
Na prawach rękopisu
Do użytku służbowego

INSTYTUT INŻYNIERII LĄDOWEJ
POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ

Raport I I L serii PRE nr 1/2003



ANALIZA PÓL TEMPERATURY
WYWOŁANYCH CIEPŁEM HYDRATACJI
W MASYWACH BETONOWYCH

Andrzej Helowicz

PRACA DOKTORSKA

Promotor: prof. dr hab. inż. Jan Biliszczyk

Słowa kluczowe;
beton,
elementy masywne,
ciepło hydratacji,
badania,
model teoretyczny,
rozkład temperatur.

WROCŁAW 2003

Serdecznie dziękuję Panu Profesorowi dr hab. inż. Janowi BILISZCZUKOWI
za okazanie mi pomocy w realizacji pracy.

SPIS TREŚCI

	str.
1. WSTĘP	5
1.1. Przedmiot pracy	5
1.2. Cel i zakres pracy	6
1.3. Tezy pracy	7
1.4. Wykaz stosowanych oznaczeń	7
2. DOTYCHCZASOWY STAN WIEDZY	8
2.1. Rys historyczny	8
2.2. Wpływ poszczególnych czynników na pola temperatury w dojrzewającym bloku	12
2.2.1. <i>Optymalizacja ilości cementu</i>	12
2.2.2. <i>Zastosowanie cementu niskokalorycznego</i>	15
2.2.3. <i>Wpływ domieszek i dodatków</i>	17
2.2.4. <i>Rodzaj kruszywa w betonie</i>	24
2.2.5. <i>Wpływ betonowania w okresie wiosny i jesieni</i>	26
2.2.6. <i>Wpływ izolacji termicznej</i>	28
2.3. Pola naprężeń w masywach betonowych generowane nierównomiernymi rozkładami temperatur	30
2.4. Przegląd stosowanych współcześnie technik pomiarowych	34
2.5. Uzasadnienie potrzeby dalszych badań	35
3. BADANIA WŁASNE	37
3.1. Cel i zakres badań	37
3.2. Opis zastosowanego sprzętu pomiarowego	37
3.3. Estakada we Wrocławiu w rejonie Gądowa - opis badanego obiektu	39
3.4. Opis badań	42
3.5. Wyniki badań	47
3.5.1. <i>Rozkłady temperatur w słupach podpór (beton B30)</i>	47
3.5.2. <i>Rozkład temperatur w przęsle łącznicy zachodniej i wschodniej (beton klasy B60)</i>	53
3.5.3. <i>Rozkłady temperatur w środkach estakady głównej (beton klasy B60)</i>	60
3.6. Ławy fundamentowe Mostu Milenijnego we Wrocławiu - opis badanego obiektu	67
3.7. Opis badań	68
3.8. Wyniki badań	70
3.9. Wnioski	78
4. PODSTAWY TEORETYCZNE	79
5. PRZYBLIŻONA ANALIZA PARAMETRYCZNA WPŁYWU RÓŻNYCH CZYNNIKÓW NA ROZKŁADY TEMPERATUR W MASYWNYCH ELEMENTACH	91
5.1. Cel i zakres analizy	91
5.2. Założenia do obliczeń	93
5.3. Wpływ gęstości objętościowej betonu	99
5.4. Wpływ współczynnika przewodności cieplnej betonu	101
5.5. Wpływ ciepła właściwego betonu	103
5.6. Wpływ temperatury mieszanki betonowej	105
5.7. Wpływ temperatury powietrza	107
5.8. Wpływ powierzchniowego współczynnika przejmowania ciepła	109

5.9. Wpływ ocieplenia zewnętrznego elementu	111
5.10 Podsumowanie	114
6. UWAGI KOŃCOWE	116
6.1. Uwagi ogólne	116
6.2. Uwagi szczegółowe	116
6.3. Postulowane kierunki dalszych badań	117
6.4. Zakończenie	118
LITERATURA	119
ZAŁĄCZNIKI	133
Z.1. Przybliżona analiza parametryczna wpływu różnych czynników na rozkład temperatur w masywnych elementach	133
Z.2. Wpływ gęstości objętościowej betonu	133
Z.3. Wpływ współczynnika przewodności cieplnej betonu	140
Z.4. Wpływ ciepła właściwego betonu	151
Z.5. Wpływ temperatury mieszanki betonowej	162
Z.6. Wpływ temperatury powietrza	171
Z.7. Wpływ powierzchniowego współczynnika przenoszenia ciepła	182
Z.8. Wpływ ocieplenia zewnętrznego elementu	193

1. WSTĘP

1.1. Przedmiot pracy

Beton jest materiałem, którego własności zmieniają się w czasie. Jest to złożony proces skomplikowanych zjawisk fizykochemicznych. W wyniku dojrzewania zaczyn zwiększa swoją lepkość stając się ciałem stałym nabierającym coraz większej sztywności i wytrzymałości. Proces ten jest egzotermiczny. Intensywność procesu uzależniona jest od specyficznych własności spoiwa (składu mineralicznego klinkieru, stopnia zmielenia klinkieru, zawartości gipsu, zawartości żużla, zawartości dodatków pucolanowych, stopnia zleżenia klinkieru, zawartości dodatków i domieszek) oraz temperatury. W konsekwencji zachodzących reakcji chemicznych wzrasta temperatura dojrzewającego betonu oraz przepływ wilgoci, wywołany zmiennymi w czasie objętościowymi upustami masy wody swobodnej i zmniejszaniem się porowatości. Wskutek chłodzenia elementu na brzegu spowodowanego między innymi wymianą ciepła z otoczeniem, w elemencie powstaje niejednorodne pole temperatury. W konsekwencji nierównomiernego przyrostu temperatury, element deformuje się, co wywołuje powstawanie samorównoważących się naprężeń termicznych (blok swobodny). Naprężenia rozciągające pojawiają się na brzegu elementu a ściskające w środku. Jeżeli przekroczona zostanie wytrzymałość materiału na rozciąganie lub przekroczona zostanie zdolność materiału do dalszego odkształcania, w warstwie zewnętrznej pojawią się rysy a w najgorszym przypadku pęknięcie może objąć cały przekrój elementu.

W fazie spadku temperatury w bloku następuje inwersja naprężeń. Wskutek powstrzymywania odkształceń stygnącego wnętrza przez powierzchniowe warstwy bloku, naprężenia ściskające powstają w zewnętrznych warstwach bloku a naprężenia rozciągające w jego środku. W konsekwencji powierzchniowe rysy powstałe w fazie uderzenia termicznego mogą połączyć się z rysami wewnętrznymi powstałymi w wyniku stygnięcia prowadząc do pęknięcia obejmującego cały przekrój bloku (patrz rys. 2.5).

Należy podkreślić, że w elementach swobodnych, niepozbawionych swobody odkształceń, o niebezpieczeństwie utraty monolityczności decyduje różnica temperatur między powierzchnią a środkiem elementu. W elementach utwierdzonych, pozbawionych swobody odkształceń o niebezpieczeństwie utraty monolityczności elementu decyduje maksymalna temperatura wewnętrzna i późniejsze się jej wyrównanie od tej temperry.

Analizowany proces jest wyjątkowo groźny w elementach masywnych, w których wzrost temperatury jest znacznie wyższy niż w elementach cienkościennych.

Samo pojawienie się rys stanowi już duże zagrożenie dla użyteczności i trwałości konstrukcji, a pojawienie się pęknięć zupełnie ją dyskwalifikują.

Można, więc powiedzieć, że o własnościach betonu stwardniałego decydują warunki, w jakich on dojrzewał a przede wszystkim temperatura w jakiej tworzy się jego struktura.

Przedstawiony mechanizm powstawania naprężeń termicznych nie wyczerpuje w pełni przypadków występujących podczas realizacji konstrukcji, jak np. wpływ utwardzenia elementu w podstawie, czy złożone procesy zachodzące w konstrukcjach zespolonych.

Zmiany termiczno objętościowe mają już bogatą literaturę zarówno dotyczącą rozwiązań teoretycznych problemu jak i obserwacji na rzeczywistych konstrukcjach, do najważniejszej można zaliczyć prace np. Bażanta, Boruckiej-Lipskiej, Elbadry, Ghali, Flagi, Godyckiego-Ćwirko, Kaszyńskiej, Kiernożyckiego, Nevilla, Witakowskiego [10÷18, 30÷31, 24÷26, 41÷42, 45÷56, 59, 62, 65, 83÷95, 123, 174÷176, 189]. Pomimo licznych publikacji nie wszystkie problemy zostały ostatecznie wyjaśnione, a w związku z rozwojem technologii betonu i wprowadzeniu do budownictwa betonów wysokowartościowych istnieje potrzeba uzupełnienia bazy danych doświadczalnych.

Inspiracją do podjęcia przedmiotowej tematyki była budowa w Polsce obiektów mostowych z betonów klas dużo wyższych od normalnie stosowanych np. B60, w których występowały masywne elementy betonowe. Wykonanie tych elementów (np. stóp fundamentowych pylonów) wymagało zastosowania niestandardowych sposobów pielęgnacji betonów jakościowo innych od wykorzystywanych w elementach cienkościennych.

Przedmiotem niniejszej pracy jest zatem, badania i analiza niejednorodnych pól temperatury powstałych w wyniku zachodzących przemian strukturalnych w dojrzewającym betonie. W szczególności zainteresowania autora dotyczą betonów klas B30 i wyższych.

Obszar zainteresowań obejmuje opracowanie metody badań, wykonanie badań na rzeczywistych elementach konstrukcji mostowych w trakcie ich realizacji, weryfikację obecnie stosowanych technologii oraz wykonanie analizy wpływu wybranych czynników, wpływających na wartości pól temperatury w dojrzewającym betonie.

1.2. Cel i zakres pracy

Celem pracy jest:

- opracowanie metody pomiaru temperatury dojrzewającego betonu, w dużej liczbie punktów elementu,
- poszerzenie bazy danych doświadczalnych rozkładu temperatur, wywołanych ciepłem hydratacji w masywnych betonowych elementach mostowych, wykonywanych z różnych betonów i pielęgnowanych w rozmaity sposób,
- analiza parametryczna wpływu wybranych czynników materiałowych i technologicznych na wartości temperatur w wybranych elementach.

Dane doświadczalne zostały zebrane w czasie realizacji konstrukcji mostowych wykonywanych z betonu produkowanego na skalę przemysłową.

Zakres pracy został ograniczony do:

- pomiarów rozkładu temperatury elementów obiektów mostowych w czasie ich realizacji,
- przedstawienia podstawowych równań teorii wymiany ciepła,
- analizy parametrycznej,
- wniosków.

1.3. Tezy pracy

Sformułowano następujące tezy pracy:

- W konstrukcjach wykonanych z betonu mogą występować, w procesie jego dojrzewania, temperatury o wartościach do 80°C i znaczne gradienty temperatur, co powinno być uwzględnione w projektowaniu składu mieszanki betonowej, technologii betonowania oraz w doborze sposobu pielęgnacji betonu.
- Możliwe jest wykonanie masywnych konstrukcji z betonów klas wysokich z zachowaniem ich monolityczności.
- Znaczne obniżenie najwyższych temperatur i gradientów temperatury można osiągnąć stosując specjalny skład mieszanki betonowej, technologię jej układania oraz odpowiednie do warunków metody pielęgnacji.

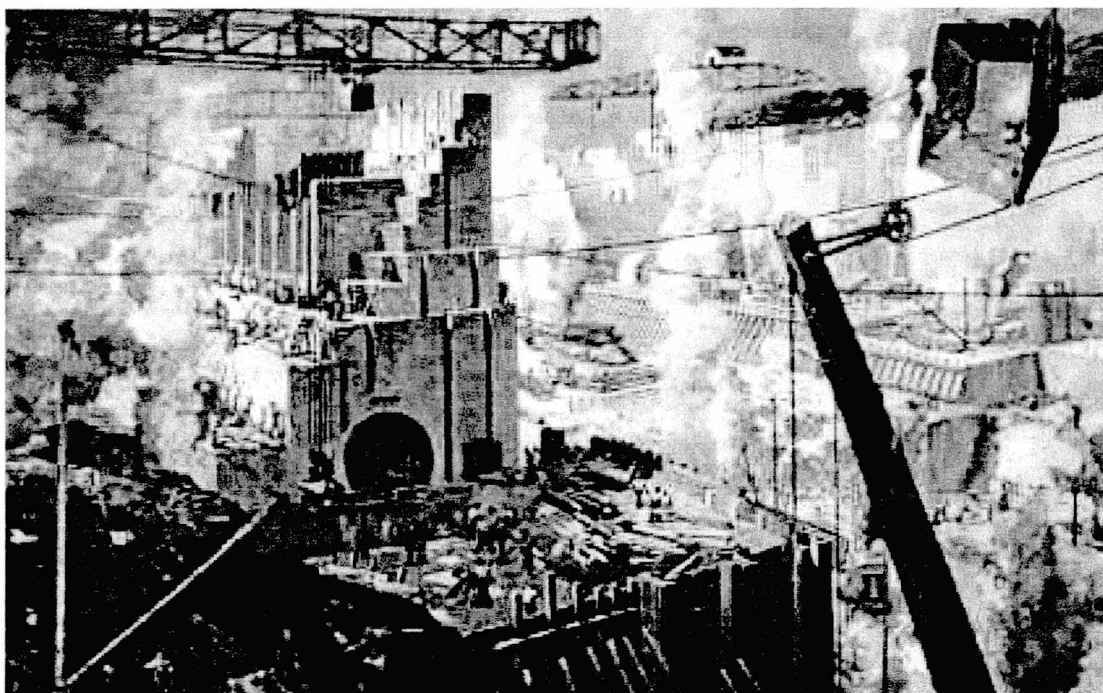
1.4. Wykaz stosowanych oznaczeń

$Q(t)$	[J/g]	- ciepło hydratacji,
$W(t)$	[W/g]	- funkcja źródeł, proces wydzielania ciepła,
q_v	[W/m ³]	- gęstość ciepła (np. ciepło hydratacji cementu w betonie),
q_p	[W/m ²]	- ciepło doprowadzone lub odprowadzone z powierzchni elementu,
t	[s]	- czas,
T	[⁰ C]	- temperatura,
ρ	[kg/m ³]	- gęstość objętościowa,
$\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}, \frac{\partial T}{\partial z}$		- składowe gradientu temperatury (wektor),
λ	[W/(m · ⁰ C)]	- współczynnik przewodzenia ciepła,
c	[J/(kg · ⁰ C)]	- ciepło właściwe,
α_k	[W/(m ² · ⁰ C)]	- współczynnik konwekcji, powierzchniowy współczynnik przejmowania ciepła,
F	[m ²]	- powierzchnia ciała.

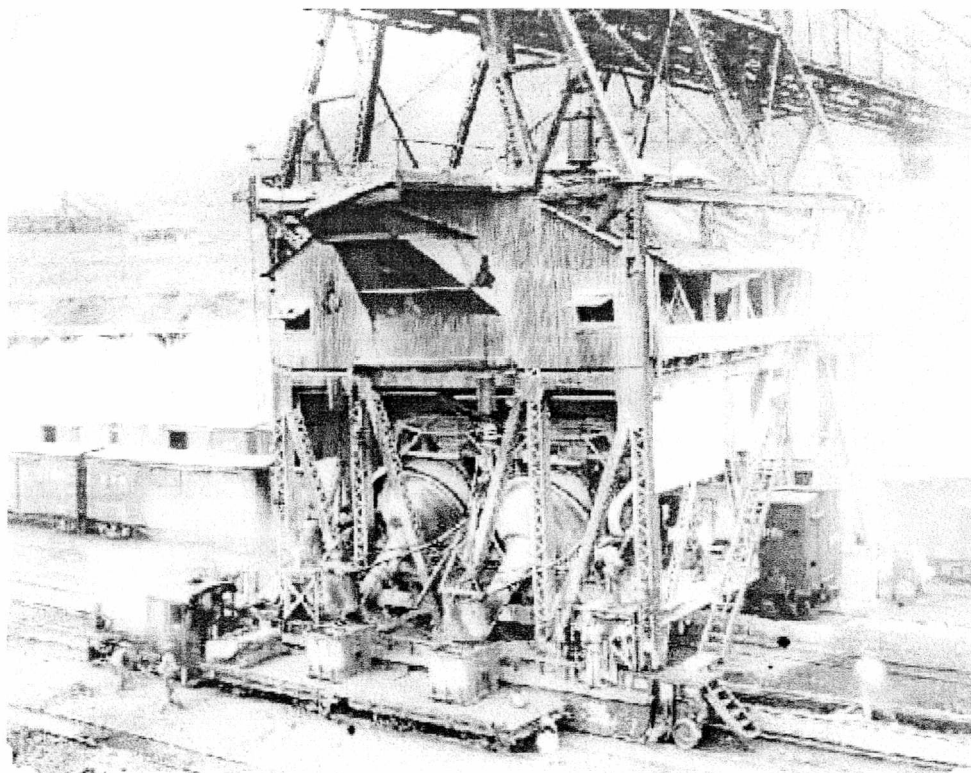
2. DOTYCHCZASOWY STAN WIEDZY

2.1. Rys historyczny

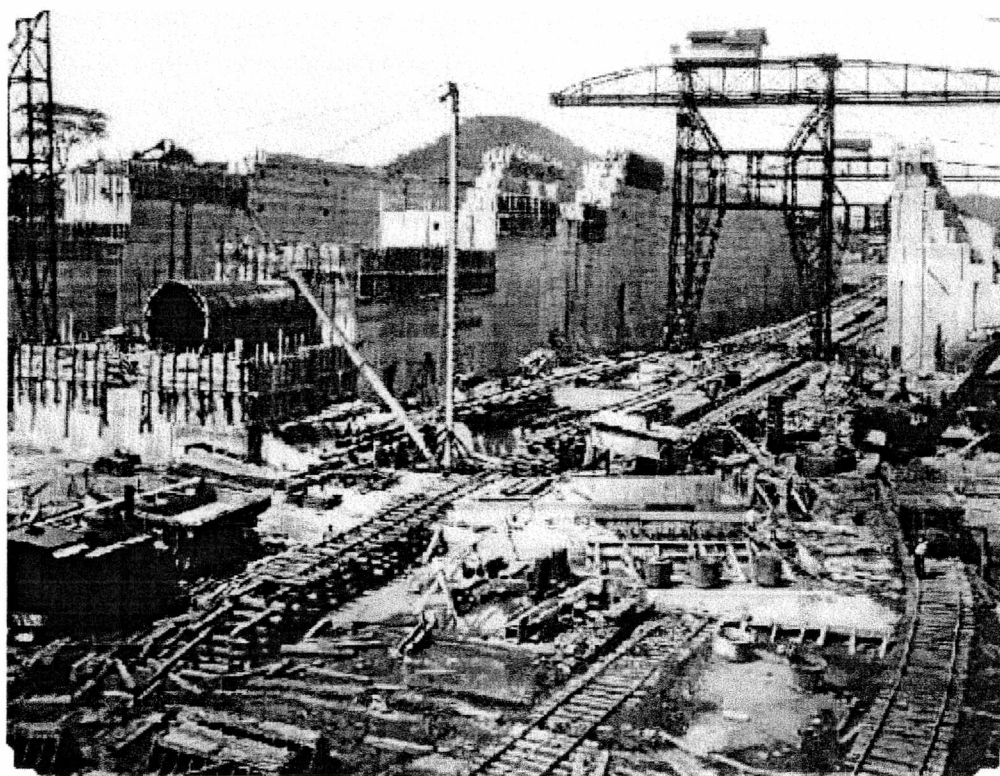
Problem generacji samonaprężeń wywołanych ciepłem hydratacji w konstrukcjach betonowych pojawił się na początek XX wieku. W okresie tym rozwija się budownictwo hydrotechniczne, w którym podstawowe konstrukcje są wykonywane głównie z betonu. Między innymi w (1879 ÷ 1914) powstaje Kanał Panamski (rys. 2.1 ÷ rys. 2.4). Zastosowana podczas budowy technologia szybkiego transportu betonu na miejsce jego wbudowania spowodowała, że wcześniej mające niewielkie znaczenie zjawisko ciepła hydratacji, stało się przyczyną powstawania rys termicznych we wznoszonych betonowych ścianach oporowych kanału. Zaistniała sytuacja zmusiła inżynierów wznoszących kanał do szybkiej zmiany technologii betonowania masywnych elementów kanału polegającej na podziale wykonywanych elementów na segmenty, betonowane w ściśle określonej kolejności. Wykorzystanie tej technologii zostało udokumentowane na archiwalnych fotografiach (rys. 2.1 ÷ rys. 2.4).



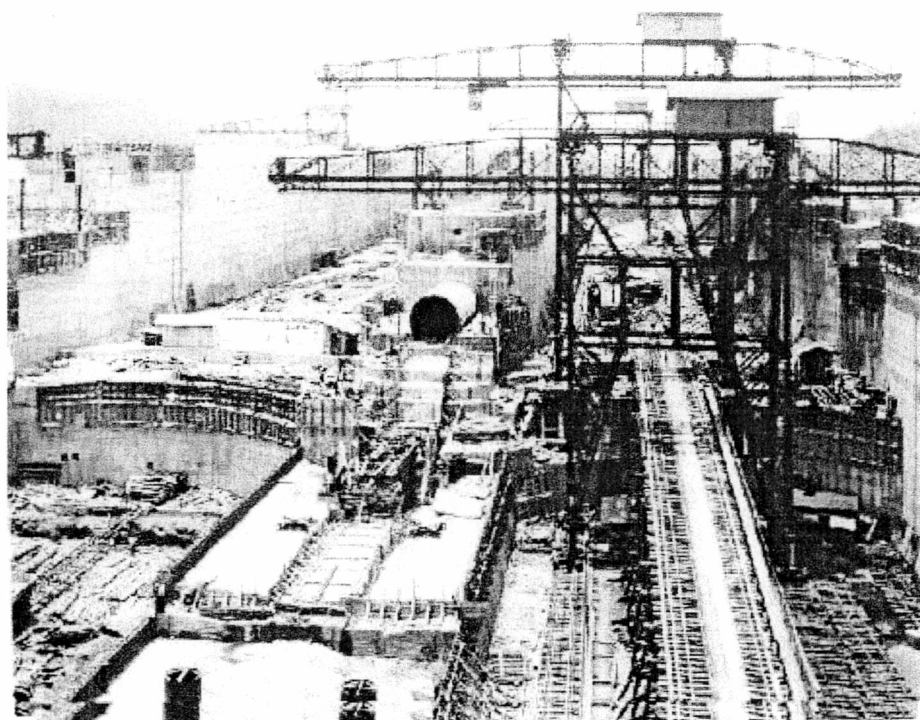
Rys. 2.1. Fragment obrazu Van Ingensa ukazujący jeden z wielu odcinków placu budowy Kanału Panamskiego. Obraz w kształcie rotundy znajduje się w Panama Canal Administration Building, Balboa Heights [74]



Rys. 2.2. Jeden z wielu zastosowanych węzłów betoniarskich wykorzystywanych podczas budowy Kanału Panamskiego. Obiekt zlokalizowany był przy wrotach Pedro Miguel, fotografia pochodzi z roku 1910 roku [74]



Rys. 2.3. Fragment odcinka budowy Kanału Panamskiego. Wznoszenie ścian oporowych przy wrotach Pedro Miguel. Widok od północnej strony, fotografia z 1910 roku [74]



Rys. 2.4. Fragment odcinka budowy Kanału Panamskiego. Wznoszenie ścian oporowych przy wrotach Miraflores. Widok od północnej strony, fotografia z 1912 roku [74]

Pierwsze badania eksperymentalne w obszarze przedmiotowej problematyki pojawiają się już na początku lat dwudziestych XX wieku, wykonane przez Contessiniego na zaporze Cignana. W okresie tym rozwija się technika pomiarowa związana z pomiarem temperatury, odkształceń oraz wykrywania rys w betonie, wywołanych ciepłem hydratacji. Lata dwudzieste uważane są również za okres rozwoju badań laboratoryjnych mających na celu poznanie istotnych dla stanu naprężenia termicznego własności materiałowych. Kolejne lata badań przynoszą szereg prac z zakresu:

- badań doświadczalnych wykonanych na rzeczywistych elementach,
- teorii przewodnictwa ciepła oraz liniowej teorii naprężeń termicznych,
- badań laboratoryjnych.

W kolejnych latach, w wymienionych wyżej obszarach badań w wielu krajach, szczególnie w byłym ZSRR, USA, Niemczech, Francji, Danii, Szwecji, oraz Japonii, powstaje szereg publikacji np. [6, 27, 28, 60, 71, 117, 151, 158, 168, 179] związanych z istotą problemu. Pierwsze doświadczalne prace dotyczyły pomiaru temperatury wewnątrz konstrukcji wielkich zapór wodnych. Wykonane badania dostarczyły wielu danych i pozwoliły na wysunięcie szeregu wniosków i uogólnień, będących podwaliną dzisiejszej wiedzy

w tej dziedzinie. Początek lat trzydziestych przynosi pierwsze prace teoretyczne, dotyczące opisu niestacjonarnych pól temperatur w masywnych konstrukcjach wielkich zapór. W znacznej mierze prace te dotyczyły zastosowania teorii dyfuzji do opisu niestacjonarnych pól temperatur w masywnych konstrukcjach wielkich zapór. Na uwagę zasługują prace R.W. Carlson [27], R.E. Glover [60] oraz D. MacHenry'ego [117], w których znaleźć można rozważania dotyczące przepływu ciepła w masywach betonowych oraz weryfikację wyników analiz teoretycznych pola temperatury wewnątrz zapory oraz związku pola temperatury w betonie z naprężeniami.

W drugiej połowie lat czterdziestych pojawiają się monografie poświęcone przewodnictwu ciepła w ciałach stałych Carslaw i Jaeger [28] oraz Hirschfelda [71]. W latach po wojennych G.N. Masłow i N.C. Arutiunian rozwijają teorię pęcznienia betonu: teoria dziedziczności, teoria starzenia i teoria pęcznienia ciała sprężystego, głównie poświęcone zagadnieniu narzuconych odkształceń objętościowych stwardniałego betonu. W latach pięćdziesiątych ukazało się szereg prac, zwłaszcza badaczy skandynawskich, ukazujących zależność postępu hydratacji cementu od temperatury [158].

Lata sześćdziesiąte przynoszą prace badaczy amerykańskich np. Townsenda [168] oraz radzieckich: Prokopowicza [151], Aleksandrowskiego [6] i Zporożca, Okorokowa, Parijskiego [179], w których zawarto pewne podsumowanie doświadczeń praktycznych i naukowych dotyczących rejestracji niestacjonarnych pól temperatury dojrzewającego betonu, oraz wpływu niestacjonarnych pól temperatury na naprężenia termiczne w masywach betonowych. W okresie tym pojawiają się pierwsze zalecenia i normy poświęcone projektowaniu masywnych konstrukcji betonowych. Na podkreślenie zasługuje wprowadzona w 1961 roku radziecka norma SN-123-60 [153], dotycząca warunków technicznych projektowania betonowych ciężkich zapór na podłożu skalnym. W pracy [153] znaleźć można szereg wzorów pozwalających na ustalenie wartości wymuszonych naprężeń termicznych u podstawy zapory. W roku 1965 i 1970 ukazują się kolejne opracowania powyższej normy. Podobne zalecenia ukazują się w USA, Japonii, Niemczech oraz Polsce, jako normy branżowe [125 ÷ 129]. Ogólnie uważa się, że lata sześćdziesiąte przyniosły pogłębienie rozpoznania problemu, odsłaniając złożoność zjawisk zachodzących podczas dojrzewania betonu.

W kolejnych latach pojawia się szereg nowych prac poświęconych temu problemowi zarówno w kraju jak i za granicą, można tu wymienić następujące ważniejsze prace [24÷26, 45÷58, 83÷95, 107÷109, 118, 123, 147÷148, 174÷176, 189] w których zawarto analizę i pewne podsumowanie stanu wiedzy z danej dziedziny.

2.2. Wpływ poszczególnych czynników na pola temperatury w dojrzewającym bloku

Zebrany materiał badawczy z wykonanych badań własnych i zdobyte przy tym doświadczenie wraz z bogatą już literaturą [30÷31, 44, 62, 86÷87, 93, 95, 104, 106, 123, 148, 175÷176], dotyczącą technologii wykonywania betonowych elementów masywnych, stanowić może podstawę do sformułowania ogólniejszych ocen i wniosków. Ocenę tę sformułowano biorąc pod uwagę czynniki analizowane w badaniach własnych oraz będące przedmiotem badań obcych, opisanych w literaturze. W szczególności analizowano:

- a) skład mieszanki betonowej;
 - optymalizacja ilości cementu,
 - zastosowanie cementu niskokalorycznego,
 - wpływ domieszek i dodatków,
 - rodzaj kruszywa w betonie,
- b) technologie betonowania; wpływ betonowania w okresie wiosny lub jesieni,
- c) technologie pielęgnacji; wpływ izolacji termicznej.

W przeprowadzonej analizie nie omówiono czynników mających również wpływ na temperaturę dojrzewającego betonu, takich jak;

- a) obniżenie temperatury mieszanki betonowej poprzez;
 - ochłodzenie jej poszczególnych składników (kruszywo, cement i wodę) [93, 123],
 - zastąpienie części wody zarobowej kruszonymi kawałkami lodu, [93, 123, 167],
 - ochłodzenie mieszanki betonowej zaraz po jej wymieszaniu, np. ciekłym azotem [93, 106, 123],
- b) chłodzenie wewnętrzne elementu za pomocą systemu rur z przepływającą wodą [44, 91, 93, 123, 189] lub powietrzem [106],
- c) podział elementu na bloki betonowane w ściśle określonej kolejności i określonym czasie, (etapowania betonowania) [87, 93, 175, 189].

2.2.1. Optymalizacja ilości cementu

Zmniejszenie ilości cementu w mieszance betonowej jest jednym ze środków zaradczych, prowadzącym do obniżenia temperatury dojrzewającego betonu [86, 93, 123, 175]. Możliwe jest to, do osiągnięcia, dla wcześniej założonej klasy betonu i przy spełnieniu wszystkich wcześniej założonych wymogów normowych (nasiąkliwość max 4%, F150, W8).

Przykładem modyfikacji zaprojektowanej receptury na beton, w której zmniejszono ilość cementu, jest receptura betonu klasy B60, którą wykorzystano do wykonania elementów konstrukcyjnych Estakady we Wrocławiu w rejonie Gądowa [72].

Receptura na betonu klasy B60 zaprojektowana była przez Instytut Badawczy Dróg i Mostów (IBDiM), Filia Wrocław w Pracowni Betonu i Kruszywa. Receptura ta spełniała założone warunki normowe tj. nasiąkliwość max 4%, F150, W8. Średnia wytrzymałość 28 dniowa betonu na ściskanie wynosiła 70.3 MPa. Do wykonania betonu wybrano betoniarnię Th-beton Polska. Po otrzymaniu receptury na beton klasy B60, postanowiono tam zmodyfikować wcześniej zaprojektowaną mieszankę. Ostatecznie zmniejszona została ilość cementu z 450 kg/m³ do 420 kg/m³, czyli o 7% mniej w 1 m³ mieszanki betonowej, niż w pierwotnej recepturze (patrz tablica 2.1, 3.1). Zmianie uległo również kruszywo, jego rodzaj (rodzaj skały) oraz jego frakcja. Zmodyfikowana receptura na beton klasy B60, spełniała wszystkie wcześniej założone warunki normowe, tj. nasiąkliwość max 4%, F150, W8. Beton wykonany według nowej receptury miał wyższą średnią wytrzymałość 28 dniową na ściskanie, wynoszącą 75.4 MPa, niż beton wykonany według receptury wstępnej (przed jej modyfikacją), którego wytrzymałość wynosiła 70.3 MPa. Ostatecznie do wykonania elementów konstrukcyjnych Estakady Gądów przyjęto zmodyfikowaną mieszankę betonową.

Tablica 2.1. Receptury na beton klasy B60 *

KLASA BETONU	B60 (IBDiM)	B60 (Th-beton Polska) Ostatecznie wybrana
Zastosowanie	na ustroje nośne estakad głównych i łącznic	
Cement „WARTA” CEM I MSR 42.5 NA	450,00 kg/m ³	420,00 kg/m³
Woda, - B60 (IBDiM) w/c=0.37, w/s=0.35 - B60 (th-beton) w/c=0.37, w/s=0.35	166,50 kg/m ³	155,00 kg/m³
Piasek 0/2 mm	597,00 kg/m ³	687,00 kg/m³
Grys granitowy 2/8 mm	597,00 kg/m ³	—————
Grys granitowy 8/16 mm	615,00 kg/m ³	—————
Grys bazaltowy 5/8 mm	—————	481,00 kg/m³
Grys bazaltowy 11/16 mm	—————	763,00 kg/m³
Superplastyfikator ViscoCrete 5	0,7% m.c.=3,15 kg/m ³	0,9% m.c.= 3,78 kg/m³
Mikrokrzemionka	27,0 kg/m ³	18,0 kg/m³

*) Wymagania dodatkowe odnośnie wykonanych betonów; nasiąkliwość max 4%, F150, W8.

Przykładem ilustrującym wpływ ilości cementu w mieszance betonowej, na temperatury wewnętrzne dojrzewającego betonu, jest wykonanie ław fundamentowych Mostu Milenijnego, oraz fundamentu kotłowni pod nowy blok Elektrowni Pątnów II [30÷31]. Wymiary geometryczne fundamentu kotłowni wynosiły $46 \times 46 \times 3.5$ m. Obydwie konstrukcje wykonane były na bazie tego samego cementu hutniczego „Strzelce Opolskie” CEM III/A 32.5 NA.

Tablica 2.2. Receptury mieszanek betonowych wykorzystanych do wykonania ław fundamentowych Mostu Milenijnego we Wrocławiu i fundamentów Elektrowni Pątnów II *

Most Milenijny we Wrocławiu beton klasy B35	kg/m³	Elektrownia Pątnów II beton klasy B30 [154]	kg/m³
Cement hutniczy „Strzelce Opolskie” CEM III/A 32.5 NA	375,00	Cement hutniczy „Strzelce Opolskie” CEM III/A 32.5 NA	300,00
Woda (w/c=0.46)	172,00	Woda (w/c=0.52)	155,00
Piasek 0/2 mm (Mietków)	668,00	Piasek 0/2 mm (Halinów)	663,00
Grys granitowy 5/8 mm (Graniczna)	535,00	Żwir 2/8 mm (Rakowice)	427,00
Grys granitowy 8/16 mm (Graniczna)	707,00	Żwir 8/16 mm (Rakowice)	358,00
Superplastyfikator Sikament 400/30 (SIKA)	6,00	Żwir 16/31,5 mm (Wójcice)	409,00
		Popiół lotny EC2 Karolin, Poznań	55,00
		Plastyfikator BVT 99 (0,66 % masy cementu)	1,95
		Superplastyfikator FM 34 (0,8 % masy cementu)	2,40

*) Wymagania dodatkowe odnośnie wykonanych betonów; nasiąkliwość max 4%, F150, W8.

Maksymalna temperatura dojrzewającego betonu ław fundamentowych Mostu Milenijnego nie przekroczyła $T_s = 61$ °C. Była zbliżona do temperatury, jaką pomierzyli w trakcie badań (Czkwianianc, Pawlica, Moszczyński [30÷31]), przeprowadzonych na fundamencie kotłowni Elektrowni Pątnów II ($T_s = 59,6$ °C).

Na uwagę zasługuje kilka istotnych czynników, które wpłynęły na wartości temperatur wewnętrznych w obydwu fundamentach, takich jak;

- temperatura powietrza podczas betonowania fundamentu kotłowni Elektrowni Pątnów II była wyższa (w dzień $T_0 = 20$ °C ÷ 30 °C, w nocy nie mniej niż $T_0 = 12$ °C) niż podczas betonowania ław fundamentowych Mostu Milenijnego (w dzień $T_0 = 12$ °C, w nocy nie mniej niż $T_0 = 5$ °C),
- wbudowywana mieszanka betonowa do fundamentu kotłowni Elektrowni Pątnów II miała temperaturę wyższą ($T_m = 23.1$ °C) od mieszanki betonowej wbudowywanej do ław fundamentowych Mostu Milenijnego ($T_m = 13$ °C),

- średnia dobową temperaturę powietrza podczas dojrzewania betonu fundamentu kotłowni Elektrowni Pątnów II wynosiła $T_z = 23.1^{\circ}\text{C}$ a ław Mostu Milenijnego $T_z = 7^{\circ}\text{C}$ i 11°C ,
- warstwa izolacji termicznej (styropian) na zewnętrznych powierzchniach fundamentu kotłowni Elektrowni Pątnów II miała grubość 20 cm a ław Mostu Milenijnego 10 cm.

Wszystkie przedstawione czynniki wpłynęły na zbliżoną temperaturę wewnętrzną dojrzewającego betonu w obydwu fundamentach.

Widać, że mimo większej ilości cementu w betonie fundamentu Mostu Milenijnego, z uwagi na wpływ wyższej temperatury mieszanki betonowej oraz wpływ wyższej temperatury powietrza w trakcie dojrzewania betonu fundamentu kotłowni Elektrowni Pątnów II, uzyskano podobne temperatury wewnętrzne w obu fundamentach.

2.2.2. Zastosowanie cementu niskokalorycznego

Obniżenie temperatury wewnętrznej dojrzewającego betonu jest możliwe, poprzez zastosowanie cementu o niskim cieple hydratacji [30÷31, 44, 62, 86÷87, 93, 104, 175].

Na podkreślenie zasługują prace Kiernożyckiego [87, 93], w których na wybranych przykładach badań własnych, przeprowadzonych w kraju i zagranicą, Autor prezentuje efekty różnych zabiegów technologicznych, mających na celu obniżenie temperatury dojrzewającego betonu, w celu uzyskania wysokiej jakości betonu wznoszonych konstrukcji. W pracy Autor podaje wskazówki, co do rodzaju cementu, jak i jego składu mineralogicznego. Z pośród cementów stosowanych w kraju jak i zagranicą Autor wyróżnia; cementy hydrotechniczne, cementy portlandzkie charakteryzujące się małym udziałem krzemianu trójwapniowego C_3S i glinianu trójwapniowego C_3A w składzie mineralogicznym i umiarkowanym stopniu rozdrobnienia, cementy hutnicze, cementy pucolanowe, cementy hutnicze z dodatkami pucolan, jako właściwe do wykonania elementów masywnych. W pracy autor wskazuje rodzaj użytego spoiwa cementowego jako zasadniczy wpływ na temperaturę dojrzewającego betonu.

Przykładem zastosowania cementu o niskim cieple hydratacji, jest wykonanie betonu ław fundamentowych Mostu Milenijnego we Wrocławiu (patrz p. 3.7 i rys. 3.33). Ławy zostały wykonane z betonu klasy B35. W skład mieszanki betonowej wchodził cement hutniczy CEM III/A 32,5N - LH/NA/HSR „Strzelce Opolskie”, w ilości 375 kg w 1 m^3 betonu (patrz tablica 3.6), charakteryzujący się niskim ciepłem hydratacji, wynoszącym po trzech dniach $Q_{3\text{dzień}}(\text{metodą semiadiabatyczną}) = 217\text{ J/g}$ i po siedmiu dniach $Q_{7\text{dzień}}(\text{metodą semiadiabatyczną}) = 265\text{ J/g}$. Maksymalna wewnętrzna temperatura dojrzewającego betonu ław fundamentowych nie przekroczyła $T_{\xi} = 61^{\circ}\text{C}$.

Dla porównania, filary Estakady Gądów (patrz p. 3.3 i rys.3.4, 3.5) wykonane zostały z betonu klasy B30, w którego skład wchodził cement portlandzki CEM I MSR NA 42,5 „Warta”, w ilości 360 kg w 1 m³ betonu. Ciepło hydratacji tego cementu po trzech dniach wynosiło $Q_{3\text{dzień}} \text{ (metodą semiadiabatyczną)} = 272 \text{ J/g}$ a po siedmiu dniach $Q_{7\text{dzień}} \text{ (metodą semiadiabatyczną)} = 318 \text{ J/g}$. Maksymalna wewnętrzna temperatura dojrzewającego betonu filarów wyniosła $T_s = 72^\circ\text{C}$.

Na przykładzie obydwu elementów widać, że mimo zbliżonej zawartości cementu w 1 m³ betonu, z uwagi na wpływ wyższej kaloryczności cementu „Warta” CEM I MSR NA 42,5 niż cementu „Strzelce Opolskie” CEM III/A 32,5N - LH/NA/HSR, w filarach wystąpiły znacznie wyższe wartości temperatur. Należy podkreślić, że na temperatury wewnętrzne w obydwu elementach miały wpływ również inne czynniki takie jak; geometria betonowanej konstrukcji, technologia betonowania (termiczne warunki początkowe) i technologia pielęgnacji (termiczne warunki brzegowe).

Przykłady zastosowania cementu o niskim cieple hydratacji wraz z podaniem maksymalnej temperatury wewnętrznej dojrzewającego betonu i czasu jej wystąpienia od zakończenia betonowania, zestawiono w tablicy 2.3.

Tablica 2.3. Przykłady zastosowania cementu hutniczego do wykonania masywnych elementów betonowych

Element	Czas	Temperatura
Fundament płytowy wieży Bazyliki Licheńskiej [62] (betonu klasy B35) wykonany na bazie cementu hutniczego „Strzelce Opolskie” CEM III/A 32,5N - LH/NA/HSR. Grubość fundamentu wynosiła 3.0 m a powierzchnia 400 m ² .	po 69 [h]	$T_{\text{max}} = 52,6^\circ\text{C}$
Elementy konstrukcyjne pochylni Wulkan Nowy, Stoczni Szczecińskiej [104]. Belka progowa, betonu klasy B35 (360 kg/m ³ cementu). Płyta denna pochylni wykona z trzech mieszanek betonowych; beton klasy B25 (warstwa górna i dolna), B15 (warstwa środkowa). Warstwa dolna 258 kg/m ³ cementu, warstwa środkowa 157 kg/m ³ cementu, warstwa górna 325 kg/m ³ cementu. Zastosowany cement; cement hutniczy „Strzelce Opolskie” CEM III/A 32,5N - LH/NA/HSR. Elementy różniły się gabarytami i metodą układania mieszanki betonowej.		
- belka progowa pochylni o wysokości $h=2.2\text{m}$,	po 43 [h]	$T_{\text{max}}=45,0^\circ\text{C}$,
- płyta denna pochylni o zmiennej wysokości $h=1.0 \div 2.1 \text{ m}$.	po 140 [h]	$T_{\text{max}}=60,0^\circ\text{C}$

c.d. Tablica 2.3.

Element	Czas	Temperatura
Fundamenty bloku energetycznego Elektrowni Pątnów II [30÷31]. Do wykonania fundamentów zastosowano beton klasy B25 i B30, wykonane na bazie cementu hutniczego „Strzelce Opolskie” CEM III/A 32,5N - LH/NA/HSR. Beton klasy B30 zawierał 300 kg/m ³ cementu.		
- fundament Fk1, Fk2, (beton klasy B30), o wymiarach (5.0 × 10.0 × 2.5 m),	po 72 [h]	T _{max} =45,1 ⁰ C
- fundament bunkrowni 1, (beton klasy B30), o wymiarach (15.75 × 36.0 × 1.8 m),	po 55 [h]	T _{max} =50,1 ⁰ C
- fundament bunkrowni 2, (beton klasy B30), o wymiarach (15.75 × 36.0 × 1.8 m),	po 55 [h]	T _{max} =43,8 ⁰ C
- fundament pylonu 1, (beton klasy B30), o wymiarach (16.0 × 25.1 × 2.5 m),	po 72 [h]	T _{max} =55,9 ⁰ C
- fundament pylonu 2, (beton klasy B30), o wymiarach (16.0 × 25.1 × 2.5 m),	po 72 [h]	T _{max} =50,1 ⁰ C
- fundament kotłowni, (beton klasy B30), o wymiarach (46.0 × 46.0 × 3.50 m),	po 84 [h]	T _{max} =59,6 ⁰ C
- fundament maszynowni. (beton klasy B25), o wymiarach (14.0 × 39.84 × 3.0 m),	po 72 [h]	T _{max} =52,2 ⁰ C

2.2.3. Wpływ domieszek i dodatków

Wprowadzenie do mieszanki betonowej dodatków i domieszek poprawiających pewne wybrane cechy mieszanki lub stwardniałego betonu w istotny sposób wpływa na całkowitą ilość wydzielonego ciepła i szybkość hydratacji. Szczególnie istotny wpływ dodatków i domieszek ujawnia się w betonach wysokowartościowych i betonach wysokiej wytrzymałości, różniących się od betonów zwykłych [26, 78, 93, 123, 139] między innymi;

- wyższą wytrzymałością wczesną (początkową),
- wyższą wytrzymałością po 28 dniach (do 200 MPa),
- wysokim modułem sprężystości,
- niską przepuszczalnością i wysokim oporem dyfuzyjnym,
- wysoką trwałością i wydłużoną eksploatacją w środowisku agresywnym,
- wysoką odpornością na korozję chemiczną,
- wysoką mrozoodpornością i odpornością na łuszczenie pod wpływem soli odładzających,
- wysoką odpornością na ścieranie,
- stałością objętościową,

- łatwością układania,
- możliwością zagęszczenia bez segregacji.

W zależności od oczekiwanych potrzeb, osiągnięcie powyższych cech jest możliwe, poprzez zastosowanie odpowiedniego doboru składu i proporcji materiałów wchodzących w skład mieszanki betonowej, oraz właściwej pielęgnacji młodego betonu [84, 93, 123, 175, 189]. Projektowaniu oraz właściwościom betonów wysokowartościowych poświęcono wiele prac, np. [5, 22, 26, 78, 84, 89, 92, 123, 139 155÷156]. Z tego względu nie wydaje się konieczne przedstawienie całości zagadnienia a jedynie wybranych elementów dotyczących bezpośrednio problematyki niniejszej pracy.

Skład mieszanki betonów wysokowartościowych charakteryzuje:

- wysoka zawartość cementu (cement portlandzki, cement pucolanowy, cement hutniczy) w ilości ($400\div550\text{ kg/m}^3$ [78], $450\div550\text{ kg/m}^3$ [123], $350\div500\text{ kg/m}^3$ [139]),
- wyższa niż w betonach zwykłych zawartość dodatków w postaci naturalnych lub sztucznych puculan; prażona glina, metakaolin, popioły lotne (do 45% całej masy spoiwa [123], $40\div50\%$ [147]), mielony granulowany żużel wielkopiecowy (do 35 % w cemencie portlandzkim żużlowym [93], do 95 % w cemencie hutniczym), prażony łupek przywęglowy i szczególnie wysoko reaktywna mikrokrzemionka ($7\div20\%$ [78], dla cementów klasy ≥ 42.5 powinna wynosić $8\div10\%$ [78] masy całego spoiwa, $5\div15\%$ [123], $10\div25\%$ [147], $6\div8\%$ [154] masy cementu),
- zawartość domieszek; kompatybilne z cementem plastyfikatory lub superplastyfikatory ($5\div15$ litrów na 1m^3 betonu [123, 139] lub $1\div1.5\%$ masy cementu [154]), upłynniacze, domieszki kontrolujące hydratację, opóźniacze, przyspieszacze, inhibitory korozji, środki zmniejszające skurcz, inhibitor ASR kontrolujący reakcję alkaiczno krzemionkową, oraz modyfikatory polimerowo lateksowe podnoszące trwałość betonu,

Złożoność wpływów poszczególnych dodatków i domieszek wchodzących w skład betonów wysokowartościowych wymaga szerszego omówienia niektórych z nich, mających istotny wpływ na wydzielanie ciepła hydratacji.

Do najczęściej stosowanych domieszek pucolanowych stosowanych przy wykonaniu betonów wysokowartościowych można zaliczyć mikrokrzemionkę i popioły lotne.

Mikrokrzemionka, pył krzemionkowy, skondensowana krzemionka lub mikrowypełniacz są to nazwy przemysłowe bardzo reaktywnej pucolany sztucznej, będącej produktem ubocznym otrzymywanym podczas produkcji krzemu, stopów żelazokrzemu, stopów

krzemu w piecach łukowych [123, 154]. Mikrokrzemionka składa się głównie z dwutlenku krzemionki (SiO_2), której zawartość uzależniona jest od wytapianego stopu, im wyższa jest zawartość krzemu w stopie tym wyższa jest zawartość dwutlenku krzemionki w pyłe krzemionkowym. Zawartość dwutlenku krzemionki w pyłe krzemionkowym waha się od 85÷98 %, (inne materiały pucolanowe zawierają do 55% dwutlenku krzemionki) [123, 154]. Dwutlenek krzemionki występuje w formie krystalicznej lub bardziej aktywnej formie bardzo drobnych sferycznych cząstek amorficznych (szklistych). Gęstość pyłów krzemionkowych uzależniona jest od zawartości dwutlenku krzemionki w pyłe krzemionkowym i wynosi na ogół 2.20 g/cm^3 . Średnie wymiary cząstek pyłów krzemionkowych nie przekraczają $0.1 \mu\text{m}$ (100 razy mniejsze od cząstek cementu), a powierzchnia właściwa wynosi $20\,000 \text{ m}^2/\text{kg}$ i jest 13÷20 razy większa od innych materiałów pucolanowych. Jako produkt handlowy mikrokrzemionka jest dostępna w postaci zagęszczonej jako mikrogranulki, stanowiące aglomeraty pojedynczych cząstek o gęstości nasypowej od $500 \div 700 \text{ kg/m}^3$, lub szlamu o różnej zawartości wody oraz pyłów krzemionkowych. Gęstość szlamu waha się od $1300 \div 1400 \text{ kg/m}^3$.

Mikrokrzemionka dzięki swojej bardzo drobnej strukturze (mniejsze cząstki zwiększają reaktywność mikrokrzemionki) i właściwościom chemicznym, reaguje z dużą szybkością w temperaturze normalnej z wodorotlenkiem wapnia Ca(OH)_2 powstającym podczas hydratacji cementu portlandzkiego, tworząc w obecności wody trwałe hydrokrzemiany wapnia mające właściwości wiążące. Dodatkowo dzięki skrajnemu rozdrobnieniu pyłu krzemionkowego stanowiącego zarodki krystalizacji dla wodorotlenku wapnia, mikrokrzemionka w sposób fizyczny przyczynia się do przyspieszenia hydratacji cementu prowadząc do wczesnego przyrostu wytrzymałości betonu oraz intensywniejszego wydzielania się ciepła [123]. Przyspieszenie hydratacji pyłów krzemionkowych w mieszance może być wywołane dodatkową zawartością żużla. Stwierdzono, że gdy masa pyłów krzemionkowych wynosi 10 % całej masy spoiwa, połowa pyłów krzemionkowych ulega reakcji w ciągu pierwszego dnia a $2/3$ w ciągu trzech pierwszych dni hydratacji. Późniejsza reakcja przebiega bardzo wolno i tylko $3/4$ krzemionki ulega hydratacji w ciągu 90 dni [123]. Konsekwencją szybkiej reakcji pyłów krzemionkowych z wodorotlenkiem wapnia Ca(OH)_2 jest szybsze zużycie wody zaabsorbowanej wywołujące samosuszenie się mieszanki prowadzące do spowolnienia hydratacji a nawet po dłuższym okresie czasu zatrzymania rozwoju wytrzymałości [123].

Popioły lotne, popioły dymnicowe są to nazwy przemysłowe najbardziej pospolitej pucolany sztucznej, wytrącaniej mechanicznie lub elektrostatycznie z gazów spalinowych

w elektrowniach opalanych węglem [123]. W skład popiołów lotnych wchodzi głównie krzemionka, tlenek glinu, tlenek żelaza, tlenek wapnia. Szczególnie w elementach masywnym gdzie występuje duży wzrost temperatury, zwiększona zawartość CaO w popiołach lotnych (pochodzących ze spalania węgla subbitumicznego i lignitów) może spowolnić przyrost wytrzymałości, ale również spowodować szkodliwe pęcznienie [123]. Częstki popiołów lotnych są najczęściej kuliste o ziarnach między $1\mu\text{m}$ ÷ $100\mu\text{m}$, zbliżonych wielkością do ziaren cementu. Typowa średnia gęstość popiołów lotnych wynosi 2.35 g/cm^3 . Powierzchnia właściwa określona metodą *Blaine'a* wynosi zwykle od 250 do $600\text{ m}^2/\text{kg}$, co umożliwia im łatwą reakcję z wodorotlenkiem wapnia Ca(OH)_2 powstającym podczas hydratacji cementu portlandzkiego. Kulisty kształt cząstek popiołów lotnych oraz ujemnie naładowane cząstki adsorbowane na powierzchni ziaren cementu, korzystnie wpływają na urabialność i mniejsze zapotrzebowanie na wodę przez mieszankę betonową, wynoszące od 5% do 15% mniej w porównaniu z mieszanką o tej samej zawartości materiału wiążącego zawierającego tylko cement portlandzki. Dodatkowo popioły lotne zawarte w mieszance działają opóźniająco na proces wiązania, korzystnie wpływając na betonowanie przy wysokich temperaturach. W innych przypadkach niezbędne jest zastosowanie domieszek przyspieszających wiązanie. Aktywność popiołów uzależniona jest od rodzaju węgla i sposobu jego rozdrobnienia z którego pochodzą popioły, rodzaju konstrukcji paleniska, sposobu wytrącania popiołu z gazów spalinowych, szczególny wpływ ma zakres klasyfikacji cząstek w układzie wyciągowym spalin, właściwości cementu portlandzkiego z którym popiół został wspólnie zestawiony oraz temperatury wiązania betonu, będącej konsekwencją uwodnienia cementu portlandzkiego [123]. Według *Nevilla* [123] wzrost temperatury pomiędzy 20°C a 80°C , jaka występuje w betonach masywnych w wyniku uwodnienia spoiwa, przyspiesza reakcję popiołów lotnych w większym zakresie, niż w przypadku stosowania samego cementu portlandzkiego, co w konsekwencji może prowadzić do retrogresji wytrzymałości betonu. Należy podkreślić, że najważniejszą zaletą popiołów lotnych jest to, że zastosowanie ich w mieszance betonowej umożliwia zmniejszenie dozowanego cementu przy zachowaniu tej samej klasy betonu.

Ważne jest, że różnorodność czynników wpływających na właściwości popiołów lotnych oraz fakt, że nie są one bezpośrednim produktem wytwarzanym w oparciu o wymogi normowe dotyczące kontrolowania produkcji powoduje, iż popioły lotne mogą wykazywać zmienność swoich właściwości [123]. Dlatego istotne jest, przy stosowaniu popiołów lotnych, dokładne doświadczalne zweryfikowanie właściwości betonu, mającego bezpośrednie zastosowanie do danej konstrukcji.

Przykładem zastosowania popiołów lotnych do betonu elementów masywnych, było wykonanie elementów konstrukcyjnych pochylni Wulkan Nowy Stoczni Szczecińskiej [104] oraz wykonanie fundamentów bloku energetycznego Elektrowni Pątnów II [30÷31]. W siedmiu mieszankach betonowych, służących do wykonania elementów konstrukcyjnych pochylni Wulkan Nowy Stoczni Szczecińskiej, w czterech dodano popioły lotne Dolna Odra.

Betony zawierające popioły lotne;

- beton klasy B35 (belki torowiska), dodano 50 kg/m^3 ,
- beton klasy B35 (ściana niecki), dodano 21 kg/m^3 ,
- beton klasy B25 (płyta denna pochylni - warstwa wewnętrzna), dodano 80 kg/m^3 ,
- beton klasy B15 (płyta denna pochylni - warstwa wypełniająca), dodano 157 kg/m^3 .

Do mieszanki betonowej betonu klasy B30 fundamentów bloku energetycznego Elektrowni Pątnów II [30÷31] dodano 55 kg/m^3 popiołów lotnych „EC2 Karolin Poznań”.

Mielony granulowany żużel wielkopiecowy jest odpadem powstającym podczas produkcji surówki żelaza. Podstawowymi składnikami chemicznymi wchodzącymi w skład żużla wielkopiecowego są tlenek wapnia, krzemionka, tlenek glinu i tlenek manganu. Znaczący wpływ na skład chemiczny i właściwości fizyczne żużla mają rodzaj i jakość rudy, stosowane procesy produkcyjne i metody chłodzenia. Zbliżony skład chemiczny żużla wielkopiecowego do składu chemicznego cementu portlandzkiego [123, 147], lecz nie w tych samych proporcjach, czyni go dobrym materiałem hydraulicznym o właściwościach wiążących. Dzięki swoim właściwościom znalazł on zastosowanie do produkcji cementu hutniczego będącego jednorodną mieszaniną cementu portlandzkiego i zmielonego granulowanego żużla wielkopiecowego oraz dodatku gipsu lub jego pochodnych, względnie anhydrytu. Cementy hutnicze o wysokiej zawartości granulowanego żużla wielkopiecowego mają niskie ciepło hydratacji, co czyni je przydatnymi do wykonywania betonowych elementów masywnych, a więc tam, gdzie wzrost temperatury w wyniku dużego początkowego ciepła hydratacji cementu musi być kontrolowany [123]. Powolna hydratacja cementów hutniczych, znacznie wolniejsza niż samego cementu portlandzkiego, jest powiązana z umiarkowanie powolnym przyrostem wytrzymałości, co prawie zupełnie wyklucza ich stosowanie do wykonania elementów cienkościennych w okresach zimowych, podczas których działanie mrozu może być przyczyną uszkodzenia betonu. W Polsce rozróżnia się trzy odmiany cementu hutniczego w zależności od zawartości żużla w całkowitej masie cementu; **A** o zawartość żużla od 36% do 65%, **B** o zawartości żużla od 66% do 80% oraz **C** o zawartości żużla od 81% do 95% [137]. Gęstość granulowanego żużla wielkopiecowego wynosi około 2.9 g/cm^3 i jest nieco niższa od gęstości cementu

portlandzkiego 3.15 g/cm^3 . Powierzchnia właściwa granulowanego żużla zwykle wynosi $350 \text{ m}^2/\text{kg}$, sporadycznie $500 \text{ m}^2/\text{kg}$. Aktywność hydrauliczna żużla jest zależna od jego rozdrobnienia, jego składu i zawartości szkliva. Dodanie do mieszanki granulowanego żużla wielkopiecowego opóźnia wiązanie w normalnych temperaturach, zwykle od 30 do 60 minut, obniża zapotrzebowanie na wodę, poprawia urabialność i powoduje, że mieszanka staje się bardziej plastyczna, ale i spoista. Przy zastosowaniu żużla w ilości $50 \div 75 \%$ osiąga się podczas twardnienia znaczne zmniejszenie wzrostu temperatury w masywnym betonie od 15% do 50% w stosunku do stosowanego zwykłego cementu portlandzkiego [147]. W cementach o podwyższonej zawartości alkaliów dodanie mielonego żużla obniża całkowitą zawartość alkaliów w mieszance, dodatkowo obniża przepuszczalność i przyspiesza karbonatyzację betonu. Podczas twardnienia betonu zawierającego granulowany żużel istotna jest przedłużona pielęgnacja wilgotnościowa betonu, ponieważ początkowa niska szybkość hydratacji powoduje powstawanie systemów porów kapilarnych, które pozwalają na ubytek wody przy wysychaniu [123].

Domieszki są produktami chemicznymi (substancjami organicznymi lub nieorganicznymi) dodawanymi w trakcie mieszania bądź przy dodatkowej operacji mieszania przed układaniem mieszanki betonowej, w ilościach nie większych niż 5% masy cementu w celu uzyskania określonych modyfikacji właściwości chemicznych, fizycznych bądź fizykochemicznych betonu.

Polska norma [136] klasyfikuje osiem grup domieszek, spośród których na uwagę zasługują:

- a) domieszki modyfikujące właściwości reologiczne świeżej mieszanki betonowej;
 - domieszki uplastyczniające i upłynniające (superplastyfikatory),
- b) domieszki modyfikujące wiązanie i twardnienie betonu;
 - domieszki opóźniające wiązanie.

Zadaniem domieszek uplastyczniających i upłynniających (superplastyfikatorów) w świeżej mieszance betonowej jest polepszenie jej ciekłości przy zachowaniu dobrej spójności. Ze względu na intensywność działania najistotniejsze są substancje oparte na żywicach syntetycznych (superplastyfikatory), które nadają powierzchni ziaren cementu ładunek ujemny, co prowadzi do odepchnięcia się od siebie ziaren. Wynikiem tego jest peptyzacja i rozproszenie cementu. Jednym ze sposobów działania superplastyfikatora jest obniżenie ilości wody w mieszance nawet o $30 \% \div 40 \%$ [78, 123, 147] przy zachowaniu wyjściowej konsystencji. Dzięki bardzo dużemu zmniejszeniu stosunku wodno-cementowego (do $w/c \cong 0.2$ [123]) można otrzymać beton o szczególnie wysokiej wytrzymałości.

Działanie superplastyfikatora z jednej strony prowadzi do dużego rozproszenia ziaren cementu, co wstępnie przyspiesza ich hydratację, chociaż istnieją przypadki wydłużenia czasu indukcji (okres II hydratacji spoiwa - okres spokoju) do około 15h [26] wywołane wspólnym działaniem superplastyfikatora i mikrokrzemionki. Do podobnego wniosku doszedł, Kapelko [82], badając wpływ nowego superplastyfikatora opóźniającego wiązanie cementu na właściwości tworzyw cementowych. Kiernożycki podkreśla [93], że dodanie do betonu plastyfikatora lub superplastyfikatora, na ogół zmniejsza ilość wydzielonego ciepła w początkowym okresie twardnienia cementu, choć znane są również przypadki działania odwrotnego.

Należy podkreślić, że skuteczność działania superplastyfikatora uzależniona jest od jego kompatybilności z cementem, potwierdzonej wykonanymi wcześniej badaniami.

Działanie domieszek opóźniających wiązanie polega na fizycznym utrudnieniu wiązania cementu, lub spowolnieniu tego procesu w wyniku pokrycia ziaren cementu, bądź tylko szybko wiążącego glinianu trójwapniowego (C_3A). W efekcie działania opóźniacza spowolniona jest egzotermiczna reakcja wiązania cementu z wodą prowadząca do wolniejszego wydzielania się ciepła hydratacji, oraz w zależności od typu domieszki, opóźniony jest początek wiązania nawet do 10 godzin [78]. Beton taki charakteryzuje się niską wytrzymałością początkową i zwykle wolniejszym twardnieniem, ale wyższą wytrzymałością końcową niż beton bez domieszek [78, 123, 147].

Do najczęściej spotykanych przypadków zastosowania domieszek opóźniających wiązanie należą [78];

- betonowanie w wysokiej temperaturze gdy czas potrzebny do ułożenia mieszanki jest niewystarczający,
- potrzeba właściwego powiązania ze sobą układanego warstwami betonu oraz niedopuszczenie do nieszczelności w miejscach styków roboczych,
- umożliwienie rewibracji,
- betonowanie dużych masywów (spowolnienie wydzielania się ciepła hydratacji),
- długi okres transportu mieszanki betonowej,
- spodziewane dłuższe przerwy w betonowaniu konstrukcji.

Do określenia skuteczności działania każdego opóźniacza niezbędne jest wykonanie próbnych zarobów z użyciem tego samego cementu, który będzie zastosowany w wykonawstwie.

Z wyników badań własnych, przeprowadzonych na elementach konstrukcyjnych obiektów mostowych w czasie ich realizacji, nie było możliwe jednoznaczne określenie wpływu zastosowanych dodatków i domieszek w mieszance betonowej na wartości temperatury

dojrzewającego betonu. Związane było to z brakiem możliwości porównania elementów betonowych różniących się jedynie ilością zastosowanych dodatków i domieszek w mieszance betonowej.

2.2.4. Rodzaj kruszywa w betonie

Rodzaj kruszywa (rodzaj skały) w betonie, jest jednym z czynników wpływających na wartości temperatur dojrzewającego betonu. Uważa się [93, 123], że stanowi ono około 70 % ÷ 80 % masy mieszanki betonowej.

Właściwości termofizyczne kruszywa opisują: współczynnik przewodnictwa cieplnego, ciepło właściwe, gęstość oraz współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej.

Należy nadmienić, że poza rodzajem kruszywa wpływ na właściwości termofizyczne betonu ma również jego wilgotność, która wpływa na wartość współczynników termofizycznych betonu w miarę postępu procesu hydratacji [93]. Ważnym parametrem decydującym o doborze rodzaju kruszywa do betonu elementów masywnych jest współczynnik wyrównania temperatury a [65]. Współczynnik ten określa prędkość wymiany ciepła przy przewodzeniu w stanie nieustalonym (prędkość wyrównania się temperatury).

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \left[\frac{m^2}{h} \right] \quad (3.1)$$

gdzie; λ [W/(m·°C)] - współczynnik przewodnictwa cieplnego,
 c [kJ/(kg·°C)] - ciepło właściwe,
 ρ [kg/m³] - gęstość objętościowa.

Współczynnik wyrównania temperatury, jest wprost proporcjonalny do współczynnika przewodzenia ciepła λ , a odwrotnie proporcjonalny do iloczynu ($c \cdot \rho$), określającego zdolność akumulacji ciepła w 1 m³ ciała stałego przy różnicy temperatur 1 °C.

W tablicy 2.4 zestawiono przykładowe wartości współczynników termofizycznych wybranych betonów wykonanych z różnego rodzaju kruszywa, wraz obliczonym dla nich współczynnikiem wyrównania temperatury.

Tablica 2.4. Wartości współczynników termofizycznych wybranych betonów

Beton z kruszywa		$q \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	$\lambda \left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right]$	$c \left[\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \right]$	$a \left[\frac{m^2}{h} \right]$
Granit	[106]	2450,00	2,04	0,96	0,003122
	[148]	2500,00	2,15	0,91	0,003402
	[148]	2400,00	1,67	0,96	0,002609
Bazalt	[106]	2500,00	1,50	1,00	0,002160
	[148]	2534,00	1,38	0,94	0,002086
Żwir	[106]	2400,00	3,40	0,92	0,005543

Z powyższych właściwości termofizycznych betonów wynika, że betony wykonane na bazie żwiru, posiadają wyższą zdolność do odprowadzania ciepła, niż beton wykonany na bazie granitu czy bazaltu. Oznacza to, że beton na bazie żwiru będzie miał niższą maksymalną temperaturę wewnętrzną dojrzewającego betonu, od betonu na bazie bazaltu lub granitu i że szybciej się w nim temperatura wewnętrzna ustabilizuje.

Nie mniej ważny jest współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej betonu. Wartość współczynnika zależy w dużej mierze od procentowego udziału danego kruszywa i zaczynu w składzie mieszanki betonowej, oraz stopnia zawilgocenia betonu wraz ze wzrostem temperatury. W tym przypadku najniższy współczynnik rozszerzalności cieplnej, mają betony na bazie granitu i bazaltu. Niski współczynnik rozszerzalności cieplnej, mają również kruszywa; gąbry, diabaz, dolomit [123].

Wypływa z tego istoty wnioski, że przy doborze kruszywa do betonu elementów masywnych ważne jest, aby współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej kruszywa był jak najniższy a współczynnik przewodzenia ciepła, gęstość i ciepło właściwe jak najwyższe, (np. granit, dolerit [123]).

Witkowski [175] zaleca stosowanie kruszywa o możliwie wysokim współczynniku przewodzenia termicznego i możliwie wysokim cieple właściwym np. kruszywo dolomitowe, bazaltowe.

Kiernożycki w pracy [93] zaleca;

- ograniczenie punktu pyłowo-piaskowego do ok. 15 %,
- ograniczenie punktu piaskowego do około 30 %,
- najgrubsza frakcja kruszywa nie powinna przekraczać 32 mm,
- stosowanie kruszyw o szorstkich powierzchniach,
- stosowanie kruszywa łamanego,
- stosowanie kruszyw o niskim współczynniku rozszerzalności cieplnej np. wapien.

W pracy Kiernożyckiego [93] i Плята [148] znaleźć można wzory na obliczenie współczynników termofizycznych betonu w zależności od składu mieszanki betonowej.

Przykłady zastosowanych kruszyw, ich frakcji, oraz ilości w mieszance betonowej wykorzystanej do wykonania elementów masywnych zestawiono w tablicy 2.5.

Tablica 2.5. Zastosowane kruszywa w betonach elementów maszynowych [30÷31, 62]

Obiekt, klasa betonu i zastosowanie	Rodzaj zastosowanego kruszywa i ilość
Estakada Gądów beton klasy B30 (patrz tablica 3.1), filary słupowe,	- piasek 0/2 mm - 680,46 kg, - grys granitowy 2/8 mm, - 519,30 kg, - grys granitowy 8/16 mm - 590,93 kg,
Estakada Gądów beton klasy B60 (patrz tablica 3.1), ustroje nośne estakad głównych i łącznic,	- piasek 0/2 mm - 687,00 kg, - grys bazaltowy 5/8 mm, - 481,00 kg, - grys bazaltowy 11/16 mm - 763,00 kg,
Most Milenijny beton klasy B35 (patrz tablica 3.6), fundamenty podpór głównych,	- piasek 0/2 mm - 668,00 kg, - grys granitowy 5/8 mm, - 535,00 kg, - grys granitowy 8/16 mm - 707,00 kg,
Elektrownia Pątnów II [30÷31] beton klasy B35, fundamenty bloku energetycznego,	- piasek 0/2 mm - 663,00 kg, - żwir 2/8 mm - 427,00 kg, - żwir 8/16 mm - 358,00 kg, - żwir 16/31,5 mm - 409,00 kg,
Wieża Bazyliki Licheńskiej beton klasy B35 [62] fundament wieży, masa kruszywa 1915 kg/m ³ .	- piasek płukany 0/2 mm, - mieszanka żwirowa 2/8 mm, - grys granitowy 8/16 mm.

2.2.5. Wpływ betonowania w okresie wiosny i jesieni

Występująca w okresie wiosny i jesieni niska temperatura powietrza wpływa na obniżenie temperatury składników mieszanki betonowej i tym samym na obniżenie temperatury mieszanki betonowej [30÷31, 123, 86÷87, 175]. Niska, ale dodatnia temperatura wbudowywanej mieszanki, oraz temperatury powietrza prowadzi do spowolnienia kinetyki zachodzących przemian strukturalnych w dojrzewającym betonie, a tym samym na spowolnienie wydzielania ciepła hydratacji. Szczególnie jest to korzystne przy wykonywaniu elementów maszynowych, gdzie spowolniona kinetyka hydratacji wywołuje niższą temperaturę wewnętrzną prowadzącą w konsekwencji do mniejszego wyężenia elementu.

Witakowski w pracy [175] stwierdza, że przy obniżonej temperaturze betonowania (Autor określa tak temperaturę wbudowywanej mieszanki betonowej oraz temperaturę powietrza) z 20 °C do 5 °C powoduje w bloku niskim (2 m) 3-krotne zmniejszenie maksymalnego wyężenia. Takie samo zmniejszenie temperatury betonowania w bloku wysokim (10 m) powoduje zmniejszenie wyężenia jedynie o 30 %, natomiast czas niezbędny

do jego osiągnięcia wydłuża się aż 4-rotnie. Autor pracy [175] zaleca prowadzenie betonowania elementów masywnych w okresie wiosny, gdy zarówno składniki mieszanki jak i powietrze atmosferyczne mają temperaturę dodatnią, lecz dostatecznie niską.

Neville w pracy [123] zaleca, przy betonowaniu elementów w okresie obniżonych temperatur, podczas gdy średnia z maksymalnych i minimalnych temperatur powietrza odnotowana w ciągu 3-ch kolejnych dni jest niższa niż 5°C i kiedy temperatura powietrza w ciągu, co najmniej 12 godzin w każdym okresie 24 godzin wynosi 10°C lub mniej, to w elementach masywnych temperatura układanej mieszanki betonowej nie powinna być niższa od 5°C , a dla elementów cienkościennych nie mniejsza niż 13°C .

Przykładem ilustrującym wpływ obniżonych temperatur mieszanki betonowej jak i temperatury powietrza na wartości maksymalnych temperatur dojrzewającego betonu, jest wykonanie przęseł łącznic dojazdowych do Estakady Gądów (patrz p. 3.5.2).

Betonowanie łącznicy zachodniej rozpoczęto latem w dniu 6 lipca 2001 r., natomiast łącznicy wschodniej wiosną w dniu 27 marca 2002 r. Dla obydwu elementów zastosowano taką samą metodę pielęgnacji dojrzewającego betonu (patrz p. 3.4).

Temperatura mieszanki betonowej wbudowywanej do przęsła łącznicy zachodniej wynosiła $T_{\text{betonu}}=26^{\circ}\text{C}$ (latem), a mieszanki betonowej wbudowywanej do przęsła łącznicy wschodniej $T_{\text{betonu}}=10^{\circ}\text{C}$ (wiosną). Przez cały okres prowadzonych badań, średnia temperatura powietrza wynosiła $T_{\text{sr.o}}=26^{\circ}\text{C}$ (latem), $T_{\text{sr.o}}=9^{\circ}\text{C}$ (wiosną). Wahania temperatury podczas badań dochodziły do $T_{\text{min}}=17^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{max}}=34^{\circ}\text{C}$ (latem), $T_{\text{min}}=1^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{max}}=16^{\circ}\text{C}$ (wiosną). Maksymalna temperatura wewnętrzna w przęśle łącznicy zachodniej wynosiła $T_{\text{max}}=75^{\circ}\text{C}$ (latem), po upływie 24 godzin utrzymywała się aż do 36 godziny od rozpoczęcia badań, natomiast maksymalna temperatura wewnętrzna w przęśle łącznicy wschodniej wynosiła $T_{\text{max}}=58^{\circ}\text{C}$ (wiosną), po upływie 36 godzin od rozpoczęcia badań. Na wysokości konstrukcyjnej przęsła łącznicy zachodniej, maksymalna różnica temperatury po 24 godzinach wynosiła $\Delta T_{\text{G-D}}=45^{\circ}\text{C}$ (latem), a w łącznicy wschodniej po 36 godzinach wynosiła $\Delta T_{\text{G-D}}=41^{\circ}\text{C}$ (wiosną). Jest to także maksymalna różnica temperatur między powierzchnią górną przęsła a jego środkiem, dla obydwu przypadków.

Należy podkreślić, że na głębokości 7.5 cm od górnej powierzchni przęsła, temperatura wewnętrzna była ponad 20°C wyższa od temperatury na jego górnej powierzchni (w obydwu przypadkach). Powodowało to, że różnica temperatur między środkiem i warstwą na głębokości 7.5 cm, była prawie dwukrotnie mniejsza od różnicy temperatur między środkiem i jego górną powierzchnią (patrz tablica 2.6).

Tablica 2.6. Temperatur na górnej powierzchni i na głębokości 7.5 cm od górnej powierzchni przęśła, oraz różnica temperatur między środkiem i górną powierzchnią oraz między środkiem i warstwą na głębokości 7.5 cm od górnej powierzchni przęśła

ELEMENT	LISTWA	TEMPERATURA		RÓŻNICA TEMPERATUR	
		na górnej powierzchni przęśła	na głębokości 7.5 cm od górnej powierzchni	między środkiem i górną powierzchnią	między środkiem i warstwą na głębokości 7.5cm
Łącznica zachodnia	A	30 °C	51 °C	45 °C	24 °C
	B		57 °C	45 °C	18 °C
	C		51 °C	44 °C	23 °C
Łącznica wschodnia	A	17 °C	37 °C	41 °C	21 °C

W przęśle łącznicy zachodniej, maksymalna różnica temperatur, między spodem przęśła a jego środkiem po 24 godzinach wynosiła $\Delta T_{\dot{s}-D}=19\text{ }^{\circ}\text{C}$ (latem), a w przęśle łącznicy wschodniej $\Delta T_{\dot{s}-D}=15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (wiosną). Po 168 godzinach temperatura maksymalna w środku przęśła łącznicy zachodniej wynosiła $T_{\dot{s}(168h)}=48\text{ }^{\circ}\text{C}$ (latem), a w przęśle łącznicy wschodniej $T_{\dot{s}(168h)}=36\text{ }^{\circ}\text{C}$ (wiosną). Maksymalna różnica temperatur po 168 godzinach między środkiem i powierzchnią górną przęśła łącznicy zachodniej wynosiła $\Delta T_{G-D}=22\text{ }^{\circ}\text{C}$ (latem), a w przęśle łącznicy wschodniej $\Delta T_{G-D}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (wiosną). W tym samym czasie maksymalna różnica temperatur między środkiem a spodem przęśła łącznicy zachodniej wynosiła $\Delta T_{\dot{s}-D}=7\text{ }^{\circ}\text{C}$ (latem), w przęśle łącznicy wschodniej $\Delta T_{\dot{s}-D}=8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (wiosną).

Wynikają z tego ważne wnioski dla technologii betonowania;

- niskie ale dodatnie temperatury powietrza w okresie wiosny lub jesieni, wpływają na obniżenie temperatury wewnętrznej dojrzewającego betonu,
- różnica temperatur między powierzchnią zewnętrzną narażoną na bezpośrednie oddziaływanie czynników atmosferycznych, a środkiem elementu w okresie lata i jesieni jest zbliżona w obydwu elementach.

2.2.6. Wpływ izolacji termicznej

Izolacja termiczna może być skutecznym środkiem technologicznym zapobiegającym powstawaniu rys termicznych w blokach swobodnych [30÷31, 62, 87, 93, 104, 123, 175]. Jak podkreśla Witakowski [175], za pomocą odpowiedniej izolacji termicznej zawsze można zapewnić monolityczność bloku betonowego nie pozbawionego swobody odkształceń, lecz przedwczesne zdjęcie izolacji z powierzchni bloku prowadzić może do gwałtownego oziębienia konstrukcji, wzrostu naprężeń i wyężenia, a w konsekwencji do

zniszczenia bloku. Witakowski w pracy [175], zaleca przeprowadzenie wnikliwej analizy określającej dopuszczalny moment usunięcia izolacji.

Kiernożycki wykazał [87], że niedostateczna izolacja lub jej brak na górnej powierzchni dojrzewającego betonu masywnych płyt fundamentowych, sprzyja wystąpieniu znacznych różnic temperatur w przekroju elementu. Autor zaleca [93], ograniczenie wartości gradientu temperatury w przekroju elementu – w konstrukcjach swobodnych; $\Delta T < 15 \div 20$ °C/m, w zależności od wysokości bloku, oraz wysokości samoociepnięcia betonu – w konstrukcjach pozbawionych swobody odkształcenia, w strefie oddziaływania oporów liniowych lub powierzchniowych; $\Delta T < 15 \div 28$ °C/m, w zależności od rodzaju cementu, składu mieszanki betonowej oraz temperatury początkowej. W pracy Autor [93] podaje również, minimalny okres ochrony cieplnej elementów masywnych, wynoszący 21 dni.

Neville w pracy [123] powołując się na pracę FitzGibbona podaje wartość krytycznej różnicy temperatury, wynoszącą 20 °C między określonymi warstwami betonu, po przekroczeniu której element się zarysuje.

Neville zaleca [123], stosowanie właściwej izolacji termicznej deskowania, górnej powierzchni elementu, krawędzi i naroży gdzie straty ciepła są największe oraz w innych wrażliwych częściach elementu. Neville uważa [123], że właściwa izolacja powinna kontrolować straty ciepła przez parowanie, przewodzenie i promieniowanie.

Przykładem zastosowania izolacji termicznej na powierzchni zewnętrznej masywnego elementu betonowego, jest wykonanie ław fundamentowych Mostu Milenijnego we Wrocławiu (patrz p.3.7). Ławy po zakończeniu betonowania, poddawane były 9 godzinnej (ława północna) i 17 godzinnej (ława południowa) pielęgnacji wilgotnościowej, po której górną powierzchnię zewnętrzną ław przykrywano warstwą folii budowlanej i 10 cm warstwą styropianu. Pomiar temperatury rozpoczęto po zakończeniu betonowania. Ławy wykonane były z betonu klasy B35. Maksymalną temperaturę wewnętrzną oraz różnicę temperatur zanotowano na środku ławy południowej. Średnia z pomierzonych w trakcie badań temperatur otoczenia wynosiła 7 °C. Pomierzona maksymalna temperatura wewnętrzna, dojrzewającego betonu wynosiła 61 °C, na głębokości $h = -1.94$ m od górnej powierzchni ławy. Maksymalna różnica z pomierzonych temperatur, między środkiem i powierzchnią górną ławy, wystąpiła po 108 godzinach badań i wynosiła 32 °C, natomiast maksymalna różnica z pomierzonych temperatur, między powierzchnią dolną i środkiem ławy wystąpiła po 60 godzinach badań i wynosiła 32 °C. Ława położona była w nurcie rzeki Odry, około 6 m poniżej jej lustra. Wpływ niskiej temperatury wody (około 5 °C) znajdującej się w silnie nawodnionym piasku rzeczny, zalegającym bezpośrednio pod fundamentem,

spowodował intensywne chłodzenie dolnej partii łąwy. Izolację termiczną wraz z warstwą folii usunięto po 6 tygodniach od rozpoczęcia badań. Pomiar temperatury po 828 godzinach wykazał, że maksymalna temperatura wewnętrzna wynosiła około 41°C , a maksymalna różnica temperatur między środkiem i powierzchnią górną łąwy wynosiła około 13°C . Temperatura powietrza w tym samym czasie wynosiła; w dzień 26°C , w nocy 16°C . Po usunięciu warstwy izolacji oraz folii budowlanej, sprawdzono powierzchnię górną łąwy i rys termicznych nie stwierdzono.

Wynikają z stąd ważne wnioski, dla technologii pielęgnacji;

- warstwa izolacji termicznej w postaci styropianu grubości 10 cm na powierzchniach zewnętrznych elementu, w wielu przypadkach skutecznie zapobiega stratom ciepła,
- dodatkowa warstwa folii budowlanej między powierzchnią betonu a warstwą styropianu skutecznie ogranicza wysychanie zewnętrznych warstw dojrzewającego betonu,
- dla zachowania monolityczności elementu, niezbędne jest monitorowanie temperatury wewnętrznej dojrzewającego betonu, w celu określenia wartości gradientu temperatury w przekroju elementu, oraz wysokości samoociepłenia betonu, jak również w celu określenia czasu usunięcia izolacji termicznej.

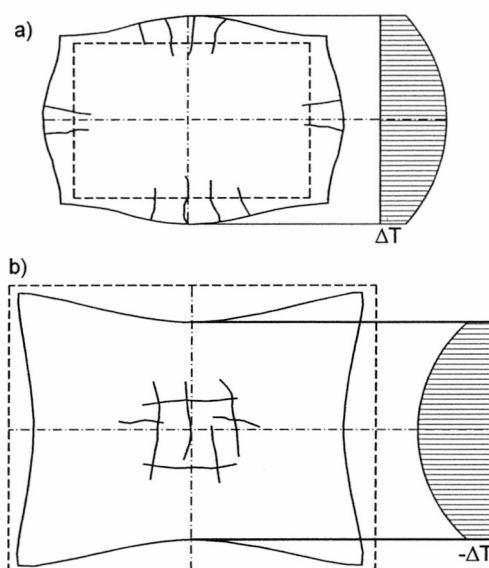
Obecnie istnieją już bogata literatura związana z praktycznym wykonywaniem maszynych elementów betonowych, do której można zaliczyć np. [30÷31, 62, 83÷93, 104, 123, 175÷176]. Ukazująca jak ważnym zagadnieniem jest wpływ temperatury dojrzewającego betonu dla zachowania jego monolityczności.

2.3. Pola naprężeń w maszynach betonowych generowane nierównomiernymi rozkładami temperatur

Jak już wspomniano na wstępie nierównomierny przyrost temperatury na grubości elementu generuje w nim nierównomierny stan naprężeń. Stosunkowo łatwo można ten stan określić w przypadku masywu swobodnego mogącego się swobodnie odkształcać we wszystkich kierunkach. Rozpatrując ten przypadek jako zagadnienie płaskie łatwo wskazać na generowany symetryczny stan naprężeń. Wartości maksymalne naprężeń generowane są w początkowym okresie dojrzewania betonu, gdy charakteryzuje go mała odkształcalność graniczna, a intensywność wydzielania ciepła hydratacji osiąga maksimum. W wyniku samorównoważących się naprężeń własnych, naprężenia ściskające generowane są w środku elementu, a rozciągające w zewnętrznych jego warstwach. Jeżeli naprężenie rozciągające

przekroczy wytrzymałość betonu na rozciąganie, lub jeżeli przekroczona jest zdolność materiału do dalszych odkształceń przy rozciąganiu, powstają wtedy rysy powierzchniowe (patrz rys. 2.5 a). W dalszym okresie naturalnego studzenia elementu w wyniku procesów reologicznych i zróżnicowanych warunków twardnienia betonu, na grubości bloku naprężenia ulega inwersji. Zewnętrzne warstwy ulegają wówczas ścisaniu, podczas gdy beton w części wewnętrznej jest rozciągany. Ze względu na zróżnicowaną wartość modułu sprężystości w przekroju elementu, oraz obecność rys powierzchniowych zmieniających sztywność przekroju, wyężenie w wewnętrznych strefach betonu oraz wartości naprężeń termicznych są znacznie niższe niż w czasie początkowego wzrostu temperatury. W wyniku, rozkład naprężeń termicznych nie jest ściśle podobny do rozkładu temperatury, a znacznie wyższa wartość wytrzymałości betonu na rozciąganie może powstrzymać dalszą propagację rysy. Możliwa jest sytuacja, w której rysa powierzchniowa, powstała w fazie rozgrzewu betonu, łączy się z rysami wewnętrznymi utworzonymi na skutek intensywnego chłodzenia elementu w okresie jego stygnięcia (patrz rys 2.5 b), w następstwie czego mogą powstać pęknięcia obejmujące całość przekroju elementu betonowego.

W większości przypadków sytuacja jest daleko bardziej skomplikowana, z uwagi na to że masyw zewnętrznie ma ograniczoną możliwość odkształceń przynajmniej na jednej krawędzi (tarcie o podłoże gruntowe lub wręcz zamocowanie w głowicach pali czy ścian szczelinowych). Podobnie jest z warunkami termicznymi, które będą zazwyczaj różne na górnej (np. powietrze) i dolnej (np. grunt) powierzchni masywu.

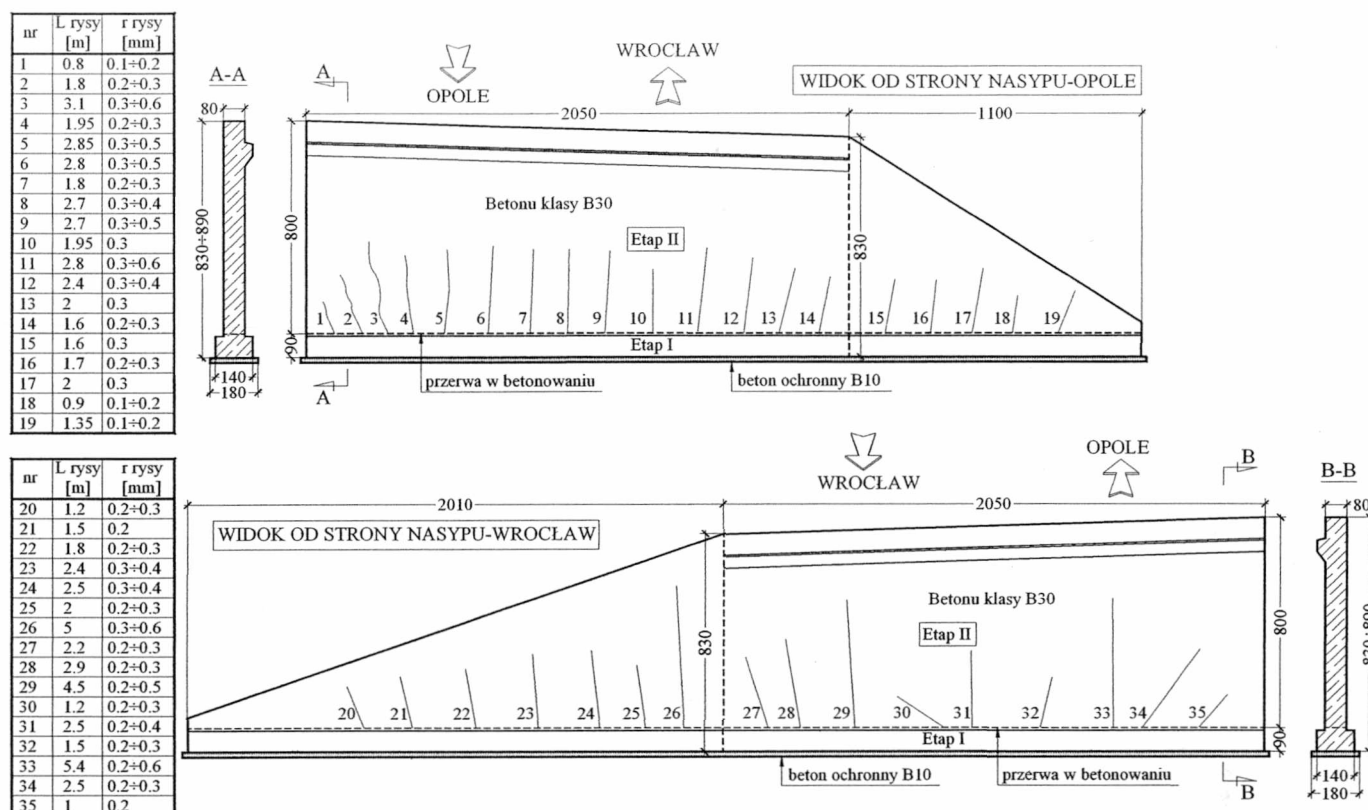


Rys. 2.5. Mechanizm zniszczenia elementu betonowego w wyniku ciepła hydratacji;
 a) zniszczenie warstw powierzchniowych w wyniku bezpośredniego rozciągania – wzrost temperatury (faza nagrzewania),
 b) zniszczenie wnętrza elementu wskutek powstrzymywania odkształceń na brzegach – spadek temperatury (faza stygnięcia). [188]

W młodym betonie pozbawionym swobody odkształceń w okresie samoociepnięcia, wraz z nierównomiernym wzrostem temperatury następuje rozwój naprężeń ściskających. Duży wpływ procesów reologicznych w okresie samoociepnięcia elementu wraz ze wzrostem modułu sprężystości, obniżają wartość maksymalnych naprężeń ściskających. W konsekwencji jeszcze w trakcie spadku temperatury (stygnięcia elementu) możliwa jest sytuacja że naprężenia ściskające spadają do zera. Dalsze studzenie betonu do temperatury otoczenia wywołuje w nim rozwój naprężeń rozciągających, mogących przekroczyć wartość graniczną wytrzymałości na rozciąganie, doprowadzając do pęknięcia obejmującego całość przekroju elementu, niezależnie od jego grubości.

Betonowanie warstwowe jest złożonym przypadkiem powstawania naprężeń w elemencie pozbawionym swobody odkształceń. Przyczepność mechaniczna oraz rozwój kontaktu natury chemicznej, uniemożliwiają swobodę odkształceń między świeżo ułożonymi warstwami betonu. Występujące siły tarcia w płaszczyźnie świeżo ułożonej warstwy betonu o zróżnicowanym stopniu przemian strukturalnych a istniejącą konstrukcją, gruntem czy istniejącymi pionowymi płaszczyznami oporowymi, wywołują naprężenia, których charakter i wielkość związana jest z rozkładem temperatury w obu analizowanych elementach. Przerwy technologiczne w wykonywanej konstrukcji są typowym przypadkiem zaistnienia takiej sytuacji. W zależności od okresu układania kolejnych warstw, rysy wystąpić mogą w już wykonanym elemencie lub warstwie betonu świeżo ułożonego. W pierwszym przypadku rysy mogą tworzyć się w warstwie betonu wcześniej wykonanego w wyniku wzrostu temperatury i odkształceń warstwy świeżo ułożonej. W drugim przypadku rysy mogą tworzyć się w warstwie świeżo ułożonej w wyniku oddziaływań pośrednich spadku temperatury oraz skurczu warstwy świeżo ułożonej i ograniczenia swobody odkształceń między sąsiadującymi warstwami.

Przykładem zaistnienia takiej sytuacji była budowa wiaduktu A(Mo)001 przebudowywanej autostrady A4 z Wrocławia do Opola (patrz rys. 2.6). Wiadukt posadowiony jest na palach wielkośrednicowych $\phi = 110$ cm. Ławy i korpusy przyczółków wykonano w okresie od maja do września 1998 roku. Przerwy między wykonaniem poszczególnych sekcji (ława i korpus przyczółka) wynosiły w obydwu przypadkach około 4 tygodni.



Rys. 2.6. Przyczołki wiaduktu A(Mo)001 modernizowanej Autostrady A4, Wrocław – Opole. Inwentaryzacja rys termicznych.

Beton klasy B30 użyty do wykonania elementów konstrukcyjnych wiaduktu został wykonany według receptury podanej w tab. 2.7.

Tablica 2.7. Receptura mieszanki betonowej na elementy konstrukcyjne wiaduktu *)

Skład mieszanki - beton klasy B30	Ilość
Cement „WARTA” CEM I MSR 42.5 NA	377,00 kg/m ³
Woda (w/c=0.47)	178,00 kg/m ³
Piasek 0/2 mm (Malerzowice)	670,00 kg/m ³
Grys bazaltowy 2/8 mm (Gracze)	743,00 kg/m ³
Grys bazaltowy 8/16 mm (Gracze)	635,00 kg/m ³
Superplastyfikator Sikament 400/30 (SIKA)	4,50 kg/m ³

*) Wymagania dodatkowe odnośnie wykonanego betonu; nasiąkliwość max 4%, F150, W8.

Pęknięcia korpusu przyczółka powstały na skutek oddziaływań pośrednich temperatury (stygnięcie elementu), skurczu i ograniczenia swobody odkształceń między sąsiadującymi warstwami.

Ze względu na zróżnicowany stopień przemian strukturalnych obydwu elementów w fazie wzrostu temperatury, beton korpusu przyczółka w warstwie granicznej uległ ścisnieniu a beton ławy rozciąganiu. Duży wpływ procesów reologicznych (skurcz w skutek wysychania, skurcz samoczynny i relaksacja) przyczyniły się do spadku naprężeń, które w chwili wystąpienia temperatury maksymalnej były bliskie zera.

W okresie naturalnego stygnięcia w wyniku oddziaływań pośrednich temperatury i skurczu, w betonie korpusu przyczółka w strefie styku nastąpił wzrost naprężeń rozciągających, które przekroczyły wartość graniczną wytrzymałości na rozciąganie, doprowadzając powstałych pęknięć. W literaturze sytuację taką również określa się mianem mechanizmu powstrzymywania a towarzyszące jej naprężenia termiczne jako naprężenia powstrzymywania [175].

Należy podkreślić, że ogólna długość rys dla obydwu ścian wynosiła 78.9 m. Do iniekcji i szpachlowania rys zużyto około 30 kg materiałów naprawczych.

W trakcie przebudowy Autostrady A4 z Wrocławia do Opola, podobnym uszkodzeniom uległo jeszcze osiem podobnych konstrukcji, (patrz tablica 2.8).

Tablica 2.8. Inwentaryzacja rys oraz ilości materiałów naprawczych*

Obiekt	Całkowita długość rys [m]	Ilość materiałów naprawczych	
		[kg]	[l]
A(Mo)001	78.9	30.0	–
A(Mo)002	56.8	21.1	–
A(Mo)003	19.1	11.1	1
A(Mo)007	22.5	21.8	1
A(Mo)008	36.4	27.0	1
A(Mo)020	45.1	24.5	3
A(Mo)021	32.6	36.8	1
A(Mo)036	26.6	38.0	4
A(Mo)047	129.8	197.0	4

**) Informacje o powstałych pęknięciach zgromadzono w trakcie dwuletniej pracy przy budowie odcinka Autostrady A4 z Wrocławia do Opola*

Tak, więc teoretycznie wyznaczenie stanu naprężeń generowanych pośrednio zmianami temperatur wewnętrznych i skurczu jak i różnymi warunkami brzegowymi jest zjawiskiem bardzo złożonym, gdyż co należy podkreślić i cechy materiałowe betonu również zmieniają się w czasie.

2.4. Przegląd stosowanych współcześnie technik pomiarowych

W Polsce jak i na Świecie istnieje wiele urządzeń służących do pomiaru temperatury wewnętrznej dojrzewającego betonu np. [30, 44, 62, 76, 176, 189]. Na szczególną uwagę zasługuje skomputeryzowany system pomiaru temperatury SPT-GSM-GPS, zbudowany przez P. Witakowskiego w Zakładzie Betonu ITB [176]. System może działać zarówno w trybie *on line*, jak i *off line* umożliwiającym prowadzenie pomiarów w sposób ciągły. Moduł pomiarowy składa się z sondy, rejestratora, modemu GSM i odbiornika GPS. Wyniki z wykonanych pomiarów przekazywane są poprzez sieć GSM do komputera jednostki badawczej, odpowiadającej za monitorowanie robót budowlanych. Dzięki temu możliwe jest stałe

monitorowanie temperatury, oraz prowadzenie badań na wielu budowach jednocześnie, teoretycznie niezależnie gdzie się one znajdują. Dodatkową zaletą systemu jest możliwość instalacji sondy w dowolnym czasie w praktycznie każdym miejscu konstrukcji i wyjęcia w dowolnym czasie celem użycia w innym miejscu, oraz niezależność od panujących warunków atmosferycznych jak opady deszczu czy śniegu. Ograniczony jest również bezpośredni kontakt z budową i związana z tym wielokrotna instalacja sprzętu pomiarowego. System ten był wykorzystywany do monitorowania wielu bardzo ważnych konstrukcji mostowych, między innymi przy Moście Świętokrzyskim, Siekierkowskim oraz Tunelu Wisłostrady w Warszawie. Wdrożony przez Zakład Betonu ITB system zdalnego monitorowania konstrukcji, stanowi bardzo ważny czynnik służący zapobieganiu uszkodzeń konstrukcji.

Czkwianianc, Pawica, Maćkowiak, Saferna [30] do pomiaru temperatury wewnętrznej dojrzewającego betonu wykorzystują półprzewodnikowe czujniki typ LM35D firmy National Semiconductor. Natomiast Gotycki-Ćwirko, Kiernożycki, Wojdak [62] do pomiaru temperatury wewnętrznej dojrzewającego betonu wykorzystują platynowe czujniki rezystancyjne podłączone do zestawu pomiarowego. Technika pomiaru dla obydwu przypadków polega na umieszczeniu czujników wewnątrz elementu, jeszcze przed jego betonowaniem. Po zakończeniu betonowania rozpoczynany jest pomiar.

W Niemczech i na niektórych budowach polskich (budowy, na których dostawcą mieszanki betonowej jest betoniarnia Th-beton) do pomiaru temperatury dojrzewającego betonu wykorzystywane jest urządzenie pomiarowe typu CONSONIC 60 [76].

Większość obecnie stosowanych w Polsce np. [30, 44, 62, 189] i na Świecie np. [76] rozwiązań technicznych dotyczących pomiaru temperatury opiera się na tej samej zasadzie, czyli umieszczeniu jeszcze przed betonowaniem czujnika termicznego lub termopary we wcześniej wybranym miejscu konstrukcji. Pomiar temperatury przeprowadzany jest przy wykorzystaniu zestawu pomiarowego np. UPM 60 firmy Hottinger Baldwin Messtechnik (patrz rys. 3.1).

2.5. Uzasadnienie potrzeby dalszych badań

Wcześniejsze badania w dużej mierze dotyczyły betonów zwykłych niskich klas, przy zawartości cementu do $c = 300 \text{ kg/m}^3$ oraz niewielkiej lub żadnej zawartości domieszek i dodatków.

Obecnie stosuje się betony i cementy nowych generacji, to jest Betony Wysokich Klas (BWK) i Betony Wysokowartościowe (BWW), oraz w zależności od potrzeb o wysokiej zawartości dodatków i domieszek, wpływających na egzotermiczną reakcję wiązania spoiwa cementowego.

Z tego względu dawne ustalenia dotyczące betonów zwykłych, wymagają szerszej weryfikacji doświadczalnej i teoretycznej, przeprowadzonej na rzeczywistych elementach betonowych

wykonanych z BWK i BWW, dający właściwy obraz zachodzących zjawisk.

Zebranie dużej liczby badań jest ważne również z uwagi na złożoność i trudności w opisie teoretycznym zagadnienia, oraz problemy z wyznaczeniem występujących w modelu teoretycznym stałych materiałowych.

Liczne wyniki z badań eksperymentalnych mogą posłużyć również do zastosowania innych technik obliczeniowych w rozwiązywaniu zagadnienia, takich jak np. zastosowanie sztucznej inteligencji-sieci neuronowe.

W ostatnich pięciu latach w Polsce (patrz tablica 2.9) powstało wiele obiektów mostowych wykonanych z Betonów Wysokich Klas i Betonów Wysokowartościowych. Widać wyraźnie, że produkcja na skalę przemysłową betonów klasy B60 nie nastęrcza obecnie większych trudności. Np. na budowie estakady we Wrocławiu wbudowano 16175 m³ betonu klasy B60 [22].

Tablica 2.9. Mosty wykonane ostatnio w Polsce, w których użyto betonu dużej wytrzymałości [22]

Lp.	Nazwa obiektu	Element mostu	Klasa zastosowanego betonu	Rok zakończenia budowy
1.	Wiadukt drogowy w Chabówce	ustrój nośny	B60	1997
2.	Obiekty nr 4 i 5 w Świnnej Porębie	ustroje nośne	B50	1997
3.	Wiadukt nad torami PKP w Starachowicach	ustrój nośny	B45	1997
4.	Most autostradowy przez Wisłę w Toruniu	ustrój nośny	B50	1998
5.	Most przez Odrę w Opolu	ustrój nośny	B40	1999
6.	Most Świętokrzyski w Warszawie	pylon	B50	1999
		płyta pomostu	B40	
7.	Most przez Odrę w Krzyżanowicach	ustrój nośny	B50	2001
8.	Most III Tysiąclecia im. Jana-Pawła II w Gdańsku	nogi pylonu	B50	2001
		górną część pylonu	B60	
		płyta pomostu	B50	
9.	Most Zwierzyniecki w Krakowie	ustrój nośny	B50	2001
10.	Most Siekierski w Warszawie	pylony	B60	2002
		płyta pomostu	B45	
11.	Estakada nad torami PKP we Wrocławiu	ustrój nośny	B60	2002
12.	Estakady nasuwane w Węźle Czerniakowska na Trasie Siekierskiej w Warszawie	ustroje nośne	B50	w budowie
13.	Most Tysiąclecia we Wrocławiu (część podwieszona)	ustrój nośny i pylony	B50	w budowie
14.	Most Tysiąclecia we Wrocławiu (część belkowa)	ustrój nośny	B50	w budowie

3. BADANIA WŁASNE

3.1. Cel i zakres badań

Celem badań był pomiar temperatury wewnętrznej i zewnętrznej oraz uchwycenie maksymalnej temperatury wewnętrznej i czasu jej wystąpienia w wybranych elementach konstrukcji mostowych w trakcie dojrzewania betonu.

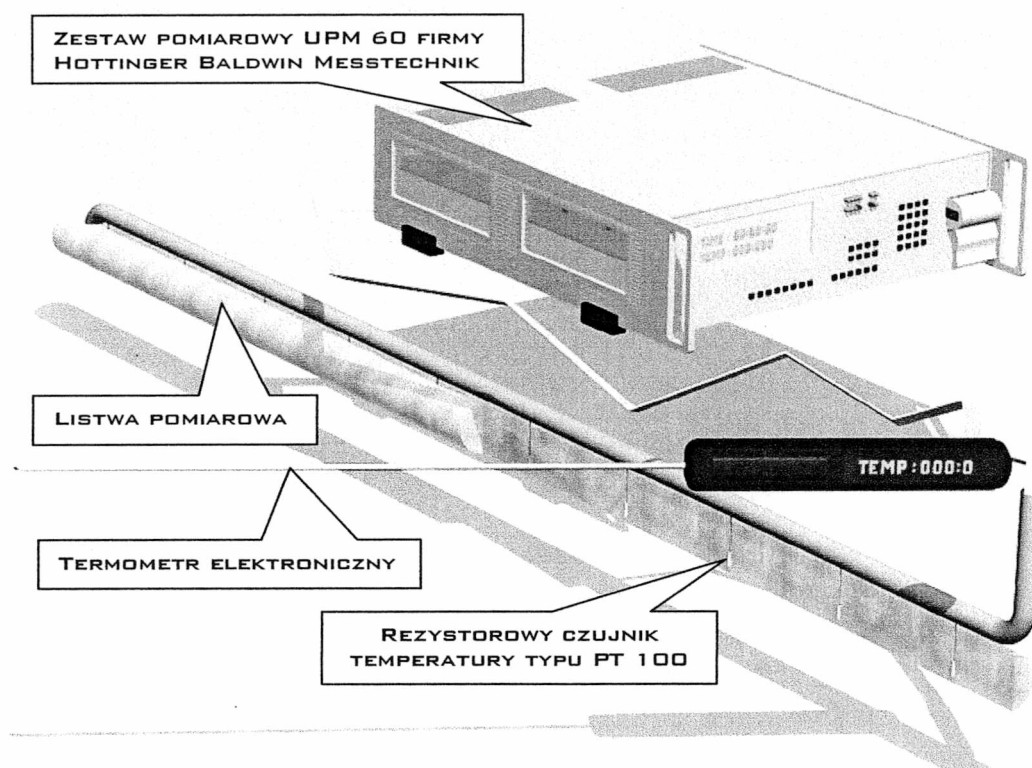
Badania wykonano na dwóch obiektach mostowych;

- Estakadzie we Wrocławu w rejonie Gądowa,
- Moście Milenijnym we Wrocławiu.

Badania przeprowadzono na elementach betonowych wykonanych z betonu klasy B30, B35 i B60. Do przeprowadzenia badań wybrano sześć elementów mostowych Estakady-Gądów; dwa filary o średnicy $\phi=2\text{m}$, dwa dźwigary z prześł łącznic dojazdowych, dwa środniki prześła estakady głównej, oraz dwa elementy mostowe Mostu Milenijnego; dwie ławy fundamentowe pod główne podpory – pylony.

3.2. Opis zastosowanego sprzętu pomiarowego

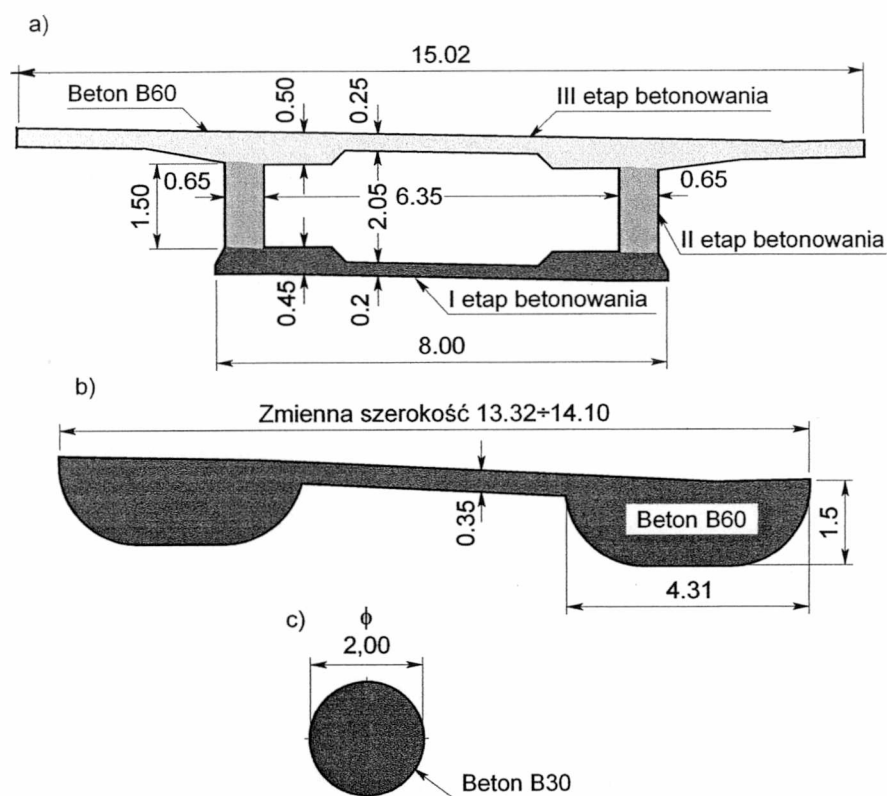
Pomiary temperatury wewnętrznej przeprowadzono przy użyciu rezystorowych czujników temperatury typu PT 100, umieszczonych bezpośrednio w specjalnie do tego celu zbudowanej listwie pomiarowej, oraz zestawu pomiarowego UPM 60 firmy Hottinger Baldwin Messtechnik (rys. 3.1).



Rys. 3.1. Zestaw urządzeń pomiarowych wykorzystanych podczas badań

W celu właściwego rozmieszczenia czujników w badanym elemencie, oraz dla zabezpieczenia ich przed uszkodzeniem w trakcie betonowania wykonano listwy pomiarowe. Długość listew pomiarowych uzależniona była od grubości przekroju badanego elementu. Listwę pomiarową w całości wykonano z betonu przygotowanego według receptury na beton wbudowany w badany element. Wykonanie listwy polegało na umieszczeniu betonu w formie plastikowej i właściwym zagęszczeniu mieszanki. Do tak wykonanej listwy wprowadzono czujniki, równomiernie rozmieszczając je na jej długości. W każdej z listew zamontowano po 10 czujników typu PT 100. W dalszym etapie listwy poddane zostały dwutygodniowej pielęgnacji wilgotnościowej, dla uzyskania odpowiednich parametrów wytrzymałościowych zapewniających właściwe wykonanie pomiarów. Temperaturę zewnętrzną (powietrza i powierzchni elementu) mierzono termometrem elektronicznym ręcznym. Temperaturę powierzchni zewnętrznej elementu mierzono w specjalnie przygotowanym płytkim otworze (1cm) na powierzchni elementu. Różnica w próbnym pomiarze temperatury między czujnikami a termometrem wynosiła $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$. Natomiast odchyłka w pomiarze temperatury między czujnikami dochodziła do $\pm 1^{\circ}\text{C}$, co uznano za wystarczającą dokładność przeprowadzonych badań.

Pierwszy etap badań przeprowadzono na budowie estakady w ciągu obwodnicy śródmiejskiej Wrocławia. Jest to obiekt złożony z dwóch niezależnych ciągłych 15-przęsłowych konstrukcji z betonu sprężonego (rys. 3.3a). Do każdej z głównych estakad „wnikają” łącznice zapewniające komunikację z otaczającym obszarem miejskim (rys. 3.3b). Obiekt wykonany jest w technologii mieszanej; nasuwania podłużnego i betonowania na rusztowaniach. Estakady główne mają przekrój poprzeczny skrzynkowy, łącznice płytowo-żebrowy. Filary estakad głównych i łącznic wykonano jako słupy średnicy $\phi=2,00$ m (rys. 3.3c) i $\phi=1,50$ m.



Rys. 3.3. Przekroje poprzeczne poszczególnych elementów obiektu;

- a) przęsło estakady głównej,
- b) przęsło łącznicy dojazdowej,
- c) filar słupowy pod przęsłem estakady głównej

Beton użyty do budowy poszczególnych elementów obiektu został wykonany według receptur podanych w tab. 3.1.

Tablica 3.1. Receptury mieszanki betonowej dla betonu klasy B30 i B60 *

KLASA BETONU	B30	B60
Zastosowanie	na filary słupowe	na ustroje nośne estakad głównych i łącznic
Cement „WARTA” CEM I MSR 42.5 NA	360,00 kg/m ³	420,00 kg/m ³
Woda, - dla klasy betonu B30 w/c=0.46, w/s=0.44 - dla klasy betonu B60 w/c=0.37, w/s=0.35	165,60 kg/m ³	155,00 kg/m ³
Piasek 0/2 mm	680,46 kg/m ³	687,00 kg/m ³
Grys granitowy 2/8 mm	519,30 kg/m ³	—————
Grys granitowy 8/16 mm	590,93 kg/m ³	—————
Grys bazaltowy 5/8 mm	—————	481,00 kg/m ³
Grys bazaltowy 11/16 mm	—————	763,00 kg/m ³
Superplastyfikator BG-97	1,5% m.c.= 5,4 kg/m ³	—————
Superplastyfikator ViscoCrete 5	—————	0,9% m.c.=3,78 kg/m ³
Mikrokrzemionka	14,4 kg/m ³	18,0 kg/m ³

*) Masę kruszywa i mikrokrzemionki podano w stanie powietrzno suchym. Wymagania dodatkowe odnośnie wykonanego betonu; nasiąkliwość max 4%, F150, W8.

Filary betonowano warstwami grubości 0.4 m, kolejno następującymi po sobie. Betonowanie filara Z8 wysokości 8 m (25 m³ mieszanki betonowej) trwało 6 godzin, a filara Z5 wysokości 5 m (16 m³ mieszanki betonowej) trwało 4 godziny. Do betonowania filarów wykorzystano jedną pompę do betonu.

Przęsła łącznic dojazdowych betonowano warstwami ukośnymi o spadku 1:5 i grubości 0.4 m. Betonowanie łącznicy zachodniej długości 112 m (1450 m³ mieszanki betonowej) trwało 42 godzin, a wschodniej długości 116 m (1510 m³ mieszanki betonowej), trwało 36 godzin. Do betonowania każdej z łącznic wykorzystywano po 3 pompy do betonu.

W przekrojach pomiarowych, całą wysokość przekroju oraz otaczającą ten przekrój strefę szerokości 2 m ułożono w ciągu 2 godzin.

Środniki przęsła estakady głównej betonowano warstwami ukośnymi o spadku 1:5 i grubości 0.4 m. Betonowanie obydwu środników długości 30 m (2x32 m³ mieszanki betonowej) trwało 7 godzin. Do betonowania środników wykorzystano 2 pompy do betonu po jednej na każdy środek. We wszystkich elementach, każda wbudowana warstwa mieszanki betonowej, zagęszczana była wibratorami buławowymi średnicy $\phi=60\text{mm}$.

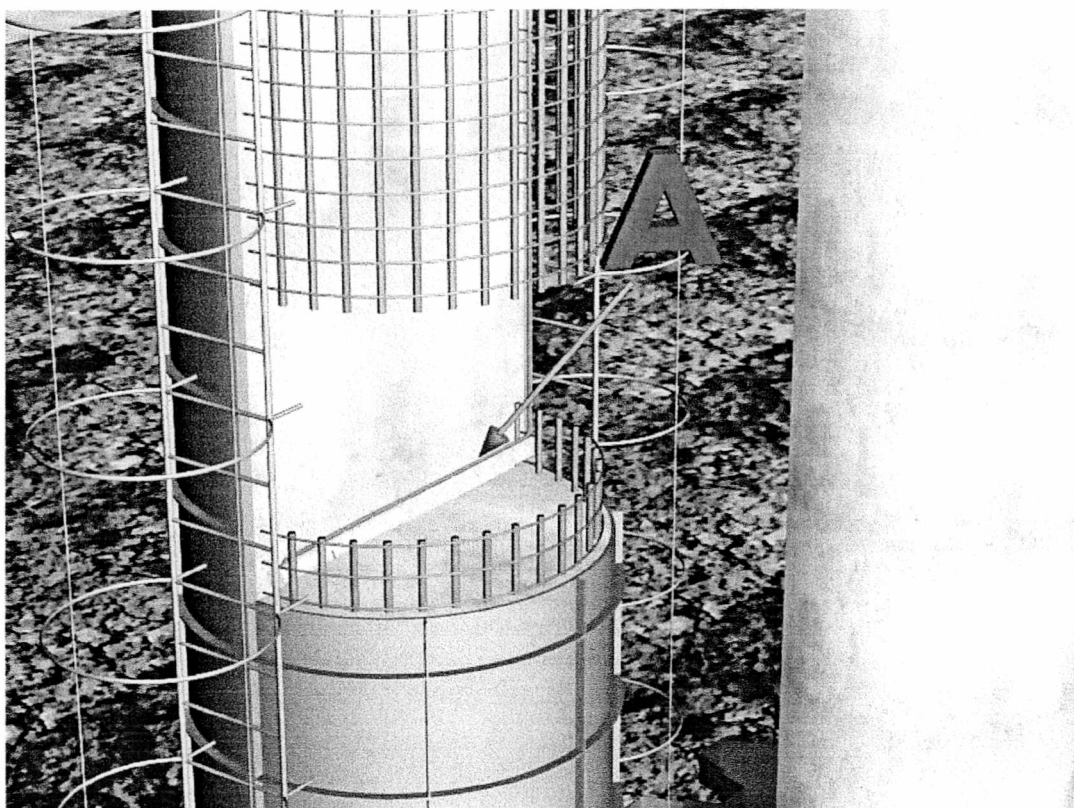
W trakcie dojrzewania betonu, jedynie przęsła łącznicy dojazdowej poddawane były pielęgnacji wilgotnościowej. Pielęgnacja wilgotnościowa dla obydwu przypadków polegała na ułożeniu pojedynczej warstwy z geowłókniny na górnej powierzchni przęsła i intensywnym jej polewaniu wodą. Proces ten przerywano po 4 dniach o zakończenia betonowania.

3.4. Opis badań

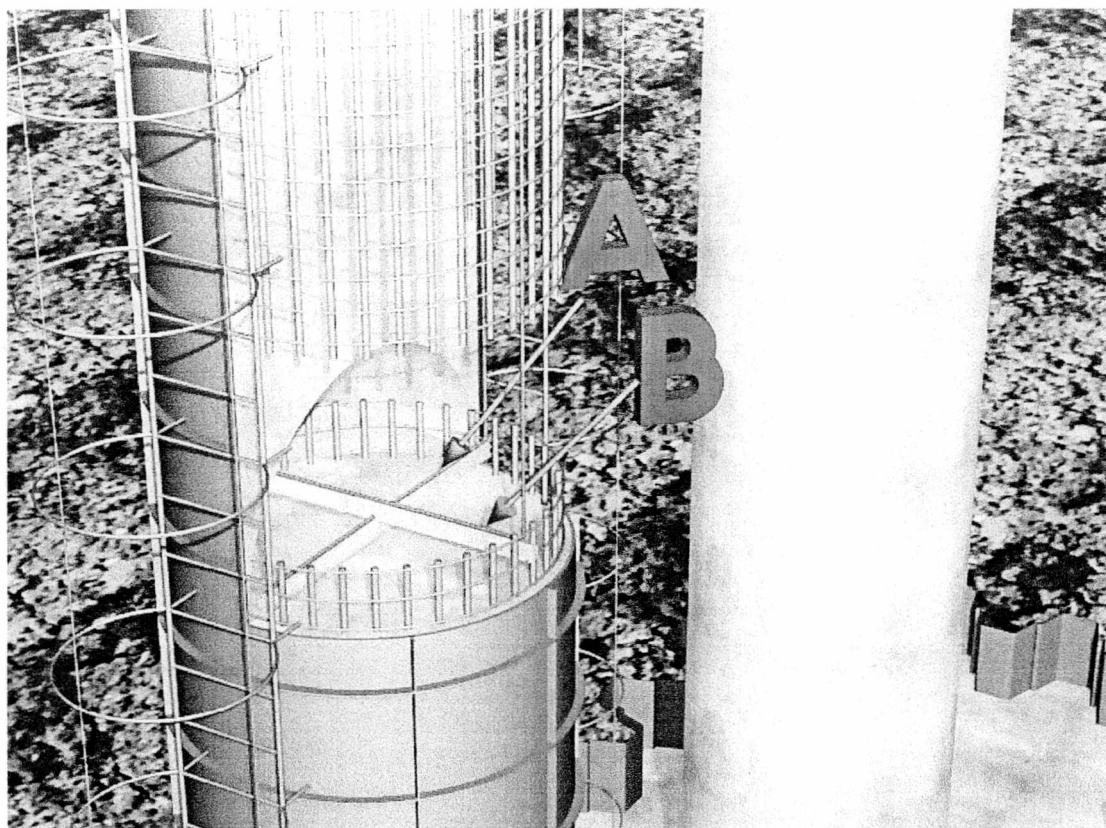
Dla celów badawczych wybrano pięć elementów; filar Z8 wysokości 8.0 m, średnicy $\phi=2.0$ m (rys. 3.4, 3.9a), filar Z5 wysokości 5.0 m, średnicy $\phi=2.0$ m (rys. 3.5, 3.9b), przęsło łącznicy dojazdowej zachodniej (rys. 3.6, 3.9c) i przęsło łącznicy dojazdowej wschodniej (rys. 3.7, 3.9d), składających się z dwóch masywnych dźwigarów z betonu sprężonego oraz środniki przęsła estakady głównej (rys. 3.8, 3.9e). W obu badanych filarach, listwy pomiarowe umieszczono poziomo w środku wysokości filara, zorientowane zgodnie z kierunkami geograficznymi wschód-zachód (rys. 3.9a). Dodatkowo w filarze Z5 wprowadzono dodatkową listwę usytuowaną w kierunkach południowo-północnym (rys. 3.9b). Ustawienie w ten sposób listew poziomych miało na celu pomiar temperatury wewnętrznej uwzględniającej wpływ usytuowania elementu w stosunku do stron świata.

Ze względu na kształt przęsła łącznicy dojazdowej, zdecydowano się na pionowe usytuowanie trzech listew pomiarowych długości 1.5 m, rozstawionych na szerokości dźwigara względem jego osi, w odległości wynoszącej 1.2 m, (rys. 3.9c). Natomiast w przęsle łącznicy dojazdowej wschodniej wykorzystując wcześniejsze doświadczenie, zamontowano pojedynczą listwę pomiarową, ustawioną pionowo w środku dźwigara (rys. 3.9d). Do pomiaru temperatury dojrzewającego betonu w środnikach estakady głównej wykorzystano pojedynczą listwę pionową ustawioną w środku środnika oraz pojedynczą listwę poziomą ustawioną na środku wysokości środnika (rys. 3.9e). W przęsłach łącznic dojazdowych oraz w środnikach przęsła estakady głównej znajdują się osłony (kanały) dla kabli sprężających (patrz rys. 3.6 ÷ 3.8). W każdym z badanych elementów pomierzono temperaturę wbudowanej mieszanki betonowej oraz temperaturę powietrza podczas betonowania. Temperaturę powietrza, powierzchni deskowania i powierzchni betonu po rozdeskowaniu (rozformowaniu) mierzono elektronicznym termometrem ręcznym. Ustawienie listew pomiarowych w każdym elemencie miało na celu pomiar temperatury maksymalnej dojrzewającego betonu. Przewidziany czas pomiaru od chwili wbudowania mieszanki betonowej do każdego z elementów wynosił pełne siedem dni (168 godzin). Ze względu na prowadzone prace budowlane, nie było możliwości przeprowadzenia ciągłego pomiaru, przez cały przewidziany okres badawczy. Utrudnienie to, zmuszało do

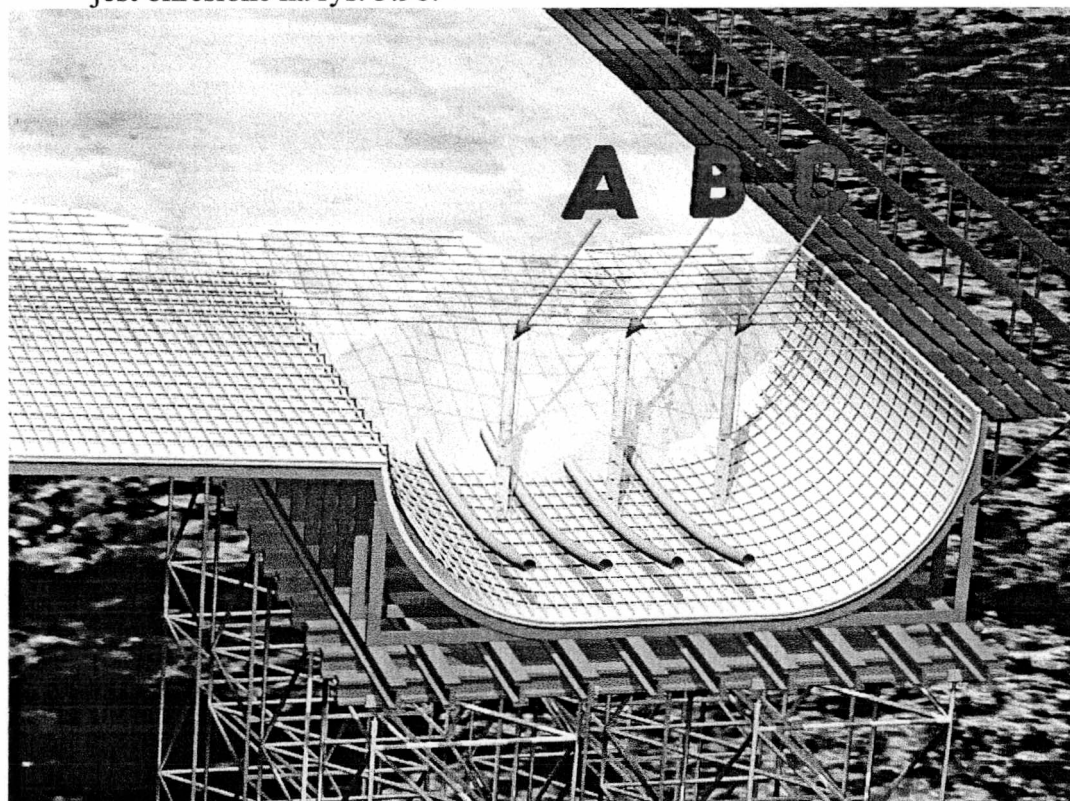
každorazowego podłączania i odłączenia zestaw pomiarowego (UPM 60 firmy Hottinger Baldwin Messtechnik) od końcówek kabli łączących czujniki termiczne. Z tego względu cykl pomiarów podczas badań dla każdego z elementu wynosił, co godzinę przez pierwsze 12 godzin a następnie, co 12 godzin aż do pełnych 168 godzin. Wyniki pomiaru temperatury wewnętrznej, temperatury na powierzchni zewnętrznej deskowania (formy stalowej) i po rozdeskowaniu (rozformowaniu) powierzchni zewnętrznej elementu, zamieszczono na wykresach (patrz rys. 3.10 ÷ 3.15). Na rysunkach (patrz rys. 3.10, 3.12, 3.13) podano również czas rozdeskowania (rozformowania) badanego elementu.



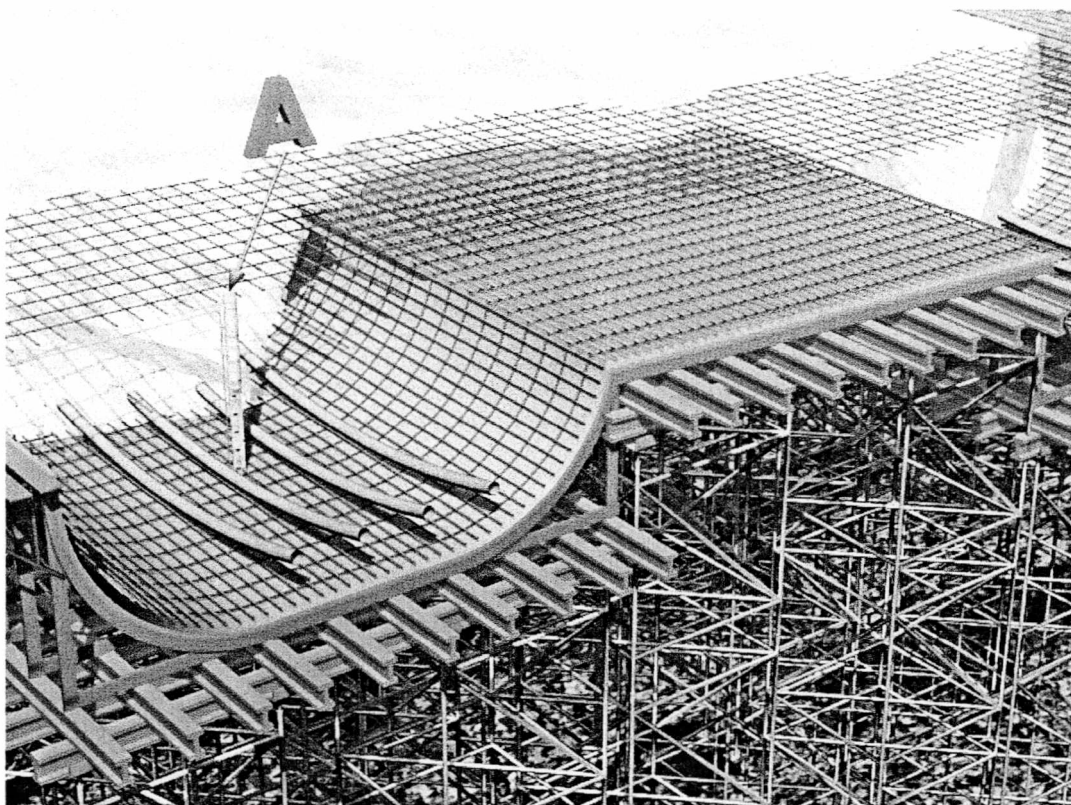
Rys. 3.4. Układ listwy pomiarowej w filarze Z8 wzdłuż osi (Zachód-Wschód). Szczegółowe położenie listwy pomiarowej w elemencie jest określone na rys. 3.9a.



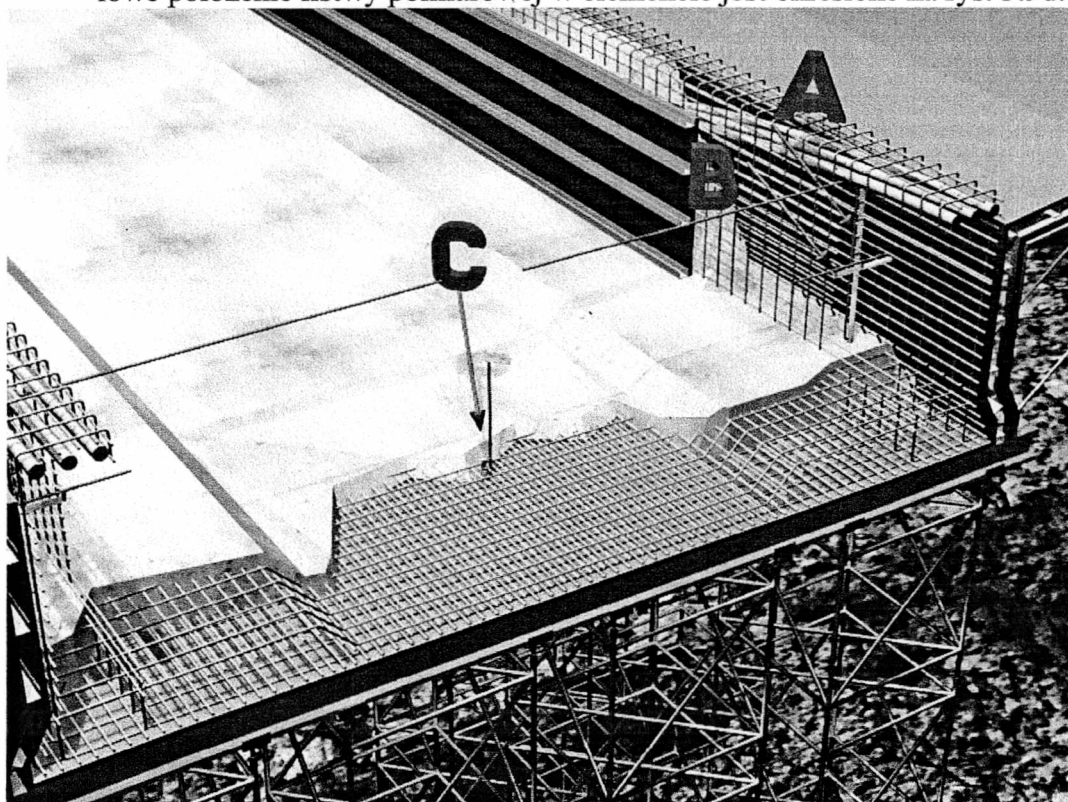
Rys. 3.5. Układ listew pomiarowych w filarze Z5 wzdłuż osi (Zachód - Wschód) oraz (Południe - Północ). Szczegółowe położenie listew pomiarowych w elemencie jest określone na rys. 3.9b.



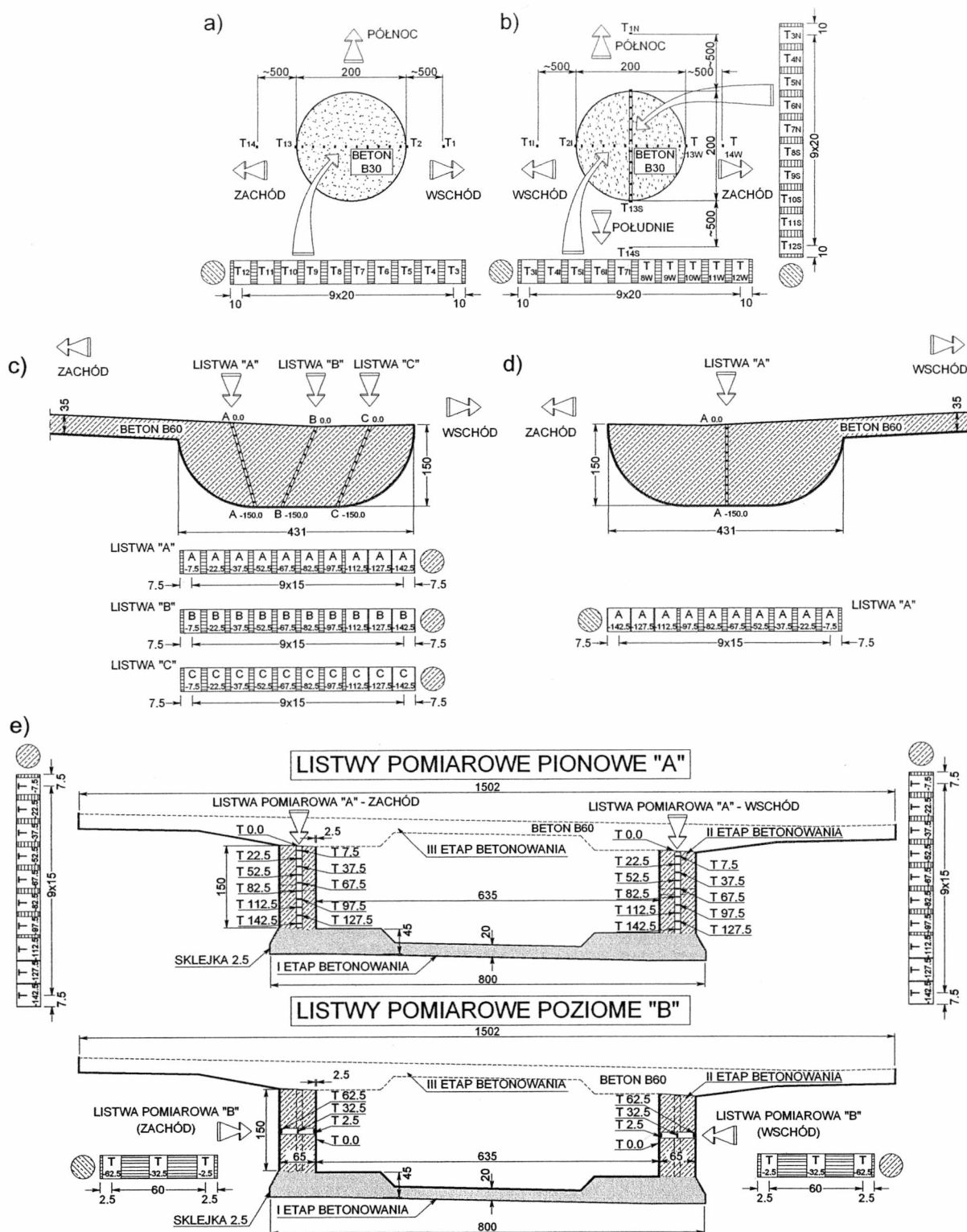
Rys. 3.6. Układ listew pomiarowych w przęśle łącznicy dojazdowej zachodniej. Szczegółowe położenie listew pomiarowych w elemencie jest określone na rys. 3.9c.



Rys. 3.7. Układ listwy pomiarowej w przęśle łącznicy dojazdowej wschodniej. Szczegółowe położenie listwy pomiarowej w elemencie jest określone na rys. 3.9d.



Rys. 3.8. Układ listew pomiarowych w środkach przęsła estakady głównej zachodniej. Szczegółowe położenie listew pomiarowych w elemencie jest określone na rys. 3.9e.



Rys. 3.9. Rozmieszczenie listw pomiarowych w betonowych elementach konstrukcji;
a) w filarze Z8,
b) w filarze Z5,
c) w przęśle łącznicy dojazdowej zachodniej,
d) w przęśle łącznicy dojazdowej wschodniej,
e) w środkach przęsła estakady głównej zachodniej.
Czas rozpoczęcia oraz zakończenia badań podano w tab. 3.2.

Tablica 3.2. Terminarz badań wykonanych na elementach konstrukcyjnych estakady Gądów

L.P.	BADANY ELEMENT	ROZPOCZĘCIE BADAŃ	ZAKOŃCZENIE BADAŃ	ŚREDNIA TEMPE- RATURA POWIE- TRZA W CZASIE BADAŃ
1.	Filar Z8, (rys. 3.4, rys.3.9a)	11 maja 2001, godzina 15 ⁰⁹	18 maja 2001, godzina 15 ⁰⁹	$T_{\text{śr.o}}=16^{\circ}\text{C}$
2.	Filar Z5, (rys. 3.5, rys.3.9b)	18 maja 2001, godzina 11 ³⁰	25 maja 2001, godzina 11 ³⁰	$T_{\text{śr.o}}=16^{\circ}\text{C}$
3.	Łącznica dojazdowa zachodnia będąca dojazdem do estakady głównej zachodniej, (rys. 3.6, rys.3.9 c)	6 lipca 2001, godzina 8 ¹⁵	13 lipca 2001, godzina 8 ¹⁵	$T_{\text{śr.o}}=26^{\circ}\text{C}$
4.	Środniki przęsła estakady głów- nej, (rys 3.8, rys.3.9 e)	27 października 2001, godzina 17 ⁴⁵	3 listopada 2001, godzina 17 ⁴⁵	$T_{\text{śr.o}}=10^{\circ}\text{C}$
5.	Łącznica dojazdowa wschodnia będąca dojazdem do estakady głównej wschodniej, (rys. 3.7, rys.3.9 d)	27 marca 2002, godzina 17 ²³	3 kwietnia 2002, godzina 17 ²³	$T_{\text{śr.o}}=9^{\circ}\text{C}$

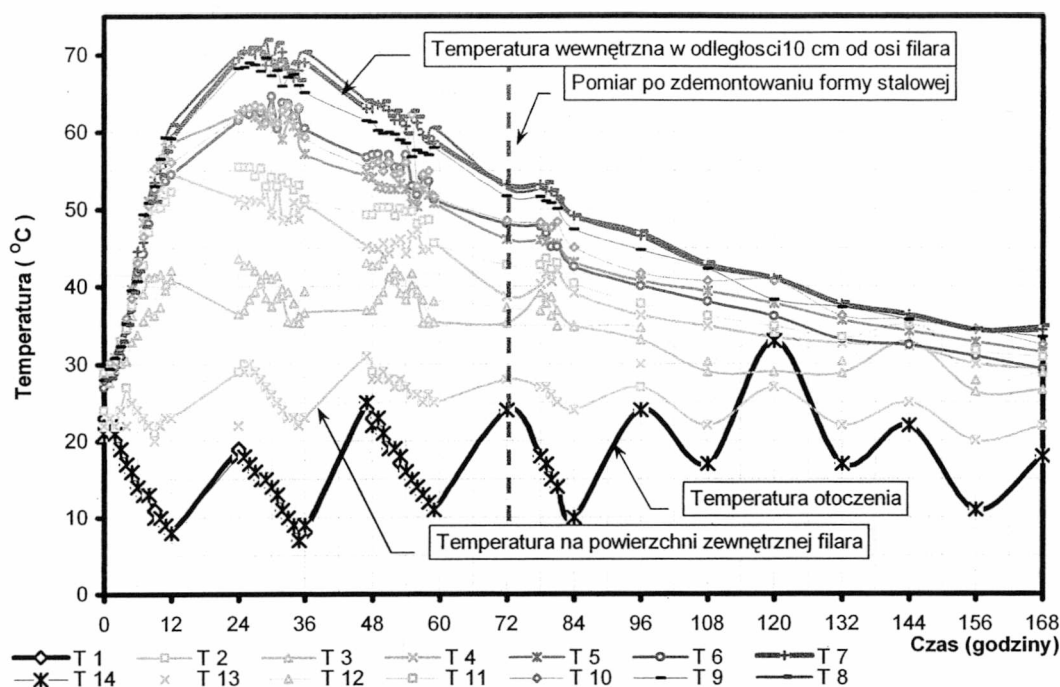
3.5. Wyniki badań

3.5.1. Rozkłady temperatur w słupach podpór (beton klasy B30)

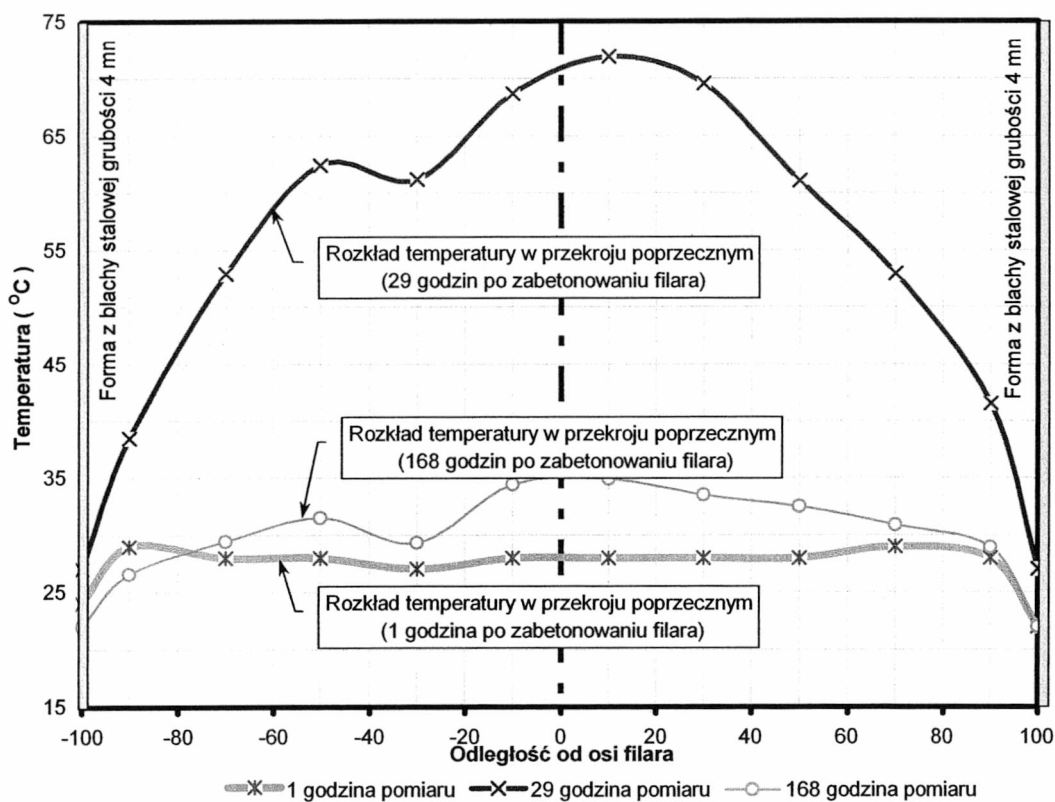
Na rys. 3.10 ÷ rys. 3.15, przedstawiono wyniki pomiarów temperatur, wykonane w filarach Z8 oraz Z5 na wysokości odpowiednio dla filara Z8, 4 m i filara Z5, 3 m, mierzonej od górnej powierzchni płyty fundamentowej.

Pomiary (rys. 3.10 ÷ rys. 3.11) wykonano wzdłuż osi (Zachód – Wschód), natomiast pomiary (rys. 3.12 ÷ rys. 3.15), wzdłuż dwóch prostopadłych osi (Południe – Północ i Wschód – Zachód).

• filar Z8

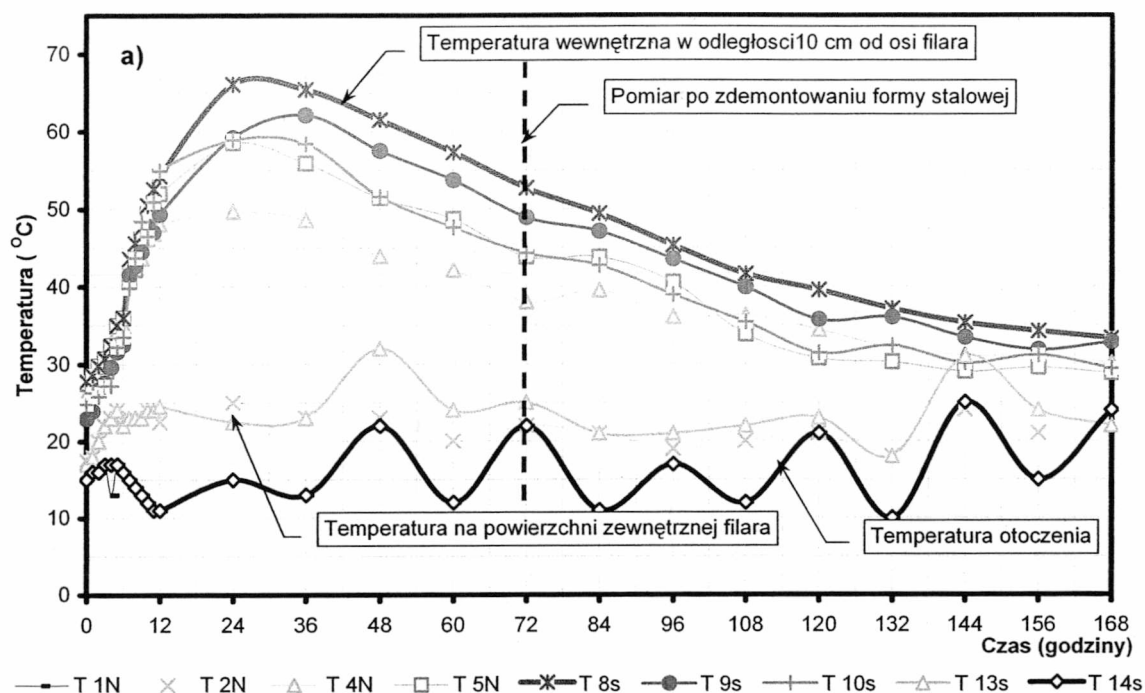


Rys. 3.10. Wartości temperatur w funkcji czasu, zmierzone w filarze Z8 wzdłuż osi Zachód - Wschód

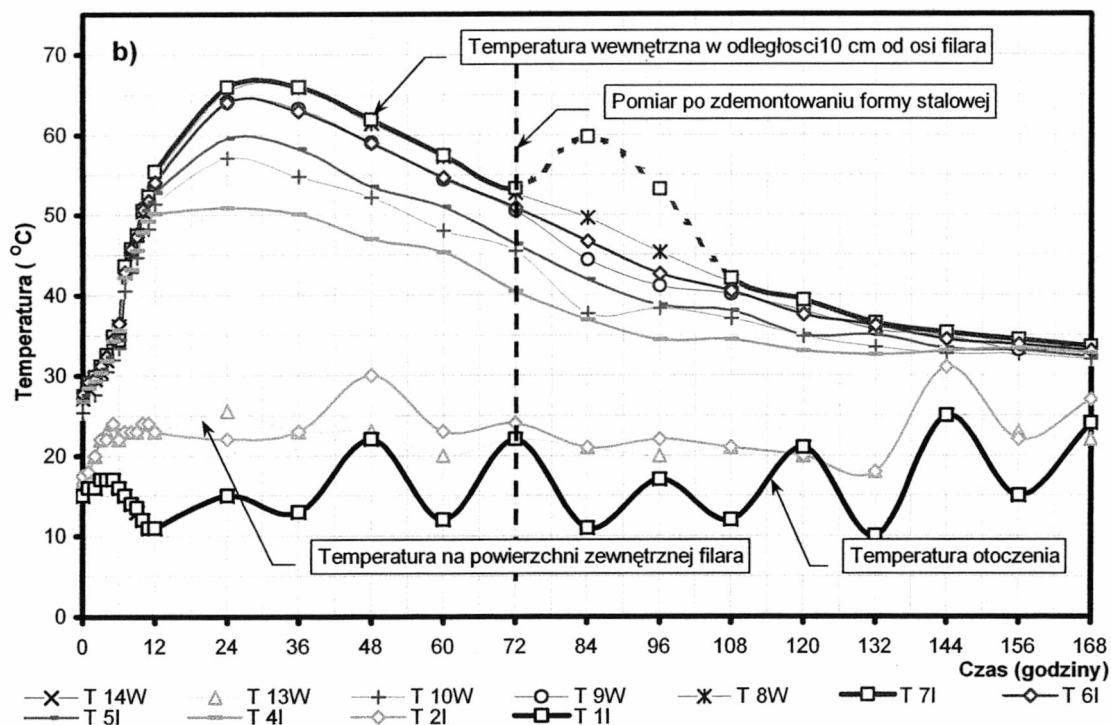


Rys. 3.11. Rozkład temperatur w filarze Z8 wzdłuż osi Zachód – Wschód

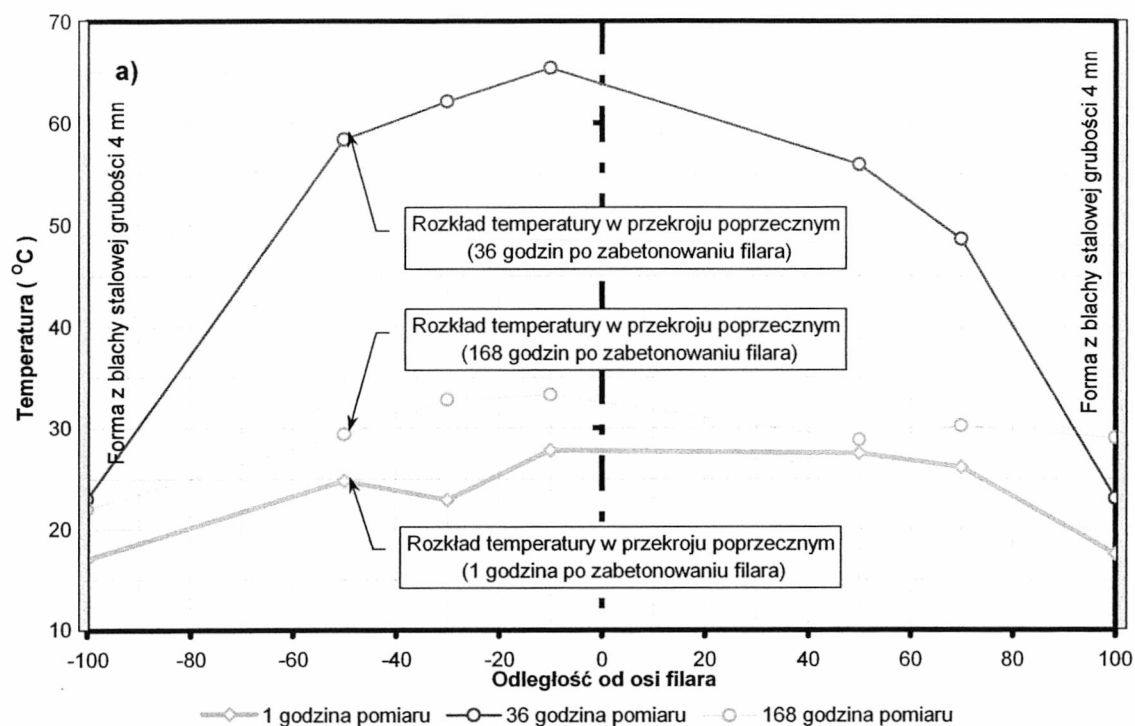
• filar Z5



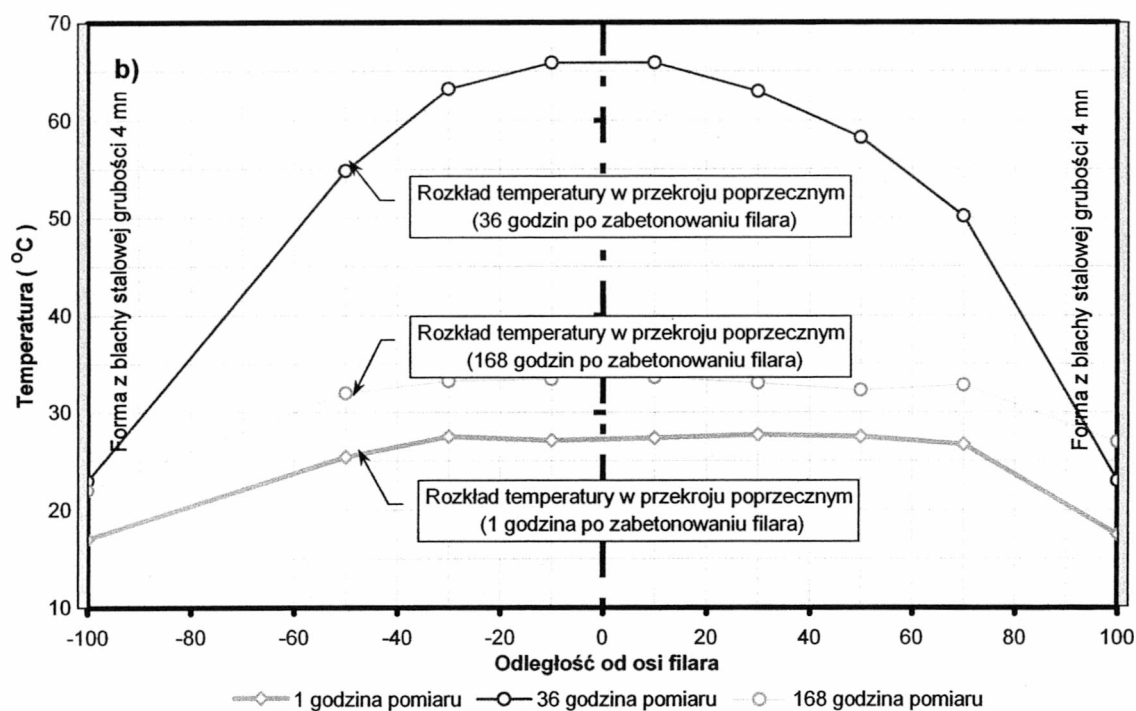
Rys. 3.12. Wartości temperatur w funkcji czasu, zmierzone w filarze Z5 wzdłuż osi Południe – Północ



Rys. 3.13. Wartości temperatur w funkcji czasu, zmierzone w filarze Z5 wzdłuż osi Wschód- Zachód



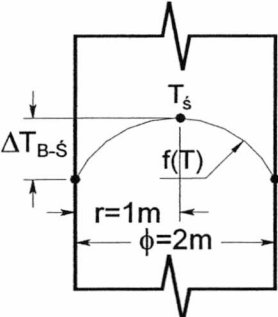
Rys. 3.14. Rozkład temperatur w filarze Z5 wzdłuż osi Południe - Północ



Rys. 3.15. Rozkład temperatur w filarze Z5 wzdłuż osi Wschód- Zachód

Pomierzone temperatury powietrza, mieszanki betonowej, temperatury wewnętrzne oraz różnice temperatur zestawiono w tablicy 3.3.

Tablica 3.3. Pomierzone temperatury i różnice temperatur w czasie badań

MIEJSCE POMIARU	TEMPERATURA I CZAS	
Temperatura mieszanki betonowej,	filar Z8 $T_{\text{betonu}}=24^{\circ}\text{C}$,	filar Z5 $T_{\text{betonu}}=25^{\circ}\text{C}$,
Średnia z pomierzonych w trakcie badań temperatur powietrza,	filar Z8 $T_{\text{śr.o}}=16^{\circ}\text{C}$,	filar Z5 $T_{\text{śr.o}}=16^{\circ}\text{C}$,
Pomierzona minimalna i maksymalna temperatura powietrza w czasie badań,	filar Z8; $T_{\text{min}}=7^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{max}}=33^{\circ}\text{C}$,	filar Z5; $T_{\text{min}}=10^{\circ}\text{C}$ (listwa Z-W), $T_{\text{max}}=25^{\circ}\text{C}$ (listwa Z-W),
Pomierzona maksymalna temperatura w środku elementu – od rozpoczęcia badań,		
Maksymalna różnica z pomierzonych temperatur, między środkiem i powierzchnią zewnętrzną filara.	filar Z8; $\Delta T_{\text{B-s}}=48^{\circ}\text{C}$ po 24 h i 36 h, $\Delta T_{\text{B-s}}=13^{\circ}\text{C}$ po 168 h, filar Z5; $\Delta T_{\text{B-s}}=44^{\circ}\text{C}$ (listwa Z-W), po 24 h, $\Delta T_{\text{B-s}}=12^{\circ}\text{C}$ (listwa Z-W), po 168 h, $\Delta T_{\text{B-s}}=44^{\circ}\text{C}$ (listwa P-P), po 24 h, $\Delta T_{\text{B-s}}=11^{\circ}\text{C}$ (listwa P-P), po 168 h,	

Analizując otrzymane rezultaty stwierdzono, że:

- rozkład temperatur w filarze jest zbliżony do osiowo symetrycznego, (nie zauważono zależności od zorientowania osi pomiarowej),
- zmiany dobowe temperatury powietrza, wpływają na zmiany temperatury przypowierzchniowej elementu,
- średnia z pomierzonych w trakcie badań temperatur powietrza dla obydwu filarów była zbliżona i wynosiła 16°C ,

-
- temperatura mieszanki betonowej wbudowywanej do obydwu filarów była zbliżana i wynosiła $T_{\text{betonu Z8/Z5}}=24^{\circ}\text{C}/25^{\circ}\text{C}$,
 - maksymalna temperatura dojrzewającego betonu w filarze Z8 była wyższa o 6°C , niż w filarze Z5, prawdopodobnie spowodowane było to niższymi temperaturami powietrza (patrz tablica 3.3 - T_{min} , T_{max}) występującymi w trakcie dojrzewania betonu w filarze Z5,
 - czas wystąpienia maksymalnej temperatury dojrzewającego betonu był zbliżony dla obydwu filarów ($24\text{ h} \div 36\text{ h}$),
 - maksymalna różnica z pomierzonych temperatur w filarze Z8 była wyższa o 4°C , niż w filarze Z5,
 - po rozmontowaniu form stalowych (grubości 5 mm) nie stwierdzono gwałtownego spadku temperatury na powierzchni filara, oraz wzdłuż osi pomiarowej co oznacza, że forma stalowa jest bardzo słabym izolatorem i w analizie teoretycznej jej wpływ na rozpatrywane procesy może być pomijany,
 - zanotowano dużą różnicę temperatur między powierzchnią zewnętrzną filara i kolejnymi punktami pomiarowymi, nierównomiernie zwiększającą się w kierunku osi filara,
 - na głębokości 10 cm od powierzchni zewnętrznej i środkiem filara gradient temperatury nie przekraczał 22°C/m ,
 - po około 168 godzinie, temperatura w filarach niebyła ustabilizowana. Różnica temperatury między brzegiem filara i jego środkiem w obydwu przypadkach wynosiła około 10°C ,
 - po zakończeniu badań na ograniczonej (do 5 % całej powierzchni) powierzchni zewnętrznej filarów widoczne były miejscowe pionowe krótkie rysy powierzchniowe o rozwarciu dochodzącym do 0.2 mm i długości nie przekraczające 0.5 m, (przegląd powierzchni wykonano wzrokowo, rozwartość rys określono przy pomocy wzornika do rys),
 - brak widocznych uszkodzeń powierzchni słupów mimo dużego gradientu temperatury należy tłumaczyć istnieniem silnego zbrojenia przypowierzchniowego (na głębokości 0.05 m) i współdziałaniem z zewnętrzną warstwą betonu płaszcza formy. Istnienie płaszcza stalowego powodowało sprężenie objętości betonu wewnątrz formy,
 - w trakcie badań przeprowadzonych na filarze Z8, zanotowano nieprawidłowe odczyty z czujnika zamontowanego na głębokości 70 cm (patrz rys. 3.11) od powierzchni zewnętrznej filara,
 - w filarze Z5 uszkodzeniu uległo 8 czujników, pięć w listwie Południe – Północ na głębokości; 10cm (Południe i Północ), 30cm (Południe), 70cm (Północ), 90cm (Północ),

i trzy w listwie Wschód – Zachód na głębokości; 10cm (Wschód – Zachód) i 30cm (Wschód).

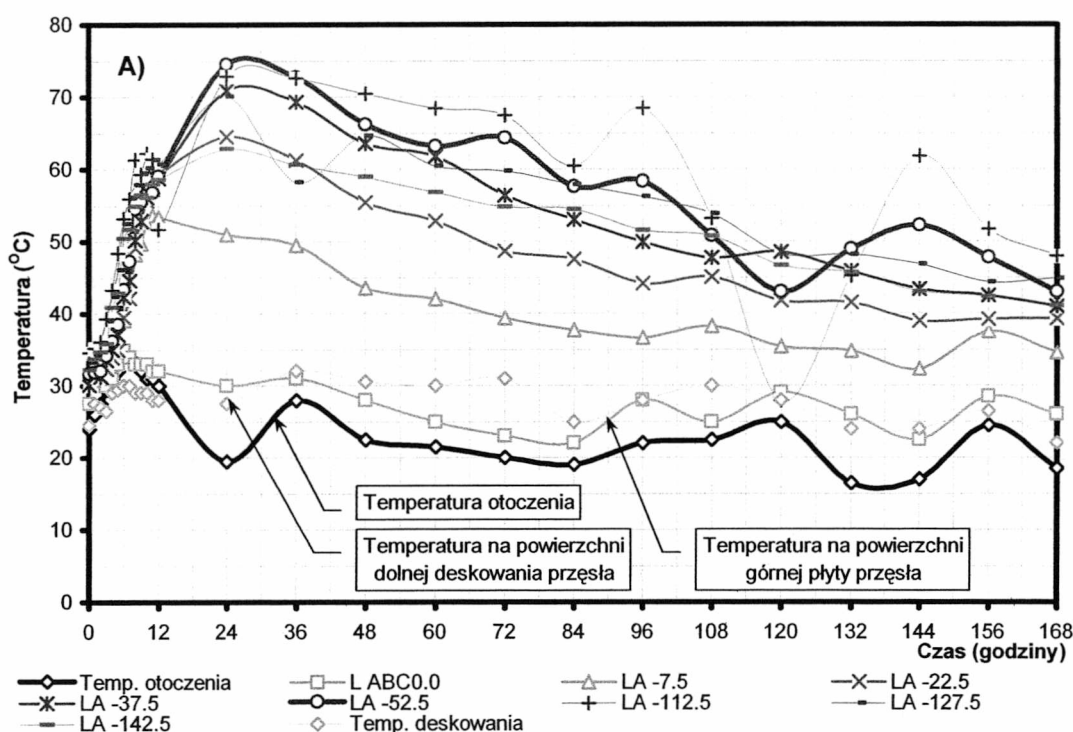
3.5.2. Rozkład temperatur w przęśle łącznicy zachodniej i wschodniej (beton klasy B60)

Na rys. 3.16 ÷ rys. 3.21 przedstawiono wyniki pomiarów temperatur wykonane w środku rozpiętości przęsła łącznicy dojazdowej zachodniej.

Pomiar (rys. 3.16 ÷ rys. 3.21) wykonano na wysokości dźwigara, ustawiając pionowo listwę B w osi dźwigara oraz listwy A i C z przesunięciem na zewnątrz o 1.2 m w kierunku zachodnim (listwa A) oraz wschodnim (listwa C), (rys. 3.6 i rys. 3.9 c). Ze względów technicznych listwy podczas montażu odchyłono od pionu o około 5°.

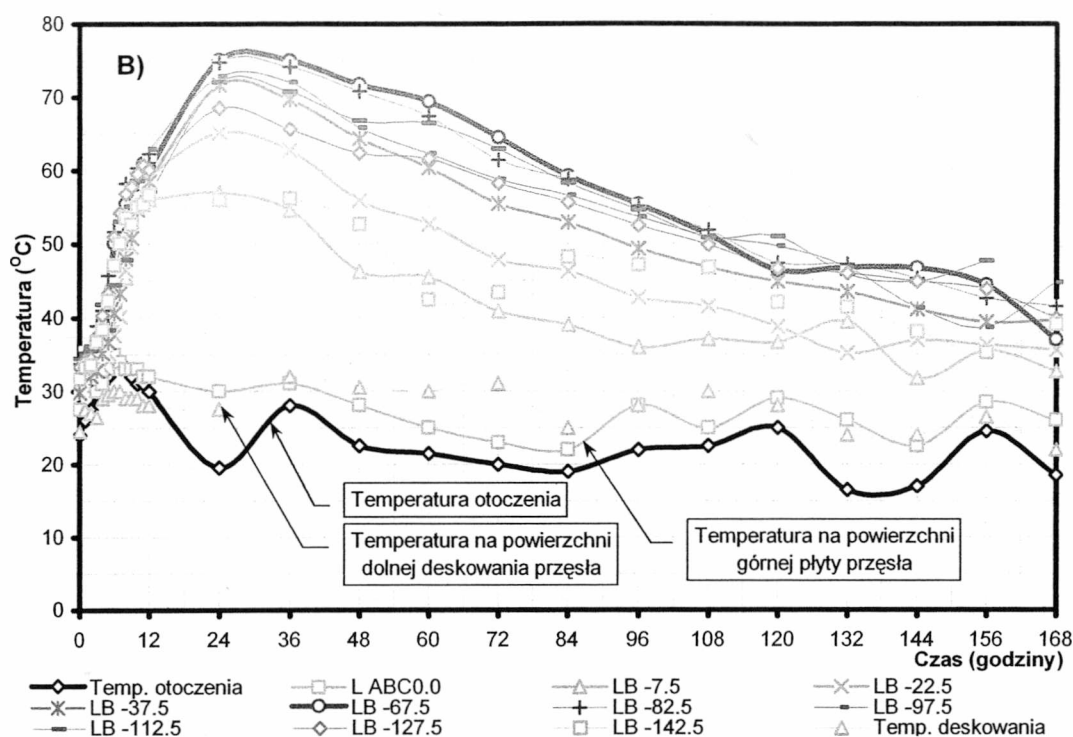
Na rys. 3.22 ÷ rys. 3.23, przedstawiono wyniki pomiarów temperatur wykonane w środku rozpiętości przęsła łącznicy dojazdowej wschodniej. Pomiar wykonano na wysokości dźwigara, ustawiając pojedynczą pionowo listwę A w osi dźwigara (rys. 3.7 i rys. 3.9d).

• łącznica zachodna



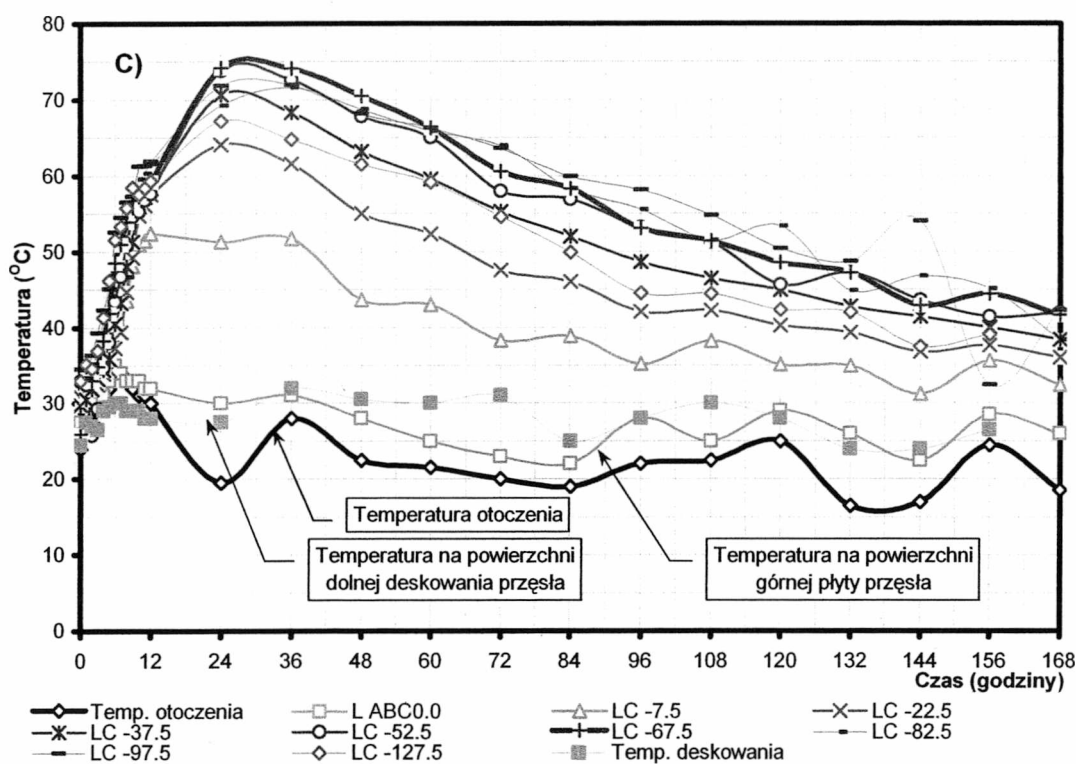
Rys. 3.16. Wartości temperatur w poszczególnych punktach osi pomiarowej pionowej w funkcji czasu dla przęsła łącznicy dojazdowej zachodniej;

- listwa pomiarowa pionowa A



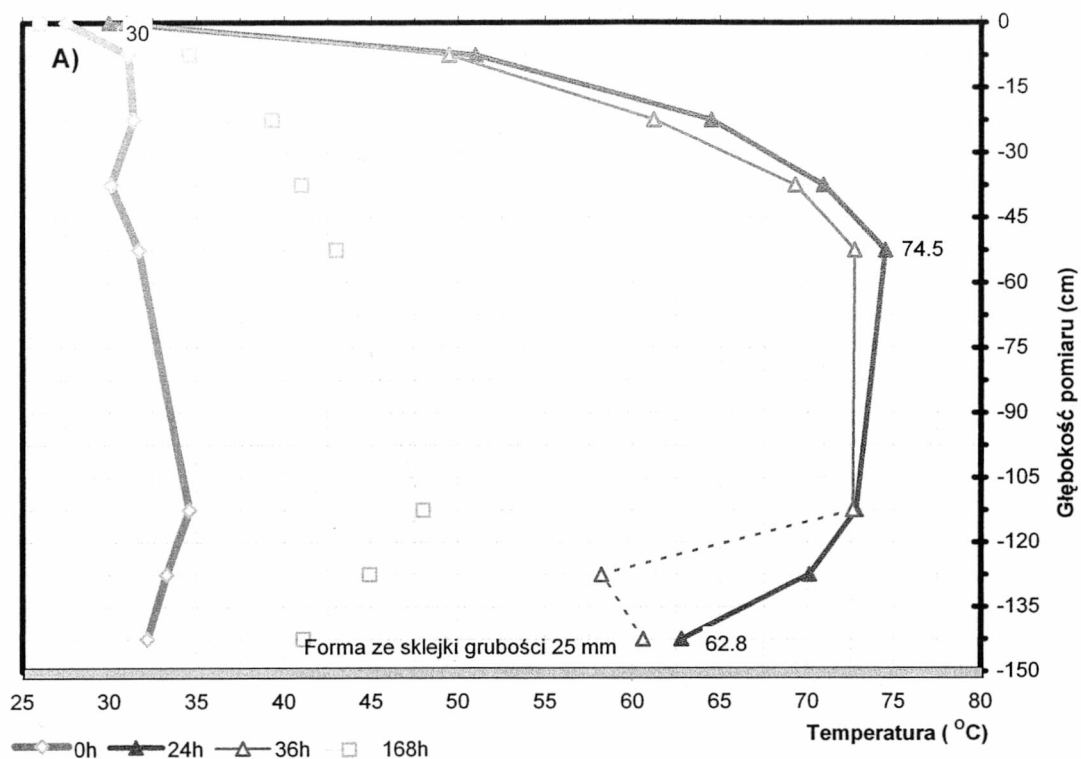
Rys. 3.17. Wartości temperatur w poszczególnych punktach osi pomiarowej pionowej w funkcji czasu dla przęsła łącznicy dojazdowej zachodniej;

- listwa pomiarowa pionowa B



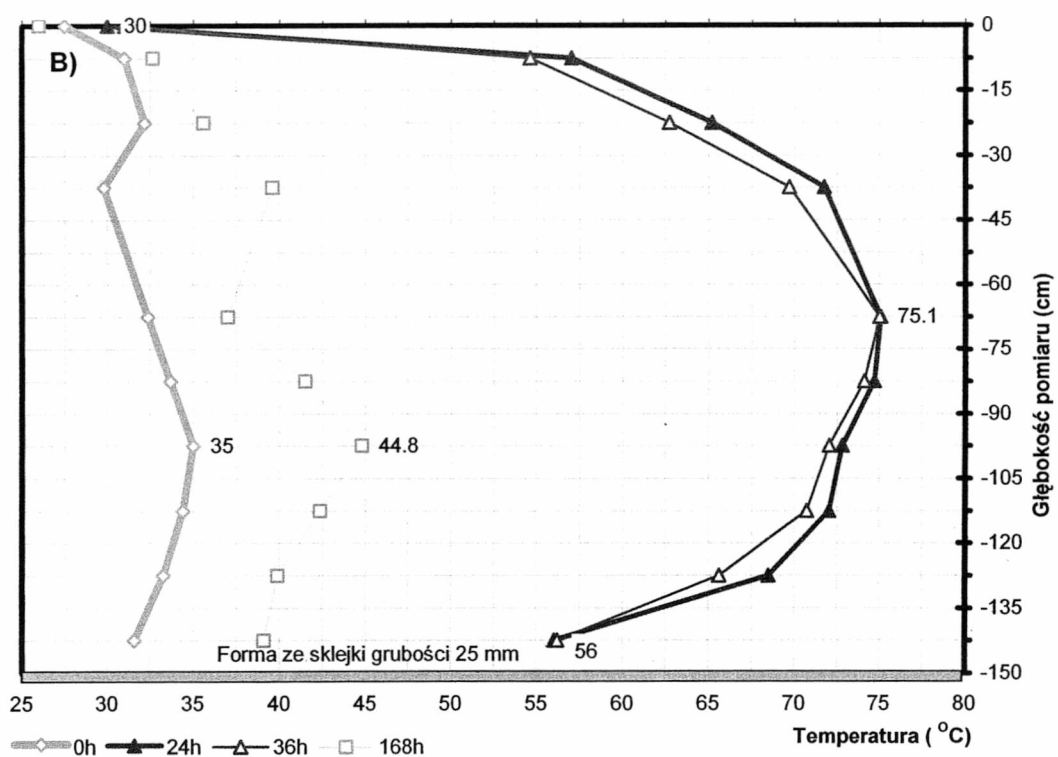
Rys. 3.18. Wartości temperatur w poszczególnych punktach osi pomiarowej pionowej w funkcji czasu dla przęsła łącznicy dojazdowej zachodniej;

- listwa pomiarowa pionowa C



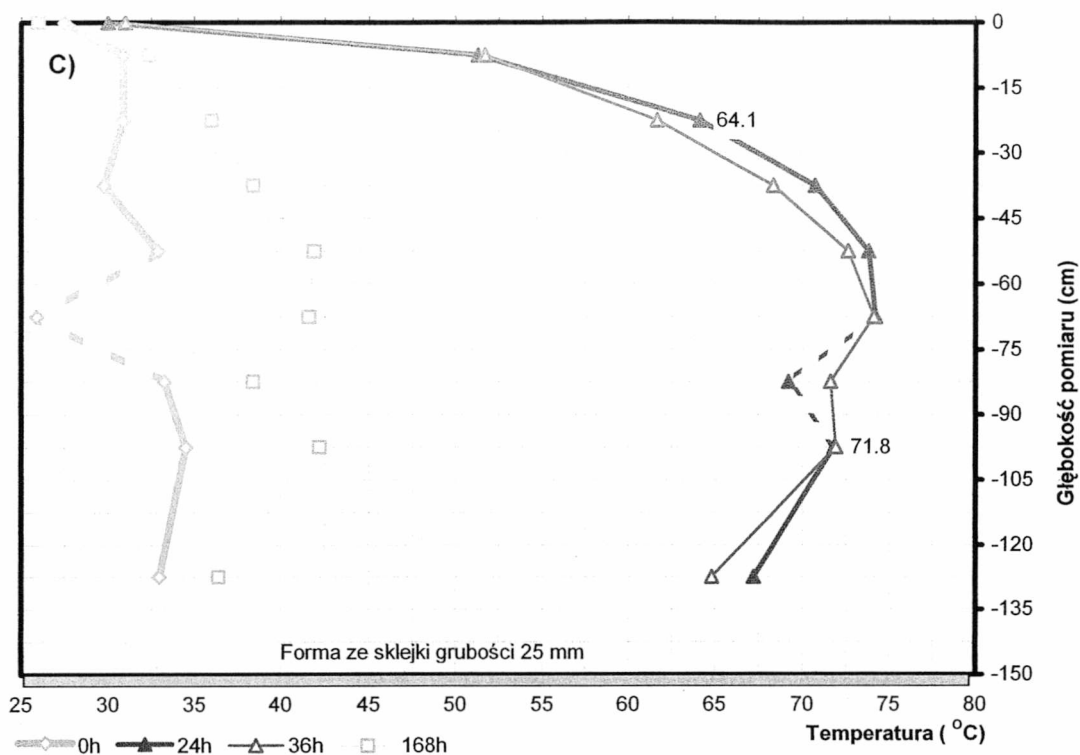
Rys. 3.19. Rozkład temperatur w przekroju poprzecznym przęsła łącznicy dojazdowej zachodniej;

- listwa pomiarowa pionowa A



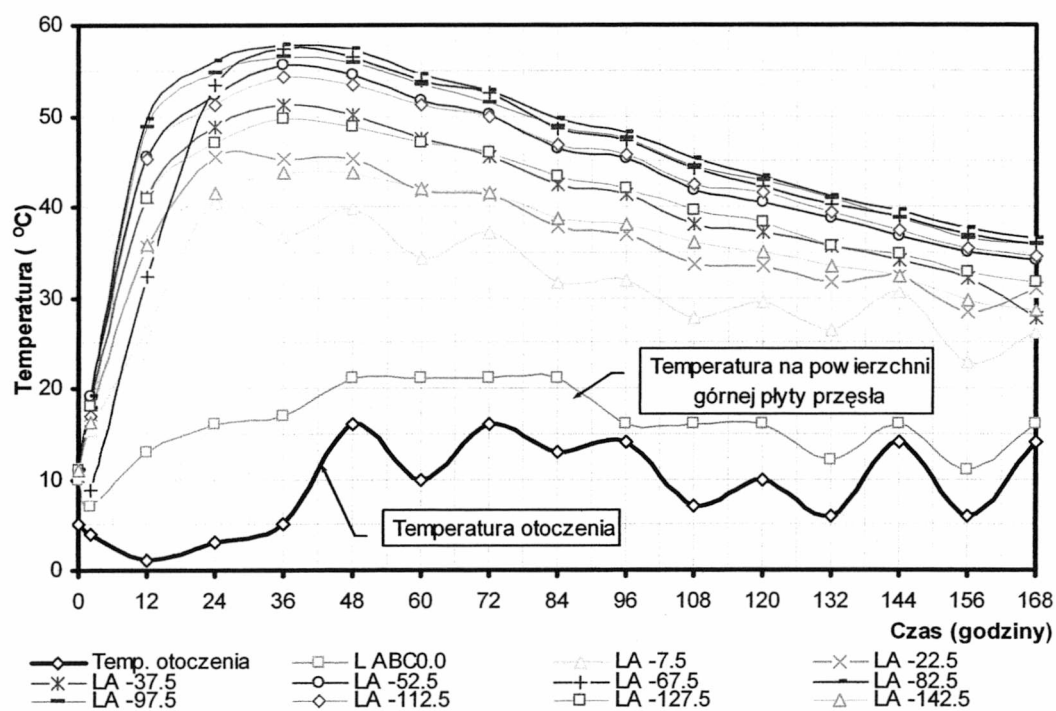
Rys. 3.20. Rozkład temperatur w przekroju poprzecznym przęsła łącznicy dojazdowej;

- listwa pomiarowa pionowa B

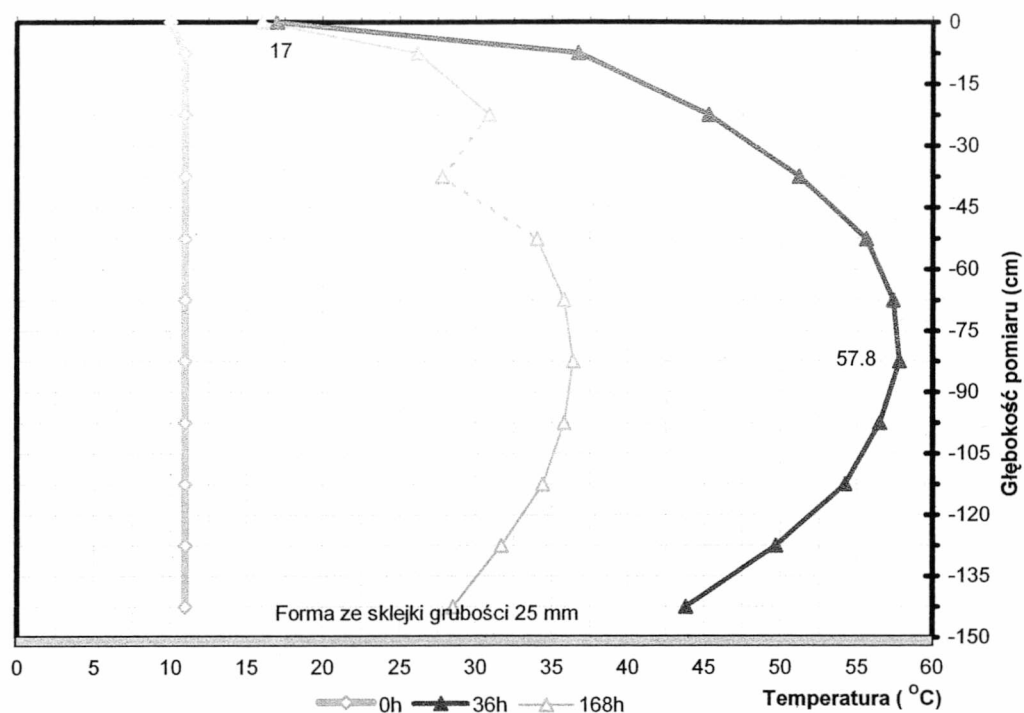


Rys. 3.21. Rozkład temperatur w przekroju poprzecznym przęsła łącznicy dojazdowej;
• listwa pomiarowa pionowa C

• łącznica wschodnia



Rys. 3.22. Wartości temperatur w poszczególnych punktach osi pomiarowej pionowej w funkcji czasu dla przęsła łącznicy dojazdowej wschodniej;
• listwa pomiarowa pionowa A



Rys. 3.23. Rozkład temperatur w przekroju poprzecznym przęsła łącznicy dojazdowej wschodniej;

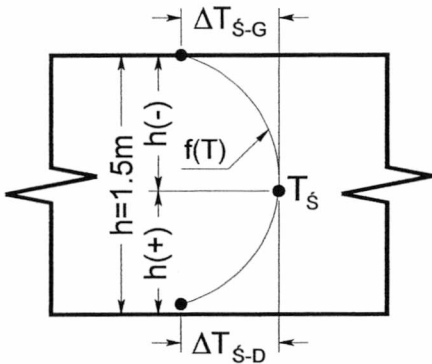
- listwa pomiarowa pionowa A

Pomierzone temperatury powietrza, mieszanki betonowej, temperatury wewnętrzne oraz różnice temperatur zestawiono w tablicy 3.4.

Tablica 3.4. Pomierzone temperatury i różnice temperatur w czasie badań

MIEJSCE POMIARU	TEMPERATURA I CZAS	
Temperatura mieszanki betonowej,	łącznica zachodnia; $T_{\text{betonu}}=26^{\circ}\text{C}$,	łącznica wschodnia; $T_{\text{betonu}}=10^{\circ}\text{C}$,
Średnia z pomierzonych w trakcie badań temperatur powietrza,	łącznica zachodnia; $T_{\text{śr.o}}=26^{\circ}\text{C}$,	łącznica wschodnia; $T_{\text{śr.o}}=9^{\circ}\text{C}$,
Pomierzona minimalna i maksymalna temperatura powietrza w czasie badań,	łącznica zachodnia; $T_{\text{min}}=17^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{max}}=34^{\circ}\text{C}$,	łącznica wschodnia; $T_{\text{min}}=1^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{max}}=16^{\circ}\text{C}$,

C.d. Tablica 3.4.

MIEJSCE POMIARU	TEMPERATURA I CZAS
Pomierzona maksymalna temperatura w środku elementu, od rozpoczęcia badań, 	łącznica zachodnia; $T_{\dot{s}(24h)} = 75^{\circ}\text{C}$ (listwa A) $h = -52.5\text{ cm}$, $T_{\dot{s}(168h)} = 48^{\circ}\text{C}$ (listwa A) $h = -112.5\text{ cm}$ $T_{\dot{s}(24+36h)} = 75^{\circ}\text{C}$ (listwa B) $h = -67.5\text{ cm}$ $T_{\dot{s}(168h)} = 45^{\circ}\text{C}$ (listwa B) $h = -97.5\text{ cm}$ $T_{\dot{s}(24+36h)} = 74^{\circ}\text{C}$ (listwa C) $h = -67.5\text{ cm}$, $T_{\dot{s}(168h)} = 42^{\circ}\text{C}$ (listwa C) $h = -97.5\text{ cm}$, łącznica wschodnia; $T_{\dot{s}(36h)} = 58^{\circ}\text{C}$ (listwa A) $h = -82.5\text{ cm}$, $T_{\dot{s}(168h)} = 36^{\circ}\text{C}$ (listwa A) $h = -82.5\text{ cm}$,
Maksymalna różnica z pomierzonych temperatur, między powierzchnią górną i środkiem dźwigara,	łącznica zachodnia; $\Delta T_{\dot{s}-G(24h)} = 45^{\circ}\text{C}$ (listwa A), $h = -52.5\text{ cm}$, $\Delta T_{\dot{s}-G(168h)} = 22^{\circ}\text{C}$ (listwa A), $h = -112.5\text{ cm}$, $\Delta T_{\dot{s}-G(24h)} = 45^{\circ}\text{C}$ (listwa B), $h = -67.5\text{ cm}$, $\Delta T_{\dot{s}-G(168h)} = 19^{\circ}\text{C}$ (listwa B), $h = -97.5\text{ cm}$, $\Delta T_{\dot{s}-G(24h)} = 44^{\circ}\text{C}$ (listwa C), $h = -67.5\text{ cm}$, $\Delta T_{\dot{s}-G(168h)} = 16^{\circ}\text{C}$ (listwa C), $h = -97.5\text{ cm}$, łącznica wschodnia; $\Delta T_{\dot{s}-G(36h)} = 41^{\circ}\text{C}$ (listwa A), $h = -82.5\text{ cm}$, $\Delta T_{\dot{s}-G(168h)} = 20^{\circ}\text{C}$ (listwa A), $h = -82.5\text{ cm}$,
Maksymalna różnica z pomierzonych temperatur, między spodem (7cm powyżej dolnej powierzchni dźwigara) i środkiem dźwigara, w listwie C pomiar wykonany jest 22 cm powyżej dolnej powierzchni dźwigara).	łącznica zachodnia; $\Delta T_{\dot{s}-D(36h)} = 15^{\circ}\text{C}$ (listwa A), $h = 92.5\text{ cm}$, $\Delta T_{\dot{s}-D(168h)} = 7^{\circ}\text{C}$ (listwa A), $h = 37.5\text{ cm}$, $\Delta T_{\dot{s}-D(24+48h)} = 19^{\circ}\text{C}$ (listwa B), $h = 82.5\text{ cm}$, $\Delta T_{\dot{s}-D(168h)} = 6^{\circ}\text{C}$ (listwa B), $h = 52.5\text{ cm}$, $\Delta T_{\dot{s}-D(96h)} = 14^{\circ}\text{C}$ (listwa C), $h = 52.5\text{ cm}$, $\Delta T_{\dot{s}-D(168h)} = 6^{\circ}\text{C}$ (listwa C), $h = 52.5\text{ cm}$, łącznica wschodnia; $\Delta T_{\dot{s}-D(24+48h)} = 15^{\circ}\text{C}$ (listwa A), $h = 67.5\text{ cm}$, $\Delta T_{\dot{s}-D(168h)} = 8^{\circ}\text{C}$ (listwa A), $h = 67.5\text{ cm}$,

Analizując otrzymane rezultaty stwierdzono, że:

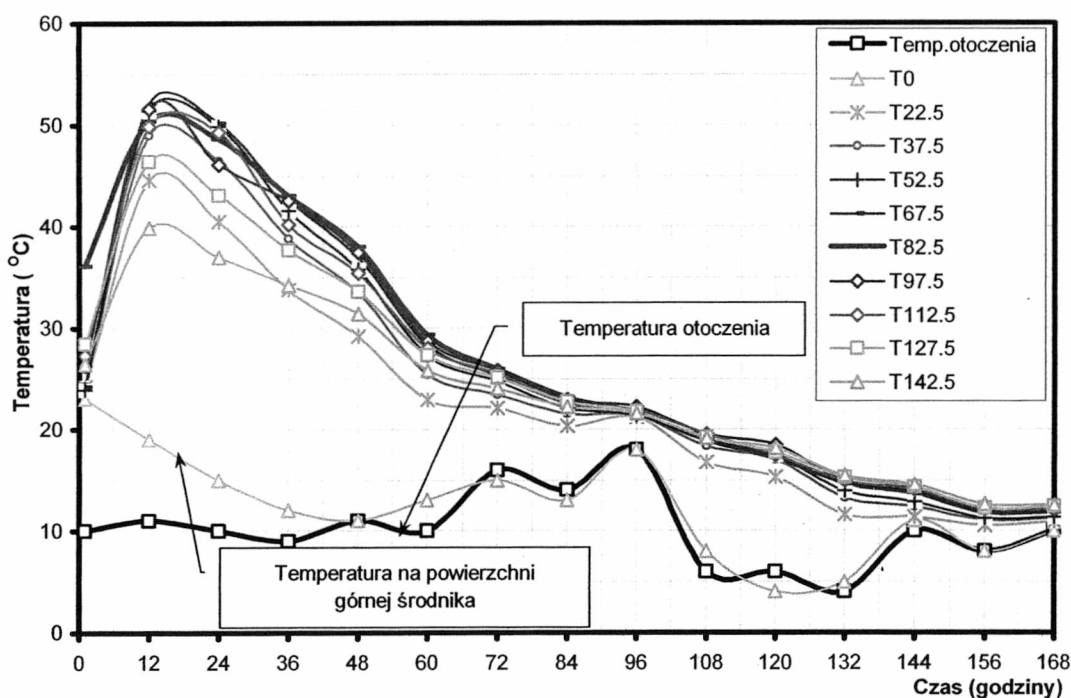
- temperatura mieszanki betonowej wbudowywanej do przęsła łącznicy zachodniej była 16°C wyższa (element wykonany latem), niż mieszanki betonowej wbudowanej do przęsła łącznicy wschodniej (element wykonany wiosną),
- temperatura maksymalna dojrzewającego betonu w dźwigarze łącznicy zachodniej była 18°C wyższa (element wykonany latem), niż w dźwigarze łącznicy wschodniej (element wykonany wiosną),
- maksymalna temperatura wewnętrzna dojrzewającego betonu dla obydwu dźwigarów wystąpiła między $24 \div 36$ godziną badań,
- zanotowano dużą różnicę temperatur między górną powierzchnią zewnętrzną dźwigara a kolejnymi punktami pomiarowymi, nierównomiernie zwiększającą się w głąb dźwigara,
- maksymalna różnica z pomierzonych temperatur między środkiem i powierzchnią górną oraz między środkiem i powierzchnią dolną, w dźwigarze łącznicy zachodniej była 4°C wyższa (element wykonany latem) niż w dźwigarze łącznicy wschodniej (element wykonany wiosną),
- zanotowano duży spadek różnicy temperatur z $\Delta T_{\text{ś-G}(24\text{h})} = 45^{\circ}\text{C}$ (między środkiem a górną powierzchnią przęsła) do 21°C (między środkiem a warstwą znajdującą się na głębokości 7.5 cm od górnej powierzchni przęsła),
- duży spadek temperatury wystąpił na głębokości 7 cm w strefie silnego zbrojenia (rys. 3.7, 3.19 $\div$ 3.21 i 3.23), należy podkreślić, że beton zbrojony ma znacznie większą wydłużalność przy rozciąganiu niż niezbrojony (wg. Godyckiego-Ćwirko [180] nawet 3 razy),
- po zakończeniu badań na ograniczonej powierzchni zewnętrznej przęseł (do 5 % całej powierzchni) zauważono miejscowe krótkie i płytkie rysy powierzchniowe o rozwarciu nie przekraczającym 0.2 mm i długości nie przekraczającej 0.5 m, (przegląd powierzchni wykonano wzrokowo, rozwarłość rys określono przy pomocy wzornika do rys),
- nikłe zarysowania powierzchni przęseł mimo dużego gradientu temperatury należy tłumaczyć istnieniem silnego zbrojenia przypowierzchniowego (na głębokości 0.03 m),
- analizując wyniki rozkładów temperatury na grubości belek łącznic widać, że sklejka drewniana (gr. 0.025 m) jest bardzo dobrym izolatorem, spowalniającym odpływ ciepła z elementu,
- w trakcie badań przeprowadzonych na przęsle łącznicy zachodniej zanotowano nieprawidłowe odczyty z czujników w listwach A, B i C, czujników zamontowanych na głębokości mierzonej od górnej powierzchni przęsła; -52.5 cm, -112.5 cm, -127.5 cm

- (Listwa A), -67.5 cm, -112.5 cm, -142.5 cm (Listwa B) i -67.5 cm, -82.5 cm, -97.5 cm, (Listwa C) (patrz rys. 3.16 ÷ 3.21),
- w trakcie badań uszkodzeniu uległo 6 czujników; trzy w listwie A na głębokości -67.5 cm, -82.5 cm, -97.5 cm, jeden w listwie B na głębokości -52.5 cm i dwa w listwie C na głębokości -112.5 cm, -142.5 cm,
 - w trakcie badań przeprowadzonych na przęśle łącznicy wschodniej żaden z czujników nie uległ uszkodzeniu, natomiast zanotowano nieprawidłowy odczyt z czujnika zamontowanego na głębokości -37.5 cm, (patrz rys. 3.23).

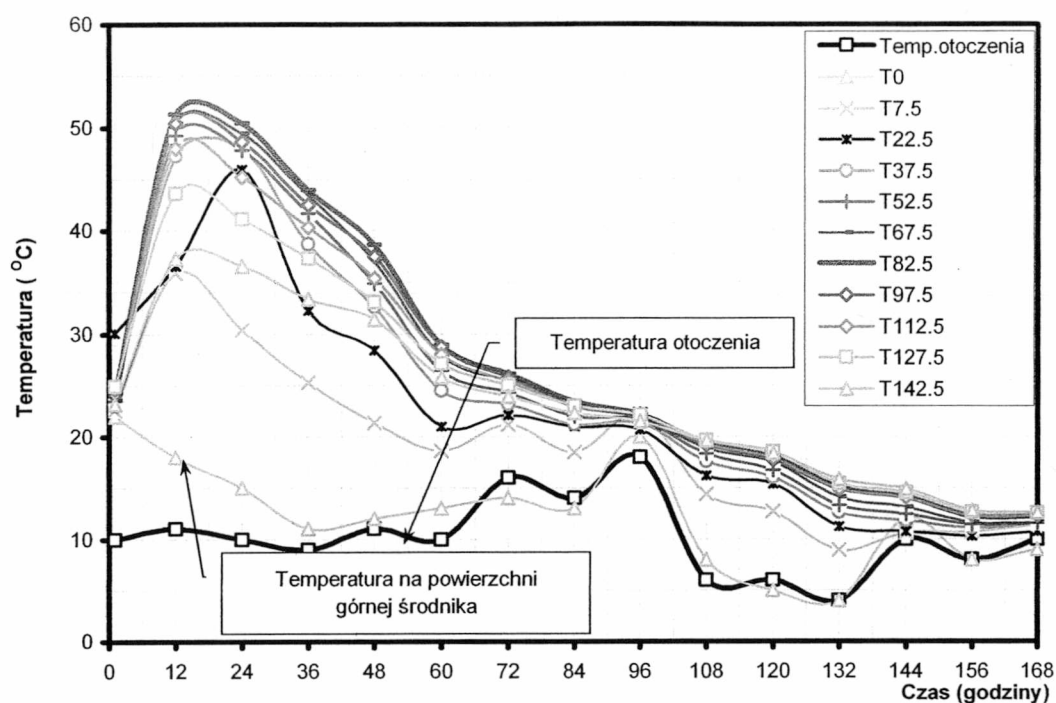
3.5.3. Rozkłady temperatur w środnikach estakady głównej (beton klasy B60)

Na rys. 3.24 ÷ rys. 3.31 przedstawiono wyniki pomiarów temperatur wykonane w środku środników przęsla estakady głównej.

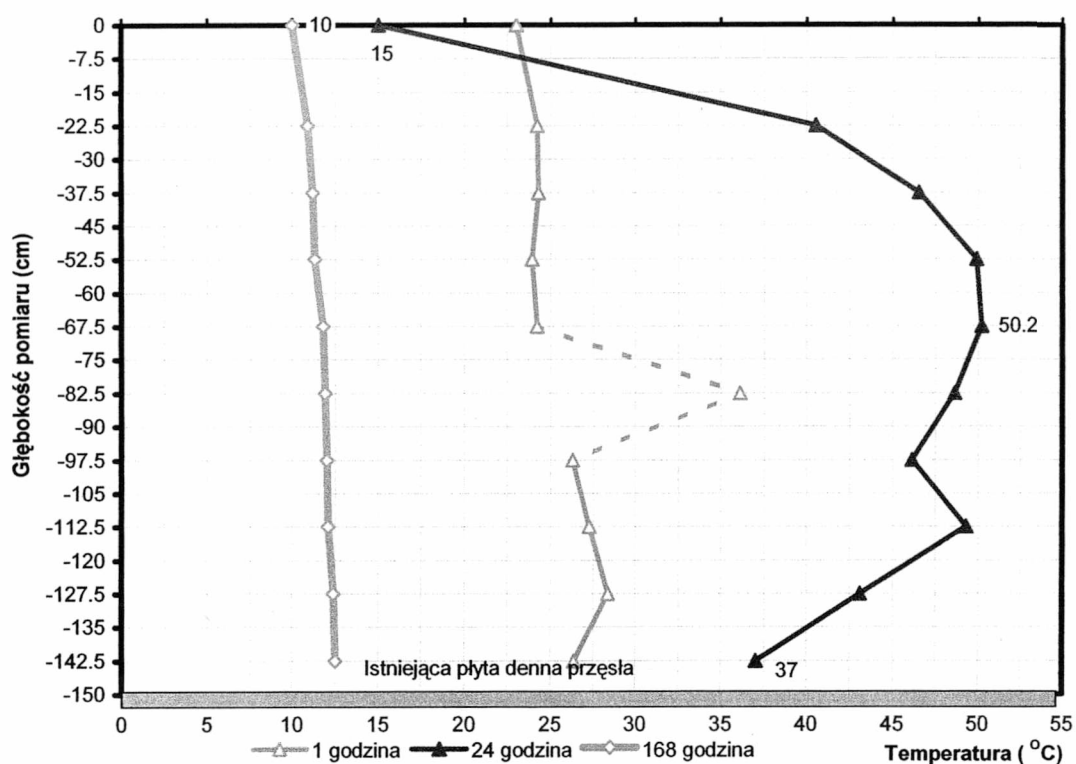
Pomiar (rys. 3.24 ÷ rys. 3.27) wykonano przy ustawieniu pionowej listwy A w osi środnika (rys. 3.8 i rys. 3.9 e), natomiast pomiar (rys. 3.28 ÷ rys. 3.31) wykonano przy ustawieniu poziomym listwy B na środku wysokości środnika (rys. 3.8 i rys. 3.9 e).



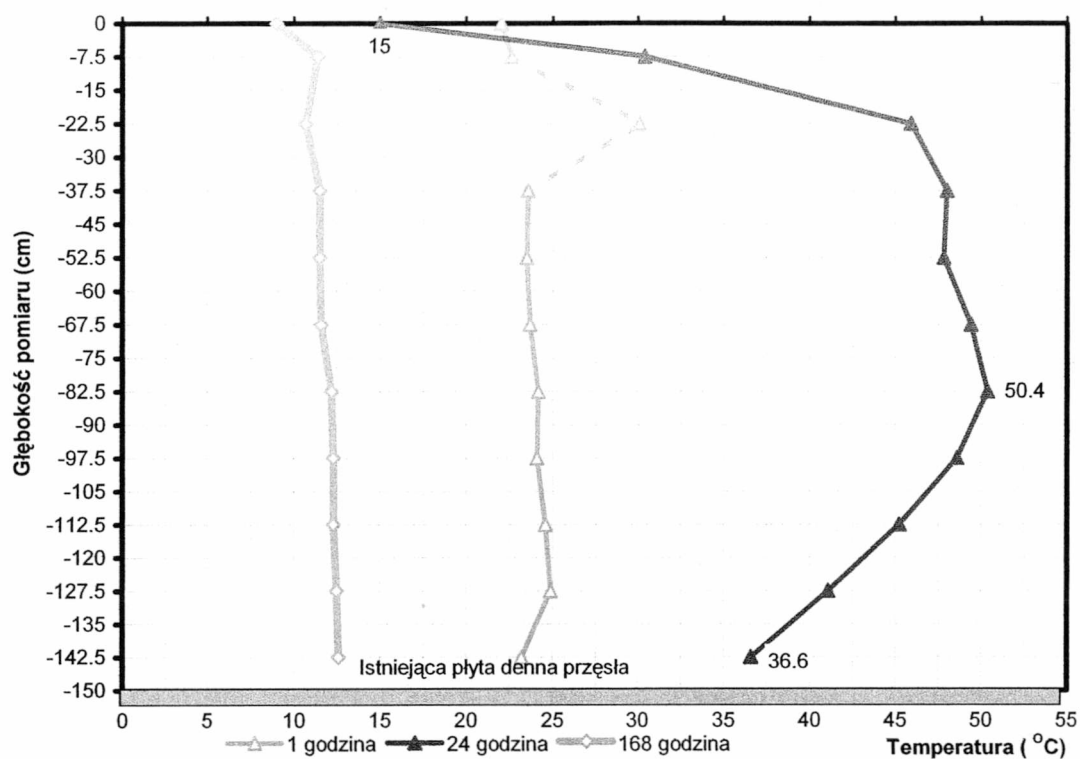
Rys. 3.24. Wartości temperatur w poszczególnych punktach osi pionowej w funkcji czasu;
• środnik zachodni przęsla estakady głównej



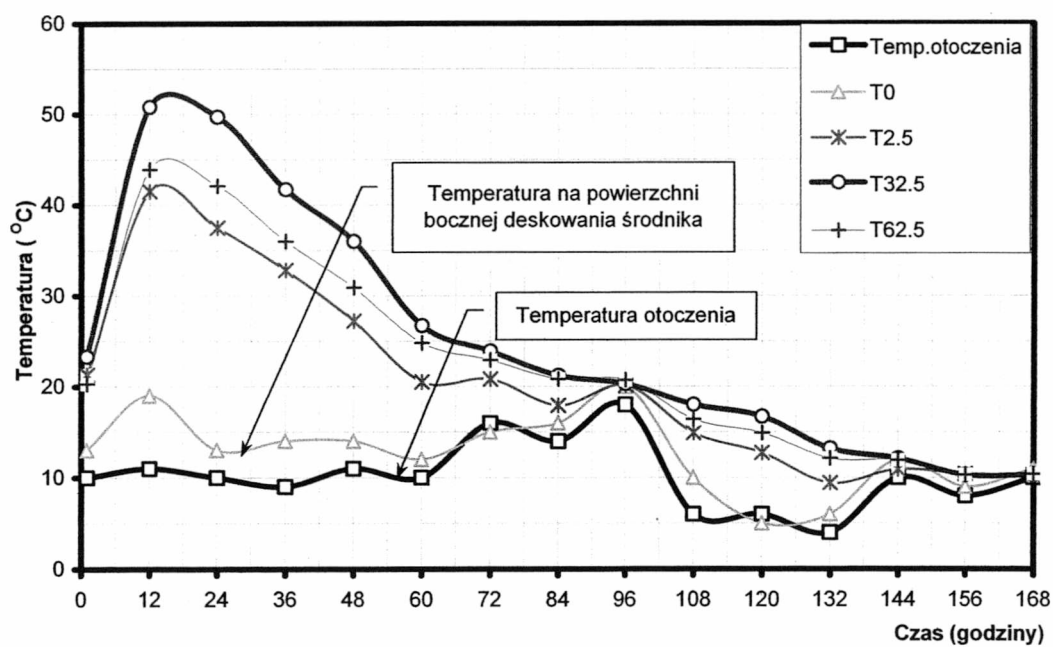
Rys. 3.25. Wartości temperatur w poszczególnych punktach osi pionowej w funkcji czasu;
 • środnik wschodni przęsła estakady głównej



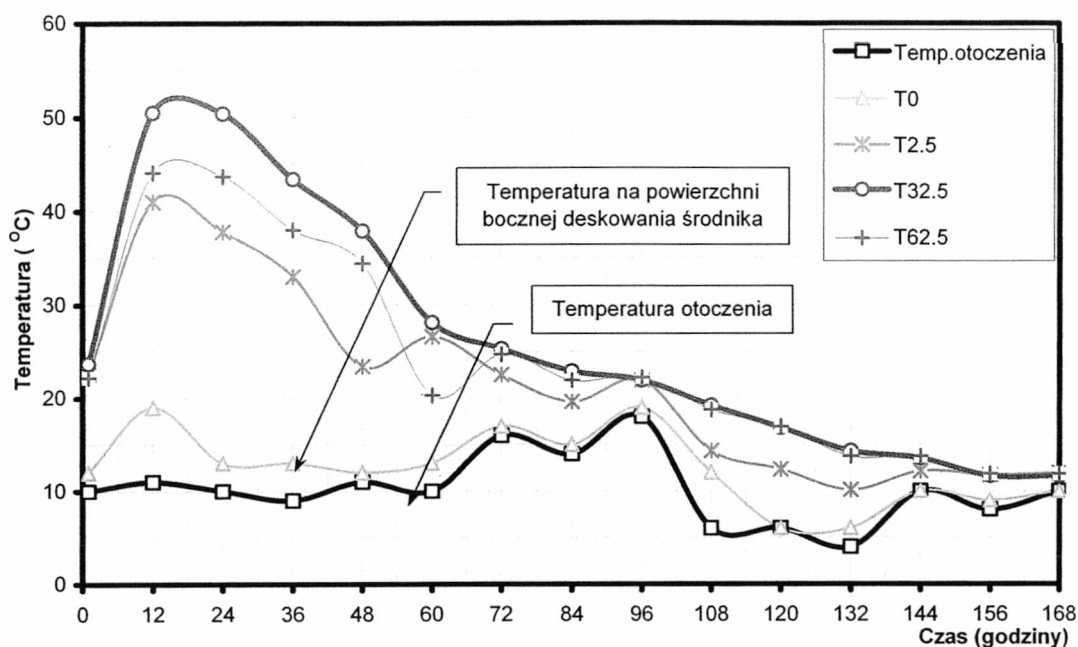
Rys. 3.26. Rozkład temperatur na wysokości środnika w przęsle estakady głównej;
 • środnik zachodni przęsła estakady głównej



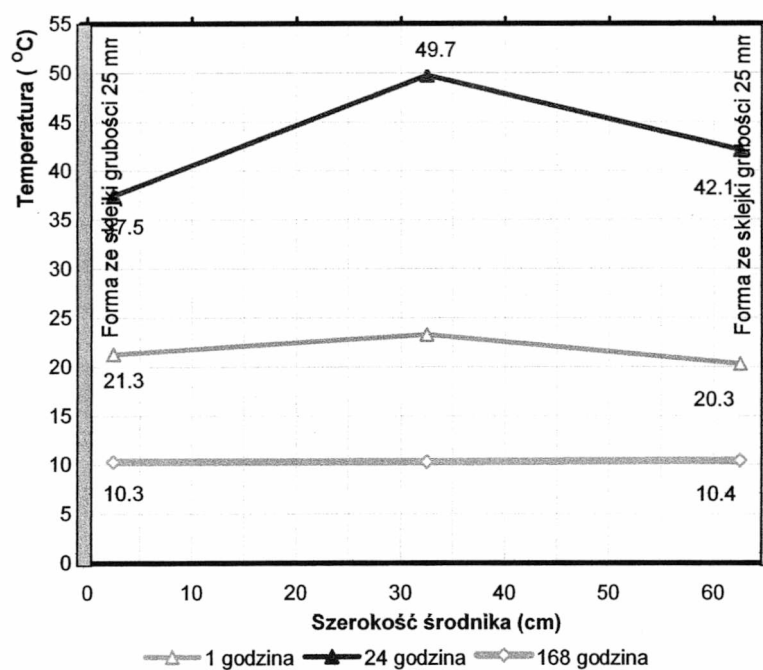
Rys. 3.27. Rozkład temperatur na wysokości środka w przęśle estakady głównej;
 • średnik wschodni przęsła estakady głównej



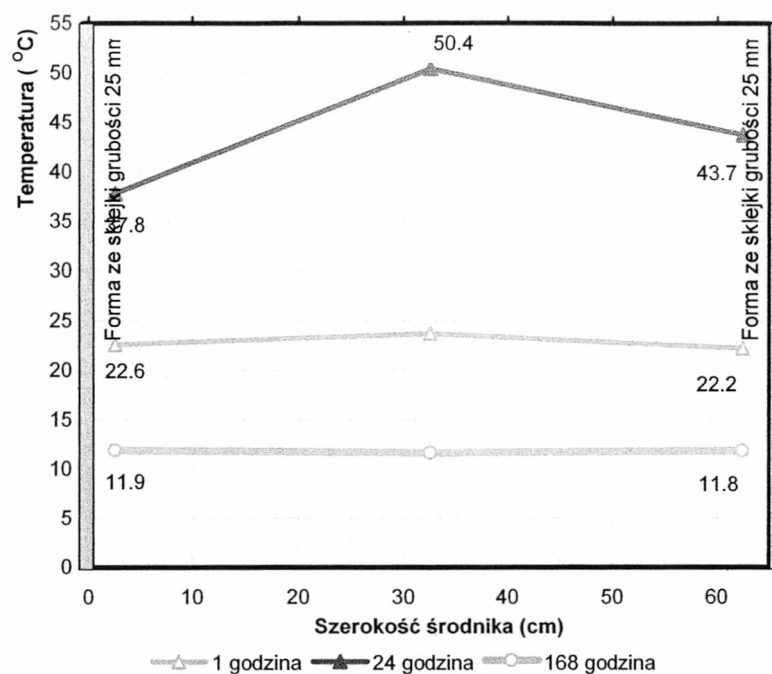
Rys. 3.28. Wartości temperatur w poszczególnych punktach osi poziomej w funkcji czasu;
 • średnik zachodni przęsła estakady głównej



Rys. 3.29. Wartości temperatur w poszczególnych punktach osi poziomej w funkcji czasu;
 • środek wschodni przęła estakady głównej



Rys. 3.30. Rozkład temperatur na szerokości środnika w przęśle estakady głównej;
 • środek zachodni przęła estakady głównej



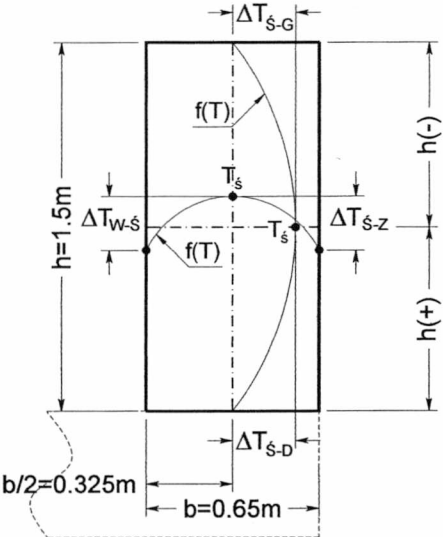
Rys. 3.31. Rozkład temperatur na szerokości środnika w przęśle estakady głównej;
 • środnik wschodni przęśla estakady głównej

Pomierzone temperatury powietrza, mieszanki betonowej, temperatury wewnętrzne oraz obliczone różnice temperatur zestawiono w tablicy 3.5.

Tablica 3.5. Pomierzone temperatury i różnice temperatur w czasie badań

MIEJSCE POMIARU	TEMPERATURA I CZAS
Temperatura mieszanki betonowej,	$T_{\text{betonu}}=10^{\circ}\text{C}$,
Średnia z pomierzonych w trakcie badań temperatur powietrza,	$T_{\text{śr.o}}=10^{\circ}\text{C}$,
Pomierzona minimalna i maksymalna temperatura powietrza w czasie badań,	$T_{\text{min}}=4^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{max}}=18^{\circ}\text{C}$,

C.d. Tablica 3.5.

MIEJSCE POMIARU	TEMPERATURA I CZAS
Pomierzona maksymalna temperatura w środku elementu – od rozpoczęcia badań; - pomiar na wysokości środka – listwa pionowa, - pomiar na szerokości środka – listwa pozioma,  The diagram illustrates a rectangular element with a width $b = 0.65\text{m}$ and height $h = 1.5\text{m}$. The center is marked with a dot and labeled $T_{\dot{s}}$. A vertical dashed line represents the centerline. A horizontal dashed line represents the mid-height. The diagram shows temperature profiles $f(T)$ as curved lines. Various temperature differences are indicated: $\Delta T_{\dot{s}-G}$ (top center), $\Delta T_{\dot{s}-z}$ (right center), $\Delta T_{\dot{s}-D}$ (bottom center), and $\Delta T_{w-\dot{s}}$ (left center). The vertical distance from the top edge to the center is $h(-)$, and from the bottom edge is $h(+)$. The horizontal distance from the left edge to the center is $b/2 = 0.325\text{m}$.	środek wschodnia – listwa pionowa; $T_{\dot{s}(12\div 24\text{ h})} = 51\text{ }^{\circ}\text{C}$, $h = -82\text{ cm}$, $T_{\dot{s}(168\text{ h})} = 13\text{ }^{\circ}\text{C}$, $h = -143\text{ cm}$, środek zachodnia – listwa pionowa; $T_{\dot{s}(12\div 24\text{ h})} = 52\text{ }^{\circ}\text{C}$, $h = -82\text{ cm}$, $T_{\dot{s}(168\text{ h})} = 13\text{ }^{\circ}\text{C}$, $h = -143\text{ cm}$, środek wschodnia – listwa pozioma; $T_{\dot{s}(12\div 24\text{ h})} = 51\text{ }^{\circ}\text{C}$, $b = 32\text{ cm}$, $T_{\dot{s}(168\text{ h})} = 12\text{ }^{\circ}\text{C}$, $b = 0\div 32\text{ cm}$, środek zachodnia - listwa pozioma; $T_{\dot{s}(12\div 24\text{ h})} = 51\text{ }^{\circ}\text{C}$, $b = 32\text{ cm}$, $T_{\dot{s}(168\text{ h})} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $b = 0\div 32\text{ cm}$,
Maksymalna różnica z pomierzonych temperatur; - między środkiem i powierzchnią górną środka – listwa pionowa, - między środkiem i powierzchnią wewnętrzną środka, – listwa pozioma,	środek wschodnia – listwa pionowa; $\Delta T_{\dot{s}-G(12\div 24\text{ h})} = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$, $h = -82\text{ cm}$, $\Delta T_{\dot{s}-G(168\text{ h})} = 4\text{ }^{\circ}\text{C}$, $h = -143\text{ cm}$, środek zachodnia – listwa pionowa; $\Delta T_{\dot{s}-G(12\div 36\text{ h})} = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$, $h = -82\text{ cm}$, $\Delta T_{\dot{s}-G(168\text{ h})} = 3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $h = -143\text{ cm}$, środek wschodnia – listwa pozioma; $\Delta T_{w-\dot{s}(48\text{ h})} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $b = 32\text{ cm}$, $\Delta T_{w-\dot{s}(156\div 168\text{ h})} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $b = 32\text{ cm}$, środek zachodnia - listwa pozioma; $\Delta T_{w-\dot{s}(24\text{ h})} = 12\text{ }^{\circ}\text{C}$, $b = 32\text{ cm}$, $\Delta T_{w-\dot{s}(168\text{ h})} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $b = 32\text{ cm}$,

C.d. Tablica 3.5.

MIEJSCE POMIARU	TEMPERATURA I CZAS
Maksymalna różnica z pomierzonych temperatur; - między środkiem i spodem średnika – listwa pionowa, - między środkiem i powierzchnią zewnętrzną średnika, – listwa pozioma.	średnik wschodnia – listwa pionowa; $\Delta T_{\dot{S}-D(12 \div 24 \text{ h})} = 14^{\circ}\text{C}$, $h = 61 \text{ cm}$, $\Delta T_{\dot{S}-D(168 \text{ h})} = 0^{\circ}\text{C}$, $h = 0 \text{ cm}$, średnik zachodnia – listwa pionowa; $\Delta T_{\dot{S}-D(12 \div 24 \text{ h})} = 13^{\circ}\text{C}$, $h = 61 \text{ cm}$, $\Delta T_{\dot{S}-D(168 \text{ h})} = 0^{\circ}\text{C}$, $h = 0 \text{ cm}$, średnik wschodnia – listwa pozioma; $\Delta T_{\dot{S}-Z(24 \text{ h}, 60 \text{ h})} = 8^{\circ}\text{C}$, $b = 32 \text{ cm}$, $\Delta T_{\dot{S}-Z(144 \div 168 \text{ h})} = 0^{\circ}\text{C}$, $b = 32 \text{ cm}$, średnik zachodnia - listwa pozioma; $\Delta T_{\dot{S}-Z(24 \text{ h})} = 8^{\circ}\text{C}$, $b = 32 \text{ cm}$, $\Delta T_{\dot{S}-Z(168 \text{ h})} = 0^{\circ}\text{C}$, $b = 32 \text{ cm}$,

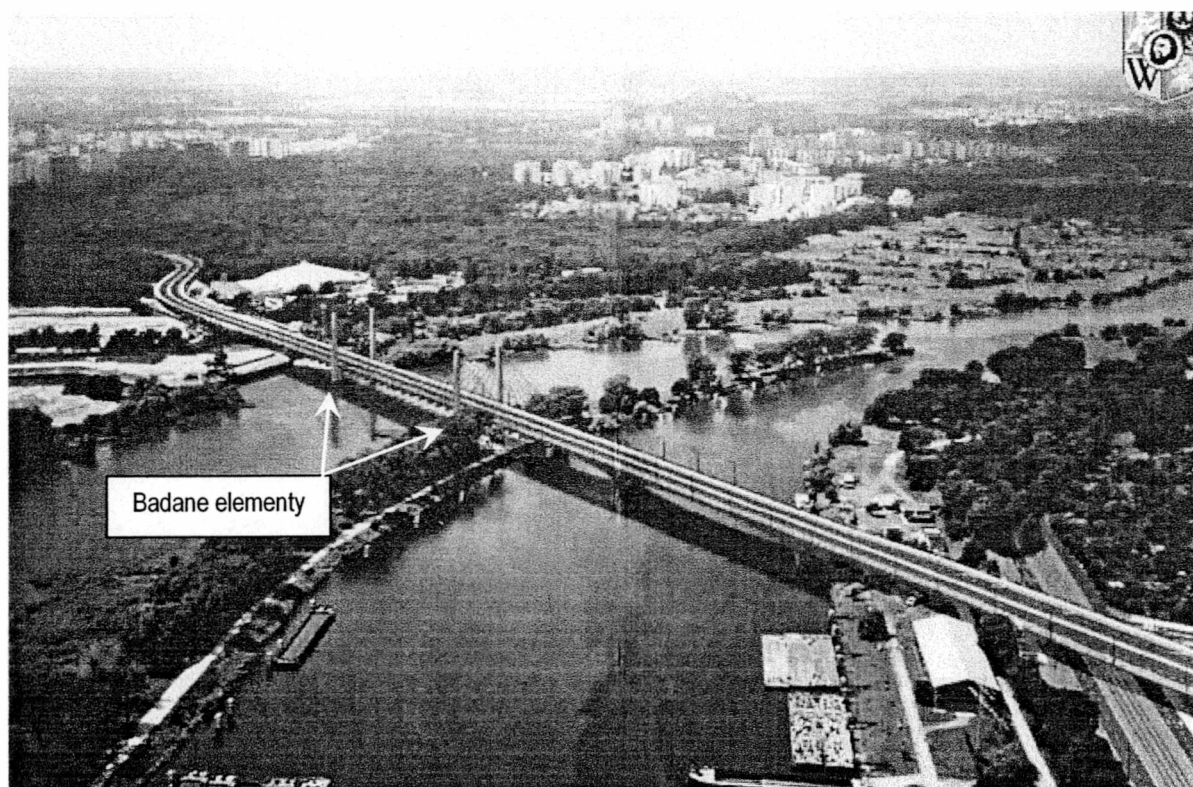
Analizując otrzymane rezultaty stwierdzono, że:

- maksymalna temperatura dojrzewającego betonu, oraz różnice z pomierzonych temperatur, między środkiem i powierzchniami zewnętrznymi, w obydwu średnikach były zbliżone,
- maksymalna temperatura wewnętrzna dojrzewającego betonu w obydwu średnikach wystąpiła między 12 ÷ 24 godziną badań,
- zanotowano dużą różnicę temperatur między górną powierzchnią zewnętrzną średnika i kolejnymi punktami pomiarowymi, nierównomiernie zwiększającą się w głąb średnika,
- zanotowano duży spadek różnicy temperatur z $\Delta T_{\dot{S}-G(12 \div 36 \text{ h})} = 35^{\circ}\text{C}$ (między środkiem a górną powierzchnią średnika) do 20°C (między środkiem a warstwą znajdującą się na głębokości 7.5 cm od górnej powierzchni średnika),
- po około 168 godzinie, temperatura w średnikach jest ustabilizowana,
- po zakończeniu badań i rozdeskowaniu form na ograniczonej (do 5 % całej powierzchni) powierzchni zewnętrznej średników widoczne były miejscowe krótkie pionowe rysy powierzchniowe, zlokalizowane w górnej części średnika o rozwarcu dochodzącym do 0.2 mm i długości nie przekraczające 0.3 m i głębokości 5 ÷ 7 cm, (przegląd powierzchni wykonano wzrokowo, rozwartość rys określono przy pomocy wzornika do rys),
- w trakcie badań przeprowadzonych na średnikach estakady głównej zanotowano nieprawidłowe odczyty z czujników w listwach pionowych, czujników zamontowanych na głębokości mierzonej od górnej powierzchni średnika; -82.5 cm, -97.5 cm, 112.5 cm

(listwa w średnicy zachodnim) i -22.5 cm, (listwa w średnicy wschodnim) (patrz rys. 3.24 ÷ 3.27),

- w trakcie badań żaden z czujników nie uległ uszkodzeniu.

3.6. Ławy fundamentowe Mostu Milenijnego we Wrocławiu - opis badanego obiektu



Rys. 3.32. Most Milenijny przez Odrę we Wrocławiu – wizualizacja

Kolejny etap badań przeprowadzono na dwóch ławach fundamentowych pod główne podpory (pylony) Mostu Milenijnego przez Odrę we Wrocławiu, znajdującego się w ciągu obwodnicy śródmiejskiej Wrocławia (rys. 3.32). Most będzie miał długość 973 m. Przy budowie zużytych zostanie 41324 m^3 betonu. Prace budowlane rozpoczęto w lipcu 2002 i planowane są do września 2004 roku.

Ławy są posadowione na palach wielkośrednicowych $\phi=150\text{cm}$. Spód ław fundamentowych znajduje się średnio na głębokości 7 m poniżej przyległego terenu, oraz lustra rzeki Odry. Ława fundamentowa północna znajduje się przy brzegu rzeki Odry, natomiast ława fundamentowa południowa w rzece Odrze. Gabaryty ław fundamentowych przedstawiono na rysunku 3.33. Beton klasy B35 użyty do wykonania ław został wykonany według receptury podanej w tab. 3.6.

Tablica 3.6. Receptura mieszanki betonowej na ławy fundamentowe pod główne podpory (pylony) (beton klasy B35) *

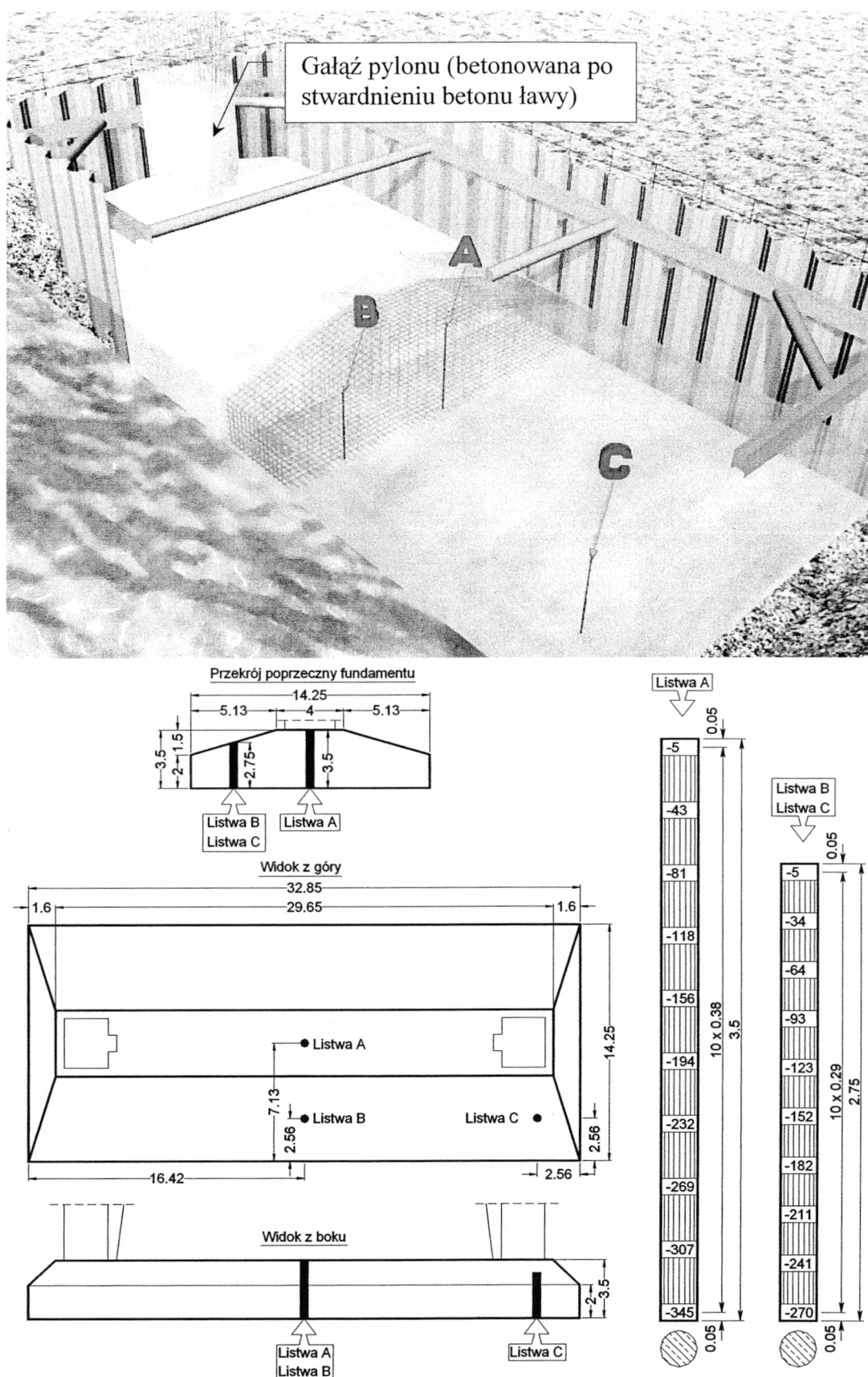
Skład mieszanki	Ilość
Cement hutniczy „Strzelce Opolskie” CEM III/A 32.5 NA	375,00 kg/m ³
Woda (w/c=0.46)	172,00 kg/m ³
Piasek 0/2 mm (Mietków)	668,00 kg/m ³
Grys granitowy 5/8 mm (Graniczna)	535,00 kg/m ³
Grys granitowy 8/16 mm (Graniczna)	707,00 kg/m ³
Superplastyfikator Sikament 400/30 (SIKA)	6,00 kg/m ³

*) Wymagania dodatkowe odnośnie wykonanego betonu; nasiąkliwość max 4%, F150, W8.

3.7. Opis badań

Dla celów badawczych wybrano dwie identyczne ławy fundamentowe pod główne podpory (pylony) mostu (rys. 3.33).

Betonowanie ławy północnej podzielono na trzy warstwy poziome, betonowane kolejno po sobie. Grubość warstw wynosiła; $w_I=1.5$ m, $w_{II}=1$ m, $w_{III}=1$ m. Natomiast ławę południową betonowano jako pojedynczą warstwę o grubości $w_I=3.5$ m. Do betonowania wszystkich warstw zastosowano metodę układania mieszanki betonowej płatami ukośnymi o pochyleniu 1:5 i grubości 0.40 m. Do każdej ławy fundamentowej wbudowano 1345 m³ mieszanki betonowej. Betonowanie ławy fundamentowej północnej trwało 29 godzin a południowej 21 godzin. W trakcie układania warstw, wbudowana mieszanka, była sukcesywnie zagęszczana wibratorami buławowymi średnicy $\phi=60$ mm. Świeży beton podawano do każdej z ław trzema pompami do betonu. Bezpośrednio po wbudowaniu ostatniej warstwy betonu i jej zagładzeniu, obydwie ławy poddane były pielęgnacji ciepło-wilgotnościowej. Pielęgnacja ciepło-wilgotnościowa polegała na wstępnym intensywnym zraszaniu powierzchni zewnętrznej ławy wodą, do czasu gdy możliwe było wejście na powierzchnię ławy bez pozostawienia odcisku na jej powierzchni (ław północna 17 godzin, ław południowa 9 godzin) i ułożeniu warstwy z folii budowlanej i styropianu gr.=10 cm. Po ułożeniu obydwu warstw, powierzchnie zewnętrzne ław były zraszane wodą, trzykrotnie w ciągu dnia przez okres czterech tygodni. Folię oraz styropian usunięto z ławy północnej po 830 godzinach, natomiast z ławy południowej po 6 tygodniach od rozpoczęcia pomiarów. Zaproponowaną pielęgnację termiczno-wilgotnościową betonu, wykorzystano przy budowie dwóch pozostałych ław fundamentowych o zbliżonych gabarytach, wykonanych w okresie zimy (ławy fundamentowe w części przęsła belkowego budowanego metodą wspornikową).



Rys. 3.33 Rozmieszczenie listew pomiarowych oraz czujników termicznych w listwach pomiarowych, zamontowanych w ławie fundamentowej Mostu Milenijnego przez Odrę we Wrocławiu

Czas rozpoczęcia oraz zakończenia badań podano w tab. 3.7.

Tablica 3.7. Terminarz badań wykonanych na ławach fundamentowych Mostu Mile-nijnego przez Odrę we Wrocławiu

L.P.	BADANY ELEMENT	ROZPOCZĘCIE BADAŃ	ZAKOŃCZENIE BADAŃ	CZAS
1.	Ława fundamentowa północna	15 października 2002, godzina 5 ⁰⁰	20 listopada 2002, godzina 16 ¹⁵	882 h 36 dni
2.	Ława fundamentowa południowa	1 kwietnia 2003, godzina 5 ⁰⁰	5 maja 2003, godzina 17 ³⁰	828 h 34 dni

Przed betonowaniem ławy fundamentowej północnej zamontowano w niej trzy listwy pomiarowe, ustawione pionowo; listwę A na środku elementu, boczną listwę B w odległości 2.56 m od ściany dłuższego boku oraz narożną listwę C w odległości 2.56 m od ścian zewnętrznych (rys. 3.33). W ławie fundamentowej południowej zamontowano dwie listwy pomiarowe ustawione pionowo; listwę A na środku elementu, pionową boczną listwę B w odległości 2.56 m od ściany dłuższego boku. Dodatkowo podczas badań pomierzono temperaturę wbudowywanej mieszanki betonowej oraz temperaturę powietrza podczas betonowania. Do pomiaru temperatury wewnętrznej i zewnętrznej użyto tego samego sprzętu pomiarowego, który został wcześniej wykorzystany do badań na elementach konstrukcyjnych Estakady Gądów (p. 3.2).

3.8. Wyniki badań

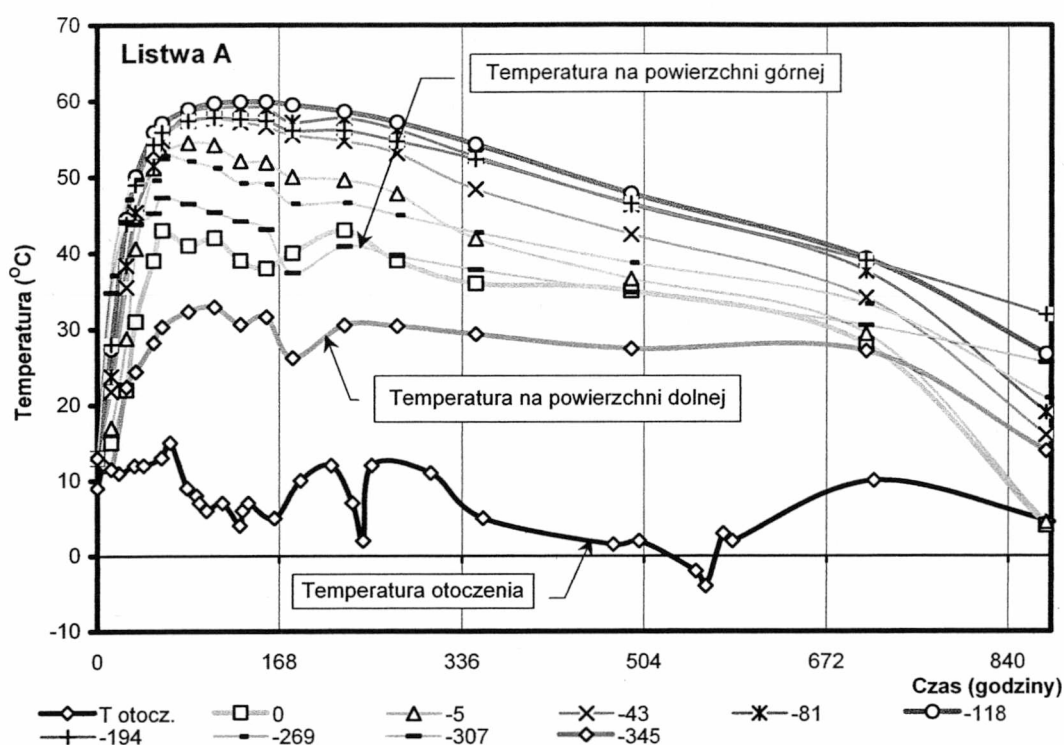
Ława północna rys. 3.34 ÷ rys. 3.39;

- rys. 3.34 ÷ rys. 3.35 rozkład temperatur na środku elementu,
- rys. 3.36 ÷ rys. 3.37 rozkład temperatur w odległości 2.56 m od ściany dłuższego boku,
- rys. 3.38 ÷ rys. 3.39 rozkład temperatur w odległości 2.56 m od ścian zewnętrznych.

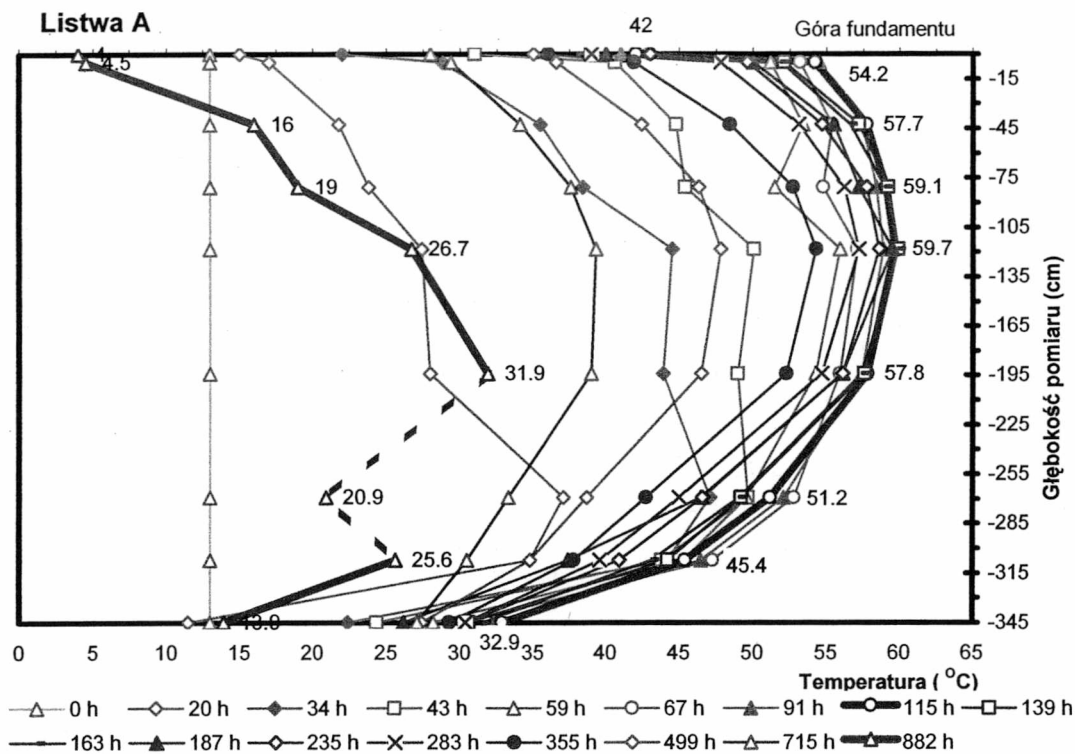
Ława południowa rys. 3.40 ÷ rys. 3.43;

- rys. 3.40 ÷ rys. 3.41 rozkład temperatur na środku elementu,
- rys. 3.42 ÷ rys. 3.43 rozkład temperatur w odległości 2.56 m od ściany dłuższego boku.

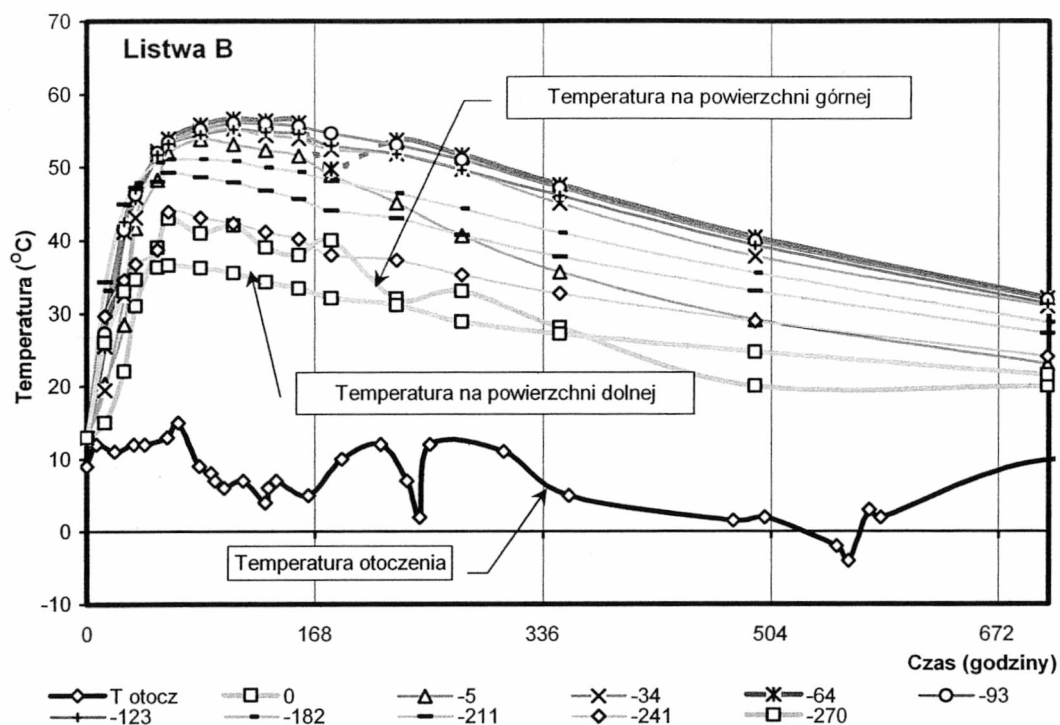
• Rozkłady temperatur w ławie fundamentowej północnej (beton klasy B35)



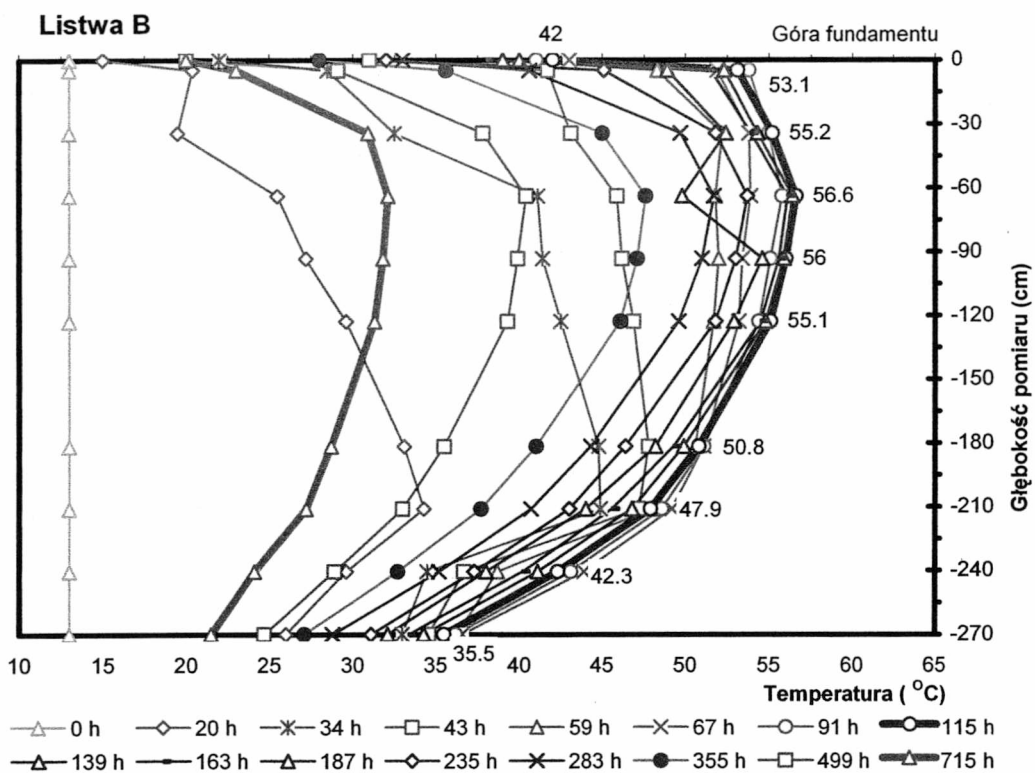
Rys. 3.34 Wartości temperatur w poszczególnych punktach osi pomiarowej pionowej w funkcji czasu dla ławy fundamentowej północnej Mostu Milenijnego;
- listwa pomiarowa pionowa A



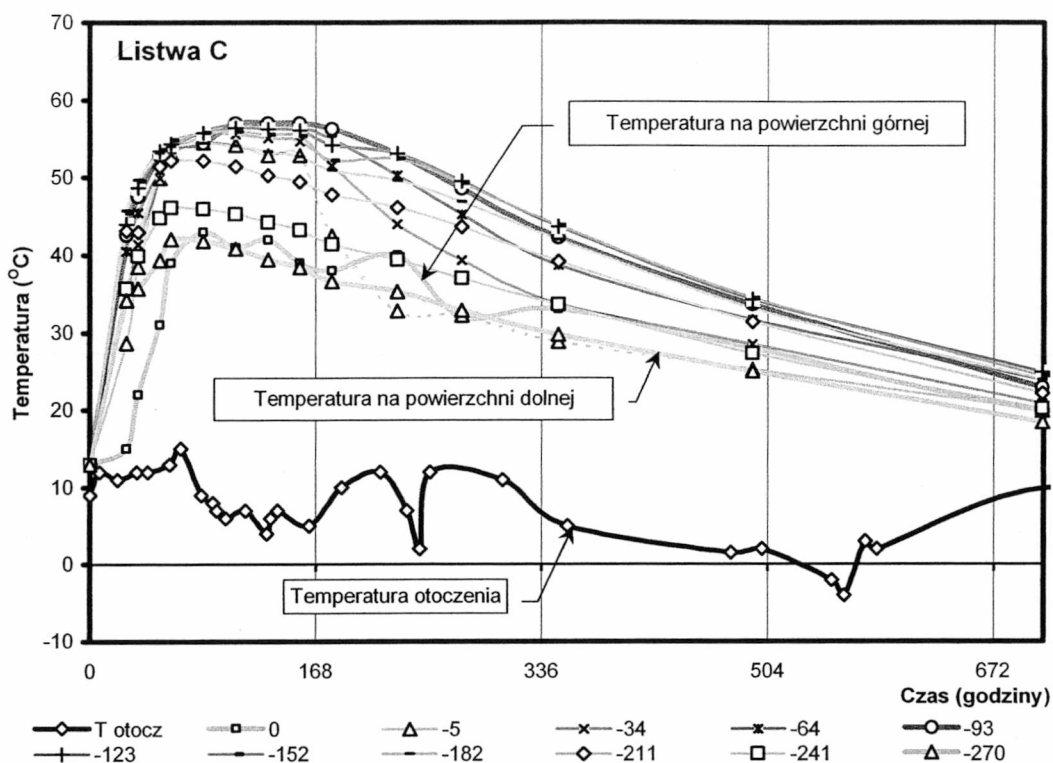
Rys. 3.35 Rozkład temperatur w przekroju poprzecznym ławy fundamentowej północnej Mostu Milenijnego;
- listwa pomiarowa pionowa A



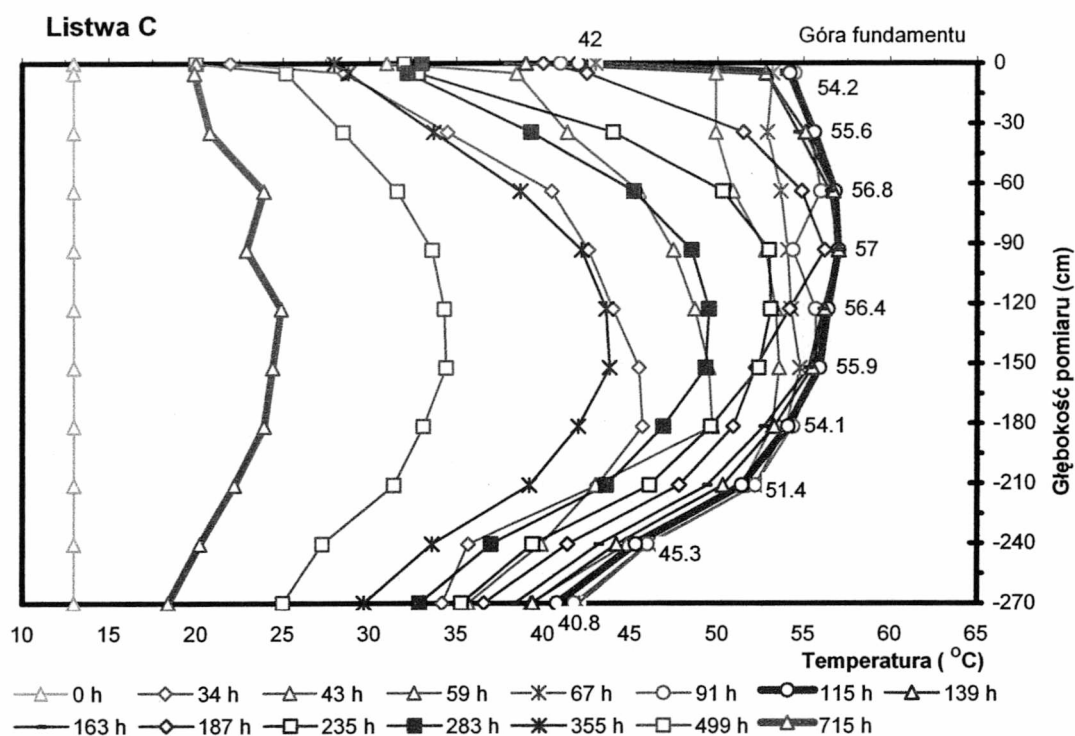
Rys. 3.36 Wartości temperatur w poszczególnych punktach osi pomiarowej pionowej w funkcji czasu dla ławy fundamentowej północnej Mostu Milenijnego;
- listwa pomiarowa pionowa B



Rys. 3.37 Rozkład temperatur w przekroju poprzecznym ławy fundamentowej północnej Mostu Milenijnego;
- listwa pomiarowa pionowa B

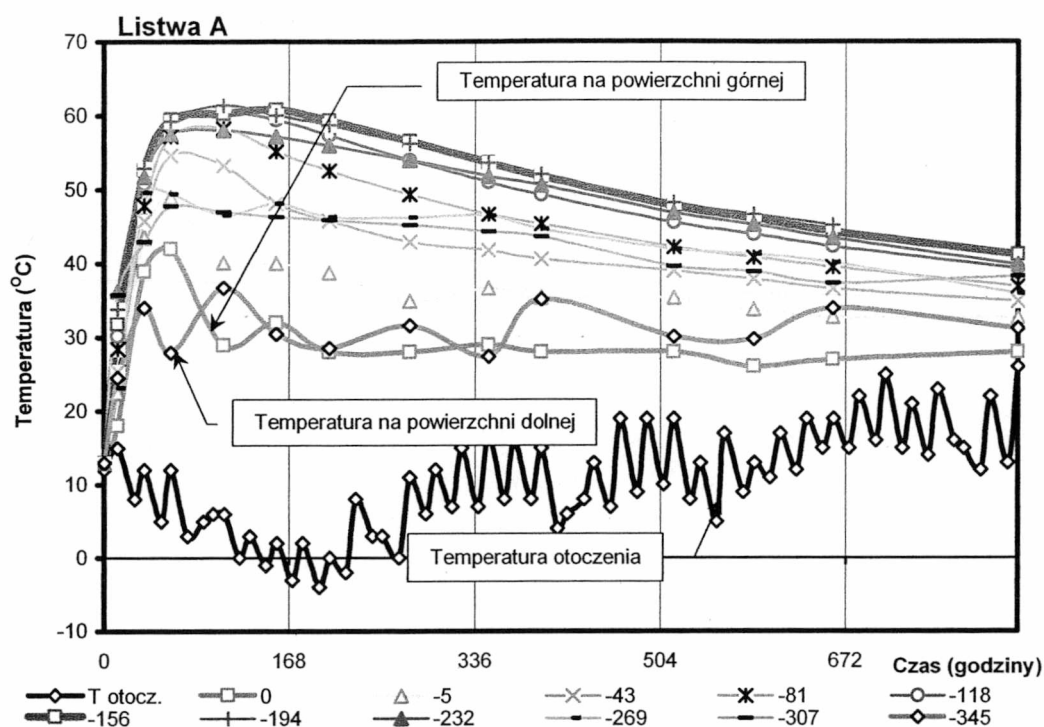


Rys. 3.38 Wartości temperatur w poszczególnych punktach osi pomiarowej pionowej w funkcji czasu dla ławy fundamentowej północnej Mostu Milenijnego;
- listwa pomiarowa pionowa C

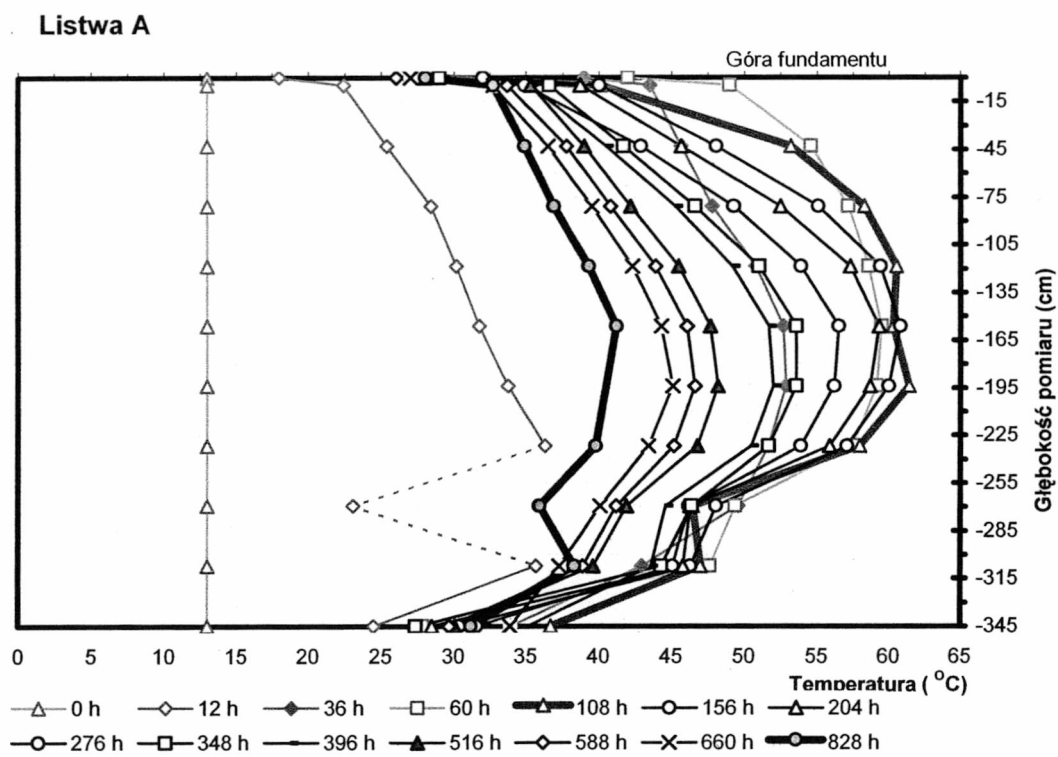


Rys. 3.39 Rozkład temperatur w przekroju poprzecznym ławy fundamentowej północnej Mostu Milenijnego;
- listwa pomiarowa pionowa C

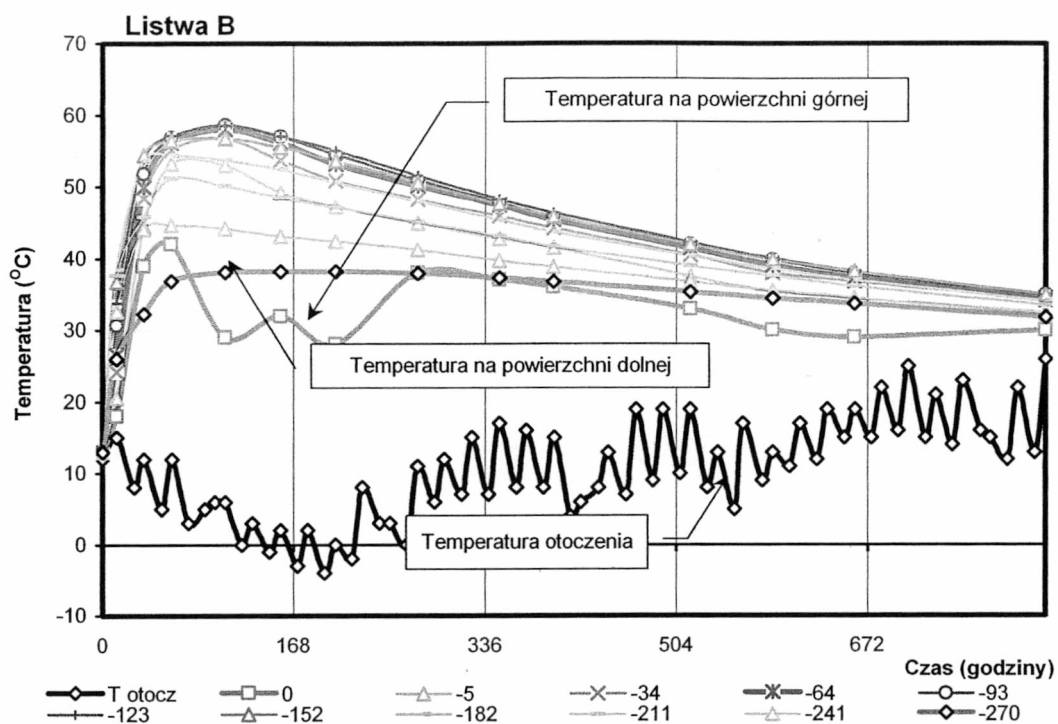
• Rozkłady temperatur w ławie fundamentowej południowej (beton klasy B35)



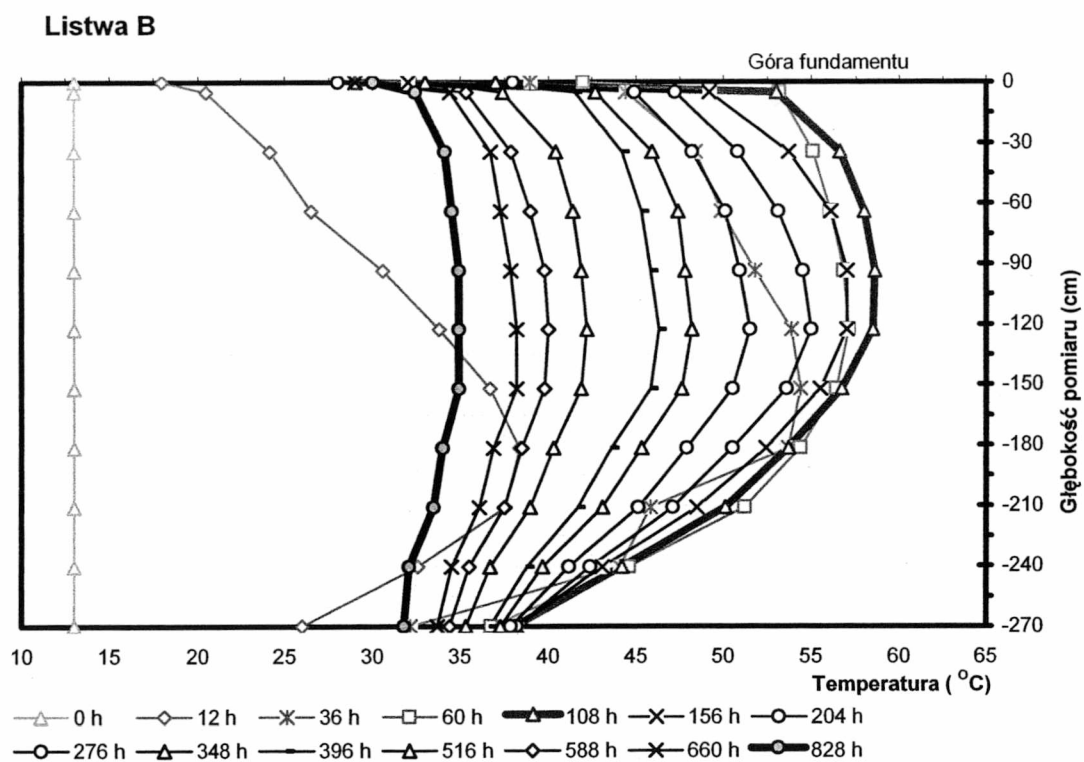
Rys. 3.40 Wartości temperatur w poszczególnych punktach osi pomiarowej pionowej w funkcji czasu dla ławy fundamentowej południowej Mostu Milenijnego;
- listwa pomiarowa pionowa A



Rys. 3.41 Rozkład temperatur w przekroju poprzecznym ławy fundamentowej południowej Mostu Milenijnego;
- listwa pomiarowa pionowa A



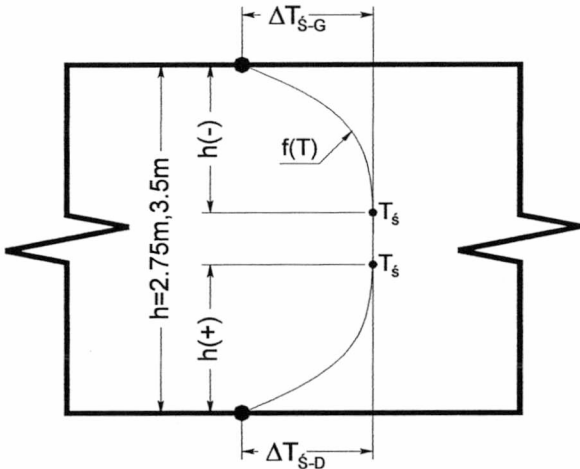
Rys. 3.42 Wartości temperatur w poszczególnych punktach osi pomiarowej pionowej w funkcji czasu dla ławy fundamentowej południowej Mostu Milenijnego;
- listwa pomiarowa pionowa B



Rys. 3.43 Rozkład temperatur w przekroju poprzecznym ławy fundamentowej południowej Mostu Milenijnego;
- listwa pomiarowa pionowa B

Pomierzone temperatury powietrza, mieszanki betonowej, temperatury wewnętrzne oraz różnice temperatur zestawiono w tablicy 3.8.

Tablica 3.8. Zanotowane temperatury i różnice temperatury w czasie badań

MIEJSCE POMIARU	TEMPERATURA I CZAS	
Temperatura mieszanki betonowej,	ława f. północna; $T_{\text{betonu}}=13^{\circ}\text{C}$,	ława f. południowa; $T_{\text{betonu}}=13^{\circ}\text{C}$,
Średnia z pomierzonych w trakcie badań temperatur powietrza,	ława f. północna; $T_{\text{śr.o}}=7^{\circ}\text{C}$,	ława f. południowa; $T_{\text{śr.o}}=11^{\circ}\text{C}$,
Pomierzona minimalna i maksymalna temperatura powietrza w czasie badań,	ława f. północna; $T_{\text{min}}=-4^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{max}}=15^{\circ}\text{C}$,	ława f. południowa; $T_{\text{min}}=-4^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{max}}=26^{\circ}\text{C}$,
Pomierzona maksymalna temperatura w środku elementu, od rozpoczęcia badań,  Listwa A - $L=3.5\text{ m}$, Listwa B i C - $L=2.75\text{ m}$,	ława fundamentowa północna; $T_{\text{ś}(115\div 187\text{ h})}=60^{\circ}\text{C}$ (listwa A) $h=-118\text{ cm}$, $T_{\text{ś}(715\text{ h})}=39^{\circ}\text{C}$ (l. A) $h=-118\div -194\text{ cm}$, $T_{\text{ś}(882\text{ h})}=32^{\circ}\text{C}$ (l. A) $h=-194\text{ cm}$, $T_{\text{ś}(115\div 163\text{ h})}=57^{\circ}\text{C}$ (l. B) $h=-64\text{ cm}$, $T_{\text{ś}(715\text{ h})}=32^{\circ}\text{C}$ (l. B) $h=-64\div -93\text{ cm}$, $T_{\text{ś}(115\div 187\text{ h})}=57^{\circ}\text{C}$ (l. C) $h=-64\div -123\text{ cm}$, $T_{\text{ś}(715\text{ h})}=25^{\circ}\text{C}$ (l. C) $h=-123\text{ cm}$, ława fundamentowa południowa; $T_{\text{ś}(108\text{ h})}=61^{\circ}\text{C}$ (l. A) $h=-194\text{ cm}$, $T_{\text{ś}(828\text{ h})}=41^{\circ}\text{C}$ (l. A) $h=-156\text{ cm}$, $T_{\text{ś}(108\text{ h})}=59^{\circ}\text{C}$ (l. B) $h=-93\div -123\text{ cm}$, $T_{\text{ś}(828\text{ h})}=35^{\circ}\text{C}$ (l. B) $h=-64\div -152\text{ cm}$,	
Maksymalna różnica z pomierzonych temperatur, między powierzchnią górną i środkiem ławy ($h(-)$),	ława fundamentowa północna; $\Delta T_{\text{ś-G}(34\text{ h})}=25^{\circ}\text{C}$ (l. A), $h=-269\text{ cm}$, $\Delta T_{\text{ś-G}(715\text{ h})}=11^{\circ}\text{C}$ (l. A), $h=-118\text{ cm}$, $\Delta T_{\text{ś-G}(882\text{ h})}=28^{\circ}\text{C}$ (l. A), $h=-194\text{ cm}$, $\Delta T_{\text{ś-G}(34\text{ h})}=23^{\circ}\text{C}$ (l. B), $h=-182\text{ cm}$, $\Delta T_{\text{ś-G}(715\text{ h})}=12^{\circ}\text{C}$ (l. B), $h=-64\text{ cm}$, $\Delta T_{\text{ś-G}(34\text{ h})}=24^{\circ}\text{C}$ (l. C), $h=-152\text{ cm}$, $\Delta T_{\text{ś-G}(715\text{ h})}=5^{\circ}\text{C}$ (l. C), $h=-123\text{ cm}$, ława fundamentowa południowa; $\Delta T_{\text{ś-G}(108\text{ h})}=32^{\circ}\text{C}$ (l. A), $h=-118\text{ cm}$, $\Delta T_{\text{ś-G}(828\text{ h})}=13^{\circ}\text{C}$ (l. A), $h=-156\text{ cm}$, $\Delta T_{\text{ś-G}(108\text{ h})}=30^{\circ}\text{C}$ (l. B), $h=-93\text{ cm}$, $\Delta T_{\text{ś-G}(828\text{ h})}=5^{\circ}\text{C}$ (l. B), $h=-93\text{ cm}$,	

c.d. Tablica 3.8.

MIEJSCE POMIARU	TEMPERATURA I CZAS
Maksymalna różnica z pomierzonych temperatur, między powierzchnią dolną i środkiem ławy (h (+)). Uwaga: jako temperaturę powierzchni dolnej przyjmowano temperaturę zmierzoną przez czujnik umieszczony około 5cm powyżej dna, w istocie różnice temperatury była znacznie wyższe.	ława fundamentowa północna; $\Delta T_{\dot{S}-D(187\text{ h})} = 33\text{ }^{\circ}\text{C}$ (l. A), h= 232 cm, $\Delta T_{\dot{S}-D(715\text{ h})} = 12\text{ }^{\circ}\text{C}$ (l. A), h= 156 cm $\Delta T_{\dot{S}-D(882\text{ h})} = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ (l. A), h= 156 cm, $\Delta T_{\dot{S}-D(139\text{ h})} = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$ (l. B), h= 182 cm $\Delta T_{\dot{S}-D(715\text{ h})} = 11\text{ }^{\circ}\text{C}$ (l. B), h= 152 cm, $\Delta T_{\dot{S}-D(187\text{ h})} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (l. C), h= 182 cm, $\Delta T_{\dot{S}-D(715\text{ h})} = 7\text{ }^{\circ}\text{C}$ (l. C), h= 123 cm, ława fundamentowa południowa; $\Delta T_{\dot{S}-D(60\text{ h})} = 32\text{ }^{\circ}\text{C}$ (l. A), h= 156 cm, $\Delta T_{\dot{S}-D(828\text{ h})} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (l. A), h= 194 cm, $\Delta T_{\dot{S}-D(36\text{ h})} = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ (l. B), h= 93 cm, $\Delta T_{\dot{S}-D(828\text{ h})} = 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (l. B), h= 123 cm,

Analizując otrzymane rezultaty stwierdzono, że:

- temperatura mieszanki betonowej wbudowywanej do obydwu ław fundamentowych jest taka sama i wynosiła $13\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ławy wykonane jesienią i wiosną),
- temperatura maksymalna dojrzewającego betonu w obydwu ławach fundamentowych jest zbliżona (ławy wykonane jesienią i wiosną),
- maksymalna temperatura wewnętrzna dojrzewającego betonu w ławie północnej wystąpiła po 115 godzinie badań (ława wykonana jesienią), natomiast w ławie południowej po 108 godzinie badań (ława wykonana wiosną),
- maksymalna różnica z pomierzonych temperatur między środkiem i powierzchnią górną, w ławie fundamentowej południowej jest o $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ wyższa (ława wykonana wiosną), niż w ławie fundamentowej północnej (ława wykonana jesienią),
- maksymalna różnica z pomierzonych temperatur między środkiem i powierzchnią dolną, dla obydwu ław jest zbliżona (ławy wykonane jesienią i wiosną),
- po 882 godzinach badań temperatura wewnętrzna na środku ławy północnej wynosiła $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ława wykonana jesienią), a w ławie południowej po 828 godzinach badań $41\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ława wykonana wiosną),
- po zakończeniu badań na ograniczonej (do 5 % całej powierzchni) górnej powierzchni ław zauważono miejscowe krótkie rysy powierzchniowe o rozwarciu nie

- przekraczającym 0.2 mm i długości nie przekraczające 0.5 m, (przegląd powierzchni wykonano wzrokowo, rozwartość rys określono przy pomocy wzornika do rys),
- w trakcie badań przeprowadzonych na ławie fundamentowej północnej zanotowano nieprawidłowe odczyty z czujników w listwach A, B i C, czujników zamontowanych na głębokości; -81cm, -194 cm, -269 cm, -307 cm, (Listwa A), -34 cm, -64 cm, -241 cm, (Listwa B) i -5 cm, -34 cm, -93 cm, 241 cm, (Listwa C) (patrz rys. 3.34 ÷ 3.39),
 - w trakcie badań uszkodzeniu uległy 3 czujniki; dwa w listwie A na głębokości -156 cm, -232 cm i jeden w listwie B na głębokości -152 cm,
 - w trakcie badań przeprowadzonych na ławie fundamentowej południowej zanotowano nieprawidłowe odczyty z czujników w listwie A, czujników zamontowanych na głębokości; -156 cm, -269 cm, -345 cm, (patrz rys. 3.40÷3.43).

3.9. Wnioski

W trakcie prowadzonych badań nie uniknięto problemów natury technicznej. Badania wykonywano w różnych warunkach atmosferycznych; podczas opadów deszczu, opadów śniegu, bardzo wysokiej temperatury powietrza oraz podczas silnego wiatru. Pomimo zabezpieczenia pozostawionych przy badanym elemencie końcówek kabli (wtyczek elektrycznych), łączących czujniki termiczne z zestawem pomiarowym, w trakcie opadów deszczu i występującej wysokiej wilgotności powietrza zbierała się w nich woda. Wodę z wtyczek elektrycznych usuwano przed każdym pomiarem, lecz nie zapewniało to ich pełnego wysuszenia. Nie uniknięto również uszkodzenia czujników podczas betonowania elementu.

Przedstawione czynniki wpłynęły na jakość otrzymywanych wyników. Z tego też względu „wyskoki” oraz „wyrwy” na wykresach (rys. 3.10 ÷ rys. 3.43) spowodowane były prawdopodobnie zawilgoceniem końcówek kabli (wtyczek elektrycznych) lub innymi czynnikami. Jednak większość materiału badawczego należy uznać za wiarygodną i mogącą posłużyć do analizy problemu.

Obecnie istnieją już bogata literatura związana z praktycznym wykonywaniem maszynowych elementów betonowych, do której można zaliczyć np. [30÷31, 62, 83÷93, 104, 123, 175÷176]. Ukazująca jak ważnym zagadnieniem jest wpływ temperatury dojrzewającego betonu dla zachowania jego monolityczności.

Obecny stan zaawansowanych technik komputerowych bazujących na metodzie elementów skończonych, umożliwia projektantom modelowanie części zjawisk zachodzących podczas dojrzewania betonu. Możliwość symulowania rozkładów temperatur w elementach betonowych, podczas różnych warunków dojrzewania betonu sprawia, że jeszcze na etapie projektowania konstrukcji, możliwe jest dobranie najwłaściwszej technologii jej wykonania.

4. PODSTAWY TEORETYCZNE

Zjawisko przejmowania ciepła między ciałem a otaczającym je środowiskiem oraz przepływem ciepła w ciałach jest analizowane od ponad 200 lat. Pierwsze prace na ten temat pojawiły się na początku XVIII wieku.

Badaczem, który to jako pierwszy opisał zagadnienie związane z przejmowaniem ciepła z powierzchni ciał stałych stykających się z innymi ciałami (o różnych stanach skupienia) był angielski filozof, astronom, fizyk i matematyk I. Newton. W wyniku swoich badań, zauważył On, iż przepływ ciepła pomiędzy danym ciałem a opływającym je płynem jest proporcjonalny do różnicy temperatury między nimi (4.1).

$$q_p = \alpha_k \cdot (T - T_\infty). \quad (4.1)$$

gdzie:

q_p - ciepło doprowadzone lub odprowadzone z powierzchni elementu,

α_k - współczynnik konwekcji, współczynnik przejmowania ciepła,

T - temperatura na powierzchni,

T_∞ - temperatura otoczenia,

Kolejnym badaczem pracującym na przełomie XVIII i XIX wieku, podejmującym zagadnienie związane z przepływem energii cieplnej w ciałach stałych był francuski fizyk i matematyk J. B. J. Fourier. Wyprowadzone przez niego równanie zwane prawem Fouriera (4.2) stało się jednym z ważniejszych równań działu termodynamiki opisującym proces przepływu energii cieplnej;

$$q_v = -\lambda \cdot \text{grad } T, \quad (4.2)$$

w którym:

q_v - gęstość ciepła,

λ - współczynnik materiałowy determinujący przewodzenie ciepła przez ciało,

$\text{grad } T$ - gradient temperatur.

W 1884 dwóch austriackich fizyków J. Stefan oraz L. E. Boltzmann sformułowali prawo promieniowania ciał o danej temperaturze (prawo Stefana-Boltzmann) określające zależność całkowitej zdolności emisyjnej ε ciała doskonale czarnego od jego temperatury bezwzględnej

$$\varepsilon = \sigma \cdot T^4 \quad (4.3)$$

w którym:

ε - emisja ciała doskonale czarnego,

σ - stała Stefana-Boltzmann = $5.75 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{deg}^{-4}$,

T - temperatura bezwzględna.

Te trzy równania stanowią podstawę opisu teoretycznego zagadnień cieplnych zachodzących w różnych materiałach w tym dojrzewającym betonie.

Rozwój na początku lat 80-tych komputerów osobistych, przyczynił się do gwałtownego postępu w różnych dziedzinach nauki. Stopniowo rozwijane oraz udoskonalane oprogramowanie, wykorzystywane w różnych dziedzinach techniki, gospodarki i nauki stało się podstawowym narzędziem w rękach inżynierów i naukowców dając im szerokie możliwości w rozwiązywaniu różnych problemów.

Na uwagę zasługuje metoda elementów skończonych FEM (MES). Metoda elementów skończonych powstała pod koniec lat 50. jako metoda obliczeniowa stosowana w mechanice strukturalnej, przy czym historia jej rozwoju częściowo sięga daleko w przeszłość. Metoda elementów skończonych MES jest szczególnie przydatna w rozwiązywaniu zagadnień brzegowo-początkowych i znalazła zastosowanie w wielu obszarach nauki i techniki. Za pomocą MES bada się przepływy ciepła, przepływy cieczy podczas analizy pola temperatur oraz rozpatruje się inne zagadnienia opisane równaniami różniczkowymi pierwszego lub drugiego rzędu. Do obliczeń pól termicznych w dojrzewającym betonie wykorzystano oprogramowaniem amerykańskiej firmy STRUCTURAL RESEARCH & ANALYSIS CORP. - COSMOS/M V2.5 APPLICATIONS [75].

Oprogramowanie to znalazło szerokie zastosowanie w różnych dziedzinach przemysłu, między innymi w;

- energetyce jądrowej przy projektowaniu elementów chłodzących reaktory jądrowe,
- energetyce przy projektowaniu elementów chłodzących transformatory,
- elektronice przy projektowaniu elementów chłodzących procesory,
- mechanice przy projektowaniu głowic silników spalinowych, oraz elementów chłodzących silniki.

Istnieje już bogata literatura dotycząca obciążeń cieplnych. Na szczególne wyróżnienie zasługuje monografia autorów E. Rusińskiego, J. Czmochońskiego, T. Smolnickiego [159], w której znaleźć można omówienie zasady działania oraz zastosowania metody elementów skończonych do obliczeń przepływu ciepła. Z tego względu nie wydaje się konieczne przedstawienie całości zagadnienia a jedynie wybranych elementów dotyczących bezpośrednio problematyki niniejszej pracy.

Oprogramowanie wykorzystane w obliczeniach, bazuje na metodzie elementów skończonych i posiada gotowe moduły obliczeniowe z różnych dziedzin techniki. Zastosowany moduł z działu termodynamiki technicznej wykorzystuje w algorytmach obliczeniowych;

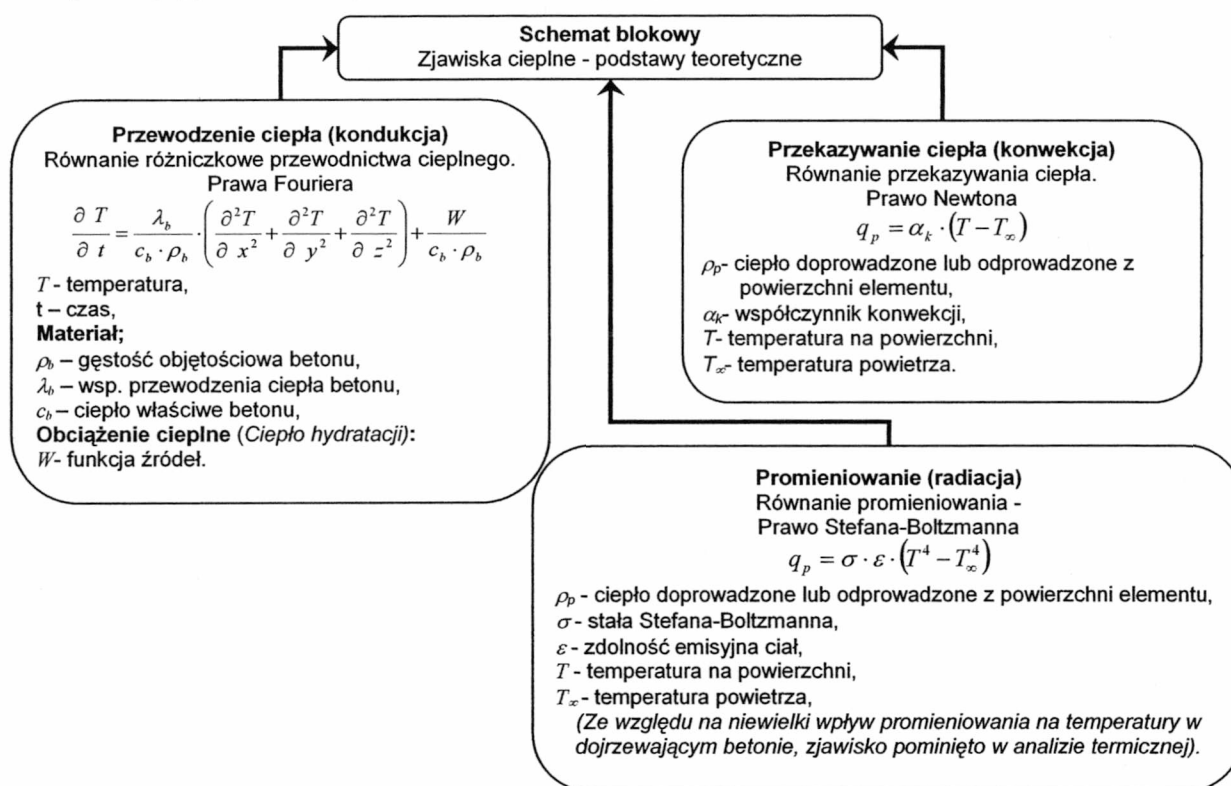
- równanie przekazywania ciepła (4.1),

- różniczkowe równanie przewodnictwa cieplnego (4.4),
- równanie promieniowania (4.7).

Wymienione równania stosowane są również w algorytmach obliczeniowych wielu bardzo zaawansowanych programów obliczeniowych, między innymi takich jak; Cosmo-sm 2.8 [75], Ideas 9 [180], Catia V5R12 [181].

W aplikacji COSMOS/M V2.5 [75] możliwe jest rozpatrywanie przestrzennego zagadnienia nieustalonego przewodnictwa ciepła, przy występowaniu wewnętrznych źródeł ciepła zależnych wyłącznie od czasu.

Zjawiska ciepłe, będące podstawą teoretyczną do obliczenia pól termicznych w dojrzewającym betonie, przedstawiono na ogólnym schemacie blokowym (patrz rys. 4.1).



Rys. 4.1. Schemat blokowy rozpatrywanych zjawisk cieplnych

• Przewodzenie ciepła - kondukcja

Przewodzenie ciepła zachodzi wtedy, kiedy w kierunku przekazywania ciepła, tj. kierunku gradientu temperatury, nie ma makroskopowego przemieszczenia substancji. Przypadek taki z reguły występuje w ciałach stałych, w których nie zachodzi makroskopowe przemieszczanie. Przewodzenie ciepła zachodzi również w ciałach gazowych, gdy zamykająca od góry gaz pozioma powierzchnia grzejąca, ma wyższą od niego temperaturę.

Według Kalinowskiego [80, 81] mechanizm przewodzenia ciepła w ciałach stałych jest zjawiskiem skomplikowanym i dotychczas niecałkowicie poznanym. Niepoślednią

rolę odgrywa w nim drgający (oscylacyjny) ruch atomów i cząstek oraz ruch wolnych elektronów (metale).

Do określenia zmiany temperatury dojrzewającego betonu z wewnętrznym źródłem ciepła o mocy zależnej od temperatury i czasu $W(T,t)$ służy, różniczkowe równanie przewodnictwa cieplnego wyprowadzone na podstawie Prawa Fouriera (4.2), opisujące trójki-runkowy przepływ ciepła w stanie nieustalonym. Równanie różniczkowe Fouriera dla materiału termicznie izotropowego, przyjmuje postać;

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_b}{c_b \cdot \rho_b} \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{W}{c_b \cdot \rho_b} \quad (4.4)$$

gdzie:

- $T = T(x, y, z)$ - temperatura ośrodka, [$^{\circ}\text{C}$],
- λ_b - współczynnik przewodności cieplnej betonu [$\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$],
- c_b - ciepło właściwe betonu, [$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$],
- ρ_b - gęstość objętościowa betonu, [kg/m^3],
- $W(T, t)$ - wewnętrzne źródło ciepła zależne od temperatury i czasu, [W/m^3],
- t - czas, [s].

Źródłem ciepła w układzie jest egzotermiczna reakcja chemiczna, wiązania spoiwa z wodą. Należy podkreślić, że szybkość wydzielania ciepła hydratacji oraz jego wartość całkowita, w istotny sposób zależą od wielu czynników, takich jak [93, 175];

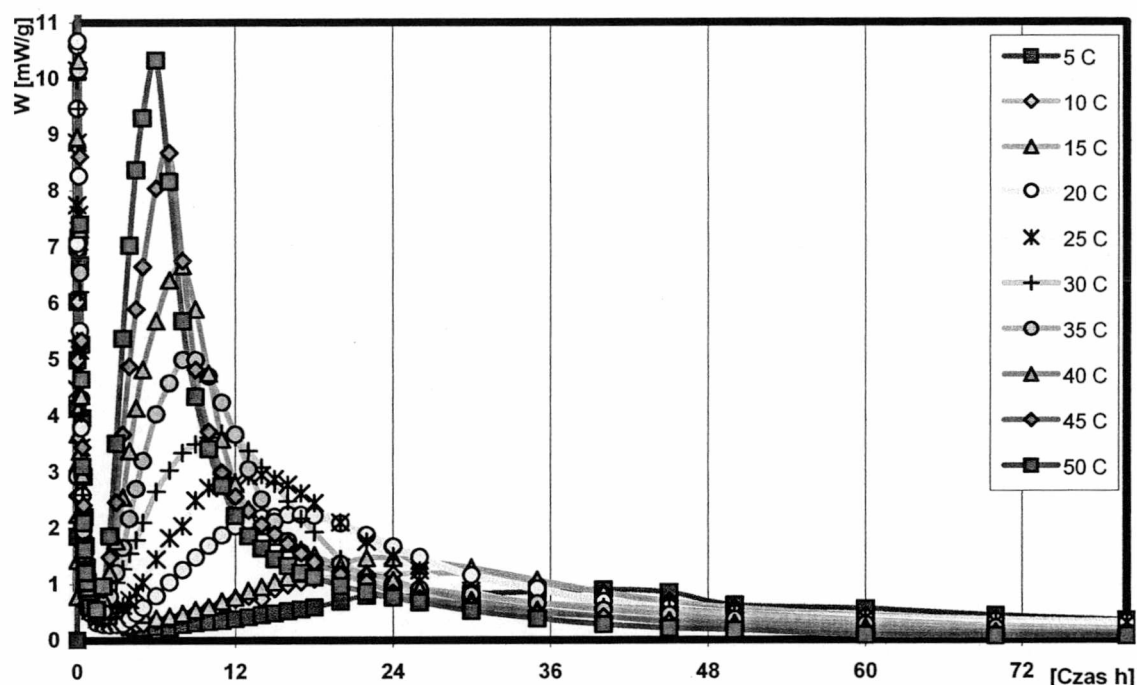
- 1) składu mineralogicznego klinkieru,
- 2) stopnia zmielenia klinkieru (cementu),
- 3) zawartości gipsu,
- 4) zawartości żużla i dodatków pucolanowych,
- 5) stopnia zleżenia klinkieru (cementu),
- 6) stosunku w/c,
- 7) zawartości domieszek,
- 8) temperatury.

Witakowski [175] uważa, że pierwsze siedem czynników może być świadomie wybrane lub ustalone jeszcze przed samym projektowaniem spoiwa. Jedynie temperatura nie może być ustalona przy projektowaniu materiału. Temperatura jak i czas pojawienia się maksymalnej temperatury dojrzewającego betonu zależy od szeregu innych czynników, z których autor pracy [175] wyróżnia cztery grupy;

- skład mieszanki betonowej,
- geometria betonowanej konstrukcji,
- technologia betonowania (termiczne warunki początkowe),

- technologia pielęgnacji (termiczne warunki brzegowe).

Wydzielanie się ciepła hydratacji opisuje funkcja czasu, której wartości stanowią gęstość mocy ciepła hydratacji [93, 175]. Funkcja ta nosi nazwę funkcji źródeł, $W(t)$ i wskazuje ilość ciepła, jakie się wydzieli z 1 grama cementu w ciągu jednostki czasu w danych warunkach termicznych. Wartości funkcji źródeł oznaczane są w jednostkach W/g lub J/(g·s) (w odniesieniu do ilości cementu w betonie W/m³ lub J/(s·m³)). Zależność funkcji źródeł od temperatury, jak podkreśla Witakowski [175], ma znaczenie fundamentalne dla prawidłowego ustalenia naprężeń termicznych. Autor w pracy [175] proponuje wyznaczenie rodziny funkcji źródeł $W(t)$ w warunkach izotermicznych dla dowolnego zakresu temperatur $T_1 \leq T \leq T_2$, przy różnicy temperatur między poszczególnymi badaniami nieprzekraczającej (krok termiczny) 5 °C (patrz rys 4.2).



Rys. 4.2. Graficzne wyniki badań funkcji źródeł cementu portlandzkiego 45 Małogoszcz, uzyskane w Pracowni Termochemii Instytutu Techniki Budowlanej w Warszawie [175].

Przykładowo dla cementu „WARTA” CEM I MSR NA 42.5, zastosowanego do wykonania przęseł łącznic dojazdowych do estakady głównej (patrz p.3.3.), w których maksymalna temperatura dojrzewającego betonu wynosiła $T_{s(24h)}=75\text{ }^{\circ}\text{C}$, badania takie należałoby wykonać w zakresie $T_1=10\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq T_2=75\text{ }^{\circ}\text{C}$, przy kroku termicznym wynoszącym 5 °C. W konsekwencji otrzymano by 14 funkcji źródeł pokrywających cały zakres temperatur możliwy do wystąpienia w danym elemencie. Szczegółowy opis dotyczący funkcji źródeł oraz metody jej wyznaczania Witakowski przedstawił w pracy [175].

Omówienie różnych koncepcji analitycznego opisu funkcji źródeł ciepła twardnienia betonu, przedstawili między innymi Kiernożycki i Klemczak [93, 95]. Autorzy [93, 95] wskazują na trudności w analitycznym opisie funkcji źródeł, podkreślając że możliwe jest analityczne odwzorowanie przebiegu funkcji źródeł, lecz niezbędne jest eksperymentalnie wyznaczenie dokładnych wartości współczynników występujących w proponowanych równaniach, w odniesieniu do każdego rodzaju cementu.

Właściwości termofizyczne materiału opisują: współczynnik przewodzenia ciepła, ciepło właściwe, gęstość oraz współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej. Prac poświęcona jest wyłącznie analizie pól temperatury z tego względu pominięto omówienie współczynnika liniowej rozszerzalności cieplnej, wpływającego na wielkości odkształceń termicznych betonu.

Współczynnik przewodności cieplnej λ , jest to stosunek gęstości ustalonego strumienia ciepła q przewodzonego przez warstwę materiału do spadku temperatury T na grubości x warstwy [134]. Wartość współczynnika zależy od rodzaju substancji (materiału), jego gęstości i temperatury [80, 81].

Ciepło właściwe, jest to ilość ciepła [kJ] potrzebna do ogrzania 1 kg ciała o 1 °C [134] lub, jest ilość ciepła w [kJ] pobrana przez jednostkę masy danego układu powodująca wzrost temperatury układu o 1 °C. Wartość ciepła właściwego, zależy od rodzaju substancji (materiału), jego gęstości (ciśnienia płynu) i temperatury [80, 81].

Gęstość objętościowa jest to wielkość, charakteryzująca daną substancję, liczbowo równa masie jednostki jej objętości. Gęstość objętościowa zależy od temperatury i ciśnienia.

Według Kiernożyckiego i Klemczak [93, 95] wartości współczynników termofizycznych dla betonu, przyjmować mogą następujące wartości;

$$\text{wg. [93]} \quad \lambda_b = 1.4 \div 2.7 \text{ [W/(m} \cdot ^\circ\text{C)]}, \quad c_b = 0.84 \div 1.17 \text{ [kJ/(kg} \cdot ^\circ\text{C)]},$$

$$\text{wg. [95]} \quad \lambda_b = 1.75 \div 2.7 \text{ [W/(m} \cdot ^\circ\text{C)]}, \quad c_b = 0.84 \div 1.2 \text{ [kJ/(kg} \cdot ^\circ\text{C)]}.$$

Klemczak w publikacji [95] twierdzi, że pozornie małe rozrzuty przyjmowanych wartości współczynników termofizycznych mają istotny wpływ na obliczane wartości temperatur dojrzewającego betonu, a najwłaściwszą metodą ich określenia jest przeprowadzenie badań eksperymentalnych. Autorka publikacji [95] proponuje w przypadku braku danych eksperymentalnych, przyjęcie w obliczeniach najmniejszych wartości współczynników termofizycznych, które skutkują wyższymi temperaturami dojrzewającego betonu i wolniejszym odpływem ciepła z elementu, a tym samym większa będzie różnica pomiędzy temperaturą wnętrza i powierzchnią, co z kolei stwarza większe zagrożenie powstania zarysowania.

Według Klemczak [95] współczynniki termofizyczne w dużej mierze zależą od składu mieszanki betonowej i stosunku wodno-cementowego w/c.

W przypadku braku danych eksperymentalnych Kiernożycki [93] proponuje, wyznaczenie wartości współczynników termofizycznych w zależności od składu mieszanki betonowej, wilgotności objętościowej betonu (w) i stopnia hydratacji cementu.

Witakowski [175] podkreśla, że współczynniki materiałowe należy ustalić drogą eksperymentu, a w przypadku braku danych eksperymentalnych można je obliczyć metodą średniej ważonej na podstawie odpowiednich współczynników dla poszczególnych składników betonu. Autor pracy [175] we wszystkich obliczeniach własnych, przyjmował stałe wartości współczynników termofizycznych, ustalone na podstawie analizy dostępnych danych literaturowych; $\rho_b = 2000$ [kg/m³], $\lambda_b = 1.74$ [W/(m·°C)], $c_b = 0.96$ [kJ/(kg·°C)].

Kiernożycki [86] i Klemczak [94, 95] w obliczeniach pól termicznych dojrzewającego betonu przyjmowali stałe wartości współczynników termofizycznych; $\rho_b = 2400$ [kg/m³], $\lambda_b = 1.75$ [W/(m·°C)], $c_b = 1.00$ [kJ/(kg·°C)].

Flaga [46, 56] do określenia przyrostu temperatury wywołanej samoociepniem się betonu, przyjmował następujące wartości współczynników termofizycznych; $\rho_b = 2300 \div 2400$ [kg/m³], $\lambda_b = 1.98$ [W/(m·°C)], $c_b = 0.96$ [kJ/(kg·°C)].

Należy podkreślić, że zarówno w pracach polskich np. [46, 53, 56, 65, 86, 90, 94, 95, 175] i zagranicznych np. [106, 148] do obliczeń pól termicznych dojrzewającego betonu, przyjmowano stałe wartości współczynników termofizycznych, ustalone albo na podstawie badań eksperymentalnych albo na podstawie szczegółowej analizy dostępnych danych literaturowych (patrz tablica 4.1).

Tablica 4.1. Wartości współczynników termofizycznych dla betonu i żelbetu

Materiał	ρ_b [kg/m ³]	λ_b [W/(m·°C)]			c_b [kJ/(kg·°C)]
		warunki średnio wilgotne	warunki wilgotne	brak informacji *)	
Beton zwykły z kruszywa kamiennego [132],	2400 2200 1900	1.70 1.30 1.00	1.80 1.50 1.10		0.84
Beton zwykły [65],	1800÷2400			0.76÷1.50	0.837
Beton,	2400 [94, 95]			1.75	1.00
	2400 [86]			1.75	1.00
	2000 [175]			1.74 (1.96)	0.96
Beton z kruszywa [123],					
- Kwarcyt	2440			3.50	—
- Dolomit	2500			3.30	—

C.d. Tablica 4.1.

Materiał	ρ_b [kg/m ³]	λ_b [W/(m·°C)]			c_b [kJ/(kg·°C)]
		warunki średnio wilgotne	warunki wilgotne	brak informacji *)	
- Wapień	2450			3.20	—
- Piaskowiec	2400			2.90	—
- Granit	2420			2.60	—
- Bazalt	2520			2.00	—
- Baryt	3040			2.00	—
Beton z kruszywa [106],					
- Bazalt	2500			1.50	1.00
- Granit	2450			2.04	0.96
- Żwir	2400			3.40	0.92
Beton z kruszywa [148],					
- Granit	2500			2.15	0.91
- Bazalt	2534			1.38	0.94
- Kwarcyt, Granit, Ryolit	2465			1.57	0.93
- Granit, Diabaz	2450			1.81	0.96
- Granit	2400			1,67	0.96
- Granit, Diabaz	2520			1.84	0.98
Żelbet [132]	2500	1.70	1.80		0.84

*) brak informacji co do warunków w jakich pozyskano dane.

• Przekazywanie ciepła (konwekcja)

Przekazywanie ciepła przez unoszenie, zwane konwekcją, zachodzi w ośrodku płynnym, w którym występują makroskopowe ruchy płynu, zwane konwekcyjnymi [80, 81]. Kalinowski twierdzi [80, 81] że, w technice najważniejsze znaczenie ma konwekcja, która zachodzi między powierzchnią ciała stałego, a płynem opływającym tę powierzchnię. Rozpatruje się także przypadki konwekcji między dwoma płynami, jeśli można wyraźnie określić powierzchnię styku oddzielającą oba płyny, np. powierzchnię rozdziału fazy ciekłej i gazowej. Konwekcja jest takim przypadkiem przewodzenia ciepła w płynie, w którym ruch płynu ma wpływ na wielkość przewodzonego strumienia ciepła, a więc na zachowanie się pola temperatury. W kierunku strumienia określonego kierunkiem gradientu temperatury istnieją wtedy różne od zera składowe prędkości makroskopowego ruchu płynu.

Jeśli pominie się przypuszczalny wpływ promieniowania przy przekazywaniu ciepła od ścianki do płynu, to można do konwekcji zastosować prawo Newtona (4.1), [80, 81].

Współczynnik konwekcji α_k jest to wartość bezwzględna, stosunku ciepła doprowadzonego lub odprowadzonego z powierzchni elementu q_p do różnicy temperatur powierzchni przegrody i otoczenia [134]. Kalinowski twierdzi [80, 81] że, wartość

współczynnika zależy między innymi od współczynnika λ i grubości warstewki granicznej. Ta z kolei jest uwarunkowana nie tylko prędkością, ale i lepkością płynu η . Współczynnik przewodzenia zależy również od gęstości ρ . Na wielkość α_k ma wpływ także ciepło właściwe płynu c_p i inne wielkości. Wymienione parametry: λ , ρ , η , c_p , zależą od temperatury jest, więc istotne, dla jakiej temperatury należy je przyjmować. Autor prac [80, 81], proponuje określenie współczynnika α_k w zależności od potrzeb dla jednej z trzech temperatur obliczeniowych:

- dla średniej temperatury płynu;

$$T_{pl} = \frac{T_p + T_k}{2} \quad (4.5)$$

gdzie: T_p - temperatura płynu na wlocie,

T_k - temperatura płynu na wylocie,

- dla średniej temperatury ściany otrzymuje się;

$$T_s = \frac{T_p + T_k}{2} \quad (4.6)$$

gdzie: T_p - temperatura ściany - awers,

T_k - temperatura ściany - rewers.

Orientacyjne wartości współczynnika konwekcji α_k , zależnego od parametrów płynu podano w tablicy 4.2, [80, 81].

Tablica 4.2. Zależność współczynnika konwekcji α_k od parametrów płynu

Płyn	α_k [W/m ² ·°C]
Powietrze	5-30
Ciecze lepkie	50-350
Woda nie wrząca	500-10 000
Woda wrząca	1 000-20 000
Para skraplająca się	4 000-40 000

Kuczyński w pracy [105], podaje orientacyjne wartości α_k w zależności od rodzaju powierzchni i prędkości wiatru (patrz tab. 4.3.), podkreślając, że straty ciepła wskutek konwekcji z powierzchni poziomych w górę są w przybliżeniu o 20 % większe, a z powierzchni poziomych w dół o 40 % mniejsze niż z powierzchni pionowych.

Tablica 4.3. Współczynnik α_k uzależniony od rodzaju powierzchni i prędkości wiatru [105]

Prędkość wiatru v [m/s]		0	0.5	1	2	4	6	8
α_k [W/(m ² ·°C)]	powierzchnia polerowana	5.1	7.9	9.9	13.7	21.3	28.7	35.2
	powierzchnia szorstka	5.8	8.7	10.7	14.8	22.8	30.8	38.5

Kiernożycki [93] powołując się na prace Andreasika, Branco, Townsenda, podaje sposoby wyznaczenia współczynnika przejmowania ciepła z powierzchni betonu dla konwekcji swobodnej i wymuszonej.

Z dostępnych danych literaturowych [93, 105] wynika, że średnie wartości powierzchniowego współczynnika przejmowania ciepła na powierzchni betonu odpowiadają wartościom podanym przez Townsenda [93] dla konwekcji wymuszonej uzależnionej od prędkości wiatru (patrz tablica 4.4).

Tablica 4.4. Współczynnik α_k uzależniony od prędkości wiatru [93]

Prędkość wiatru v [m/s]	0	1	2	3	4	5	6
α_k [W/(m ² ·°C)]	5.8	10.4	14.5	18.6	22.6	26.7	34.5

Z przeprowadzonej analizy dostępnych danych literaturowych wynika, że do obliczeń pól termicznych w dojrzewającym betonie przyjmuje się stałą wartość współczynnika α_k w zależności od średniej prędkości wiatru, występującego w pobliżu wykonywanego elementu.

Przybliżone dane dotyczące prognozowanej średniej temperatury powietrza oraz średniej prędkości wiatru na danym obszarze polski, znaleźć można na wielu stronach internetowych [183, 184, 185].

- **Promieniowanie (radiacja)**

Promieniowanie jest to wysyłanie energii w formie strumieni cząstek lub fal elektromagnetycznych.

Prawo Stefana-Boltzmann (4.3) określa zależność sumy energii q_p wypromieniowanej przez ciało doskonale czarne od temperatury bezwzględnej $(T^4 - T_\infty^4)$ tego ciała.

Równanie promieniowanie (radiacja) można zapisać;

$$q_p = \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T^4 - T_\infty^4), \quad (4.7)$$

gdzie:

q_p - ciepło doprowadzone lub odprowadzone z powierzchni elementu, [W/m²],

σ - stała Stefan-Boltzmann, $5,675 \times 10^{-8}$ [W/(m²·°C⁴)]

ε - zdolność emisyjna ciał, (stała bezwymiarowa)

T - temperatura na powierzchni, [°C],

T_∞ - temperatura otoczenia, [°C].

Zdolność emisyjna ciał (stopień czarność powierzchni) jest stosunek emisji danego ciała do emisji, jaką by ono miało, gdyby przy tej samej temperaturze było doskonale czarne. Zdolność emisyjna ciała doskonale białego wynosi $\varepsilon = 0$, a doskonale czarnego $\varepsilon = 1$, [80, 81].

Ze względu na niską wartość stałej Stefan-Boltzmann, i niskie wartości temperatury na powierzchni betonu podczas jego dojrzewania (około 35 °C - dla zbadanych elementów konstrukcyjnych), w analizie pól termicznych wpływ promieniowania można pominąć.

Podsumowanie

Przedstawione równania dotyczące zjawisk cieplnych, mogą posłużyć do obliczenia pól termicznych w dojrzewającym betonie [93, 94, 95, 106, 118]. Równania te nie wyczerpują w pełni złożoności zjawisk zachodzących podczas dojrzewania betonu.

Z przedstawionych podstaw teoretycznych wynika, że do właściwego modelowania warunków termicznych dojrzewającego betonu, niezbędne jest wyznaczenie dla spoiwa cementowego (cement, dodatki i domieszki) rodziny funkcji źródeł o mocy zależnej od temperatury i czasu, oraz eksperymentalne wyznaczenie wszystkich współczynników termofizycznych dla analizowanych materiałów; współczynnika przewodzenia ciepła, ciepło właściwe i gęstość objętościowa. Niezbędne jest również ustalenie termicznych warunków początkowych i termicznych warunków brzegowych.

Przedstawione podstawy teoretyczne stanowią mogą podstawę do przeprowadzenia ilościowej i jakościowej analizy porównawczej czynników decydujących o temperaturze wewnętrznej dojrzewającego betonu, lecz do tego niezbędne jest ustalenie wszystkich parametrów materiałowych oraz kinetyki wydzielanego ciepła hydratacji zależnej od temperatury i czasu. Trzeba podkreślić, że beton jest materiałem wykonywanym zazwyczaj z materiałów miejscowych i jego cechy fizyczne wykazują duże zróżnicowanie. Na przykład średni moduł sprężystości betonu określonej klasy może dla różnych składów mieszanek różnić się nawet o 15 % [20, 123].

Także beton wykonany według określonej receptury wykazuje dużą niejednorodność. Co oznacza, że wyznaczone na drodze eksperymentalnej parametry będą charakteryzować się współczynnikiem zmienności w najlepszym przypadku około 0.1 [20].

Z powyższego wynika, że bardzo trudne a w zasadzie nie możliwe jest wyznaczenie dostatecznie ścisłych i uniwersalnych funkcji i parametrów materiałowych charakteryzujących procesy cieplne betonu. Teoretycznie wraz z określeniem receptury betonu można by wyznaczać funkcję źródeł i pozostałe potrzebne parametry. Tak w zasadzie można postąpić tylko w przypadku projektowania technologii betonowania szczególnych konstrukcji np. osłon reaktorów czy zapór wodnych. W pozostałych przypadkach wykonanie takich badań będzie niemożliwe z uwagi na ich skomplikowany charakter i koszty.

Wydaje się, że w analizach praktycznych w większości przypadków trzeba będzie ustalić potrzebne parametry na podstawie istniejącej w literaturze bazy danych. Oczywisty jest postulat jej poszerzenia i uściślenia.

Takie podejście, zakłada z góry że dane wyjściowe do analiz cieplnych masywów betonowych będą się charakteryzować dużym marginesem błędów.

W tej sytuacji autor niniejszej rozprawy uważa, że oprócz dalszych poszukiwań rozwiązań dokładnych można przedmiotowy proces analizować od strony jakościowej stosując metody uproszczone.

Brak danych eksperymentalnych dotyczących funkcji źródeł dla spoiwa cementowego i współczynników termofizycznych dla analizowanych materiałów, nie pozwala w normalnych przypadkach przeprowadzenie dokładnej analizy ilościowej, określającej ściśle wartości temperatur w dojrzewającym betonie.

Przyjmując do obliczeń wyznaczoną eksperymentalnie w warunkach semiadiabacyjnych kinetykę wydzielania ciepła hydratacji dla cementu „WARTA” CEM I MSR 42.5 NA w funkcji czasu, oraz przyjmując z literatury średnie wartości współczynników termofizycznych analizowanych materiałów, możliwe jest jedynie wykonanie analizy jakościowej. Analiza taka wskazywać może, jaki jest wpływ wybranych czynników decydujących o temperaturze dojrzewającego betonu na wzrost lub obniżenie temperatury wewnętrznej jak i różnicy temperatur między środkiem i powierzchnią zewnętrzną elementu. Wykonanie takiej analizy może być przydatna w doborze składu mieszanki betonowej (rodzaj kruszywa) oraz technologii betonowania i pielęgnacji dojrzewającego betonu.

Przybliżoną analizę parametryczną wykonano dla wybranych czynników, takich jak;

- wpływ właściwości termofizycznych betonu,
- wpływ temperatury mieszanki betonowej,
- wpływ temperatury powietrza,
- wpływ powierzchniowego współczynnika przejmowania ciepła,
- wpływ grubości warstwy izolacji termicznej na powierzchni zewnętrznej elementu,

5. PRZYBLIŻONA ANALIZA PARAMETRYCZNA WPLYWU RÓŻNYCH CZYNNIKÓW NA ROZKŁADY TEMPERATUR W MASYWNYCH ELEMENTACH

5.1. Cel i zakres analizy

Celem analizy, jest określenie wpływu wybranych czynników wewnętrznych (właściwości termofizyczne betonu, temperatura początkowa mieszanki betonowej) oraz zewnętrznych (temperatura powietrza, wpływ powierzchniowego współczynnika przejmowania ciepła, grubość warstwy izolacji termicznej) na różnicę temperatur ΔT_{wz} , między środkiem i powierzchnią zewnętrzną elementu betonowego oraz wzrost lub obniżenie maksymalnej temp. wewnętrznej elementu.

Należy podkreślić, że zakres wykonanej analizy oraz wyciągnięte z niej wnioski ograniczono do elementów swobodnych, niepozbawionych swobody odkształceń, w których o niebezpieczeństwie utraty monolityczności decyduje różnica temperatur między środkiem i powierzchnią elementu. W elementach utwierdzonych, pozbawionych swobody odkształceń o niebezpieczeństwie utraty monolityczności elementu decyduje maksymalna temperatura wewnętrzna i późniejsze się jej wyrównanie od tej temp. Z tego względu i przyjętych do obliczeń uproszczeń a zwłaszcza przyjętej funkcji źródeł niezależnej od temperatury, analizę ograniczono jedynie do wybranych czynników mające zarówno wpływ na wartości temperatur jak i na różnice temperatur między środkiem i powierzchnią elementu.

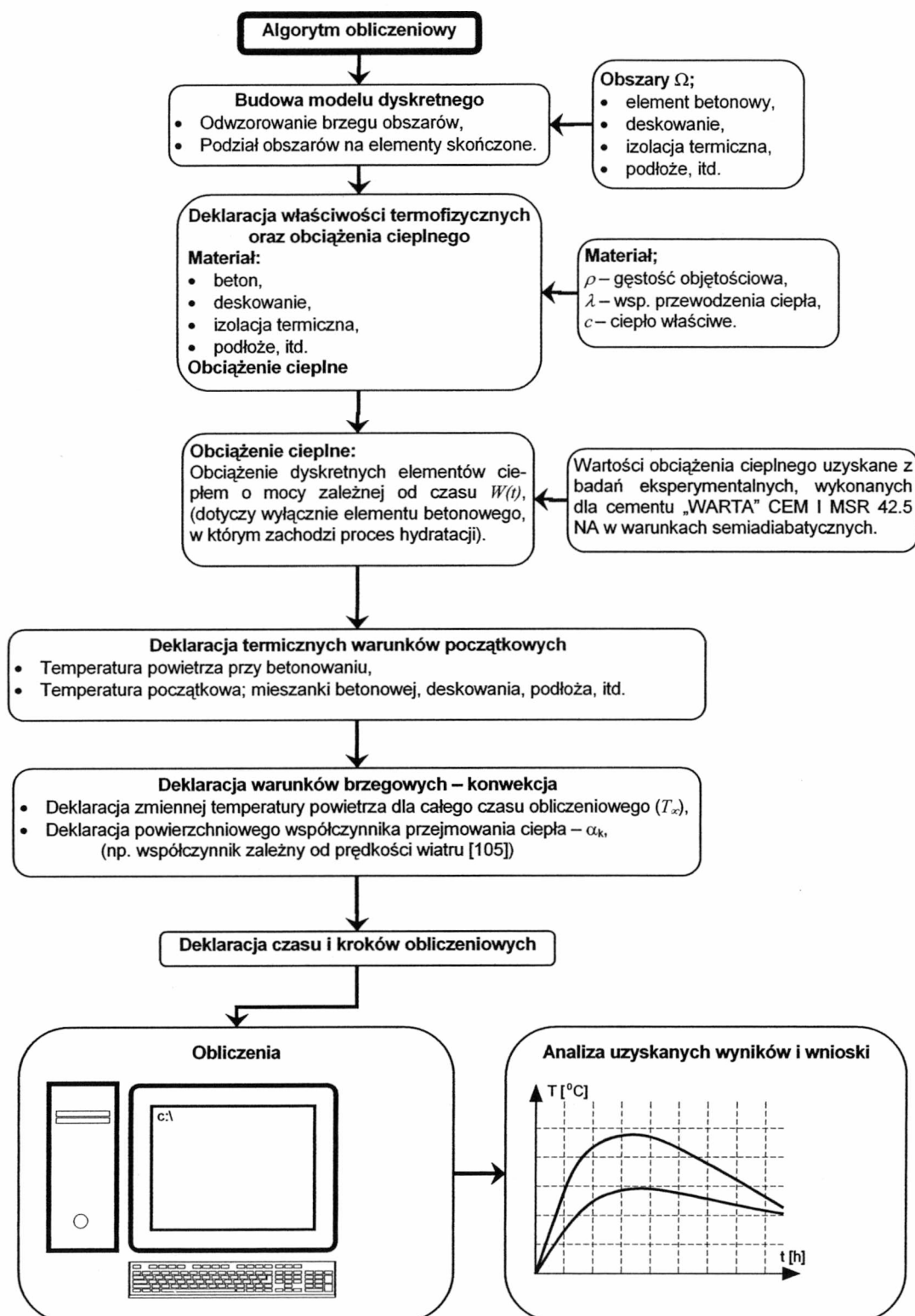
Ze względu na zmienność współczynników termofizycznych betonu (patrz tablica 4.1), postanowiono analizować poszczególne wartości termofizyczne oddzielnie w zakresie przedziałów zmienności występujących w realnych warunkach.

Analiza parametryczna dotyczyła;

- wpływu gęstości objętościowej betonu (ρ),
- wpływu współczynnika przewodności cieplnej betonu (λ),
- wpływu ciepła właściwego betonu (c),
- wpływu temperatury mieszanki betonowej,
- wpływu temperatury powietrza,
- wpływu powierzchniowego współczynnika przejmowania ciepła (α),
- wpływu grubości warstwy izolacji termicznej na powierzchni zewnętrznej elementu (warstwa styropianu).

Wszystkie obliczenia wykonano w programie amerykańskiej firmy STRUCTURAL RESEARCH & ANALYSIS CORP. - COSMOS/M V2.5 APPLICATIONS [75] według schematu obliczeniowego przedstawionego na rysunku 5.1. Program zainstalowany był w

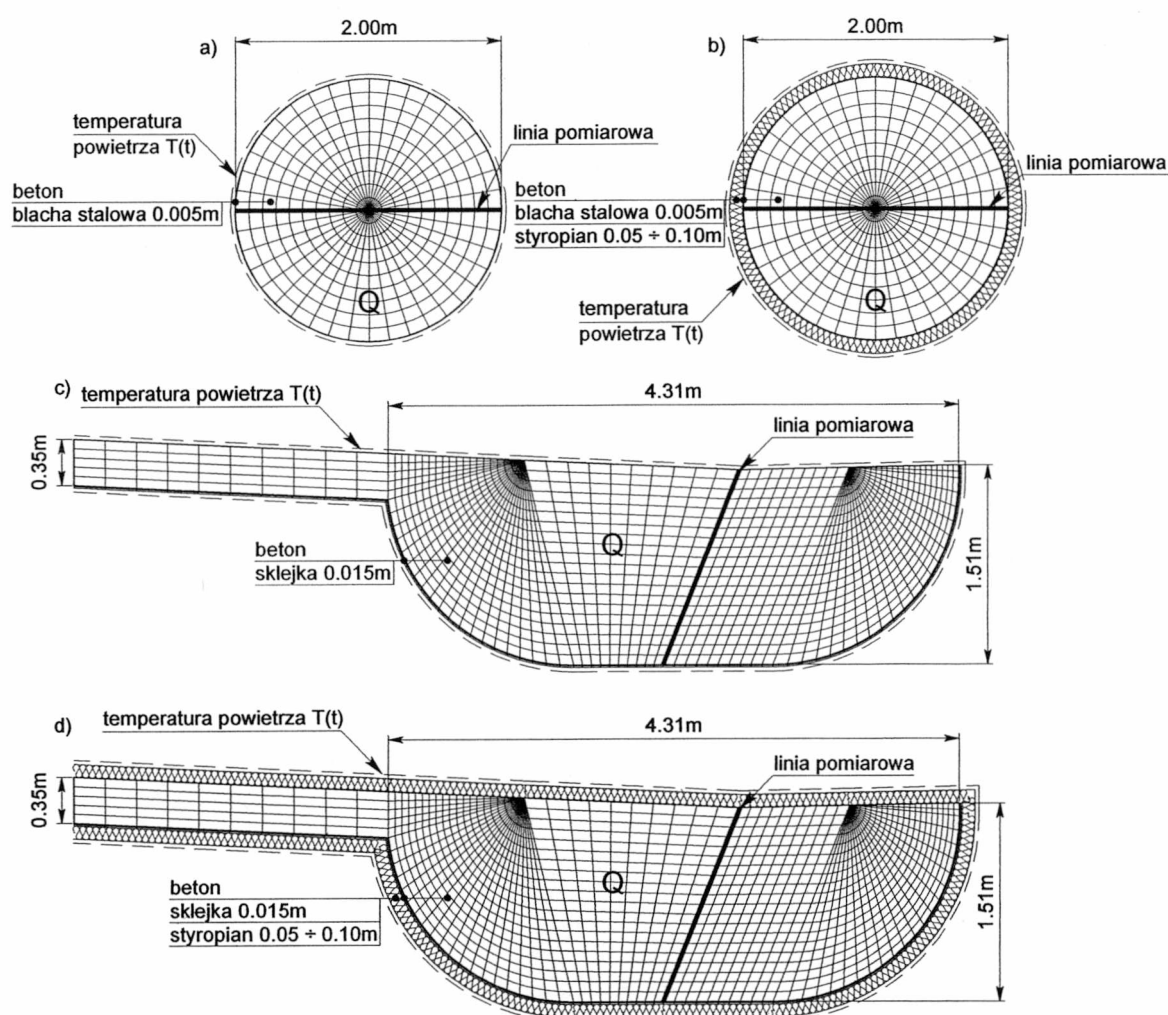
komputerze osobistym (PC) z procesorem AMD Durom(tm) 1.10 GHz i pamięcią operacyjną 640 MB DDR-SDRAM, w systemie Microsoft Windows 2000 Professional Workstation.



Rys. 5.1. Schemat blokowy – algorytm obliczeniowy

5.2. Założenia do obliczeń

Do przeprowadzenia analizy parametrycznej wyszczególniono dwa elementy konstrukcyjne estakady Gądów; filar słupowy i przęsło łącznicy dojazdowej do estakady głównej (patrz rys. 3.4 ÷ rys. 3.7 i rys. 5.2). Moduł powierzchniowy $m = F / V$ wybranych elementów wynosi; przęsło łącznicy dojazdowej $m = 1.84 \text{ m}^{-1}$, filar $m = 2 \text{ m}^{-1}$. Wybrane elementy były przedmiotem wcześniejszych badań (patrz rys. 3.10 ÷ rys. 3.23), w trakcie których pomierzono temperatury w dojrzewającym betonie.



Rys. 5.2. Siatka elementów skończonych analizowanych elementów konstrukcyjnych;
 a) filar betonowy średnicy 2.00 m,
 b) filar betonowy średnicy 2.00 m z ociepleniem zewnętrznym w postaci warstwy styropianu 5 cm oraz 10 cm,
 c) przęsło łącznicy dojazdowej,
 d) przęsło łącznicy dojazdowej z ociepleniem zewnętrznym w postaci warstwy styropianu 5 cm oraz 10 cm

W analizie parametrycznej rozpatrywano dwukierunkowy przepływ ciepła w obszarze dwuwymiarowym, stosując do dyskretyzacji obszarów elementy trójkątne i czworokątne typu PLANE2D. W modelach zastosowano następujące podziały obszarów na elementy skończone (patrz rys. 5.2);

a) model filara;

- 400 elementów (460 węzłów), o właściwościach termofizycznych betonu,
- 80 elementów (72 węzły), o właściwościach termofizycznych stali,
- 160 elementów (163 węzły), o właściwościach termofizycznych styropianu,

b) model przęsła łącznicy dojazdowej;

- 1390 elementów (1596 węzłów), o właściwościach termofizycznych betonu,
- 144 elementy (79 węzłów), o właściwościach termofizycznych sklejk, i
- 576 elementów (686 węzłów), o właściwościach termofizycznych styropianu.

W obydwu przypadkach obliczenia wykonano dla 168 kroków czasowych, przyjmując krok czasowy równy 1 godzinę. W analizie parametrycznej uwzględniono;

- kinetykę wydzielania ciepła hydratacji dla cementu „WARTA” CEM I MSR 42.5 NA, w funkcji czasu, dla pełnego pomiaru tj. 168 godzin, (360 kg - beton klasy B30, 420 kg – beton klasy B60),
- gęstość objętościową betonu wg. receptur otrzymanych od generalnego wykonawcy Dromex S.A, na beton klasy B30 i B60 (patrz tab. 3.1),
- warunki początkowe; temperatura mieszanki betonowej,
- warunki brzegowe; stała temperatura powietrza i stała wartość powierzchniowego współczynnika przejmowania ciepła, dla całego czasu obliczeniowego tj. 168 kroków czasowych.

Wartości współczynników termofizycznych deskowania (sklejka), formy stalowej (blacha gr. 5 mm) i styropianu przyjęto z normy [132]. Gęstość objętościową betonu przyjęto z receptur na beton klasy B30 i B60, otrzymanych od generalnego wykonawcy Dromex S.A, (patrz tab. 3.1). Pozostałe wartości współczynników termofizycznych betonu (λ_b – współczynnik przewodzenia ciepła, c_b – ciepło właściwe) wstępnie przyjęto z normy [132]. Wartości te skorygowano w analizie porównawczej, w której poprzez zmianę wartości współczynnika przewodzenia ciepła betonu i wartości ciepła właściwego betonu, dopasowywano wynik obliczonych temperatur do temperatur pomierzonych w rzeczywistych elementach konstrukcyjnych. Analizę taką wykonano dla zbadanych filarów (beton klasy B30) i przęseł estakad dojazdowych (beton klasy B60). Obliczone temperatury odczytywano w węzłach ustawionych

w miejscach fizycznie zainstalowanych czujników termicznych, z których uzyskiwano wyniki pomierzonych temperatur.

W obliczeniach uwzględniono;

- dokładne numeryczne odwzorowanie rzeczywistego kształtu (obszaru); filara, przęsła, deskowania, formy stalowej (patrz rys. 5.2 a i rys. 5.2 c),
- dwukierunkowy przepływ ciepła w obszarze dwuwymiarowym, stosując do dyskretyzacji obszarów elementy trójkątne i czworokątne typu PLANE2D [75] (patrz rys. 5.2a i rys. 5.2c).
- kinetykę wydzielania ciepła hydratacji dla cementu „WARTA” CEM I MSR 42.5 NA, w funkcji czasu, dla pełnego pomiaru tj. 168 godzin, (360 kg - beton klasy B30, 420 kg – beton klasy B60),
- warunki początkowe; pomierzoną temperaturę mieszanki betonowej (patrz tablica 3.3, i tablica 3.4),
- warunki brzegowe; dobowe zmiany temperatury powietrza (temperatury pomierzone), oraz stałą wartość powierzchniowego współczynnika przejmowania ciepła ($\alpha_k=15 \text{ [J/(m}^2\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C)]}$),
- analizę przeprowadzono dla 168 kroków czasowych, krok czasowy wynosił 1 godzinę (168 godzin),
- usunięcie formy stalowej z filara (po 72 godzinie).

Dopasowane wartości współczynników termofizycznych (współczynnik przewodzenia ciepła betonu i ciepło właściwe betonu) uznano za dostatecznie dokładne dla przeprowadzenia analizy parametrycznej, gdy maksymalna różnica temperatur obliczonych i pomierzonych nie przekroczyła 5°C . Ostateczne wartości współczynników termofizycznych wykorzystanych w analizie parametrycznej, zestawiono w tablicy 5.1.

Tablica 5.1. Wartości współczynników termofizycznych przyjęte do obliczeń [132]

L.p.	Nazwa materiału (element konstrukcji)	ρ [kg/m ³]	λ [W/(m·°C)]	c [J/(kg·°C)]
1.	Beton: B30 (filar) B60 (przęsło łącznicy)	2336 ** 2528 **	1.7 1.7	840, 700 * 790 *
2.	Sklejka	600	0.2	2510
3.	Stal	7800	58	440
4.	Styropian – dotyczy wyłącznie wpływu ocieplenia	30	0.05	1460

*Wartości skorygowane po wykonaniu obliczeń wstępnych i przyjęte do obliczeń.

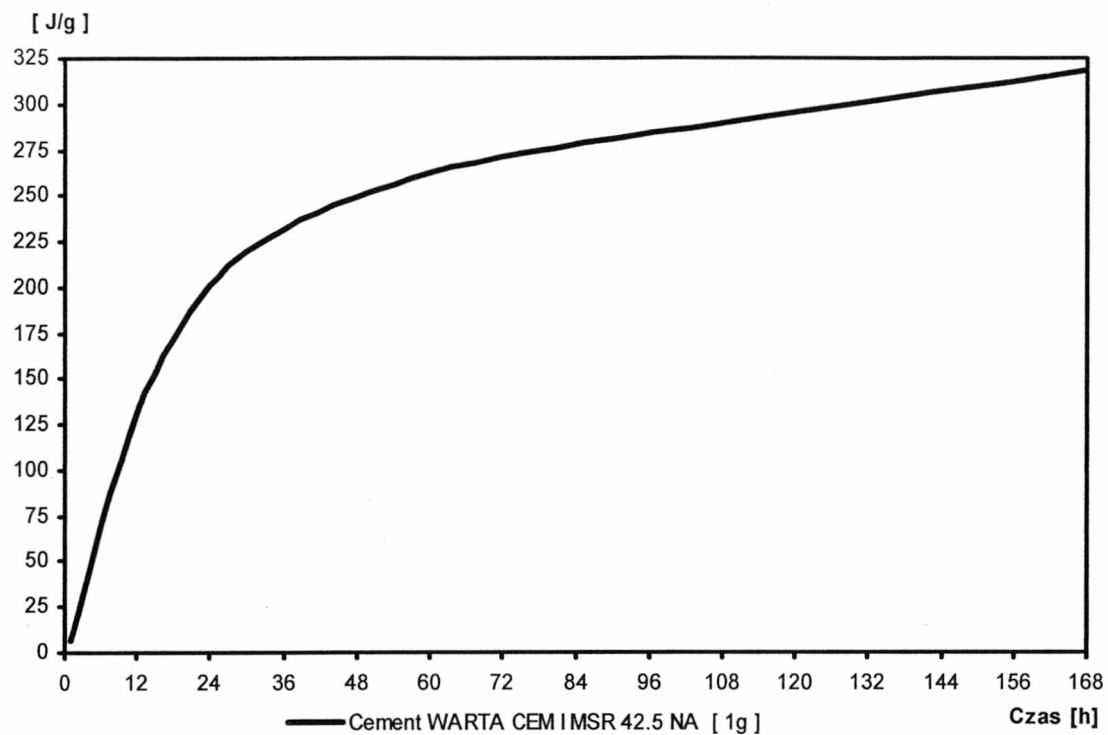
**Wartości przyjęte z receptur na beton klasy B30 i B60, otrzymanych od generalnego wykonawcy Dromex S.A.

Kinetykę wydzielania ciepła hydratacji cementu „WARTA” CEM I MSR 42.5, otrzymano z Kombinatu Cementowo-Wapiennego „Warta” S.A. Pomiar ciepła hydratacji, wykonano w Laboratorium Badań Fizycznych w Zakładzie Cementu i Chemii Budowlanej IMMB/Kraków w dniu 01.06.2001 r. zgodnie z normą BN-79/6731-17, w kalorymetrze różnicowym KRM, metodą semiadiabatyczną (patrz rys 5.3, rys. 5.4). Na rys. 5.5 i rys. 5.6, przedstawiono obliczone ciepło hydratacji oraz obliczoną kinetykę wydzielanego ciepła hydratacji, w funkcji czasu dla 360 kg/m^3 cementu w betonie (beton klasy B30 - Filar) i 420 kg/m^3 cementu w betonie (beton klasy B60 – przeszło łącznicy). Badania wykonano dla pełnego pomiaru tj. 168 h.

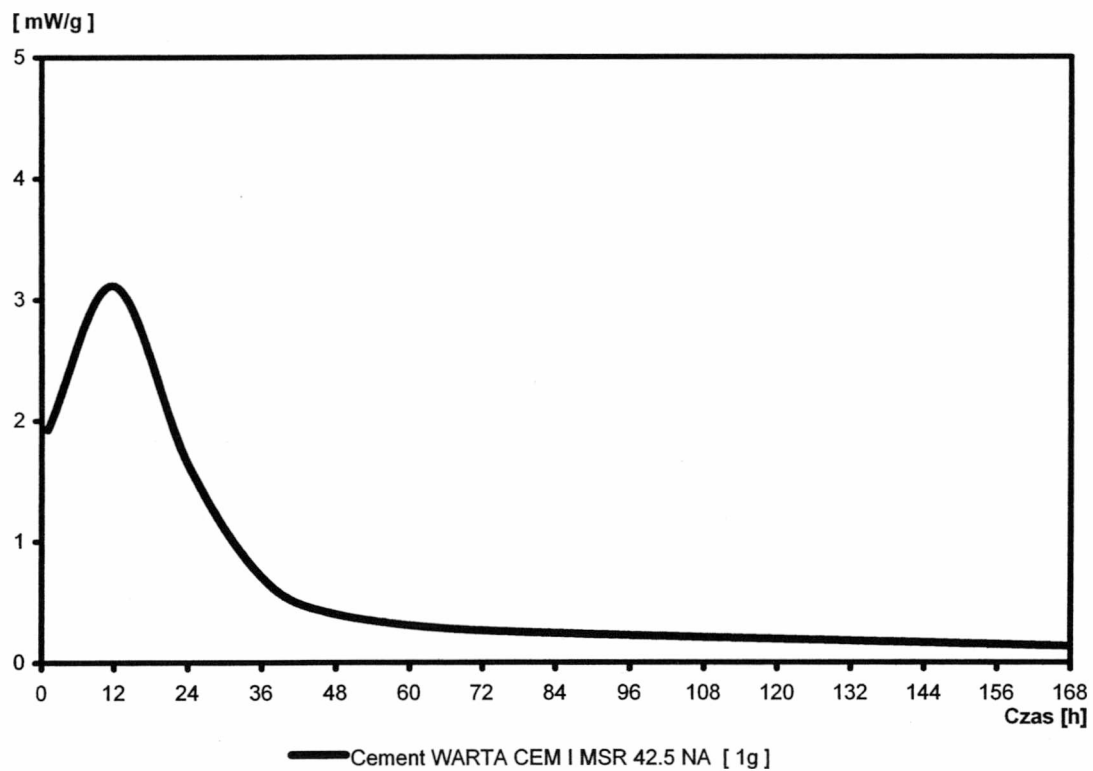
Należy podkreślić, że z przyjętej do obliczeń kinetyki wydzielania ciepła hydratacji nie jest możliwe określenie, jaka ilość ciepła wydzieli się z 1g cementu w ciągu jednostki czasu przy danej temperaturze. Ponadto w badaniach tych nie uwzględniono wpływu na proces hydratacji, zastosowanych dodatków i domieszek jak i obniżonej ilości wody w mieszance betonowej.

Przyjęcie do obliczeń powyższych założeń, wraz z brakiem wyznaczonych eksperymentalnie współczynników termofizycznych materiałów (beton, deskowanie, forma stalowa, izolacja termiczna) uniemożliwia dokładne ustalenie pól termicznych dojrzewającego betonu jak i czasu wystąpienia maksymalnej temperatury wewnętrznej. Z tego też względu, w analizie parametrycznej rozpatrywano jedynie wpływ wybranych czynników decydujących o temperaturze dojrzewającego betonu na wzrost lub obniżenie maksymalnej różnicy temperatur między środkiem i powierzchnią zewnętrzną elementu.

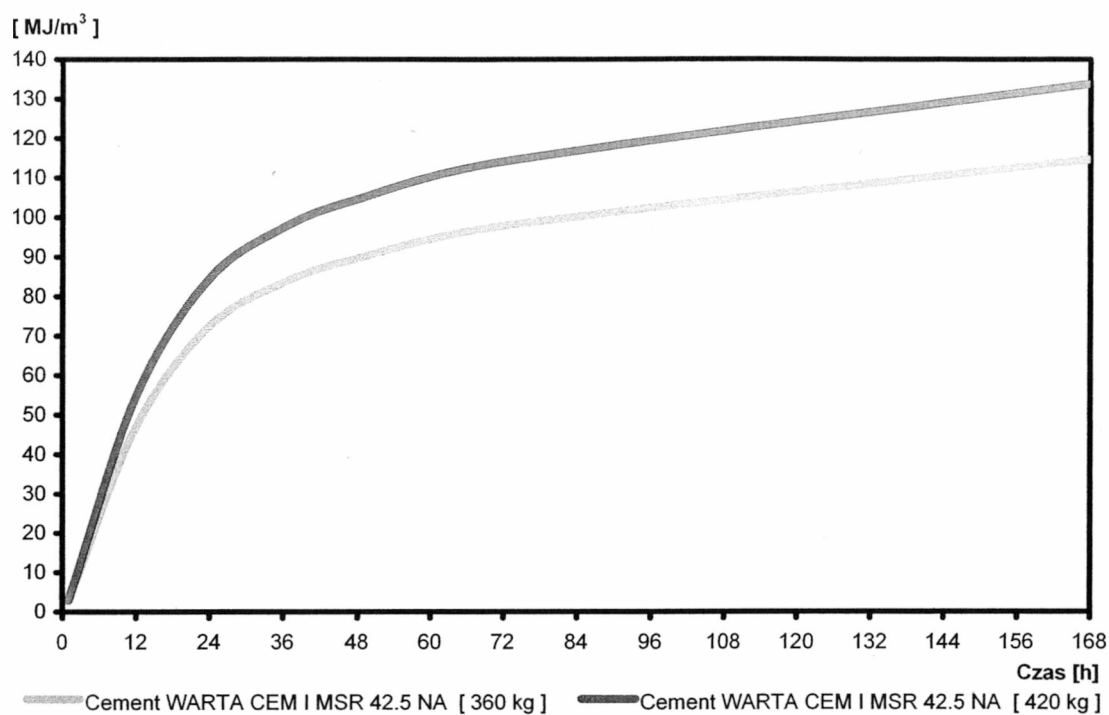
W celu przetworzenia dużych zbiorów obliczeniowych generowanych przez program Cosmosm, napisano program wspomagający, którego zadaniem było wybieranie wartości obliczonych temperatur w wybranych węzłach, po każdym kroku czasowym. Procedurę taką napisano w programie MATLAB 6.0 [187].



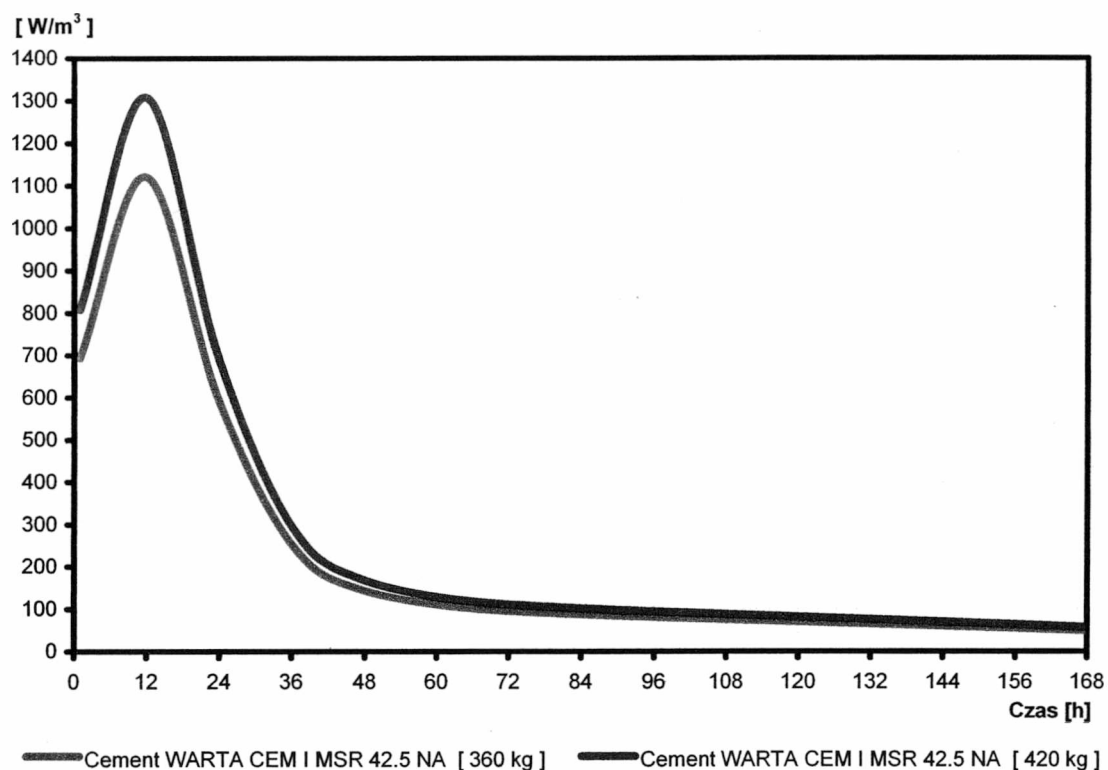
Rys. 5.3. Ilość ciepła hydratacji dla 1g cementu w funkcji czasu dla pełnego pomiaru (168 h)



Rys. 5.4. Kinetyka wydzielania ciepła badanej próbki cementu, w funkcji czasu dla pełnego pomiaru (168 h)



Rys. 5.5. Ilość ciepła hydratacji dla 360 kg i 420 kg cementu w betonie, w funkcji czasu dla pełnego pomiaru (168 h)



Rys. 5.6. Kinetyka wydzielania ciepła dla 360 kg i 420 kg cementu w betonie, w funkcji czasu dla pełnego pomiaru (168 h)

5.3. Wpływ gęstości objętościowej betonu

Celem analizy jest określenie wpływu, gęstości objętościowej betonu na różnicę temperatur ΔT_{wz} między środkiem i powierzchnią zewnętrzną elementu oraz wzrost lub obniżenie maksymalnej temperatury wewnętrznej elementu.

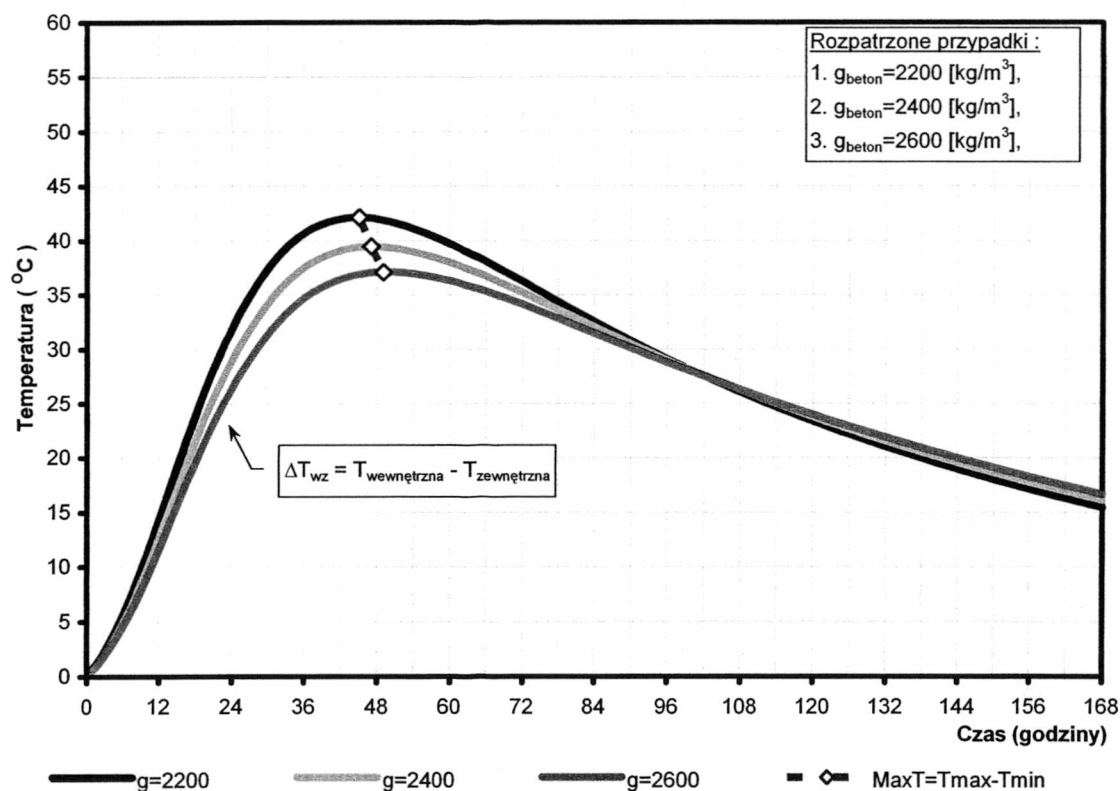
Gęstość betonu analizowano od wartości 2200 [kg/m³] w interwale, co 200 [kg/m³] do 2600 [kg/m³].

Wartości współczynników termofizycznych materiałów wykorzystanych w analizie, zestawiono w tabelicy 5.1. Stałą temperaturę powietrza, temperaturę mieszanki betonowej oraz stałą wartość powierzchniowego współczynnika przejmowania ciepła, zestawiono w tabelicy 5.2.

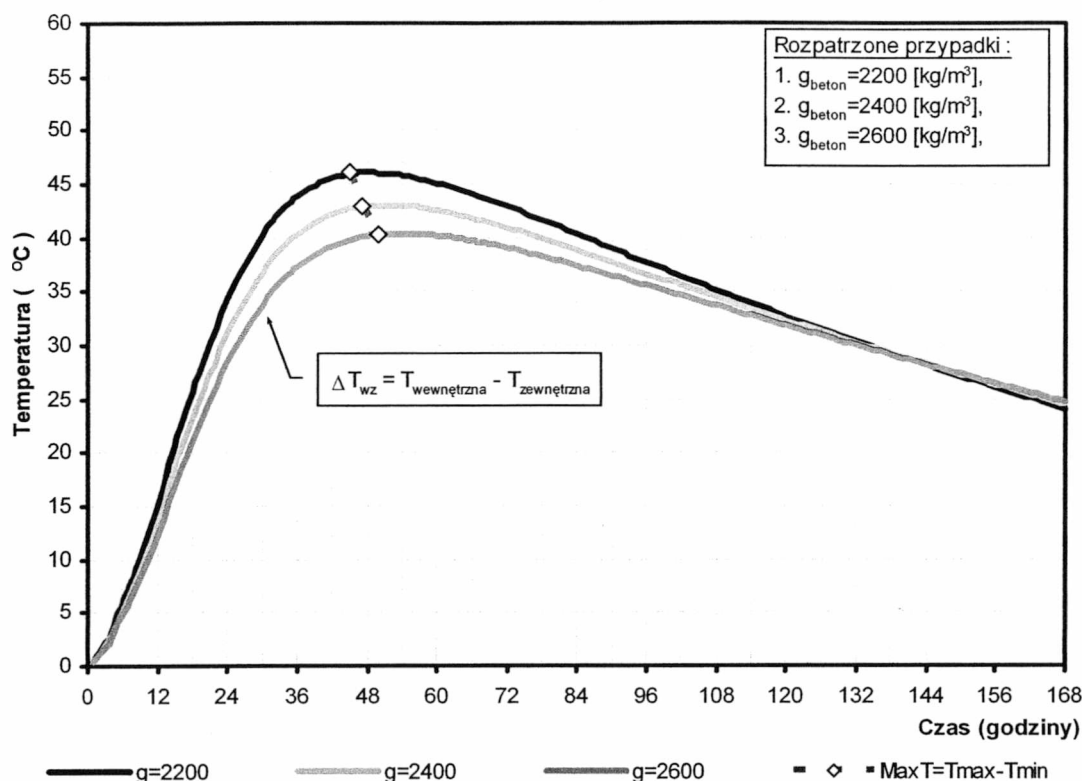
Tabela 5.2. Dane dodatkowe wykorzystane w analizie

L.p.	Nazwa	Jednostka	Filar	Łącznica
1.	Temperatura powietrza, (wartość stała)	[°C]	20	
2.	Temperatura mieszanki betonowej.		20	
3.	Wartość powierzchniowego współczynnika przejmowania ciepła α , (wartość stała).	[J/(m ² ·s·°C)]	13	

Szczegółowe wyniki analizy zestawiono w załączniku (rys. Z.1 ÷ rys. Z.12).



Rys. 5.7. Maksymalna różnica temperatur wewnętrznej i zewnętrznej w funkcji czasu dla filara (patrz rys. 5.2 a), przy różnych wartościach gęstości betonu



Rys. 5.8. Maksymalna różnica temperatur wewnętrznej i zewnętrznej w funkcji czasu dla przęsła łącznicy dojazdowej do estakady głównej (patrz rys. 5.2 c), przy różnych wartościach gęstości betonu

• Wnioski

1. Wyższa gęstość wpływa na zmniejszenie różnicy temperatury ΔT_{wz} między środkiem i powierzchnią zewnętrzną elementu oraz wydłuża czas jej wystąpienia. Związane jest to ze wzrostem akumulacji cieplnej betonu (patrz p. 2.2.4). Czas wystąpienia temperatury maksymalnej, oraz zakończonej analizy wraz z podaną temperaturą zestawiono w tab. 5.3.

Tablica 5.3. Zestawienie czasu wystąpienia maksymalnej różnicy temperatury z podaną temperaturą, oraz różnicy temperatur po zakończonej analizie

Element	Gęstość objętościowa betonu [kg/m^3]					
	2200		2400		2600	
	Czas	Temp	Czas	Temp	Czas	Temp
Filar	45 h	42 °C	47 h	39 °C	49 h	37 °C
	168h	15 °C	168h	16 °C	168h	17 °C
Łącznica	45 h	46 °C	47 h	43 °C	50 h	40 °C
	168h	24 °C	168h	24 °C	168h	25 °C

- Wyższa gęstość wpływa na zmniejszenie maksymalnej temperatury wewnętrznej i wydłuża czas jej wystąpienia.
- Wyższa gęstość o 200 kg/m^3 , powoduje spadek maksymalnej różnicy temperatur ΔT_{wz} , średnio dla filara i przęsła łącznicy o 3°C .
- Maksymalna różnica temperatur, występuje w fazie spadku temperatur, tzn. po czasie, wystąpienia maksymalnej temperatury wewnętrznej elementu.

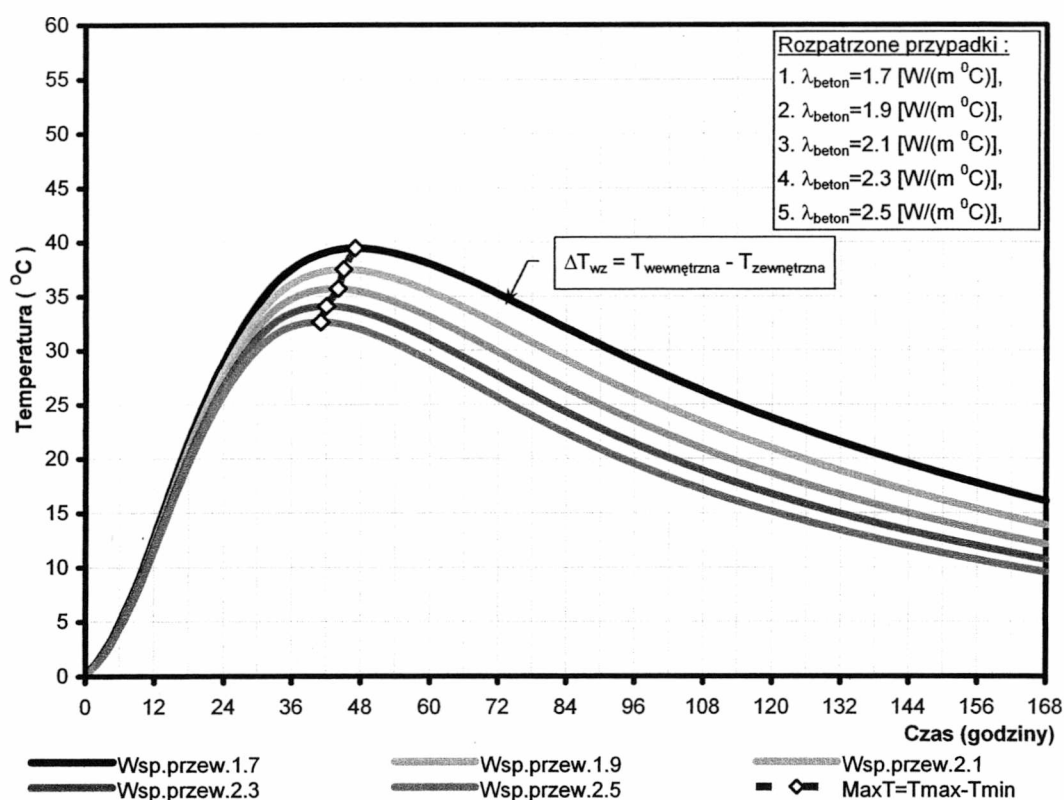
5.4. Wpływ współczynnika przewodności cieplnej betonu

Celem analizy jest określenie wpływu współczynnika przewodności cieplnej betonu na różnicę temperatur ΔT_{wz} między środkiem i powierzchnią zewnętrzną elementu oraz wzrost lub obniżenie maksymalnej temperatury wewnętrznej elementu.

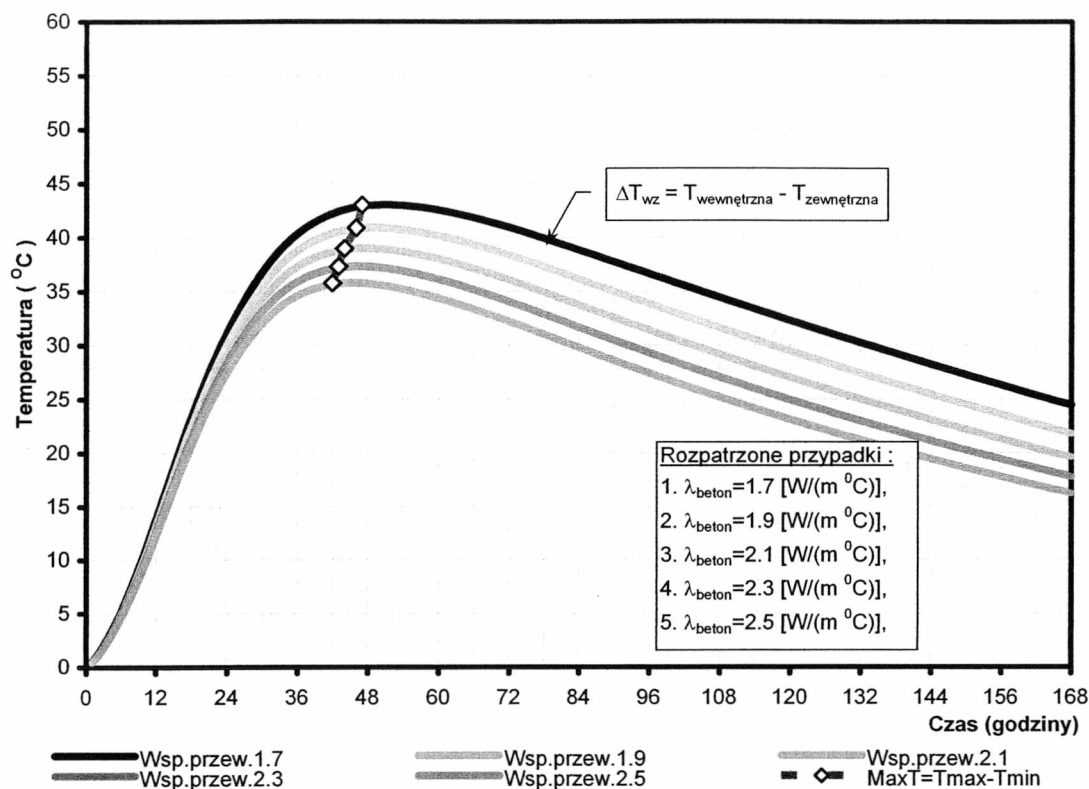
Współczynnik przewodności cieplnej betonu analizowano od wartości $1.7 \text{ [W/(m}\cdot^\circ\text{C)]}$ w interwale, co $0.2 \text{ [W/(m}\cdot^\circ\text{C)]}$ do $2.5 \text{ [W/(m}\cdot^\circ\text{C)]}$.

Wartości współczynników termofizycznych materiałów wykorzystanych w analizie zestawiono w tablicy 5.1. Stałą temperaturę powietrza, temperaturę mieszanki betonowej oraz stałą wartość powierzchniowego współczynnika przejmowania ciepła, zestawiono w tab. 5.2.

Szczegółowe wyniki analizy zestawiono w załączniku (rys. Z.13 ÷ rys. Z.32).



Rys. 5.9. Maksymalna różnica temperatur wewnętrznej i zewnętrznej w funkcji czasu dla filara (patrz rys. 5.2 a), przy różnych wartościach współczynnika przewodności cieplnej betonu



Rys. 5.10. Maksymalna różnica temperatur wewnętrznej i zewnętrznej w funkcji czasu dla przęsła łącznicy dojazdowej do estakady głównej (patrz rys. 5.2 c), przy różnych wartościach współczynnika przewodności cieplnej betonu

• Wnioski

1. Wzrost współczynnika powoduje spadek maksymalnej różnicy temperatur ΔT_{wz} między środkiem i powierzchnią zewnętrzną elementu oraz skraca czas jej wystąpienia. Związane jest to z szybszym odprowadzeniem ciepła z elementu. Czas wystąpienia temperatury maksymalnej oraz zakończonej analizy wraz z podaną temperaturą zestawiono w tab. 5.4.

Tablica 5.4. Zestawienie czasu wystąpienia maksymalnej różnicy temperatury z podaną temperaturą, oraz różnicy temperatur po zakończonej analizie

Element	Współczynnik przewodności cieplnej betonu [W/(m·°C)]									
	1.7		1.9		2.1		2.3		2.5	
	Czas	Temp	Czas	Temp	Czas	Temp	Czas	Temp	Czas	Temp
Filar	47 h	39 °C	45 h	37 °C	44 h	36 °C	42 h	34 °C	41 h	33 °C
	168h	16 °C	168h	14 °C	168h	12 °C	168h	11 °C	168h	10 °C
Łącznica	47 h	43 °C	46 h	41 °C	44 h	39 °C	43 h	37 °C	42 h	36 °C
	168h	24 °C	168h	22 °C	168h	20 °C	168h	18 °C	168h	16 °C

2. Wzrost współczynnika powoduje spadek maksymalnej temperatury wewnętrznej i skraca czas jej wystąpienia.
3. Wzrost współczynnika o $0.2 \text{ [W/(m}^0\text{C)]}$, powoduje spadek maksymalnej różnicy temperatur ΔT_{wz} dla obydwu elementów o średnio 2^0C .
4. Maksymalna różnica temperatur występuje w fazie spadku temperatur, tzn. po czasie, wystąpienia maksymalnej temperatury wewnętrznej elementu.

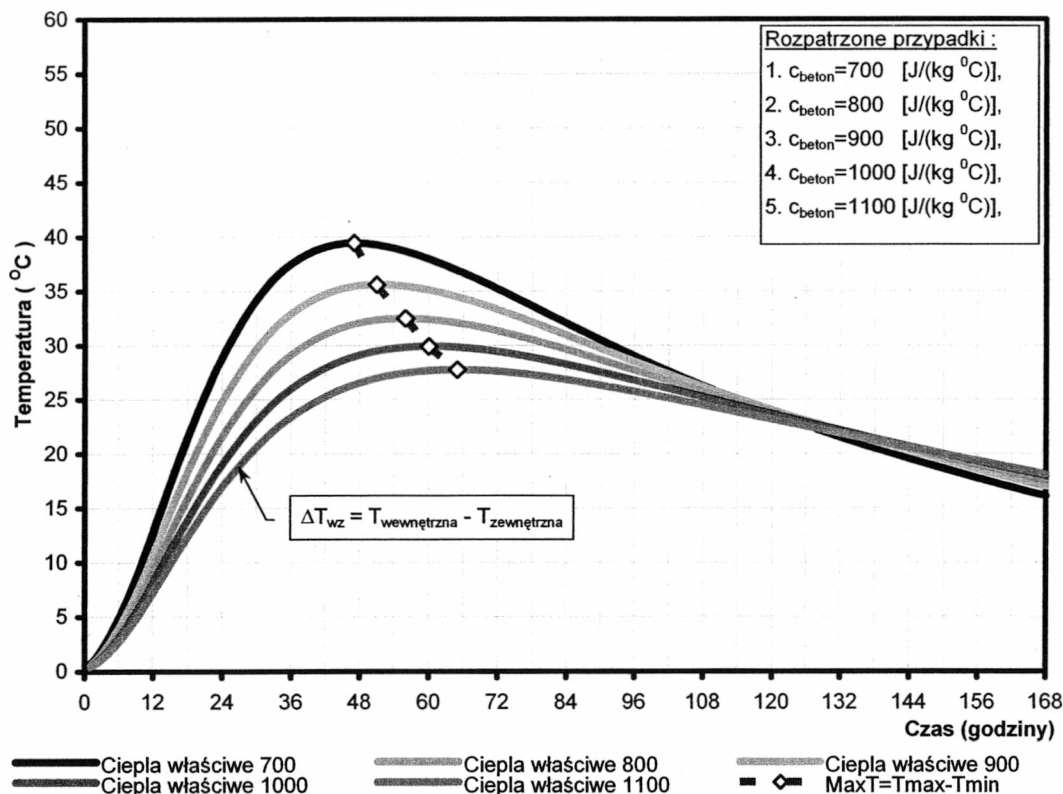
5.5. Wpływ ciepła właściwego betonu

Celem analizy jest określenie wpływu wartości ciepła właściwego betonu na różnicę temperatur ΔT_{wz} między środkiem i powierzchnią zewnętrzną elementu oraz wzrost lub obniżenie maksymalnej temperatury wewnętrznej elementu.

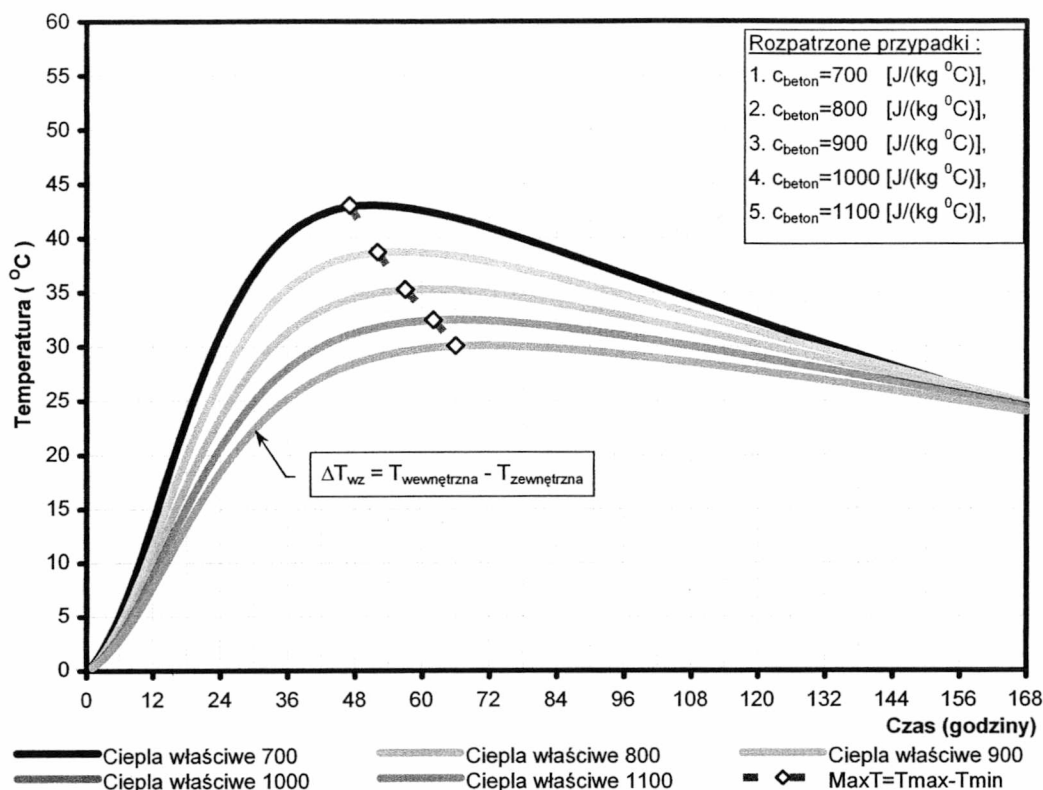
Ciepło właściwe betonu analizowano od wartości $700 \text{ [J/(kg}^0\text{C)]}$ w interwale, co $100 \text{ [J/(kg}^0\text{C)]}$ do $1100 \text{ [J/(kg}^0\text{C)]}$.

Wartości współczynników termofizycznych materiałów wykorzystanych w analizie zestawiono w tabelicy 5.1. Stałą temperaturę powietrza, temperaturę mieszanki betonowej, oraz stałą wartość powierzchniowego współczynnika przejmowania ciepła, zestawiono w tab. 5.2.

Szczegółowe wyniki analizy zestawiono w załączniku (rys. Z.33 ÷ rys. Z.52).



Rys. 5.11. Maksymalna różnica temperatur wewnętrznej i zewnętrznej w funkcji czasu dla filara (patrz rys. 5.2 a), przy różnych wartościach ciepła właściwego betonu



Rys. 5.12. Maksymalna różnica temperatur wewnętrznej i zewnętrznej w funkcji czasu dla przęsła łącznicy dojazdowej do estakady głównej (patrz rys. 5.2 c), przy różnych wartościach ciepła właściwego betonu

• Wnioski

1. Wzrost ciepła właściwego powoduje spadek maksymalnej różnicy temperatur ΔT_{wz} między środkiem i powierzchnią zewnętrzną elementu oraz wydłuża czas jej wystąpienia. Związane jest to ze wzrostem akumulacji ciepłej betonu (patrz p. 2.2.4). Czas wystąpienia temperatury maksymalnej, oraz zakończonej analizy wraz z podaną temperaturą zestawiono w tab. 5.5.

Tablica 5.5. Zestawienie czasu wystąpienia maksymalnej różnicy temperatury z podaną temperaturą, oraz różnicy temperatury po zakończonej analizie

Element	Ciepło właściwe betonu [J/(kg·°C)]									
	700		800		900		1000		1100	
	Czas	Temp	Czas	Temp	Czas	Temp	Czas	Temp	Czas	Temp
Filar	47 h	39 °C	51 h	36 °C	56 h	32 °C	60 h	30 °C	65 h	28 °C
	168h	16 °C	168h	17 °C	168h	18 °C	168h	18 °C	168h	18 °C
Łącznica	47 h	43 °C	52 h	39 °C	57 h	35 °C	62 h	32 °C	66 h	30 °C
	168h	24 °C	168h	25 °C	168h	25 °C	168h	24 °C	168h	24 °C

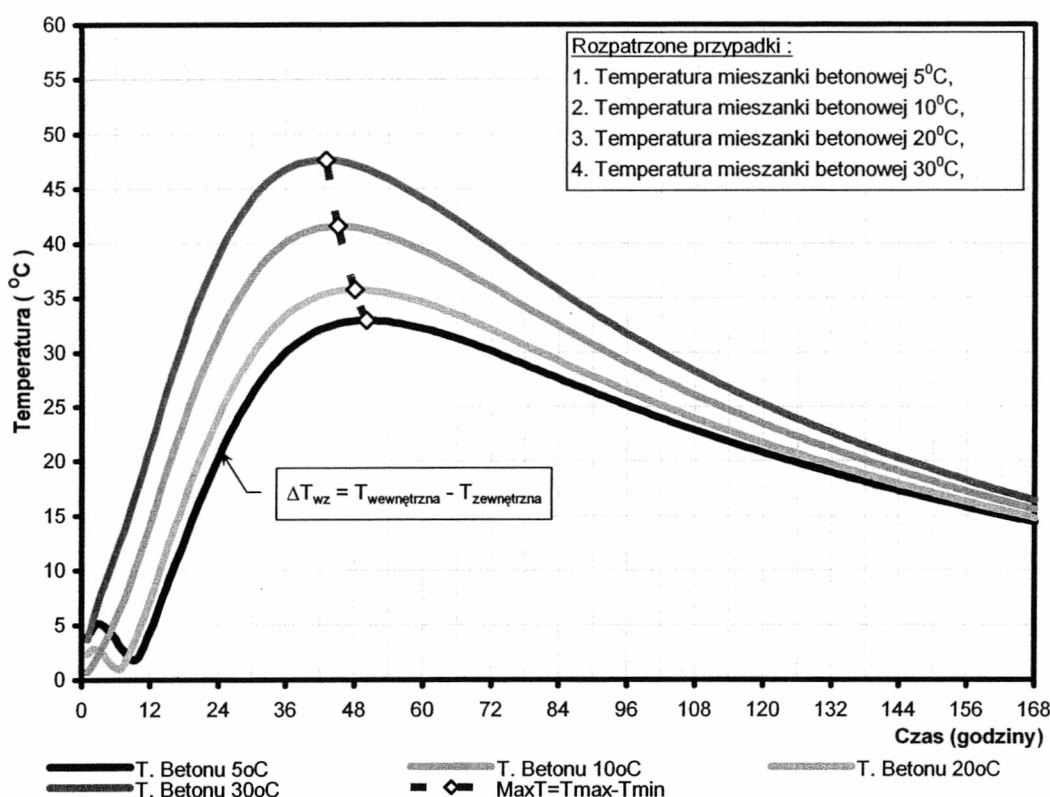
2. Wzrost ciepła właściwego powoduje obniżenie temperatury wewnętrznej i wydłuża czas jej wystąpienia.
3. Wzrost ciepła właściwego o $100 \text{ [J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)]}$, powoduje spadek maksymalnej różnicy temperatur ΔT_{wz} dla rozpatrywanych elementów o średnio $3 ^\circ\text{C}$.
4. Maksymalna różnica temperatur występuje w fazie spadku temperatur, tzn. po czasie, wystąpienia maksymalnej temperatury wewnętrznej elementu.

5.6. Wpływ temperatury mieszanki betonowej

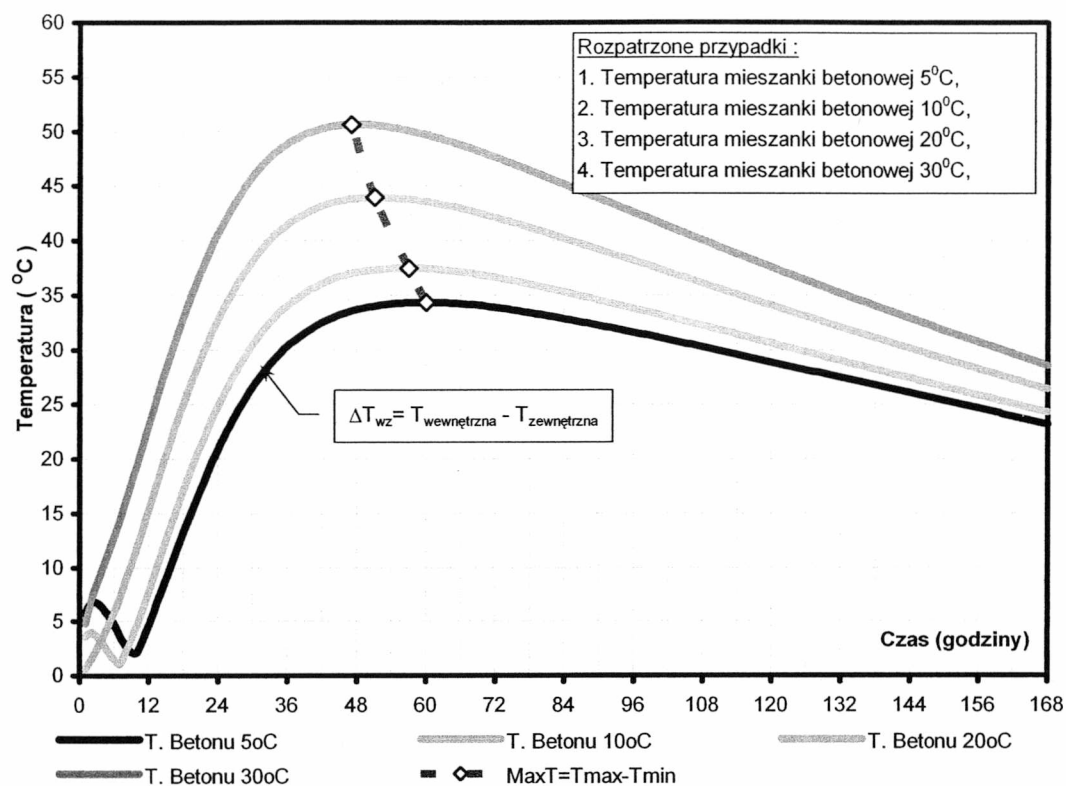
Celem analizy jest określenie wpływu temperatury wbudowywanej mieszanki betonowej na różnicę temperatur ΔT_{wz} między środkiem i powierzchnią zewnętrzną elementu oraz wzrost lub obniżenie maksymalnej temperatury wewnętrznej elementu. Temperaturę mieszanki betonowej analizowano od temperatury 5°C w interwale, co $5 ^\circ\text{C}$ do temperatury $30 ^\circ\text{C}$.

Wartości współczynników termofizycznych materiałów wykorzystanych w analizie zestawiono w tablicy 5.1. Stałą temperaturę powietrza i stałą wartość powierzchniowego współczynnika przejmowania ciepła, zestawiono w tab. 5.2.

Szczegółowe wyniki analizy zestawiono w załączniku (rys. Z.53 ÷ rys. Z.68).



Rys. 5.13. Maksymalna różnica temperatur wewnętrznej i zewnętrznej w funkcji czasu dla filara (patrz rys. 5.2 a), przy różnej temperaturze mieszanki betonowej



Rys. 5.14. Maksymalna różnica temperatur wewnętrznej i zewnętrznej w funkcji czasu dla przęsła łącznicy dojazdowej do estakady głównej (patrz rys. 5.2 c), przy różnej temperaturze mieszanki betonowej

• Wnioski

1. Obniżenie temperatury mieszanki powoduje spadek maksymalnej różnicy temperatur ΔT_{wz} między środkiem i powierzchnią zewnętrzną elementu oraz wydłuża czas jej wystąpienia. Czas wystąpienia temperatury maksymalnej oraz zakończonej analizy wraz z podaną temperaturą, zestawiono w tab. 5.6.

Tablica 5.6. Zestawienie czasu wystąpienia maksymalnej różnicy temperatury z podaną temperaturą, oraz różnicy temperatury po zakończonej analizie

Element	Początkowa temperatura mieszanki betonowej [°C]							
	5		10		20		30	
	Czas	Temp.	Czas	Temp.	Czas	Temp.	Czas	Temp.
Filar	50 h	33 °C	48 h	36 °C	45 h	42 °C	43 h	48 °C
	168 h	14 °C	168 h	15 °C	168 h	16 °C	168 h	16 °C
Łącznica	60 h	34 °C	57 h	37 °C	51 h	44 °C	47 h	51 °C
	168 h	23 °C	168 h	24 °C	168 h	26 °C	168 h	29 °C

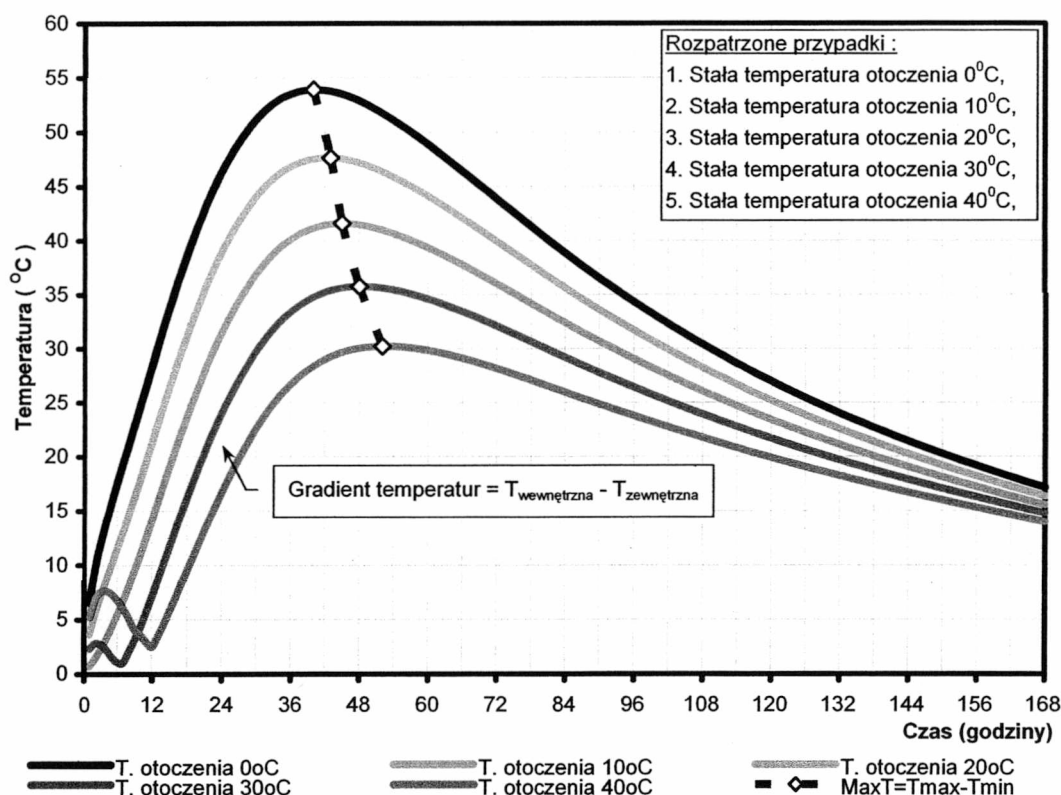
2. Obniżenie temperatury mieszanki powoduje obniżenie maksymalnej temperatury wewnętrznej oraz wydłuża czas jej wystąpienia.
3. Obniżenie temperatury mieszanki o 5°C , powoduje spadek maksymalnej różnicy temperatur ΔT_{wz} odpowiednio dla filara 3°C oraz łącznica 3.5°C .
4. Maksymalna różnica temperatur występuje w fazie spadku temperatur, tzn. po czasie, wystąpienia maksymalnej temperatury wewnętrznej elementu.

5.7. Wpływ temperatury powietrza

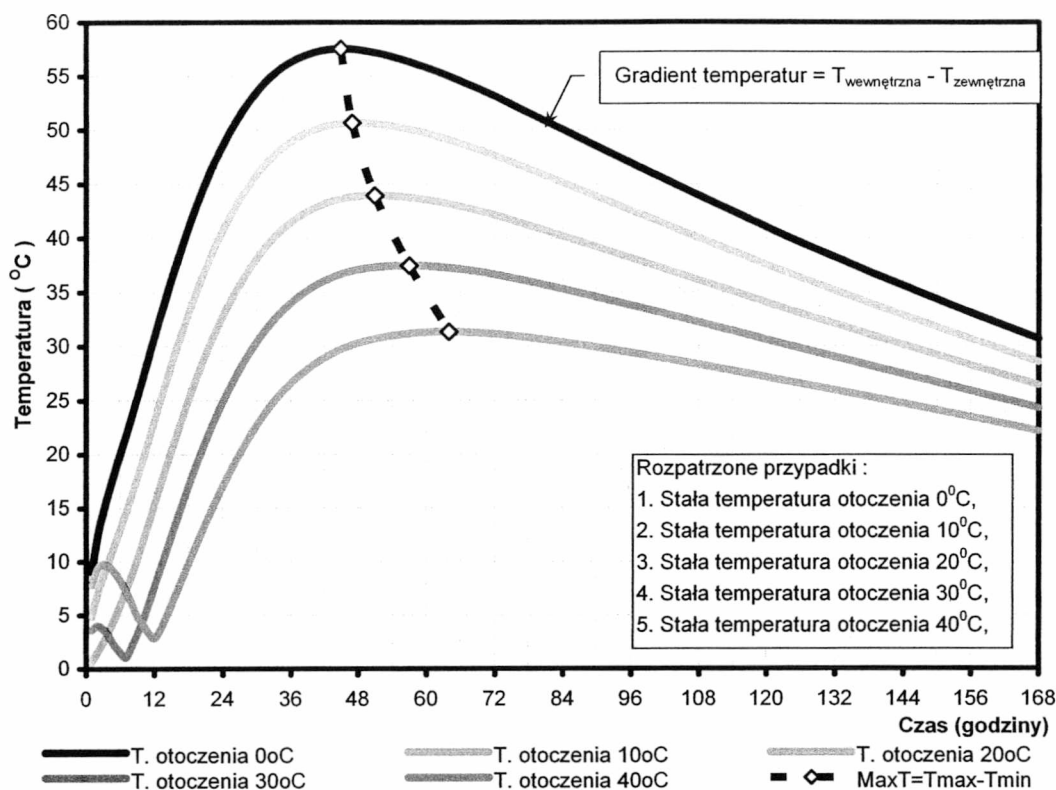
Celem analizy jest określenie wpływu temperatury powietrza na różnicę temperatur ΔT_{wz} między środkiem i powierzchnią zewnętrzną elementu oraz wzrost lub obniżenie maksymalnej temperatury wewnętrznej elementu.

Stałą temperaturę powietrza analizowano od temperatury 0°C w interwale, co 5°C do temperatury 40°C . Wartości współczynników termofizycznych materiałów wykorzystanych w analizie zestawiono w tablicy 5.1. Temperaturę mieszanki betonowej oraz stałą wartość powierzchniowego współczynnika przejmowania ciepła, zestawiono w tab. 5.2.

Szczegółowe wyniki analizy zestawiono w załączniku (rys. Z.69 ÷ rys. Z.88).



Rys. 5.15. Maksymalna różnica temperatur wewnętrznej i zewnętrznej w funkcji czasu dla filara (patrz rys. 5.2 a), przy różnej temperaturze powietrza



Rys. 5.16. Maksymalna różnica temperatur wewnętrznej i zewnętrznej w funkcji czasu dla przęsła łącznicy dojazdowej do estakady głównej (patrz rys. 5.2 c), przy różnej temperaturze powietrza

• Wnioski

1. Wzrost temperatury powietrza powoduje spadek maksymalnej różnicy temperatur ΔT_{wz} między środkiem i powierzchnią zewnętrzną elementu oraz wydłuża czas jej wystąpienia. Czas wystąpienia temperatury maksymalnej oraz zakończonej analizy wraz z podaną temperaturą zestawiono w tab. 5.7.

Tablica 5.7. Zestawienie czasu wystąpienia maksymalnej różnicy temperatury z podaną temperaturą, oraz różnicy temperatury po zakończonej analizie

Element	Stała temperatura otoczenia [$^{\circ}\text{C}$]									
	0		10		20		30		40	
	Czas	Temp	Czas	Temp	Czas	Temp	Czas	Temp	Czas	Temp
Filar	40 h	54 $^{\circ}\text{C}$	43 h	48 $^{\circ}\text{C}$	45 h	42 $^{\circ}\text{C}$	48 h	36 $^{\circ}\text{C}$	52 h	30 $^{\circ}\text{C}$
	168h	17 $^{\circ}\text{C}$	168h	16 $^{\circ}\text{C}$	168h	16 $^{\circ}\text{C}$	168h	15 $^{\circ}\text{C}$	168h	14 $^{\circ}\text{C}$
Łącznica	45 h	58 $^{\circ}\text{C}$	47 h	51 $^{\circ}\text{C}$	51 h	44 $^{\circ}\text{C}$	57 h	37 $^{\circ}\text{C}$	64 h	31 $^{\circ}\text{C}$
	168h	31 $^{\circ}\text{C}$	168h	29 $^{\circ}\text{C}$	168h	26 $^{\circ}\text{C}$	168h	24 $^{\circ}\text{C}$	168h	22 $^{\circ}\text{C}$

2. Wzrost temperatura powietrza powoduje wzrost maksymalnej temperatury wewnętrznej i wydłuża czas jej wystąpienia.

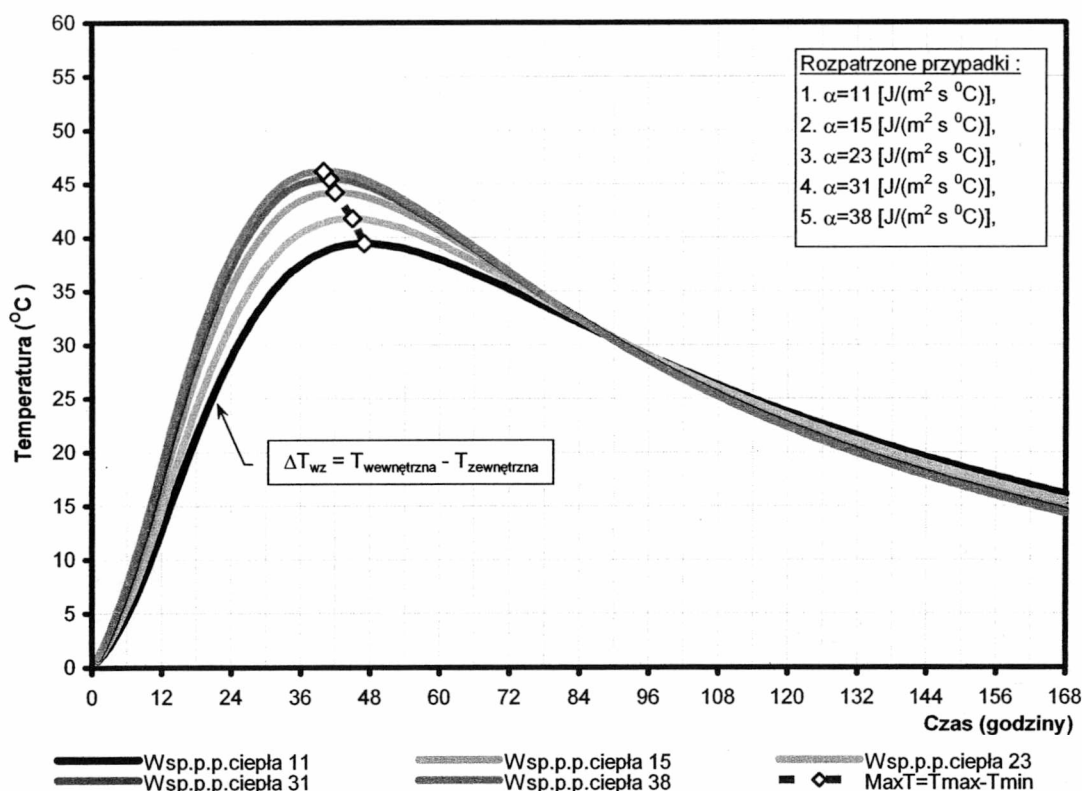
3. Wzrost stałej temperatury powietrza o 10°C , powoduje spadek maksymalnej różnicy temperatur ΔT_{wz} dla rozpatrywanych elementów o 6°C .
4. Maksymalna różnica temperatur występuje w fazie spadku temperatur, tzn. po czasie, wystąpienia maksymalnej temperatury wewnętrznej elementu.

5.8. Wpływ powierzchniowego współczynnika przejmowania ciepła

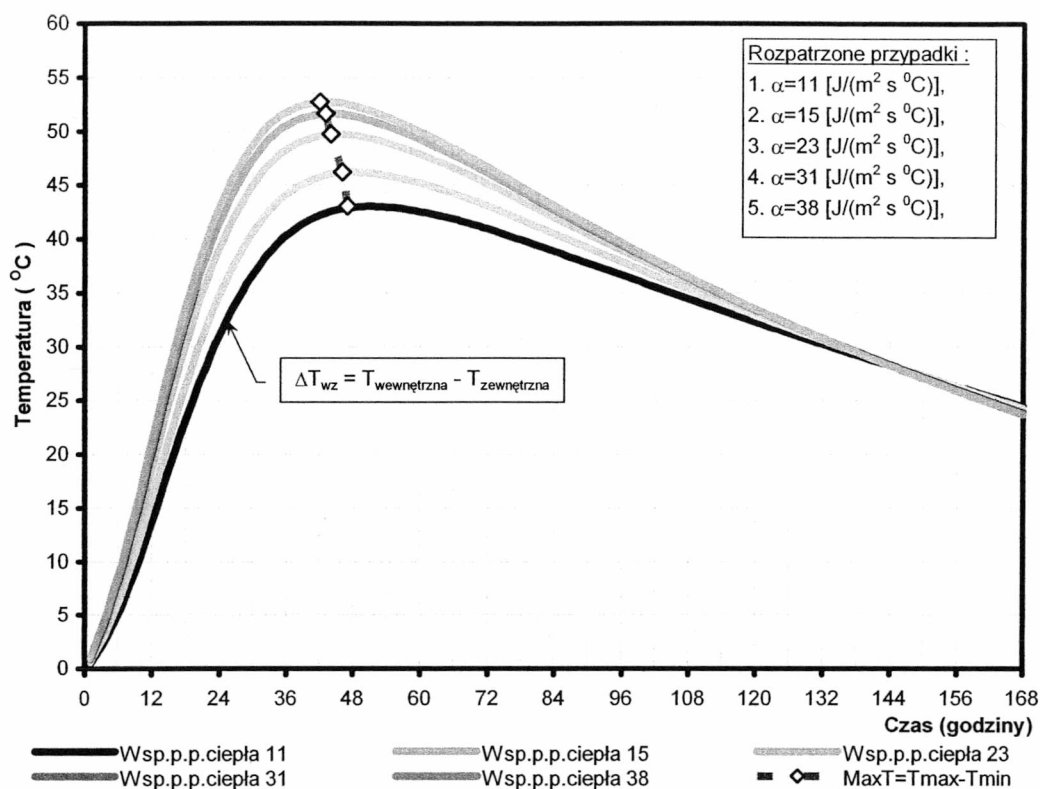
Celem analizy jest określenie wpływu wartości powierzchniowego współczynnika przejmowania ciepła na różnicę temperatur ΔT_{wz} między środkiem i powierzchnią zewnętrzną elementu oraz wzrost lub obniżenie maksymalnej temperatury wewnętrznej elementu. Rozpatrzono następujące przypadki;

- $\alpha = 11 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C})$ - dla prędkości wiatru wynoszącej 1 m/s,
- $\alpha = 15 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C})$ - dla prędkości wiatru wynoszącej 2 m/s,
- $\alpha = 23 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C})$ - dla prędkości wiatru wynoszącej 4 m/s,
- $\alpha = 31 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C})$ - dla prędkości wiatru wynoszącej 6 m/s,
- $\alpha = 38 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C})$ - dla prędkości wiatru wynoszącej 8 m/s.

Wartości współczynników termofizycznych materiałów wykorzystanych w analizie zestawiono w tablicy 5.1. Stałą temperaturę powietrza i temperaturę mieszanki betonowej, zestawiono w tab. 5.2. Szczegółowe wyniki analizy zestawiono w załączniku (rys. Z.89 ÷ rys. Z.108).



Rys. 5.17 Maksymalna różnica temperatur wewnętrznej i zewnętrznej w funkcji czasu dla filara (patrz rys. 5.2 a), przy różnej wartości powierzchniowego współczynnika przejmowania ciepła



Rys. 5.18. Maksymalna różnica temperatur wewnętrznej i zewnętrznej w funkcji czasu dla przęsła łącznicy dojazdowej do estakady głównej (patrz rys. 5.2 c), przy różnej wartości powierzchniowego współczynnika przejmowania ciepła

• Wnioski

1. Wzrost współczynnika (wyższa prędkości wiatru) zwiększa maksymalną różnicę temperatur ΔT_{wz} między środkiem i powierzchnią zewnętrzną elementu oraz skraca czas jej wystąpienia. Związane jest to z intensywniejszym chłodzeniem zewnętrznych powierzchni elementu. Czas wystąpienia temperatury maksymalnej oraz zakończonej analizy wraz z podaną temperaturą, zestawiono w tab. 5.8.

Tablica 5.8. Zestawienie czasu wystąpienia maksymalnej różnicy temperatury z podaną temperaturą, oraz różnicy temperatury po zakończonej analizie

Element	Powierzchniowy współczynnik przejmowania ciepła [J/(m ² ·s·°C)]									
	11		15		23		31		38	
	Czas	Temp	Czas	Temp	Czas	Temp	Czas	Temp	Czas	Temp
Filar	47 h	39 °C	45 h	42 °C	42 h	44 °C	41 h	45 °C	40 h	46 °C
	168h	16 °C	168h	16 °C	168h	15 °C	168h	14 °C	168h	14 °C
Łącznica	47 h	43 °C	46 h	46 °C	44 h	50 °C	43 h	52 °C	42 h	53 °C
	168h	24 °C	168h	24 °C	168h	24 °C	168h	24 °C	168h	24 °C

2. Wzrost współczynnika powoduje nieznaczne obniżenie maksymalnej temperatury wewnętrznej i skraca czas jej wystąpienia.

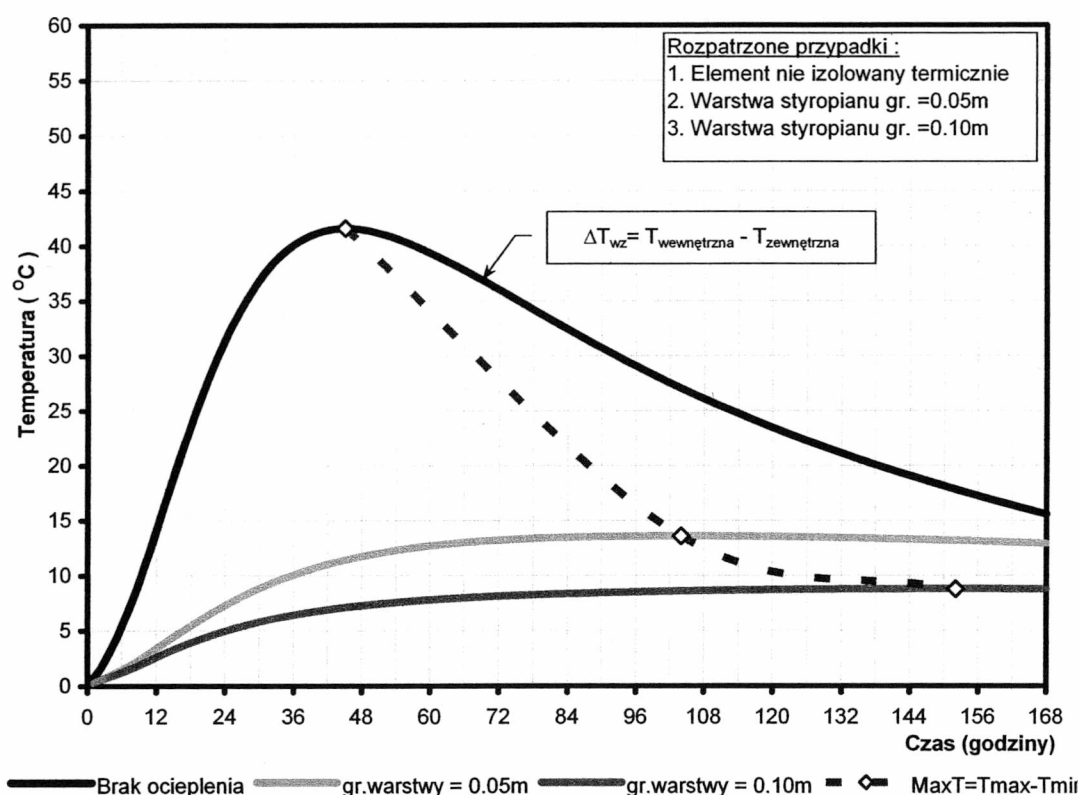
3. Wzrost współczynnika powoduje wzrost maksymalnej różnicy temperatur ΔT_{wz} dla rozpatrywanych elementów.
4. Maksymalna różnica temperatur występuje w fazie spadku temperatur, tzn. po czasie, wystąpienia maksymalnej temperatury wewnętrznej elementu.

5.9. Wpływ ocieplenia zewnętrznego elementu

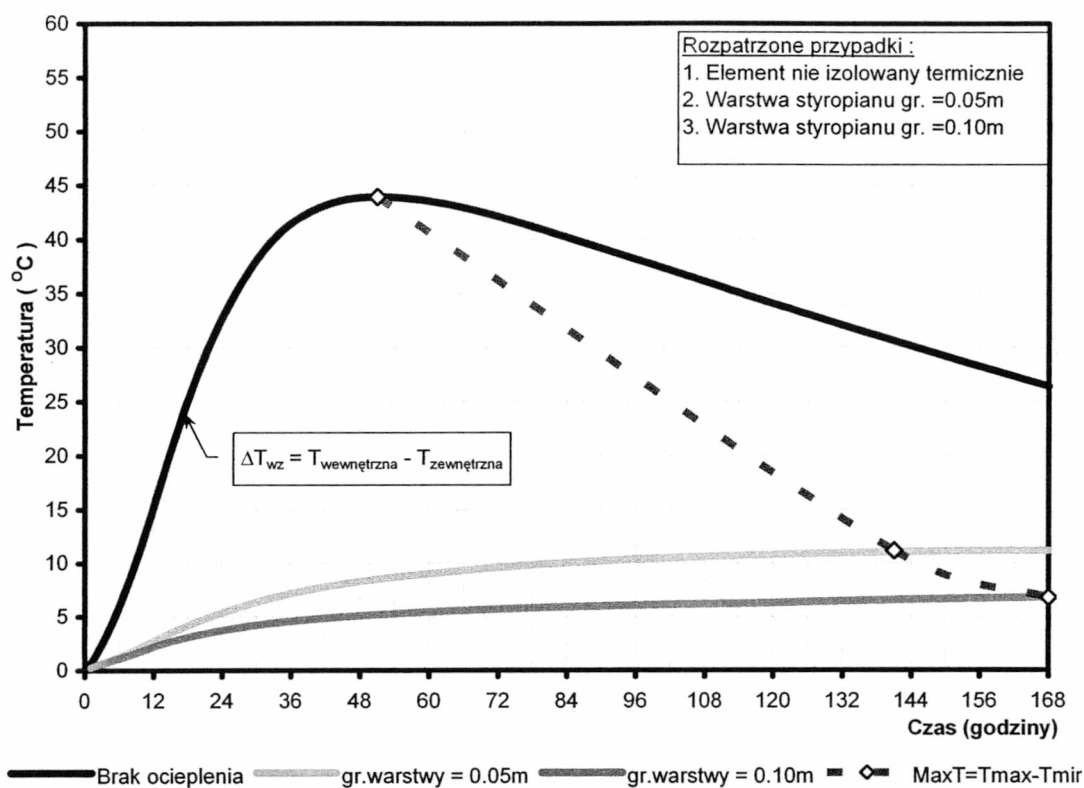
Celem analizy jest określenie wpływu grubości warstwy styropianu na różnicę temperatur ΔT_{wz} między środkiem i powierzchnią zewnętrzną elementu oraz wzrost lub obniżenie maksymalnej temperatury wewnętrznej elementu. Rozpatrzono następujące przypadki;

- element nie izolowany termicznie,
- ocieplenie zewnętrzne elementu warstwą styropianu o gr. 0,05 m,
- ocieplenie zewnętrzne elementu warstwą styropianu o gr. 0,10 m.

Wartości współczynników termofizycznych materiałów wykorzystanych w analizie zestawiono w tablicy 5.1. Stałą temperaturę powietrza, temperaturę mieszanki betonowej, oraz stałą wartość powierzchniowego współczynnika przejmowania ciepła, zestawiono w tab. 5.2. Szczegółowe wyniki analizy zestawiono w załączniku (rys. Z.109 ÷ rys. Z.120).



Rys. 5.19. Różnica maksymalnej temperatury wewnętrznej i zewnętrznej w funkcji czasu dla filara (patrz rys. 5.2a, b), przy różnej grubości warstwy styropianu



Rys. 5.20. Maksymalna różnica temperatur wewnętrznej i zewnętrznej w funkcji czasu dla przęsła łącznicy dojazdowej do estakady głównej (patrz rys. 5.2c, d), przy różnej grubości warstwy styropianu

• Wnioski

1. Izolacja powoduje znaczny spadek maksymalnej różnicy temperatur ΔT_{wz} między środkiem i powierzchnią zewnętrzną elementu oraz wydłuża czas jej wystąpienia, utrzymujący się przez dłuższy czas (termos). Czas wystąpienia temperatury maksymalnej, oraz zakończonej analizy wraz z podaną temperaturą zestawiono w tab. 5.9.

Tablica 5.9. Zestawienie czasu wystąpienia maksymalnej różnicy temperatury z podaną temperaturą, oraz różnicy temperatury po zakończonej analizie

Element	Grubość zastosowanej izolacji termicznej (styropian) [cm]					
	element nie izolowany termicznie		5		10	
	Czas	Temp	Czas	Temp	Czas	Temp
Filar	45 h	42 °C	104 h	14 °C	152 h	8.8 °C
	168 h	16 °C	168 h	13 °C	168 h	8.7 °C
Łącznica	51 h	44 °C	141 h	13 °C	168 h	7 °C
	168 h	26 °C	168 h	11 °C		

2. Ograniczony odpływ ciepła z elementu spowodowany zewnętrzną izolacją termiczną, powoduje podniesienie maksymalnej temperatury wewnętrznej utrzymującej się przez dłuższy czas.
3. Zastosowanie izolacji termicznej w postaci warstwy styropianu grubości 0.05 m powoduje spadek maksymalnej różnicy temperatur ΔT_{wz} odpowiednio dla filara 28 °C oraz dla łącznicy 33 °C. Dodatkowe zwiększenie grubości warstwy styropian do 0.10 m dodatkowo zmniejsza różnicę temperatur ΔT_{wz} o: filar 5 °C oraz łącznica 4 °C.
4. Maksymalna różnica temperatur występuje w fazie spadku temperatur, tzn. po czasie, wystąpienia maksymalnej temperatury wewnętrznej elementu.
5. Zwiększenie grubości warstwy styropianu wywołuje progresywne przesunięcie czasowe wystąpienia maksymalnej różnicy temperatur.

5.10. Podsumowanie

Wykonana analiza parametryczna pozwoliła na oszacowanie wpływu poszczególnych czynników decydujących o temperaturze dojrzewającego betonu, ukazując zróżnicowany ich wpływ na rozpatrywane procesy.

Rozpatrując właściwości termofizyczne betonu, z góry można założyć że znana jest gęstość objętościowa betonu (np. masa całkowita wszystkich składników mieszanki betonowej), niewiadomymi są zaś współczynnik przewodzenia ciepła oraz ciepło właściwe. Należy wspomnieć (patrz p. 2.2.4, p. 4), że wartości nieznanymi współczynników zależą od rodzaju materiału jego gęstości, temperatury i wilgotności. Pomijając wpływ temperatury i wilgotności na wartość niewiadomych współczynników można założyć, że muszą one ściśle zależeć od gęstości objętościowej oraz klasy betonu.

W tablicy 5.10 przedstawiono najczęściej przyjmowane w obliczeniach pól temperaturowych np. [46, 56, 86, 94, 95, 175] wartości współczynników termofizycznych dla betonu konstrukcyjnych ($\rho = 2400 \div 2600$ [kg/m³], $\lambda = 1.7 \div 1.9$ [W/(m·°C)], $c = 700 \div 1000$ [J/(kg·°C)]), wraz z wykonaną dla nich szacunkową oceną wrażliwości na wartości temperatur w analizowanych elementach.

Tablica 5.10. Wpływ wartości współczynników termofizycznych betonów konstrukcyjnych o masie $2400 \div 2600$ kg/m³ na otrzymane rezultaty

Rozpatrywany czynnik	Wartość parametru	Maksymalna temp. wewnętrzna		Różnica temp. wew. i temp. zew.	
		Błąd bezwzględny	Błąd procentowy	Błąd bezwzględny	Błąd procentowy
Gęstość objętościowa betonu (ρ) [kg/m ³]	2400 ÷ 2600	2 °C	2 %	1 °C	3 %
Współczynnik przewodności cieplnej betonu (λ), [W/(m·°C)]	1.7 ÷ 1.9	1 °C	1 %	1 °C	3 %
Ciepło właściwe betonu (c), [J/(kg·°C)]	700 ÷ 1000	8 °C	12 %	6 °C	17 %
		$\Sigma=11^{\circ}\text{C}$ (9 °C)	$\Sigma=15^{\circ}\text{C}$ (13 °C)	$\Sigma=8^{\circ}\text{C}$ (7 °C)	$\Sigma=23^{\circ}\text{C}$ (20 °C)

Analizując otrzymane rezultaty pod kątem wrażliwości końcowych rezultatów (w analizowanym przypadku maksymalna temperatura wewnętrzna oraz maksymalna różnica temperatur między środkiem i powierzchnią zewnętrzną elementu, tablica 5.10) należy

stwierdzić, że wpływ zmienności współczynników termofizycznych betonu na otrzymane rezultaty odnośnie maksymalnej temperatury wewnętrznej jest rzędu 15 %, natomiast odnośnie maksymalnej różnicy temperatur jest rzędu 23 %. Zakładając, że znana jest gęstości objętościowa betonu (np. masa całkowita wszystkich składników mieszanki betonowej), wpływ zmienności zmniejsza się do 13 % i 20 % (patrz tablica 5.10). Oznacza to, że przyjęcie z literatury współczynników termofizycznych może skutkować błędem w obliczanej maksymalnej temperaturze wewnętrznej rzędu do 15 % (13 %) i maksymalnej różnicy temperatur do 23 % (20 %).

Z uwagi na to, że te parametry nie są niezależne, i muszą wykazywać dużą korelację to jest dla określonej klasy betonu i jej gęstości nie mogą one się zbytnio różnić. Można więc przyjąć, że do analiz technicznych dopuszczalne jest określenie ich wartości na podstawie literatury np.[46, 56, 86, 94, 95, 175].

Dla poszczególnych parametrów, wartością porównawczą w obliczanych błędach była średnia wartość z maksymalnych temperatur oraz średnia wartość z maksymalnych różnic temperatur.

Podsumowując można stwierdzić, że decydujący wpływ na temperatury dojrzewającego betonu mają czynniki takie jak;

- współczynniki termofizyczne betonu,
- temperatura układanego betonu,
- temperatura powietrza,
- rodzaj i grubość zastosowanej izolacji termicznej.

Mniejszy wpływ ma współczynnik przejmowania ciepła α .

Podkreślić tu trzeba, że ze względu na przyjęte w obliczeniach uproszczenie dotyczące przyjętej kinetyki ciepła hydratacji, w analizie nie rozpatrywano ważnych czynników takich jak;

- rodzaj i klasa cementu,
- wpływ dodatków i domieszek,
- ilość spoiwa cementowego (cement, dodatki i domieszki) w 1 m³ mieszanki betonowej.

6. UWAGI KOŃCOWE

6.1. Uwagi ogólne

1. Zaproponowana metoda pomiaru temperatury w masywnych konstrukcjach betonowych pozwala na rejestrację rzeczywistych rozkładów temperatur wewnątrz elementu.
2. Wykonane badania na rzeczywistych elementach betonowych, oraz wyciągnięte z nich wnioski, pozwalają na ocenę wpływu czynników decydujących o rozkładzie temperatury wewnętrznej w dojrzewającym betonie.
3. Wykonana analiza parametryczna, pozwala na przybliżoną ocenę wpływu poszczególnych czynników decydujących o rozkładzie temperatury wewnętrznej w dojrzewającym betonie.

6.2. Uwagi szczegółowe

W wyniku przeprowadzonych badań i obliczeń stwierdzono, iż;

1. W masywnych elementach betonowych wykonanych z betonów o znacznej zawartości cementu w mieszance i umiarkowanym jego cieple hydratacji, temperatura wewnętrzna dojrzewającego betonu może osiągnąć 80°C , co czyni je szczególnie narażonymi na zarysowania lub pękanie.
2. Cementy klasy 42.5 i wyższej, o umiarkowanym cieple hydratacji ($Q_{7\text{dzień}}(\text{metoda semiadiabatyczna})=318 \text{ J/g}$), wywołują wysoki wzrost temperatury wewnętrznej oraz wysokie gradienty temperatur, już w elementach średniej masywności (o module powierzchniowym zbliżonym do; $m=F/V\approx 2$), co wyklucza ich zastosowanie do masywnych elementów betonowych.
3. Niska kaloryczność cementu oraz obniżona jego ilość w 1 m^3 mieszanki betonowej, wpływa znacząco na obniżenie temperatur wewnętrznych dojrzewającego betonu.
4. Betonowanie masywów betonowych w okresie wiosny i jesieni sprzyja obniżeniu temperatury mieszanki betonowej i tym samym na obniżenie temperatur wewnętrznych dojrzewającego betonu.
5. Maksymalna różnica z pomierzonych temperatur między środkiem i powierzchnią zewnętrzną elementu wykonywanego w okresie wiosny (przęsło łącznicy dojazdowej wschodniej) jest nieco niższa (4°C) niż elementu wykonywanego w okresie lata (przęsło łącznicy dojazdowej zachodniej).
6. Szczególnie niekorzystne z uwagi na znikome właściwości izolacyjne jest stosowanie form stalowych do wykonania bloków swobodnych. Znacznie lepsze właściwości izolacyjne mają formy drewniane. Przykładowo zamiana formy stalowej gr. 0.004 m (służącej do wykonania filara średnicy $\phi=2.0\text{m}$) na deskowanie ze sklejk gr. $=0.025 \text{ m}$, skutkuje nieznacznym wzrostem temperatury wewnętrznej filara o około 3°C , natomiast znacznie

obniża się różnica temperatur między środkiem i powierzchnią zewnętrzną filara do około 9°C . Dodatkowo wystąpienie maksymalnej temperatury dojrzewającego betonu (przy zastosowanym deskowaniu ze sklejki) przesuwają się progresywnie o około 10 h. Powyższe wyliczenia wykonano zgodnie z założeniami przyjętymi w analizie parametrycznej (patrz p.5).

7. W wyniku wykonanej analizy parametrycznej dotyczącej wybranych czynników decydujących o temperaturze dojrzewającego betonu stwierdzono iż;
 - a) wyższe wartości współczynników termofizycznych betonu (współczynnik przewodzenia ciepła, ciepło właściwe oraz gęstość) wpływają znacząco na zmniejszenie temperatury dojrzewającego betonu, oraz na zmniejszenie maksymalnej różnicy temperatur między środkiem i powierzchnią zewnętrzną elementu,
 - b) obniżona temperatura mieszanki betonowej oraz niższe temperatury powietrza w trakcie dojrzewania betonu, powodują znaczny spadek temperatur dojrzewającego betonu oraz sprzyjają obniżeniu maksymalnej różnicy temperatur między środkiem i powierzchnią zewnętrzną elementu,
 - c) intensywne chłodzenie powierzchni zewnętrznych w wyniku działającego wiatru powoduje nieznaczne zmniejszenie maksymalnej temperatury wewnętrznej elementu, natomiast istotnie wzrasta maksymalna różnica temperatur między środkiem i powierzchnią zewnętrzną elementu,
 - d) ograniczenie odpływu ciepła z elementu wskutek zastosowanej izolacji termicznej powoduje wzrost temperatury wewnętrznej dojrzewającego betonu oraz wydłuża się czas jej trwania, natomiast istotnie ograniczona jest maksymalna różnica temperatur między środkiem i powierzchnią zewnętrzną elementu.

6.3. Postulowane kierunki dalszych badań

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz własnych oraz studiów literaturowych np. [24÷26, 30÷31, 41, 44÷56, 59, 62, 64, 65÷66, 80÷95, 103÷109, 123, 147÷148, 174÷176] wydaje się, że konieczne są dalsze badania w następujących obszarach:

- poszerzenie bazy danych odnośnie funkcji i parametrów materiałowych charakteryzujących procesy cieplne betonu,
- wydaje się, że do opisu teoretycznego analizowanych zjawisk przydatne mogą być podejścia:
 - a) uwzględniające losowość cech betonu i parametrów zewnętrznych,
 - b) wykorzystujące sztuczną inteligencję.

Wykorzystanie sieci neuronowych wydaje się szczególnie obiecujące z uwagi na

skomplikowany model zjawisk a jednocześnie stosunkowo już obszerną bazę danych dotyczących badań naturalnych obiektów i elementów.

6.4. Zakończenie

Po analizie wyników badań i rozważań zawartych w analizie parametrycznej stwierdza się co następuje:

- Wyniki badań na rzeczywistych konstrukcjach wykonanych z betonów potwierdziły występowanie wysokich temperatur i znacznych gradientów temperatur, (Teza 1).
- Wykazano doświadczalnie podczas realizacji rzeczywistych budowli i w analizie parametrycznej, że możliwe jest wykonanie masywnych konstrukcji z betonów klas wysokich stosując specjalny skład mieszanki betonowej, technologię jej układania oraz odpowiednie do warunków metody pielęgnacji (Teza 2, Teza 3).
- Znaczne obniżenie najwyższych temperatur i gradientów temperatur można osiągnąć poprzez (Teza 3);
 1. ograniczenie zawartości cementu w mieszance betonowej, przy zachowaniu warunków normowych dotyczących wytrzymałości, szczelności, mrozoodporności betonu oraz urabialności mieszanki,
 2. zastosowanie cementu niskokalorycznego o umiarkowanym stopniu rozdrobnienia np. stosując cementy hutnicze, cementy pucolanowe, cementy hutnicze z dodatkami pucolan,
 3. zastosowanie do betonu kruszywa o jak najwyższych parametrach termicznych i niskim współczynniku liniowej rozszerzalności cieplnej (np. bazaltowe),
 4. stosowanie mieszanki betonowej o niskiej temperaturze początkowej (najlepiej około 5 °C),
 5. wykonując elementy betonowe w okresie wiosny lub jesieni podczas występowania niskich ale dodatnich temperatur powietrza.

LITERATURA

- [1] *Aao P.*: Temperature Distributions and Stresses in Concrete Bridges. ACI JOURNAL / July-August 1986.
- [2] ACI Committee No. 207, Mass Concrete for Dams and other Massive Concrete Structures, ACI Journal, April 1970.
- [3] ACI Committee No. 207 Effect of Restraint, Volume Changes and Reinforcement on Cracking of Massive Concrete, ACI Journal, July 1973.
- [4] ACI Committee No. 207, Cooling and Insulation Systems for Massive Concrete, Concrete International (ACI), May 1980.
- [5] *Aitcin P.*: Trwały wysokowartościowy beton – sztuka i wiedza. Konferencja „Dni Betonu”, Tradycja i Nowoczesność, 8-10 października Szczyrk. Wyd. Polski Cement, Kraków 2002.
- [6] *Alleksandrowskij S.W.*: Rascziot bietonnyh i żieliezobietonnyh konstrukcji na tiempieraturnyje i wlaźnostnyje wozdiejstwija (s ucziotom połzuciesti) Strojizdat, Moskwa 1966.
- [7] *Alsayed S.H.*: Influence of superplasticizer, plasticizer and silica fume on the drying shrinkage of high-strength concrete subjected to hot-dry field condition. Cement and Concrete Research, Vol. 28, No. 10, pp. 1405÷1415, 1998.
- [8] *Barycz S., Ciurej H., OrubaR.*: Wpływ obciążeń termicznych na uszkodzenia żelbetowych fundamentów wentylatorów ciągu spalin.
- [9] *Bastian S., Batura-Baturewicz M., Krasowski C.*: Badania betonów o przyspieszonym twardnieniu. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 12/2002.
- [10] *Bažant Z.P., Yuan N.L., Tandon S., Faber K.T.*: Cohesive crack modeling of influence of sudden changes in loading rate on concrete fracture. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 52, No. 6. Pp. 987÷997, 1995.
- [11] *Bažant Z., Carol I.*: Damage and plasticity in microplane theory. J. Solids Structures Vol. 34 No. 29 pp. 3807÷3835 1997.
- [12] *Bažant Z., Huet Ch.*: Thermodynamic functions for ageing viscoelasticity: integral form without internal variables. Solids Structures 36 (1999) 3993÷4016.
- [13] *Bažant Z., Steffens A.*: Mathematical model for kinetics of alkali-silica reaction in concrete. Cement and Concrete Research 30 (2000) 419-428.

-
- [14] *Bažant Z.P.*: Reply to the discussion by G.M. Idorn of the paper “Mathematical model for kinetics of alkali-silica reaction in concrete”. *Cement and Concrete Research* 32 (2001) 1111÷1113.
- [15] *Bažant Z., Carol I., Jirásek M.*: A thermodynamically consistent approach to microplane theory. Part I. Free energy and consistent microplane stresses. *International journal of solids and structures*. 38 (2001) 2921÷2931.
- [16] *Bažant Z.P.*: Prediction of concrete creep and shrinkage: past, present and future. *Nuclear Engineering and Design* 203 (2001) 27÷38.
- [17] *Bažant Z., Prat P.C.*: Tangential stiffness of elastic materials with systems of growing or closing cracks. *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 45, No. 8 pp. 1419÷1420.
- [18] *Bažant Z.P.*: Concrete fracture models: testing and practice. *Engineering Fracture Mechanics* 69 (2002) 165÷205.
- [19] *Biliszczyk J.*: Reologiczna redystrybucja stanu naprężenia w niejednorodnych, izostatycznych konstrukcjach betonowych. Państwowe Wydawnictwo Naukowe Warszawa - Łódź 1982.
- [20] *Biliszczyk J.*: Beton-tworzywo do budowy mostów. Politechnika Wrocławska, Wrocław 1986.
- [21] *Biliszczyk J.*: Budowa mostów betonowych metodą nasuwania podłużnego. Seminarium Dedykowane Profesorowi Janowi Kmicie z okazji Jubileuszu 80-lecia urodzin. Wrocław 28-29 maja 2002 roku.
- [22] *Biliszczyk J., Rajski O.*: Stosowanie betonów wysokich klas w mostownictwie. Konferencja „Dni Betonu”, Tradycja i Nowoczesność, 8-10 października Szczyrk. Wyd. Polski Cement, Kraków 2002.
- [23] *Bissonnette B., Pigeon M.*: Tensile creep at early ages of ordinary, silica fume and fiber reinforced concretes. *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 5 pp. 1075÷1085, 1995.
- [24] *Borucka-Lipska J., Kirnożycki W.*: Następstwa nadmiernego obciążenia młodego betonu. XLVI Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB, Krynica 2000. Problemy naukowo-badawcze budownictwa. Tom 2, Wrocław – Krynica 17-22 września 2000.
- [25] *Borucka-Lipska J., Kirnożycki W.*: Termiczne naprężenia wymuszone w betonowych budowlach masowych. Konferencja „Dni Betonu”, Tradycja i Nowoczesność, 8-10 października Szczyrk. Wyd. Polski Cement, Kraków 2002.

-
- [26] *Borucka-Lipska J., Freidenberg P., Kiernożycki W.*: Termiczno-skurczowe naprężenia wymuszone w betonie wysokowartościowym. "Inżynieria i Budownictwo", nr 5/2003.
 - [27] *Carlson R.W.*: Temperatures and stresses in mass concrete, Proc. Amer. Concr. Inst. 34, 1937/38, 497÷515.
 - [28] *Carslaw H.S., Jaeger J.G.*: Conduction of heat in solids, The Clarendon Press, Oxford 1947.
 - [29] *Cooke N., Priestley M. J. N., Thurston S. J.*: Analysis and Design of Partially Prestressed Concrete Bridges Under Thermal Loading. PCI JOURNAL/May-Joun 1984.
 - [30] *Czkwianianc A., Pawlica J., Maćkowiak Z., Saferna M.*: Betonowanie masywnego fundamentu o objętości 7400m³. Konferencja „Dni Betonu”, Tradycja i Nowoczesność, 8-10 października Szczyrk. Wyd. Polski Cement, Kraków 2002.
 - [31] *Czkwianianc A., Pawica J., Moszczyński D.*: O betonowaniu masywów na przykładzie fundamentów w elektrowni. "Inżynieria i Budownictwo", nr 4/2003.
 - [32] *Deja J., Kopia B.*: Właściwości betonu z cementem hutniczym. Polski Cement Sp. z o.o., Kraków 1998.
 - [33] *Deja J., Kijowski P.*: ABC Betonu. Polski Cement Sp. z o.o., Kraków 2002.
 - [34] *Derflinger F.*: Bemessung von Fundamentplatten, Aus Unserem Forschungsarbeiten, Lehrstuhl für Massivbau, TU München, München 1983, 96÷103.
 - [35] *De Schutter G.*: Hydration and temperature development of concrete made with blast-furnace slag cement. Cement Concrete Research, 29 (1999) 143÷149.
 - [36] *Dolmatov A. P., Nejdlin S. Z.*: Nejdlin, Regulirovanie temperaturного režima massivnogo betona plotiny Krasnojarskoj ges, Gidrotechničeskoe Stroitelstvo, 11, 1968, 6÷9.
 - [37] Dokład po issledowanijam napriaziennogo i tiermonapriaziennogo sostojanija bieronnych plotin (tiema G-P-2), Sowiet Ekonomiczieskoj Wzaimopomoszcz, Postojannaja Komissija po Eliكتروeniergii, Sofija, Diekabr 1965.
 - [38] Durable Concrete Structures. CEB Design Guide-second edition 1989. Bulletin d'information N° 182.
 - [39] *De Schutter G.*: General hydration model for portland cement and blast furnace slag cement. Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 3, pp. 593-604, 1995.

-
- [40] *Eisenmann O.*: Zur Vermeidung von Temperaturrissen im Massengestein, Bauwirtschaft, 23, 1960, 523÷549.
- [41] *Elbadry M., Ghali A.*: Thermal Stresses and Cracking of Concrete Bridges. ACI JOURNAL / November-December 1986.
- [42] *Elgaaly M.*: Thermal Gradients in Beams, walls, and Slabs. ACI STRUCTURAL JOURNAL, Title no. 85÷89.
- [43] *Escalante-Garcia J.I., Sharp J.H.*: Effect of temperature on the hydration of the main clinker phases in portland cements: Part I, Neat cements. Cement and Concrete Research, Vol. 28, No. 9, pp. 1245÷1257, 1998.
- [44] *Faleńska M., Gajger W.*: Doświadczenia ze stosowania cementu CEM III/A „Strzelce Opolskie” przy realizacji fundamentów podpór mostu w Warszawie. Sympozjum Naukowo Techniczne. Beton w inżynierii komunikacyjnej.
- [45] *Flaga K.*: Funkcja temperatury betonu tężejącego w warunkach podwyższonych temperatur, Archiwum Inżynierii Lądowej, Tom XV, Z. 1÷2/1969.
- [46] *Flaga K.*: Wpływ samoociepnięcia się betonu na szybkość wznoszenia budowli masywnych. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 3/1970.
- [47] *Flaga K.*: Energetyczne podstawy wzrostu wytrzymałości betonu tężejącego w warunkach obróbki termicznej, Politechnika Krakowska, Zeszyt Naukowy Nr 3, Kraków 1971.
- [48] *Flaga K., Furtak K.*: O obliczeniu przypowierzchniowego zbrojenia przeciwskurczowego w elementach z betonu. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 11÷12/1983.
- [49] *Flaga K., Furtak K., Jagiełło J.*: Zastosowanie zmodyfikowanej teorii starzenia do oceny relaksacji naprężeń skurczowych w elementach żelbetowych, Archiwum Inżynierii Lądowej, t XXX, Z. 4, 1984.
- [50] *Flaga K., Furtak K.*: Obliczenia przypowierzchniowych rys skurczowych w elementach betonowych średniej i dużej masywności. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 4/1994.
- [51] *Flaga K.*: Wpływ naprężeń własnych na destrukcję naprężeniową i parametry wytrzymałościowe betonu. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 6/1995.
- [52] *Flaga K., Rudka T., Ścieranka P.*: Doświadczenia ze stosowania betonu klasy B50 na budowie mostu autostradowego przez Wisłę koło Torunia. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 4/1998.

-
- [53] *Flaga K.*: Wpływ ciepła hydratacji cementu na możliwość zarysowania konstrukcji żelbetowych o rozwiniętym przekroju poprzecznym. "Inżynieria i Budownictwo", nr 5/1998.
- [54] *Flaga K.*: Skurecz betonu a trwałość mostów betonowych. "Inżynieria i Budownictwo", nr 7÷8/1988.
- [55] *Flaga K.*: Pełzanie betonu według Eurokodu 2. "Inżynieria i Budownictwo", nr 3÷4/2002.
- [56] *Flaga K., Pańtak M.*; Ryzyko zarysowania płyt pomostów konstrukcji zespolonych betonowo-stalowych. "Inżynieria i Budownictwo", nr 8/2003.
- [57] *Gawin D.*: Wpływ wybranych czynników na pole higro – termiczne w młodym betonie. XLVI Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB, Krynica 2000. Problemy naukowo-badawcze budownictwa. Tom 3, Wrocław – Krynica 17-22 września 2000.
- [58] *Gawin D., Heim D., Kośny J.*: Wpływ wilgoci technologicznej na właściwości termiczne ściany gazobetonowej w pierwszym okresie eksploatacji budynku. XLVI Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB, Krynica 2000. Problemy naukowo-badawcze budownictwa. Tom 3, Wrocław – Krynica 17-22 września 2000.
- [59] *Ghali A., Favre R.*: Concrete structures. Stresses and deformations. E & FN Span, London UK. 1994.
- [60] *Glovera R.E.*: Calculation of temperature distribution in a succession of lifts due to release of chemical heat, ACI Journal, 34, 1937, 105÷116.
- [61] *Giergiczny Z.*: Cementy Górażdże Cement S.A. w inżynierii komunikacyjnej. Beton w inżynierii komunikacyjnej. Górażdże Cement Poznań 17 stycznia 2001.
- [62] *Godycki-Ćwirko T., Kiernożycki W., Wojdak R.*: Fundament płytowy wierzby Bazyliki Licheńskiej. XLVI Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB, Krynica 2000. Problemy naukowo-badawcze budownictwa. Tom 2, Wrocław – Krynica 17-22 września 2000.
- [63] *Goldstein R.J., Eckert E.R.G., Ibele W.E., Patankar S.V., Simon T.W., Kuehn T.H., Strykowski P.J., Tamma K.K., Bar-Cohen A., Heberlein J.V.R., Davidson J.H., Bischof J., Kulacki F.A., Kortshagen U., Garrick S.*: Heat transfer: a review of 1998 literature. International Journal of Heat and Mass Transfer 44 (2001) 253÷366.

-
- [64] *Grodzicka A., Małolepszy J.*; Wpływ pyłu krzemionkowego na proces hydratacji cementów. *Cement Wapno Beton*, nr 2/99.
- [65] *Grudziński F.*; Procesy cieplne w technologii betonów. Warszawa 1976. Państwowe Wydawnictwo Naukowe.
- [66] Hattori T., Tanabe T., Japanese practice of thermal stress control in massive concrete and successful achievement of huge structures, *Proceedings of the 20th Conference on Our World in Concrete and Structures*, 23÷25 August 1995, Singapore.
- [67] *Hellmich K.*; Einfluss der Hydratationswärme des Betons auf die Lagerver-schiebungen bei Spannbetonbrücken, *Beton-und Stahlbetonbau*, 2, 1984, 42÷46.
- [68] *Helowicz A.*; Rozkład temperatury twardnienia betonu w masywnych elemen-tach obiektu mostowego. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 3÷4/2002.
- [69] *Helowicz A.*; Rozkład temperatury twardnienia betonu w masywnych elemen-tach obiektu mostowego – ciąg dalszy badań. Seminarium, Budowa mostów be-tonowych metodą nasuwania podłużnego. Wrocław 29÷29 maja 2002 r.
- [70] *Herzog M.*; Temperaturmessungen an einer Spannbetonbrücke im Vergleich mit der üblichen Berechnung. *Bauingenieur* 52 (1997) 157÷161.
- [71] *Hirschfeld K.*; Die Temperaturverteilung im Beton, Springer Verlag, Berlin 1948.
- [72] IBDiM; Ocena i sprawdzenie opracowanych receptur na beton B60 z domieszką Sika ViscoCrete 5 lub Sika ViscoCrete 5-600 dla zastosowania w inżynierii komunikacyjnej. IBDiM-TW 37401/W-905. Żmigród, kwiecień 2001.
- [73] *Ickiewicz I.*; Straty ciepła budynku do gruntu w zależności od właściwości ter-micznych gruntu oraz przyjętych rozwiązań projektowych. XLVI Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB, Krynica 2000. Problemy naukowo-badawcze budownictwa. Tom 3, Wrocław – Krynica 17-22 września 2000.
- [74] Internet; www.pancanal.com .
- [75] Internet; www.cosmosm.com/cosmosm.htm .
- [76] Internet; www.cobet-software.de/cobet_dt.htm .
- [77] Issliedowanija napriaziennogo i tiermonapriaziennogo sostojanija wysokich bie-tonnych płotin (tiema G-P-2 II etap), Sowiet Ekonomiczieskoj Wzaimopo-moszczi. Postojannaja Komissija po Eliktroenergii, Driezden, Jun 1970.

-
- [78] *Jamroży Z.*: Beton i jego technologie. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa Kraków 2000.
- [79] *Jasiczak J., Mikołajczyk P.*: Technologia betonu modyfikowanego domieszkami i dodatkami. Przegląd tendencji krajowych i zagranicznych. Politechnika Poznańska, Poznań 1997.
- [80] *Kalinowski E.*: Termodynamika Techniczna. Skrypt do przedmiotu Termodynamika, Wydanie III, Wrocław 1979.
- [81] *Kalinowski E.*: Termodynamika, zagadnienia wybrane. Wydanie II, Wrocław 1984.
- [82] *Kapelko A.*; Wpływ nowego superplastyfikatora opóźniającego wiązanie cementu na właściwości tworzyw cementowych. Cement Wapno Beton, nr 3/99.
- [83] *Kaszyńska M.*; Wpływ temperatury na ciepło twardnienia i wytrzymałość betonów wysokowartościowych. Cement Wapno Beton, nr 6/96.
- [84] *Kaszyńska M.*: Właściwości BWW w początkowym okresie dojrzewania. Konferencja „Dni Betonu”, Tradycja i Nowoczesność, 8-10 października Szczyrk. Wyd. Polski Cement, Kraków 2002.
- [85] *Kiernożycki W., Kurzawa J.*: Temperatury i naprężenia termiczne w masywnych fundamentach konstrukcji inżynierskich, XXII Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 1976, t2, 261÷273.
- [86] *Kiernożycki W.*: Termiczne naprężenia wymuszone w betonowych budowlach masywnych z uwzględnieniem zjawisk reologicznych. Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej nr 487, Instytut Inżynierii Lądowej nr 31, Szczecin 1992.
- [87] *Kiernożycki W.*; Niektóre problemy techniczne wykonawstwa betonowych budowli masywnych. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 3/1995.
- [88] *Kiernożycki W.*: Pełzanie młodego betonu rozciąganego. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 5/1996.
- [89] *Kiernożycki W., Ślusarek J., Freidenberg P.*: Temperatury twardnienia betonu wysokowartościowego. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 5/1997.
- [90] *Kiernożycki W.*: Termiczne naprężenia wymuszone w betonie masywnych płyt fundamentowych. Politechnika Gdańska – Wydział Budownictwa Lądowego, Księga Jubileuszowa z okazji 70-lecia profesora Tadeusza Godyckiego-Ćwirko.
- [91] *Kiernożycki W., Różyło P.*; Chłodzenie młodego betonu w masywnych elementach płytowych. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 5/1999.

-
- [92] *Kiernożycki W., Freidenberg P.*: Badania młodego rozciąganego betonu zwykłego i wysokowartościowego. "Inżynieria i Budownictwo", nr 5/2001.
- [93] *Kiernożycki W.*: Betonowe konstrukcje masywne. Teoria Wymiarowanie Realizacje. Polski Cement, Kraków 2003.
- [94] *Klemczak B.*: Wpływ ciepła uwodnienia cementu i jego ilości w 1m^3 betonu na temperatury twardnienia masywnych konstrukcji betonowych. Konferencja „Dni Betonu”, Tradycja i Nowoczesność, 8-10 października Szczyrk. Wyd. Polski Cement, Kraków 2002.
- [95] *Klemczak B.*: Wpływ niektórych współczynników materiałowych młodego betonu na temperatury twardnienia konstrukcji masywnych. "Inżynieria i Budownictwo", nr 11/2002.
- [96] *Kossecka E.*: Generator przebiegów temperatury otoczenia. XLVI Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB, Krynica 2000. Problemy naukowo-badawcze budownictwa. Tom 3, Wrocław – Krynica 17-22 września 2000.
- [97] *Kotlewski F.*: Podstawowe pomiary w technice cieplnej. WNT Warszawa 1966.
- [98] *Kowalski J., Rybicki A.*: Temperature and moisture content distributions in a saturated wall.
- [99] *Kratzer K.*: Verfahren zur Berechnung von instationären temperatur im Beton, Zement und Beton, 26, 1981, 118÷123.
- [100] *Krawczyk J., Pawelski S., Biliszczyk J.*: Rozpoczęcie budowy największego w Polsce mostu podwieszonego. Wybrane problemy projektowania dróg, autostrad i mostów. Wrocław – Opole 2002. Praca pod redakcją Jana Biliszczuka i Antoniego Szydło.
- [101] *Kronlöf, A., Leivo M. and Sipari P.*: Experimental study on the basic phenomena of shrinkage and cracking of fresh mortar. Cement Concrete Research, Vol. 25, No. 8, pp. 1747÷1754, 1995.
- [102] *Kubissa J., Koper W.*: Przydatność nieniszczących metod badania wytrzymałości betonu na ściskanie w zastosowaniu betonów wysokowartościowych.
- [103] *Kubissa W.*: Wpływ pielęgnacji na wybrane właściwości betonu. "Inżynieria i Budownictwo", nr 6/2003.
- [104] *Kucnerowicz-Jakubowska M.*: Zagadnienia technologii betonu na budowie pochylnej Wulkan Nowy Stoczni Szczecińskiej. "Inżynieria i Budownictwo", nr 5/2001.

-
- [105] *Kuczyński W.*: Budownictwo betonowe. Tom I. Technologia betonu, cz. 2. Arkady, Warszawa 1972.
 - [106] *Kumar Mehta P., Monteiro P.J.M.*: Concrete. Microstructure, properties, and materials. Second edition.
 - [107] *Kurzawa J., Kiernożycki W.*: Uszkodzenie płyty fundamentowej 250 m komina w wyniku samoociepnięcia betonu, V Sympozjum Badanie Przyczyn i Zapobieganie Awariom Konstrukcji Budowlanych, Szczecin 1979, 145÷151.
 - [108] *Kurzawa J., Kiernożycki W.*: Thermische Spannungen hervorgerufen durch den Hydratationsprozess des Zements in massigen Fundamenten von Ingenieurkonstruktionen, Bauingenieur, 57, 1982, 357÷361.
 - [109] *Kurzawa J., Kiernożycki W. Janik T.*: Temperaturen und Spannungen durch den Erhartungsprozess des Beton in Stützkonstruktionen von Hochleistungsturbogeneratoren, Betontechnik, 6, 1986, 183÷185.
 - [110] *Lebet J.-P., Badoux J. -C.*: Temperaturänderungen in Brücken. Bauingenieur, Springer-Verlag 1998.
 - [111] *Leonhard E.*: Risschaden an Betonbrücken – Ursachen und Abhilfe, Beton – und Stahlbetonbau, 2, 1979, 36÷44.
 - [112] *Liu Ning, Liu Guangting*: Research on nonstationary random thermal creep stresses in mass concrete structures. Finite Elements in Analysis and Design 26(1997) 83÷95.
 - [113] *Liu Ning, Liu Guang-Ting*: Time-dependent reliability assessment for mass concrete structure. Structural Safety 21 (1999) 23÷43.
 - [114] *Lokhorst S. J. and van Breugel K.*: Simulation of the effect of geometrical changes of the microstructure on the deformational behaviour of hardening concrete. Cement Concrete Research, Vol. 27, No. 10, pp. 1465÷1479, 1997.
 - [115] *Loukili A., Khelidj A., Richard P.*: Hydration kinetics, change of relative humidity, and autogenous shrinkage of ultra-high-strength concrete. Cement Concrete Research, 29 (1999) 557÷584.
 - [116] *Łapko A., Labad N.*: Badania odkształceń belek żelbetowych poddanych szokowym obciążeniom temperaturą. "Inżynieria i Budownictwo", nr 6/1996.
 - [117] *MacHenry`ego D.*: Measured and computed temperatures of concrete at Norris Dam, ACI Journal, 34, 1937, 117÷125.

-
- [118] *Majewski S., Klemczak B.*: Numeryczne modelowanie twardniejącego betonu. XLVI Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB, Krynica 2000. Problemy naukowo-badawcze budownictwa. Tom 2, Wrocław – Krynica 17-22 września 2000.
 - [119] *Makedonskij G. M. i inni*: Razrezka massivnych plotin na bloki betonirovanija, Energija, Moskva 1969.
 - [120] *Mass G., Yeh C.*: Temperature related cracking in an underground chamber ceiling, *Concrete International*, 4, 1983, 42÷48.
 - [121] *Mirambell E., Aguado A.*: Temperature and Stress Distributions in Concrete Box Girder Bridges. *Journal of Structural Engineering*, nr.9, 1990.
 - [122] *Moetaz M., El-Hawary and Sameer A. Hamoush.*: Bond Shear Modulus of Reinforced Concrete at High Temperature. *Engineering Fracture Mechanics* Vol 55, No. 6, pp. 991÷999, 1996.
 - [123] *Neville A. M.*: Właściwości betonu. Polski Cement Sp. Z o.o., Kraków 2000.
 - [124] *Ning Liu, Guang-Ting Liu*: Time-dependent reliability assessment for mass concrete structures. Elsevier. *Structural Safety* 21 (1999) 23÷43.
 - [125] Norma Branżowa BN-62/6738-03, Beton hydrotechniczny. Składniki betonu. Wymagania techniczne.
 - [126] Norma Branżowa BN-62/6738-04, Beton hydrotechniczny. Badanie masy betonowej.
 - [127] Norma Branżowa BN-62/6738-05. Beton hydrotechniczny. Badanie betonu.
 - [128] Norma Branżowa BN-62/6738-06. Beton hydrotechniczny. Badanie składników, betonu.
 - [129] Norma Branżowa BN-62/6738-07, Beton hydrotechniczny. Wymagania techniczne.
 - [130] Norma PN-88/B-06250. Beton zwykły.
 - [131] Norma PN-88/B-30000. Cement portlandzki.
 - [132] Norma PN-EN ISO 6946:1999. Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór cieplny i współczynniki przenikania ciepła. Metoda obliczania.
 - [133] Norma PN- 91/S-10042. Obiekty mostowe, Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone.
 - [134] Norma PN-91/B02020. Ochrona cieplna budynków.
 - [135] Norma PN-88/B-30005. Cement hutniczy.
 - [136] Norma PN-EN 934-2. Domieszki do betonu – definicje.

-
- [137] Norma PN-EN 197-1:2002. Cement -Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
- [138] Norma BN-79/6731-17. Cement. Metody badań.
- [139] *Olek J.*: Betony wysokowartościowe – przegląd technologiczny doświadczeń z USA. Konferencja „Dni Betonu”, Tradycja i Nowoczesność, 8-10 października Szczyrk. Wyd. Polski Cement, Kraków 2002.
- [140] Ono S., Shono A., Tanabe T., JCI method for calculating thermal stress and crack width of massive concrete, Proceedings of the 20th Conference on Our World in Concrete and Structures, 23-25 August 1995. Singapore.
- [141] *Østergaard L., Lange D. A., Altoubat S. A., Stang H.*: Tensile basic creep of early-age concrete under constant load. Cement and Concrete Research 31 (2001) 1895-1899.
- [142] *Paluch M., Sygula S., Radoń J.*: Sposób obliczania naprężeń termicznych od promieniowania słonecznego w betonowych mostach skrzynkowych. Drogownictwo, nr 2-1984.
- [143] *Pauser A.*: Betrachtungen über die konstruktion und Berechnung Weitgespannter Talbrücken, Zement und Beton, 2, 1982, 36÷39.
- [144] *Persson B.*: Poisson's ratio of high-performance concrete. Cement and Concrete Research 29 (1999) 1647÷1653.
- [145] *Persson B.*: Correlating laboratory and field tests of creep in high-performance concrete. Cement and Concrete Research 31 (2001) 389÷395.
- [146] *Peukert S.*: Cementy powszechnego użytku i specjalne. Polski Cement Sp. Z o.o., Kraków 2000.
- [147] *Piasta J., Piasta W. G.*: Beton zwykły. Arkady, Warszawa 1997.
- [148] *Плям Ш.Н.*: Расчеты температурных полей бетонных гидросооружений, „ЭНЕРГИЯ”, Москва 1974.
- [149] Polska Akademia Nauk Komitet Inżynierii: “Budownictwo Betonowe” tom 1 cz.2.
- [150] *Priestley M. J. N.*: Design of Concrete Bridges for Temperature Gradients. ACI JOURNAL / MAY 1978.
- [151] *Prokopowicz I. Je.*: Prakticzeskij sposob opriedielienija tiempieraturno-włażnostnych napriazienij w priamougolnych bietonnych b্লokach, Gidrotiechniczeskoje Stroitelstwo, Nr 5/1964.

-
- [152] *Pustelnik M.*: Wybrane wyniki badań rozkładów temperatur w betonowym dźwigarze skrzynkowym. Seminarium, Budowa mostów betonowych metodą nasuwania podłużnego. Wrocław 29÷29 maja 2002 r.
- [153] Radziecka Norma SN-123-60, Normy i warunki techniczne projektowania betonowych ciężkich zapór na podłożach skalnych, Moskwa 1961.
- [154] *Rajski O.*: Wpływ mikrokrzemionki na odkształcalność i proces niszczenia betonów wysokowartościowych. Praca Doktorska. Instytut Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej. Raport III serii PRE nr 34/95 Wrocław 1995.
- [155] *Rajski O.*: Sprawozdanie z badań do oceny betonu wbudowanego w obiekty mostowe na budowie Autostrady A4 Wrocław – Gliwice. Symbol pracy IB-DiM-TV 28599/W-627 Żmigród - Węglowo. Lipiec 1999 rok.
- [156] *Rajski O., Rowiński W., Turczyński A.*; Doświadczenia ze stosowania betonu klasy B60 na budowie estakady we Wrocławiu. "Inżynieria i Budownictwo", nr 10/2002.
- [157] *Rao G.H.*: Influence of silica fume replacement of cement on expansion and drying shrinkage. Cement and Concrete Research, Vol. 28, No. 10, pp. 1505÷1509, 1998.
- [158] *Rastrup E.*: Heat of hydration in concrete, Magazin of Concrete Research, Vol.6 Nr 17 September 1954.
- [159] *Rusiński E., Czmochoński J., Smolnicki T.*; Zaawansowane metody elementów skończonych w konstrukcjach nośnych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000.
- [160] Sachstandbericht: Massenbeton aufgestellt von Deutscher Beton-Verein, E.V. D.A.f Sb. Heft 329. Berlin 1982.
- [161] *Singh N.B., Bhattacharjee K.N., Shukla A.K.*: Hydration of portland blended cements. Cement Concrete Research, Vol. 25, No. 5, pp. 1023÷1030, 1995.
- [162] *Sioulas B., Sanjayan J.G.*: Hydration temperatures in large high-strength concrete columns incorporating slag. Cement and Concrete Research, 30 (2002) 1791÷1799.
- [163] *Specht M. Fouad A.*: Temperatureinwirkungen auf Beton-Kastenträgerbrücken durch Klimaeinflüsse. Beton – und Stahlbetonbau 93 (1998), Heft 10.
- [164] *Springenschmid R., Breitenbücher R.*: Tunnelinnenschalen, Tiefbau, Ingenieurbau, Strassenbau, 11, 1984, 640÷649.

-
- [165] *Springenschmid R., Breitenbücher R.*: Über die Ursache und das Vermeiden von Rissen im Beton von Tunnelauskleidungen, *Felsbau*, 3, 1985, 212÷218.
- [166] *Starościak D., Dobrowolski S.*; Wpływ wybranych domieszek plastyfikujących na cechy mieszanki betonowej i betonu. "Inżynieria i Budownictwo", nr 12/1991.
- [167] *Suzuki T., Takigushi K., Miyashita*: Application of New Concrete Using Small Pieces of Ice. Congress Report –Helsinki, June 6÷10, 1988.
- [168] *Townsend C. L.*: Control of cracking on massconcrete structures, A Water Resources Technical publication, Engineering Monograph 34, US Government Printing Office, Washington 1965.
- [169] *Ubysz A.*: Odkształcenia plastyczne i samonapężenia w żelbetowych konstrukcjach prętowych. Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1999.
- [170] *Walz K., Wischers G.*: Beton als Strahlenschutz für Kernreaktoren, *Betontechnische Berichte*, Beton-Verlag, Düsseldorf 1961, 91÷127.
- [171] *Wandschneider R.*: Massenbeton im Kerntechnischen Ingenieurbau, *Beton*, 3, 1984, 85÷91.
- [172] *Widmann R.*: Grundlagen für den Entwurf der Bogenstaumauer Zilleergundl, *Wasserwirtschaft*, 74, 1984, 147÷152.
- [173] *Wischers G., Dahms J.*: Untersuchungen zur Beherrschung von Temperaturrisse in Brückenwiderlagen durch Raum-und Scheinfugen, *Betontechnische Berichte*, Beton-Verlag, Dusseldorf 1968, 145÷175.
- [174] *Witakowski P.*; Wewnętrzne klinowanie struktury dojrzewającego betonu. "Inżynieria i Budownictwo", nr 8/1997.
- [175] *Witakowski P.*: Termodynamiczna teoria dojrzewania. Zastosowanie do konstrukcji masywnych z betonu. Politechnika Krakowska, Zeszyt Naukowy nr 1, Kraków 1998.
- [176] *Witakowski P.*: Kompleksowe zarządzanie jakością robót. Zdalne monitorowanie robót betonowych. Konferencja „Dni Betonu”, Tradycja i Nowoczesność, 8-10 października Szczyrk. Wyd. Polski Cement, Kraków 2002.
- [177] *Woyciechowski P.*: Skurcz w pierwszej dobie dojrzewania modyfikowanych tworzyw cementowych. "Inżynieria i Budownictwo", nr 7/2000.

-
- [178] *Vilardell J., Aguado A., Agullo L. And Gettu R.*: Estimation of the modulus of elasticity for dam concrete. *Cement Concrete Research*, Vol. 28, No. 1, pp. 93÷101, 1998.
- [179] *Zaporożec I.D., Okorokow S.D., Parijskij A.A.*: *Tieplowydielienije bietona*, Izdatielstwo Litieratury po Stroitielstvu, Leningrad - Moskwa 1966.
- [180] *Godycki-Ćwirko T.*: *Mechanika betonu*. Arkady, Warszawa 1982.
- [181] Internet; <http://www.eds.com/products/plm/ideas/version9.shtml>.
- [182] Internet; <http://www-3.ibm.com/software/applications/plm/catia5/> .
- [183] Internet; <http://www.imgw.pl/>.
- [184] Internet; <http://pogoda.onet.pl/>
- [185] Internet; <http://pogoda.wp.pl/>.
- [186] *Kiernożycki W., Borucka-Lipska J., Freidenberg P.*: O minimalnym zbrojeniu przypowierzchniowym masywnych elementów płytowych. "Inżynieria i Budownictwo", nr 11/2003.
- [187] Internet; <http://www.mathworks.com/>
- [188] *Witakowski P.*: Technologia betonowania i pielęgnacja betonu na budowie Mostu Świętokrzyskiego w Warszawie. *Prace Instytutu Techniki Budowlanej – Kwartalnik* nr 4 (128) 2003.
- [189] *Witakowski P.*: *Awaria fundamentu wieżowca i jego naprawa*. Wydawnictwo WEKA, Warszawa II 2003.

ZAŁĄCZNIKI

W załączniku zawarto szczegółowe wyniki obliczeń przybliżonej analizy parametrycznej wpływu różnych czynników na rozkłady temperatur w masywnych elementach.

Z.1. Przybliżona analiza parametryczna wpływu różnych czynników na rozkłady temperatur w masywnych elementach

Do przeprowadzenia analizy parametrycznej wyszczególniono dwa elementy konstrukcyjne estakady Gądów; filar słupowy i przęsło łącznicy dojazdowej do estakady głównej (patrz rys. 3.4 ÷ rys. 3.7 i rys. 5.1). Moduł powierzchniowy $m = F / V$ wybranych elementów wynosi odpowiednio, dla przęsła łącznicy dojazdowej $m = 1.84 \text{ m}^{-1}$, dla filara $m = 2 \text{ m}^{-1}$. Wybrane elementy były przedmiotem wcześniejszych badań. W trakcie których, pomierzono temperaturę w czasie dojrzewania betonu (patrz rys. 3.10 ÷ rys. 3.23).

Celem analizy, jest określenie wpływu wybranych czynników wewnętrznych (właściwości termofizyczne betonu, temperatura początkowa mieszanki betonowej) oraz zewnętrznych (temperatura powietrza, wpływ powierzchniowego współczynnika przejmowania ciepła, grubość warstwy izolacji termicznej) na różnicę temperatur ΔT_{wz} , między środkiem i powierzchnią zewnętrzną elementu oraz wzrost lub obniżenie maksymalnej temp. wewnętrznej elementu. Zakres analizy ograniczono do elementów swobodnych.

Ze względu na zmienność współczynników termofizycznych betonu (patrz tablica 4.1), postanowiono analizować poszczególne wartości termofizyczne oddzielnie w zakresie przedziałów zmienności występujących w realnych warunkach..

Analiza parametryczna dotyczyła;

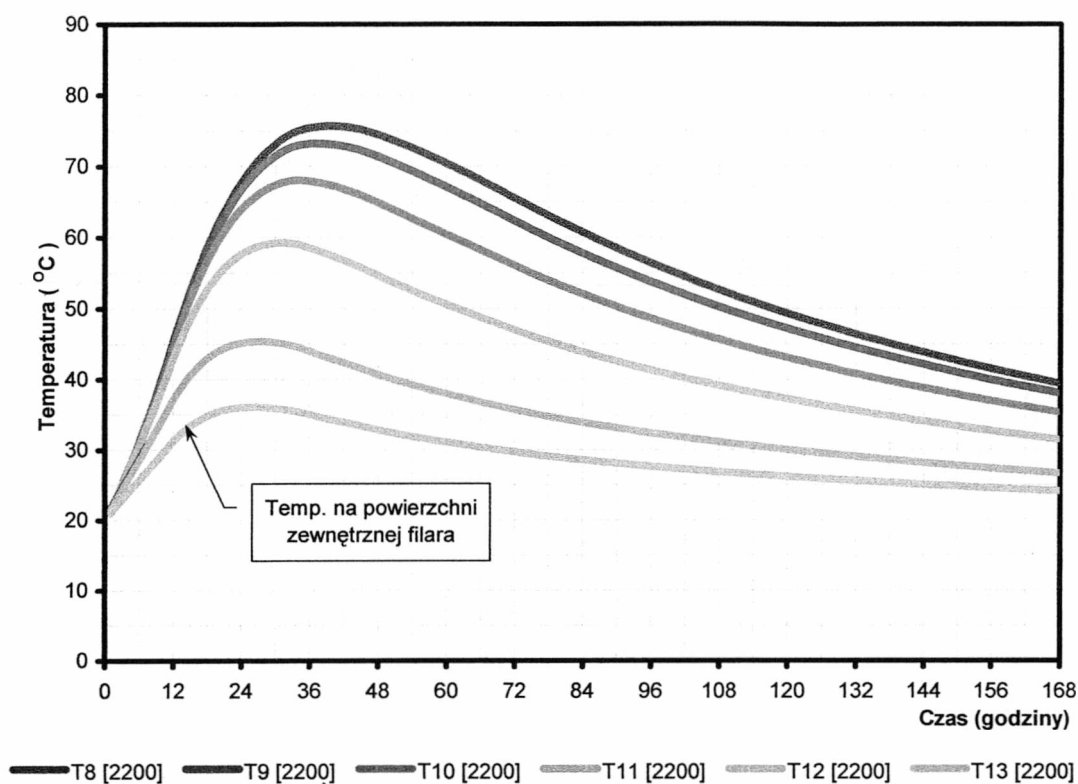
- wpływu gęstości objętościowej betonu (ρ),
- wpływu współczynnika przewodności cieplnej betonu (λ),
- wpływu ciepła właściwego betonu (c),
- wpływu temperatury mieszanki betonowej,
- wpływu temperatury powietrza,
- wpływu powierzchniowego współczynnika przejmowania ciepła (α),
- wpływu grubości warstwy styropianu na powierzchni zewnętrznej elementu.

Z.2. Wpływ gęstości objętościowej betonu

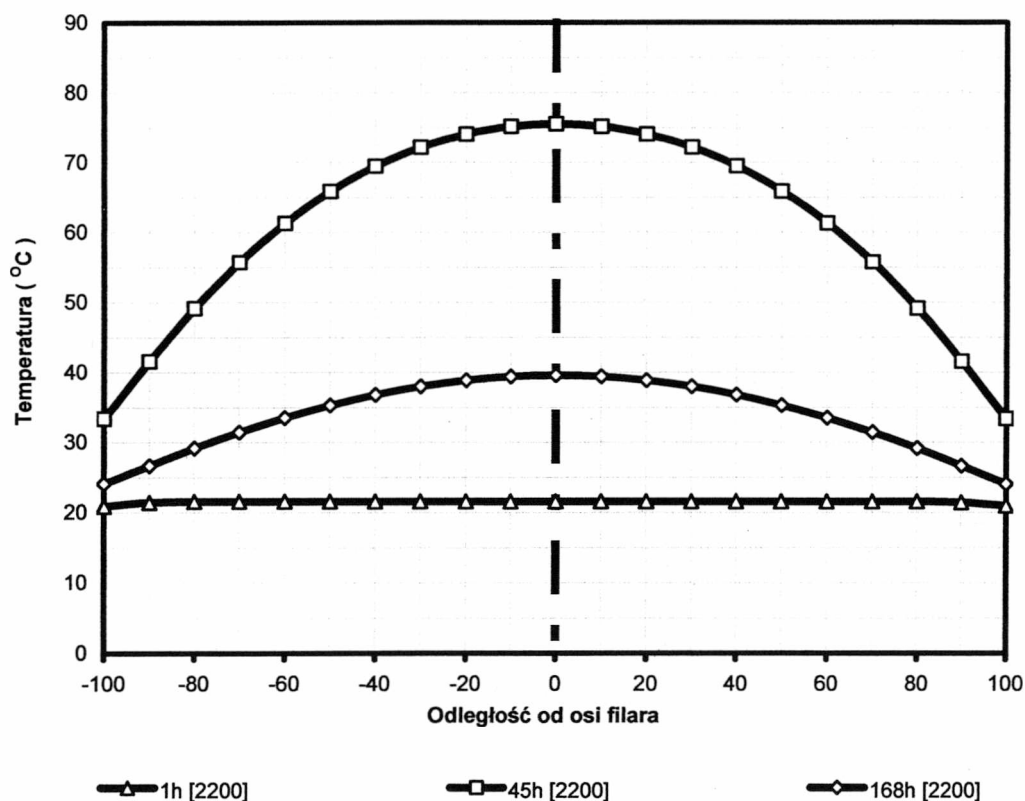
Celem analizy jest określenie wpływu, wartości gęstości objętościowej betonu na różnicę temperatur ΔT_{wz} między środkiem i powierzchnią zewnętrzną elementu oraz wzrost lub obniżenie maksymalnej temperatury wewnętrznej elementu.

Gęstość betonu analizowano od wartości $2200 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ w interwale, co $200 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ do $2600 \text{ [kg/m}^3\text{]}$. Wartości współczynników termofizycznych materiałów wykorzystanych w analizie zestawiono w tablicy 5.1. Stałą temperaturę powietrza, początkową temperaturę mieszanki betonowej oraz stałą wartość powierzchniowego współczynnika przejmowania ciepła, zestawiono w tab. 5.2.

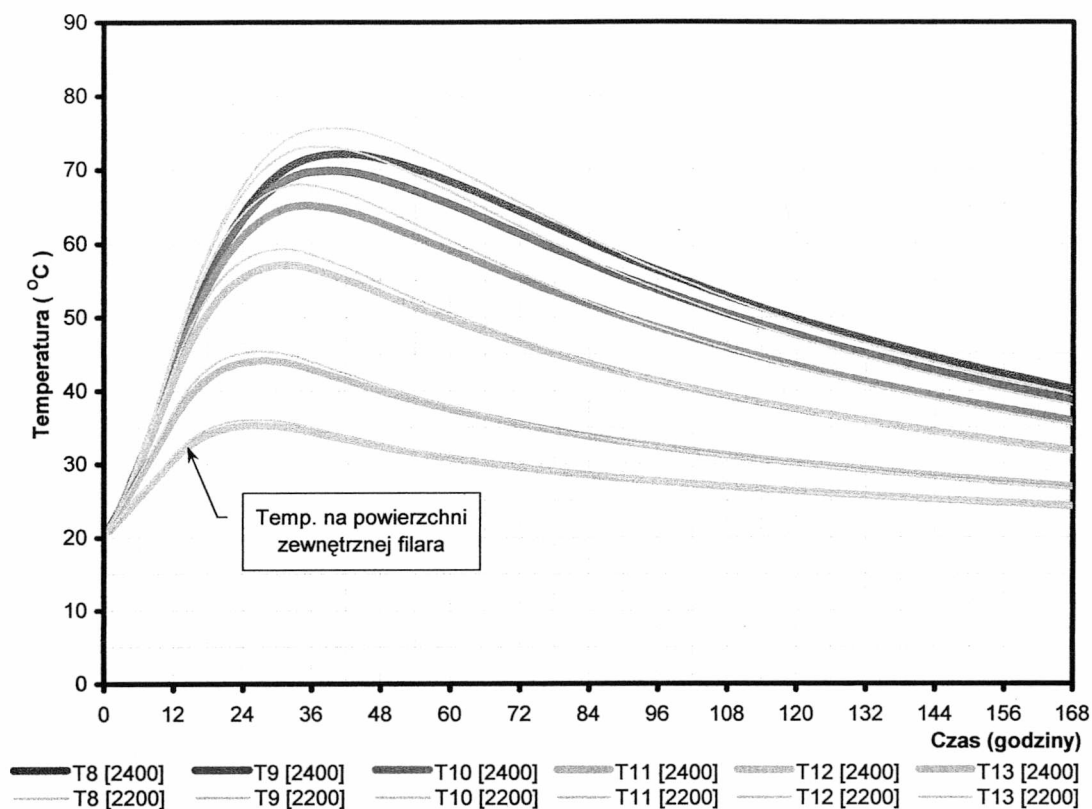
• Wyniki obliczeń dla filara



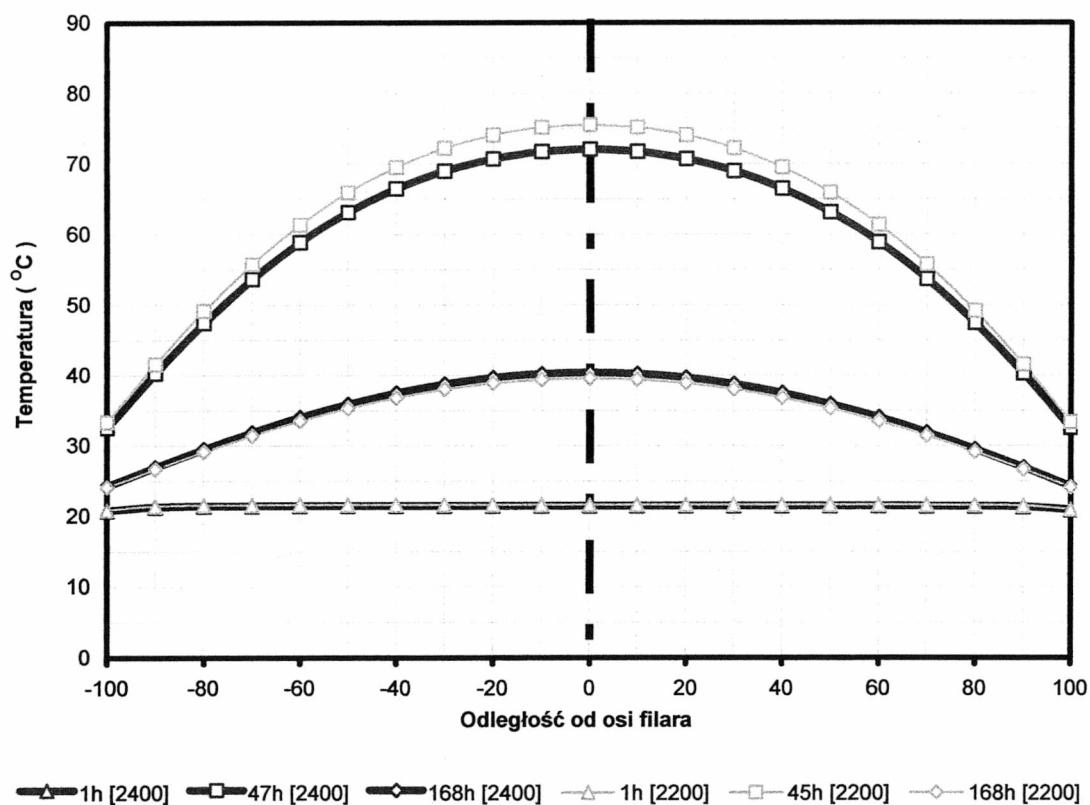
Rys. Z.1. Wartości temperatur w funkcji czasu obliczone w filarze betonowym średnicy $\phi = 2$ m, (rys. 5.1 a – $\rho_B = 2200 \text{ kg/m}^3$)



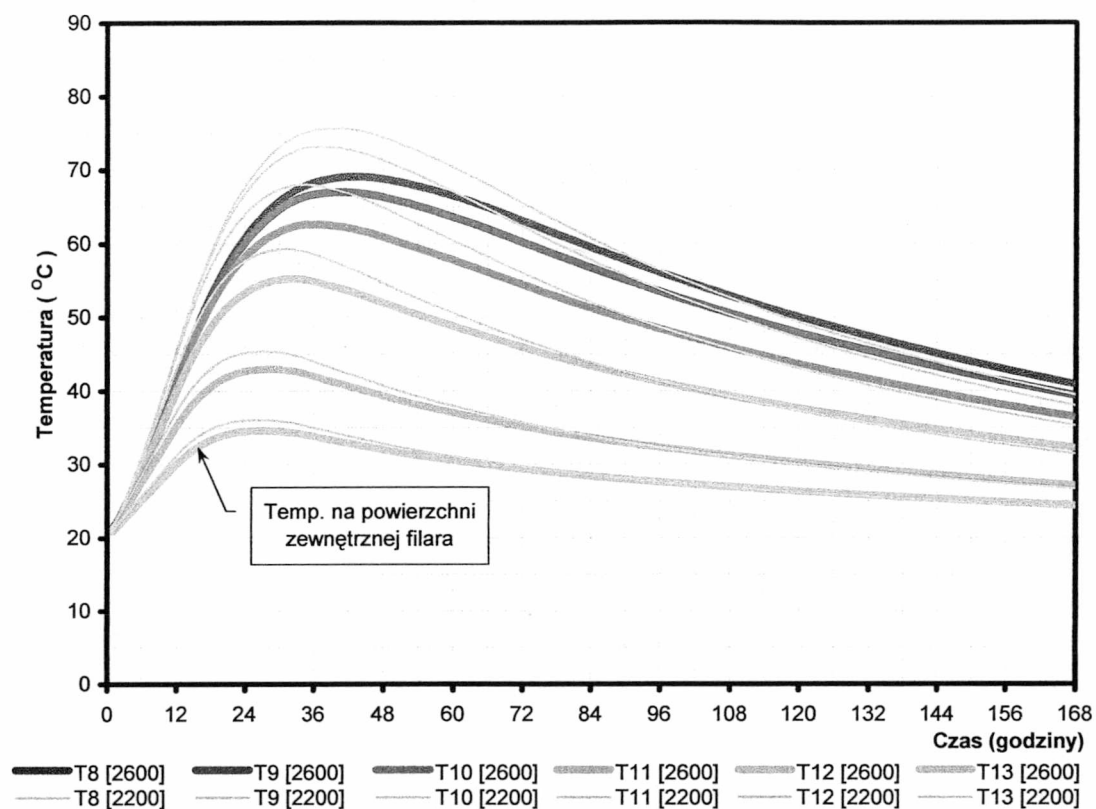
Rys. Z.2. Rozkład temperatur w filarze betonowym wzdłuż osi środkowej, (rys. 5.1 a – $\rho_B = 2200 \text{ kg/m}^3$)



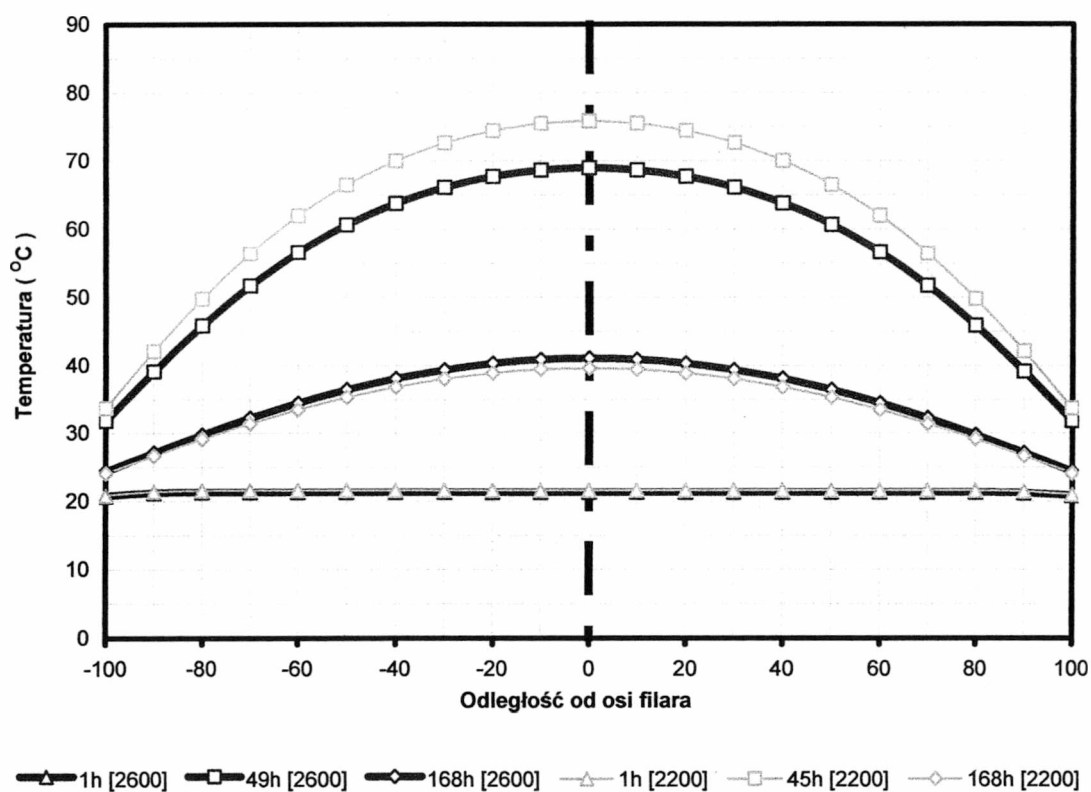
Rys. Z.3. Wartości temperatur w funkcji czasu obliczone w filarze betonowym średnicy $\phi = 2$ m, (rys. 5.1 a – $\rho_B = 2400 \text{ kg/m}^3$)



Rys. Z.4. Rozkład temperatur w filarze betonowym wzdłuż osi środkowej, (rys. 5.1 a – $\rho_B = 2400 \text{ kg/m}^3$)

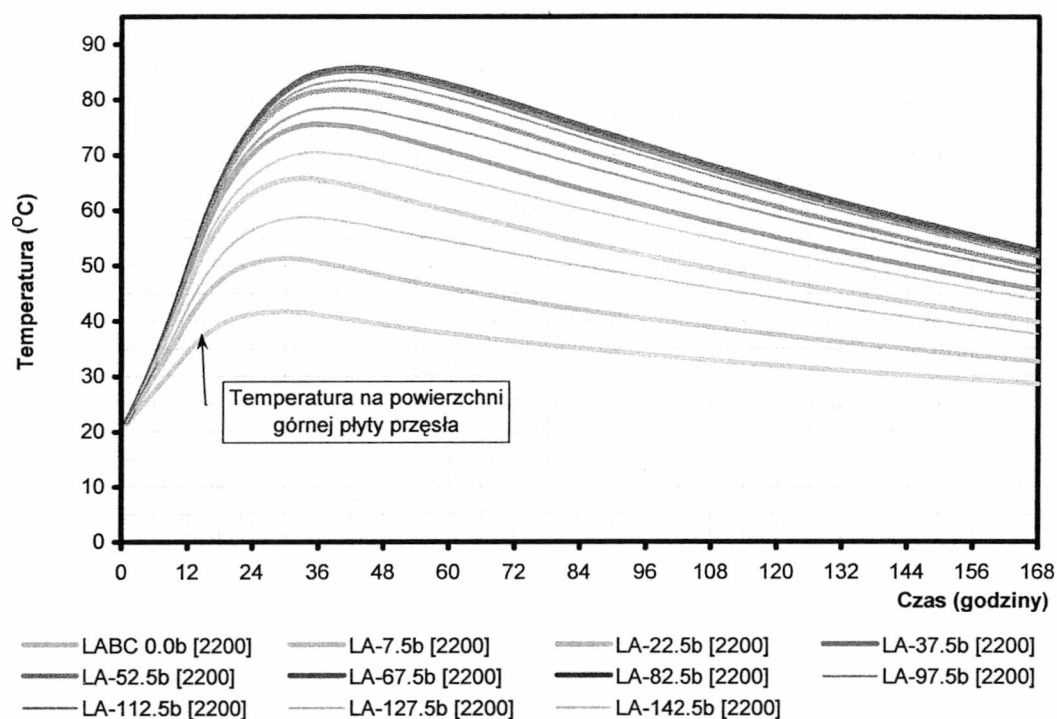


Rys. Z.5. Wartości temperatur w funkcji czasu obliczone w filarze betonowym średnicy $\phi = 2$ m, (rys. 5.1 a – $\rho_B = 2600 \text{ kg/m}^3$)

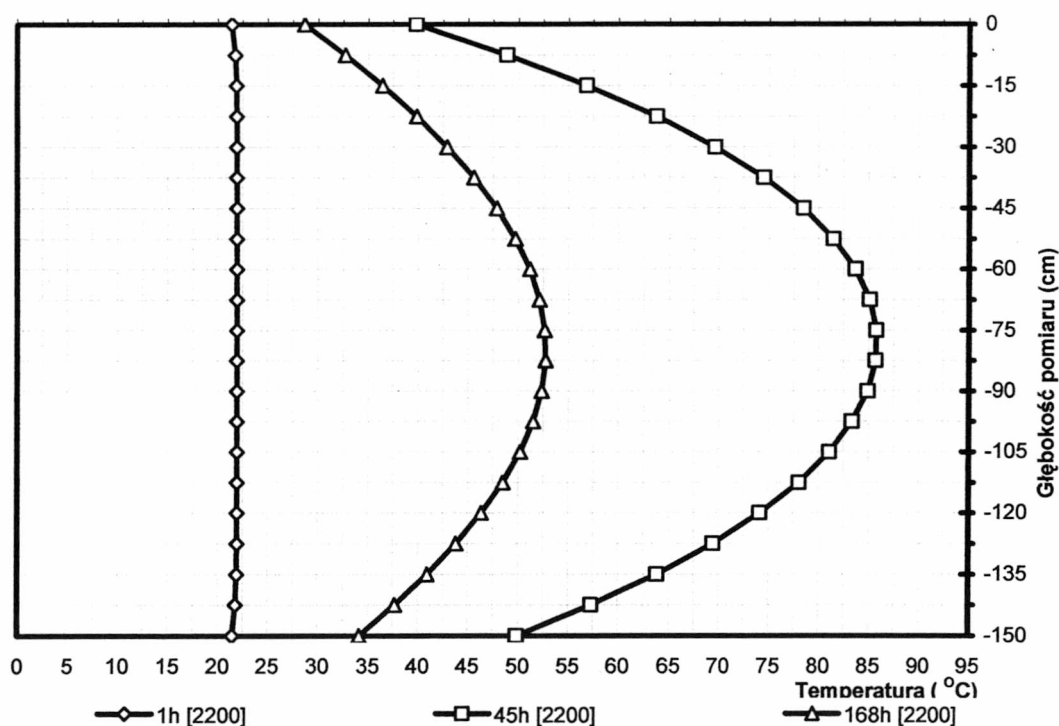


Rys. Z.6. Rozkład temperatur w filarze betonowym wzdłuż osi środkowej, (rys. 5.1 a – $\rho_B = 2600 \text{ kg/m}^3$)

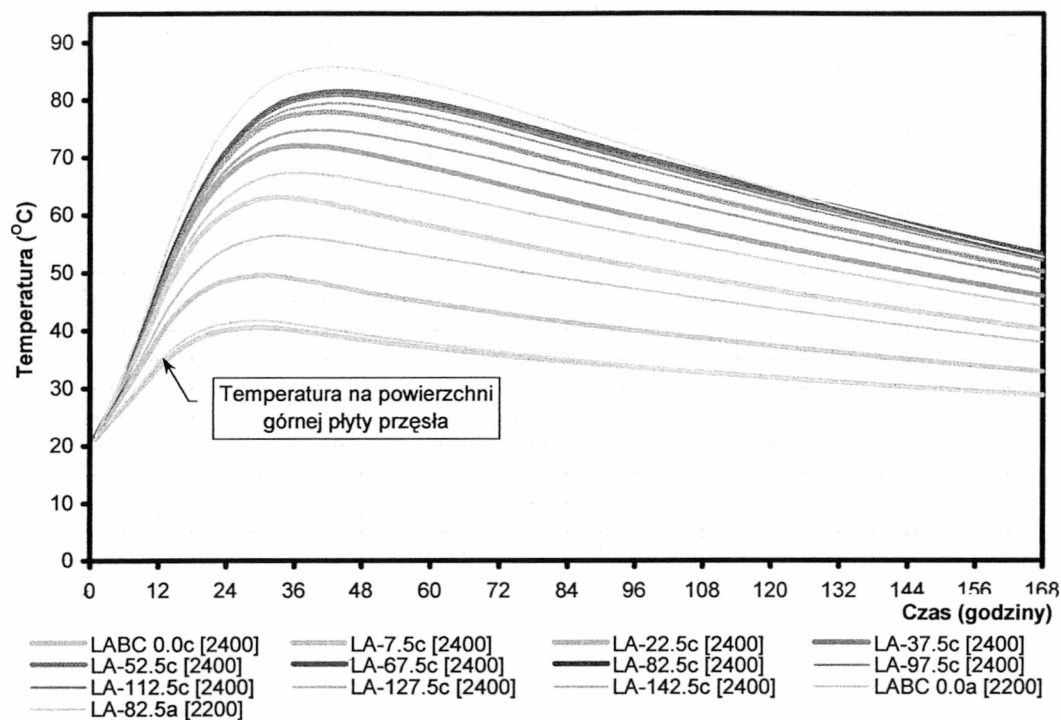
• Wyniki obliczeń dla przęsła łącznicy dojazdowej do estakady głównej



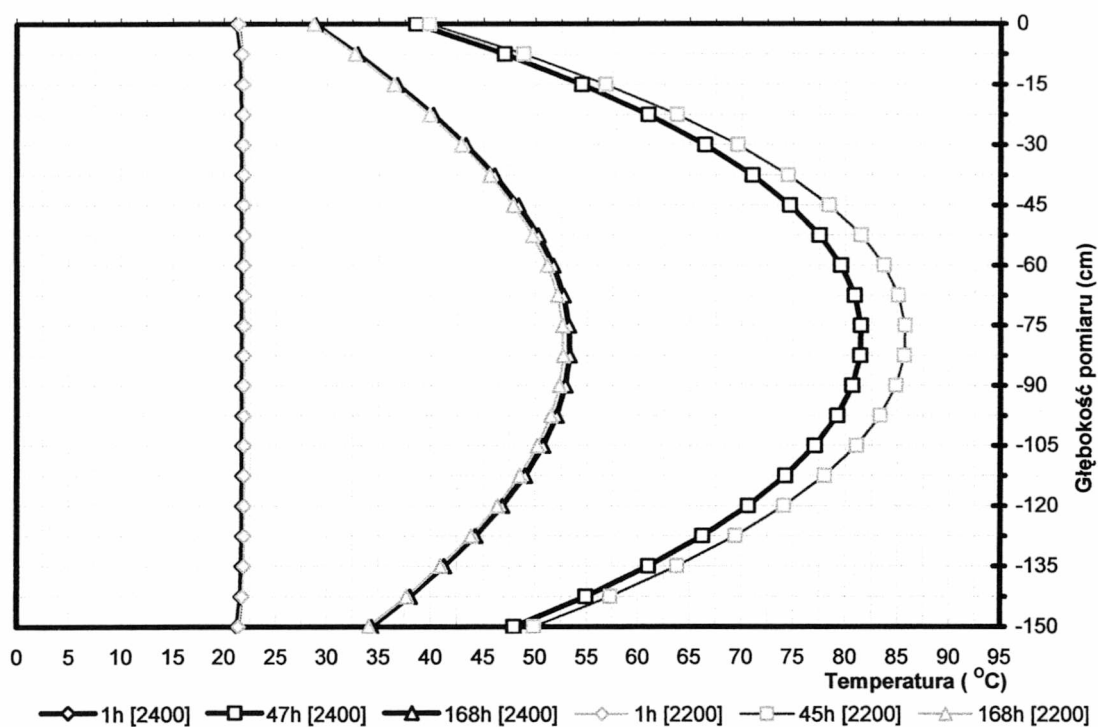
Rys. Z.7. Wartości temperatur w poszczególnych punktach osi pomiarowej pionowej w funkcji czasu dla przęsła łącznicy dojazdowej;
- linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $\rho_B = 2200 \text{ kg/m}^3$)



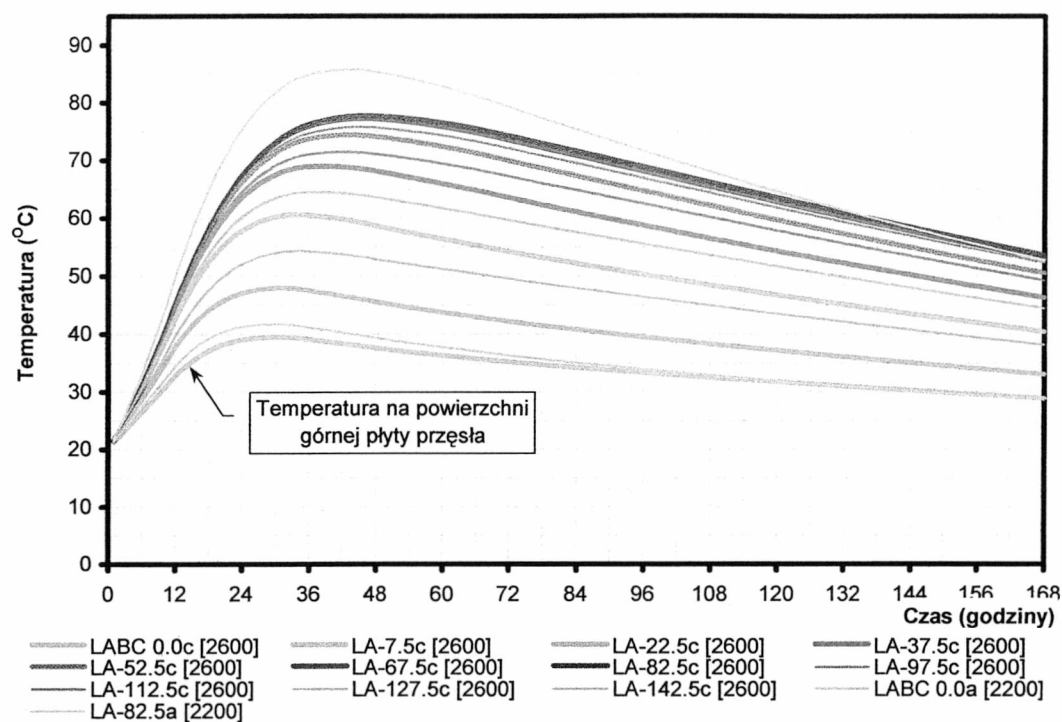
Rys. Z.8. Rozkład temperatur w przekroju poprzecznym przęsła łącznicy dojazdowej;
- linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $\rho_B = 2200 \text{ kg/m}^3$)



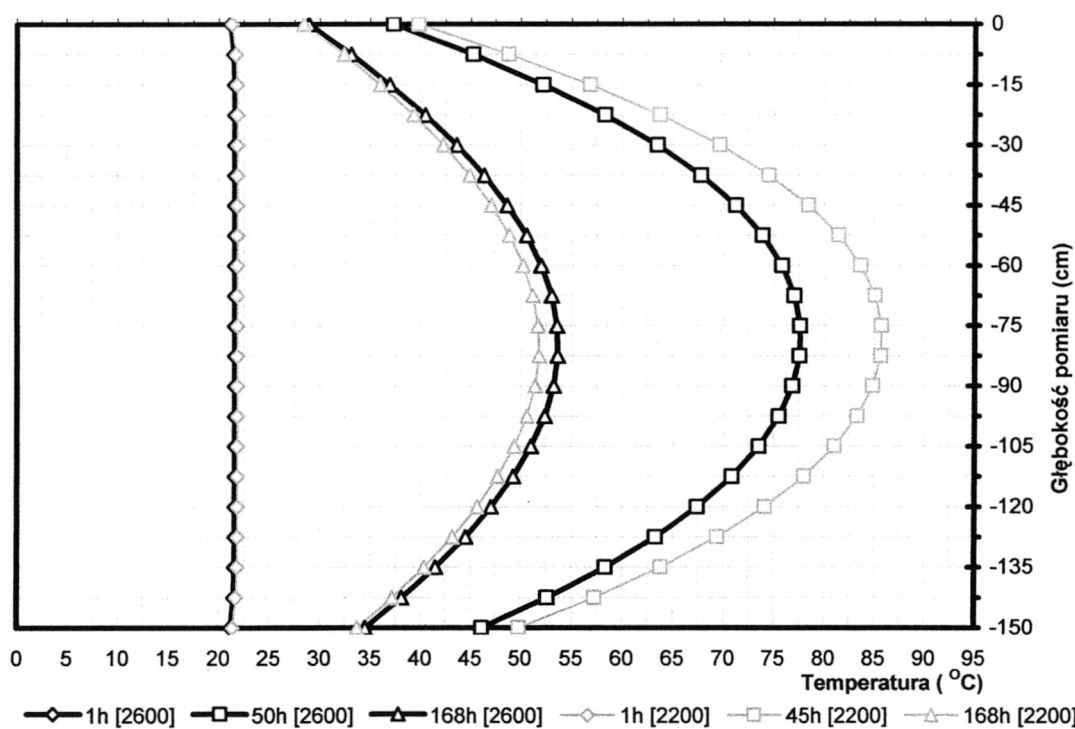
Rys. Z.9. Wartości temperatur w poszczególnych punktach osi pomiarowej pionowej w funkcji czasu dla przęsła łącznicy dojazdowej;
- linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $\rho_B = 2400 \text{ kg/m}^3$)



Rys. Z.10. Rozkład temperatur w przekroju poprzecznym przęsła łącznicy dojazdowej;
- linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $\rho_B = 2400 \text{ kg/m}^3$)



Rys. Z.11. Wartości temperatur w poszczególnych punktach osi pomiarowej pionowej w funkcji czasu dla przęsła łącznicy dojazdowej;
 - linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $\rho_B = 2600 \text{ kg/m}^3$)



Rys. Z.12. Rozkład temperatur w przekroju poprzecznym przęsła łącznicy dojazdowej;
 - linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $\rho_B = 2600 \text{ kg/m}^3$)

• Wnioski

1. Wyższa gęstość wpływa na zmniejszenie różnicy temperatury ΔT_{wz} między środkiem i powierzchnią zewnętrzną elementu oraz wydłuża czas jej wystąpienia. Związane jest to ze wzrostem akumulacji ciepłej betonu (patrz p. 2.2.4). Czas wystąpienia temperatury maksymalnej, oraz zakończonej analizy wraz z podaną temperaturą zestawiono w tab. Z.1.

Tablica Z.1. Zestawienie czasu wystąpienia maksymalnej różnicy temperatury z podaną temperaturą, oraz różnicy temperatur po zakończonej analizie

Element	Gęstość objętościowa betonu [kg/m^3]					
	2200		2400		2600	
	Czas	Temp	Czas	Temp	Czas	Temp
Filar	45 h	42 °C	47 h	39 °C	49 h	37 °C
	168h	15 °C	168h	16 °C	168h	17 °C
Łącznica	45 h	46 °C	47 h	43 °C	50 h	40 °C
	168h	24 °C	168h	24 °C	168h	25 °C

2. Wyższa gęstość wpływa na zmniejszenie maksymalnej temperatury wewnętrznej i wydłuża czas jej wystąpienia.
3. Wyższa gęstość o 200 kg/m^3 , powoduje spadek maksymalnej różnicy temperatur ΔT_{wz} , średnio dla filara i przęśła łącznicy o 3°C .
4. Maksymalna różnica temperatur, występuje w fazie spadku temperatur, tzn. po czasie, wystąpienia maksymalnej temperatury wewnętrznej elementu.

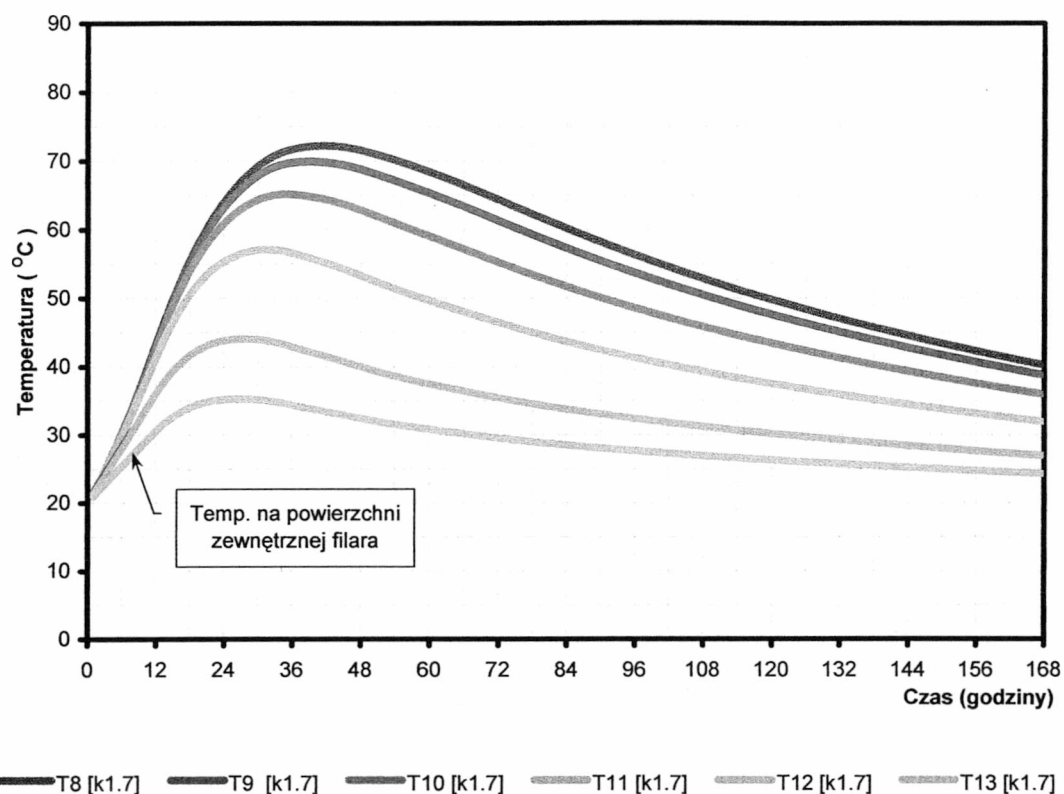
Z.3. Wpływ współczynnika przewodności cieplnej betonu

Celem analizy jest określenie wpływu wartości współczynnika przewodności cieplnej betonu na różnicę temperatur ΔT_{wz} między środkiem i powierzchnią zewnętrzną elementu oraz wzrost lub obniżenie maksymalnej temperatury wewnętrznej elementu.

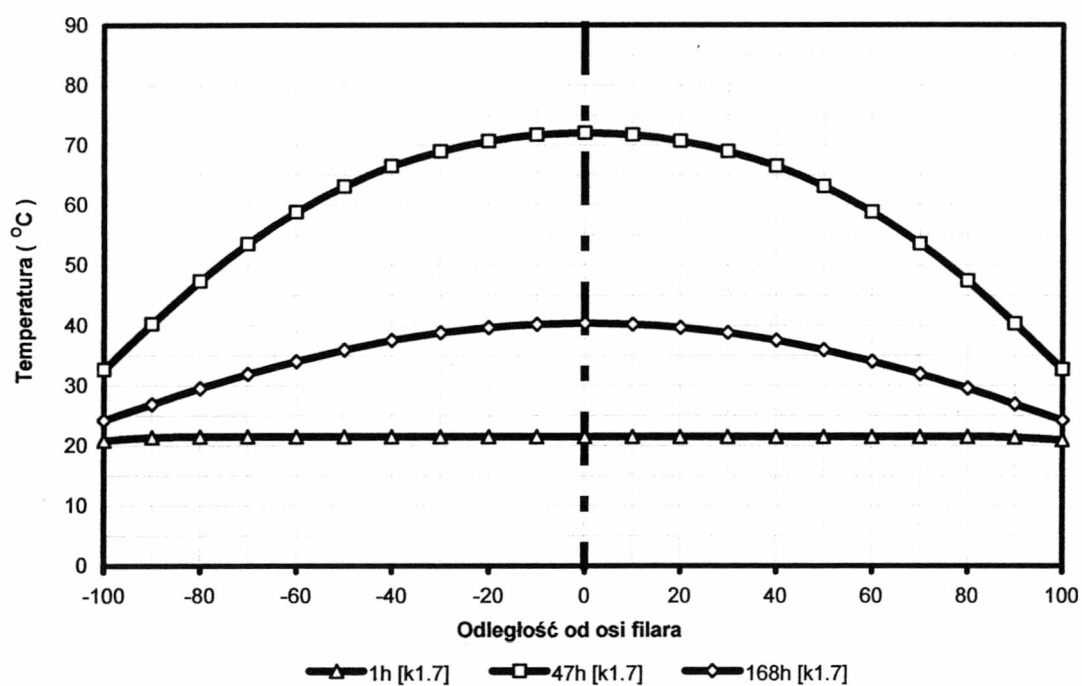
Współczynnik przewodności cieplnej betonu analizowano od wartości $1.7 [\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})]$ w interwale, co $0.2 [\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})]$ do $2.5 [\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})]$.

Wartości współczynników termofizycznych materiałów wykorzystanych w analizie zestawiono w tablicy 5.1. Stałą temperaturę powietrza, początkową temperaturę mieszanki betonowej oraz stałą wartość powierzchniowego współczynnika przejmowania ciepła, zestawiono w tab. 5.2.

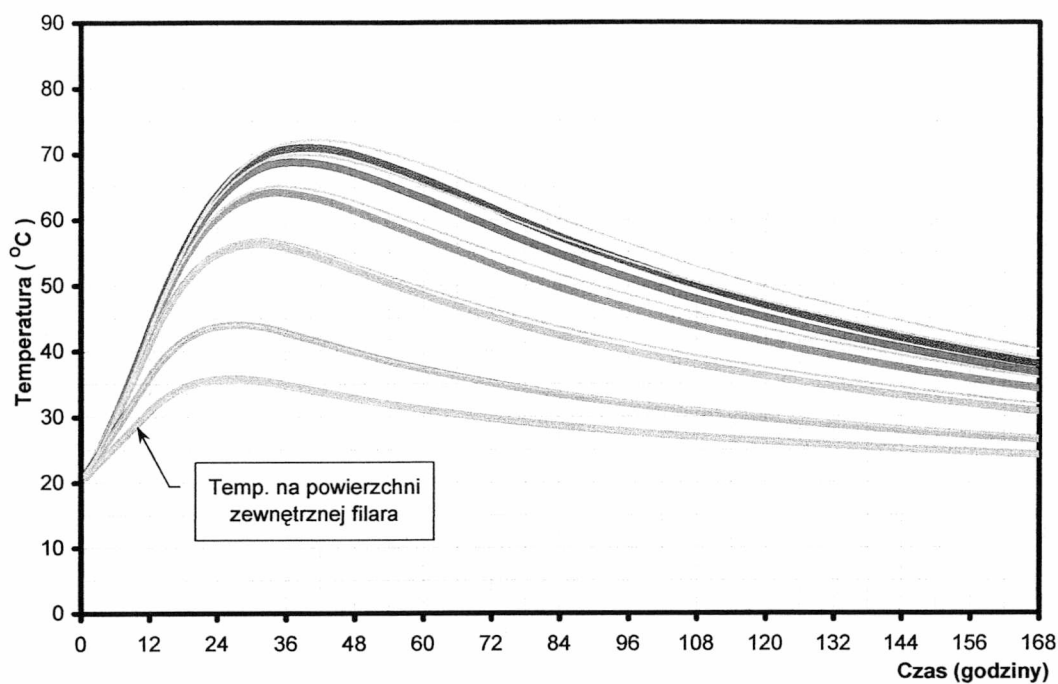
• Wyniki obliczeń dla filara



Rys. Z.13. Wartości temperatur w funkcji czasu obliczone w filarze betonowym średnicy $\phi = 2$ m, (rys. 5.1 a – $k_B = 1.7 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$)

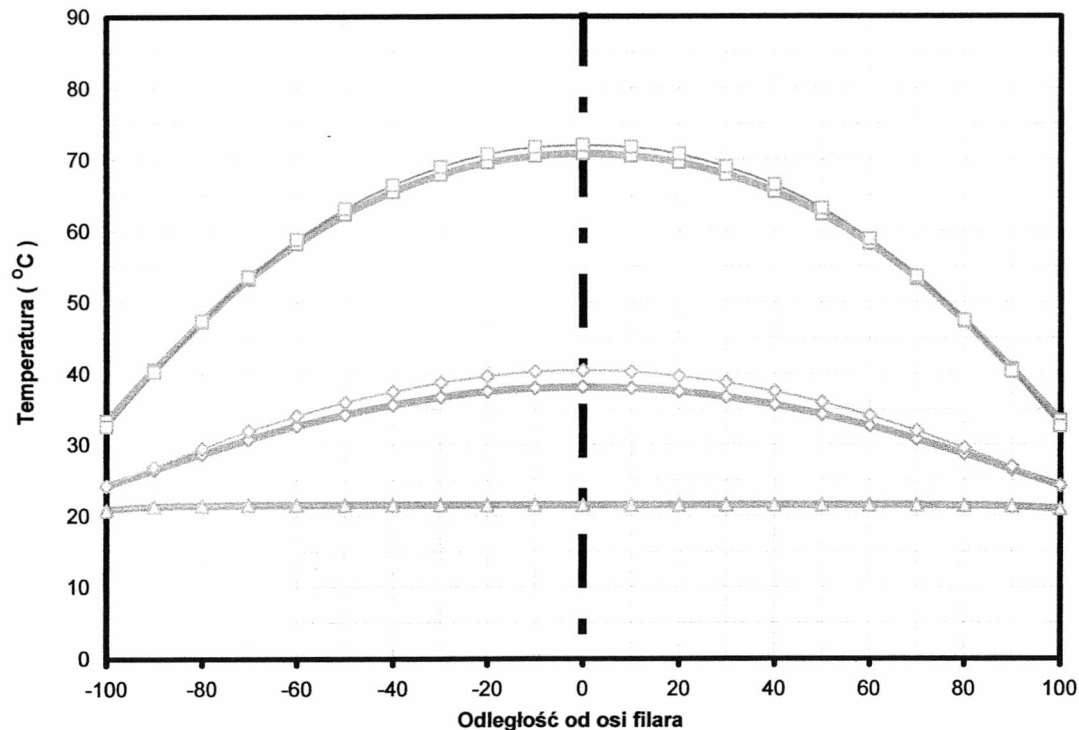


Rys. Z.14. Rozkład temperatur w filarze betonowym wzdłuż osi środkowej, (rys. 5.1 a – $k_B = 1.7 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$)



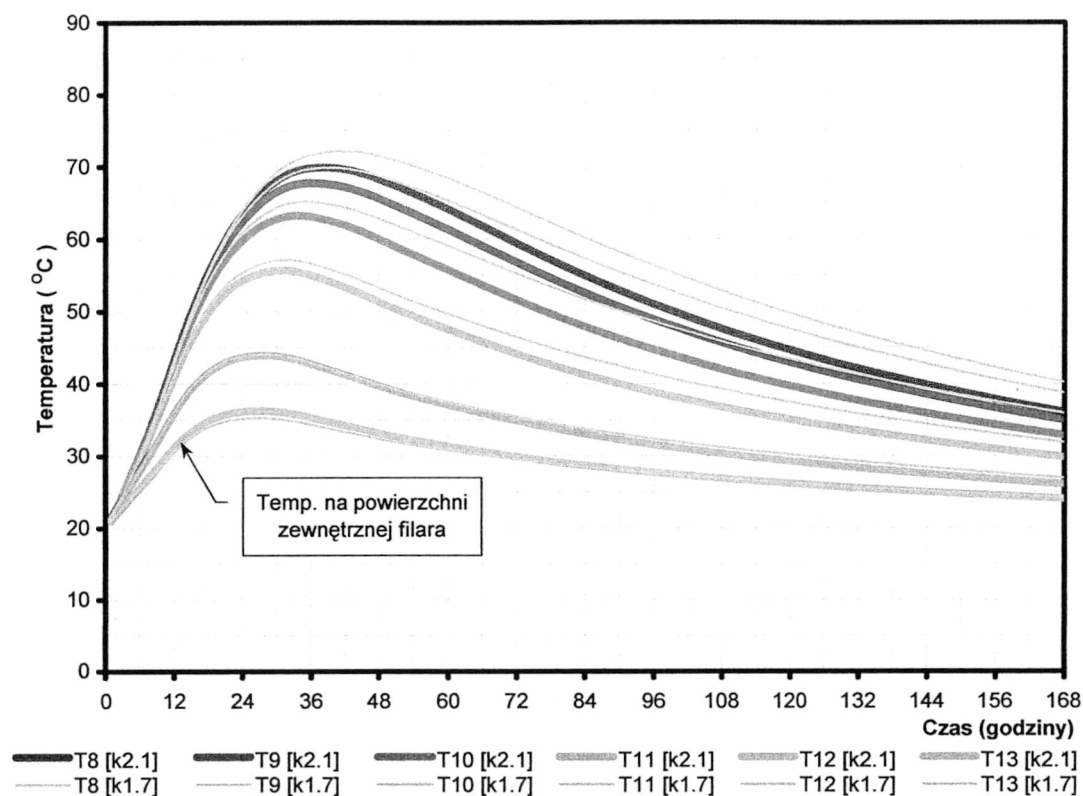
— T8 [k1.9] — T9 [k1.9] — T10 [k1.9] — T11 [k1.9] — T12 [k1.9] — T13 [k1.9]
 — T8 [k1.7] — T9 [k1.7] — T10 [k1.7] — T11 [k1.7] — T12 [k1.7] — T13 [k1.7]

Rys. Z.15. Wartości temperatur w funkcji czasu obliczone w filarze betonowym średnicy $\phi = 2$ m, (rys. 5.1 a – $k_B = 1.9 \text{ W/(m}^0\text{C)}$)

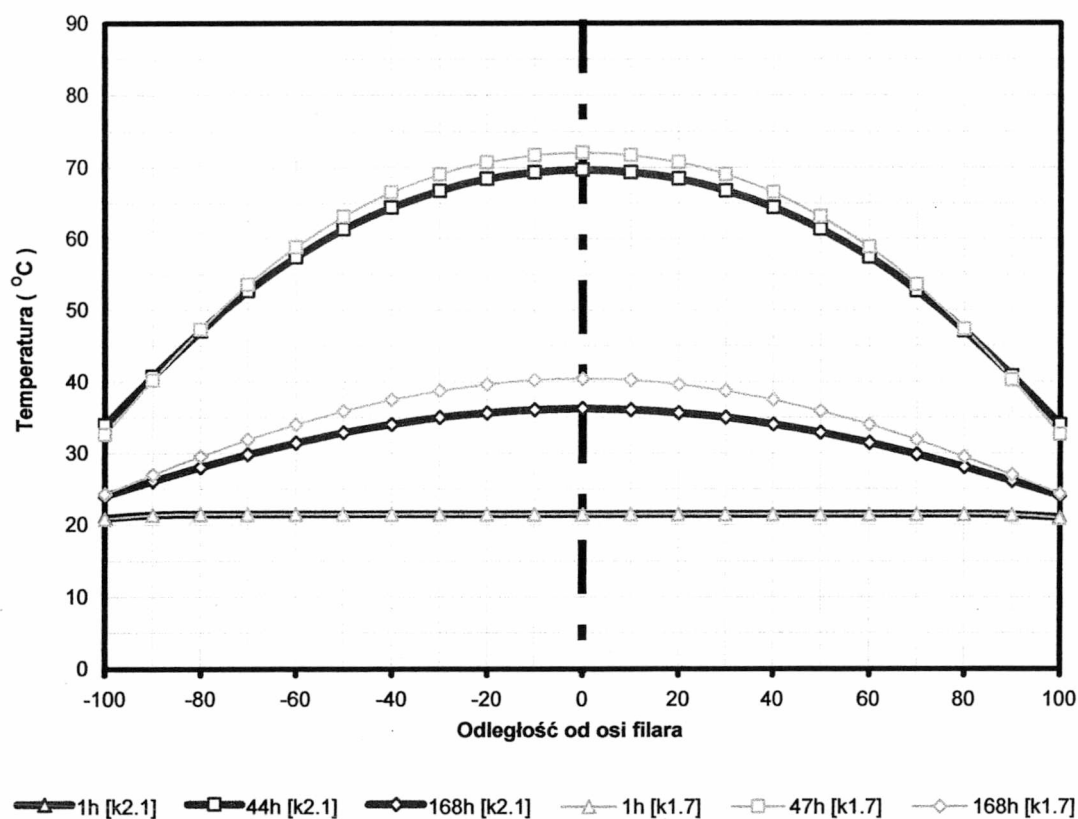


—△— 1h [k1.9] —□— 45h [k1.9] —◇— 168h [k1.9] —△— 1h [k1.7] —□— 45h [k1.7] —◇— 168h [k1.7]

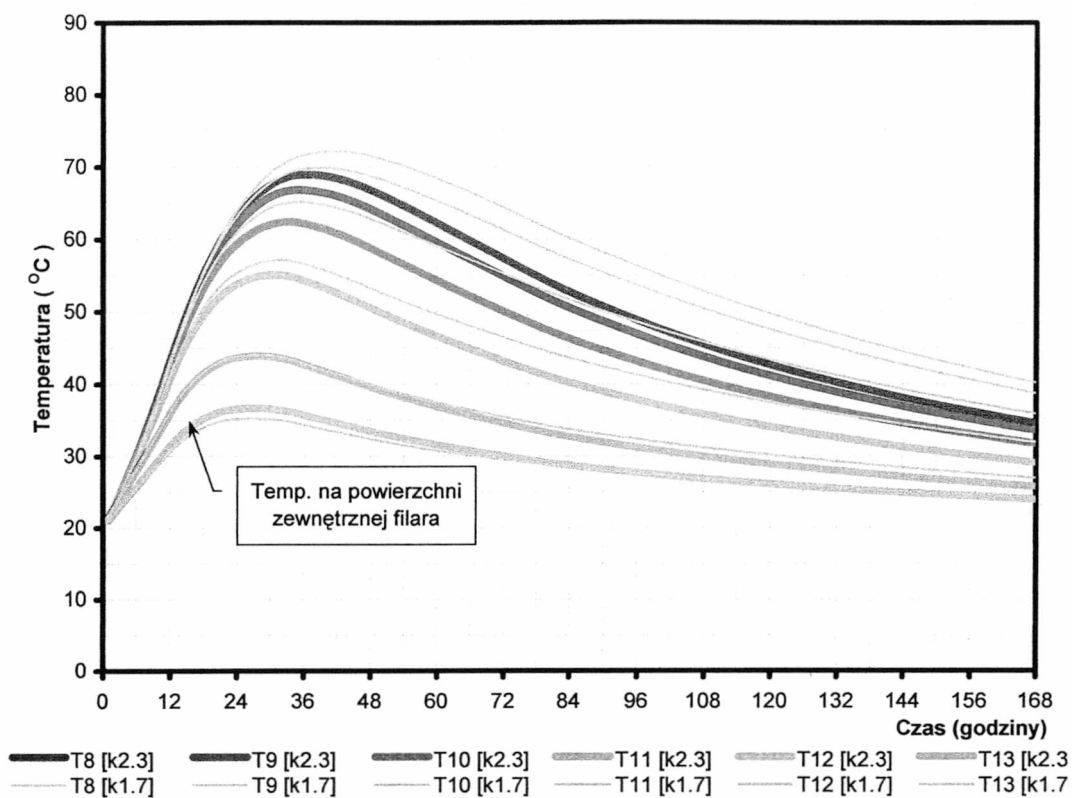
Rys. Z.16. Rozkład temperatur w filarze betonowym wzdłuż osi środkowej, (rys. 5.1 a – $k_B = 1.9 \text{ W/(m}^0\text{C)}$)



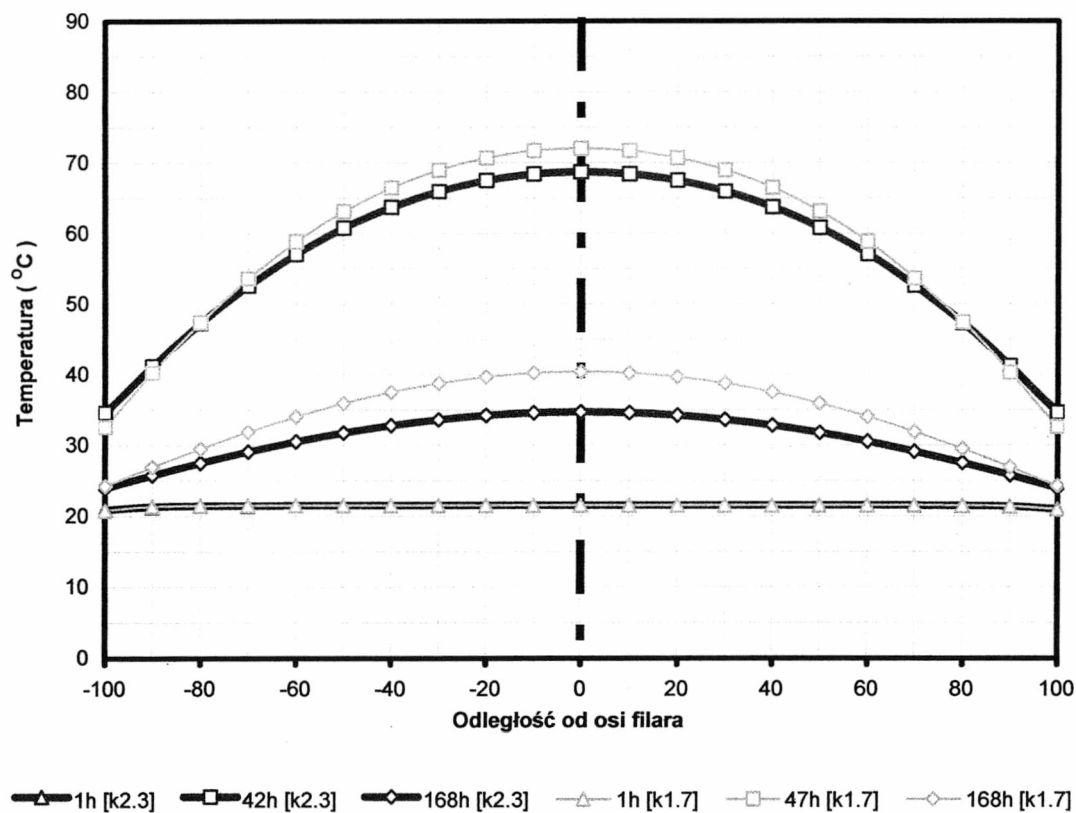
Rys. Z.17. Wartości temperatur w funkcji czasu obliczone w filarze betonowym średnicy $\phi = 2$ m, (rys. 5.1 a – $k_B = 2.1 \text{ W/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$)



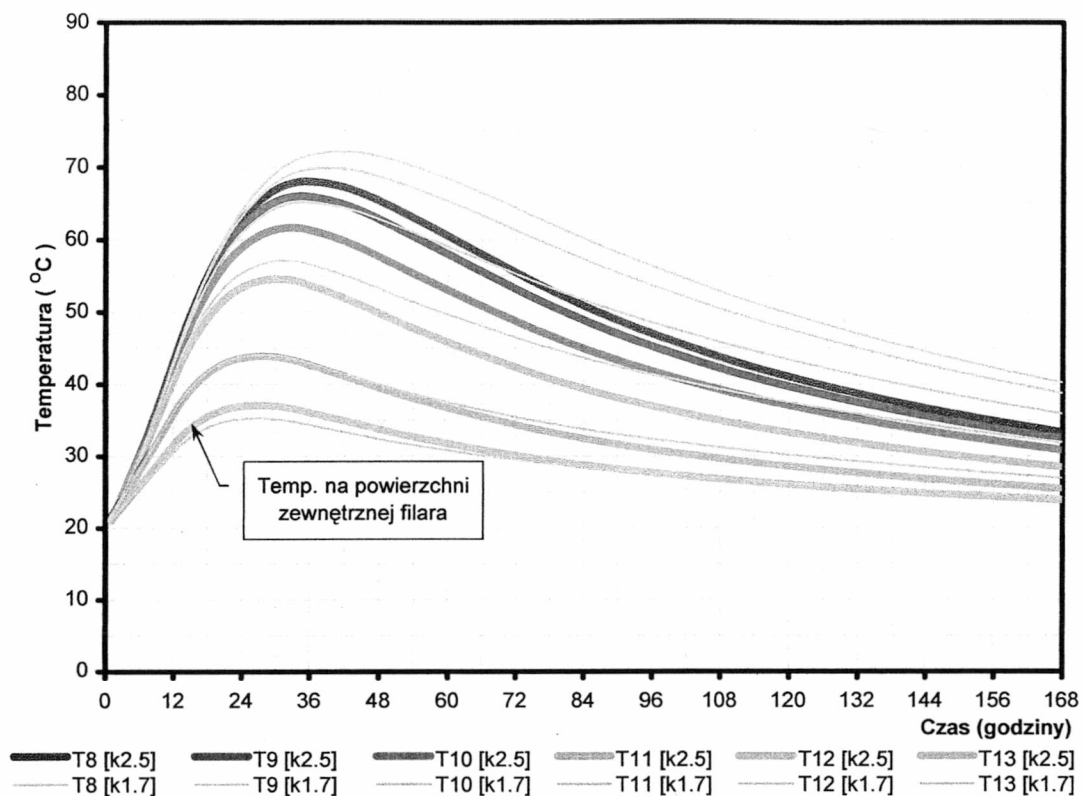
Rys. Z.18. Rozkład temperatur w filarze betonowym wzdłuż osi środkowej, (rys. 5.1 a – $k_B = 2.1 \text{ W/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$)



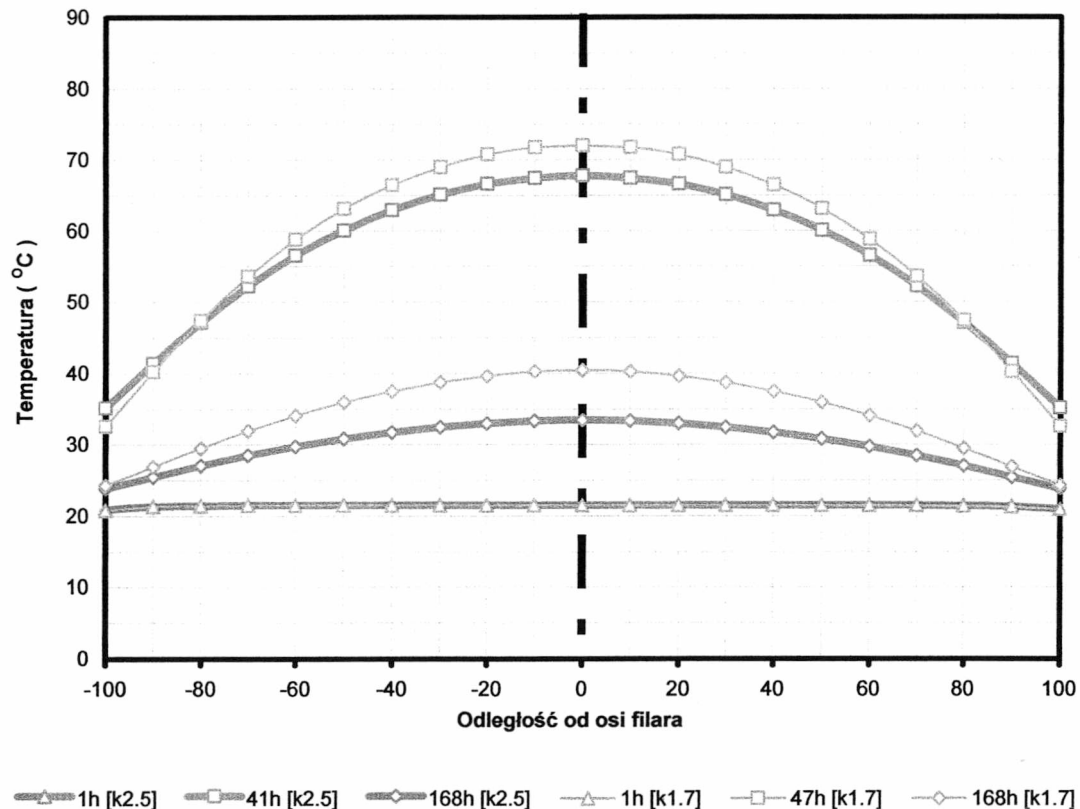
Rys. Z.19. Wartości temperatur w funkcji czasu obliczone w filarze betonowym średnicy $\phi = 2$ m, (rys. 5.1 a – $k_B = 2.3 \text{ W/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$)



Rys. Z.20. Rozkład temperatur w filarze betonowym wzdłuż osi środkowej, (rys. 5.1 a – $k_B = 2.3 \text{ W/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$)

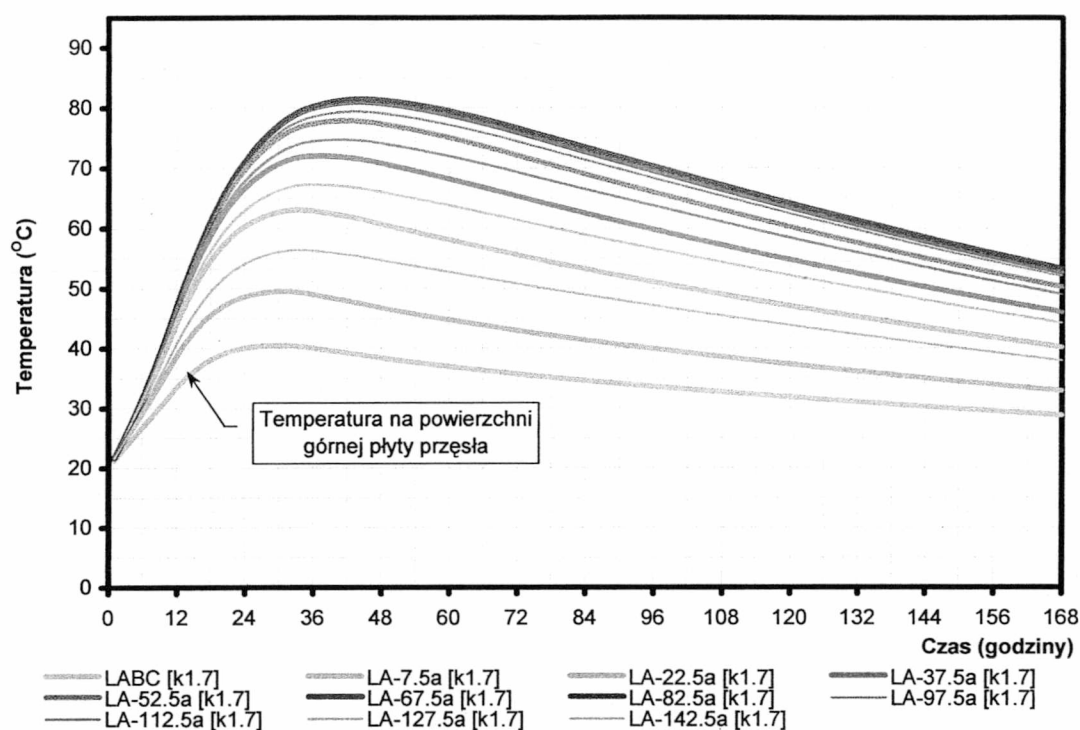


Rys. Z.21. Wartości temperatur w funkcji czasu obliczone w filarze betonowym średnicy $\phi = 2$ m, (rys. 5.1 a – $k_B = 2.5 \text{ W/(m}^0\text{C)}$)

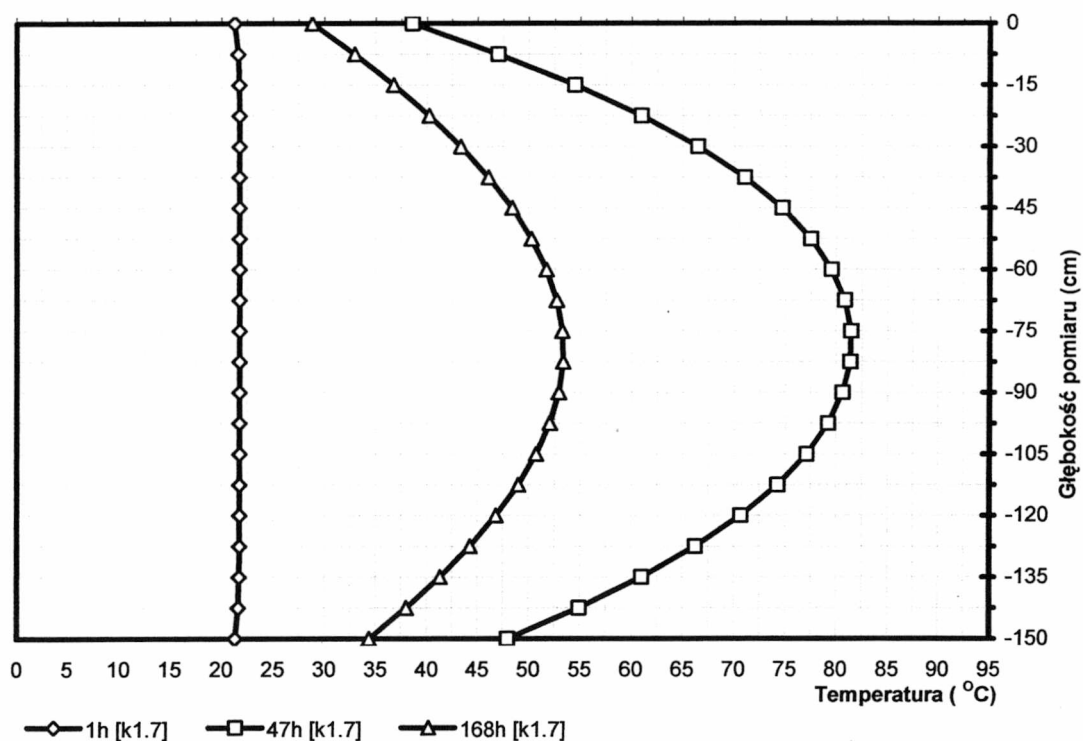


Rys. Z.22. Rozkład temperatur w filarze betonowym wzdłuż osi środkowej, (rys. 5.1 a – $k_B = 2.5 \text{ W/(m}^0\text{C)}$)

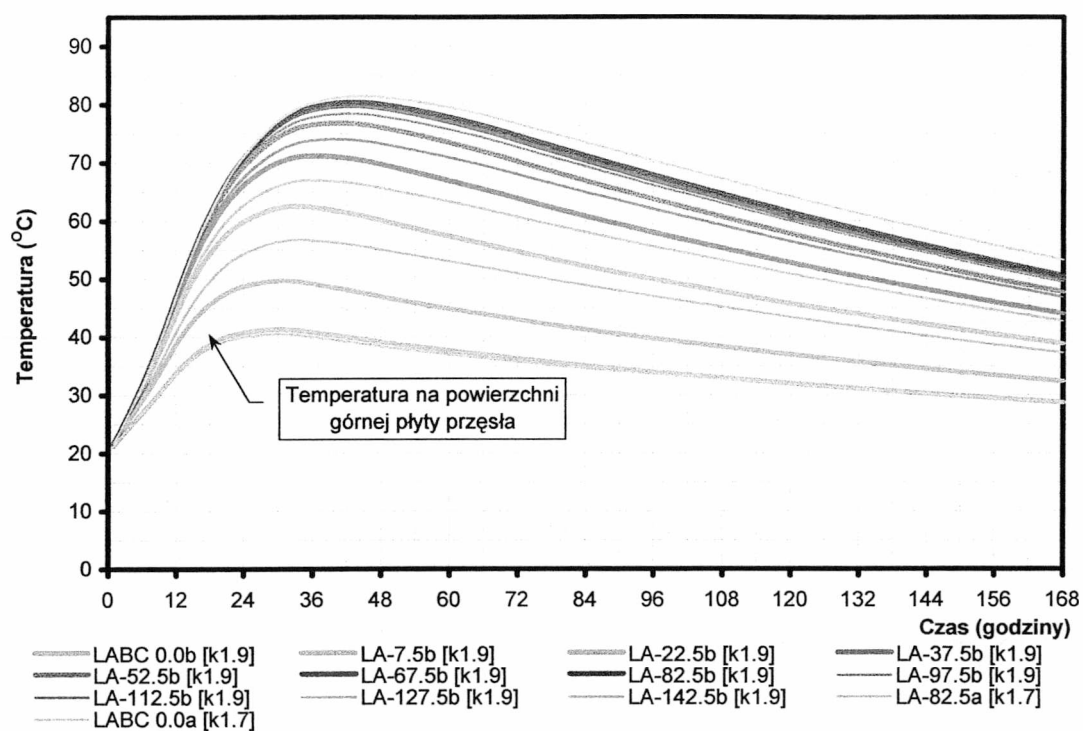
• Wyniki obliczeń dla przęsła łącznicy dojazdowej do estakady głównej



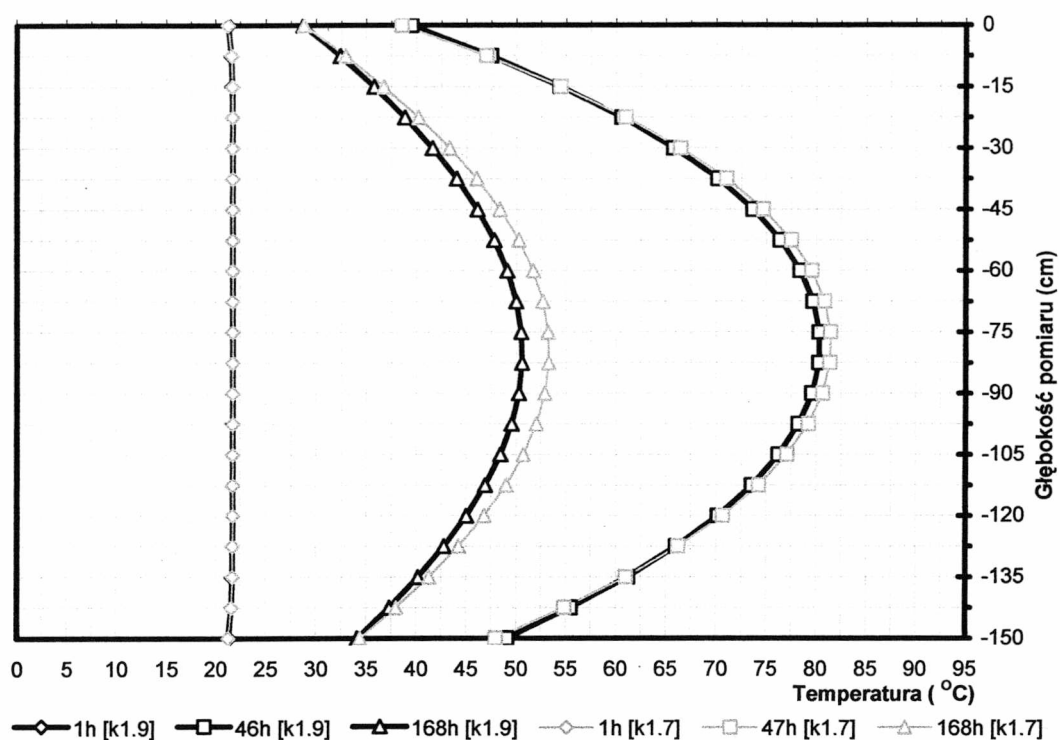
Rys. Z.23. Wartości temperatur w poszczególnych punktach osi pomiarowej pionowej w funkcji czasu dla przęsła łącznicy dojazdowej;
- linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $k_B = 1.7 \text{ W/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$)



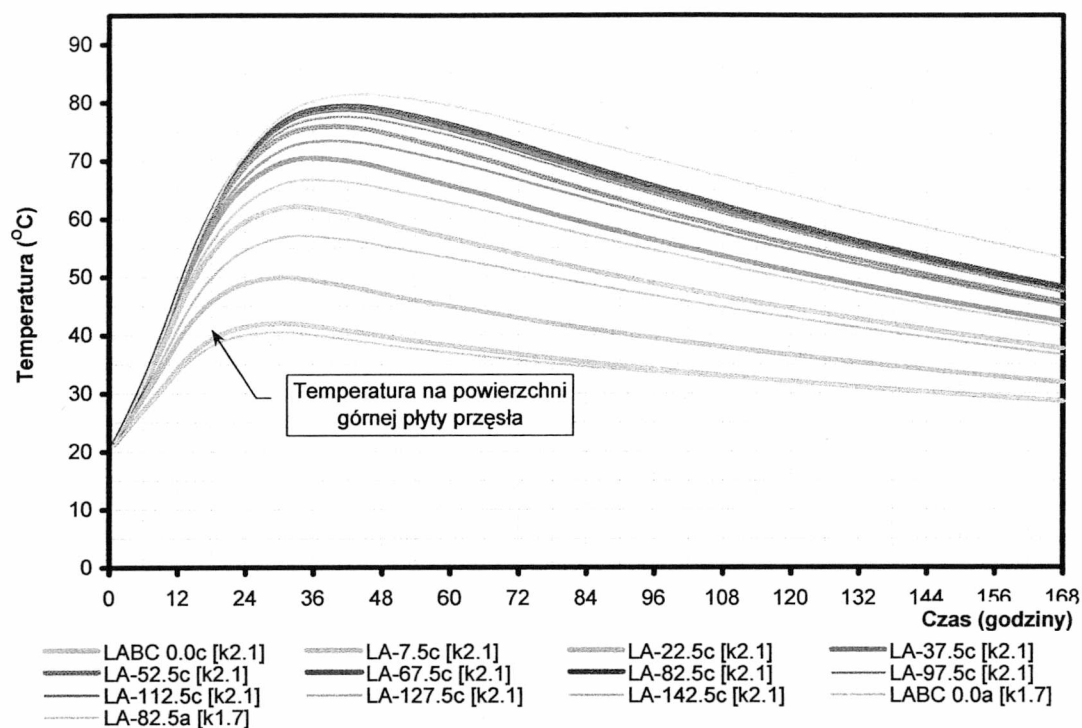
Rys. Z.24. Rozkład temperatur w przekroju poprzecznym przęsła łącznicy dojazdowej;
- linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $k_B = 1.7 \text{ W/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$)



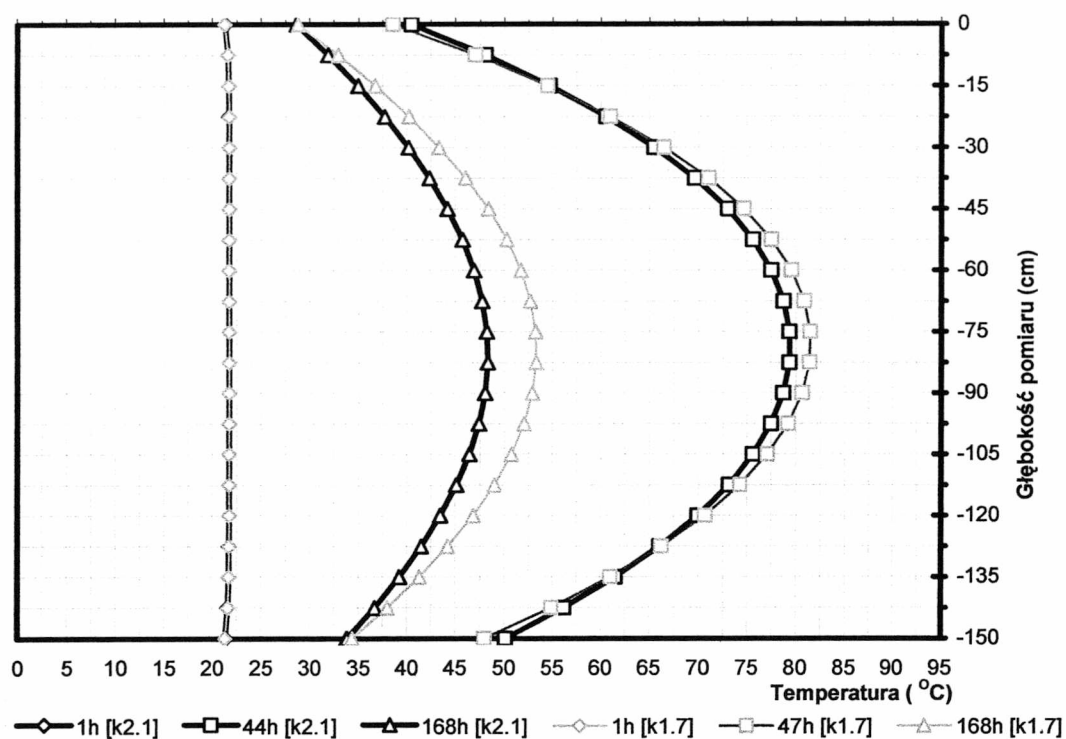
Rys. Z.25. Wartości temperatur w poszczególnych punktach osi pomiarowej pionowej w funkcji czasu dla przęsła łącznicy dojazdowej;
- linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $k_B = 1.9 \text{ W/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$)



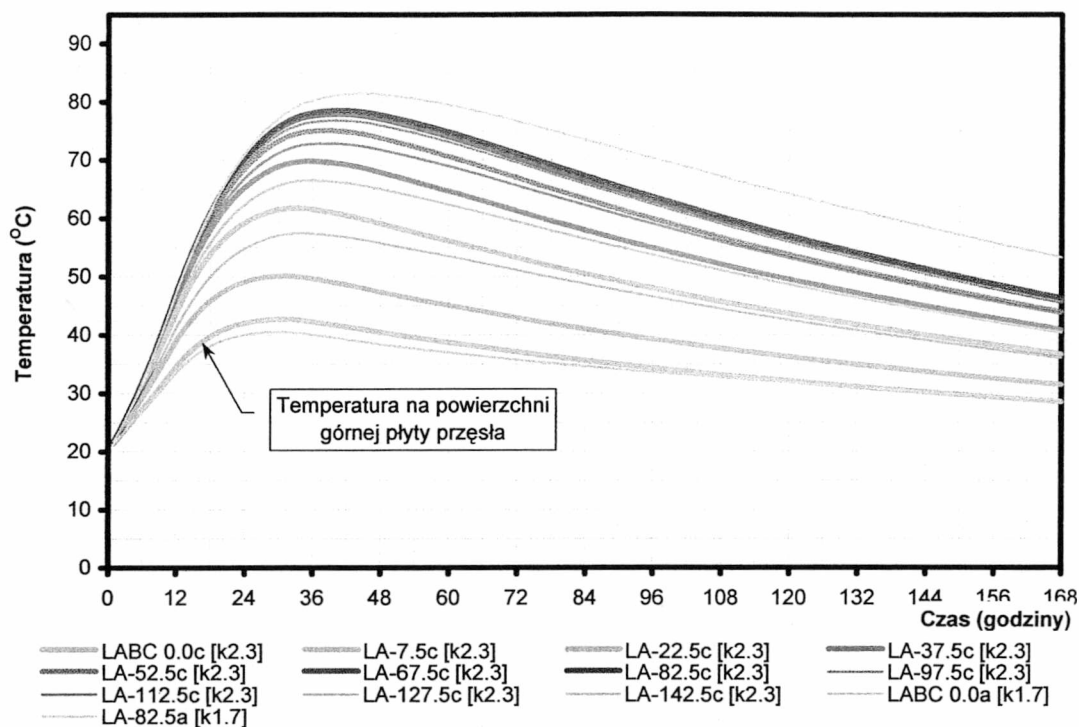
Rys. Z.26. Rozkład temperatur w przekroju poprzecznym przęsła łącznicy dojazdowej;
- linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $k_B = 1.9 \text{ W/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$)



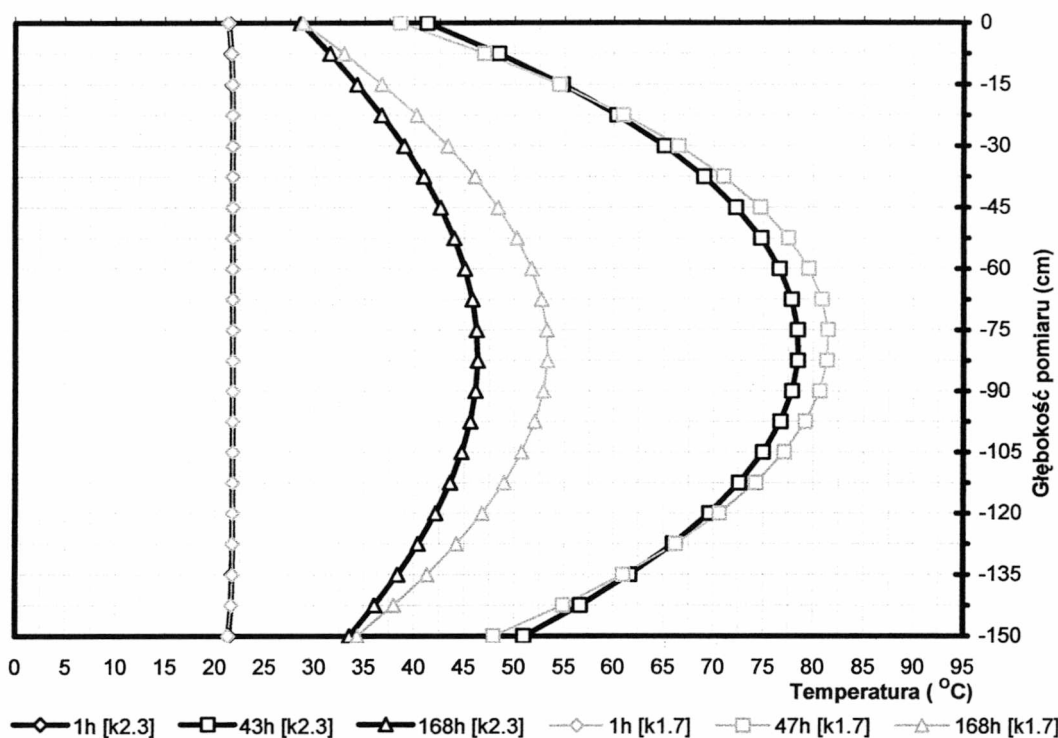
Rys. Z.27. Wartości temperatur w poszczególnych punktach osi pomiarowej pionowej w funkcji czasu dla przęsła łącznicy dojazdowej;
 - linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $k_B = 2.1 \text{ W/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$)



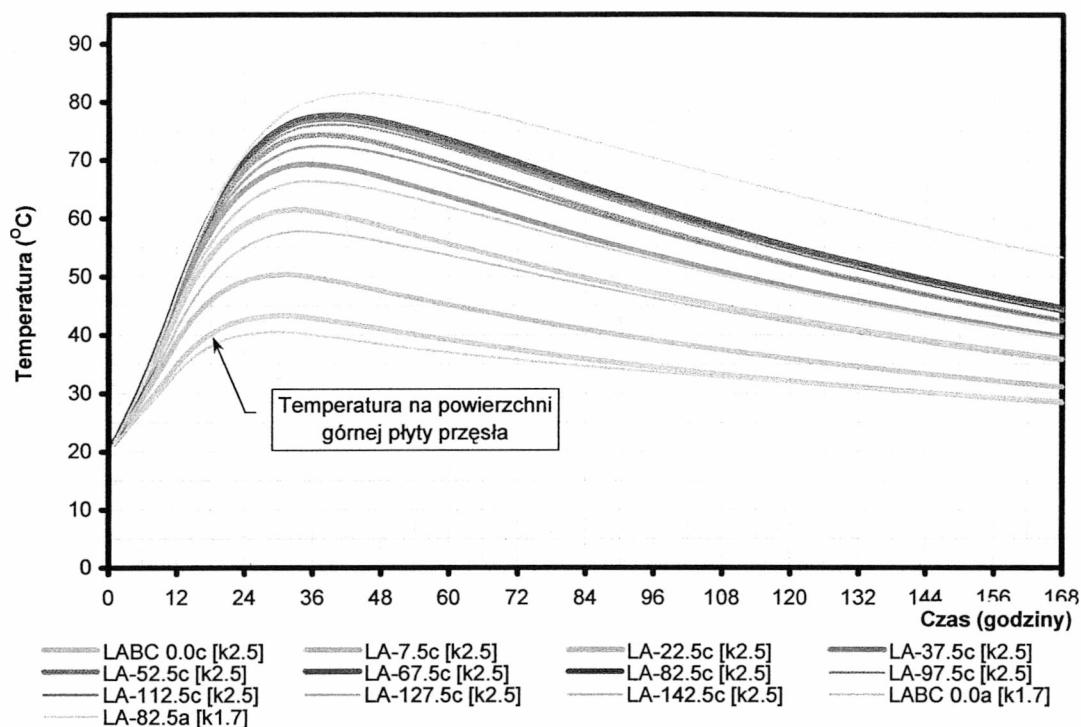
Rys. Z.28. Rozkład temperatur w przekroju poprzecznym przęsła łącznicy dojazdowej;
 - linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $k_B = 2.1 \text{ W/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$)



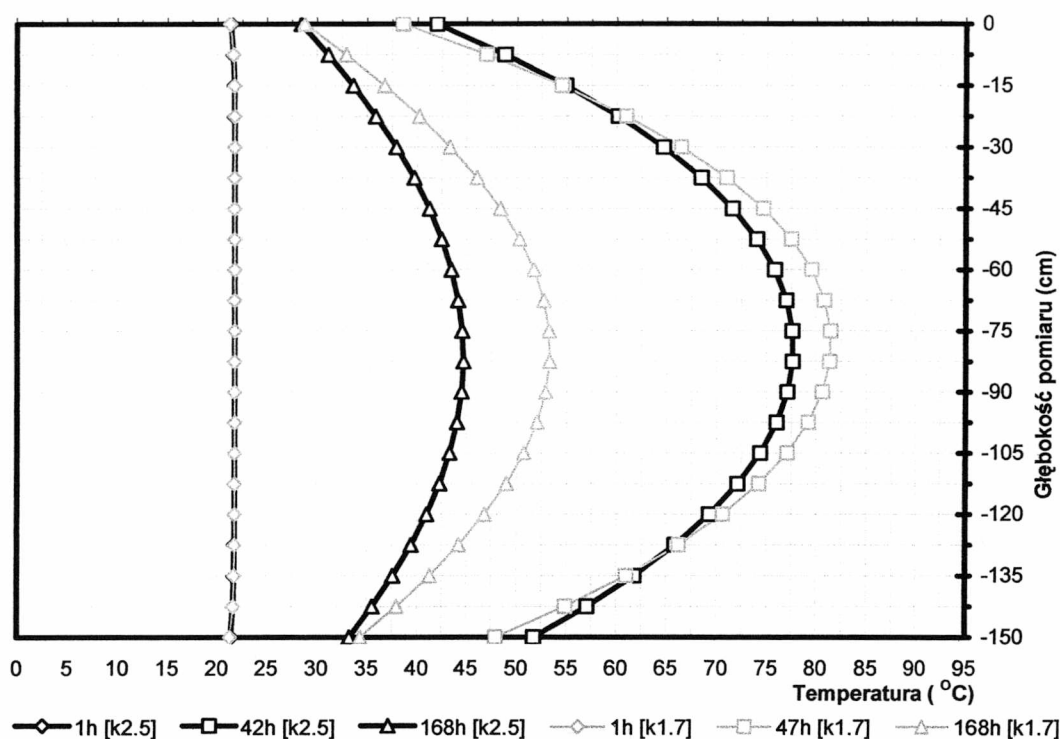
Rys. Z.29. Wartości temperatur w poszczególnych punktach osi pomiarowej pionowej w funkcji czasu dla przęsła łącznicy dojazdowej;
 - linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $k_B = 2.3 \text{ W/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$)



Rys. Z.30. Rozkład temperatur w przekroju poprzecznym przęsła łącznicy dojazdowej;
 - linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $k_B = 2.3 \text{ W/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$)



Rys. Z.31. Wartości temperatur w poszczególnych punktach osi pomiarowej pionowej w funkcji czasu dla przęsła łącznicy dojazdowej;
- linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $k_B = 2.5 \text{ W/(m}^0\text{C)}$)



Rys. Z.32. Rozkład temperatur w przekroju poprzecznym przęsła łącznicy dojazdowej;
- linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $k_B = 2.5 \text{ W/(m}^0\text{C)}$)

• Wnioski

1. Wzrost współczynnika powoduje spadek maksymalnej różnicy temperatur ΔT_{wz} między środkiem i powierzchnią zewnętrzną elementu oraz skraca czas jej wystąpienia. Związane jest to z szybszym odprowadzeniem ciepła z elementu. Czas wystąpienia temperatury maksymalnej oraz zakończonej analizy wraz z podaną temperaturą zestawiono w tab. Z.2.

Tablica Z.2. Zestawienie czasu wystąpienia maksymalnej różnicy temperatury z podaną temperaturą, oraz różnicy temperatur po zakończonej analizie

Element	Współczynnik przewodności cieplnej betonu [$W/(m \cdot ^\circ C)$]									
	1.7		1.9		2.1		2.3		2.5	
	Czas	Tem p	Czas	Tem p	Czas	Tem p	Czas	Tem p	Czas	Tem p
Filar	47 h	39 $^\circ C$	45 h	37 $^\circ C$	44 h	36 $^\circ C$	42 h	34 $^\circ C$	41 h	33 $^\circ C$
	168h	16 $^\circ C$	168h	14 $^\circ C$	168h	12 $^\circ C$	168h	11 $^\circ C$	168h	10 $^\circ C$
Łącznica	47 h	43 $^\circ C$	46 h	41 $^\circ C$	44 h	39 $^\circ C$	43 h	37 $^\circ C$	42 h	36 $^\circ C$
	168h	24 $^\circ C$	168h	22 $^\circ C$	168h	20 $^\circ C$	168h	18 $^\circ C$	168h	16 $^\circ C$

2. Wzrost współczynnika powoduje spadek maksymalnej temperatury wewnętrznej i skraca czas jej wystąpienia.
3. Wzrost współczynnika o 0.2 [$W/(m \cdot ^\circ C)$], powoduje spadek maksymalnej różnicy temperatur ΔT_{wz} dla obydwu elementów o średnio 2 $^\circ C$.
4. Maksymalna różnica temperatur występuje w fazie spadku temperatur, tzn. po czasie, wystąpienia maksymalnej temperatury wewnętrznej elementu.

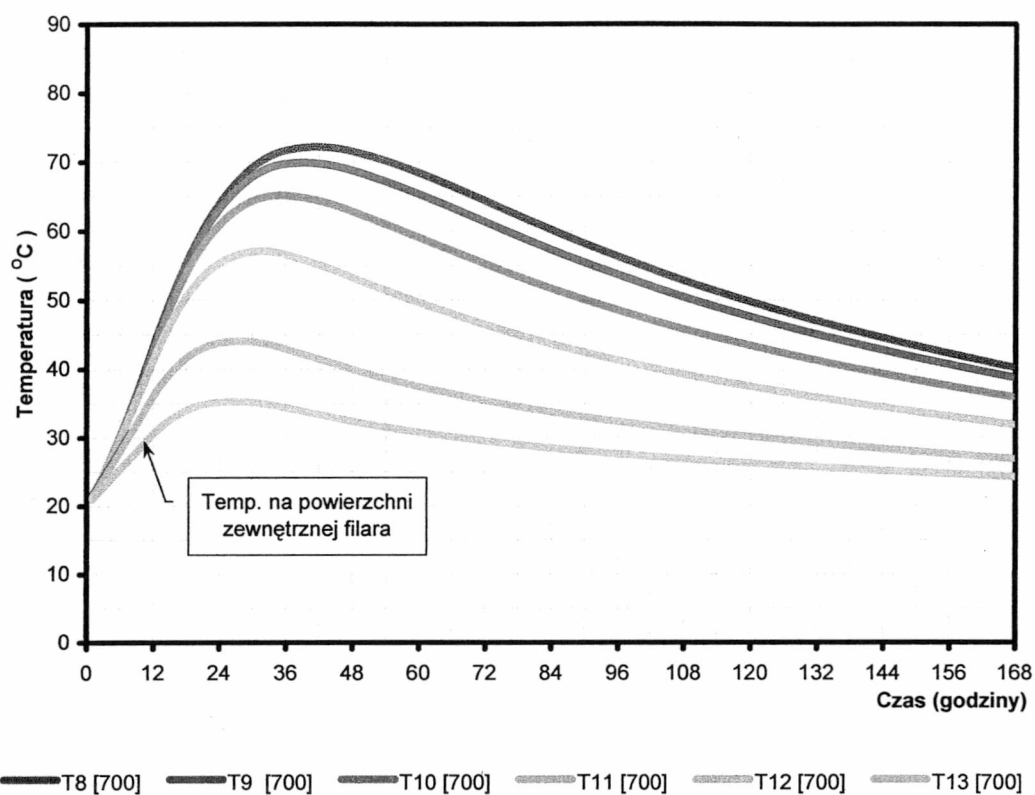
Z.4. Wpływ ciepła właściwego betonu

Celem analizy jest określenie wpływu wartości ciepła właściwego betonu na różnicę temperatur ΔT_{wz} między środkiem i powierzchnią zewnętrzną elementu oraz wzrost lub obniżenie maksymalnej temperatury wewnętrznej elementu.

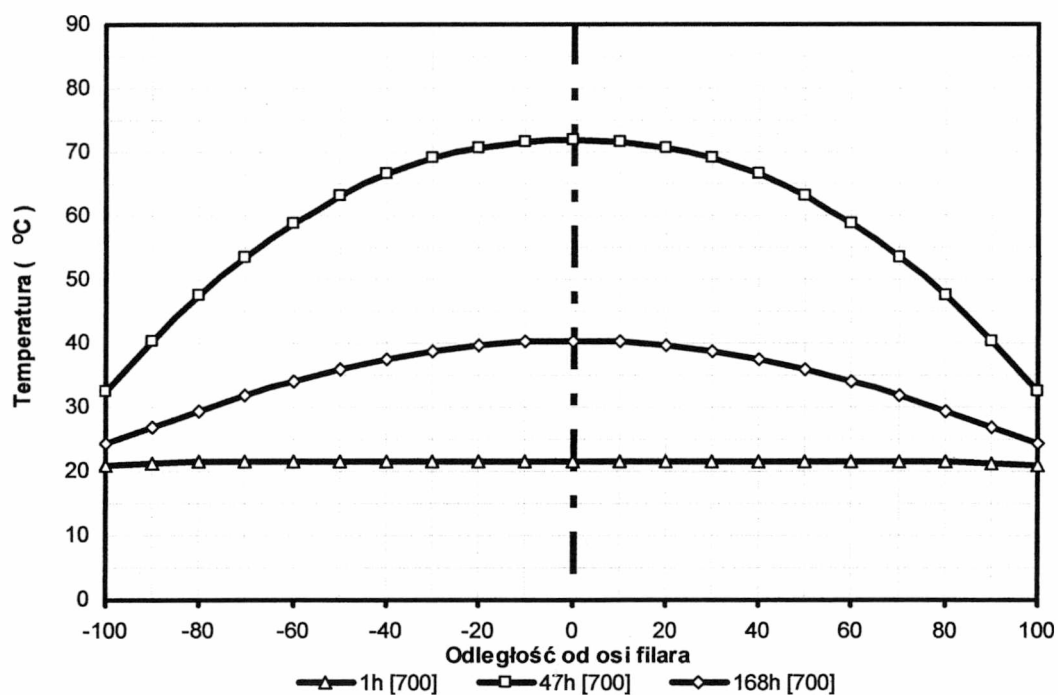
Ciepło właściwe betonu analizowano od wartości 700 [$J/(kg \cdot ^\circ C)$] w interwale, co 100 [$J/(kg \cdot ^\circ C)$] do 1100 [$J/(kg \cdot ^\circ C)$].

Wartości współczynników termofizycznych materiałów wykorzystanych w analizie zestawiono w tablicy 5.1. Stałą temperaturę powietrza, początkową temperaturę mieszanki betonowej oraz stałą wartość powierzchniowego współczynnika przejmowania ciepła, zestawiono w tab. 5.2.

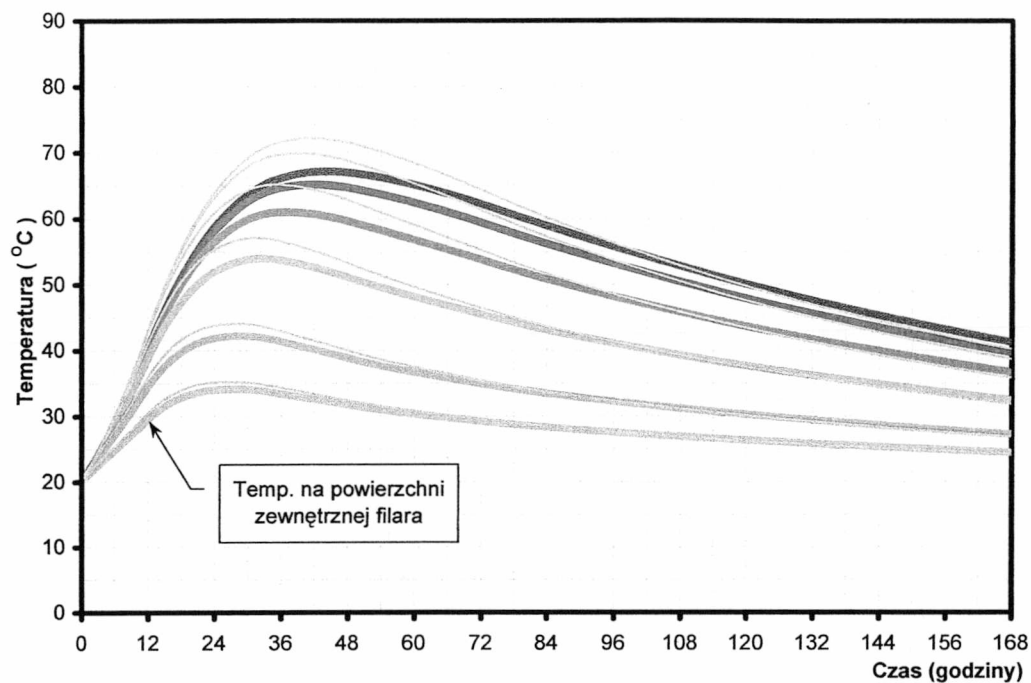
• Wyniki obliczeń dla filara



Rys. Z.33. Wartości temperatur w funkcji czasu obliczone w filarze betonowym średnicy $\phi = 2$ m, (rys. 5.1 a – $c_B = 700 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$)

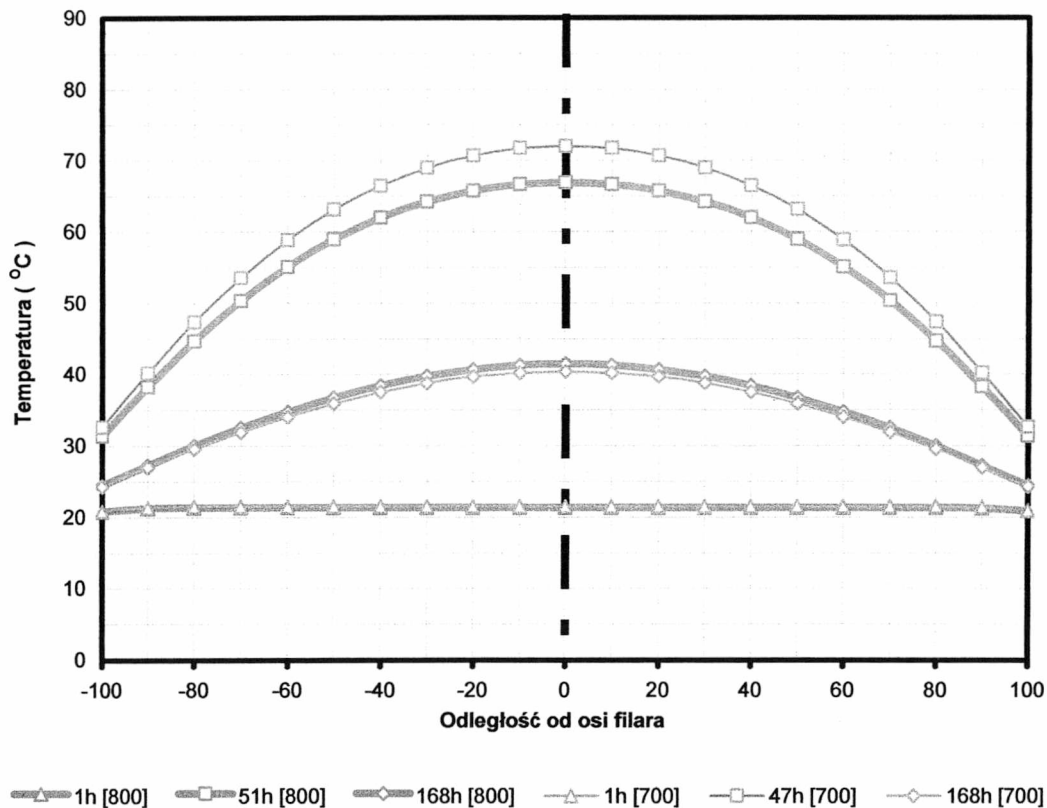


Rys. Z.34. Rozkład temperatur w filarze betonowym wzdłuż osi środkowej, (rys. 5.1 a – $c_B = 700 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$)



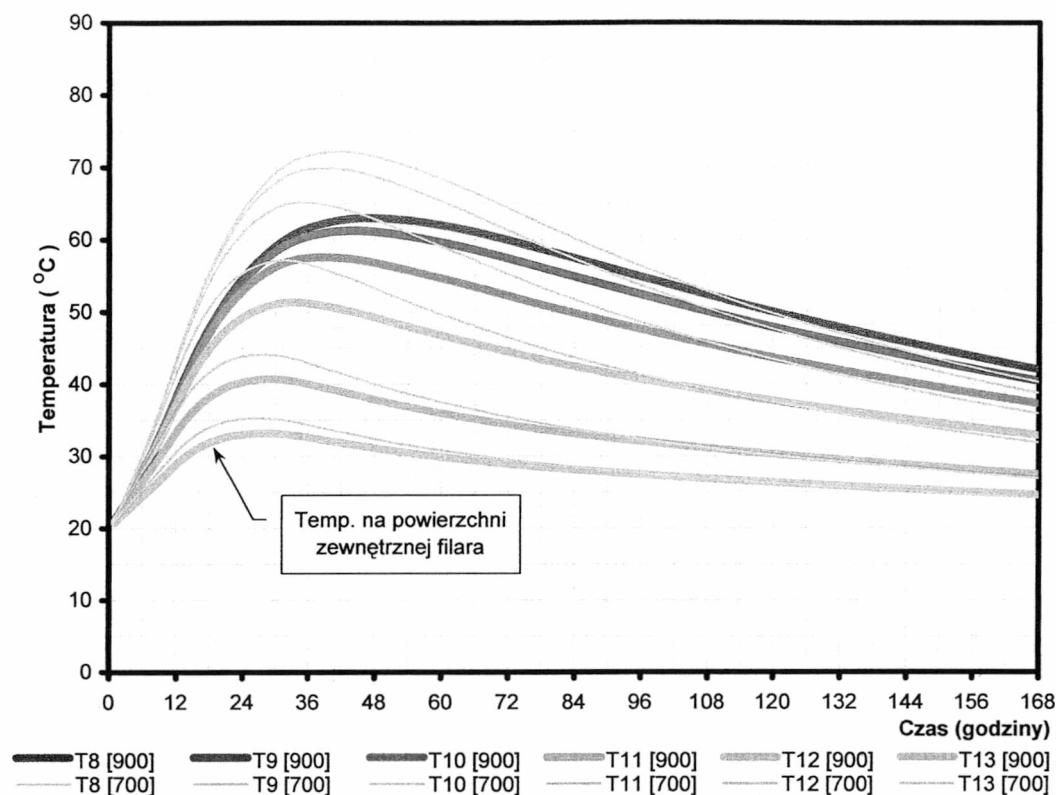
— T8 [800] — T9 [800] — T10 [800] — T11 [800] — T12 [800] — T13 [800]
 — T8 [700] — T9 [700] — T10 [700] — T11 [700] — T12 [700] — T13 [700]

Rys. Z.35. Wartości temperatur w funkcji czasu obliczone w filarze betonowym średnicy $\phi = 2$ m, (rys. 5.1 a – $c_B = 800 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$)

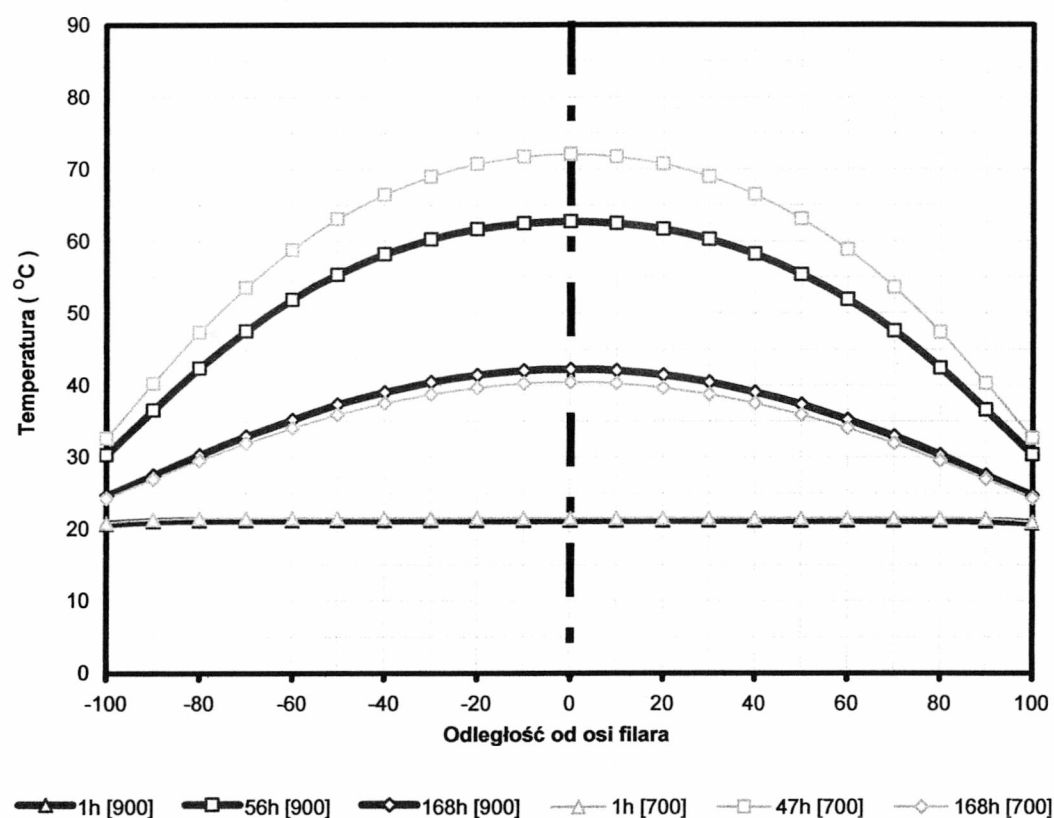


—▲— 1h [800] —■— 51h [800] —◆— 168h [800] —▲— 1h [700] —■— 47h [700] —◆— 168h [700]

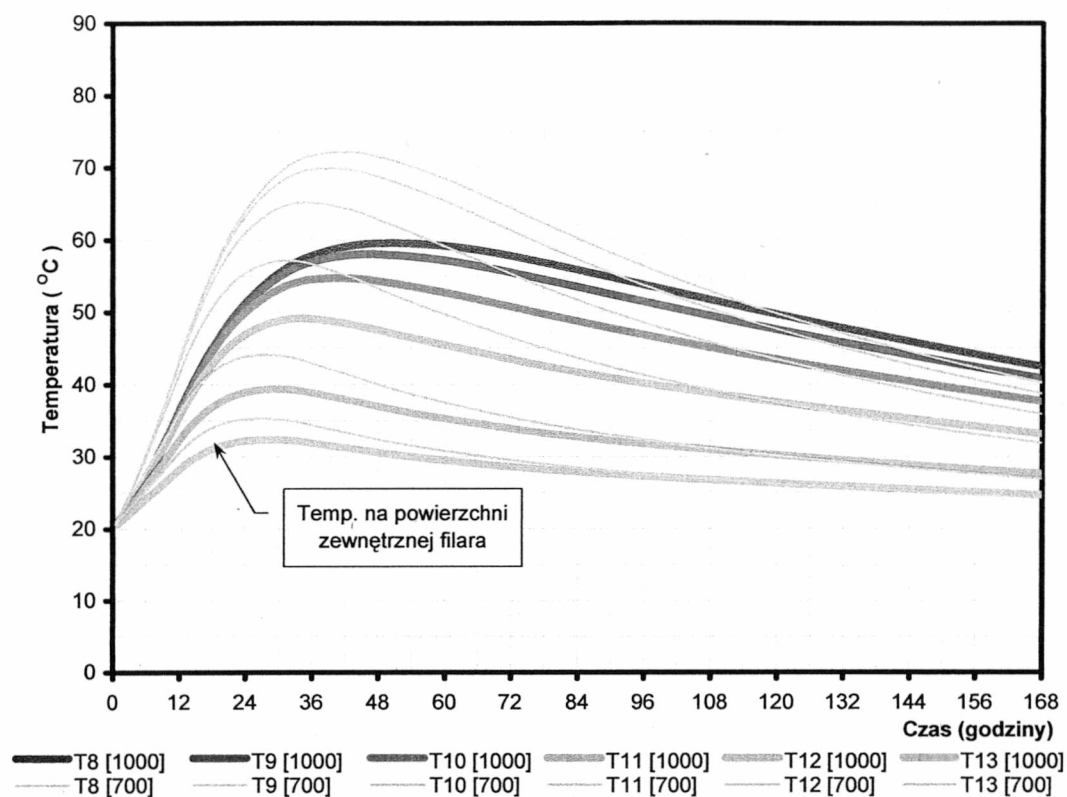
Rys. Z.36. Rozkład temperatur w filarze betonowym wzdłuż osi środkowej, (rys. 5.1 a – $c_B = 800 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$)



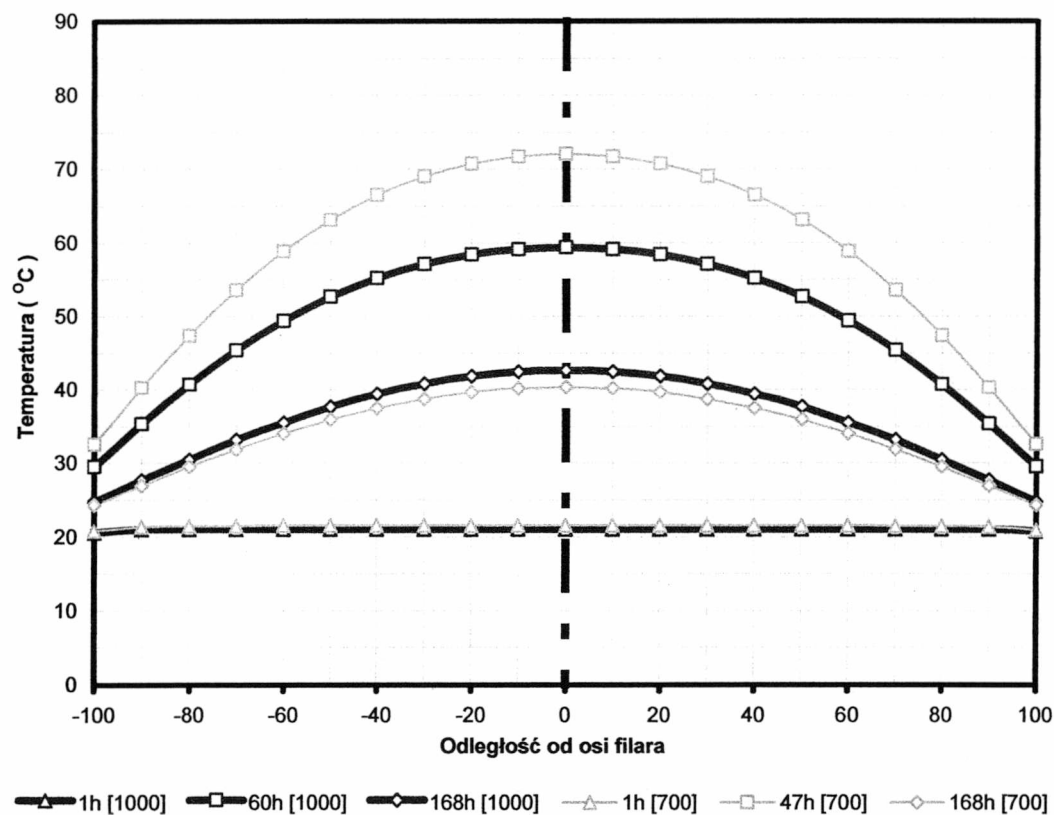
Rys. Z.37. Wartości temperatur w funkcji czasu obliczone w filarze betonowym średnicy $\phi = 2$ m, (rys. 5.1 a – $c_B = 900 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$)



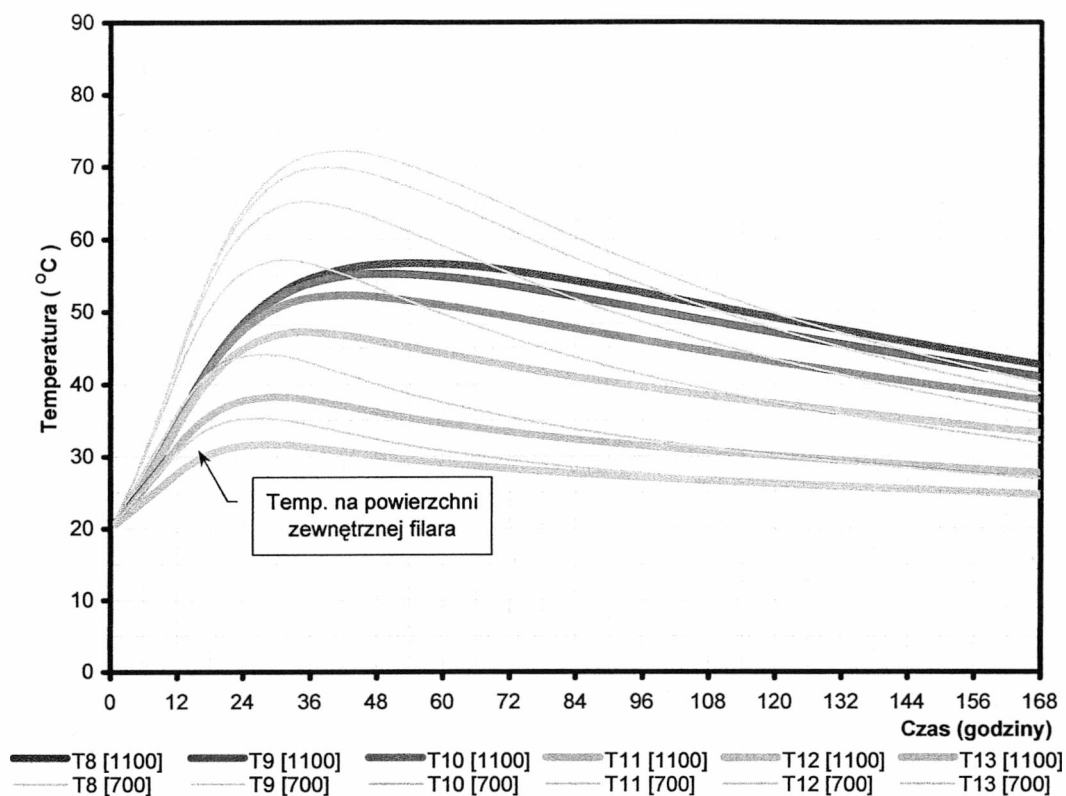
Rys. Z.38. Rozkład temperatur w filarze betonowym wzdłuż osi środkowej, (rys. 5.1 a – $c_B = 900 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$)



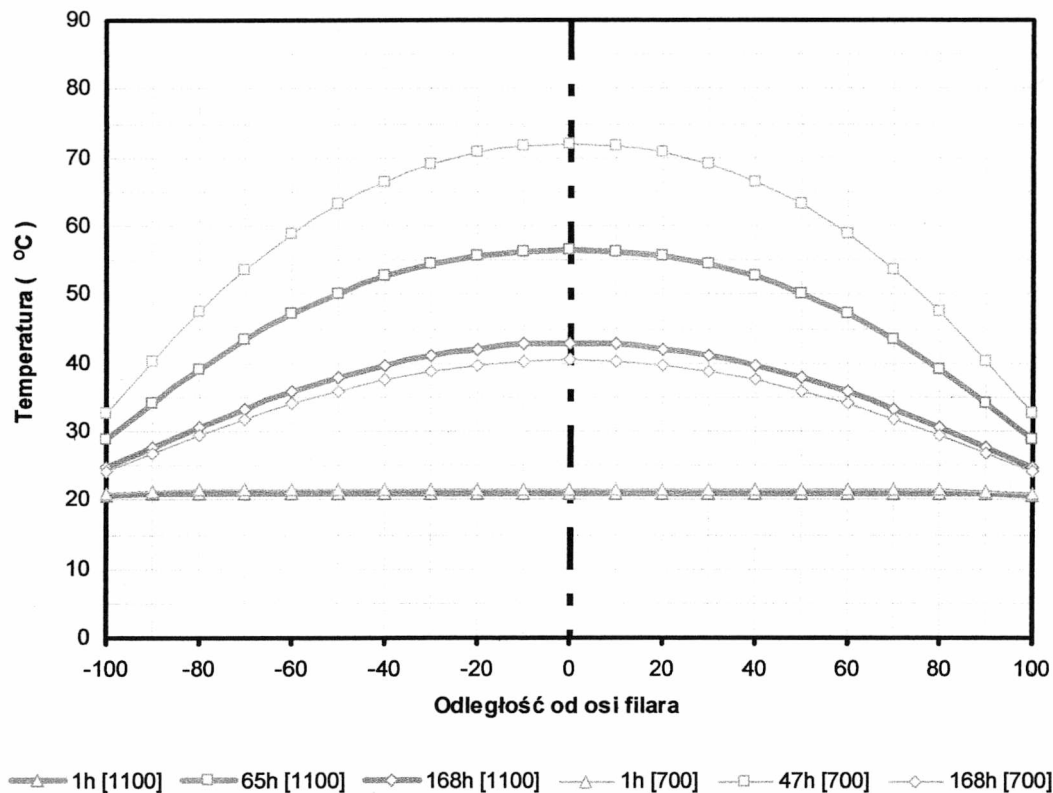
Rys. Z.39. Wartości temperatur w funkcji czasu obliczone w filarze betonowym średnicy $\phi = 2$ m, (rys. 5.1 a – $c_B = 1000 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$)



Rys. Z.40. Rozkład temperatur w filarze betonowym wzdłuż osi środkowej, (rys. 5.1 a – $c_B = 1000 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$)

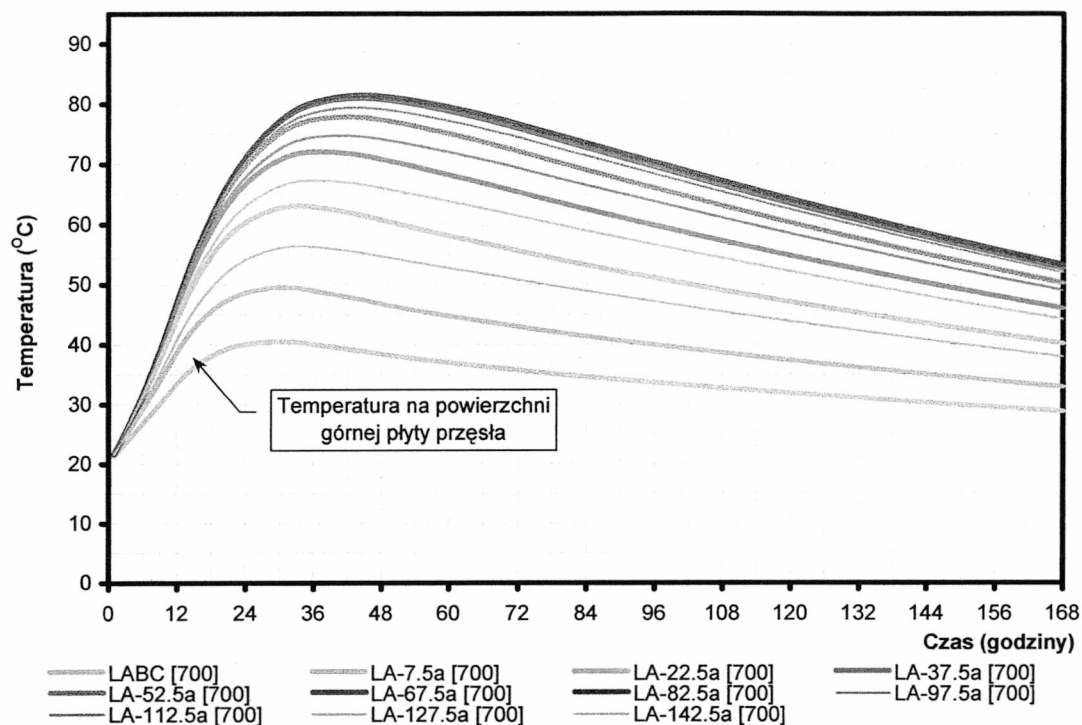


Rys. Z.41. Wartości temperatur w funkcji czasu obliczone w filarze betonowym średnicy $\phi = 2$ m, (rys. 5.1 a – $c_B = 1100 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$)

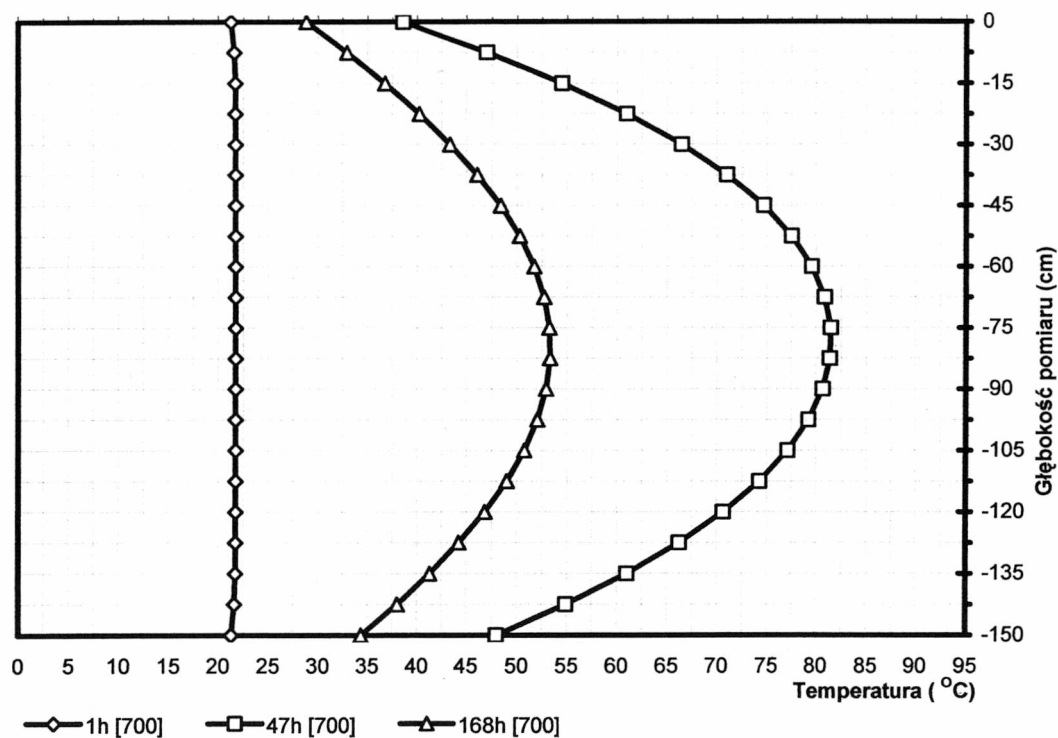


Rys. Z.42. Rozkład temperatur w filarze betonowym wzdłuż osi środkowej, (rys. 5.1 a – $c_B = 1100 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$)

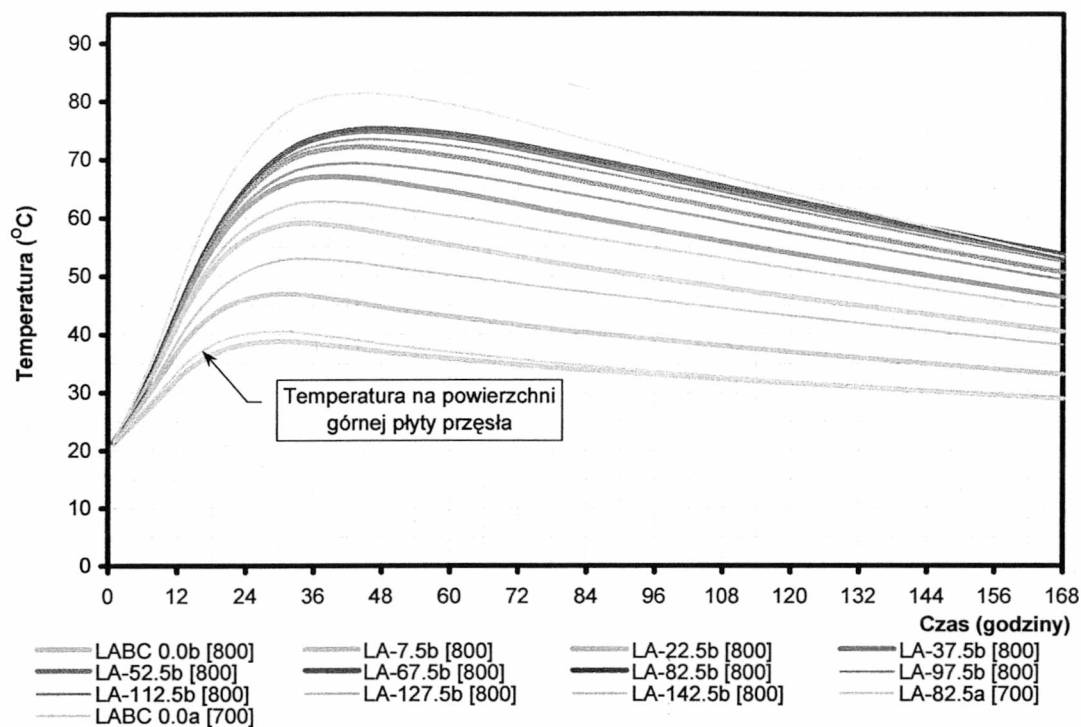
• Wyniki obliczeń dla przęsła łącznicy dojazdowej do estakady głównej



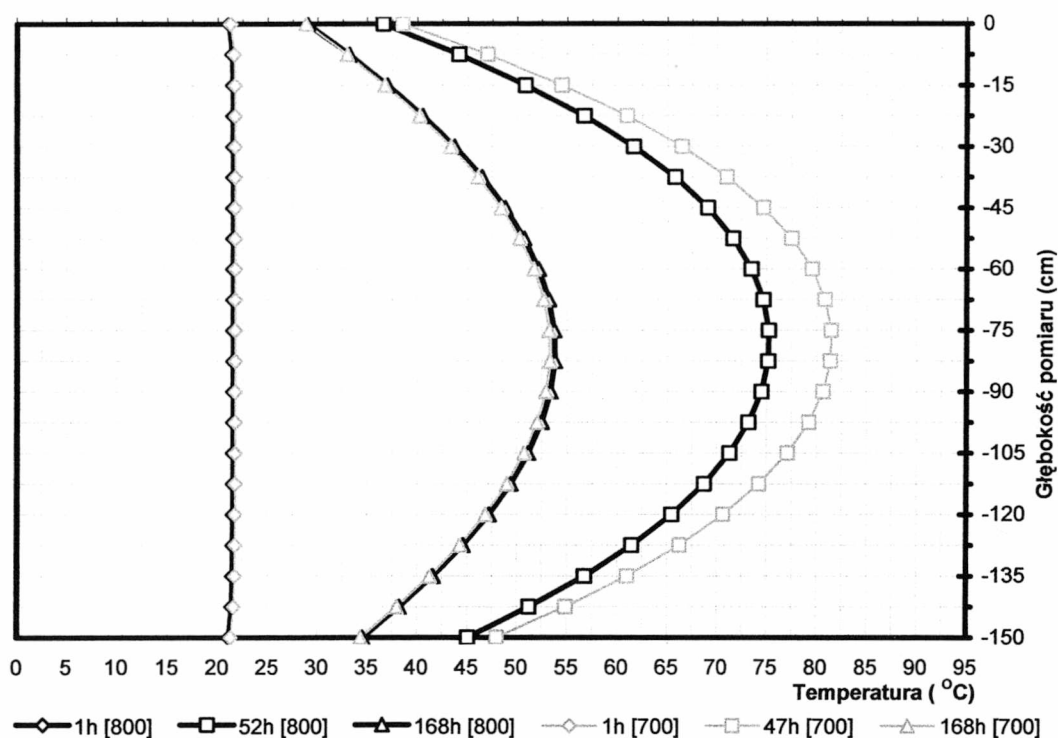
Rys. Z.43. Wartości temperatur w poszczególnych punktach osi pomiarowej pionowej w funkcji czasu dla przęsła łącznicy dojazdowej;
- linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $c_B = 700 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$)



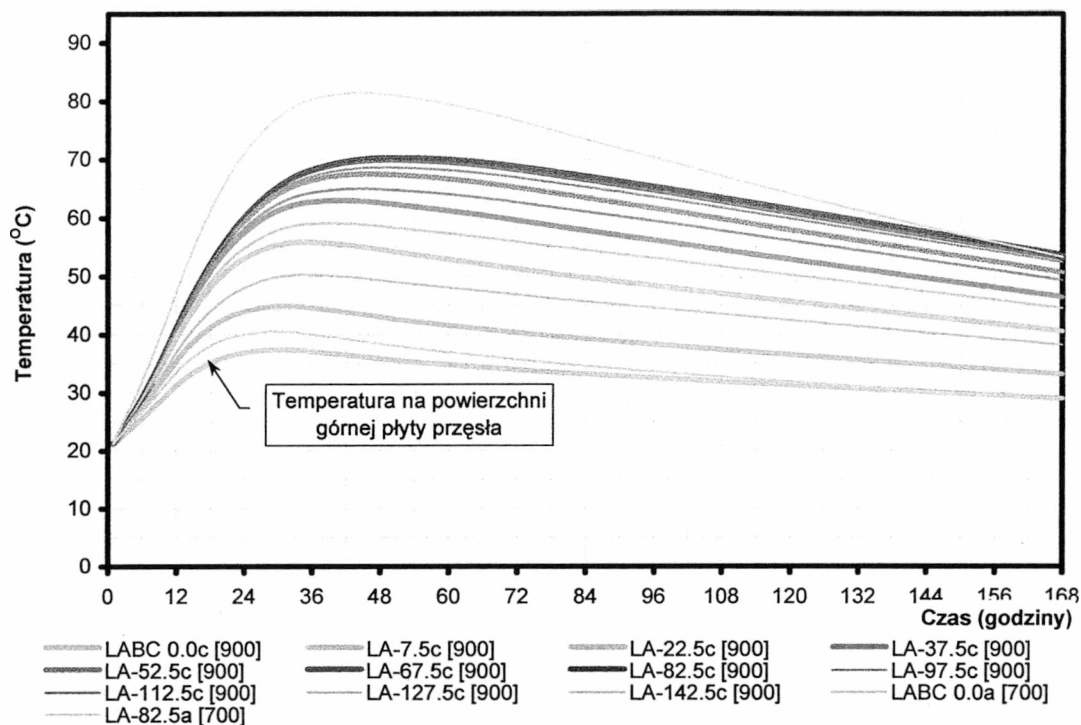
Rys. Z.44. Rozkład temperatur w przekroju poprzecznym przęsła łącznicy dojazdowej;
- linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $c_B = 700 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$)



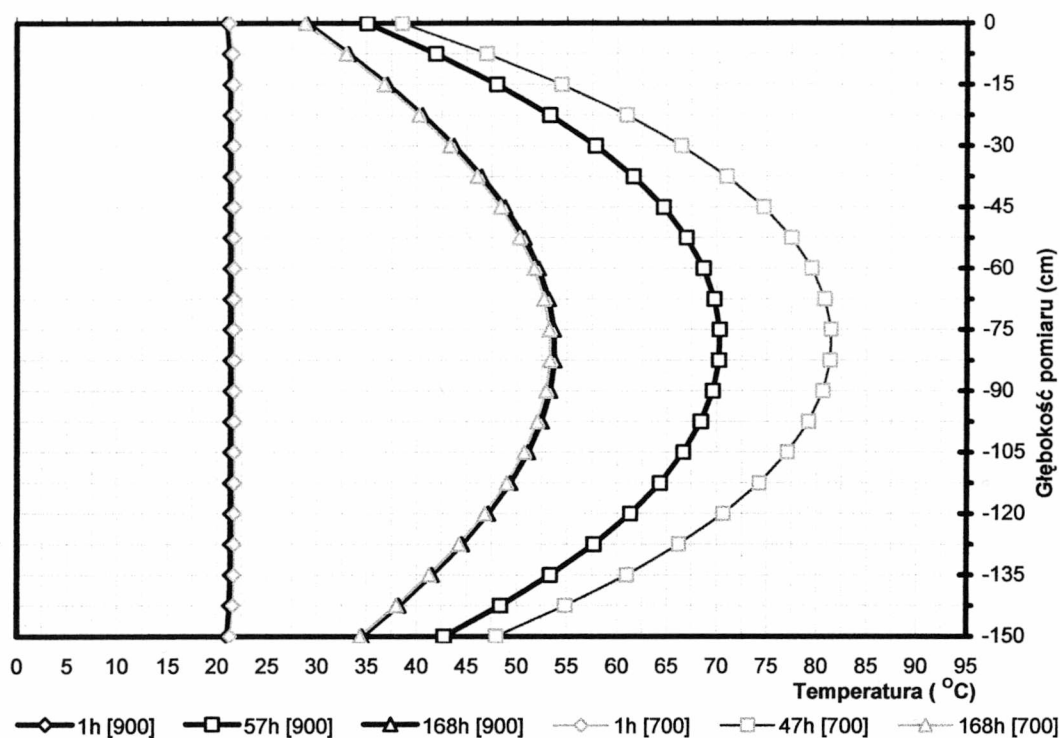
Rys. Z.45. Wartości temperatur w poszczególnych punktach osi pomiarowej pionowej w funkcji czasu dla przęsła łącznicy dojazdowej;
 - linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $c_B = 800 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$)



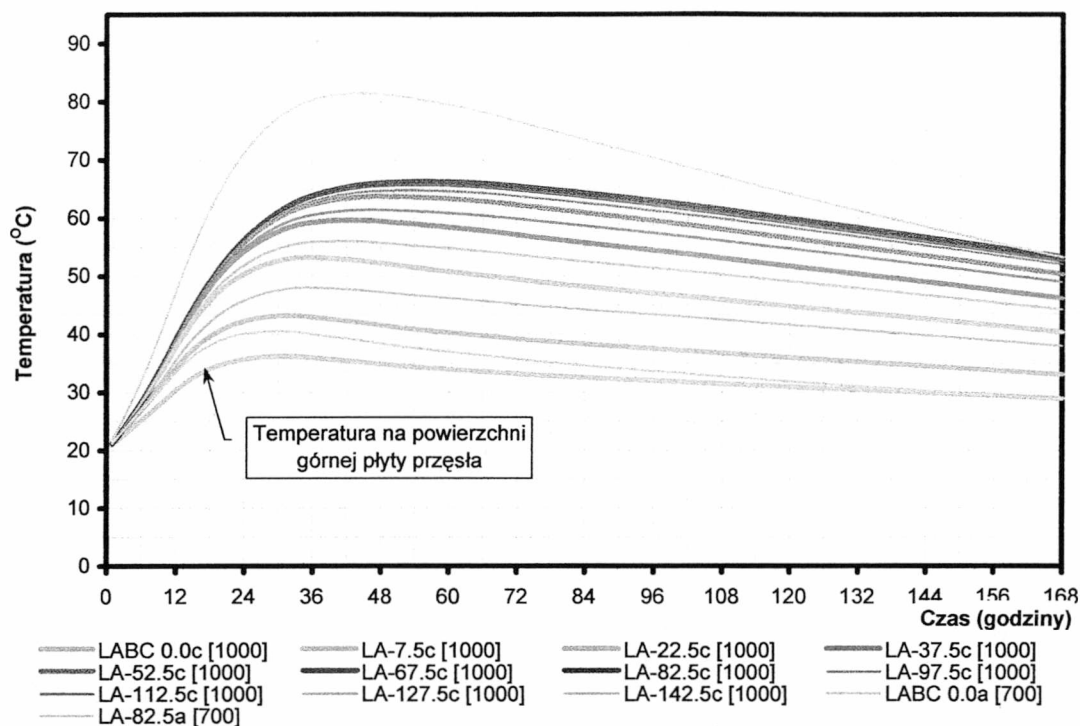
Rys. Z.46. Rozkład temperatur w przekroju poprzecznym przęsła łącznicy dojazdowej;
 - linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $c_B = 800 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$)



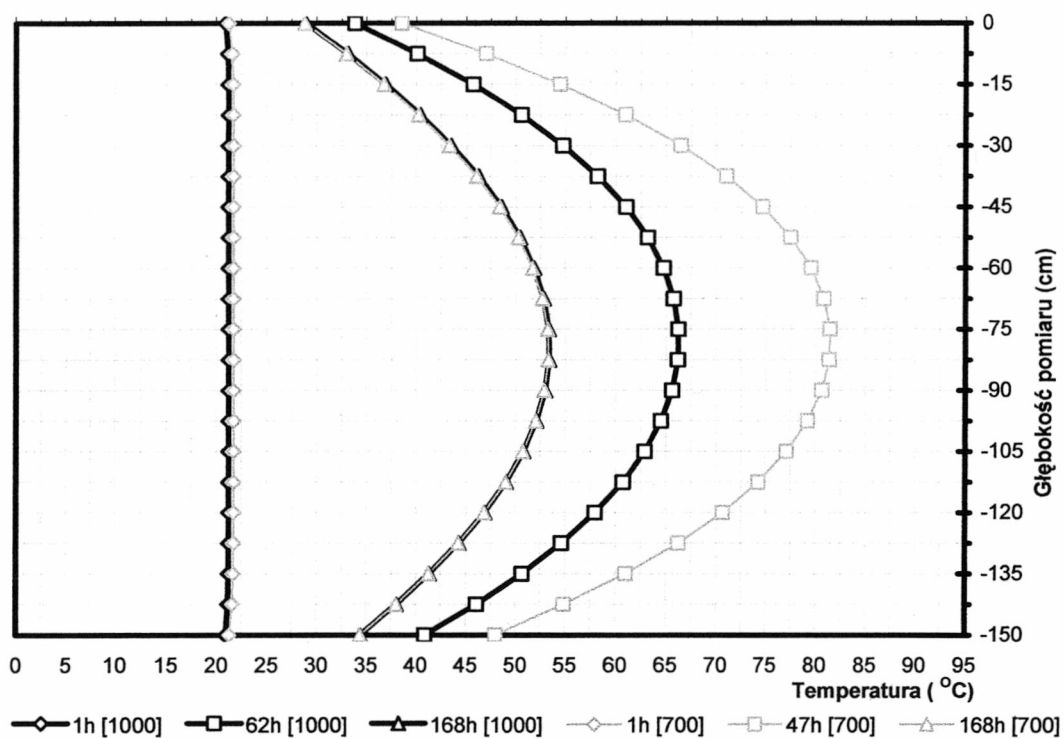
Rys. Z.47. Wartości temperatur w poszczególnych punktach osi pomiarowej pionowej w funkcji czasu dla przęsła łącznicy dojazdowej;
- linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $c_B = 900 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$)



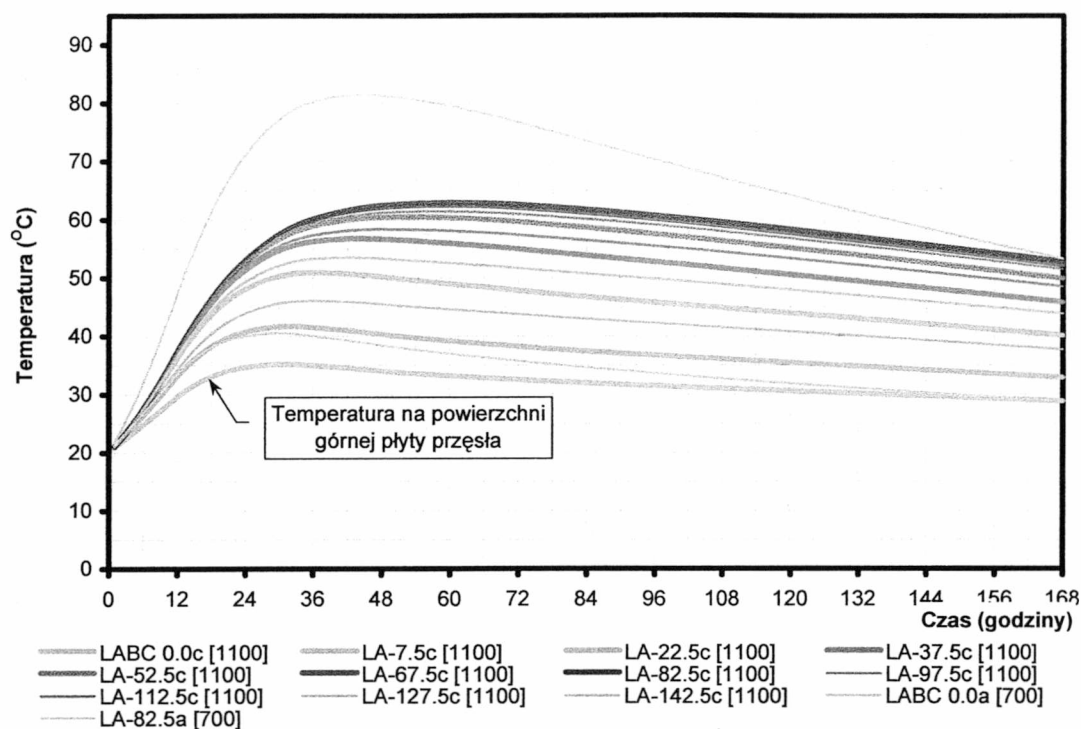
Rys. Z.48. Rozkład temperatur w przekroju poprzecznym przęsła łącznicy dojazdowej;
- linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $c_B = 900 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$)



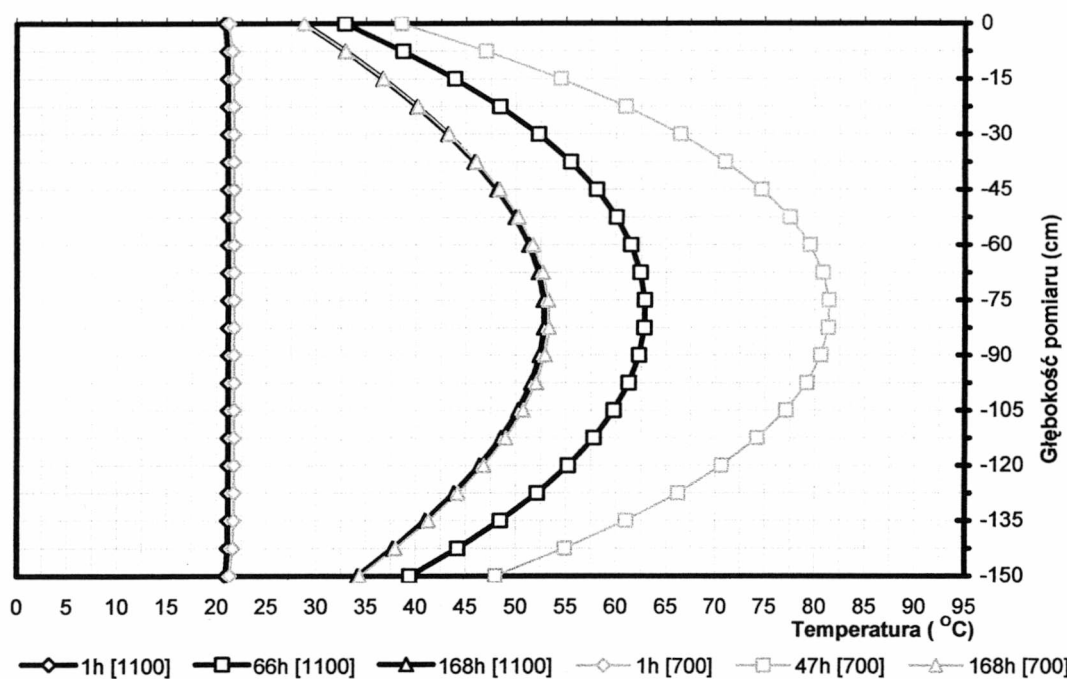
Rys. Z.49. Wartości temperatur w poszczególnych punktach osi pomiarowej pionowej w funkcji czasu dla przęsła łącznicy dojazdowej;
- linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 $c - c_B = 1000 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$)



Rys. Z.50. Rozkład temperatur w przekroju poprzecznym przęsła łącznicy dojazdowej;
- linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 $c - c_B = 1000 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$)



Rys. Z.51. Wartości temperatur w poszczególnych punktach osi pomiarowej pionowej w funkcji czasu dla przęsła łącznicy dojazdowej;
- linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $c_B = 1100 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$)



Rys. Z.52. Rozkład temperatur w przekroju poprzecznym przęsła łącznicy dojazdowej;
- linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $c_B = 1100 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$)

• Wnioski

1. Wzrost ciepła właściwego powoduje spadek maksymalnej różnicy temperatur ΔT_{wz} między środkiem i powierzchnią zewnętrzną elementu oraz wydłuża czas jej wystąpienia. Związane jest to ze wzrostem akumulacji cieplnej betonu (patrz p. 2.2.4). Czas wystąpienia temperatury maksymalnej, oraz zakończonej analizy wraz z podaną temperaturą zestawiono w tab. Z.3.

Tablica Z.3. Zestawienie czasu wystąpienia maksymalnej różnicy temperatury z podaną temperaturą, oraz różnicy temperatury po zakończonej analizie

Element	Ciepło właściwe betonu [J/(kg·°C)]									
	700		800		900		1000		1100	
	Czas	Temp	Czas	Temp	Czas	Temp	Czas	Temp	Czas	Temp
Filar	47 h	39 °C	51 h	36 °C	56 h	32 °C	60 h	30 °C	65 h	28 °C
	168h	16 °C	168h	17 °C	168h	18 °C	168h	18 °C	168h	18 °C
Łącznica	47 h	43 °C	52 h	39 °C	57 h	35 °C	62 h	32 °C	66 h	30 °C
	168h	24 °C	168h	25 °C	168h	25 °C	168h	24 °C	168h	24 °C

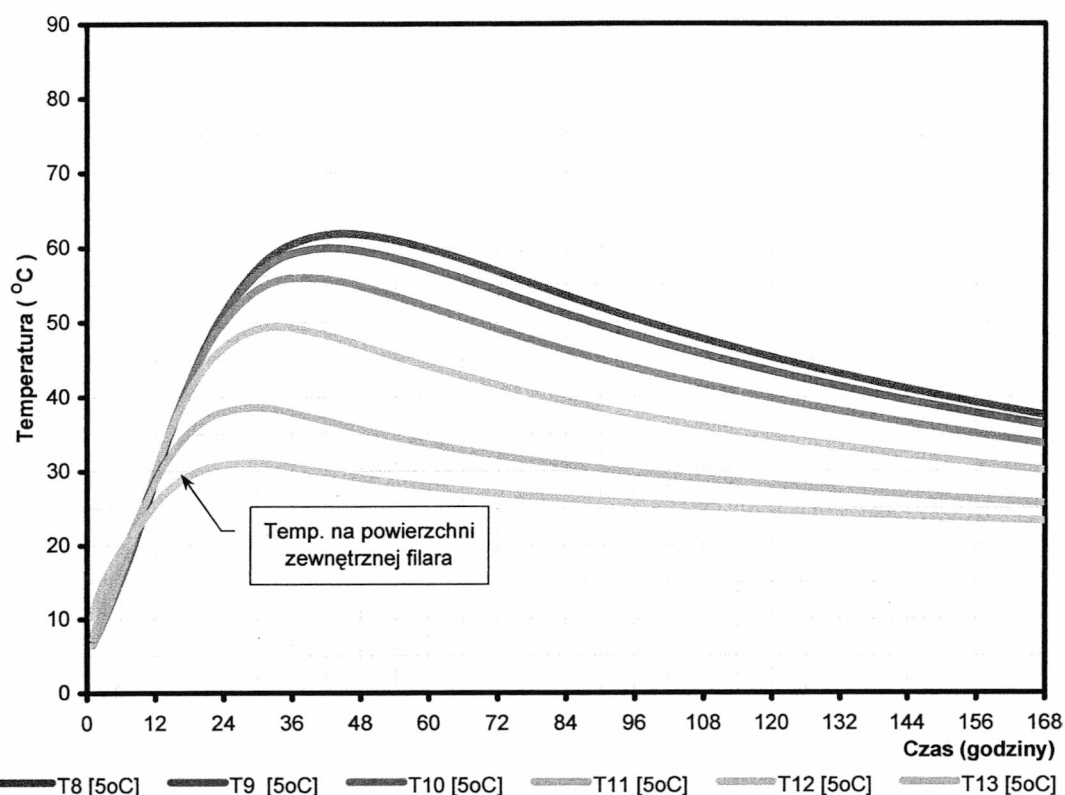
2. Wzrost ciepła właściwego powoduje obniżenie temperatury wewnętrznej i wydłuża czas jej wystąpienia.
3. Wzrost ciepła właściwego o 100 [J/(kg·°C)], powoduje spadek maksymalnej różnicy temperatur ΔT_{wz} dla rozpatrywanych elementów o średnio 3 °C.
4. Maksymalna różnica temperatur występuje w fazie spadku temperatur, tzn. po czasie, wystąpienia maksymalnej temperatury wewnętrznej elementu.

Z.5. Wpływ temperatury mieszanki betonowej

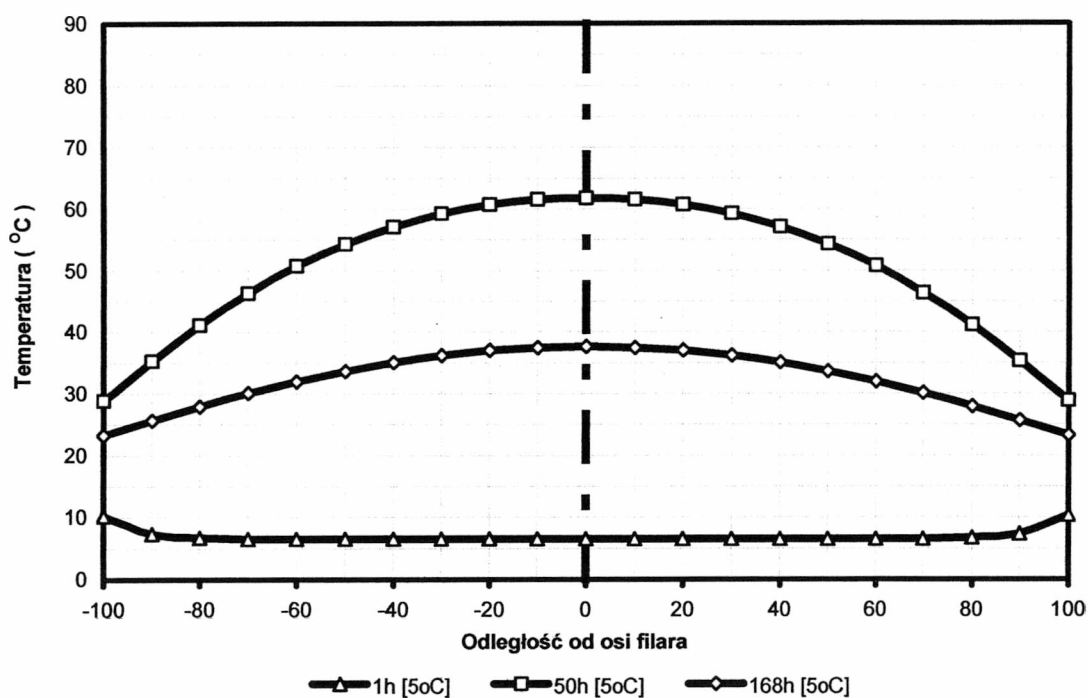
Celem analizy jest określenie wpływu temperatury początkowej wbudowywanej mieszanki betonowej na różnicę temperatur ΔT_{wz} między środkiem i powierzchnią zewnętrzną elementu oraz wzrost lub obniżenie maksymalnej temperatury wewnętrznej elementu. Początkową temperaturę mieszanki betonowej analizowano od temperatury 5 °C w interwale, co 5 °C do temperatury 30 °C.

Wartości współczynników termofizycznych materiałów wykorzystanych w analizie zestawiono w tablicy 5.1. Stałą temperaturę powietrza i stałą wartość powierzchniowego współczynnika przejmowania ciepła, zestawiono w tab. 5.2.

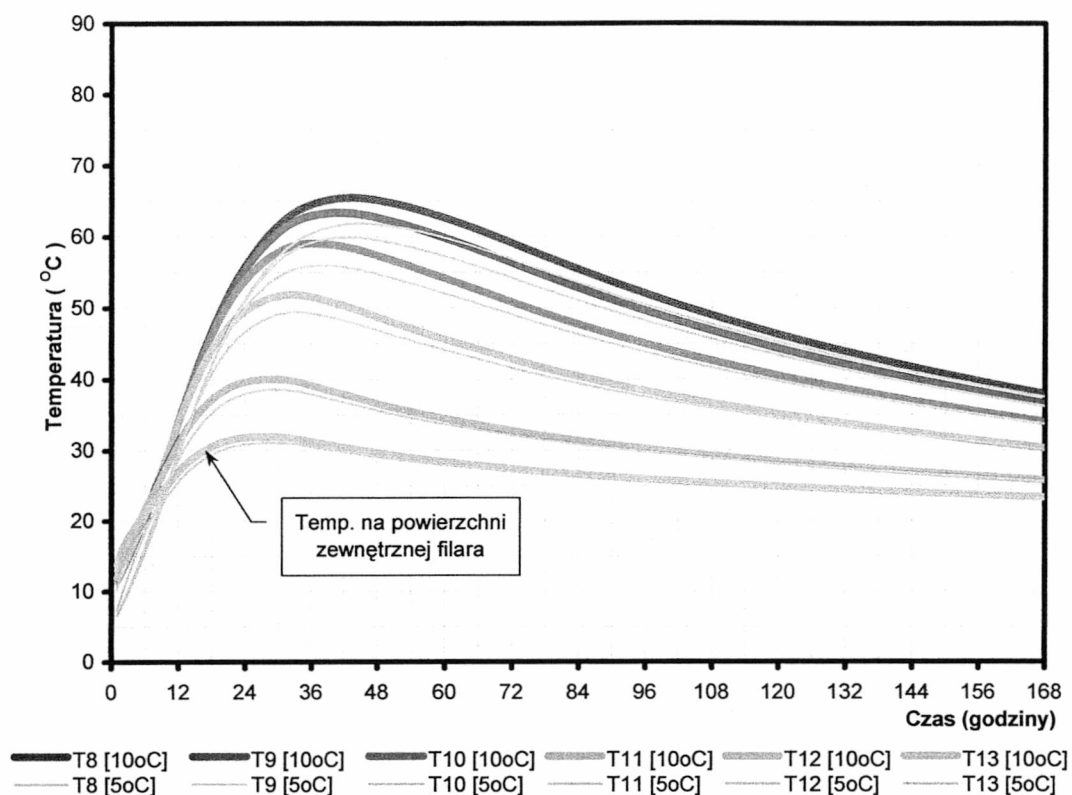
• Wyniki obliczeń dla filara



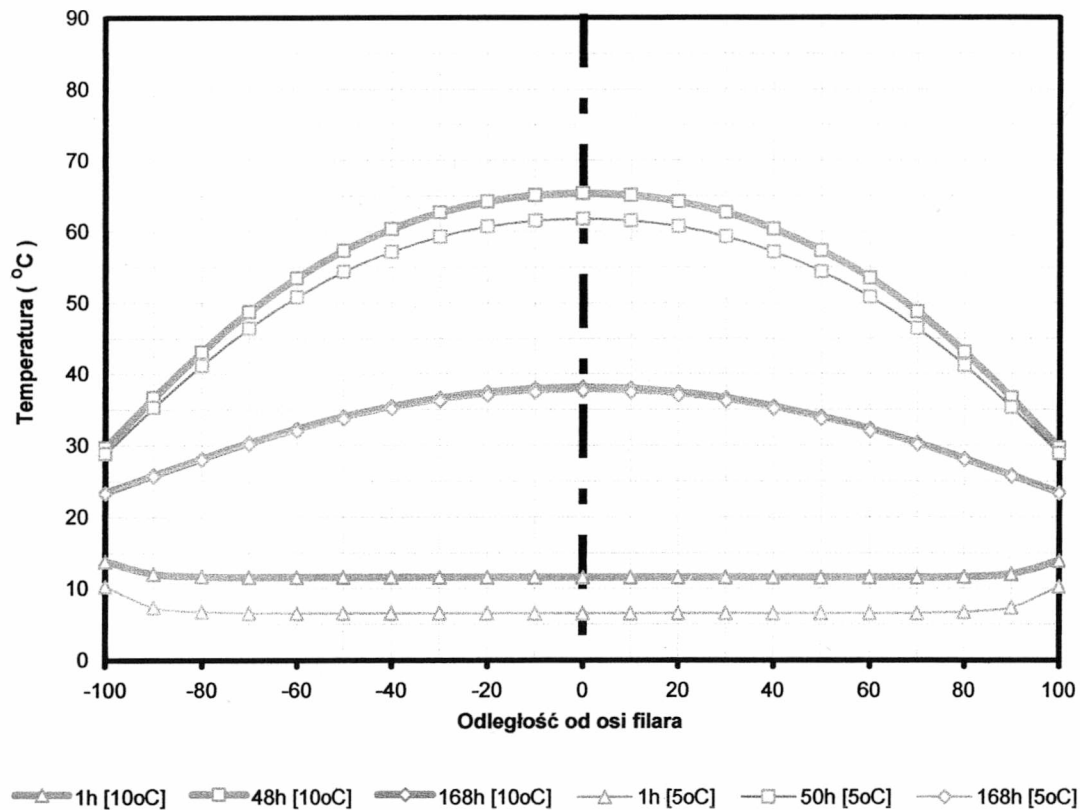
Rys. Z.53. Wartości temperatur w funkcji czasu obliczone w filarze betonowym średnicy $\phi = 2$ m, (rys. 5.1 a – $T_{mb} = 5^{\circ}\text{C}$)



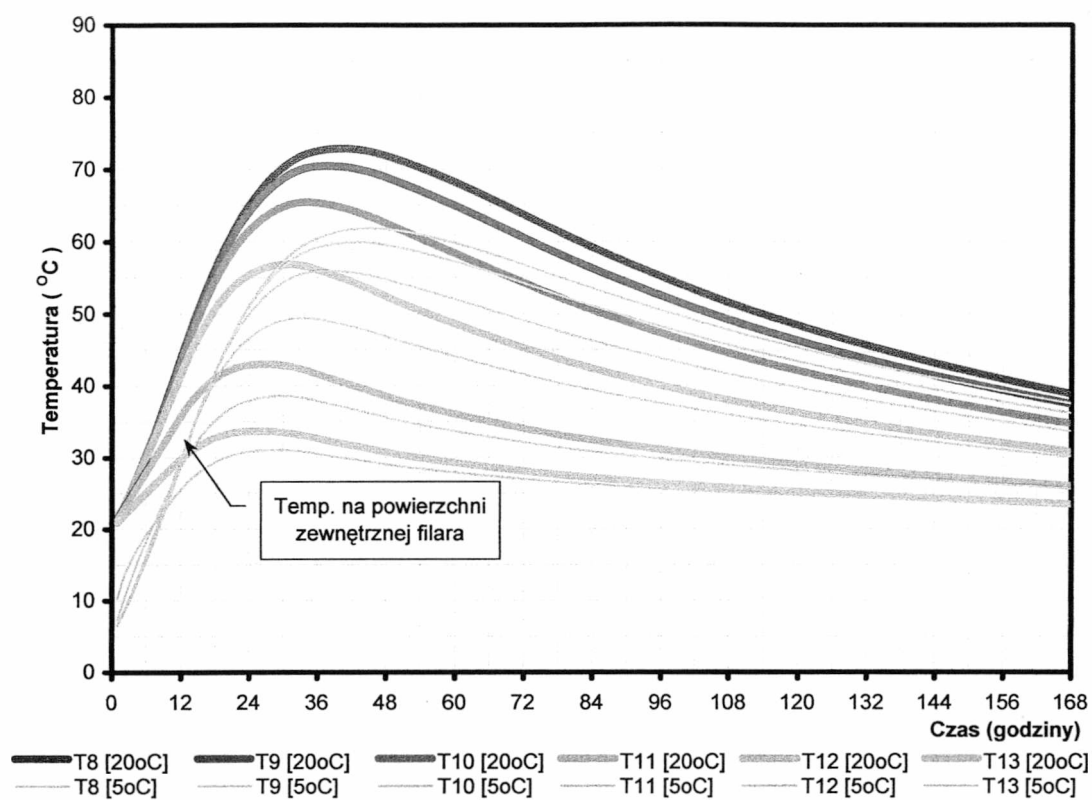
Rys. Z.54. Rozkład temperatur w filarze betonowym wzdłuż osi środkowej, (rys. 5.1 a – $T_{mb} = 5^{\circ}\text{C}$)



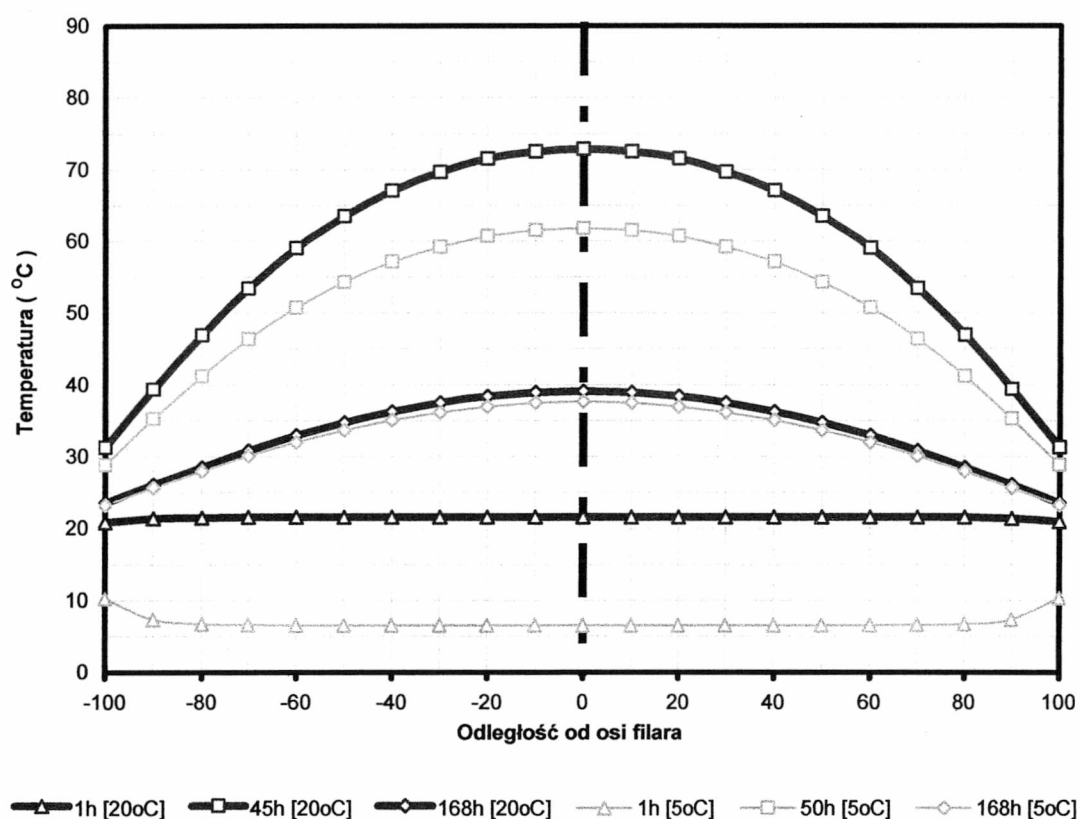
Rys. Z.55. Wartości temperatur w funkcji czasu obliczone w filarze betonowym średnicy $\phi = 2$ m, (rys. 5.1 a – $T_{mb} = 10^0\text{C}$)



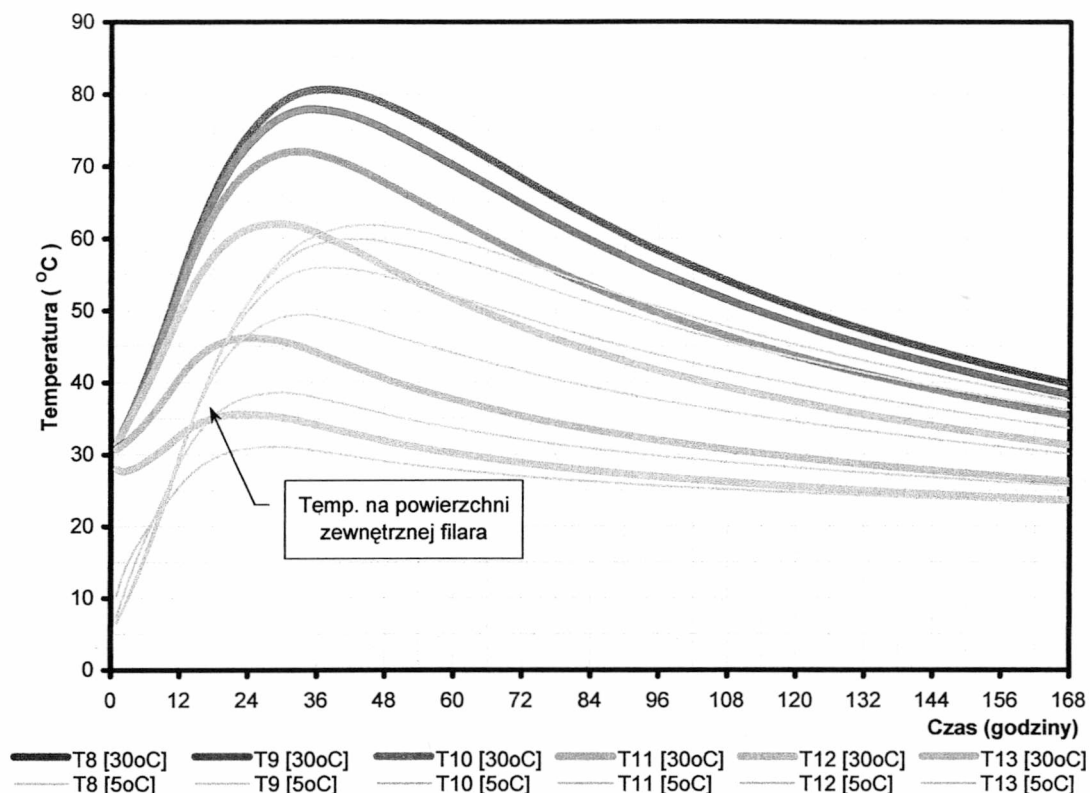
Rys. Z.56. Rozkład temperatur w filarze betonowym wzdłuż osi środkowej, (rys. 5.1 a – $T_{mb} = 10^0\text{C}$)



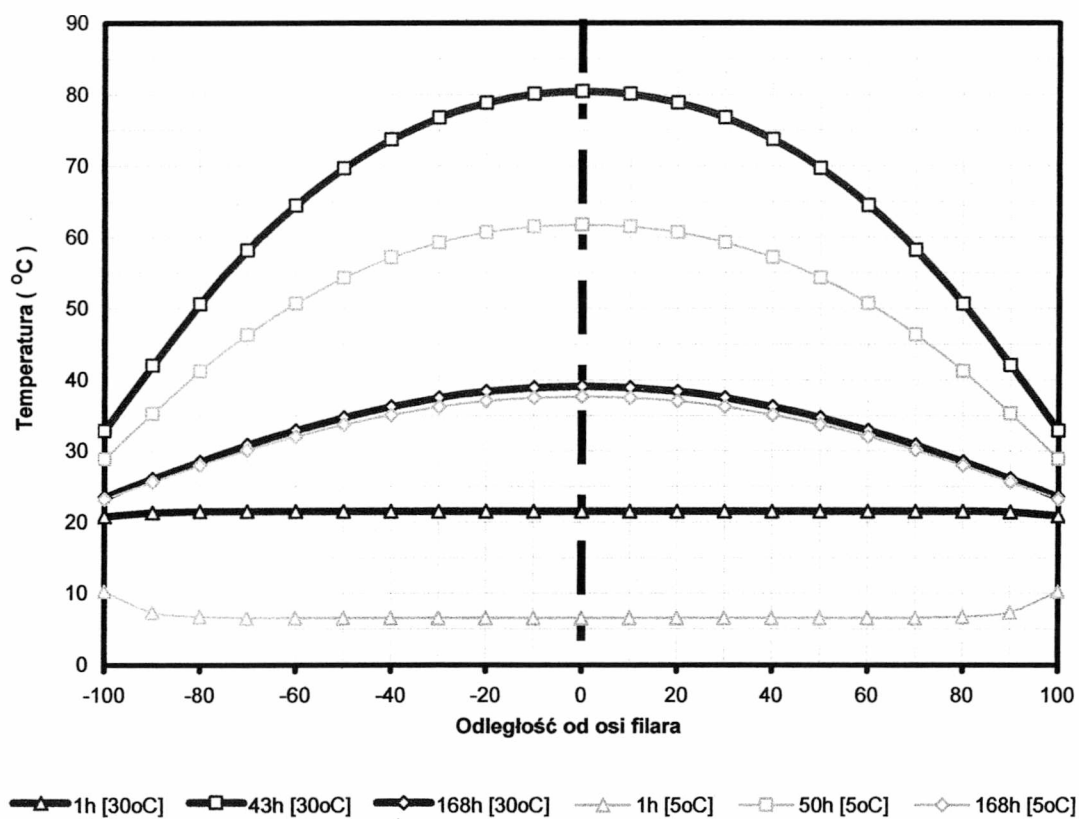
Rys. Z.57. Wartości temperatur w funkcji czasu obliczone w filarze betonowym średnicy $\phi = 2$ m, (rys. 5.1 a – $T_{mb} = 20^{\circ}\text{C}$)



Rys. Z.58. Rozkład temperatur w filarze betonowym wzdłuż osi środkowej, (rys. 5.1 a – $T_{mb} = 20^{\circ}\text{C}$)

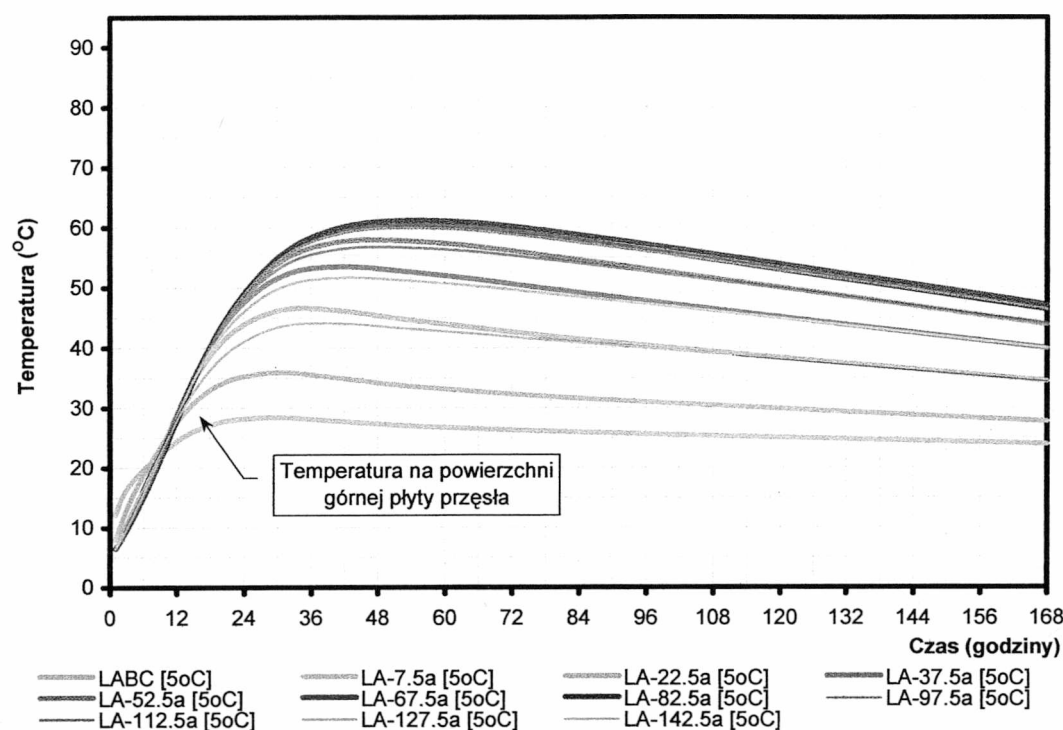


Rys. Z.59. Wartości temperatur w funkcji czasu obliczone w filarze betonowym średnicy $\phi = 2$ m, (rys. 5.1 a – $T_{mb} = 30^{\circ}\text{C}$)

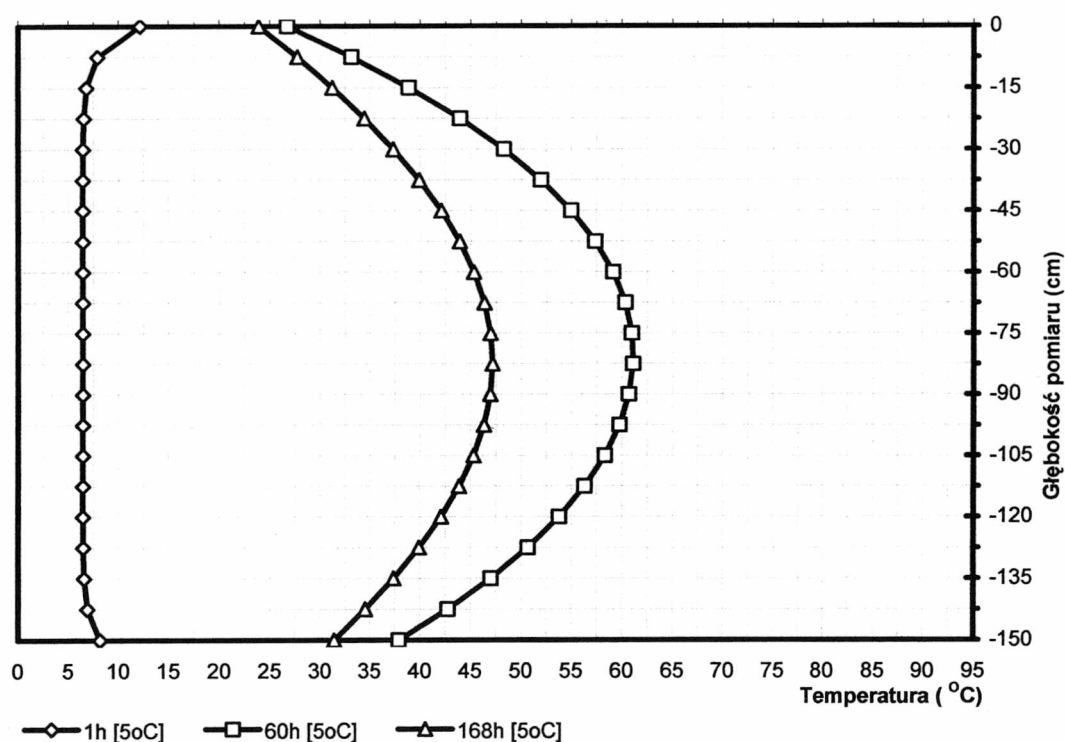


Rys. Z. 60. Rozkład temperatur w filarze betonowym wzdłuż osi środkowej, (rys. 5.1 a – $T_{mb} = 30^{\circ}\text{C}$)

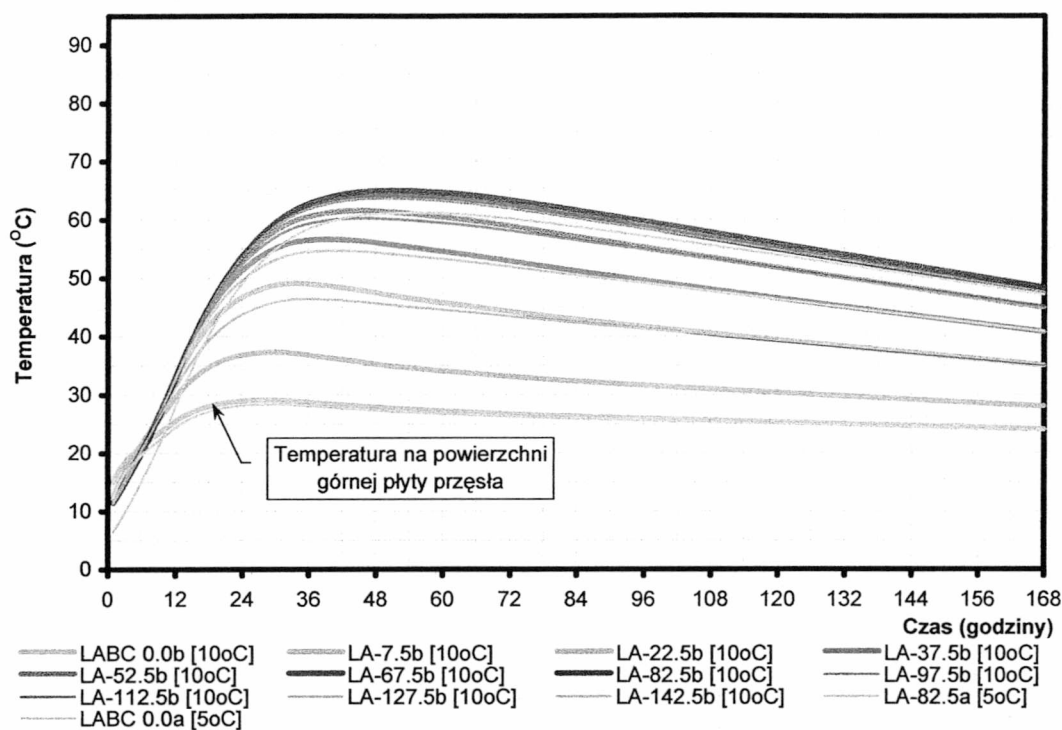
• Wyniki obliczeń dla przęsła łącznicy dojazdowej do estakady głównej



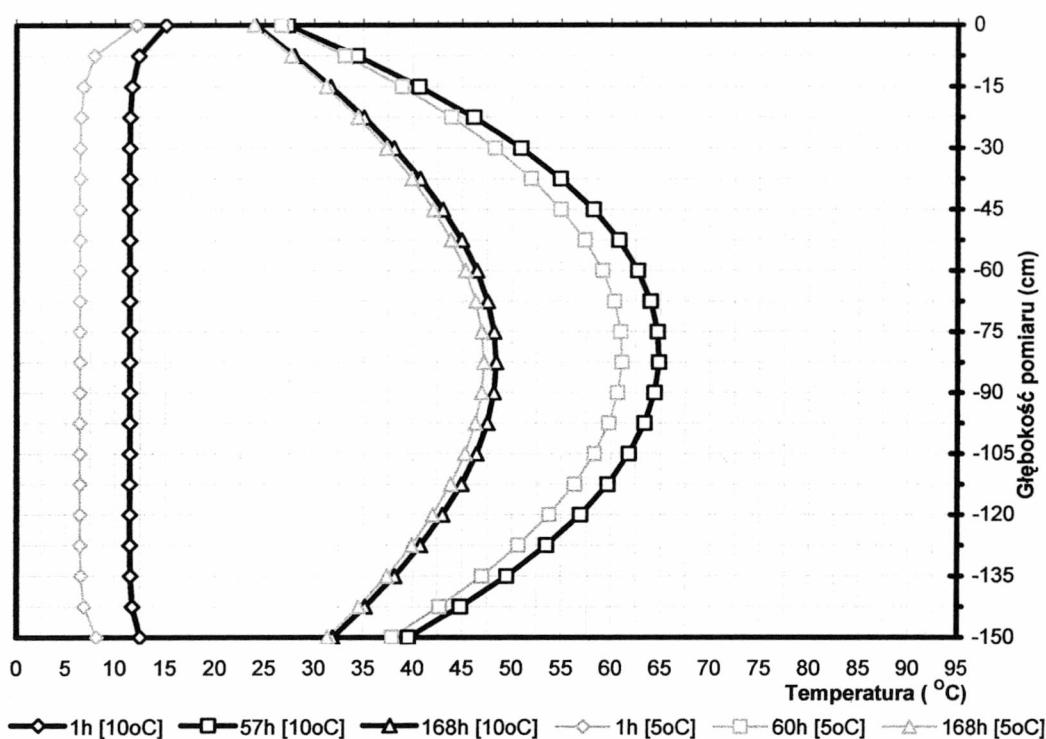
Rys. Z.61. Wartości temperatur w poszczególnych punktach osi pomiarowej pionowej w funkcji czasu dla przęsła łącznicy dojazdowej;
 - linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $T_{mb} = 5^{\circ}\text{C}$)



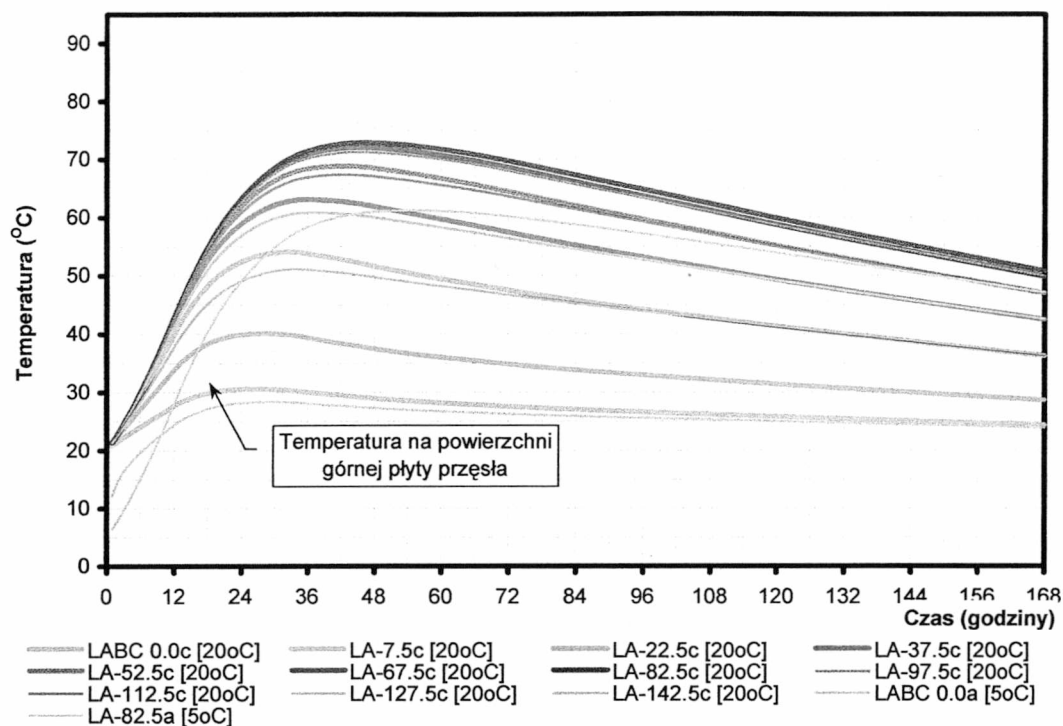
Rys. Z.62. Rozkład temperatur w przekroju poprzecznym przęsła łącznicy dojazdowej;
 - linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $T_{mb} = 5^{\circ}\text{C}$)



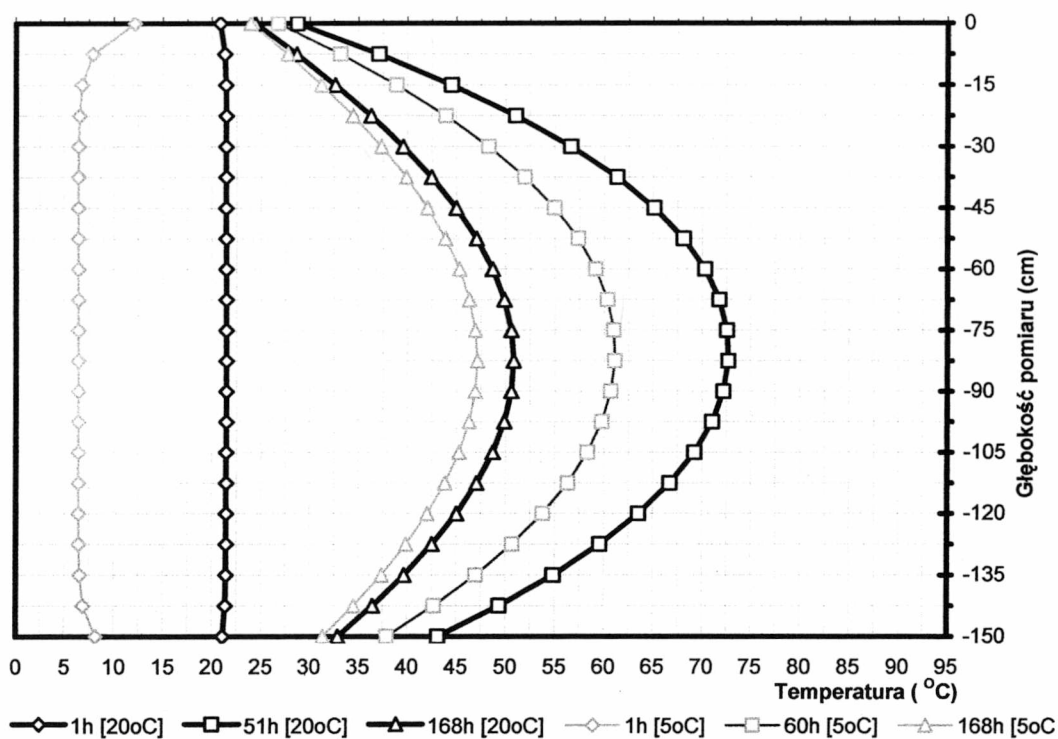
Rys. Z.63. Wartości temperatur w poszczególnych punktach osi pomiarowej pionowej w funkcji czasu dla przęsła łącznicy dojazdowej;
 - linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $T_{mb} = 10^0\text{C}$)



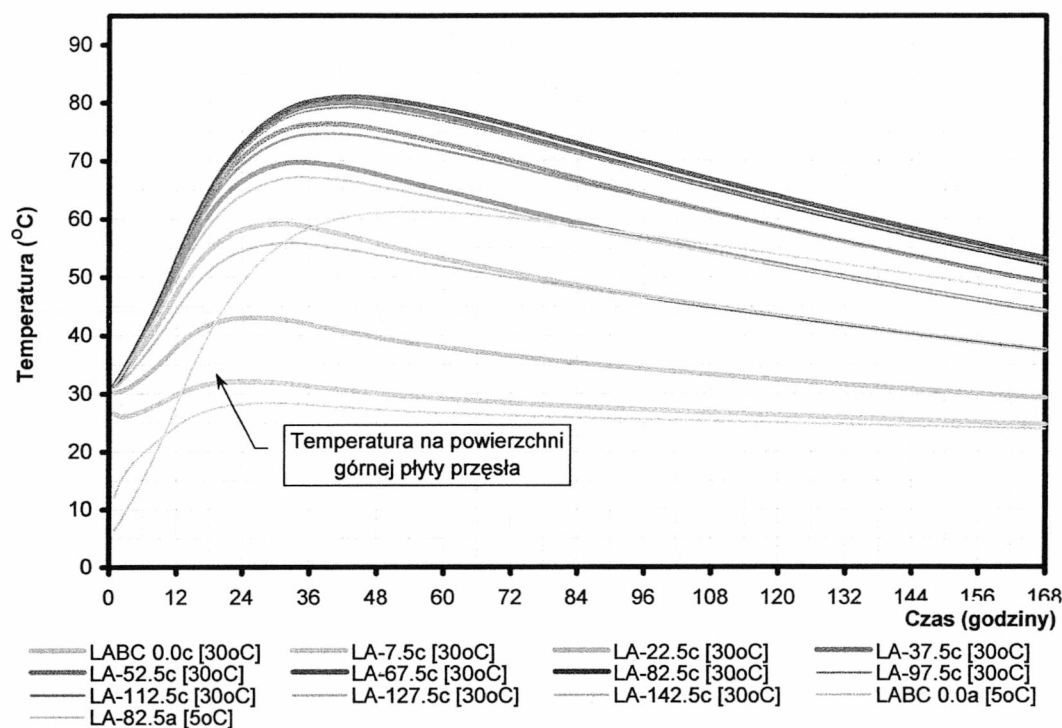
Rys. Z.64. Rozkład temperatur w przekroju poprzecznym przęsła łącznicy dojazdowej;
 - linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $T_{mb} = 10^0\text{C}$)



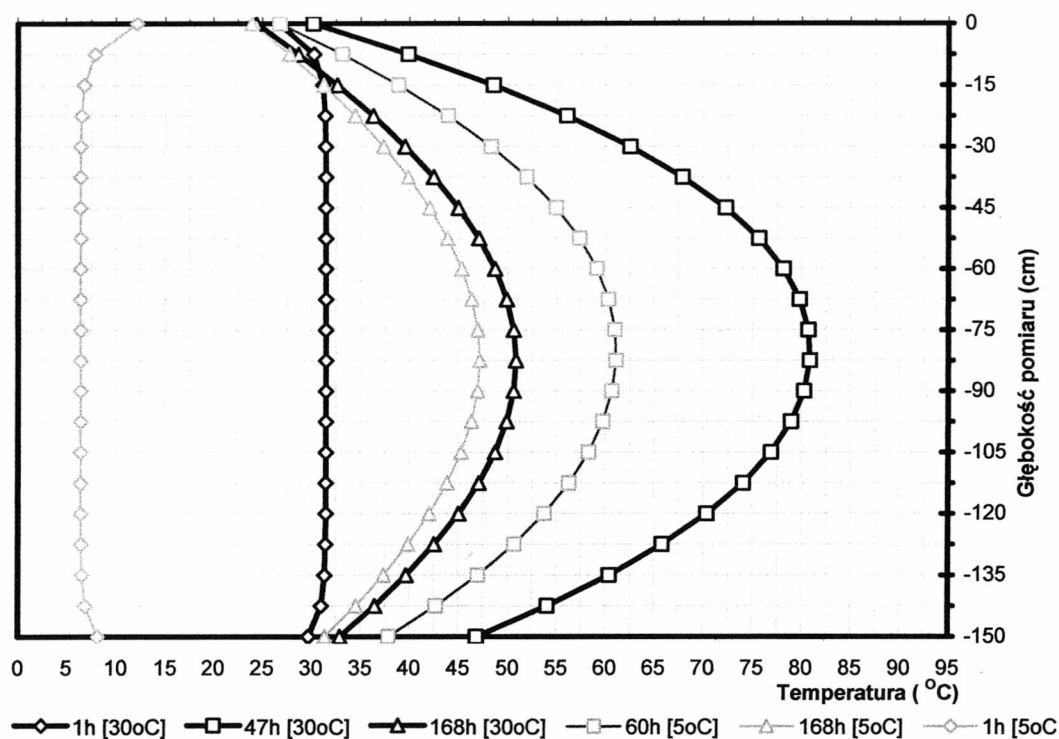
Rys. Z.65. Wartości temperatur w poszczególnych punktach osi pomiarowej pionowej w funkcji czasu dla przęsła łącznicy dojazdowej;
 - linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $T_{mb} = 20^{\circ}\text{C}$)



Rys. Z.66. Rozkład temperatur w przekroju poprzecznym przęsła łącznicy dojazdowej;
 - linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $T_{mb} = 20^{\circ}\text{C}$)



Rys. Z.67. Wartości temperatur w poszczególnych punktach osi pomiarowej pionowej w funkcji czasu dla przęsła łącznicy dojazdowej;
- linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $T_{mb} = 30^{\circ}\text{C}$)



Rys. Z.68. Rozkład temperatur w przekroju poprzecznym przęsła łącznicy dojazdowej;
- linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $T_{mb} = 30^{\circ}\text{C}$)

• Wnioski

1. Obniżenie temperatury mieszanki powoduje spadek maksymalnej różnicy temperatur ΔT_{wz} między środkiem i powierzchnią zewnętrzną elementu oraz wydłuża czas jej wystąpienia. Czas wystąpienia temperatury maksymalnej oraz zakończonej analizy wraz z podaną temperaturą, zestawiono w tab. Z.4.

Tablica Z.4. Zestawienie czasu wystąpienia maksymalnej różnicy temperatur z podaną temperaturą, oraz różnicy temperatury po zakończonej analizie

Element	Początkowa temperatura mieszanki betonowej [$^{\circ}\text{C}$]							
	5		10		20		30	
	Czas	Temp.	Czas	Temp.	Czas	Temp.	Czas	Temp.
Filar	50 h	33 $^{\circ}\text{C}$	48 h	36 $^{\circ}\text{C}$	45 h	42 $^{\circ}\text{C}$	43 h	48 $^{\circ}\text{C}$
	168 h	14 $^{\circ}\text{C}$	168 h	15 $^{\circ}\text{C}$	168 h	16 $^{\circ}\text{C}$	168 h	16 $^{\circ}\text{C}$
Łącznica	60 h	34 $^{\circ}\text{C}$	57 h	37 $^{\circ}\text{C}$	51 h	44 $^{\circ}\text{C}$	47 h	51 $^{\circ}\text{C}$
	168 h	23 $^{\circ}\text{C}$	168 h	24 $^{\circ}\text{C}$	168 h	26 $^{\circ}\text{C}$	168 h	29 $^{\circ}\text{C}$

2. Obniżenie temperatury mieszanki powoduje obniżenie maksymalnej temperatury wewnętrznej i wydłuża czas jej wystąpienia.
3. Obniżenie temperatury mieszanki o 5 $^{\circ}\text{C}$, powoduje spadek maksymalnej różnicy temperatur ΔT_{wz} odpowiednio dla filar 3 $^{\circ}\text{C}$ oraz łącznica 3.5 $^{\circ}\text{C}$.
4. Maksymalna różnica temperatur występuje w fazie spadku temperatur, tzn. po czasie, wystąpienia maksymalnej temperatury wewnętrznej elementu.

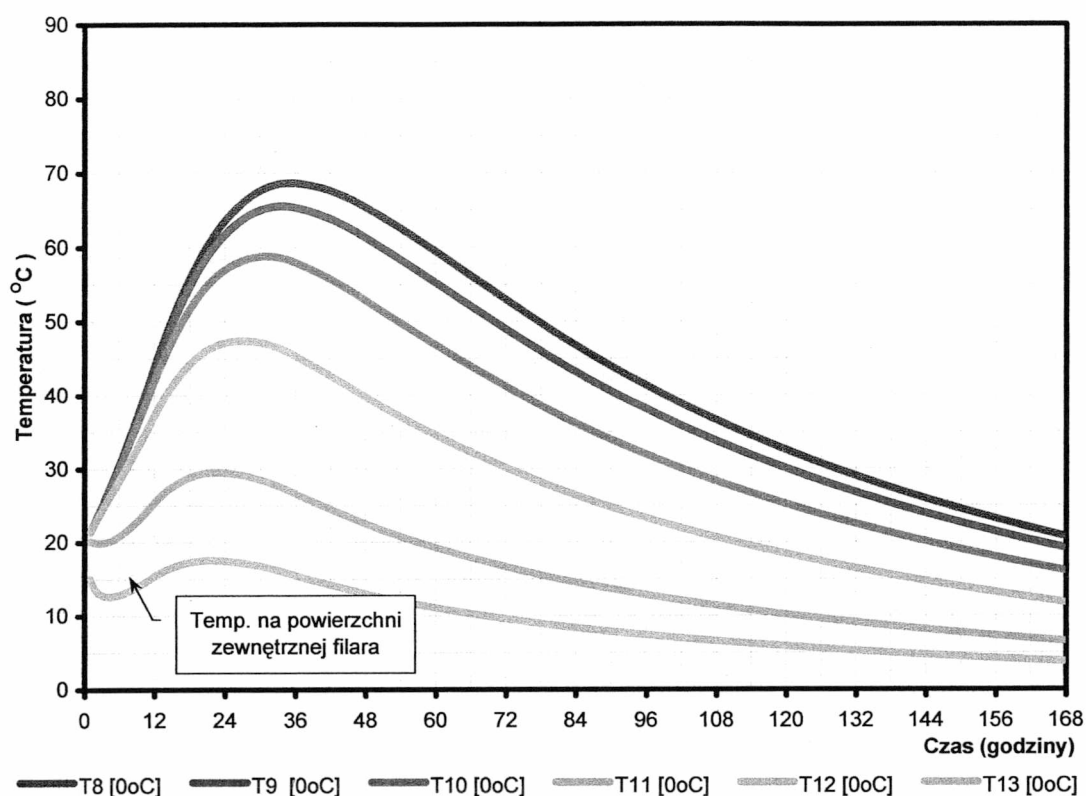
Z.6. Wpływ temperatury powietrza

Celem analizy jest określenie wpływu temperatury powietrza na różnicę temperatur ΔT_{wz} między środkiem i powierzchnią zewnętrzną elementu oraz wzrost lub obniżenie maksymalnej temperatury wewnętrznej elementu.

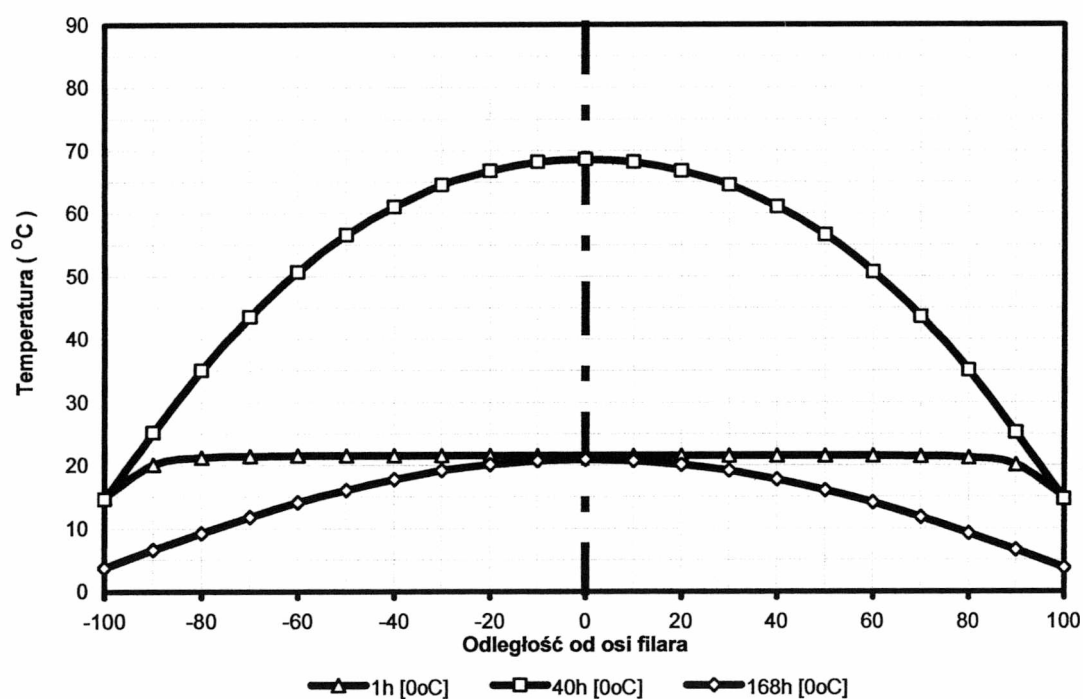
Stałą temperaturę powietrza analizowano od temperatury 0 $^{\circ}\text{C}$ w interwale, co 5 $^{\circ}\text{C}$ do temperatury 40 $^{\circ}\text{C}$.

Wartości współczynników termofizycznych materiałów wykorzystanych w analizie zestawiono w tablicy 5.1. Początkową temperaturę mieszanki betonowej oraz stałą wartość powierzchniowego współczynnika przejmowania ciepła, zestawiono w tab. 5.2.

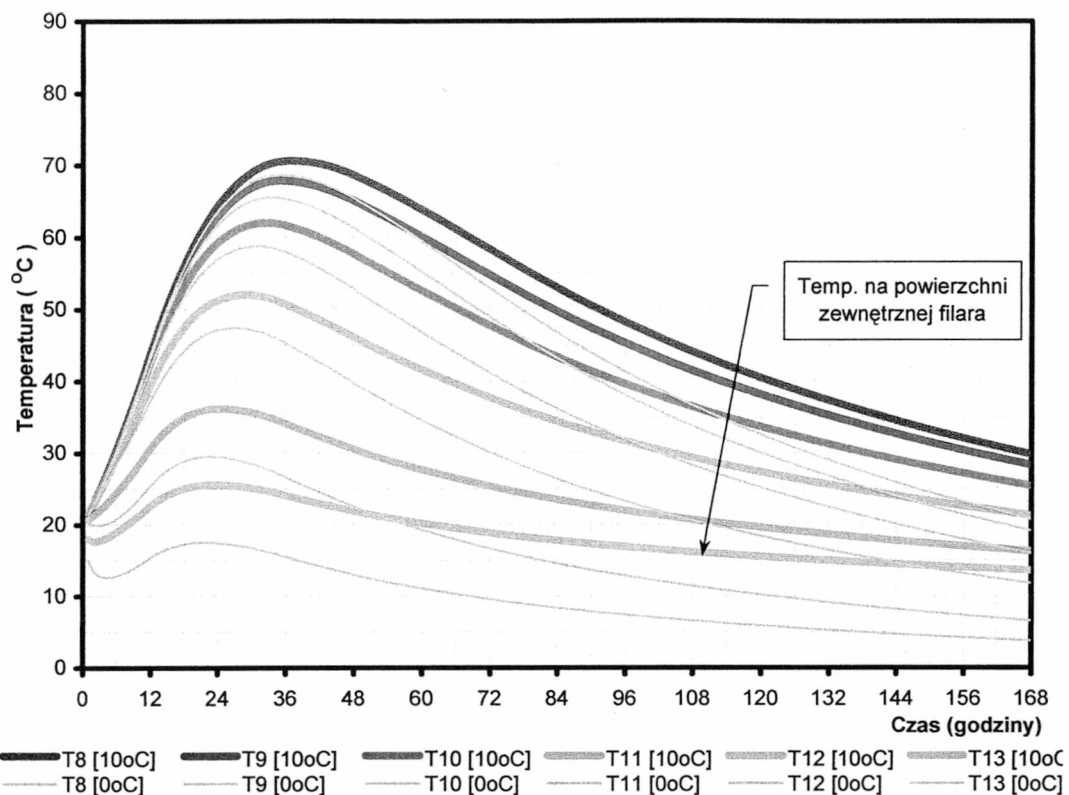
• Wyniki obliczeń dla filara



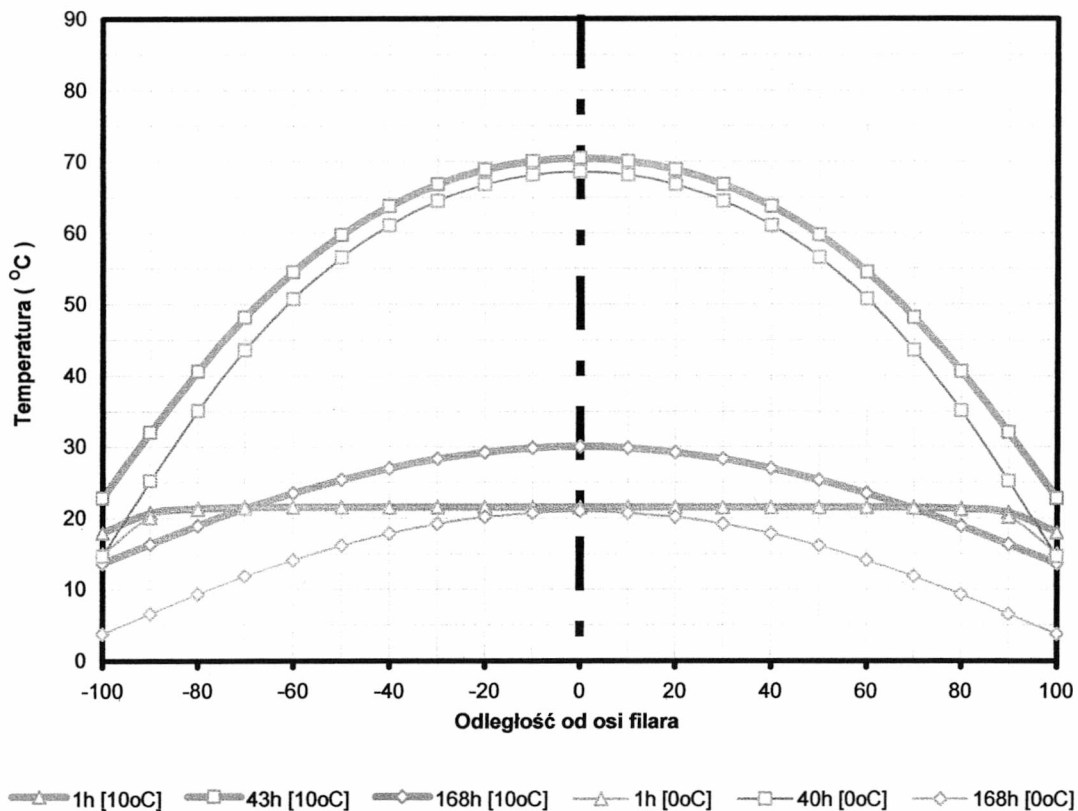
Rys. Z.69. Wartości temperatur w funkcji czasu obliczone w filarze betonowym średnicy $\phi = 2$ m, (rys. 5.1 a – $T_0 = 0^\circ\text{C}$)



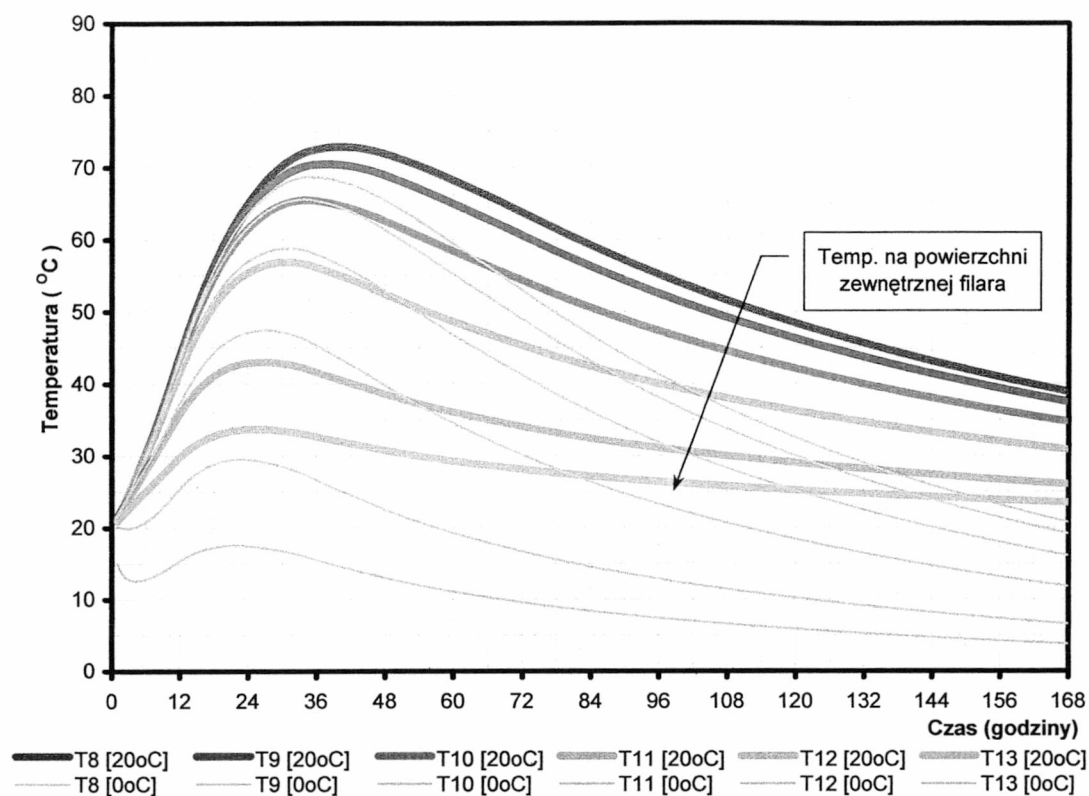
Rys. Z.70. Rozkład temperatur w filarze betonowym wzdłuż osi środkowej, (rys. 5.1 a – $T_0 = 0^\circ\text{C}$)



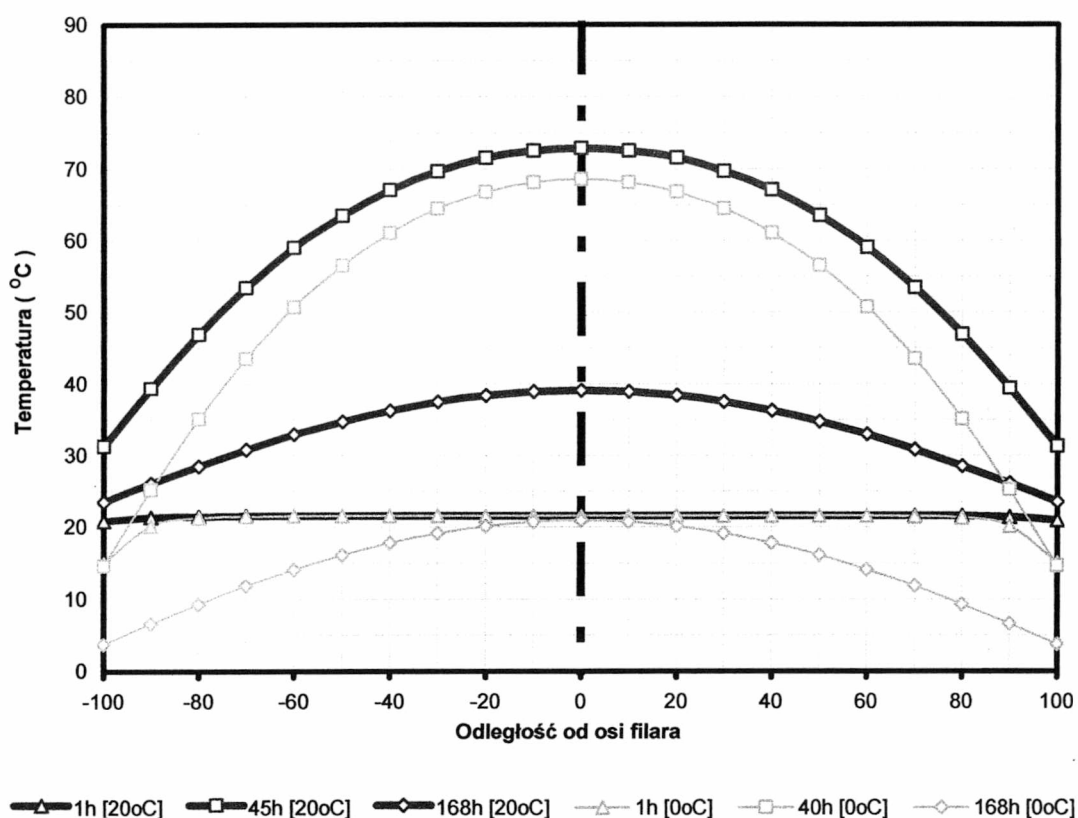
Rys. Z.71. Wartości temperatur w funkcji czasu obliczone w filarze betonowym średnicy $\phi = 2$ m, (rys. 5.1 a – $T_0 = 10^\circ\text{C}$)



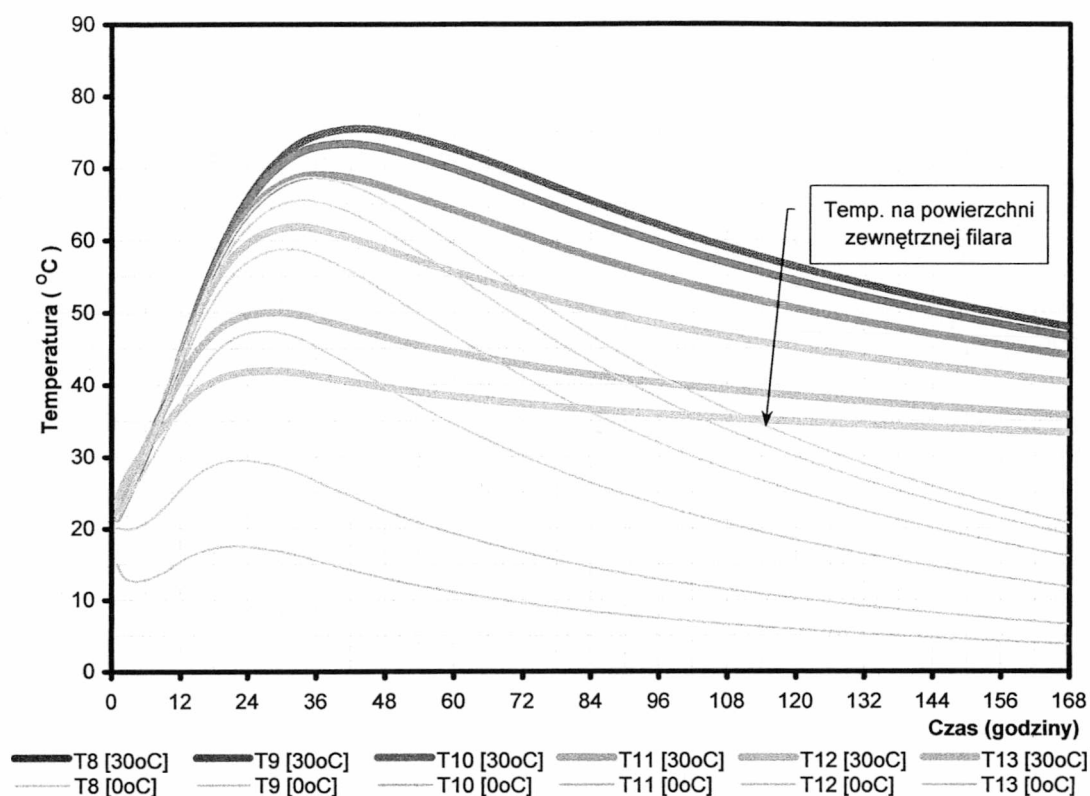
Rys. Z.72. Rozkład temperatur w filarze betonowym wzdłuż osi środkowej, (rys. 5.1 a – $T_0 = 10^\circ\text{C}$)



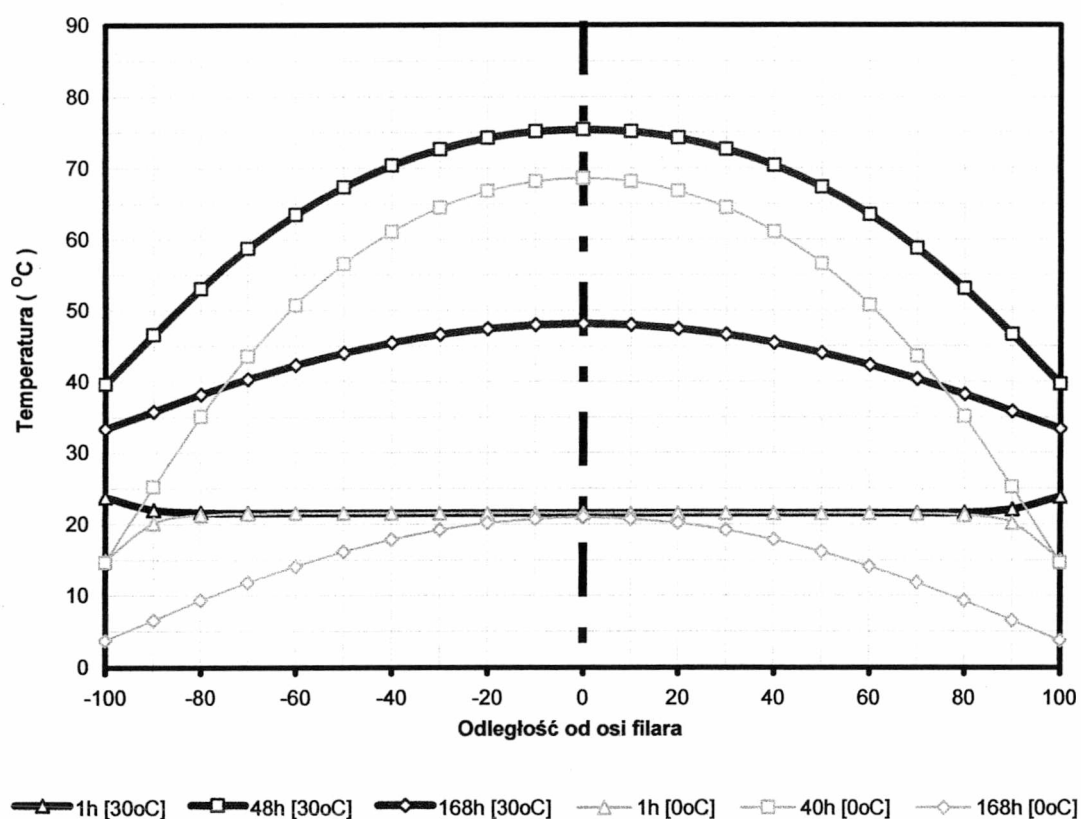
Rys. Z.73. Wartości temperatur w funkcji czasu obliczone w filarze betonowym średnicy $\phi = 2$ m, (rys. 5.1 a – $T_0 = 20^\circ\text{C}$)



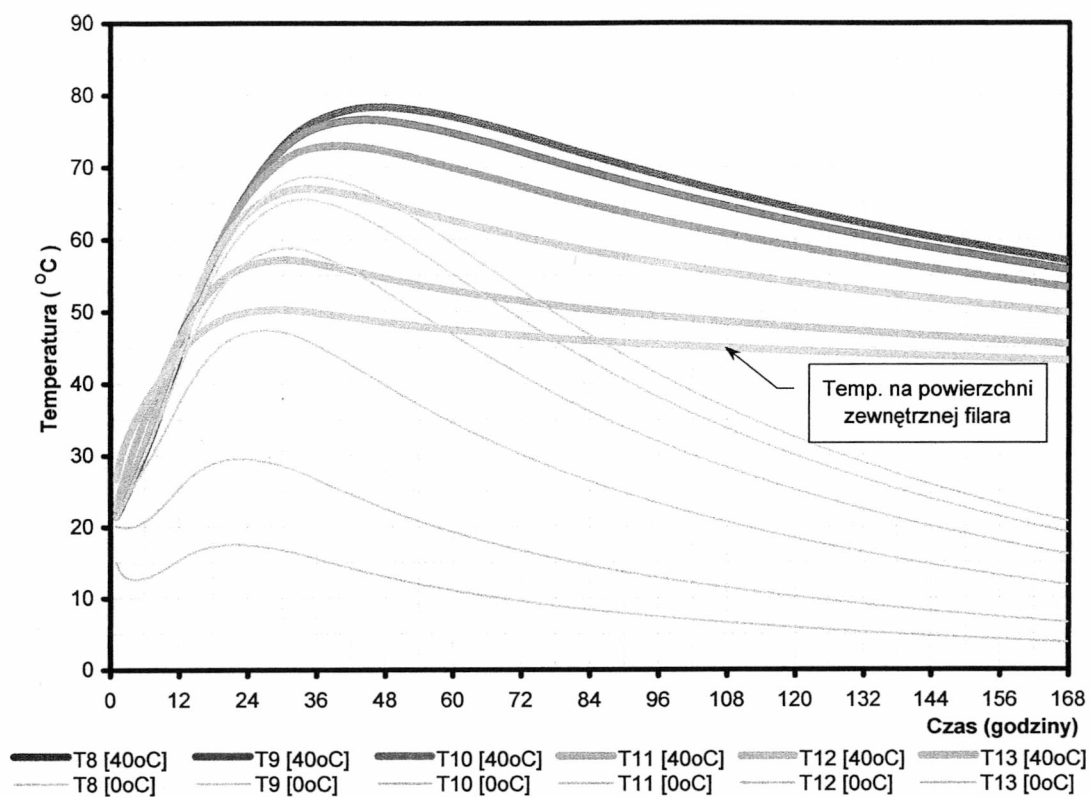
Rys. Z.74. Rozkład temperatur w filarze betonowym wzdłuż osi środkowej, (rys. 5.1 a – $T_0 = 20^\circ\text{C}$)



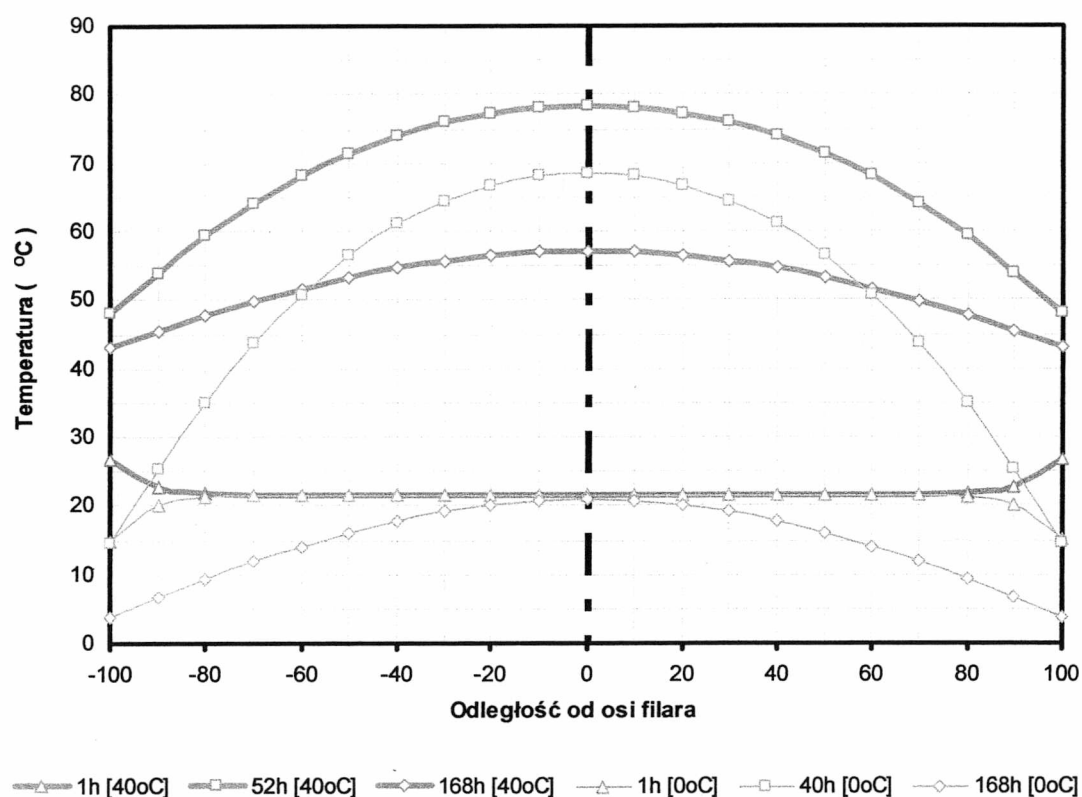
Rys. Z.75. Wartości temperatur w funkcji czasu obliczone w filarze betonowym średnicy $\phi = 2$ m, (rys. 5.1 a – $T_0 = 30^\circ\text{C}$)



Rys. Z.76. Rozkład temperatur w filarze betonowym wzdłuż osi środkowej, (rys. 5.1 a – $T_0 = 30^\circ\text{C}$)

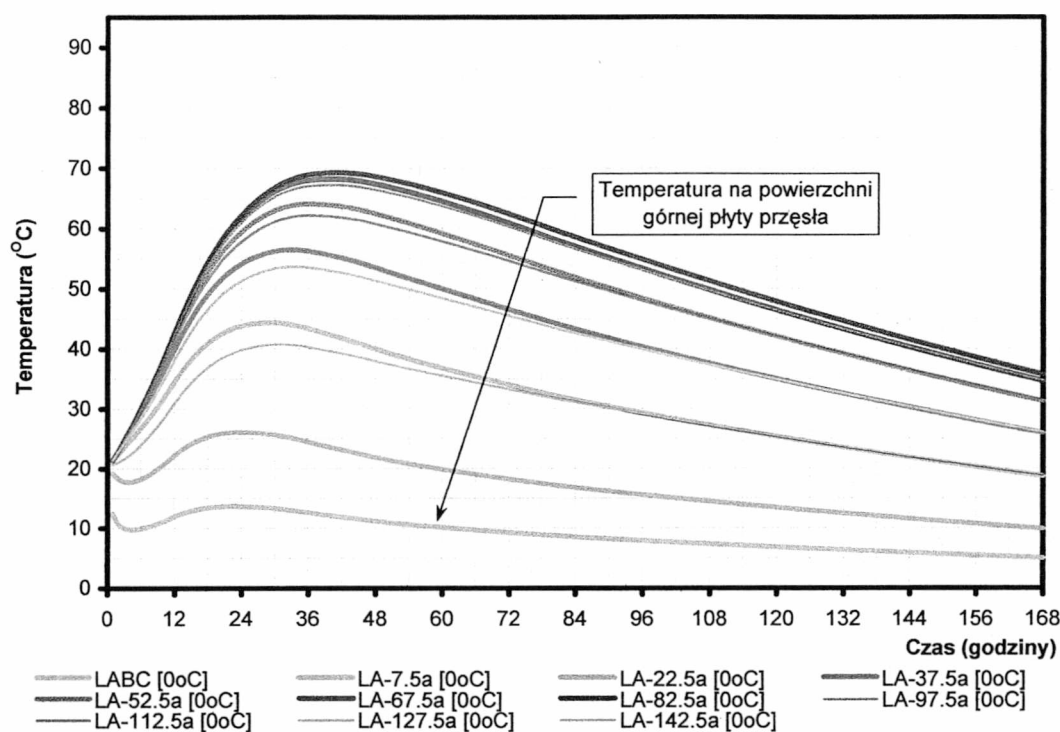


Rys. Z.77. Wartości temperatur w funkcji czasu obliczone w filarze betonowym średnicy $\phi = 2$ m, (rys. 5.1 a – $T_0 = 40^\circ\text{C}$)

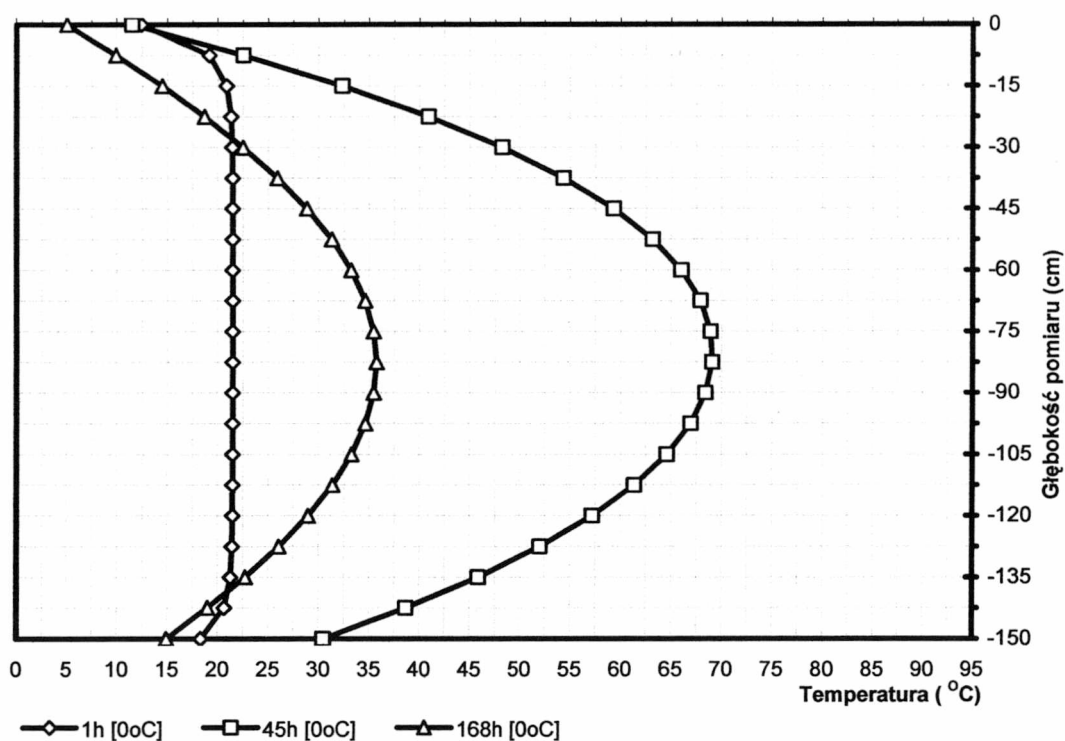


Rys. Z.78. Rozkład temperatur w filarze betonowym wzdłuż osi środkowej, (rys. 5.1 a – $T_0 = 40^\circ\text{C}$)

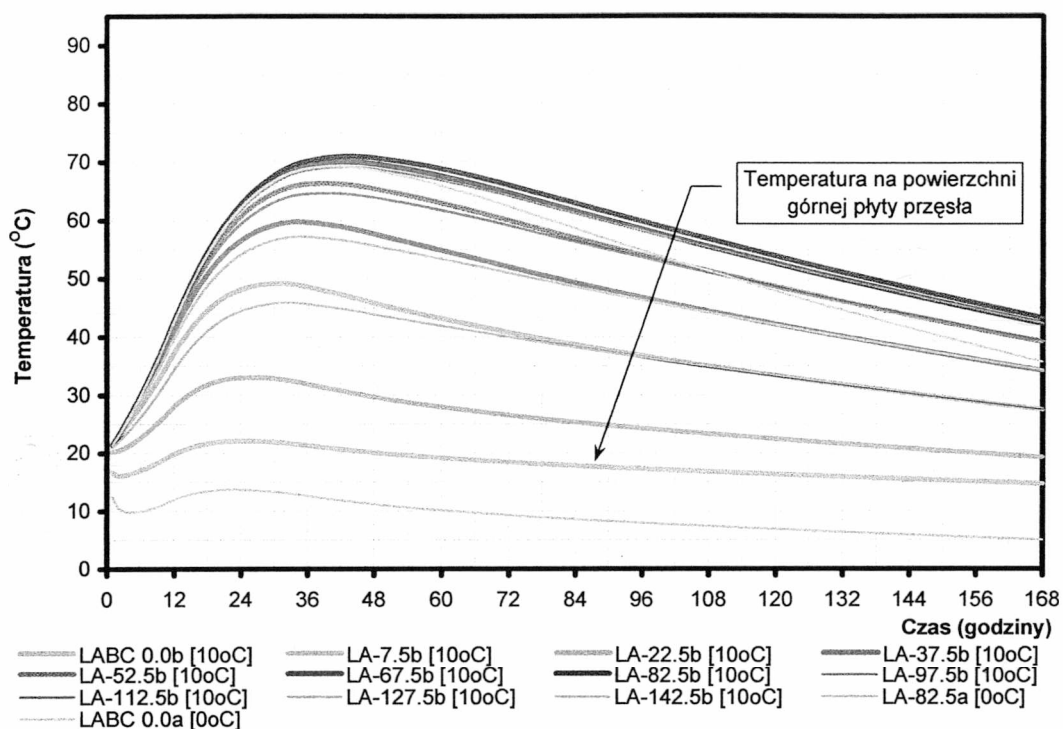
• Wyniki obliczeń dla przęsła łącznicy dojazdowej do estakady głównej



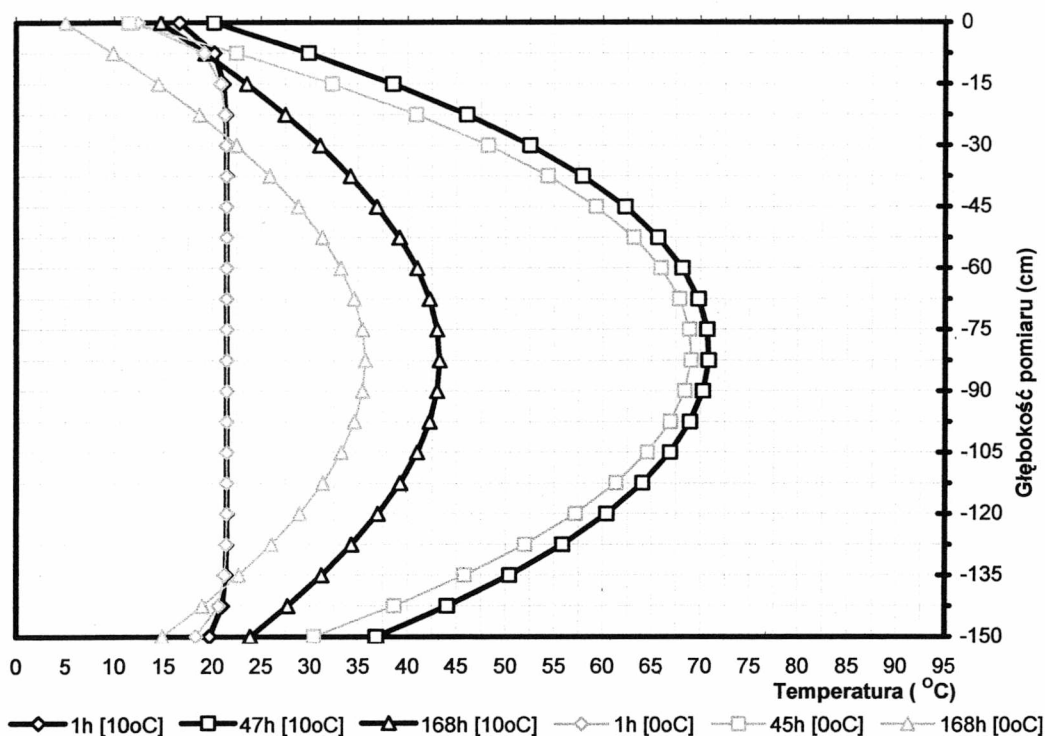
Rys. Z.79. Wartości temperatur w poszczególnych punktach osi pomiarowej pionowej w funkcji czasu dla przęsła łącznicy dojazdowej;
 - linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $T_0 = 0^{\circ}\text{C}$)



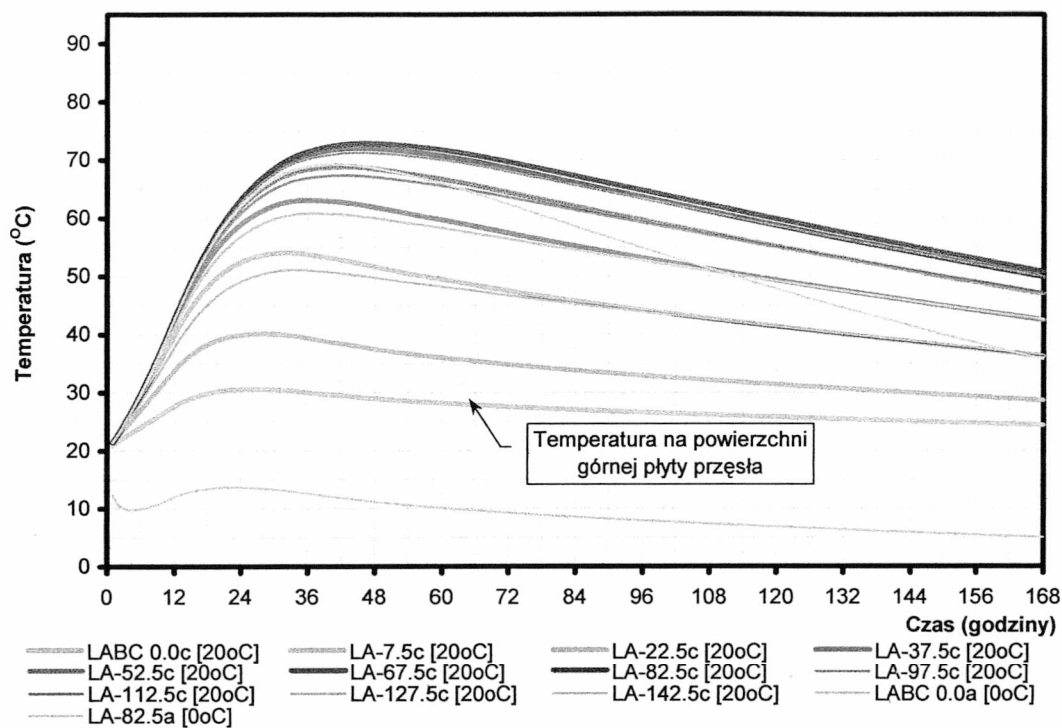
Rys. Z.80. Rozkład temperatur w przekroju poprzecznym przęsła łącznicy dojazdowej;
 - linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $T_0 = 0^{\circ}\text{C}$)



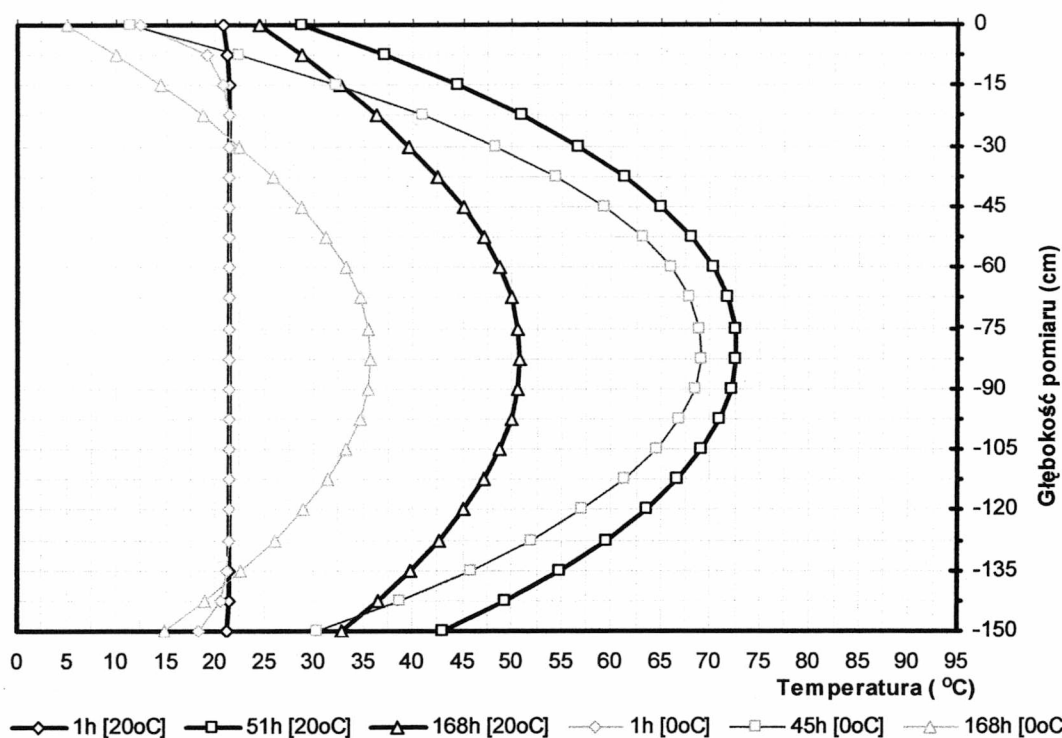
Rys. Z.81. Wartości temperatur w poszczególnych punktach osi pomiarowej pionowej w funkcji czasu dla przęsła łącznicy dojazdowej;
 - linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $T_0 = 10^0\text{C}$)



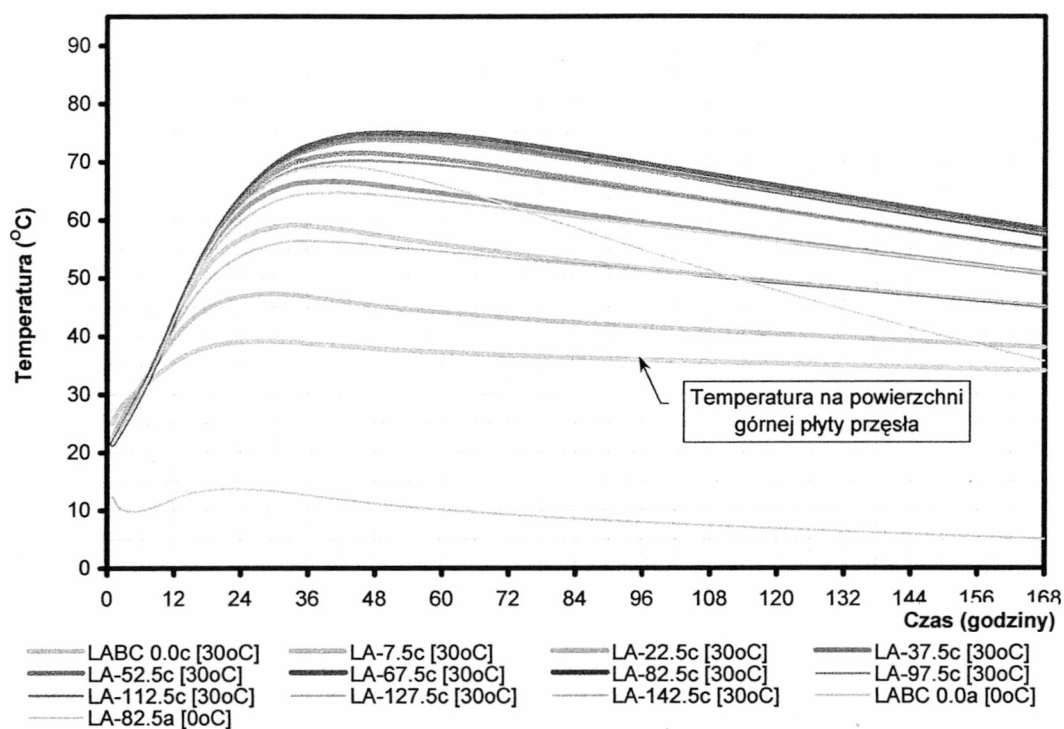
Rys. Z.82. Rozkład temperatur w przekroju poprzecznym przęsła łącznicy dojazdowej;
 - linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $T_0 = 10^0\text{C}$)



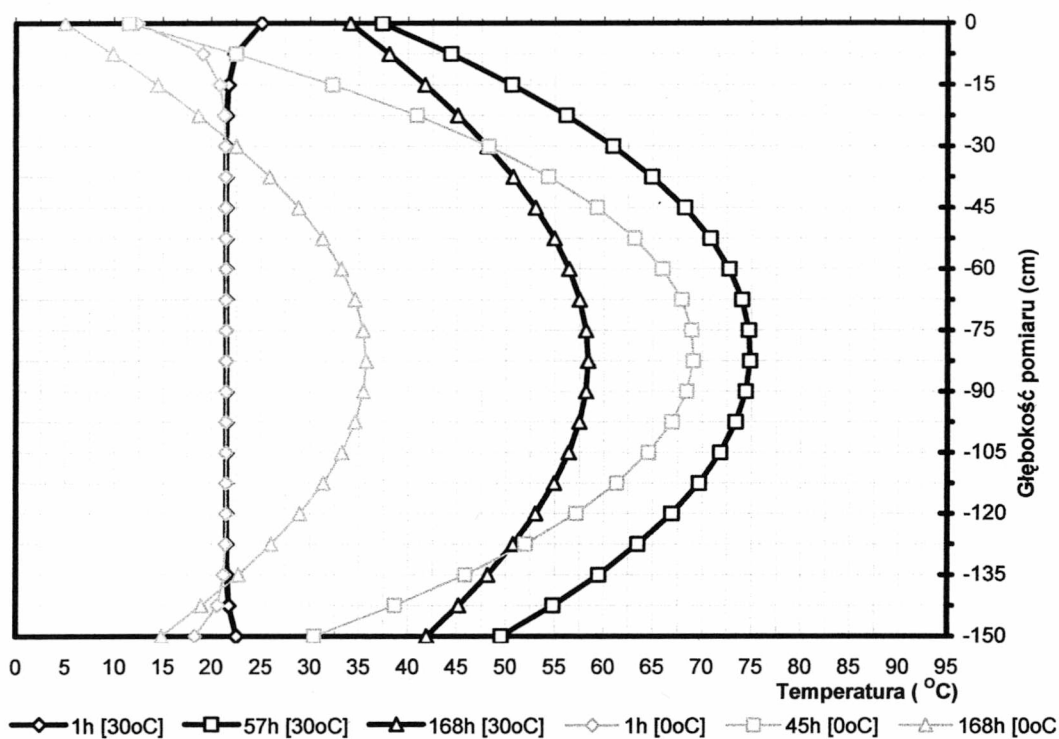
Rys. Z.83. Wartości temperatur w poszczególnych punktach osi pomiarowej pionowej w funkcji czasu dla przęsła łącznicy dojazdowej;
 - linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $T_0 = 20^0\text{C}$)



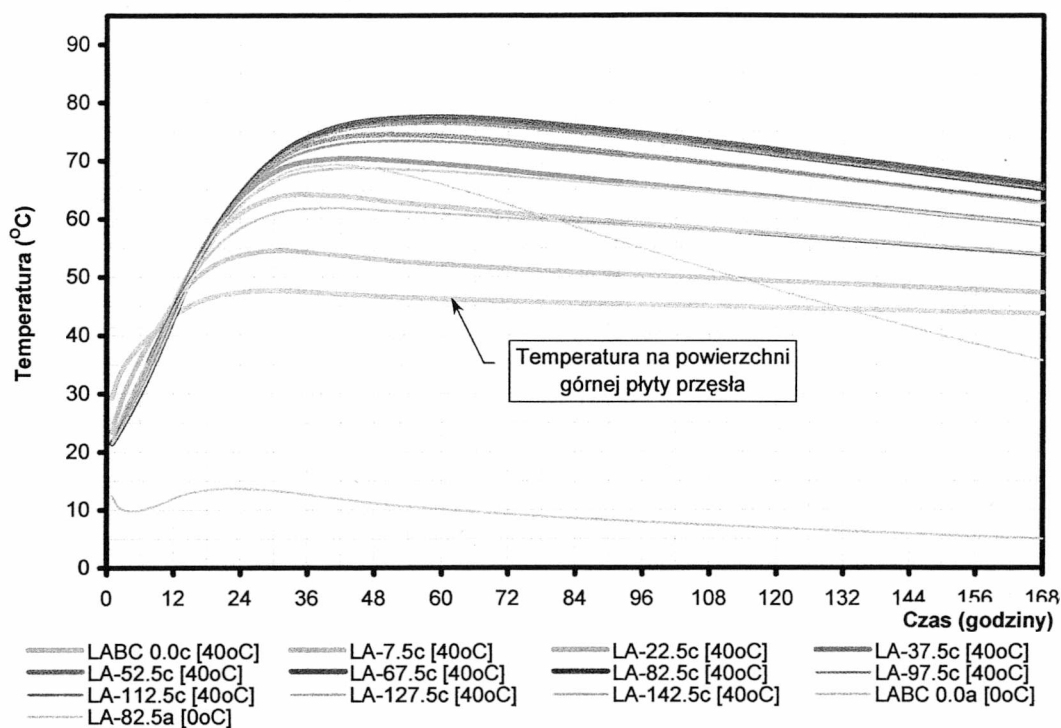
Rys. Z.84. Rozkład temperatur w przekroju poprzecznym przęsła łącznicy dojazdowej;
 - linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $T_0 = 20^0\text{C}$)



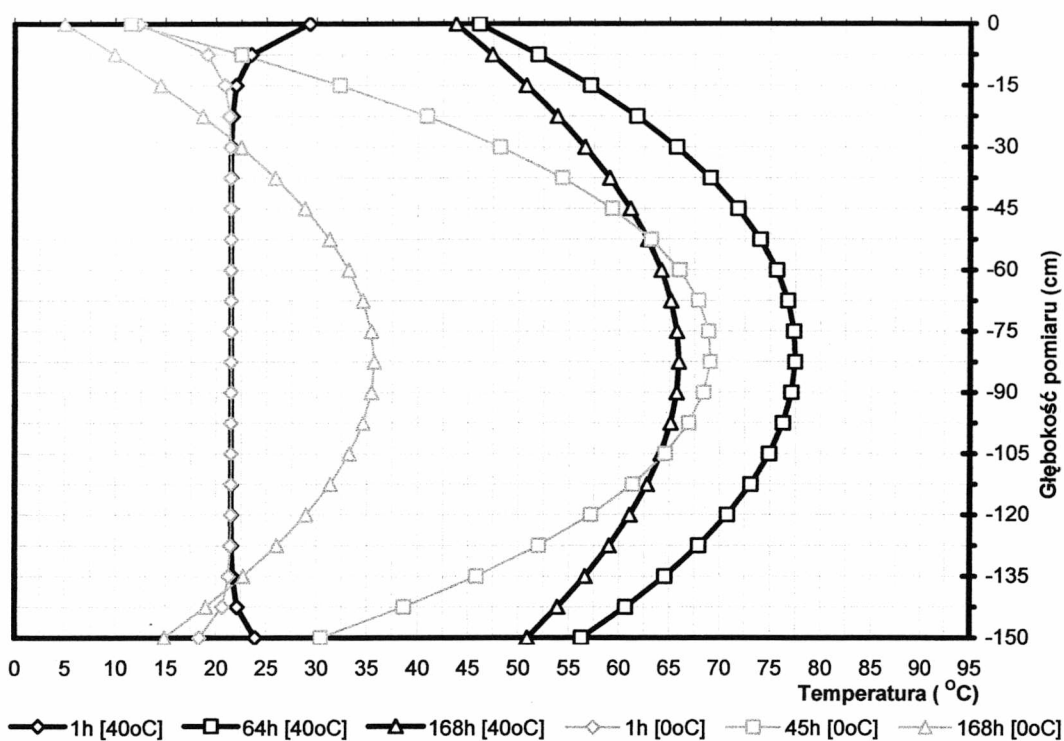
Rys. Z.85. Wartości temperatur w poszczególnych punktach osi pomiarowej pionowej w funkcji czasu dla przęsła łącznicy dojazdowej;
- linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $T_0 = 30^{\circ}\text{C}$)



Rys. Z.86. Rozkład temperatur w przekroju poprzecznym przęsła łącznicy dojazdowej;
- linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $T_0 = 30^{\circ}\text{C}$)



Rys. Z.87. Wartości temperatur w poszczególnych punktach osi pomiarowej pionowej w funkcji czasu dla przęsła łącznicy dojazdowej;
- linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $T_0 = 40^0\text{C}$)



Rys. Z.88. Rozkład temperatur w przekroju poprzecznym przęsła łącznicy dojazdowej;
- linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $T_0 = 40^0\text{C}$)

• Wnioski

1. Wzrost temperatury powietrza powoduje spadek maksymalnej różnicy temperatur ΔT_{wz} między środkiem i powierzchnią zewnętrzną elementu oraz wydłuża czas jej wystąpienia. Czas wystąpienia temperatury maksymalnej oraz zakończonej analizy wraz z podaną temperaturą zestawiono w tab. Z.5.

Tablica Z.5. Zestawienie czasu wystąpienia maksymalnej różnicy temperatury z podaną temperaturą, oraz różnicy temperatury po zakończonej analizie

Element	Stała temperatura otoczenia [$^{\circ}\text{C}$]									
	0		10		20		30		40	
	Czas	Temp	Czas	Temp	Czas	Temp	Czas	Temp	Czas	Temp
Filar	40 h	54 $^{\circ}\text{C}$	43 h	48 $^{\circ}\text{C}$	45 h	42 $^{\circ}\text{C}$	48 h	36 $^{\circ}\text{C}$	52 h	30 $^{\circ}\text{C}$
	168h	17 $^{\circ}\text{C}$	168h	16 $^{\circ}\text{C}$	168h	16 $^{\circ}\text{C}$	168h	15 $^{\circ}\text{C}$	168h	14 $^{\circ}\text{C}$
Łącznica	45 h	58 $^{\circ}\text{C}$	47 h	51 $^{\circ}\text{C}$	51 h	44 $^{\circ}\text{C}$	57 h	37 $^{\circ}\text{C}$	64 h	31 $^{\circ}\text{C}$
	168h	31 $^{\circ}\text{C}$	168h	29 $^{\circ}\text{C}$	168h	26 $^{\circ}\text{C}$	168h	24 $^{\circ}\text{C}$	168h	22 $^{\circ}\text{C}$

2. Wzrost temperatura powietrza powoduje wzrost maksymalnej temperatury wewnętrznej i wydłuża czas jej wystąpienia.
3. Wzrost stałej temperatury powietrza o 10 $^{\circ}\text{C}$, powoduje spadek maksymalnej różnicy temperatur ΔT_{wz} dla rozpatrywanych elementów o 6 $^{\circ}\text{C}$.
4. Maksymalna różnica temperatur występuje w fazie spadku temperatur, tzn. po czasie, wystąpienia maksymalnej temperatury wewnętrznej elementu.

Z.7. Wpływ powierzchniowego współczynnika przenoszenia ciepła

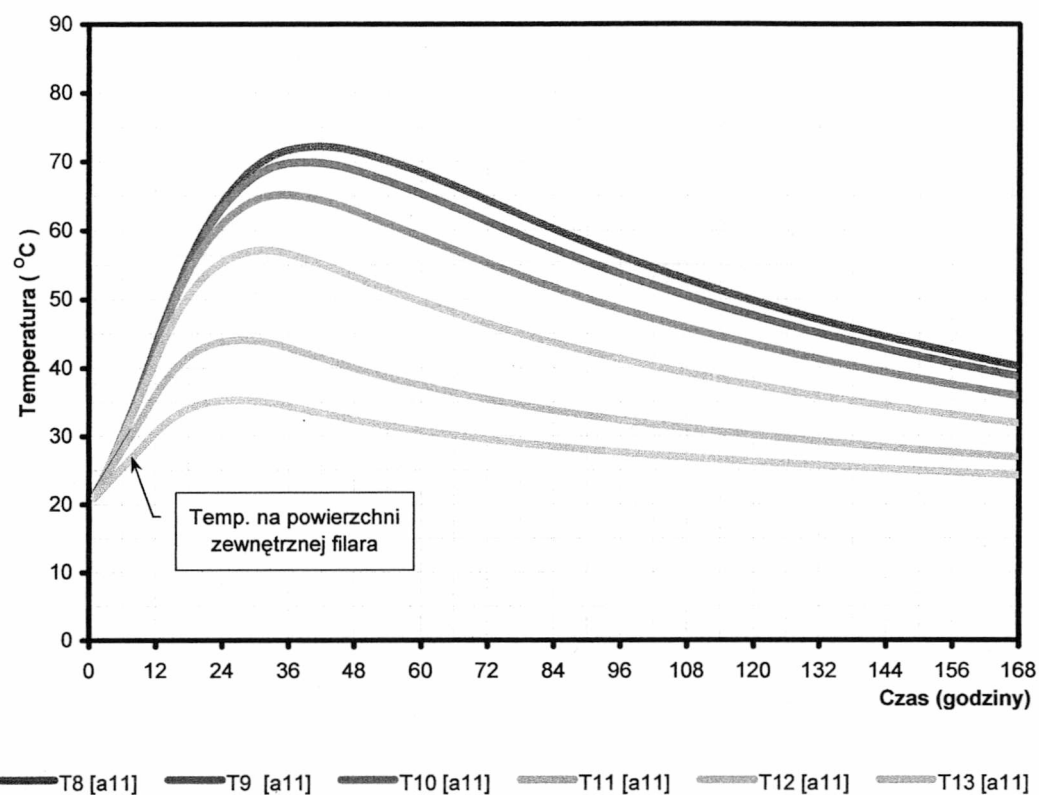
Celem analizy jest określenie wpływu wartości powierzchniowego współczynnika przejmowania ciepła na różnicę temperatur ΔT_{wz} między środkiem i powierzchnią zewnętrzną elementu oraz wzrost lub obniżenie maksymalnej temperatury wewnętrznej elementu.

Rozpatrzono następujące przypadki;

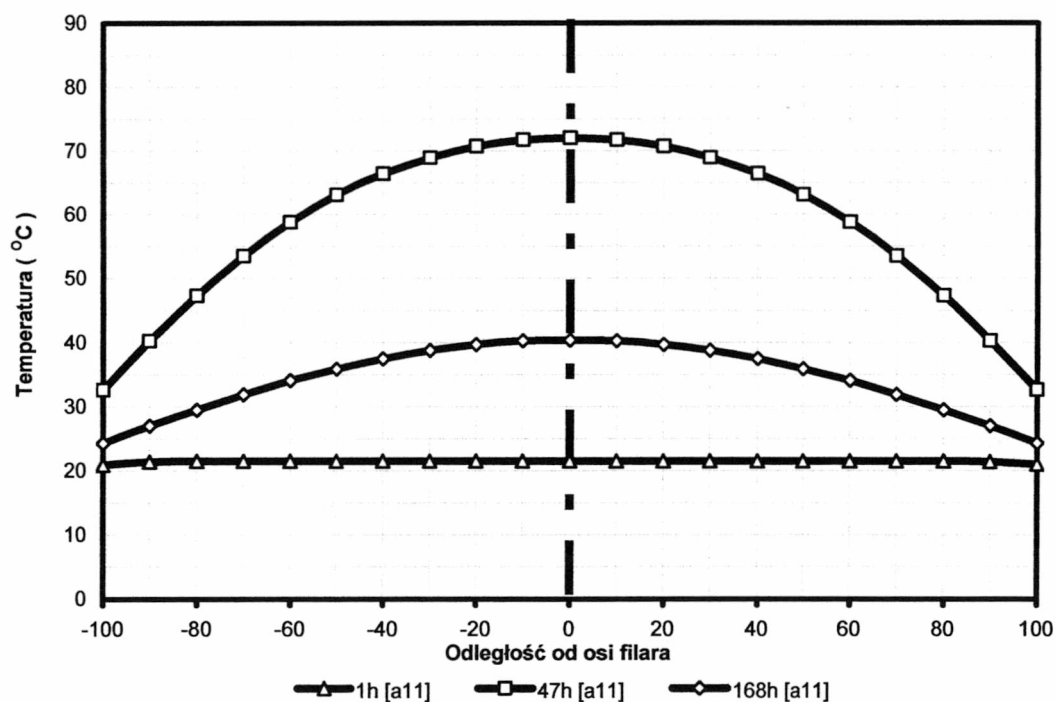
- $\alpha = 11 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C})$ - dla prędkości wiatru wynoszącej 1 m/s,
- $\alpha = 15 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C})$ - dla prędkości wiatru wynoszącej 2 m/s,
- $\alpha = 23 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C})$ - dla prędkości wiatru wynoszącej 4 m/s,
- $\alpha = 31 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C})$ - dla prędkości wiatru wynoszącej 6 m/s,
- $\alpha = 38 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C})$ - dla prędkości wiatru wynoszącej 8 m/s,

Wartości współczynników termofizycznych materiałów wykorzystanych w analizie zestawiono w tablicy 5.1. Stałą temperaturę powietrza i początkową temperaturę mieszanki betonowej, zestawiono w tab. 5.2.

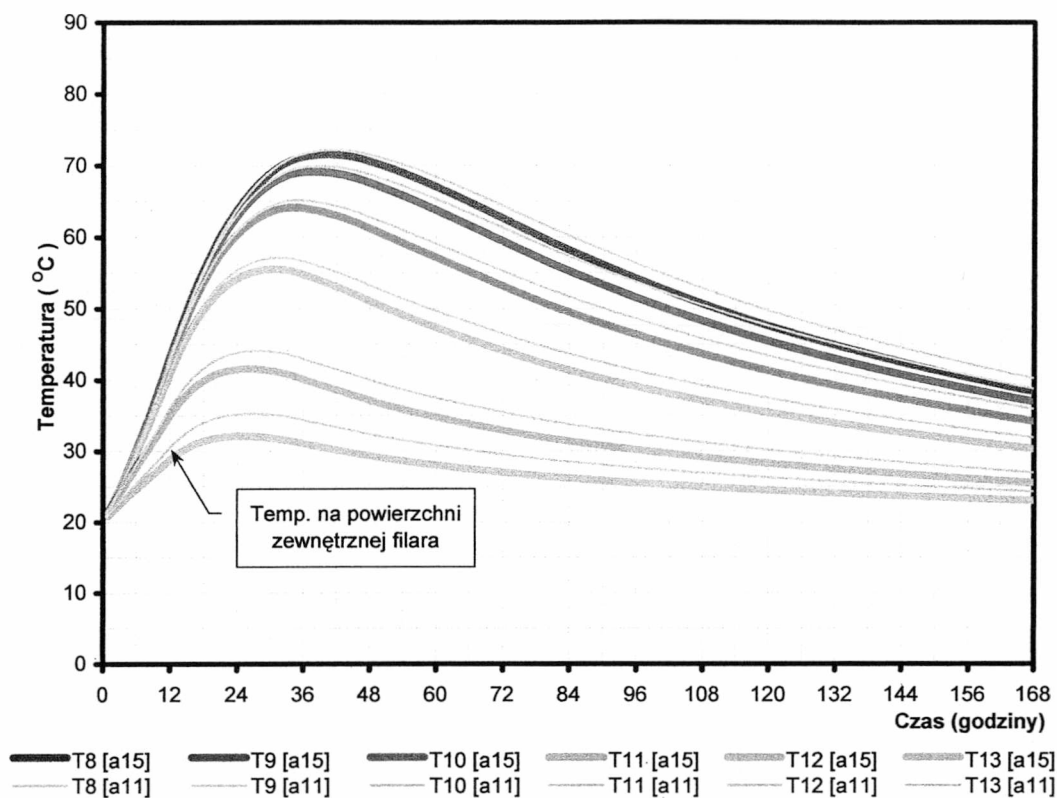
• Wyniki obliczeń dla filara



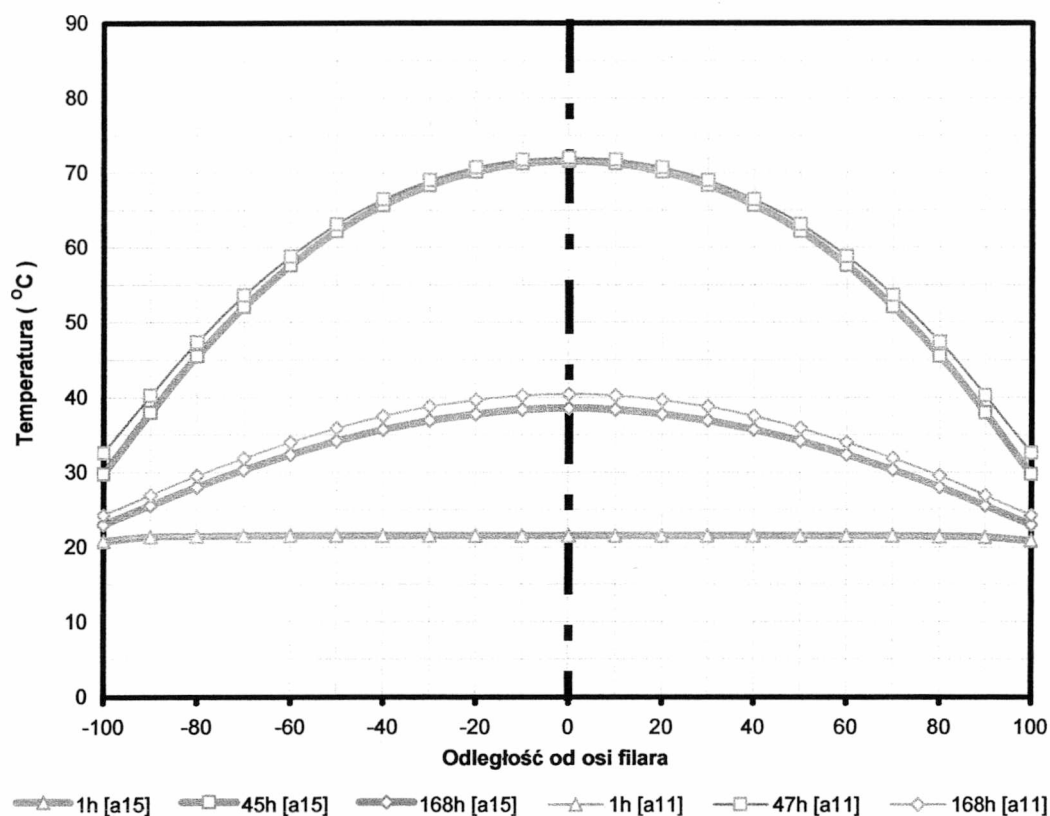
Rys. Z.89. Wartości temperatur w funkcji czasu obliczone w filarze betonowym średnicy $\phi = 2$ m, (rys. 5.1 a – $\alpha = 11 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$)



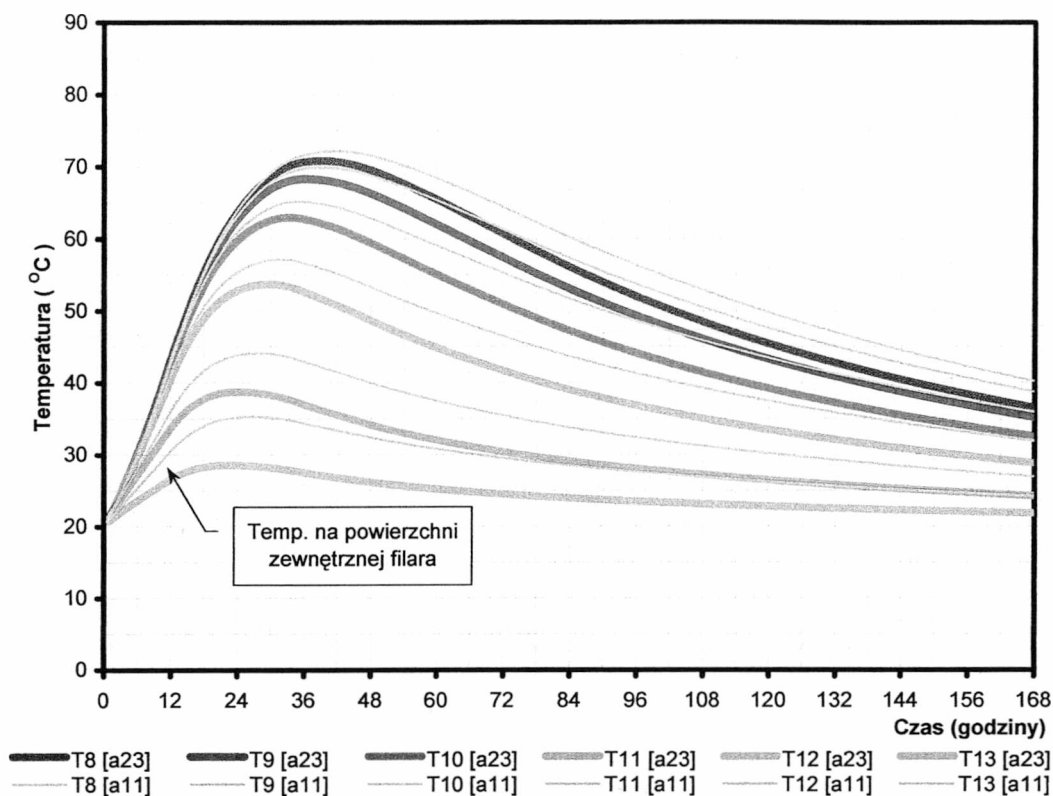
Rys. Z.90. Rozkład temperatur w filarze betonowym wzdłuż osi środkowej, (rys. 5.1 a – $\alpha = 11 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$)



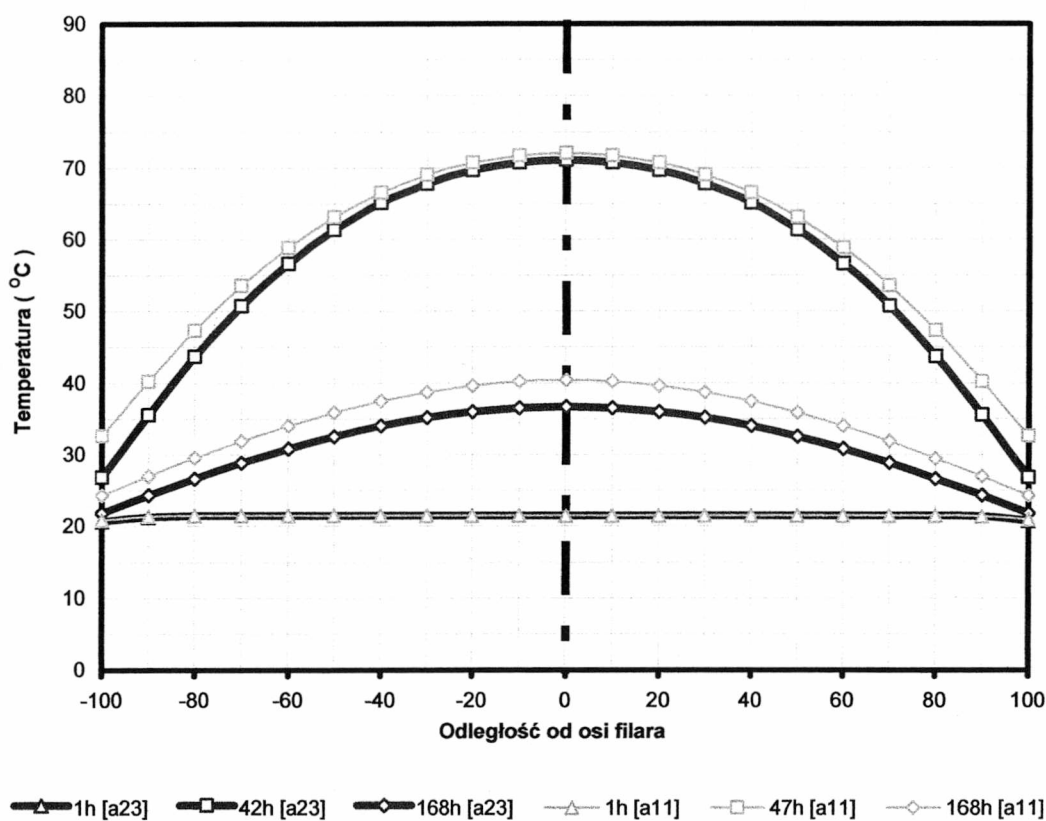
Rys. Z.91. Wartości temperatur w funkcji czasu obliczone w filarze betonowym średnicy $\phi = 2$ m, (rys. 5.1 a – $\alpha = 15 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$)



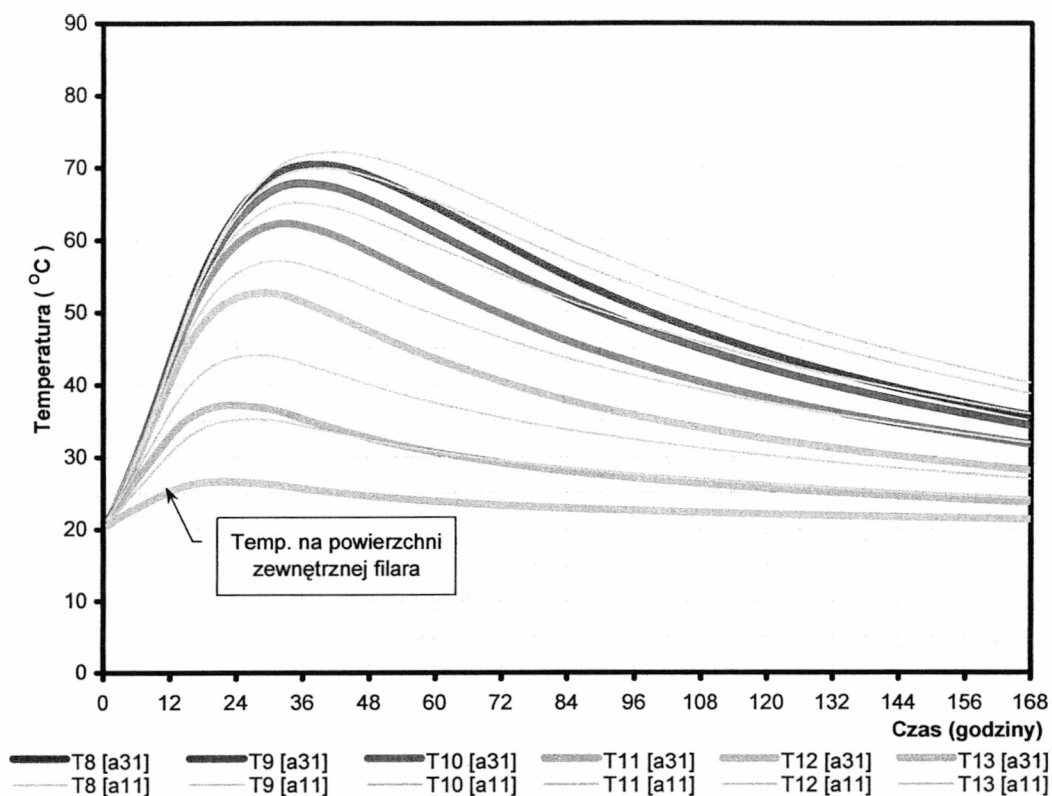
Rys. Z.92. Rozkład temperatur w filarze betonowym wzdłuż osi środkowej, (rys. 5.1 a – $\alpha = 15 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$)



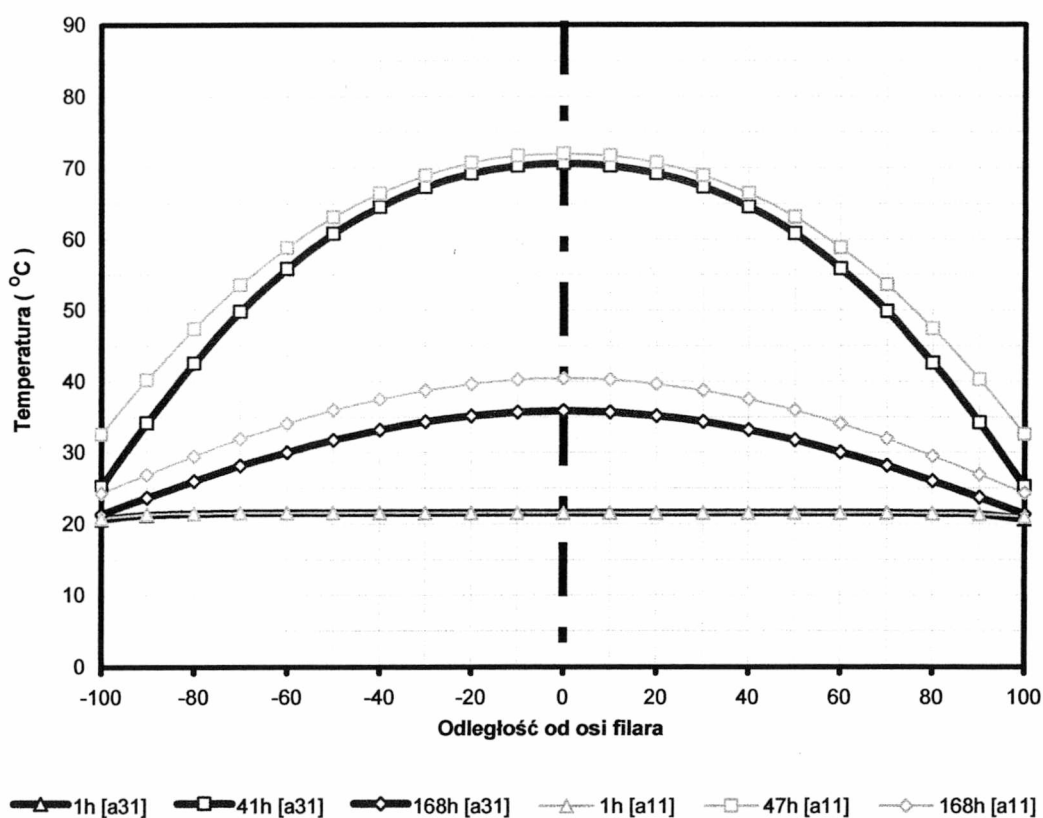
Rys. Z.93. Wartości temperatur w funkcji czasu obliczone w filarze betonowym średnicy $\phi = 2$ m, (rys. 5.1 a – $\alpha = 23 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$)



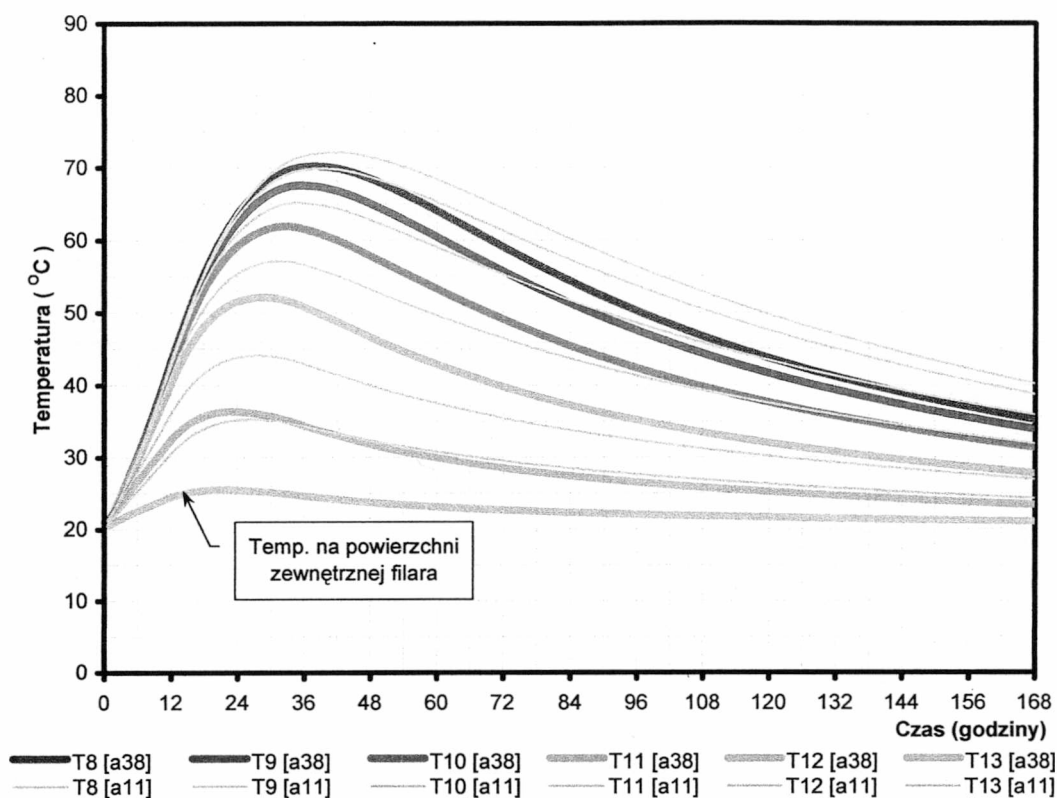
Rys. Z.94. Rozkład temperatur w filarze betonowym wzdłuż osi środkowej, (rys. 5.1 a – $\alpha = 23 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$)



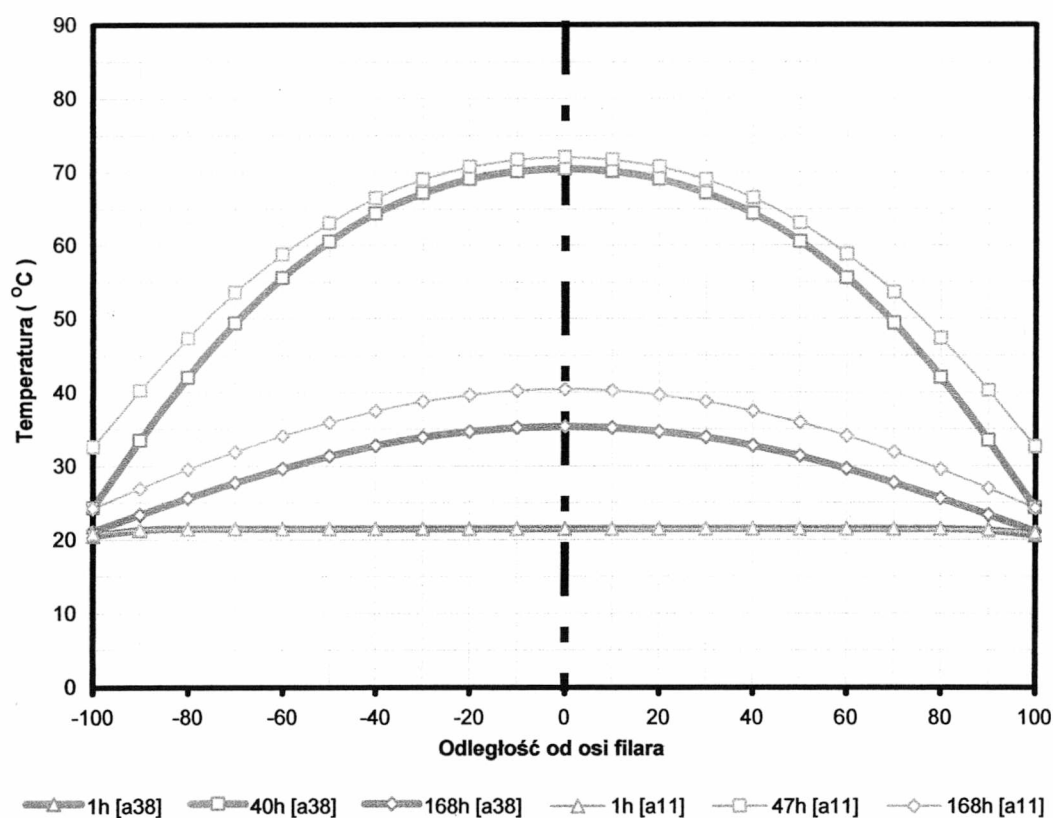
Rys. Z.95. Wartości temperatur w funkcji czasu obliczone w filarze betonowym średnicy $\phi = 2$ m, (rys. 5.1 a – $\alpha = 31 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$)



Rys. Z.96. Rozkład temperatur w filarze betonowym wzdłuż osi środkowej (rys. 5.1 a – $\alpha = 31 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$)

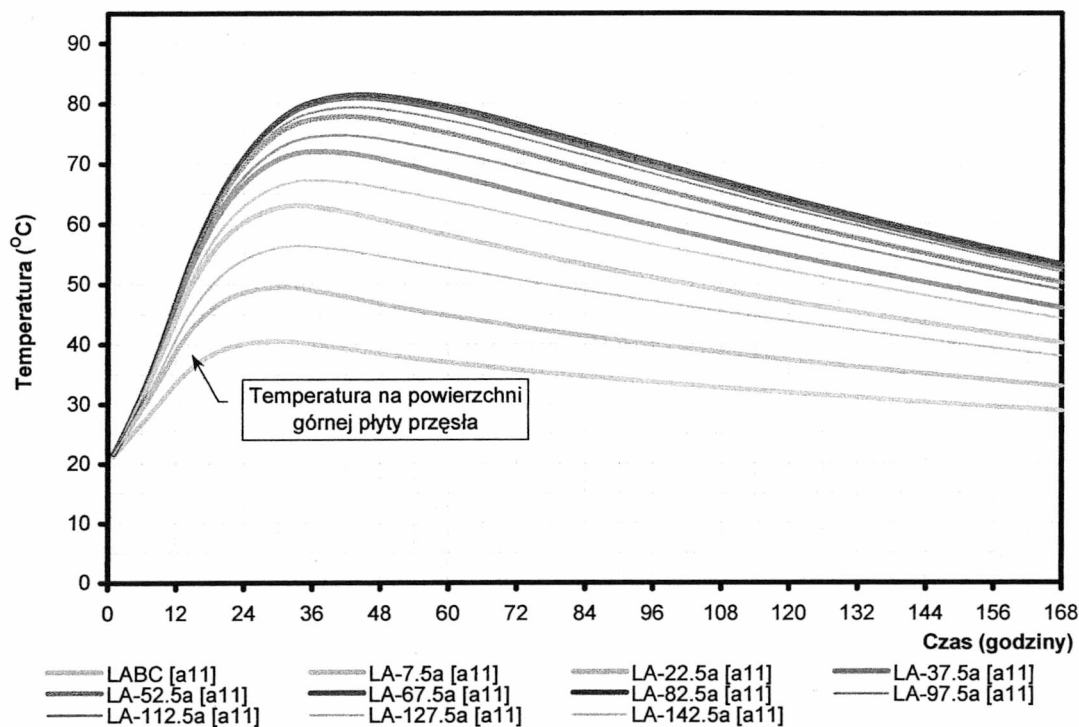


Rys. Z.97. Wartości temperatur w funkcji czasu obliczone w filarze betonowym średnicy $\phi = 2$ m, (rys. 5.1 a – $\alpha = 38 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$)

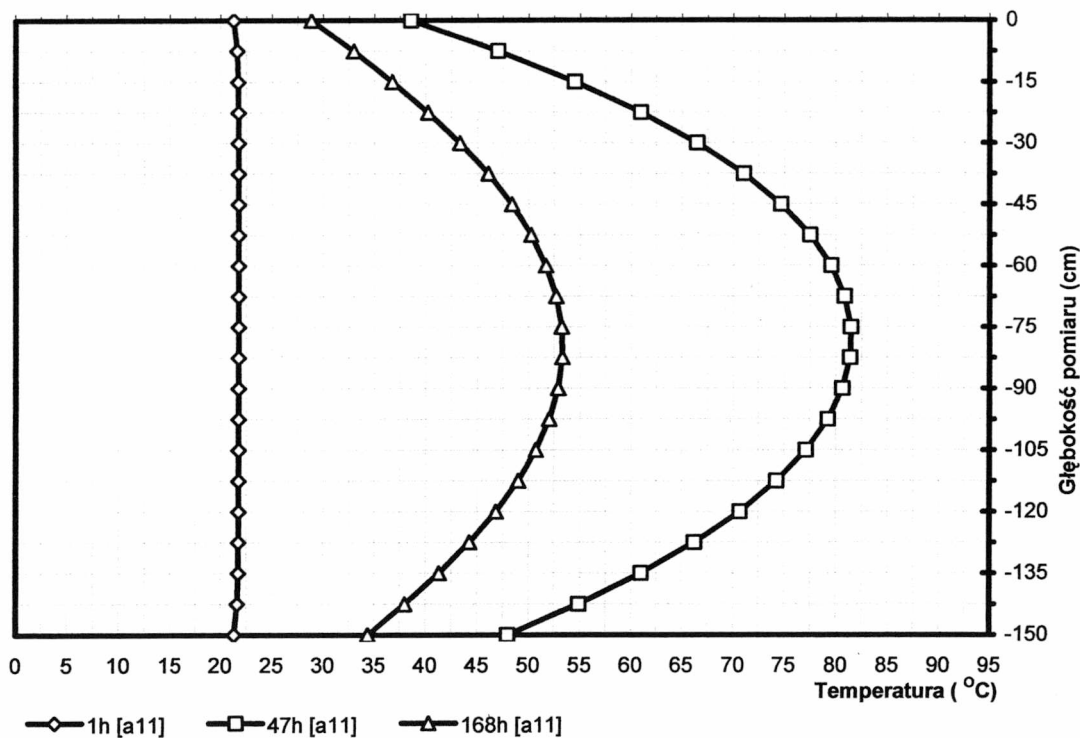


Rys. Z.98. Rozkład temperatur w filarze betonowym wzdłuż osi środkowej, (rys. 5.1 a – $\alpha = 38 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$)

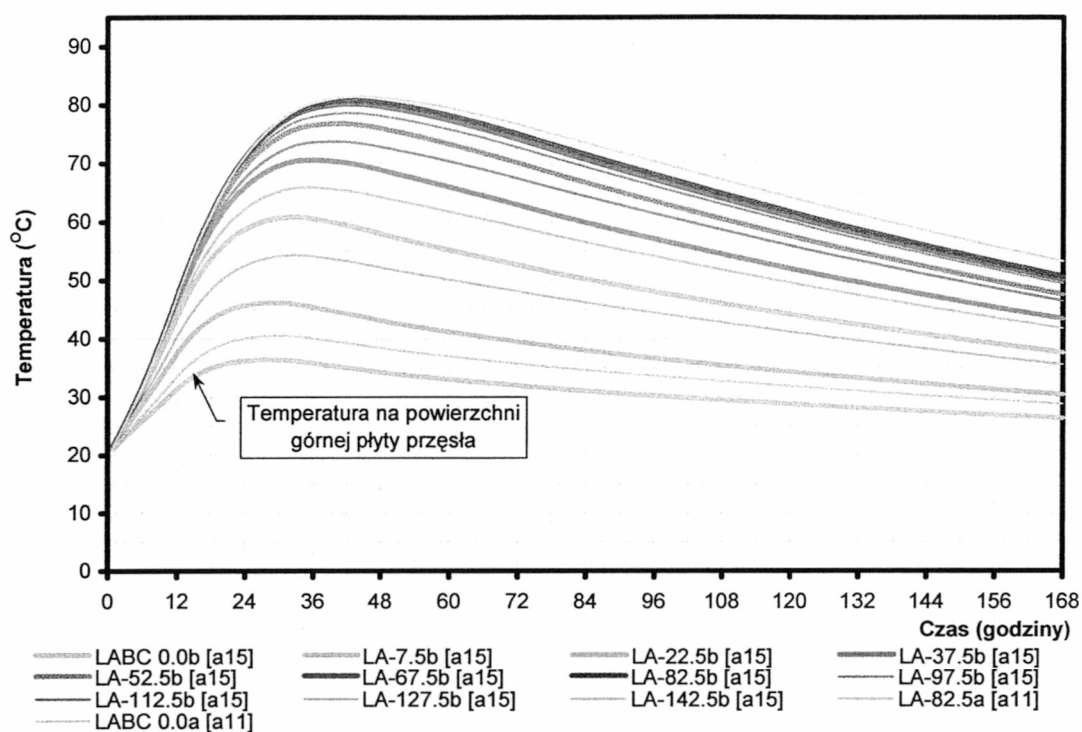
• Wyniki obliczeń dla przęsła łącznicy dojazdowej do estakady głównej



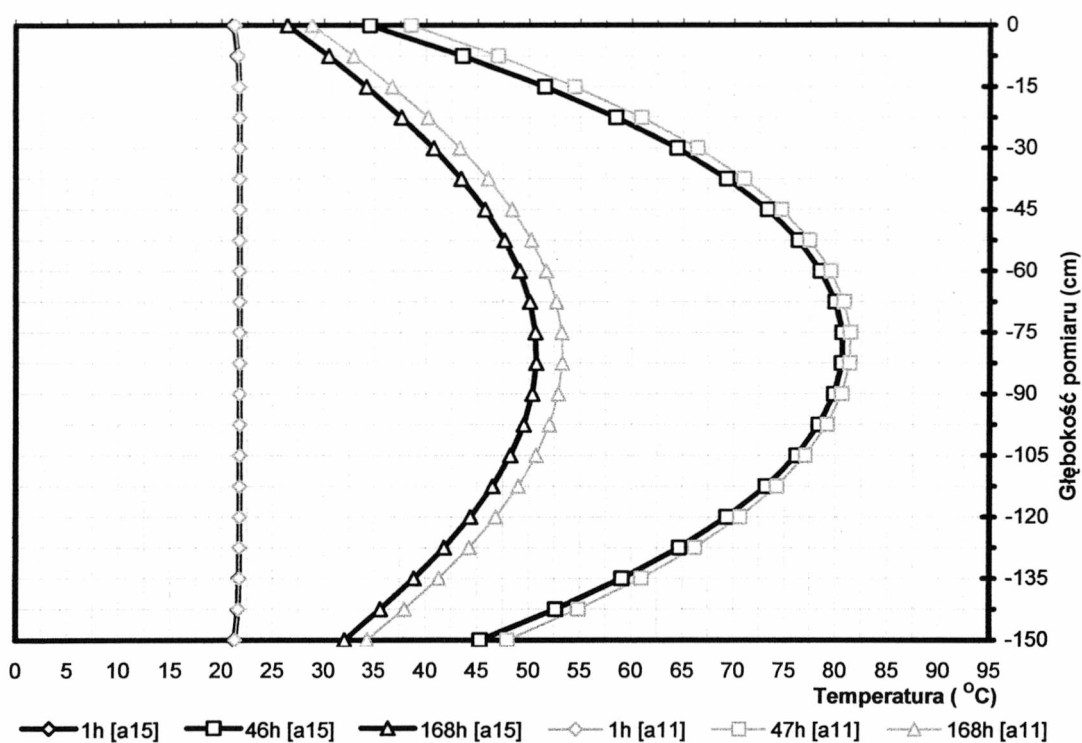
Rys. Z.99. Wartości temperatur w poszczególnych punktach osi pomiarowej pionowej w funkcji czasu dla przęsła łącznicy dojazdowej;
 - linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $\alpha = 11 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$)



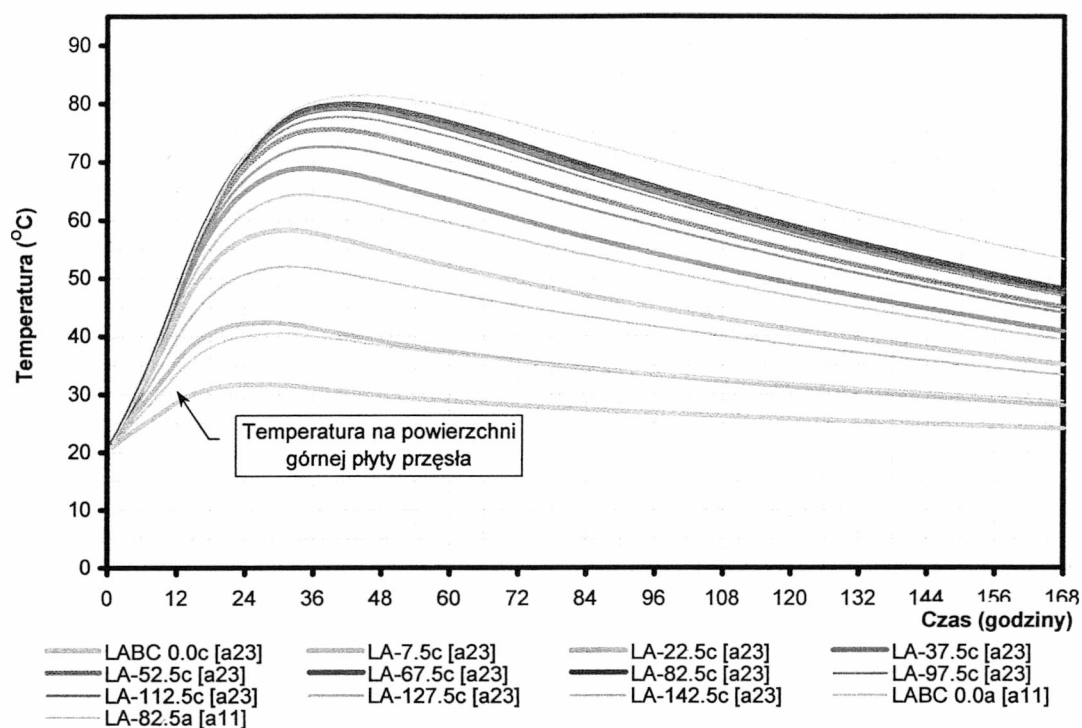
Rys. Z.100. Rozkład temperatur w przekroju poprzecznym przęsła łącznicy dojazdowej;
 - linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $\alpha = 11 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$)



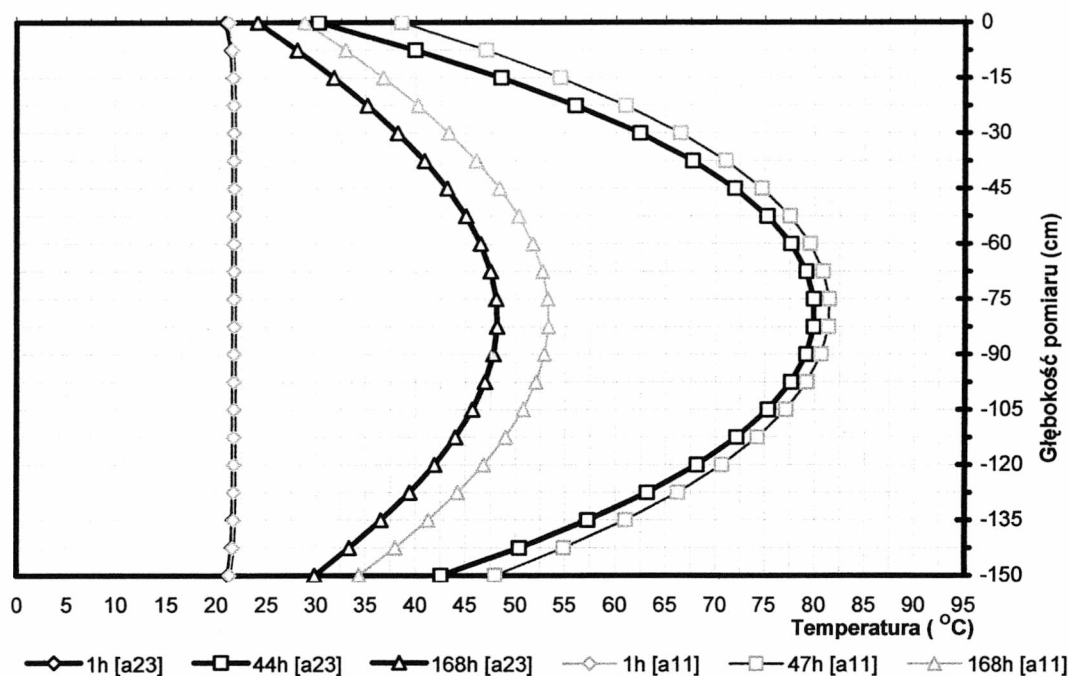
Rys. Z.101. Wartości temperatur w poszczególnych punktach osi pomiarowej pionowej w funkcji czasu dla przęsła łącznicy dojazdowej;
- linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $\alpha = 15 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$)



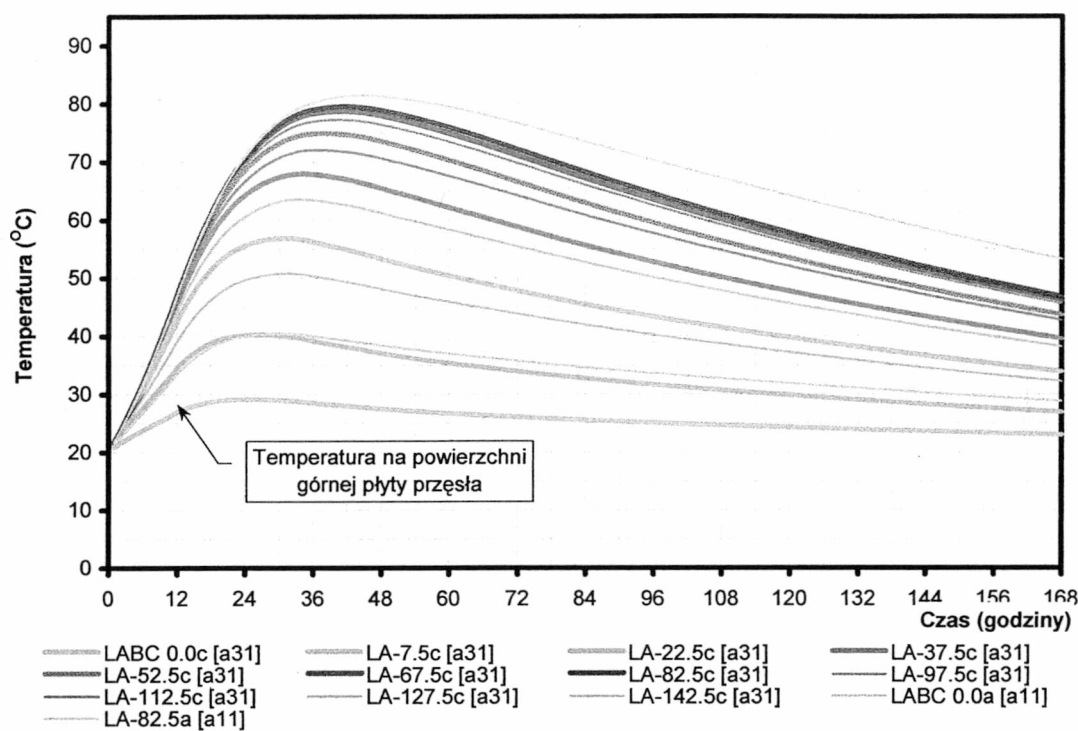
Rys. Z.102. Rozkład temperatur w przekroju poprzecznym przęsła łącznicy dojazdowej;
- linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $\alpha = 15 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$)



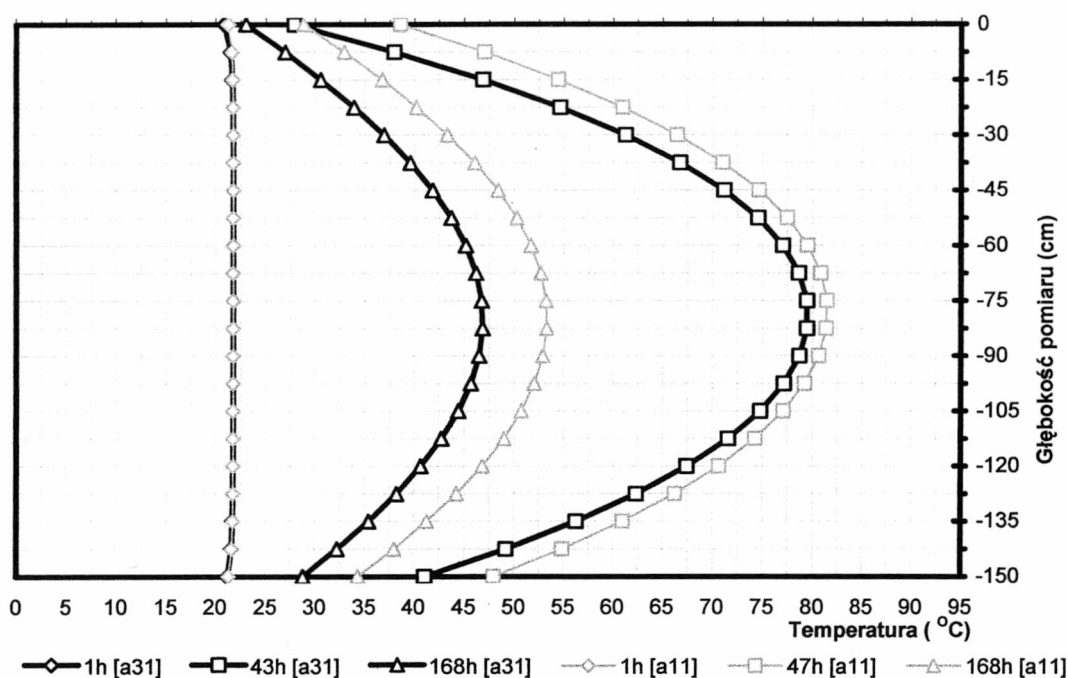
Rys. Z.103. Wartości temperatur w poszczególnych punktach osi pomiarowej pionowej w funkcji czasu dla przęsła łącznicy dojazdowej;
 - linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $\alpha = 23 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$)



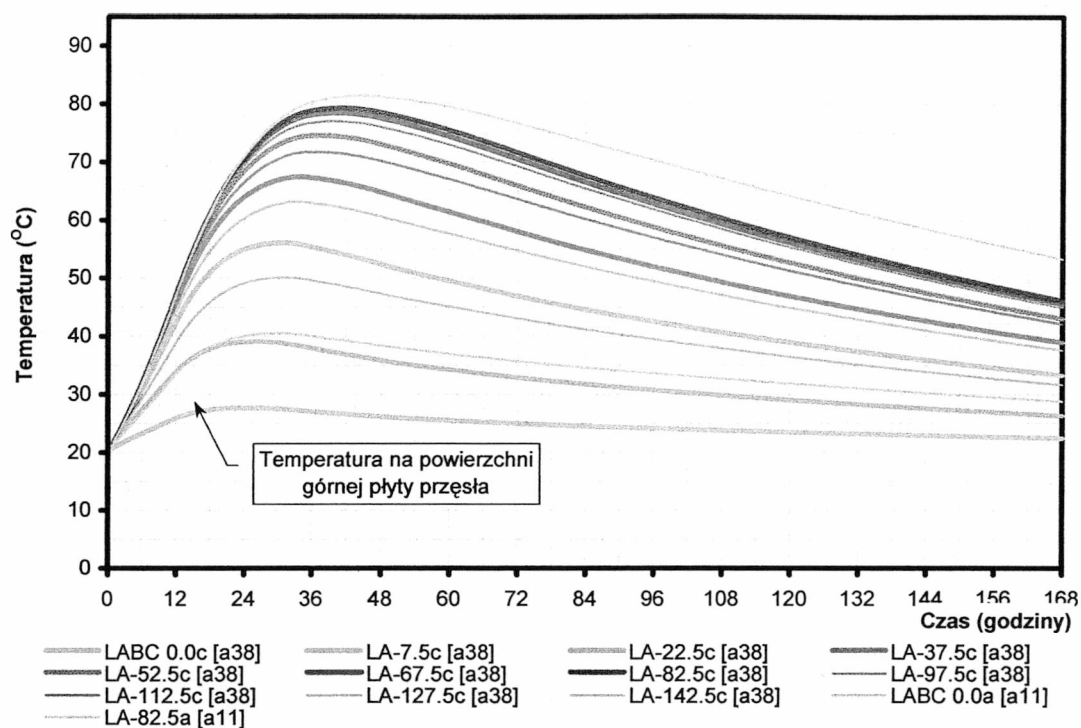
Rys. Z.104. Rozkład temperatur w przekroju poprzecznym przęsła łącznicy dojazdowej;
 - linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $\alpha = 23 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$)



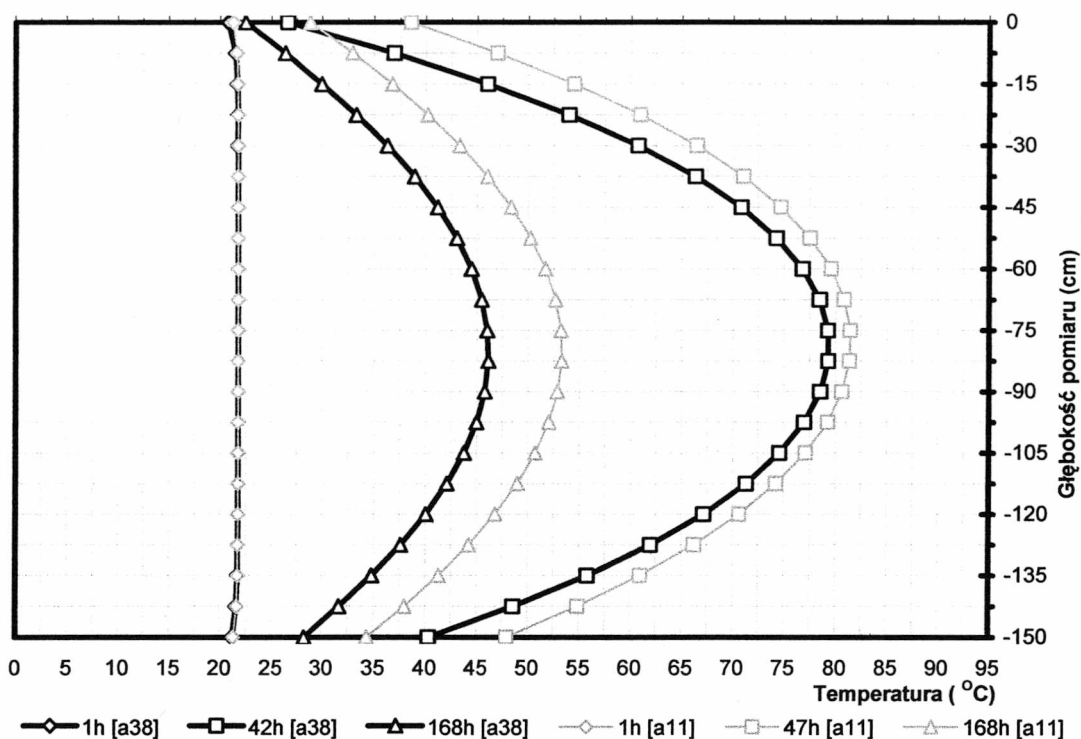
Rys. Z.105. Wartości temperatur w poszczególnych punktach osi pomiarowej pionowej w funkcji czasu dla przęsła łącznicy dojazdowej;
 - linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $\alpha = 31 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$)



Rys. Z.106. Rozkład temperatur w przekroju poprzecznym przęsła łącznicy dojazdowej;
 - linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $\alpha = 31 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$)



Rys. Z.107. Wartości temperatur w poszczególnych punktach osi pomiarowej pionowej w funkcji czasu dla przęsła łącznicy dojazdowej;
- linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $\alpha = 38 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$)



Rys. Z.108. Rozkład temperatur w przekroju poprzecznym przęsła łącznicy dojazdowej;
- linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c – $\alpha = 38 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$)

• Wnioski

1. Wzrost współczynnika (wyższa prędkości wiatru) zwiększa maksymalną różnicę temperatur ΔT_{wz} między środkiem i powierzchnią zewnętrzną elementu oraz skraca czas jej wystąpienia. Związane jest to z intensywniejszym chłodzeniem zewnętrznych powierzchni elementu. Czas wystąpienia temperatury maksymalnej oraz zakończonej analizy wraz z podaną temperaturą, zestawiono w tab. Z.6.

Tablica Z.6. Zestawienie czasu wystąpienia maksymalnej różnicy temperatury z podaną temperaturą, oraz różnicy temperatury po zakończonej analizie

Element	Powierzchniowy współczynnik przejmowania ciepła [$J/(m^2 \cdot s \cdot K)$]									
	11		15		23		31		38	
	Czas	Temp	Czas	Temp	Czas	Temp	Czas	Temp	Czas	Temp
Filar	47 h	39 °C	45 h	42 °C	42 h	44 °C	41 h	45 °C	40 h	46 °C
	168h	16 °C	168h	16 °C	168h	15 °C	168h	14 °C	168h	14 °C
Łącznica	47 h	43 °C	46 h	46 °C	44 h	50 °C	43 h	52 °C	42 h	53 °C
	168h	24 °C	168h	24 °C	168h	24 °C	168h	24 °C	168h	24 °C

2. Wzrost współczynnika powoduje nieznaczne obniżenie maksymalnej temperatury wewnętrznej i skraca czas jej wystąpienia.
3. Wzrost współczynnika powoduje wzrost maksymalnej różnicy temperatur ΔT_{wz} dla rozpatrywanych elementów.
4. Maksymalna różnica temperatur występuje w fazie spadku temperatur, tzn. po czasie, wystąpienia maksymalnej temperatury wewnętrznej elementu.

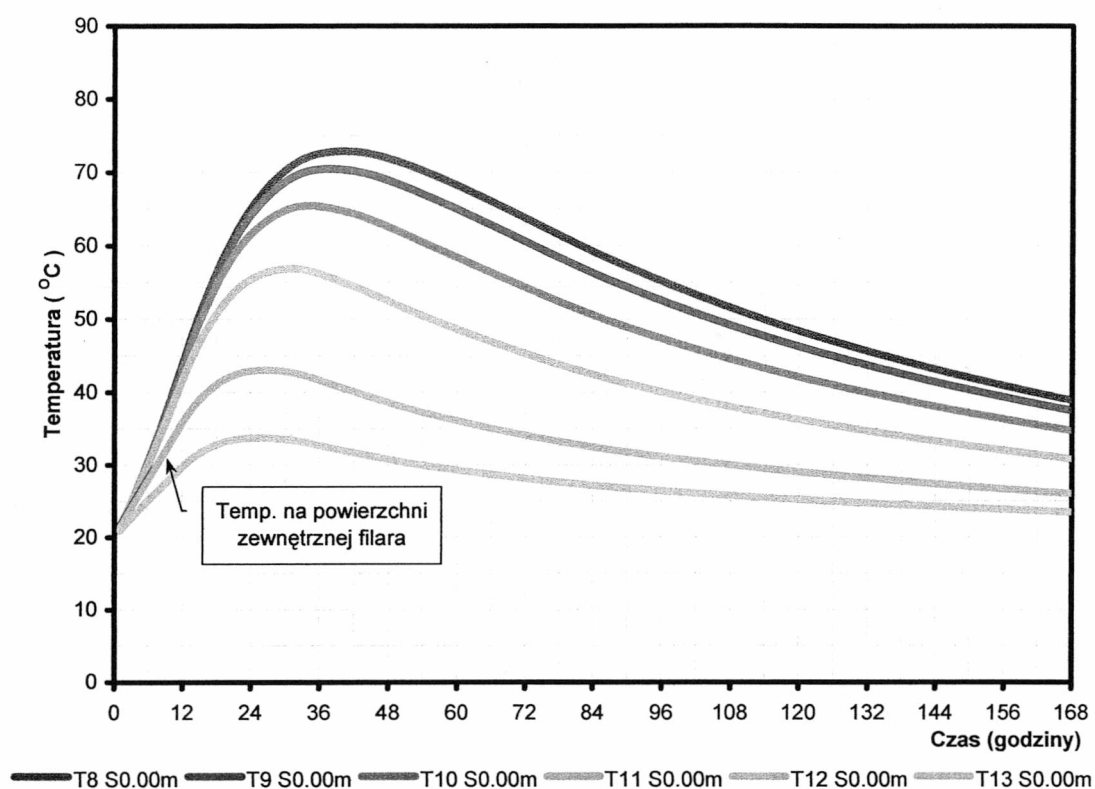
Z.8. Wpływ ocieplenia zewnętrznego elementu

Celem analizy jest określenie wpływu grubości warstwy styropianu na różnicę temperatur ΔT_{wz} między środkiem i powierzchnią zewnętrzną elementu oraz wzrost lub obniżenie maksymalnej temperatury wewnętrznej elementu. Rozpatrzono następujące przypadki;

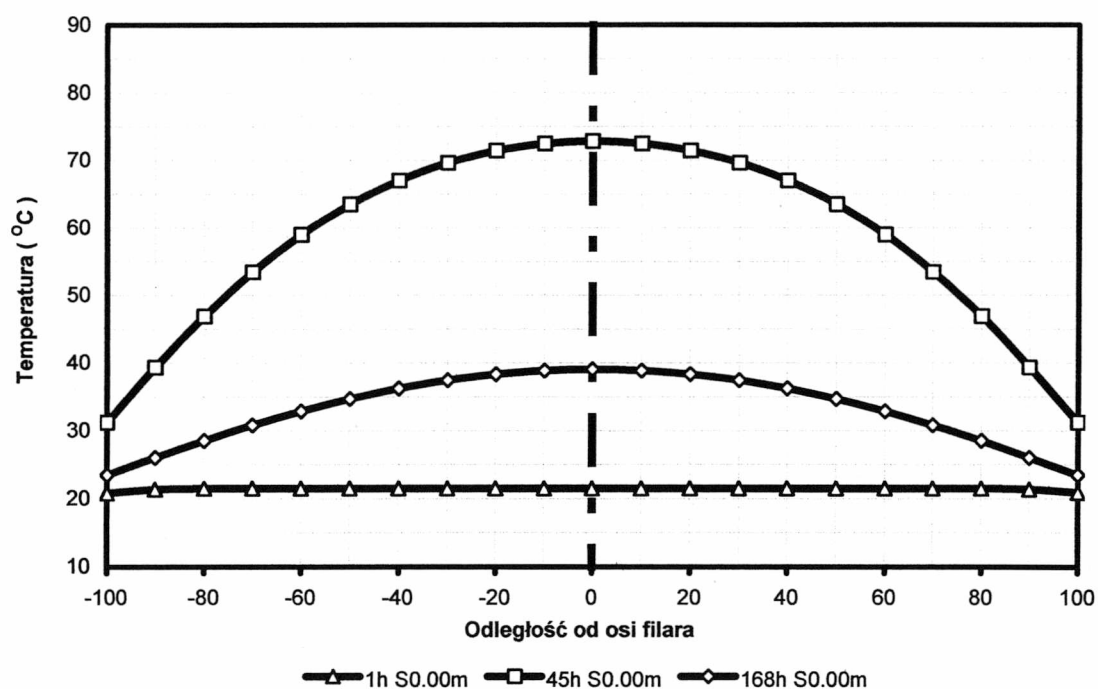
- element nie izolowany termicznie,
- ocieplenie zewnętrzne elementu warstwą styropianu o gr. 0,05 m,
- ocieplenie zewnętrzne elementu warstwą styropianu o gr. 0,10 m.

Wartości współczynników termofizycznych materiałów wykorzystanych w analizie zestawiono w tablicy 5.1. Stałą temperaturę powietrza, początkową temperaturę mieszanki betonowej oraz stałą wartość powierzchniowego współczynnika przejmowania ciepła, zestawiono w tab. 5.2.

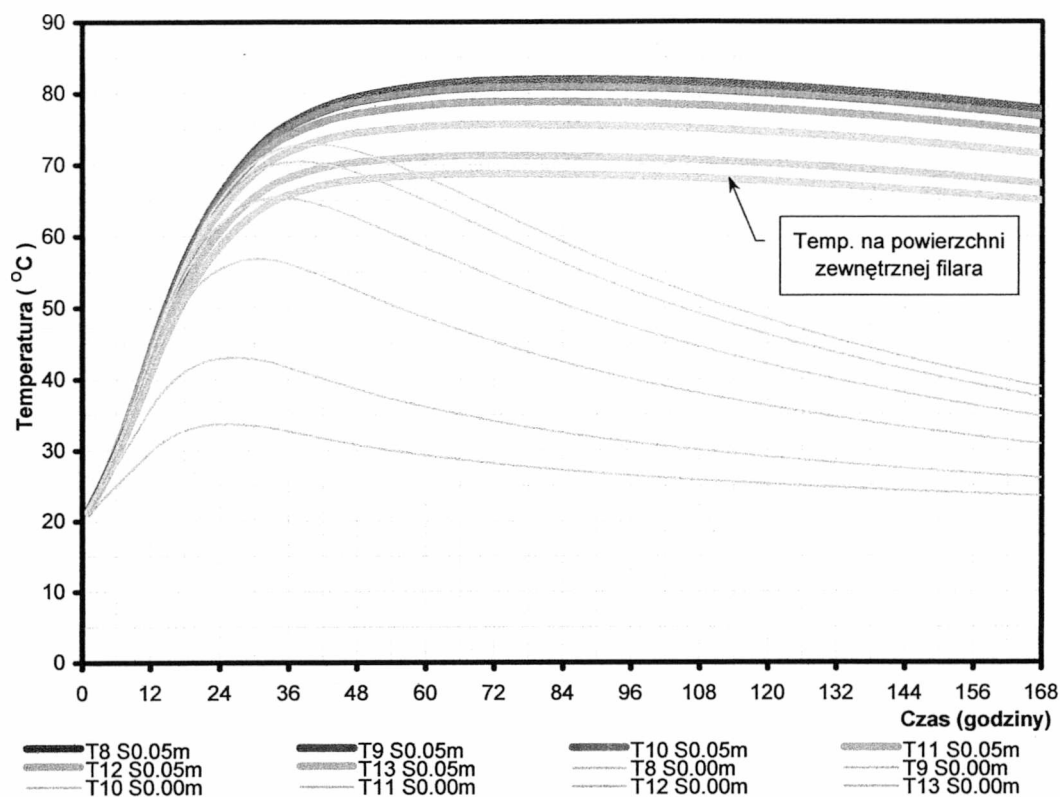
• Wyniki obliczeń dla filara



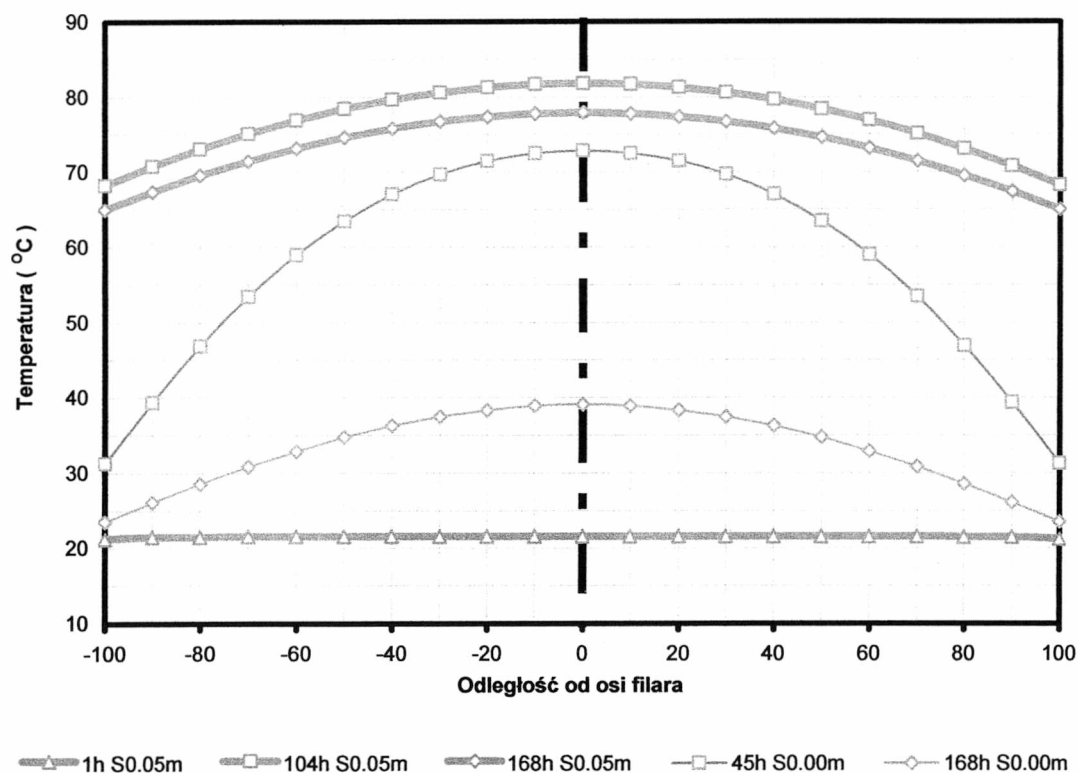
Rys. Z.109. Wartości temperatur w funkcji czasu obliczone w filarze betonowym średnicy $\phi = 2$ m, (rys. 5.1 a - brak ocieplenia zewnętrznego)



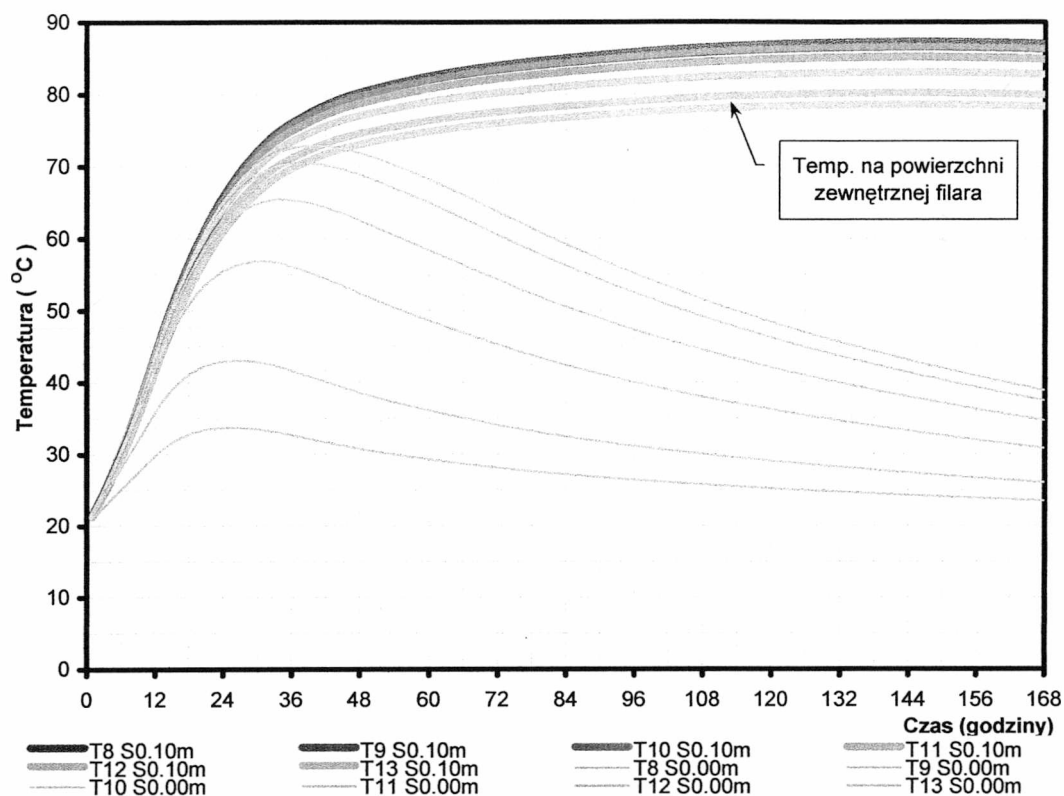
Rys. Z.110. Rozkład temperatur w filarze betonowym wzdłuż osi środkowej, (rys. 5.1 a - brak ocieplenia zewnętrznego)



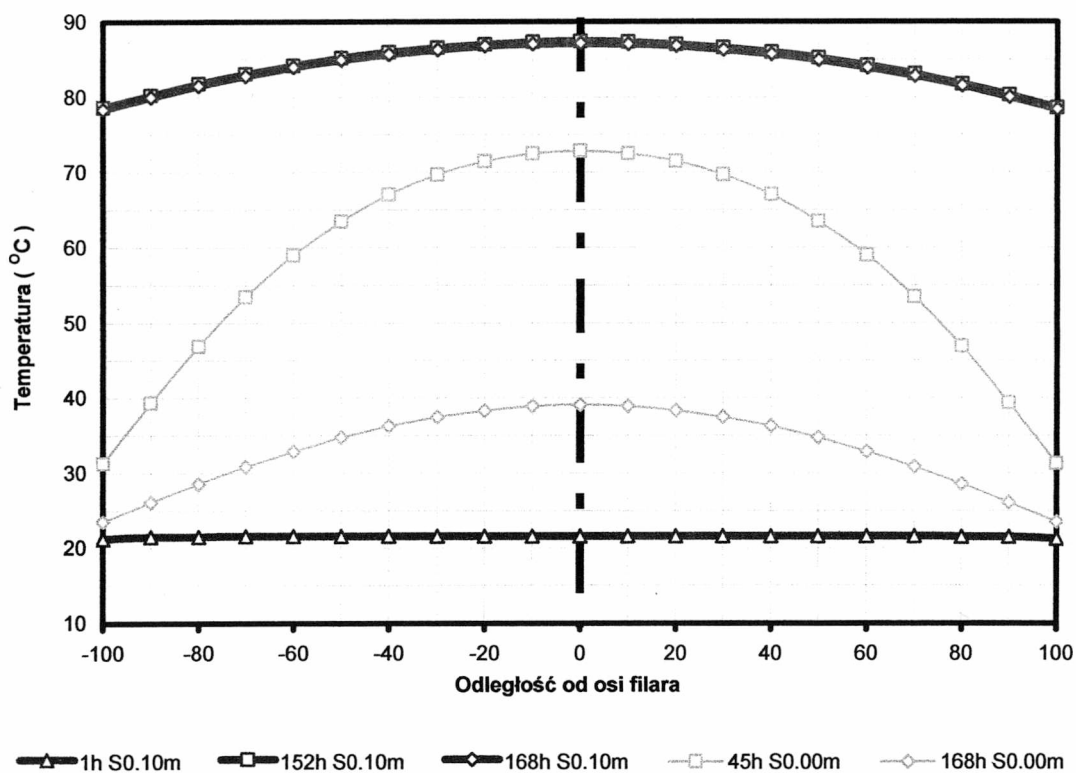
Rys. Z.111. Wartości temperatur w funkcji czasu obliczone w filarze betonowym średnicy $\phi = 2$ m, (rys. 5.1 b – ocieplenie warstwą styropianu $\delta = 5$ cm)



Rys. Z.112. Rozkład temperatur w filarze betonowym wzdłuż osi środkowej, (rys. 5.1 b – ocieplenie warstwą styropianu $\delta = 5$ cm)

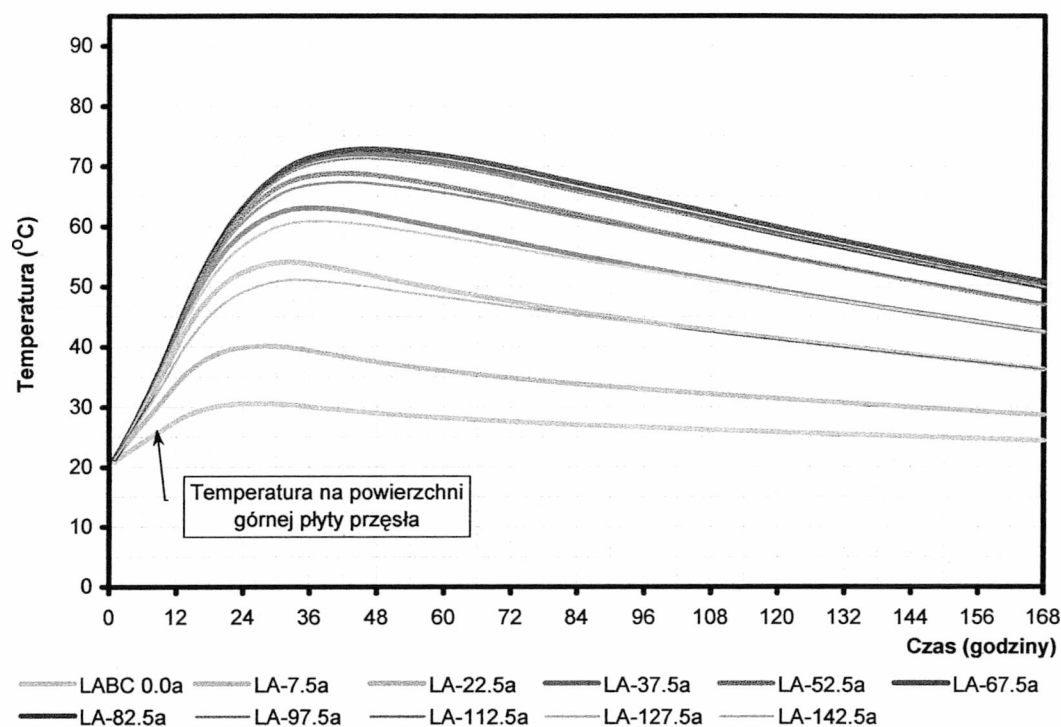


Rys. Z.113. Wartości temperatur w funkcji czasu obliczone w filarze betonowym średnicy $\phi = 2$ m, (rys. 5.1 b – ocieplenie warstwą styropianu $\delta = 10$ cm)

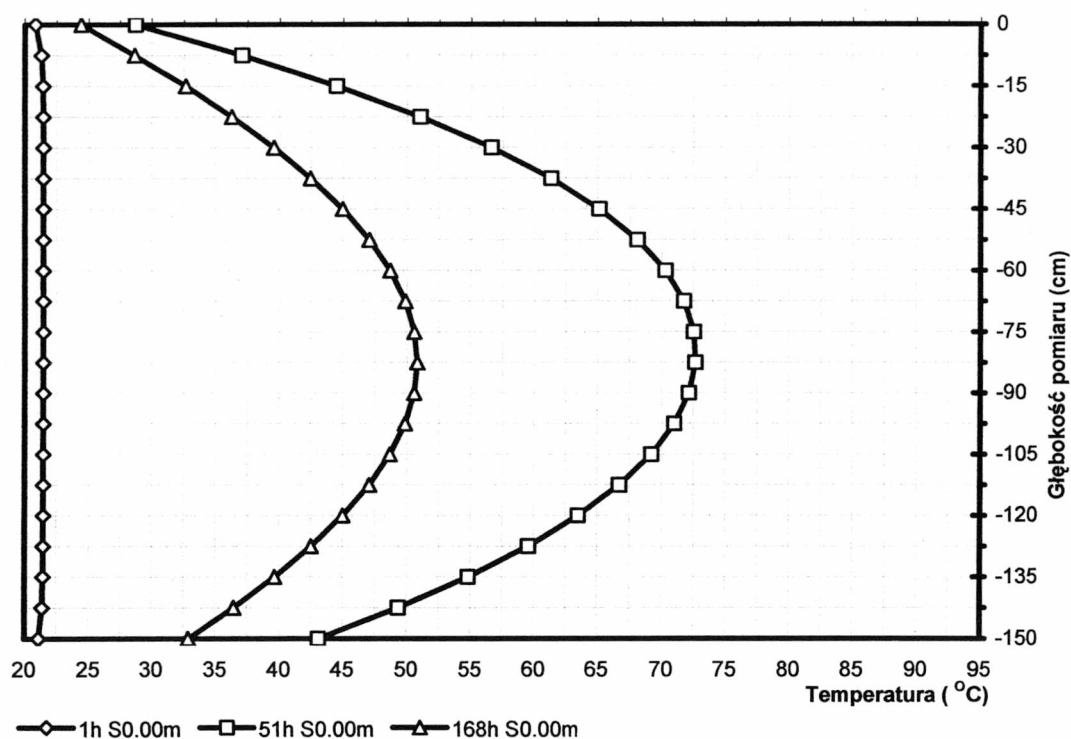


Rys. Z.114. Rozkład temperatur w filarze betonowym wzdłuż osi środkowej, (rys. 5.1 b – ocieplenie warstwą styropianu $\delta = 10$ cm)

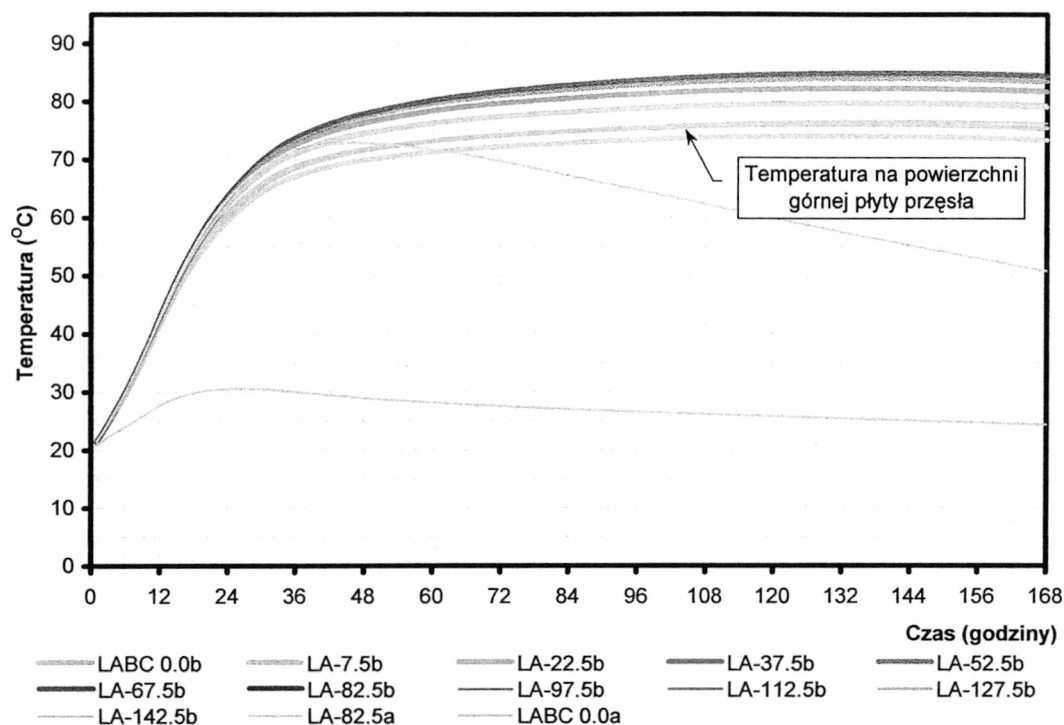
• Wyniki obliczeń dla przęsła łącznicy dojazdowej do estakady głównej



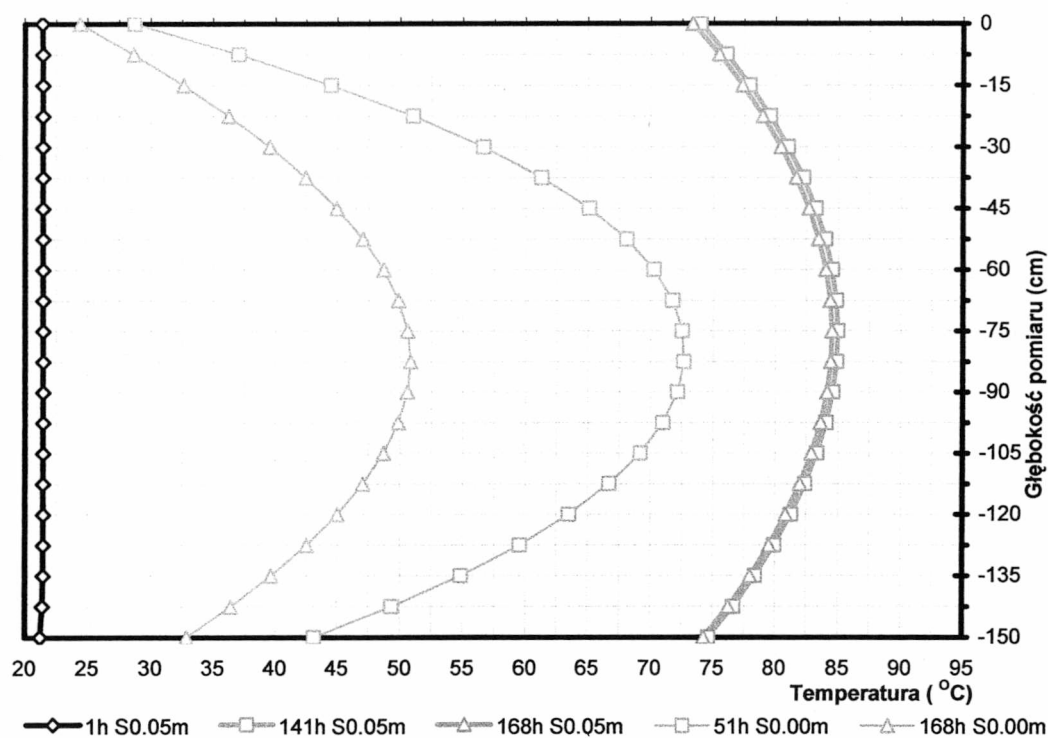
Rys. Z.115. Wartości temperatur w poszczególnych punktach osi pomiarowej pionowej w funkcji czasu dla przęsła łącznicy dojazdowej;
 - linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c - brak ocieplenia zewnętrznego)



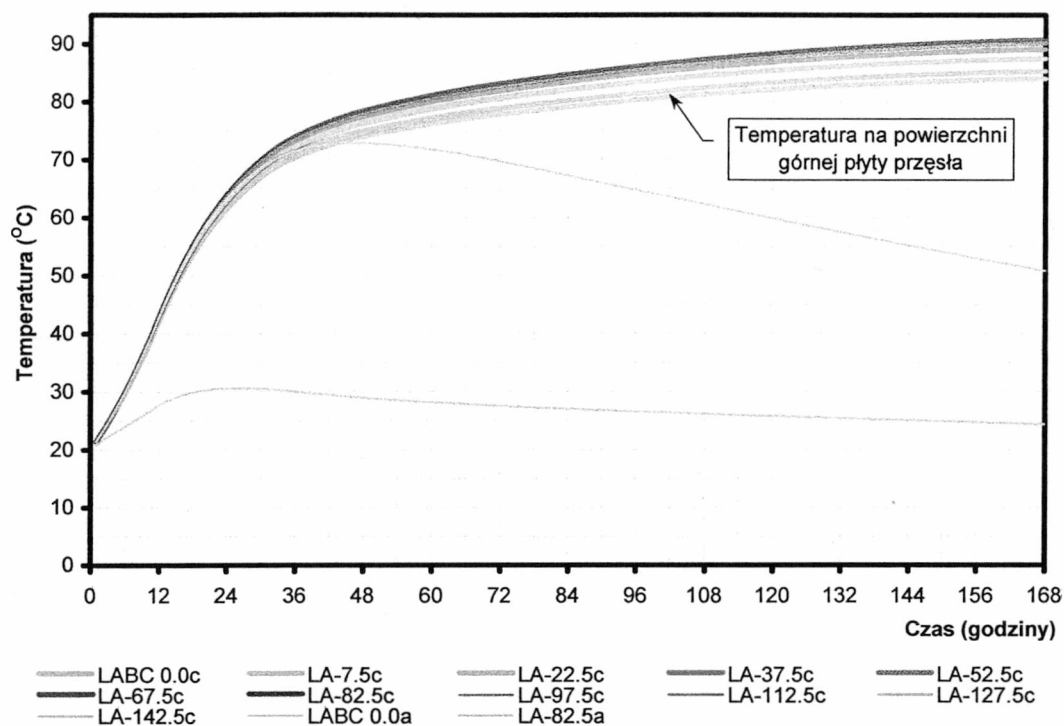
Rys. Z.116. Rozkład temperatur w przekroju poprzecznym przęsła łącznicy dojazdowej;
 - linia pomiarowa pionowa, (rys. 5.1 c - brak ocieplenia zewnętrznego)



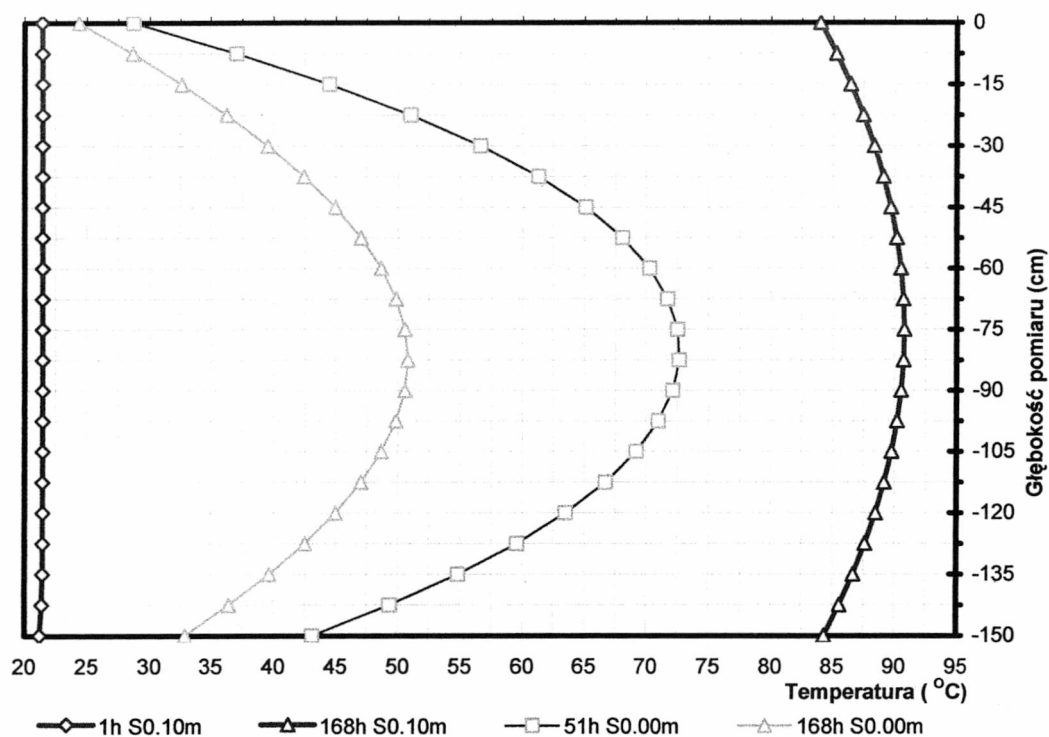
Rys. Z.117. Wartości temperatur w poszczególnych punktach osi pomiarowej pionowej w czasie dla przęsła łącznicy dojazdowej;
 - linia pomiarowa pionowa (rys. 5.1 d – ocieplenie warstwą styropianu $\delta = 5$ cm)



Rys. Z.118. Rozkład temperatur w przekroju poprzecznym przęsła łącznicy dojazdowej;
 - linia pomiarowa pionowa (rys. 5.1 d – ocieplenie warstwą styropianu $\delta = 5$ cm)



Rys. Z.119. Wartości temperatur w poszczególnych punktach osi pomiarowej pionowej w funkcji czasu dla przęsła łącznicy dojazdowej;
- linia pomiarowa pionowa (rys. 5.1 d – ocieplenie warstwą styropianu $\delta = 10$ cm)



Rys. Z.120. Rozkład temperatur w przekroju poprzecznym przęsła łącznicy dojazdowej;
- linia pomiarowa pionowa (rys. 5.1 d – ocieplenie warstwą styropianu $\delta = 10$ cm)

• Wnioski

1. Izolacja powoduje znaczny spadek maksymalnej różnicy temperatur ΔT_{wz} między środkiem i powierzchnią zewnętrzną elementu oraz wydłuża czas jej wystąpienia, utrzymujący się przez dłuższy czas (termos). Czas wystąpienia temperatury maksymalnej, oraz zakończonej analizy wraz z podaną temperaturą zestawiono w tab. Z.7.

Tablica Z.7. Zestawienie czasu wystąpienia maksymalnej różnicy temperatury z podaną temperaturą, oraz różnicy temperatury po zakończonej analizie

Element	Grubość zastosowanej izolacji termicznej (styropian) [cm]					
	element nie izolowany termicznie		5		10	
	Czas	Temp	Czas	Temp	Czas	Temp
Filar	45 h	42 °C	104 h	14 °C	152 h	8.8 °C
	168 h	16 °C	168 h	13 °C	168 h	8.7 °C
Łącznica	51 h	44 °C	141 h	13 °C	168 h	7 °C
	168 h	26 °C	168 h	11 °C		

2. Ograniczony odpływ ciepła z elementu spowodowany zewnętrzną izolacją termiczną, powoduje podniesienie maksymalnej temperatury wewnętrznej utrzymującej się przez dłuższy czas.
3. Zastosowanie izolacji termicznej w postaci warstwy styropianu grubości 0.05 m powoduje spadek maksymalnej różnicy temperatur ΔT_{wz} odpowiednio dla filara 28 °C oraz dla łącznicy 33 °C. Dodatkowe zwiększenie grubości warstwy styropian do 0.10 m dodatkowo zmniejsza różnicę temperatur ΔT_{wz} o: filar 5 °C oraz łącznica 4 °C.
4. Maksymalna różnica temperatur występuje w fazie spadku temperatur, tzn. po czasie, wystąpienia maksymalnej temperatury wewnętrznej elementu.
5. Zwiększenie grubości warstwy styropianu wywołuje progresywne przesunięcie czasowe wystąpienia maksymalnej różnicy temperatur.