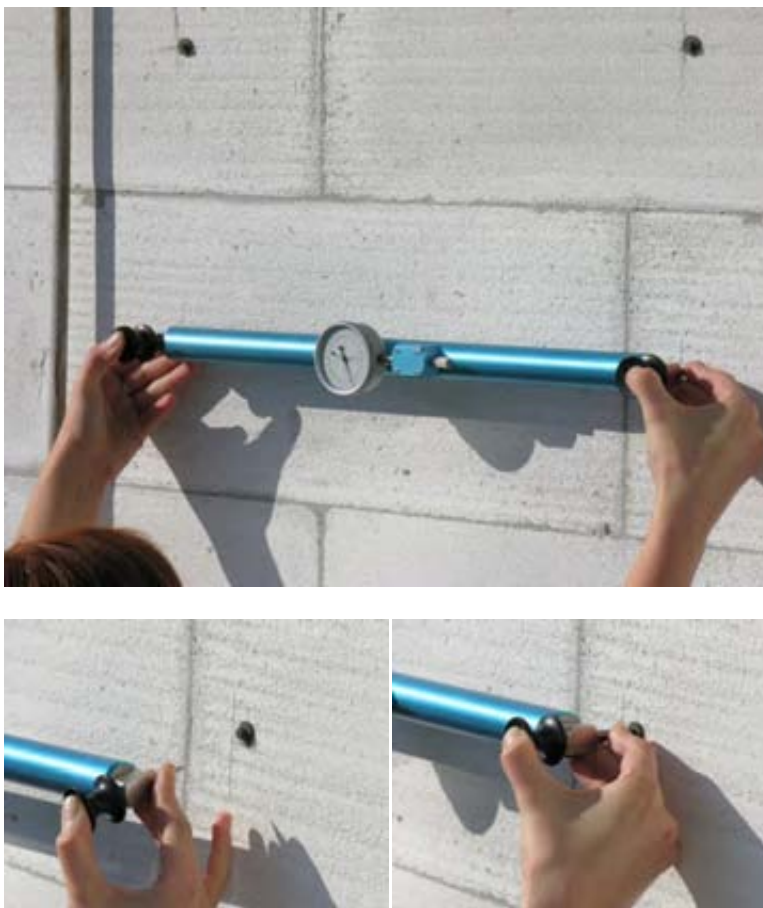


Rys. 4.2.7-4 Mury badawcze o symbolach F21, F22, F31, F32, E41, E42

(3) Na południowej powierzchni murów przyklejono w ustalonych punktach siatkę reperków (zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku rys. 4.2.5-2), pozwalającą na prowadzenie przy pomocy tensometru nasadowego pomiarów zmian długości odcinków pomiarowych (Rys. 4.2.7-5 i 4.2.7-6). Na rysunku 4.2.7-5 widoczny jest styropianowy daszek zabezpieczający murek od bezpośredniego wpływu opadów atmosferycznych jak i wysokich temperatur mogących spowodować nagrzanie stalowej ramy, przez co mogą być wywołane dodatkowe naprężenia w murku spowodowane odkształceniami stali. Zgodnie z przyjętą metodyką, na północnej stronie muru, zatynkowano gładką zaprawą połączenia bloczków na szerokości ok. 8 cm wzdłuż spoin pionowych i poziomych, aby ułatwić obserwację powstających ewentualnie zarysowań w strefie spoiny. (Rys. 4.2.7-7).



Rys. 4.2.7-5 Rozmieszczenie siatki reperów na jednym z murów badawczych



Rys. 4.2.7-6 Przykładowy pomiar zmian długości tensometrem nasadowym



Rys. 4.2.7-7 Zatynkowane spoiny dla ułatwienia obserwacji – widok od strony północnej

(4) Pierwotnie zakładano ustawienie obok każdego z murów wolnostojących bloczków dla określenia w nich zmian liniowych i wilgotności. Badania tych bloczków miały na celu w wytypowanych murach przy założeniu tej samej zmiany wilgotności betonu (zarówno w badanym bloczku, jak i w murze) oznaczenie naprężeń w bloczku znajdującym się w murze, poprzez zmiany długości bloczków składowanych przy badanych murkach. Badań tych nie wykonano, ponieważ w praktyce wilgotność wolnostojących elementów murowych odbiegała zdecydowanie od wilgotności elementów wmurowanych.

4.2.8. Obserwacja i pomiary zmian liniowych murów

(1) Mury badawcze po ich wykonaniu podlegały obserwacji i pomiarom w okresie do 120 dni, przy czym pierwsze tygodnie po wymurowaniu częstotliwość pomiarów była zwiększona. Obserwacja murów polegała na rejestrowaniu powstających ewentualnie zarysowań i pęknięć z oceną ich szerokości rozwarcia. Natomiast całościowo odkształcenia zgodnie z założeniem były pierzone za pośrednictwem umocowanej na murze siatki reperków.

Łącznie wykonano ponad 10 tysięcy pomiarów tensometrem nasadowych ustalonych odcinków pomiarowych, a wyniki obserwacji oraz wspomnianych zarysowaniu przedstawiono w punkcie 4.3 niniejszej rozprawy.

4.3. Wyniki badań murów wykonanych w skali 1:1

(1) Zgodnie z założeniami programu niniejszej pracy (punkt 4.2.4.) wykonane w skali naturalnej (1:1) mury badawcze podlegały obserwacjom przede wszystkim pod względem zarysowań oraz odkształceń wynikających ze zmian cieplno-wilgotnościowych materiału. Szczegółowy opis stanowisk badawczych i metodyki prowadzonych badań przedstawiono w rozdziałach od 4.2.4 do 4.2.7 niniejszej pracy. Podsumowując podstawowe punkty programu warto zaznaczyć, iż założono 4 grupy (rodzaje) murów badawczych odróżniających się zmianą rodzaju elementów murowych (technologia popiołowa i piaszkowa) i zastosowanej do ich łączenia zaprawy murarskiej (ciepłochronnej i do cienkich spoin). Z kolei w każdej grupie wyróżnić można po cztery mury, które różnią się wilgotnością elementów murowych w momencie wmurowania, tj.: wilgotność poautoklawizacyjna oraz wilgotność 30 %, 20 % i 10 % masy.

(2) Przedstawiając wyniki przeprowadzonych na murach badawczych badań i obserwacji uznano za celowe w pierwszej kolejności przedstawić charakterystykę powstałych w murach zarysowań, przebieg i położenie rys oraz przede wszystkim pomierzoną ich rozwartość. Następnie z uwagi na dużą liczbę wyników pomiarów odkształceń murów badawczych (około 10 tys. pomiarów odkształceń tensometrem nasadowym) w rozdziale tym zostaną one przedstawione dla wybranych murów i obszarów ich płaszczyzn. Natomiast całość wyników pomiarów odkształceń zamieszczono w załącznikach do niniejszej pracy w postaci wykresów (załącznik 1 i 2).

4.3.1. Charakter zarysowań powstałych w murach badawczych

(1) Dla ułatwienia formy przedstawienia wyników obserwacji charakteru powstałych w murach badawczych zarysowań oraz późniejszej ich analizy zdecydowano się podzielić całość danych na cztery podgrupy względem zawilgocenia wmurowywanych elementów murowych, tj. przy wilgotności poautoklawizacyjnej oraz wilgotności 30 %, 20 % i 10 % masy.

(2) Na podstawie badań wyróżnić można rysy powstające na styku elementu murowego z zaprawą (zarówno w płaszczyźnie spoiny wspornej jak i spoiny pionowej) oraz rys w kierunku prostopadłym do spoin wspornych powstających w autoklawizowanym betonie komórkowym. W większości zasięg zarysowań przebiegał na całej grubości muru w płaszczyźnie prostopadłej

do jego powierzchni zewnętrznej. Ponadto zauważalne były w murach z betonu komórkowego na kruszywie popiołowym zarysowania w postaci siatki rys o rozwarości nie więcej niż 0,1 mm sięgające głębokości kilku centymetrów, tak zwane zarysowania przypowierzchniowe, jednak zarysowania te w szczegółowej analizie wyników obserwacji zostały pominięte, ponieważ nie wynikają one z wywołanych na stanowisku badawczym naprężeń rozciągających.

(3) Charakter oraz szerokość rozwarcia rys zaobserwowanych w murach badawczych przedstawiono w postaci schematycznych rysunków murów, na których nakreślono „mapę” zarysowań wraz z rozwarciem poszczególnych rys przypisując (w zakresie kolorów) do czterech grup, tj. rozwarcie rysy w przedziale do 0,2 mm włącznie, rozwarcie rys w przedziale od 0,2 do 0,4 włącznie oraz przedziały od 0,4 do 0,9 mm i powyżej 0,9 mm. Zmienność rodzajów murów przedstawiono poglądowo na rysunku 4.2.7-1.

4.3.1.1. Mury z ABK o wilgotności poautoklawizacyjnej

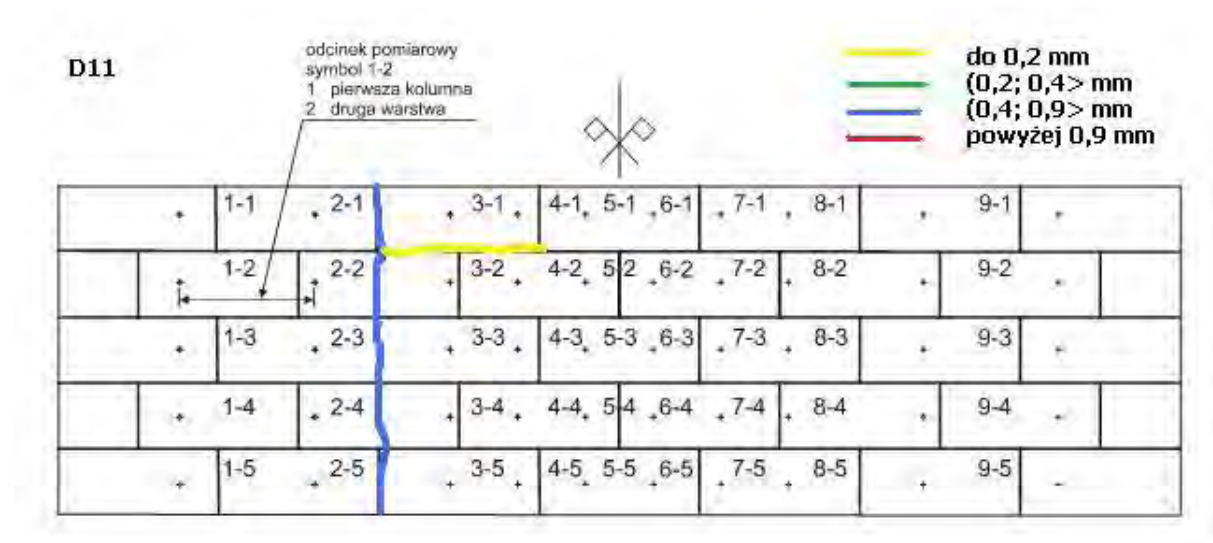
(1) W tej grupie znajdują się cztery mury różniące się rodzajem betonu komórkowego zastosowanego do wykonania elementów murowych oraz rodzajem zaprawy łączącej. Zgodnie z opisem przedstawionym w rozdziale 4.2.7 niniejszej rozprawy mury oznaczone symbolem D i F wykonane są z elementów murowych technologii „piaskowej” (na kruszywie piaskowym), natomiast mury oznaczone symbolem E technologii „popiołowej” (na kruszywie popiołowym). Cyfra na pierwszym miejscu po odpowiedniej literze oznacza poziom zawilgocenia betonu w chwili wmurowania (i tak odpowiednio „1” – wilg. poautoklawizacyjna; „2” – 30 % masy, „3” – 20 % masy, „4” – 10 % masy). Cyfra na drugim miejscu w zmienności „1” i „2” oznacza odpowiednio mur wzniesiony na zaprawie do cienkich spoin i zaprawie ciepłochronnej. Przykładem może być mur o symbolu D11, tj. mur wykonany z elementów murowych z autoklawizowanego betonu komórkowego na kruszywie piaskowym o wilgotności wmurowania poautoklawizacyjnej łączony zaprawą do cienkich spoin.

(2) Położenie rys, które pojawiły się w badanych murach, zostało przedstawione na rysunkach w sposób następujący. Na rysunku widoczna jest strona południowa muru (czyli nasłoneczniona), a mapa siatki reperów zgodnie z przyjętym opisem w rozdziale 4.2.5 dzieli się na kolumny (jest ich 9) oraz wiersze (5 szt.). Ten sam schemat zróżnicowania murów będzie powtarzał się w każdej z czterech rozważanych tu grup.

(2) Cechą wspólną dla opisanych w danej grupie murów jest zawilgocenie elementów mурowych z betonu komórkowego w chwili ich wmurowywania. Zawilgocenie to ma w konsekwencji wpływ na ostateczny poziom odkształceń, a co za tym idzie powstających w murze naprężeń i ewentualnych zarysowań. W tej grupie jest to wilgotność poautoklawizacyjna, czyli największa wilgotność wśród rozważanych w niniejszej rozprawie.

(3) **Mur D11** został wykonany z elementów mурowych z betonu komórkowego na kruszywie piaskowym przy wilgotności wmurowywanego materiału poautoklawizacyjnej, łączonych zaprawą do cienkich spoin (Rys. 4.3.1.1-1).

W murze tym jedno główne pęknięcie (kolumna 2) obserwowane po obu stronach muru, którego szerokość rozwarcia mierzona od strony południowej ściany kształtowała się na poziomie 0,4-0,6 mm. Pęknięcie to przenika mur przechodząc naprzemiennie spoina pionowa blocek, natomiast wyróżnione kolorem żółtym zarysowanie jest znikome.

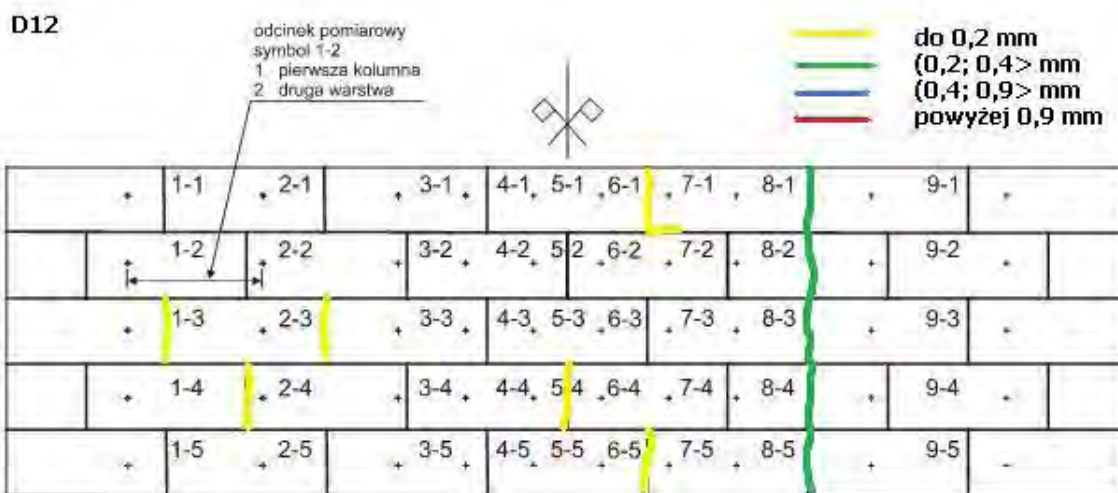


Rys. 4.3.1.1-1 Położenie, przebieg i rozwarcie rys w murze badawczym D11

(4) **Mur D12** został wykonany z elementów mурowych z betonu komórkowego na kruszywie piaskowym przy wilgotności wmurowywanego materiału poautoklawizacyjnej, łączonych zaprawą do ciepłochronną (Rys. 4.3.1.1-2).

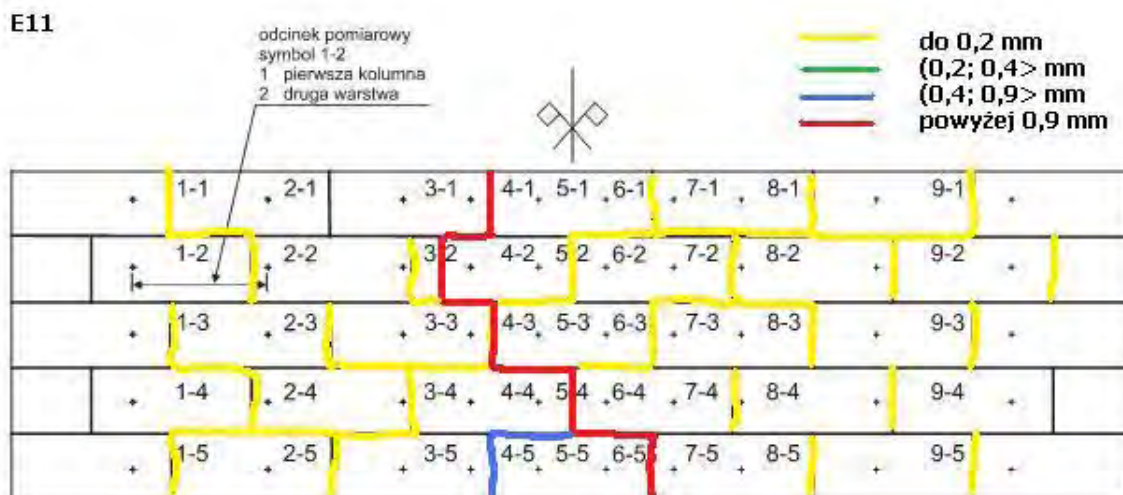
Oznaczone na rysunku kolorem zielonym zarysowanie (kolumna 8) w istocie jest pęknięciem obserwowanym po obu stronach muru, gdzie szerokość rozwarcia od strony południowej kształtowała się na poziomie 0,2-0,3 mm. Pęknięcie to jest pęknięciem głównym przechodzą-

cym naprzemiennie spoina pionowa bloczek, natomiast wyróżnione kolorem żółtym zarysowania są znikome nie przekraczające wartości szerokości rysy 0,1 mm.



Rys. 4.3.1.1-2 Położenie, przebieg i rozwarcie rys w murze badawczym D12

(5) **Mur E11** został wykonany z elementów murowych z betonu komórkowego na kruszywie popiołowym przy wilgotności wmurowywanego materiału poautoklawizacyjnej, łączonych zaprawą do cienkich spoin (Rys. 4.3.1.1-3).



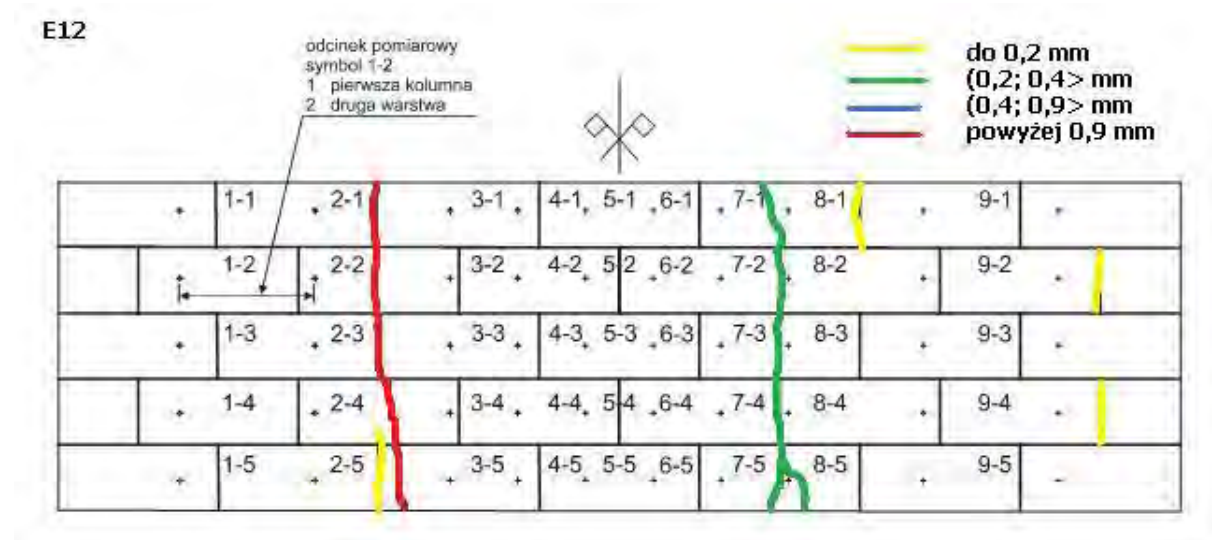
Rys. 4.3.1.1-3 Położenie, przebieg i rozwarcie rys w murze badawczym E11

W murze tym widoczne jest wyraźne pęknięcie przechodzące w kierunku pionowym po linii spoin (na rysunku wyróżnione kolorem czerwonym), odpowiednio w odcinkach pomiarowych

4-1, 3-2, 4-3, 5-3, 6-5. Pęknięcie to na odcinku 3-2 przebiega po elemencie murowym. Szerokość tego pęknięcia oznaczona na płaszczyźnie ściany południowej kształtowała się na poziomie 1 mm. Na rysunku widoczna jest również cała siatka zarysowań (oznaczonych kolorem żółtym), których rozwartość nie przekraczała przeważnie 0,1 mm. Wyjątkiem jest zaznaczone kolorem niebieskim zarysowanie na odcinku 4-5, którego szerokość rozwarcia wyniosła około 0,3 mm.

(6) **Mur E12** został wykonany z elementów murowych z betonu komórkowego na kruszywie popiołowym przy wilgotności wmurowywanego materiału poautoklawizacyjnej, łączonych zaprawą do ciepłochronną (Rys. 4.3.1.1-4).

W murze tym wyróżnić można dwa główne pęknięcia w kierunku pionowym przechodzące naprzemiennie przez spoinę bloczek, pierwsze w kolumnie 2 oznaczone kolorem czerwonym o szerokości rozwarcia na poziomie około 2,0-2,5 mm (większe), natomiast drugie w kolumnie 7 (kolor zielony) na poziomie zarysowania 0,3 mm. W obu przypadkach obserwowane pęknięcia w dolnej części muru, to jest w ostatniej warstwie elementów murowych (odcinki pomiarowe 2-5;7-5), notowane są w betonie komórkowym, a nie spoinie. Pozostałe zarysowania oznaczone kolorem żółtym są znikome i nie przekraczają 0,1 mm.

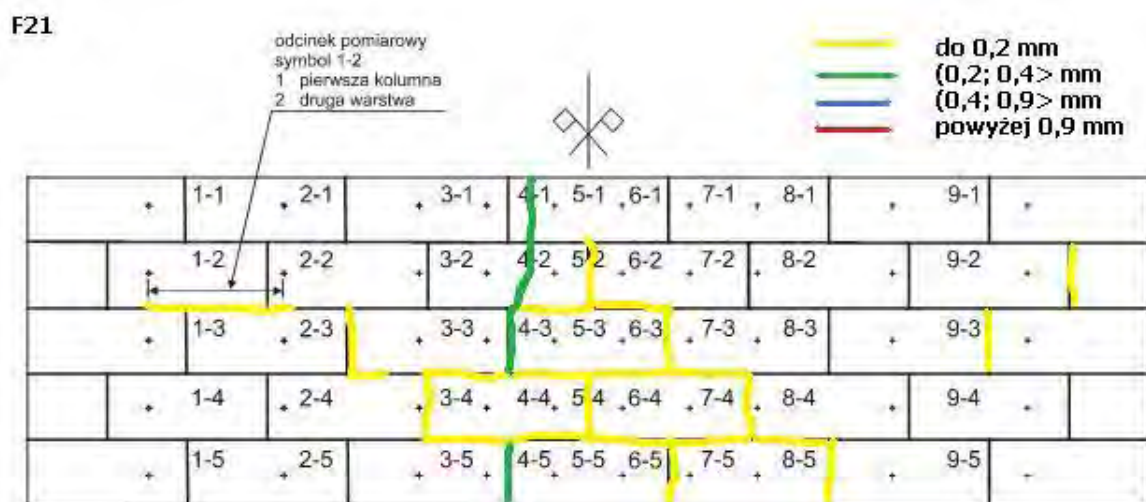


Rys. 4.3.1.1-4 Położenie, przebieg i rozwarcie rys w murze badawczym E12

4.3.1.2. Mury z ABK o wilgotności ok. 30 % masy

(1) **Mur F21** został wykonany z elementów murowych z betonu komórkowego na kruszywie piaskowym przy wilgotności wmurowywanego materiału 30 % masy, łączonych zaprawą do cienkich spoin (Rys. 4.3.1.2-1).

Widoczne na rysunku zarysowania trudno zakwalifikować jako pęknięcia, może z wyjątkiem zaznaczonego kolorem zielonym w kolumnie 4 zarysowania, którego szerokość rozwarcia mierzona na stornie południowej muru nie przekraczała 0,3 mm. Pęknięcie to jest stosunkowo niewielkie jednak na odcinku 4-2 widoczne jest jego przejście przez element murowy. Natomiast na odcinku pomiarowym 4-4 można powiedzieć, że pęknięcie to rozkłada się na dwa okalające element murowy po spoinach pionowych (odcinki 3-4; 5-4). Pozostałe zarysowania oznaczone kolorem żółtym są znikome, a ich szerokość rozwarcia nie przekracza wartości 0,1 mm.

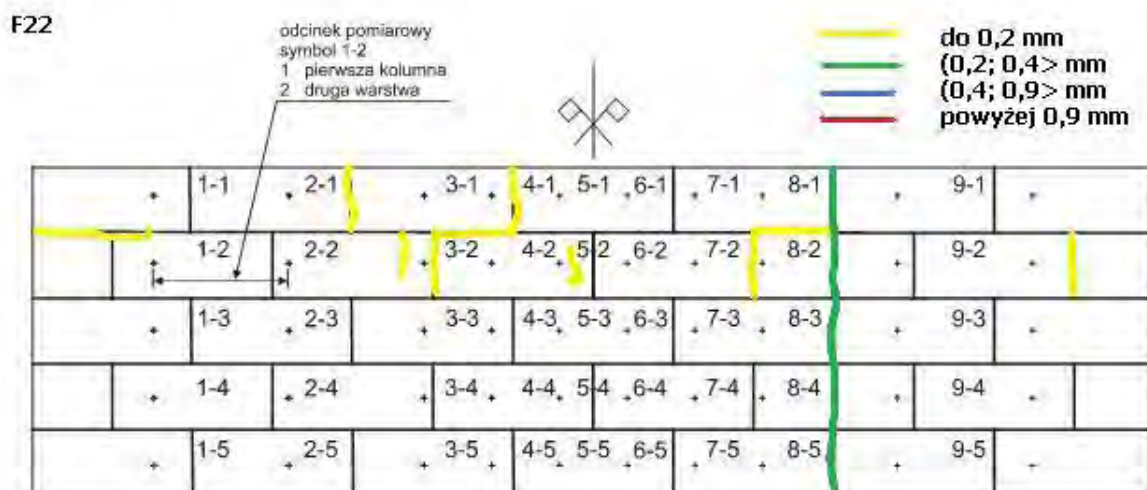


Rys. 4.3.1.2-1 Położenie, przebieg i rozwarcie rys w murze badawczym F21

(2) **Mur F22** został wykonany z elementów murowych z betonu komórkowego na kruszywie piaskowym przy wilgotności wmurowywanego materiału 30 % masy, łączonych zaprawą do ciepłochronną (Rys. 4.3.1.2-2).

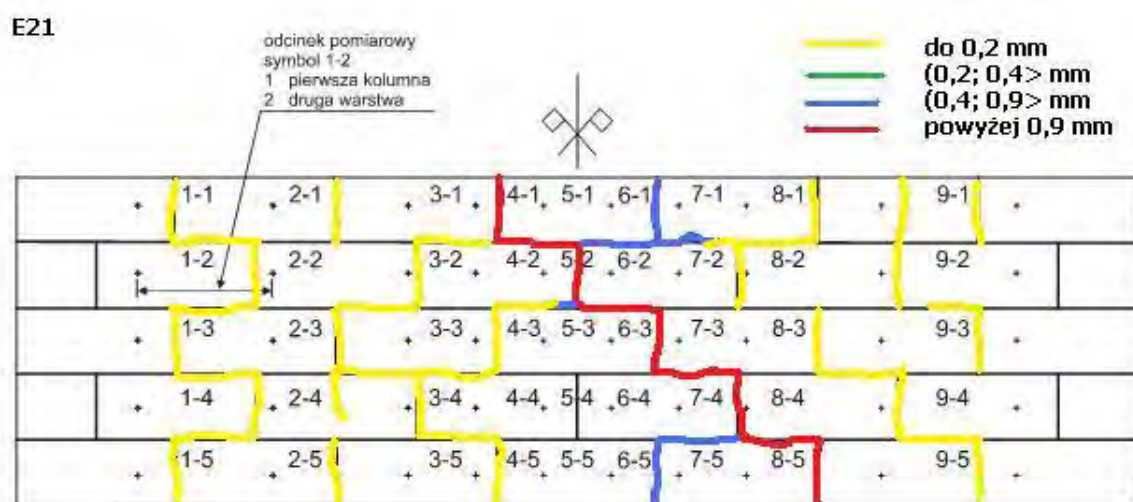
Podobnie jak w przypadku muru F21 trudno zakwalifikować obserwowane zarysowania do pęknięć, może za wyjątkiem powstałej w kolumnie 8 rysy, która obserwowana jest po obu stronach muru. Jej szerokość rozwarcia pomierzona od strony południowej nie przekracza

wartości 0,3 mm, a raczej kształtuje się na poziomie 0,2-0,3 mm. Pęknięcie to przechodzi jednak naprzemiennie spoina bloczek w kierunku pionowym. Pozostałe zarysowania rejestruje się na poziomie znikomym, gdzie szerokość rozwarcia rysy nie przekracza 0,1 mm (oznaczone kolorem żółtym na rysunku).



Rys. 4.3.1.2-2 Położenie, przebieg i rozwarcie rys w murze badawczym F22

(3) **Mur E21** został wykonany z elementów murowych z betonu komórkowego na kruszywie popiołowym przy wilgotności wmurowywanego materiału 30 % masy, łączonych zaprawą do cienkich spoin (Rys. 4.3.1.2-3).

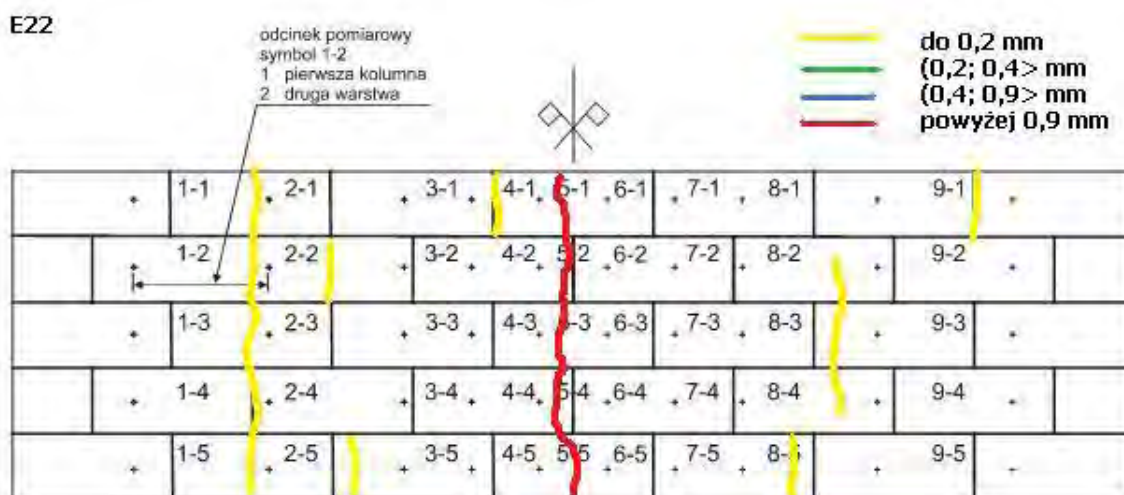


Rys. 4.3.1.2-3 Położenie, przebieg i rozwarcie rys w murze badawczym E21

W odróżnieniu od murów F21 i F22 obserwowana rysa w murze E21 jest bardzo wyraźna i kwalifikowana do pęknięcia o szerokości rozwarcia na poziomie 1,5 mm. Pęknięcie to wyraźnie przebiega w kierunku pionowym w linii spoin (na rysunku oznaczono kolorem czerwonym), przebiegając odpowiednio w odcinkach pomiarowych numer 4-1, 5-2, 6-3, 7-4, 8-5. Wyróżnić też należy pęknięcie o mniejszej szerokości rozwarcia (na poziomie 0,4 mm) widoczne na odcinkach pomiarowych 6-1 i 6-5. Poza wymienionymi pęknięciami widoczne są liczne rysy szerokości do 0,1 mm przebiegające wzdłuż spoin (na rysunku oznaczone kolorem żółtym).

(4) **Mur E22** został wykonany z elementów murowych z betonu komórkowego na kruszywie popiołowym przy wilgotności wmurowywanego materiału 30 % masy, łączonych zaprawą do ciepłochronną (Rys. 4.3.1.2-4).

Główna rysa (kolor czerwony), a raczej pęknięcie, przebiegająca w kolumnie piątej w kierunku pionowym w sposób dotąd niespotykany przebiega niezależnie do spoin pionowych, można powiedzieć, że przechodzi na całej swojej długości w kolejnych elementach murowych. Szerokość rozwarcia rysy kształtuje się na poziomie 1,0-1,3 mm. Wyróżnić można też drugie pęknięcie przebiegające w kolumnie 2 naprzemiennie bloczek spoina, jednak szerokość rozwarcia jest zdecydowanie mniejsza, bo nie przekracza 0,2 mm (kolor żółty). Zauważalne są również zarysowania o podobnym charakterze (rozwartość do 0,2), jednak jest ich niewiele.

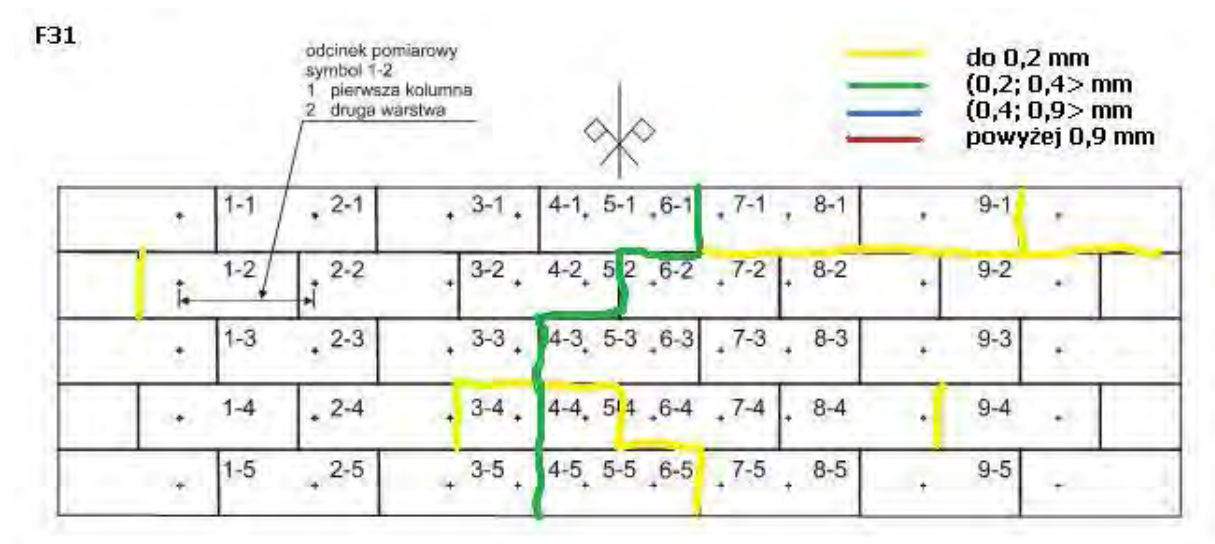


Rys. 4.3.1.2-4 Położenie, przebieg i rozwarcie rys w murze badawczym E22

4.3.1.3. Mury z ABK o wilgotności ok. 20 % masy

(1) **Mur F31** został wykonany z elementów murowych z betonu komórkowego na kruszywie piaskowym przy wilgotności wmurowywanego materiału 20 % masy, łączonych zaprawą do cienkich spoin (Rys. 4.3.1.3-1).

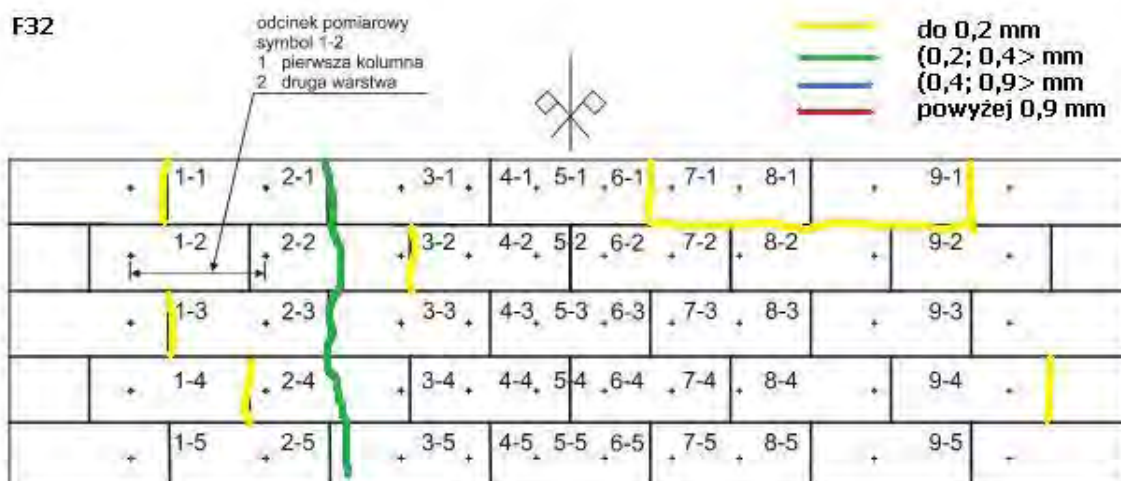
W murze tym wyróżnia się pęknięcie główne (kolor zielony) o szerokości rozwarcia około 0,3 mm, mierzone po stronie południowej muru. Pęknięcie to przebiega częściowo spoinami, a na odcinku pomiarowym 4-4 w elemencie murowym. Zauważalne są również nieliczne zarysowania oznaczone kolorem żółtym, których szerokość zarysowania nie przekracza 0,1 mm.



Rys. 4.3.1.3-1 Położenie, przebieg i rozwarcie rys w murze badawczym F31

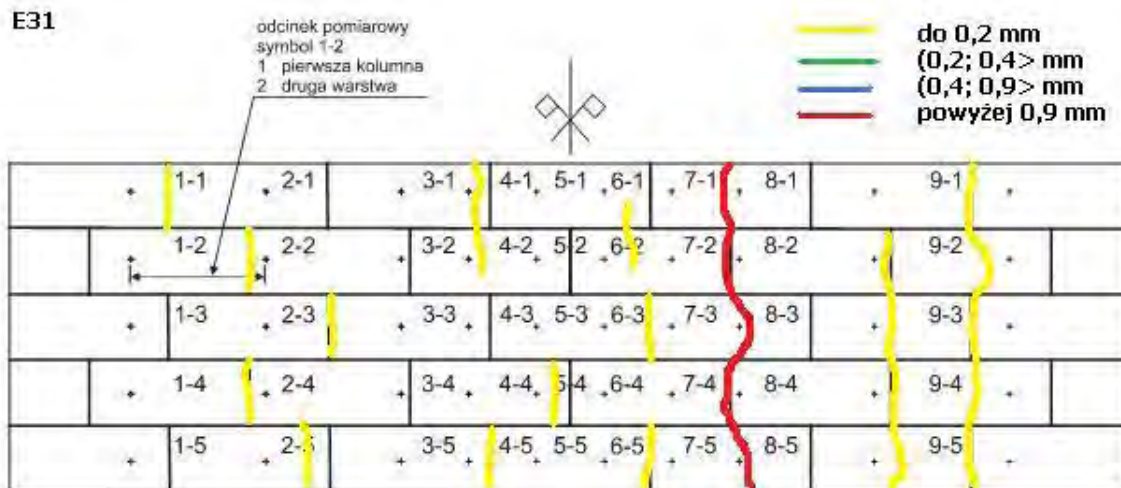
(2) **Mur F32** został wykonany z elementów murowych z betonu komórkowego na kruszywie piaskowym przy wilgotności wmurowywanego materiału 20 % masy, łączonych zaprawą do ciepłochronną (Rys. 4.3.1.3-2).

W murze F32 szerokość pęknięcia głównego jest na tym samym poziomie jak w przypadku muru F31, tj. 0,3-0,4 mm, natomiast wystąpiło w kolumnie 2, a jego przebieg jest zbliżony do linii prostej w kierunku pionowym przebiegającej naprzemiennie spoina bloczek (z tym że na odcinku 2-5 zamiast w spoinie pęknięcie nastąpiło w elemencie murowym). Zauważalne drobne zarysowania nie przekraczające szerokości rozwarcia na poziomie 0,1 mm oznaczono na rysunku kolorem żółtym. Jednak nie obserwuje się innych zarysowań oprócz pęknięcia głównego, które przebiegało by w linii ciągłej przez całą wysokość badanego muru.



Rys. 4.3.1.3-2 Położenie, przebieg i rozwarcie rys w murze badawczym F32

(3) **Mur E31** został wykonany z elementów murowych z betonu komórkowego na kruszywie popiołowym przy wilgotności wmurowywanego materiału 20 % masy, łączonych zaprawą do cienkich spoin (Rys. 4.3.1.3-3).

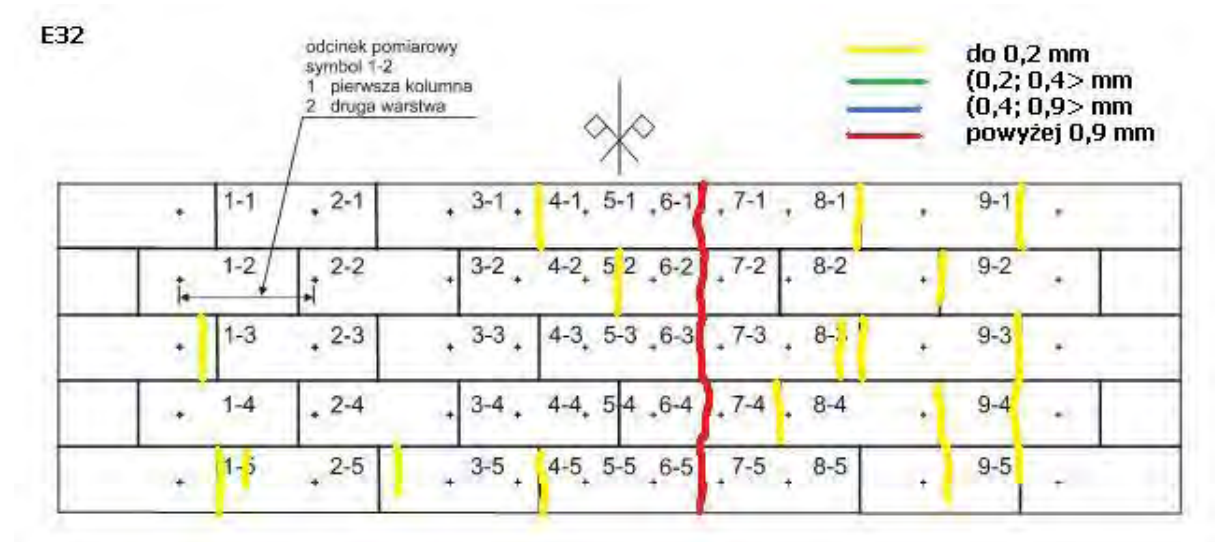


Rys. 4.3.1.3-3 Położenie, przebieg i rozwarcie rys w murze badawczym E31

Podobnie jak dla murów na kruszywie popiołowym o wilgotności wmurowania poautoklawizacyjnej oraz 30 % masy tak i dla rozpatrywanego tutaj poziomu zawilgocenia (20 % masy) powstałe pęknięcie jest znaczące. Zaznaczone kolorem czerwonym na styku kolumn 7 i 8 pęknięcie przebiega naprzemiennie spoina bloczek, a jego szerokość rozwarcia kształtuje się

na poziomie 1,0-1,5 mm. Widoczne jest również zarysowanie o podobnym kształcie jak wcześniej wspomniane pęknięcie, przebiegające w kolumnie 9. Zarysowanie to ma swoje odbicie również w podobnym i również kolumnie 9 w sąsiednim pionie spoin. Oba zarysowania swoją szerokością rozwarcia nie przekraczają 0,2 mm. W analizowanym murze zauważyć można liczne pojedyncze zarysowania oznaczone kolorem żółtym przechodzące zarówno w elemencie murowym jak i w spoinie.

(4) **Mur E32** został wykonany z elementów murowych z betonu komórkowego na kruszywie popiołowym przy wilgotności wmurowywanego materiału 20 % masy, łączonych zaprawą do ciepłochronną (Rys. 4.3.1.3-4).



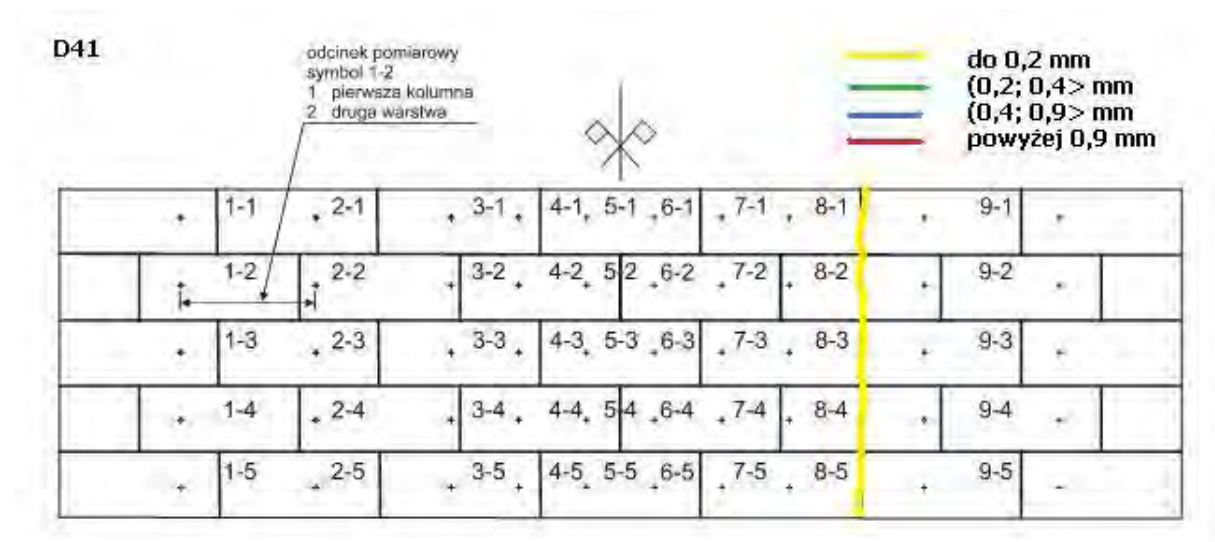
Rys. 4.3.1.3-4 Położenie, przebieg i rozwarcie rys w murze badawczym E32

Powstałe w murze pęknięcie główne oznaczone kolorem czerwonym przebiega w kolumnie 6 w linii pionowej zbliżonej do prostej naprzemiennie spoina bloczek można stwierdzić, a jego szerokość rozwarcia kształtuje się na poziomie 2,0-2,5 mm, co należy uznać za znaczące. Kolejne nieliczne zarysowania nie przekraczają szerokości rozwarcia 0,2 mm przebiegają odcinkowo oprócz spoin również w elementach murowych (oznaczono je kolorem żółtym). W przypadku rozważanego muru nie notuje się innego zarysowania ciągłego przebiegającego w linii ciągłej wzdłuż wysokości.

4.3.1.4. Mury z ABK o wilgotności ok. 10 % masy

(1) **Mur D41** został wykonany z elementów murowych z betonu komórkowego na kruszywie piaskowym przy wilgotności wmurowywanego materiału 10 % masy, łączonych zaprawą do cienkich spoin (Rys. 4.3.1.4-1).

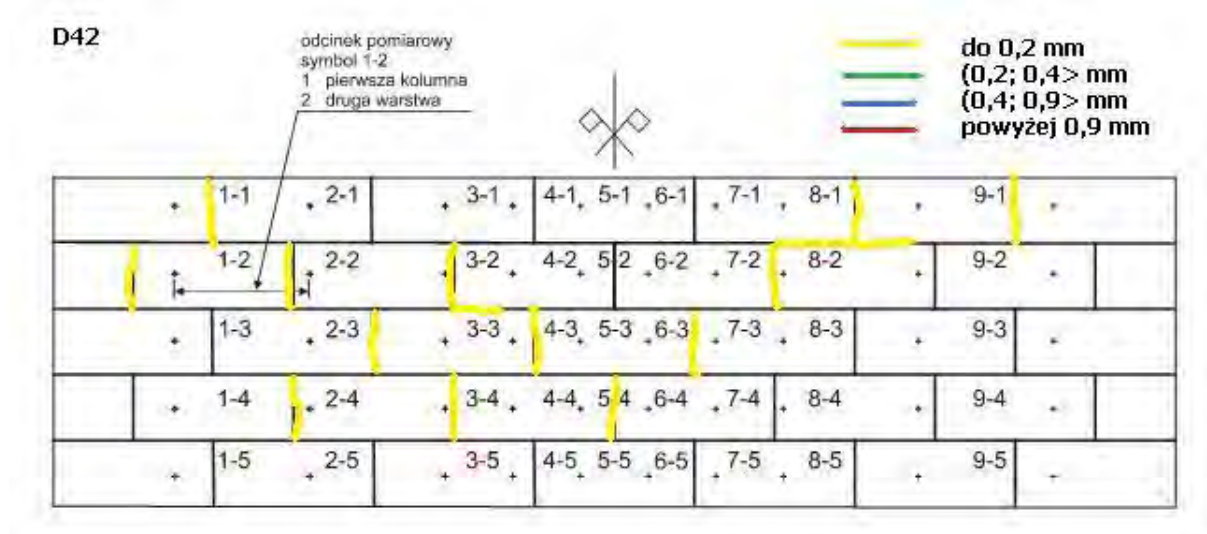
Zarysowanie w tym murze ujawniło się w kolumnie 8 przebiegając naprzemiennie spoina bloczek (oznaczone kolorem żółtym), a jego szerokość rozwarcia nie przekroczyła 0,2 mm. Jednak oprócz powstałego zarysowania w kolumnie 8 opisanego powyżej nie zaobserwowano żadnych innych zarysowań i pęknięć, nawet w spoinach.



Rys. 4.3.1.3-1 Położenie, przebieg i rozwarcie rys w murze badawczym D41

(2) **Mur D42** został wykonany z elementów murowych z betonu komórkowego na kruszywie piaskowym przy wilgotności wmurowywanego materiału 10 % masy, łączonych zaprawą do ciepłochronną (Rys. 4.3.1.4-2).

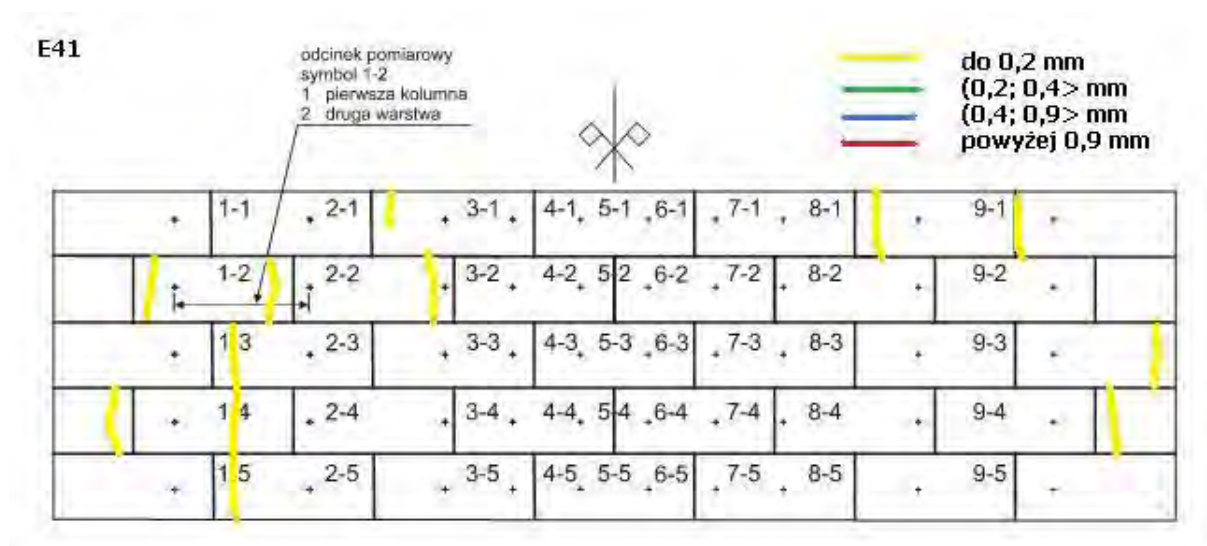
W murze tym nie powstało żadne zarysowanie główne przebiegające w linii pionowej na całej wysokości muru. Zauważalne są jedynie zaznaczone na rysunku kolorem żółtym drobne zarysowania muru szerokością rozwarcia nieprzekraczającą 0,1 mm notowane w różnych fragmentach płaszczyzny muru. Nie tworzą one powiązanego ciągu zarysowań wskazującego na koncentrację naprężeń, albo najsłabszy pod względem wytrzymałościowym obszar muru.



Rys. 4.3.1.3-2 Położenie, przebieg i rozwarcie rys w murze badawczym D42

(3) **Mur E41** został wykonany z elementów murowych z betonu komórkowego na kruszywie popiołowym przy wilgotności wmurowywanego materiału 10 % masy, łączonych zaprawą do cienkich spoin (Rys. 4.3.1.4-3).

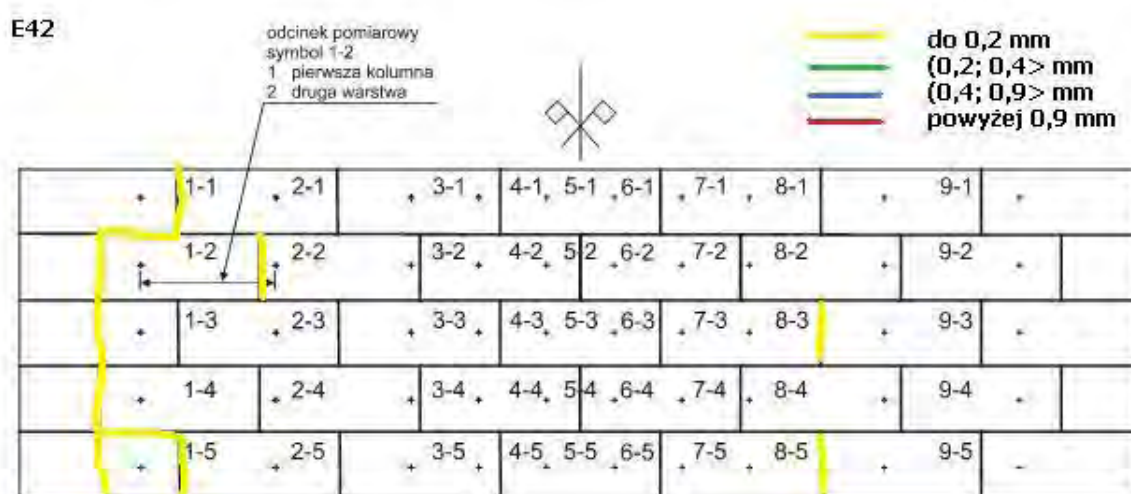
W murze tym zaobserwowano pojedyncze, na długości wysokości bloczka, zarysowania podobnie jak w murze D42, których szerokość rozwarcia rys nie przekroczyła 0,2 mm, z tymże duża część z nich przebiega w elemencie murowym.



Rys. 4.3.1.3-3 Położenie, przebieg i rozwarcie rys w murze badawczym E41

(4) **Mur E42** został wykonany z elementów murowych z betonu komórkowego na kruszywie popiołowym przy wilgotności wmurowywanego materiału 10 % masy, łączonych zaprawą do ciepłochronną (Rys. 4.3.1.4-4).

Analogicznie jak w murach z betonu komórkowego o zawilgoceniu wmurowania nieprzekraczającym 10 % masy szerokość rozwarcia zarysowań nie przekroczyła 0,2 mm. Oznaczone kolorem żółtym zarysowania są nieliczne, natomiast jedynie w strefie zamocowania (kolumna 0 i 1) zaobserwowano rysę ciągłą przebiegającą na wysokości muru wzdłuż spoin (za wyjątkiem warstwy 5 gdzie rysa obserwowana jest w elemencie murowym).



Rys. 4.3.1.3-4 Położenie, przebieg i rozwarcie rys w murze badawczym E42

4.3.2. Wyniki pomiaru odkształceń murów w czasie

(1) Wartości odkształceń murów otrzymano na podstawie obliczeń zmian odległości pomiędzy reperami na powierzchni muru. Analizy wielkości odkształceń dokonano w ujęciu zmian temperatury i wilgotności powietrza, których dane przedstawiono na wykresach. Na osi pionowej zamieszczono wielkość badanego parametru, a na poziomej kolejny dzień badania rozpoczynając od dnia postawienia pierwszego muru.

(2) Z uwagi na znaczną ilość wyników pomiarów dla ułatwienia ich analizy przedstawiono je w postaci graficznej. Całość wyników zamieszczono w załącznikach do niniejszej pracy, tj. w załączniku 1 wyniki odkształceń względem wartości rzeczywistych oznaczonych dla po-

szczególne odcinków pomiarowych (jednostką jest tutaj mm), natomiast w załączniku 2 wyniki pomiarów zostały ujednolicone dla wszystkich kolumn pomiarowych (ponieważ w kolumnach 1,2, 8 i 9 bazą pomiarową był odcinek 500 mm, a dla pozostałych kolumn – odcinek 250 mm) podając bezwzględne wartości odkształceń (jednostką tutaj jest m/m).

(3) W niniejszym rozdziale dla przejrzystości zestawienia wyników pomiarów uznano za pomocne ograniczenie się do szczegółowego omówienia wyników pomiarów odkształceń wybranych murów badawczych. Mury te zostały wybrane z uwagi na charakter ich zarysowania oraz dla ukazania zauważalnych tendencji w całej grupie 16 badanych murów. Omawiając wyniki pomiarów odkształceń podstawą jest schemat zarysowań dla poszczególnych murów przedstawiony w rozdziale 4.3.1.

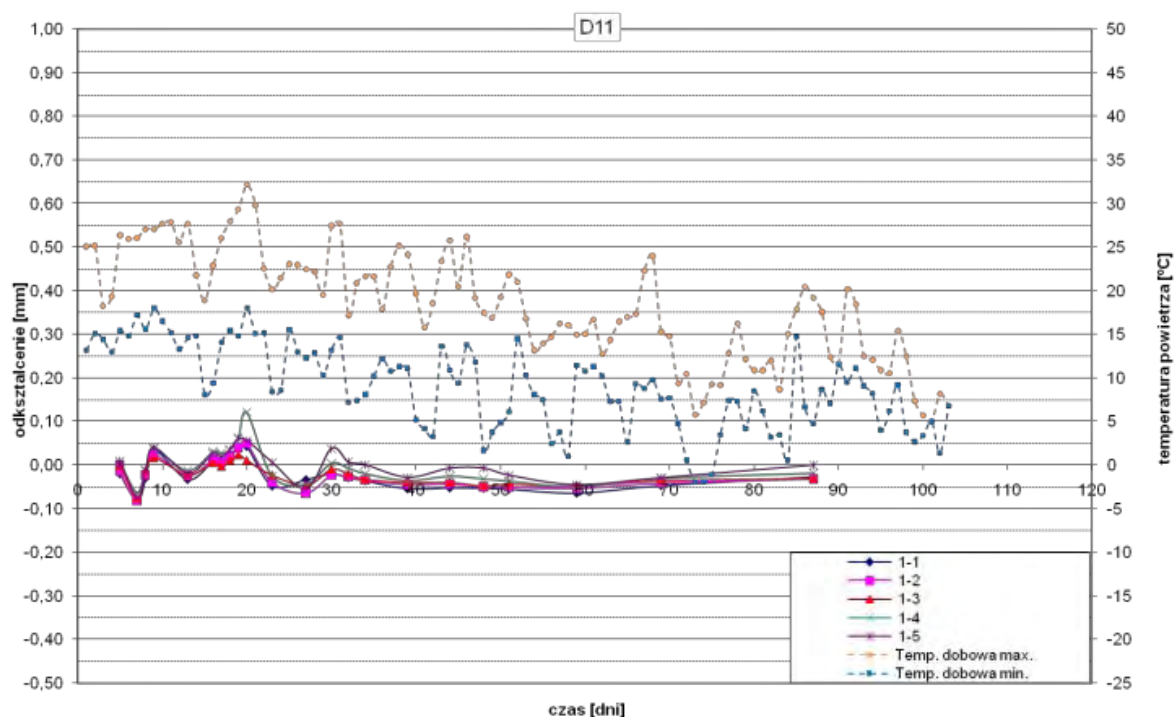
(4) Przedstawiając wyniki badań prowadzonych na murach w warunkach poligonowych, gdzie wyniki odkształceń wyraźnie zależne są od warunków atmosferycznych oraz mając świadomość praktycznie niewielkiej liczby próbek (16 murów różniących się między sobą, chociaż ujmujących naprzemiennie poszczególnymi grupami wspólne cechy – rodzaj betonu, rodzaj zaprawy, rodzaj spoiny, wilgotność materiału), należy uwzględnić też podczas analizy pewnego rodzaju przypadkowość wyników. Zestawiając wyniki pomiarów z obserwacjami powstałych zarysowań, wyraźnie widoczne są pewne tendencje, które potwierdzając wcześniejsze badania pozwalają wyprowadzić zasadne wnioski. W związku z powyższym wiadomym jest, iż nie można pokusić się tu na dokonanie analizy statystycznej, gdyż całościowy program badań i wybór rodzajów badanych murów został tak przyjęty, aby przy minimalnej próbce badawczej uzyskać jak najwięcej informacji o rozważanym zjawisku zarysowań.

4.3.2.1. Mury z ABK o wilgotności poautoklawizacyjnej

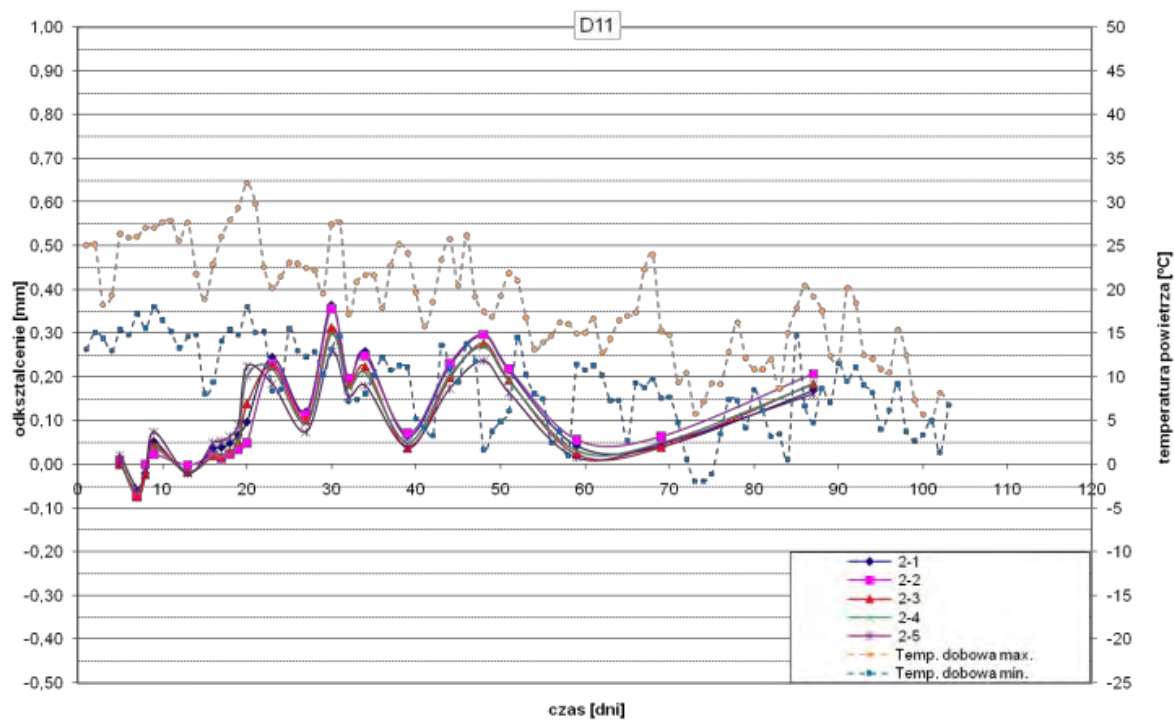
(1) W pierwszej kolejności zestawiono wybrane dwa mury o zawilgoceniu poautoklawizacyjnym, tj. mur D11 i E12. W obu murach powstało wyraźne zarysowanie w linii pionowej przechodzącej naprzemiennie przez spoinę pionową i element murowy. Porównując z charakterem zarysowań przedstawionych kolejno na rysunkach 4.3.1.1-1 i 4.3.1.1-4 wartość rozwarcia rys oraz położenie potwierdzone jest w zapisie odkształceń otrzymanym z pomiarów tensometrem nasadowym. Rysy główne powstały w kolumnie 2 zarówno dla muru D11 (Rys. 4.3.2.1-2) jak i E12 (Rys. 4.3.2.1-11). Natomiast zauważalna rysa w kolumnie 7 muru E12

(Rys. 4.3.2.1-17) na poziomie rozwarcia do 0,4 mm nie jest odzwierciedlona w pomiarach tensometrycznych. Przyczyną tego może być późniejsze jej ujawnienie.

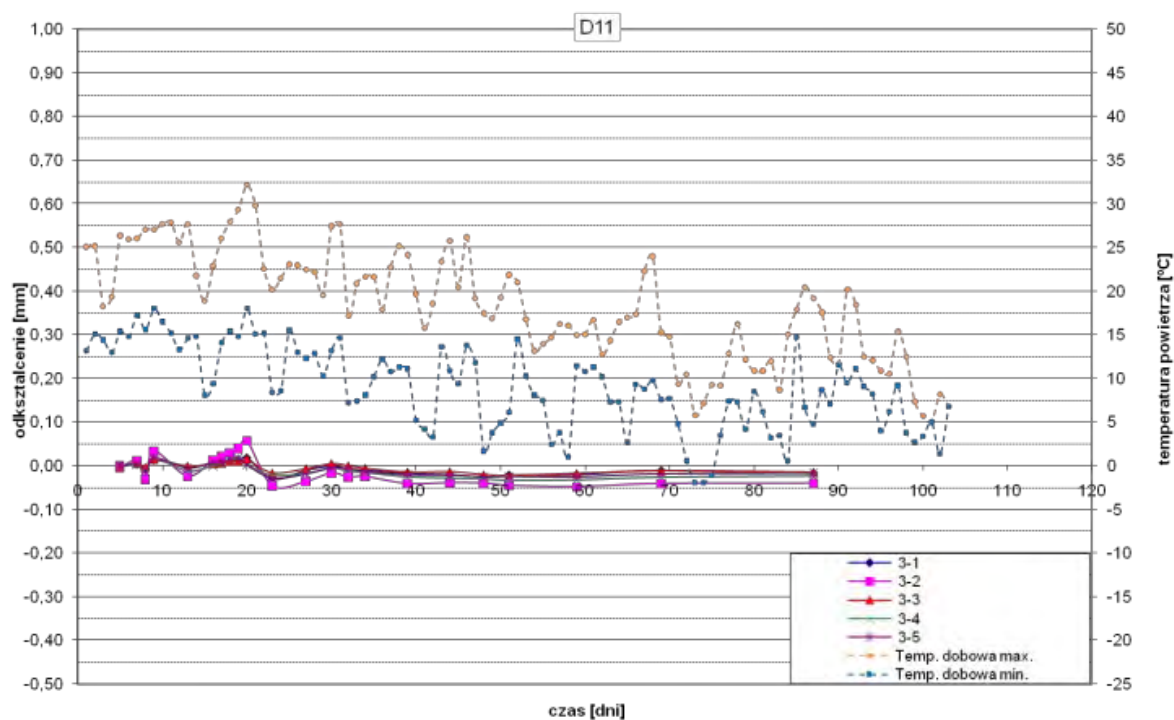
(2) Z przedstawionych poniżej wykresów wyraźnie widać brak zauważalnych zarysowań w innych kolumnach pomiarowych co znajduje potwierdzenie w przeprowadzonej inwentaryzacji zarysowań poszczególnych murów. Rysa w kolumnie 2 muru D11 zgodnie dla obu metod oznaczenia jej rozwarcia kształtuje się na poziomie 0,4-0,5 mm, natomiast dla muru E12 rozwarcie jest większe w przybliżeniu około 0,9.



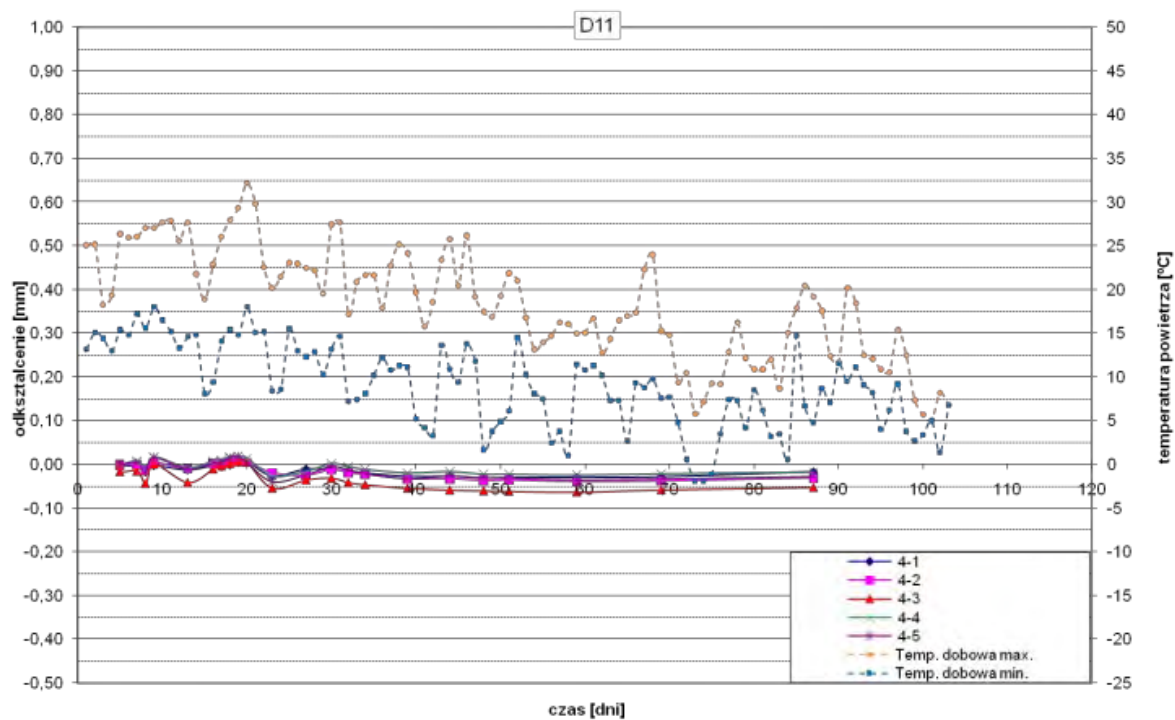
Rys. 4.3.2.1-1 Wartości odkształceń w kolumnie 1 muru D11



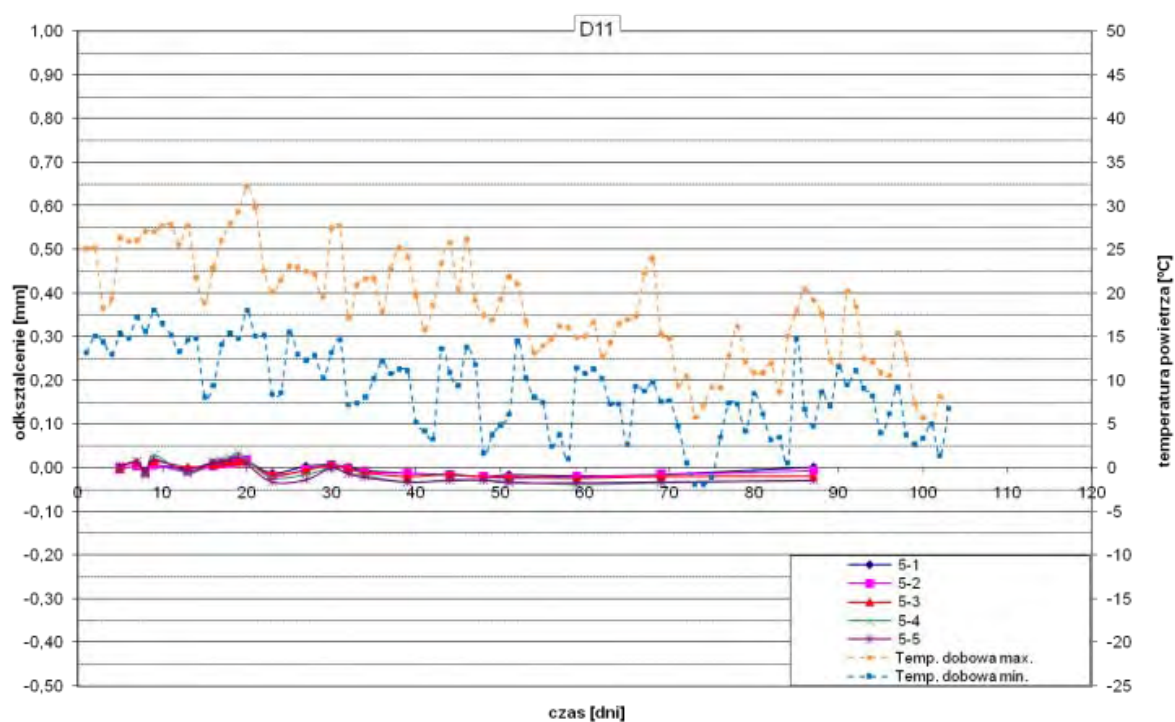
Rys. 4.3.2.1-2 Wartości odkształceń w kolumnie 2 muru D11



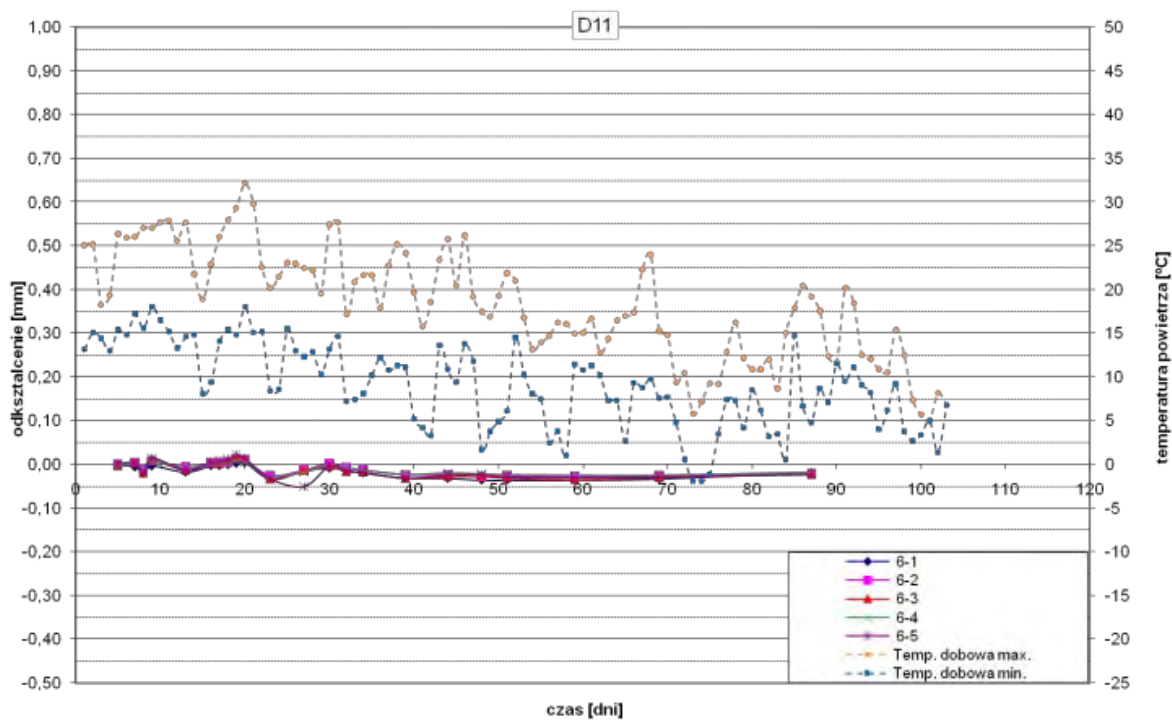
Rys. 4.3.2.1-3 Wartości odkształceń w kolumnie 3 muru D11



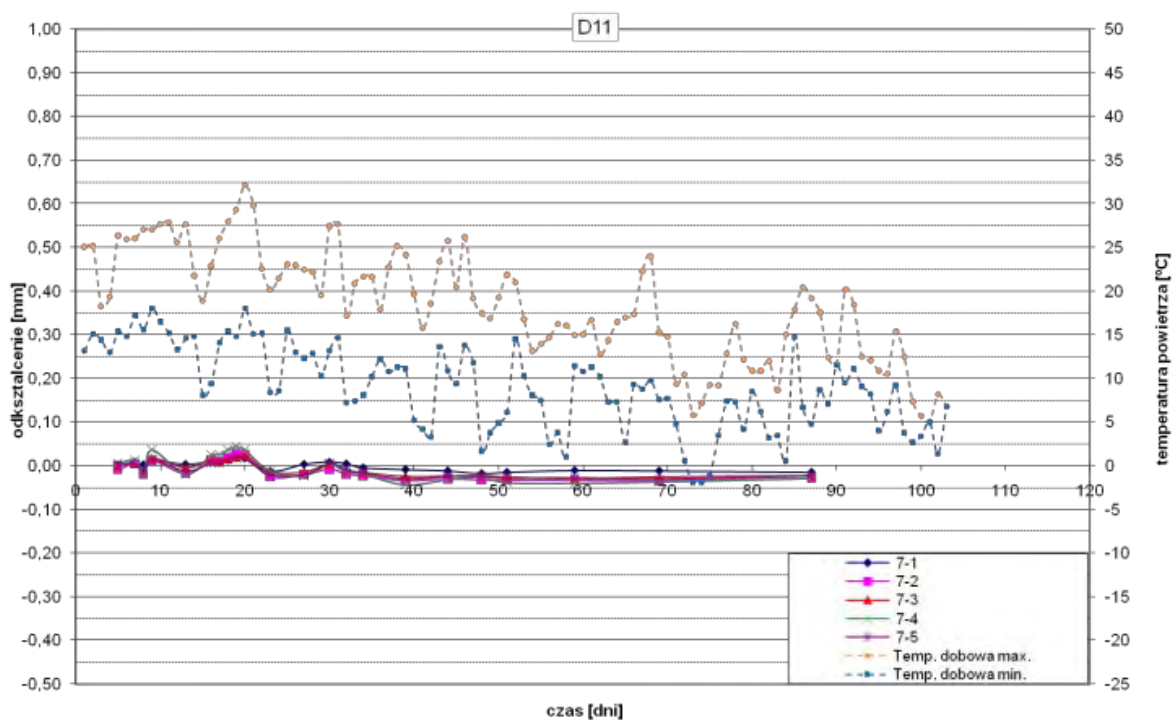
Rys. 4.3.2.1-4 Wartości odkształceń w kolumnie 4 muru D11



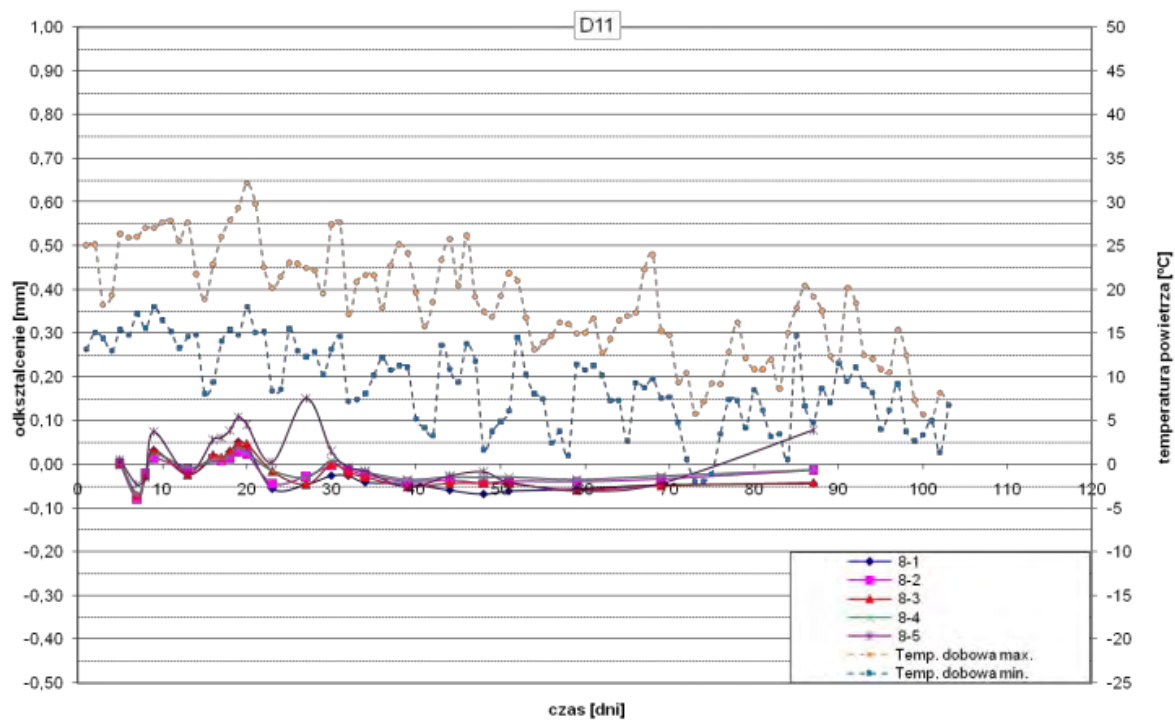
Rys. 4.3.2.1-5 Wartości odkształceń w kolumnie 5 muru D11



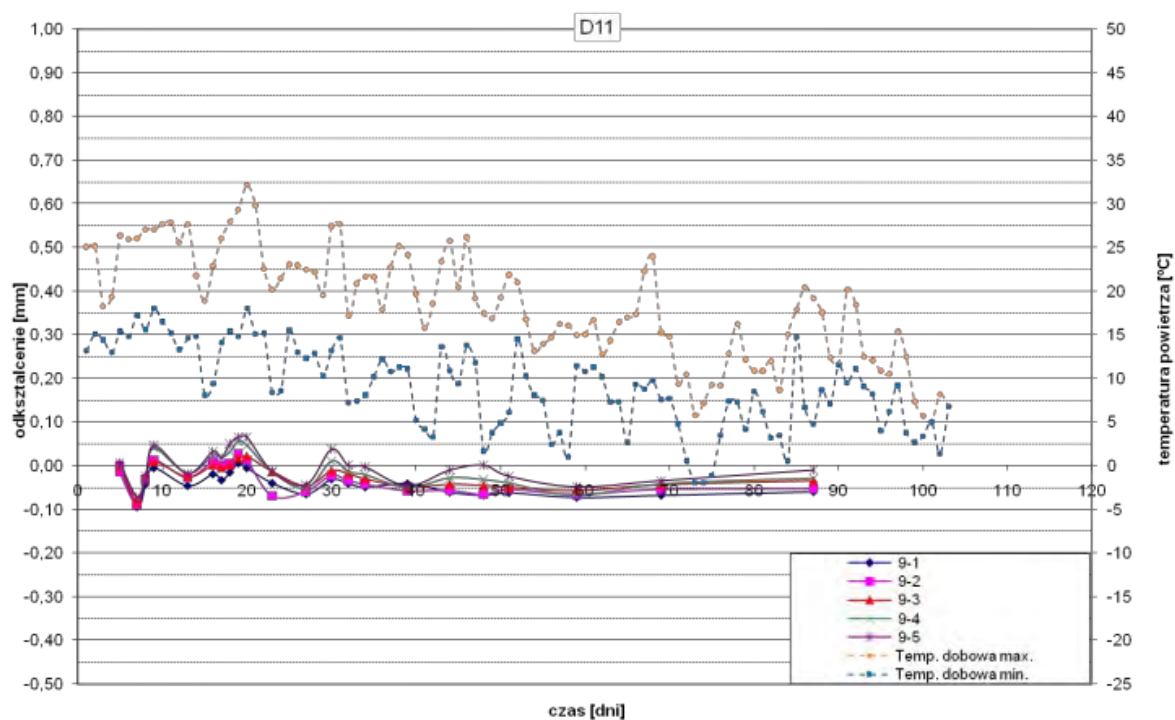
Rys. 4.3.2.1-6 Wartości odkształceń w kolumnie 6 muru D11



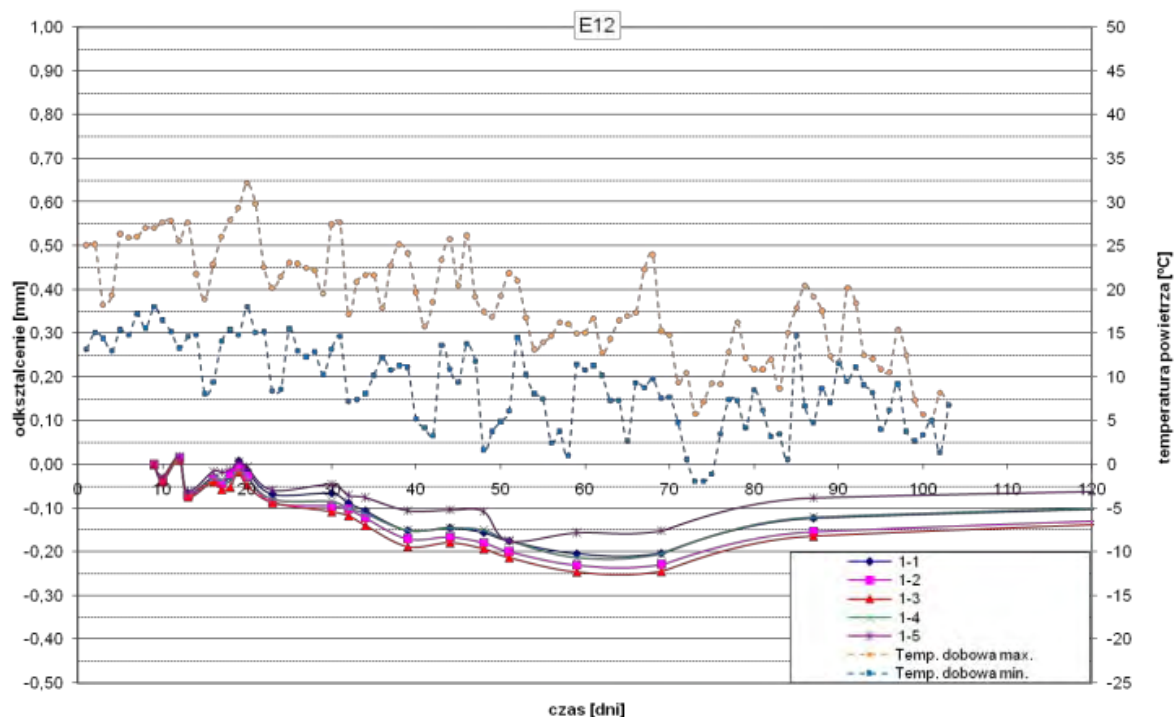
Rys. 4.3.2.1-7 Wartości odkształceń w kolumnie 7 muru D11



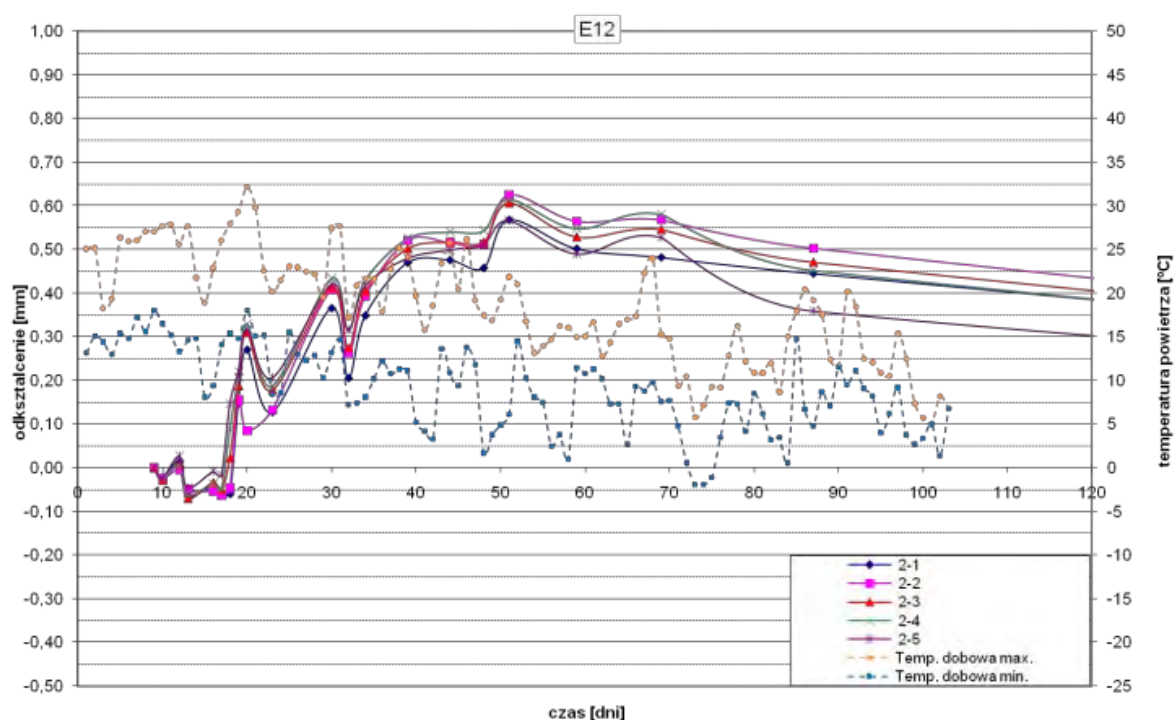
Rys. 4.3.2.1-8 Wartości odkształceń w kolumnie 8 muru D11



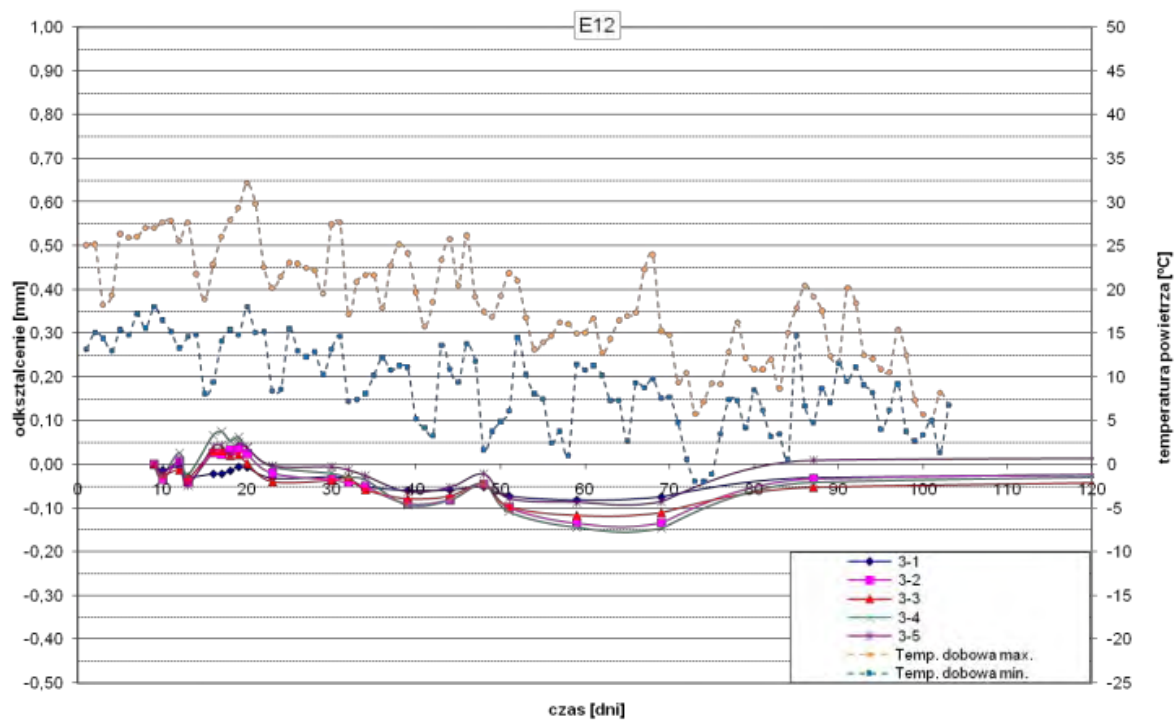
Rys. 4.3.2.1-9 Wartości odkształceń w kolumnie 9 muru D11



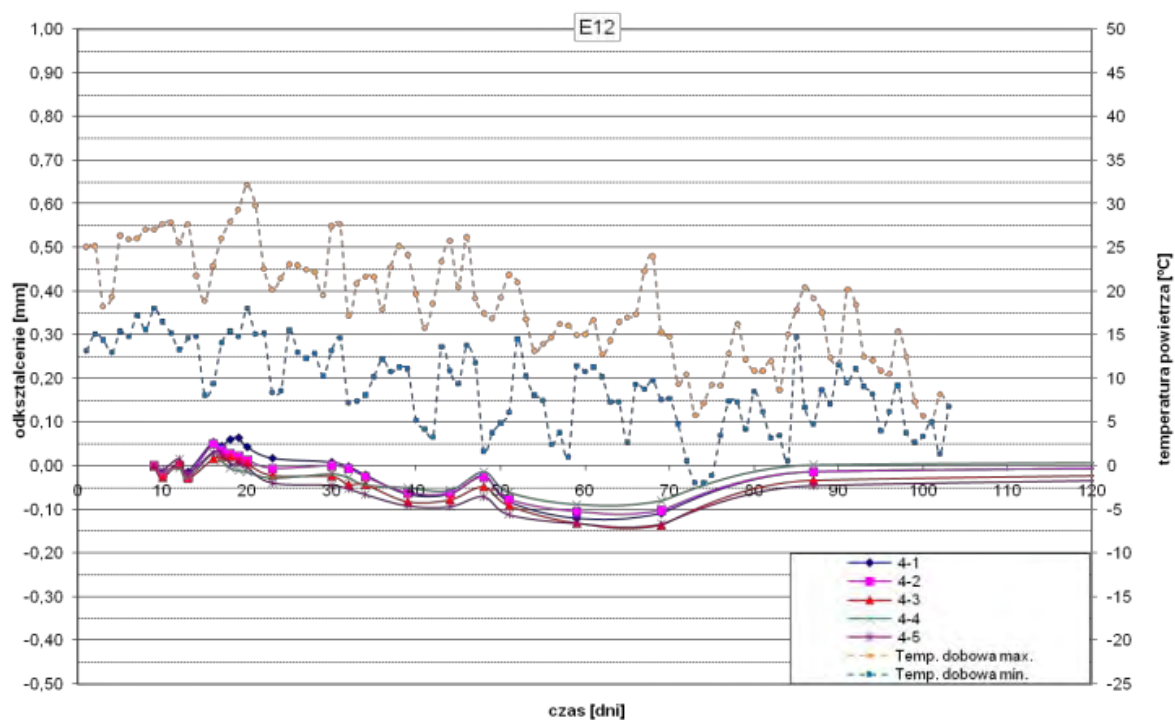
Rys. 4.3.2.1-10 Wartości odkształceń w kolumnie 1 muru E12



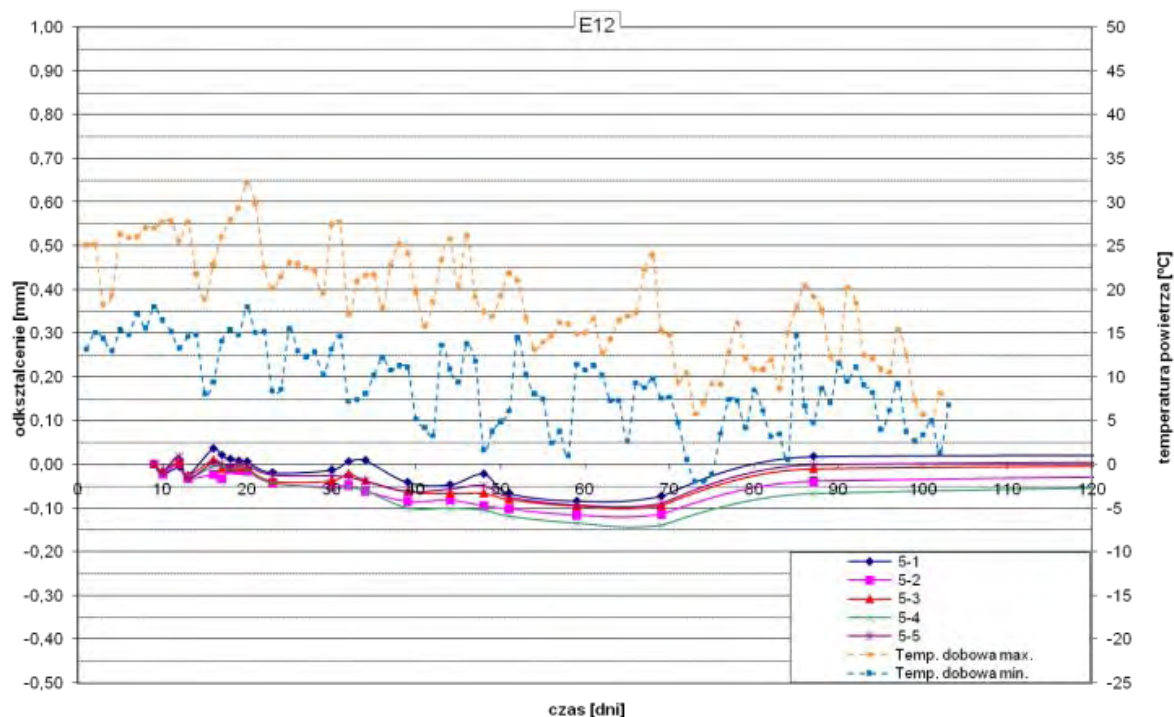
Rys. 4.3.2.1-11 Wartości odkształceń w kolumnie 2 muru E12



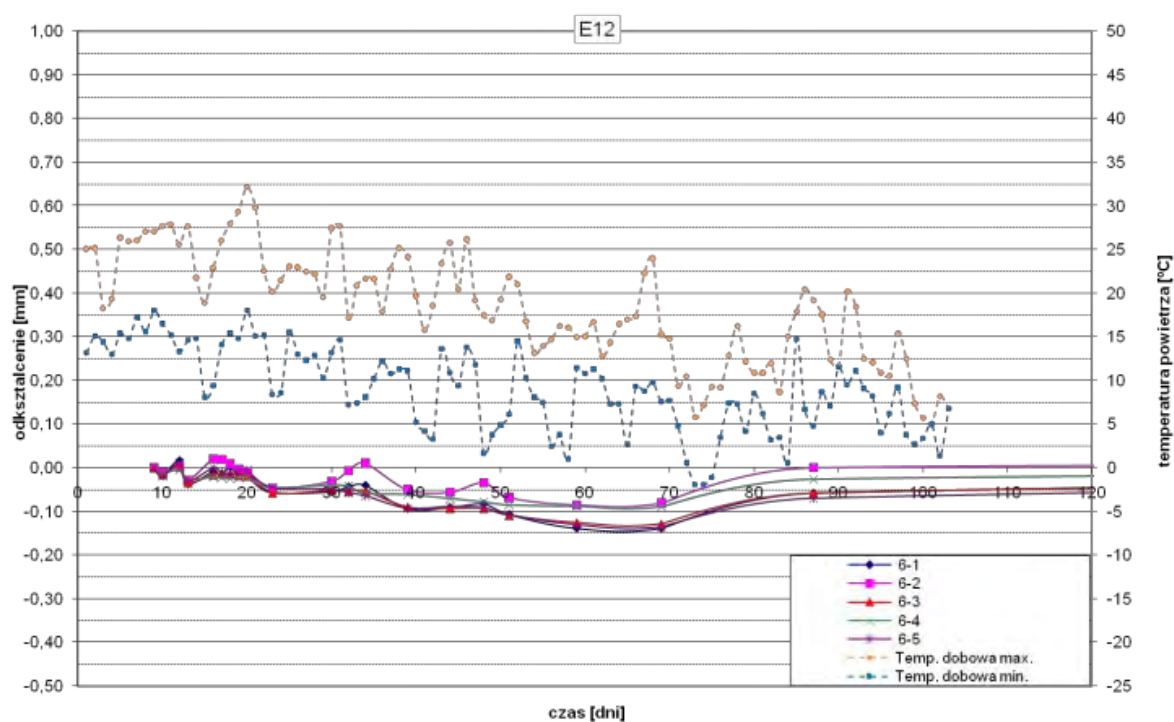
Rys. 4.3.2.1-12 Wartości odkształceń w kolumnie 3 muru E12



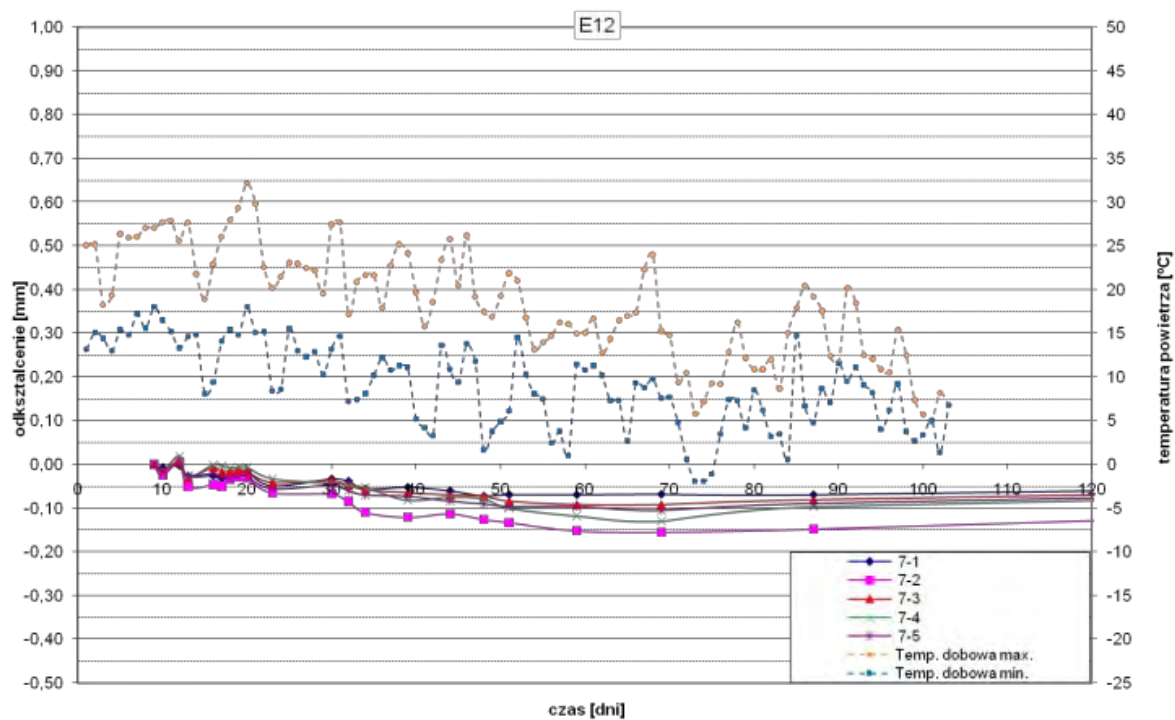
Rys. 4.3.2.1-13 Wartości odkształceń w kolumnie 4 muru E12



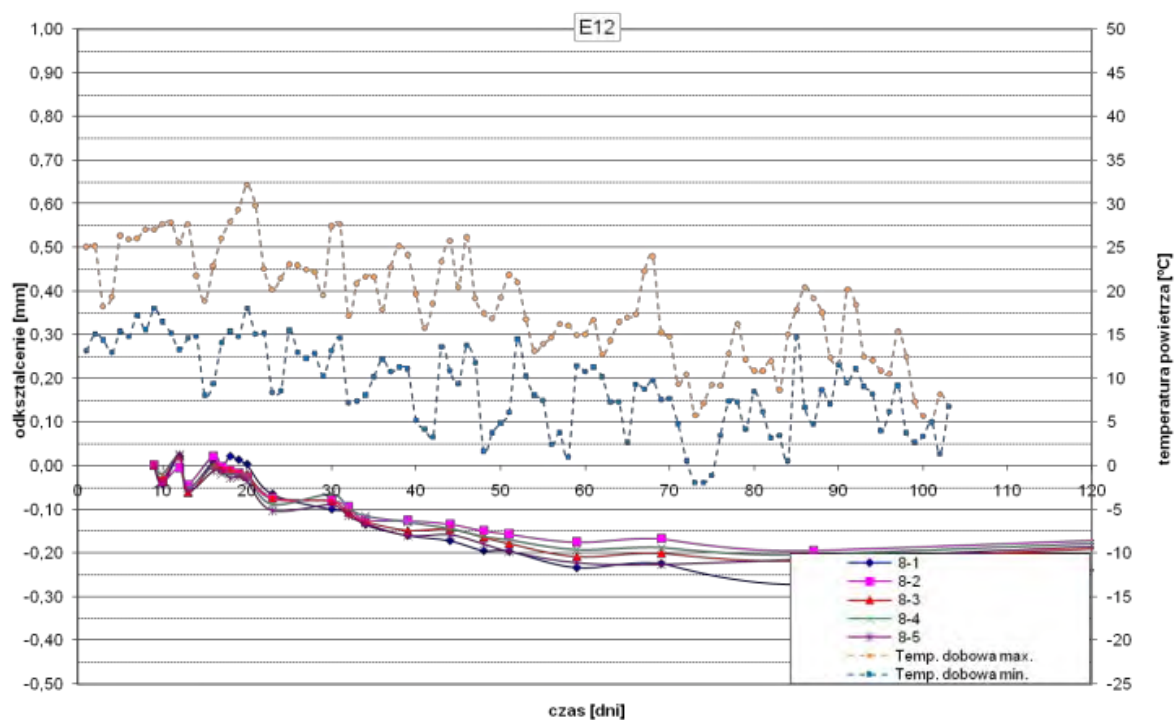
Rys. 4.3.2.1-14 Wartości odkształceń w kolumnie 5 muru E12



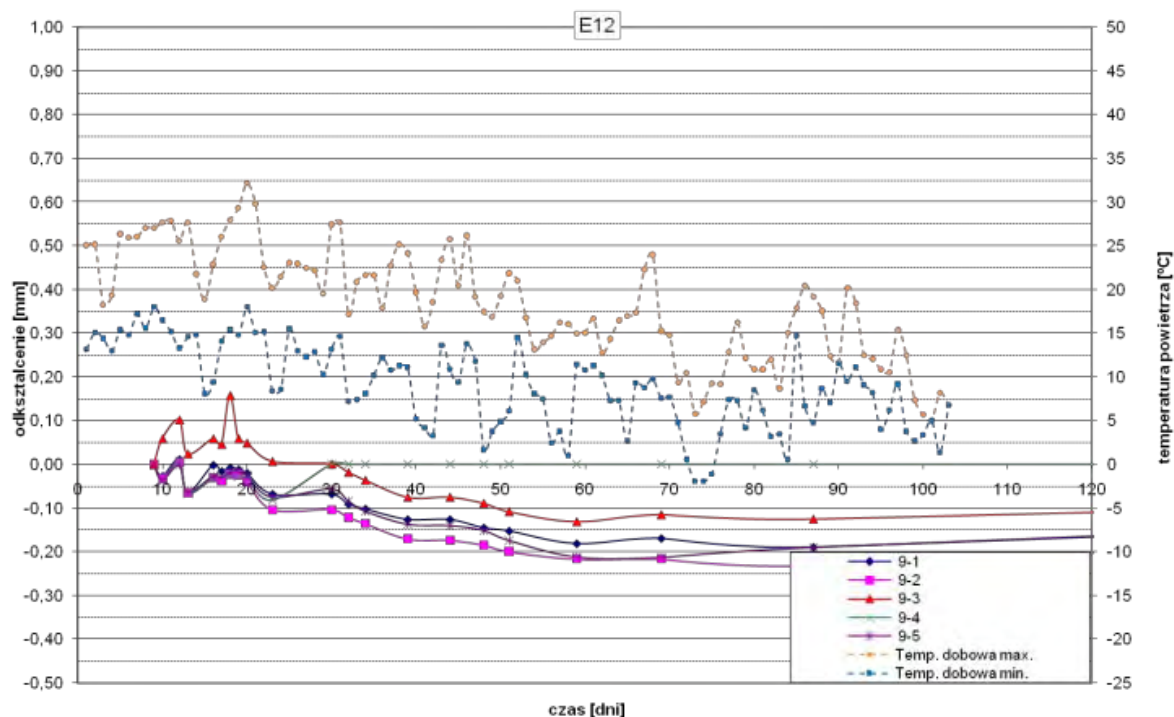
Rys. 4.3.2.1-15 Wartości odkształceń w kolumnie 6 muru E12



Rys. 4.3.2.1-16 Wartości odkształceń w kolumnie 7 muru E12



Rys. 4.3.2.1-17 Wartości odkształceń w kolumnie 8 muru E12

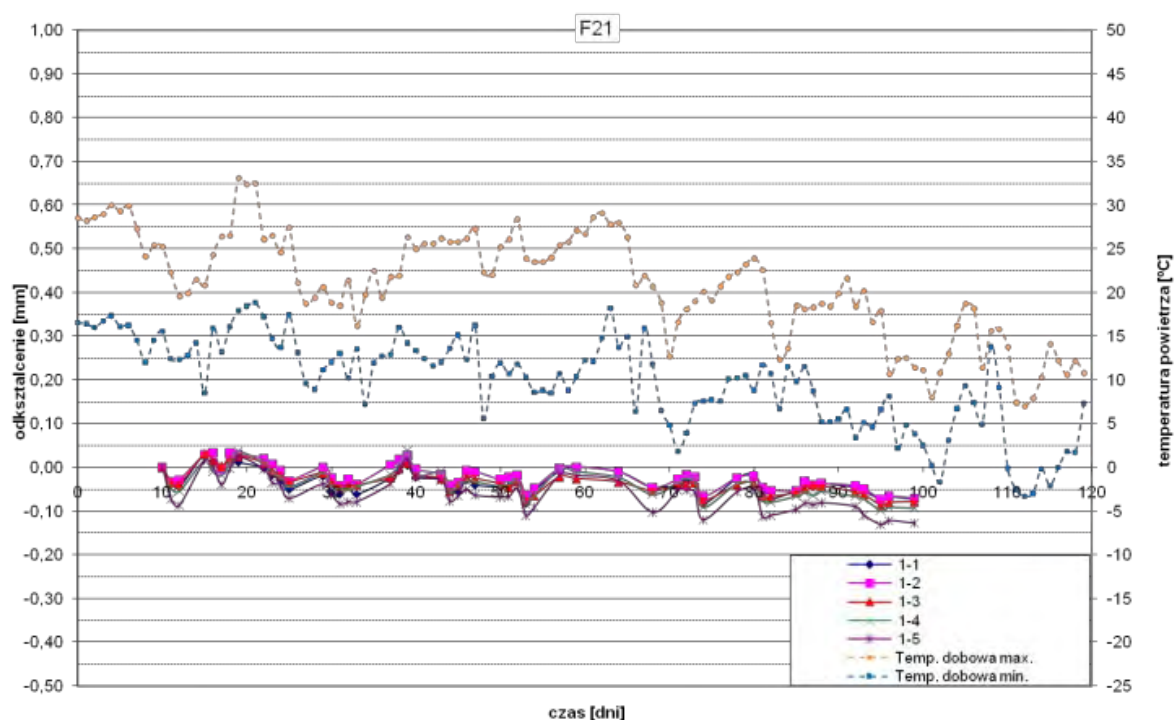


Rys. 4.3.2.1-18 Wartości odkształceń w kolumnie 9 muru E12

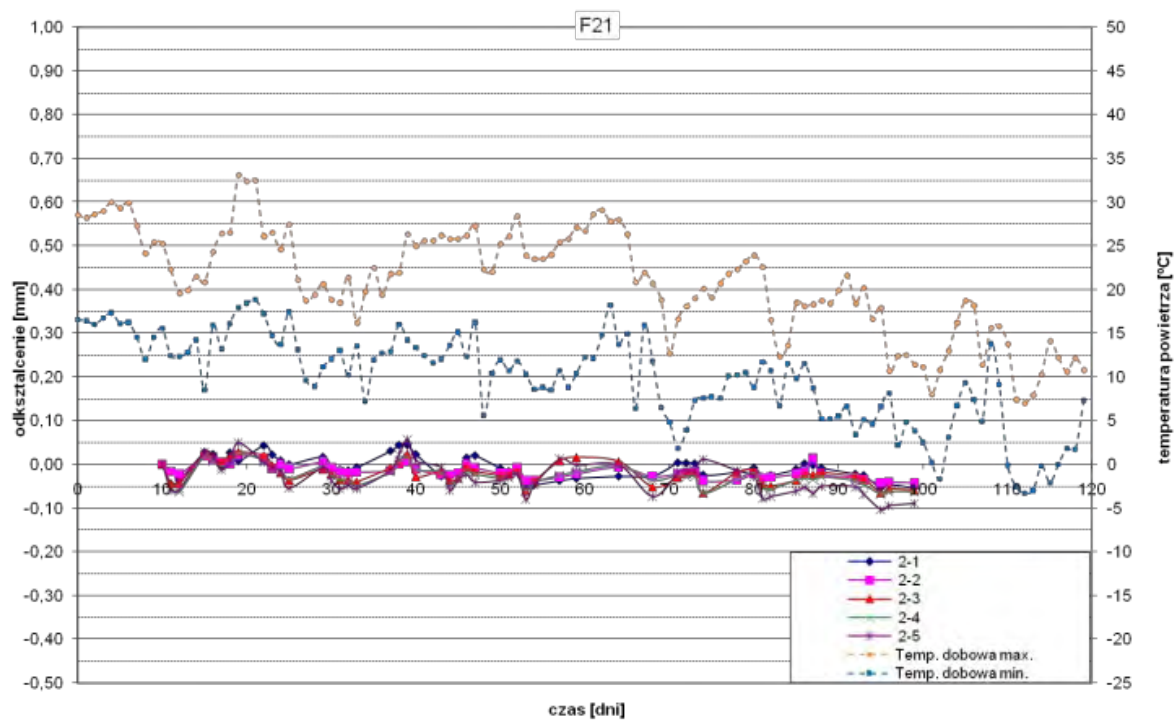
4.3.2.2. Mury z ABK o wilgotności ok. 30 % masy

(1) Mury wznoszone z elementów z betonu komórkowego o wilgotności ok. 30 % masy swoją wilgotnością zbliżone do wilgotności poautoklawizacyjnej, dlatego schematy zarysowań oraz poziom wartości rozwarcia rys dla obu przypadków jest porównywalny. Porównując mury F21 i F22, mury o wykonane z tego samego rodzaju betonu tj. na kruszywie piaskowym (choć innym co do gęstości w porównaniu z murami D11 i D12), łatwo można zauważyć podobne charakterystyki zarysowań (spoina-bloczek-spoina). W przypadku muru F21 zarysowanie ukształtowało w pierwszych dwóch warstwach kolumnie 4 (trochę nietypowo, ponieważ w elemencie murowym, co świadczyć może o pracy ustroju w charakterze monolitu (zaprawa do cienkich spoin o podwyższonej wytrzymałości – Rys. 4.3.2.2-4). To zarysowanie ma przełożenie na wyniki odkształceń wyznaczone pomiarem tensometrycznym (Rys. od 4.3.2.2-4 do 4.3.2.2-6) obejmujące kolejne kolumny. W warstwie 4 muru F21 wzrost odkształceń jest widoczny w sąsiednich kolumnach, co świadczy o rozłożeniu naprężeń rozciągających na szerszym obszarze bez koncentracji naprężeń, czego owocem jest brak zarysowania w elemencie murowym dla odcinka pomiarowego 4-4 (Rys. 4.3.2.2-4).

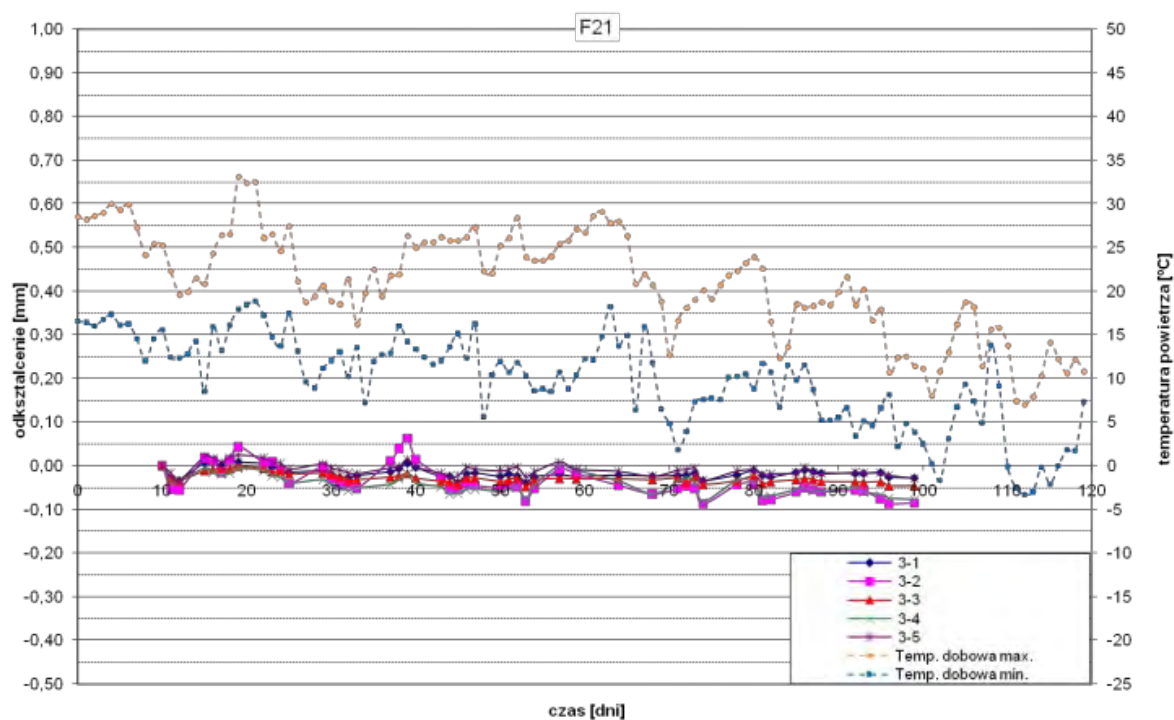
(2) Liczbowo rozwartość rysy w murze F21 w kolumnie 4 sięga poziomu ok. 0,4 mm, natomiast analizując wyniki odkształceń muru F22 stwierdzić można, iż oprócz kolumny 8, gdzie rozwartość rysy kształtuje się na poziomie 0,1-0,2 mm (Rys. 4.3.2.2-17), innych zarysowań nie notuje się. Zarysowanie to ma odzwierciedlenie w przedstawionych na rysunku 4.3.1.2-2 schematach.



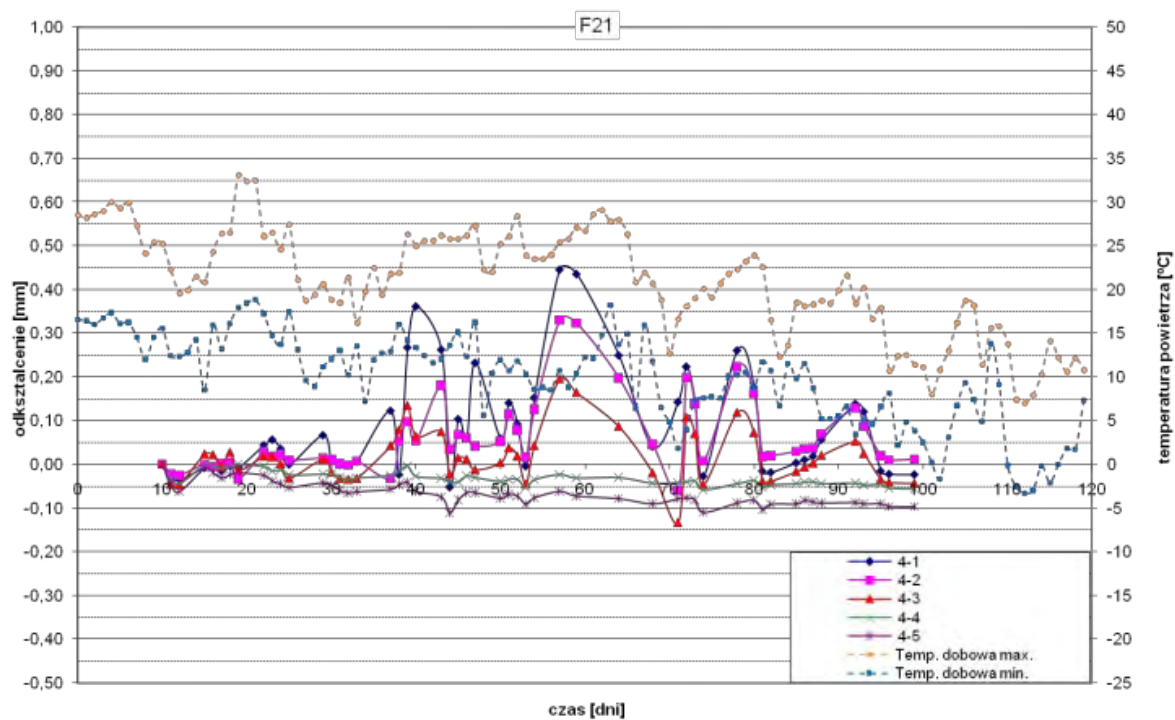
Rys. 4.3.2.2-1 Wartości odkształceń w kolumnie 1 muru F21



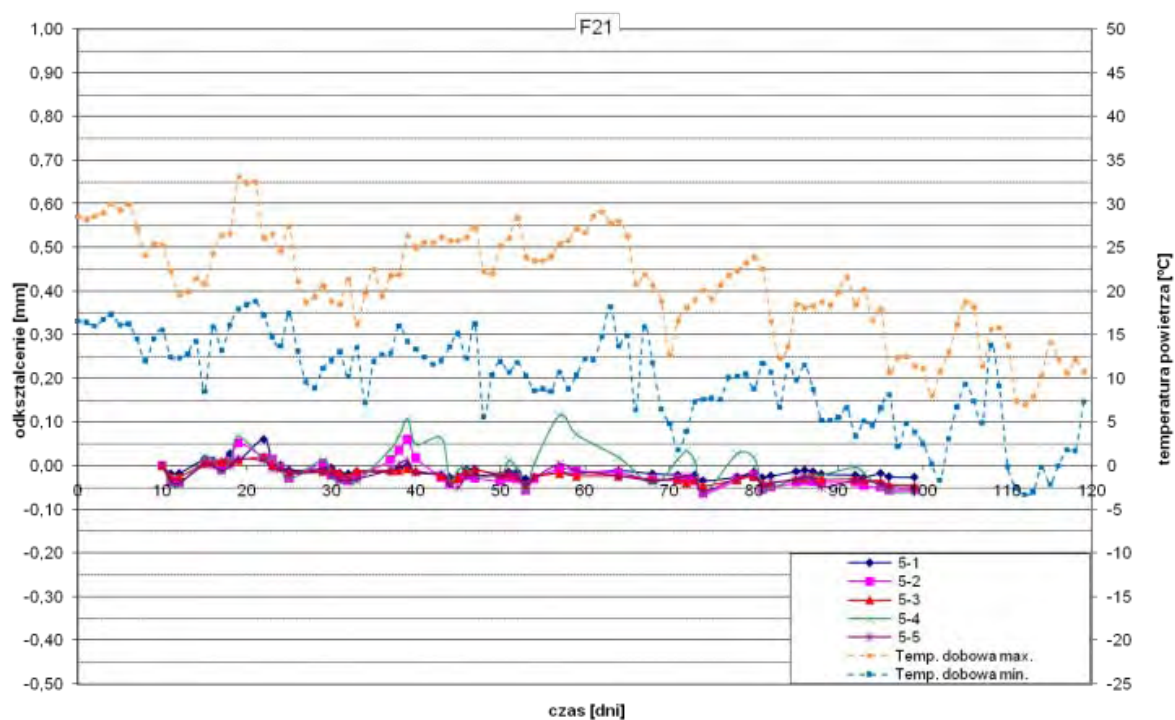
Rys. 4.3.2.2-2 Wartości odkształceń w kolumnie 2 muru F21



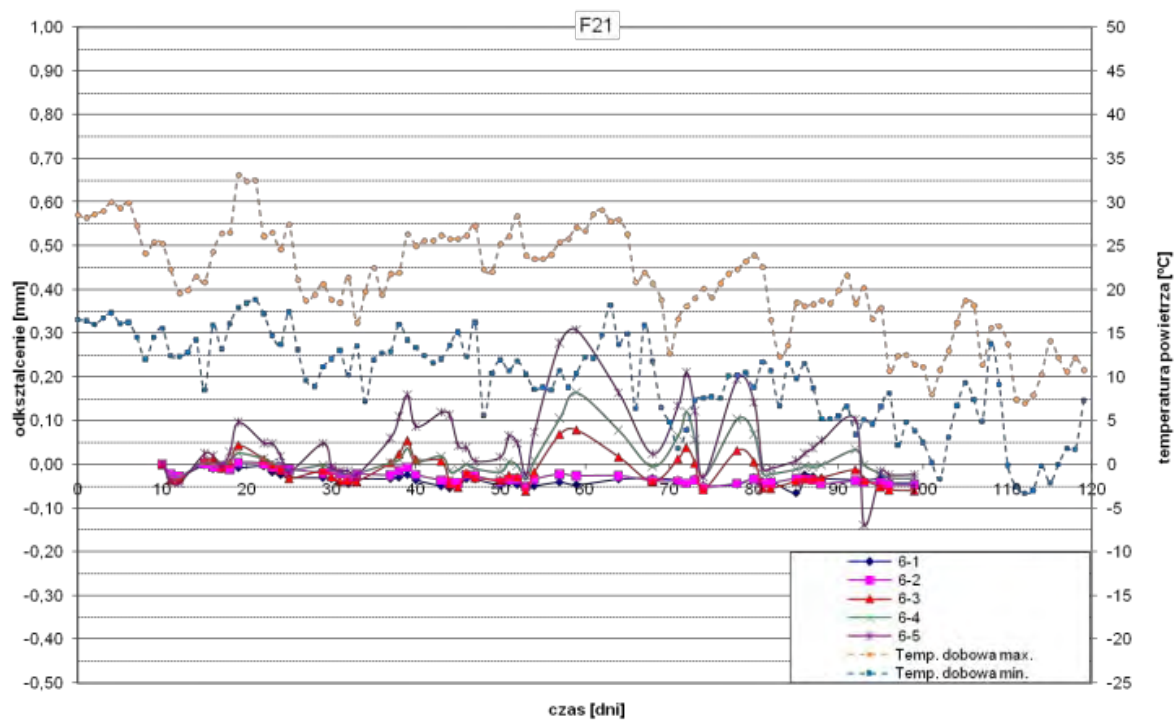
Rys. 4.3.2.2-3 Wartości odkształceń w kolumnie 3 muru F21



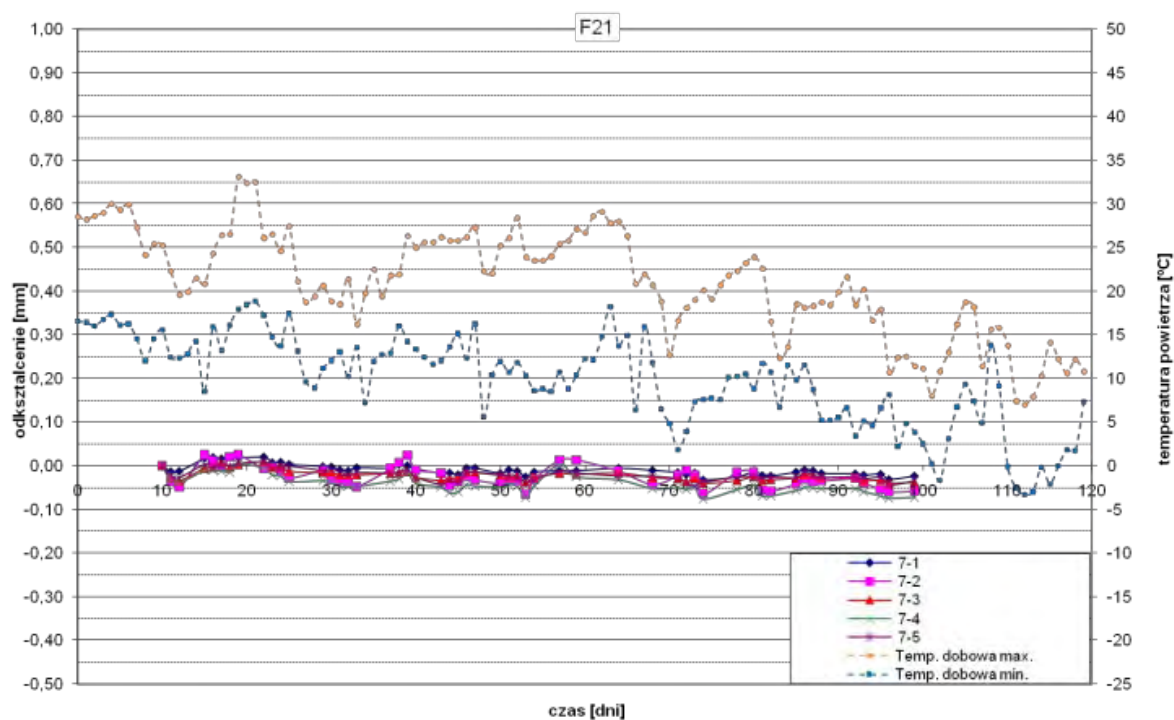
Rys. 4.3.2.2-4 Wartości odkształceń w kolumnie 4 muru F21



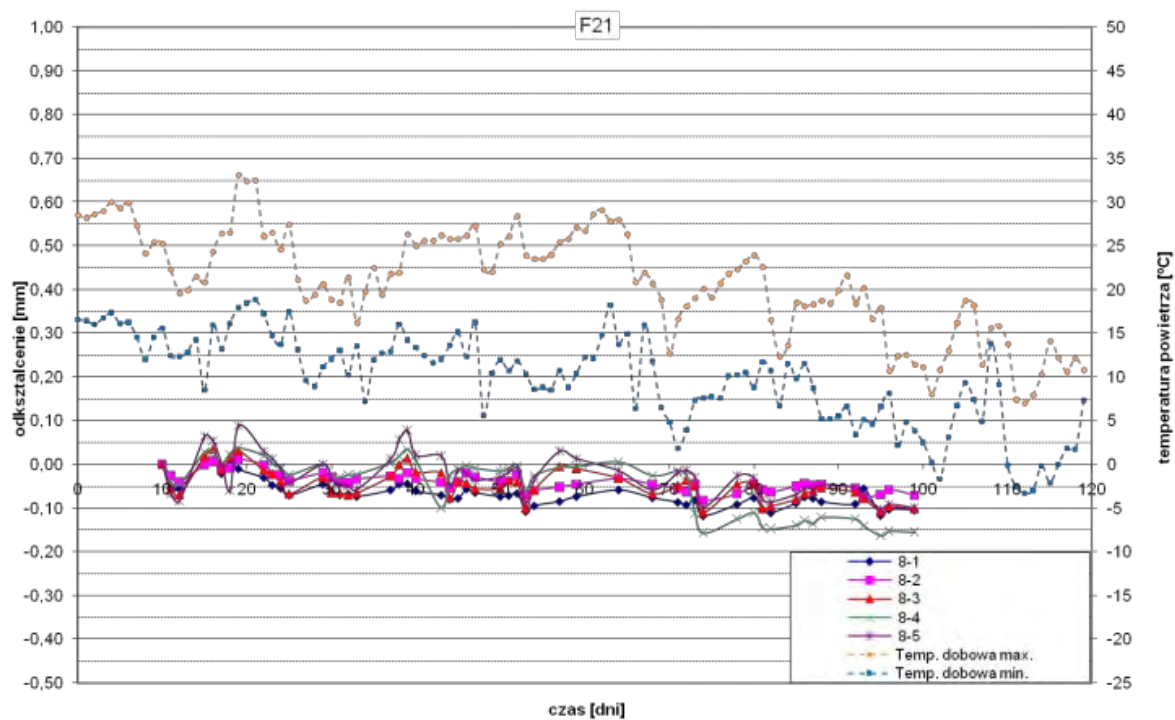
Rys. 4.3.2.2-5 Wartości odkształceń w kolumnie 5 muru F21



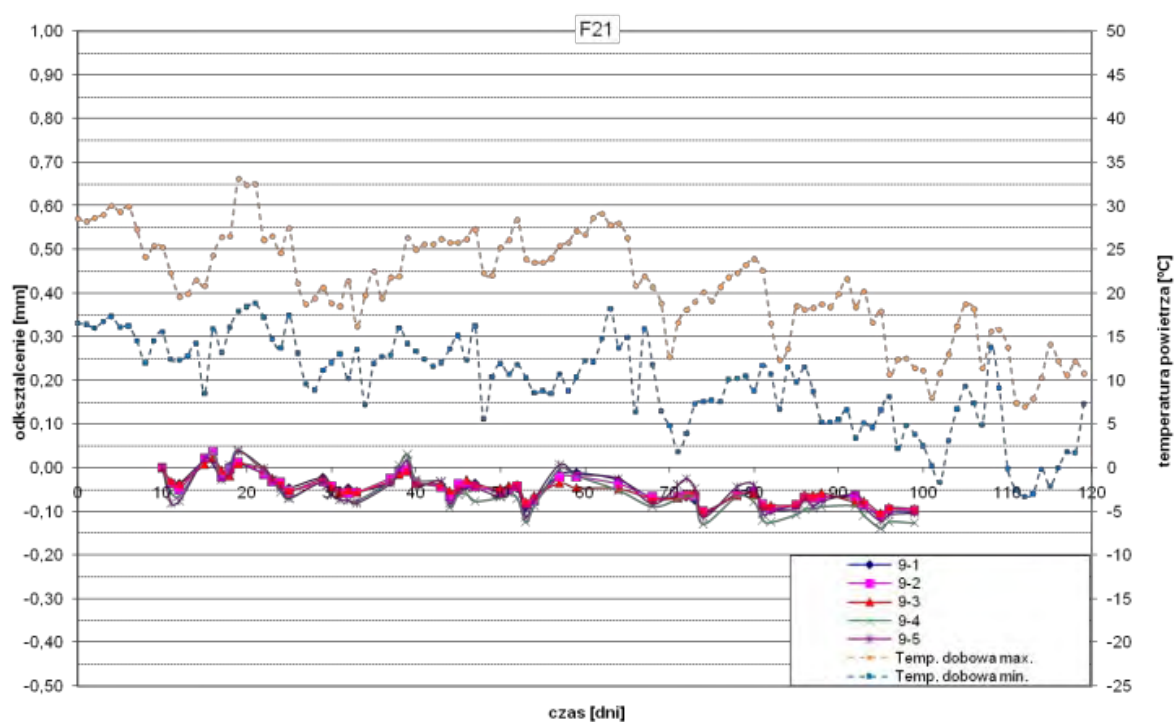
Rys. 4.3.2.2-6 Wartości odkształceń w kolumnie 6 muru F21



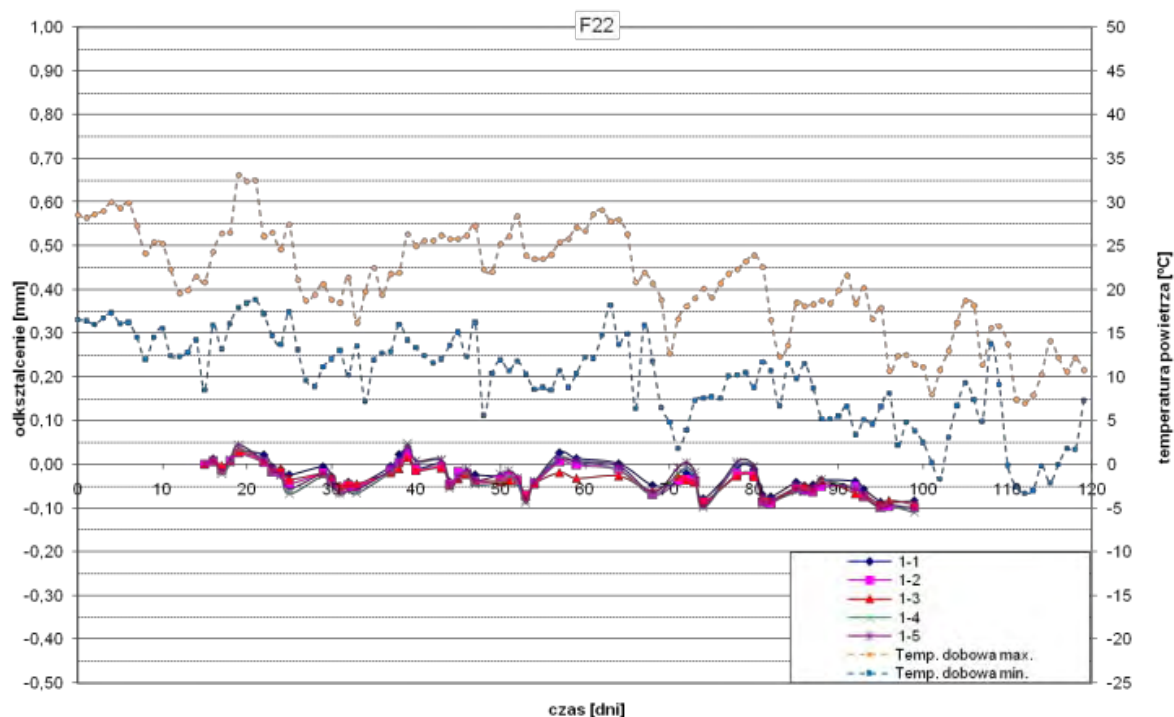
Rys. 4.3.2.2-7 Wartości odkształceń w kolumnie 7 muru F21



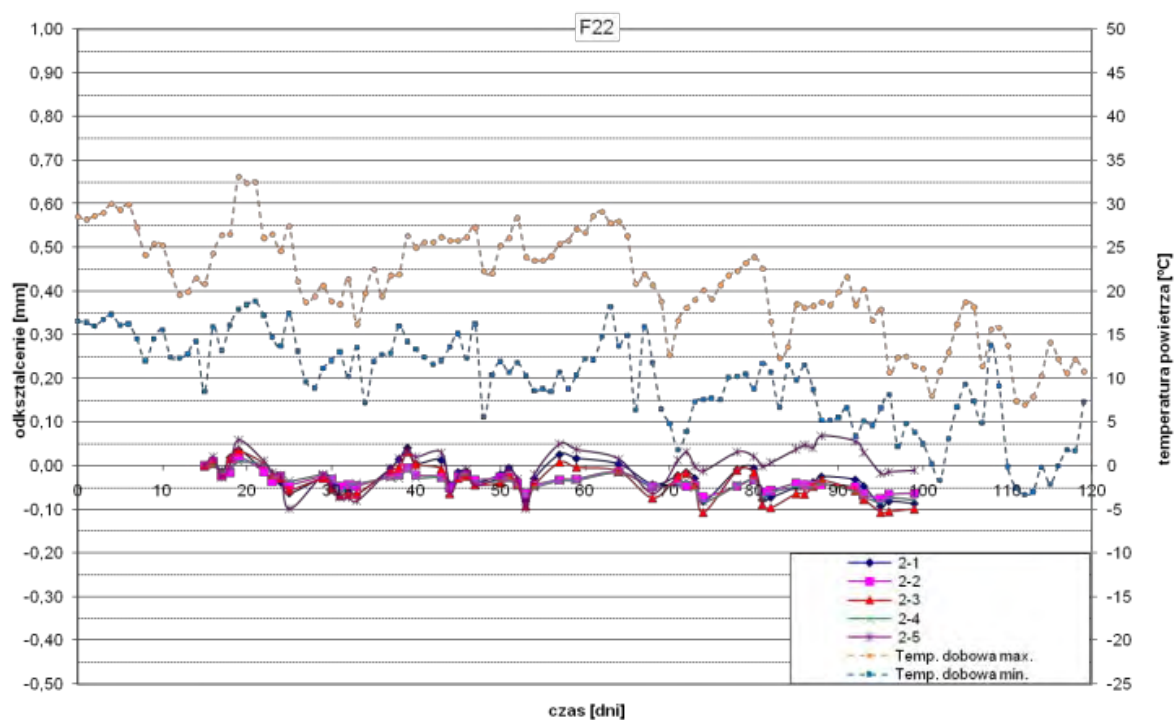
Rys. 4.3.2.2-8 Wartości odkształceń w kolumnie 8 muru F21



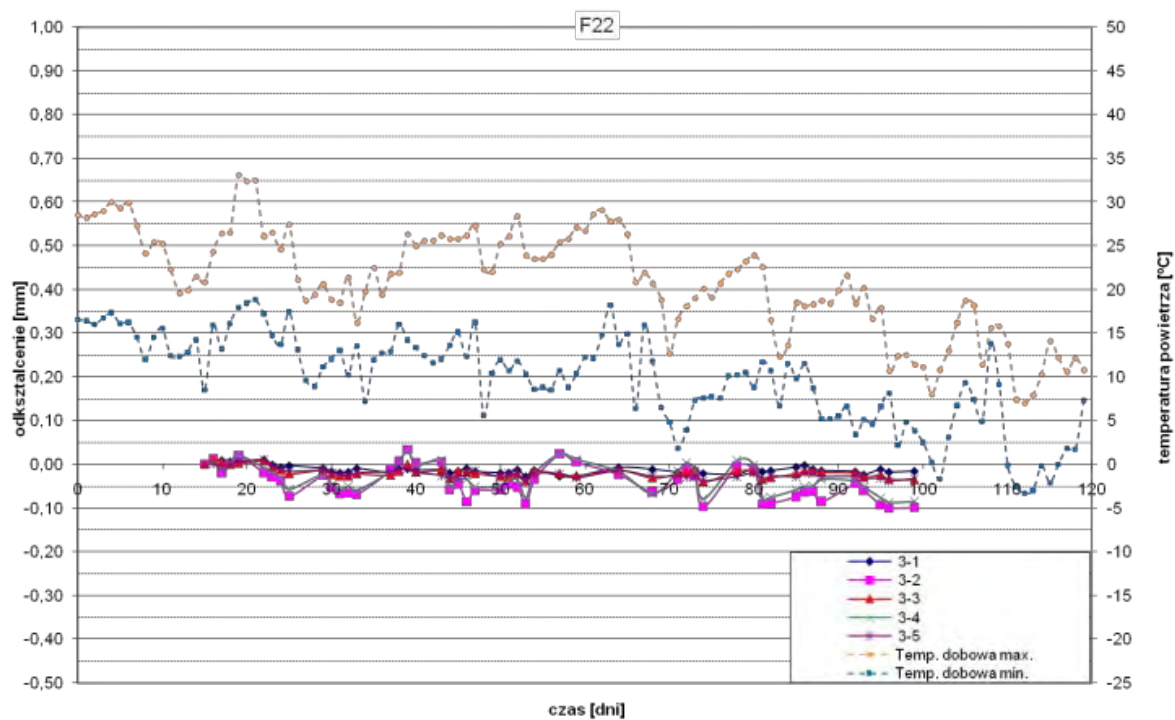
Rys. 4.3.2.2-9 Wartości odkształceń w kolumnie 9 muru F21



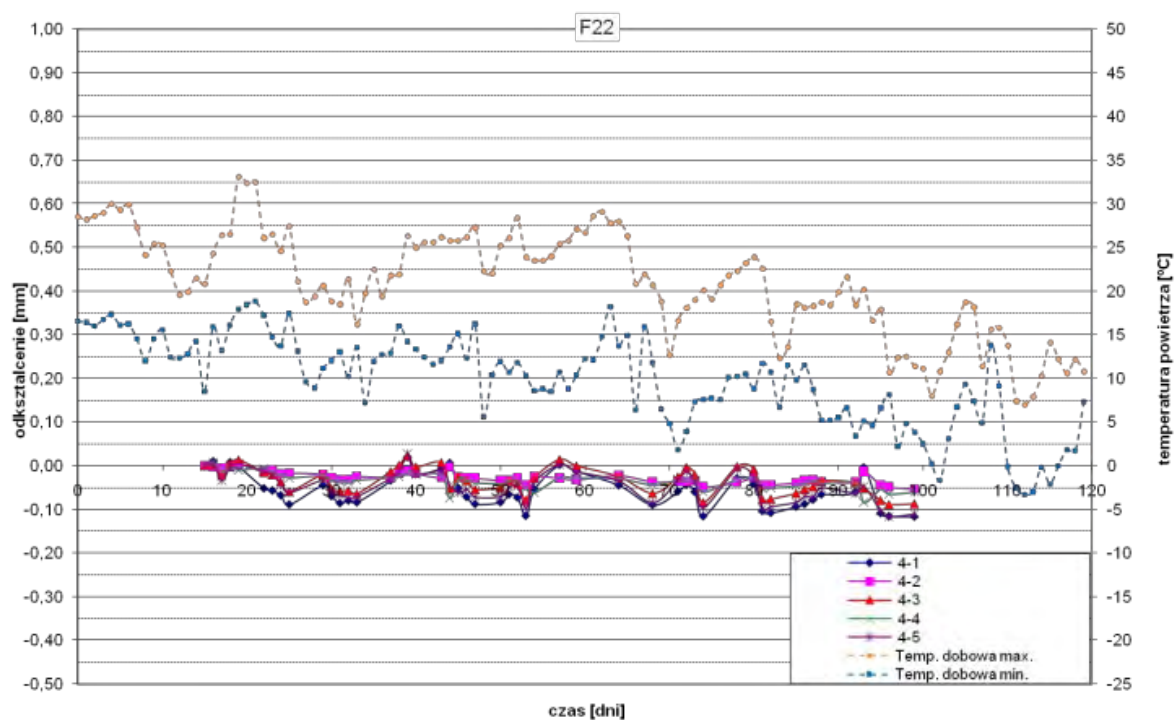
Rys. 4.3.2.2-10 Wartości odkształceń w kolumnie 1 muru F22



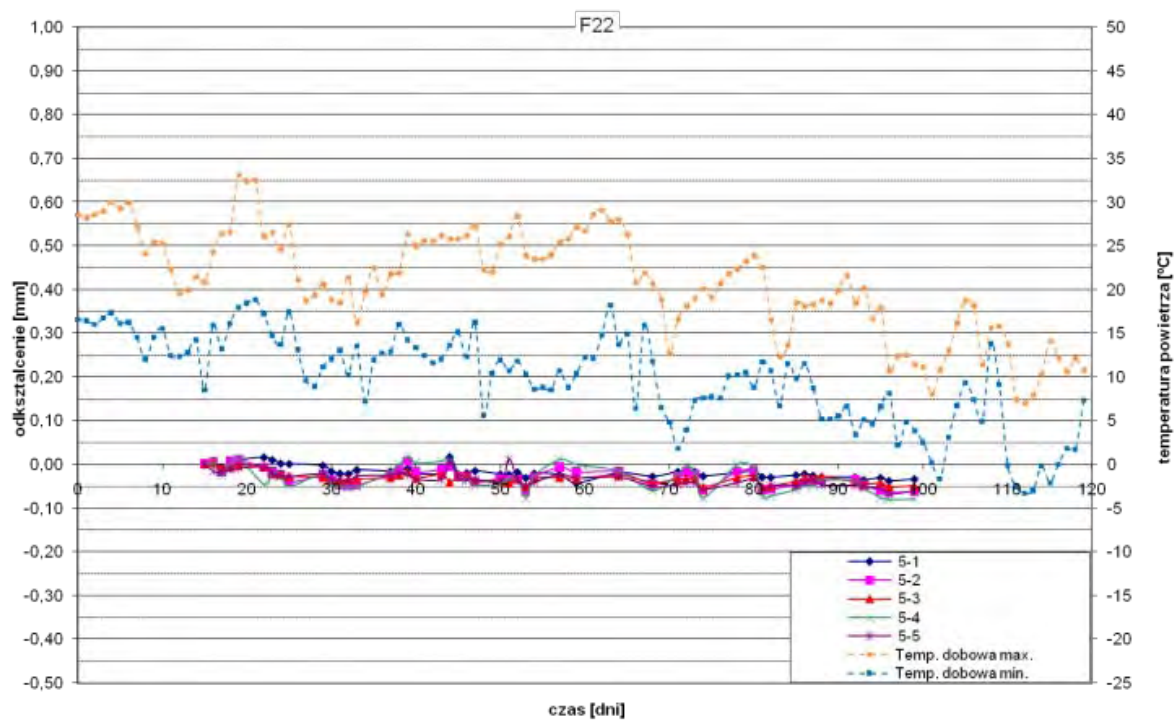
Rys. 4.3.2.2-11 Wartości odkształceń w kolumnie 2 muru F22



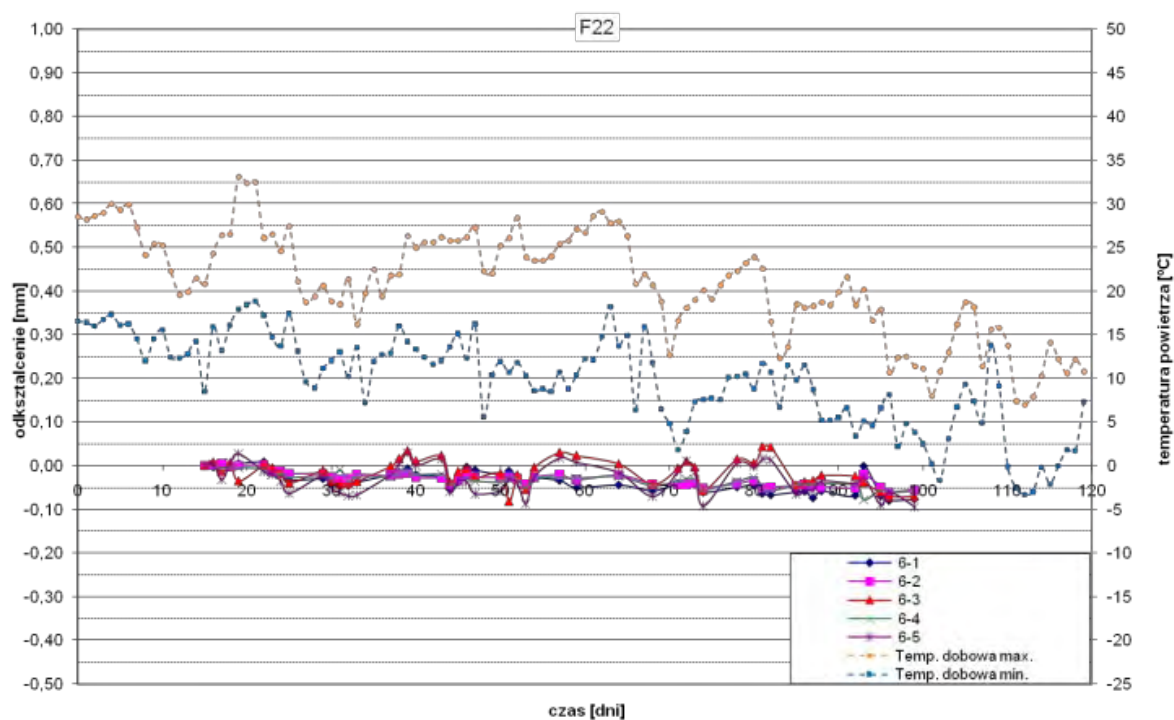
Rys. 4.3.2.2-12 Wartości odkształceń w kolumnie 3 muru F22



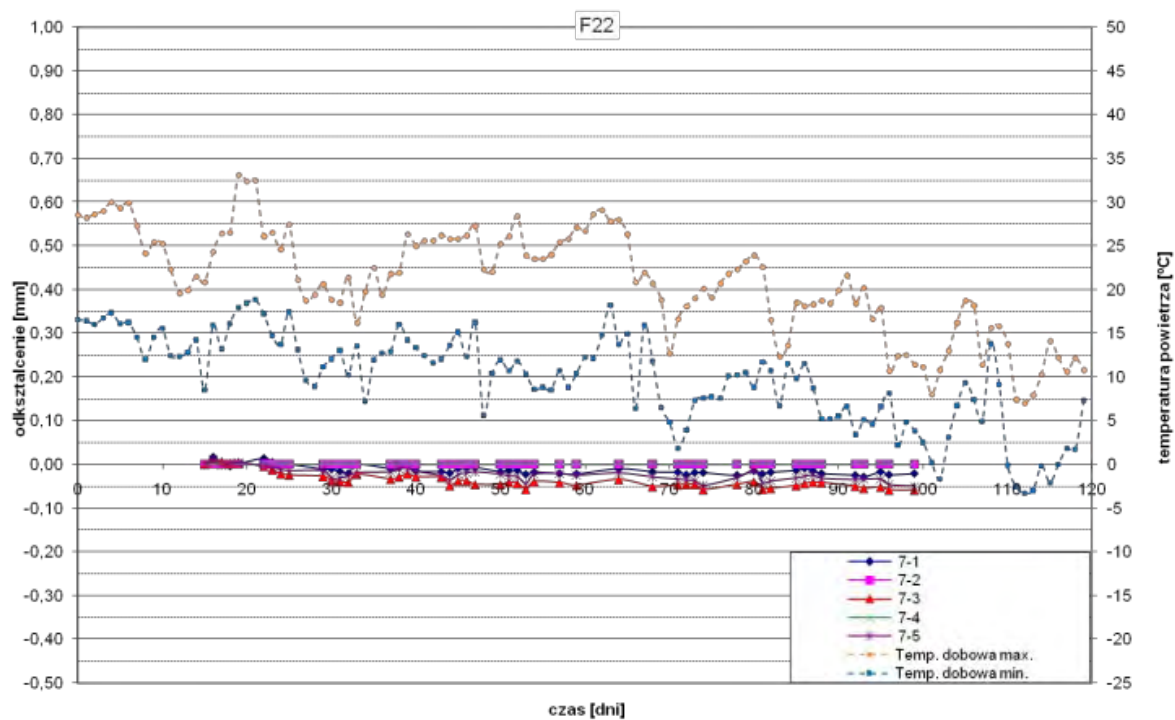
Rys. 4.3.2.2-13 Wartości odkształceń w kolumnie 4 muru F22



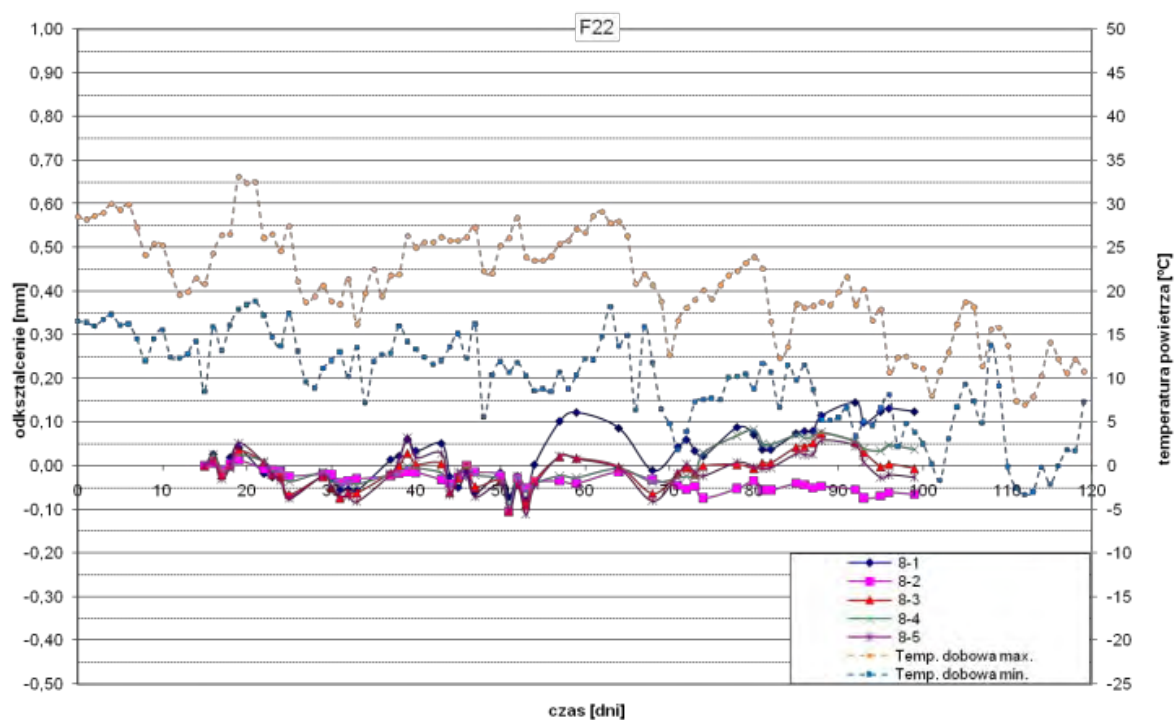
Rys. 4.3.2.2-14 Wartości odkształceń w kolumnie 5 muru F22



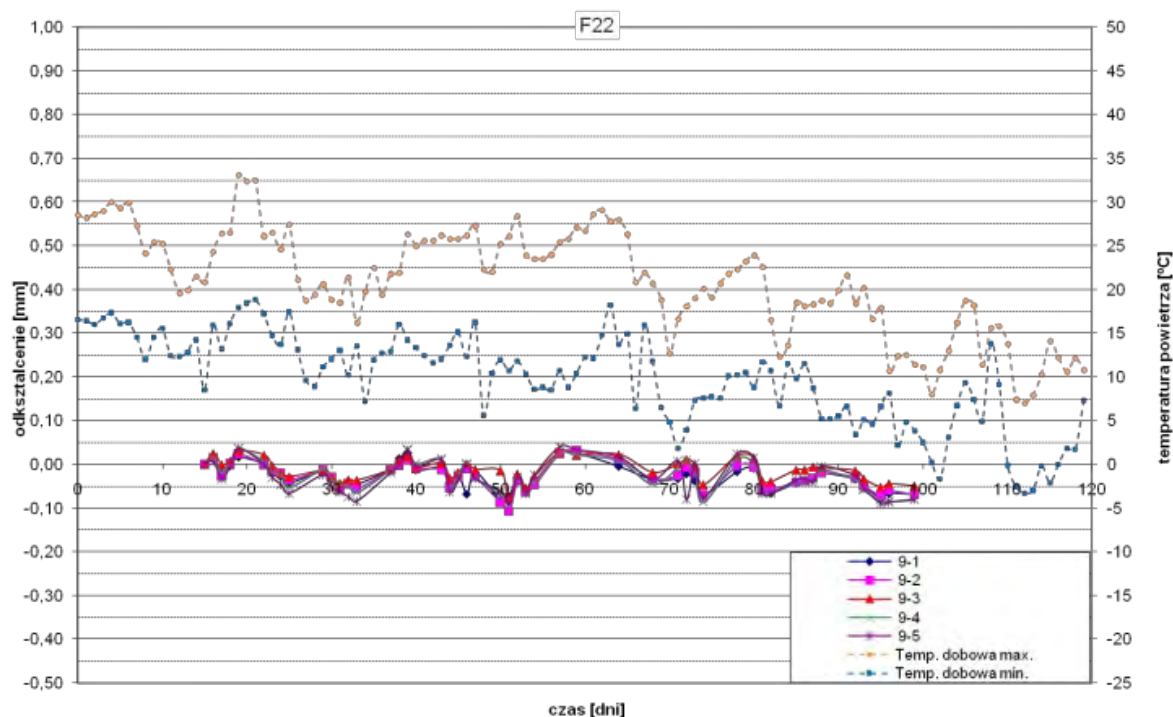
Rys. 4.3.2.2-15 Wartości odkształceń w kolumnie 6 muru F22



Rys. 4.3.2.2-16 Wartości odkształceń w kolumnie 7 muru F22



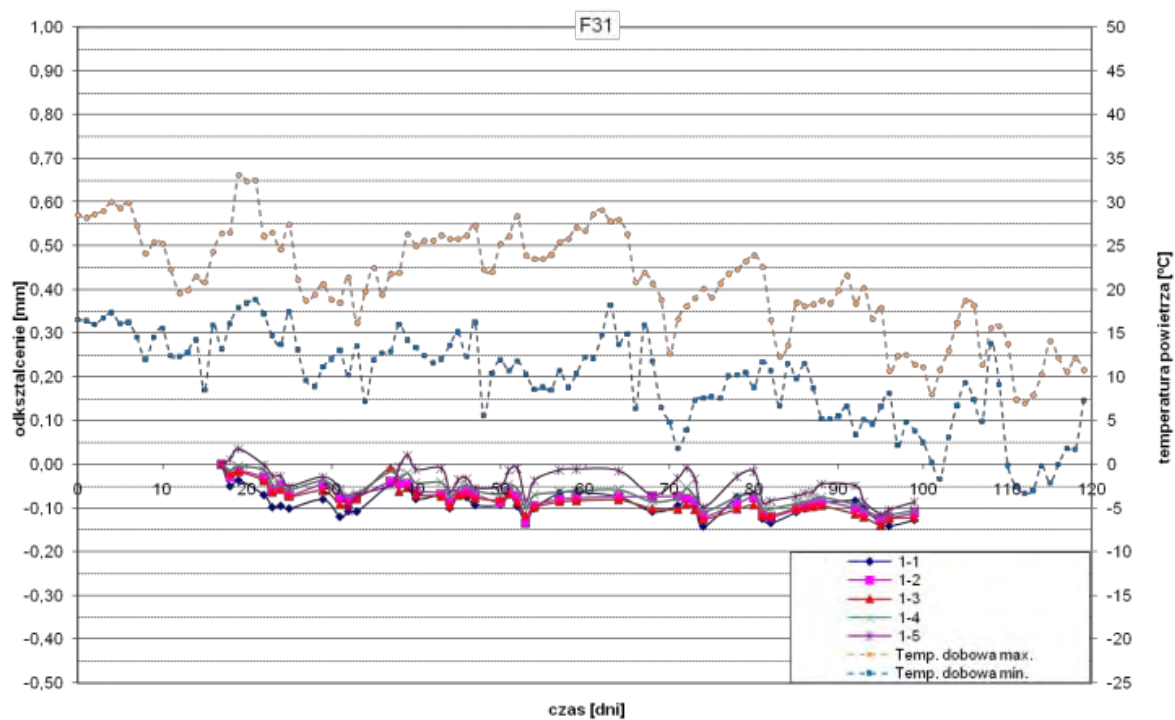
Rys. 4.3.2.2-17 Wartości odkształceń w kolumnie 8 muru F22



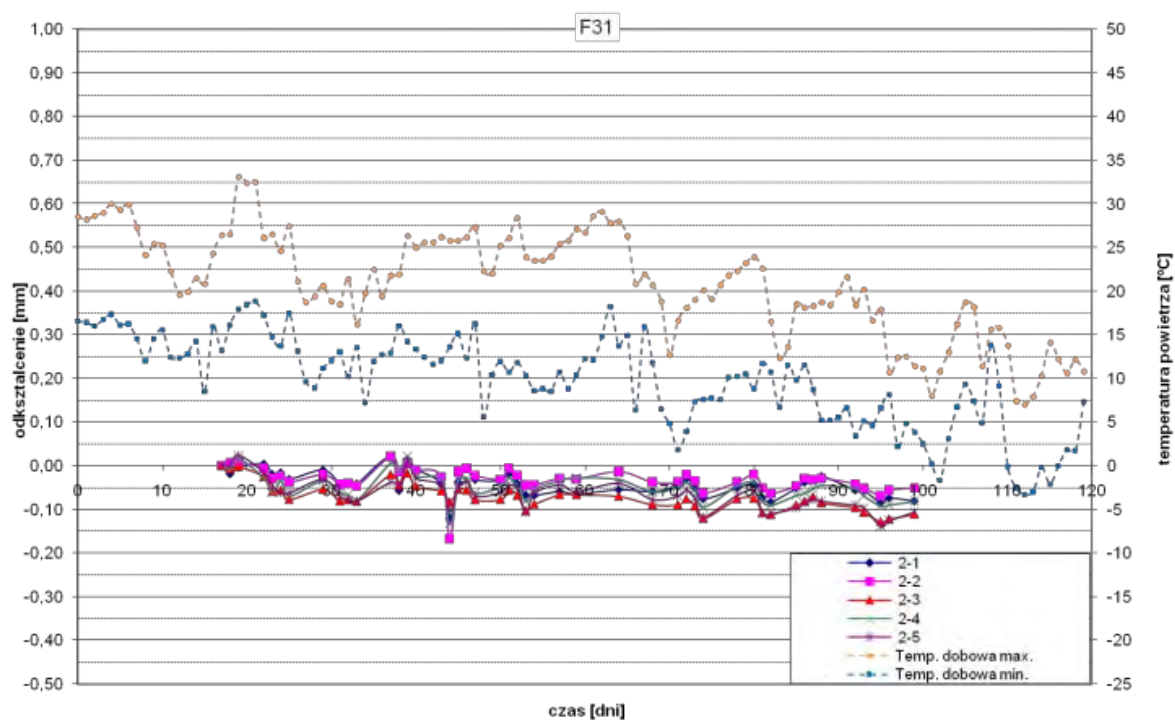
Rys. 4.3.2.2-18 Wartości odkształceń w kolumnie 9 muru F22

4.3.2.3. Mury z ABK o wilgotności ok. 20 % masy

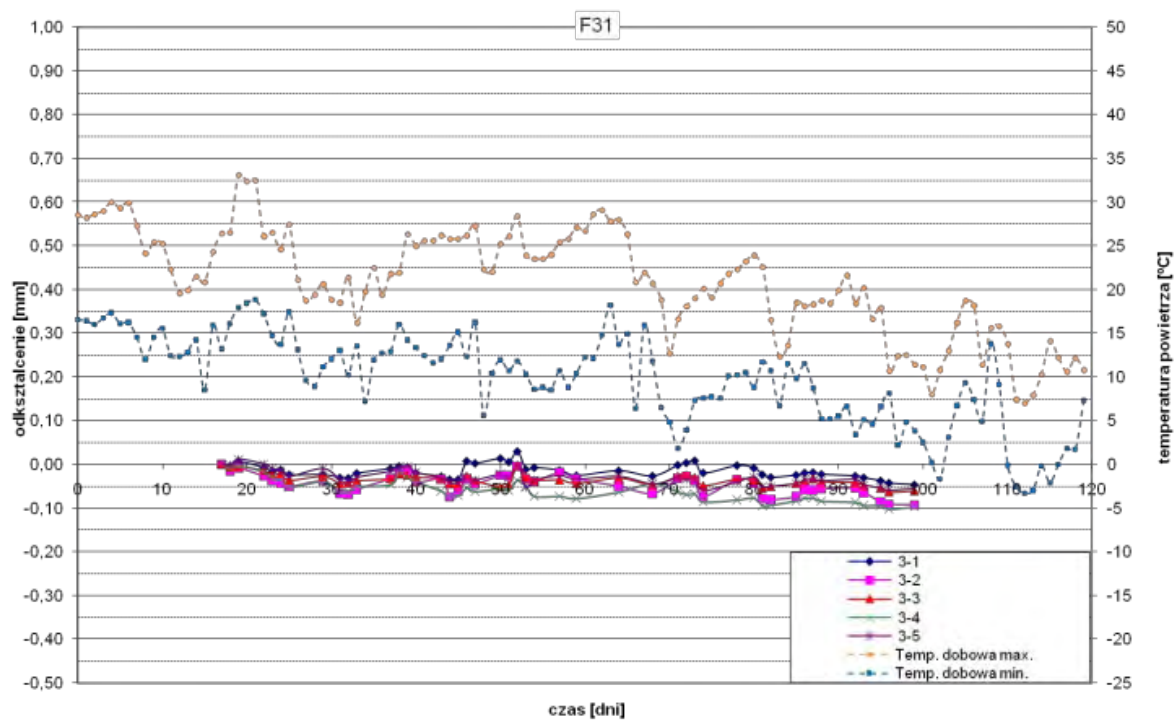
(1) Podobny schemat zarysowań zauważalny jest dla murów F31 i F32 jak w przypadku murów o wilgotności wmurowania 30 % masy (mury F21 i F22). Szerokość rozwarcia rys kształtuje się w przedziale od 0,2 do 0,4 mm, choć w przypadku muru F31 odkształcenie z pomiaru tensometrycznego wyraźnie przekracza wartość 0,4 mm. W murze tym rysy rozchodzą się stopniowo w trzech kolumnach (od 4 do 6 – odpowiednio rys. 4.3.2.3-4 do 4.3.2.3-6) z większą koncentracją w kolumnie 4. Natomiast w murze F32 na przedstawionych wykresach zarysowania są ledwo widoczne, co ma również przełożenie na wyniki obserwacji okiem nieuzbrojonym, widoczne lekkie zarysowanie w kolumnie 2 (Rys. 4.3.2.3-11) przy szerokości rozwarcia rysy ok. 0,3 mm. Wyraźnie widoczne jest zmniejszenie odkształceń murów przy zawilgoceniu elementów wmurowywanych na poziomie 20 % masy. Zarysowania powstają, ale szerokość ich rozwarcia jest prawie dwukrotnie mniejsza w stosunku do zarysowań opisanych dla murów o wilgotności wyższej.



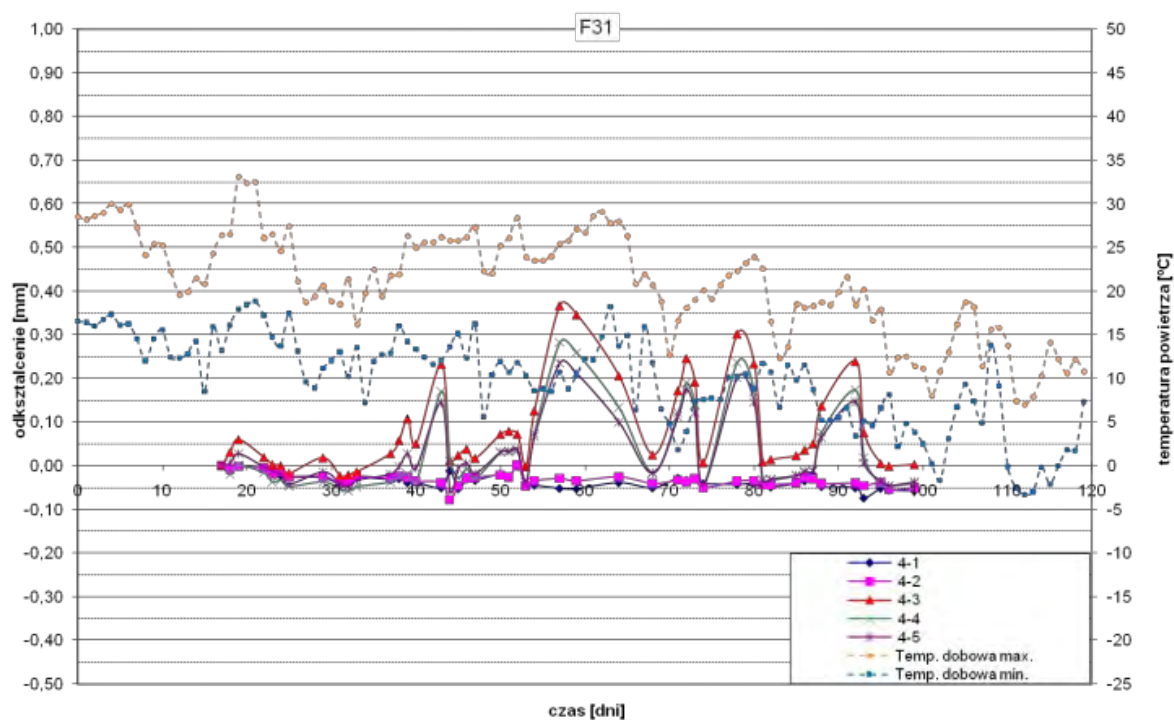
Rys. 4.3.2.3-1 Wartości odkształceń w kolumnie 1 muru F31



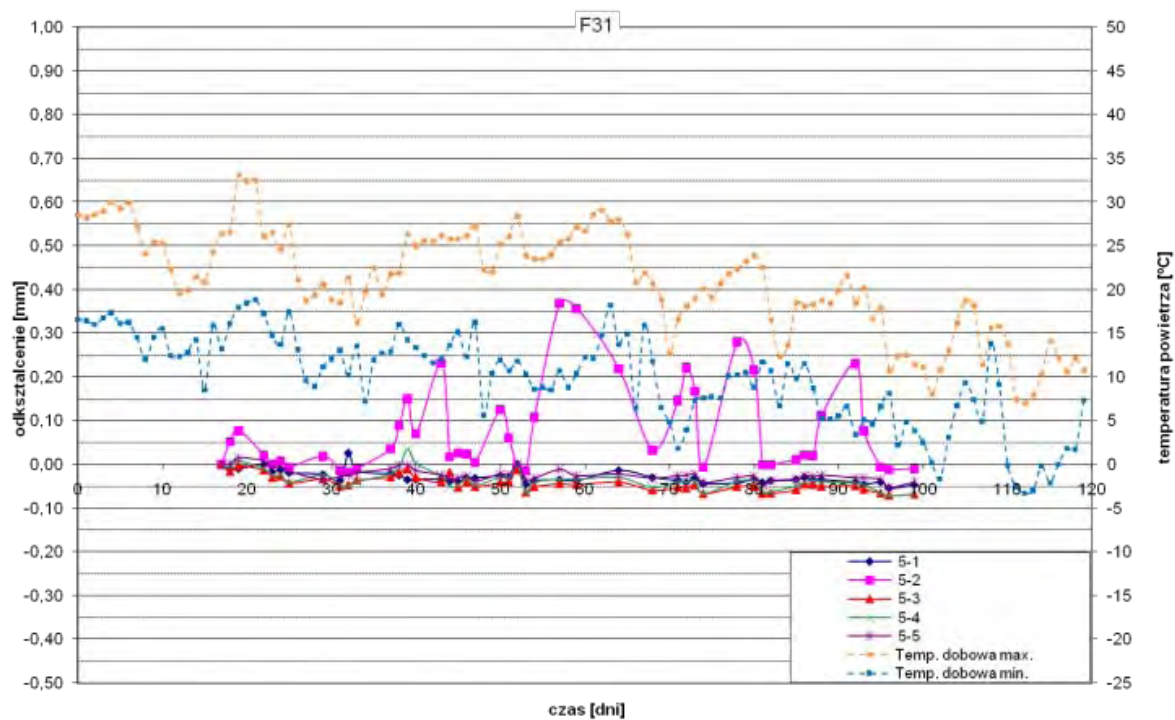
Rys. 4.3.2.3-2 Wartości odkształceń w kolumnie 2 muru F31



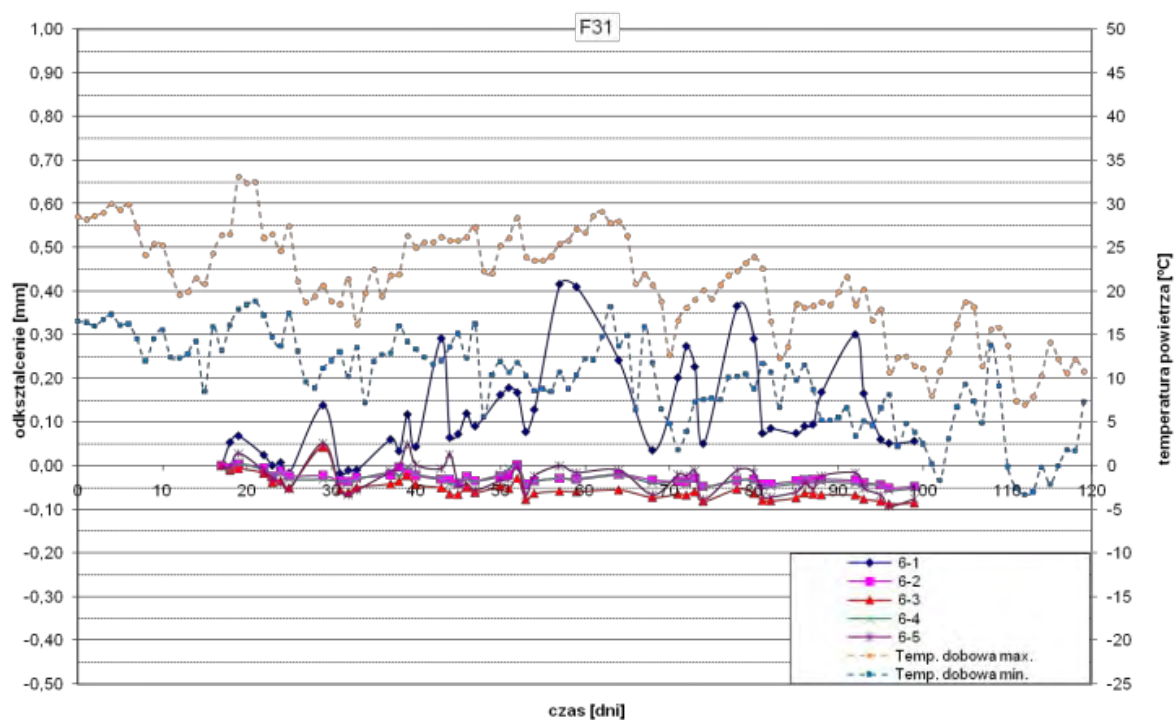
Rys. 4.3.2.3-3 Wartości odkształceń w kolumnie 3 muru F31



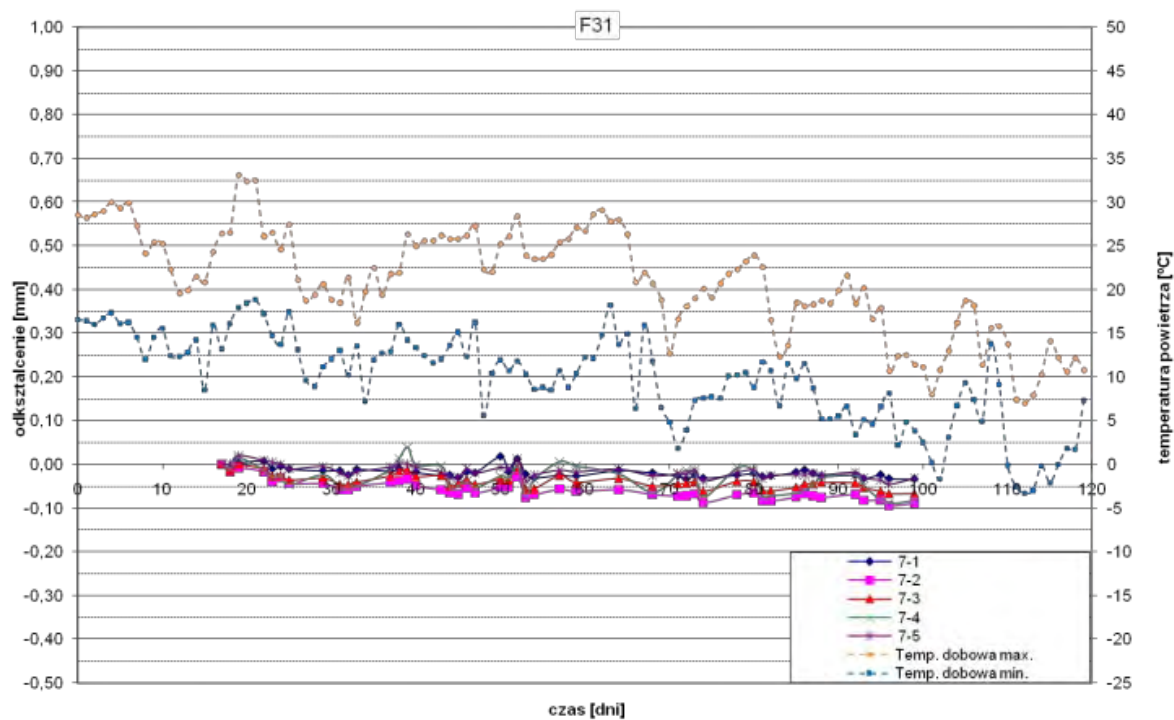
Rys. 4.3.2.3-4 Wartości odkształceń w kolumnie 4 muru F31



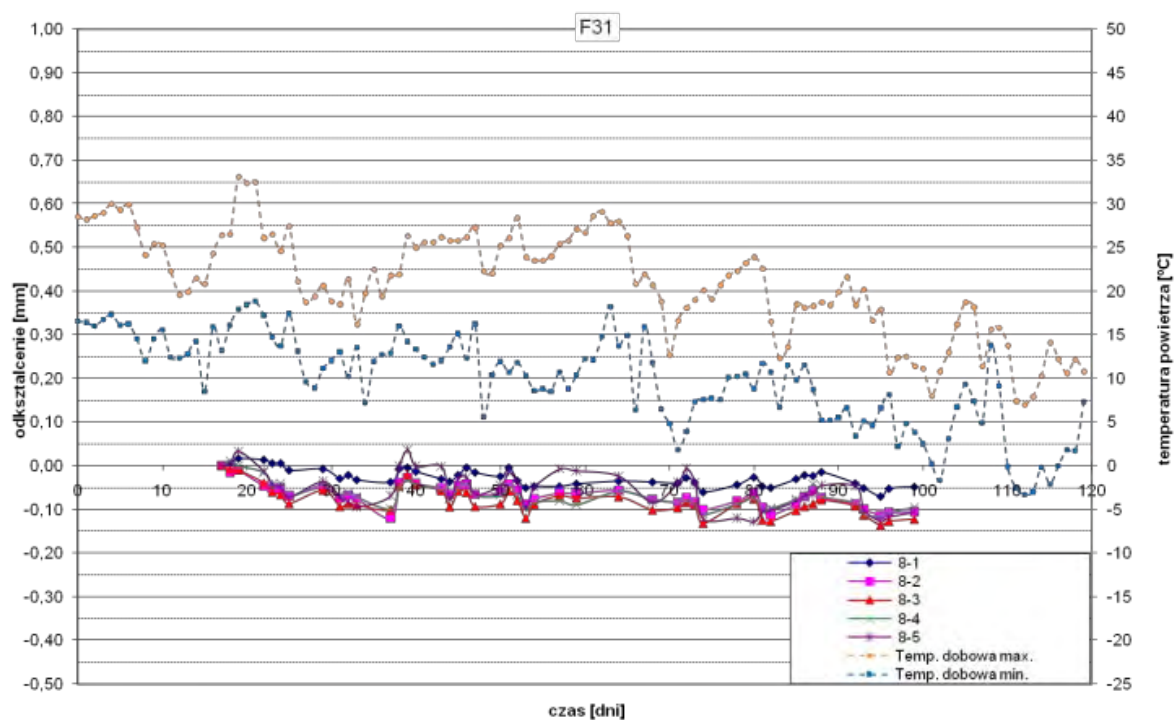
Rys. 4.3.2.3-5 Wartości odkształceń w kolumnie 5 muru F31



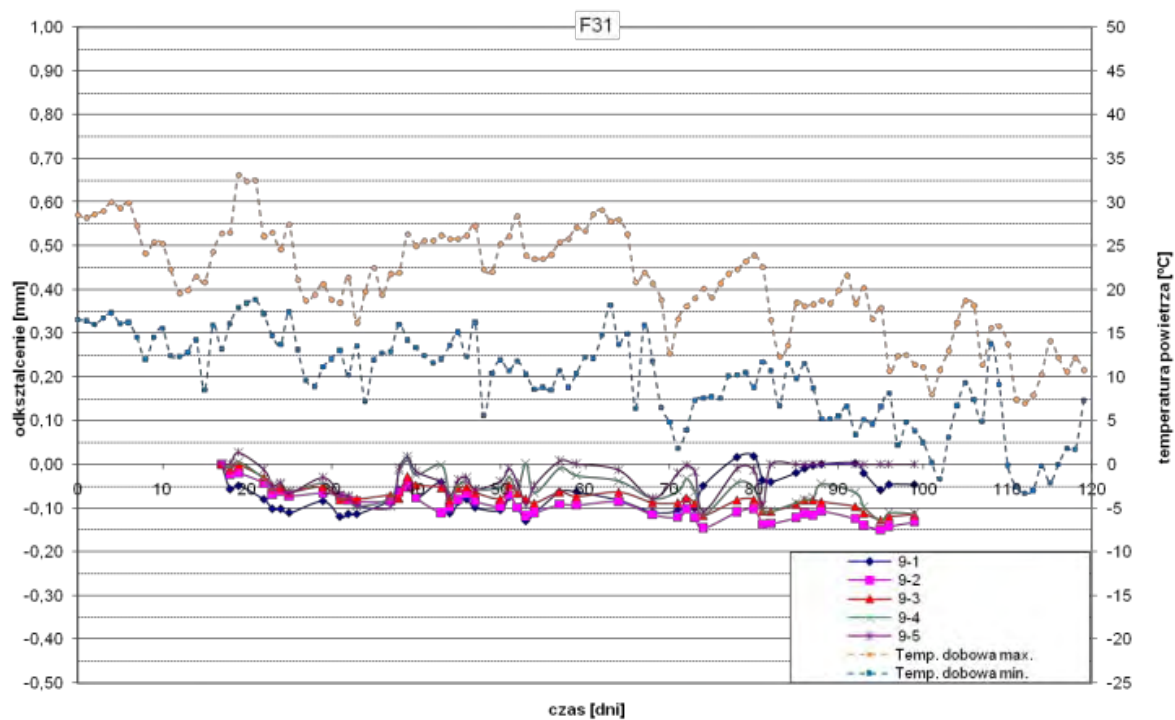
Rys. 4.3.2.3-6 Wartości odkształceń w kolumnie 6 muru F31



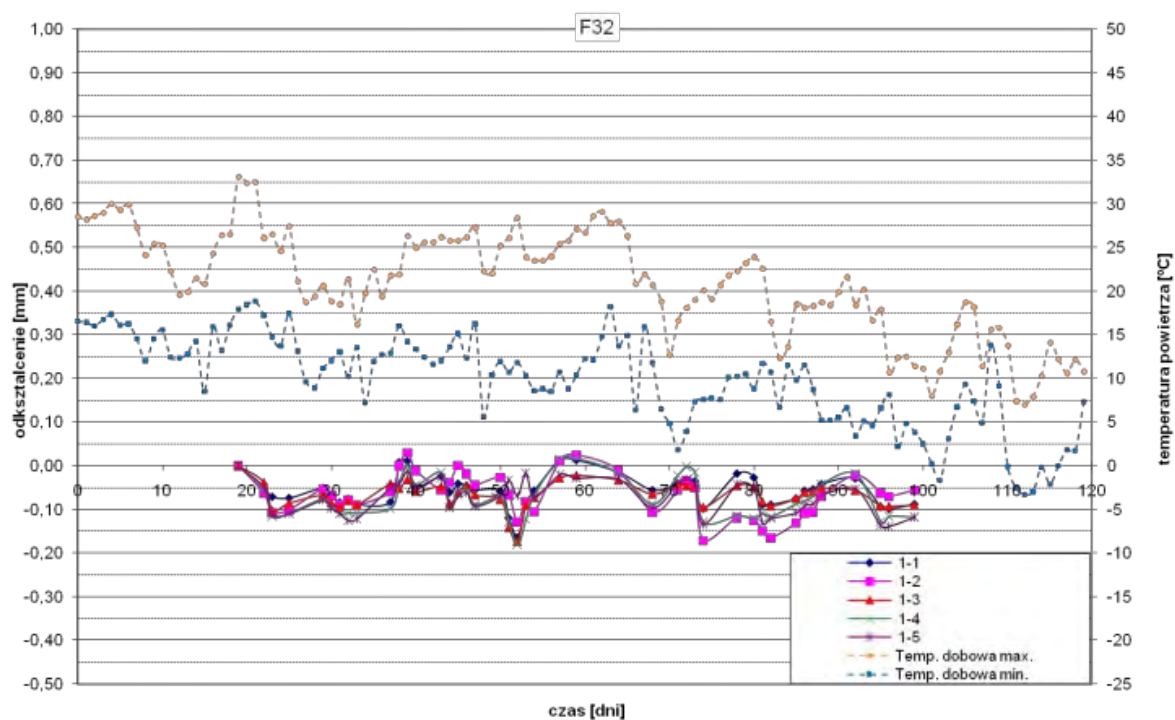
Rys. 4.3.2.3-7 Wartości odkształceń w kolumnie 7 muru F31



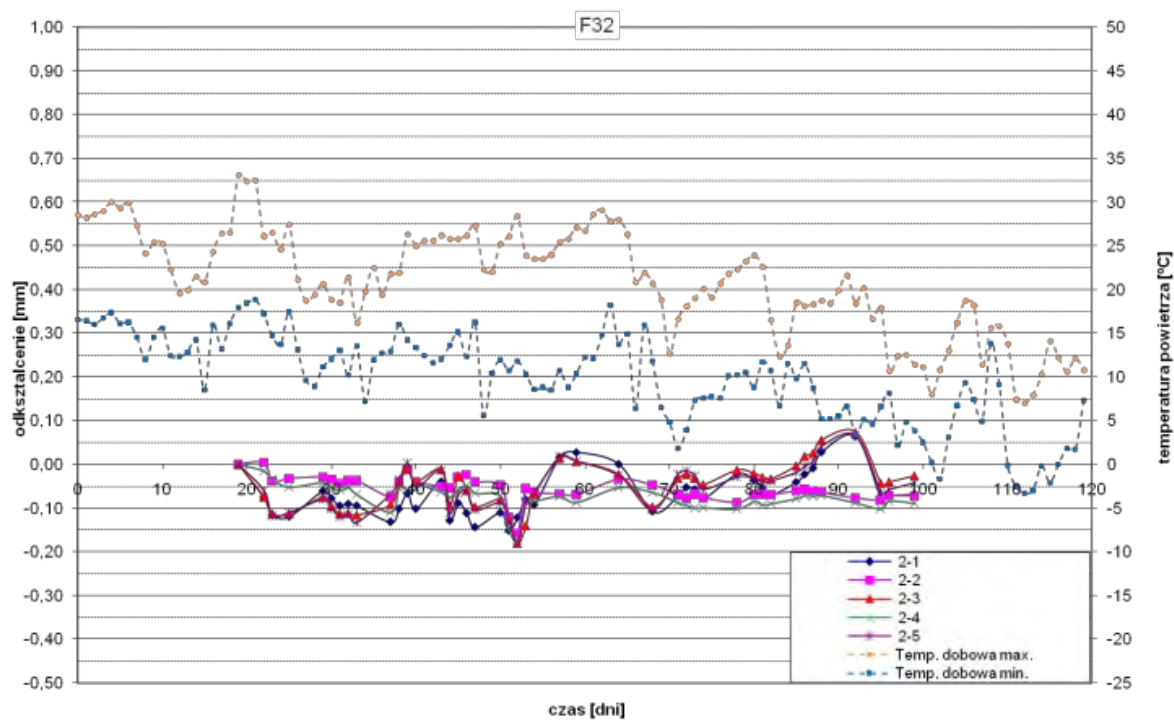
Rys. 4.3.2.3-8 Wartości odkształceń w kolumnie 8 muru F31



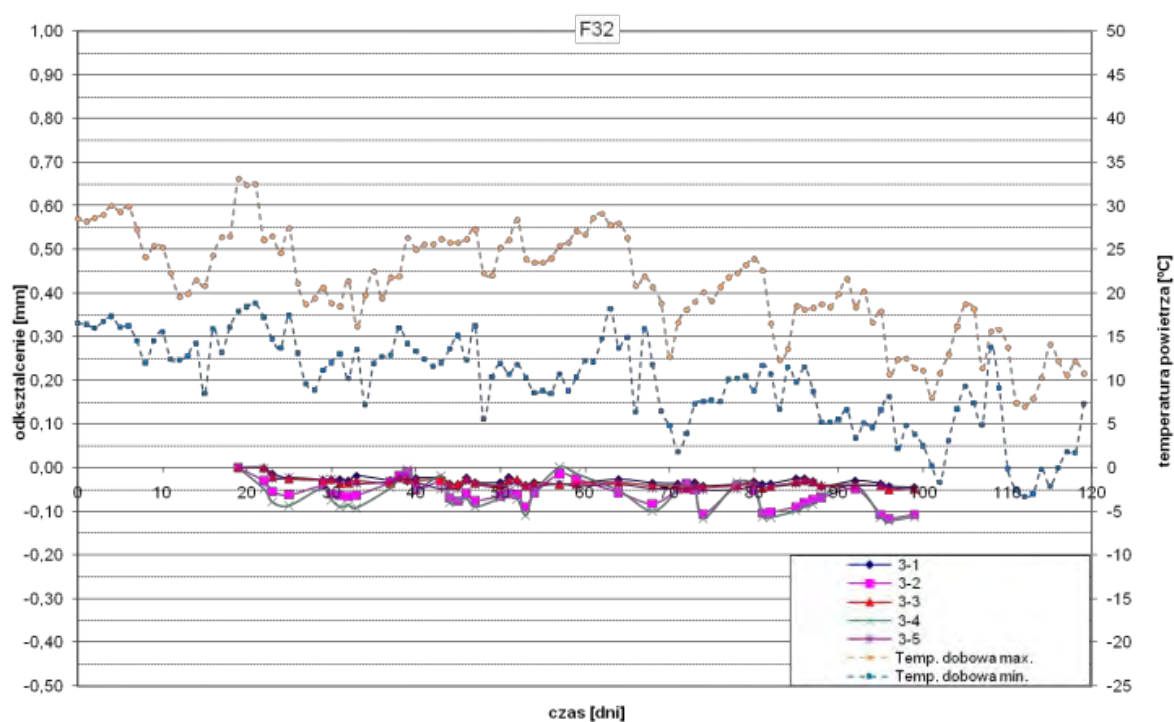
Rys. 4.3.2.3-9 Wartości odkształceń w kolumnie 9 muru F31



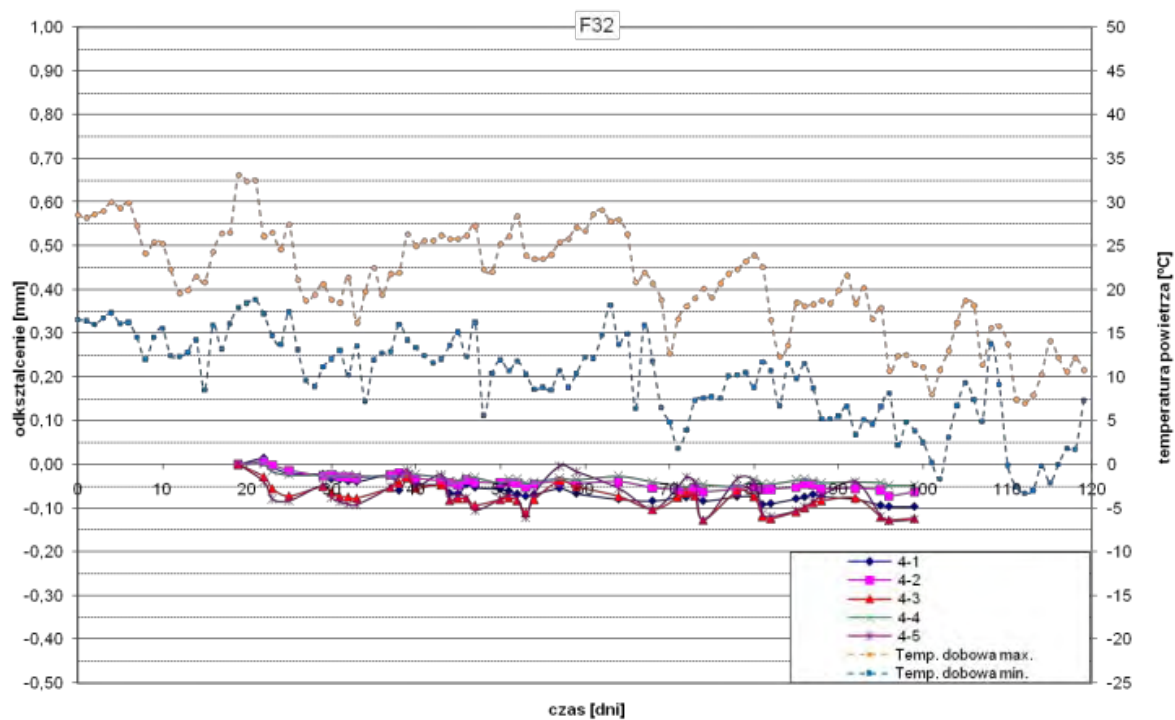
Rys. 4.3.2.3-10 Wartości odkształceń w kolumnie 1 muru F32



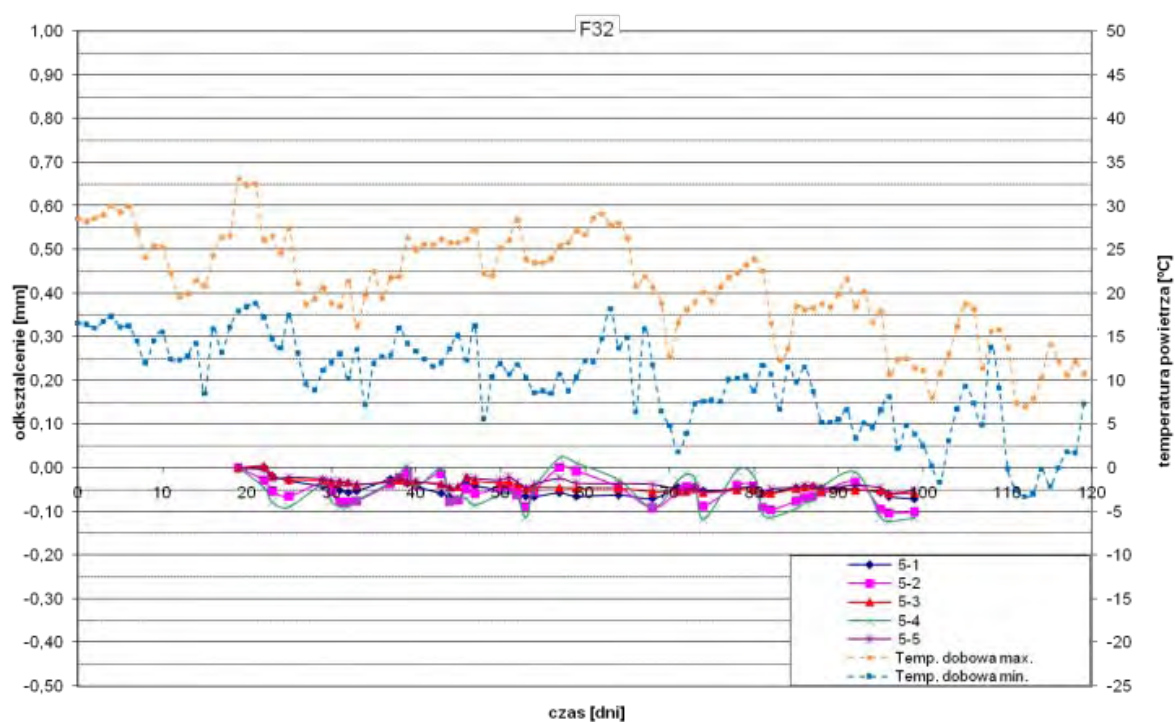
Rys. 4.3.2.3-11 Wartości odkształceń w kolumnie 2 muru F32



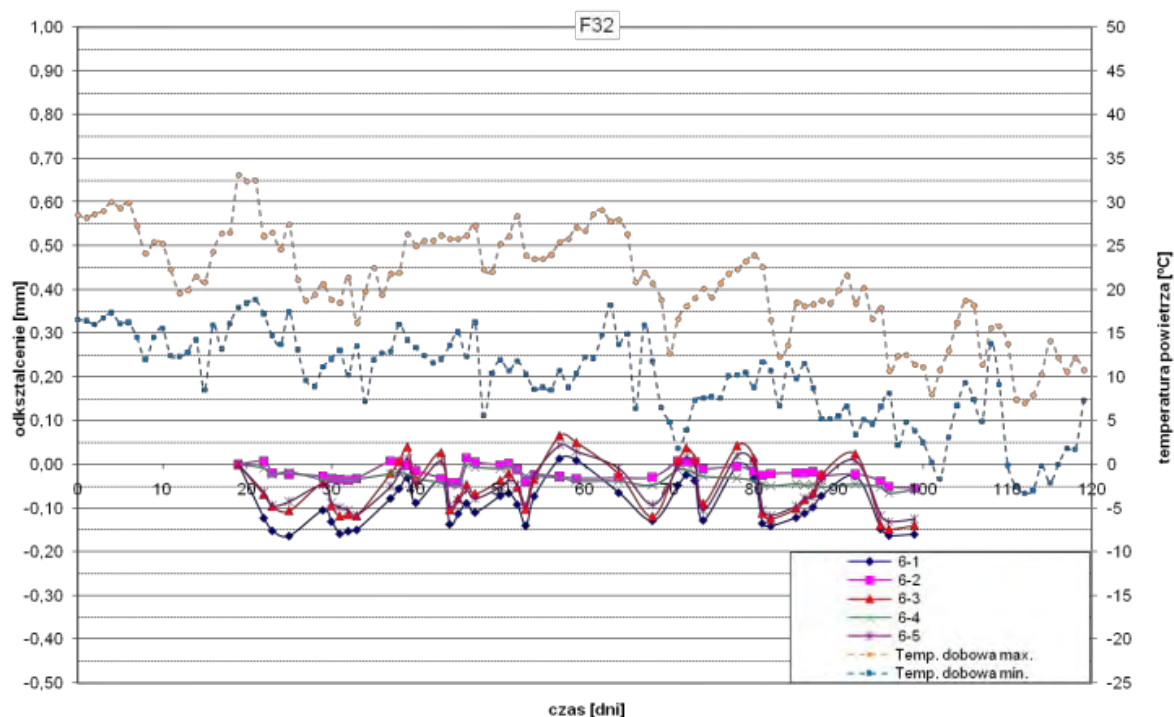
Rys. 4.3.2.3-12 Wartości odkształceń w kolumnie 3 muru F32



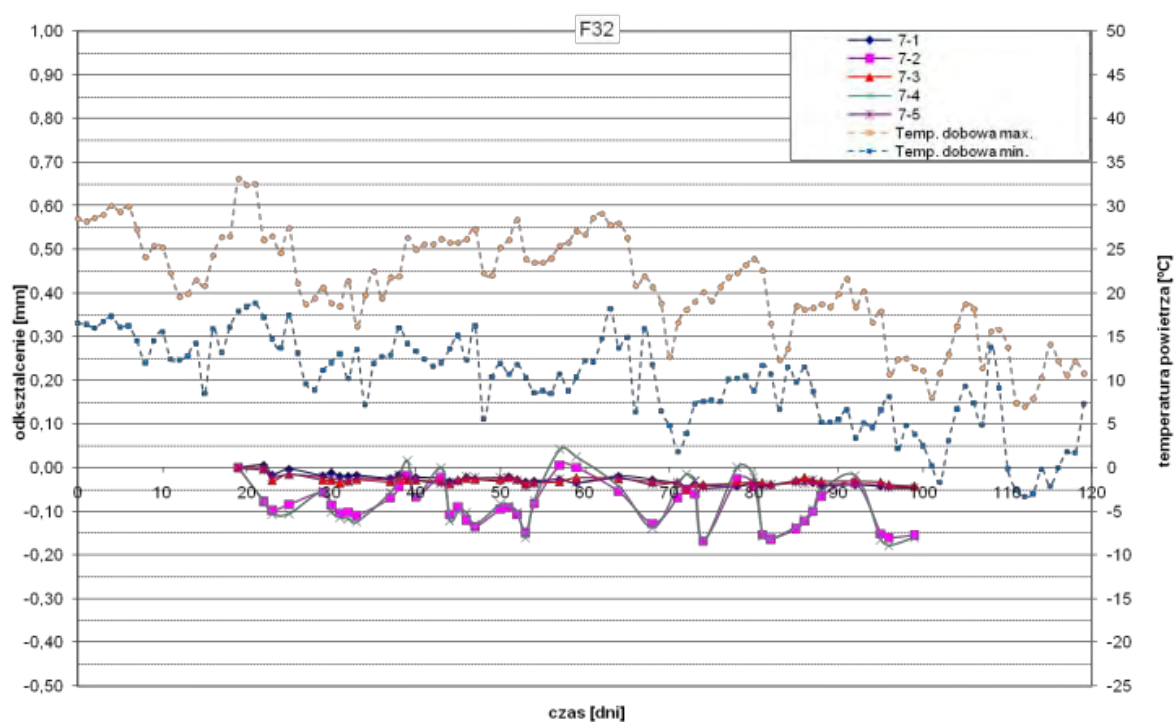
Rys. 4.3.2.3-13 Wartości odkształceń w kolumnie 4 muru F32



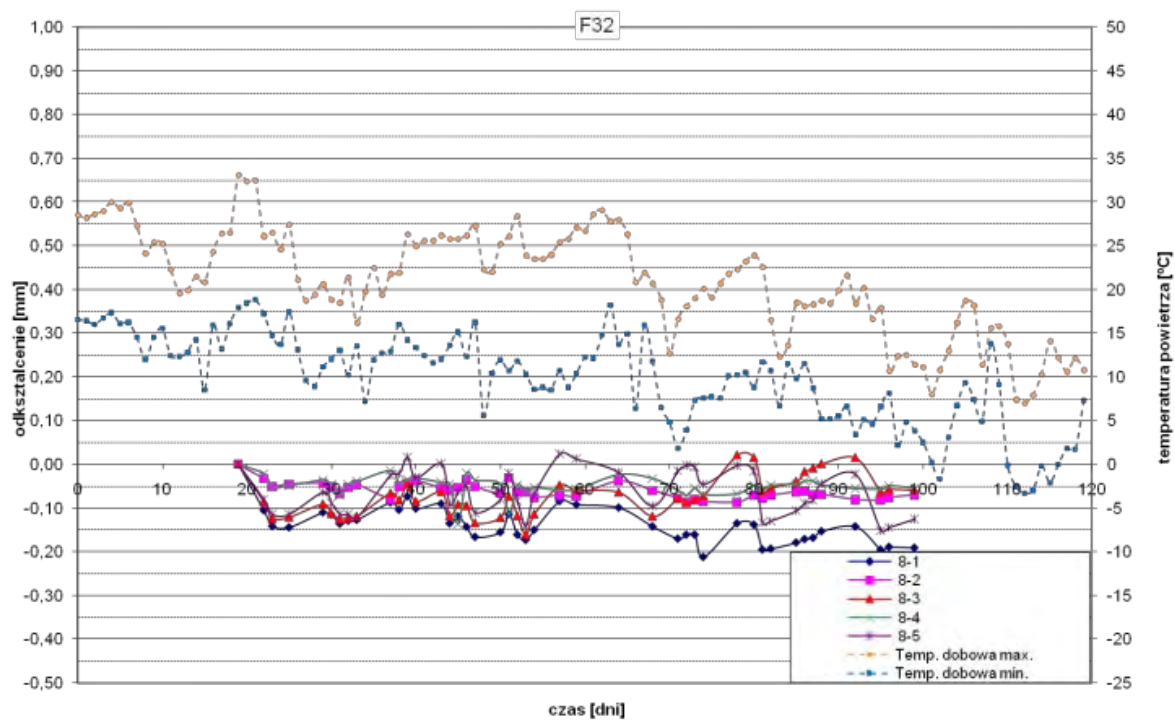
Rys. 4.3.2.3-14 Wartości odkształceń w kolumnie 5 muru F32



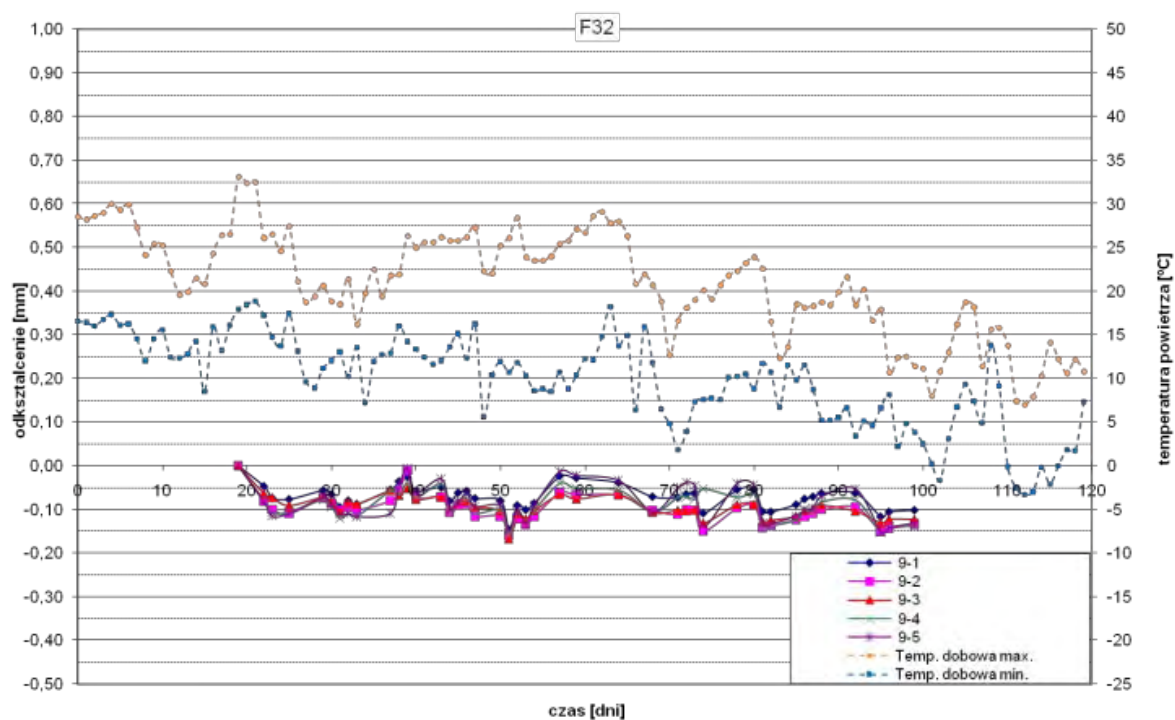
Rys. 4.3.2.3-15 Wartości odkształceń w kolumnie 6 muru F32



Rys. 4.3.2.3-16 Wartości odkształceń w kolumnie 7 muru F32



Rys. 4.3.2.3-17 Wartości odkształceń w kolumnie 8 muru F32

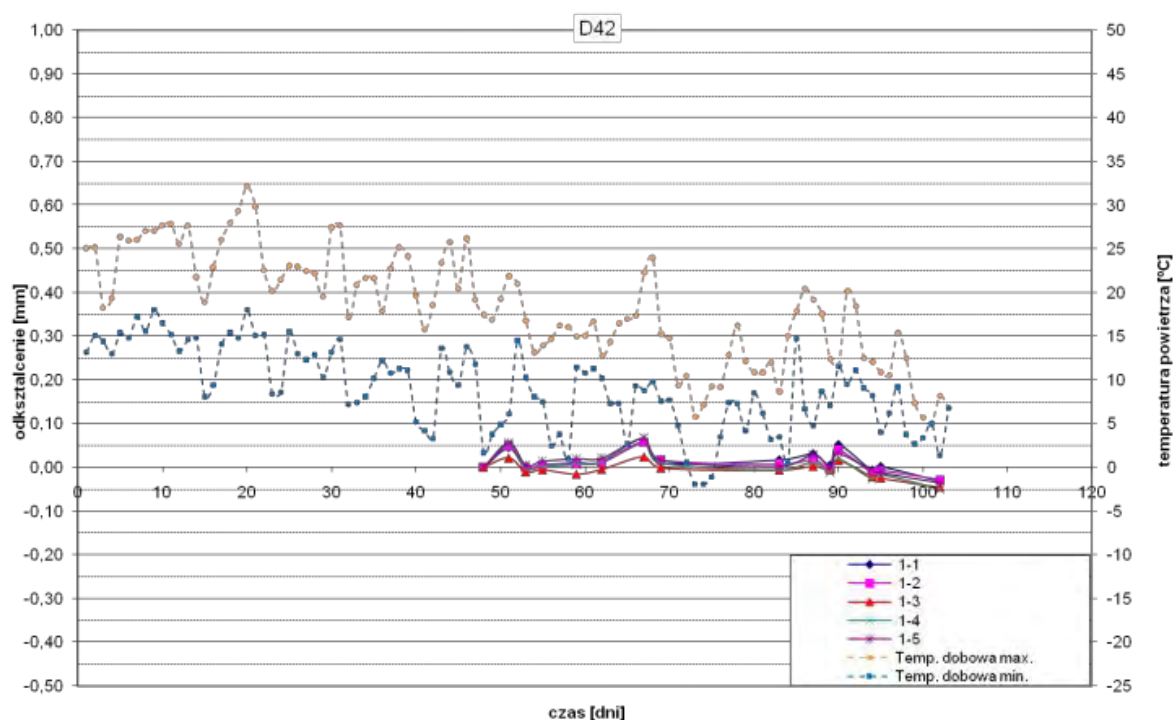


Rys. 4.3.2.3-18 Wartości odkształceń w kolumnie 9 muru F32

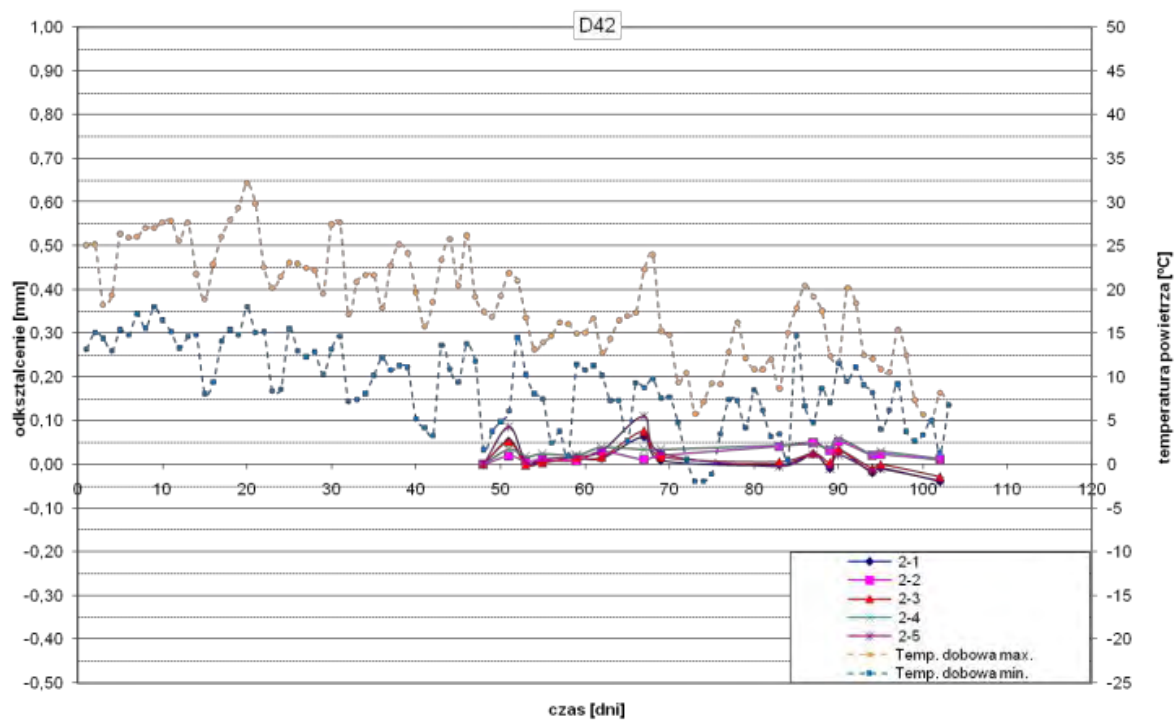
4.3.2.4. Mury z ABK o wilgotności ok. 10 % masy

(1) Wznosząc mury z elementów na poziomie ich zawilgocenia ok. 10 % masy, na podstawie analizowanych schematów zarysowań (Rys. od 4.3.1.4-1 od 4.3.1.4-4) oraz poziomu rozwarcia rys widocznych m.in. na poniższych wykresach, można wywnioskować, że prawdopodobieństwo powstawania zarysowań jest zdecydowanie mniejsze w stosunku do materiału o wyższej wilgotności. Stwierdzenie to po raz kolejny potwierdziło się w prowadzonych badaniach zarówno na podstawie obserwacji jak i pomiarów tensometrycznych. Dla przykładowo wybranych murów D42 i E41 widać wyraźny brak rejestracji większych odkształceń, gdzie maksymalne kształtują się na poziomie $\pm 0,1$ lub $0,2$ mm.

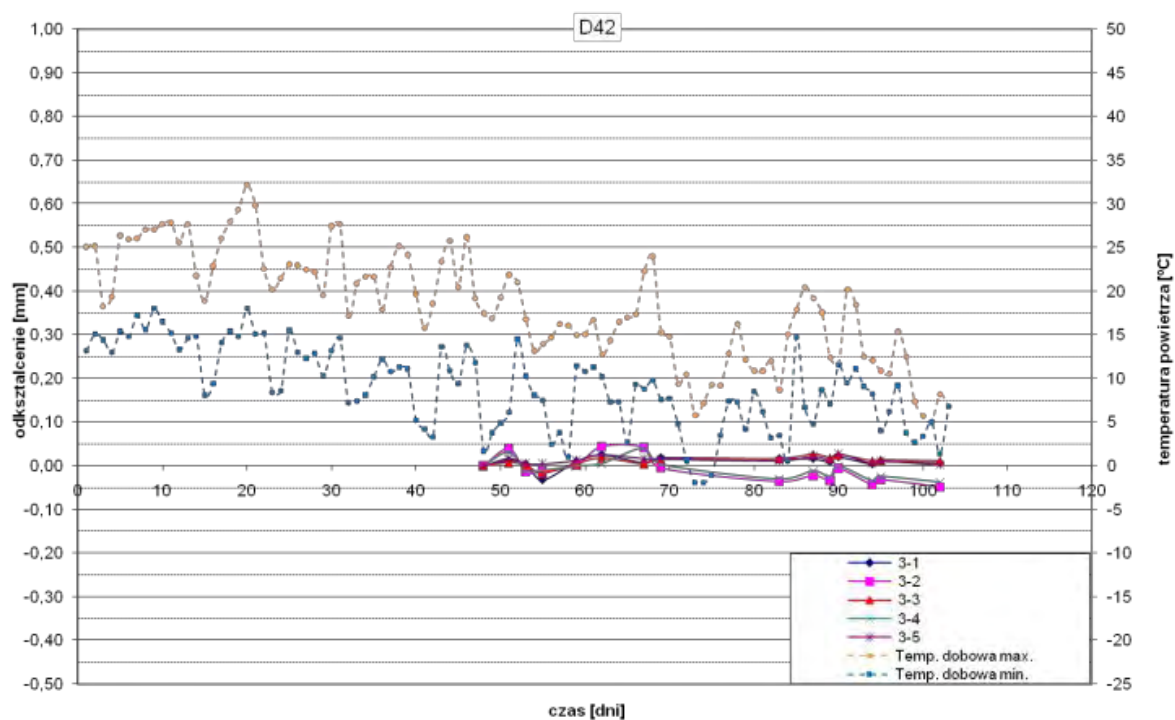
(2) Ponadto celowe jest wyróżnienie poziomu wartości szerokości rozwarcia rys dla grupy murów wykonanych z elementów murowych z betonu komórkowego na kruszywie piaskowym łączonych zaprawą ciepłochronną, gdzie stopniowo w zależności od zawilgocenia poziom szerokości rozwarcia rys odpowiednio malał, lecz w żadnym z tych murów (tj. D12, F22, F32, D42) zarysowanie nie przekroczyło szerokości rozwarcia $0,3$ mm.



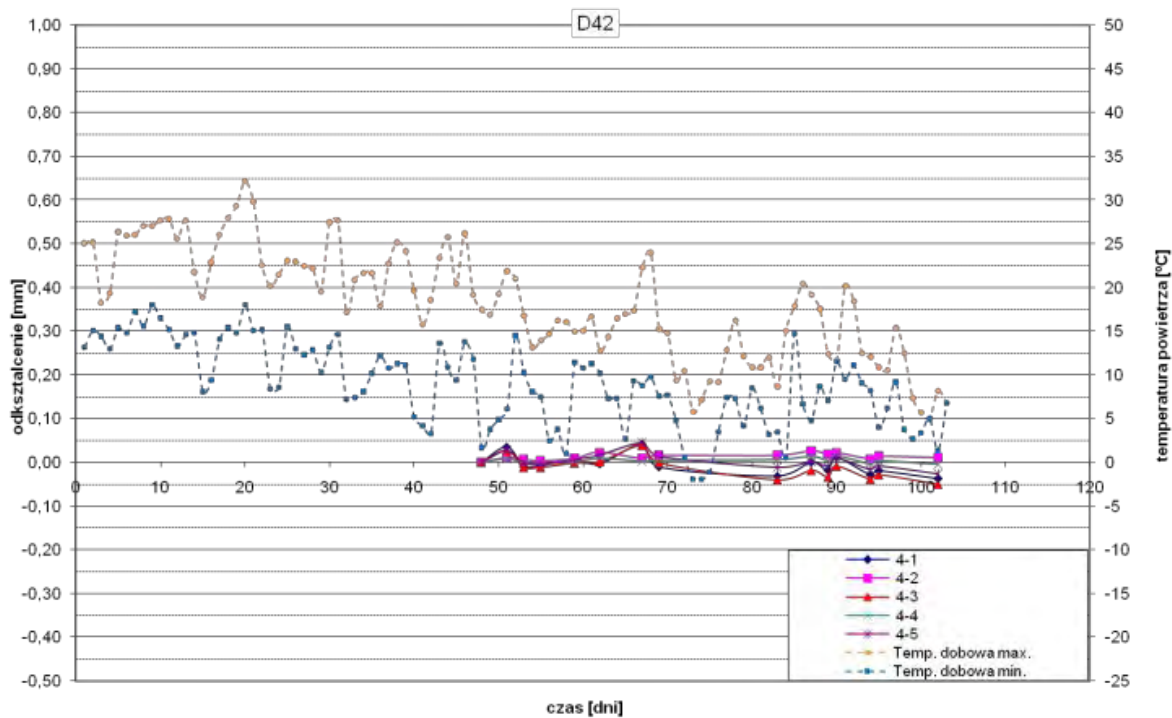
Rys. 4.3.2.4-1 Wartości odkształceń w kolumnie 1 muru D42



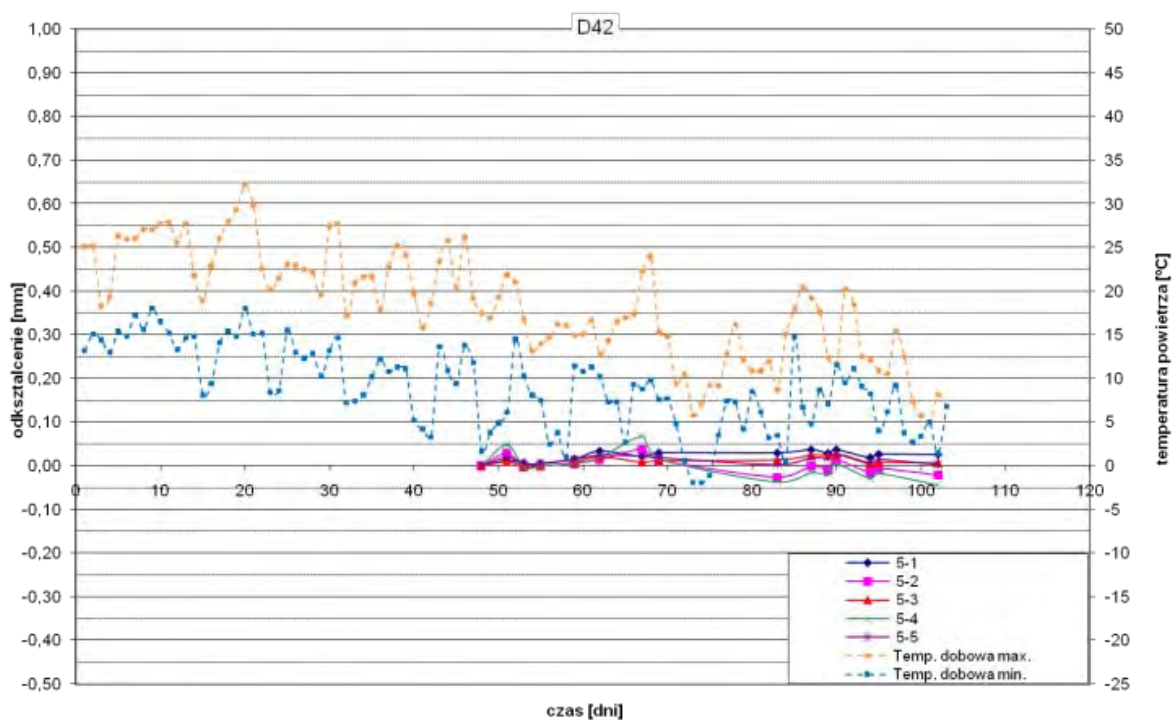
Rys. 4.3.2.4-2 Wartości odkształceń w kolumnie 2 muru D42



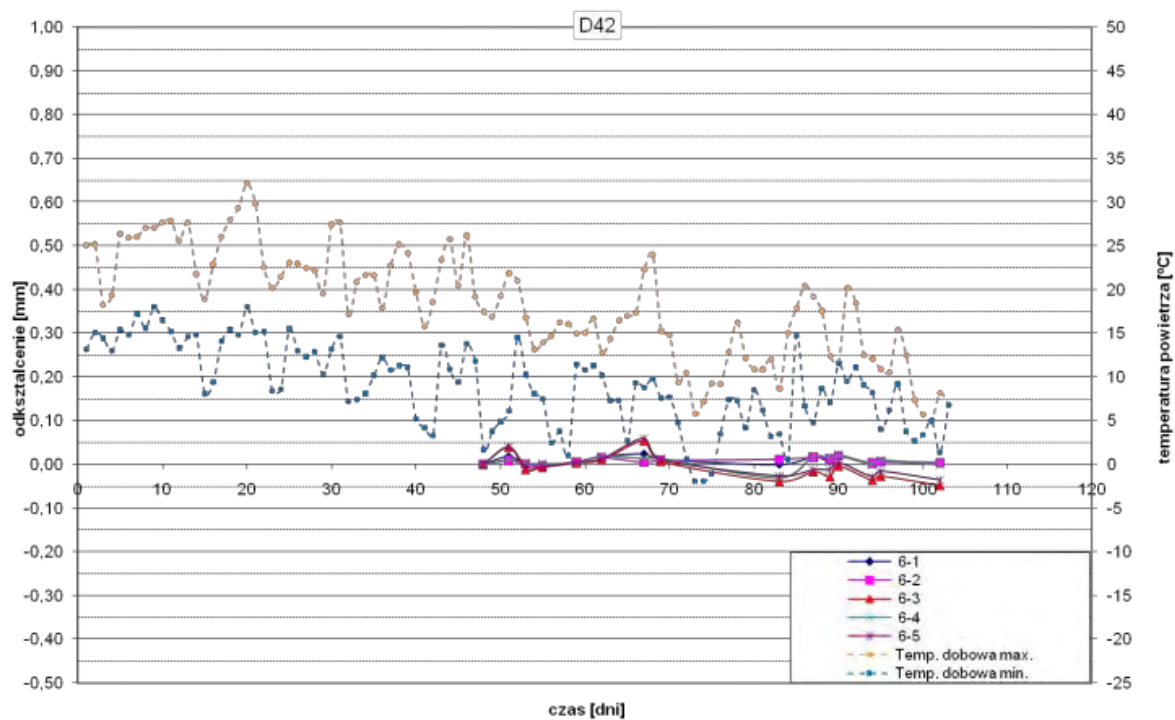
Rys. 4.3.2.4-3 Wartości odkształceń w kolumnie 3 muru D42



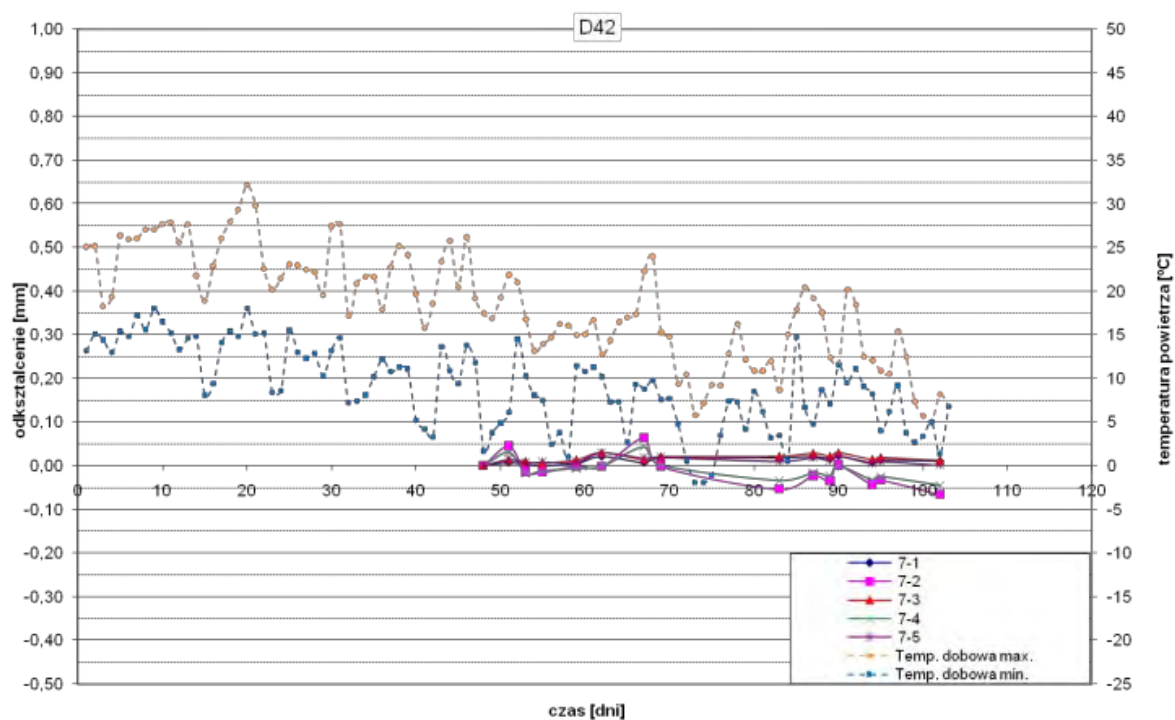
Rys. 4.3.2.4-4 Wartości odkształceń w kolumnie 4 muru D42



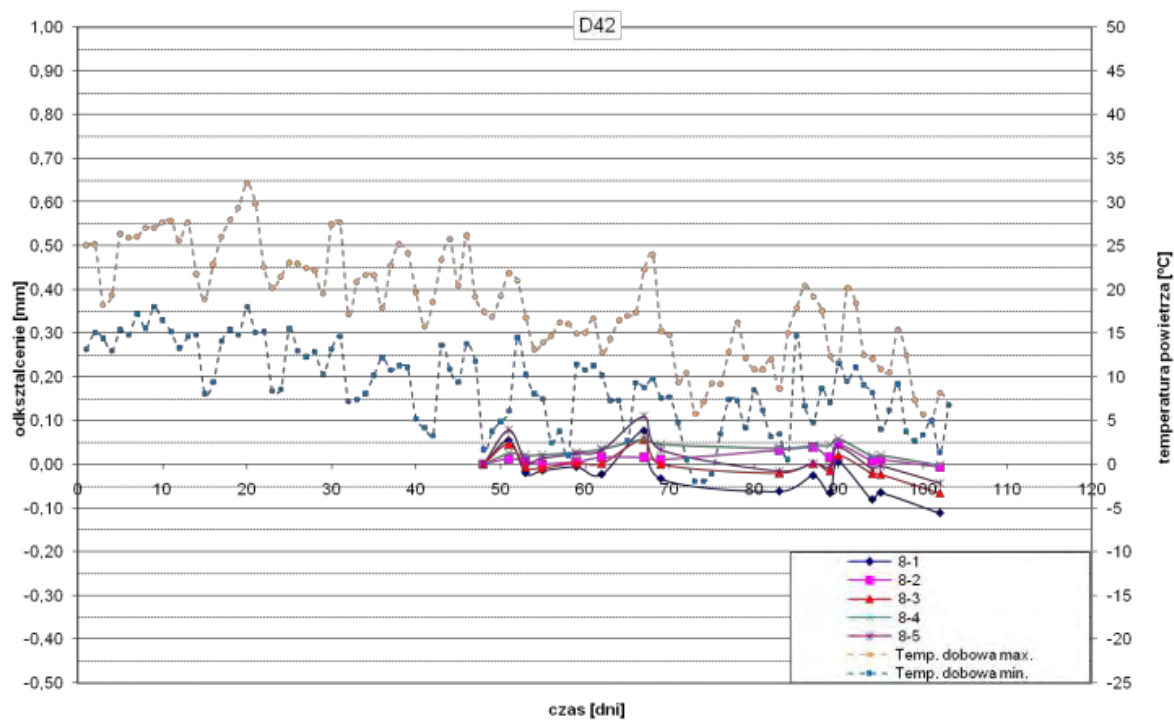
Rys. 4.3.2.4-5 Wartości odkształceń w kolumnie 5 muru D42



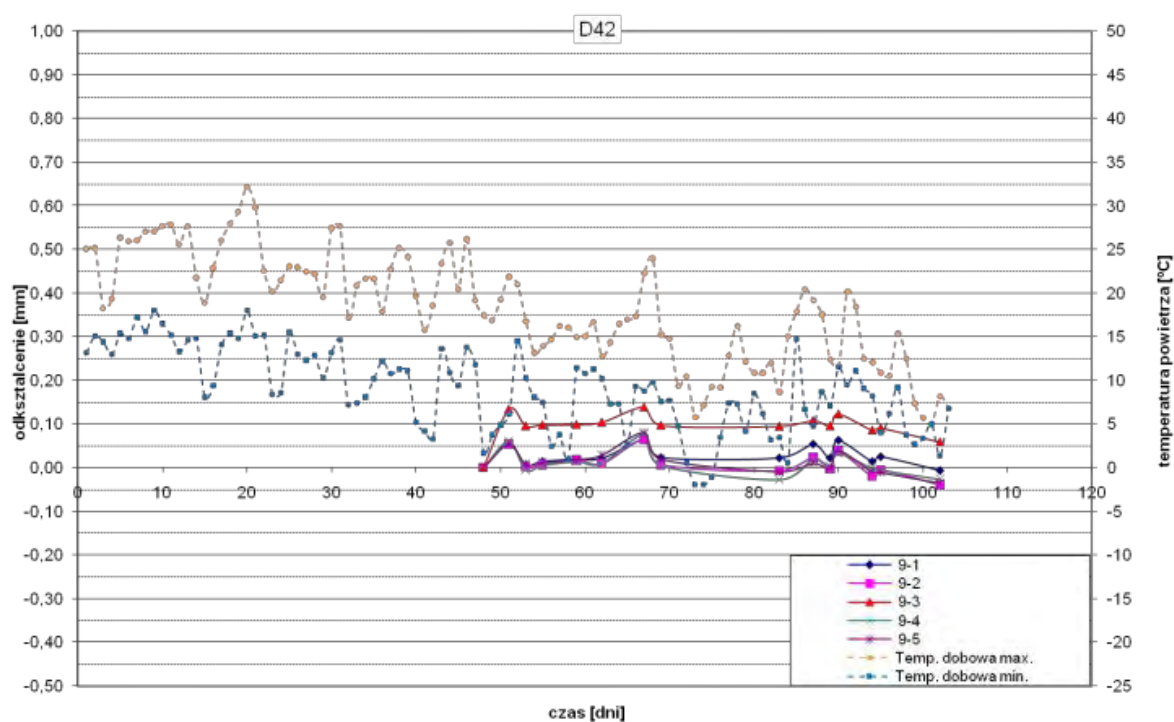
Rys. 4.3.2.4-6 Wartości odkształceń w kolumnie 6 muru D42



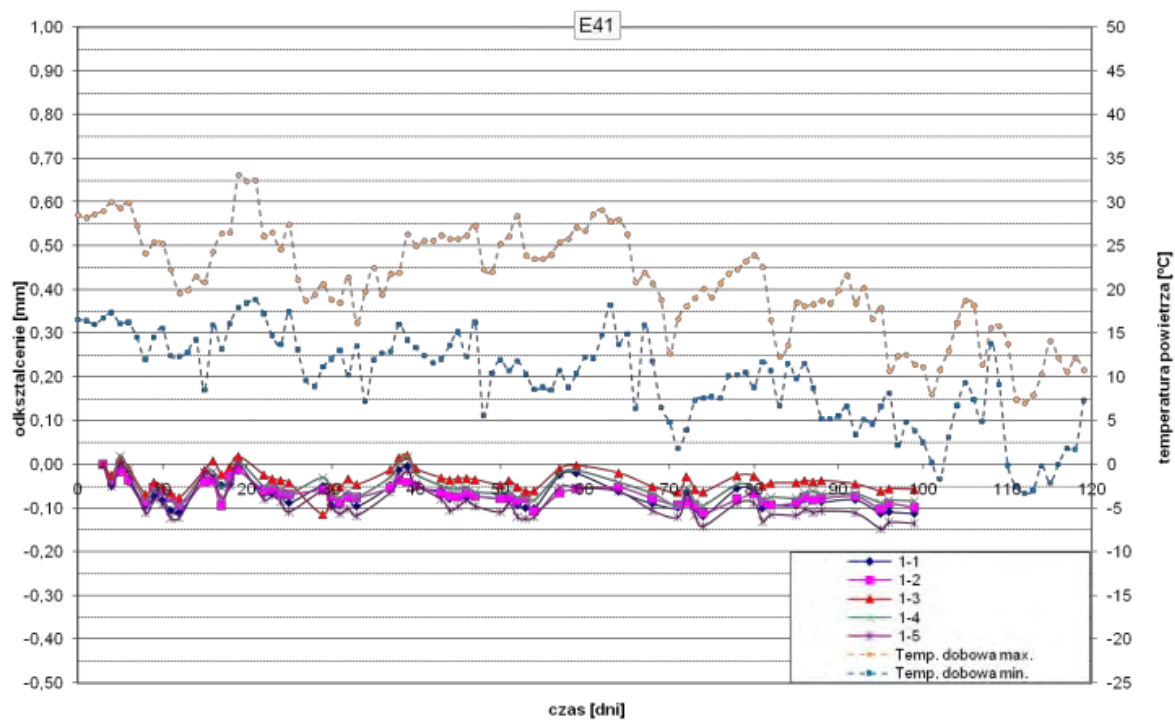
Rys. 4.3.2.4-7 Wartości odkształceń w kolumnie 7 muru D42



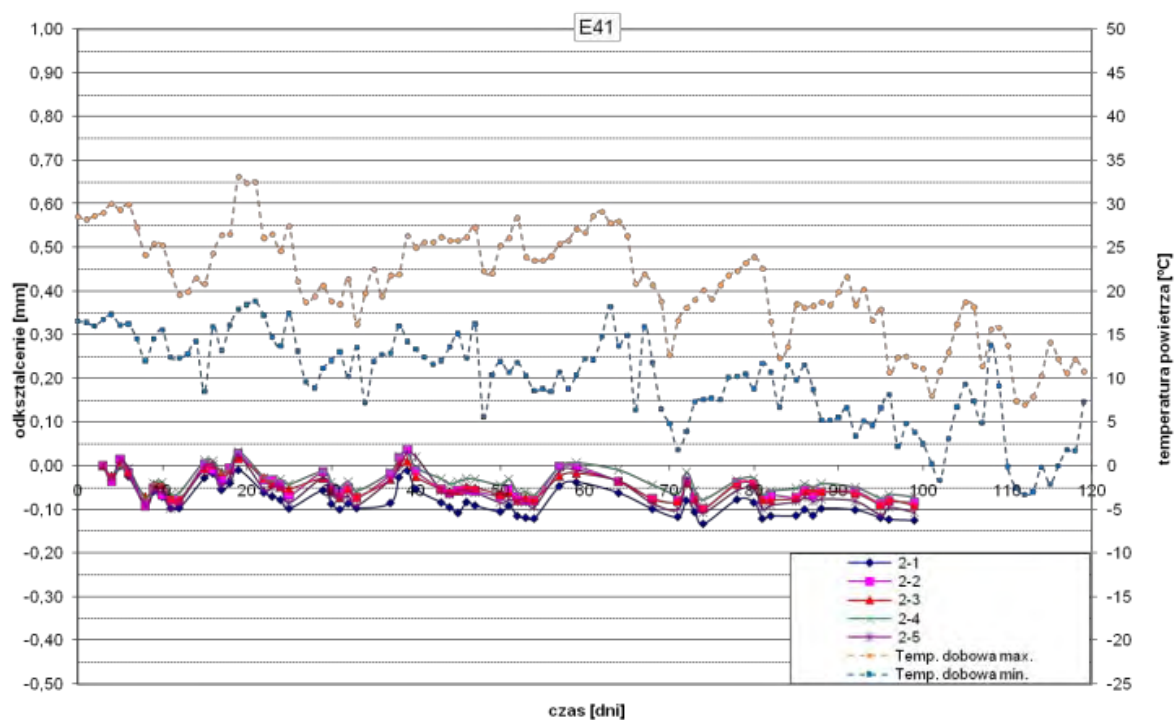
Rys. 4.3.2.4-8 Wartości odkształceń w kolumnie 8 muru D42



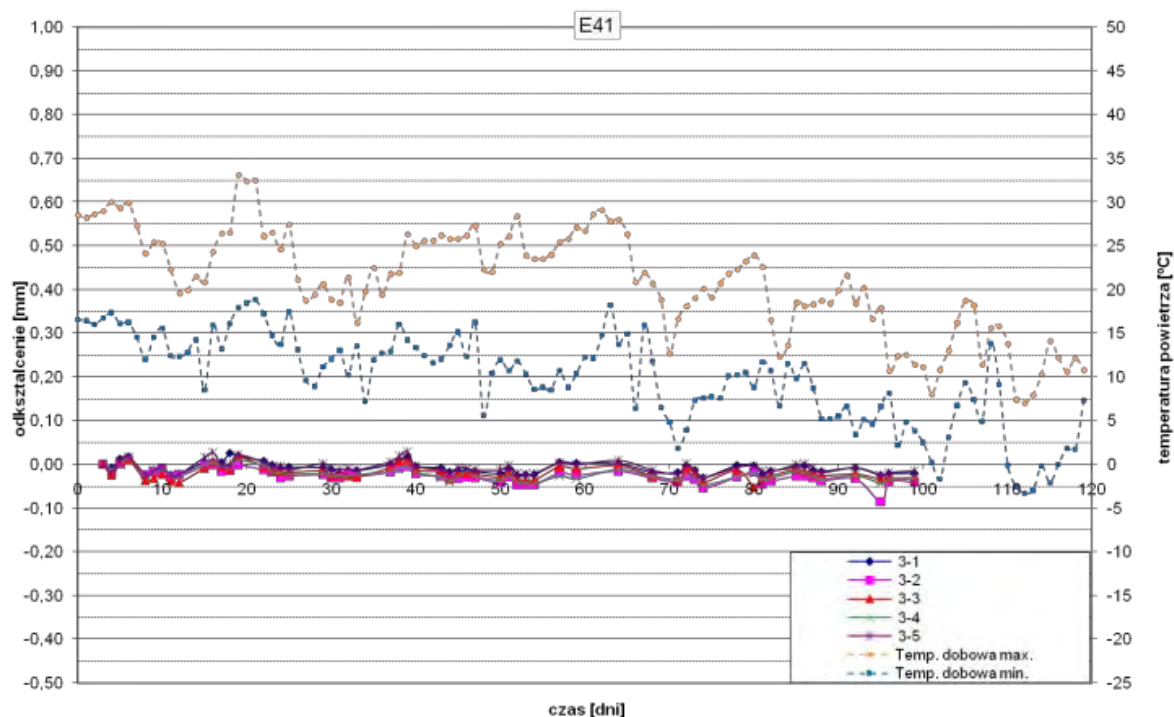
Rys. 4.3.2.4-9 Wartości odkształceń w kolumnie 9 muru D42



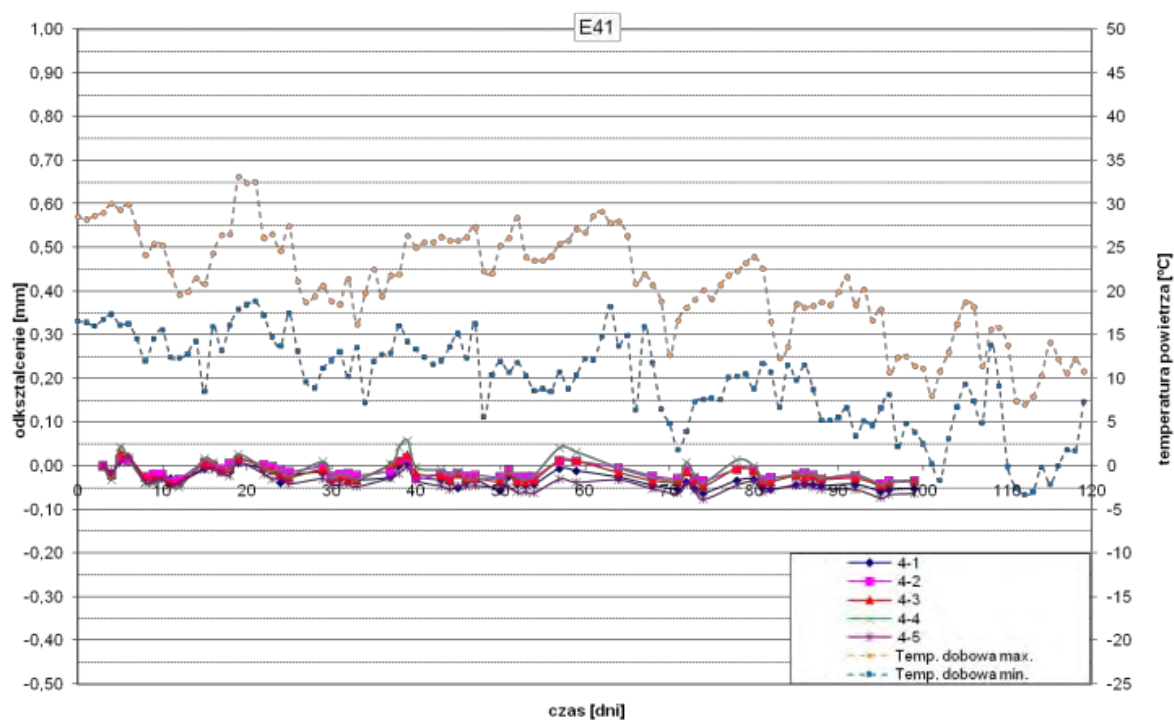
Rys. 4.3.2.4-10 Wartości odkształceń w kolumnie 1 muru E41



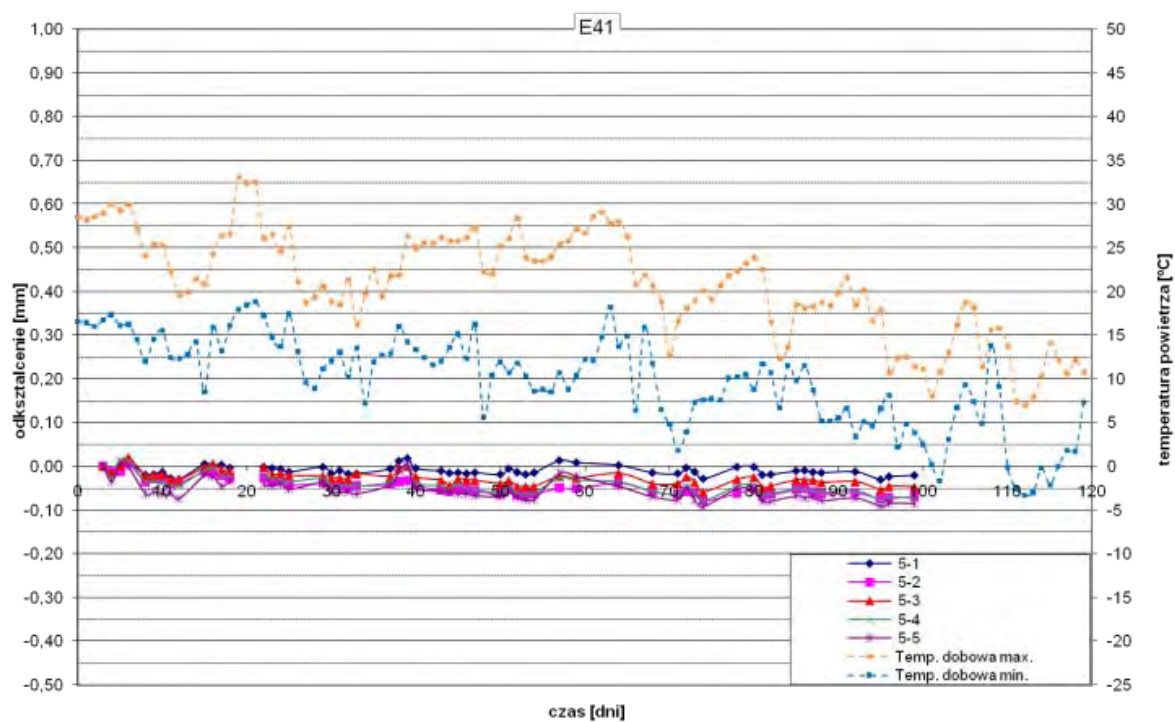
Rys. 4.3.2.4-11 Wartości odkształceń w kolumnie 2 muru E41



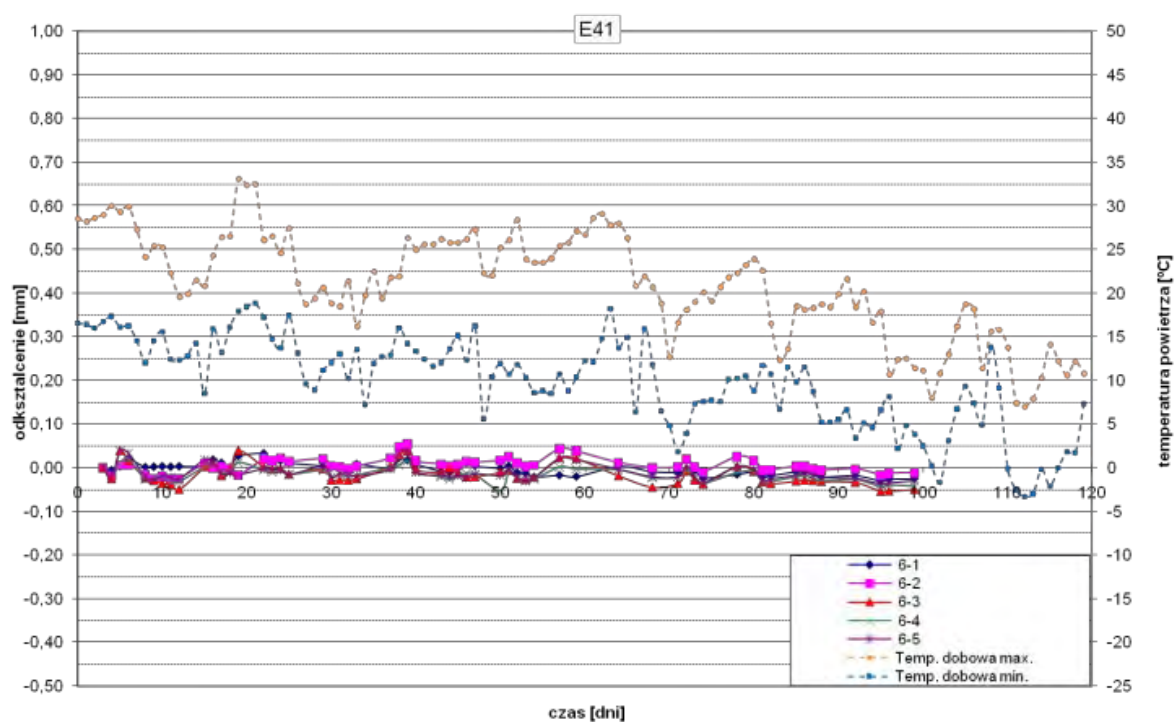
Rys. 4.3.2.4-12 Wartości odkształceń w kolumnie 3 muru E41



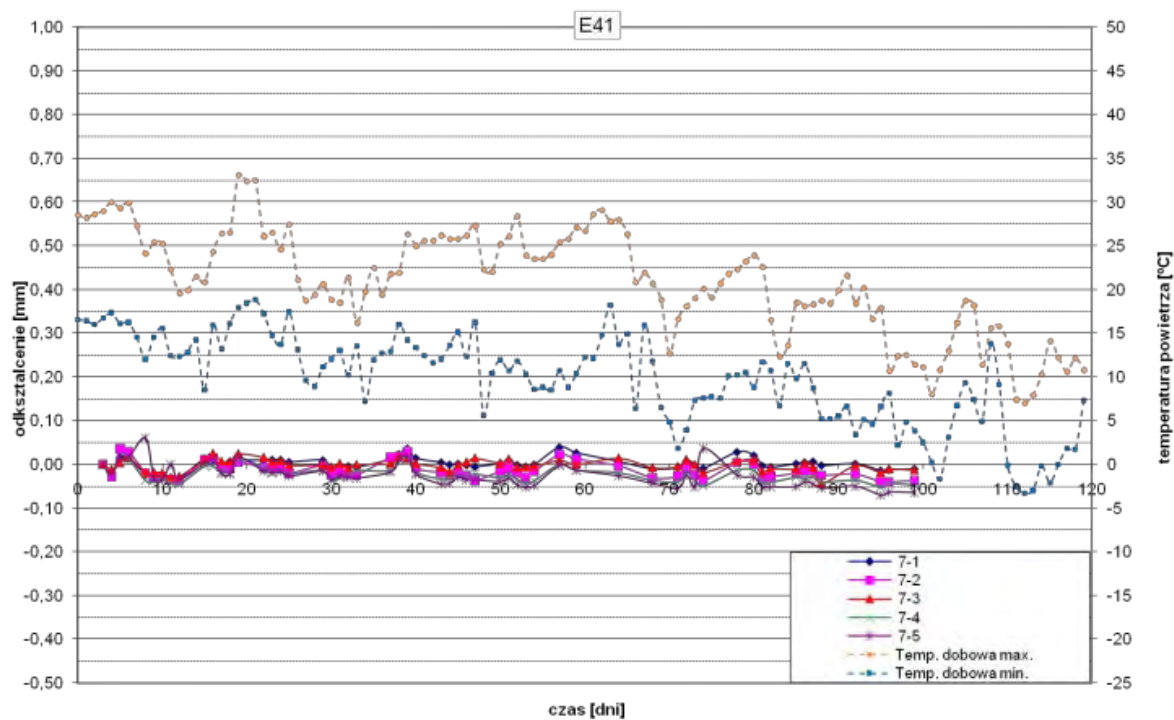
Rys. 4.3.2.4-13 Wartości odkształceń w kolumnie 4 muru E41



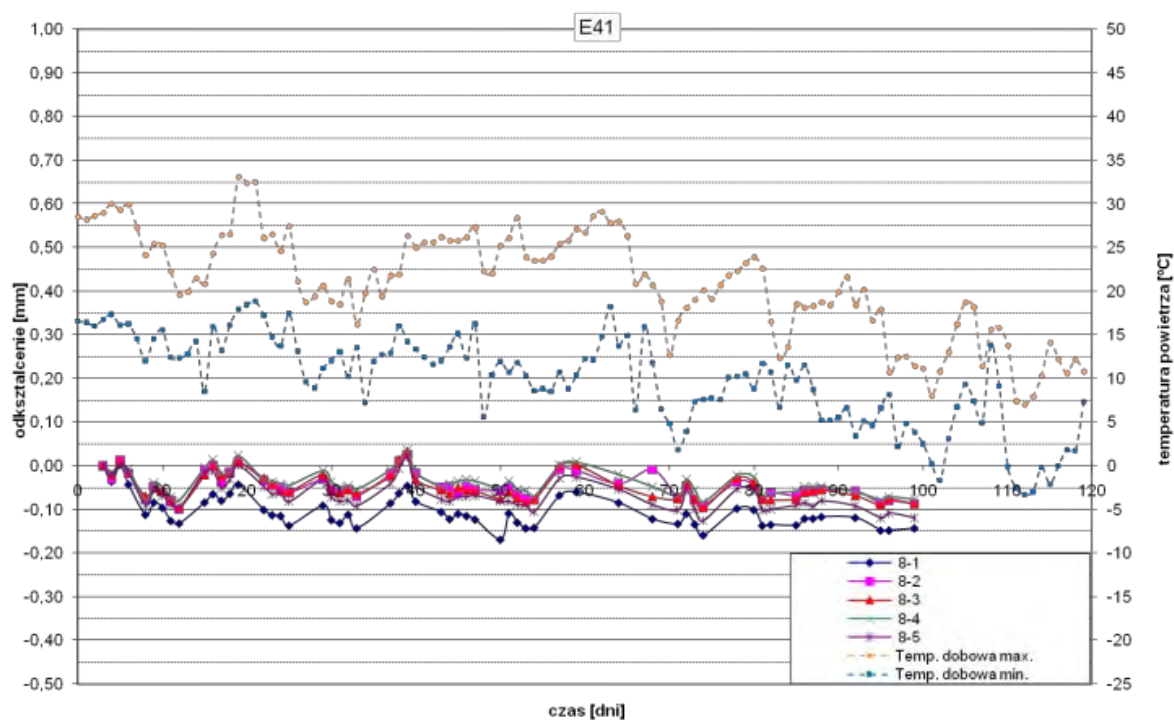
Rys. 4.3.2.4-14 Wartości odkształceń w kolumnie 5 muru E41



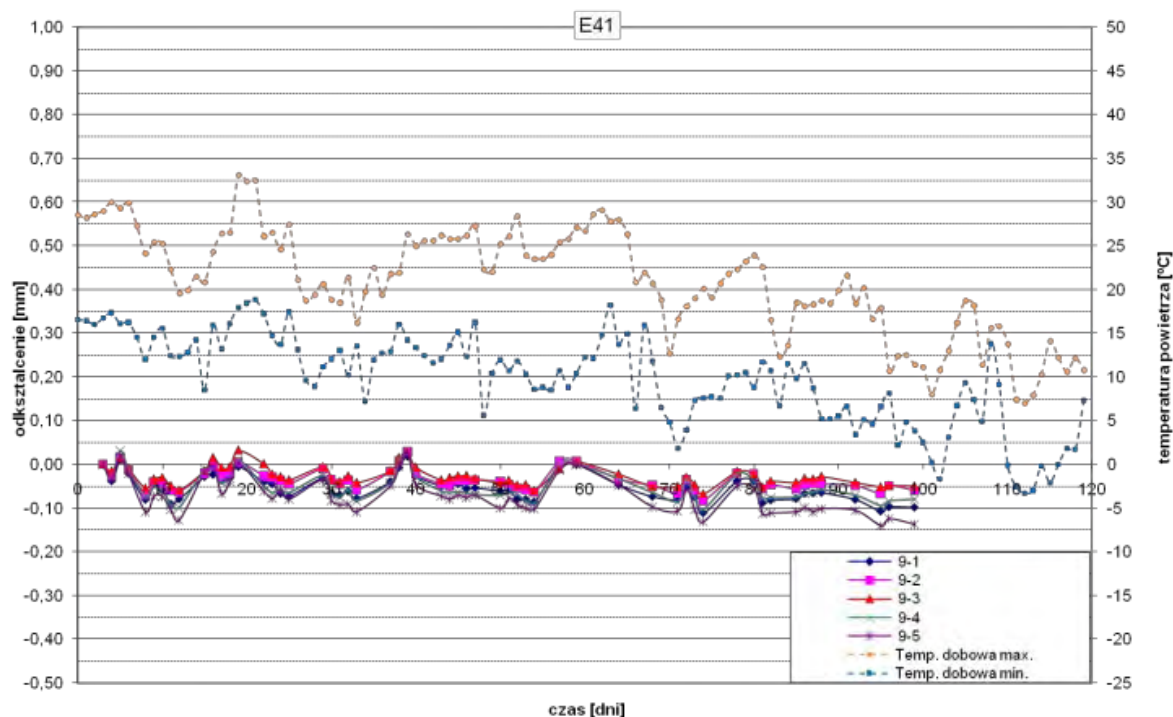
Rys. 4.3.2.4-15 Wartości odkształceń w kolumnie 6 muru E41



Rys. 4.3.2.4-16 Wartości odkształceń w kolumnie 7 muru E41



Rys. 4.3.2.4-17 Wartości odkształceń w kolumnie 8 muru E41

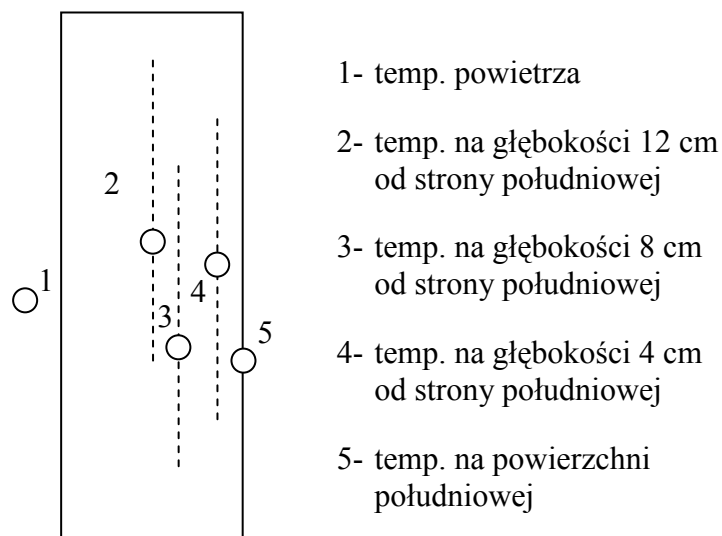


Rys. 4.3.2.4-18 Wartości odkształceń w kolumnie 9 muru E41

4.3.3. Rozkład temperatury i wilgotności wewnątrz muru

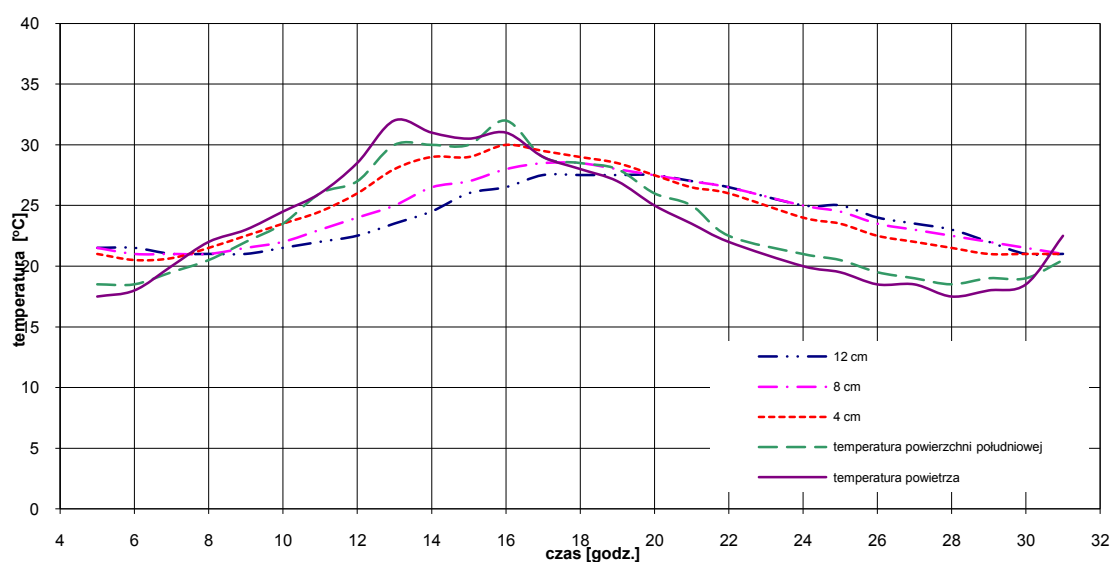
(1) Zmiany temperatury i wilgotności otoczenia mają jak wiadomo bardzo istotny wpływ na odkształcenia konstrukcji murowej, a szczególnie wznoszonej z elementów z betonu komórkowego. Dla prowadzonych badań murów nie wystarczająca jest rejestracja zmian cieplno-wilgotnościowych w ujęciu globalnym, tj. rejestrowanym dla otaczającego mury środowiska. Ważnym jest też oznaczenie wpływu temperatury zewnętrznej na rozkład temperatur wewnątrz muru. Niestety pomiar odkształceń muru z założenia możliwy był jedynie na powierzchni zewnętrznej, lecz określone zmiany rozkładu temperatur we wnętrzu muru pozwoli ocenić wpływ tego parametru na odkształcenia wewnętrzne.

(2) Na potrzeby niniejszej pracy wykonano pomiary rozkładu temperatur i wilgotności w przekroju o grubości 24 cm z autoklawizowanego betonu komórkowego gęstości ok. 500 przeprowadzono na jednym ze stanowisk badawczych. Ściana ta, zgodnie z opisem w punkcie 4.2.5, ustawiona była na wolnym powietrzu prostopadle do kierunku północ – południe. Temperaturę mierzono w stałych odstępach czasu przez ok. 24 godziny w 5 tych punktach pomiarowych umiejscowionych zgodnie z rysunkiem poniżej (Rys. 4.3.3-1).



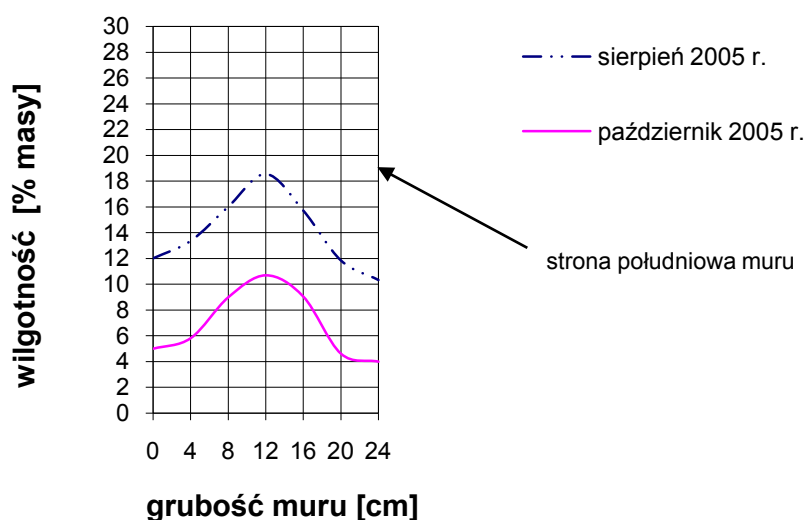
Rys. 4.3.3-1 Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych do pomiaru temp.

(2) Pomiary rozkładu temperatur były wykonywane na wysokości ok. 1,20 m od poziomu gruntu oraz ok. 30 cm od lica muru (krawędzi bocznej). Rozkład temperatur w murze badawczym odniesiono do temperatury powietrza, która oznaczana jest każdorazowo przy pomiarach odkształceń murów. Rozkład temperatur wewnątrz muru przedstawiono na rysunku 4.3.3-2.



Rys. 4.3.3-2 Rozkład temperatur wewnątrz muru w ciągu doby

(3) Rozkład wilgotności wewnątrz muru w kilku punktach przekroju oznaczono poprzez wykonanie odwiertów. Wyniki zestawiono na wykresach poniżej.



Rys. 4.3.3-3 Rozkład wilgotności wewnątrz muru w miesiącach sierpień i październik 2005 r.

4.4. Podsumowanie wyników przeprowadzonych badań

(1) Zgodnie z założonym programem badań własnych wykonano i poddano głównie obserwacjom oraz pomiarom tensometrycznym 16 murów badawczych w skali naturalnej (1:1). Przeprowadzono łącznie około 10 000 pomiarów odkształceń murów (poprzez pomiar ustalonej siatki reperów badawczych) z dokładnością pomiaru 0,001 mm.

(2) Przebadano pod względem cech fizyko-technicznych elementy składowe murów, beton komórkowy i zaprawę.

- Zbadano trzy rodzaje autoklawizowanego betonu komórkowego stosowanego w badaniach poligonowych murów, gdzie oznaczono takie cechy jak:
 - skurczu przy wysychaniu (54 próbki),
 - gęstości (ok. 1000 próbek),
 - wilgotność (ok. 1000 próbek),
 - wytrzymałości na ściskanie (ok. 162 próbki),
 - modułu sprężystości (ok. 840 próbek dla różnych wilgotn. ABK),
 - wytrzymałość na rozciąganie (ok. 162 próbki),
- Zbadano dwa rodzaje zaprawy murowej stosowanej do łączenia elementów murowych w badaniach poligonowych, gdzie oznaczono takie cechy jak:
 - gęstości (6 próbek),

- wytrzymałości na zginanie (6 próbek),
- wytrzymałości na ściskanie (6 próbek).

Sformułowano na podstawie przeprowadzonych badań następujące wnioski.

(3) Mury przy wilgotności wmurowania około 10 % masy elementów betonu komórkowego rysowały się w zakresie rozwarcia rys do 0,2 mm, co można uznać za dopuszczalne w znaczeniu użytkowości konstrukcji.

(4) Mury wykonane z betonu komórkowego na kruszywie popiołowym mają większą tendencję do powstawania zarysowań, a szerokość rozwarcia powstałych pęknięć jest zdecydowanie większa niż dla murów wykonanych z betonu na kruszywie piaskowym.

(5) W murach wykonanych z autoklawizowanego betonu komórkowego na kruszywie piaskowym technologii Unipol zarysowania nie przekroczyły szerokości rozwarcia równej 0,6 mm, natomiast w przypadku zaprawy ciepłochronnej maksymalna szerokość rozwarcia rysy wyniosła ok. 0,3 mm dla wilgotności autoklawizacyjnej muru.

(6) Dla wszystkich czterech grup murów badawczych przy zawilgoceniu maksymalnym, tj. poautoklawizacyjnym (mury D11, D12, E11, E12) i 30 % masy (mury F21, F22, E21, E22) schematy zarysowań wraz z ustaloną w pomiarach tensometrycznych szerokością rozwarcia rys, powtórzyły się. Widoczne jest to przy porównaniu murów E11 i E21.

(7) Schemat zarysowania, a w tym przebieg rysy przechodzącej jedynie w spoinach (zarówno pionowych jak i wspornych) odnotowany był dla murów z betonu komórkowego na spoiwie popiołowym łączonych zaprawą klejową przy zawilgoceniu betonu wmurowywanego na poziomie maksymalnym (mury E11 i E21).

(8) W murach łączonych zaprawą ciepłochronną ilość zarysowań oraz wielkość rozwarcia rys jest w porównaniu z zaprawą do cienkich spoin jest mniejsza.

(9) W murach przy wilgotności wmurowania powyżej 10 % masy oprócz dwóch przypadków (mury E11 i E21), zarysowania powstają głównie w linii prostopadłej do spoin wspornych przechodząc naprzemiennie spoina-bloczek-spoina, co świadczyć może o niskiej wytrzymałości na rozciąganie elementów murowych oraz typowym rozciąganiu jednoosiowym w kierunku równoległym do spoin wspornych.

5. Dyskusja uzyskanych wyników badań

(1) Podstawowym warunkiem dla każdej konstrukcji technicznej jest zapewnienie jej dostatecznej wytrzymałości. Najpewniejszym sposobem sprawdzenia wytrzymałości jest wyznaczenie jej doświadczalnie. Poszukiwanie jednak w każdym oddzielnym przypadku najwłaściwszego pod względem wytrzymałościowym rozwiązania wyłącznie na drodze eksperymentowania byłoby długotrwałe i kosztowne. Dlatego, wykorzystując dostępną wiedzę na temat zarysowań w konstrukcjach murowych, podjęto próbę określenia nośności konstrukcji (murów badawczych) na jednoosiowe rozciąganie posiłkując się danymi charakteryzującymi właściwości materiału, z którego wykonano mury badawcze.

(2) Ocena nośności muru z uwagi na jego niejednorodność musi być wykonywana z uwzględnieniem decydującego mechanizmu zniszczenia. Analizowany w niniejszej rozprawie model zarysowania muru z autoklawizowanego betonu komórkowego oraz jego mechanizm zniszczenia w wyniku odkształceń w kierunku równoległym do spoin wspornych jednoznacznie wskazuje na powstające w ustroju poziomego naprężenia rozciągające.

(3) Przy oznaczaniu wytrzymałości na rozciąganie przy osiowym działaniu siły zastosowanie ma znana z wcześniejszych rozważań zależność wytrzymałości od rzeczywistego mechanizmu zniszczenia. Przykładowo dla przyjętego w rozprawie modelu jeśli obciążenie działa w kierunku równoległym do spoin wspornych, to przyjmując ogólnie, zniszczenie możliwe jest tylko w postaci rysy biegnącej w kierunku prostopadłym do tej spoiny. Należy tu jednak zaznaczyć, iż pojawiają się dwa schematy zniszczenia, w jednym rysa przebiega przez element murowy, w drugim natomiast przez spoinę przewiazaną bez zniszczenia elementu murowego. Jak wiadomo, w praktyce obciążenie zawsze przyłożone jest z pewnym niezależnym mimośrodem, który powoduje wystąpienie złożonego stanu naprężenia.

(4) Wyżej wymienione zjawiska potwierdzone zostały w przeprowadzonych badaniach murów w warunkach poligonowych. Zgodnie z przedstawionymi na kolejnych schematach obrazujących położenie, przebieg i rozwarcie rys w murze badawczym (rysunki rozdziału 4.3.1 niniejszej pracy), widoczne jest, że mury rysują się w linii pionowej, tj. prostopadłej do kierunku spoin wspornych. Zarysowania przebiegają naprzemiennie spoina pionowa i element murowy (np. 4.3.1.1-1 i 4.3.1.1-2) lub jedynie wzdłuż spoin (co nastąpiło jedynie w dwóch przypadkach dla murów E11 i E21 – odpowiednio rysunki 4.3.1.1-3 i 4.3.1.2-3).

(5) Przy próbie sformułowania opisu matematycznego zjawiska zarysowania w murach z autoklawizowanego betonu komórkowego, w wyniku powstających jednoosiowych naprężeń rozciągających w kierunku równoległym do kierunku spoin wspornych należy pamiętać, iż najbardziej charakterystycznymi cechami betonu komórkowego są jego niska gęstość (beton lekki) oraz z tym związana porowatość. W zależności od gęstości zmieniają się inne właściwości autoklawizowanego betonu komórkowego, takie jak: wytrzymałość, przewodność cieplna, mrozoodporność, nasiąkliwość, izolacyjność akustyczna. Natomiast znaczący wpływ na poziom poszczególnych parametrów betonu ma jego zawilgocenie oraz kierunek wyrostu masy podczas jego produkcji. Należy również zwrócić uwagę na fakt, iż wartość skurczu dla elementów z kruszywa popiołowego jest większa, co znalazło też potwierdzenie zarówno w badaniach materiałowych jak i badaniach bezpośrednio na murach w warunkach poligonowych. Właściwość ta jest zjawiskiem naturalnym, wynikającym z właściwości popiołów lotnych. Charakterystyka ta będzie miała odniesienie w dalszych rozważaniach na temat zarysowań murów z tego materiału.

(6) Na podstawie analizy obecnego stanu wiedzy oraz doświadczeń badaczy takich jak Mann, Müller, Schubert, Lewicki czy Kubica stwierdzono, że przy próbie opisu złożonych zjawisk w konstrukcjach murowych dobre wyniki mogą dawać czasami próby formułowania prostych kryteriów wytrzymałościowych i modeli zniszczenia. Przyjmując ten tok rozumowania wprowadzone do programu badań analizy rozważanego zjawiska oraz podstawowe założenia, znalazły potwierdzenie w wynikach badań wytrzymałości murów na rozciąganie w warunkach poligonowych.

- W badanym murze w wyniku zmian temperaturowo-wilgotnościowych zachodzących głównie z autoklawizowanym betonem komórkowym przy jego utwierdzeniu na końcach (zgodnie z rys. 4.2.5-1) powstają naprężenia wyłącznie rozciągające równoległe do kierunku spoin wspornych. Założenie to potwierdzić może rzeczywisty mechanizm zniszczenia znany z wcześniejszych rozważań (rozdz. 3.4 (3)).
- Analizując stan naprężeń i odkształceń w murze badawczym poddawanych zmianom wilgotności i temperatury potwierdziło się, że siły zewnętrzne, działające na badany mur, wynikające z obciążenia w kierunku pionowym, są znikomo małe, natomiast głównym obciążeniem dla rozpatrywanej konstrukcji jest rozciągające w kierunku równoległym do spoin wspornych.

(7) Odkształcalność zaprawy i elementu murowego jak wiadomo z analizy literaturowej jest różna, co dość dobrze tłumaczy nieco odmienny mechanizm zniszczenia i charakter zarysowań w murze od występującego w kruchych jednorodnych materiałach izotropowych. Do analizy oraz próby opisu matematycznego otrzymanych w niniejszej rozprawie wyników badań zarysowań i odkształceń murów przyjęto dwa niezależne modele przedstawiające charakter pracy ustroju. Pierwszy to mur jako konstrukcja anizotropowa, natomiast drugi przy założeniu muru jako konstrukcji izotropowej (monolitycznej) podlegającej prawu proporcjonalności Hooke’a.

(8) Przy założeniu struktury muru jako materiału anizotropowego, celowe jest dokonanie analizy naprężeń rozciągających powstających w obserwowanych murach, na podstawie wzorów przedstawionych m.in. przez Schuberta i Weschego (opis rozważanych przypadków zniszczenia muru przy rozciąganiu został przedstawiony w rozdziale 3.4 (p. (5),(6) niniejszej rozprawy).

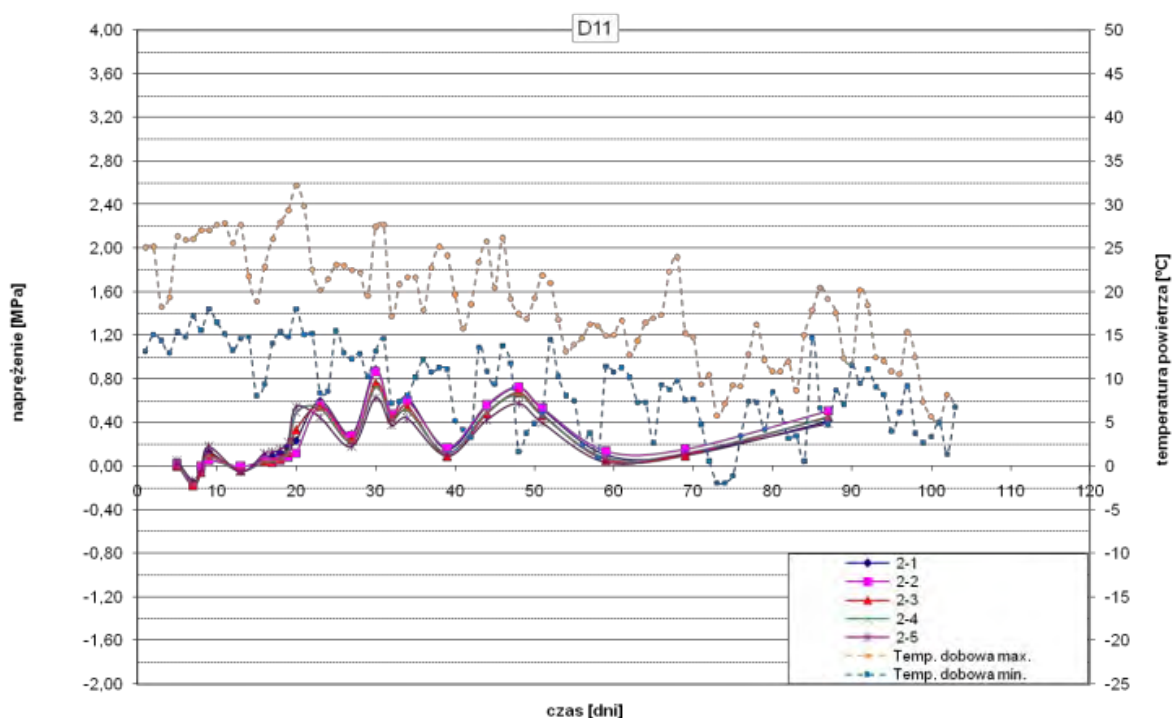
5.1. Opis matematyczny zjawiska

Prawo proporcjonalności Hooke’a

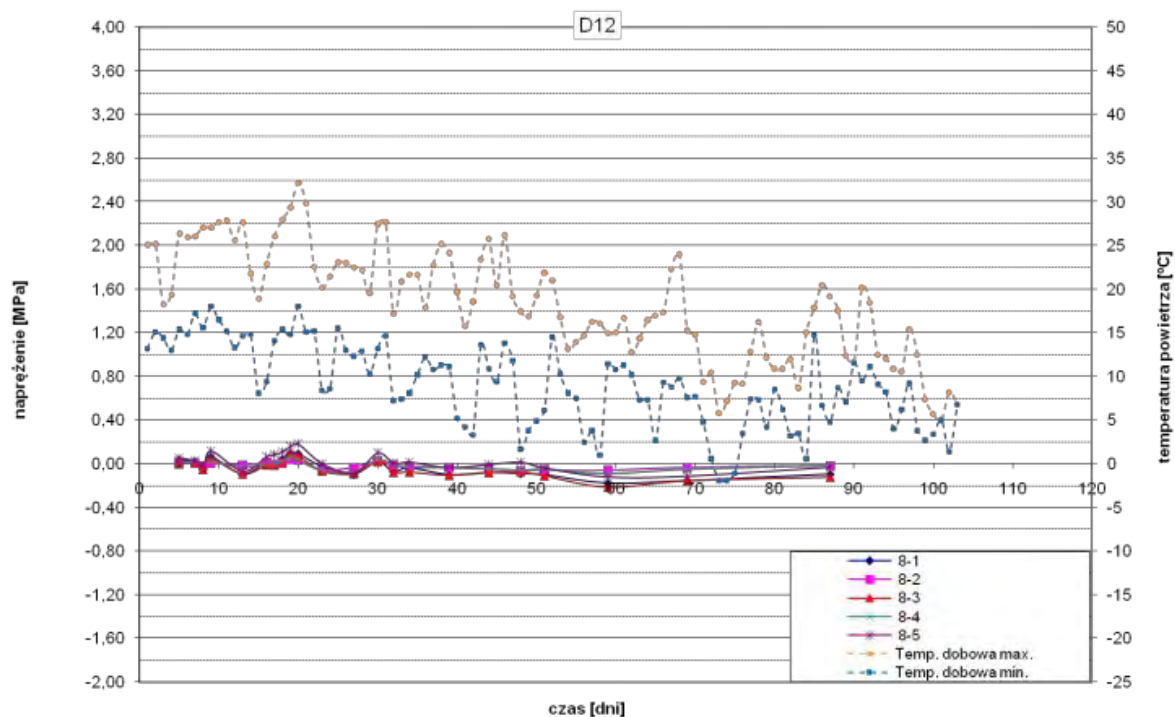
(1) Przyjmując pewne uproszczenia (mur jako ustrój izotropowy) przy podjęciu próby wyznaczenia naprężeń powstających w murze jak już wcześniej wykazano możliwe jest zastosowanie prawa proporcjonalności Hooke’a. Zależność naprężenia, odkształcenia i modułu sprężystości wyrażona wzorem $\sigma = \varepsilon \cdot E$ (wzór 4.2.4-2), pozwala na wyznaczenie naprężeń występujących w murze. Na podstawie inwentaryzacji poszczególnych odcinków pomiarowych siatki reperków określono odkształcenie ε (załącznik 2 w jednostkach m/m), a moduł sprężystości E dla betonu komórkowego wyznaczono doświadczalnie (Tablica 4.2.2.3-1). Następnie na podstawie powyższej zależności wyliczono teoretyczne naprężenia powstające w murze, które to wyliczenia w postaci wykresów przedstawiono w załączniku 3 do niniejszej pracy.

(2) Do analizy przykładowo wybranych murów wytypowano mury wykonane z elementów murowych o zawilgoceniu poautoklawizacyjnym, tj. D11 (kolumna pomiarowa 2), D12 (kolumna pomiarowa 8), E11 (kolumna pomiarowa 4, 5 i 6) i E12 (kolumna pomiarowa 2). We wszystkich rozważanych tutaj kolumnach zarejestrowano znaczne odkształcenia w odcinkach pomiarowych prowadzących do zarysowania. Analizowane mury badawcze wykonano z ele-

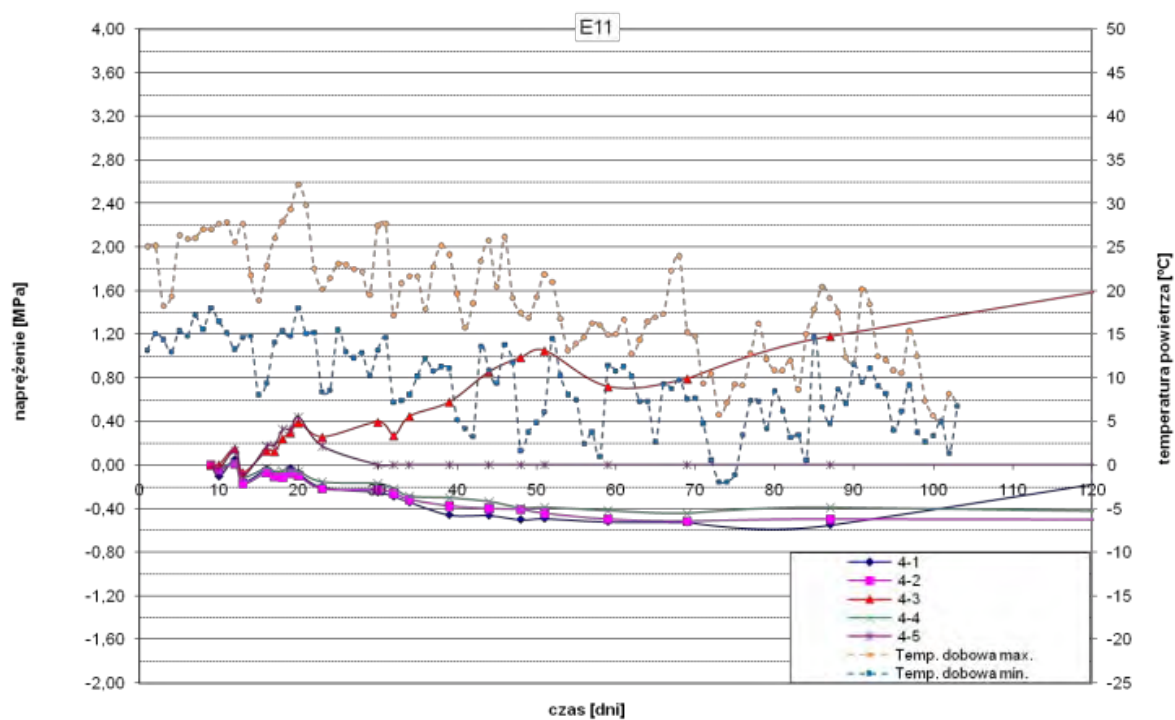
mentów o tej samej wilgotności (wilgotności poautoklawizacyjnej) i przez tego samego producenta w serii po dwa, tj. producent D i E. Różnią się natomiast rodzajem stosowanej dołączenia zaprawy. Opisując schemat powstałych zarysowań w murze zauważamy, że jedynie w murze E11 powstało w środkowej strefie muru pęknięcie przebiegające po długości spoin odpowiednio w kolumnie 4, 5 i 6, natomiast w murach D11, D12 i E12 widoczne jest na całej wysokości muru w odpowiedniej kolumnie pomiarowej wyraźne pęknięcie.



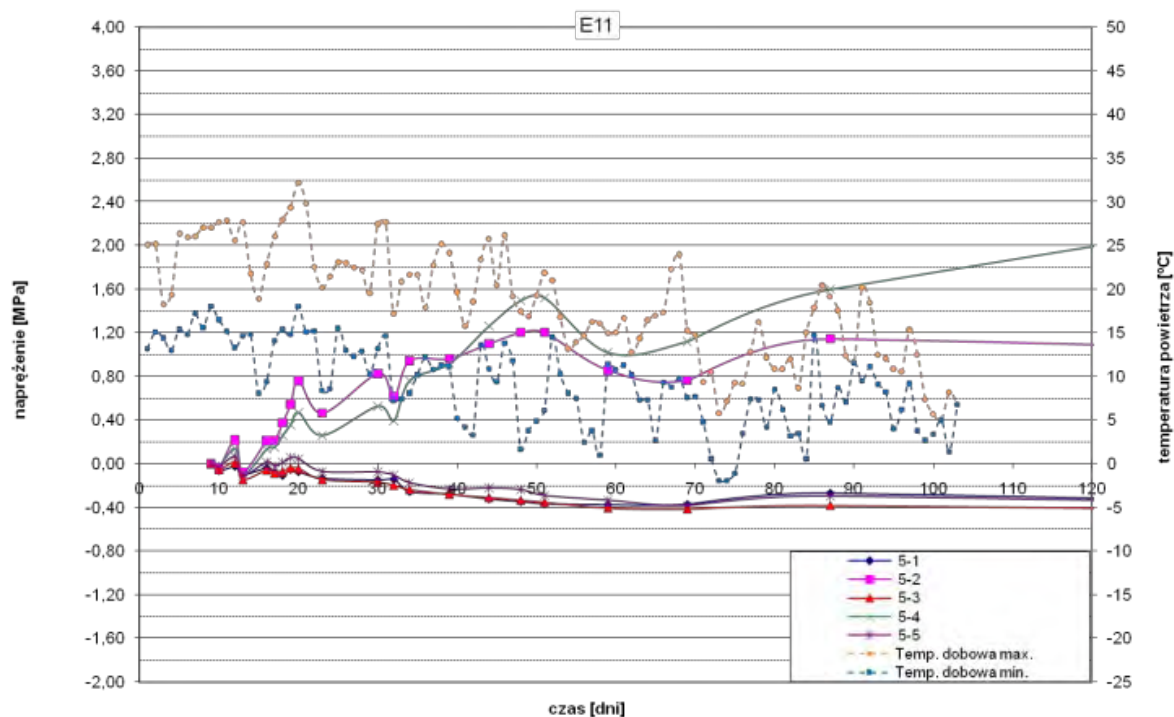
Rys. 5.1-1 Wartości naprężeń w kolumnie 2 muru D11



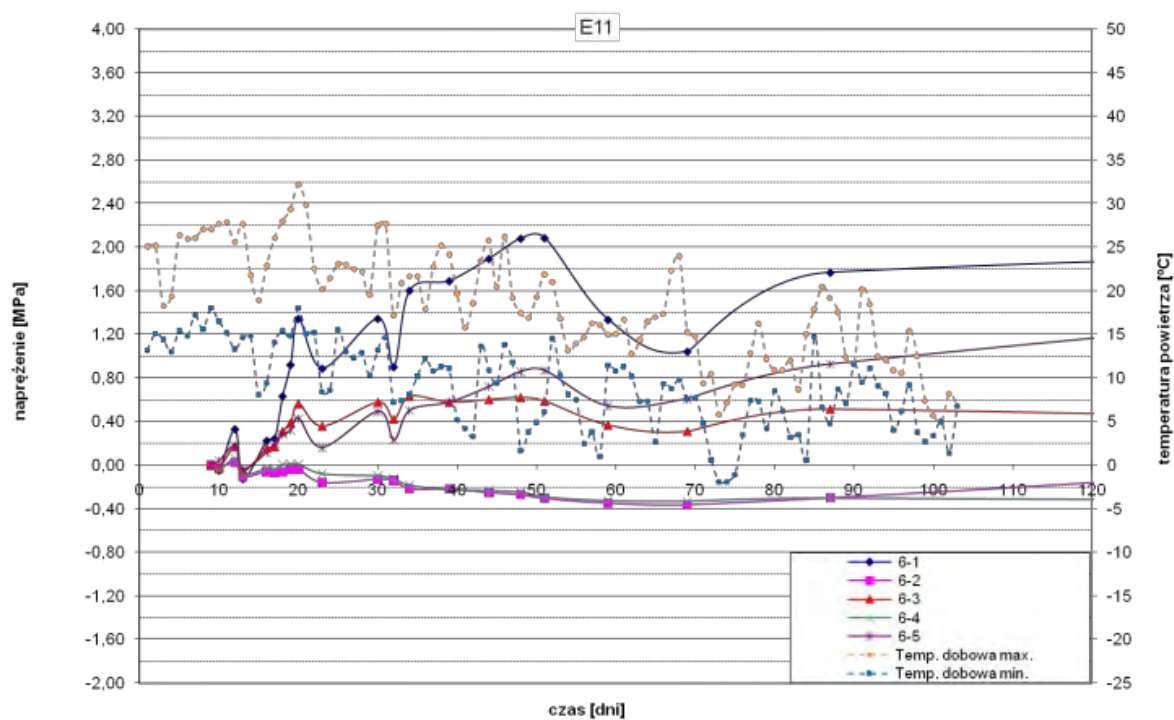
Rys. 5.1-2 Wartości naprężeń w kolumnie 8 muru D12



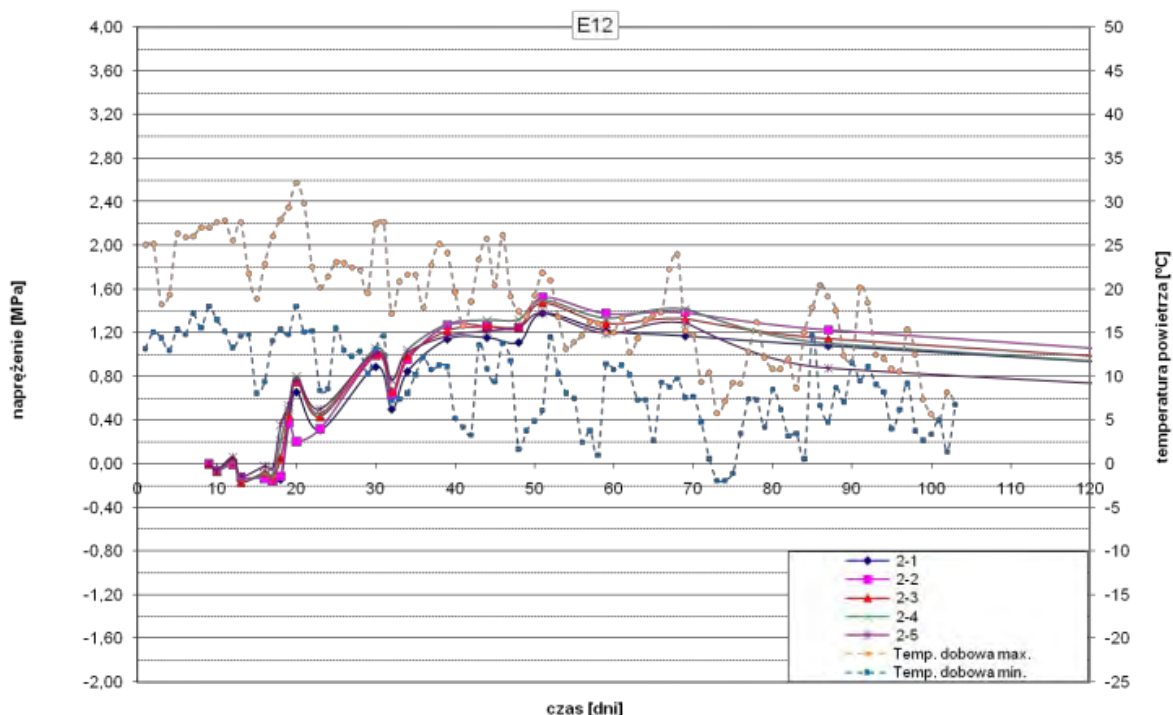
Rys. 5.1-3 Wartości naprężeń w kolumnie 4 muru E11



Rys. 5.1-4 Wartości naprężeń w kolumnie 5 muru E11



Rys. 5.1-5 Wartości naprężeń w kolumnie 6 muru E11



Rys. 5.1-6 Wartości naprężeń w kolumnie 2 muru E12

(3) Porównując rysunki przedstawione powyżej rysunki (Rys. od 5.1-1 do 5.1-6) za wyjątkiem muru D12 można zauważyć, że poziom naprężeń wyznaczonych zgodnie z prawem proporcjonalności Hooke'a kształtuje się na poziomie wytrzymałości na rozciąganie betonu komórkowego. Przykładowo w tej samej (tj. drugiej od lewej strony) kolumnie pomiarowej siatki reperów murów D11 (Rys. 5.1-1) i E12 (Rys. 5.1-1) odkształcenia przyjmują podobny charakter. Widoczne jest, iż okolicach 32 dnia pomiarowego w murze E12 powstało zarysowanie na całej wysokości przechodzące w pęknięcie. Natomiast w murze D11 mimo dużych odkształceń żadne zarysowanie bloczka nie powstało w tym przedziale czasowym, co wyjaśnić może fakt, że naprężenie rozłożyło się w kolejnych dniach na siatkę zarysowań w spoinach środkowej strefy. Na podstawie otrzymanych odkształceń ε , przy określonym module sprężystości $E=1217 \text{ MPa}$ (wartość przyjęta na podstawie przeprowadzonych badań materiału dla producenta E) oraz $E=1289 \text{ MPa}$, wyznaczono wartość naprężeń w murze. Otrzymane wyniki przedstawiono na powyższych wykresach.

(4) Znając wyznaczoną doświadczalnie wytrzymałość betonu komórkowego na rozciąganie równą $R_r=1,3 \text{ MPa}$ dla producenta E można stwierdzić, że zarysowanie powstałe na całej wysokości muru E12 zostało spowodowane przekroczeniem w okolicach 32 dnia pomiarowe-

go naprężeń rozciągających osiągających wartość rzędu $1,4 \text{ MPa} > 1,3 \text{ MPa}$. W kolumnie drugiej muru D11, za wyjątkiem naprężenia w górnym odcinku pomiarowym (2-2), w którym naprężenie osiągnęło wartość $0,9 \text{ MPa}$ (w spoinie pionowej przechodzącej przez ten odcinek pomiarowy powstała rysa), naprężenia nie przekroczyły wartości granicznej tj. wytrzymałości na rozciąganie równej $0,9 \text{ MPa}$, a co za tym idzie nie powstało w tym okresie czasu zarysowanie o charakterze podobnym jak w murze E12.

Opis matematyczny wyznaczenia wytrzymałości muru na rozciąganie jednoosiowe według Schuberta i Weschego

(5) Na podstawie analizy literaturowej oraz przeprowadzonych zgodnie z programem niniejszej pracy badań uznano, że dobrym opisem matematycznym dla dwóch przypadków zniszczenia muru przy jednoosiowym rozciąganiu w kierunku równoległym do spoiny wspornej obserwowanych w murach badawczych i w otrzymanych wynikach badań jest zaproponowany w pracach Manna [97], Schuberta i Weschego [98, 99, 100], Backes'a [101] model, który znalazł odbicie m.in. w niemieckich przepisach normowych [102]. Model ten wyróżnia dwa schematy zarysowania, tj. przebiegającego przez element murowy oraz przebiegającego przez spoiny. Proponowany tutaj opis matematyczny z uwagi na mechanizm zarysowania ma zastosowanie do zjawisk rozpatrywanych w niniejszej rozprawie.

(6) Na podstawie wyznaczonych na drodze prac badawczych parametrów fizyko-technicznych betonu komórkowego i zastosowanej do łączenia w murze zaprawy oraz korzystając z wyprowadzonych w punkcie (5) rozdziału 3.4 zależności (wzory 3.4-6 i 3.4-7) podjęto próbę ustalenia na drodze wyliczeń matematycznych wartości wytrzymałości badanego muru na jednoosiowe rozciąganie w kierunku równoległym do linii spoin wspornych.

Rozważania przeprowadzono dla muru D11.

$$f_t = 0,5 \cdot f_{tc} \cdot \frac{1}{1 + \frac{t_m}{h_u}} = 0,5 \cdot 0,9 \text{ MPa} \cdot \frac{1}{1 + \frac{2 \text{ mm}}{240 \text{ mm}}} = 0,45 \text{ MPa}$$

gdzie:

- f_{tc} - wytrzymałość elementów murowych na rozciąganie,
- t_m - grubość spoiny,

h_u - wysokość elementu murowego,

$$f_t = f_{vo} \cdot \frac{u_j}{h_u + t_m} = 0,3MPa \cdot \frac{295mm}{240mm + 2mm} = 0,36MPa$$

gdzie:

u_j - wzajemne przesunięcie elementów murowych w murze,

f_{vo} - wytrzymałość na ścinanie pomiędzy elementem murowym a zaprawą.

(7) Jak wynika z wyliczeń przeprowadzonych w punkcie (6) proponowane przez Schuberta i Weschego wzory są jak najbardziej właściwe i znajdują potwierdzenie w przeprowadzonych w niniejszej pracy badaniach. Wyznaczone tutaj wartości wprawdzie zaniżają wielkość wytrzymałości muru na rozciąganie, ale zapewniają tym samym nie powstawanie zarysowań w konstrukcji.

6. Podsumowanie

(1) Autoklawizowany beton komórkowy jest wyrobem budowlanym bardzo dobrze wpisującym się w zrównoważone budownictwo, spełniającym wyższe normy środowiskowe, proces jego wytwarzania jest przyjazny dla środowiska naturalnego, o niskim zużyciu energii i surowców. Został on stworzony w odpowiedzi na grożącą całkowitą zagładę lasów w Skandynawii przez ich dalsze wycinanie, jako ciepły materiał dla budownictwa o właściwościach zbliżonych do drewna. W Polsce jest on obecnie najpopularniejszym materiałem budowlanym stosowanym do wznoszenia ścian.

(2) Temat o niekorzystnych zjawiskach zarysowań w konstrukcjach murowych z betonu komórkowego z uwagi na odkształcenia fizyko-chemiczne (skurcz i pęcznienie) zaczął się pojawiać coraz częściej, zarówno ze strony producentów jak i inwestorów. Jak wykazały kontakty z różnymi zagranicznymi ośrodkami badawczymi, zajmującymi się tą tematyką, problemy odkształceń (skurczu i pęcznienia) muru występują również i w innych krajach.

(3) W związku z powyższy zasadnym stało się podjęcie próby wyjaśnienia zagadnień pozwalających zapobieganiu w praktyce niekorzystnym zjawiskom zarysowania murów wznoszonych z tego materiału. W tezach pracy podjęto następujące założenia:

- Powstawanie w ścianach z autoklawizowanego betonu komórkowego rys o charakterze skurczowym związane jest bardzo znacząco z wilgotnością wmurowywanego materiału.
- Istnieje wyższe prawdopodobieństwo powstania rys w ścianach z betonu komórkowego łączonego zaprawą do cienkich spoin, której wytrzymałość na ściskanie kilkakrotnie przewyższa wytrzymałość łączonego betonu komórkowego.
- Istnieje możliwość takiego kształtowania cech mechanicznych muru z autoklawizowanego betonu komórkowego, aby zarysowania o charakterze skurczowym nie powstały.

(4) Odpowiedzią na postawione tezy była realizacja zaproponowanego programu naukowo-badawczego, dla którego ustalono dwa główne nurty działania. Pierwszy to przeprowadzenie analizy dostępnej w tym zakresie literatury pod kątem próby sformułowania opisu matematycznego charakteryzującego obserwowane zjawisko zarysowań. Drugi to wykonanie oraz obserwacja i pomiary odkształceń 16 murów badawczych, poddawanych jednoosiowemu rozciąganiu, zróżnicowanych pod względem rodzaju elementu murowego, zaprawy do jego łączenia oraz zmiennych parametrów fizyko-technicznych powyższych tych składowych muru. Ponadto dokonano szeregu badań właściwości materiałowych zarówno betonu komórkowego jak i zapraw stosowanych do jego łączenia. Całość programu badawczego zwieńczono konfrontacją obecnego stanu wiedzy, zaproponowanego opisu matematycznego zjawiska z otrzymanymi wynikami badań własnych, co pozwoliło na potwierdzenie słuszności sformułowanych w rozprawie tez.

(5) Mając świadomość dość małej próbki, jak na zaplanowany zakres tematyki pracy badawczej (16 murów w skali naturalnej) oraz faktu prowadzenia badań w warunkach poligonowych, które dostarczają wyników równie przypadkowych zależnych od warunków atmosferycznych (z jednej strony brak możliwości uzyskania powtarzalności badania, natomiast z drugiej – możliwość oceny pracy ustroju murowego w jego środowisku zbliżonym do naturalnego), w zestawieniu z dostępną literaturą przedmiotu ustalono, przedstawione w punkcie 7 niniejszej rozprawy, wnioski techniczne płynące z analizy rozważanej tematyki zjawiska.

7. Wnioski

(1) Na cechy mechaniczne muru, w tym wytrzymałość na ściskanie i na rozciąganie, wpływają jego elementy składowe, to jest rodzaj elementu murowego oraz sposób jego powiązania (zaprawa, rodzaj spoiny lub ewentualne zbrojenie). Cechy mechaniczne muru z betonu komórkowego o tych samych cechach fizyko-technicznych materiału kształtują się inaczej przy spoinie grubej (od 6 do 15 mm) a inaczej przy spoinie cienkiej (od 1 do 3 mm). Ważna jest też wytrzymałość zaprawy zastosowanej. Przykładowo układ elementów murowych przewiązanych zaprawą o wytrzymałości na ściskanie przekraczającej kilkakrotnie wytrzymałość na ściskanie elementu sprawia, że mur taki zaczyna pracować jako monolityczna tarcza, a spoina traci swoją funkcję (przestaje być m.in. „poduszką” – elastyczną matrycą z zatopionymi w niej sztywnymi elementami).

(2) Dla zbadanych dotychczas murów osiągnięcie rzeczywistego stanu zniszczenia (równoznacznego ze stanem granicznym nośności) następowało dla większych poziomów naprężeń niż notowane w chwili pojawienia się rys, niemniej różnica ta silnie zależała od typu elementów murowych, z których badane modele były wykonane. Stwierdzenie to pozwala przyjąć, że pojawienie się zarysowań z uwagi na odkształcenia muru (skurcz i pęcznienie) wpływa przede wszystkim na estetykę muru, a nie na jego nośność.

(3) Najmniejsze prawdopodobieństwo powstawania rys skurczowych jest w betonie komórkowym technologii Unipol z kruszywem piaskowym, gdyż charakteryzuje się on stosunkowo małym oporem dyfuzyjnym oraz niską wilgotnością krytyczną, dużymi odkształceniami granicznymi, małymi odkształceniami skurczowymi oraz stosunkowo dużą wytrzymałością na rozciąganie. W murach wykonanych z autoklawizowanego betonu komórkowego na kruszywie piaskowym technologii Unipol zarysowania nie przekroczyły szerokości rozwarcia równej 0,6 mm, natomiast w przypadku zaprawy ciepłochronnej maksymalna szerokość rozwarcia rysy wyniosła ok. 0,3-0,4 mm dla wilgotności autoklawizacyjnej muru.

(4) Ocena nośności muru z uwagi na jego niejednorodność musi być wykonywana z uwzględnieniem decydującego mechanizmu zniszczenia. Analizowany w niniejszej rozprawie model zarysowania muru z autoklawizowanego betonu komórkowego oraz jego mechanizm zniszczenia w wyniku odkształceń w kierunku równoległym do spoin wspornych jednoznacznie wskazuje na powstające w ustroju poziome naprężenia jednoosiowe rozciągające.

(5) Dobrym opisem matematycznym dla dwóch przypadków zniszczenia muru przy jednoosiowym rozciąganiu w kierunku równoległym do spoiny wspornej jest zaproponowany w pracach Manna [97], Schuberta i Weschego [98, 99, 100], Backes'a [101] model, który znalazł odbicie m.in. w niemieckich przepisach normowych [102]. Model ten wyróżnia dwa schematy zarysowania, tj. przebiegającego przez element murowy oraz przebiegającego przez spoiny. Proponowany tutaj opis matematyczny z uwagi na mechanizm zarysowania ma zastosowanie do zjawisk rozpatrywanych w niniejszej rozprawie.

(6) Zastosowanie stalowego zbrojenia układanego w spoinach spornych ma pozytywny wpływ na rysoodporność, nośność i odkształcalność konstrukcji murowych. Najbardziej korzystny wpływ na wytrzymałość muru ma zbrojenie poziome typu „kratownicza”. Przy wzroście naprężeń ściskających notuje się podwyższenie wartości naprężeń rysujących i niszczących.

7.1. Wnioski końcowe

(1) Metodykę badań murów w skali naturalnej prowadzonych w warunkach poligonowych można traktować jako prawidłową, czego potwierdzeniem jest zauważalna powtarzalność wyników pomiarów odkształceń murów dla dwóch kolejnych serii, tj. przy poautoklawizacyjnym zawilgoceniu betonu komórkowego wmurowywanego oraz przy zawilgoceniu ok. 30 % masy. Schematy zarysowań notowane podczas obserwacji oraz ustalone w pomiarach tensometrycznych szerokości rozwarcia rys i pęknięć potwierdziły się wzajemnie. Widoczne jest to chociażby przy porównaniu wyników z murów E11 i E21.

(2) Na podstawie wyników z przeprowadzonych badań własnych stwierdza się, że mury przy wilgotności wmurowania około 10 % masy elementów betonu komórkowego rysowały się w zakresie rozwarcia rys do 0,1-0,2 mm, gdzie za minimalne rozwarcie rysy uważa się wartość 0,05-0,1 mm. Mając na uwadze wyniki analizy literaturowej oraz potwierdzenie tego zjawiska dla wszystkich czterech badanych murów tej grupy zawilgocenia należy stwierdzić, iż powstawanie rys i pęknięć w rozważanych murach związane jest bardzo znacząco z wilgotnością wmurowywanego materiału. Wilgotność elementów murowych z betonu komórkowego stosowanych do murowania nie powinna przekraczać 10-15 % masy.

(3) Mury wykonane z betonu komórkowego na kruszywie popiołowym mają większą tendencję do powstawania zarysowań, co jest zrozumiałe z uwagi na wyższe wartości skurczu tego betonu przy wysychaniu, co wynika również z technologii jego wytwarzania (właściwość ta jest zjawiskiem naturalnym, wynikającym z właściwości popiołów lotnych). Natomiast w murach wykonanych z autoklawizowanego betonu komórkowego na kruszywie piaskowym technologii Unipol zarysowania nie przekroczyły szerokości rozwarcia równej 0,6 mm, a w przypadku zaprawy ciepłochronnej maksymalna szerokość rozwarcia rysy wyniosła ok. 0,3-0,4 mm dla wilgotności autoklawizacyjnej muru.

(5) Na podstawie obserwacji wszystkich 16 murów badawczych i ich pomiarów odkształceń należy stwierdzić, iż najmniej pęknięć i zarysowań powstało w murach łączonych zaprawą ciepłochronną z elementów murowych na kruszywie piaskowym (mury D12, F22, F32, D42). Porównując z murami z betonu komórkowego o tej samej technologii wytwarzania (producent „D” i „F”), a wykonanych na zaprawie do cienkich spoin (wytrzymałość na ściskanie na poziomie 13,77 MPa), potwierdza się, że mniejsze jest prawdopodobieństwo powstawania rys i pęknięć w ścianach na zaprawie o wytrzymałości na ściskanie zbliżonej wartością do wytrzymałości elementu murowego (zaprawa ciepłochronna: 5,34 MPa, beton komórkowy „piaskowy”: 2,3-3,1 MPa).

(6) Kształtując cechy mechaniczne muru z autoklawizowanego betonu komórkowego poprzez dobór jego składowych względem właściwości fizyko-techniczne materiału (elementy murowe i zaprawa) można znacząco wpływać na obniżenie prawdopodobieństwa powstawania zarysowań. Przede wszystkim wymienić należy:

- dobór pod względem wytrzymałości na ściskanie zaprawy murowej do łączenia elementów z betonu komórkowego, gdzie powinna być dla obu składników muru na zbliżonym poziomie,
- beton komórkowy o niskiej wartości skurczu przy wysychaniu,
- wilgotność betonu komórkowego w chwili wmurowania nie większa niż 15 % masy.

(7) Ocena nośności muru z uwagi na jego niejednorodność musi być wykonywana z uwzględnieniem decydującego mechanizmu zniszczenia. Dobrym opisem matematycznym określającym wytrzymałość muru na rozciąganie w kierunku równoległym do płaszczyzny spoin wspornych (również dla murów z autoklawizowanego betonu komórkowego) jest za-

proponowany w pracach Manna [97], Schuberta i Weschego [98, 99, 100], Backes'a [101]. Model ten wyróżnia dwa schematy zarysowania, tj. przebiegającego przez element murowy oraz przebiegającego przez spoiny (szczegóły w punkcie (5) rozdziału 3.4 niniejszej rozprawy).

7.2. Kierunki dalszych działań

(1) Przeprowadzone w ramach niniejszej rozprawy badania należy traktować po części jako rozpoznawcze z uwagi na praktycznie niewielką liczbę próbek (16 murów badawczych), gdzie każdy z murów różnił się parametrami od pozostałych. Ponadto warunki poligonowe w jakich mury te zostały wykonane nie wpływają pozytywnie na powtarzalność i odtwarzalność zaproponowanej metody badawczej. Jednak całość zaprogramowanych badań murów, ich pogrupowanie w zakresie rodzaju elementu murowego, zaprawy murowej, wilgotności wmurowania, pozwoliło na uzyskanie odpowiedzi na postawione w niniejszej rozprawie pytania.

(2) Celowe jest potwierdzenie uzyskanych wyników zwiększając liczebność próbki szczególnie w zakresie murów z elementów murowych z autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK) o wilgotności wmurowania nie przekraczającej 15 % masy. Celowe jest również potwierdzenie zmniejszenia zarysowania murów wykonanych z elementów ABK na kruszywie piaskowym łączonych zaprawą murową, której wytrzymałość na ściskanie nie przekracza 5 MPa.

(3) Przy analizie zagadnienia powstawiania rys i pęknięć w konstrukcji murowej właściwe jest potwierdzenie i przypomnienie funkcji, jaką pełni w murze zaprawa murowa (funkcji jako: „łącznika” elementów w murze; elastycznej „poduszki”-matrycy z zatopionymi w niej sztywnymi elementami; „bariery” chroniącej mur przed wnikaniem do jego wnętrza m.in. wilgoci; „sączka” regulującego wilgotność muru).

(4) Ponadto celowe jest rozważenie zasadności stosowania do łączenia z betonem komórkowym zaprawy wapiennej oraz grubości spoiny większej niż 3 mm. Przykładowo niezbadanym jest jeszcze dostatecznie obszar spoiny o grubości od 3 do 8 mm, która to mogła by poprawić odporność na zarysowania muru wykonanego z betonu komórkowego.

8. Literatura

- [1] Zapotoczna-Sytek G.: *Współczesne technologie betonu komórkowego, prognozy w świetle zrównoważonego rozwoju*, Wydawnictwo Prace COBRPB CEBET, Zeszyt 32, Warszawa 2004r.
- [2] Zapotoczna-Sytek G.: Beton komórkowy (ABK) w świetle wymagań europejskich, Kalendarz budowlany 2006 pod redakcją L. Runkiewicza
- [3] Zapotoczna-Sytek G.: Rozwój autoklawizowanego betonu komórkowego na tle 20 Konferencji „Jadwisińskich” , 20. Konferencja Naukowo-Techniczna „JADWISIN 2006”.
- [4] Dom ze ścianami jednowarstwowymi, program edukacyjno-informacyjny „Mądry Polak przed budową”, patronat Ministerstwa Infrastruktury (www.domprzyjazny.pl) Wydawnictwo Ardo – Studio
- [5] Misiewicz L.: Polski rynek materiałów ściennych, Materiały Budowlane '04 2007r. (nr 416)
- [6] PN-EN 771-4:2004 wraz ze zmianą PN-EN 771-4:2004/A1:2006, Wymagania dla elementów murowych. Część 4: Elementy murowe z autoklawizowanego betonu komórkowego
- [7] PN-EN 998-2:2004, Wymagania dotyczące zaprawy do murów. Część 2: Zaprawa murarska (wprowadzona poprawka do normy PN-EN 998-2:2004/Ap1:2008)
- [8] BN-88/6734-06, Zaprawy budowlane. Lekka zaprawa murarska Termor i Termor W
- [9] Żenczykowski W., Budownictwo ogólne (Tom II), Konstrukcje i wznoszenie murów i sklepień, Warszawa 1956r.
- [10] PN-EN 1996-1-1:2006 Eurokod 6 - Projektowanie konstrukcji murowych - Część 1-1: Reguły ogólne dla zbrojonych i niezbrojonych konstrukcji murowych (nowe wydanie)

normy PN-EN 1996-1-1:2010 z datą publikacji 18 marca 2010 wprowadza EN 1996-1-1:2005/AC:2009 i EN 1996-1-1:2005)

- [11] Lewicki B. z zespołem, Rozszerzenie podstaw naukowych ustaleń Eurokodu 6 „Projektowanie konstrukcji murowych” – Komentarz naukowo-badawczy do PN-EN 1996-1-1:2008, PN-EN 1996-2:2008 i PN-EN 1996-3:2008, Tom 1, wyd. ITB, Warszawa 2008
- [12] Lewicki B. z zespołem, Rozszerzenie podstaw naukowych ustaleń Eurokodu 6 „Projektowanie konstrukcji murowych” – Komentarz naukowo-badawczy do PN-EN 1996-1-1:2008, PN-EN 1996-2:2008 i PN-EN 1996-3:2008, Tom 2, wyd. ITB, Warszawa 2008
- [13] PN-EN 771-1:2006 Wymagania dotyczące elementów murowych - Część 1: Elementy murowe ceramiczne
- [14] PN-EN 771-2:2006 Wymagania dotyczące elementów murowych - Część 2: Elementy murowe silikatowe
- [15] PN-EN 771-3:2005 Wymagania dotyczące elementów murowych - Część 3: Elementy murowe z betonu kruszywowego (z kruszywami zwykłymi i lekkimi) wraz ze zmianą PN-EN 771-3:2005/A1:2006
- [16] PN-EN 771-4:2004 Wymagania dotyczące elementów murowych - Część 4: Elementy murowe z autoklawizowanego betonu komórkowego wraz ze zmianą PN-EN 771-4:2004/A1:2006
- [17] PN-EN 771-5:2005 Wymagania dotyczące elementów murowych - Część 5: Elementy murowe z kamienia sztucznego wraz ze zmianą PN-EN 771-5:2005/A1:2006
- [18] PN-EN 771-6:2007 Wymagania dotyczące elementów murowych - Część 6: Elementy murowe z kamienia naturalnego

- [19] Zapotoczna-Sytek G. z zespołem, Badanie ustrojów ściennych (murów) wykonanych z lekkich odmian betonu komórkowego, Sprawozdanie COBRPB „CEBET”, Warszawa 2002 r.
- [20] Zapotoczna-Sytek G. z zespołem, Badania nad zwiększeniem wytrzymałości autoklawizowanego betonu komórkowego z jednoczesnym obniżeniem energochłonności procesu autoklawizacji (wstępne prace laboratoryjne), Sprawozdanie COBRPB „CEBET”, Warszawa 2003 r.
- [21] Zapotoczna-Sytek G. z zespołem, Praca ustrojów ściennych z autoklawizowanego betonu komórkowego, Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego Nr 4 T07E 020 26, Warszawa 2006r.
- [22] Kubica J., Niezbrojone ściany murowe poddane odkształceniom postaciowym wywołanym nierównomiernymi pionowymi przemieszczeniami podłoża, Rozprawa habilitacyjna, wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003
- [23] Starosolski W. z zespołem, Wykonanie uzupełniających badań cech materiałowych wypełnienia i modelu ramy żelbetowej z wypełnieniem z cegły. Praca NB-119/RB-2/91, zlecona przez ITB Warszawa w ramach CPBR 6.4 Zadanie 17.01.2. Raport końcowy, Instytut Konstrukcji Budowlanych, Politechnika Śląska, Gliwice 1991
- [24] Starosolski W. z zespołem, Ściany z elementów drobnowymiarowych jako usztywnienie żelbetowej konstrukcji szkieletowej na terenach górniczych. Praca NBPBU-610/RB-2/92 (Projekt Badawczy Nr 7 0681 91 01 finansowany z KBN), Raport końcowy, Instytut Konstrukcji Budowlanych, Politechnika Śląska, Gliwice 1994
- [25] Kubica J., Wstępne badania modułu Kirchhoffa niezbrojonych, ścinanych murów z cegły. Praca BK-282/RB-2/00 zlecona przez Rektora Politechniki Śląskiej w ramach badań statutowych. Raport, Katedra Konstrukcji Budowlanych, Politechnika Śląska, Gliwice 2000

- [26] Kubica J., Wstępne badania murów z bloczków z betonu komórkowego poddanych ścinaniu ze ściskaniem. Praca BK-273/RB-2/98 zlecona przez Rektora Politechniki Śląskiej w ramach badań statutowych. Raport, Katedra Konstrukcji Budowlanych, Politechnika Śląska, Gliwice 1998
- [27] Kubica J. z zespołem, Analiza nośności i odkształcalności ścian murowanych, ścinanych prostopadle do spoin wspornych na skutek pionowych deformacji podłoża wywołanych wpływami typu górniczego. Praca PBU-99/RB-2/98 (Projekt Badawczy Nr 7 T07E 026 15 finansowany przez KBN), Raport końcowy, Katedra Konstrukcji Budowlanych, Politechnika Śląska, Gliwice 2001
- [28] Kubica J. z zespołem, Badania wytrzymałości na ścinanie w kierunku pionowym oraz granicznych wartości kąta odkształcenia postaciowego murów wykonanych z bloczków typu „YTONG”. Praca NB-83/RB-2/99, Raport końcowy, Katedra Konstrukcji Budowlanych, Politechnika Śląska, Gliwice 1999
- [29] Lewicki B., Jarmontowicz R., Kubica J., Podstawy projektowania niezbrojonych konstrukcji murowych, Prace naukowe ITB, Warszawa 2001
- [30] Ciesielski R., O pomiarze, opisie i interpretacji rys w konstrukcjach murowanych, Przegląd Budowlany '11 1987r.
- [31] Małyszko L., Orłowicz R., Konstrukcje murowe Zarysowania i naprawy, Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie, Olsztyn 2000
- [32] Page A. W., An Experimental Investigation of the Biaxial Strength of Brick Masonry, Proceedings of the Sixth International Brick Masonry Conference, 1982
- [33] Dhanasekar M., Page A. W., Kleeman P. W., The Failure of Brick Masonry under Biaxial Stresses, Proc. Int. Cov. Engrs.
- [34] Runkiewicz L., Raport o awariach i katastrofach konstrukcji budowlanych, Wyd. ITB, Warszawa 1994

- [35] Pielas J., Naprężenia skurczowe w elementach z betonu komórkowego wywołane nieliniowym rozkładem wilgotności w przekroju, Centralny Ośrodek Badawczo-Projektowy Budownictwa Ogólnego, Warszawa 1989
- [36] Ciesielski R., O pomiarze, opisie i interpretacji rys w konstrukcjach murowych, Przegląd budowlany, 11/87
- [37] Pluta J., Metoda strukturalnych punktów charakterystycznych – badanie, opis i diagnostyka budowli, Inżynieria i Budownictwo, 2/70
- [38] Mann W., Müller H., Bruchkriterien für querkraftbeanspruchtes Mauerwerk und ihre Anwendung auf gemauerte Windscheiben, Die Bautechnik 1973, Zeszyt 12
- [39] Kubica J., The Effect of Compressive Loads on the Load Capacity and Deformation of Brick Walls Subject to Vertical Shear, Proceedings of The British Masonry Society, London 1995
- [40] Mojsilovic N., Marti P., Versuche an kombiniert beanspruchten Mauerwerkswänden, Bericht, IBK ETH, Zürich 1994
- [41] Gienijew G., Kryterium wytrzymałości murów w złożonym stanie naprężeń, Mechanika Budowlana, No 2, Moskwa, 1979
- [42] Kubica J., Ściany z cegły w złożonym stanie naprężenia, Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 1995
- [43] Mann W., Tension and Shear In Masonry Walls. Proceedings of CIB/W23 Meeting, CIB Publication 131, 1984
- [44] Mann W., Müller H., Schubtragfähigkeit von gemanerten Wänden und Voraussetzungen für das Entfallen des Windnachweises, Mauerwerk-Kalender, Ernst & Shon Verlag, Berlin 1985
- [45] Müller H., Untersuchungen zum Tragverhalten vom querkraftbeanspruchtem Mauerwerkswänden. Bruchverhalten und Bruchtheorie. Auswertung bekannter Scher-

- versuche, zusätzliche Einflüsse bei Windscheiben, Disseration - praca doktorska, Darmstad 1974
- [46] Mann W., Müller H., Failure of Shear-Stressed Masonry – An Enlarged Theory. Tests and Application to Shear Walls., Proceedings of the British Ceramic Society. Load-Bearing Brickwork, Vol. 7, No. 30, 1982
- [47] Graubner C. A., Simon E., II Forschungsbericht: Zur Schubtragfähigkeit von Mauerwerk aus großformatigen Steinen., Mauerwerk- Kalender 2001
- [48] Mann W., Müller H., Schubtragfähigkeit von Mauerwerk, Mauerwerk- Kalender 1978
- [49] Graubner C.A., Simon E., Forschungsbericht: Zur Schubtragfähigkeit von Mauerwerk aus großformatigen Steinen, Mauerwerk-Kalender 1985
- [50] Schubert P., Zur Schubfestigkeit von Mauerwerk. Mauerwerk-Kalender 1998
- [51] Ganz H. R., Thürlimann B., Versuche über die Festigkeit von zweiachsig beanspruchtem Mauerwerk, Institut für Baustatistik und Konstruktion, ETH Zürich, Versuchsbericht 1984
- [52] Guggisberg R., Thürlimann B., Versuche zur Festlegung der Rechenwerte von Mauerwerkfestigkeiten, Institut für Baustatistik und Konstruktion, ETH Zürich, Versuchsbericht 1987
- [53] Lurati F., Graf H., Thürlimann B., Versuche zur Festlegung der Festigkeitswerte von Zementsteinmauerwerk, Institut für Baustatistik und Konstruktion, ETH Zürich, Versuchsbericht 1990
- [54] Lewicki B., Kubica J., Nowa norma projektowania konstrukcji murowych PN-B-03002:1999, Inżynieria i Budownictwo, 2000
- [55] Kubica J., Badania zależności σ - ϵ niezbrojonych murów z cegły, XLI Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Kraków-Krynica, 1995

- [56] Janowski Z., Matysek P., Analiza nośności murów ceglanych z uwzględnieniem nieliniowej zależności obciążenie-odkształcenie, XXXVIII Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Łódź-Krynica, 1992
- [57] Janowski Z., Amin Z., Analiza nośności i odkształcalności ścian ceglanych w ujęciu norm i badań doświadczalnych, X Toruńska Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna PZITB, Toruń 1986
- [58] Becker G., Bernard R., Nichtlineare Spannungs-Dehnungs-Verläufe bei Mauerwerk, Bautechnik 1991, Vol. 68, h.5
- [59] Bernardyni A., Modena C., Vescovi U., An experimental research on the resistance and deformability of ceramics bricks masonry walls. Proceedings of the 6th International Brick/Block Masonry Conference, Rzym, Włochy, 1982
- [60] Eden W., Kasten D., Makowski B., Mayer G., Druckfestigkeit von Kalksandstein-Mauerwerk unter Berücksichtigung des Wasserhaushaltes in der Lagerfuge, Bautechnik, 1994, nr 71, h.6
- [61] Hendry A.W., Malek M.H., Characteristic compressive strengt hof brickwork from collected test results, masonry International, 1986
- [62] Hendry A.W., Struktural masonry. Macmillan Education LTD. Houndmills, Basingstoke, Hampsire and London, 1990
- [63] Lewicki B., Kukulski W., Mathez J., Lugez J., Methodes de calcule des Mures, Cahiers du CSTB, 1964, nr 68, Juin
- [64] Lewicki B., Some remarks on establishing compressive strengt hof masonry according to European standards, Proceedings of 32nd Meeting of CIB W 23, Berlin, September 1995

- [65] Mann W., Statistische Auswertung von Druckversuchen an mauerwerkskorpern in geschlossener Darstellung mit Hilfe von Potenzfunktionen, Proceedings of the 6th International Brick/Block Masonry Conference, Rzym, Włochy, 1982
- [66] Meyer U., Schubert P., Spannungs-Dehnungs-Linien von Mauerwerk, Proceedings of the 6th International Brick/Block Masonry Conference, Rzym, Włochy, 1982
- [67] Schneider K.J., Schubert P., Wormuth R., Mauerwerksbau, Werner Verlag GmbH & Co.KG, Düsseldorf 1999
- [68] Schneider K.J., Weickenmeier N., Aktuell Mauerwerksbau, Werner Verlag GmbH & Co.KG, Düsseldorf 2000, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Wien, Zürich 2000
- [69] Drobiec Ł., Analiza murów ze zbrojeniem w spoinach wspornych poddanych obciążeniom pionowym, Praca doktorska, Gliwice 2004
- [70] Piekarczyk A, Nośność i odkształcalność zbrojonych ścian murowych poddanych ścinaniu w kierunku pionowym, Praca doktorska, Gliwice 2005
- [71] Jasiński R., Nośność i odkształcalność zbrojonych ścian murowych ścinanych poziomo, Praca doktorska, Gliwice 2005
- [72] Carter C., Smith B.S., Structural behavior of masonry infilled frames subjected to racking loads. Design Engineering and Constructing with Masonry Products. Taken from the proceedings of The International Conference on Masonry Structural System. College of Engineering. The University of Texas at Austin. Gulf Publishing Company, Houston, Texas, 1969
- [73] Dhanasekar M., Page A.W., The influence of brick masonry infill properties on the behaviour of infilled frames. Proceedings of Institute of Civil Engineerings, Vol. 81, Part 2, 1986

- [74] Hoobs D.W., Samai M.L., Failure of reinforced concrete frames with lightweight concrete blockwork infill, I. CIB Third International Symposium on Wall Structures, Warsaw 1984
- [75] Holmes M., Steel frames with brickwork and concrete infilling. Proceedings of Institute of Civil Engineerings, Vol. 19, 1961
- [76] Kapela M., Wojtycki A., Badania sztywności ram wypełnionych murem, Inżynieria i Budownictwo, Nr 4, 1997
- [77] Kliszczewicz R., Badanie efektywności murowanych wypełnień jako skutecznych usztywnień ram żelbetowych, XL Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB, Rzeszów-Krynica-Warszawa, 1994
- [78] Liauw T.C., Lee S.W., On the behaviour and analysis of Multi-storey infilled frames subject to lateral loading, Proceedings of Institute of Civil Engineerings, Vol. 3, Part 2, 1977
- [79] Půbal Z., Výpočet rámců se stěnovými výplněmi jako tlakovými diagonálami na vodorovné zatížení. Pozemní stavby, 4, 1978
- [80] Seah C.K., Dawe J.L., Elastic-plastic analysis of masonry infilled frames, 11th International Brick/Block Masonry Conference, Tongji University, Shanghai 1997
- [81] Al-Chaar G., Issa M., Sweeney S., Behavior of masonry-infilled nonductile reinforced concrete frames, Journal of Structural Engineering, Vol. 128, No. 8 2002
- [82] Klinger R.E., Rubiano N.R., Bashandy T.R., Sweeney S.C., Evaluation and analytical verification of shaking table data from infilled frames, Part I: In-plane behavior, 7th North American Masonry Conference, University of Notre Dame –South Bend, Indiana USA 1996

- [83] Lafuente M., Castilla E., Genatios C., Experimental and analytical evaluation of the seismic resistant behavior of masonry walls, *Masonry International*, Vol. 11, No. 3 1998
- [84] Madan A., Reinhorn A.M., Mander J.B., Valles R.E., Modelling of masonry infill panels for structural analysis, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 123, No. 10, 1997
- [85] Mehrabi A.B., Shing P.B., Schuller M.P., Noland J.L., Experimental evaluation of masonry infilled RC frames, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 122, No. 3, 1996
- [86] Hendry A.W., Reinforced and prestressed masonry, Longman Scientific & Technical, Essex, 1991
- [87] Hendry A.W., Sinha B.P., Davies S.R., Design of masonry structures, E & FN Spon, London, 1997
- [88] Rosenhaupt S., Experimental study of masonry walls on beams, *Journal of the Structural Division*, Vol. 88, No. 6, 1962
- [89] Xueyou Q., Xiao H., Guangyao F., Shaoliang B., An experimental study on aseismic mechanism of frame-supported wall-beam, 11th International Brick/Block Masonry Conference, Tongji University, Shanghai 1997
- [90] Adell J.M., González T., Martinez L.B., Astudillo F.R., Casas P.A., Garcia G.J., Vertical Flexural bending in lintels of bed joint reinforced clay masonry in Spain, *Proceedings of the British Masonry Society. Proceedings of the Fourth International Masonry Conference*, Proceedings No. 7, London 1995
- [91] Edgell G.J., The shear behaviour of reinforced brick masonry beams, *Proceedings of CIB/W23 Meeting*, September 1981
- [92] Fereig S.M., Tests on reinforced masonry walls subjected to in-plane loading, *Darmstadt Concrete*, 10, 1995

- [93] Sorić Z., Masonry lintels-shear failure analysis, *The Masonry Society Journal*, Vol. 12, No. 2, 1994
- [94] TC250/SC6/N1003/1: General comments received relating to the conversion of Eurocode 6 from ENV to EN, BRE, October 1998
- [95] PN-EN 1996-2:2006 Eurokod 6 - Projektowanie konstrukcji murowych - Część 2: Uwarunkowania projektowe, dobór materiałów i wykonawstwo konstrukcji murowych (z datą publikacji 4 marca 2010r. PN-EN 1996-2:2010 wprowadza EN 1996-2:2006/AC1:2009 i EN 1996-2:2006)
- [96] PN-EN 1996-3:2006 Eurokod 6 - Projektowanie konstrukcji murowych - Część 3: Uproszczone metody obliczania niezbrojonych konstrukcji murowych (z datą publikacji 5 marca 2010r. PN-EN 1996-3:2010 wprowadza EN 1996-3:2006/AC1:2009 i EN 1996-3:2006)
- [97] Mann W., Tensile and Flexural Strength on Masonry – Teoretical Basis and Comparison with Test Results, *Walls Structures CIB Proceedings*, Publication 133, 1990
- [98] Schubert P., *Zur Rißfreien Länge von nichttragenden Mauerwerkswänden*, Mauerwerk-Kalender, Ernst & Sohn Verlag, Berlin 1988
- [99] Schubert P., Wesche K., *Verformung und Rißsicherheit von Mauerwerk*, Mauerwerk-Kalender, Ernst & Sohn Verlag, Berlin 1988
- [100] Schubert P., Wesche K., *Verformungsverhalten und Rißsicherheit von Mauerwerk*, Mauerwerk-Kalender, Ernst & Sohn Verlag, Berlin 1987
- [101] Backes H.P., *Zum Verhalten von Mauerwerk bei Zugbeanspruchung in Richtung der Lagerfugen*, Dissertation RWTH Aachen, 1985
- [102] DIN 1053 Teil 2: Mauerwerk nach Eignungsprüfung, Berechnung und Ausführung, Ausgabe 1984

- [103] DIN 1053 Teil 1: Mauerwerk. Recept- Mauerwerk. Berechnung und Ausführung, Ausgabe 1990
- [104] Pohl R., Schneider K.J., Wormuth R., Ohler A., Schubert P., Mauerwerksbau. Baustoffe-Konstruktion-Berechnung-Ausführung. 4. Auflage, Werner-Verlag GmbH, Düsseldorf 1992
- [105] Drysdale R.G., Hamid A.A., Heidebrecht A.C., Tensile Strenght of Concrete Masonry, Proceedings oft he ASCE, Journal of the Structural Division, no ST7/1979, vol. 105
- [106] Jatymowicz H., Siejko J., Zapotocz-Sytek G., Technologia autoklawizowanego betonu komórkowego, Arkady, Warszawa 1980
- [107] Ziembicka H., Łaś M., Michniewski F., Wiśniewska H., Własności fizyczne autoklawizowanego betonu komórkowego, Warszawa 1966 r.
- [108] Hums D., Skurcz materiałów ściennych, Materiały Budowlane '04 1999r. (nr 320)
- [109] Schubert P., Eigenschaftswerte von Mauerwerk, Mauersteinen und Mauermörtel, Mauerwerk- Kalender 1992
- [110] Schubert P., Formänderungen von Mauersteinen, Mauermörtel und Mauerwerk, Mauerwerk- Kalender 1992
- [111] PN-89/B-06258 wraz ze zmianą PN-89/B-06258/Az1:2001 Autoklawizowany beton komórkowy (obecnie norma wycofana jednak w okresie prowadzonych prac na potrzeby niniejszej rozprawy była aktualnie stosowaną)
- [112] PN-EN 680:1998 Oznaczanie skurczu przy wysychaniu autoklawizowanego betonu komórkowego (15 kwietnia 2006 norma PN-EN 680:1998 zastąpiona nowym wydaniem z 2006, a to z kolei 12 czerwca 2008 r. wydaniem PN-EN 680:2008)
- [113] Łaś M., Zapotoczna-Sytek G., Kruk M., Skurcz betonu komórkowego (AAC) badany wg PN-89/B-06258 + Az1:2001 i PN-EN 680:1998, Materiały konferencyjne XLVIII Konferencji Naukowej KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 2002

- [114] PN-EN 679:1998 Oznaczenie wytrzymałości na ściskanie autoklawizowanego betonu komórkowego (15 maja 2006 norma PN-EN 679:1998 zastąpiona nowym wydaniem z 2006, a to z kolei 13 czerwca 2008 r. wydaniem PN-EN 679:2008)
- [115] PN-EN 772-1:2001 Metody badań elementów murowych Część 1: Określenie wytrzymałości na ściskanie
- [116] PN-EN 1352:1999 Oznaczanie modułu sprężystości autoklawizowanego betonu komórkowego lub betonu lekkiego o otwartej strukturze
- [117] Prace badawcze mające na celu ustalenie wpływu parametrów zaprawy na wytrzymałość muru z betonu komórkowego na ścinanie, Maszynopis z realizacji pracy badawczej N009, COBRPB „Cebet”, Warszawa 2005 r.
- [118] Prace badawcze mające na celu ustalenie wpływu parametrów zaprawy na wytrzymałość muru z betonu komórkowego na ścinanie (Kontynuacja tematu rozpoczętego w roku 2005), Maszynopis z realizacji pracy badawczej N009, COBRPB „Cebet”, Warszawa 2006 r.
- [119] PN-EN 1015-12:2002 Metody badań zapraw do murów Część 12: Określenie przyczepności do podłoża stwardniałych zapraw na obrzutkę i do tynkowania
- [120] PN-EN 1015-11:2001 Metody badań zapraw do murów Część 11: Określenie wytrzymałości na zginanie i ściskanie stwardniałej zaprawy (PN-EN 1015-11:2001/A1:2007)
- [121] PN-EN 772-13:2001 Metody badań elementów murowych Część 1: Określenie gęstości netto i brutto elementów murowych w stanie suchym (z wyjątkiem kamienia naturalnego)
- [122] PN-EN 772-10:2000 Metody badań elementów murowych Część 1: Określenie wilgotności silikatowych elementów murowych oraz elementów z autoklawizowanego betonu komórkowego

- [123] PN-EN 1052-3:2004 Metody badań murów Część 3: Określenie początkowej wytrzymałości muru na ścinanie (wprowadzona zmiana do normy PN-EN 1052-3:2004/A1:2009)
- [124] PN-B-03002:1999 wraz ze zmianą PN-B-03002:1999/Az1:2001 i PN-B-03002:1999/Az2:2002 oraz poprawką PN-B-03002:1999/Ap1:2001 Konstrukcje murowe niezbrojone Projektowanie i obliczanie (nowe wydanie normy PN-B-03002:2007)
- [125] Schmidt U., Kang B.G., Kannawald J., Brameshuber W., Test of load bearing behavior of masonry shear walls, Materiały konferencji: Autoclaved Aerated Concrete – Information and Development, Londyn 2005r.
- [126] PN-B-03002:2007 Konstrukcje murowe - Projektowanie i obliczanie
- [127] Eurocode 6 – Design of masonry structures – Part 1-1: General rule for reinforced and unreinforced masonry structures , November 2005
- [128] PN-EN 1052-1:2000 Metody badań murów Część 1: Określenie wytrzymałości na ściskanie
- [129] PN-87/B-03002 Konstrukcje murowe Obliczenia statyczne i projektowanie
- [130] Bodzak J., Gajownik R., Zapotoczna-Sytek G., Wytrzymałości charakterystyczne muru z bloczków z betonu komórkowego w świetle ostatnich badań COBRPB „CEBET”, Konferencja Naukowo-Techniczna KONSTRUKCJE MUROWE – Harmonizacja Polskich Norm z Normami Europejskimi, Puławy, 8/9 stycznia 1998 r.
- [131] Badania murów z elementów z betonu komórkowego łączonych na cienkie spoiny i bez spoin pionowych, Maszynopis z realizacji pracy badawczej N002. COBRPB „Cebet” Warszawa 1995 r.
- [132] Badania murów z elementów z betonu komórkowego, Maszynopis z realizacji pracy badawczej Z095. COBRPB „Cebet” Warszawa 1996 r.

- [133] Badania uzupełniające murów z elementów z betonu komórkowego, Maszynopis z realizacji pracy badawczej Z043. COBRPB „Cebet” Warszawa 1998 r.
- [134] Dodatkowe badania wytrzymałości murów z bloczków z betonu komórkowego odmiany 400, Maszynopis z realizacji pracy badawczej Z043. COBRPB „Cebet” Warszawa 1998 r.
- [135] Janowski Z., Matysek P., Metody wzmacniania konstrukcji murowych przez sprężanie, XIV Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji, Ustroń, 1999
- [136] Katalog produktów - http://www.alpol.pl/pl/katalog_produkow/go:1:0/
- [137] ATLAS KB-15 zaprawa murarska do betonu komórkowego, podstawowe wytyczne dotyczące stosowania wyrobu
- [138] Katalog produktów - <http://www.izolbet.pl/products.php?cid=4&sid=&pid=21>
- [139] Karta techniczna wyrobu - P.P.H.U. INTER GRAD 72-310 Płoty, Sowno 52
- [140] Karta techniczna wyrobu – BAUMIT Data aktualizacji: 04/2008
- [141] Deklaracja zgodności – styczeń 2008r
- [142] Aprobata Techniczna ITB: AT-15-2700/2001 Elementu murowe Ytong z betonu komórkowego
- [143] EN 12602:2008 Prefabrykowane elementy zbrojone z autoklawizowanego betonu komórkowego
- [144] Dyląg Z., Jakobowicz A., Orłoś Z., Wytrzymałość materiałów (tom I), Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1996
- [145] Badania podatności na zarysowania ustrojów ściennych (murów) wykonanych z lekkich odmian betonu komórkowego, Maszynopis z realizacji pracy badawczej Z047. COBRPB „Cebet” Warszawa 2003 r.

-
- [146] Małyszko L., Modelowanie zniszczenia w konstrukcjach murowych z uwzględnieniem anizotropii, Rozprawa habilitacyjna, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski, Olsztyn 2005

ZAŁĄCZNIKI

Załącznik 1: Odkształcenia [mm]

Załącznik 2: Odkształcenia [m/m]

Załącznik 3: Naprężenia wyznaczone wg prawa Hooke'a [MPa]

