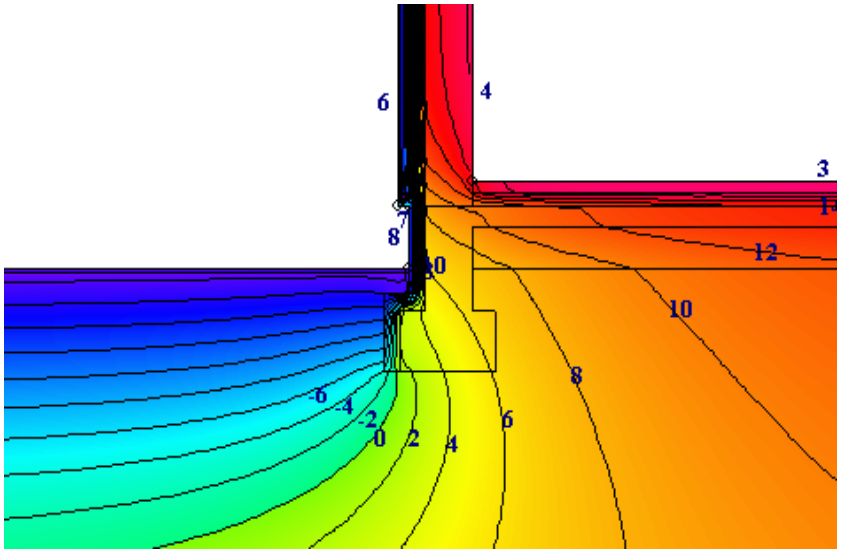
Politechnika Białostocka
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

Rozkład temperatury gruntu w sąsiedztwie ogrzewanych i nieogrzewanych budynków

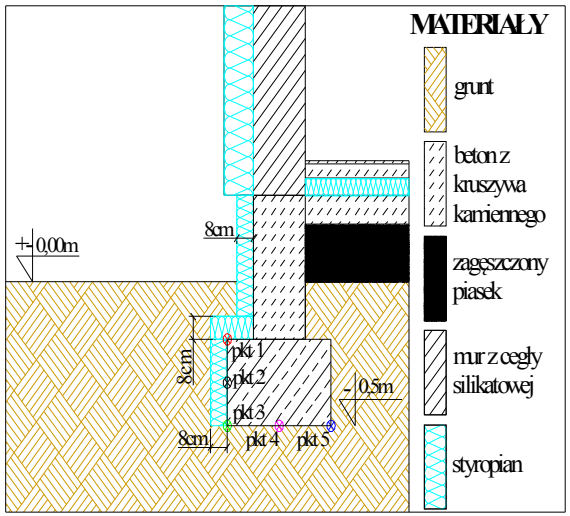


Białystok, czerwiec 2018

Irena Jckiewicz

Głębokość posadowień bezpośrednich

Jeżeli głębokość posadowień bezpośrednich podyktowana jest tylko głębokością przemarzania gruntów to w polskich warunkach klimatycznych fundamenty budynków niepodpiwniczonych można posadawiać na głębokości 0,5 m, pod warunkiem, że fundamenty te będą odpowiednio ocieplone (zapis w normie PN 03020).



Parametry mające wpływ na rozkład temperatury

Podstawowymi parametrami mającymi decydujący wpływ na rozkład temperatury w gruncie pod budynkiem w okolicy fundamentów są:

- **wskaźnik stopniodni temperatur ujemnych F_d ,**
- **współczynnik przewodzenia ciepła λ [W/(m·K)] gruntu,**
- **charakter eksploatacji budynku (budynek ogrzewany, nieogrzewany).**

Zależności te (do obliczeń inżynierskich) można przyjąć, że mają charakter liniowy.

Parametry …cd

Wpływ pozostałych czynników takich jak :

- **wody gruntowe,**
- **uwarstwienia gruntu,**
- **przesunięcia fazowe,**
- **sprzężone procesy przenoszenia ciepła i wilgoci,**
- **stężenie substancji (soli) w gruncie,**
- **obniżony punkt zamarzania wody wolnej,**
- **kilkakrotne zamarzania i rozmarzania w czasie zimy**

jest nieznaczny i również w przypadku obliczeń dla celów inżynierskich można go pominąć. Błąd z tego tytułu wynosi < 5 %.

Model obliczeniowy rozkładu temperatury w gruncie zakłóconym budynkiem

Aby opracować model obliczeniowy dotyczący określenia wpływu izolacji termicznej fundamentów na rozkład temperatury w gruncie na styku z fundamentem, należy wcześniej wykonać następujące badania szczegółowe dotyczące;

- **analizy merytorycznej istniejących metod teoretycznych, empirycznych i numerycznych wyznaczania pól temperatur w gruntach zamarzających z uwzględnieniem zakłóceń spowodowanych dodatkowymi źródłami ciepła w postaci budynków,**

Model obliczeniowy – zadania szczegółowe

- określenia warunków brzegowych czyli „znaleźć” zimy (dla klimatu Polski) charakteryzujące się maksymalnym wskaźnikiem stopniodni temperatur ujemnych F_d z ostatnich 50-ciu lat (zimy z 50-letnim okresem powrotu),
- wykonania analizy programów numerycznych pod kątem przydatności do obliczenia rozkładu temperatur w zamarzających gruntach z uwzględnieniem wpływu źródeł ciepła czyli budynków, zwłaszcza ogrzewanych .

Model termiczny przemarzania gruntu (warunki brzegowe i początkowe)

Do analizy teoretycznej przemarzania gruntu wykorzystano równanie różniczkowe Fouriera opisujące przepływ ciepła w ośrodku pomiędzy dwoma punktami o różnej temperaturze. W wyniku analizy otrzymano równania matematyczne , które możliwe są do rozwiązania poprzez zastosowanie pewnych założeń upraszczających.

Korzystając z teorii Klapejrona, Stefana i Lebejzona założono , że dolna ruchoma granica zamarzania gruntu, ma zawsze stałą temperaturę zamarzania. Dolną granicę rozmarzniętej strefy przyjęto w nieskończoności ($l = \infty$).

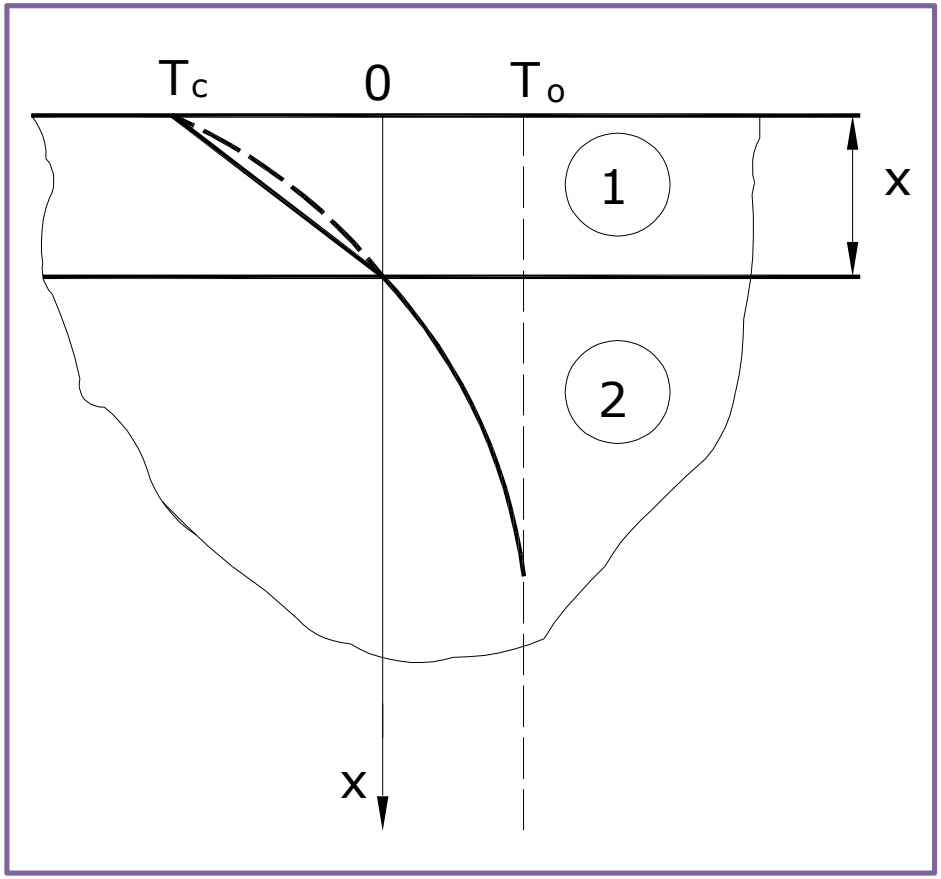
Model termiczny przemarzania gruntu (analiza metod teoretycznych)

gdzie :

T_o – temperatura w gruncie przed okresem mrozów (temperatura jest wyrównana i równa temperaturze gruntu na dużych głębokościach, w polskiej strefie klimatycznej > 8,5m wynoszącej ~9,5 °C

T_c – temperatura powierzchni gruntu przez okres mrozów

X – głębokość (rzędna granicy zmiany faz) [m]



Metody obliczeniowe – analiza programów numerycznych

Metody numeryczne dają możliwość uzyskania wartości liczbowych temperatury w określonych punktach przestrzeni dla określonych czasów i dla konkretnej realizacji geometrycznej i fizycznej zjawiska. Zastosowanie metod numerycznych daje większą możliwość **praktycznego wykorzystania danego modelu obliczeniowego w zagadnieniach inżynierskich**.

- **Entalpia i Bilans (programy opracowane przez autorkę)**
  - **DEISY 2 (Kozłowski T., Politechnika Świętokrzyska) ,**
  - **Kobra (Belgia) ,**
  - **Heat 2 i Heat 3 (Blomberg T., Stany Zjednoczone)**

Analiza programów numerycznych (Heat 2 i Heat 3)

Po analizie tych programów wybrano program Heat 2 służący do obliczenia dwuwymiarowych zadań zarówno w stanie ustalonym jak i przejściowym. W programie został wykorzystane równanie różniczkowe Fouriera opisujące przewodzenia ciepła w 2 kierunkach.

Z analizy programu Hest 2 stwierdzono, że program ten umożliwia uzyskanie wartości liczbowych temperatur w określonych punktach przestrzeni , dla określonych czasów i dla konkretnej realizacji geometrycznej i fizycznej zjawiska. Program umożliwia wprowadzenia warunków brzegowych i początkowych .

Wstępne wyniki z obliczeń, zweryfikowane pomiarami bezpośrednimi potwierdziły przydatność programu do dalszych obliczeń.

Analiza pól temperatur w gruncie zakłóconym budynkiem (w otoczeniu fundamentów) przy wykorzystaniu programu HEAT

Przyjęto następujące założenia do modelu obliczeniowego rozkładu temperatury w gruncie zakłóconym budynkiem:

- **budynek niepodpiwniczony ogrzewany (nieogrzewany)**
- **temperatury wewnętrzne : w budynku ogrzewanym $T_i = +20\ ^0C$**
- **w budynku nieogrzewanym $T_i = +5\ ^0C$**

Przyjęte warunki brzegowe przedstawiono na rys. 1.

WPŁYW PRZEGRÓD STYKAJĄCYCH SIĘ Z GRUNTEM NA ROZKŁAD TEMPERATURY

Na zmiany rozkładu temperatur w gruncie pod budynkiem, poza temperaturą powietrza, wpływ mają również przegrody stykające się z gruntem (podłoga i ściany powierzchni zagłębionych.

Straty ciepła tych przegród należy rozpatrywać jako model złożony z budynku i gruntu. Spośród kilku różnych modeli obliczeniowych najlepszą zgodność z wynikami doświadczalnymi wykazuje model Henrikssona. Model ten zakłada, że w obszarze podłogi budynku można wyróżnić dwie strefy i podzielić całkowity strumień strat ciepła przez podłogę na dwa składniki.

Model Henrikssona

$$Q_o = Q_1 + Q_2$$

gdzie:

- Q_2 - odnosi się do środkowej części podłogi budynku na którą zmiany temperatury powietrza nie mają wpływu,
- Q_1 - określa przepływ ciepła przez tą część połogi wokół ścian zewnętrznych, której straty ciepła podlegają wahaniom zależnym od zmian temperatury powietrza zewnętrznego

W obszarze odległym mniej niż o **r** od osi ściany zewnętrznej przenikanie ciepła odbywa się po okręgach o promieniu $\rho < r$. Dla obszaru w odległości większej od „**r**" od osi ściany zewnętrznej, założono, że izoterma średniej rocznej wieloletniej przebiega w płaszczyźnie osi ściany zewnętrznej po okręgach o promieniu $r < \rho < B/2$ (B - szerokość budynku)

WPŁYW PRZEGRÓD STYKAJĄCYCH…..

Wówczas strumień strat ciepła ma postać:

$$Q = U_1(T_i - T_e)\, r + U_2\, (T_e - T_{śr})\, (B/2 - r)$$

gdzie:

- U_1 ,U_2 – współczynniki przenikania ciepła odpowiednio dla 1 i 2 strefy,
- T_i – temperatura powietrza w budynku,
- T_e – obliczeniowa temperatura powierzchni gruntu poza budynkiem,
- $T_{śr}$ – temperatura gruntu na dużej głębokości pod budynkiem (średnia wieloletnia temperatura powierza zewnętrznego w ciągu roku)
- B – szerokość budynku

Z badań przeprowadzonych przez Henrikssona wynika, że szerokość pasa przyściennego w którym jest zauważalny wpływ temperatury zewnętrznej powietrza na układ budynek - grunt wynosi około 0,75 m.

Analiza pól temperatur ..(Model obliczeniowy)

WARUNKI BRZEGOWE: rys.1.

Powierzchnia 1 – T_0 = const = 9,5^{0}C

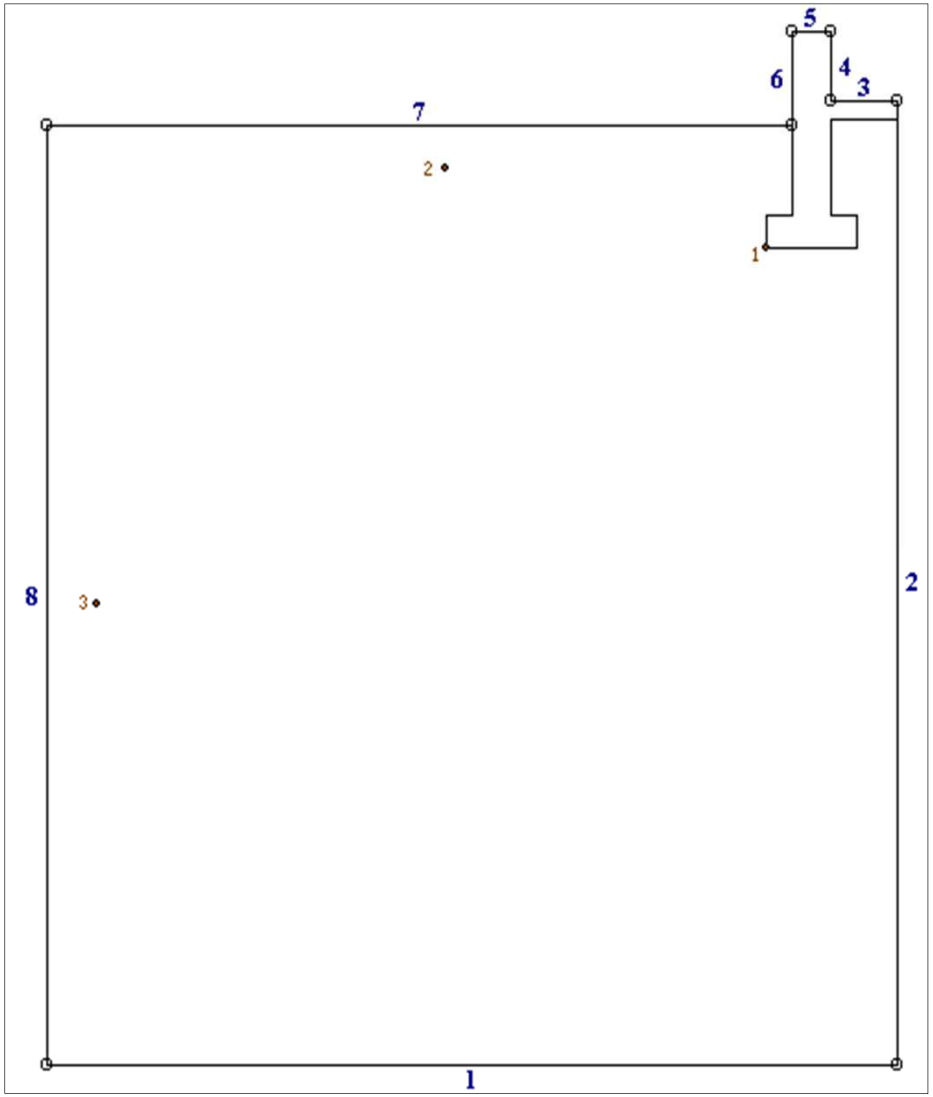
Powierzchnia 3 – T=const = 20^{0}C, R_{si} = 0,17 [(m^2·K/W)]

Powierzchnia 4 – T=const = 20^{0}C

R_{si} = 0,13 [(m^2·K/W)]

Powierzchnia 6-7 – T(t) = funct (funkcja liniowa na podstawie danych klimatycznych (np. zima 95/96) R_{si} = 0,04 [(m^2·K/W)]

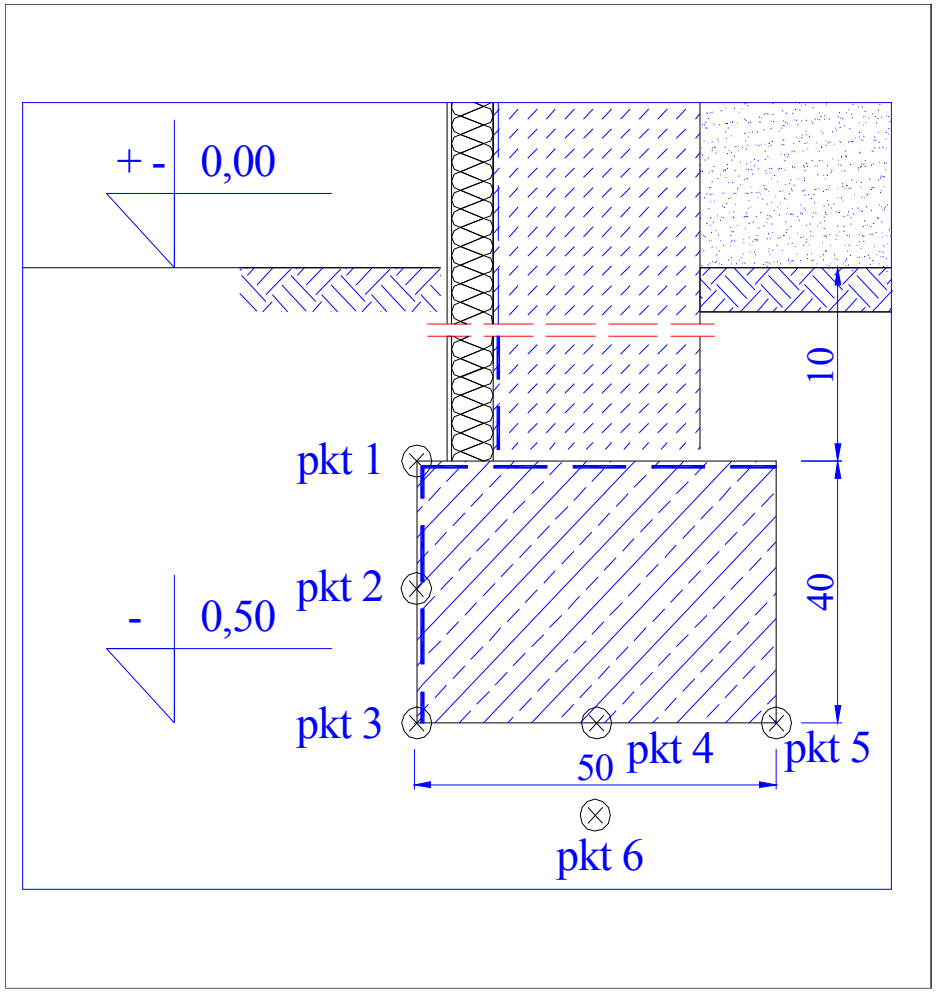
Powierzchnie 2, 5, 8 – adiabatyczne , q = 0



Analiza pól temperatur… (punkty pomiarowe)

Rys. 2.

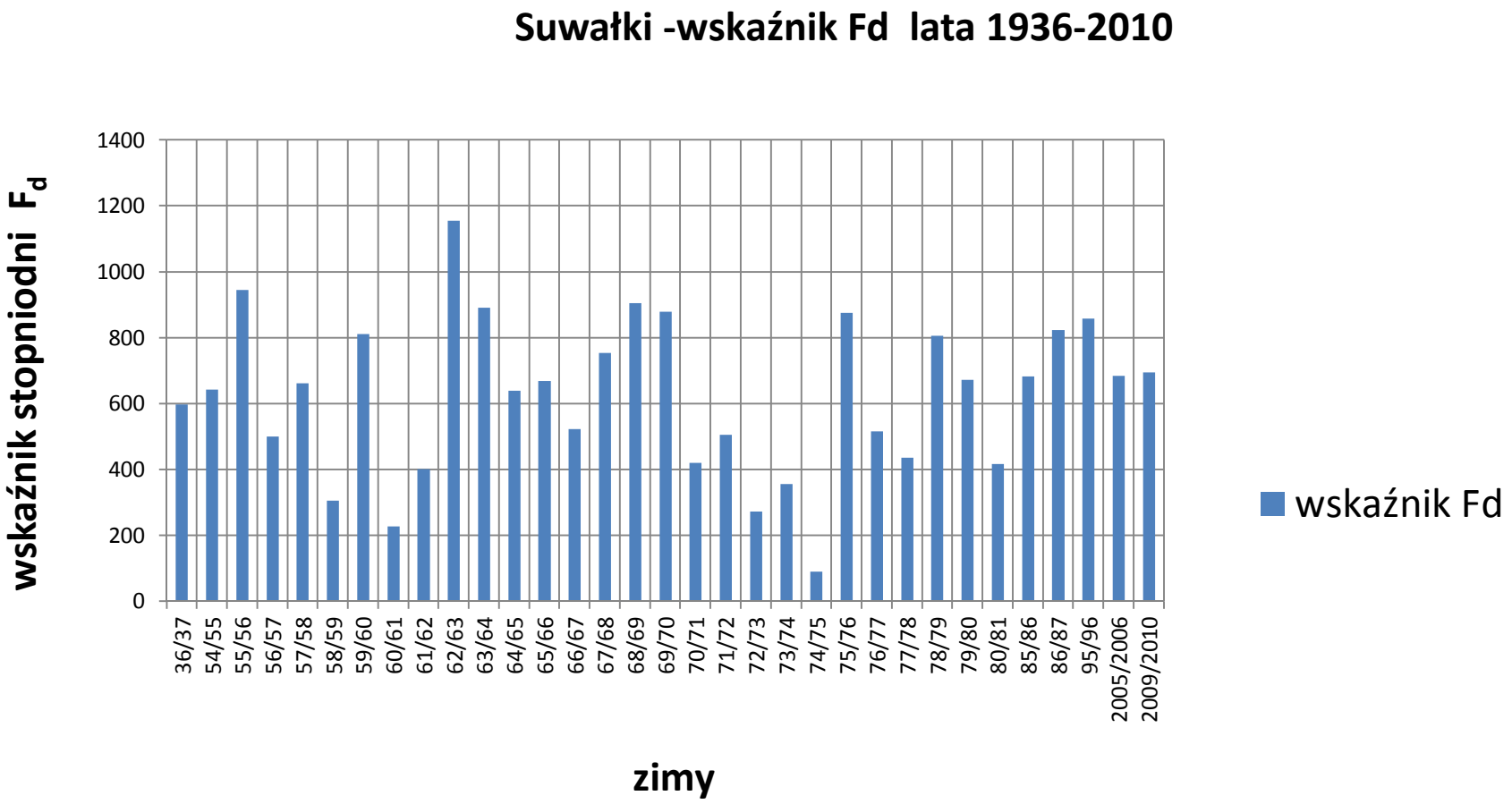
Fundament posadowiony na głębokości 0,50 cm poniżej poziomu gruntu. Zaznaczone miejsca 6-ciu punktów pomiarowych



Analiza pól temperatur… określenie warunku brzegowego

Warunek brzegowy w postaci temperatury zewnętrznej powietrza w okresie zimowym przyjęto dla zimy z 50-letnim czasem powrotu, charakteryzującej się maksymalnym wskaźnikiem stopniodni temperatur ujemnych F_d dla klimatu Polski z ostatnich 50 lat .

Wartości wskaźnika stopniodni temperatur ujemnych w latach 1936-2010 dla najzimniejszego miasta w Polsce – Suwałki



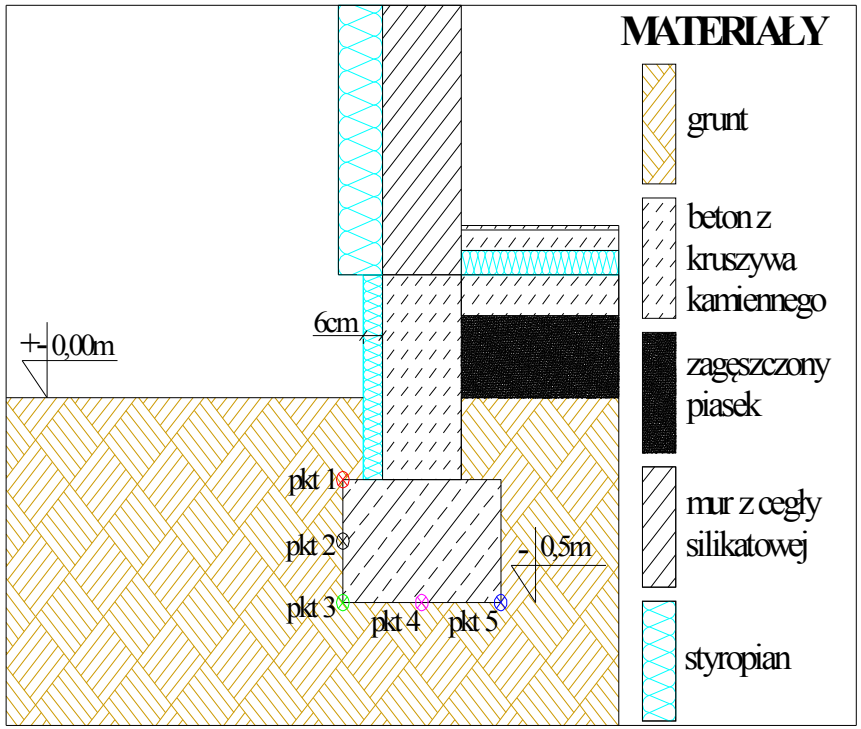
Analiza wpływu izolacji termicznej na rozkład temperatury na styku fundamentu z gruntem

Do analizy wpływu izolacji fundamentów przyjęto 9 wariantów ocieplenia, obliczenia zostały wykonane dla ekstremalnych warunków jakie miały miejsce w okresie ostatnich 50 lat na terenie Polski (z wyłączeniem terenów górskich), były to zimy 1986/87, 1995/96 i 2005/2006 2005, przyjęto 3 różne wartości współczynnika przewodzenia ciepła λ analizowanego gruntu.

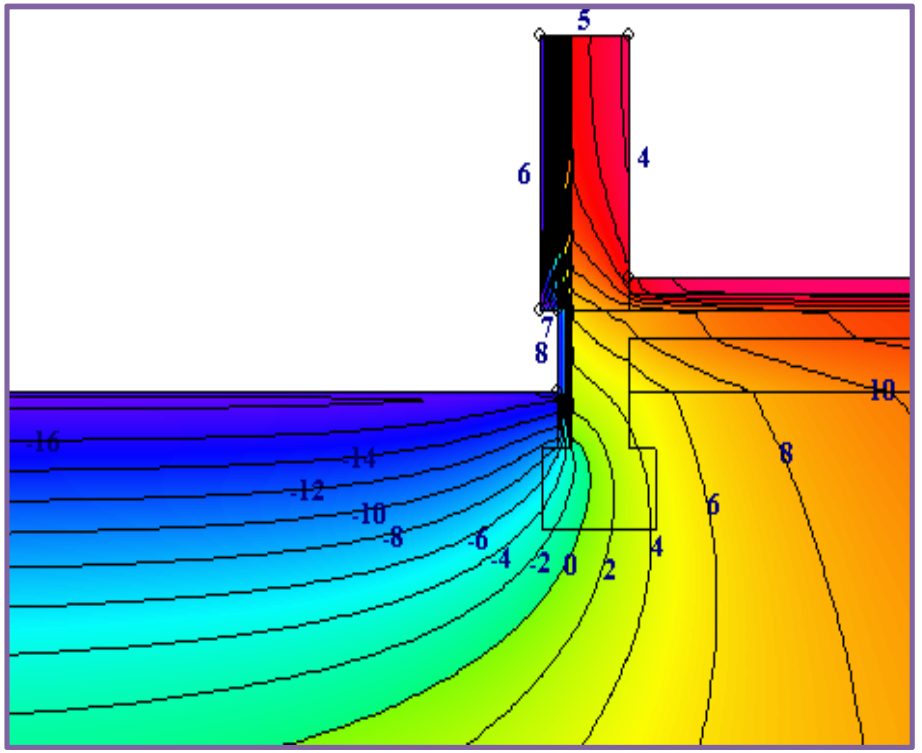
Wykonano również obliczenia dla gruntu o $\lambda = 1.293$ [W/(m·K)], gdyż takim współczynnikiem charakteryzował się grunt na poletku IMiGW Białystok.

Wpływ izolacji termicznych na rozkład temperatury w gruncie (λ = 2,0 [W/(m·K)]) w okolicy fundamentów budynku ogrzewanego

Schemat obliczeniowy dla proponowanego rozwiązania

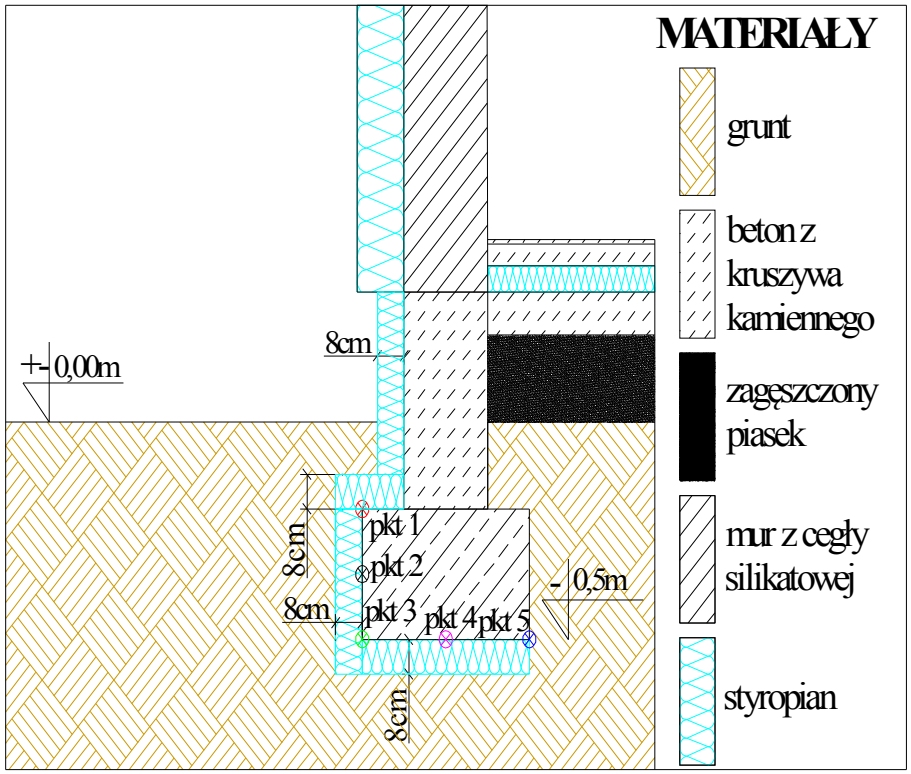


Rozkład izoterm dla najzimniej-szego dnia 20.01.2006 (-23,4 ^{0}C)

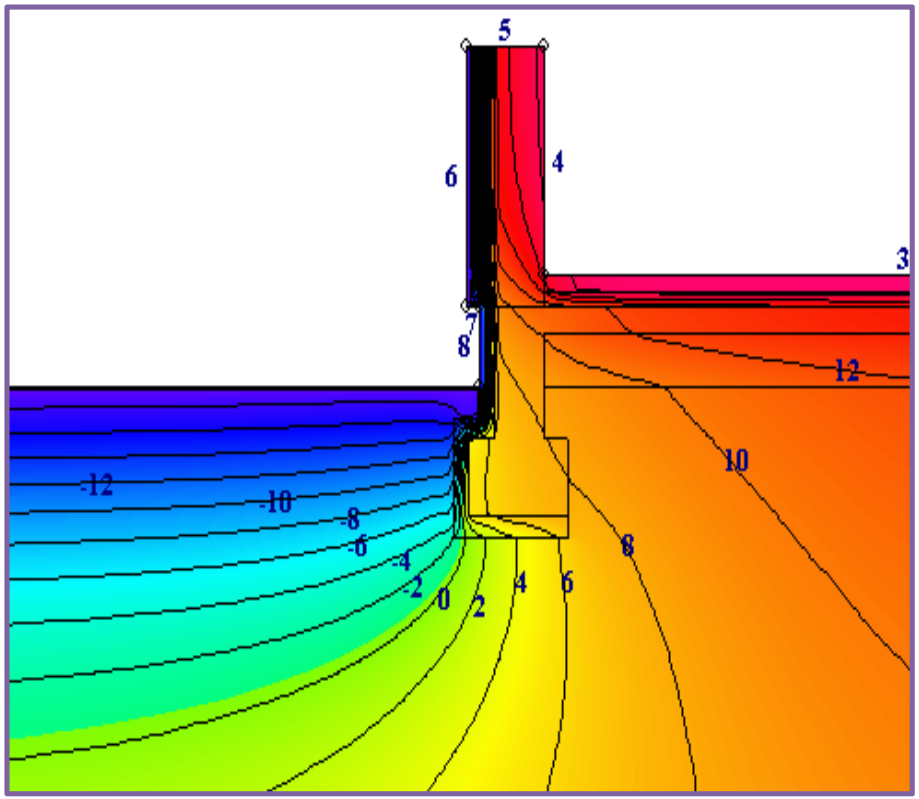


6. Wpływ izolacji termicznych na rozkład temperatury w gruncie (λ = 2,0 [W/(m·K)]) w okolicy fundamentów budynku ogrzewanego

Schemat obliczeniowy dla proponowanego rozwiązania

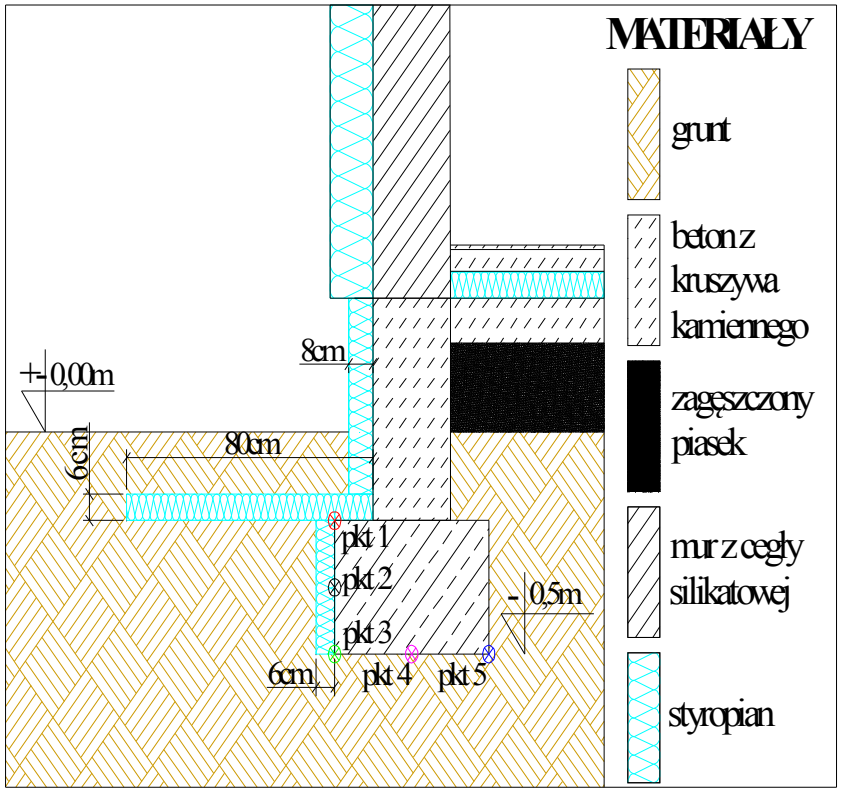


Rozkład izoterm dla najzimniejszego dnia 20.01.2006 (-23,4 ^{0}C)

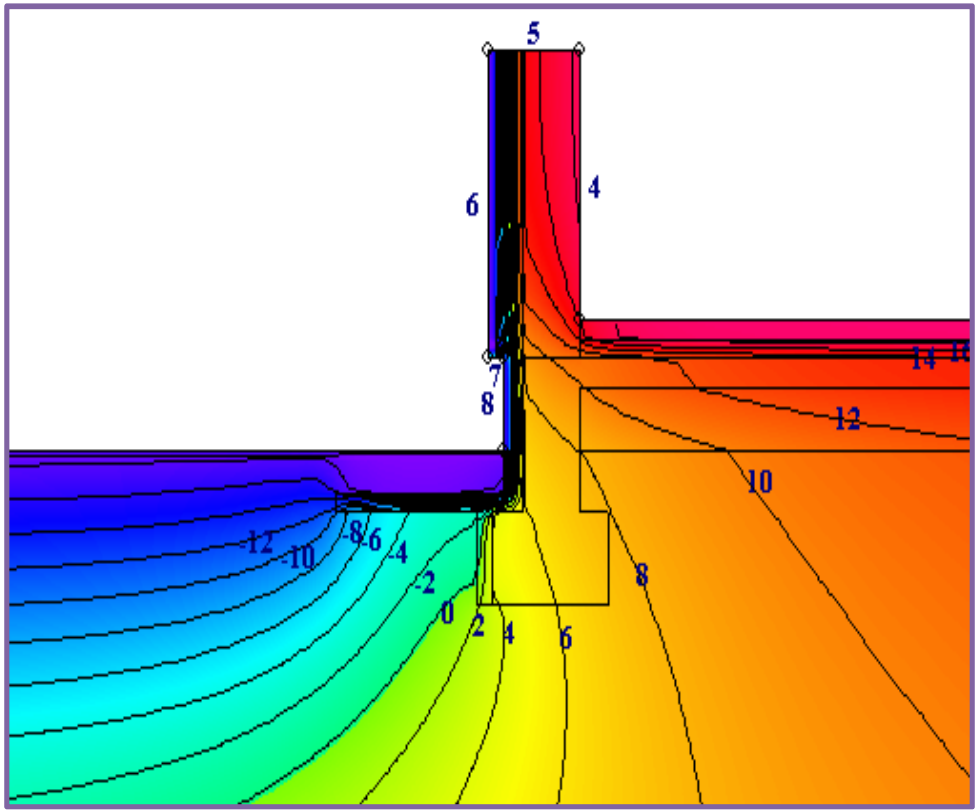


6. Wpływ izolacji termicznych na rozkład temperatury w gruncie (λ = 2,0 [W/(m·K)]) w okolicy fundamentów budynku ogrzewanego

Schemat obliczeniowy dla proponowanego rozwiązania

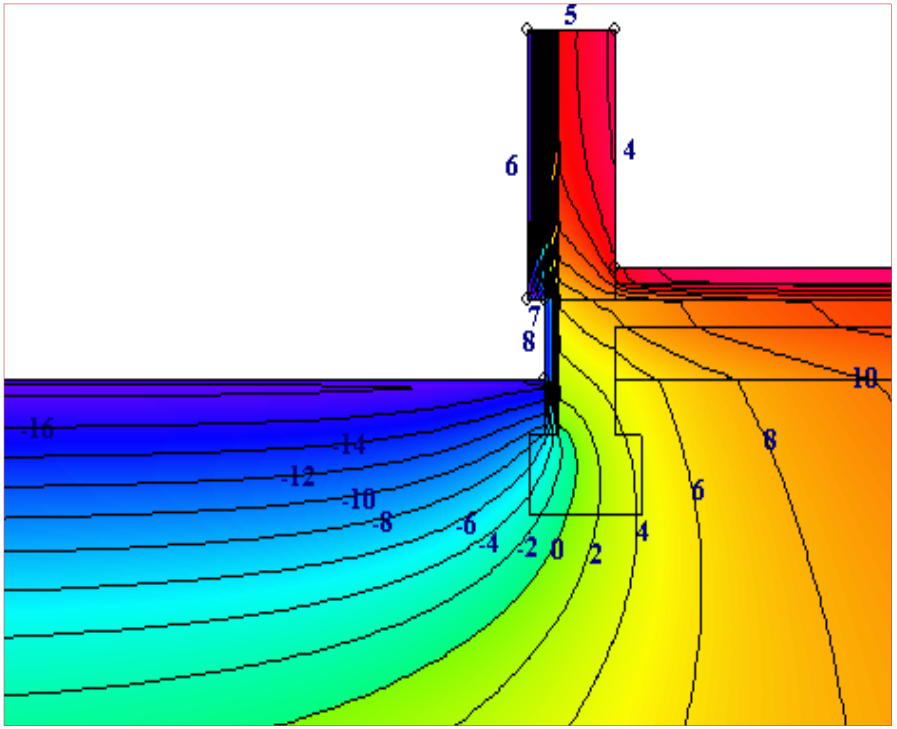


Rozkład izoterm dla najzimniejszego dnia 20.01.2006 (-23,4 ^{0}C)

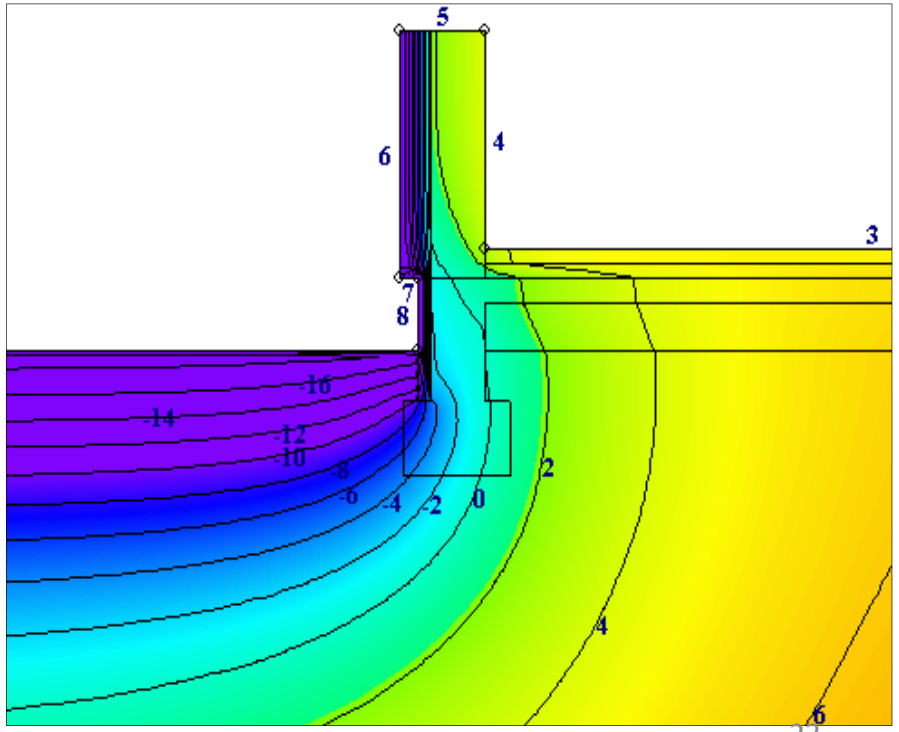


6. Rozkład temperatury w otoczeniu fundamentów budynku posadowionego na gruncie o współczynniku przewodzenia ciepła λ = 2,0 [W/(m·K)], dla najchłodniejszego dnia 20.01 2006r.

Budynek ogrzewany



Budynek nieogrzewany



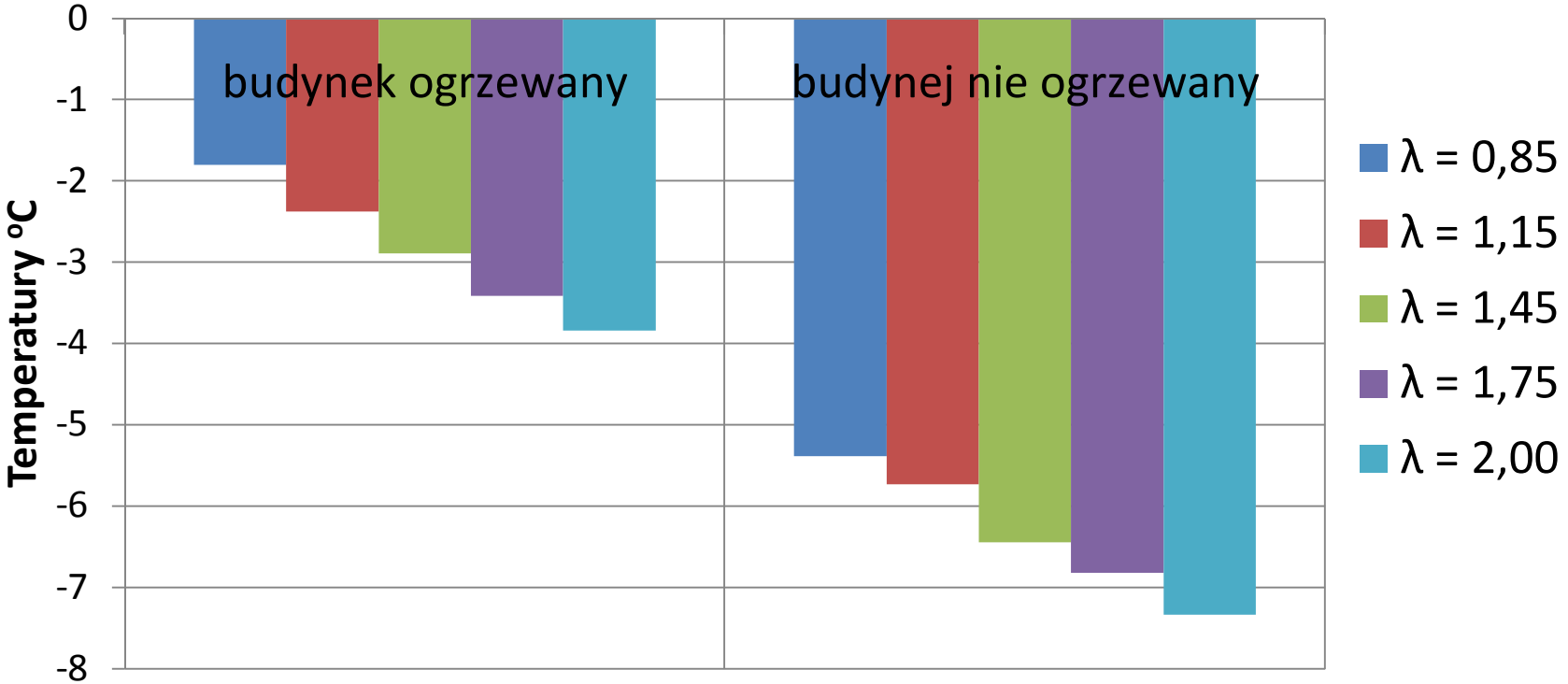
Wzory obliczeniowe (symulacyjne wartości temperatur w gruncie na głębokości 0,5 m w p.3 fundamentu)

Budynki ogrzewane		Budynki nieogrzewane	
Wzór	**wyjaśnienie**	**Wzór**	**wyjaśnienie**
$T = -0{,}01F_d + 5{,}95$	dla λ_{gruntu} = 0,85 W/(m·K), fundamenty nie ocieplone	**$T = -0{,}012\ F_d + 3{,}98 + (-0{,}073 \cdot n)$**	0,85 ≤ λ_{gruntu} ≤ 1,7 W/(m·K), fundamenty nie ocieplone
$T = 0{,}01F_d + 5{,}95 + (-0{,}087 \cdot n)$	0,85 ≤ λ_{gruntu} ≤2,10 W/m·K, fundamenty nie ocieplone	**$T = -0{,}013\ F_d + 3{,}29 + (-0{,}073 \cdot n)$**	λ_{gruntu} > 1,7 W/(m·K), fundamenty nie ocie plone
$T = -\ 0{,}004\ F_d + 8{,}10 + (-0{,}08\ n)$	0,85 ≤ λ_{gruntu} ≤2,10 W/(m·K), ocieplnie 6 cm warstwą styropianu ekstrudowanego	**$T = -\ 0{,}001\ F_d + 0{,}70 + (-0{,}030 \cdot n)$**	0,85 ≤ λ_{gruntu} ≤2,10 W/(m·K), ocieplonie 6 cm warstwą styropianu ekstrudowanego
$T = -\ 0{,}006\ F_d + 9{,}90 + (-0{,}09\ n)$	0,85 ≤ λ_{gruntu} ≤2,10 W/(m·K), fundamenty ocieplone 8 cm war stwą styropianu eks trudowanego	**$T = -\ 0{,}002\ F_d + 1{,}90 + (-0{,}035\ n)$**	0,85 ≤ λ_{gruntu} ≤2,10 W/(m·K), fundamenty ocieplone 8 cm war stwą styropianu ekstru dowanego

Wzory obliczeniowe (cd)

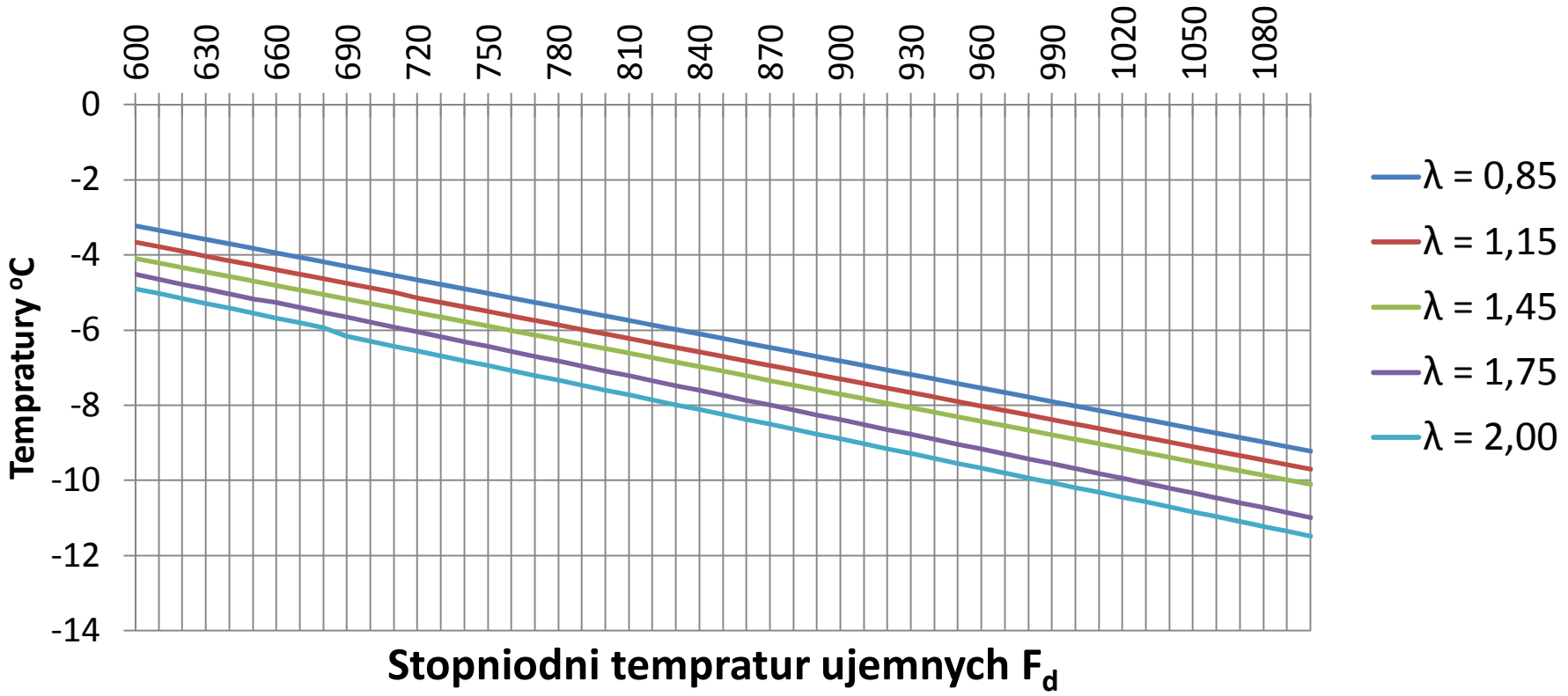
- **gdzie:**
  - **T – temperatura w pkt. 3 fundamentu**
  - **n = 1÷25 w zależności od wartości współczynnika przewodzenia ciepła λ, dla n= 0, λ=0,85: zmiana o 1 jednostkę powoduje zmianę wartości λ o 0,05 [W/(m·K)].**

Najniższe wartości temperatury w p.3 nieocieplonego fundamentu w zależności od λ i warunków eksploatacji budynku, zima 95/96 - Białystok

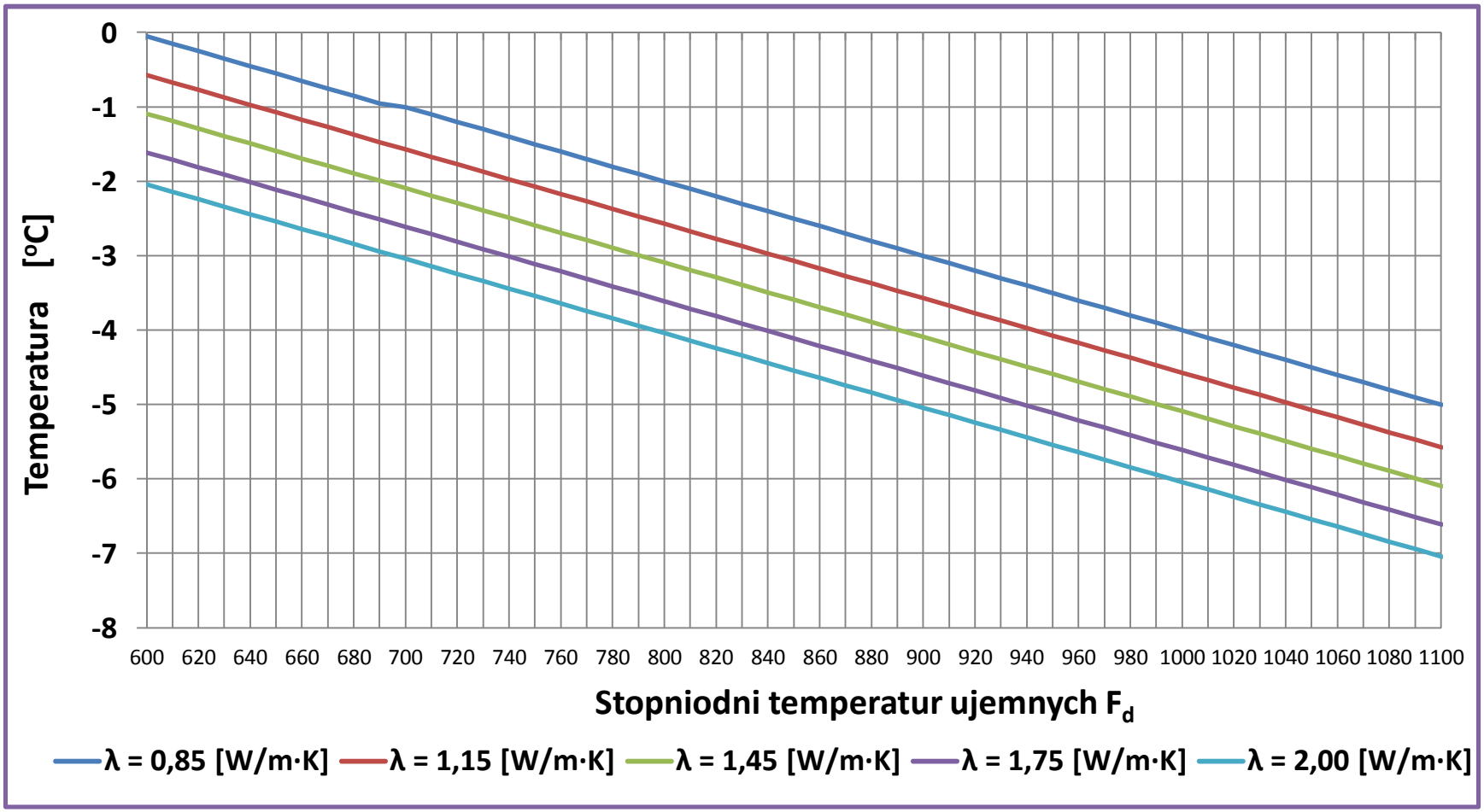


Symulacyjne wartości najniższych temperatur w p.3 fundamentu

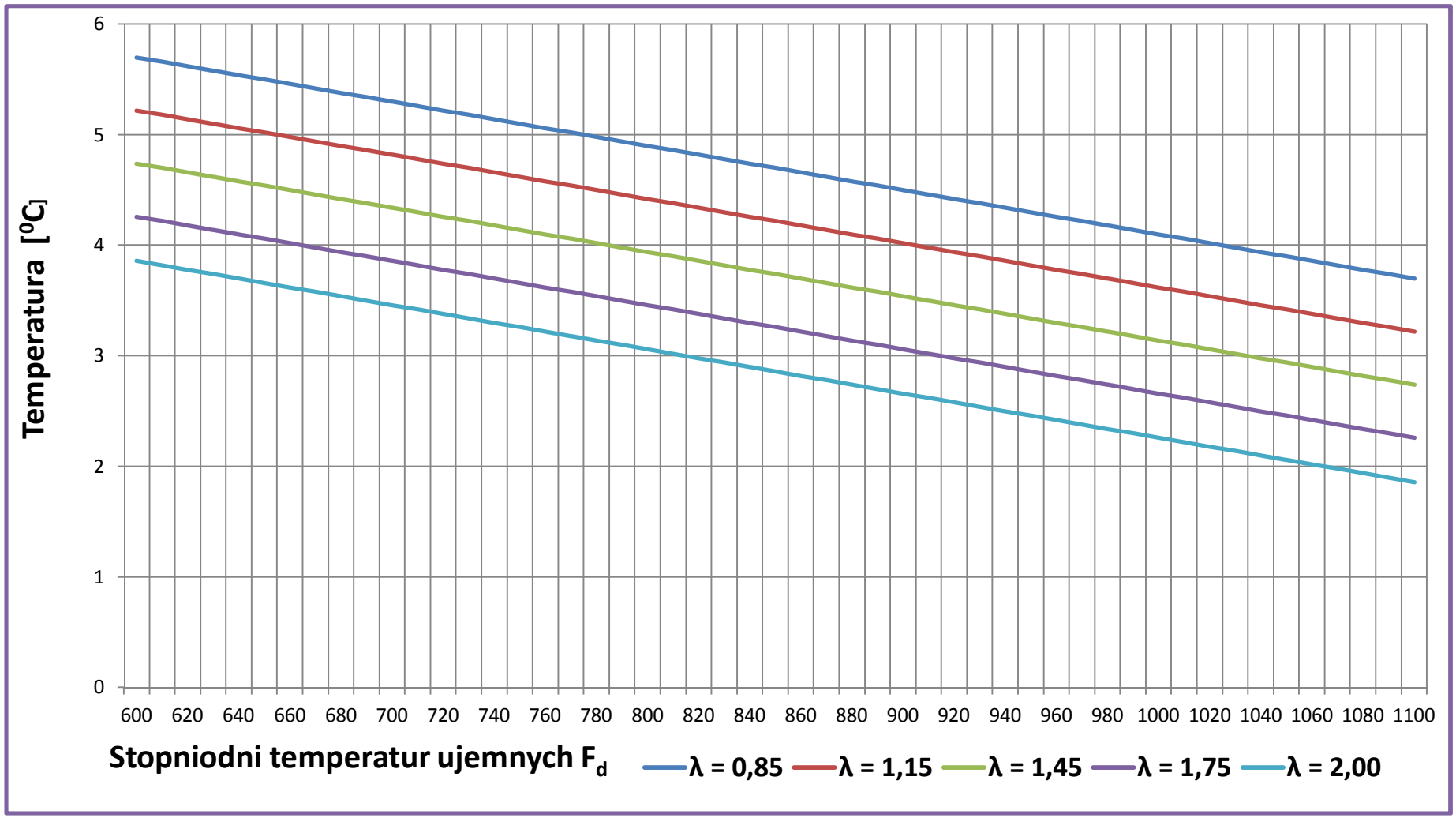
budynek nieogrzewany, fundamenty nieocieplony



Wartości temperatur w. p.3 fundamentu w zależności od F_d i współczynnika λ, budynek ogrzewany, fundamenty nieocieplone



Wartości temperatur w. p.3 fundamentu w zależności od F_d i współczynnika przewodzenia ciepła λ budynek ogrzewany, fundamenty ocieplone (ocieplenie 6cm styropianu)



Podsumowanie i wnioski

- **Aby uzyskać założony cel opracowania modelu obliczeniowego rozkładu temperatur w otoczeniu budynków ogrzwanych i nieogrzewanych , przeprowadzono analizę istniejących metod teoretycznych, empirycznych i numerycznych dotyczących rozkładu temperatury w gruntach, uwzględniających zakłócenia naturalnego pola temperatur źródłem ciepła (np. budynkiem).**
- **Korzystając z metod numerycznych (HEAT 2) wykonano obliczenia rozkładu temperatury w gruncie w otoczeniu budynku ogrzewanego i nieogrzewanego.**

Podsumowanie –wzory obliczeniowe

Otrzymane wartości obliczeniowe temperatur są poprawne pod względem merytorycznym oraz rachunkowym (zweryfikowane na podstawie pomiarów bezpośrednich) .

Korzystając z teoretycznych podstaw wymiany ciepła i masy, danych literaturowych i badań własnych, podjęto próbę uogólnienia zależności rozkładu temperatury w gruncie w okolicy fundamentu w zależności od :

- **temperatury powietrza (stopniodni temperatur ujemnych F_d),**
- **współczynnika przewodzenia ciepła λ [W/(m^2·K)] analizowanego gruntu**
- **źródła ciepła (budynek ogrzewany i nieogrzewany).**

Podsumowanie

- **Na podstawie analizy otrzymanych wyników obliczeniowych zweryfikowanych pomiarami bezpośrednimi opracowano, w postaci wzorów i wykresów model obliczeniowy, który w prosty sposób umożliwia obliczanie wartość temperatury w gruncie w otoczeniu fundamentów w zależności od współczynnika przewodzenia ciepła λ gruntu , stopniodni temperatur ujemnych, charakteru eksploatacji budynku**
- **Otrzymane wyniki mogą być pomocne do optymalnego zaprojektowania głębokości posadowienia oraz izolacji termicznej fundamentu, tak aby nie nastąpiło ryzyko przemarzanie fundamentów a w konsekwencji naruszenia konstrukcji.**

Wnioski

- **W polskich warunkach klimatycznych budynki niepodpiwniczone można posadawiać na głębokości 0,5 m, (jeżeli wartość ta podyktowana jest tylko głębokością przemarzania) pod warunkiem, że fundamenty budynków zarówno ogrzewanych jak i nie ogrzewanych będą posiadały izolację termiczną.**

- **Dla celów inżynierskich można założyć, że wartości obliczeniowe najniższych temperatur w gruncie na styku z fundamentem są zależne głównie od stopniodni temperatur ujemnych F_d oraz współczynnika przewodzenia ciepła gruntu λ.**

Wnioski

- **Zależność wartości temperatury w gruncie na styku z fundamentem od stopniodni temperatur ujemnych F_d oraz współczynnika gruntu λ, można przyjąć jako liniową pod warunkiem, że głównym celem obliczeń jest określenie najniższych temperatur jakie mogą wystąpić w czasie analizowanej zimy.**

- **Zwiększenie głębokości posadowienia z 0,5 m do 0,6 m skutkuje podniesienie temperatury w okolicy fundamentów średnio o 1,0 °C, natomiast do 0,7 m o 2,5÷3,2 °C.**

Wnioski (cd)

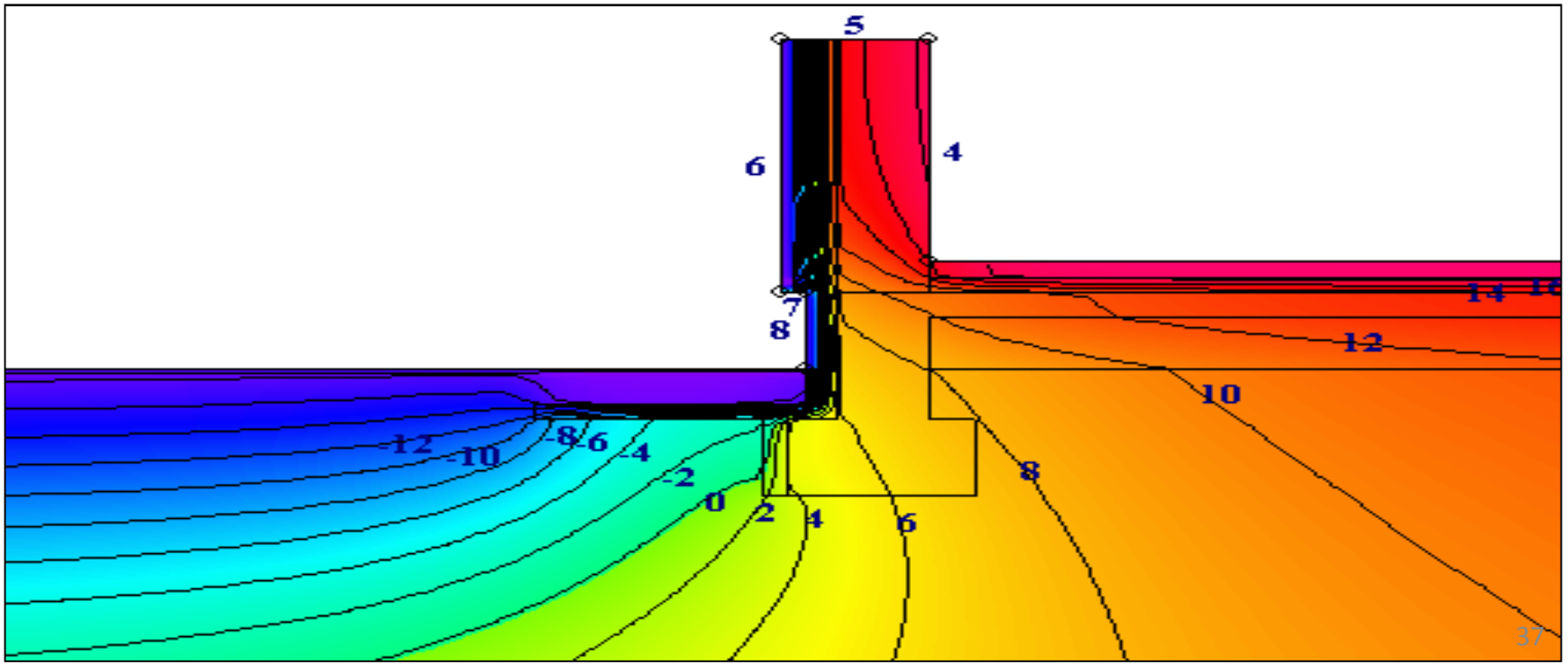
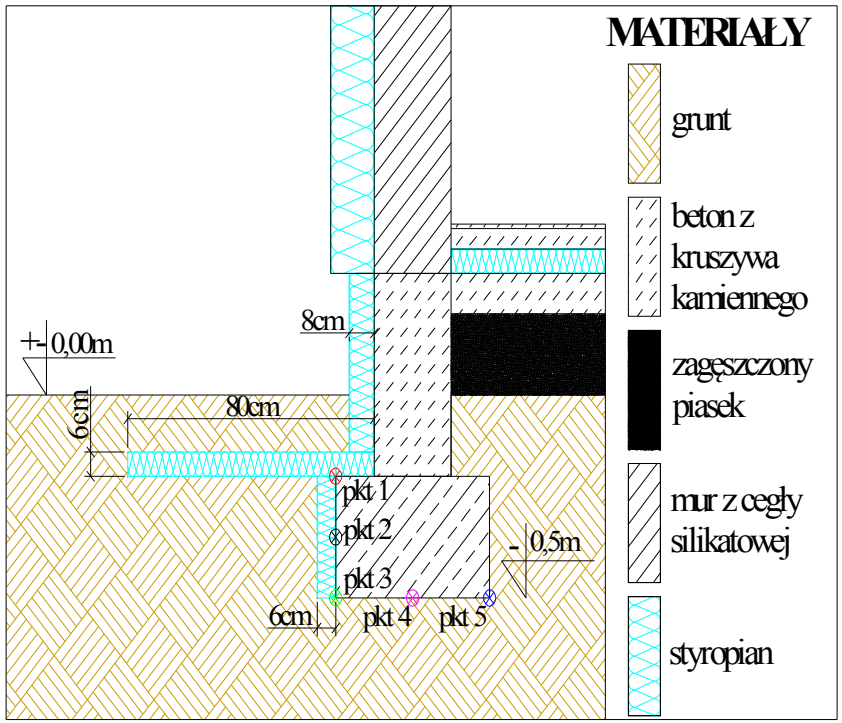
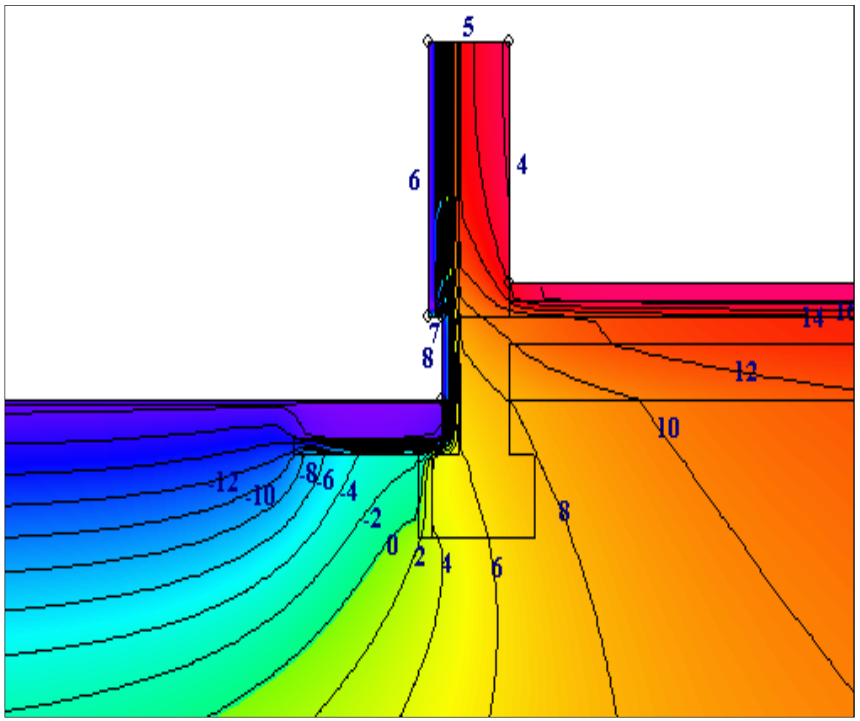
- **Wszystkie wartości obliczeniowe temperatur zawierają pewien „zapas bezpieczeństwa” (w rzeczywistości temperatury są wyższe od 0,5 do 1°C), wynika to między innymi z nie uwzględnienia ciepła utajonego przemiany fazowej (przy zamarzaniu gruntów – krzepnięciu 1 g wody towarzyszy wydzielenie się 5,5 kcal. ciepła) oraz przyjęcia, że woda w gruncie zamarza w 0^0C**
- **W modelu obliczeniowym przyjęto, że najniższa temperatura w gruncie obniża się przez cały okres trwania ujemnych temperatur. W rzeczywistości najniższe temperatury w gruncie występują po kilku dniach z najniższą temperaturą ujemną powietrza (najczęściej w styczniu) i taką najniższą temperaturę przyjęto do modelu obliczeniowego jako wartość maksymalną**

Wnioski

Niestety brak jest danych dotyczących wartości wskaźnika F_d liczonego do dnia w którym wystąpiła najniższa temperatura w gruncie .

Zauważone na podstawie analizy literatury jak i pomiarów bezpośrednich (IMiGW) zjawisko, można wytłumaczyć przepływem ciepła w strefie poniżej frontu przemarzania, w szczególności dopływem ciepła z wnętrza Ziemi. Niestety uwzględnienie w modelu obliczeniowych zmiennej temperatury w płaszczyźnie poziomej (pod fundamentem) jest bardzo trudne do ujęcia w modelu obliczeniowym.

Dziękuję za uwagę



Rozkład izoterm dla najzimniejszego dnia zimy 2005/2006 przy zaproponowanym wariancie ocieplenia fundamentów