



POLITECHNIKA POZNAŃSKA
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska
INSTYTUT INŻYNIERII ŚRODOWISKA
Zakład Ogrzewnictwa, Klimatyzacji i Ochrony Powietrza

Agnieszka Rajek

**Optymalizacja izolacji cieplnej podłogi na
gruncie pod dużą halą przemysłową**

PRACA MAGISTERSKA

Kierujący pracą:

dr inż. Andrzej Górka

Koreferent:

prof. dr hab. inż. Halina Koczyk

Poznań, 2010



Temat
pracy dyplomowej magisterskiej
nr 49 – 2009/2010

Politechnika Poznańska	Studia stacjonarne magisterskie
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska	Kierunek: Inżynieria Środowiska
Instytut Inżynierii Środowiska	Specjalność: Zaopatrzenie w ciepło, klimatyzacja i ochrona powietrza

Imię i nazwisko: **Agnieszka RAJEK**

Tytuł pracy: **Optymalizacja izolacji cieplnej podłogi na gruncie pod dużą halą przemysłową**

Wersja angielska tytułu: **Optimization of thermal insulation of the ground floor under a large industrial hall**

Dane wyjściowe: Literatura

- Zakres pracy:
1. Przegląd technologii wykonywania podłóg w halach przemysłowych
 2. Analiza wymagań, norm i wytycznych dotyczących analizowanego zagadnienia
 3. Model numeryczny budynku stykającego się z gruntem
 4. Analiza wpływu izolacji podłogi na projektowe obciążenie cieplne i na roczne zużycie energii do ogrzewania
 5. Podsumowanie

Miejsce prowadzenia prac: Zakład Ogrzewnictwa, Klimatyzacji i Ochrony Powietrza, IIS PP

Termin oddania pracy: 30 czerwca 2010r.

Promotor: dr inż. Andrzej GÓRKA

Koreferent: prof. dr hab. inż. Halina KOCZYK

Zobowiązujemy się samodzielnie wykonać pracę w zakresie wyspecyfikowanym wyżej. Wszystkie elementy (m.in. rysunki, tabele, cytaty, programy komputerowe, urządzenia itp.), które zostaną wykorzystane w pracy, a nie będą naszego autorstwa będą w odpowiedni sposób zaznaczone i będzie podane źródło ich pochodzenia.

Imię i nazwisko	Nr albumu	Data i podpis
Student: Agnieszka RAJEK	75474	

Z-ca DYREKTORA
Instytutu Inżynierii Środowiska PP
[Podpis]
dr inż. Henryk Byłka, doc. PP

[Podpis]
PROF. GLEMA
Wydział
Budownictwa i Inżynierii Środowiska
Dziekan
dr hab. inż. Adam Glema, prof. nadzw. PP

Poznań, 30.11.2009r.

Miejscowość, data

Bardzo dziękuję rodzicom za troskę, którą okazywali mi podczas trwania studiów. Wasze wsparcie pomogło mi osiągnąć cel jaki przed sobą postawiłam. Dziękuję również najbliższej mi osobie, której miłość dawała mi siłę aby walczyć dalej.

Serdeczne podziękowania należą się również Panu dr. inż. Andrzejowi Górcie za okazaną cierpliwość oraz wskazówki podczas pisania pracy magisterskiej.

"Wszyscy wiedzą, że czegoś nie da się zrobić, aż znajdzie się taki jeden, który nie wie, że się nie da, i on to robi."

Albert Einstein

Spis treści

Streszczenia	6
Spis oznaczeń	7
1. Wprowadzenie	8
1.1. Wstęp	8
1.2. Cel pracy	8
2. Przegląd technologii wykonywania podłóg w halach przemysłowych	8
2.1. Budowa podłogi	8
2.2. Zadania poszczególnych warstw podłogi przemysłowej	9
2.2.1. Posadzka	9
2.2.2. Rodzaje posadzek	9
2.2.3. Podkłady	13
2.2.4. Rodzaje podkładów	13
2.2.5. Materiały stosowane do izolacji cieplnej, akustycznej i	
3. Analiza wymagań, norm i wytycznych dotyczących analizowanego zagadnienia	14
3.1. Wytyczne i wymagania	14
3.2. Normy	16
3.2.1. Metoda obliczeń współczynnika przenikania ciepła przez podłogę na gruncie według normy PN-EN ISO 13370:2001	16
3.2.2. Metoda obliczeń współczynnika przenikania ciepła przez podłogę na gruncie według normy PN-EN ISO 21831:2006	18
3.2.3. Porównanie wyników obliczeń współczynnika przenikania ciepła przez podłogę na gruncie według norm PN-EN ISO 13370:2001 oraz PN-EN ISO 21831:2006	20
3.2.4. Budowa modelu 3-D według normy PN-EN ISO 10211:2008	21
4. Model numeryczny budynku stykającego się z gruntem	22
4.1. Budowa modelu numerycznego w programie AnTherm	22
4.1.1. Program AnTherm	22
4.1.2. Model hali w programie AnTherm	23
4.1.3. Naturalne pole temperatury gruntu	25
4.2. Budowa modelu numerycznego w programie Excel	26
4.2.1. Opis modelu numerycznego	26
4.2.2. Model numeryczny gruntu	27
4.2.3. Opis działania modelu -grunt	32
4.2.4. Wyniki obliczeń dla 5 letniego okresu symulacji –model gruntu	33
4.2.5. Model numeryczny hali przemysłowej bez izolacji termicznej	37
4.2.6. Opis działania modelu – hala bez izolacji termicznej	41
4.2.7. Wyniki obliczeń po okresie 5 letniej symulacji –hala bez izolacji termicznej	42
4.2.8. Model numeryczny hali przemysłowej z izolacją termiczną	43
4.2.9. Opis działania modelu – hala z izolacją termiczną	47
4.2.10. Wyniki obliczeń po 5 letnim okresie symulacji –hala z izolacją termiczną	48

5. Analiza wpływu izolacji podłogi na projektowe obciążenie cieplne i na roczne zużycie energii do ogrzewania	52
5.1. Analiza zużycia energii do ogrzewania	52
5.2. Uproszczona analiza ekonomiczna	55
6. Podsumowanie i wnioski	56
7. Bibliografia	57

Streszczenie:

Podłoga jest przegrodą budowlaną wobec której często nie zwraca się należytej uwagi na izolacyjność cieplną ze względu na specyficzne warunki temperaturowe gruntu leżącego pod nią.

Celem poniższej pracy było przeanalizowanie kilku wariantów izolacji cieplnej podłogi na gruncie w dużej hali przemysłowej. Początkowo do realizacji zagadnienia wykorzystano program AnTherm pozwalający na obliczenia rozkładu ciepła dla trójwymiarowego modelu. Niestety program nie pozwala na dowolne zadawanie warunków brzegowych, które były zaplanowane w tej pracy. Następnie zbudowany został trójwymiarowy model podłogi stykającej się z gruntem w arkuszu kalkulacyjnym programu Microsoft Excel oparty na metodzie bilansów elementarnych. Podstawą obliczeń przepływu ciepła z wnętrza hali do gruntu stanowił model gruntu zawierający rozkład temperatury w zależności od głębokości odpowiadający warunkom naturalnym. Podczas obliczeń dla modelu gruntu uwzględniono zmiany warunków atmosferycznych takie jak: temperaturę zewnętrzną, nasłonecznienie oraz prędkość wiatru. Obliczenia dla poszczególnych wariantów izolacji cieplnej prowadzone były dla okresu 5 lat. Na podstawie uzyskanych wyników sporządzono szereg wykresów obrazujących zmianę temperatury w zależności od głębokości dla poszczególnych wariantów izolacji cieplnej a także samego gruntu. Uzyskane z obliczeń średnie temperatury posadzki posłużyły do obliczeń strat ciepła przez podłogę na gruncie. Ostatnim punktem pracy było porównanie efektywności poszczególnych wariantów izolacji termicznych na ochronę cieplną budynku.

Summary:

Floor, is one of the construction compartments, which most of the times isn't given much attention because of the thermal isolation and specific circumstances of the ground temperature lying below the floor.

The aim of the below MSc thesis was to analyse few variants of the thermal isolation of the floor on the ground of the big hall. In the early stages of the issue the AnTherm program was used, allowing for the warmth 3D arrangement calculations. Unfortunately, the program doesn't allow for random changes in the edge conditions, which were planned in this thesis. Next, a 3D model of the floor adjoining with the ground was built in the Microsoft Excel programme based on the elementary balance method. The basic for the flow of the heat from the inside of the hall to the soil calculations was the model of the soil containing the distribution of the temperature depending on the deepness to the natural conditions. During the calculations for the soil model, the changes of the atmospheric conditions were taken into consideration, as follows: external temperature, insolation and wind speed. Calculations for particular variants of heat isolations were conducted for the period of 5 years. On the basis of gained results, charts were given to illustrate the temperature change depending on depth on the variants of the thermal isolation and the depth of the soil itself. Gained results of the average floor temperature for particular variants served for calculation of heat losses from the floor to the ground. The last chapter of the MSc thesis was to compare the effectiveness of the particular thermal isolation variants on the heat.

Spis oznaczeń:

- λ_g - przewodność cieplna gruntu (glina piaszczysta) [W/(mK)]
 λ_s - przewodność cieplna izolacji termicznej (styropian) [W/(mK)]
 λ_p - przewodność cieplna posadzki betonowej [W/(mK)]
 ρ_g - gęstość gruntu (glina piaszczysta) [kg/m³]
 ρ_s - gęstość izolacji termicznej (styropian) [kg/m³]
 ρ_p - gęstość posadzki betonowej [kg/m³]
 c_g - ciepło właściwe gruntu (glina piaszczysta) [J/(kgK)]
 c_s - ciepło właściwe izolacji termicznej (styropian) [J/(kgK)]
 c_p - ciepło właściwe posadzki betonowej [J/(kgK)]
 d_A - grubość warstwy materiału A [m]
 d_B - grubość warstwy materiału B [m]
 d - grubość warstwy równa 1 m [m]
 d_i - grubość równoważna [m]
 $\Delta\tau$ - długość kroku czasowego [s]
 $t_{x,y,z}$ - temperatura w rozpatrywanym węźle [°C]
 $t'_{x,y,z}$ - temperatura w rozpatrywanym węźle po czasie $\Delta\tau$ [°C]
 t_{stp} - średnia temperatura posadzki w hali przemysłowej [°C]
 α_k - współczynnik przejmowania ciepła (konwekcji) [W/m²K]
 $\Delta\psi$ - człon korekcyjny z uwagi na izolację krawędziową płyty podłogowej [W/(mK)]
 $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ - stała promieniowania (Stefana – Boltzmanna) $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right]$
 A - pole powierzchni posadzki przemysłowej [m²]
 BI - straty wypromieniowania ciepła do niebosłonu [W/m²]
 B' - „wymiar charakterystyczny” [m]
 P - obwód płyty podłogowej [m]
 R - opór przewodzenia ciepła [m²K/W]
 U - współczynnik przenikania ciepła [W/m²K]
 WS - prędkość wiatru (dane meteorologiczne) [m/s]
 $ITHI$ - zyski ciepła od nasłonecznienia [W/m²]
 ITH - całkowite natężenie promieniowania słonecznego na powierzchnię poziomą [W/m²]
 T_s - temperatura styku (powietrze zewnętrzne/grunt) [°C]
 $TSKY$ - temperatura promieniowania niebosłonu [°C]
 $Q_{p.}$ - straty ciepła przez przenikanie przez podłogę na gruncie [kWh/rok]
 Ld - liczba dni sezonu grzewczego [dni]

1. Wprowadzenie

1.1. Wstęp

Utrzymanie budynku wymusza comiesięczne wydatki, jednym z największych obciążeń budżetu są koszty ogrzewania. Około 10% wszystkich strat ciepła wynika z przenikania ciepła z budynków do podłoża gruntowego. Dlatego należy zadbać nie tylko o izolację cieplną ścian zewnętrznych czy dachu ale również podłogi na gruncie, tak aby jak najwięcej ciepła zostało wewnątrz budynku. Rodzaj i grubość izolacji termicznej zastosowanej w podłodze na gruncie oraz staranność i dokładność jej wykonania – to czynniki które wyznaczają wielkość strat ciepła tą drogą.

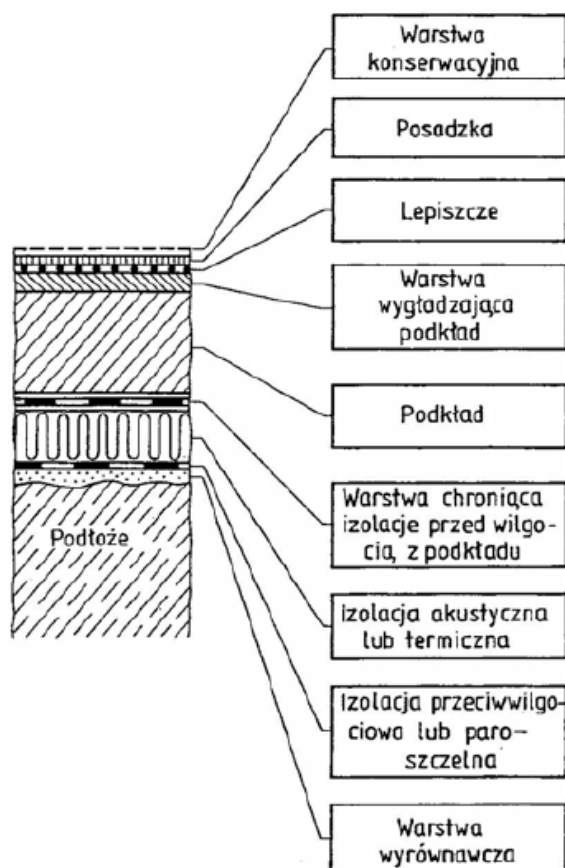
1.2. Cel pracy

Celem poniższej pracy było przeanalizowanie czterech wariantów izolacji cieplnej podłogi pod dużą halą przemysłową oraz wybór optymalnej grubości izolacji. W celu przeprowadzenia takiej analizy został zbudowany trójwymiarowy model podłogi stykającej się z gruntem, dzięki któremu możliwe było przeanalizowanie strat ciepła z wnętrza hali do gruntu.

2. Przegląd technologii wykonywania podłóg w halach przemysłowych

2.1. Budowa podłogi

Podłoga - jest to element wykończeniowy poziomych przegród budowlanych. Najprostsza zbudowana jest z jednej warstwy, którą stanowi posadzka. Częściej jest to układ kilku warstw z różnych materiałów, spoczywających na podłożu.



Rys. 1.1. Schemat podłogi wielowarstwowej [5].

W zależności od usytuowania w budynku rozróżnia się podłogi:

- **leżące na gruncie** – podłoga tego rodzaju wymaga izolacji termicznej oraz izolacji zabezpieczającej ją przed zawilgoceniem przez przenikającą wilgoć gruntową;
- **leżące na stropach nad piwnicami i pomieszczeniami nie ogrzewanymi** – podłogi te mają za zadanie uzupełnić izolacyjność cieplną pozostałych przegród, jak również w przypadku podłogi na stropie leżącym nad pomieszczeniami o znacznej wilgotności powietrza, zabezpieczyć przed przenikaniem pary wodnej, która może spowodować zawilgocenie izolacji termicznej i podkładu;
- **leżące na stropach międzykondygnacyjnych** – podłogi te mają dodatkowo za zadanie poprawić własności akustyczne przegród;
- **w pomieszczeniach mokrych** – podłogi te w swojej konstrukcji uwzględniają izolację wodoszczelną w postaci papy asfaltowej lub folii izolacyjnej z tworzywa sztucznego (np, PCV,PE).

2.2. Zadania poszczególnych warstw podłogi przemysłowej

2.2.1. Posadzka

Posadzka jest wierzchnią warstwą podłogi przemysłowej która ulega degradacji. Zniszczenia powstają głównie wskutek obciążenia dynamicznego (ruch toczny wózków i pojazdów) i punktowych obciążeń statycznych (ciężar regałów wysokiego składowania i magazynowanego towaru). Podczas projektowania funkcjonalnej posadzki przemysłowej, należy uwzględnić:

- obciążenie mechaniczne dynamiczne i statyczne (ruch pieszy i kołowy, rodzaj elementów toczonych, obciążenie ciężarem pojazdów i regałów, nośność i dopuszczalne odkształcenie elementów konstrukcyjnych podłogi),
- obciążenie chemiczne występujące w fazie produkcji,
- odporność na ścieranie i uderzenia,
- odporność na środki stosowane do czyszczenia i utrzymania czystości,
- estetyka i wymagane walory estetyczne,
- faktura powierzchni (gładka, fakturowana),
- bezpieczeństwo (antypoślizgowość, izolacyjność prądowa, antystatyczność, palność, zawartość rozpuszczalników, bezzapachowość),
- konserwacja (łatwość czyszczenia, łatwość napraw, możliwość nanoszenia kolejnych warstw posadzki).

2.2.2. Rodzaje posadzek

W związku z rosnącymi wymaganiami posadzki przemysłowe ciągle ewoluują. Aktualnie znane są i stosowane następujące typy posadzek:

a) Posadzki betonowe

Zaletą tych posadzek jest brak pęknięć i pacywania płyt oraz brak pogarszania się stanu spoin dylatacyjnych w trakcie eksploatacji. Mogą być stosowane wszędzie tam, gdzie nie występuje środowisko chemicznie agresywne wobec betonu.



Rys.2.1. Wykonanie posadzki betonowej [24].

b) Posadzki mineralne

Materiał stosowany przede wszystkim przy podłóżach narażonych na duże obciążenia mechaniczne, np. w halach magazynowych i fabrycznych, supermarketach, powierzchniach wystawowych, ciągach komunikacyjnych, warsztatach, stacjach serwisowych, parkingach wielopoziomowych itp.

Podstawowe zalety:

- umożliwia wykonanie równej, barwnej, gładkiej posadzki,
- wysoka twardość i odporność na uderzenia,
- wysoka odporność na ścieranie,
- uzyskanie powierzchni nie pyłących,
- zwiększenie odporności na zanieczyszczenia smarami i paliwami.



Rys. 2.2. Posadzka mineralna [22].

c) Posadzki żywiczne

Są to posadzki zalecane w pomieszczeniach zagrożonych wysoką korozją chemiczną i mechaniczną, względnie wymagających ochrony przed elektrycznością statyczną czy promieniowaniem UV. Stosowane w pracowniach komputerowych, salach operacyjnych szpitali, zbiornikach z wodą pitną, w obiektach przemysłu spożywczego, w pomieszczeniach produkcyjnych przemysłu elektronicznego.

Stosowane substancje to:

- żywice epoksydowe (EP),
- metylometakrylat (MMA),
- żywica poliestrowa nienasycona (PN),
- żywica poliuretanowa (PUR).

Zalety posadzek żywicznych to:

- wysoka odporność chemiczna,
- bardzo wysoka przyczepność do podłoża,
- szczelność,
- wysoka odporność uderzenia i ścieranie,
- brak pylenia,
- szeroka paleta kolorów,
- możliwość układania w bardzo cienkich warstwach estetyczny wygląd.



Rys. 2.3. Posadzka żywiczna [23].

d) Posadzki wykładzinowe

- z tworzyw sztucznych

Są stosowane w budynkach użyteczności publicznej, szkołach, domach opieki, muzeach, salach fitness, sklepach i biurach. Posadzki o podwyższonym komforcie chodzenia charakteryzują się zdolnością tłumienia hałasu, bezspoinowością, estetyką, miękkością i niską emisją wolnych cząstek organicznych.

Na rynku dostępne są następujące typy wstępnie prefabrykowanych wykładzin:

- poliuretanowe,
- linoleum,

- PCW (polichlorek winylu),
- guma o strukturze pełnej lub kilku warstwowej typu sandwicz.



Rys. 2.4. Posadzka z tworzywa sztucznego [25].

- **ceramiczne**

Jako posadzki przemysłowe stosowane są tam, gdzie wymagana jest wysoka odporność chemiczna na działanie kwasów oraz zasad, a jednocześnie stawiane są wysokie wymagania w zakresie estetyki pomieszczeń i bezpieczeństwa, a więc w laboratoriach, ambulatoriach, pomieszczeniach technicznych.

Wykonywane posadzki ceramiczne są odporne na wiele czynników zależności od zastosowanych materiałów i wymogów inwestora:

- oleje, smary, kwasy, ciecze o dużym stopniu agresywności,
- ścieranie mechaniczne obciążenia ściskające o dużej intensywności,
- wypłukiwanie spoin strumieniem wody i pary oraz przy zastosowaniu chemicznych środków czyszczących.



Rys. 2.5. Posadzka ceramiczna [26].

2.2.3. Podkłady

Podkład to warstwa podłogi, którą układa się bezpośrednio pod posadzką. Głównie od podkładu zależą właściwości techniczno-użytkowe układanej posadzki oraz jej trwałość. Podkład dobrej jakości nie będzie pękał ani pylił, a jego powierzchnia będzie równa i dobrze wypoziomowana. Podkłady wykonywane są jako monolityczne oraz prefabrykowane. Klasyfikacja monolitycznych podkładów budowlanych:

a) w zależności od rodzaju spoiwa:

- cementowe (oznaczone C) – wykonane z zaprawy cementowej lub betonowej,
- anhydrytowe (oznaczone A) – wykonane z zaprawy na bazie anhydrytu o konsystencji plastycznej lub ciekłej,
- na bazie innych spoiw mineralnych (oznaczone początkowa litera nazwy spoiwa).

b) w zależności od układu w konstrukcji podłogi:

- podkłady związane z podłożem, ułożone bezpośrednio na podłożu nośnym,
- podkłady na warstwie rozdzielczej, oddzielone od podłoża warstwą izolacji,
- podkłady pływające, oddzielone od pionowych elementów budynku paskami izolacyjnymi oraz ułożone na warstwie sprężystego materiału izolacyjnego,
- podkłady grzewcze, elementy grzejne służące do ogrzewania pomieszczeń są wbudowane w podkładzie podłogowym.

Podkłady prefabrykowane wykonuje się z płyt betonowych, gipsowych, gipsowo-włóknistych, drewnopochodnych (pilśniowych, wiórowych). Zaletą stosowania tego typu podkładów jest przyspieszenie wykonania robót podłogowych, z uwagi na szybkość układania prefabrykatów oraz ograniczenie robót tzw. mokrych.

2.2.4. Rodzaje podkładów

a) podkłady anhydrytowe

Siarczan wapnia, zwany anhydrytem, jest gipsową skałą osadową. Podkłady te posiadają tendencję samo rozlewania się, nie wymagają zatem pracochłonnego wyrównania i zacierania powierzchni. Zaletą tych podkładów jest szybkość twardnienia co znacznie przyspiesza wykonanie robót. Stosując podkłady anhydrytowe należy pamiętać:

- anhydryt pod wpływem wilgoci pęcznieje, co prowadzi do pęknięć i obniża wytrzymałość podkładu dlatego nie powinno się stosować anhydrytu w pomieszczeniach wilgotnych,
- ponieważ anhydryt powoduje korozję stali, należy uniemożliwić jego bezpośrednie stykanie się z elementami instalacyjnymi.

b) podkłady cementowe

Podkład cementowy zespolony pozwala na wykonanie skomplikowanych spadków, dokładnych połączeń z półfabrykatami budowlanymi i instalacyjnymi. Podkłady tego typu są odporne na zawilgocenie oraz nie powodują korozji stali. Wadą podkładów cementowych są opóźnienia jakie powodują w przebiegu wykończenia wnętrza.

c) podkłady magnezjowe

Jastrychy magnezjowe stosowane są w pomieszczeniach pod dachem, przy dużych obciążeniach mechanicznych, natomiast nie stosuje się tego rodzaju podkładu w przypadku ciągłego obciążenia wilgocią. Podkłady magnezjowe cechują się dobrą odpornością na benzyny, oleje i rozpuszczalniki, lecz nie są odporne na kwasy i zasady.

d) podkłady suche

Stosowane są gdy nie ma możliwości wykonania tradycyjnej wylewki betonowej. Suche jastrychy są to ułożone na podłożu płyty gipsowo-kartonowe lub gipsowo-włóknowe.

e) podłoża bitumiczne

Asfalty są termoplastycznymi mieszaninami bitumów i materiałów mineralnych, które nakłada się na gorąco i które zestalają się po ochłodzeniu. Wadą asfaltów jest mała odporność na rozpuszczalniki oraz niewielka odporność na kwasy organiczne i tłuszczowe. Ograniczone są również możliwości nadawania barwy takim posadzkom.

2.2.5. Materiały stosowane do izolacji cieplnej, akustycznej i przeciwwilgociowej podłóg.

a) izolacja cieplna (termiczna), charakteryzuje się słabym przewodnictwem ciepła, są to materiały pochodzenia:

- **organicznego** – styropian (płyty, granulaty, kształtki), płyty pilśniowe grzyboodporne, płyty i maty korkowe oraz płyty wiórkowo-cementowe;
- **mineralnego** – wełna mineralna (płyty, maty i filce), maty z waty szklanej, szkło piankowe czarne.

b) izolacja akustyczna (przeciwdźwiękowa), powinna amortyzować drgania podkładu oraz tłumić fale dźwiękowe przenikające do warstwy izolacyjnej. Te warunki najlepiej spełniają; wełny, maty i płyty z materiałów włóknistych (wełna mineralna, wata szklana), elastyczny styropian (nie należy stosować styropianu używanego do izolacji cieplnej budynków), maty polietylenowe, płyty pilśniowe porowate oraz płyty z korka.

c) izolacja przeciwwilgociowa, paroszczelna i wodoszczelna, zadaniem tego typu izolacji jest stworzenie szczelnej przegrody, uniemożliwiającej przenikanie wilgoci i pary wodnej. Stosowane materiały to: papy (tektury i włókniny nasyczone asfaltem, materiały asfaltowe oraz folie z tworzyw sztucznych).

3. Analiza wymagań, norm i wytycznych dotyczących analizowanego zagadnienia.

3.1. Wytyczne i wymagania.

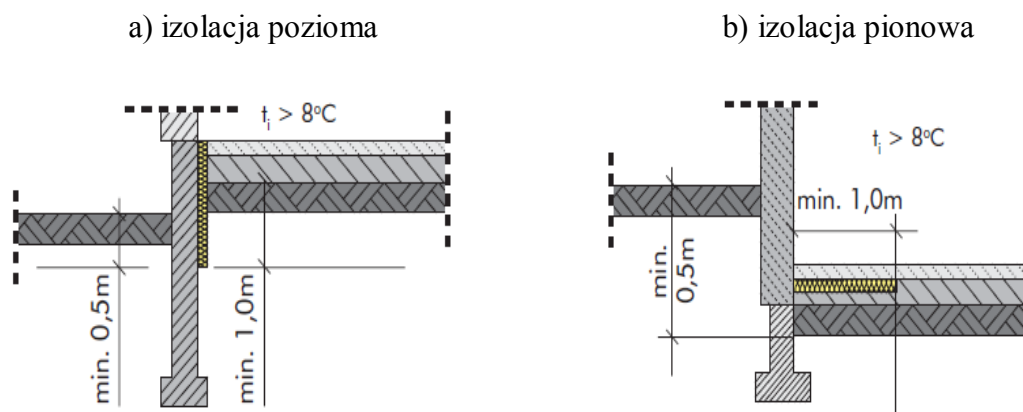
W Polsce wymagania techniczne dotyczące podłóg przemysłowych nie są jednoznacznie określone. Ogólne wymagania dotyczące podłóg znaleźć można w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury z 12.04.2002r. (Dz.U. nr 75 poz. 690 wraz z późniejszymi

zmianami) w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. Natomiast wytycznych dotyczących analizowanego zagadnienia brak.

Tab.3.1. Minimalne wartości sumy oporów cieplnych dla podłóg układanych na gruncie [20].

Lp.	Składniki oporu ciepła	R_{min} [$m^2 \cdot K/W$]	
		$8^{\circ}C \leq t_i \leq 16^{\circ}C$	$t_i > 16^{\circ}C$
1	2	3	4
1	Warstwy podłogowe, izolacja cieplna (pozioma lub pionowa) oraz ściana zewnętrzna lub fundamentowa	1,0	1,5
2	Warstwy podłogowe i grunt przyległy do podłogi (w jej strefie środkowej)	bez wymagań	1,5

Podłogom usytuowanym poniżej 0,6 m od poziomu terenu oraz podłogom stykającym się z gruntem w pomieszczeniach o temperaturze $t_i \leq 8^{\circ}C$ nie są stawiane żadne wymagania dotyczące izolacji cieplnej. W budynkach mieszkalnych, użyteczności publicznej oraz w budynkach przemysłowych podłoga na gruncie w ogrzewanych pomieszczeniach powinna być izolowana dodatkową izolacją cieplną w postaci pasów poziomych lub pionowych o szerokości co najmniej 1,0 m, usytuowanych wzdłuż linii styku podłogi ze ścianą zewnętrzną. W przypadku izolacji pasem biegnącym pionowo wzdłuż ściany ocieplenie powinno sięgać minimum 1,0 m poniżej poziomu podłogi i minimum 0,5 m poniżej poziomu terenu.



Rys. 3.1. Schemat wymaganej ochrony cieplnej podłogi w warstwie przyściennej [16].

3.2. Normy.

Obliczenie strat ciepła przez przenikanie do gruntu obecnie wykonuje się powszechnie na podstawie normy PN-EN ISO 13370:2001 - *Właściwości cieplne budynków-Wymiana ciepła przez grunt - Metody obliczania*. Istnieje jednak możliwość wykonania tego typu obliczeń metodą uproszczoną, zgodną z ww. normą. Taką możliwość stwarza norma PN-EN ISO 12831:2006 – *Instalacje ogrzewcze w budynkach – Metoda obliczania projektowego obciążenia cieplnego*. Podana w tej normie metoda dotyczy wyznaczenia współczynnika przenikania ciepła przez podłogę na gruncie oraz przez ścianę pomieszczenia zagłębionego w gruncie.

3.2.1. Metoda obliczeń współczynnika przenikania ciepła przez podłogę na gruncie według normy PN-EN ISO 13370:2001.

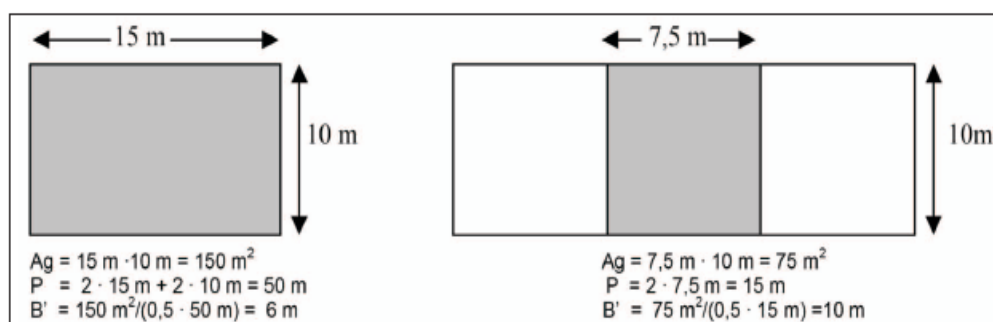
Straty ciepła według tej normy określone są w oparciu o tzw. „wymiar charakterystyczny” podłogi B' wyznaczany jest ze wzoru:

$$B' = \frac{A}{\frac{1}{2} \cdot P} \quad (3.1)$$

gdzie:

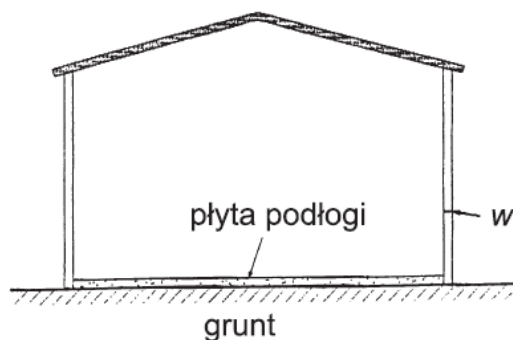
- A - powierzchnia rozpatrywanej płyty podłogowej łącznie ze ścianami zewnętrznymi i wewnętrznymi [m^2];
- P – obwód rozpatrywanej płyty podłogowej [m].

W obliczeniach odnoszących się do budynku wolnostojącego wartość A jest całkowitą powierzchnią rzutu parteru, natomiast w odniesieniu do budynku w zabudowie szeregowej A jest powierzchnią rzutu parteru rozpatrywanego fragmentu budynku. P jest całkowitym obwodem budynku wolnostojącego zaś w odniesieniu do segmentu budynku w zabudowie odpowiada jedynie sumie długości ścian zewnętrznych oddzielających rozpatrywaną przestrzeń ogrzewaną od środowiska zewnętrznego.



Rys. 3.2. Metoda wyznaczenia parametru B' [20].

Podłogi typu płyta na gruncie obejmują każdą podłogę, która składa się z płyty w kontakcie z gruntem na całej swojej powierzchni. Podłogi tego typu mogą być nieizolowane lub izolowane równomiernie na całej powierzchni.



Rys. 3.3. Schemat podłogi typu płyta na gruncie [16].

Współczynnik przenikania ciepła zależy od wymiaru charakterystycznego podłogi B' (3.1) oraz całkowitej grubości równoważnej d_t (3.2) określonej wzorem:

$$d_t = w + \lambda_g \cdot (R_{si} + R_f + R_{se}) \quad (3.2)$$

gdzie:

w – grubość całkowita ścian zewnętrznych budynku (rysunek 2.3.) [m] ;

λ_g – przewodność cieplna gruntu $\left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$;

R_{si} – opór przyjmowania ciepła na powierzchni wewnętrznej $\left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$;

R_f – opór cieplny konstrukcji podłogi $\left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$;

R_{se} – opór przyjmowania ciepła na powierzchni zewnętrznej $\left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$;

R_f uwzględnia opór cieplny każdej warstwy izolacyjnej na całej powierzchni, nad, pod i wewnątrz płyty podłogowej, natomiast w jest grubością całkowitą ścian zewnętrznych budynku włącznie ze wszystkimi warstwami. W obliczeniach oporu cieplnego konstrukcji podłogi zakłada się, że chudy beton pod płytą ma przewodność cieplną taką jak grunt i jego oporu cieplnego nie trzeba uwzględniać.

Jeżeli grubość równoważna $d_t < B'$ (podłogi nieizolowanej lub umiarkowanie izolowanej) wyznaczając podstawowy współczynnik przenikania ciepła płyty na gruncie (U_0) stosuje się wzór:

$$U_0 = \frac{2 \cdot \lambda_g}{\pi \cdot B' + d_t} \ln \left(\frac{\pi B'}{d_t} + 1 \right) \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \quad (3.3)$$

natomiast jeżeli $d_t \geq B'$ (podłogi dobrze izolowane) stosuje się wzór:

$$U_0 = \frac{\lambda_g}{0,457 \cdot B' + d_t} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \quad (3.4)$$

W przypadku podłóg bez izolacji krawędziowej :

$$U = U_0 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \quad (3.5)$$

a z izolacją krawędziową :

$$U = U_0 + \frac{2\Delta\psi}{B'} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \quad (3.6)$$

gdzie:

$\Delta\psi$ – człon korekcyjny z uwagi na izolację krawędziową płyty podłogowej $\left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$
wyznaczany ze wzoru:

a) w przypadku izolacji krawędziowej poziomej (odnosi się także do izolacji krawędziowej poziomej nad płytą lub na zewnątrz budynku):

$$\Delta\psi = -\frac{\lambda_g}{\pi} \cdot \left[\ln\left(\frac{D}{d_t} + 1\right) - \ln\left(\frac{2D}{d_t + d'} + 1\right) \right] \left[\frac{W}{m \cdot K} \right] \quad (3.7)$$

b) w przypadku izolacji krawędziowej pionowej (odnosi się także do izolacji na zewnątrz fundamentów lub wewnątrz ściany fundamentowej):

$$\Delta\psi = -\frac{\lambda_g}{\pi} \cdot \left[\ln\left(\frac{2D}{d_t} + 1\right) - \ln\left(\frac{2D}{d_t + d'} + 1\right) \right] \left[\frac{W}{m \cdot K} \right] \quad (3.8)$$

gdzie:

D – szerokość (3.7), głębokość (3.8) poziomej izolacji krawędziowej [m];

d_t – całkowita grubość równoważna podłogi (3.2) [m];

d' – dodatkowa grubość równoważna, wynikająca z izolacji krawędziowej:

$$d' = R' \cdot \lambda_g \quad [m] \quad (3.9)$$

gdzie:

R' – dodatkowy opór cieplny wynikający z izolacji krawędziowej:

$$R' = \frac{R_n - d_n}{\lambda_g} \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right] \quad (3.10)$$

gdzie :

R_n – opór cieplny poziomej lub pionowej izolacji krawędziowej $\left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$;

d_n – grubość izolacji krawędziowej [m].

3.2.2. Metoda obliczeń współczynnika przenikania ciepła przez podłogę na gruncie według normy PN-EN ISO 12831:2006.

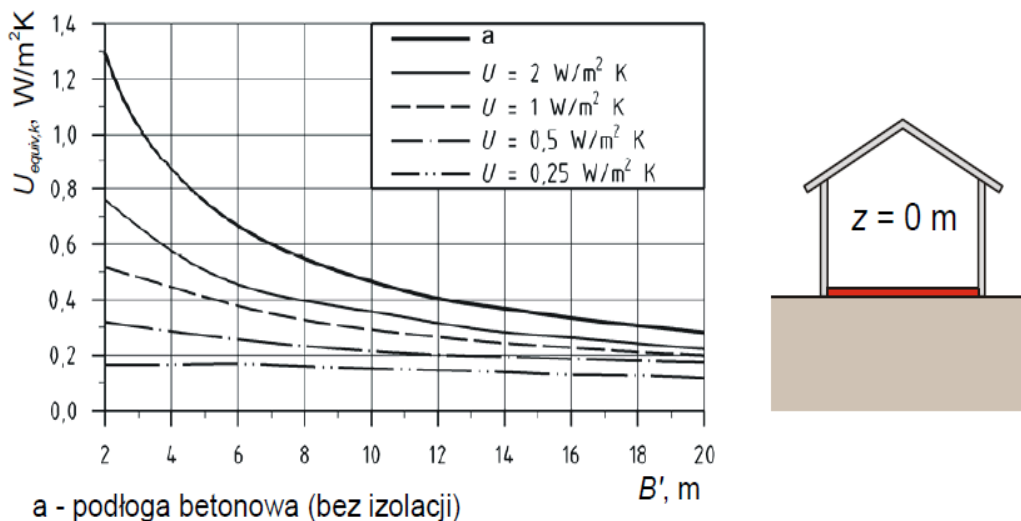
Wartość równoważnego współczynnika przenikania ciepła elementu budynku stykającego się z gruntem, oznaczonego jako $U_{equiv,bf}$, dla podłóg zależy od:

- współczynnika przenikania ciepła U obliczonego dla konstrukcji podłogi;
- zagłębienia poniżej terenu z ;

- wielkości parametru $B'(1)$.

Na podstawie obliczonej wartości B' oraz wyznaczonego współczynnika U podłogi określa się wartość $U_{equiv,bf}$, przy użyciu tablic oraz nomogramów podanych w omawianej normie w odniesieniu do różnych schematów podłóg. Dla płyty podłogowej na poziomie terenu wartość $U_{equiv,bf}$ wyznaczana jest w oparciu o:

a)



Rys. 3.4. Równoważny współczynnik przenikania ciepła podłogi na poziomie terenu [17].

b) Tabela 3.3. Równoważny współczynnik przenikania ciepła podłogi na poziomie terenu [17].

Wartość B' m	Równoważny współczynnik przenikania ciepła podłogi $U_{equiv,bf}$ (dla $z = 0$ m) W/m^2K				
	bez izolacji	$U_{podłogi} = 2,0 W/m^2K$	$U_{podłogi} = 1,0 W/m^2K$	$U_{podłogi} = 0,5 W/m^2K$	$U_{podłogi} = 0,25 W/m^2K$
2	1,30	0,77	0,55	0,33	0,17
4	0,88	0,59	0,45	0,30	0,17
6	0,68	0,48	0,38	0,27	0,17
8	0,55	0,41	0,33	0,25	0,16
10	0,47	0,36	0,30	0,23	0,15
12	0,41	0,32	0,27	0,21	0,14
14	0,37	0,29	0,24	0,19	0,14
16	0,33	0,26	0,22	0,18	0,13
18	0,31	0,24	0,21	0,17	0,12
20	0,28	0,22	0,19	0,16	0,12

3.2.3. Porównanie wyników obliczeń współczynnika przenikania ciepła przez podłogę na gruncie według normy PN-EN ISO 13370:2001 oraz PN-EN ISO 12831:2006.

Dla poszczególnych wariantów podłogi na gruncie wykonano obliczenia współczynnika przenikania ciepła według [17] i [19].

- Tabela 3.4. Całkowity opór cieplny i współczynnik przenikania [19].

Wyszczególnienie	Grubość ścian zewnętrznych w [m]	Współczynnik przewodności cieplnej gruntu λ_g [W/mK]	Opór cieplny podłogi R_f [m ² K/W]	Grubość równoważna podłogi d_t [m]	Człon korekcyjny z uwagi na izolację krawędziową [W/mK]	Wartość U_0 [W/m ² K]
Podłoga bez izolacji	0,3	0,7	0,12	0,53		0,29
Podłoga - izolacja 5cm	0,3	0,7	1,31	1,36		0,21
Podłoga - izolacja 20cm	0,3	0,7	4,88	3,86		0,098
Podłoga - izolacja obwodowa 1m - 10cm	0,3	0,7	0,12	0,53	-0,28	0,28

- Tabela 3.5. Całkowity opór cieplny i współczynnik przenikania [17].

Wyszczególnienie	Grubość warstwy d [m]	Współczynnik przewodności λ [W/mK]	Opór cieplny R_f [m ² K/W]	Współczynnik przenikania $U_{podłogi}$ [W/m ² K]	Wartość $U_{equiv,bf}$ [W/m ² K]
Podłoga bez izolacji					
Posadzka betonowa	0,2	1,7	0,12		
			0,12	3,48	0,19
Podłoga - izolacja 5 cm					
Posadzka betonowa	0,2	1,7	0,12		
Styropian	0,05	0,042	1,19		
			1,31	0,68	
Podłoga - izolacja 20 cm					
Posadzka betonowa	0,2	1,7	0,12		
Styropian	0,2	0,042	4,76		
			4,88	0,2	0,09

Różnice w wynikach obliczeń współczynnika przenikania ciepła dla poszczególnych rodzajów podłóg zamieszone w tabeli 3.4 oraz 3.5 wynikają przede wszystkim z dokładności obliczeń prowadzonych za pomocą ww. norm .

Metoda obliczeń przedstawiona w normie [17] :

- nie uwzględnia izolacji krawędziowej oraz zakłada, że współczynnik przewodzenia ciepła gruntu wynosi :

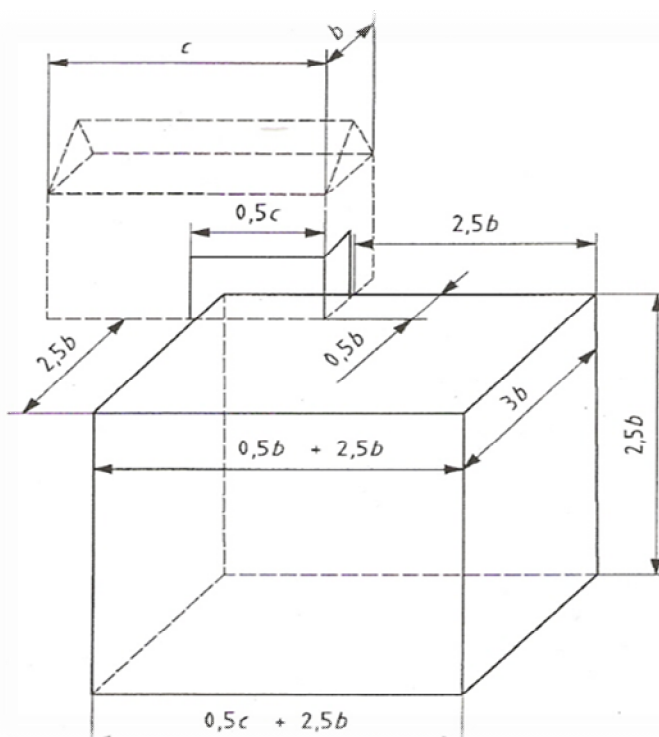
$$\lambda_g = 2,0 \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$$

- podczas obliczania współczynnika przenikania ciepła U dla konstrukcji podłogi uwzględnia się opór przejmowania ciepła od strony wewnętrznej budynku jednocześnie pomijając opór przejmowania ciepła od strony gruntu, przyjmując jego wartość równą 0.

- wykresy oraz tabele zawarte w ww. normie sporządzone są dla maksymalnej wartości „wymiaru charakterystycznego” $B^*=20$.
- Natomiast posługując się normą [19] obliczenia wykonywane są w sposób dokładny, oparty na wzorach odnoszących się do konkretnych przypadków. Przede wszystkim wzory te uwzględniają sposób ułożenia izolacji cieplnej oraz rodzaj gruntu na którym położona jest rozpatrywana podłoga.

3.2.4. Budowa modelu 3-D według normy PN-EN ISO 10211

Płaszczyzny wycięcia dla modelu 3-D do obliczenia całkowitego strumienia ciepła zawierającego przenoszenie ciepła przez grunt należy usytuować następująco:



Rys.3.5. Ilustracja płaszczyzn wycięcia dla modelu geometrycznego 3-D, zawierającego grunt [18].

Tab. 3.6. Usytuowanie płaszczyzn wycięcia w gruncie [18].

Kierunek	Odległość od elementu centralnego	
	Cel obliczenia	
	Jedynie obliczenia temperatury powierzchni	Strumień ciepła i temperatury powierzchni
Odległość w poziomie od przekroju pionowego, wewnątrz budynku	co najmniej trzy razy grubość ściany	$0,5 \times$ wymiar podłogi
Odległość w poziomie od przekroju pionowego, na zewnątrz budynku	co najmniej trzy razy grubość ściany	$2,5 \times$ szerokość podłogi
Odległość w pionie od przekroju poziomego, poniżej poziomu gruntu	co najmniej 3 m	$2,5 \times$ szerokość podłogi
Odległość w pionie od przekroju poziomego, poniżej poziomu podłogi (stosuje się jedynie wtedy, gdy rozważany poziom podłogi jest więcej niż 2 m poniżej poziomu gruntu)	co najmniej 1 m	$2,5 \times$ szerokość podłogi

W modelu geometrycznym 3-D:

- wymiary podłogi (długość i szerokość) wewnątrz budynku należy rozpatrywać oddzielnie w każdym kierunku,
- odległość na zewnątrz budynku i poniżej gruntu powinna być oparta na mniejszym wymiarze podłogi.

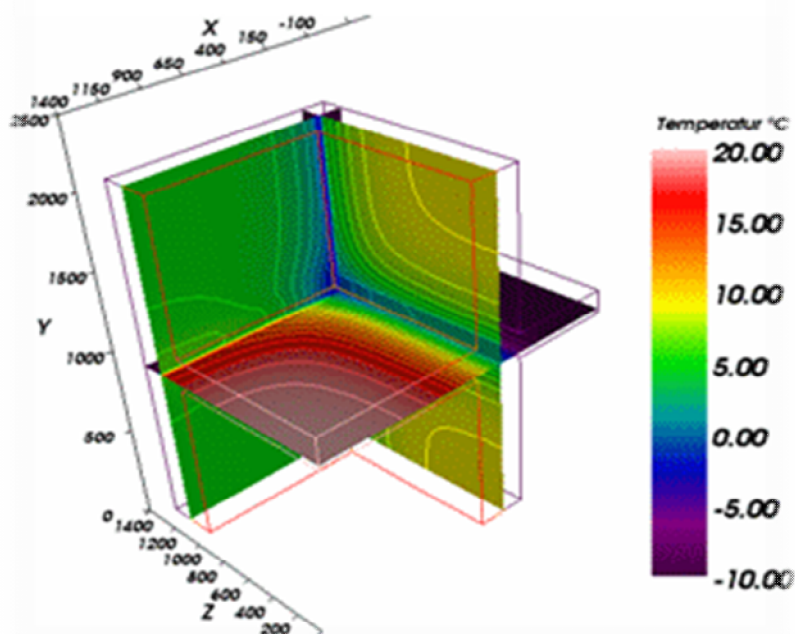
4. Model numeryczny budynku stykającego się z gruntem

4.1. Budowa modelu numerycznego w programie AnTherm

4.1.1. Program AnTherm

AnTherm jest kompletnym pakietem programowym do obliczania rozkładu temperatur i strumieni cieplnych w konstrukcjach budowlanych, szczególnie z uwzględnieniem mostków cieplnych. Program pozwala na dokonywanie obliczeń dla dowolnie skomplikowanych konstrukcji budowlanych w przestrzeni 2D oraz 3D.

Do prezentacji wyników program **AnTherm** posługuje się najnowocześniejszymi technologiami wizualizacji.

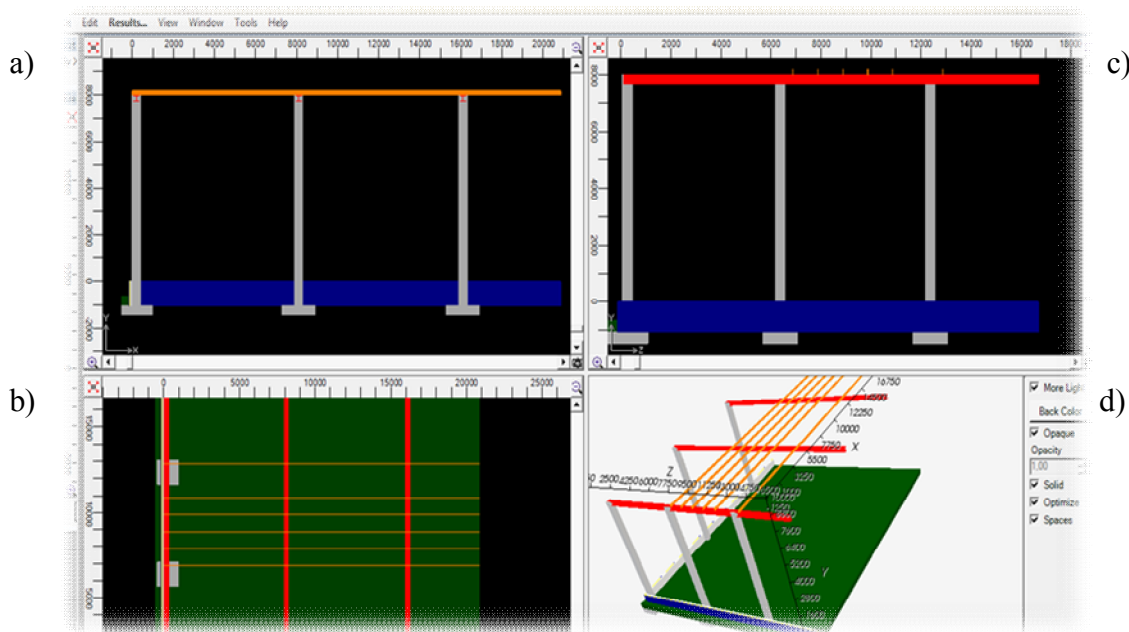


Rys.4.1. Przykładowe wyniki obliczeń w programie AnTherm [21].

Według producenta programu „**AnTherm** to nowoczesny i wyjątkowo sprawny program do analizy termicznych własności konstrukcji budowlanych z mostkami cieplnymi oraz mostkami dyfuzji pary wodnej. Jako program do symulacji mostków cieplnych stosuje się go do obliczania rozkładu temperatur i ciepła, prądów cieplnych i prądów dyfuzji pary wodnej w konstrukcjach budowlanych o dowolnej, skomplikowanej formie i dowolnej kombinacji materiałów. Dodatkowo program wylicza i wykazuje rozkład granicznej wilgotności powietrza na wszystkich powierzchniach konstrukcji oraz rozkład ciśnienia cząstkowego pary wodnej wewnątrz w konstrukcji. Program ten stosuje się również w analizie dynamicznego zachowania się budowli (przy okresowych, periodycznych, harmonicznym warunkach brzegowych)” [21].

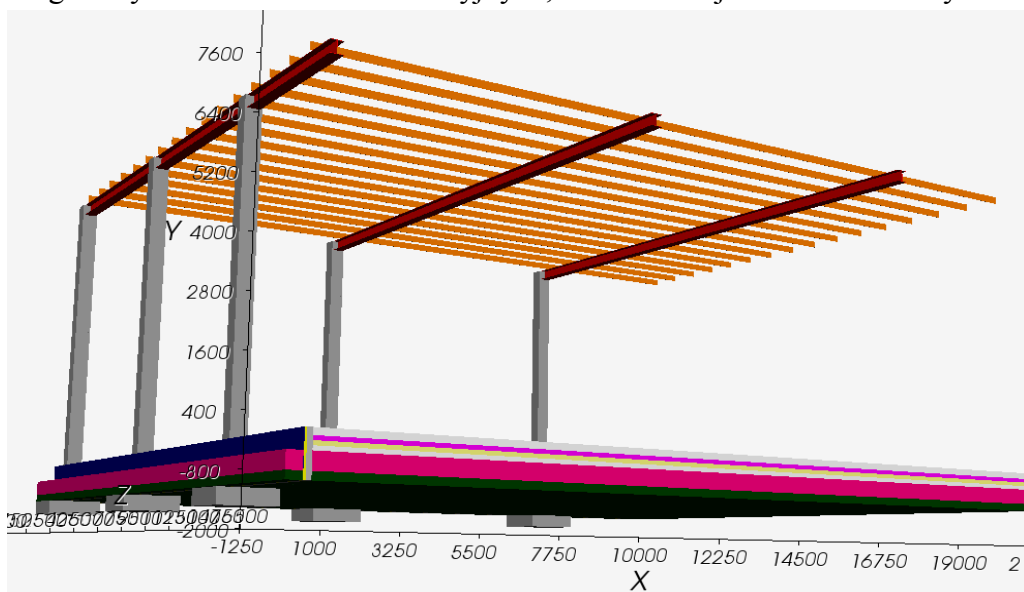
4.1.2. Model hali w programie AnTherm

Konstrukcja hali wprowadzana jest do programu w kartezjańskim układzie współrzędnych. Usytuowanie osi X,Y,Z może być swobodnie zmieniane przez użytkownika programu. Okno wprowadzania elementu 3-D podzielone jest na 4 główne części:



Rys.4.2. Okno wprowadzania elementu 3-D w programie AnTherm: a) oś XY, b) oś XZ, c) oś YZ, d) widok elementu 3-D.

Wprowadzanie elementu należy rozpocząć od zewnętrznych części konstrukcji ponieważ każdy element wprowadzany później „wycina” zajmowaną przez siebie przestrzeń we wcześniej zdefiniowanym elemencie. Rodzaj elementu, wymiary oraz kolejność wprowadzania zawiera okno „lista elementów”. Program pozwala na budowę szczegółowych elementów konstrukcyjnych, dokładność jest zależna od użytkownika.

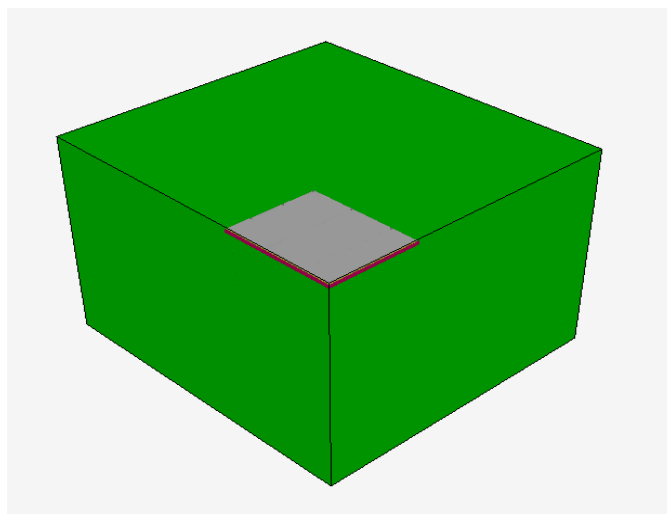


Rys.4.3. Szczegółowy model hali przemysłowej zbudowany w programie AnTherm.

Ponieważ hala jest symetryczna w modelu wzięto pod uwagę ¼ całej powierzchni hali.

Uproszczony model obejmuje:

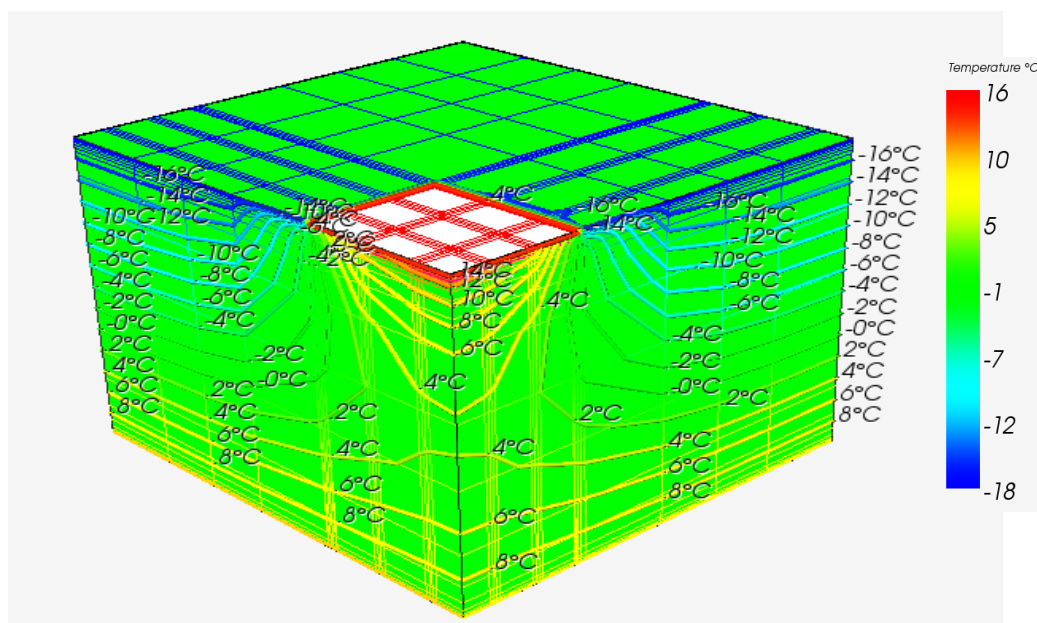
- a) **posadzka**
 - długość – 50 m
 - szerokość – 50 m
 - głębokość – 0,2 m
- b) **izolacja termiczna**
 - długość – 50 m
 - szerokość – 50 m
 - głębokość – 0,05m, 0,2 m
- b) **grunt**
 - długość – 175 m
 - szerokość – 175 m
 - głębokość – 0÷130 m



Rys.4.4. Uproszczony model hali przemysłowej zbudowany w programie AnTherm.

Tab.4.1. Zestawienie parametrów materiałów wchodzących w skład modelu.

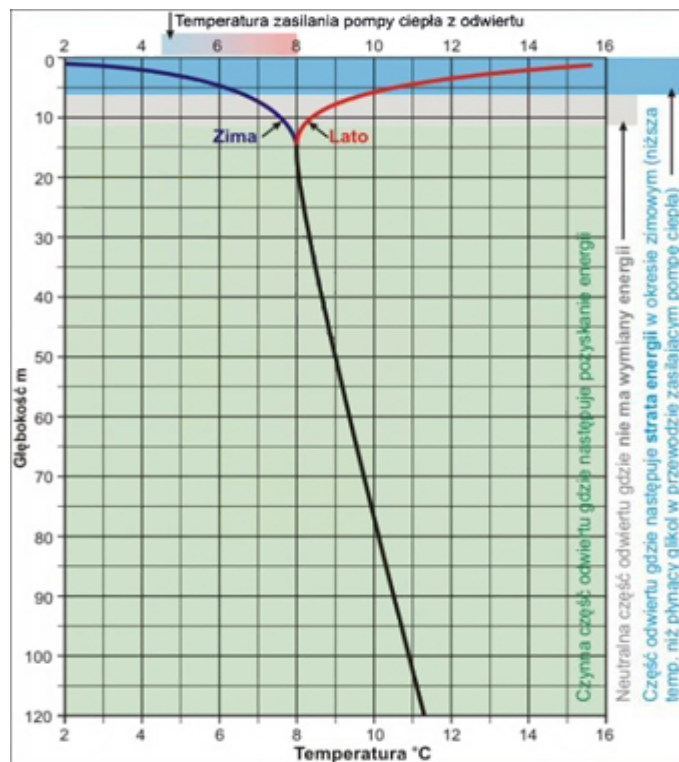
	λ	ρ	c_p	d
	[W/mK]	[kg/m ³]	[J/kgK]	[m]
posadzka betonowa	1,7	2400	840	0,2
styropian	0,042	40	1460	0,1
grunt (glina piaszczysta)	0,7	1800	840	130
	Temperatura [°C]			
wewnątrz hali	16			
powietrze zewnętrzne	-18			
temperatura gruntu poniżej 133m od poziomu	10			



Rys. 4.5. Wyniki obliczeń uzyskane w programie AnTherm.

4.1.2. Naturalne pole temperatury gruntu

Temperatura gruntu poniżej pewnej głębokości pozostaje względnie stała przez cały rok [12]. W tak zwanej „płytkiej strefie” sięgającej od 1-8 m (dla suchego lekkiego gruntu) i do 20 m głębokości (dla wilgotnego ciężkiego zwirowego gruntu) temperatura gruntu oscyluje w granicach 8°C.



Rys. 4.6. Rozkład temperatury gruntu w zależności od głębokości i pory roku [27]

Na rozkład temperatury w gruncie mają wpływ następujące czynniki:

- gęstość, ciepło właściwe i przewodność cieplna gruntu (które zależą głównie od rodzaju, struktury i wilgotności gruntu),
- oddziaływania klimatyczne i pogodowe oraz dobowe; oddziaływania te realizowane są na powierzchni gruntu poprzez zmiany temperatury, wilgotności i prędkości powietrza, opady, a także poprzez promieniowanie słoneczne emitowane oraz odbite przez grunt,
- rodzaj pokrycia powierzchni gruntu (np. ziemia bez roślinności, trawa, płyty chodnikowe, pokrywa śnieżna).

Wnioski:

- rozkład temperatury gruntu w zależności od głębokości uzyskany z obliczeń w programie AnTherm nie odpowiada naturalnemu rozkładowi temperatury (rys.3.5.), w obliczeniach otrzymano temperaturę 0°C na głębokości 85 m poniżej poziomu terenu,
- program nie pozwala użytkownikowi na wprowadzenie rozkładu temperatury w gruncie(rys.3.5.), dlatego model rozpoczyna obliczenia traktując grunt jako materiał nie posiadający temperatury co jest sprzeczne z rzeczywistością,

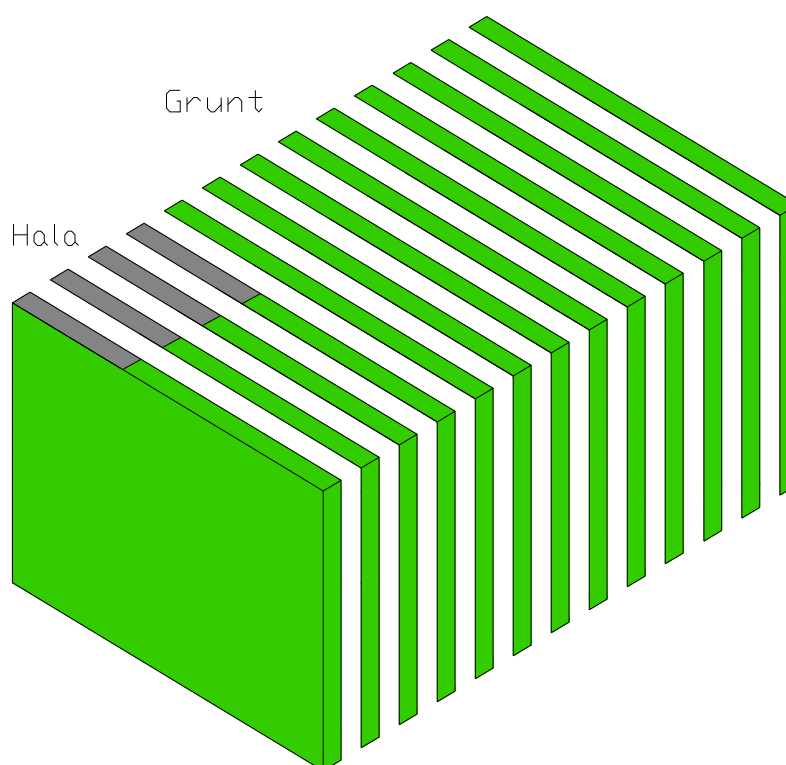
- model harmoniczny program wykonuje w oparciu o PN-EN ISO 13786:2008 „*Ciepne właściwości użytkowe komponentów budowlanych - Dynamiczne charakterystyki cieplne - Metody obliczania*”, program nie pozwala na uwzględnienie w obliczeniach takich wartości jak nasłonecznienie czy prędkość wiatru.

Są to główne powody rezygnacji z wykorzystania omawianego programu w realizacji danego zadania.

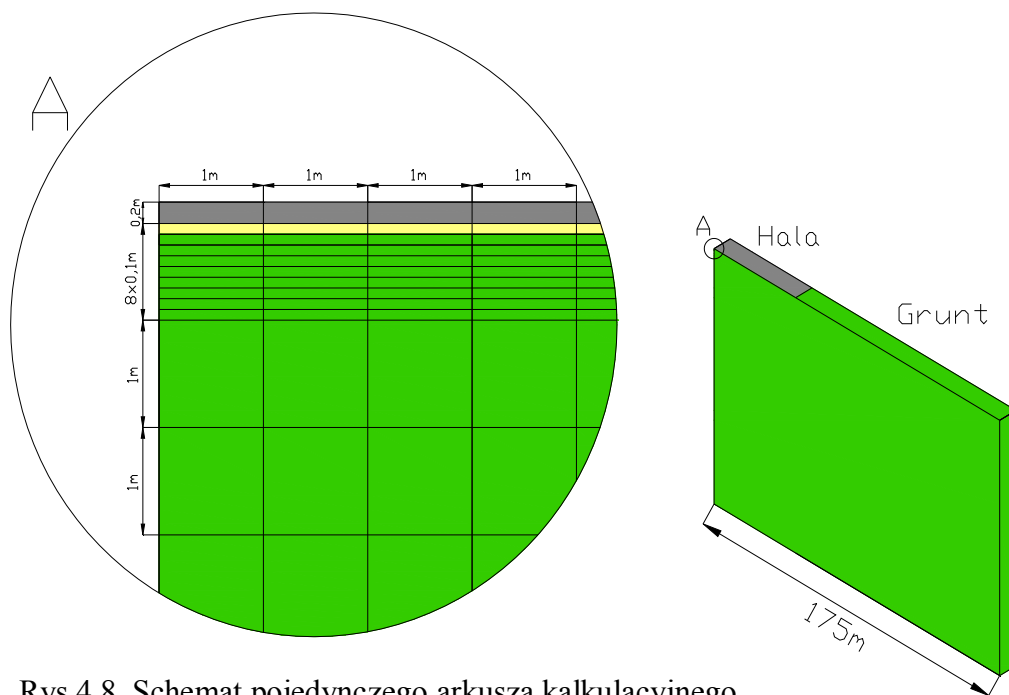
4.2. Budowa modelu numerycznego w programie Excel

4.2.1. Opis model numerycznego

W celu wyznaczenia optymalnej izolacji cieplnej podłogi na gruncie pod halą przemysłową oraz rozkładu temperatury w gruncie wykorzystano metodę bilansów elementarnych. Model numeryczny obejmuje przepływ ciepła w sześciu kierunkach, obliczenia dotyczą przepływu trójwymiarowego. Model stworzony w programie Excel obejmuje 175 arkuszy kalkulacyjnych z których każdy zawiera 8050 komórek obliczeniowych łącznie dając 1 408 750 komórek obliczeniowych. Każda komórka w arkuszu odpowiada określonej przestrzeni w rzeczywistości. Hala wraz z gruntem została podzielona na 175 wycinków o grubości 1m.



Rys.4.7. Podział podłogi hali wraz z gruntem na 175 wycinków o grubości 1m.



Rys.4.8. Schemat pojedynczego arkusza kalkulacyjnego

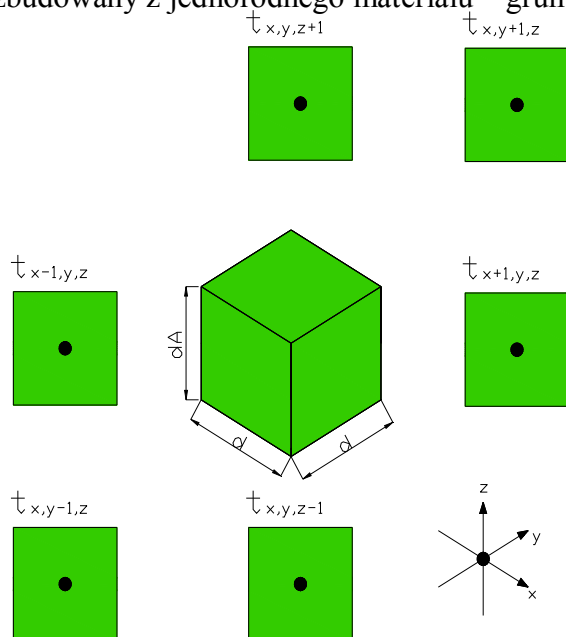
Każda obliczeniowa komórka pojedynczego arkusza kalkulacyjnego w poziomie odpowiada 1m natomiast w pionie dzieli się na :

- 0,2 m – grubość posadzki,
- 0,5 lub 0,2 – grubość styropianu,
- 8 razy 0,1 m – grunt,
- 20 razy 1m – grunt,
- 11 razy 10m – grunt.

4.2.2. Model numeryczny gruntu

Element 1

Element zbudowany z jednorodnego materiału – grunt:



Rys.4.9. Schemat węzła zbudowanego z jednorodnego materiału.

- Zmienne:
 $\Delta x = \Delta y = d;$
 $\Delta z = dA$
- Równanie przepływu ciepła w stanie ustalonym w 6 kierunkach w ciałach stałych uwzględniające tylko przewodzenie (4.1).

$$Q = \sum_{i=1}^6 \left(\frac{1}{R_i} \cdot A_i \cdot \Delta t_i \right) \quad R = \frac{d}{\lambda}; \quad \Delta t_i = t_i - t_{x,y,z}$$

$$\begin{aligned} Q &= \frac{1}{d} \cdot d \cdot dA \cdot (t_{x+1,y,z} - t_{x,y,z}) + \frac{1}{d} \cdot d \cdot dA \cdot (t_{x-1,y,z} - t_{x,y,z}) + \frac{1}{d} \cdot d \cdot dA \cdot (t_{x,y+1,z} - t_{x,y,z}) \\ &+ \frac{1}{d} \cdot d \cdot dA \cdot (t_{x,y-1,z} - t_{x,y,z}) + \frac{1}{dA} \cdot d \cdot d \cdot (t_{x,y1,z+1} + t_{x,y1,z-1} - 2 \cdot t_{x,y,z}) = \quad (4.1) \\ &= \lambda_g \cdot (dA \cdot (t_{x+1,y,z} + t_{x-1,y,z} + t_{x,y+1,z} + t_{x,y-1,z} - 4t_{x,y,z})) + \frac{d^2}{dA} \cdot (t_{x,y1,z+1} + t_{x,y1,z-1} - 2 \cdot t_{x,y,z}) \end{aligned}$$

- Bilans energii rozpatrywanego elementu (4.2)

$$\begin{aligned} Q \cdot \Delta \tau &= m \cdot c \cdot (t'_{x,y,z} - t_{x,y,z}) \\ m &= \rho \cdot V = \rho_g \cdot d \cdot d \cdot dA = \rho_g \cdot d^2 \cdot dA \\ Q \cdot \Delta \tau &= \rho_g \cdot d^2 \cdot dA \cdot c_g \cdot (t'_{x,y,z} - t_{x,y,z}) \quad (4.2) \end{aligned}$$

- Podstawiając (4.1) do (4.2) otrzymano:

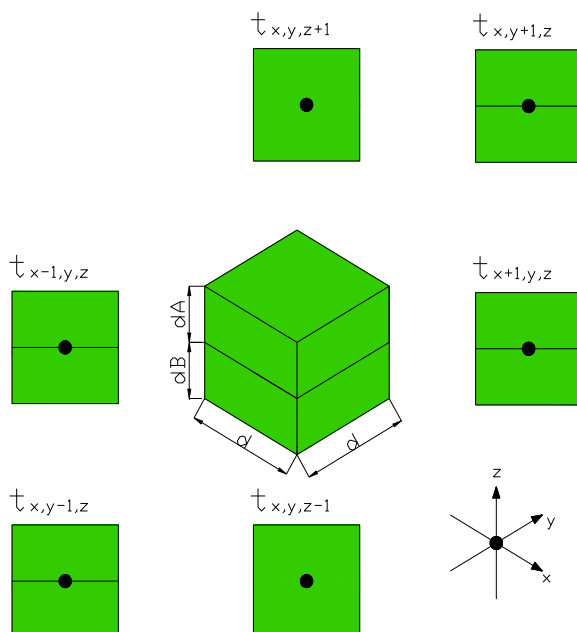
$$\begin{aligned} \lambda_g \cdot (dA \cdot (t_{x+1,y,z} + t_{x-1,y,z} + t_{x,y+1,z} + t_{x,y-1,z} - 4t_{x,y,z})) + \frac{d^2}{dA} \cdot (t_{x,y1,z+1} + t_{x,y1,z-1} - 2 \cdot t_{x,y,z}) \cdot \\ \cdot \Delta \tau &= \rho_g \cdot d^2 \cdot dA \cdot c_g \cdot (t'_{x,y,z} - t_{x,y,z}) \quad (4.3) \end{aligned}$$

- Po przekształceniu :

$$\begin{aligned} t'_{x,y,z} &= t_{x,y,z} + \frac{\lambda_g}{\rho_g \cdot c_g \cdot dA} \cdot \frac{\Delta \tau}{d^2} \cdot (dA \cdot (t_{x+1,y,z} + t_{x-1,y,z} + t_{x,y+1,z} + t_{x,y-1,z} - 4t_{x,y,z})) + \\ &+ \frac{d^2}{dA} \cdot (t_{x,y,z+1} + t_{x,y,z-1} - 2 \cdot t_{x,y,z}) \quad (4.4) \end{aligned}$$

Element 2

Element zbudowany z jednorodnego materiału łączący dwie grubości - grunt.



Rys.4.10. Schemat węzła zbudowany z jednorodnego materiału łączący dwie grubości.

- Zmienne:
 $\Delta x = \Delta y = d$;
 $\Delta z = \frac{1}{2}(dA + dB)$
- Równanie przepływu ciepła w stanie ustalonym w 6 kierunkach w ciałach stałych uwzględniające tylko przewodzenie (4.5).

$$\begin{aligned}
 Q &= \sum_{i=1}^6 \left(\frac{1}{R_i} \cdot A_i \cdot \Delta t_i \right); & R &= \frac{d}{\lambda}; & \Delta t_i &= t_i - t_{x,y,z} ; \\
 Q &= \frac{1}{\lambda_g} \cdot \frac{1}{2} \cdot (dA + dB) \cdot d \cdot (t_{x+1,y,z} - t_{x,y,z}) + \frac{1}{\lambda_g} \cdot \frac{1}{2} \cdot (dA + dB) \cdot d \cdot (t_{x-1,y,z} - t_{x,y,z}) + \\
 &+ \frac{1}{\lambda_g} \cdot \frac{1}{2} \cdot (dA + dB) \cdot d \cdot (t_{x,y+1,z} - t_{x,y,z}) + \frac{1}{\lambda_g} \cdot \frac{1}{2} \cdot (dA + dB) \cdot d \cdot (t_{x,y-1,z} - t_{x,y,z}) + \\
 &+ \frac{1}{\lambda_g} \cdot d \cdot d \cdot (t_{x,y,z+1} - t_{x,y,z}) + \frac{1}{\lambda_g} \cdot d \cdot d \cdot (t_{x,y,z-1} - t_{x,y,z}) = \\
 & \lambda_g \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot (dA + dB) \cdot (t_{x+1,y,z} + t_{x-1,y,z} + t_{x,y+1,z} + t_{x,y-1,z} - 4 \cdot t_{x,y,z}) + \frac{d^2}{dA} \cdot (t_{x,y,z+1} - t_{x,y,z}) + \right. \\
 & \left. + \frac{d^2}{dB} \cdot (t_{x,y,z-1} - t_{x,y,z}) \right) \tag{4.5}
 \end{aligned}$$

- Bilans energii rozpatrywanego elementu (4.6)

$$Q \cdot \Delta\tau = m \cdot c \cdot (t'_{x,y,z} - t_{x,y,z})$$

$$m = \rho \cdot V = \rho_g \cdot \frac{dA}{2} \cdot d \cdot d + \rho_g \cdot \frac{dB}{2} \cdot d \cdot d = \frac{d^2}{2} \cdot \rho_g \cdot (dA + dB) \quad (4.6)$$

Podstawiając (4.5) do (4.6) otrzymano:

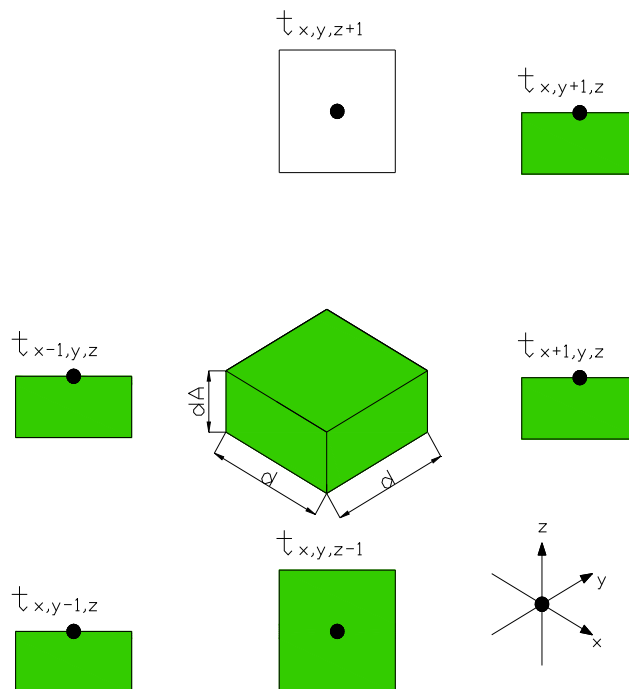
$$\lambda_g \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot (dA + dB) \cdot (t_{x+1,y,z} + t_{x/1,y,z} + t_{x,y+1,z} + t_{x,y-1,z} - 4 \cdot t_{x,y,z}) + \frac{d^2}{dA} \cdot (t_{x,y,z+1} - t_{x,y,z}) + \frac{d^2}{dB} \cdot (t_{x,y,z-1} - t_{x,y,z})\right) \cdot \Delta\tau = \frac{d^2}{2} \cdot \rho_g \cdot c_g \cdot (dA + dB) \cdot (t'_{x,y,z} - t_{x,y,z}) \quad (4.7)$$

- Po przekształceniu :

$$t'_{x,y,z} = t_{x,y,z} + \frac{2 \cdot \lambda_g}{\rho_g \cdot c_g \cdot (dA + dB)} \cdot \frac{\Delta\tau}{d^2} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot (dA + dB) \cdot (t_{x+1,y,z} + t_{x/1,y,z} + t_{x,y+1,z} + t_{x,y-1,z} - 4 \cdot t_{x,y,z}) + \frac{d^2}{dA} \cdot (t_{x,y,z+1} - t_{x,y,z}) + \frac{d^2}{dB} \cdot (t_{x,y,z-1} - t_{x,y,z})\right] \quad (4.8)$$

Element 3

Element znajduje się na styku gruntu z powietrzem zewnętrznym.



Rys.4.11. Schemat węzła znajdującego się na styku gruntu z powietrzem zewnętrznym.

- Zmienne:
 $\Delta x = \Delta y = d;$
 $\Delta z = \frac{1}{2} dA$
- Równanie przepływu ciepła w stanie ustalonym w 6 kierunkach w ciałach stałych uwzględniające tylko przewodzenie (4.9).

$$Q = \sum_{i=1}^6 \left(\frac{1}{R_i} \cdot A_i \cdot \Delta t_i \right); \quad \Delta t_i = t_i - t_{x,y,z}$$

$$\begin{aligned} Q = & \frac{1}{\lambda_g} \cdot \frac{1}{2} dA \cdot d \cdot (t_{x+1,y,z} - t_{x,y,z}) + \frac{1}{\lambda_g} \cdot \frac{1}{2} dA \cdot d \cdot (t_{x-1,y,z} - t_{x,y,z}) + \\ & + \frac{1}{\lambda_g} \cdot \frac{1}{2} dA \cdot d \cdot (t_{x,y+1,z} - t_{x,y,z}) + \frac{1}{\lambda_g} \cdot \frac{1}{2} \cdot dA \cdot d \cdot (t_{x,y-1,z} - t_{x,y,z}) + \\ & + \frac{1}{\lambda_g} \cdot d \cdot d \cdot (t_{x,y,z-1} - t_{x,y,z}) + \alpha_w \cdot d \cdot d \cdot (t_e - t_{x,y,z}) + d \cdot d \cdot (ITH1 - B1) = \\ & \lambda_g \cdot \left(\frac{1}{2} dA \right) \cdot (t_{x+1,y,z} + t_{x-1,y,z} + t_{x,y+1,z} + t_{x,y-1,z} - 4 \cdot t_{x,y,z}) + \frac{d^2}{dA} \cdot (t_{x,y,z+1} - t_{x,y,z}) + \\ & + d^2 \cdot (\alpha_w \cdot (t_e - t_{x,y,z}) + ITH1 - B1) \end{aligned} \quad (4.9)$$

gdzie:
 α_k - współczynnik przejmowania ciepła (konwekcji) $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$,
 WS – prędkość wiatru (dane meteorologiczne) [m/s],

Równania przybliżone dla powietrza:

$$\alpha_w = 6,2 + 4,2 \cdot WS \left[\frac{W}{m^2 K} \right] \quad \text{dla} \quad WS \leq 5 \frac{m}{s}$$

$$\alpha_w = 7,15 \cdot WS^{0,78} \left[\frac{W}{m^2 K} \right] \quad \text{dla} \quad WS > 5 \frac{m}{s}$$

- $ITH1$ - zyski ciepła od nasłonecznienia [W/m^2]

$$ITH1 = 0,85 * ITH [W/m^2]$$

- ITH - całkowite natężenie promieniowania słonecznego na powierzchnię poziomą (dane meteorologiczne) [W/m^2];
- $0,85$ – stopień emisyjności powierzchni ciemnoszarej;

- $B1$ – straty wypromieniowania ciepła do nieboskłonu [W/m^2],

$$B1 = \sigma \cdot 0,9 \cdot \left(\left(\frac{T_s + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{TSKY + 273}{100} \right)^4 \right) \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ - stała promieniowania (Stefana – Boltzmanna) $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right]$;

T_s - temperatura styku (powietrze zewnętrzne/grunt) [$^{\circ}C$],

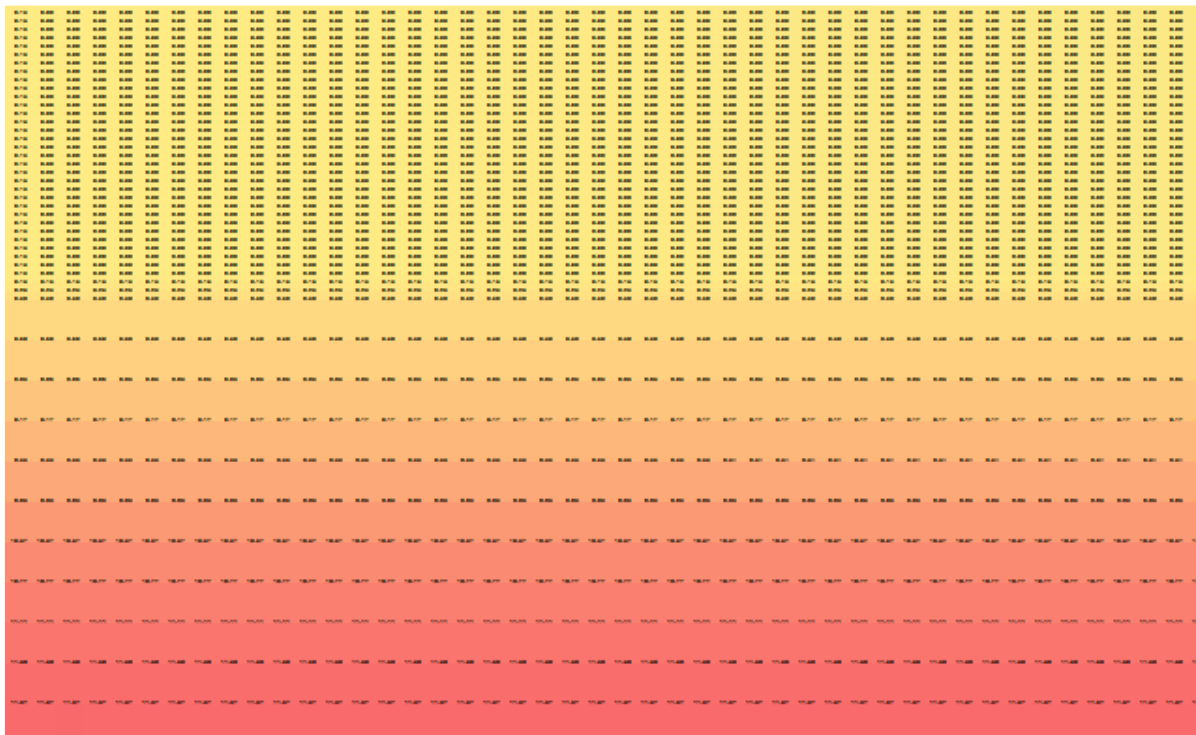
$TSKY$ – temperatura promieniowania nieboskłonu (dane meteorologiczne) [$^{\circ}C$].

- Ostatecznie:

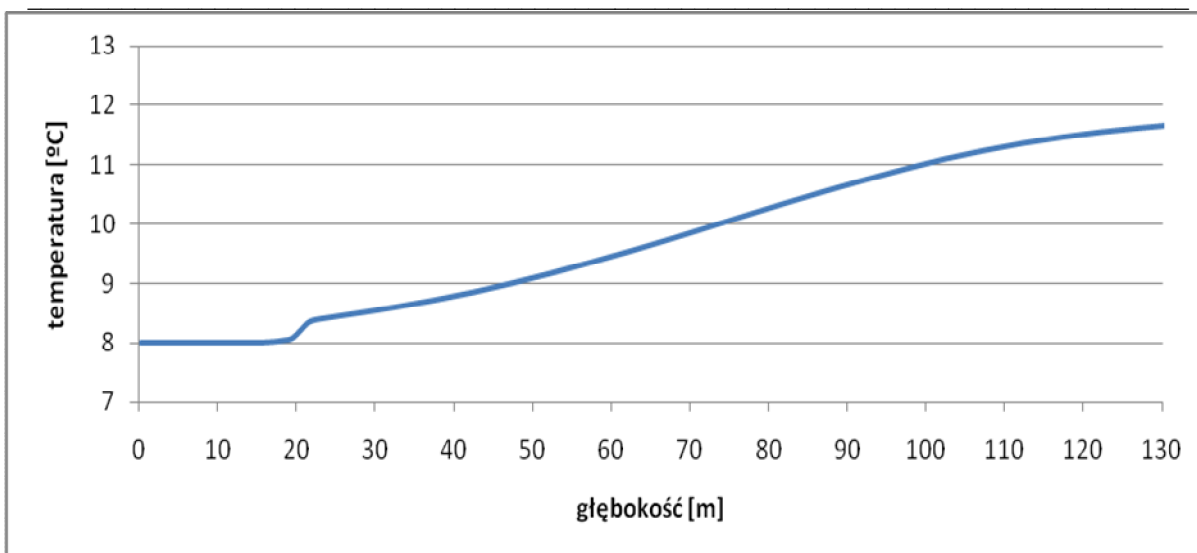
$$t'_{x,y,z} = t_{x,y,z} + \frac{2 \cdot \lambda_g}{\rho_g \cdot c_g \cdot dA} \cdot \frac{\Delta \tau}{d^2} \cdot \left(\frac{1}{2} dA \cdot (t_{x+1,y,z} + t_{x-1,y,z} + t_{x,y+1,z} + t_{x,y-1,z} - 4 \cdot t_{x,y,z}) + \frac{d^2}{dA} \cdot (t_{x,y,z+1} - t_{x,y,z}) + d^2 \cdot (\alpha_w \cdot (t_e - t_{x,y,z}) + ITH1 - B1) \right) \quad (4.10)$$

4.2.3. Opis działania modelu -grunt

Początkowo w komórkach brzegowych otaczających model narzucono temperaturę $8^{\circ}C$, następnie model wykonywał obliczenia do momentu uzyskania w każdej komórce arkusza kalkulacyjnego temperatury równej $8^{\circ}C$. W kolejnym kroku został ustalony wstępny rozkład temperatury zobrazowany na rysunku 4.12. (odpowiadający naturalnemu rozkładowi temperatury omówionemu w punkcie 4.1.3.) :



Rys. 4.12. Fragment arkusza kalkulacyjnego przedstawiający wstępny rozkład temperatury ustalony w modelu.

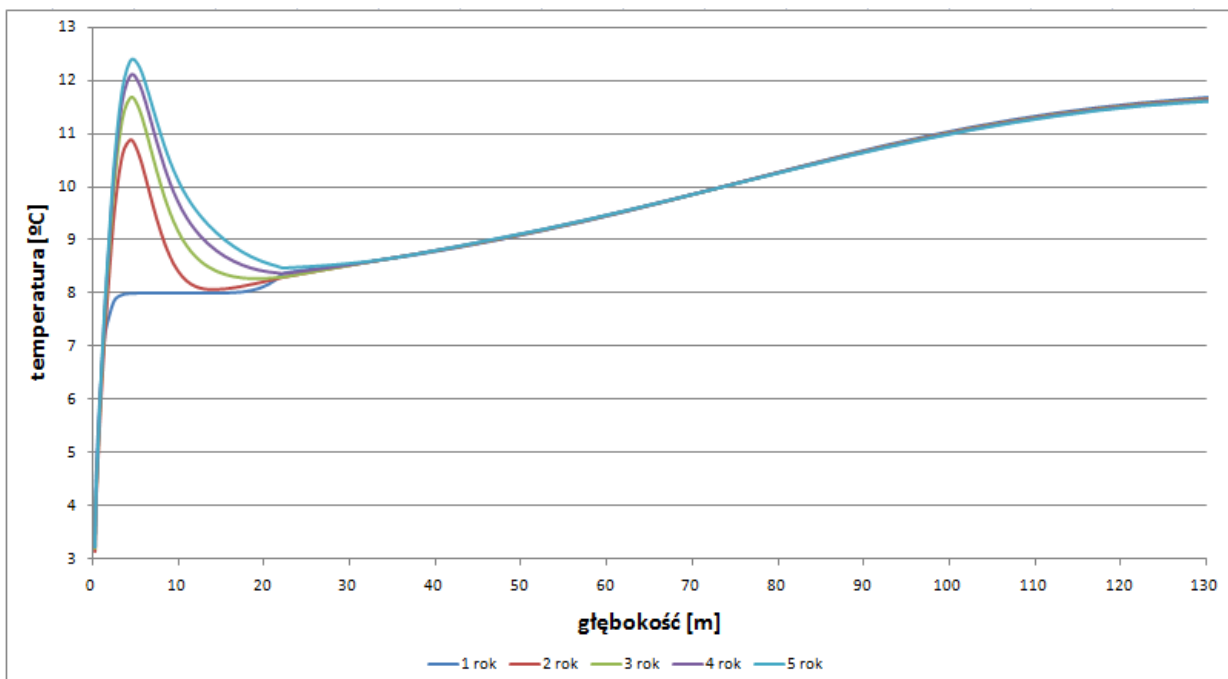


Rys.4.13. Narzucony wstępny rozkład temperatury w gruncie w zależności od głębokości.

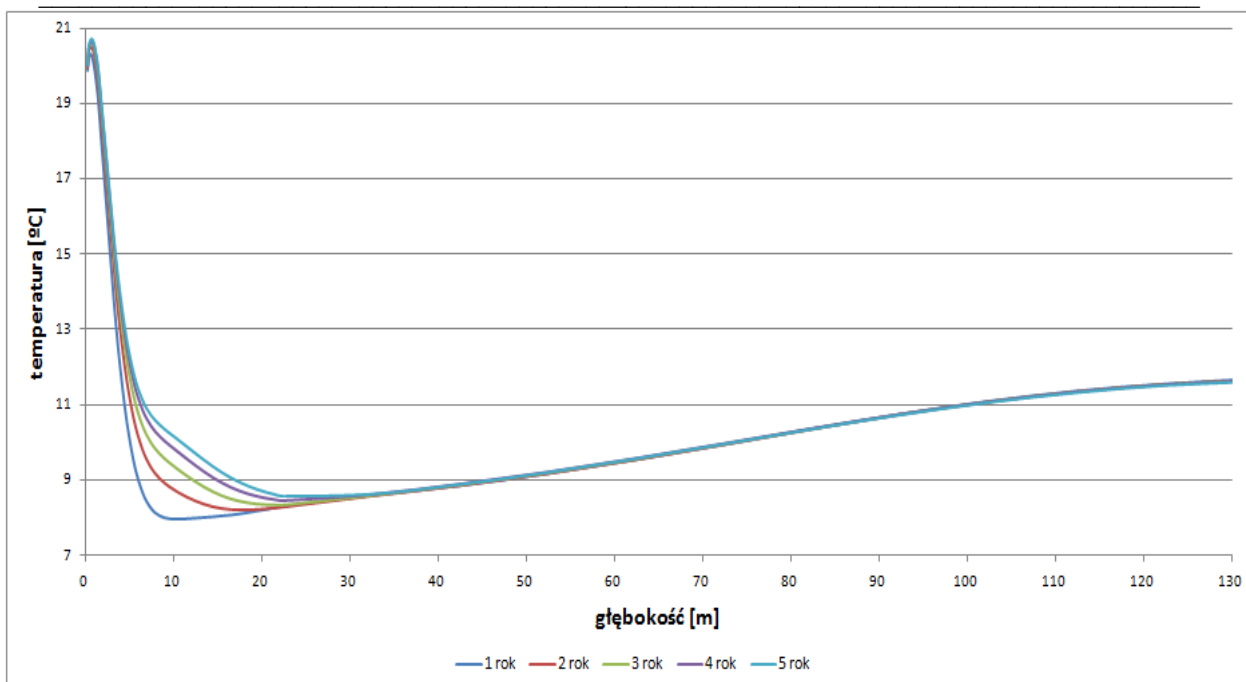
Następnie na tak ustalonym modelu rozpoczęto symulacje wpływu warunków zewnętrznych. Po włączeniu symulacji program oblicza metodą iteracyjną zmianę temperatury w gruncie podstawiając do ww. wzorów wartość temperatury zewnętrznej, nasłonecznienia oraz prędkości wiatru odpowiadające danej godzinie w roku. Wartości te pochodzą z danych meteorologicznych Ministerstwa Infrastruktury dla miasta Poznania. Pojedyncza iteracja odpowiada godzinnemu krokowi czasowemu. Łącznie dla roku model wykonał 8760 iteracji. W celu ustalenia się rozkładu temperatury w gruncie obliczenia powtórzono dla okresu 5 lat.

4.2.4. Wyniki obliczeń dla 5 letniego okresu symulacji – model gruntu

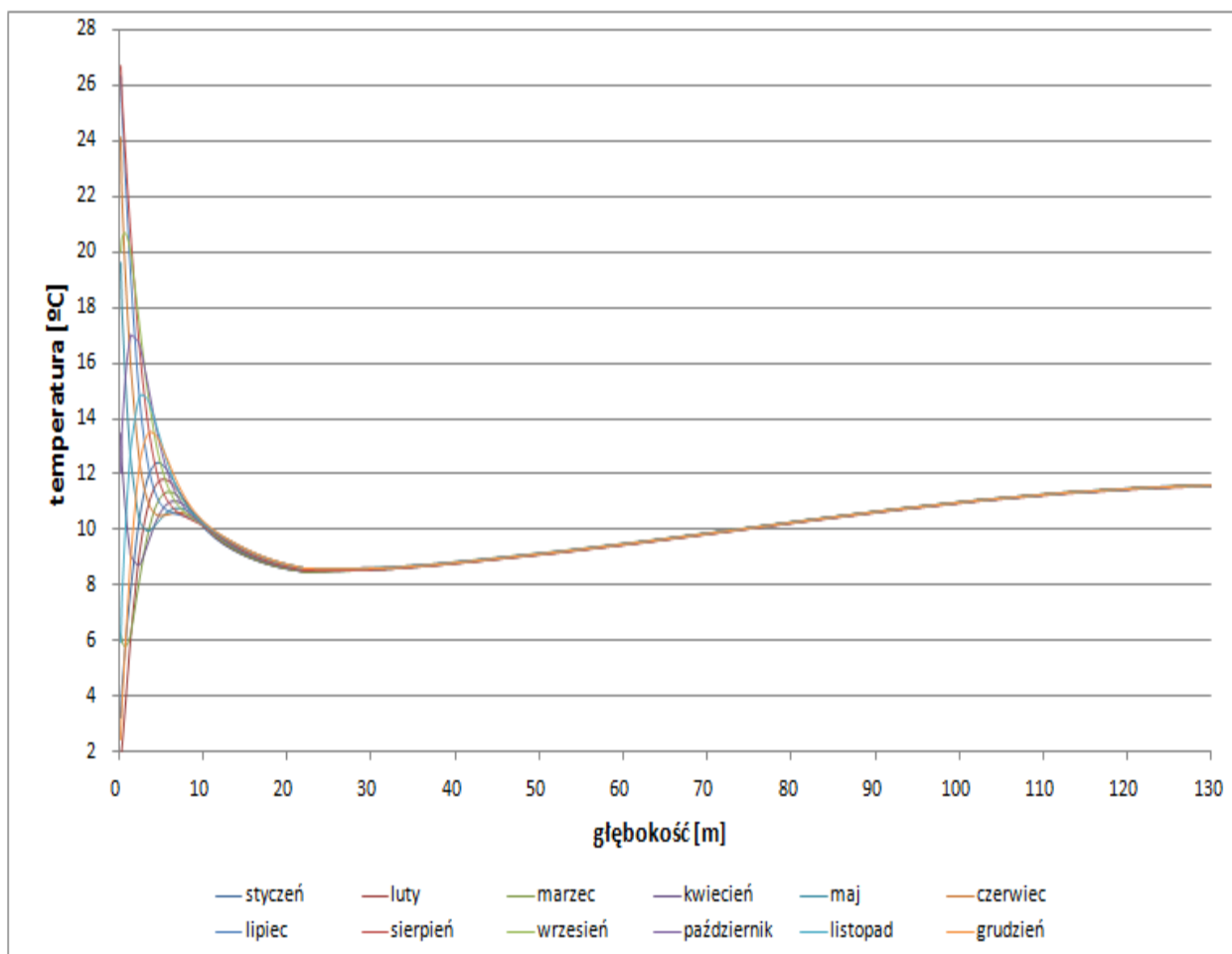
Poniżej zamieszczono wykresy obrazujące średnie temperatury gruntu na danych głębokościach dla poszczególnych lat symulacji. Wykresy powstały na podstawie wyznaczenia średniomiesięcznych rozkładów temperatury w gruncie w zależności od głębokości.



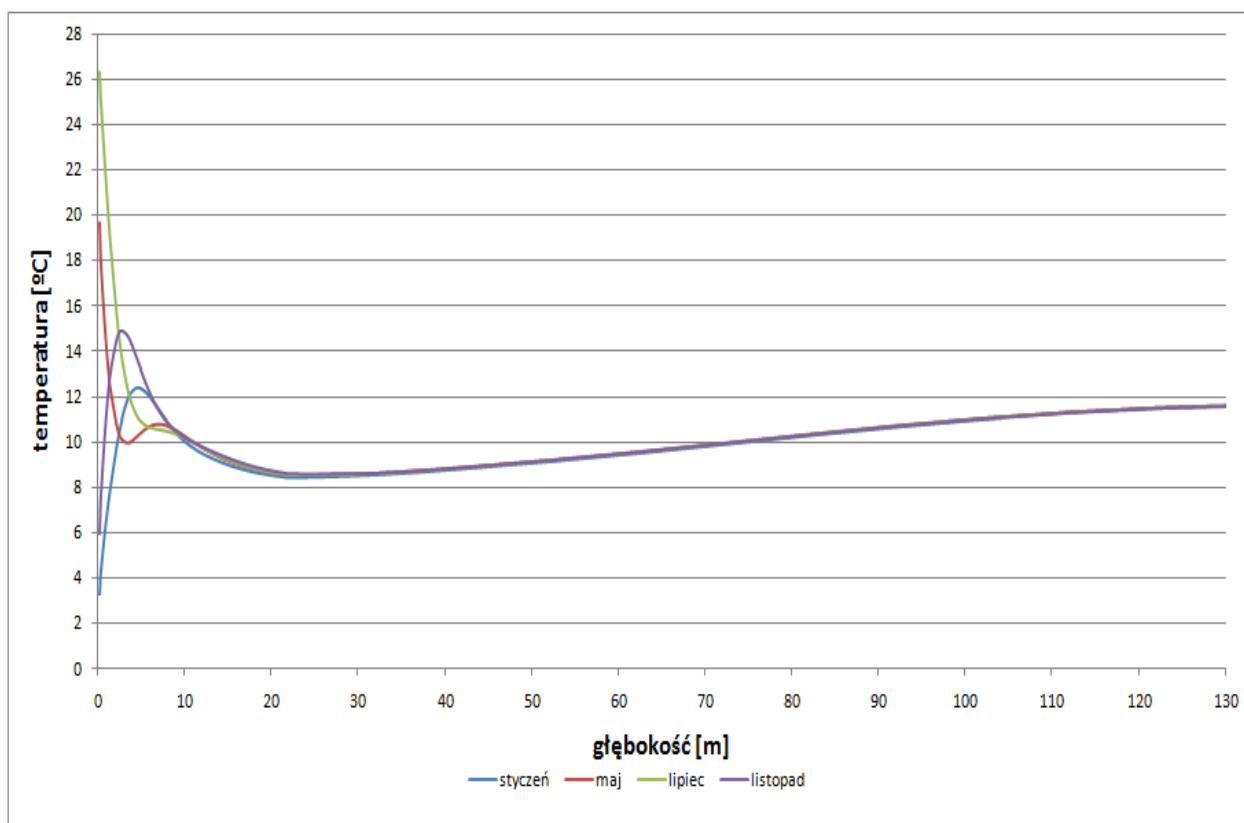
Rys. 4.14. Rozkład temperatury w gruncie zależny od głębokości w kolejnych latach symulacji w styczniu.



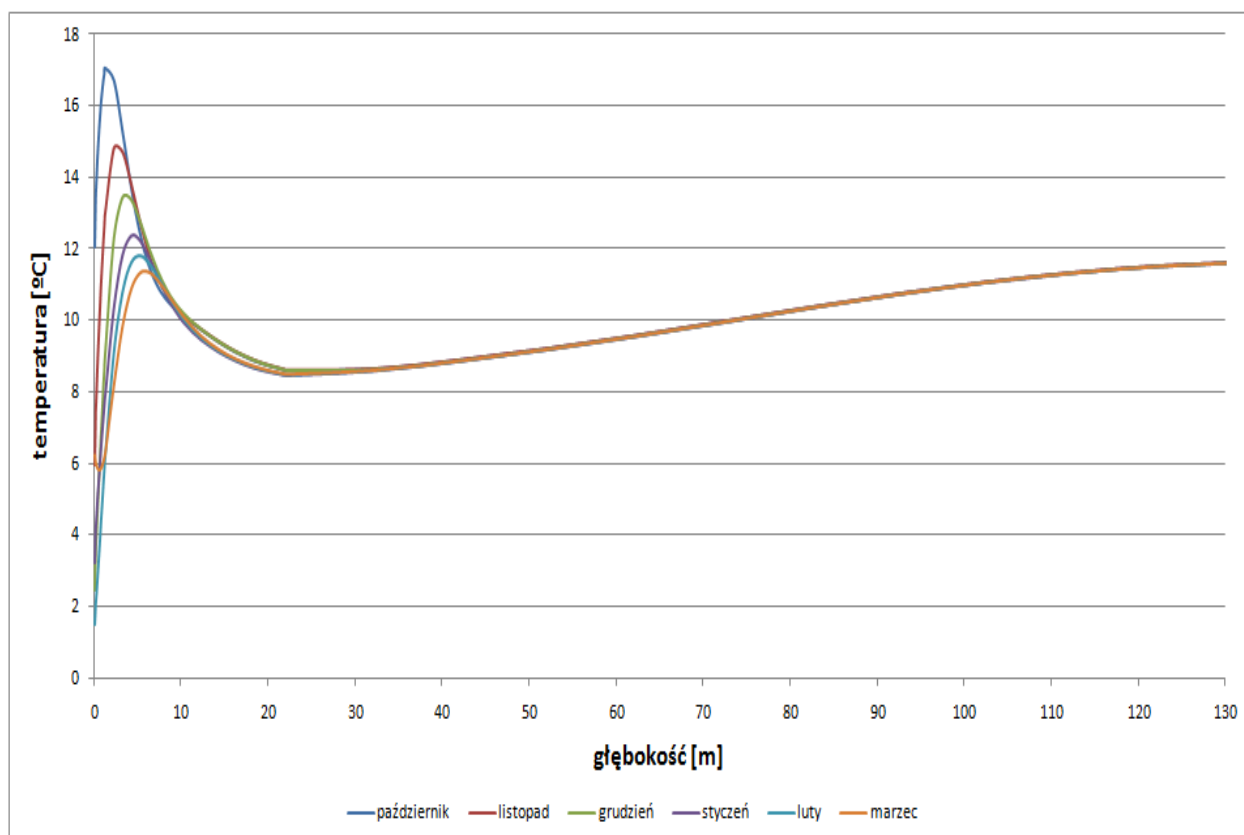
Rys. 4.15. Rozkład temperatury w gruncie zależny od głębokości w kolejnych latach symulacji w miesiącu kwietniu.



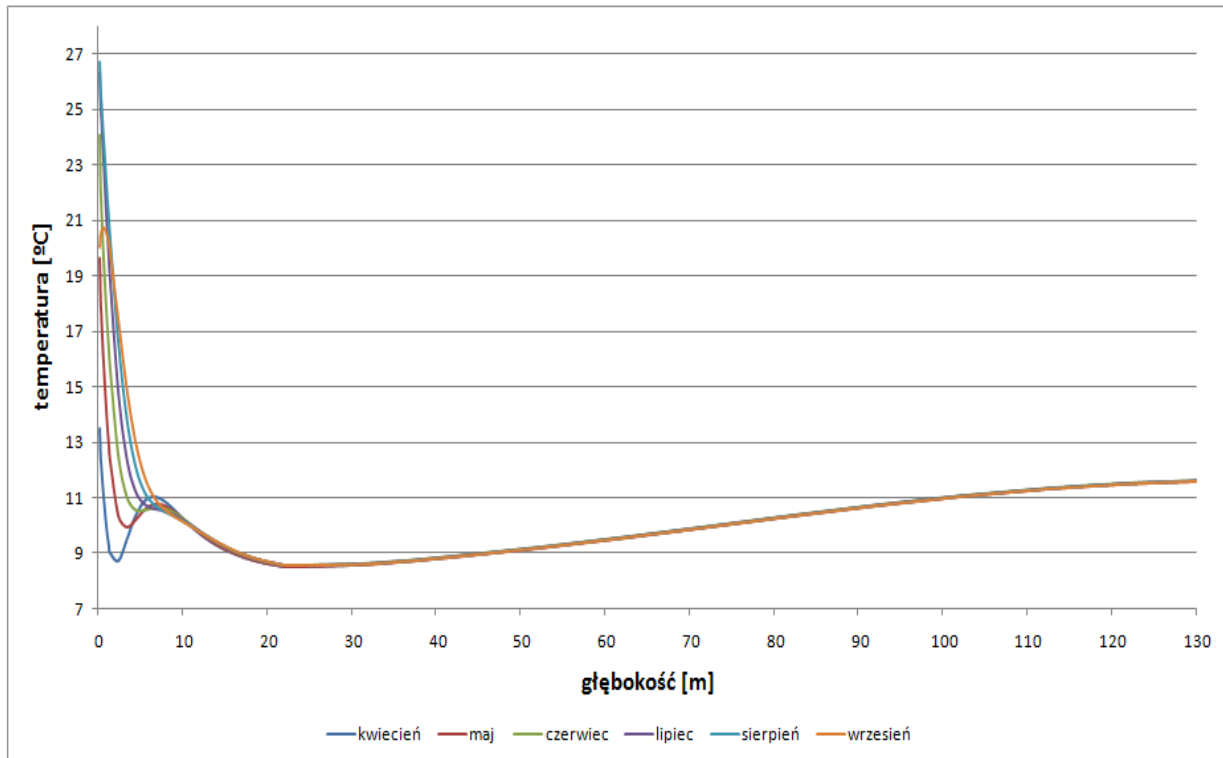
Rys. 4.16. Rozkład temperatury w gruncie zależny od głębokości w kolejnych miesiącach w 5 roku symulacji.



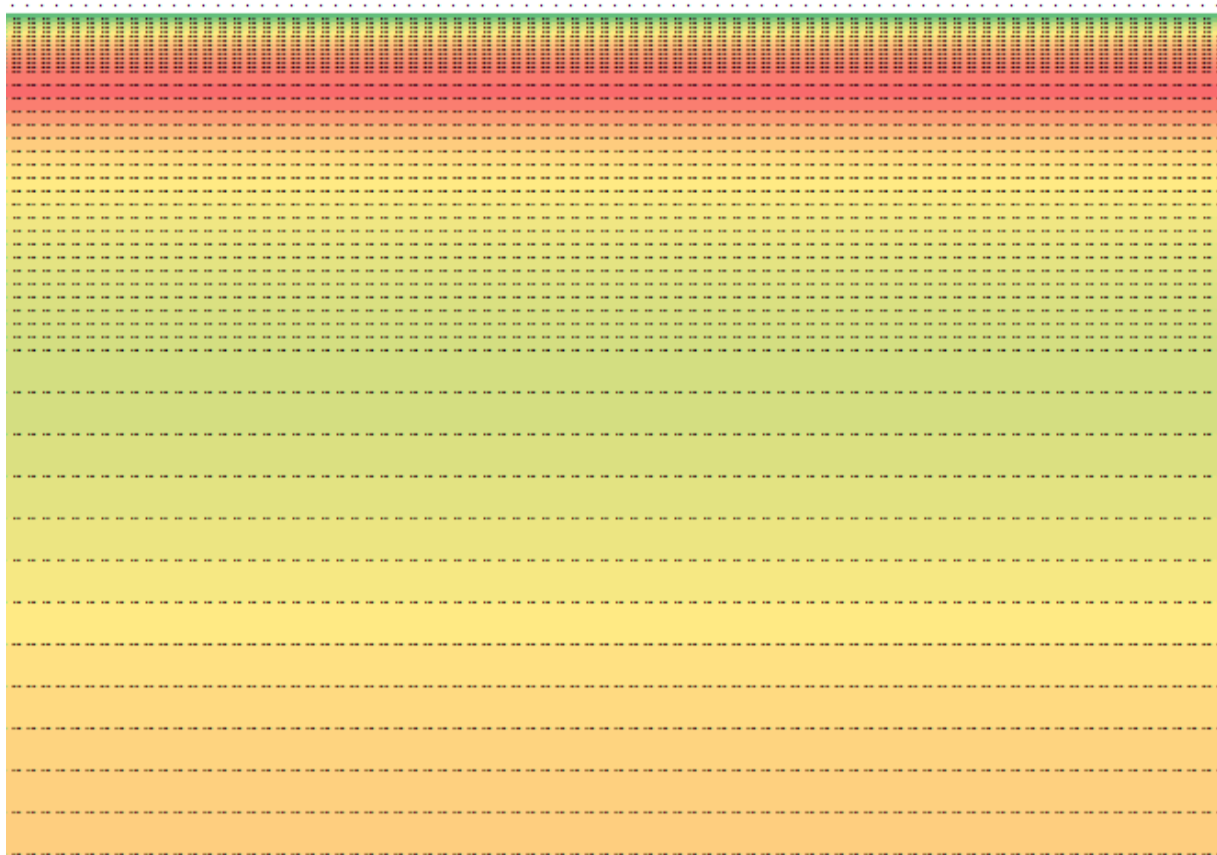
Rys. 4.17. Rozkład temperatury w gruncie zależny od głębokości dla 4 wybranych miesięcy w 5 roku symulacji.



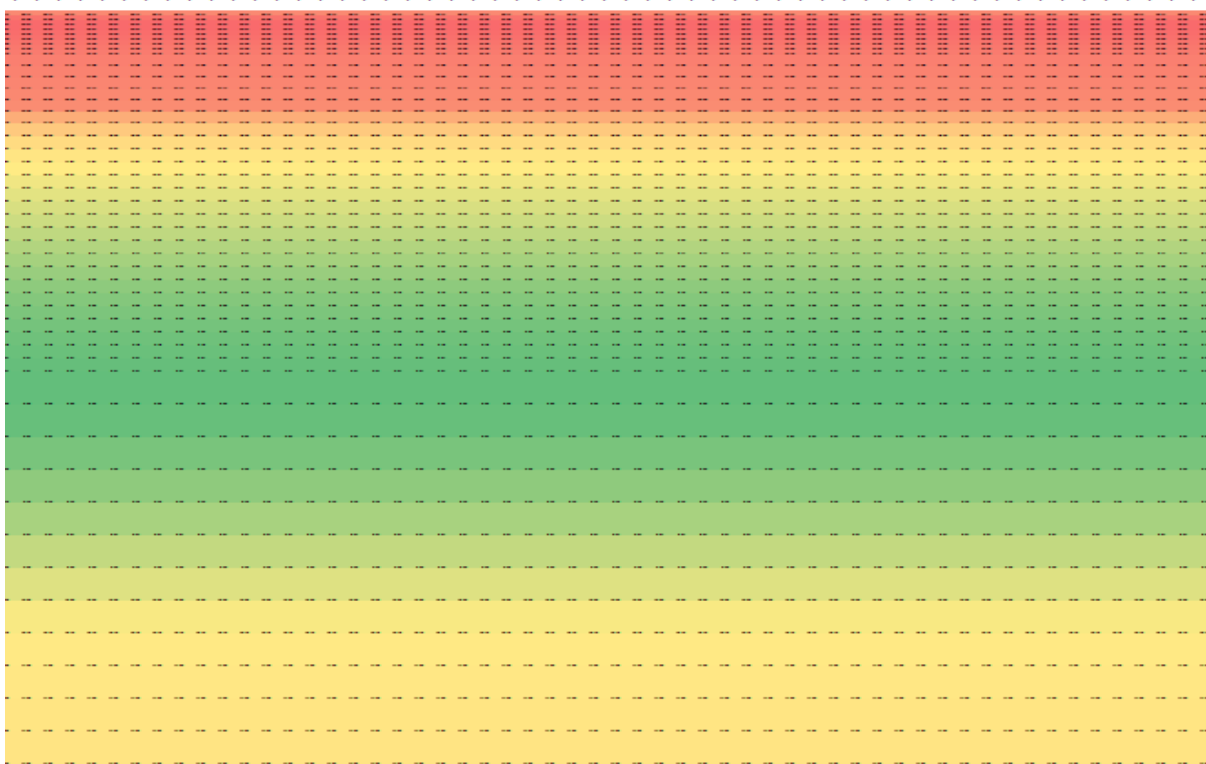
Rys. 4.18. Rozkład temperatury w gruncie zależny od głębokości w kolejnych 6 miesiącach w 5 roku symulacji.



Rys. 4.19. Rozkład temperatury w gruncie zależny od głębokości w kolejnych 6 miesiącach w 5 roku symulacji.



Rys. 4.20. Fragment arkusza kalkulacyjnego przedstawiający rozkład temperatury w gruncie dla 29 października o godzinie 13⁰⁰ w 5 roku symulacji.

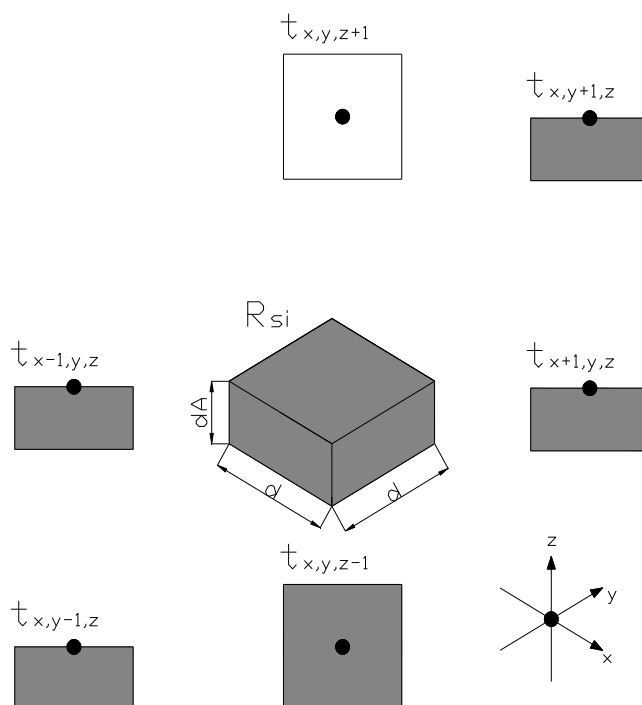


Rys. 4.21. Fragment arkusza kalkulacyjnego przedstawiający rozkład temperatury w gruncie dla 27 sierpnia o godzinie 7⁰⁰ w 5 roku symulacji.

4.2.5. Model numeryczny hali przemysłowej bez izolacji termicznej.

Element 4

Element znajduje się na styku posadzki betonowej z wnętrzem hali przemysłowej.



Rys.4.22. Schemat węzła znajdującego się na styku posadzki betonowej z wnętrzem hali.

- Zmienne:
 $\Delta x = \Delta y = d;$
 $\Delta z = \frac{1}{2} dA$
- Równanie przepływu ciepła w stanie ustalonym w 6 kierunkach w ciałach stałych uwzględniające tylko przewodzenie (4.11).

$$\begin{aligned}
 Q = & \frac{1}{\lambda_p} \cdot \frac{1}{2} \cdot dA \cdot d \cdot (t_{x+1,y,z} - t_{x,y,z}) + \frac{1}{\lambda_p} \cdot \frac{1}{2} \cdot dA \cdot d \cdot (t_{x-1,y,z} - t_{x,y,z}) + \\
 & + \frac{1}{\lambda_p} \cdot \frac{1}{2} \cdot dA \cdot d \cdot (t_{x,y+1,z} - t_{x,y,z}) + \frac{1}{\lambda_p} \cdot \frac{1}{2} \cdot dA \cdot d \cdot (t_{x,y-1,z} - t_{x,y,z}) + \\
 & + \frac{1}{\lambda_p} \cdot d \cdot d \cdot (t_{x,y,z-1} - t_{x,y,z}) + \frac{1}{Rsi} \cdot d \cdot d \cdot (t_i - t_{x,y,z}) = \quad (4.11)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \lambda_p \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot dA \cdot (t_{x+1,y,z} + t_{x-1,y,z} + t_{x,y+1,z} + t_{x,y-1,z} - 4 \cdot t_{x,y,z}) + \frac{d^2}{dA} \cdot (t_{x,y,z-1} - t_{x,y,z}) + \right. \\
 & \left. + \frac{d^2}{Rsi} \cdot (t_i - t_{x,y,z}) \right)
 \end{aligned}$$

- Bilans energii rozpatrywanego elementu (4.12)

$$\begin{aligned}
 Q \cdot \Delta \tau &= m \cdot c \cdot (t'_{x,y,z} - t_{x,y,z}) \\
 m &= \rho \cdot V = \rho_p \cdot \frac{dA}{2} \cdot d \cdot d \quad (4.12)
 \end{aligned}$$

Podstawiając (4.11) do (4.12) otrzymano:

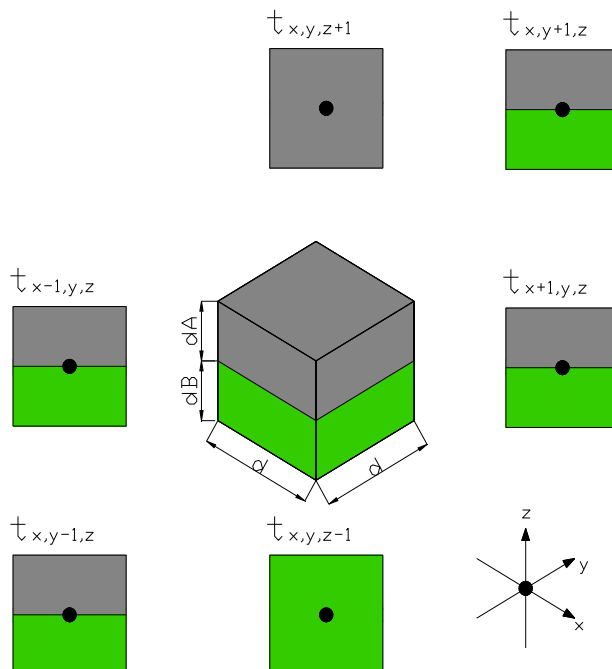
$$\begin{aligned}
 & \lambda_p \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot dA \cdot (t_{x+1,y,z} + t_{x-1,y,z} + t_{x,y+1,z} + t_{x,y-1,z} - 4 \cdot t_{x,y,z}) + \frac{d^2}{dA} \cdot (t_{x,y,z-1} - t_{x,y,z}) + \right. \\
 & \left. + \frac{d^2}{Rsi} \cdot (t_i - t_{x,y,z}) \right) \cdot \Delta \tau = \rho_p \cdot c_p \cdot \frac{dA}{2} \cdot d \cdot (t'_{x,y,z} - t_{x,y,z}) \quad (4.13)
 \end{aligned}$$

- Po przekształceniu :

$$\begin{aligned}
 t'_{x,y,z} &= t_{x,y,z} + \frac{2 \cdot \lambda_p}{\rho_p \cdot c_p \cdot dA} \cdot \frac{\Delta \tau}{d^2} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot dA \cdot (t_{x+1,y,z} + t_{x-1,y,z} + t_{x,y+1,z} + t_{x,y-1,z} - 4 \cdot t_{x,y,z}) \right. \\
 & \left. + \frac{d^2}{dA} \cdot (t_{x,y,z-1} - t_{x,y,z}) + \frac{d^2}{Rsi} \cdot (t_i - t_{x,y,z}) \right] \quad (4.14)
 \end{aligned}$$

Element 5

Element łączący warstwę gruntu rodzimego z posadzką betonową. W skład elementu wchodzi w $\frac{1}{2}$ objętości elementu grunt rodzimy, oraz w $\frac{1}{2}$ objętości posadzka betonowa stanowiąca wierzchnią warstwę podłogi przemysłowej.



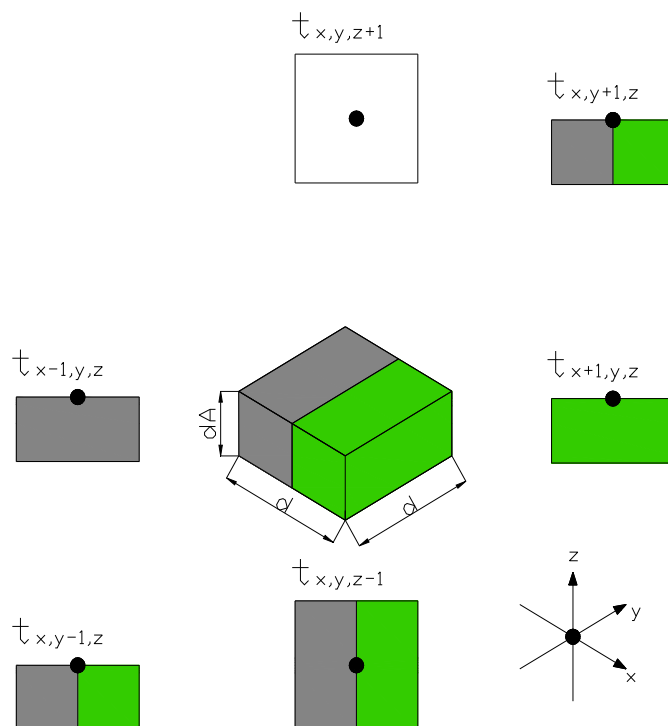
Rys.4.23. Schemat węzła łączący warstwę gruntu rodzimego z posadzką betonową.

- Ostatecznie :

$$\begin{aligned}
 t_{x,y,z} = & t_{x,y,z} + \frac{2}{dA \cdot \rho_p \cdot c_p + dB \cdot \rho_g \cdot c_g} \cdot \frac{\Delta \tau}{d^2} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot (\lambda_p \cdot dA + \lambda_g \cdot dB) \cdot (t_{x+1,y,z} + t_{x-1,y,z} + t_{x,y+1,z} + t_{x,y-1,z} - 4 \cdot t_{x,y,z}) + \right. \\
 & \left. + d^2 \cdot \left(\frac{\lambda_p}{dA} \cdot (t_{x,y,z+1} - t_{x,y,z}) + \frac{\lambda_g}{dB} \cdot (t_{x,y,z-1} - t_{x,y,z}) \right) \right] \quad (4.15)
 \end{aligned}$$

Element 6

Element łączący warstwę gruntu rodzimego z posadzką betonową. W skład elementu wchodzi w $\frac{1}{2}$ objętości elementu grunt rodzimy, oraz w $\frac{1}{2}$ objętości posadzka betonowa, (w obliczeniach założono że obie warstwy stykają się z powietrzem zewnętrznym).



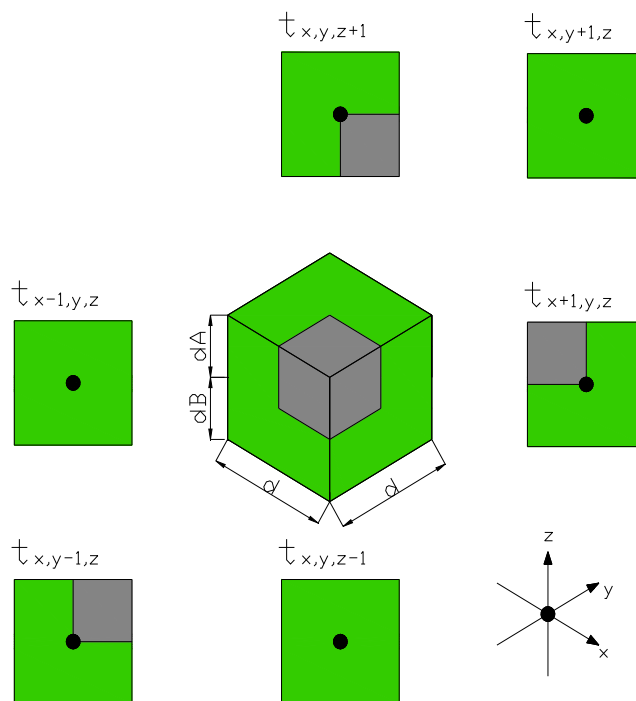
Rys.4.24. Schemat węzła łączący warstwę gruntu rodzimego z posadzką betonową.

- Ostatecznie :

$$\begin{aligned}
 t'_{x,y,z} = & t_{x,y,z} + \frac{4}{(\rho_p \cdot c_p + \rho_g \cdot c_g) \cdot dA} \cdot \frac{\Delta\tau}{d^2} \cdot \left(\frac{1}{2} dA \cdot ((\lambda_p + \lambda_g) \cdot (t_{x+1,y,z} + t_{x-1,y,z} - 2 \cdot t_{x,y,z})) + \right. \\
 & \left. \frac{1}{2} \cdot (\lambda_p + \lambda_g) \cdot (t_{x,y+1,z} + t_{x,y-1,z} - 2 \cdot t_{x,y,z}) \right) + \frac{d^2}{dA} \cdot \frac{1}{2} \cdot (\lambda_p + \lambda_g) \cdot (t_{x,y,z+1} - t_{x,y,z}) + \\
 & + d^2 \cdot (\alpha_w \cdot (t_e - t_{x,y,z}) + ITH1 - B1)
 \end{aligned} \tag{4.16}$$

Element 7

Element łączący warstwę gruntu rodzimego z posadzką betonową. W skład elementu wchodzi w $\frac{7}{8}$ objętości elementu grunt rodzimy, oraz w $\frac{1}{8}$ objętości posadzka betonowa, obie warstwy stykają się z powietrzem zewnętrznym.



Rys.4.25. Schemat węzła łączący warstwę gruntu rodzimego z posadzką betonową.

- Ostatecznie:

$$\begin{aligned}
 t'_{x,y,z} = & t_{x,y,z} + \frac{8}{d_A \cdot \rho_p \cdot c_p + \rho_g \cdot c_g \cdot (4 \cdot d_B + 3 \cdot d_A)} \cdot \frac{\Delta\tau}{d^2} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \lambda_g \cdot (dA + dB) \cdot (t_{x-1,y,z} + t_{x,y+1,z} - 2 \cdot t_{x,y,z}) \right) + \\
 & + \frac{1}{2} \cdot (\lambda_g \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot dA + dB \right) + \lambda_p \cdot dA) \cdot (t_{x+1,y,z} + t_{x,y-1,z} - 2 \cdot t_{x,y,z}) + \lambda_g \cdot \frac{d^2}{dB} \cdot (t_{x,y,z-1} - t_{x,y,z}) + \\
 & + \frac{1}{4} \frac{d^2}{dA} \cdot (3 \cdot \lambda_g + \lambda_p) \cdot (t_{x,y,z+1} - t_{x,y,z})
 \end{aligned} \tag{4.17}$$

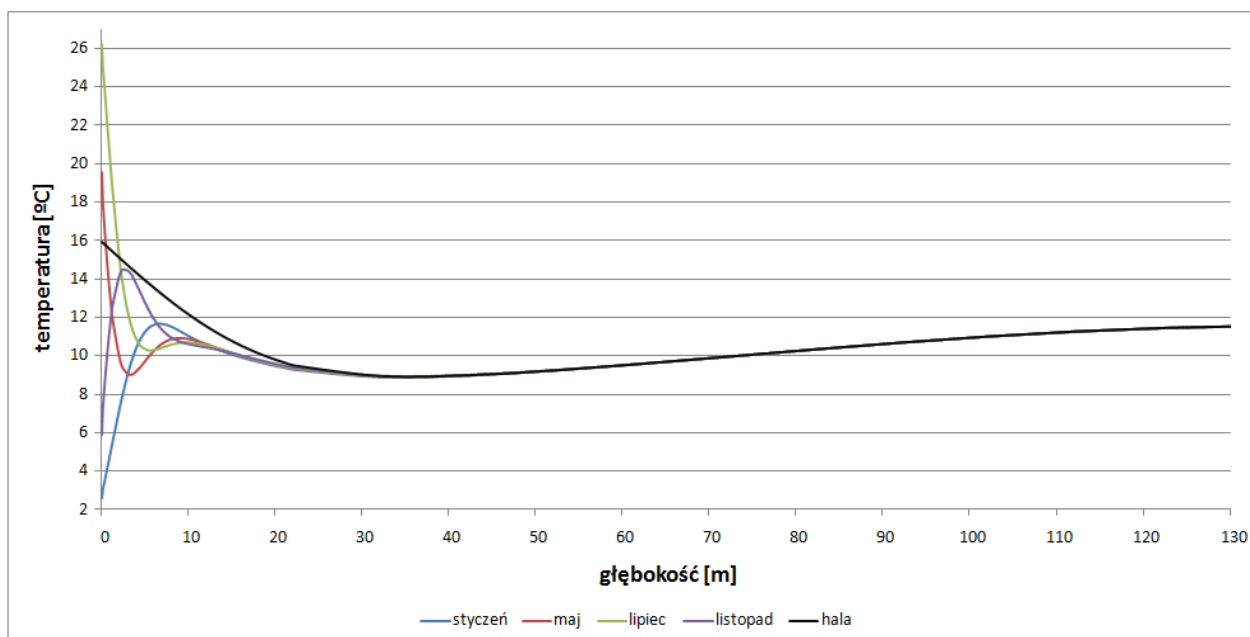
4.2.6. Opis działania modelu – hala bez izolacji termicznej.

We wcześniej wymodelowanym gruncie zostały zmienione wzory w miejscach pojawienia się posadzki. Model rozpoczął symulacje dla kolejnych 5 lat dokładnie w ten sam sposób jak w czasie symulacji samego gruntu. Jedynie temperatura w hali pozostaje stała przez cały rok.

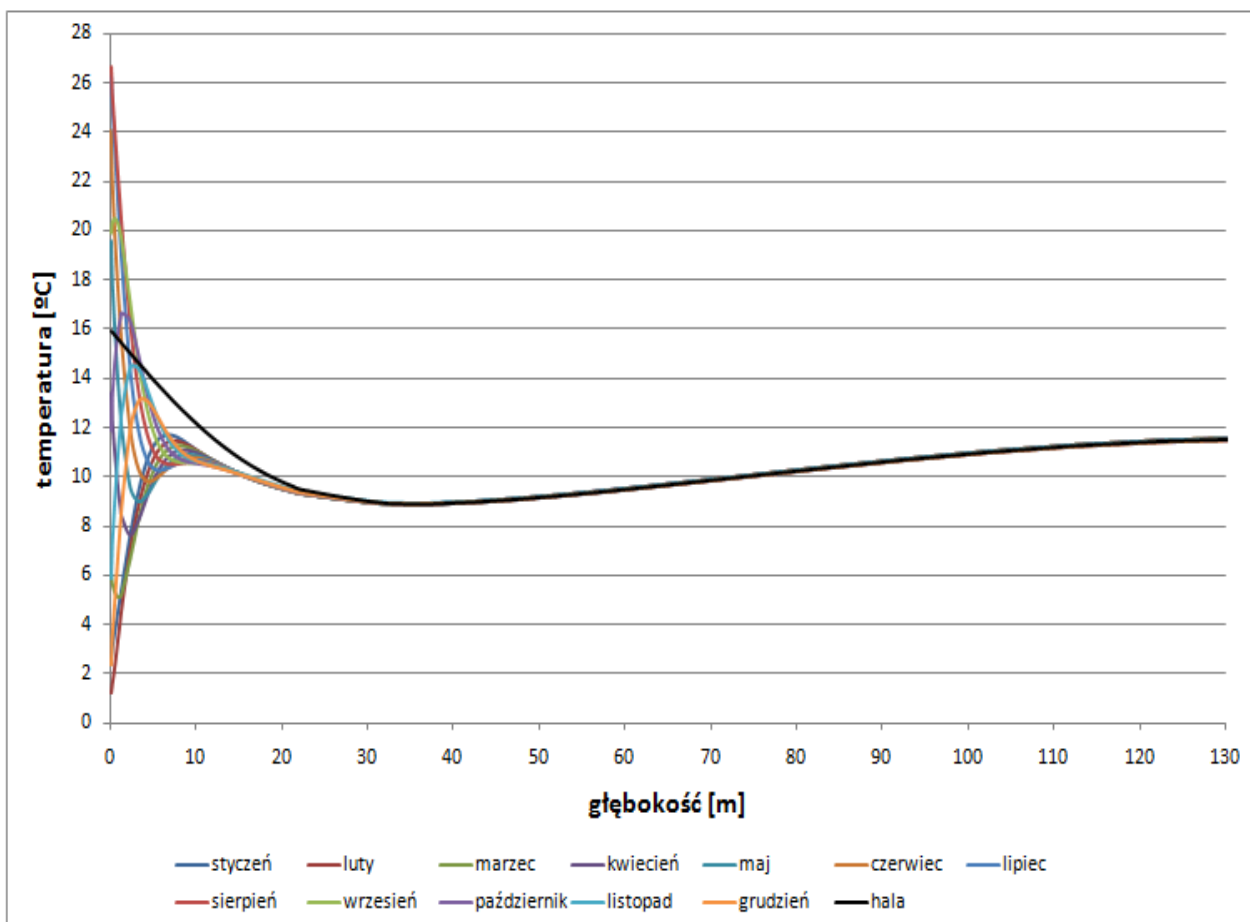
Tab.4.2.Zestawienie parametrów materiałów wchodzących w skład modelu.

Rodzaj materiału	λ [W/mK]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/kgK]	d [m]
posadzka betonowa	1,7	2400	840	0,2
grunt (glina piaszczysta)	0,7	1800	840	130
Temperatura [°C]				
wewnątrz hali	16			

4.2.7. Wyniki obliczeń po 5 letnim okresie symulacji – hala bez izolacji termicznej.



Rys. 4.26. Rozkład temperatury w gruncie zależny od głębokości pod halą przemysłową oraz poza nią dla 4 wybranych miesięcy w 5 roku symulacji.



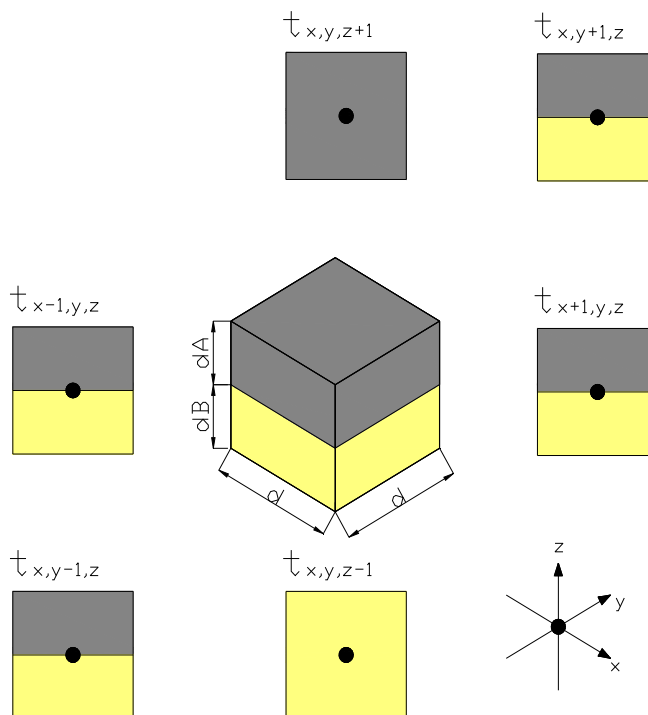
Rys. 4.27. Rozkład temperatury w gruncie zależny od głębokości pod halą przemysłową oraz poza nią dla 5 roku symulacji.

Wyżej zamieszczone wykresy powstały na podstawie wyznaczenia średniomiesięcznych rozkładów temperatury w gruncie w zależności od głębokości.

4.2.8. Model numeryczny hali przemysłowej z izolacją termiczną

Element 8

Element znajduje się na styku posadzki betonowej z izolacją termiczną. W skład elementu wchodzi w $\frac{1}{2}$ objętości elementu posadzka betonowa, oraz w $\frac{1}{2}$ objętości izolacji termicznej.



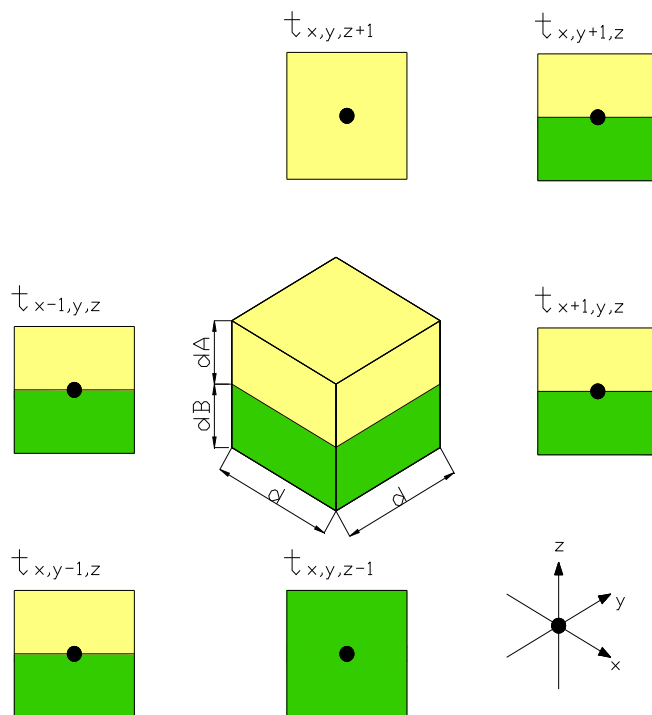
Rys.4.28. Schemat węzła łączący warstwę posadzki betonowej z izolacją termiczną.

- Ostatecznie :

$$t_{x,y,z} = t_{x,y,z} + \frac{2}{dA \cdot \rho_p \cdot c_p + dB \cdot \rho_s \cdot c_s} \cdot \frac{\Delta\tau}{d^2} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot (\lambda_p \cdot dA + \lambda_s \cdot dB) \cdot (t_{x+1,y,z} + t_{x-1,y,z} + t_{x,y+1,z} + t_{x,y-1,z} - 4 \cdot t_{x,y,z}) + d^2 \cdot \left(\frac{\lambda_p}{dA} \cdot (t_{x,y,z+1} - t_{x,y,z}) + \frac{\lambda_s}{dB} \cdot (t_{x,y,z-1} - t_{x,y,z}) \right) \right] \quad (4.18)$$

Element 9

Element znajduje się na styku izolacji termicznej z gruntem. W skład elementu wchodzi w $\frac{1}{2}$ objętości elementu grunt rodzimy, oraz w $\frac{1}{2}$ objętości izolacji termicznej.



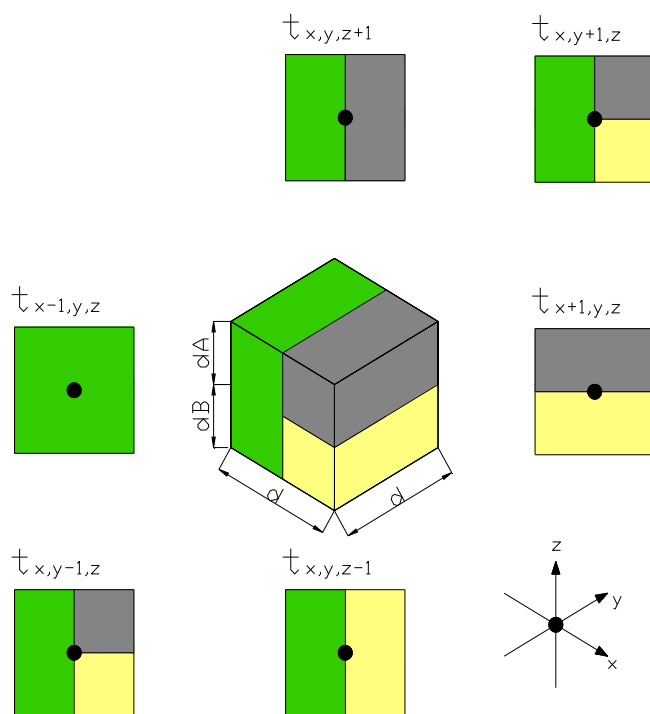
Rys.4.29. Schemat węzła łączący warstwę gruntu rodzimego z izolacją termiczną.

- Ostatecznie :

$$t'_{x,y,z} = t_{x,y,z} + \frac{2}{dA \cdot \rho_s \cdot c_s + dB \cdot \rho_g \cdot c_g} \cdot \frac{\Delta\tau}{d^2} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot (\lambda_s \cdot dA + \lambda_g \cdot dB) \cdot (t_{x+1,y,z} + t_{x-1,y,z} + t_{x,y+1,z} + t_{x,y-1,z} - 4 \cdot t_{x,y,z}) + d^2 \cdot \left(\frac{\lambda_s}{dA} \cdot (t_{x,y,z+1} - t_{x,y,z}) + \frac{\lambda_g}{dB} \cdot (t_{x,y,z-1} - t_{x,y,z}) \right) \right] \quad (4.19)$$

Element 10

Element znajduje się na styku trzech materiałów. W skład elementu wchodzi w $\frac{1}{2}$ objętości elementu grunt rodzimy, w $\frac{1}{4}$ objętości posadzka betonowa stanowiąca wierzchnią warstwę podłogi przemysłowej, oraz w $\frac{1}{4}$ objętości izolacja termiczna.



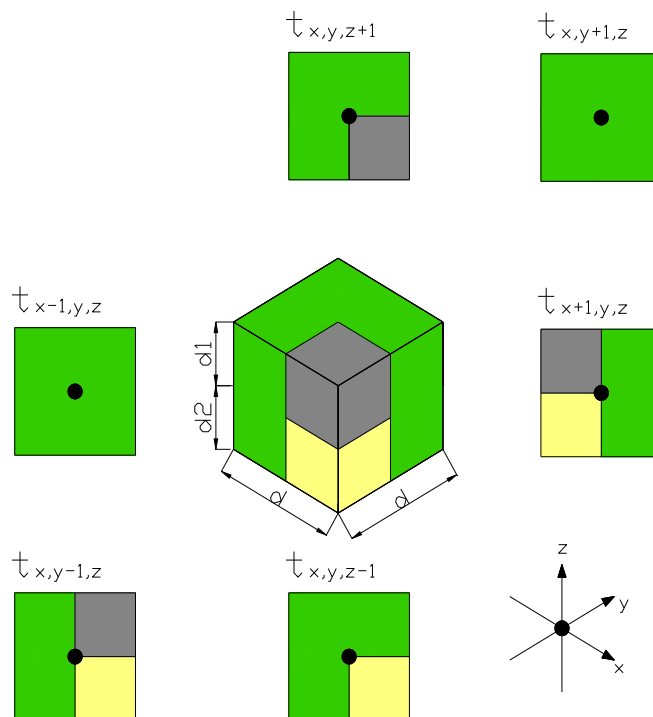
Rys.4.30. Schemat węzła łączący 3 różne materiały.

- Ostatecznie :

$$t_{x,y,z} = t_{x,y,z} + \frac{2}{dA \cdot \rho_s \cdot c_s + dB \cdot \rho_g \cdot c_g} \cdot \frac{\Delta\tau}{d^2} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot (\lambda_s \cdot dA + \lambda_g \cdot dB) \cdot (t_{x+1,y,z} + t_{x-1,y,z} + t_{x,y+1,z} + t_{x,y-1,z} - 4 \cdot t_{x,y,z}) + d^2 \cdot \left(\frac{\lambda_s}{dA} \cdot (t_{x,y,z+1} - t_{x,y,z}) + \frac{\lambda_g}{dB} \cdot (t_{x,y,z-1} - t_{x,y,z}) \right) \right] \quad (4.20)$$

Element 11

Element znajduje się na styku trzech materiałów. W skład elementu wchodzi w objętości $\frac{3}{4}$ elementu grunt rodzimy, w $\frac{1}{8}$ objętości posadzka betonowa stanowiąca wierzchnią warstwę podłogi przemysłowej, oraz w $\frac{1}{8}$ objętości izolacja termiczna.



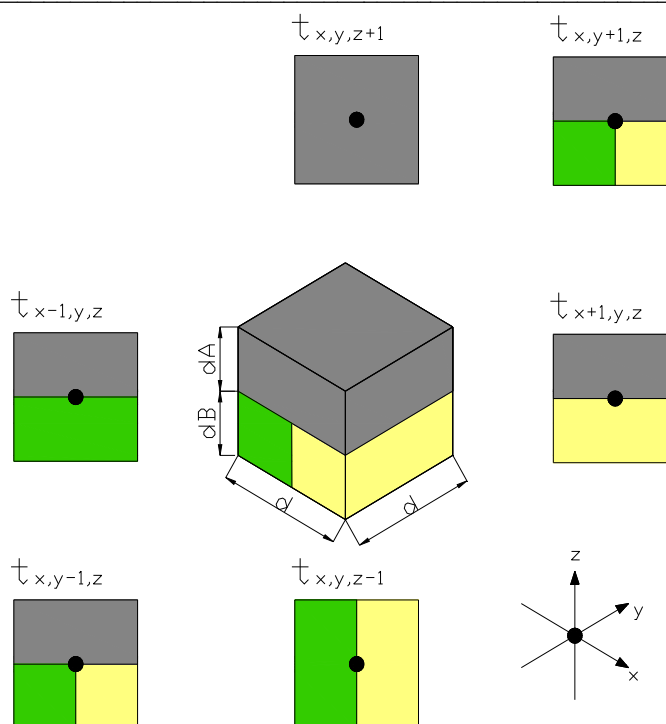
Rys.4.31. Schemat węzła łączący 3 różne materiały.

- Ostatecznie :

$$\begin{aligned}
 t'_{x,y,z} = & t_{x,y,z} + \frac{8}{3 \cdot (dA + dB) \cdot \rho_g \cdot c_g + dA \cdot \rho_s \cdot c_s + dB \cdot \rho_p \cdot c_p} \cdot \frac{\Delta \tau}{d^2} \cdot \left[\frac{1}{4} \cdot ((\lambda_g \cdot (dA + dB) + \lambda_p \cdot dA + \lambda_s \cdot dB) \cdot \right. \\
 & \cdot (t_{x+1,y,z} + t_{x,y-1,z} - 2 \cdot t_{x,y,z}) + (2 \cdot \lambda_g \cdot (dA + dB) \cdot (t_{x-1,y,z} + t_{x,y+1,z} - 2 \cdot t_{x,y,z}) + d^2 \cdot \left(\frac{3 \cdot \lambda_g + \lambda_p}{dA} \cdot (t_{x,y,z+1} - t_{x,y,z}) + \right. \\
 & \left. \left. + \frac{3 \cdot \lambda_g + \lambda_p}{dB} \cdot (t_{x,y,z-1} - t_{x,y,z}) \right) \right] \quad (4.21)
 \end{aligned}$$

Element 12

Element znajduje się na styku trzech materiałów. W skład elementu wchodzi w $\frac{1}{2}$ objętości elementu posadzka betonowa stanowiąca wierzchnią warstwę podłogi przemysłowej, w $\frac{1}{4}$ objętości izolacja termiczna, oraz w $\frac{1}{4}$ objętości grunt rodzimy.



Rys.4.32. Schemat węzła łączący 3 różne materiały.

- Ostatecznie :

$$\begin{aligned}
 t'_{x,y,z} = & t_{x,y,z} + \frac{4}{2 \cdot dA \cdot \rho_p \cdot c_p + dB \cdot (\rho_g \cdot c_g + \rho_s \cdot c_s)} \cdot \frac{\Delta\tau}{d^2} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot (\lambda_p \cdot dA + \lambda_s \cdot dB) \cdot (t_{x+1,y,z} - t_{x,y,z}) + \right. \\
 & + \frac{1}{2} \cdot (\lambda_p \cdot dA + \lambda_g \cdot dB) \cdot (t_{x-1,y,z} - t_{x,y,z}) + \frac{1}{4} \cdot (2 \cdot dA \cdot \lambda_p + dB \cdot (\lambda_g + \lambda_s)) \cdot (t_{x,y+1,z} + t_{x,y-1,z} - 2 \cdot t_{x,y,z}) + \\
 & \left. + \frac{d^2}{dA} \cdot \lambda_p \cdot (t_{x,y,z+1} - t_{x,y,z}) + \frac{1}{2} \cdot \frac{d^2}{dA} \cdot (\lambda_g + \lambda_s) \cdot (t_{x,y,z-1} - t_{x,y,z}) \right] \quad (4.22)
 \end{aligned}$$

4.2.9. Opis działania modelu – hala z izolacją termiczną

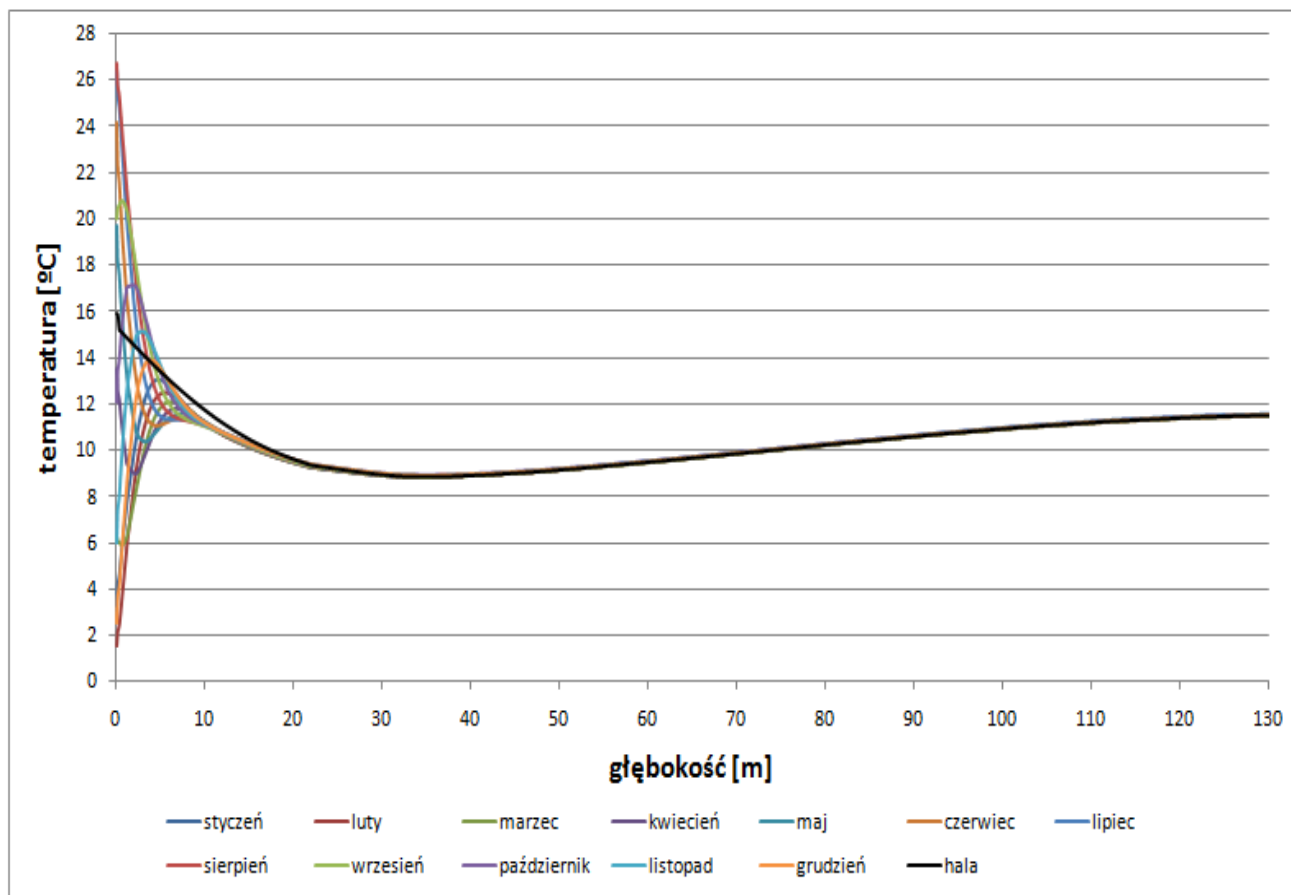
We wcześniej wymodelowanym gruncie zostały zmienione wzory w miejscach pojawienia się posadzki oraz izolacji termicznej znajdującej się pod nią. Model rozpoczął symulacje dla kolejnych 5 lat dokładnie w ten sam sposób jak w czasie symulacji samego gruntu. Jedynie temperatura w hali pozostaje stała przez cały rok. Symulacje przeprowadzono w 3 wariantach :

- stosując izolacje o grubości 5 cm,
- stosując izolacje o grubości 20 cm,
- stosując izolacje obwodową o grubości 10 cm w pasie 1 m po obwodzie hali.

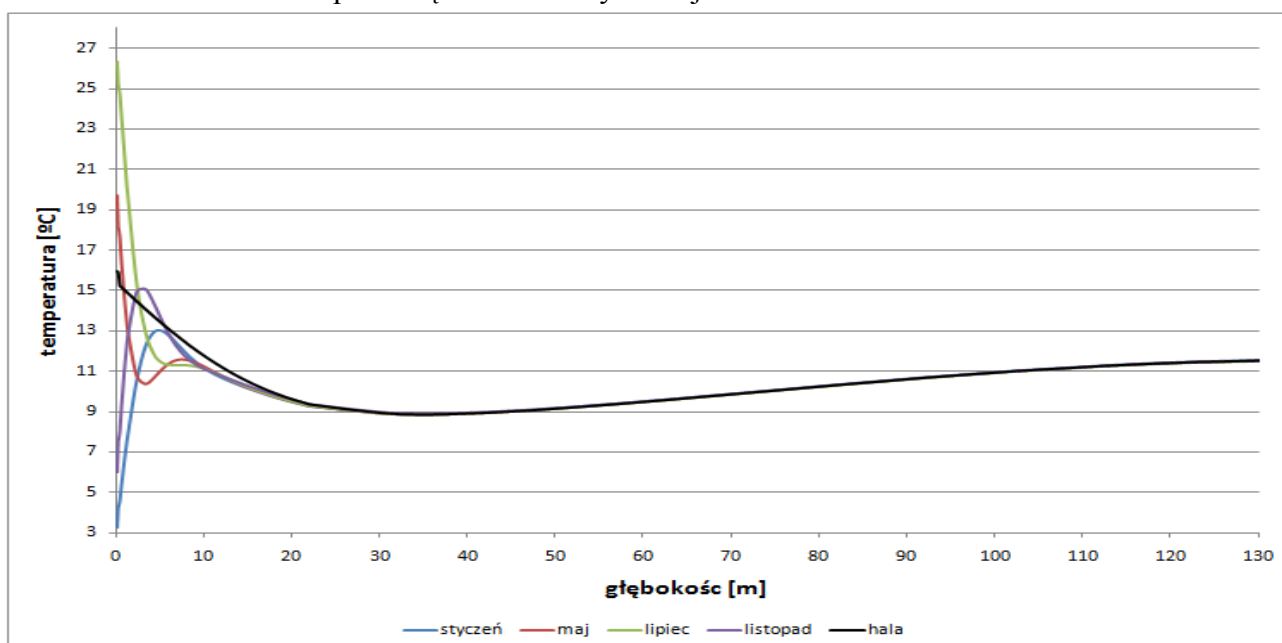
Tab.4.3.Zestawienie parametrów materiałów wchodzących w skład modelu.

	λ	ρ	cp	d
	[W/mK]	[kg/m ³]	[J/kgK]	[m]
posadzka betonowa	1,7	2400	840	0,2
styropian	0,042	40	840	0,05÷0,2
grunt (głina piaszczysta)	0,7	1800	840	130
	Temperatura [°C]			
wewnątrz hali	16			

4.2.10. Wyniki obliczeń po 5 latach symulacji – hala z izolacją termiczną
 a) izolacja termiczna o grubości 5 cm

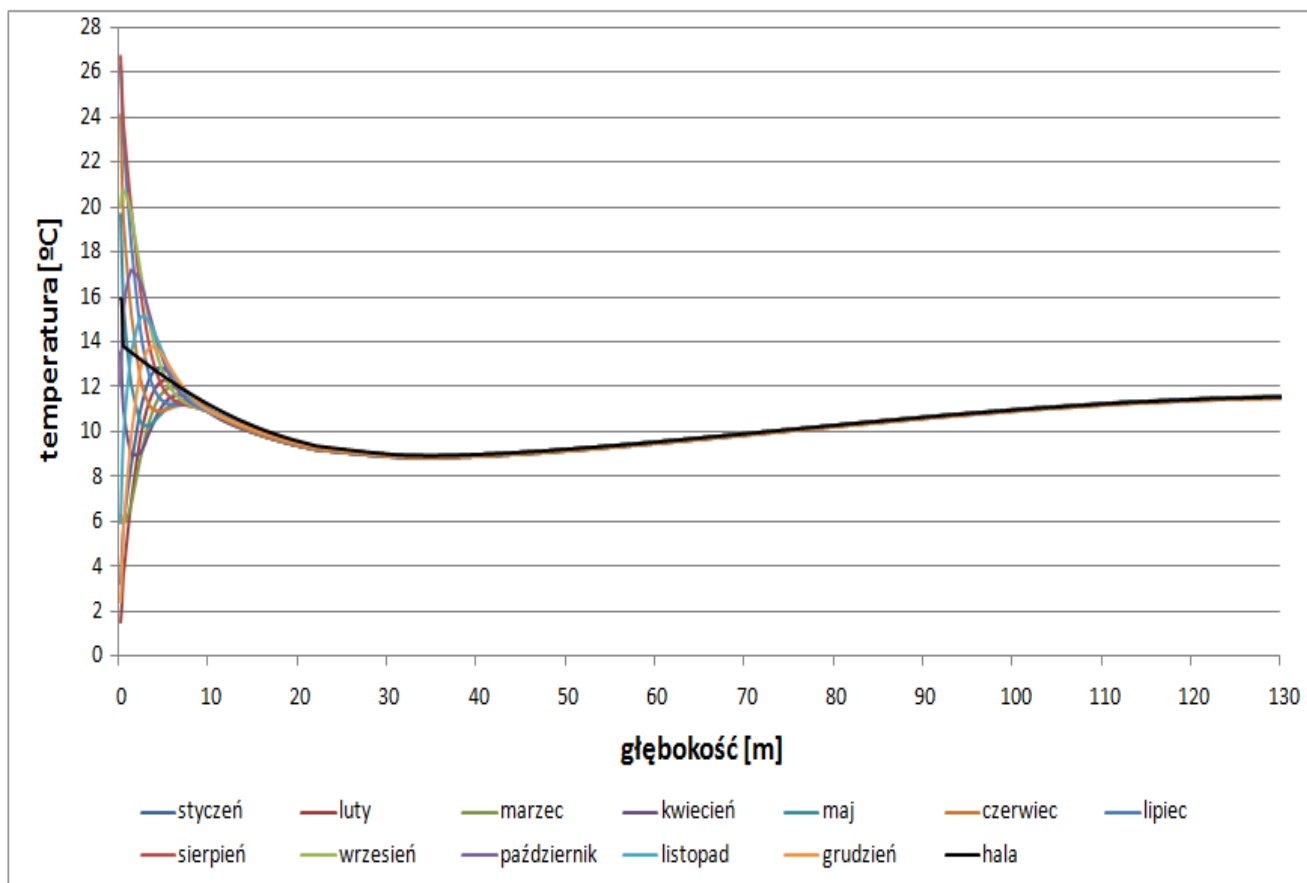


Rys. 4.33. Rozkład temperatury w gruncie zależny od głębokości pod halą przemysłową oraz poza nią dla 5 roku symulacji.

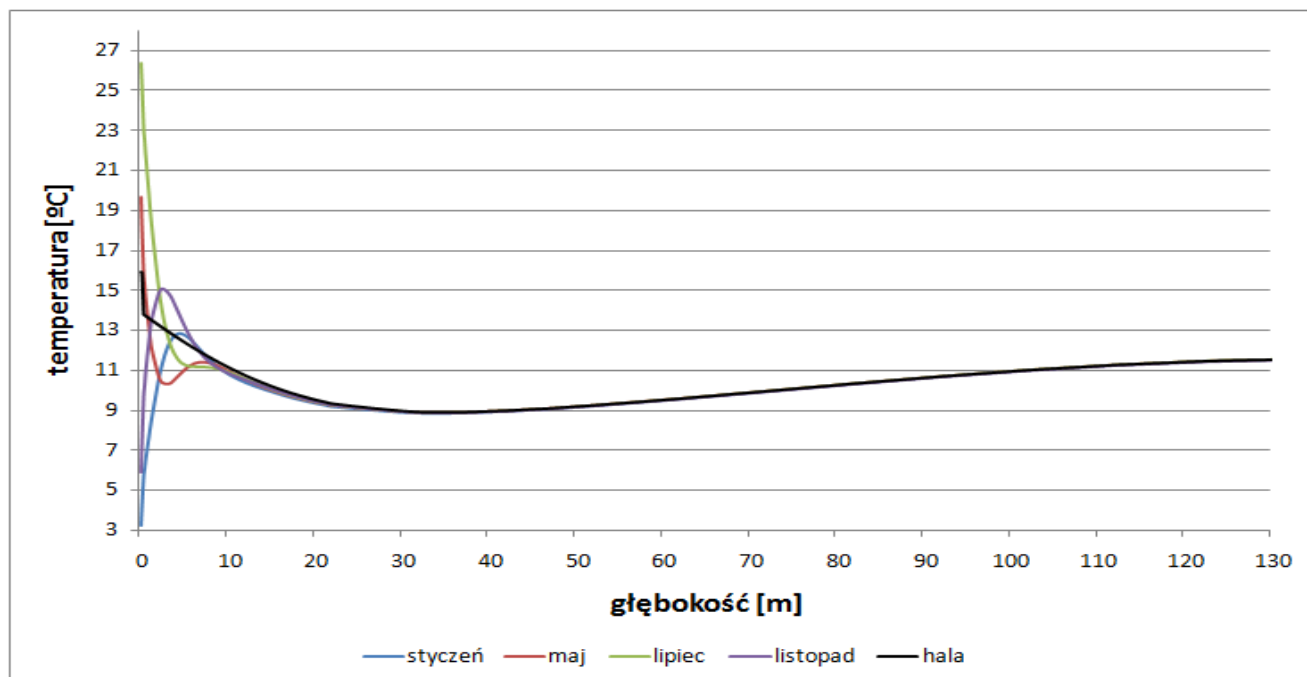


Rys. 4.34. Rozkład temperatury w gruncie zależny od głębokości pod halą przemysłową oraz poza nią dla 4 wybranych miesięcy w 5 roku symulacji.

b) izolacja termiczna o grubości 20 cm

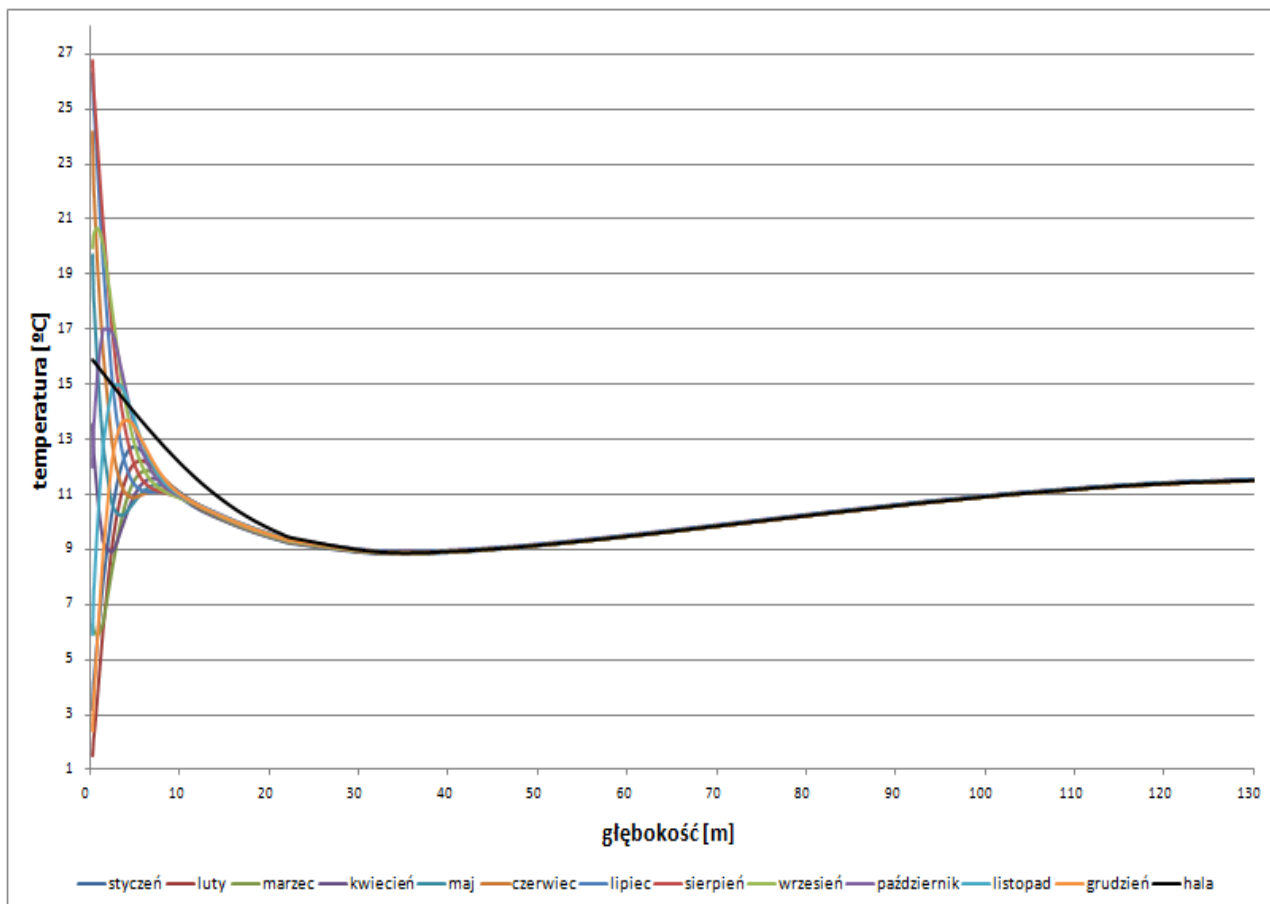


Rys. 4.35. Rozkład temperatury w gruncie zależny od głębokości pod halą przemysłową oraz poza nią dla 5 roku symulacji.

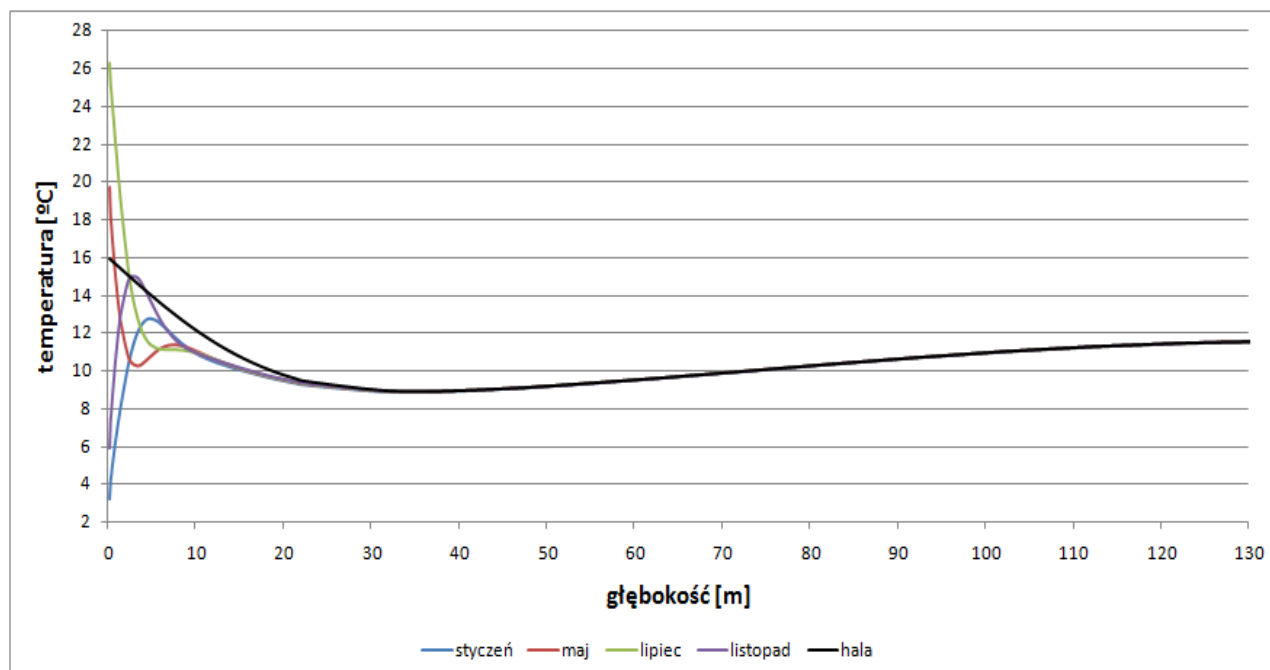


Rys. 4.36. Rozkład temperatury w gruncie zależny od głębokości pod halą przemysłową oraz poza nią dla 4 wybranych miesięcy w 5 roku symulacji.

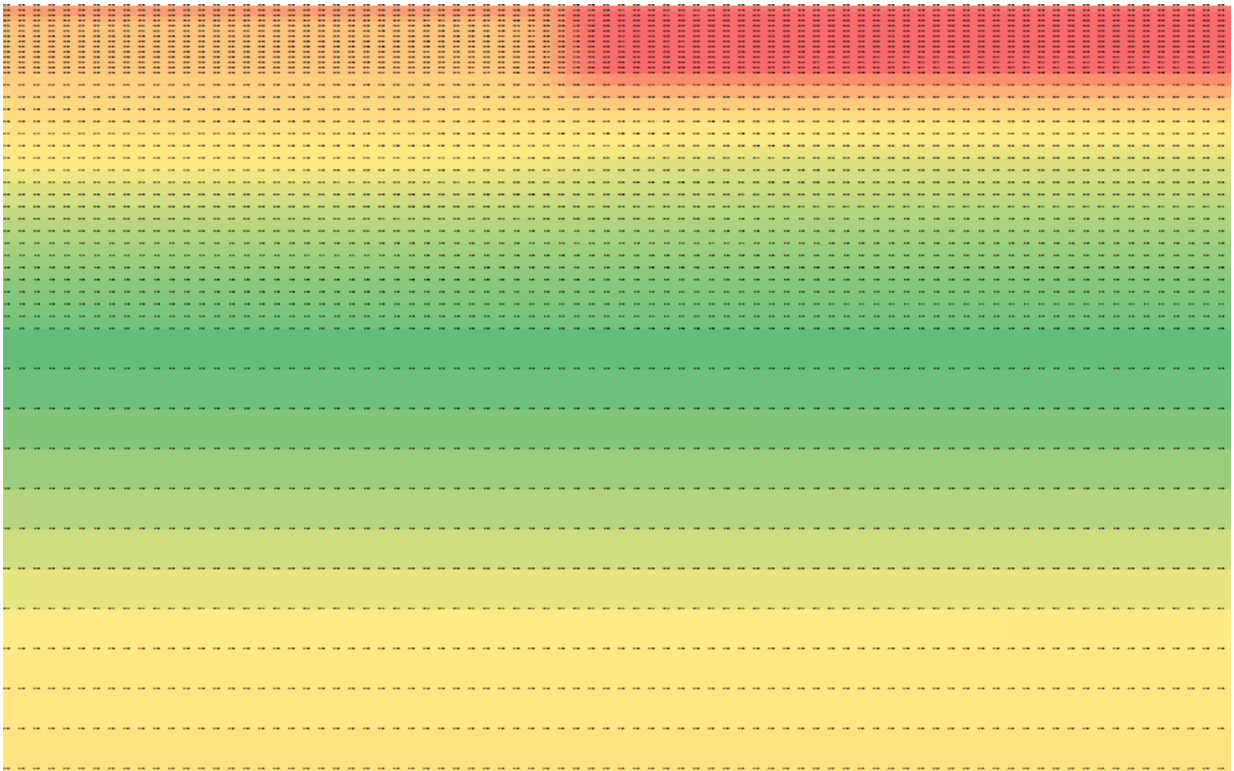
c) izolacja termiczna obwodowa o grubości 10 cm – pas o szerokości 1 m po obwodzie hali



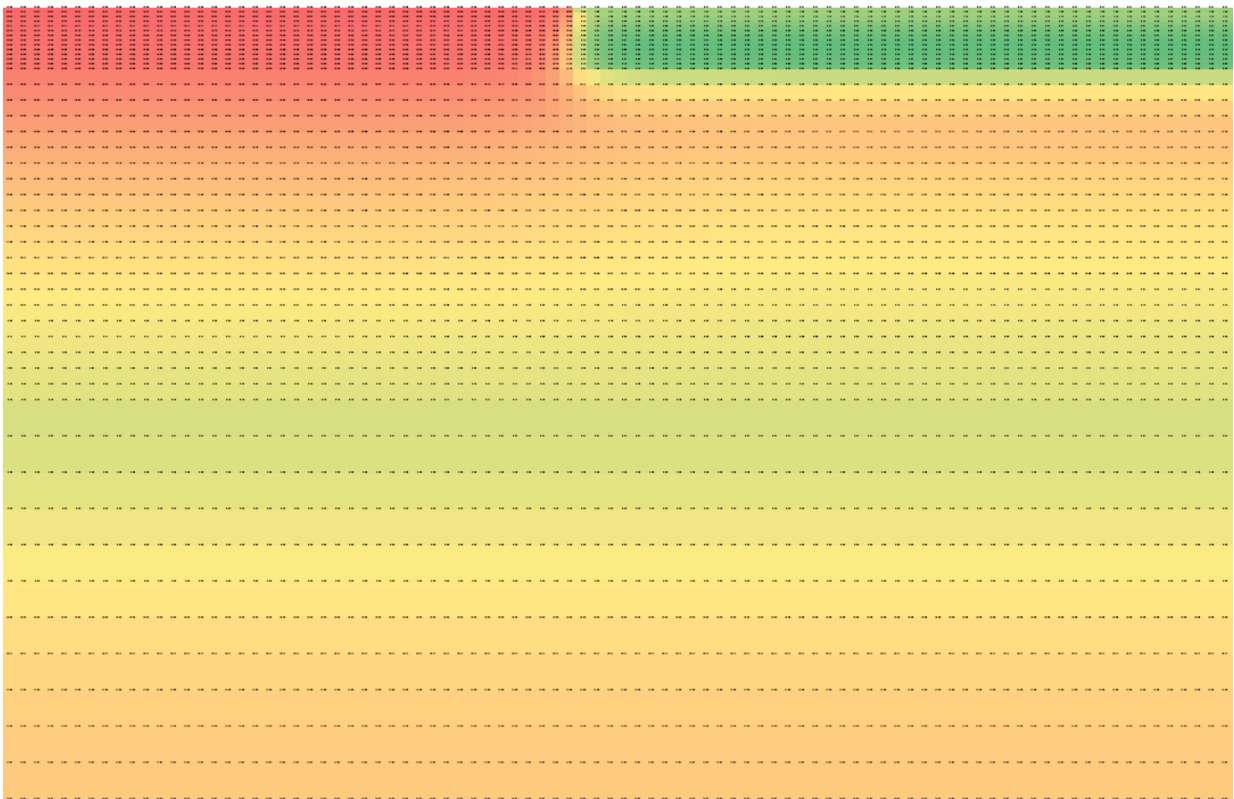
Rys. 4.37. Rozkład temperatury w gruncie zależny od głębokości pod halą przemysłową oraz poza nią dla 5 roku symulacji.



Rys. 4.38. Rozkład temperatury w gruncie zależny od głębokości pod halą przemysłową oraz poza nią dla 4 wybranych miesięcy w 5 roku symulacji.



Rys. 4.39. Fragment arkusza kalkulacyjnego przedstawiający rozkład temperatury w gruncie dla 24 września o godzinie 20⁰⁰ w 5 roku symulacji dla 20 cm izolacji cieplnej.

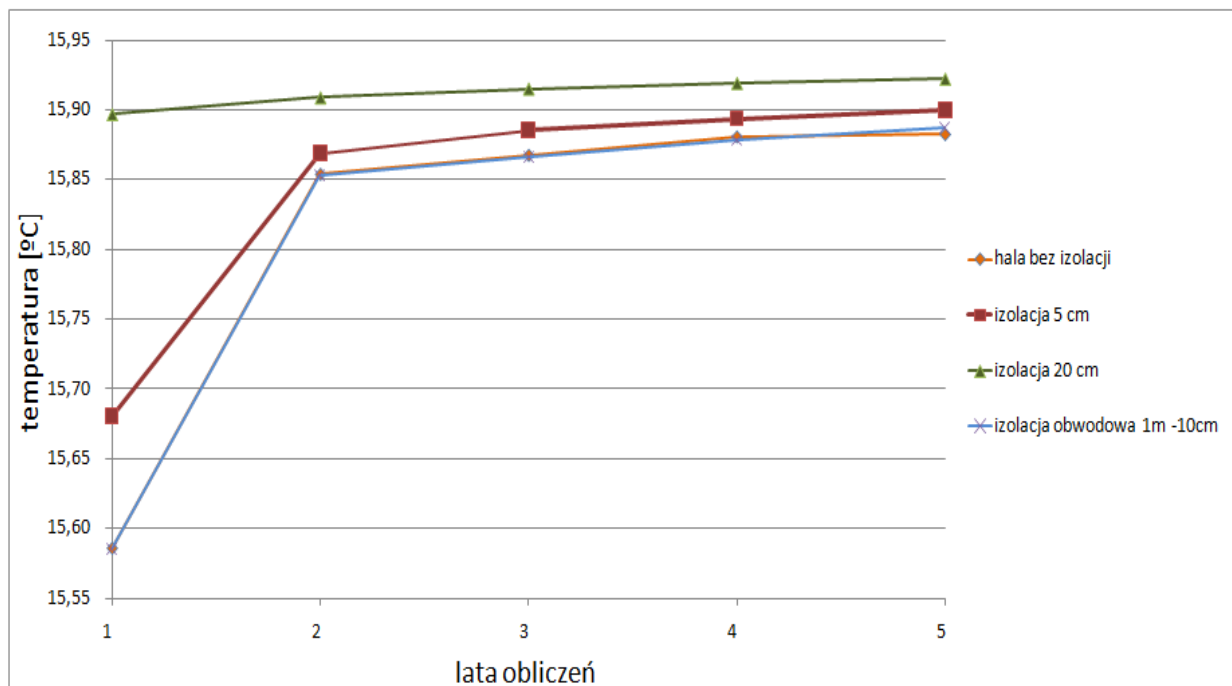


Rys. 4.40. Fragment arkusza kalkulacyjnego przedstawiający rozkład temperatury w gruncie dla 29 grudnia o godzinie 6⁰⁰ w 5 roku symulacji dla hali bez izolacji cieplnej.

5. Analiza wpływu izolacji podłogi na projektowe obciążenie cieplne i na roczne zużycie energii do ogrzewania

5.1. Analiza zużycia energii

Podczas symulacji dla okresu 5 lat, temperatura posadzki zmieniała się w następujący sposób:

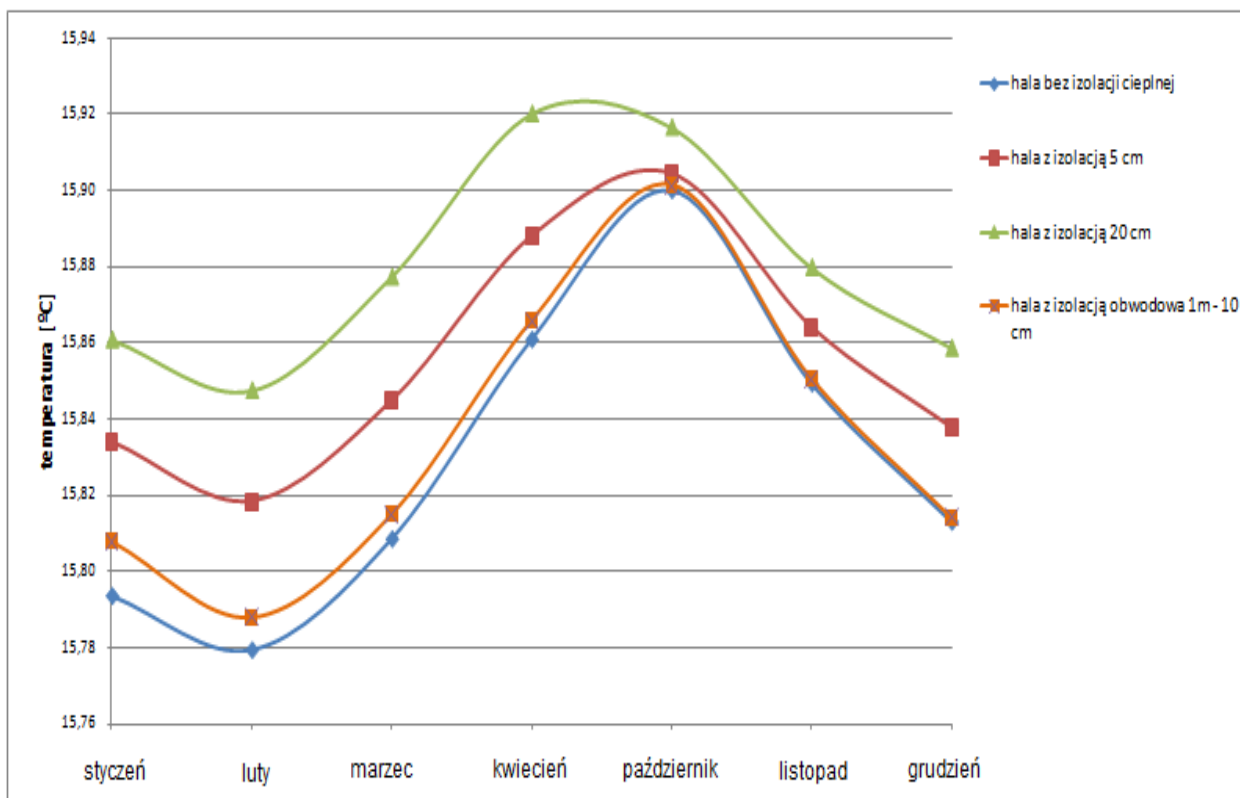


Rys.5.1. Średnia temperatura posadzki w poszczególnych latach obliczeń.

W pierwszym roku iteracji różnica średniej temperatury posadzki dzieląca wariant podłogi bez izolacji termicznej od podłogi z maksymalną rozpatrywaną izolacją cieplną jest równa 0,31 °C. Natomiast w kolejnych okresach obliczeniowych różnica ta zmniejsza się stopniowo do wartości 0,04 °C. Po trzecim roku obliczeń zmiany wartości średniej temperatury posadzki dla wszystkich wariantów ulegają niewielkim zmianom.

Tabela.5.1. Zestawienie średnich temperatur posadzki w 5 roku iteracji dla poszczególnych miesięcy w sezonie grzewczym (dla Poznania).

miesiąc grzewczy	hala bez izolacji cieplnej	hala z izolacją 5 cm	hala z izolacją 20 cm	hala z izolacją obwodowa 1m - 10 cm
styczeń	15,79	15,83	15,86	15,81
luty	15,78	15,82	15,85	15,79
marzec	15,81	15,84	15,88	15,81
kwiecień	15,86	15,89	15,92	15,87
październik	15,90	15,90	15,92	15,90
listopad	15,85	15,86	15,88	15,85
grudzień	15,81	15,84	15,86	15,81



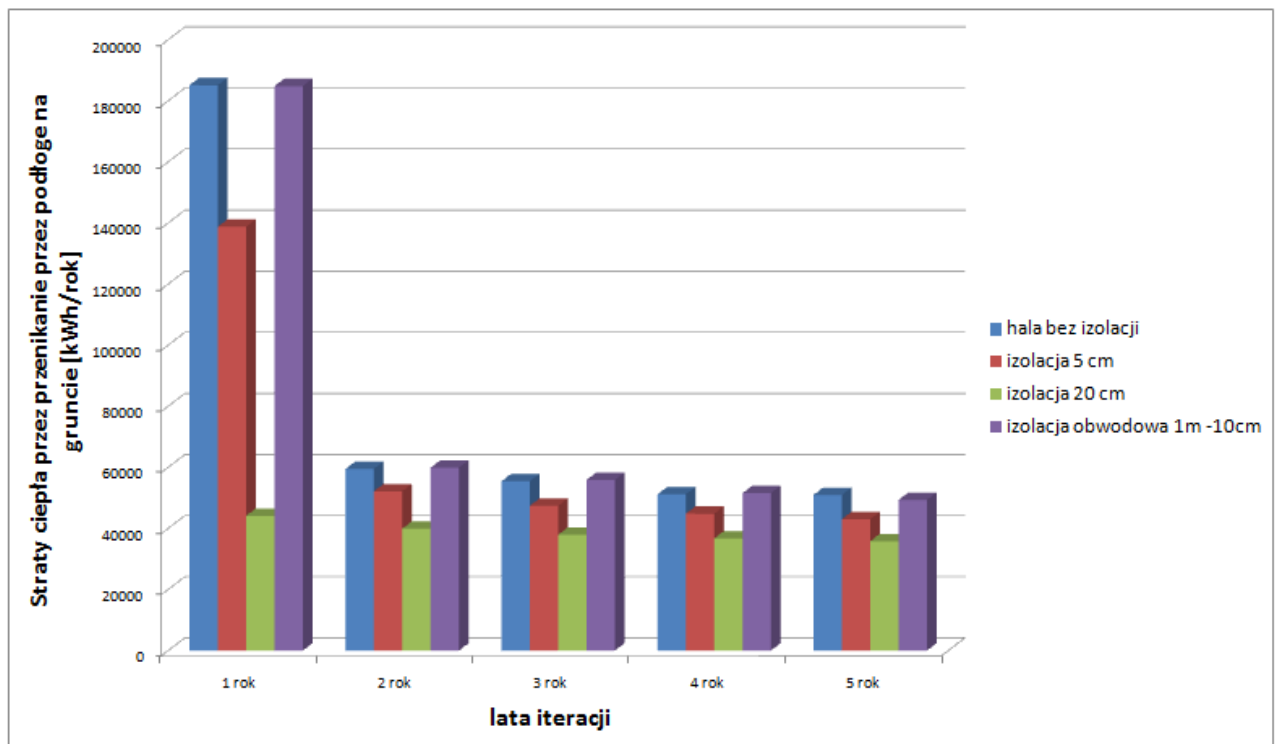
Rys.5.2. Wartość średniej temperatury posadzki w 5 roku symulacji dla poszczególnych miesięcy w sezonie grzewczym.

Wyznaczona średnia temperatura posadzki posłuży do wyznaczenia straty ciepła przez przenikanie przez podłogę na gruncie:

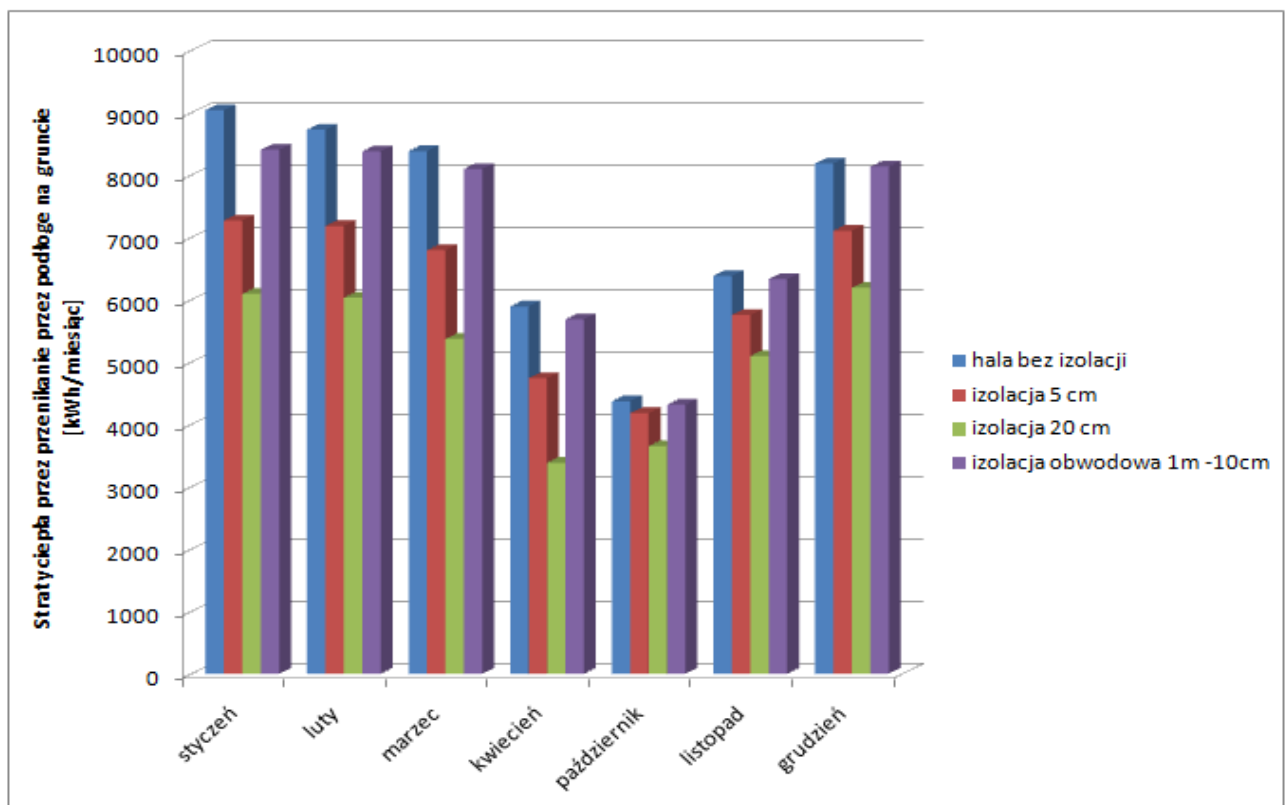
$$Q_p = 0,024 \cdot \frac{1}{R_{si}} \cdot A_p \cdot (t_i - t_{srp}) \cdot Ld \quad \left[\frac{kWh}{rok} \right] \quad (5.1)$$

gdzie:

- Q_p – straty ciepła przez przenikanie przez podłogę na gruncie $\left[\frac{kWh}{rok} \right]$,
- R_{si} – opór przejmowania ciepła na wewnętrznej powierzchni przegrody $\left(0,17 \frac{m^2 \cdot K}{W} \right)$,
- A_p – powierzchnia posadzki $(10\,000\ m^2)$,
- t_i – temperatura wewnątrz hali $(16\ ^\circ C)$,
- t_{srp} – średnia temperatura posadzki $[^\circ C]$,
- Ld – liczba dni sezonu grzewczego (dla Poznania 212 dni).



Rys.5.3. Straty ciepła przez przenikane przez podłogę na gruncie w poszczególnych latach obliczeń (wartości średnioroczne).



Rys.5.4. Straty ciepła przez przenikane przez podłogę na gruncie w poszczególnych miesiącach sezonu grzewczego w 5 roku obliczeń (wartości średniomiesięczne).

5.2. Uproszczona analiza ekonomiczna

W poniższych tabelach zamieszczono obliczenia kosztu materiału niezbędnego do wykonania izolacji termicznej w poszczególnych wariantach. W obliczeniach nie uwzględniono kosztów robocizny, transportu materiału oraz prac przygotowawczych. W tabeli 5.2. uwzględniono sumę strat ciepła przez podłogę na gruncie dla 5- letniego okresu symulacji.

Tabela.5.2. Zestawienie obliczeń oszczędności kosztów ogrzewania dla poszczególnych wariantów izolacji cieplnej.

Rodzaj izolacji cieplnej	A_p [m ²]	Cena 1m ³ styropianu [zł]	Koszt materiału izolacyjnego [zł]	Różnica straty ciepła przez podłogę w porównaniu do podłogi nieizolowanej [kWh/rok]	Cena gazu [zł/kWh]	Oszczędność kosztu ogrzewania uwzględniający tylko straty przez podłogę [zł]
Izolacja 5cm	10000	150	75000	76005,03	0,2	15201,01
Izolacja 20 cm	10000		300000	207672,73		41534,55
Izolacja obwodowa 1m - grubość10cm	396		5940	676,92		135,38

Natomiast w tabeli 5.3. pomniejszono koszt inwestycji o oszczędności na ogrzewaniu z pierwszych 5 lat „istnienia hali” oraz obliczono zwrot kosztów przyjmując straty ciepła w 5 roku symulacji za stałe w kolejnych latach.

Tabela.5.3. Zestawienie obliczeń oszczędności kosztów ogrzewania dla poszczególnych wariantów oraz czas zwrotu nakładów na izolacje cieplną.

Rodzaj izolacji cieplnej	A_p [m ²]	Cena 1m ³ styropianu [zł]	Koszt materiału izolacyjnego [zł]	Różnica straty ciepła przez podłogę w porównaniu do podłogi nieizolowanej [kWh/rok]	Cena gazu [zł/kWh]	Oszczędność kosztu ogrzewania uwzględniający tylko straty przez podłogę	Czas zwrot kosztów izolacji cieplnej [lata]
Izolacja 5cm	10000	150	59798,99	7946,20	0,2	1589,24	38
Izolacja 20 cm	10000		258465,45	15145,53		3029,11	85
Izolacja obwodowa 1m - grubość10cm	396		5804,62	1622,36		324,47	18

Ostatecznie czasy zwrotu nakładów poniesionych na izolacje termiczną podłogi na gruncie wynoszą:

- izolacja pod całą powierzchnią posadzki o grubości 5 cm – **43 lata**
- izolacja pod całą powierzchnią posadzki o grubości 20 cm – **90 lata**
- izolacja obwodowa – pas o szerokości 1 m wzdłuż obwodu posadzki przemysłowej o grubości 10 cm – **23 lata**

6. Podsumowanie i wnioski

Celem niniejszej pracy było przeanalizowanie czterech wariantów izolacji termicznej podłogi na gruncie w hali przemysłowej oraz wybór najbardziej efektywnego z nich. Podstawą realizacji danego zagadnienia był model gruntu odpowiadający rzeczywistym warunkom. Model ten był symulowany przez 5 lat aż do otrzymania okresowo powtarzalnego rozkładu temperatury w zależności od głębokości. Analiza średniej temperatury posadzki przeprowadzona dla czterech wariantów izolacji cieplnej wykazała nieznaczne różnice pomiędzy izolacją poziomą o grubości 10 cm w pasie 1 m po obwodzie podłogi a brakiem izolacji cieplnej. Najlepszymi wynikami charakteryzuje się izolacja termiczna o grubości 20 cm pod całą powierzchnią podłogi.

Największe straty dla wszystkich wariantów izolacji występują w 1 roku „istnienia” hali, jest to najbardziej widoczne dla podłogi bez ocieplenia oraz z izolacją obwodową, gdzie straty te są 3 krotnie większe niż w późniejszych latach. „Budowę„ hali przemysłowej w obliczeniach rozpoczęła się z dniem 1 stycznia, gdyby przyjąć czas rozpoczęcia „budowy” na późniejszy, cieplejszy miesiąc straty w 1 roku byłyby niższe. Jak wynika z obliczeń strat ciepła po 5 roku symulacji, różnica oszczędności na ogrzewaniu hali bez izolacji termicznej a pozostałymi wariantami jest niewielka. Jak pokazują obliczenia analizy ekonomicznej, izolacja termiczna posadzki stykającej się z gruntem jest nieopłacalna. Przy najbardziej efektywnej izolacji cieplnej czas zwrotu nakładów na sam materiał izolacyjny wynosi 90 lat. Uzasadnione jest jedynie stosowanie izolacji ułożonej po obwodzie podłogi dla zabezpieczenia posadzki przez przemarzaniem ponieważ jako izolacja termiczna nie przynosi efektów. Posadzka nie zawierająca izolacji cieplnej w okresie letnim chłodzi hale.

Reasumując zastosowanie jakiegokolwiek z rozpatrywanych wariantów izolacji cieplnej posadzki pod dużą halą przemysłową nie przynosi żadnych efektów ograniczenia strat ciepła przez przenikanie przez podłogę na gruncie. Oszczędności na ogrzewaniu uzyskane przez każdy z wariantów są niewielkie w porównaniu z nakładami jakie należy wcześniej ponieść. Wyniki obliczeń zgadzają się z metodami wykonywania posadzek przemysłowych zaobserwowanych na budowie gdzie to izolacja termiczna jest wykonywana „ewentualnie”.

7. Bibliografia

Literatura:

- [1] R. Białecki; „*Modelowanie pól temperatury*” praca zbiorowa pod redakcją J. Szarguta, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1992.
- [2] L. Czarnecki; „*Trends of Development Perspectives and Innovations*” Part 2. Researches and Education, 6-Int Colloquium Industrial Floors 07 p.p.082
- [3] L. Czarnecki; „*Badanie i rozwój posadzek przemysłowych*” Materiały Budowlane nr 5/2007, str.6-8.
- [4] A. Garbacz; „*Raport dotyczący stanu wiedzy i techniki w dziedzinie posadzek przemysłowych*” Materiały Budowlane 5/2007 str. 4-17
- [5] J. Jasiczak, praca zbiorowa; „*Posadzki przemysłowe. Materiały, technologie, projektowanie, naprawy*”, wydawnictwo ADDIMENT Polska Sp. z o.o., Poznań 2001.
- [6] L. Kral; „*Budynki przemysłowe*” PW 1978r.
- [7] T. Kulas; „*Projektowanie podłóg przemysłowych*” Izolacje nr7/8/2003, str. 25-28.
- [8] J. Mierzwa; „*Zasady projektowania posadzek przemysłowych na gruncie*”, Materiały Budowlane nr 9/2000, str.7-9.
- [9] J. Mierzwa; „*Klasyfikacja i projektowanie podłóg przemysłowych*”, Podłoga 6/2007, str.12-19.
- [10] G. Mihalakakou; „*On the ground temperature below buildings*” Solar Energy nr 5/1995, str.5-9.
- [11] H. Pieczarkowski; „*Posadzki przemysłowe*” Podłoga nr 5/2009, str. 29-35.
- [12] C.O.Popiel, J. Wojtkowiak; „*Measurements of temperature distribution in ground*” Experimental Thermal and Fluid Science; nr25, str. 301-309, 2001r.
- [13] M. Rokieli; „*Posadzki przemysłowe oraz materiały służące do ich wykonania*”, Izolacje nr 3/2008, str. 40-52.
- [14] Recknagel, Sprengel, Honmann, Schramek : Ogrzewnictwo i klimatyzacja, Poradnik EWFE, Gdańsk 1994.
- [15] M.M. Salah El-Din; „*One the heat intro the ground*” Renewable energy 18 (1999) str. 473-490.
- [16] Materiały techniczne firmy Paroc; „*Izolacje fundamentów, podłóg na gruncie i tarasów*”

Normy:

- [17] PN-EN 12831:2006 – Metoda obliczania projektowego obciążenia cieplnego.
- [18] PN-EN ISO 10211:2008 – Mostki cieplne w budynkach.
- [19] PN-EN ISO 13370:2008 – Wymiana ciepła przez grunt – Metody obliczania.
- [20] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 12.04.2002r. (z późniejszymi zmianami) W sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich Usytuowanie.

Internet:

- [21] www.kornicki.com/antherm/PL
- [22] www.eradur.com.pl
- [23] www.metexi.pl
- [24] www.gryczka.com.pl
- [25] www.lewikardflor.com.pl
- [26] www.futura.szn.info.pl
- [27] www.ecopol-system.pl