



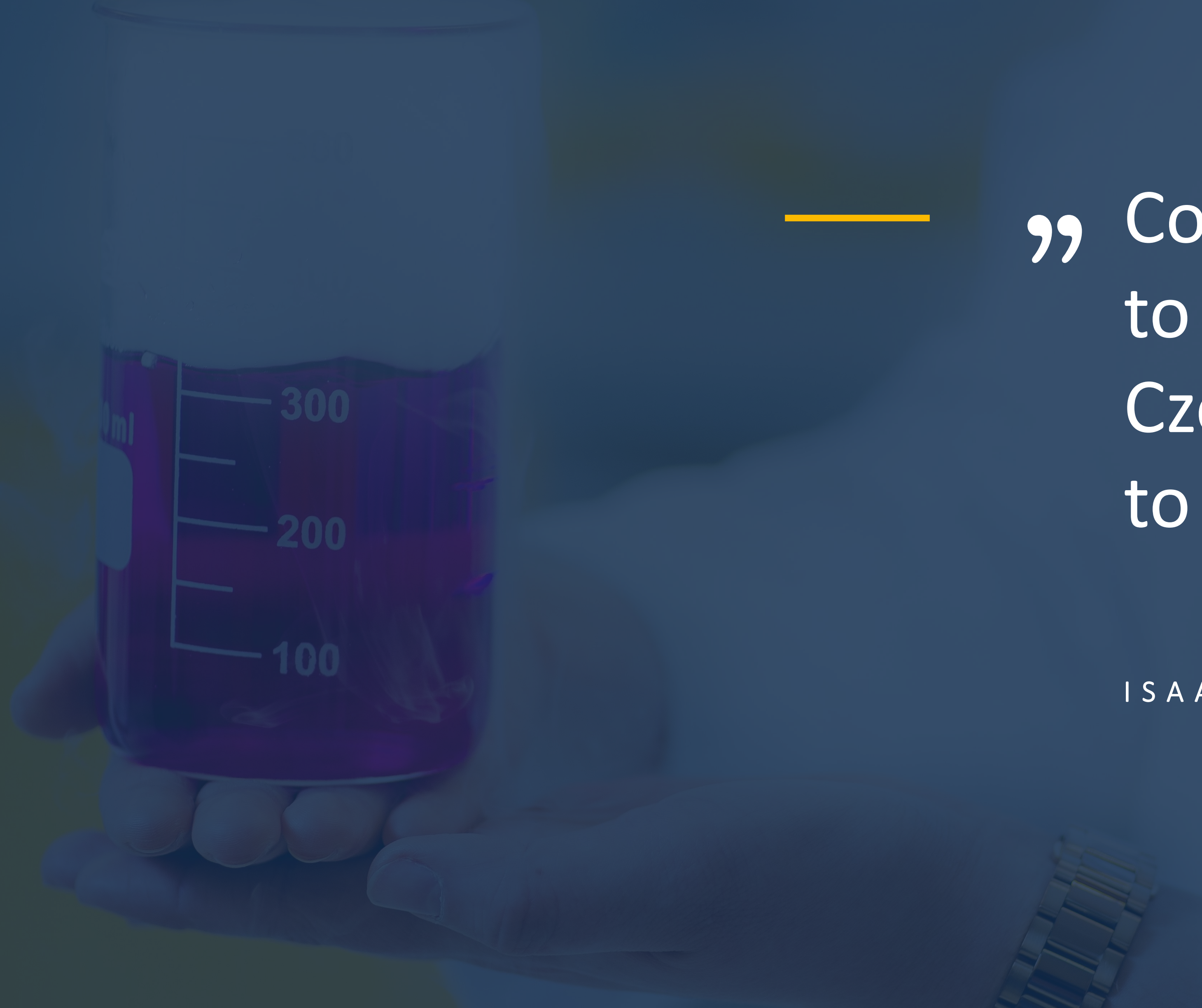
Politechnika
Śląska



UCZELNIA
BADAWCZA
INICJATYWA DOSKONAŁOŚCI

ANALIZA IMPERFEKCJI CIEPLNYCH SYSTEMÓW ETICS Z UWZGLĘDNIENIEM KONWEKCJI WEWNĄTRZ ŚCIANY

PAWEŁ KRAUSE

A hand holding a beaker with purple liquid. The beaker has a scale with markings at 100, 200, and 300 ml. The background is a dark blue gradient.

— ” Co my wiemy,
to tylko kropelka.
Czego nie wiemy,
to cały ocean. ”

ISAAC NEWTON



Politechnika
Śląska



UCZELNIA
BADAWCZA
INICJATYWA DOSKONAŁOŚCI

Kluczowe etapy rozpoznania zagadnienia

01

Imperfekcje ETICS

slajdy
04-07

02

Defekty i dyslokacje

slajdy
08-09

03

Model podobieństwa

11-12

04

Badania własne

slajdy
13-24

05

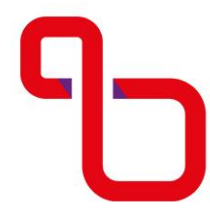
Modelowanie

numeryczne
25-30

06

Podsumowanie

slajd
31



IMPERFEKCJE SYSTEMU ETICS

Zróżnicowane etapy prowadzenia
robót ociepleniowych

G1 - Nieprawidłowe przygotowanie podłoża ściennego



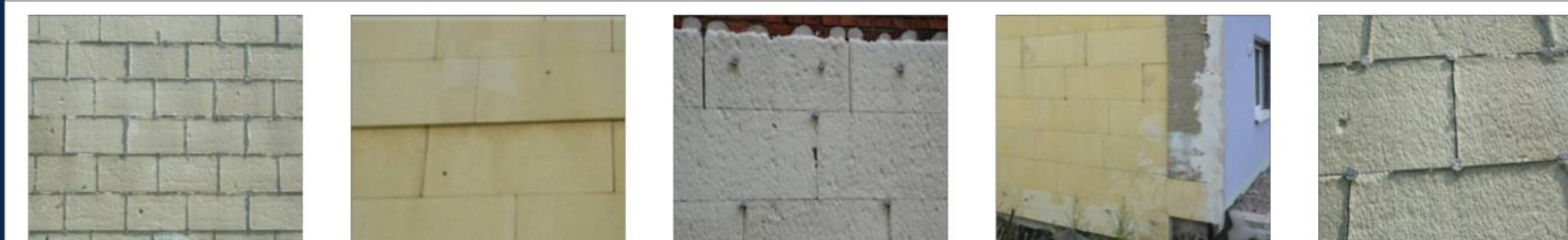
G2 - Wadliwe klejenie termoizolacji do podłoża ściennego



G3 - Wadliwe mocowanie mechaniczne termoizolacji do podłoża ściennego



G4 - Nieprawidłowe przygotowanie powierzchni izolacji termicznej



G5 - Nieciągłość warstwy termoizolacyjnej

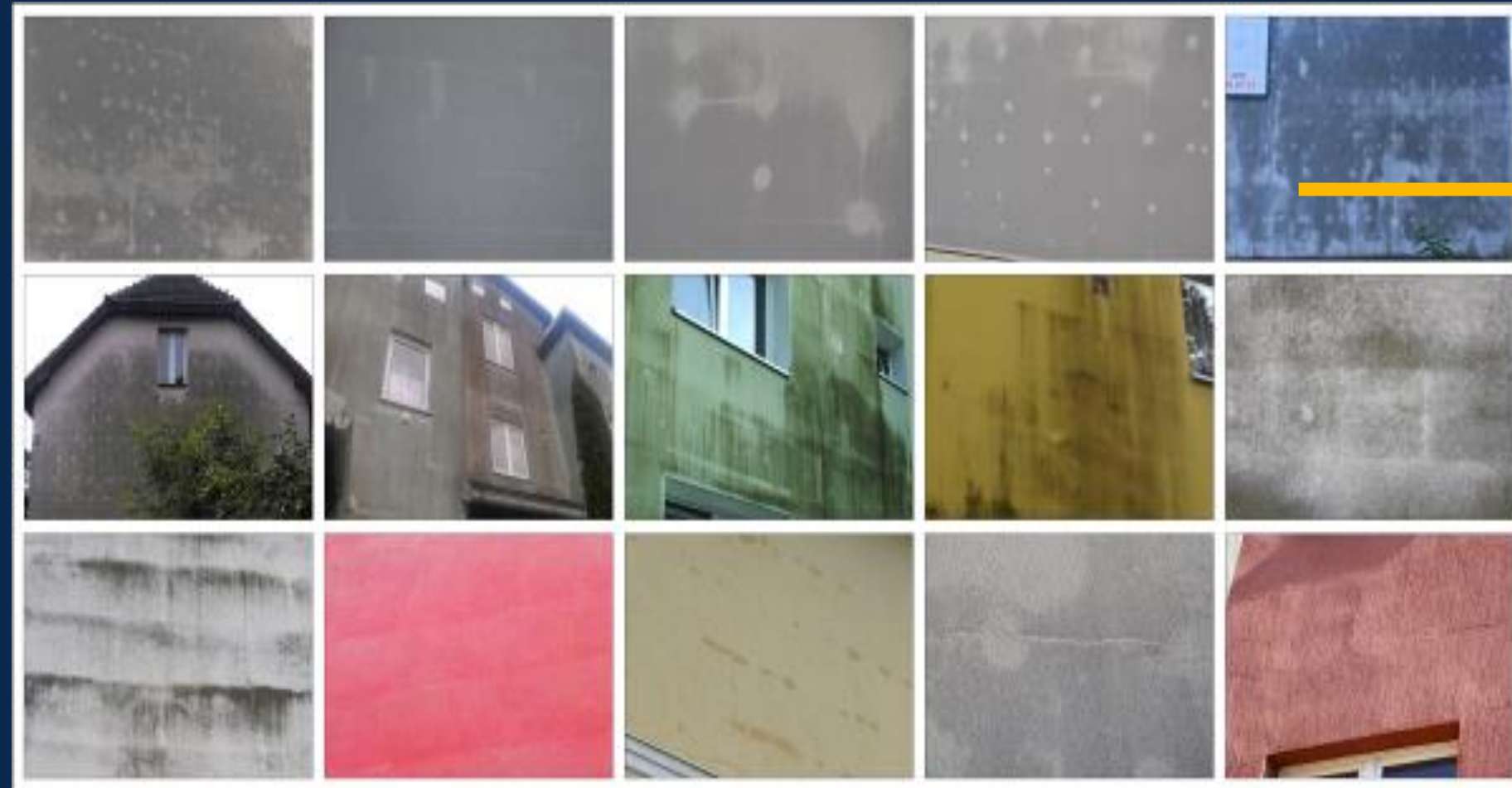


G6 - Wadliwie wykonana warstwa zbrojona



G7 - Nieprawidłowe wykonanie warstwy szpempnej i tynkarskiej





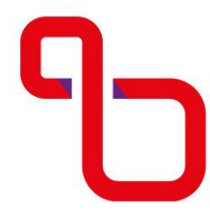
BADANIA NIENISZCZĄCE

Imperfekcje widoczne w badaniach makroskopowych

W określonych warunkach oddziaływania środowiska zewnętrznego istnieje możliwość zdiagnozowania wybranych nieprawidłowości systemu ETICS na podstawie badań makroskopowych. Występujące różnice temperatury na zewnętrznej powierzchni ściany mogą powodować, przy określonej wilgotności powietrza, powierzchniową kondensację pary wodnej.



Politechnika
Śląska

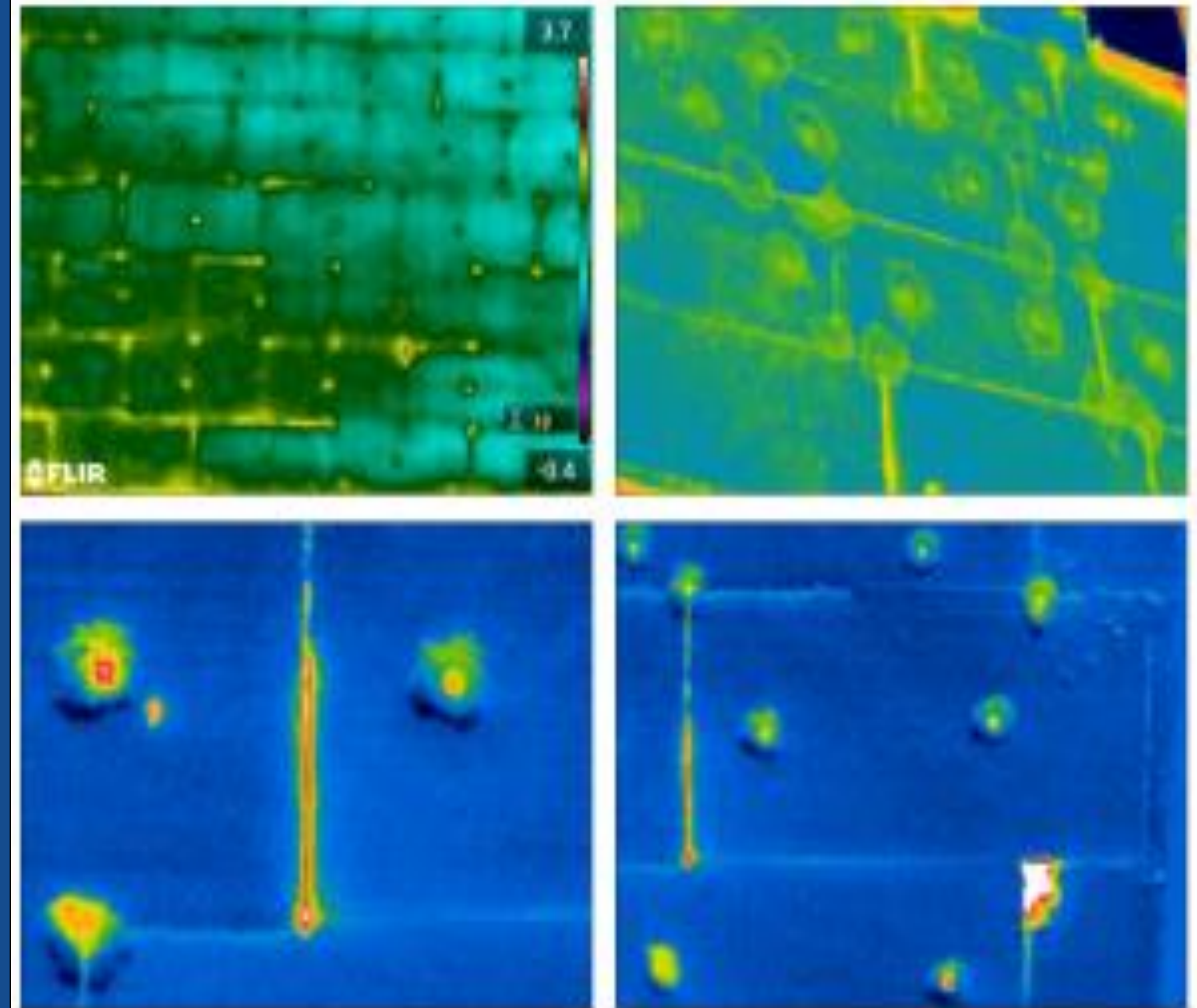


UCZELNIA
BADAWCZA
INICJATYWA DOSKONAŁOŚCI

BADANIA NIENISZCZĄCE

Imperfekcje cieplne w diagnostyce termograficznej

W przypadku ścian z systemem ETICS ich diagnostyka jest prowadzona najczęściej od strony zewnętrznej



Politechnika
Śląska



UCZELNIA
BADAWCZA
INICJATYWA DOSKONAŁOŚCI

BADANIA NISZCZĄCE

Odkrywki systemu ETICS

Badania niszczące złożonych systemów zewnętrznej izolacji cieplnej ścian wykonano na próbie kilkudziesięciu budynków. Polegały one na wycięciu fragmentu systemu ETICS, który umożliwił przeprowadzenie oceny wzajemnego powiązania poszczególnych komponentów ocieplenia oraz sposobu zamocowania izolacji termicznej do ściany



Politechnika
Śląska



UCZELNIA
BADAWCZA
INICJATYWA DOSKONAŁOŚCI

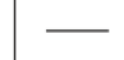


IMPERFEKCJE

Defekty cieplne ETICS

Imperfekcje cieplne

w postaci pionowych lub poziomych nieciągłości, występujących na styku poszczególnych elementów termoizolacyjnych lub fragmentaryczne ich ubytki

Klasyfikacja defektów cieplnych systemu ETICS



Lp.	RODZAJ DEFEKTU	SCHEMAT	STOPIEŃ ZDEFEKTOWANIA				
			I	II	III	IV	V
1	Defekt liniowy pionowy, poziomy		$\delta_{def} \leq 2 \text{ mm}$	$2 < \delta_{def} \leq 5 \text{ mm}$	$5 < \delta_{def} \leq 10 \text{ mm}$	$10 < \delta_{def} \leq 20 \text{ mm}$	$\delta_{def} > 20 \text{ mm}$
2	Defekt lamany		$\delta_{def} \leq 2 \text{ mm}$	$2 < \delta_{def} \leq 5 \text{ mm}$	$5 < \delta_{def} \leq 10 \text{ mm}$	$10 < \delta_{def} \leq 20 \text{ mm}$	$\delta_{def} > 20 \text{ mm}$
3	Defekt powierzchniowy		$\delta_{def} \leq 2 \text{ mm}$	$2 < \delta_{def} \leq 5 \text{ mm}$	$5 < \delta_{def} \leq 10 \text{ mm}$	$10 < \delta_{def} \leq 20 \text{ mm}$	$\delta_{def} > 20 \text{ mm}$



IMPERFEKCJE

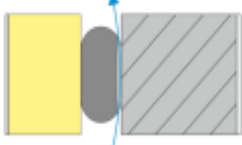
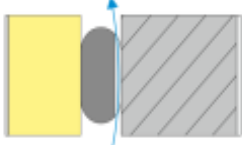
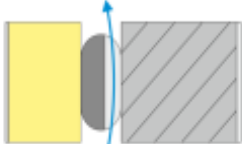


Dyslokacje cieplne ETICS

Klasyfikacja dyslokacji cieplnych systemu ETICS

Lp.	DYSLOKACJA CIEPLNA	SCHEMAT	STOPIEŃ DYSLOKACJI				
			I	II	III	IV	V
1	Zwiększona konwekcja (klejenie punktowe)		$10 < \delta_{dys} \leq 20 \text{ mm}$	$20 < \delta_{dys} \leq 30 \text{ mm}$	$30 < \delta_{dys} \leq 40 \text{ mm}$	$40 < \delta_{dys} \leq 50 \text{ mm}$	$\delta_{dys} > 50 \text{ mm}$
2	Ograniczona konwekcja (klejenie pasmowo-punktowe)		$10 < \delta_{dys} \leq 20 \text{ mm}$	$20 < \delta_{dys} \leq 30 \text{ mm}$	$30 < \delta_{dys} \leq 40 \text{ mm}$	$40 < \delta_{dys} \leq 50 \text{ mm}$	$\delta_{dys} > 50 \text{ mm}$

Wadliwie wykonane klejenie izolacji termicznej do warstwy nośnej skutkuje zaistnieniem imperfekcji cieplej. W zależności od sposobu nanoszenia zaprawy klejącej i jej grubości występuje nieprawidłowość struktury ocieplenia, polegająca na nadmiernym przesunięciu wewnętrznej płaszczyzny termoizolacji względem podłoża ściennego.

Klasyfikacja niekontrolowanej infiltracji powietrza w strukturę systemu ETICS

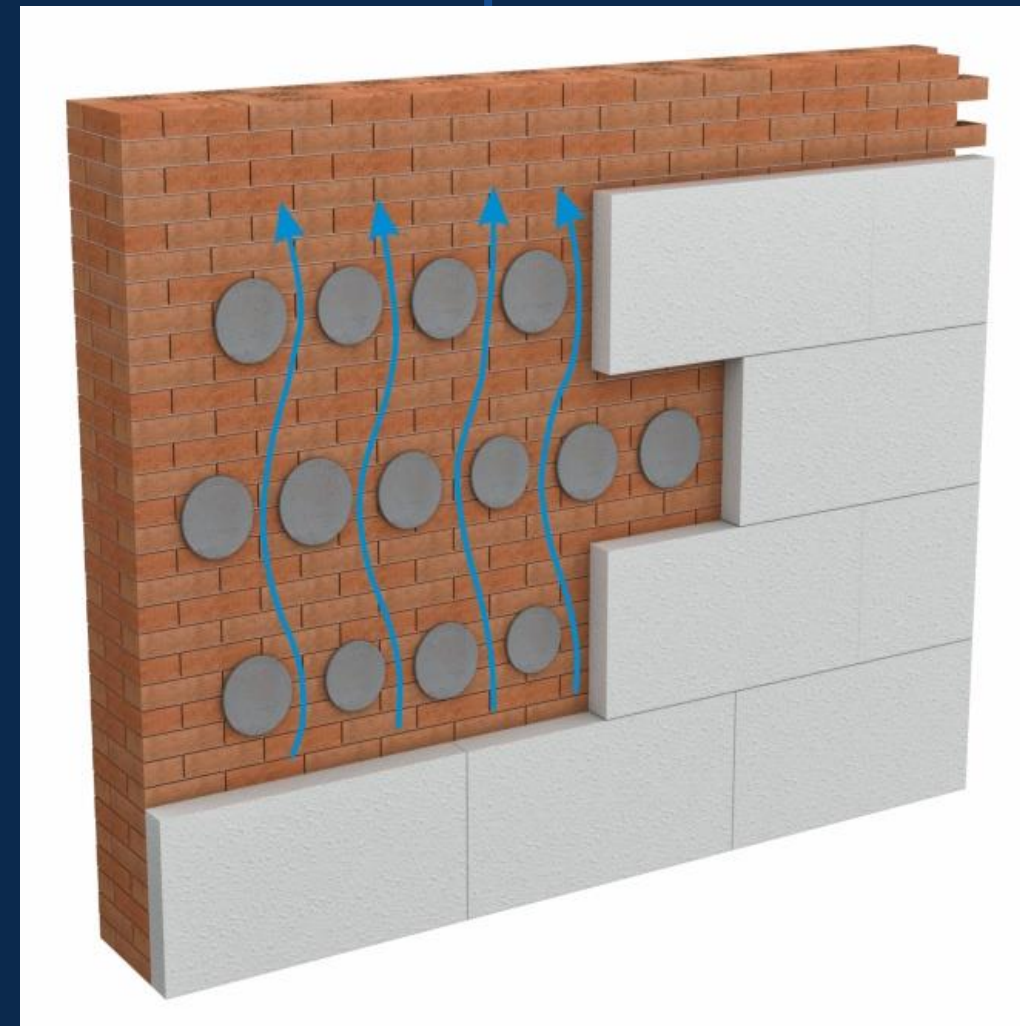
Lp.	NIEKONTROLOWANA INFILTRACJA POWIETRZA	SCHEMAT	POWIERZCHNIA OTWORÓW NA 1 M DŁUGOŚCI OCIEPLENIA ETICS
1	Mała		$A_{inf} < 500 \text{ mm}^2$
2	Umiarkowana		$500 \leq A_{inf} < 1\,500 \text{ mm}^2$
3	Duża		$1\,500 \leq A_{inf} < 5\,000 \text{ mm}^2$
4	Bardzo duża		$5\,000 \leq A_{inf} < 10\,000 \text{ mm}^2$
5	Skrajnie duża		$A_{inf} \geq 10\,000 \text{ mm}^2$

W wybranych przypadkach dyslokacji cieplnych może zachodzić dodatkowo niekontrolowana infiltracja powietrza w strukturę systemu ociepleń. Jest to związane z występowaniem nieszczelności, umożliwiającej wnikanie powietrza zewnętrznego w pionową szczelinę pomiędzy izolacją termiczną a warstwą nośną.

ZWIEKSZONA KONWEKCJA

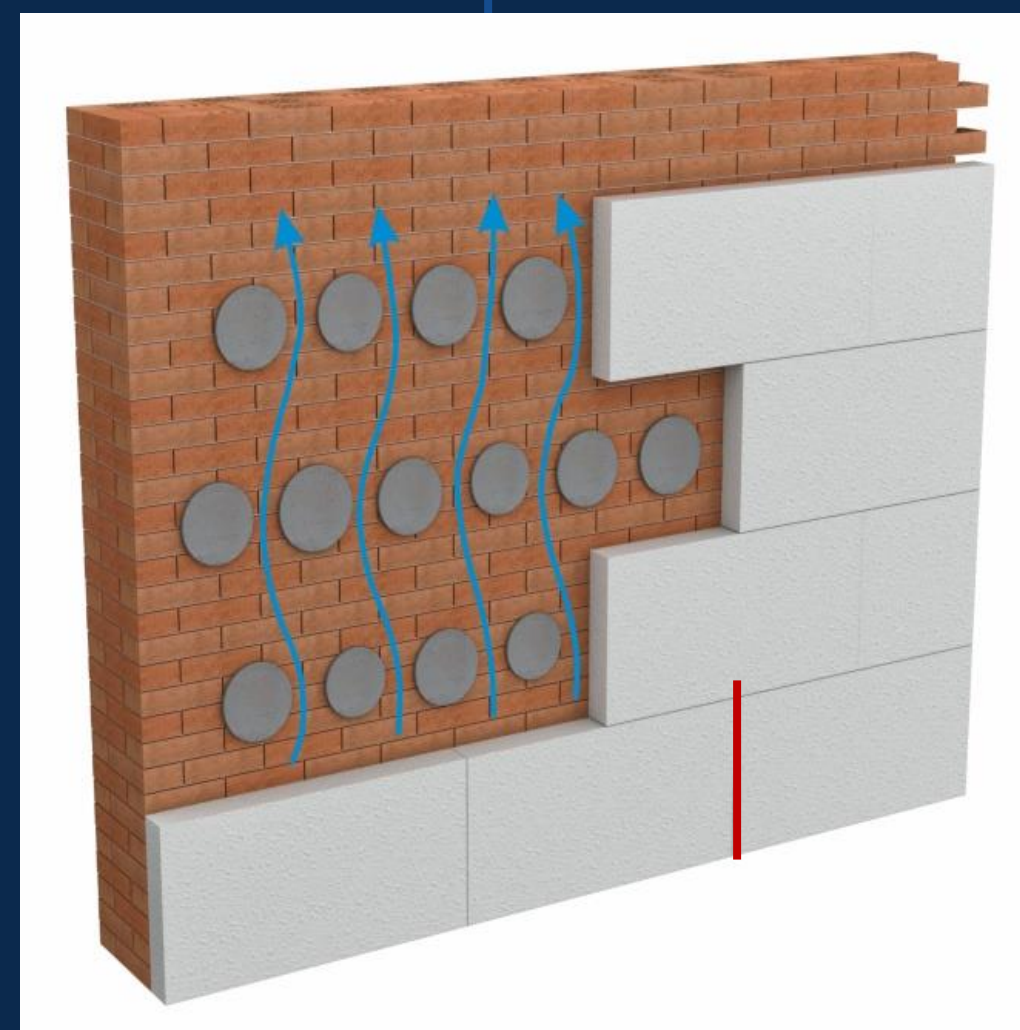
Dyslokacja ciepła

jaki ma wpływ na opór cieplny ściany ?



ZWIEKSZONA KONWEKCJA
**Niekontrolowana
infiltracja powietrza**

jaki ma wpływ na opór cieplny ściany ?



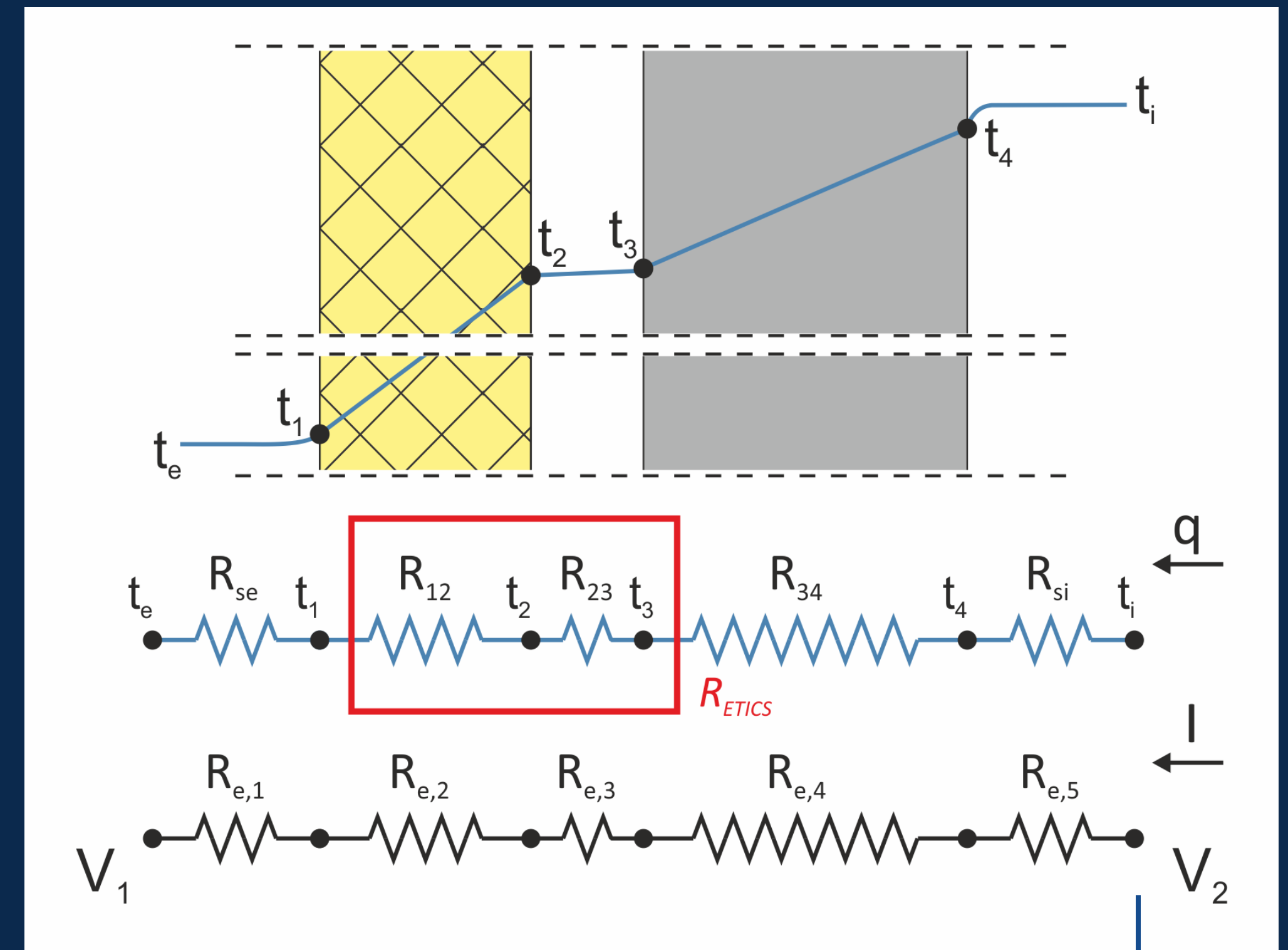
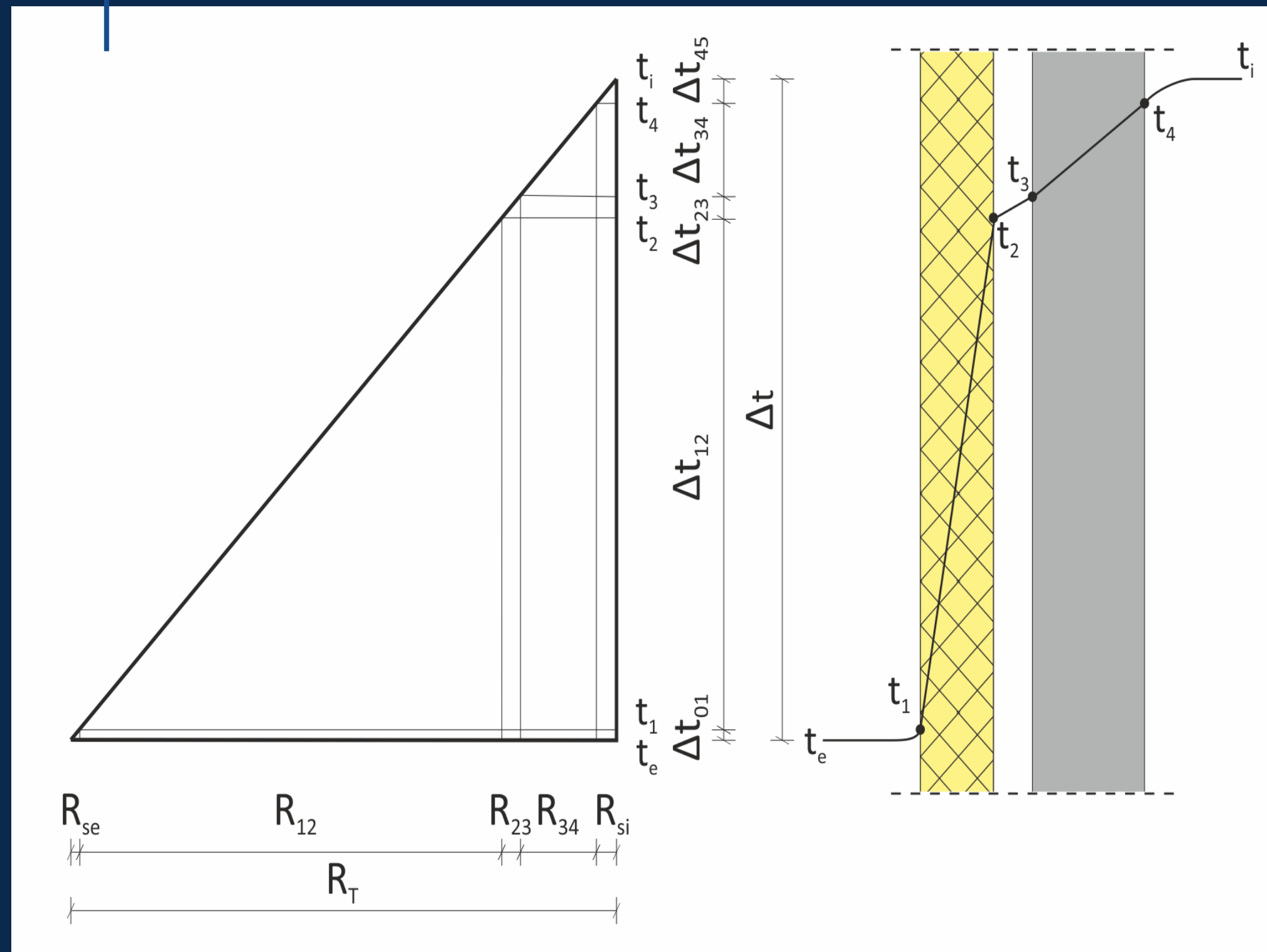
ZWIĘKSZONA KONWEKCJA

Defekt cieplny

jaki ma wpływ na opór cieplny ściany ?

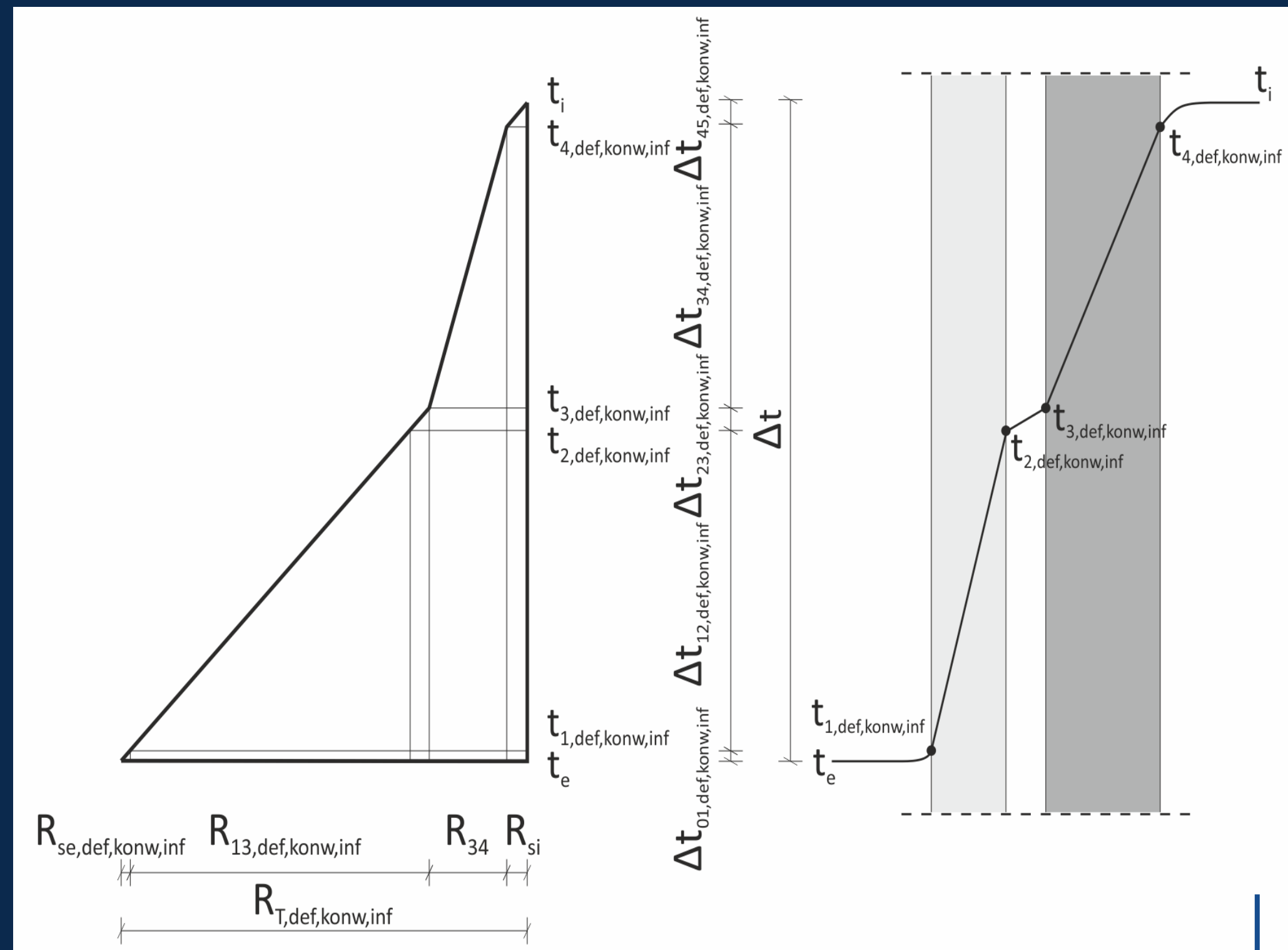
Model podobieństwa

dla ściany z systemem ETICS bez imperfekcji cieplnych



Analogia do modelu układu elektrycznego

przenikania ciepła przez ścianę bez uwzględnienia konwekcji w jej wnętrzu – miejsce referencyjne

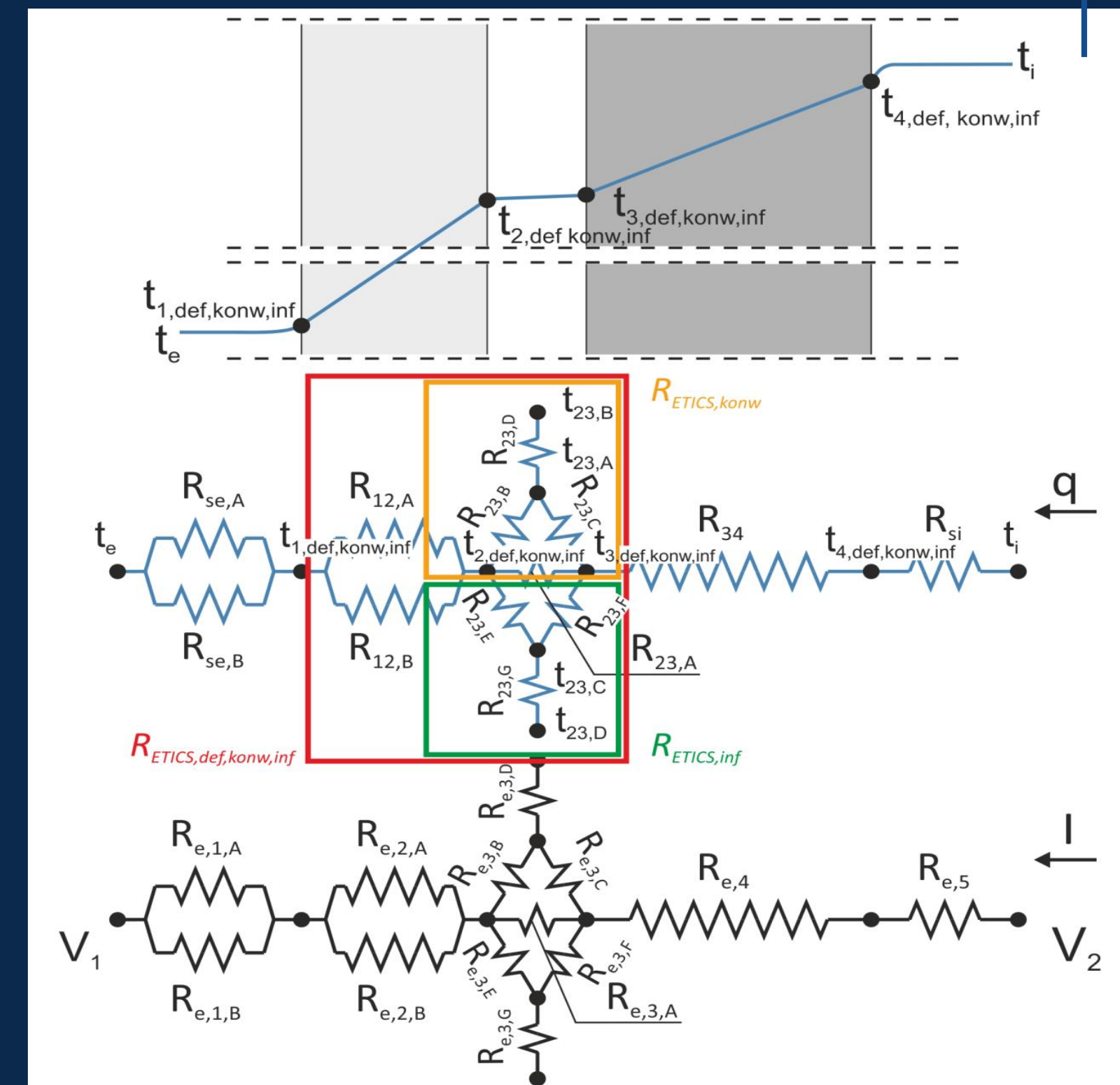


Zaburzenie modelu podobieństwa

Przenikanie ciepła w miejscu defektu z uwzględnieniem konwekcji i infiltracji powietrza wewnątrz ściany

Analogia do modelu układu elektrycznego

zjawiska przenikania ciepła przez ścianę z uwzględnieniem konwekcji w jej wnętrzu – miejsce defektu cieplnego



BADANIA EKSPERYMENTALNE

Pomiary zdalne i stykowe

13

BADANIA TOWARZYSZĄCE

Pomiar temperatury zewnętrznej



Stacja meteorologiczna

Pomiar temperatury wewnętrznej



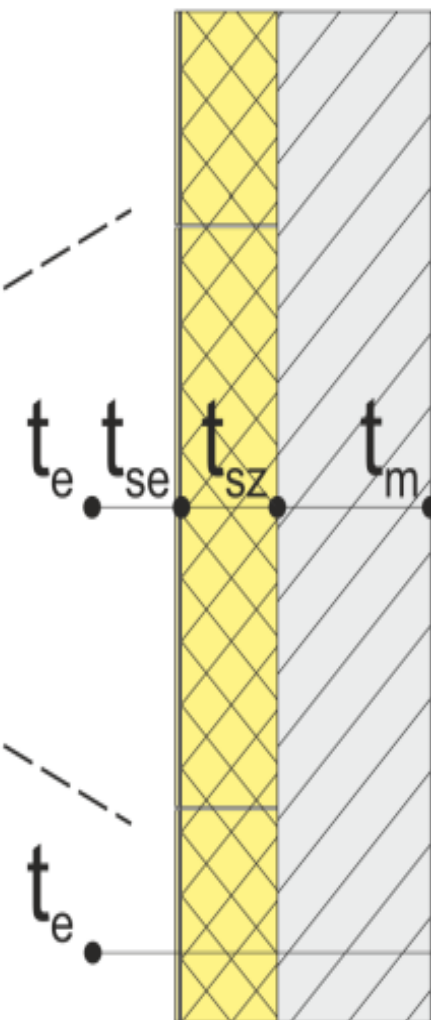
Rejestrator temperatury

BADANIE ZASADNICZE POMIARY ZDALNE

Pomiar temperatury



Kamera termowizyjna



BADANIE ZASADNICZE - POMIARY STYKOWE

Pomiar temperatury

Zestaw pomiarowo-rejestrujący

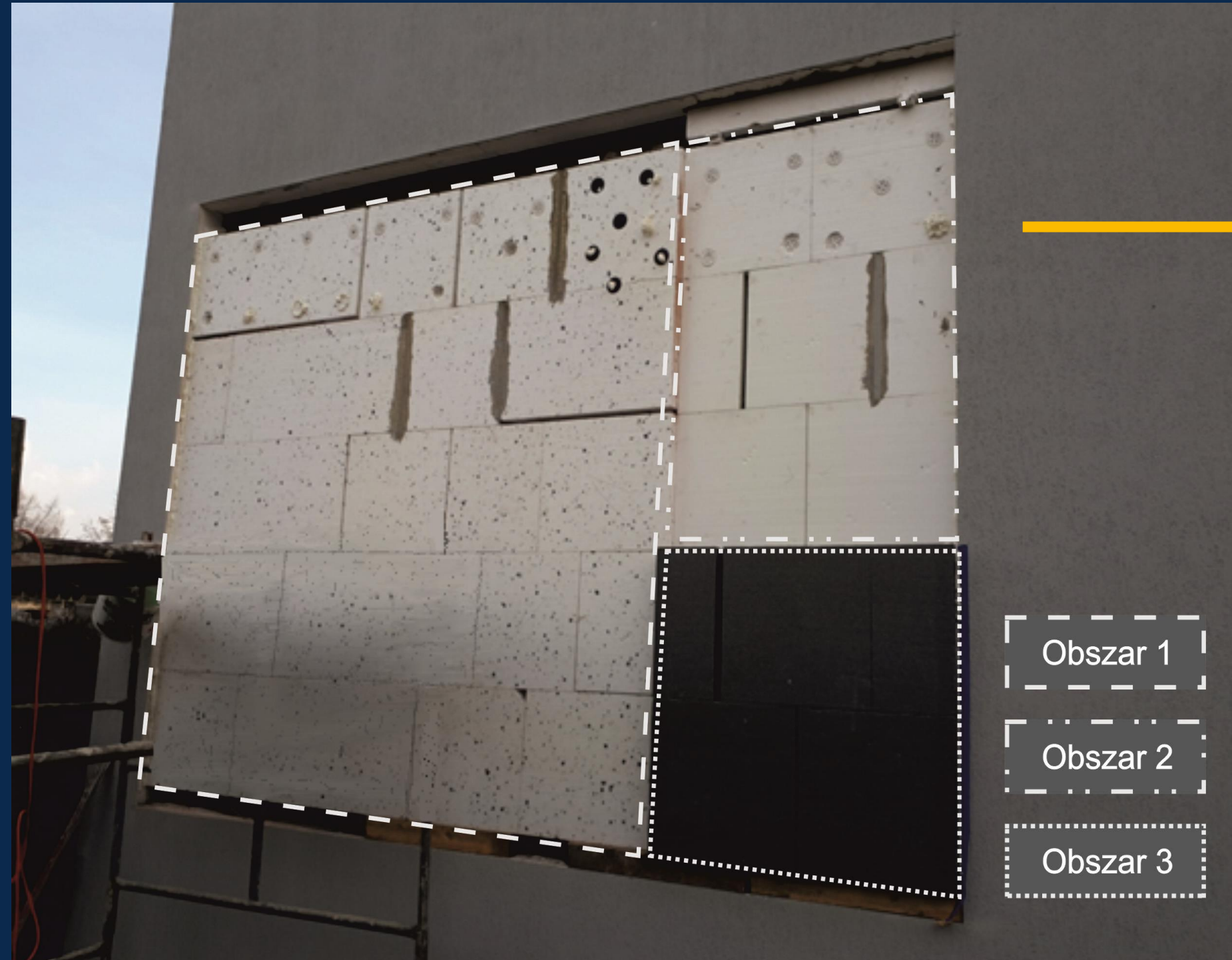


A1 A2 A3 A4

Pomiar gęstości strumienia ciepła



Zestaw pomiarowo-rejestrujący



PRZEDMIOT BADAŃ

System ETICS o zróżnicowanym oporze cieplnym

Obszar 1

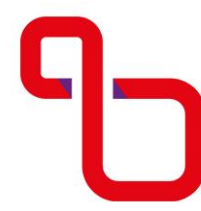
Obszar 2

Obszar 3

Obszar nr 1 - EPS 038 gr. 10 cm $R_T = 3,40 \text{ (m}^2\text{K)/W}$

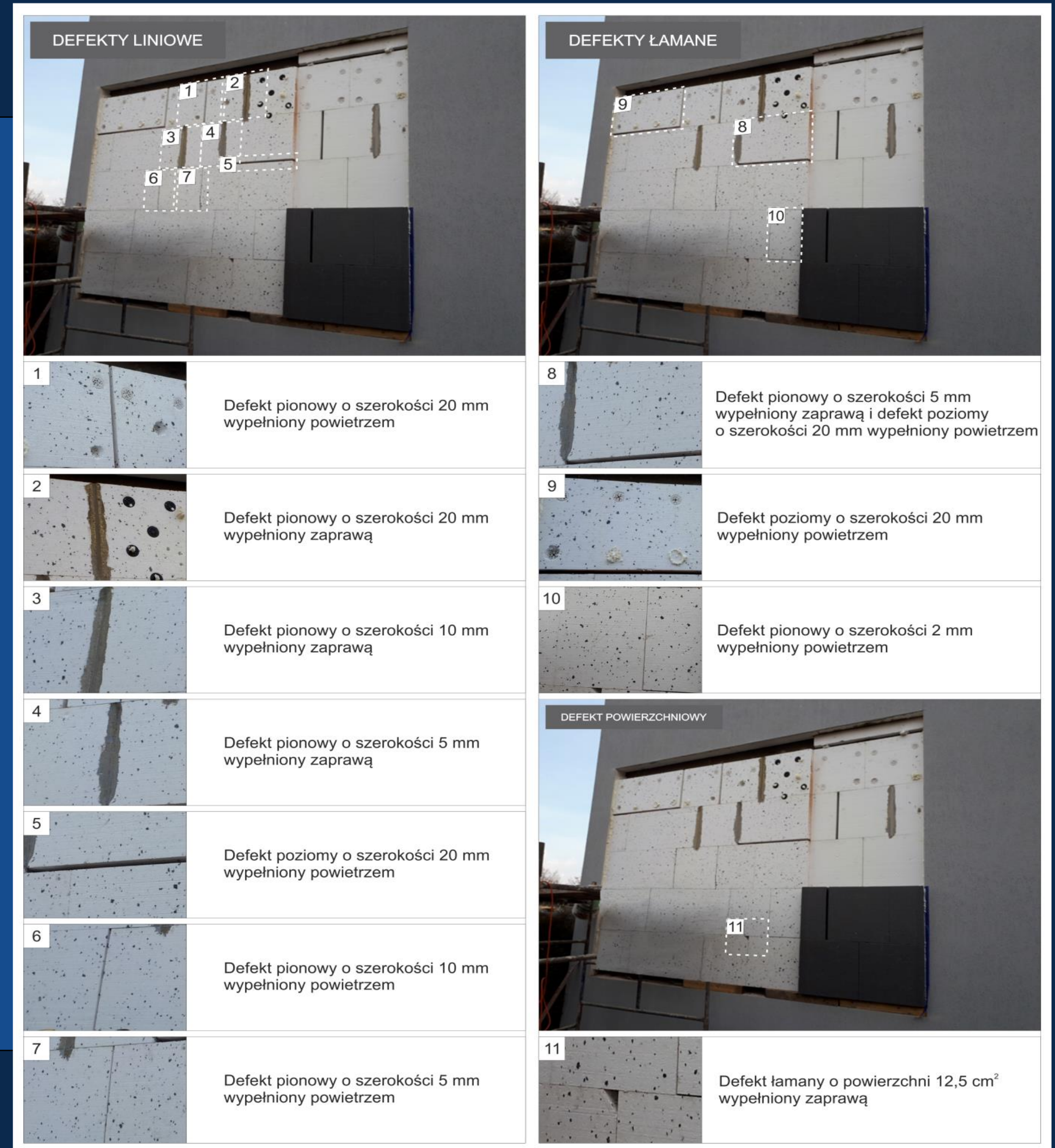
Obszar nr 2 - EPS 038 gr. 5 cm $R_T = 2,08 \text{ (m}^2\text{K)/W}$

Obszar nr 3 - EPS 031 gr. 20 cm $R_T = 7,22 \text{ (m}^2\text{K)/W}$



IMPERFEKCJE CIEPLNE

Defekty i dyslokacja cieplna ETICS z niekontrolowaną infiltracją powietrza



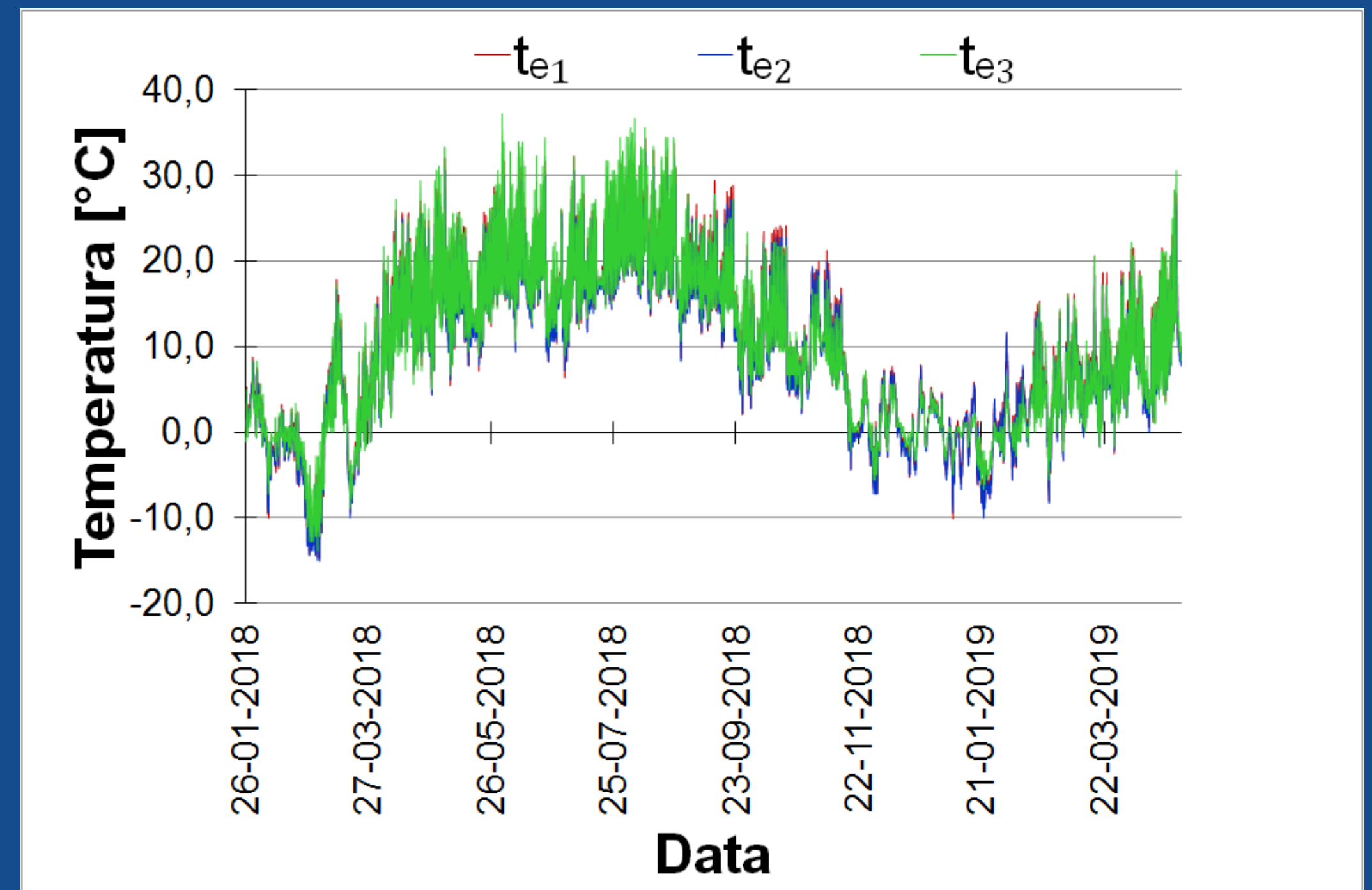
Politechnika
Śląska



UCZELNIA
BADAWCZA
INICJATYWA DOSKONAŁOŚCI

BADANIA TOWARZYSZĄCE

Wpływ zmienności temperatury powietrza zewnątrznego



Stwierdzono pomijalny wpływ zmienności temperatury powietrza zewnętrznego występującej na zróżnicowanej wysokości na rozkład temperatury wewnątrz ściany



Politechnika
Śląska

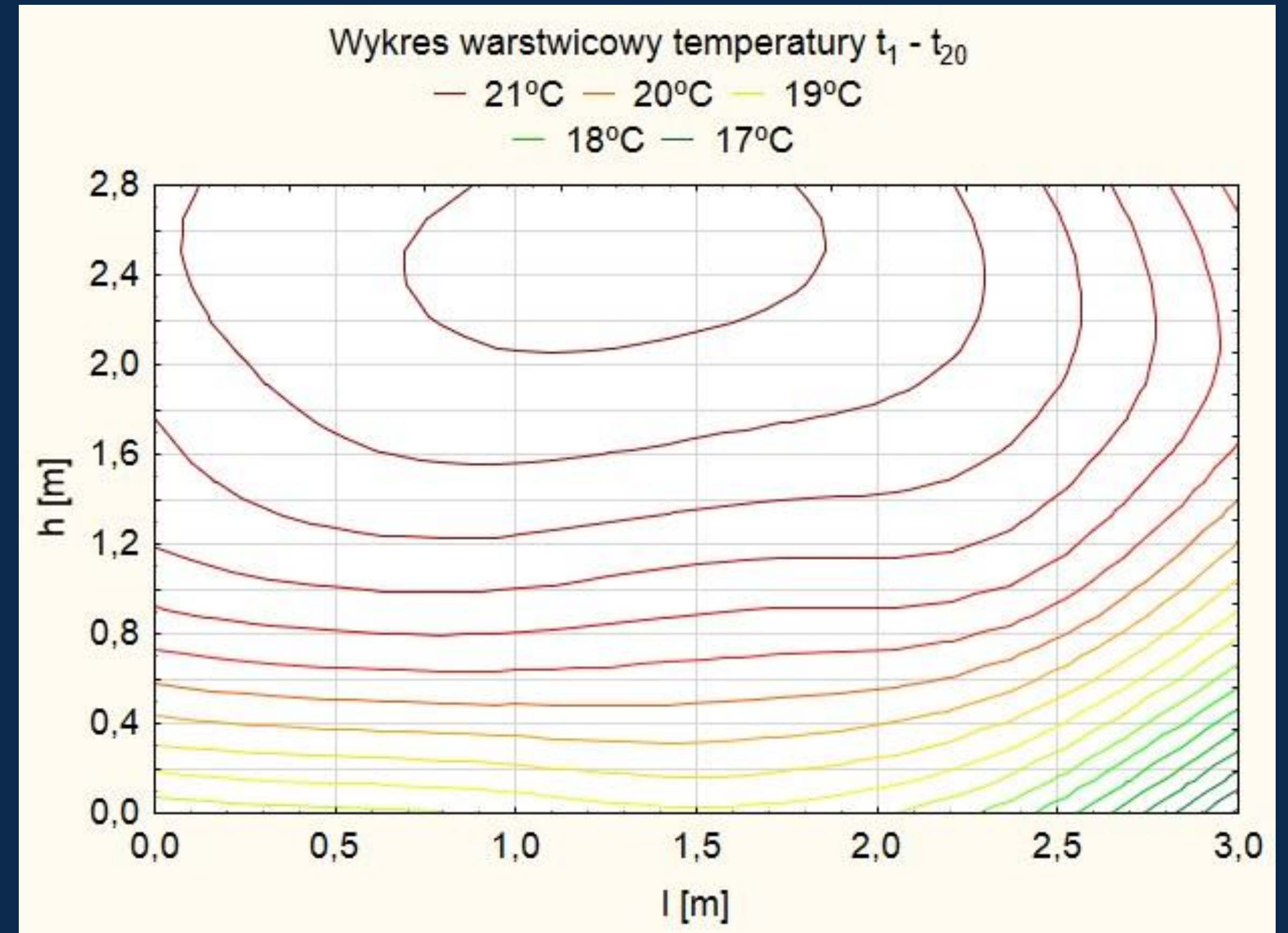


UCZELNIA
BADAWCZA
INICJATYWA DOSKONAŁOŚCI

BADANIA TOWARZYSZĄCE

Wpływ stratyfikacji temperatury powietrza wewnętrznego

W celu rozpoznania i scharakteryzowania zjawiska stratyfikacji wykonano szczegółowe pomiary temperatury wewnątrz pomieszczenia przyległego do badanej ściany z imperfekcjami ETICS. Badania zostały zrealizowane przy wykorzystaniu 20 rejestratorów temperatury, zlokalizowanych w czterech poziomych rzędach na zróżnicowanych wysokościach powyżej poziomu posadzki, tj. + 0,05 m, + 1,00 m, + 1,80 m, + 2,60 m.



Wykres warstwowy temperatury powietrza wewnętrznego w obrębie ściany

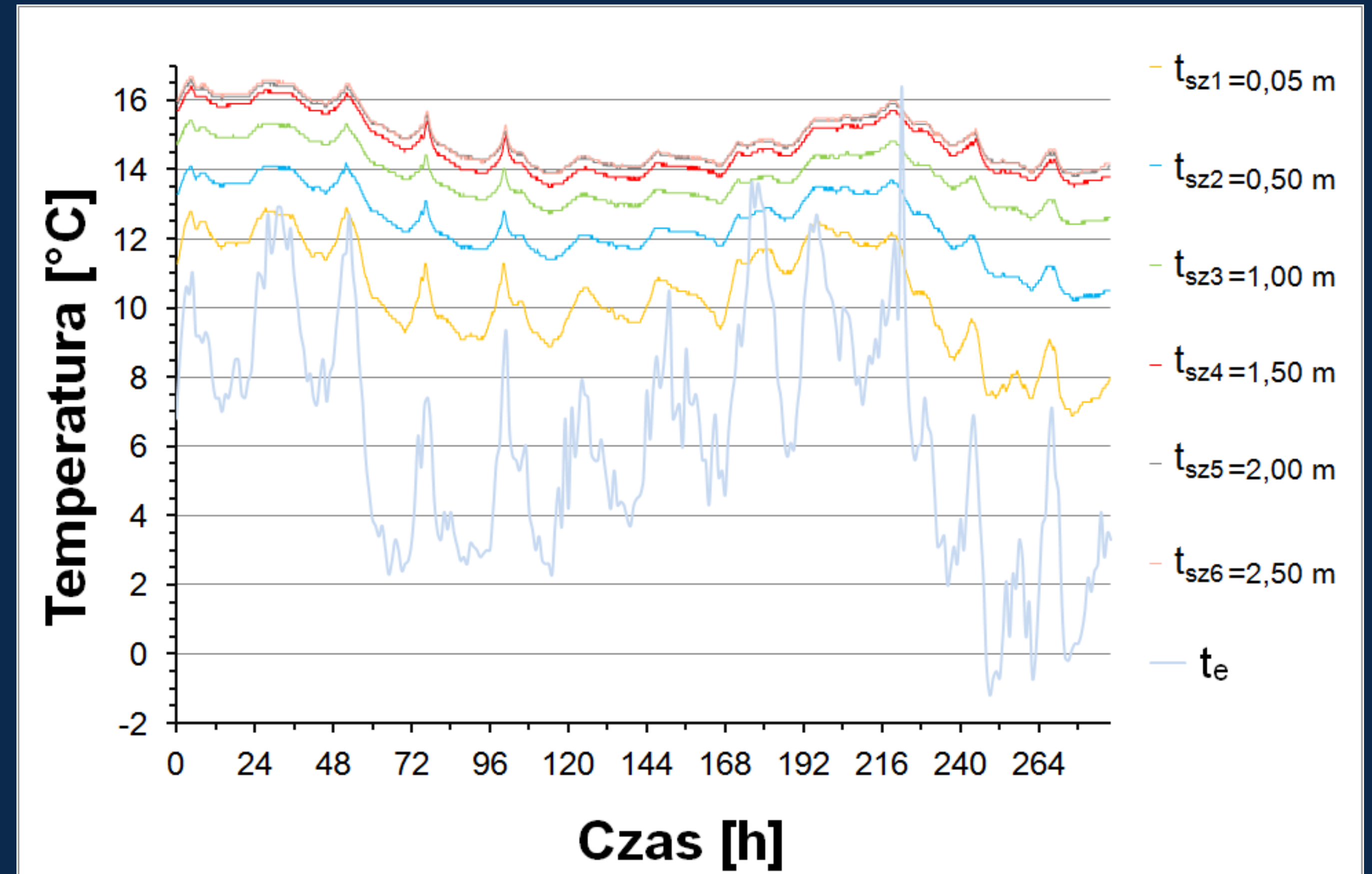
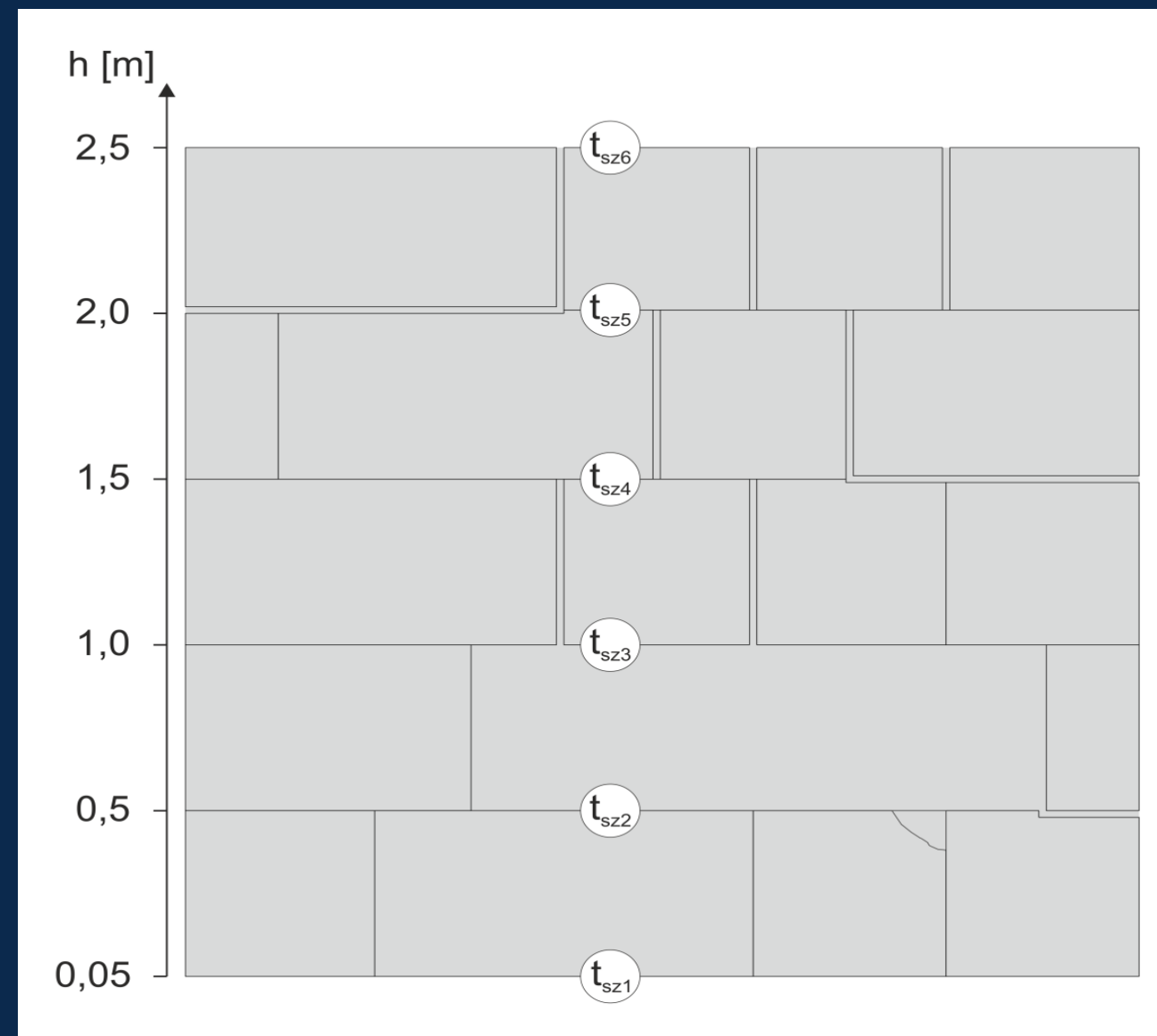


Politechnika
Śląska



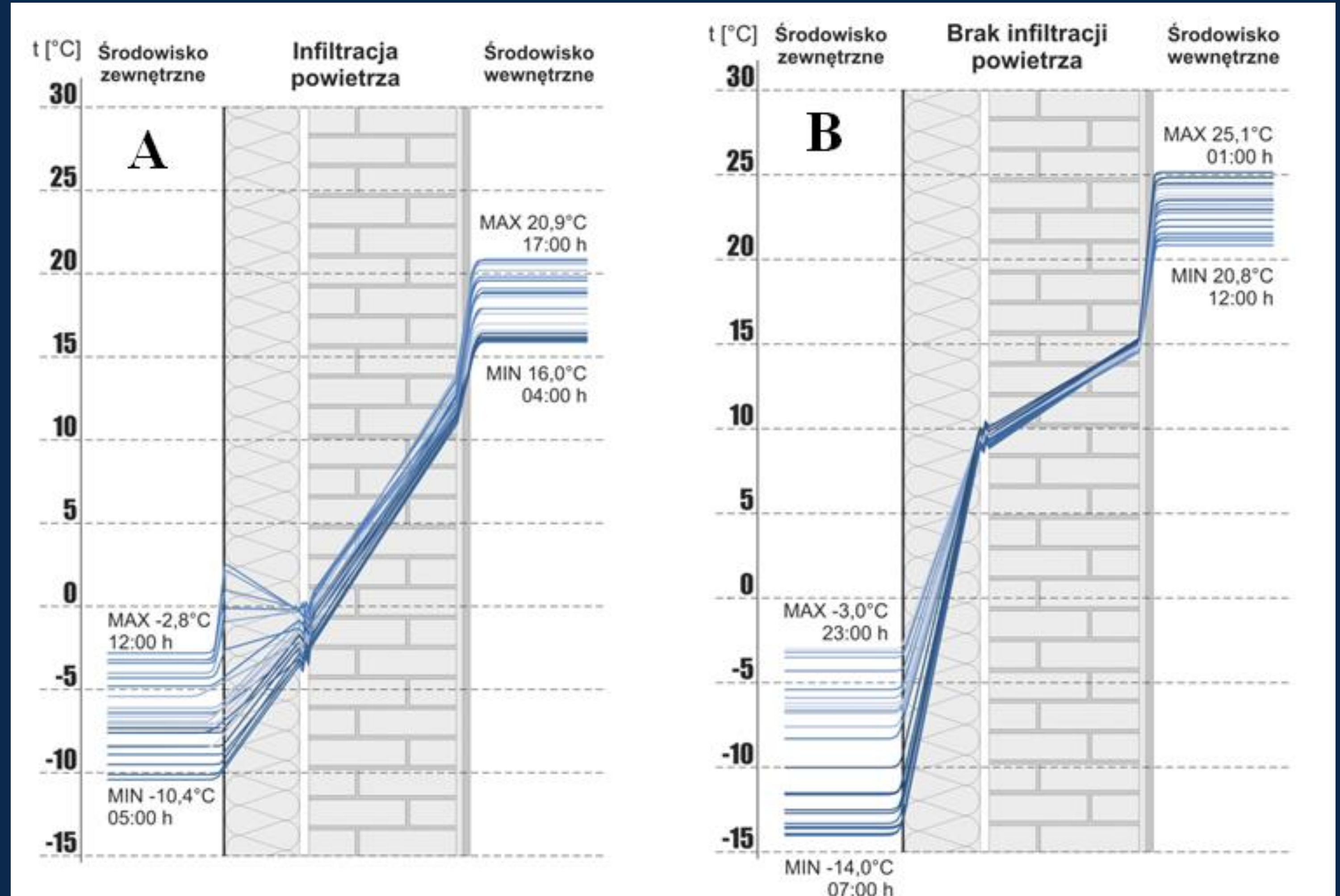
UCZELNIA
BADAWCZA
INICJATYWA DOSKONAŁOŚCI

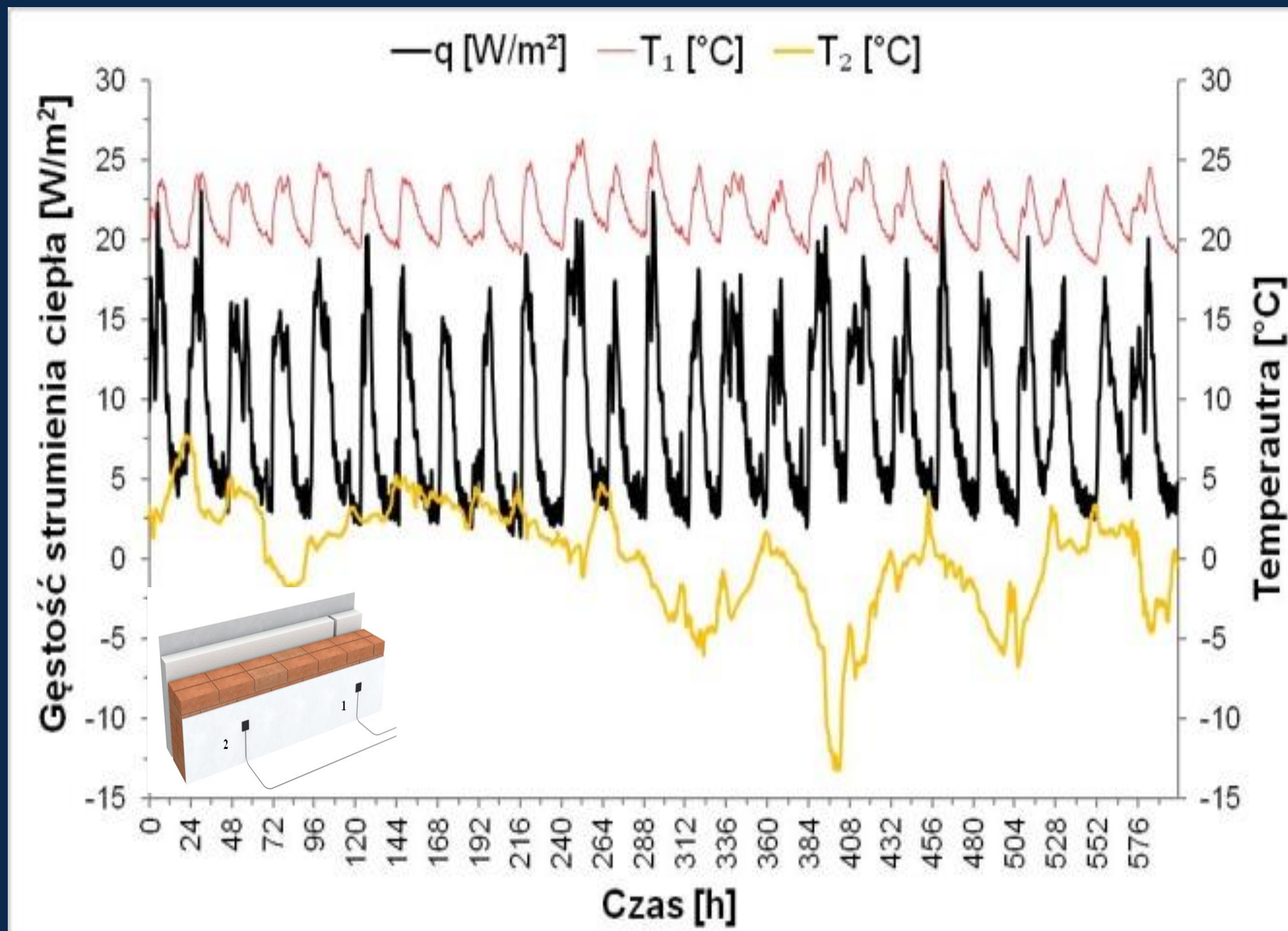
Rozkład temperatury wewnątrz ściany



Rozkład temperatury wewnątrz ściany

Rozkład temperatury w przekroju ściany w miejscu referencyjnym dla minimalnej temperatury zewnętrznej i przy występowaniu infiltracji (A) oraz jej braku (B)





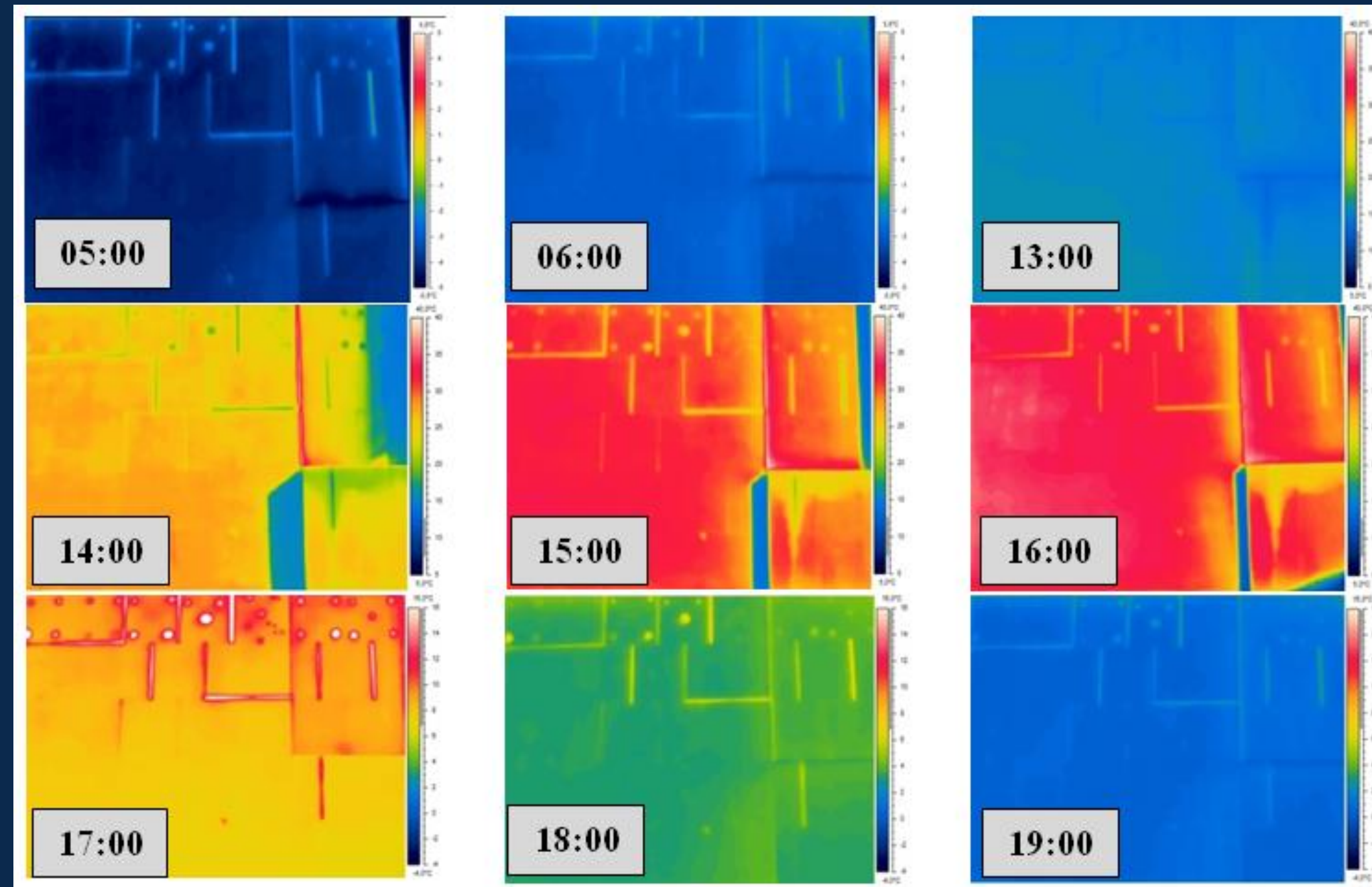
POMIAR STRUMIENIA CIEPŁA

Wyznaczenie oporu cieplnego w miejscach defektów ETICS

Pomiary gęstości strumienia ciepła zostały wykonane w obrębie obszaru 1 ściany zewnętrznej z systemem ociepleń ETICS i występującymi imperfekcjami cieplnymi w postaci defektów i dyslokacji cieplnych oraz infiltracji powietrza. Badania zostały przeprowadzone w dwóch lokalizacjach. Pierwszą stanowiło miejsce występowania defektu cieplnego BDE o szerokości $\delta_{\text{def}} = 20$ mm. Druga lokalizacja występowała w miejscu referencyjnym na identycznej wysokości, oddalonym o 1,2 m od pierwszego miejsca pomiaru.



Badania termograficzne



$$C_{ETICS}(\tau) = t_{se,def}(\tau) - t_{se}(\tau),$$

gdzie:

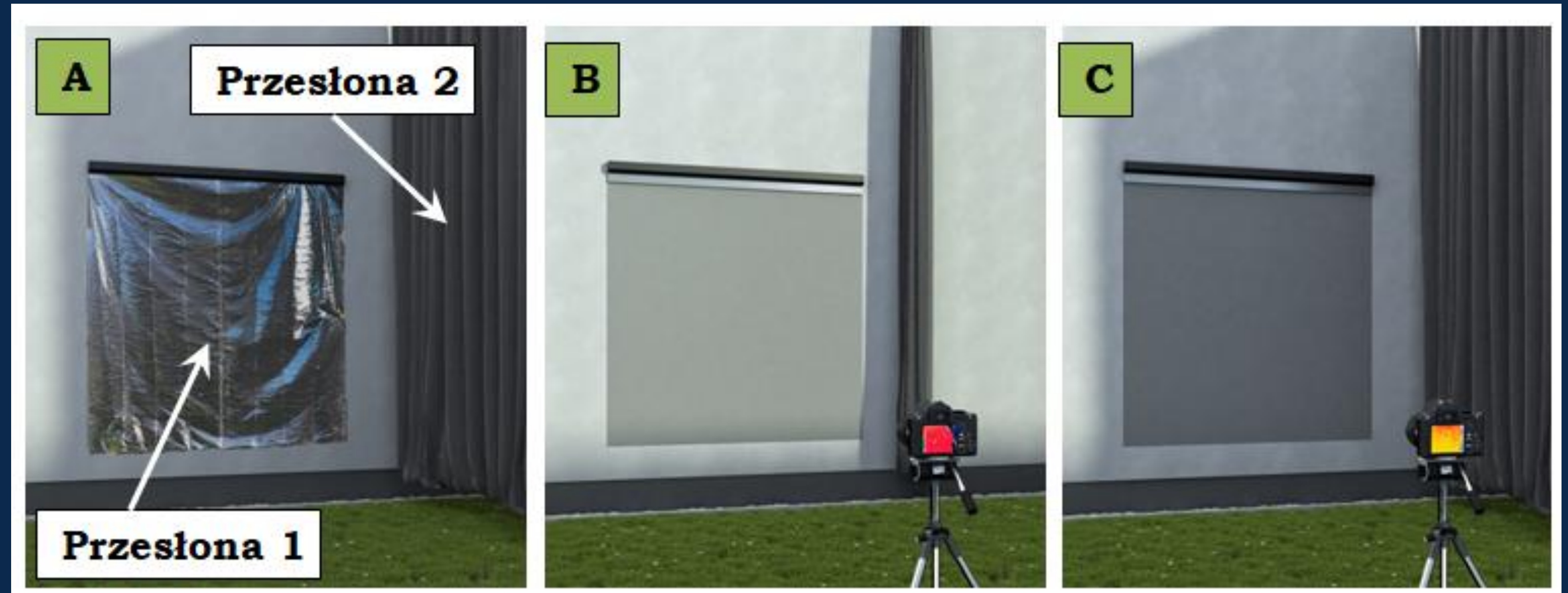
$t_{se,def}(\tau)$ – temperatura na powierzchni systemu *ETICS* w miejscu występowania defektu cieplnego w czasie τ ,

$t_{se}(\tau)$ – temperatura na powierzchni systemu *ETICS* w miejscu referencyjnym w czasie τ .

kontrast temperaturowy ETICS

różnica pomiędzy temperaturą w dowolnym punkcie defektu cieplnego a temperaturą referencyjną, znajdującą się w miejscu poza strefą zaburzeń defektu cieplnego i wyznaczaną na tej samej wysokości ściany

Badania termograficzne latem

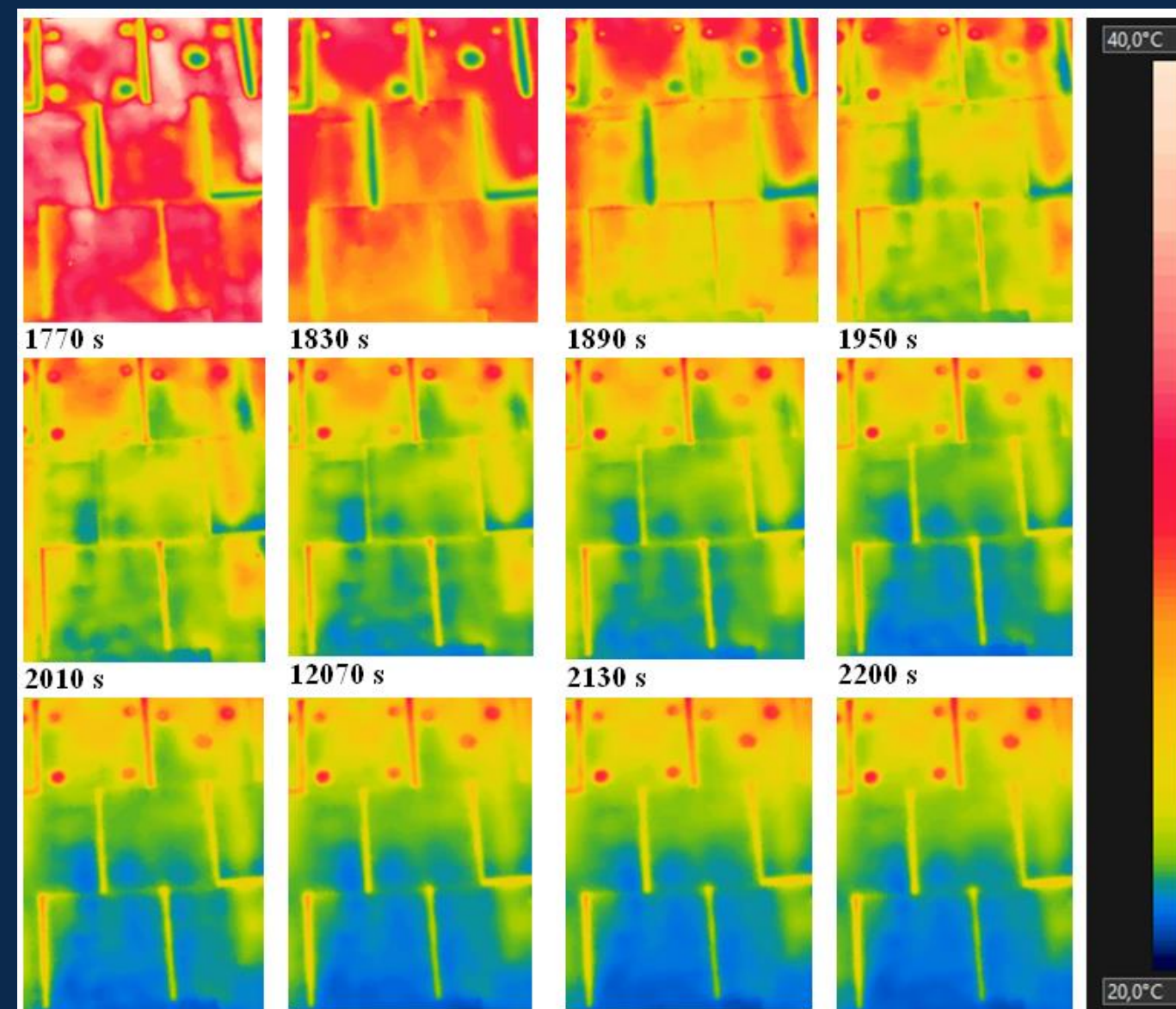


Schemat stanowiska pomiarowego z przesłonami ruchomymi:

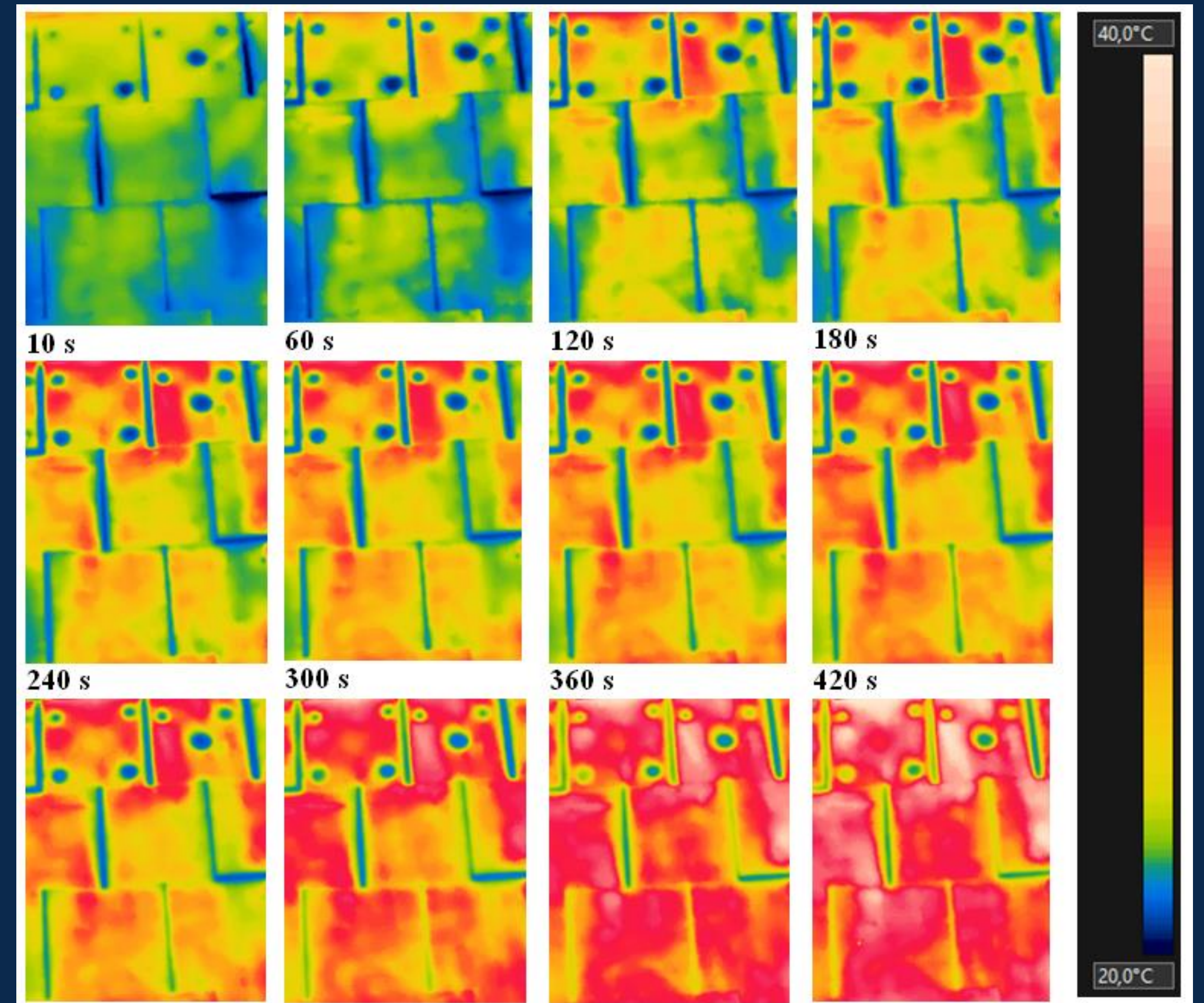
- A) przed rozpoczęciem pomiarów,
- B) w trakcie nagrzewania,
- C) w trakcie stygnięcia

BADANIA ZASADNICZE

Badania termograficzne latem



Termogramy analizowanego obszaru ściany w fazie nagrzewania i chłodzenia



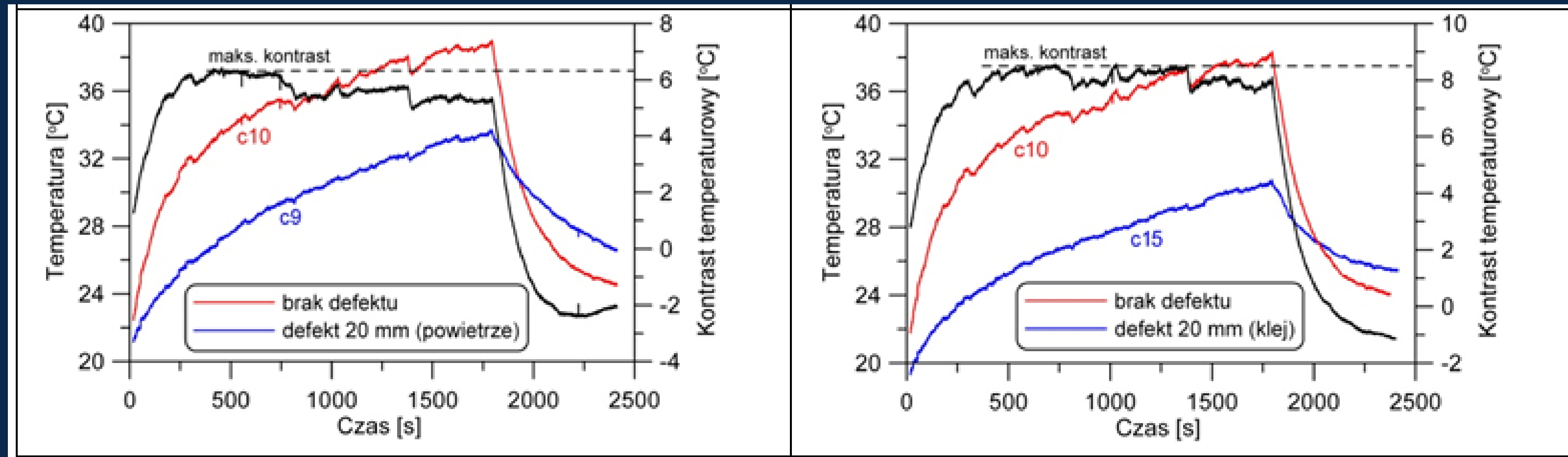
Politechnika
Śląska



UCZELNIA
BADAWCZA
INICJATYWA DOSKONAŁOŚCI

Badania termograficzne latem

Zmiany temperatury i kontrastu temperaturowego w czasie – LvDE $\delta_{\text{def}} = 20 \text{ mm}$ (P), (ZK)

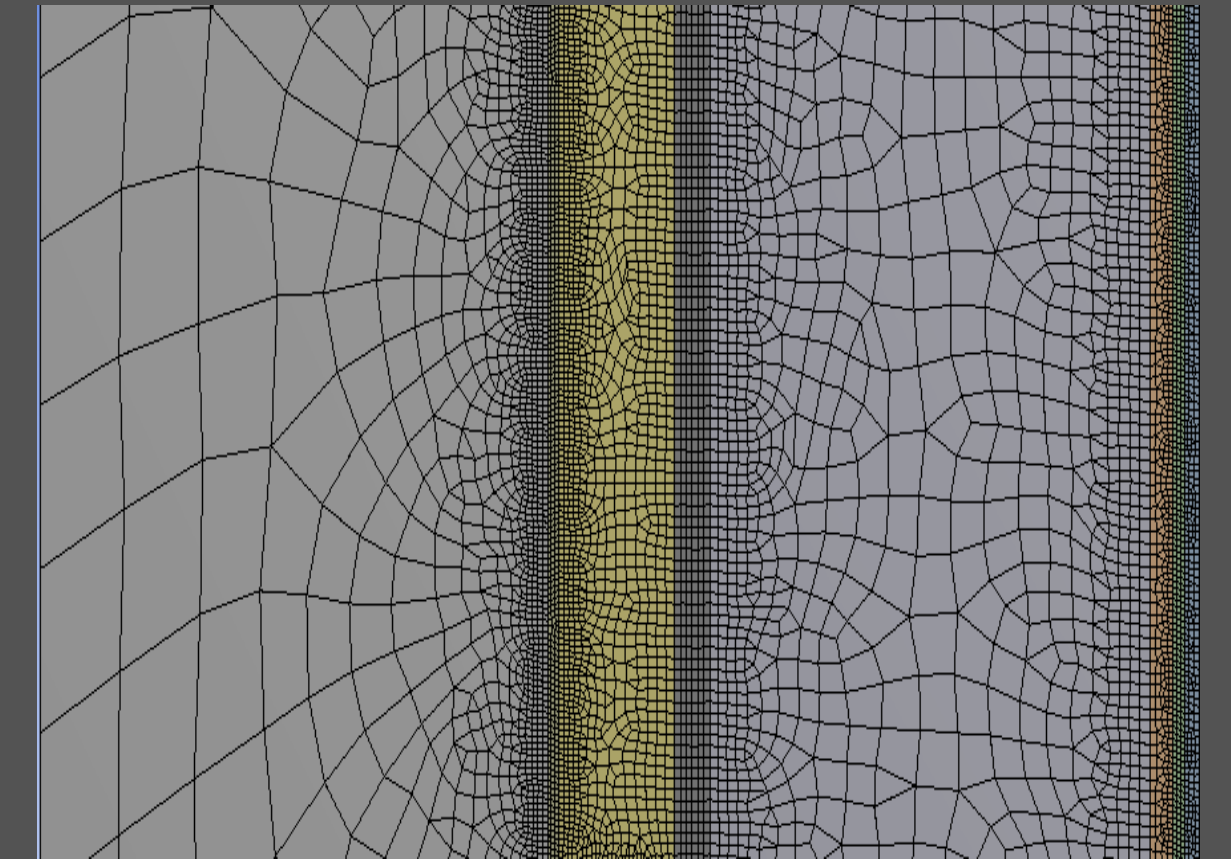


ANALIZA OBLICZENIOWA

Modelowanie numeryczne

Dwuwymiarowy model geometryczny stanowi warstwowa ściana zewnętrzna o wysokości 2,7 m z ociepleniem w systemie ETICS. Warstwę konstrukcyjną przyjęto za wykonaną z cegły pełnej, z przylegającą do jej zewnętrznej powierzchni pionową szczeliną wypełnioną powietrzem o szerokości $\delta_{dys} = 30$ mm wraz z warstwą izolacji cieplnej ze styropianu gr. 10 cm.

Analizując przepływ ciepła przez ścianę, rozpatrywano problem konwekcji swobodnej w pionowej przestrzeni zamkniętej pomiędzy izolacją termiczną a murem ceramicznym. Powietrze, które wypełnia pionową szczelinę, może ulegać cyrkulacji, w przypadku gdy otaczające ją ścianki mają zróżnicowane temperatury. Oprócz właściwości wypełniającego gazu charakter ruchu konwekcyjnego powietrza jest uzależniony od wysokości i szerokości szczeliny.



Politechnika
Śląska

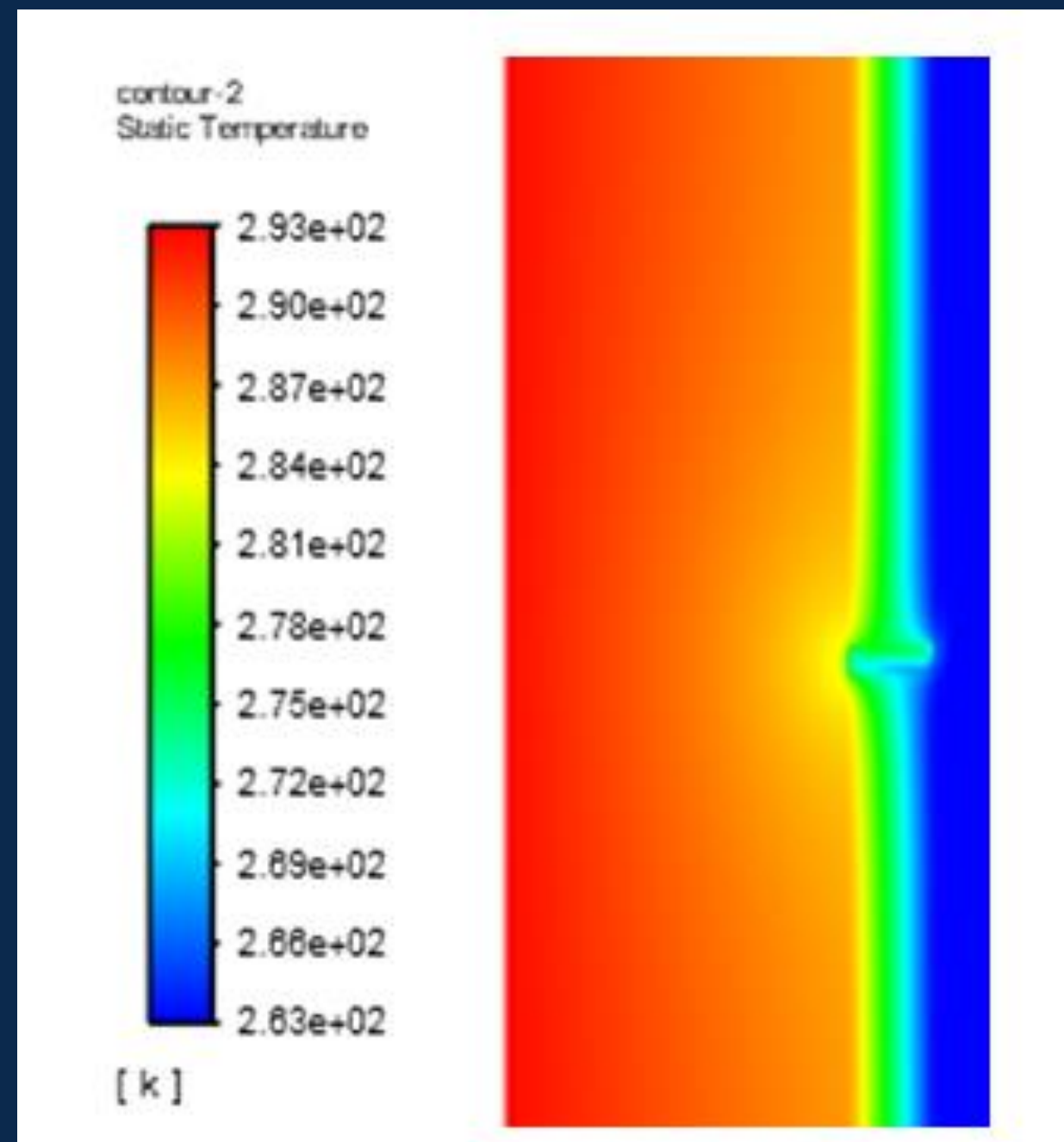


UCZELNIA
BADAWCZA
INICJATYWA DOSKONAŁOŚCI

Zmienna szerokość defektów cieplnych

Dla referencyjnej ściany zewnętrznej bez występujących defektów cieplnych wyznaczono strumień ciepła wynoszący $Q = 23,3 \text{ W}$ i gęstość strumienia ciepła równą $q = 8,62 \text{ W/m}^2$.

Defekt cieplny o szerokości $\delta_{def} = 2 \text{ mm}$ powoduje wzrost gęstości strumienia ciepła o $\Delta q = 0,7\%$ dla ściany o wysokości $h = 2,7 \text{ m}$ i szerokości $d = 1,0 \text{ m}$. Zwiększenie szerokości defektu do 5 mm lub 10 mm skutkuje wzrostem kolejno o $\Delta q = 0,8\%$ i $\Delta q = 0,9\%$. Większy wzrost ilości przenikającego ciepła wynoszący $\Delta q = 1,4\%$ i $\Delta q = 2,4\%$ następuje w przypadku defektów o szerokości $\delta_{def} = 15 \text{ mm}$ i $\delta_{def} = 20 \text{ mm}$. Największe wartości $q = 9,63 \text{ W/m}^2$ odnotowano dla defektu cieplnego o szerokości $\delta_{def} = 40 \text{ mm}$. Stanowi to wzrost o 11,7% w stosunku do wartości referencyjnej wyznaczonej dla ściany bez defektów cieplnych.



Rozkład temperatury w skali barw w obrębie defektu cieplnego $\delta_{def} = 40 \text{ mm}$

Strumień ciepła, gęstość strumienia ciepła i całkowity zastępczy opór cieplny ściany w zależności od szerokości defektów cieplnych

l_{def} [mm]	δ_{def} [mm]	Q [W]	q [W/m ²]	$R_{T,zast}$ [(m ² K)/W]
1000	2	23,43	8,68	3,46
	5	23,47	8,69	3,45
	10	23,50	8,70	3,45
	15	23,59	8,74	3,43
	20	23,83	8,83	3,40
	30	25,03	9,27	3,24
	40	25,99	9,63	3,12

Zmiana szerokość dyslokacji cieplnych

Strumień ciepła, gęstość strumienia ciepła i całkowity zastępczy opór cieplny ściany w zależności od szerokości dyslokacji cieplnych

h_{dys} [mm]	δ_{dys} [mm]	Q [W]	q [W/m ²]	$R_{T,zast}$ [(m ² K)/W]
2700	10	23,26	8,61	3,48
	15	23,11	8,56	3,50
	20	22,95	8,50	3,53
	25	23,77	8,80	3,41
	30	23,86	8,84	3,39
	35	24,71	9,15	3,28
	40	25,27	9,36	3,21

Zmienna powierzchnia otworów infiltracji powietrza

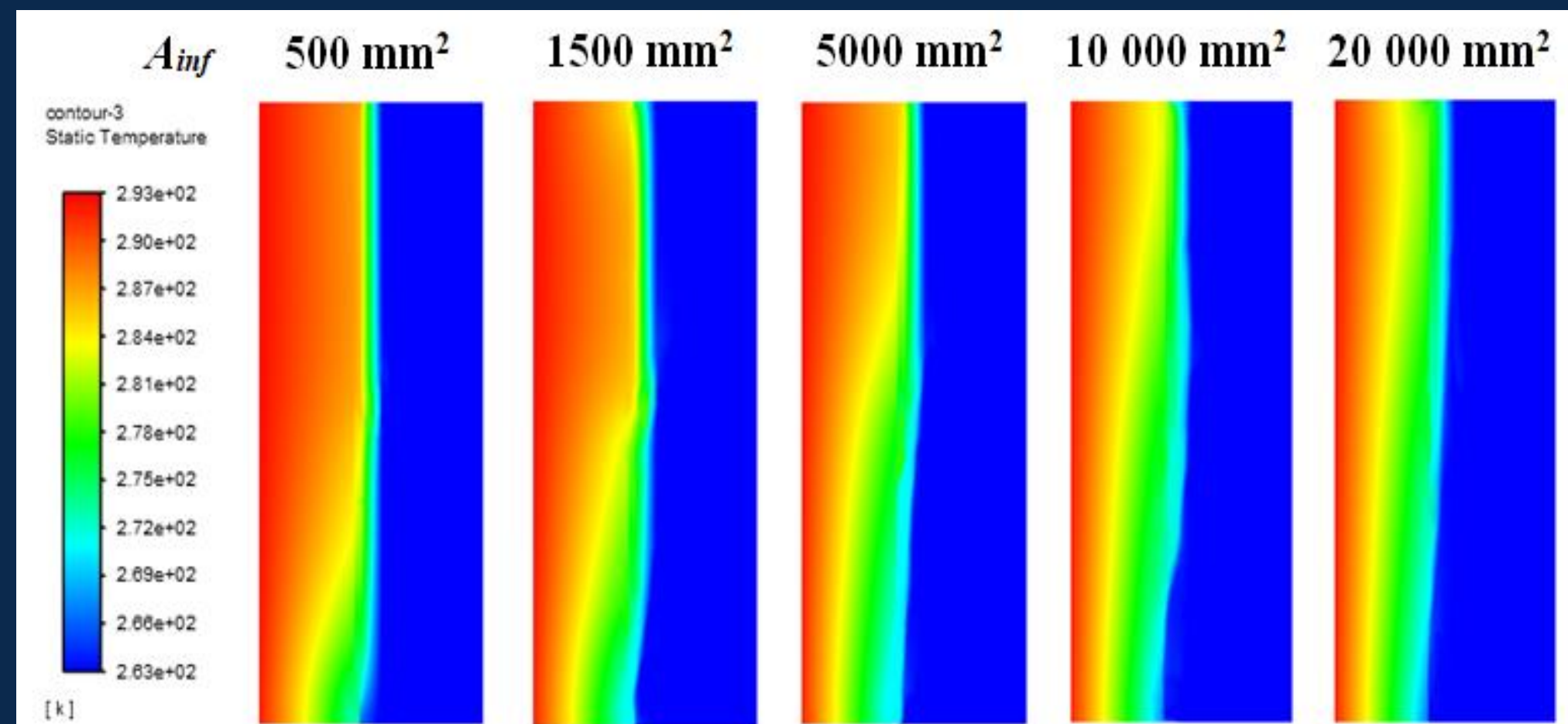
Strumień ciepła, gęstość strumienia ciepła i całkowity zastępczy opór cieplny ściany w zależności od pola powierzchni otworów A_{inf}

A_{inf} [mm ²]	Q [W]	q [W/m ²]	$R_{T,zast}$ [(m ² K)/W]
0	23,86	8,84	3,39
500	38,10	14,11	2,13
1500	47,89	17,74	1,68
5000	63,77	23,62	1,27
10000	72,64	26,90	1,12
15000	75,91	28,11	1,07
20000	78,13	28,94	1,04

Konsekwencją opisywanych zmian jest istotne zwiększenie, wraz ze wzrostem pola powierzchni A_{inf} , gęstości strumienia ciepła. Dla założonych warunków wymiany ciepła występowanie pola powierzchni otworów $A_{inf} = 500 \text{ mm}^2$ skutkuje wzrostem gęstości strumienia ciepła o $\Delta q = 60\%$ w stosunku do sytuacji występującej dyslokacji cieplnej i braku niekontrolowanej infiltracji powietrza.

MODELOWANIE NUMERYCZNE

Zmienna powierzchnia otworów infiltracji powietrza



Rozkład temperatury w skali barw dla zróżnicowanego pola powierzchni infiltracji

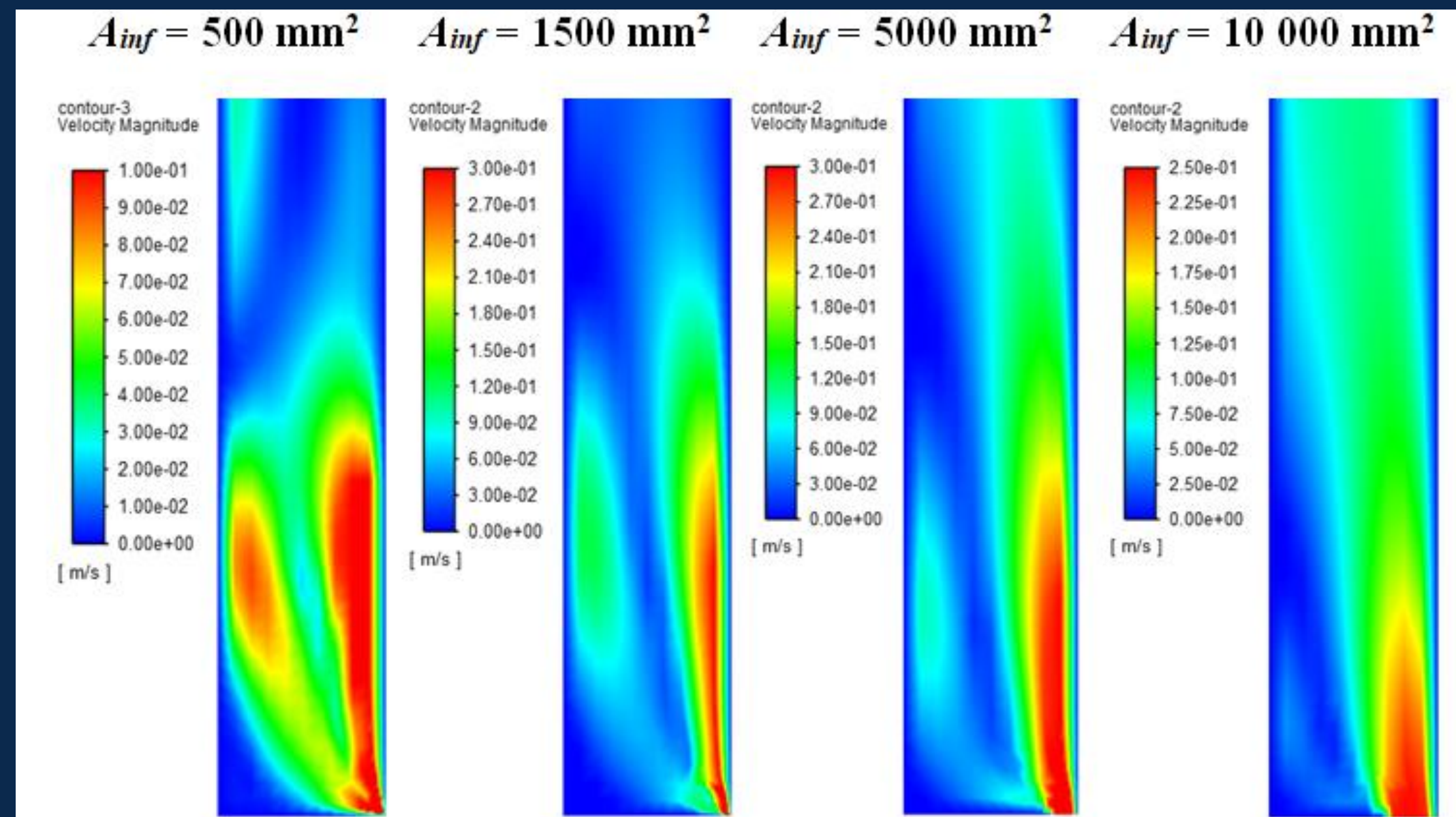


Politechnika
Śląska



UCZELNIA
BADAWCZA
INICJATYWA DOSKONAŁOŚCI

Zmienna powierzchnia otworów infiltracji powietrza



Prędkość przepływu powietrza w obrębie otworu wlotowego pionowej szczeliny dla zróżnicowanego pola powierzchni A_{inf}

Wybrane elementy



Zaproponowano klasyfikację imperfekcji systemu ETICS w postaci defektów i dyslokacji cieplnych, mogących dodatkowo występować łącznie z niekontrolowaną infiltracją powietrza i rozpoznano w warunkach rzeczywistych przy wykorzystaniu zróżnicowanych technik pomiarowych ich wpływ na odpowiedź termiczną ocieplonej ściany.



Zaproponowano nowe wskaźniki, w tym kontrast temperaturowy ETICS, umożliwiające dokonanie ilościowej oceny defektów cieplnych w diagnostyce termoizolacyjności złożonych systemów ociepleń (w tym termografia w warunkach letnich)



Obliczono zastępczy opór cieplny ścian zewnętrznych z imperfekcjami systemu ETICS oraz w oparciu o modele podobieństwa zaproponowano ich wyznaczenie przy wykorzystaniu liczb kryterialnych Biota, Rayleigha i Pecleta

DZIĘKUJĘ ZA UWAGĘ

Dr hab. Inż. Paweł Krause



Phone

+48 32 2372303



E-mail

pawel.krause@polsl.pl



Follow us:

facebook.com/polsl

twitter.com/polsl