

POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA

WYDZIAŁ BUDOWNICTWA I NAUK O ŚRODOWISKU

**PRACA DYPLOMOWA
MAGISTERSKA**

TEMAT: Analiza oddziaływań statycznych i termicznych w żelbetowej baterii
silosów

WYKONAWCA: inż. Mateusz Jankowski

OPIEKUN PRACY DYPLOMOWEJ: dr hab. inż. Jolanta Anna Prusiel, prof. PB

BIAŁYSTOK 2026 ROK

Subject of diploma thesis:

Analysis of Static and Thermal Actions in a Reinforced Concrete Battery of Silos

Summary

The aim of this master's thesis was to analyse the influence of static and thermal actions on the behaviour of a reinforced concrete rectangular battery of silos intended for storing hot cement clinker. The study focused on determining how bulk material pressure, clinker temperature, seasonal conditions and wall thickness affect the internal forces in the structure.

The first part of the thesis presents the theoretical background of silo design. It discusses the behaviour of bulk materials, the principles of determining pressure on vertical walls and hoppers, and the basic assumptions related to thermal actions in reinforced concrete silo structures. These theoretical and standard-based assumptions were used later to determine the loads and prepare the numerical model.

The analysed structure consisted of a six-cell reinforced concrete silo battery. Three wall thicknesses were considered: 0.25 m, 0.30 m and 0.35 m. Two clinker temperatures were adopted: 80°C and 100°C. The analysis also included summer and winter conditions, full and partial filling of the silo chambers, and cases with and without a near-wall damping layer limiting heat transfer to the wall.

The internal forces were determined using a numerical model prepared in RFEM with the Finite Element Method. The model made it possible to include the spatial behaviour of the silo battery, including the interaction between adjacent chambers, common walls, corners, the cover slab and the hopper. Selected results were additionally verified by analytical calculations.

The results showed that thermal actions have a significant influence on the internal forces in reinforced concrete silo walls. The most unfavourable results were obtained for winter conditions without the near-wall damping layer, especially for the clinker temperature of 100°C. In many cases, thermal effects caused a considerable increase in longitudinal forces and bending moments compared with static pressure alone. The analysis also showed that increasing wall thickness does not always reduce internal forces, because a stiffer wall may generate higher restrained thermal forces.

The thesis confirms that reinforced concrete silo batteries used for storing hot bulk materials should be analysed as spatial structural systems. Static pressure and thermal actions should be considered together, while simplified analytical methods may be used as a supporting verification tool. The Finite Element Method provides a more complete assessment of the behaviour and safety of this type of structure.

Spis treści

Wstęp	5
Uzasadnienie aktualności tematu.....	5
Cel pracy	6
Zakres pracy	6
Charakterystyka techniczna pracy	6
1. Przegląd literatury	7
1.1. Charakterystyka żelbetowych silosów na materiały sypkie	7
1.1.1. Podstawowe wymagania normowe dotyczące projektowania.....	7
1.1.2 Wpływ charakterystyki parcia materiału sypkiego na ustrój konstrukcyjny.....	9
1.1.3 Sytuacje obliczeniowe	12
1.1.4 Sytuacje obliczeniowe przy różnych układach geometrycznych silosów	13
1.2. Obciążenia od materiału sypkiego	15
1.2.1. Obciążenie na ściany pionowe silosów	15
1.2.2. Obciążenie na ściany leja i dno silosu	20
1.3. Analiza oddziaływań termicznych.....	27
1.3.1. Podstawy określania wpływu temperatury w konstrukcjach silosów.....	27
1.3.2. Obliczeniowa analiza rozkładu temperatury w żelbetowej ścianie silosu.....	27
1.3.3. Wpływ wahań temperatury zewnętrznej na konstrukcję silosu.....	30
1.3.4. Wpływ gorącego ośrodka sypkiego na konstrukcję silosu	30
2. Warianty analiz numerycznych baterii silosów	33
2.1. Założenia dotyczące geometrii baterii silosów	33
2.2. Właściwości przyjętego materiału sypkiego	38
2.3. Temperatura składowanego materiału	40
2.4. Zestawienie wariantów testów obliczeniowych	41
3. Obciążenia działające na silos prostopadłościenny.....	42
3.1. Zebranie obciążeń stałych.....	42
3.1.1. Płyta przekrycia	42
3.1.2. Konstrukcja galerii nadsilosowej.....	42
3.1.3. Ściany silosu	43
3.1.4. Lej silosu.....	44
3.2. Zebranie obciążeń zmiennych	46
3.2.1. Płyta przekrycia	46
3.2.2. Konstrukcja galerii nadsilosowej.....	46
4. Analiza oddziaływań statycznych od parcia ośrodka sypkiego	47
4.1. Wyznaczenie parcia składowanego ośrodka sypkiego przy założeniu całkowitego poziomego napełnienia komory	47

4.1.1. Parcie materiału na ściany silosu przy napełnieniu	47
4.1.2. Parcie materiału na ściany silosu przy opróżnianiu.....	54
4.1.3. Wyznaczenie parcia klinkieru cementowego na ściany leja przy napełnianiu	60
4.1.4. Wyznaczenie parcia klinkieru cementowego na ściany leja przy opróżnianiu	63
4.2. Wyznaczenie parcia składowanego ośrodka sypkiego przy założeniu częściowego napełnienia komory.	66
4.2.1. Parcie materiału na ściany silosu przy napełnieniu	66
4.2.2. Parcie materiału na ściany silosu przy opróżnianiu.....	71
4.2.3. Wyznaczenie parcia klinkieru cementowego na ściany leja przy napełnianiu	74
4.2.4. Wyznaczenie parcia klinkieru cementowego na ściany leja przy opróżnianiu	77
5. Analiza oddziaływań termicznych żelbetowej prostopadłościowej baterii silosów	80
5.1. Wpływ oddziaływania klinkieru cementowego i temperatury otoczenia.....	80
5.1.1. Obciążenie temperaturą dla ściany o grubości 0,25 m	80
5.1.2. Obciążenie temperaturą dla ściany o grubości 0,30 m	89
5.1.3. Obciążenie temperaturą dla ściany o grubości 0,35 m	98
5.1.4. Obciążenie temperaturą dla ściany o grubości 30 cm przy częściowym zapełnieniu komory silosu	107
5.1.5. Obciążenie temperaturą dla ścian wewnętrznych o grubości 30 cm	113
6. Wyznaczenie sił wewnętrznych w baterii silosów prostopadłościowych	119
6.1. Model konstrukcji baterii silosów	119
6.2. Obciążenia konstrukcji baterii silosu prostopadłościowego	121
6.3. Wyniki obliczeń statycznych	123
6.4. Kontrola poprawności otrzymanych wyników za pomocą metody analitycznej	144
7. Zestawienie porównawcze wartości sił wewnętrznych w żelbetowej baterii silosów.	152
Podsumowanie i wnioski końcowe	221
Wykaz literatury.....	224
Akty ustawodawcze i normy	224
Źródła internetowe	225
Wykaz programów wykorzystanych przy realizacji pracy	225
Załączniki	225

Wstęp

Uzasadnienie aktualności tematu

Geneza silosów, rozumianych jako stacjonarne zbiorniki do składowania materiałów sypkich, jest związana z historią magazynowania płodów rolnych. Sama nazwa „silos” pochodzi od jednostki miary ziarna stosowanej w dawnych czasach przez hiszpańskich Maurów. Podstawą tego typu obiektów były komory drążone bezpośrednio w gruncie, natomiast ściany stabilizowano gliną lub w późniejszych czasach wykładano kamieniem. Duży przełom w technice magazynowania materiałów sypkich nastąpił około 3000 lat p.n.e., kiedy w starożytnym Egipcie zaczęły powstawać pierwsze spichlerze nadziemne [S1].

Mimo upływu wieków, podstawowa rola silosów nie zmieniła się. Stanowią one ważne ogniwo w bezpiecznym przechowywaniu i ochronie materiałów sypkich przed negatywnym wpływem czynników zewnętrznych. Ich głównym zadaniem jest izolacja przechowywanych materiałów przed wpływem wilgoci, szkodników czy warunków atmosferycznych.

W obecnych czasach umiejętność projektowania zezwala na dowolny kształt projektowanego silosu, przy czym do najbardziej popularnych należą przekroje cylindryczne, prostokątne lub wielokątne. W procesie projektowania silosów najpowszechniej stosowanymi materiałami konstrukcyjnymi są stal oraz żelbet. Wymiary silosu dobiera się w zależności od potrzeb czy rodzaju przechowywanego materiału i technologii składowania [S1].

Proces projektowania nowoczesnego silosu żelbetowego jest skomplikowany. Tradycyjne podejście, które koncentruje się głównie na parciu materiału na ściany i dno silosu, nie jest już wystarczające. Bardzo ważne, a często pomijalne, są oddziaływania termiczne. Wahania temperatury otoczenia w cyklu dobowym i rocznym, w połączeniu z temperaturą własną silosu, generują w jego ścianach oraz strukturze dodatkowe naprężenia. Jeśli nie uwzględnimy tych sił, mogą powstać rysy, a w niektórych przypadkach nawet poważne awarie konstrukcji silosu.

Współczesna inżynieria ma narzędzia zdolne do analizy takiego zjawiska. Obok tradycyjnych metod analitycznych, coraz ważniejsze jest komputerowe wspomaganie projektowania oparte na Metodzie Elementów Skończonych (MES). Zaawansowane oprogramowanie pozwala odwzorować warunki konstrukcyjne i przeprowadzić wiele analiz, co zmniejsza ryzyko błędów wynikających z nadmiernych uproszczeń. Niniejsza praca koncentruje się na szczegółowym zbadaniu wpływu oddziaływań statycznych i termicznych na pracę statyczną żelbetowych silosów prostopadłościennych zblokowanych.

Cel pracy

Celem pracy dyplomowej magisterskiej jest analiza porównawcza sił wewnętrznych w żelbetowej baterii silosów prostopadłościennych, wywołanych sprzężonymi oddziaływaniami statycznymi i termicznymi. W tym celu przeprowadzono wielowariantową analizę numeryczną baterii silosów, w której uwzględniono trzy warianty grubości ścian (0,25 m, 0,30 m i 0,35 m) oraz dwa poziomy temperatury składowanego gorącego klinkieru cementowego: $T_1 = 80^{\circ}\text{C}$ i $T_2 = 100^{\circ}\text{C}$.

Zakres pracy

Zakres pracy obejmuje:

- przegląd literatury z zakresu wyznaczania obciążeń od parcia ośrodka sypkiego i temperatury w żelbetowej baterii silosów,
- opracowanie rozwiązania konstrukcyjnego żelbetowej baterii silosów i ustalenie wariantów testów obliczeniowych,
- wyznaczenie oddziaływań statycznych od parcia ośrodka sypkiego oraz oddziaływań termicznych,
- wielowariantową analizę numeryczną sprzężonych oddziaływań statycznych i termicznych w baterii silosów,
- analizę porównawczą uzyskanych sił wewnętrznych w żelbetowych ścianach silosów, opracowanie wykresów i nomogramów,
- sformułowanie wniosków ogólnych i szczegółowych.

Charakterystyka techniczna pracy

Praca składa się z 225 stron, w tym 83 tabel, 212 rysunków oraz 68 wzorów. Wykaz literatury składa się z 25 pozycji z czego 10 punktów to pozycje literaturowe, 6 pozycji normowych, 4 źródła internetowe oraz 2 programy komputerowe. Do pracy dołączono 3 załączniki.

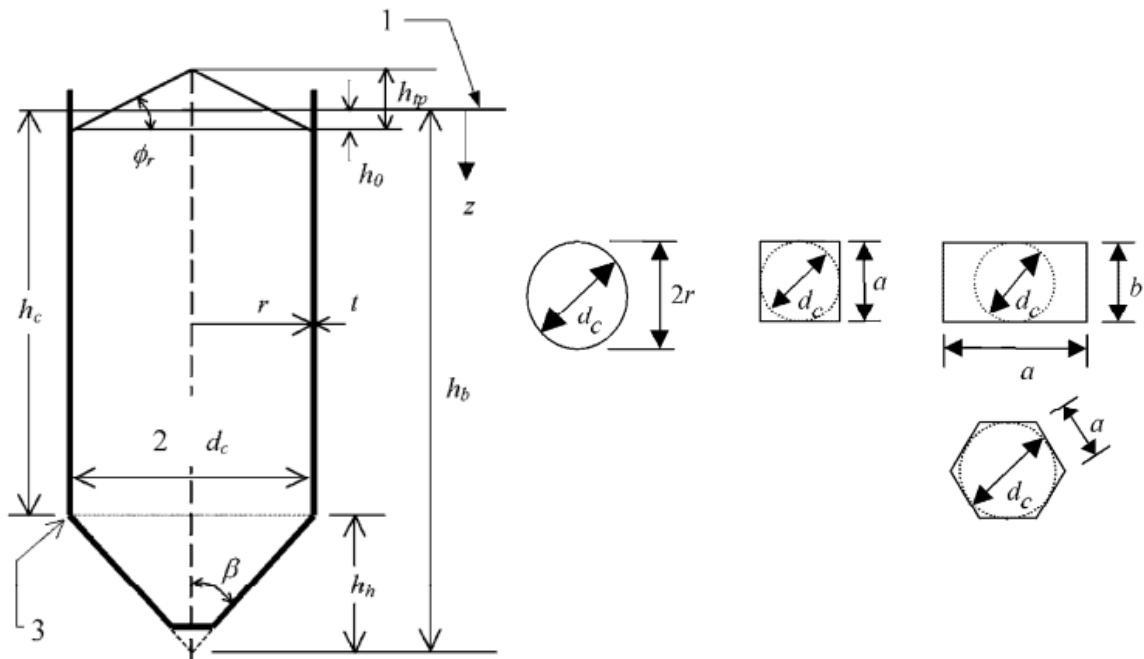
1. Przegląd literatury

1.1. Charakterystyka żelbetowych silosów na materiały sypkie

1.1.1. Podstawowe wymagania normowe dotyczące projektowania

Do poprawnego wyznaczenia obciążeń według Eurokodu [N4], należy zdefiniować geometrię komory za pomocą dwóch zmiennych: miarodajnego wymiaru przekroju komory silosu d_c oraz wysokości komory h_c . Szczególną uwagę należy zwrócić na sposób wyznaczania wysokości h_c , która jest mierzona od poziomu tzw. powierzchni zastępczej. Z uwagi na możliwość występowania komór o kształcie innym niż cylindryczny, miarodajny wymiar przekroju komory silosu definiuje się jako średnicę okręgu wpisanego w kwadrat, prostokąt czy wielobok jak pokazano na rysunku 1.1.

Powierzchnia zastępcza to koncepcja, która pozwala na uproszczenie obliczeń. Zamiast rzeczywistego stożka nasypowego, którego nachylenie zależy od kąta stoku naturalnego ϕ_r , przyjmujemy teoretyczny, poziomy poziom. Wykonujemy to tak, aby zachować tę samą objętość materiału. W praktyce projektowej ta płaszczyzna wyznacza początek wykresu parcia. To właśnie od tego poziomu zaczynają wzrastać siły oddziałujące na ściany silosu [S1].



Rys. 1.1 Geometria silosu z określeniem wymiarów [N4]

Norma PN-EN 1991-4: 2008 [N4] wprowadza systematykę silosów opartą na dwóch kluczowych kryteriach: intensywności oddziaływań (klasy AAC) oraz geometrii komory (smukłości). Wybór odpowiedniej klasy ma bezpośredni wpływ na stopień skomplikowania procedur obliczeniowych oraz zakres dopuszczalnych uproszczeń inżynierskich. Norma dopuszcza trzy klasy AAC, które determinują rygorystyczność analizy strukturalnej co pokazano w tabeli 1.1.

Tabela 1.1. Klasy oceny oddziaływań na silosy [N4]

Klasa oceny oddziaływań	Opis
AAC3	Silosy o objętości składowania powyżej 10 000 ton. Silosy o objętości składowania od 1000 do 10 000 ton z uwzględnieniem poniższych sytuacji obliczeniowych: a) opróżnianie niecentryczne: gdzie: $e_o/d_c > 0,25$, b) silosy niskie: gdzie: $e_f/d_c > 0,25$.
AAC2	Stanowi kategorię pośrednią, obejmującą wszystkie silosy określone w [N4] i nie umieszczone w innej klasie.
AAC1	Dotyczy najmniejszych silosów, w których masa składowanego materiału nie przekracza 100 ton. W tej klasie dopuszczalne jest stosowanie najbardziej uproszczonych metod obliczeniowych.

W powyższej klasyfikacji parametr e_f definiuje maksymalny mimośród napełniania komory względem jej środka ciężkości, natomiast e_o określa mimośród otworu wysypowego.

Geometria silosu, a w szczególności relacja między jego wysokością h_c a wymiarem miarodajnym d_c pozwala na podział konstrukcji na cztery grupy, co determinuje charakter rozkładu parcia materiału:

- silosy smukłe: charakteryzujące się stosunkiem $h_c/d_c \geq 2,0$;
- silosy średniej smukłości: gdzie $1,0 < h_c/d_c < 2,0$;
- silosy niskie: dla których $0,4 < h_c/d_c \leq 1,0$ przy dowolnym rodzaju dna oraz $h_c/d_c \leq 0,4$ wyposażone w dno w formie leja;
- silosy retencyjne: o smukłości $h_c/d_c \leq 0,4$ posiadające dno płaskie.

Kompleksowa analiza statyczno-wytrzymałościowa silosu, poza kluczowym parciem składowanego materiału sypkiego, musi uwzględniać szereg dodatkowych oddziaływań. Zgodnie z zasadami wiedzy inżynierskiej oraz wytycznymi normowymi, do czynników determinujących stan wyężenia konstrukcji należą [S1]:

- ciężar własny konstrukcji (galeria transportowa, przekrycie, komory, ściany, dno), izolację, powłokę oraz ciężar urządzeń współpracujących z konstrukcją,
- obciążenie wiatrem,
- obciążenie śniegiem przekrycia silosu,
- obciążenie technologiczne przekrycia,
- obciążenie temperaturą
 - gradient temperatury na grubość ściany,
 - różnica między temperaturą wznoszenia a eksploatacji,
 - zróżnicowanie temperatury na wysokości komory,
 - zjawisko gwałtownego schłodzenia otoczenia,
- odkształcenia wymuszone: osiadanie podłoża, skurcz betonu,
- obciążenia wyjątkowe w postaci wybuchu pyłów podczas składowania materiałów typu: cukier, węgiel, zboże lub mąka,
- inne obciążenia wyjątkowe, np. uderzenie pojazdów.

1.1.2 Wpływ charakterystyki parcia materiału sypkiego na ustrój konstrukcyjny

Prawidłowe określenie wpływu składowanego materiału na konstrukcję silosu jest zadaniem skomplikowanym. Wymaga uwzględnienia nie tylko geometrii samego obiektu, ale przede wszystkim właściwości fizykochemicznych materiału sypkiego oraz charakteru jego przepływu. Bardzo ważne dla rozkładu sił są szczegóły techniczne, takie jak sposób napełniania komory e_f oraz położenie i kształt otworu, przez który materiał wysypuje się e_o [10].

W cyklu funkcjonowania silosu wyróżnia się trzy fazy eksploatacyjne, z których każda generuje odmienny stan wyężenia ścian i dna:

- Etap napełniania – moment, w którym materiał sypki wsypywany jest do wnętrza silosu i znajduje się w ruchu. W tym czasie na konstrukcję zaczynają działać siły o charakterze dynamicznym.
- Etap składowania – okres, gdy zgromadzony materiał pozostaje w stanie spoczynku. Oddziaływania wywierane na ściany i dno mają wówczas charakter parcia statycznego.
- Etap opróżniania – najbardziej krytyczna faza z punktu widzenia bezpieczeństwa konstrukcji. Następuje wtedy przepływ materiału, co powoduje zmianę rozkładu naprężeń w złożu i często prowadzi do zwiększenia nacisku na ściany, określanego jako parcie dynamiczne.

Zgodnie z zasadami mechaniki ośrodków sypkich, oddziaływania na ściany i dno rozpatruje się w układzie składowych wektorowych zgodnie z rys. 1.2.:

1. Parcie na ściany pionowe:

- p_h – parcie poziome, działające prostopadłe do płaszczyzny ściany;
- p_w – parcie styczne, wynikające z tarcia wewnętrznego cząstek materiału o chropowatą powierzchnię ściany.

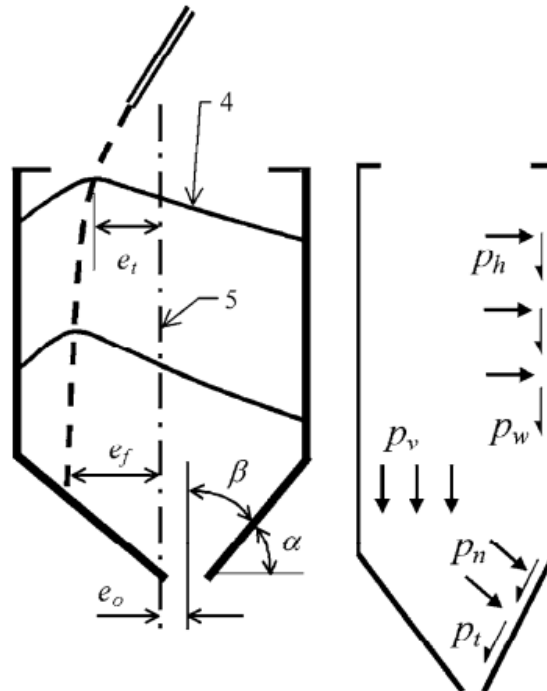
2. Parcie na dno płaskie:

- p_v – parcie pionowe, przenoszące ciężar słupa materiału.

3. Parcie na ściany leja:

- p_n – parcie normalne, działające prostopadłe do pochylonej powierzchni leja;
- p_t – parcie styczne, skierowane wzdłuż tworzącej leja.

Wewnątrz samego złoża materiału sypkiego dochodzi również do przekazywania naprężeń, co objawia się występowaniem pionowych i poziomych składowych parcia między poszczególnymi ziarnami ośrodka [5].



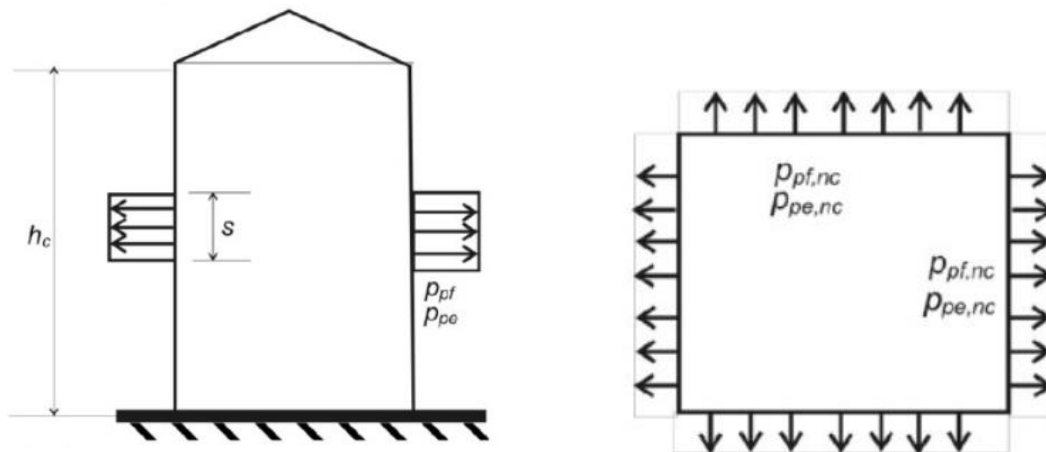
Rys. 1.2. Rodzaje składowych parcia oraz mimośrodowości w silosie [5]

Zgodnie z normą [N4] wartość parcia wyznacza się dla dwóch stanów pracy silosu: przy napełnianiu oraz przy opróżnianiu. Wielkość parcia zależy od kilku czynników:

- właściwości materiału sypkiego – przede wszystkim ciężar objętościowy γ , kąt tarcia wewnętrznego φ_i oraz współczynnik K_z , określający stosunek parcia poziomego do pionowego,
- wysokość słupa materiału z ,
- geometrii silosu – w tym smukłości komory, pola przekroju poprzecznego A oraz obwodu wewnętrznego U ,
- oddziaływania pomiędzy materiałem a ścianą silosu, obejmującego współczynnik tarcia μ oraz podatność ściany, który zależy jest od rodzaju materiału i chropowatości ściany.

Poza parciem równomiernym może pojawić się także parcie lokalne. Wynika ono z mimośrodowego napełniania lub opróżniania silosu. Parcie lokalne należy uwzględnić w obliczeniach jednocześnie z parciem symetrycznym i może ono wystąpić na dowolnej wysokości ściany. Jego rozkład dla silosów prostokątnych klasy AAC2 i AAC3 przedstawiono na rysunku 1.3., natomiast w silosach klasy AAC1 wpływ ten można pominąć.

W sytuacji dużego mimośrodu podczas napełniania lub opróżniania smukłych silosów oprócz obciążeń lokalnych należy dodatkowo uwzględnić efekty związane z powstawaniem kanału przepływu materiału przylegającego do ściany silosu [S1].



Rys. 1.3. Wykresy parcia lokalnego w silosach klasy AAC2 i AAC3 według normy [N4]

Istotnym elementem procesu opróżniania silosów są zjawiska dynamiczne, które mogą przyjmować formę uderzeń, pulsacji lub występować jednocześnie. Podczas wypływu materiału sypkiego przez otwory wysypowe pojawiają się pulsacje w przypadku materiałów bezkohezyjnych, natomiast w materiałach kohezyjnych obserwuje się zarówno pulsacje, jak

i uderzenia. Oddziaływania dynamiczne są niekorzystne także ze względu na generowany hałas, który powoduje dyskomfort u ludzi oraz sprzyja rozchodzeniu się drgań w gruncie, co może stanowić zagrożenie dla pobliskich budynków. Zjawiska te można ograniczyć poprzez zwiększenie szorstkości ścian silosu, dzięki czemu przepływ materiału staje się bardziej stabilny i łatwiejszy do kontrolowania [1].

Tabela. 1.2. Kategorie szorstkości ściany [N4]

Kategoria	Opis kategorii	Typowe materiały ściennie
D1	Śliskie niskotarciowe ściany	Nierdzewna stal walcowana na zimno Polerowana stal nierdzewna Powlekana powierzchnia w celu obniżenia tarcia Polerowane aluminium Ultra gęsty polietylen
D2	Gładkie ściany średniotarciowe	Gładka stal niskowęglowa Węglowa stal ocynkowana Aluminium oksydowane Hutniczo obrabiana stal nierdzewna Powlekana powierzchnia projektowana na odporność na korozję oraz ścieranie
D3	Wysokotarciowe ściany	Płytki ceramiczne Stal odporna na abrazję Skorodowana stal węglowa Stal z wykończeniem z betonu
D4	Nieregularna	Poziomo fałdowane ściany Ściany z blach poziomo uźebrowanych

1.1.3 Sytuacje obliczeniowe

Podczas projektowania silosów zgodnie z Eurokodem [N4] należy brać pod uwagę różne schematy obciążeń występujących zarówno w trakcie napełniania, jak i opróżniania. Poszczególne przypadki obliczeniowe oznacza się odpowiednimi symbolami.

Maksymalne obciążenia pionowe i poziome działające na ściany oraz dno silosu zależą od parametrów opisujących właściwości materiału sypkiego. Ze względu na to, wartości górne lub dolne tych parametrów należy przyjąć według tabeli 1.3.

Wartości skrajne górne lub dolne otrzymuje się poprzez przemnożenie lub podzielenie wartości średnich przez współczynnik zmienności większy od jedności. Odpowiednie parametry dla różnych materiałów sypkich zestawiono w Tablicy E1 [N4].

Tabela. 1.3. Zestawienie wartości używanych przy różnych ocenach obciążeń na ściany silosów [N4]

	Przyjmowane wartości charakterystyczne		
Przeznaczenie:	Współczynnik tarcia o ścianę μ	Iloraz parcia bocznego K	Kąt tarcia wewnętrznego ϕ_i
Dla ściany pionowej lub cylindra			
Maksymalne parcie normalne na pionową ścianę silosu	Dolne	Górne	Dolne
Maksymalne tarcie powierzchniowe o pionową ścianę silosu	Górne	Górne	Dolne
Maksymalne obciążenie na lej lub płaskie dno silosu	Dolne	Dolne	Górne
Przeznaczenie:	Współczynnik tarcia o ścianę μ	Iloraz parcia w leju F	Kąt tarcia wewnętrznego ϕ_i
Dla ściany leja			
Maksymalne parcie na lej przy napełnianiu	Dolna wartość dla leja	Dolne	Dolne
Maksymalne parcie na lej przy opróżnianiu	Dolna wartość dla leja	Górne	Górne

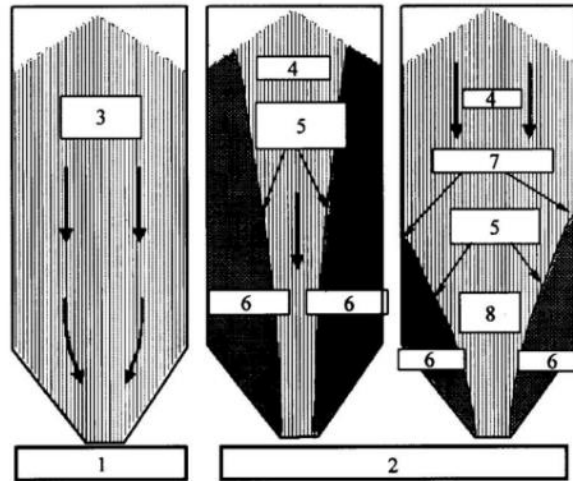
1.1.4 Sytuacje obliczeniowe przy różnych układach geometrycznych silosów

Na sytuację obliczeniową wpływ ma geometria silosu z uwzględnieniem jego smukłości, a także kształt leja i zastosowany system opróżniania. Opróżnienie silosu występuje poprzez otwory wysypowe powodujące grawitacyjne przemieszczenie ośrodka sypkiego względem ścian. W obliczeniach opróżniania należy uwzględnić występowanie określonego rodzaju przepływu materiału. Typ przepływu uzależniony jest od kąta nachylenia leja oraz wartości współczynnika tarcia pomiędzy cząstkami materiału a powierzchnią ściany. Rozpatruje się następujące przypadki przepływu materiału:

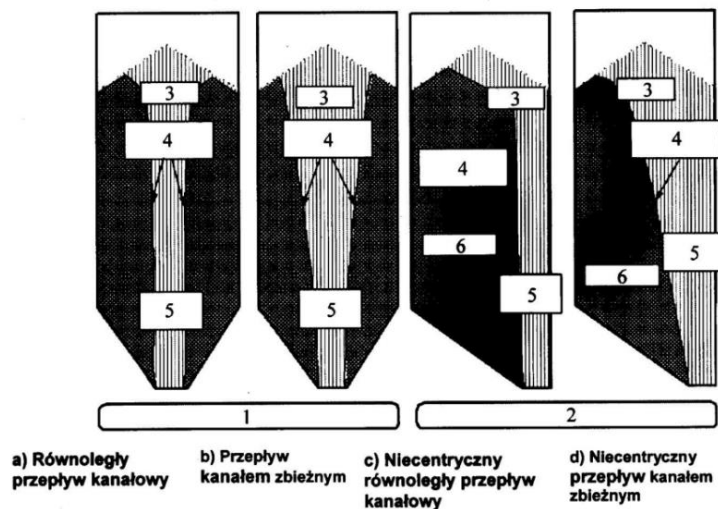
- przepływ masowy,
- przepływ rdzeniowy (kanałowy i mieszany).

Przepływ masowy zachodzi w całej objętości silosu, a wszystkie cząstki materiału znajdują się w ruchu zgodnie z rysunkiem 1.4. Jest on uznawany za najbardziej korzystny, ponieważ nie występują w nim strefy bezruchu, dzięki czemu nie ma potrzeby czyszczenia komór.

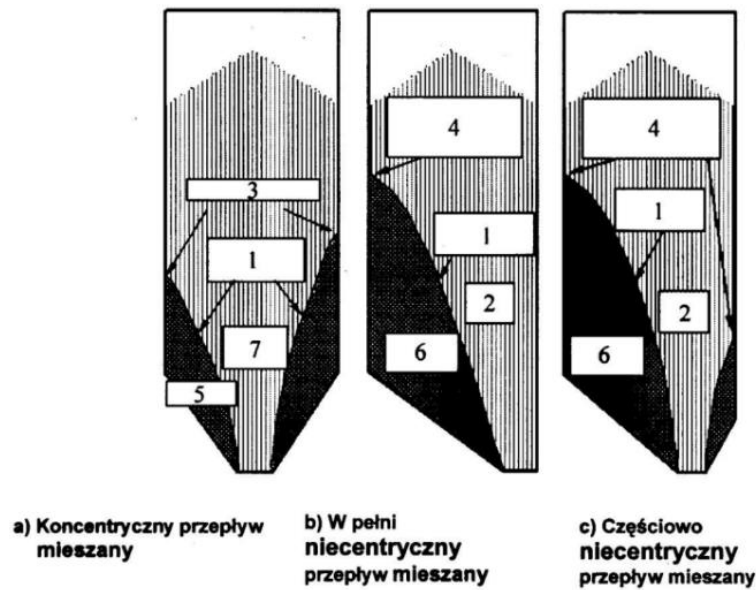
Przepływ rdzeniowy (kanałowy i mieszany) występuje w obszarach, gdzie materiał przylega do ścian i leja, pozostając nieruchomy zgodnie z rysunkiem 1.5. oraz 1.6. W centralnej części tworzy się kanał, w którym materiał przemieszcza się pod wpływem grawitacji. Koszt wykonania silosu przystosowanego do przepływu rdzeniowego jest zazwyczaj niższy niż w przypadku silosu o przepływie masowym. Jednak tego typu przepływ często prowadzi do segregacji materiału czy niestabilnych warunków przepływu [1,4].



Rys. 1.4. Schematy przepływu materiału w silosach [N4] (1- przepływ masowy, 2- przepływ rdzeniowy (kanałowy i mieszany), 3- ośrodek w całości w ruchu, 4- kanał przepływu, 5- granica kanału przepływu, 6- ośrodek w bezruchu, 7- zastępczy punkt przejścia, 9- lej zastępczy)



Rys. 1.5. Schematy przepływu kanałowego [N4] (1- wewnętrzny przepływ kanałowy, 2- niecentryczny przepływ kanałowy, 3- strumień przepływu, 4- granica kanału przepływu, 5- kanał przepływu, 6- strefa bezruchu)



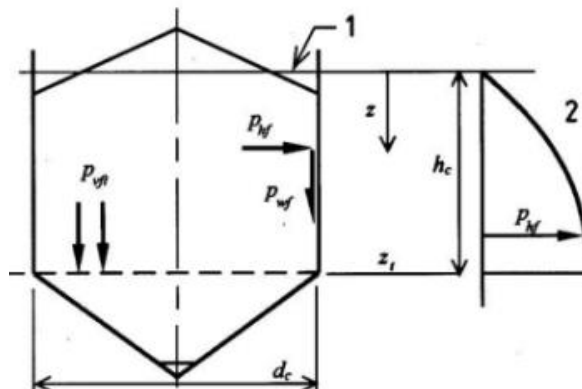
Rys. 1.6. Schematy przepływu mieszanego [N4] (1- granice kanału przepływu, 2- strefa przepływu, 3- zastępczy punkt przejściowy, 4- zastępcza linia przejściowa, 5- strefa bezruchu, 6- strefa bezruchu, 7- lej zastępczy)

1.2. Obciążenia od materiału sypkiego

1.2.1. Obciążenie na ściany pionowe silosów

Obciążenie symetryczne w fazie napełniania

Wyznaczanie symetrycznych oddziaływań materiału sypkiego na konstrukcję nośną silosu w trakcie jego napełniania opiera się na klasycznych założeniach teorii Janssena [1, 3]. Zgodnie z tym modelem wraz ze wzrostem głębokości składowania parcie materiału nie zwiększa się liniowo – jak ma to miejsce w przypadku cieczy – lecz dąży asymptotycznie do pewnej wartości granicznej. Zjawisko to wynika z tarcia materiału o ściany zbiornika, które powoduje częściowe „zawieszenie” materiału sypkiego na ścianach.



Rys. 1.7. Symetryczne parcie na ściany silosu przy napełnianiu [N4] (1- powierzchnia zastępcza, 2- parcie poziome na segment pionowy)

Zgodnie z rysunkiem 1.7. rozkład parcia w dowolnym punkcie na głębokości „z” opisują następujące zależności:

- Parcie poziome p_{hf} określone jest wzorem:

$$p_{hf}(z) = p_{ho} \cdot Y_J(z) \quad (1.1)$$

- Parcie powierzchniowe p_{wf} o ścianę wynosi:

$$p_{wf}(z) = \mu \cdot p_{ho} \cdot Y_J(z) \quad (1.2)$$

- Parcie pionowe p_{vf} na dowolnej głębokości wyznacza się ze wzoru:

$$p_{vf}(z) = \frac{p_{ho}}{K} \cdot Y_J(z) \quad (1.3)$$

gdzie: p_{ho} – jest asymptotą parcia poziomego materiału na maksymalnej głębokości, $Y_J(z)$ – funkcja zmienności parcia Janssenowskiego na głębokość z , μ – charakterystyczna wartość współczynnika tarcia materiału o ścianę, K – charakterystyczna wartość ilorazu parcia bocznego.

- Wartość asymptoty parcia poziomego materiału opisuje wzór:

$$p_{ho} = \gamma \cdot K \cdot z_o \quad (1.4)$$

gdzie: γ – jest charakterystyczną wartością ciężaru objętościowego ośrodka, K – charakterystyczna wartość ilorazu parcia bocznego, z_o – charakterystyczna głębokość we wzorze Janssena.

- Funkcja zmienności parcia Janssenowskiego określona jest przez wzór:

$$Y_J(z) = 1 - e^{-\frac{z}{z_o}} \quad (1.5)$$

gdzie: z – jest głębokością poniżej zastępczej powierzchni materiału, z_o – charakterystyczna głębokość we wzorze Janssena.

- Charakterystyczna głębokość we wzorze Janssena opisana jest wzorem:

$$z_o = \frac{1}{K \cdot \mu} \cdot \frac{A}{U} \quad (1.6)$$

gdzie: A – pole przekroju poprzecznego silosu, U – obwód wewnętrzny pola przekroju poprzecznego w silosie.

Charakterystyczną wartość siły ściskającej działającej wzdłuż obwodu ściany na głębokości „ z ” po napełnieniu, definiuje się następująco:

$$n_{zSk} = \int_0^z p_{wf}(z) dz = \mu \cdot p_{ho} [z - z_o \cdot Y_f(z)] \quad (1.7)$$

Obciążenia lokalne w fazie napełniania silosów niekołowych

Podczas napełniania silosu należy uwzględnić obciążenie lokalne, aby brać pod uwagę możliwe asymetrie obciążenia powstałe w wyniku mimośrodków lub niedoskonałości pojawiających się w trakcie napełniania. W przypadku silosów zaliczanych do AAC1 dopuszcza się pominięcie lokalnych obciążeń występujących podczas napełniania [4].

Wielkość bazowa parcia lokalnego opisana jest wzorem:

$$p_{pf} = C_{pf} \cdot p_{hf} \quad (1.8)$$

gdzie: p_{hf} – wartość parcia poziomego przy napełnianiu na wysokości przyłożenia obciążenia lokalnego, C_{pf} – współczynnik obciążenia lokalnego przy napełnianiu.

$$C_{pf} = 0,21 \cdot C_{op} \cdot [1 + 2 \cdot E^2] \cdot (1 - e^{\{-1,5[\frac{hc}{ac}] - 1\}}) \quad (1.9)$$

gdzie: C_{op} – współczynnik obciążenia lokalnego w ośrodku sypkim, E – iloraz mimośrodu usytuowania kanału przepływu i średnicy silosu, h_c – wysokość pionowego segmentu komory

od powierzchni zastępczej do punktu przejścia ściany w dno, d_c – miarodajny wymiar przekroju komory silosu.

Jeżeli wzór (1.9) daje wynik ujemny, przyjmujemy $C_{pf} = 0$.

$$E = 2 \cdot \frac{e_f}{d_c} \quad (1.10)$$

$$s = \pi \cdot \frac{d_c}{16} \cong 0,2 \cdot d_c \quad (1.11)$$

$$p_{pf,nc} = 0,36 \cdot p_{pf} \quad (1.12)$$

gdzie: e_f – maksymalny mimośród powierzchniowego stożka napełnienia, d_c – miarodajny wymiar przekroju komory silosu, s – wysokość strefy, na której działa obciążenie lokalne, $p_{pf,nc}$ – wartość przyrostu parcia symetrycznego na dowolnym poziomie dla niekołowej ściany, p_{pf} – bazowe parcie lokalne przy napełnianiu.

Obciążenie symetryczne w fazie opróżniania

Symetryczne parcie poziome p_{he} przy opróżnianiu wyrażone jest wzorem:

$$p_{he} = C_h \cdot p_{hf} \quad (1.13)$$

gdzie: C_h – współczynnik parcia poziomego przy opróżnianiu, p_{hf} – obliczeniowe parcie poziome po napełnieniu

Tarcie powierzchniowe p_{we} o ścianę określa się wzorem:

$$p_{we} = C_w \cdot p_{wf} \quad (1.14)$$

gdzie: C_w – współczynnik tarcia powierzchniowego o ścianę, p_{wf} – obliczeniowe tarcie powierzchniowe po napełnieniu.

W przypadku silosów smukłych, zakwalifikowanych do 2 lub 3 klasy oceny oddziaływań, parametry C_h oraz C_w przy opróżnianiu przyjmują określone wartości zgodnie z normą [N4]:

$$C_h = 1,15$$

$$C_w = 1,10$$

Charakterystyczną wartość siły pionowej przypadającej na jednostkę długości obwodu na dowolnej głębokości „z” przy opróżnianiu określa się według wzoru:

$$n_{zSk} = \int_0^z p_{we}(z) dz = C_w \cdot \mu \cdot p_{ho} [z - z_o \cdot Y_j(z)] \quad (1.15)$$

Obciążenie lokalne w fazie opróżniania silosów niekołowych

Podczas procesu opróżniania silosów, niezbędne jest uwzględnienie dodatkowych obciążeń lokalnych. Wynikają one z nieuniknionych asymetrii parcia, generowanych przez mimośrodowość jam nasypowych i wysypowych.

Wartość bazową składowej parcia lokalnego p_{pe} w trakcie opróżniania wyznacza się ze wzoru:

$$p_{pe} = C_{pe} \cdot p_{he} \quad (1.16)$$

gdzie: C_{pe} – współczynnik obciążenia lokalnego przy opróżnianiu, p_{he} – miejscowa wartość parcia poziomego przy opróżnianiu wyznaczona na wysokości przyłożenia obciążenia lokalnego.

W przypadku silosów $h_c/d_c > 1,2$ wartość C_{pe} wyznacza się ze wzoru:

$$C_{pe} = 0,42 \cdot C_{op} \cdot [1 + 2 \cdot E^2] \cdot (1 - e^{\{-1,5[\frac{h_c}{d_c}] - 1\}}) \quad (1.17)$$

gdzie: C_{op} – bazowy współczynnik obciążenia lokalnego dla ośrodka, E – iloraz mimośrodu usytuowania kanału przepływu i średnicy silosu, h_c – wysokość pionowego segmentu komory, d_c – miarodajny wymiar przekroju komory silosu.

Iloraz mimośrodów E wyznacza się ze wzoru:

$$E = 2 \cdot \frac{e}{d_c} \quad (1.18)$$

$$E = \max(e_f; e_o) \quad (1.19)$$

gdzie: e_f – maksymalny mimośród powierzchniowego stożka napełnienia, e_o – mimośród liczony do środka otworu wysypowego, d_c – miarodajny wymiar przekroju komory silosu.

Wartość parcia równomiernego $p_{pe,nc}$ na dowolnej wysokości dla ściany niekołowej wyznacza się wzorem:

$$p_{pe,nc} = 0,36 \cdot p_{pe} \quad (1.20)$$

gdzie: p_{pe} – bazowe parcie lokalne przy opróżnianiu.

1.2.2. Obciążenie na ściany leja i dno silosu

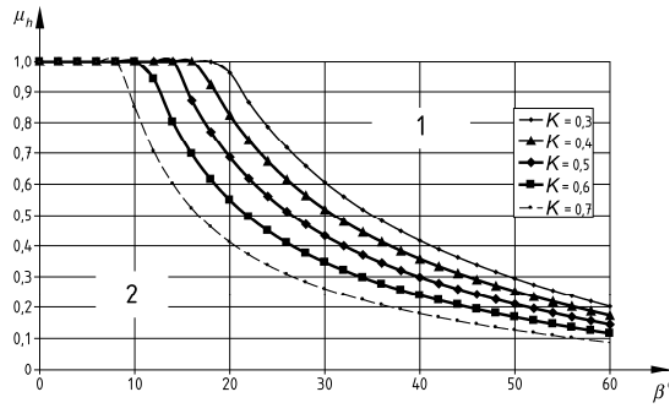
Nawiązując do normy PN-EN 1991-4:2008 [N4], podczas obliczeń wykorzystuje się charakterystyczne wartości obciążenia na dno silosów. Z uwagi na występowanie napełniania i opróżniania, wyróżnia się następujące rozwiązania den silosów:

- płaskie dna,
- leje strome,
- leje płytkie.

Stosując wzór (1.21) oraz nomogram (rys. 1.8.) można stwierdzić czy dany lej jest płytki czy stromy.

$$\tan\beta = \frac{1 - K}{2 \cdot \mu_h} \quad (1.21)$$

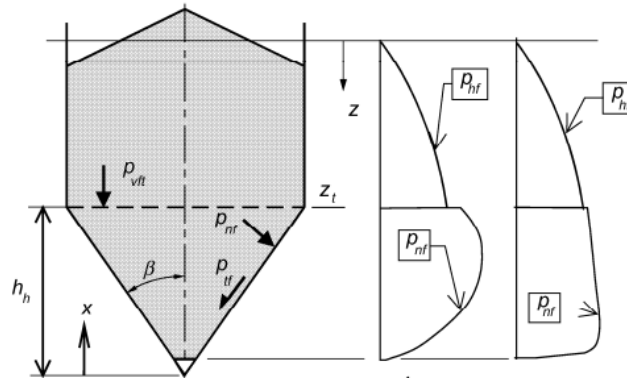
gdzie: K – jest dolną wartością charakterystyczną ilorazu parcia bocznego na ściany pionowe, β – jest kątem połówkowym wierzchołka leja, μ_h – jest dolną wartością charakterystyczną współczynnika tarcia o ścianę leja.



Rys. 1.8. Kąt połówkowy leja β [N4]

Podstawowa różnica między lejem stromym a płytkim wynika z zachowania ośrodka sypkiego przy ścianach konstrukcji. W leju stromym nacisk wyższych warstw materiału wymusza jego ruch wzdłuż nachylonych ścian, co skutkuje występowaniem tarcia ściennego. Natomiast, w leju płytkim, ze względu na zbyt małe nachylenie lub wysokie opory tarcia, materiał nie przesuwają się bezpośrednio po ścianach. W tym przypadku tarcie występuje częściowo, a jego wartość zależy od geometrii leja i panujących naprężeń.

Rysunek 1.9 przedstawia rozkład parcia ośrodka sypkiego w silosach z lejem stromym lub płytkim przy napełnianiu.



Rys. 1.9. Parcie ośrodka sypkiego w lejach stromych i płytkich przy napełnianiu [N4]

Średnie parcie pionowe w poziomie punktu przejścia pionowej ściany w lej lub płaskie dno w silosie określa się ze wzoru:

$$p_{vft} = C_b \cdot p_{vf} \quad (1.22)$$

gdzie: p_{vf} – wartość parcia pionowego przy napełnianiu, C_b – współczynnik zwiększający obciążenie dna, umożliwiający wystąpienie większych obciążeń przekazywanych z pionowej ściany na lej lub płaskie dno silosu.

Dla konstrukcji silosów zaliczanych do 2 i 3 klasy oceny oddziaływań, wartość współczynnika C_b przyjmuje się jako $C_b = 1,0$.

Projektując dno lub lej silosu, należy wziąć pod uwagę prawdopodobieństwo wystąpienia oddziaływań dynamicznych. Wymaga to uwzględniania większych wartości obciążeń przypadających na lej lub dno. Zakłada się, że istnieje możliwość wystąpienia któregoś z poniższych warunków [N4]:

- silos o smukłych ścianach przeznaczony do składowania ośrodka sypkiego, które nie kwalifikują się jako niskokohezyjne,
- składowany materiał jest podatny na mechaniczne zazębienie cząstek (np. klinkier cementowy).

Wartość współczynnika zwiększającego obciążenie dna silosów zaliczanych do 2 i 3 klasy oceny oddziaływań wynosi $C_b = 1,2$.

Wartość średnia parcia pionowego w ośrodku sypkim leja, na wysokości x powyżej wierzchołka leja wyznaczana jest ze wzoru:

$$p_v = \left(\frac{\gamma \cdot h_h}{n - 1} \right) \cdot \left\{ \left(\frac{x}{h_h} \right) - \left(\frac{x}{h_h} \right)^n \right\} + p_{vft} \cdot \left(\frac{x}{h_h} \right)^n \quad (1.23)$$

gdzie: γ – jest charakterystyczną górną wartością ciężaru objętościowego materiału sypkiego, h_h – wysokość pomiędzy wierzchołkiem leja a punktem przejścia, x – współrzędna mierzona od wierzchołka leja ku górze, p_{vft} – średnia wartość parcia pionowego po napełnieniu silosu na wysokości punktu przejścia, n – wykładnik funkcji parcia na lej.

$$n = S \cdot (F \cdot \mu_{eff} \cdot \cot \beta + F) - 2 \quad (1.24)$$

gdzie: F – jest charakterystyczną wartością ilorazu parcia na lej, B – kąt połówkowy wierzchołka leja, μ_{eff} – efektywna wartość charakterystyczna współczynnika tarcia ośrodka o ścianę leja lub wartość tarcia w ruchu, S – współczynnik kształtu leja.

W zależności od kształtu leja wartość współczynnika S przyjmujemy następująco:

$S = 2$ – lej stożkowy lub ostrosłupowy o podstawie kwadratu,

$S = 1$ – lej klinowy,

$S = (1 + \frac{b}{a})$ – lej o rzucie płaskim prostokątnym.

gdzie: a – długość prostokątnego rzutu, b – szerokość prostokątnego rzutu.

Parcie materiału na ściany leja stromego przy napełnianiu

W stanie napełniania komory silosu, średnie parcie pionowe p_v na dowolnym poziomie leja wyznacza się analogicznie do części pionowej. Do opisu składowych parcia na ściany stosuje się współczynnik F_f określony wzorem:

$$F_f = 1 - \frac{b}{(1 + \frac{\tan\beta}{\mu_h})} \quad (1.25)$$

Dodatkowo, parametr pomocniczy n przyjmuje postać:

$$n = S \cdot (1 - b) \cdot \mu_h \cdot \cot\beta \quad (1.26)$$

gdzie: b – współczynnik empiryczny, którego wartość dla standardowych warunków wynosi 0,2, μ_h - jest charakterystyczną wartością współczynnika tarcia ośrodka o ścianę leja, przy czym $\mu_h = \mu_{eff}$.

Na tej podstawie wyznacza się składową parcia normalnego p_{nf} oraz tarcie powierzchniowe p_{tf} , działające na ścianę leja:

$$p_{nf} = F_f \cdot p_v \quad (1.27)$$

$$p_{tf} = \mu_h \cdot F_f \cdot p_v \quad (1.28)$$

Parcie materiału na ściany leja stromego przy opróżnianiu

W stanie opróżniania komory, średnie parcie pionowe p_v magazynowanego materiału określa się ze wzorów (1.23) i (1.24).

Współczynnik proporcji parcia w tej fazie, oznaczony jako F_e , wyznacza się z poniższego wzoru:

$$F_e = \frac{1 + \sin\varphi_i \cos\varepsilon}{1 - \sin\varphi_i \cos(2\beta + \varepsilon)} \quad (1.29)$$

gdzie: φ_i – kąt tarcia wewnętrznego ośrodka syckiego, β – kąt połówkowy wierzchołka leja.

Parametr ε wyznacza się ze wzoru:

$$\varepsilon = \varphi_{wh} + \sin^{-1}\left\{\frac{\sin\varphi_{wh}}{\sin\varphi_i}\right\} \quad (1.30)$$

$$\varphi_{wh} = \tan^{-1}\mu_h \quad (1.31)$$

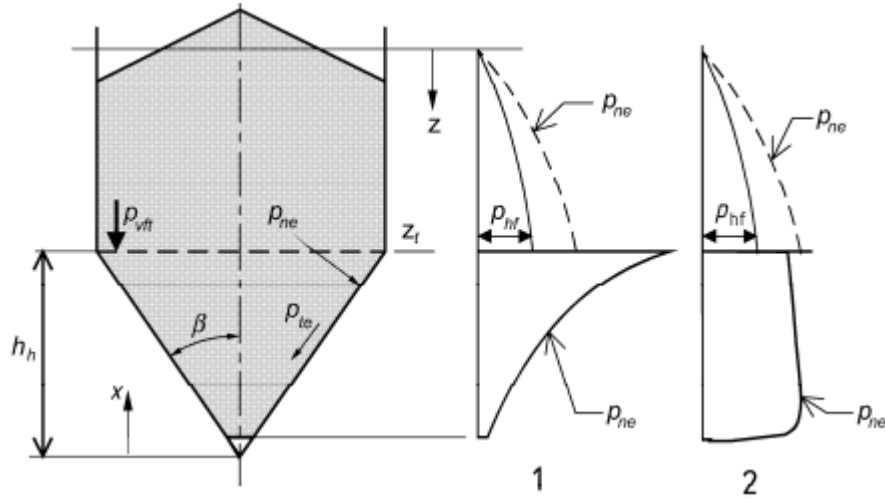
gdzie: φ_{wh} - kąt tarcia o ścianę leja, μ_h - dolna charakterystyczna wartość współczynnika tarcia ośrodka o ścianę leja.

Podczas opróżniania komory silosu, składową parcia prostopadłą do powierzchni leja stromego oblicza się w dowolnym punkcie jego wysokości za pomocą poniższego wzoru:

$$p_{ne} = F_e \cdot p_v \quad (1.32)$$

Wartość tarcia powierzchniowego p_{te} w dowolnym punkcie leja stromego określona jest wzorem:

$$p_{te} = \mu_h \cdot F_e \cdot p_v \quad (1.33)$$



Rys. 1.10. Parcie ośrodka sypkiego w lejach stromych i płytkich przy opróżnianiu (1 – lej stromy, 2 – lej płytki) [N4]

Parcie materiału na ściany leja płytkiego przy napełnianiu i opróżnianiu

Podczas napełniania, średnie parcie pionowe p_v w dowolnym poziomie silosu z lejem płytkim opisane jest wzorem (1.23) i (1.24). Wartość parametru F_f przyjmuje się jako:

$$F_f = 1 - \frac{b}{\left(1 + \frac{\tan\beta}{\mu_h}\right)} \quad (1.34)$$

Parametr n określany jest za pomocą wzoru:

$$n = S \cdot (1 - b) \cdot \mu_{eff} \cdot \cot\beta \quad (1.35)$$

gdzie: μ_{eff} – współczynnik tarcia ośrodka sypkiego o ścianę leja płytkiego, b – współczynnik empiryczny, $b = 0,2$.

W celu określenia efektywnego współczynnika tarcia μ_{eff} należy skorzystać z poniższego wzoru:

$$\mu_{eff} = \frac{(1 - K)}{2 \cdot \tan\beta} \quad (1.36)$$

gdzie: K – dolna charakterystyczna wartość parcia bocznego, β – kąt połówkowy wierzchołka leja.

Podczas procesu napełniania, składową parcia normalnego p_{nf} oblicza się jako iloczyn współczynnika F_f oraz parcia pionowego p_v . W przypadku silosów wyposażonych w płytkie leje, tarcie powierzchniowe p_{tf} wyznacza się, uwzględniając dodatkowo wspomniany wcześniej współczynnik μ_{eff} . Co istotne, zasady obliczeń dla fazy opróżniania są analogiczne do tych stosowanych przy napełnianiu zbiornika.

$$p_{nf} = F_f \cdot p_v \quad (1.37)$$

$$p_{tf} = \mu_{eff} \cdot F_f \cdot p_v \quad (1.38)$$

Obciążenie pionowe na dna płaskie w silosach smukłych

W konstrukcjach o znacznej smukłości przyjmuje się, że parcie pionowe działające na płaskie dno rozkłada się w sposób symetryczny. Wartość parcia pionowego p_v podczas napełniania określa się ze wzoru:

$$p_v = p_{vft} \quad (1.39)$$

gdzie: p_{vft} – średnie parcie pionowe w poziomie punktu przejścia pionowe ściany w płaskie dno przy napełnianiu.

Metodyka określająca parcie pionowe w trakcie opróżniania pokrywa się ze schematem obliczeniowym przyjętym dla fazy napełniania.

1.3. Analiza oddziaływań termicznych

1.3.1. Podstawy określania wpływu temperatury w konstrukcjach silosów

Podczas analizy silosu niezbędne jest uwzględnienie skutków oddziaływań termicznych. Różnice temperatur występujące między składowanym materiałem a konstrukcją mogą generować dodatkowe naprężenia, odkształcenia oraz siły wewnętrzne, które należy obliczyć. W sytuacjach, gdy temperatura magazynowanego materiału sypkiego różni się od temperatury konstrukcji, analiza musi zakładać wystąpienie zwiększonego parcia na ściany. Wynika ono z rozszerzalności termicznej oraz sztywności składowanego ośrodka [N4].

Zgodnie z normą [N4], podczas wprowadzania do silosu materiału o wysokiej temperaturze należy przeanalizować gradient termiczny występujący między chłodniejszym wkładem a gorącym powietrzem znajdującym się nad jego powierzchnią. W obliczeniach trzeba uwzględnić zmienną rozszerzalność cieplną ścian na różnych poziomach konstrukcji oraz wynikające z niej momenty zginające, wywołane koniecznością zachowania ciągłości odkształceń [6,7].

Podczas etapu projektowania konstrukcji silosu niezbędne jest uwzględnienie określonych sytuacji obliczeniowych, do których należą:

- korelacja między spadkiem temperatury otoczenia a temperaturą samej konstrukcji i zmagazynowanego w niej surowca,
- proces napełniania komory materiałem o wysokiej temperaturze,
- oddziaływanie ciepła na wyeksponowane elementy stalowe oraz żelbetowe,
- opory konstrukcyjne ograniczające swobodę odkształceń silosu.

W celu stabilizacji mikroklimatu stosuje się izolację z wełny mineralnej i blachy trapezowej. Jej głównym zadaniem jest eliminacja kondensacji pary wodnej oraz zapewnienie stałych parametrów składowania [1].

Ważnym aspektem jest również migracja wilgoci. Połączenie wzrostu temperatury z zawilgoceniem materiału sypkiego prowadzi do jego pęcznienia, co w konsekwencji wywołuje znaczące, dodatkowe parcie na ściany komory [10].

1.3.2. Obliczeniowa analiza rozkładu temperatury w żelbetowej ścianie silosu.

Rozkład temperatury w przegrodzie silosu opiera się na klasycznej teorii przewodnictwa cieplnego. Zgodnie z wytycznymi normy PN-EN 1991-1-5 [N3] (wraz z załącznikiem D), kluczowym parametrem jest różnica temperatur między wewnętrzną a zewnętrzną płaszczyzną

ściany. To właśnie ten gradient, oznaczany jako ΔT_M , generuje w konstrukcji momenty zginające:

$$\Delta T_M = T(x_1) - T(x_2) \quad (1.40)$$

gdzie: $T(x_1)$ – temperatura wewnętrznej powierzchni ściany, $T(x_2)$ – temperatura zewnętrznej powierzchni ściany.

Dla standardowych przegród warstwowych, w których nie występują lokalne mostki termiczne, temperaturę w dowolnym punkcie x przekroju można obliczyć z zależności:

$$T(x) = T_{in} - \frac{R(x)}{R_{tot}} \cdot (T_{in} - T_{out}) \quad (1.41)$$

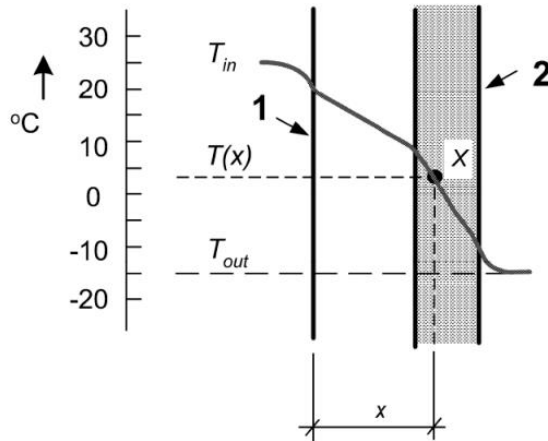
gdzie: T_{in} – temperatura powietrza wewnętrznego, T_{out} – temperatura powietrza zewnętrznego, R_{tot} – całkowity opór cieplny przegrody, $R(x)$ – opór cieplny mierzony od wnętrza do punktu x .

Wartości oporu cieplnego R_{tot} oraz $R(x)$ można wyznaczać, przyjmując określony współczynnik przenikania ciepła oraz współczynniki przewodzenia ciepła.

$$R_{tot} = R_{in} + \sum_i \frac{h_i}{\lambda_i} + R_{out} \quad (1.42)$$

$$R(x) = R_{in} + \sum_i \frac{h_i}{\lambda_i} \quad (1.43)$$

gdzie: R_{in} – opór odbierania ciepła powierzchni wewnętrznej, R_{out} – opór odbierania ciepła powierzchni zewnętrznej, λ_i – współczynnik przewodzenia ciepła, h_i – grubość warstwy.



Rys. 1.11. Temperatura w przegrodzie dwuwarstwowej (1 – powierzchnia wewnętrzna, 2 – powierzchnia zewnętrzna) [N3]

Średnią temperaturę w osi ściany wyznacza się jako średnią arytmetyczną temperatur na powierzchniach żelbetowej ściany. Przy założeniu liniowego rozkładu temperatury na grubości przegrody otrzymuje się:

$$T = \frac{T_{wew} + T_{zew}}{2} \quad (1.44)$$

gdzie: T_{wew} – temperatura powierzchni ściany od strony wewnętrznej komory, T_{zew} – temperatura powierzchni ściany od strony zewnętrznej.

Temperaturę równomiernego ogrzania lub oziębienia ściany określa się jako różnicę między średnią temperaturą w osi ściany a temperaturą początkową konstrukcji:

$$\Delta T_u = T - T_0 \quad (1.45)$$

gdzie: T – średnia temperatura w osi ściany, T_0 – temperatura początkowa konstrukcji.

W sytuacjach, gdy materiał składowany w silosie aktywnie uczestniczy w procesie przewodzenia ciepła, jego parametry powinny być określone doświadczalnie. Jeśli jednak brak jest takich badań, norma [N6] pozwala na przyjęcie zastępczej grubości warstwy przyściennej t_m :

- 20 cm – w przypadku materiałów sproszkowanych oraz drobnoziarnistych,
- 12 cm – dla materiałów o charakterze ziarnistym.

1.3.3. Wpływ wahań temperatury zewnętrznej na konstrukcję silosu

Gwałtowne dobowe wahania temperatury zewnętrznej wywołują w żelbetowych ścianach silosów na materiały sypkie dodatkowe naprężenia termiczne. Konstrukcja pod wpływem chłodu dąży do zmniejszenia obwodu a zgromadzony wewnątrz materiał stawia opór. Wywołuje to zwiększone parcie normalne oraz zjawisko rozciągania połączonego ze zginaniem ścian. Intensywność tych procesów jest ściśle powiązana z rodzajem i odkształcalnością składowanego materiału [8].

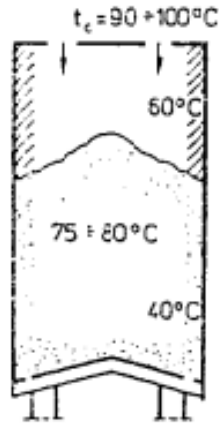
Podstawowe zależności obliczeniowe nie uwzględniają efektów pełzania materiału sypkiego ani przestrzennego rozkładu naprężeń w ścianach. W przypadku długotrwałego obniżenia temperatury pomija się także zmienność współczynnika sprężystości materiału. Na parcie poziome wpływ ma stan techniczny konstrukcji, w tym stopień jej zarysowania [3].

Wykorzystanie odpowiedniej warstwy przyściennej wewnątrz konstrukcji lub montaż izolacji na zewnątrz pozwala skutecznie zniwelować różnice temperatur występujące między obiema stronami ściany. Taki zabieg jest kluczowy, ponieważ bezpośrednio wpływa na wartości momentów zginających oddziałujących na powłokę silosu. W obiektach służących do magazynowania materiałów o standardowej temperaturze zazwyczaj stosuje się izolację zewnętrzną. Z kolei przy składowaniu surowców gorących warstwa przyścienna przejmuje rolę izolatora, skutecznie hamując przepływ gorącego powietrza w głąb struktury [3,7].

1.3.4. Wpływ gorącego ośrodka sypkiego na konstrukcję silosu

Oddziaływania termiczne stają się kluczowym wyzwaniem projektowym, gdy w silosach żelbetowych składowane są materiały o wysokiej temperaturze, taki jak świeżo wyprodukowany cement czy klinkier cementowy. Zagadnienie to jest wyjątkowo złożone, ponieważ rozkład ciepła wewnątrz komory jest nierównomierny i dynamiczny. Podczas gdy składowany przez dłuższy czas materiał stopniowo ochładza się, bezpośrednio nad jego powierzchnią gromadzi się warstwa gorącego powietrza [6,7].

Temperatura wewnątrz silosu zmienia się w zależności od miejsca pomiaru. Cement wprowadzany do komory ma zazwyczaj od 90°C do 100°C. Po pewnym czasie jego temperatura wewnątrz złoża stabilizuje się na poziomie 75–80°C, jednak tuż przy samej ścianie silosu drastycznie spada, osiągając zaledwie 40°C. Powietrze znajdujące się w przestrzeni przyściennej nad poziomem cementu utrzymuje temperaturę około 60°C, co pokazuje, jak istotne są różnice temperatur w różnych strefach obiektu [3,7].

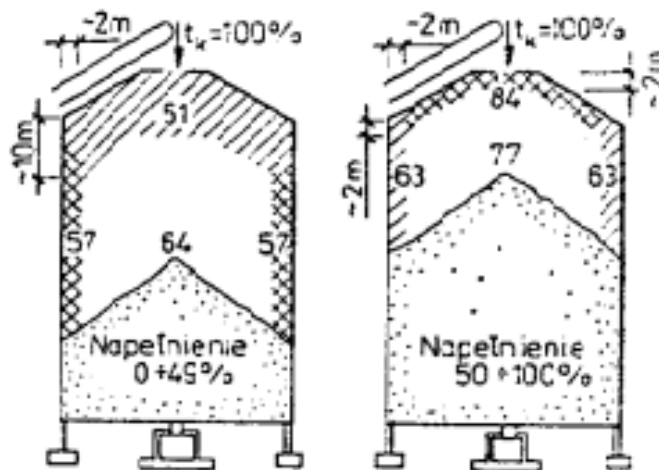


Rys. 1.12. Rozkład temperatury w komorze silosu na cement z uwzględnieniem temperatury składowanego materiału oraz powietrza w komorze [3]

Wyznaczenie temperatury materiału w pobliżu ścian silosu wymaga uwzględnienia dwóch kluczowych czynników:

- temperatury początkowej – czyli wartości, jaką posiada klinkier w momencie załadunku do komory,
- poziomu zasypania – czyli aktualnego stopnia napełnienia komory silosu.

Rysunek 1.13 przedstawia w sposób graficzny zależności między tymi parametrami. Zarówno rozkład temperatur w poszczególnych strefach komory, jak i jej stopień wypełnienia, zostały tam ujęte w wartościach procentowych [3].



Rys. 1.13. Rozkład temperatury w komorze silosu na klinkier z uwzględnieniem procentów temperatury składowanego materiału, dla dwóch przypadków napełnienia komory [3]

Analiza silosów wypełnionych gorącym ośrodkiem sypkim została prowadzona m.in. przez Ogniwka. Badania wykazały, że rozkład temperatur w ścianach jest bezpośrednio uzależniony od tego, jak wysoko zasypany jest silos. W badanych przypadkach, przy składowaniu klinkieru o temperaturze w przedziale 100–200°C, gradient temperatury w samej ścianie żelbetowej wynosił około 20°C [6,7].

2. Warianty analiz numerycznych baterii silosów

Przedmiotem analizy jest żelbetowa 6 komorowa bateria silosów prostopadłościennych z lejem w kształcie ostrosłupa, przeznaczona do magazynowania klinkieru cementowego (rys. 2.2). Badania mają na celu sprawdzenie, jak zmienna grubość ściany oraz wysokość temperatury wprowadzonego materiału wpływają na rozkład sił wewnętrznych powstających w żelbetowych ścianach konstrukcji pod wpływem sprzężonych oddziaływań statycznych i termicznych.

2.1. Założenia dotyczące geometrii baterii silosów

Analizie poddany jest zespół sześciu komór połączonych w jedną baterię. Taki układ wprowadza dodatkowe uwarunkowania statyczne, ponieważ ściany wewnętrzne pracują jako elementy wspólne dla sąsiednich komór. Każda z komór posiada przekrój kwadratowy o boku $a = 5,0$ m (średnica wewnętrzna $d_c = 5,0$ m).

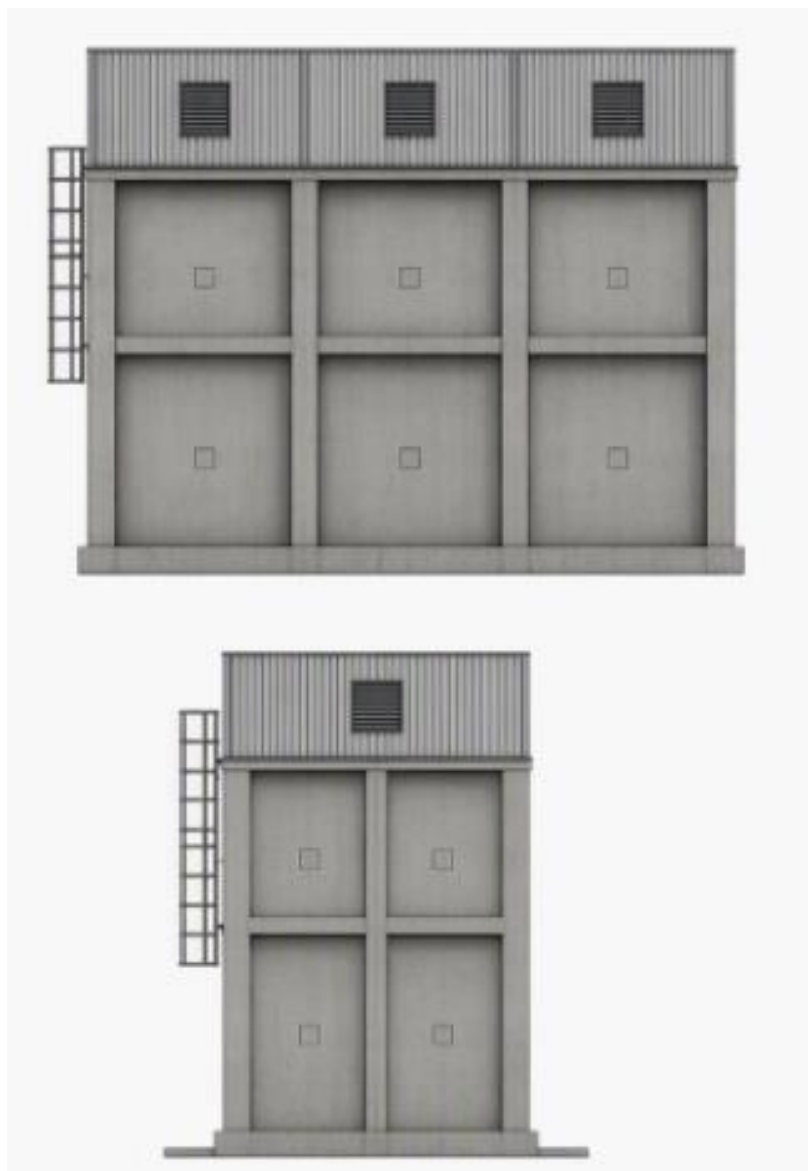
Przyjęto, że wysokość części składowej komory baterii silosów wynosi $H = 14$ m co klasyfikuje je jako silos smukły zgodnie z [N4].

Założono zmienną grubość ściany komory i w tym celu przyjęto trzy warianty grubości ściany:

- wariant I: $t = 0,25$ m,
- wariant II: $t = 0,30$ m,
- wariant III: $t = 0,35$ m.

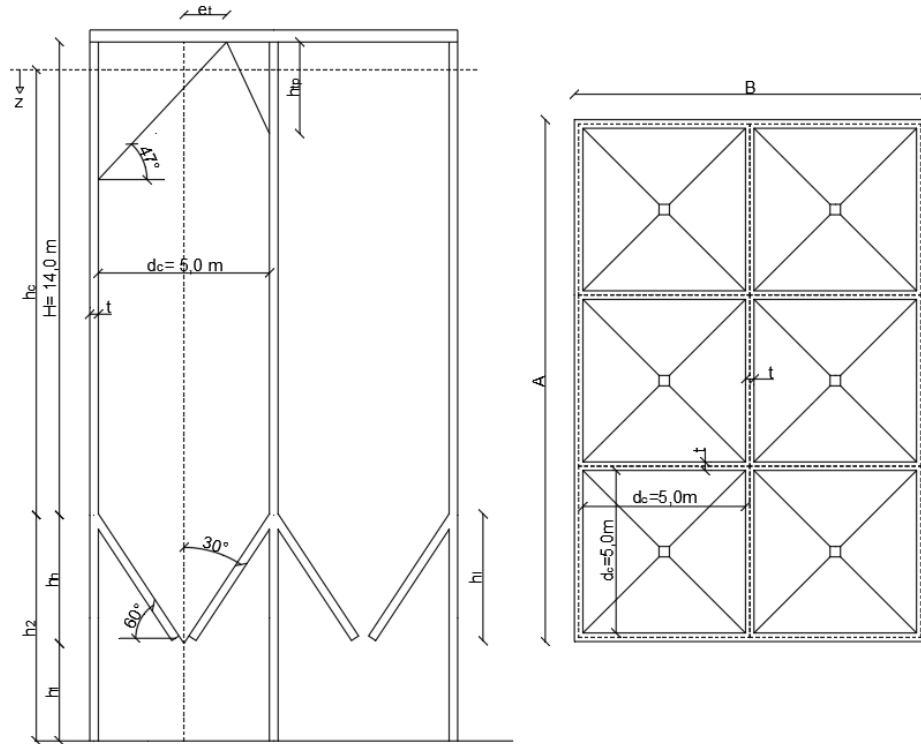
Zgodnie z powyższymi założeniami ściany komór klasyfikowane są jako kategoria D3 [N4].

Konstrukcja dolnej części silosu musi zapewniać swobodny przepływ materiału. Zgodnie z zasadą, że kąt nachylenia ścian leja musi być o 10° większy od kąta stoku naturalnego φ_r materiału. Klinkier cementowy ma kąt stoku naturalnego równy $47,0^\circ$, stąd dla bezpieczeństwa wykonawczego oraz uniknięcia zawieszania się materiału w narożach komory założono kąt nachylenia ścian leja ostrosłupowego równy $\alpha = 60^\circ$. Proces eksploatacji silosu zakłada mimośrodowe napełnianie zbiornika oraz osiowe opróżnianie.



Rys. 2.1. Wizualizacja baterii silosów z galerią nadsilosową

Przekroje komór baterii silosów przedstawiono na rysunku 2.1.



Rys. 2.2. Przekrój komór baterii a) przekrój pionowy baterii, b) przekrój poziomy baterii [P1]

Obliczenia całkowitej wysokości górnego stożka h_{tp}

Całkowita wysokość górnego stożka określana jest ze wzoru:

$$h_{tp} = e_t \cdot \tan \varphi_r \quad (2.1)$$

gdzie: e_t – mimośród otworu nasypowego, φ_r – kąt stoku naturalnego ośrodka sypkiego.

Wysokość pionowego fragmentu ściany h_c

Wysokość pionowego fragmentu ściany od punktu przejścia do powierzchni zastępczej opisuje wzór:

$$h_c = H - \frac{2}{3} h_{tp} \quad (2.2)$$

gdzie: H – jest wysokością ściany komory silosu.

Smukłość silosu s

Smukłość silosu określana jest wzorem:

$$s = \frac{h_c}{d_c} \quad (2.3)$$

gdzie: h_c – jest wysokością pionowego segmentu ściany, od powierzchni zastępczej do przejścia ściany w dno, d_c – miarodajny wymiar przekroju poprzecznego silosu.

Pole przekroju poprzecznego A oraz obwód wewnętrzny U

Dla prostopadłościennego silosu żelbetowego, pole przekroju poprzecznego można obliczyć poniższym wzorem:

$$A = a^2 \quad (2.4)$$

gdzie: a – wewnętrzna długość boku komory.

$$U = 4a \quad (2.5)$$

Objętość składowania V

Dla prostopadłościennego silosu żelbetowego, objętość składowania można obliczyć poniższym wzorem:

$$V = \left[A \cdot h_c + \frac{1}{3}(a \cdot b) \cdot h_h - \frac{1}{3}(0,40 \cdot 0,40) \cdot (h_h - h_l) \right] \cdot \gamma_l \quad (2.6)$$

gdzie: h_c – jest wysokością pionowego segmentu ściany, od powierzchni zastępczej do przejścia ściany w dno, A – pole przekroju poprzecznego silosu, a – wewnętrzna długość boku komory, h_h - pionowa wysokość stożka silosu, h_l – pionowa wysokość leja silosu, γ_l – dolna wartość ciężaru jednostkowego składowanego materiału (dla klinkieru cementowego – tabela 2.2.).

Obliczenie wariantu I - $t = 0,25$ m

Miarodajny wymiar przekroju komory:

$$d_c = a = 5,00 \text{ m}$$

Całkowita wysokość h_{tp} według wzoru (2.1):

Przyjęto wartość e_t równą:

$$e_t = 0,25 \cdot d_c \quad (2.7)$$

$$e_t = 0,25 \cdot 5,00 = 1,25 \text{ m}$$

$$h_{tp} = 1,25 \cdot \tan 47^\circ = 1,34 \text{ m}$$

Wysokość pionowego fragmentu ściany h_c :

$$h_c = 14,00 - \frac{2}{3} \cdot 1,34 = 13,11 \text{ m}$$

Pole i obwód przekroju poprzecznego komory silosu:

$$A = 5,00 \cdot 5,00 = 25,00 \text{ m}^2$$

$$U = 2 \cdot 5,00 + 2 \cdot 5,00 = 20,00 \text{ m}$$

Objętość składowania silosu:

$$\begin{aligned} V &= \left[25,00 \cdot 13,11 + \frac{1}{3} (5,00 \cdot 5,00) \cdot 4,30 - \frac{1}{3} (0,40 \cdot 0,40) \cdot (4,30 - 4,00) \right] \cdot 15,00 \\ &= 545,21 \text{ ton} \end{aligned}$$

Smukłość silosu wynosi:

$$s = \frac{13,11}{5,00} = 2,62 > 2,0$$

Zgodnie z tablicą 2.1 [N4] prostopadłościenna bateria silosów zaliczana jest do 2 klasy oceny oddziaływań (AAC2). Dalsze obliczenia dla pozostałych wariantów silosów zestawiono w tabeli 2.1.

Tabela 2.1. Zestawienie danych geometrycznych pozostałych wariantów

Dane geometryczne komory silosu	Oznaczenie	Wymiary komory		
		$a = 5,00 \text{ m}$	$a = 5,00 \text{ m}$	$a = 5,00 \text{ m}$
Grubość ściany	$t \text{ [m]}$	0,25	0,30	0,35
Wysokość ściany	$H \text{ [m]}$	14,00	14,00	14,00
Długość wewnętrzna	$a \text{ [m]}$	5,00	5,00	5,00
Wysokość leja	$h_h \text{ [m]}$	4,30	4,30	4,30
Wysokość stożka	$h_l \text{ [m]}$	4,00	4,00	4,00
Wysokość górnego stożka nasypowego	$h_{tp} \text{ [m]}$	1,34	1,34	1,34
Wysokość pionowego segmentu ściany	$h_c \text{ [m]}$	13,11	13,11	13,11
Kąt nachylenia ściany leja	$\alpha [^\circ]$	60	60	60
Kąt połówkowy wierzchołka leja	$\beta [^\circ]$	30	30	30
Mimośród otworu nasypowego	$e_t \text{ [m]}$	1,25	1,25	1,25
Mimośród otworu wysypowego	$e_o \text{ [m]}$	0,00	0,00	0,00
Pole przekroju poprzecznego	$A \text{ [m}^2\text{]}$	25,00	25,00	25,00
Obwód wewnętrzny pola przekroju	$U \text{ [m]}$	20,00	20,00	20,00
Objętość składowania	$V \text{ [tony]}$	545,21	545,21	545,21
Smukłość silosu	$h_c/d_c \text{ [-]}$	2,62	2,62	2,62
Klasa oceny oddziaływań	-	AAC2	AAC2	AAC2

2.2. Właściwości przyjętego materiału sypkiego

Kluczowym i najbardziej energochłonnym etapem produkcji cementu jest proces wypalania w piecu, gdzie w wyniku licznych reakcji i przemian fazowych powstaje klinkier. Przygotowana mieszanka surowcowa podlega tam kolejno osuszaniu, podgrzewaniu oraz dekompozycji. W strefie spiekania materiał nagrzewa się do 1450°C, przebywając w temperaturze powyżej 800°C przez około 30 minut. Ekstremalne warunki panują w strumieniu gazów i płomienia, gdzie temperatura sięga niemal 2000°C. Po opuszczeniu pieca klinkier jest chłodzony z poziomu 900–1300°C do około 100°C, a odzyskane z chłodnika gorące powietrze zasila młyny węgla. Klinkier poddawany jest dwutygodniowemu sezonowaniu, podczas którego następuje jego naturalne dojrzewanie i stabilizacja parametrów. Po upływie tego czasu półprodukt przechodzi przez finalne procesy technologiczne oraz przemiał, w wyniku czego otrzymuje się gotowy cement [S2].

Wartości parametrów materiałowych klinkieru cementowego odczytano z tablicy E1 [N4] i zestawiono w tabeli 2.2.

Tabela. 2.2. Zestawienie parametrów materiałowych klinkieru cementowego

Właściwości klinkieru	Oznaczenie	Jednostka	Wartość
Ciężar jednostkowy γ			
wartość dolna	γ_l	[kN/m ³]	15,00
wartość górna	γ_u	[kN/m ³]	18,00
Kąt stoku naturalnego	δ_r	[°]	47,00
Kąt tarcia wewnętrznego φ_i			
wartość średnia	φ_{im}	[°]	40,00
parametr konwersji	a_φ	[-]	1,20
Iloraz parcia bocznego K			
wartość średnia	K_m	[-]	0,38
parametr konwersji	a_K	[-]	1,31
Współczynnik tarcia o ścianę μ			
wartość średnia dla ściany typu D3	μ_m	[-]	0,62
parametr konwersji	a_μ	[-]	1,07
Bazowy współczynnik parcia lokalnego	C_{op}	[-]	0,70

Przy określaniu ekstremalnych górnych i dolnych wartości parametrów K , μ , φ_i wykorzystuje się współczynniki konwersji a . Pozwala to na uwzględnienie naturalnej zmienności właściwości materiału sypkiego i bezpieczne wymiarowanie konstrukcji żelbetowej pod kątem parcia. Obliczone według wzorów (2.8) – (2.13) wartości górne i dolne dla klinkieru zestawiono w tabeli 2.3.

Tabela. 2.3. Zestawienie wartości parametrów klinkieru cementowego

Parametry klinkieru cementowego	Wartość dolna	Wartość średnia	Wartość górna
Kąt tarcia wewnętrznego φ_i	33,33°	40,00°	48,00°
Iloraz parcia bocznego K	0,290	0,38	0,498
Współczynnik tarcia o ścianę μ	0,579	0,62	0,663

Powyższe wartości z tabeli obliczono na podstawie wzorów z normy [N4]. Wzory zestawiono poniżej.

Górna wartość charakterystyczna K_g

$$K_g = a_K \cdot K_m \quad (2.8)$$

Dolna wartość charakterystyczna K_d

$$K_d = \frac{K_m}{a_K} \quad (2.9)$$

Górna wartość charakterystyczna μ_g

$$\mu_g = a_\mu \cdot \mu_m \quad (2.10)$$

Dolna wartość charakterystyczna μ_d

$$\mu_d = \frac{\mu_m}{a_\mu} \quad (2.11)$$

Górna wartość charakterystyczna φ_{ig}

$$\varphi_{ig} = a_\varphi \cdot \varphi_{im} \quad (2.12)$$

Dolna wartość charakterystyczna φ_{id}

$$\varphi_{id} = \frac{\varphi_{im}}{a_\varphi} \quad (2.13)$$

2.3. Temperatura składowanego materiału

Analiza pracy silosu musi uwzględniać zmienność klimatyczną otoczenia, czyli uwzględniać porę letnią i zimową, co wpływa na średnią temperaturę samej konstrukcji. Z kolei temperatura wewnątrz komory jest ściśle powiązana z technologią produkcji [3].

W badaniach przyjęto dwa warianty temperatury składowanego klinkieru cementowego:

- $T_{in,1} = 80^\circ\text{C}$
- $T_{in,2} = 100^\circ\text{C}$

2.4. Zestawienie wariantów testów obliczeniowych

Prostopadłościenny silos na gorący ośrodek sypki zostanie poddany następującym przypadkom obciążeń:

- Oddziaływanie statyczne od parcia materiału sypkiego dla wszystkich komór baterii silosów (1),
- Oddziaływanie statyczne od parcia materiału sypkiego przyłożone w kształcie szachownicy na komory baterii silosów z uwzględnieniem całkowitego i częściowego zapełnienia komór wewnątrz baterii (2),
- Oddziaływanie termiczne wywołane temperaturą składowanego materiału dla wszystkich komór baterii silosów bez uwzględnienia warstwy tłumiącej (3),
- Oddziaływanie termiczne wywołane temperaturą składowanego materiału dla wszystkich komór baterii silosów z uwzględnieniem warstwy tłumiącej (4),
- Oddziaływanie termiczne wywołane temperaturą składowanego materiału przyłożone w kształcie szachownicy na komory baterii silosów bez uwzględnienia warstwy tłumiącej (5),
- Oddziaływanie termiczne wywołane temperaturą składowanego materiału przyłożone w kształcie szachownicy na komory baterii silosów z uwzględnieniem warstwy tłumiącej (6),

Dla prostopadłościennego silosu na klinkier opracowano zestawienie wariantów testów, które pokazano w tabeli 2.4.

Tabela 2.4. Zestawienie wariantów testów obliczeniowych

Temperatura ośrodka sypkiego	Grubość ściany		
	0,25 m	0,30 m	0,35 m
$T_1 = 80^{\circ}\text{C}$ dla pory zimowej oraz letniej	(1)	(1)	(1)
	(-)	(2)	(-)
	(1) + (3)	(1) + (3)	(1) + (3)
	(1) + (4)	(1) + (4)	(1) + (4)
	(-)	(2) + (5)	(-)
	(-)	(2) + (6)	(-)
$T_1 = 100^{\circ}\text{C}$ dla pory zimowej oraz letniej	(1)	(1)	(1)
	(-)	(2)	(-)
	(1) + (3)	(1) + (3)	(1) + (3)
	(1) + (4)	(1) + (4)	(1) + (4)
	(-)	(2) + (5)	(-)
	(-)	(2) + (6)	(-)

3. Obciążenia działające na silos prostopadłościenny

3.1. Zebranie obciążeń stałych

3.1.1. Płyta przekrycia

Poniżej zestawiono wartości obciążenia charakterystycznego oraz obliczeniowego warstw płyty przekrycia baterii silosu prostopadłościennego zgodnie z eurokodem [N1] i [N2].



Rys. 3.1. Przekrój poprzeczny płyty przekrycia [P1]

Tabela 3.1. Zestawienie obciążeń stałych płyty przekrycia

Lp.	Rodzaj obciążenia	Grubość [m]	Ciężar [kN/m ³]	Obciążenie charakterystyczne [kN/m ²]	γ_G	Obciążenie obliczeniowe [kN/m ²]
1	Gładź cementowa	0,04	21	0,840	1,35	1,134
2	Płyta żelbetowa	0,35	25	8,750		11,813
Σ				$g_k^p = 9,590$	Σ	$g_d^p = 12,947$

3.1.2. Konstrukcja galerii nadsilosowej

Obciążenie stałe konstrukcji galerii nadsilosowej przyjęto jako pokrycie dachowe w postaci płyt warstwowych. Wartość obciążenia zestawiono w tabeli 3.2.

Tabela 3.2. Zestawienie obciążeń stałych konstrukcji galerii nadsilosowej

Lp.	Rodzaj obciążenia	Grubość [m]	Ciężar [kN/m ³]	Obciążenie charakterystyczne [kN/m ²]	γ_G	Obciążenie obliczeniowe [kN/m ²]
1	Płyta warstwowa PIR	0,10	-	0,103	1,35	0,139
			Σ	$g_k^g = 0,103$	Σ	$g_d^g = 0,139$

3.1.3. Ściany silosu

Charakterystyczny ciężar ścian silosu prostopadłościennego wyznacza się następującym wzorem:

$$g_k^s = \frac{(a + 2t) \cdot (a + 2t) - a^2}{2 \cdot (a + t) + 2 \cdot (a + t)} \cdot H \cdot \gamma_b \quad (3.1)$$

Obliczeniowy ciężar wyznacza się następująco:

$$g_d^s = g_k^s \cdot \gamma_G \quad (3.2)$$

gdzie: a – wewnętrzna długość boku komory, t – grubość ścian, H – wysokość ścian, γ_b – ciężar objętościowy betonu, γ_G – częściowy współczynnik bezpieczeństwa $\gamma_G = 1,35$ [N1].

W przypadku silosu na klinkier cementowy o wysokości ścian komory $H = 14,00$ m, charakterystyczny ciężar własny ścian wynosi odpowiednio:

- dla $t = 0,25$ m

$$g_{k1}^s = \frac{(5,0 + 2 \cdot 0,25) \cdot (5,0 + 2 \cdot 0,25) - 5,0^2}{2 \cdot (5,0 + 0,25) + 2 \cdot (5,0 + 0,25)} \cdot 14,00 \cdot 25,00 = 87,50 \text{ kN/m}$$

- dla $t = 0,30$ m

$$g_{k2}^s = \frac{(5,0 + 2 \cdot 0,30) \cdot (5,0 + 2 \cdot 0,30) - 5,0^2}{2 \cdot (5,0 + 0,30) + 2 \cdot (5,0 + 0,30)} \cdot 14,00 \cdot 25,00 = 105,50 \text{ kN/m}$$

- dla $t = 0,35$ m

$$g_{k3}^s = \frac{(5,0 + 2 \cdot 0,35) \cdot (5,0 + 2 \cdot 0,35) - 5,0^2}{2 \cdot (5,0 + 0,35) + 2 \cdot (5,0 + 0,35)} \cdot 14,00 \cdot 25,00 = 123,66 \text{ kN/m}$$

Z kolei wartość obliczeniowa ciężaru ścian wspomnianego silosu wynosi odpowiednio:

- dla $t = 0,25$ m

$$g_{d1}^s = 87,50 \cdot 1,35 = 118,13 \text{ kN/m}$$

- dla $t = 0,30$ m

$$g_{d2}^s = 105,50 \cdot 1,35 = 142,43 \text{ kN/m}$$

- dla $t = 0,35$ m

$$g_{d3}^s = 123,66 \cdot 1,35 = 166,94 \text{ kN/m}$$

3.1.4. Lej silosu

Charakterystyczny ciężar leja silosu prostopadłościennego wyznacza się następującym wzorem:

$$g_k^l = \frac{\frac{1}{3} \cdot ((a + 2t) \cdot (a + 2t) - a^2) \cdot h_n - \frac{1}{3} \cdot 0,4 \cdot 0,4 \cdot (h_n - h_l)}{2 \cdot (a + t) + 2 \cdot (a + t)} \cdot \gamma_b \quad (3.3)$$

Obliczeniowy ciężar wyznacza się następująco:

$$g_d^l = g_k^l \cdot \gamma_G \quad (3.4)$$

gdzie: a – wewnętrzna długość boku komory, t – grubość ścian, h_n – pionowa wysokość stożka silosu, h_l – pionowa wysokość leja silosu, γ_b – ciężar objętościowy betonu, γ_G – częściowy współczynnik bezpieczeństwa $\gamma_G = 1,35$ [N1].

W przypadku silosu na klinkier cementowy, charakterystyczny ciężar własny leja wynosi odpowiednio:

- dla $t = 0,25$ m

$$g_{k1}^l = \frac{\frac{1}{3} \cdot ((5,0 + 2 \cdot 0,25) \cdot (5,0 + 2 \cdot 0,25) - 5,0^2) \cdot 4,30 - \frac{1}{3} \cdot 0,4 \cdot 0,4 \cdot (4,30 - 4,00)}{2 \cdot (5,0 + 0,25) + 2 \cdot (5,0 + 0,25)} \cdot 25,00 = 8,94 \text{ kN/m}$$

- dla $t = 0,30$ m

$$g_{k2}^l = \frac{\frac{1}{3} \cdot ((5,0 + 2 \cdot 0,30) \cdot (5,0 + 2 \cdot 0,30) - 5,0^2) \cdot 4,30 - \frac{1}{3} \cdot 0,4 \cdot 0,4 \cdot (4,30 - 4,00)}{2 \cdot (5,0 + 0,30) + 2 \cdot (5,0 + 0,30)} \cdot 25,00 = 10,73 \text{ kN/m}$$

- dla $t = 0,35$ m

$$g_{k3}^l = \frac{\frac{1}{3} \cdot ((5,0 + 2 \cdot 0,35) \cdot (5,0 + 2 \cdot 0,35) - 5,0^2) \cdot 4,30 - \frac{1}{3} \cdot 0,4 \cdot 0,4 \cdot (4,30 - 4,00)}{2 \cdot (5,0 + 0,35) + 2 \cdot (5,0 + 0,35)} \cdot 25,00 = 12,52 \text{ kN/m}$$

Z kolei wartość obliczeniowa ciężaru ścian wspomnianego silosu wynosi odpowiednio:

- dla $t = 0,25$ m

$$g_{d1}^s = 8,94 \cdot 1,35 = 12,07 \text{ kN/m}$$

- dla $t = 0,30$ m

$$g_{d2}^s = 10,73 \cdot 1,35 = 14,49 \text{ kN/m}$$

- dla $t = 0,35$ m

$$g_{d3}^s = 12,52 \cdot 1,35 = 16,91 \text{ kN/m}$$

3.2. Zebranie obciążeń zmiennych

3.2.1. Płyta przekrycia

Poniżej przedstawiono zestawienie obciążeń zmiennych dla płyty przekrycia. Założono obciążenie technologiczne odpowiadające kategorii E2, czyli użytkowanie przemysłowe.

Tabela 3.3. Zestawienie obciążeń zmiennych płyty przekrycia

L.P	Rodzaj obciążenia	Obciążenie charakterystyczne [kN/m ²]	γ_G	Obciążenie obliczeniowe [kN/m ²]
1	Obciążenie technologiczne – kategoria E2	2,000	1,5	3,000
	Σ	$g_{zk}^p = 2,000$	Σ	$g_{zd}^p = 3,000$

3.2.2. Konstrukcja galerii nadsilosowej

Jako obciążenie zmienne przyjęto ciężar własny przenośnika taśmowego, a szczegółowe wyniki tego zestawienia przedstawiono w tabeli 3.4.

Tabela 3.4. Zestawienie obciążeń zmiennych konstrukcji galerii nadsilosowej [S3]

L.P	Rodzaj obciążenia	Obciążenie charakterystyczne [kN/m ²]	γ_G	Obciążenie obliczeniowe [kN/m ²]
1	Przenośnik taśmowy PT-250	0,256	1,5	0,384
	Σ	$g_{zk}^g = 0,256$	Σ	$g_{zd}^g = 0,384$

4. Analiza oddziaływań statycznych od parcia ośrodka sypkiego

4.1. Wyznaczenie parcia składowanego ośrodka sypkiego przy założeniu całkowitego poziomego napełnienia komory

4.1.1. Parcie materiału na ściany silosu przy napełnieniu

- Parcie poziome p_{hf}

Charakterystyczne wartości właściwości klinkieru cementowego:

- dolna wartość współczynnika tarcia materiału o ścianę $\mu_d = 0,579$
- górna wartość ilorazu parcia bocznego $K_g = 0,498$
- górna wartość ciężaru jednostkowego $\gamma_u = 18,00 \text{ kN/m}^3$

Charakterystyczna głębokość określona jest wzorem:

$$z_o = \frac{1}{K_g \cdot \mu_d} \cdot \frac{A}{U} = \frac{1}{0,498 \cdot 0,579} \cdot \frac{25,00}{20,00} = 4,34 \text{ m}$$

Asymptota parcia poziomego określona jest wzorem:

$$p_{ho} = \gamma_u \cdot K_g \cdot z_o = 18,00 \cdot 0,498 \cdot 4,34 = 38,86 \text{ kN/m}^2$$

Zestawienie obliczonych wartości parcia poziomego na ścianę silosu w odstępach co 1,0 m wysokości komory zawarto w tabeli 4.1.

Tabela 4.1. Parcie poziome na ścianę silosu przy napełnianiu

z [m]	$Y_J(z)$	Wartość charakterystyczna $p_{hf}(z)$ [kN/m ²]	Wartość obliczeniowa $p_{hf}(z)$ [kN/m ²]
0,00	0,000	0,00	0,00
1,00	0,206	8,01	12,01
2,00	0,370	14,36	21,54
3,00	0,499	19,41	29,11
4,00	0,603	23,42	35,12
5,00	0,684	26,60	39,90
6,00	0,749	29,12	43,68
7,00	0,801	31,13	46,69
8,00	0,842	32,72	49,08
9,00	0,875	33,99	50,98
10,00	0,900	34,99	52,49
11,00	0,921	35,79	53,68
12,00	0,937	36,42	54,63
13,00	0,950	36,92	55,38
13,11	0,951	36,97	55,45

- Tarcie powierzchniowe p_{wf}

Charakterystyczne wartości właściwości klinkieru cementowego:

- górna wartość współczynnika tarcia materiału o ścianę $\mu_g = 0,663$
- górna wartość ilorazu parcia bocznego $K_g = 0,498$
- górna wartość ciężaru jednostkowego $\gamma_u = 18,00 \text{ kN/m}^3$

Charakterystyczna głębokość określona jest wzorem:

$$z_o = \frac{1}{K_g \cdot \mu_g} \cdot \frac{A}{U} = \frac{1}{0,498 \cdot 0,663} \cdot \frac{25,00}{20,00} = 3,79 \text{ m}$$

Asymptota parcia poziomego określona jest wzorem:

$$p_{ho} = \gamma_u \cdot K_g \cdot z_o = 18,00 \cdot 0,50 \cdot 3,79 = 33,94 \text{ kN/m}^2$$

Zestawienie obliczonych wartości tarcia powierzchniowego na ścianę silosu w odstępach co 1,0 m wysokości komory zawarto w tabeli 4.2.

Tabela 4.2. Tarcie powierzchniowe na ścianę silosu przy napełnianiu

z [m]	$Y_J(z)$	Wartość charakterystyczna $p_{wf}(z)$ [kN/m ²]	Wartość obliczeniowa $p_{wf}(z)$ [kN/m ²]
0,00	0,000	0,00	0,00
1,00	0,232	5,22	7,83
2,00	0,410	9,23	13,85
3,00	0,547	12,31	18,47
4,00	0,652	14,68	22,02
5,00	0,733	16,49	24,74
6,00	0,795	17,89	26,83
7,00	0,843	18,96	28,44
7,50	0,862	19,40	29,10
8,00	0,879	19,78	29,67
9,00	0,907	20,41	30,62
10,00	0,929	20,90	31,34
11,00	0,945	21,27	31,90
12,00	0,958	21,55	32,33
13,00	0,968	21,77	32,66
13,11	0,969	21,79	32,69

- Parcie pionowe p_{vf}

Charakterystyczne wartości właściwości klinkieru cementowego:

- dolna wartość współczynnika tarcia materiału o ścianę $\mu_d = 0,579$
- dolna wartość ilorazu parcia bocznego $K_d = 0,290$
- górna wartość ciężaru jednostkowego $\gamma_u = 18,00 \text{ kN/m}^3$

Charakterystyczna głębokość określona jest wzorem:

$$z_o = \frac{1}{K_d \cdot \mu_d} \cdot \frac{A}{U} = \frac{1}{0,290 \cdot 0,579} \cdot \frac{25,00}{20,00} = 7,44 \text{ m}$$

Asymptota parcia poziomego określona jest wzorem:

$$p_{ho} = \gamma_u \cdot K_d \cdot z_o = 18,00 \cdot 0,290 \cdot 7,44 = 38,86 \text{ kN/m}^2$$

Zestawienie obliczonych wartości parcia pionowego na ścianę silosu w odstępach co 1,0 m wysokości komory zawarto w tabeli 4.3.

Tabela 4.3. Parcie pionowe na ścianę silosu przy napełnianiu

z [m]	$Y_I(z)$	Wartość charakterystyczna $p_{vf}(z)$ [kN/m ²]	Wartość obliczeniowa $p_{vf}(z)$ [kN/m ²]
0,00	0,000	0,00	0,00
1,00	0,126	16,84	25,27
2,00	0,236	31,57	47,35
3,00	0,332	44,44	66,67
4,00	0,416	55,70	83,55
5,00	0,489	65,54	98,32
6,00	0,553	74,15	111,22
7,00	0,609	81,67	122,51
8,00	0,659	88,25	132,37
9,00	0,701	94,00	141,00
10,00	0,739	99,03	148,54
11,00	0,772	103,42	155,14
12,00	0,800	107,27	160,90
13,00	0,826	110,63	165,94
13,11	0,828	110,96	166,44

- Parcie lokalne przy napełnianiu

Wysokość na jakiej przyłożone jest obciążenie lokalne wyznaczono wzorem:

$$s = 0,2 \cdot 5,00 = 1,00 \text{ m}$$

Iloraz mimośrodowość usytuowania kanału przepływu oraz średnicy silosu wyznaczono wzorem:

$$E = 2 \cdot \frac{1,25}{5,00} = 0,50 \text{ m}$$

Współczynnik obciążenia lokalnego przy napełnianiu określony wzorem (1,9) wynosi:

$$C_{pf} = 0,21 \cdot 0,70 \cdot [1 + 2 \cdot 0,50^2] \cdot \left(1 - e^{\{-1,5[\frac{13,11}{5,00}] - 1\}}\right) = 0,20$$

Wielkość bazowa parcia lokalnego przy napełnianiu wynosi:

- na wysokości 6,50 m (tabela 4.4)

$$p_{pf}^{6,50} = 0,20 \cdot 45,28 = 9,11 \text{ kN/m}^2$$

- na wysokości 7,00 m (tabela 4.4)

$$p_{pf}^{7,00} = 0,20 \cdot 46,69 = 9,39 \text{ kN/m}^2$$

- na wysokości 7,50 m (tabela 4.4)

$$p_{pf}^{7,50} = 0,20 \cdot 47,96 = 9,65 \text{ kN/m}^2$$

Przyrost parcia symetrycznego przy napełnianiu wynosi:

- na wysokości 6,50 m (tabela 4.4)

$$p_{pf,nc}^{6,50} = 0,36 \cdot 9,11 = 3,28 \text{ kN/m}^2$$

- na wysokości 7,00 m (tabela 4.4)

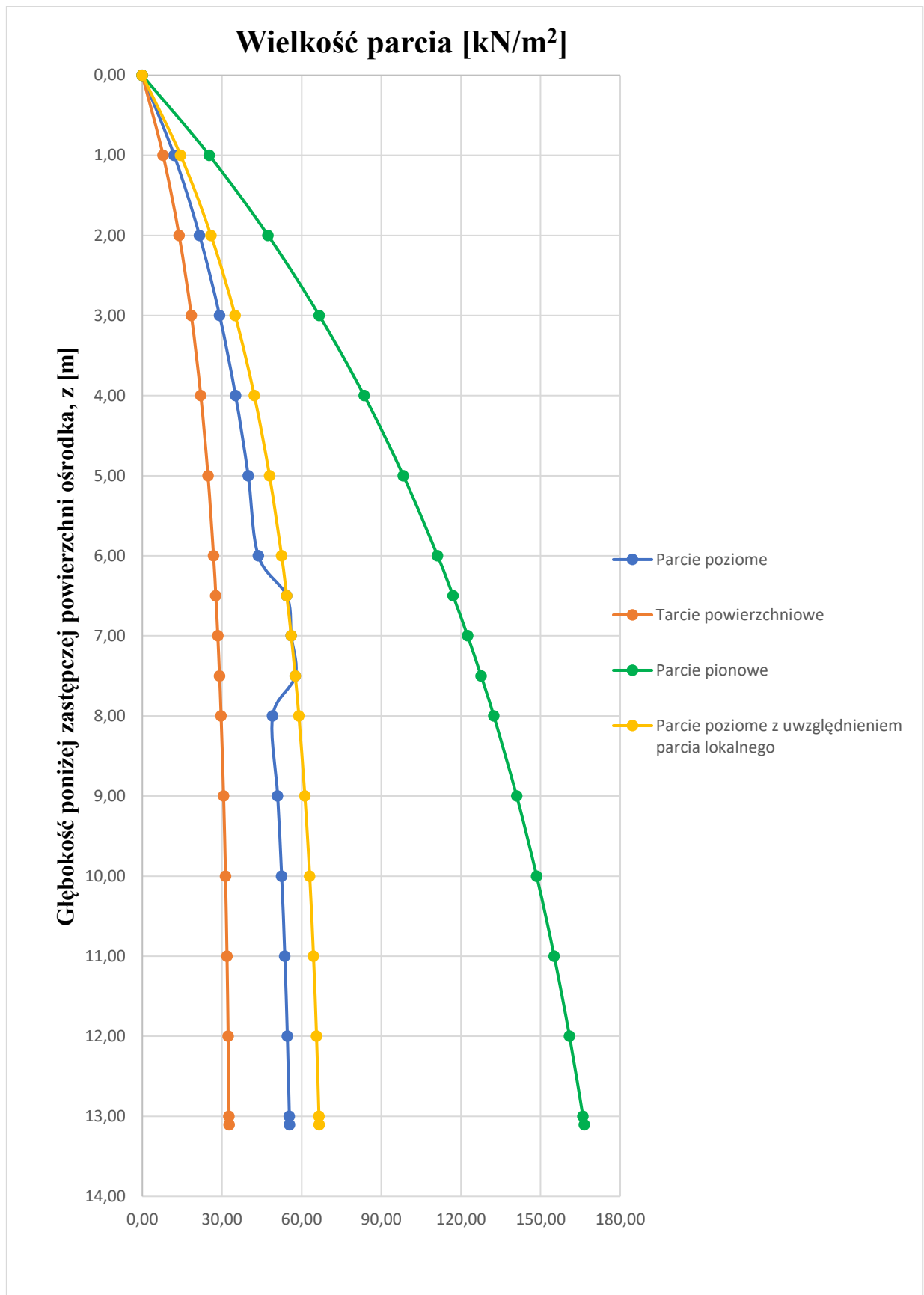
$$p_{pf,nc}^{7,00} = 0,36 \cdot 9,39 = 3,38 \text{ kN/m}^2$$

- na wysokości 7,50 m (tabela 4.4)

$$p_{pf,nc}^{7,50} = 0,36 \cdot 9,65 = 3,47 \text{ kN/m}^2$$

Tabela 4.4. Zestawienie wartości obliczeniowych parć na ścianę silosu przy napełnieniu

z [m]	Wartość obliczeniowa $p_{hf}(z)$ [kN/m ²]	Wartość obliczeniowa $p_{wf}(z)$ [kN/m ²]	Wartość obliczeniowa $p_{vf}(z)$ [kN/m ²]
0,00	0,00	0,00	0,00
1,00	12,01	7,83	25,27
2,00	21,54	13,85	47,35
3,00	29,11	18,47	66,67
4,00	35,12	22,02	83,55
5,00	39,90	24,74	98,32
6,00	43,68	26,83	111,22
6,50	45,28	27,69	117,05
7,00	46,69	28,44	122,51
7,50	47,96	29,10	127,61
8,00	49,08	29,67	132,37
9,00	50,98	30,62	141,00
10,00	52,49	31,34	148,54
11,00	53,68	31,90	155,14
12,00	54,63	32,33	160,90
13,00	55,38	32,66	165,94
13,11	55,45	32,69	166,44
Wartości parcia poziomego po uwzględnieniu parcia lokalnego			
z [m]	p_{pf} [kN/m ²]	p_{hf} [kN/m ²]	$p_{hf}^* = p_{hf} + p_{pf}$ [kN/m ²]
6,50	9,11	45,28	54,38
7,00	9,39	46,69	56,08
7,50	9,65	47,96	57,60
Wartości parcia poziomego po uwzględnieniu przyrostu parcia symetrycznego			
z [m]	$p_{pf,nc}$ [kN/m ²]	p_{hf} [kN/m ²]	$p_{hf}^* = p_{hf} + p_{pf,nc}$ [kN/m ²]
6,50	3,28	45,28	48,55
7,00	3,38	46,69	50,07
7,50	3,47	47,96	51,43



Rys. 4.1. Wykres parcia klinkieru cementowego na ścianę silosu przy napełnianiu

4.1.2. Parcie materiału na ściany silosu przy opróżnianiu

- Parcie poziome p_{he}

Parcie poziome przy opróżnianiu silosu oblicza się według wzoru (1.13), bazując na wartościach p_{hf} określonych wcześniej w tabeli 4.1. Zmienność tego obciążenia w odstępach co 1,0 m wysokości przedstawiono w tabeli 4.5.

Tabela 4.5. Parcie poziome na ścianę silosu przy opróżnianiu

z [m]	C_h	Wartość obliczeniowa $p_{hf}(z)$ [kN/m ²]	Wartość obliczeniowa $p_{he}(z)$ [kN/m ²]
0,00	1,15	0,00	0,00
1,00	1,15	12,01	13,81
2,00	1,15	21,54	24,77
3,00	1,15	29,11	33,48
4,00	1,15	35,12	40,39
5,00	1,15	39,90	45,88
6,00	1,15	43,68	50,24
7,00	1,15	46,69	53,70
8,00	1,15	49,08	56,44
9,00	1,15	50,98	58,63
10,00	1,15	52,49	60,36
11,00	1,15	53,68	61,73
12,00	1,15	54,63	62,83
13,00	1,15	55,38	63,69
13,11	1,15	55,45	63,77

- Tarcie powierzchniowe p_{we}

Tarcie powierzchniowe przy opróżnianiu silosu oblicza się według wzoru (1.14), bazując na wartościach p_{wf} określonych wcześniej w tabeli 4.2. Zmienność tego obciążenia w odstępach co 1,0 m wysokości przedstawiono w tabeli 4.6.

Tabela 4.6. Tarcie powierzchniowe na ścianę silosu przy opróżnianiu

z [m]	C_w	Wartość obliczeniowa $p_{wf}(z)$ [kN/m ²]	Wartość obliczeniowa $p_{we}(z)$ [kN/m ²]
0,00	1,10	0,00	0,00
1,00	1,10	7,83	8,62
2,00	1,10	13,85	15,24
3,00	1,10	18,47	20,32
4,00	1,10	22,02	24,22
5,00	1,10	24,74	27,21
6,00	1,10	26,83	29,52
7,00	1,10	28,44	31,28
8,00	1,10	29,67	32,64
9,00	1,10	30,62	33,68
10,00	1,10	31,34	34,48
11,00	1,10	31,90	35,09
12,00	1,10	32,33	35,57
13,00	1,10	32,66	35,93
13,11	1,10	32,69	35,96

- Wynikowa charakterystyczna wartość siły pionowej w ścianie n_{zsk}

Wartość charakterystycznej pionowej siły wypadkowej w ścianie silosu, występującej na głębokości z podczas jego opróżniania, wyznacza się na podstawie wzoru (1.15) przy uwzględnieniu następujących danych wejściowych:

$$\mu_g = 0,663$$

$$p_{ho} = 33,94 \text{ kN/m}^2$$

$$z_o = 3,79 \text{ m}$$

Tabela 4.7. Wynikowa charakterystyczna siła pionowa w ścianie przy opróżnianiu

z [m]	$Y_J(z)$	n_{zSk} [kN/m]
0,00	0,000	0,00
1,00	0,232	3,00
2,00	0,410	11,05
3,00	0,547	22,97
4,00	0,652	37,87
5,00	0,733	55,06
6,00	0,795	74,01
7,00	0,843	94,30
8,00	0,879	115,62
9,00	0,907	137,75
10,00	0,929	160,48
11,00	0,945	183,68
12,00	0,958	207,24
13,00	0,968	231,07
13,11	0,969	233,62

- Parcie lokalne przy opróżnianiu

Wysokość na jakiej przyłożone jest obciążenie lokalne wyznaczono wzorem:

$$s = 0,2 \cdot 5,00 = 1,00 \text{ m}$$

Iloraz mimośrodowość usytuowania kanału przepływu oraz średnicy silosu wyznaczono wzorem:

$$E = 2 \cdot \frac{1,25}{5,00} = 0,50 \text{ m}$$

Współczynnik obciążenia lokalnego przy opróżnianiu określony wzorem (1.17) wynosi:

$$\frac{h_c}{d_c} = \frac{13,11}{5,00} = 2,62 > 1,2$$

$$C_{pe} = 0,42 \cdot 0,70 \cdot [1 + 2 \cdot 0,50^2] \cdot \left(1 - e^{\{-1,5[\frac{13,11}{5,00}]^{-1}\}}\right) = 0,40$$

Wielkość bazowa parcia lokalnego przy opróżnianiu wynosi:

- na wysokości 6,50 m (tabela 4.8)

$$p_{he}^{6,50} = 0,40 \cdot 52,07 = 20,94 \text{ kN/m}^2$$

- na wysokości 7,00 m (tabela 4.8)

$$p_{he}^{7,00} = 0,40 \cdot 53,70 = 21,60 \text{ kN/m}^2$$

- na wysokości 7,50 m (tabela 4.8)

$$p_{he}^{7,50} = 0,40 \cdot 55,15 = 22,18 \text{ kN/m}^2$$

Przyrost parcia symetrycznego przy opróżnianiu wynosi:

- na wysokości 6,50 m (tabela 4.8)

$$p_{he,nc}^{6,50} = 0,36 \cdot 20,94 = 7,54 \text{ kN/m}^2$$

- na wysokości 7,00 m (tabela 4.8)

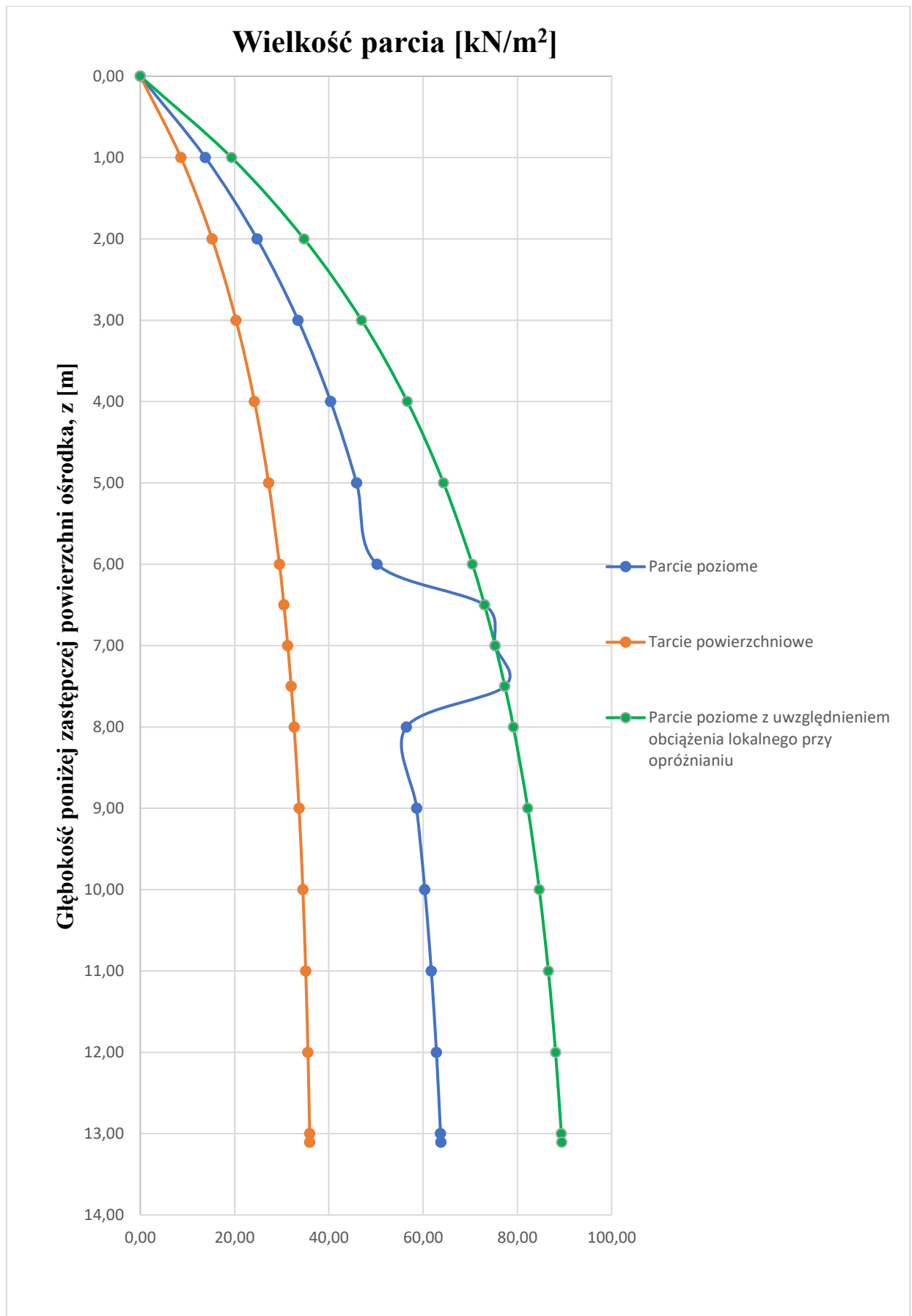
$$p_{he,nc}^{7,00} = 0,36 \cdot 21,60 = 7,78 \text{ kN/m}^2$$

- na wysokości 7,50 m (tabela 4.8)

$$p_{he,nc}^{7,50} = 0,36 \cdot 22,18 = 7,99 \text{ kN/m}^2$$

Tabela 4.8. Zestawienie wartości obliczeniowych parć na ścianę silosu przy opróżnianiu

z [m]	Wartość obliczeniowa p_{he} (z) [kN/m ²]	Wartość obliczeniowa p_{we} (z) [kN/m2]	
0,00	0,00	0,00	
1,00	13,81	8,62	
2,00	24,77	15,24	
3,00	33,48	20,32	
4,00	40,39	24,22	
5,00	45,88	27,21	
6,00	50,24	29,52	
6,50	52,07	30,46	
7,00	53,70	31,28	
7,50	55,15	32,00	
8,00	56,44	32,64	
9,00	58,63	33,68	
10,00	60,36	34,48	
11,00	61,73	35,09	
12,00	62,83	35,57	
13,00	63,69	35,93	
13,11	63,77	35,96	
Wartość parcia poziomego po uwzględnieniu parcia lokalnego			
z [m]	p_{pe} [kN/m2]	p_{he} [kN/m2]	$p_{he}^* = p_{he} + p_{pe}$ [kN/m2]
6,50	20,94	52,07	73,01
7,00	21,60	53,70	75,30
7,50	22,18	55,15	77,33
Wartość parcia poziomego po uwzględnieniu przyrostu parcia symetrycznego			
z [m]	$p_{pe,nc}$ [kN/m2]	p_{he} [kN/m2]	$p_{he}^* = p_{he} + p_{pe,nc}$ [kN/m2]
6,50	7,54	52,07	59,61
7,00	7,78	53,70	61,47
7,50	7,99	55,15	63,14



Rys. 4.2. Wykres parcia klinkieru cementowego na ścianę silosu przy opróżnianiu

4.1.3. Wyznaczenie parcia klinkieru cementowego na ściany leja przy napełnianiu

Charakterystyczne wartości właściwości klinkieru cementowego oraz parametry leja zestawiono poniżej.

- | | |
|---|---------------------|
| – dolna wartość współczynnika tarcia materiału o ścianę | $\mu_h = 0,579$ |
| – dolna wartość ilorazu parcia bocznego | $K_d = 0,290$ |
| – kąt nachylenia leja do poziomu | $\alpha = 60^\circ$ |
| – kąt połówkowy wierzchołka leja | $\beta = 30^\circ$ |

Dla kąta nachylenia leja większego od 5° , na podstawie równania (1.21) określono:

$$\tan\beta = \frac{1 - 0,290}{2 \cdot 0,579} = 0,6131 \rightarrow \beta = 31,5^\circ > 30^\circ$$

Zgodnie z rysunkiem 1.6 lej sklasyfikowano jako lej stromy.

Na poziomie przejścia ściany pionowej w lej, średnie parcie pionowe wynosi odpowiednio:

$$p_{vft} = C_b \cdot p_{vf} = 1,20 \cdot 110,96 = 133,15 \text{ kN/m}^2$$

Wartość p_{vf} przyjęto zgodnie z tabelą 4.3.

- Średnie parcie pionowe p_v

Średnie parcie pionowe na dowolnej wysokości x powyżej wierzchołka leja ze wzoru (1.23) wyznacza się z zależności:

$$p_v = \left(\frac{\gamma \cdot 4,30}{1,60 - 1} \right) \cdot \left\{ \left(\frac{x}{4,30} \right) - \left(\frac{x}{4,30} \right)^{1,60} \right\} + 133,15 \cdot \left(\frac{x}{4,30} \right)^{1,60}$$

Wykładnik w funkcji parcia na lej określony jest wzorem:

$$n = 2 \cdot (1 - 0,2) \cdot 0,579 \cdot \cot 30^\circ = 1,60$$

Tabela 4.9 pokazuje wartości średniego parcia p_v przy napełnianiu silosu w zależności od wysokości x .

Tabela 4.9. Zestawienie wartości średniego parcia ośrodka sypkiego przy napełnianiu

x [m]	Wartość charakterystyczna p_v' [kN/m ²]	Wartość obliczeniowa p_v [kN/m ²]
0,30	9,00	13,51
0,50	15,05	22,57
1,00	30,27	45,40
1,50	45,61	68,41
2,00	61,05	91,57
2,50	76,58	114,87
3,00	92,20	138,29
3,50	107,89	161,84
4,00	123,66	185,49
4,30	133,15	199,73

- Parcie normalne p_{nf}

Wartość ilorazu parcia na lej w warunkach napełniania wynosi:

$$F_f = 1 - \frac{0,2}{\left(1 + \frac{\tan 30^\circ}{0,579}\right)} = 0,90$$

Parcie normalne wyznaczono korzystając ze wzoru (1.27) oraz tabeli 4.10.

$$p_{nf} = 0,90 \cdot p_v$$

Tabela 4.10. Zestawienie wartości parcia normalnego na ściany leja przy napełnianiu

x [m]	Wartość charakterystyczna p_{nf}' [kN/m ²]	Wartość obliczeniowa p_{nf} [kN/m ²]
0,30	8,10	12,15
0,50	13,54	20,32
1,00	27,24	40,86
1,50	41,05	61,57
2,00	54,94	82,41
2,50	68,92	103,38
3,00	82,98	124,47
3,50	97,10	145,65
4,00	111,29	166,94
4,30	119,84	179,75

- Tarcie powierzchniowe p_{tf}

Tarcie powierzchniowe wyznaczono korzystając ze wzoru (1.28) a wartości tarcia zestawiono w tabeli 4.11.

Tabela 4.11. Zestawienie wartości tarcia powierzchniowego o ściany leja przy napełnianiu

x [m]	Wartość charakterystyczna p_{tf}' [kN/m ²]	Wartość obliczeniowa p_{tf} [kN/m ²]
0,30	4,22	6,33
0,50	7,06	10,58
1,00	14,19	21,29
1,50	21,39	32,08
2,00	28,63	42,94
2,50	35,91	53,86
3,00	43,23	64,85
3,50	50,59	75,89
4,00	57,98	86,98
4,30	62,44	93,65

- Zestawienie parć klinkieru cementowego na ściany leja przy napełnianiu

Tabela 4.12. Zestawienie wartości parć na ściany leja przy napełnianiu

x [m]	Wartości obliczeniowe		
	p_v [kN/m ²]	p_{nf} [kN/m ²]	p_{tf} [kN/m ²]
0,30	13,51	12,15	6,33
0,50	22,57	20,32	10,58
1,00	45,40	40,86	21,29
1,50	68,41	61,57	32,08
2,00	91,57	82,41	42,94
2,50	114,87	103,38	53,86
3,00	138,29	124,47	64,85
3,50	161,84	145,65	75,89
4,00	185,49	166,94	86,98
4,30	199,73	179,75	93,65



Rys. 4.3. Wykres parcia klinkieru cementowego na ściany lejki przy napełnianiu

4.1.4. Wyznaczenie parcia klinkieru cementowego na ściany lejki przy opróżnianiu

Charakterystyczne wartości właściwości klinkieru cementowego oraz parametry lejki zestawiono poniżej.

- dolna wartość współczynnika tarcia materiału o ścianę $\mu_h = 0,579$
- górna wartość kąta tarcia wewnętrznego $\varphi_i = 48,00^\circ$
- kąt połówkowy wierzchołka lejki $\beta = 30^\circ$

- Parcie normalne p_{ne}

Kąt tarcia ośrodka o ścianę lejki oraz parametr ε przyjmują odpowiednio wartości:

$$\varphi_{wh} = \tan^{-1}(0,579) = 30,07^\circ$$

$$\varepsilon = 30,07^\circ + \sin^{-1} \left[\frac{\sin 30,07^\circ}{\sin 48,00^\circ} \right] = 72,47^\circ$$

Wartość ilorazu parcia na lejki ze wzoru (1.29) wynosi:

$$F_e = \frac{1 + \sin 48,00^\circ \cdot \cos 72,47^\circ}{1 - \sin 48,00^\circ \cdot \cos (2 \cdot 30^\circ + 72,47^\circ)} = 0,81$$

Wartości parcia normalnego podczas opróżniania silosu wyznacza się na podstawie wzoru (1.32), a uzyskane wyniki zestawiono w tabeli 4.9:

$$p_{ne} = 0,81 \cdot p_v$$

Tabela 4.13. Zestawienie wartości parcia normalnego na ściany leja przy opróżnianiu

x [m]	Wartość charakterystyczna p_{ne}' [kN/m ²]	Wartość obliczeniowa p_{ne} [kN/m ²]
0,30	7,29	10,94
0,50	12,19	18,28
1,00	24,52	36,77
1,50	36,94	55,41
2,00	49,45	74,17
2,50	62,03	93,04
3,00	74,68	112,02
3,50	87,39	131,09
4,00	100,16	150,24
4,30	107,85	161,78

- Tarcie powierzchniowe p_{te}

Wartości tarcia powierzchniowego podczas opróżniania silosu wyznacza się na podstawie wzoru (1.33), a uzyskane wyniki zestawiono w tabeli 4.14:

Tabela 4.14 Zestawienie wartości tarcia powierzchniowego o ściany leja przy opróżnianiu

x [m]	Wartość charakterystyczna p_{te}' [kN/m ²]	Wartość obliczeniowa p_{te} [kN/m ²]
0,30	4,25	6,37
0,50	7,10	10,65
1,00	14,28	21,42
1,50	21,52	32,28
2,00	28,81	43,21
2,50	36,14	54,20
3,00	43,50	65,26
3,50	50,91	76,36
4,00	58,35	87,52
4,30	62,83	94,24

- Zestawienie parć ośrodka sypkiego na ściany leja przy opróżnianiu

Tabela 4.15. Zestawienie wartości parć klinkieru cementowego na ściany leja przy opróżnianiu

x [m]	Wartości obliczeniowe		
	p_v [kN/m ²]	p_{ne} [kN/m ²]	p_{te} [kN/m ²]
0,30	13,51	10,94	6,37
0,50	22,57	18,28	10,65
1,00	45,40	36,77	21,42
1,50	68,41	55,41	32,28
2,00	91,57	74,17	43,21
2,50	114,87	93,04	54,20
3,00	138,29	112,02	65,26
3,50	161,84	131,09	76,36
4,00	185,49	150,24	87,52
4,30	199,73	161,78	94,24



Rys. 4.4. Wykres parcia klinkieru cementowego na ściany leja przy opróżnianiu

4.2. Wyznaczenie parcia składowanego ośrodka sypkiego przy założeniu częściowego napełnienia komory.

4.2.1. Parcie materiału na ściany silosu przy napełnieniu

- Parcie poziome p_{hf}

Charakterystyczne wartości właściwości klinkieru cementowego:

- dolna wartość współczynnika tarcia materiału o ścianę $\mu_d = 0,579$
- górna wartość ilorazu parcia bocznego $K_g = 0,498$
- górna wartość ciężaru jednostkowego $\gamma_u = 18,00 \text{ kN/m}^3$

Charakterystyczna głębokość określona jest wzorem:

$$z_o = \frac{1}{K_g \cdot \mu_d} \cdot \frac{A}{U} = \frac{1}{0,498 \cdot 0,579} \cdot \frac{25,00}{20,00} = 4,34 \text{ m}$$

Asymptota parcia poziomego określona jest wzorem:

$$p_{ho} = \gamma_u \cdot K_g \cdot z_o = 18,00 \cdot 0,498 \cdot 4,34 = 38,86 \text{ kN/m}^2$$

Zestawienie obliczonych wartości parcia poziomego na ścianę silosu w odstępach co 1,0 m wysokości komory zawarto w tabeli 4.16.

Tabela 4.16. Parcie poziome na ścianę silosu przy napełnianiu

z [m]	$Y_J(z)$	Wartość charakterystyczna $p_{hf}(z)$ [kN/m ²]	Wartość obliczeniowa $p_{hf}(z)$ [kN/m ²]
0,00	0,000	0,00	0,00
1,00	0,206	8,01	12,01
2,00	0,370	14,36	21,54
3,00	0,499	19,41	29,11
4,00	0,603	23,42	35,12
5,00	0,684	26,60	39,90
6,00	0,749	29,12	43,68
7,00	0,801	31,13	46,69
7,86	0,837	32,52	48,78

- Tarcie powierzchniowe p_{wf}

Charakterystyczne wartości właściwości klinkieru cementowego:

- górna wartość współczynnika tarcia materiału o ścianę $\mu_g = 0,663$
- górna wartość ilorazu parcia bocznego $K_g = 0,498$
- górna wartość ciężaru jednostkowego $\gamma_u = 18,00 \text{ kN/m}^3$

Charakterystyczna głębokość określona jest wzorem:

$$z_o = \frac{1}{K_g \cdot \mu_g} \cdot \frac{A}{U} = \frac{1}{0,498 \cdot 0,663} \cdot \frac{25,00}{20,00} = 3,79 \text{ m}$$

Asymptota parcia poziomego określona jest wzorem:

$$p_{ho} = \gamma_u \cdot K_g \cdot z_o = 18,00 \cdot 0,50 \cdot 3,79 = 33,94 \text{ kN/m}^2$$

Zestawienie obliczonych wartości tarcia powierzchniowego na ścianę silosu w odstępach co 1,0 m wysokości komory zawarto w tabeli 4.17.

Tabela 4.17. Tarcie powierzchniowe na ścianę silosu przy napełnianiu

z [m]	$Y_J(z)$	Wartość charakterystyczna $p_{wf}(z)'$ [kN/m ²]	Wartość obliczeniowa $p_{wf}(z)$ [kN/m ²]
0,00	0,000	0,00	0,00
1,00	0,232	5,22	7,83
2,00	0,410	9,23	13,85
3,00	0,547	12,31	18,47
4,00	0,652	14,68	22,02
5,00	0,733	16,49	24,74
6,00	0,795	17,89	26,83
7,00	0,843	18,96	28,44
7,86	0,875	19,68	29,52

- Parcie pionowe p_{vf}

Charakterystyczne wartości właściwości klinkieru cementowego:

- dolna wartość współczynnika tarcia materiału o ścianę $\mu_d = 0,579$
- dolna wartość ilorazu parcia bocznego $K_d = 0,290$
- górna wartość ciężaru jednostkowego $\gamma_u = 18,00 \text{ kN/m}^3$

Charakterystyczna głębokość określona jest wzorem:

$$z_o = \frac{1}{K_d \cdot \mu_d} \cdot \frac{A}{U} = \frac{1}{0,290 \cdot 0,579} \cdot \frac{25,00}{20,00} = 7,44 \text{ m}$$

Asymptota parcia poziomego określona jest wzorem:

$$p_{ho} = \gamma_u \cdot K_d \cdot z_o = 18,00 \cdot 0,290 \cdot 7,44 = 38,86 \text{ kN/m}^2$$

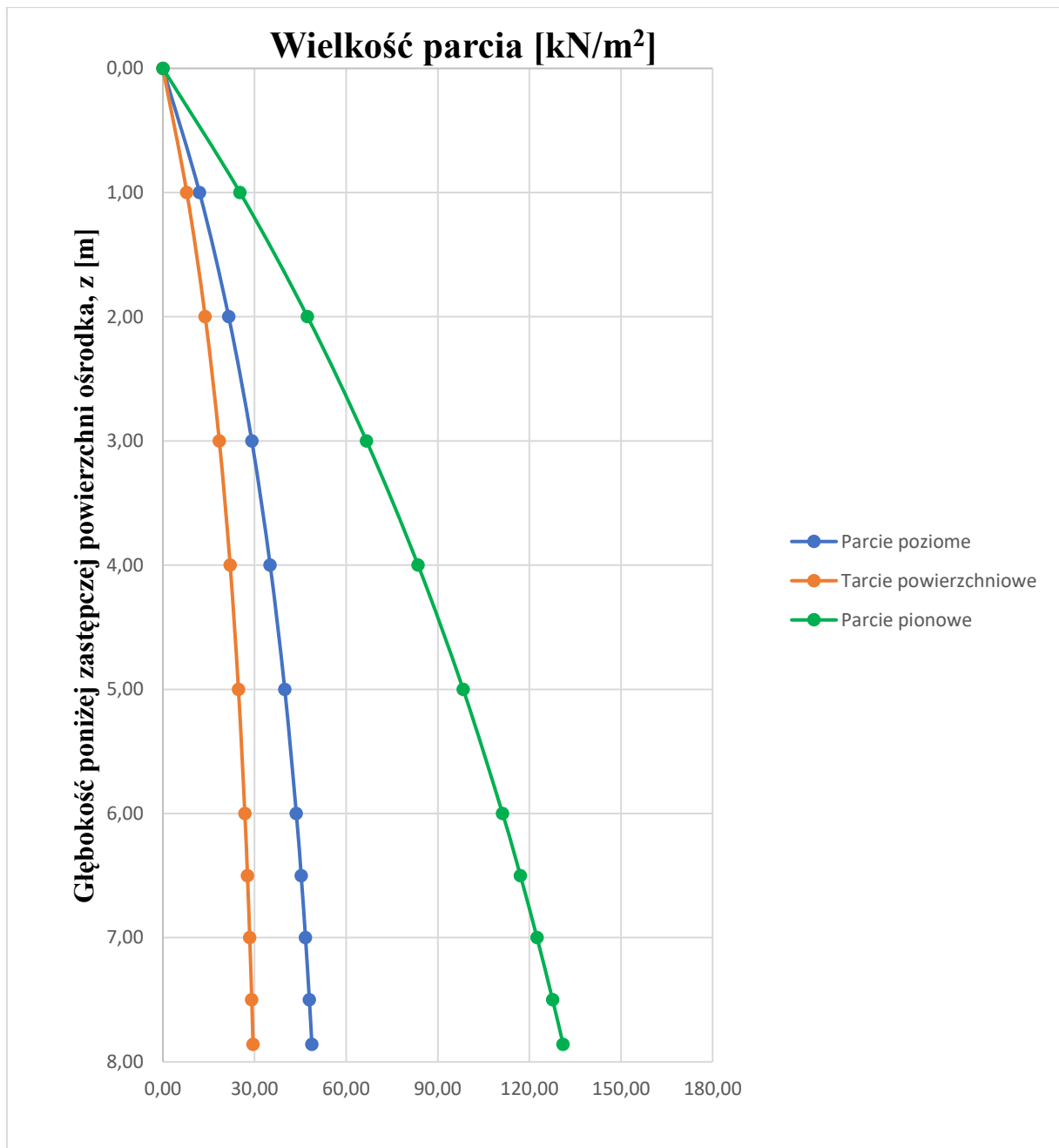
Zestawienie obliczonych wartości parcia pionowego na ścianę silosu w odstępach co 1,0 m wysokości komory zawarto w tabeli 4.18.

Tabela 4.18. Parcie pionowe na ścianę silosu przy napełnianiu

z [m]	$Y_J(z)$	Wartość charakterystyczna $p_{vf}(z)$ [kN/m ²]	Wartość obliczeniowa $p_{vf}(z)$ [kN/m ²]
0,00	0,000	0,00	0,00
1,00	0,126	16,84	25,27
2,00	0,236	31,57	47,35
3,00	0,332	44,44	66,67
4,00	0,416	55,70	83,55
5,00	0,489	65,54	98,32
6,00	0,553	74,15	111,22
7,00	0,609	81,67	122,51
7,86	0,652	87,38	131,07

Tabela 4.19. Zestawienie wartości obliczeniowych parć na ścianę silosu przy napełnieniu

z [m]	Wartość obliczeniowa $p_{hf}(z)$ [kN/m ²]	Wartość obliczeniowa $p_{wf}(z)$ [kN/m ²]	Wartość obliczeniowa $p_{vf}(z)$ [kN/m ²]
0,00	0,00	0,00	0,00
1,00	12,01	7,83	25,27
2,00	21,54	13,85	47,35
3,00	29,11	18,47	66,67
4,00	35,12	22,02	83,55
5,00	39,90	24,74	98,32
6,00	43,68	26,83	111,22
6,50	45,28	27,69	117,05
7,00	46,69	28,44	122,51
7,50	47,96	29,10	127,61
7,86	48,78	29,52	131,07



Rys. 4.5. Wykres parcia klinkieru cementowego na ścianę silosu przy napełnianiu

4.2.2. Parcie materiału na ściany silosu przy opróżnianiu

- Parcie poziome p_{he}

Parcie poziome przy opróżnianiu silosu oblicza się według wzoru (1.13), bazując na wartościach p_{hf} określonych wcześniej w tabeli 4.16. Zmienność tego obciążenia w odstępach co 1,0 m wysokości przedstawiono w tabeli 4.20.

Tabela 4.20. Parcie poziome na ścianę silosu przy opróżnianiu

z [m]	C_h	Wartość obliczeniowa $p_{hf}(z)$ [kN/m ²]	Wartość obliczeniowa $p_{he}(z)$ [kN/m ²]
0,00	1,15	0,00	0,00
1,00	1,15	12,01	13,81
2,00	1,15	21,54	24,77
3,00	1,15	29,11	33,48
4,00	1,15	35,12	40,39
5,00	1,15	39,90	45,88
6,00	1,15	43,68	50,24
7,00	1,15	46,69	53,70
7,86	1,15	48,78	56,10

- Tarcie powierzchniowe p_{we}

Tarcie powierzchniowe przy opróżnianiu silosu oblicza się według wzoru (1.14), bazując na wartościach p_{wf} określonych wcześniej w tabeli 4.17. Zmienność tego obciążenia w odstępach co 1,0 m wysokości przedstawiono w tabeli 4.21.

Tabela 4.21. Tarcie powierzchniowe na ścianę silosu przy opróżnianiu

z [m]	C_w	Wartość obliczeniowa $p_{wf}(z)$ [kN/m ²]	Wartość obliczeniowa $p_{we}(z)$ [kN/m ²]
0,00	1,10	0,00	0,00
1,00	1,10	7,83	8,62
2,00	1,10	13,85	15,24
3,00	1,10	18,47	20,32
4,00	1,10	22,02	24,22
5,00	1,10	24,74	27,21
6,00	1,10	26,83	29,52
7,00	1,10	28,44	31,28
7,86	1,10	29,52	32,47

- Wynikowa charakterystyczna wartość siły pionowej w ścianie n_{zSk}

Wartość charakterystycznej pionowej siły wypadkowej w ścianie silosu, występującej na głębokości z podczas jego opróżniania, wyznacza się na podstawie wzoru (1.15) przy uwzględnieniu następujących danych wejściowych:

$$\mu_g = 0,663$$

$$p_{ho} = 33,94 \text{ kN/m}^2$$

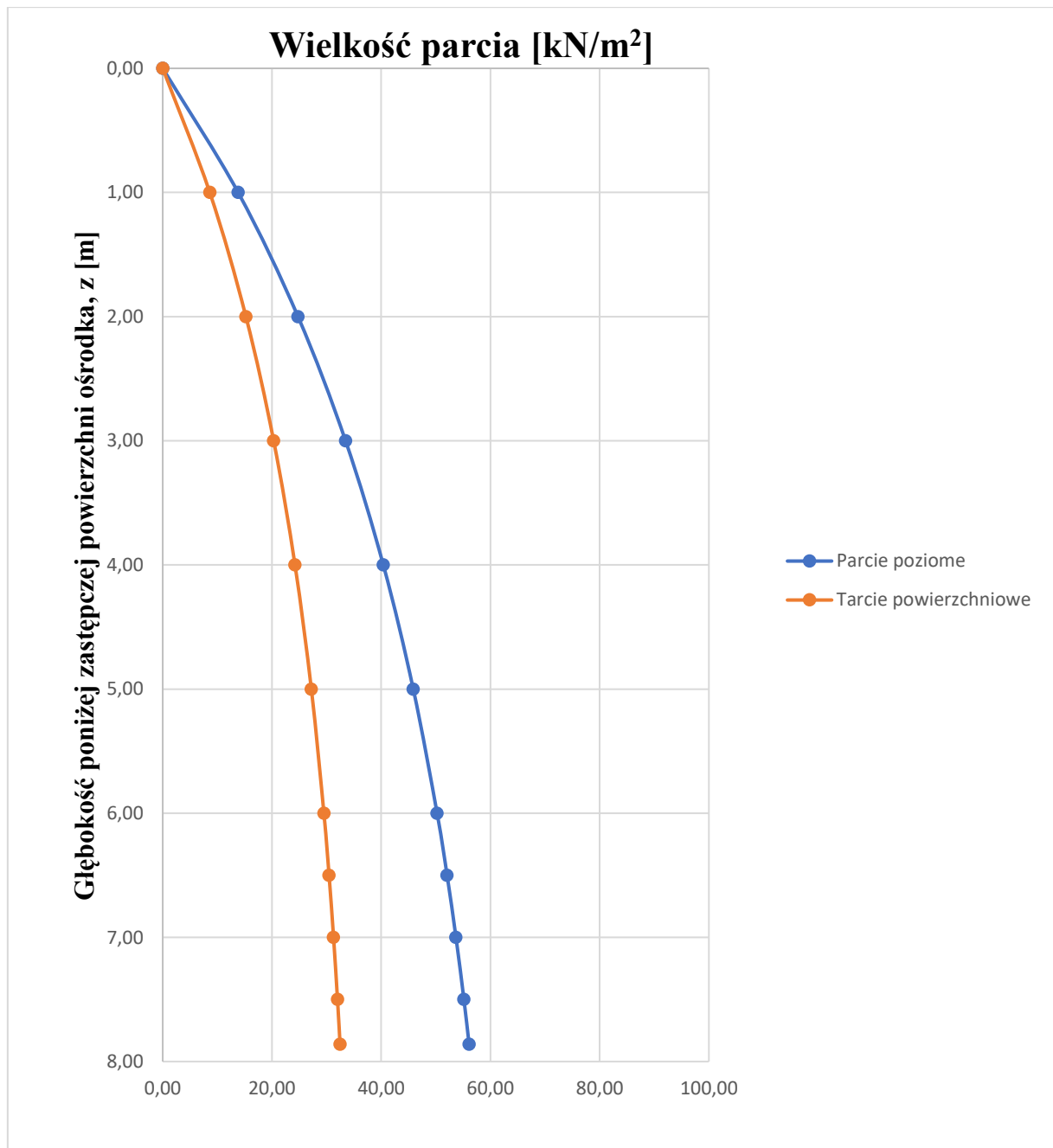
$$z_o = 3,79 \text{ m}$$

Tabela 4.22. Wynikowa charakterystyczna siła pionowa w ścianie przy opróżnianiu

$z \text{ [m]}$	$Y_J(z)$	$n_{zSk} \text{ [kN/m]}$
0,00	0,000	0,00
1,00	0,232	3,00
2,00	0,410	11,05
3,00	0,547	22,97
4,00	0,652	37,87
5,00	0,733	55,06
6,00	0,795	74,01
7,00	0,843	94,30
7,86	0,875	112,59

Tabela 4.23. Zestawienie wartości obliczeniowych parć na ścianę silosu przy opróżnianiu

$z \text{ [m]}$	Wartość obliczeniowa $p_{he}(z) \text{ [kN/m}^2\text{]}$	Wartość obliczeniowa $p_{we}(z) \text{ [kN/m}^2\text{]}$
0,00	0,00	0,00
1,00	13,81	8,62
2,00	24,77	15,24
3,00	33,48	20,32
4,00	40,39	24,22
5,00	45,88	27,21
6,00	50,24	29,52
6,50	52,07	30,46
7,00	53,70	31,28
7,50	55,15	32,00
7,86	56,10	32,47



Rys. 4.6. Wykres parcia klinkieru cementowego na ścianę silosu przy opróżnianiu

4.2.3. Wyznaczenie parcia klinkieru cementowego na ściany leja przy napełnianiu

Charakterystyczne wartości właściwości klinkieru cementowego oraz parametry leja zestawiono poniżej.

- dolna wartość współczynnika tarcia materiału o ścianę $\mu_h = 0,579$
- dolna wartość ilorazu parcia bocznego $K_d = 0,290$
- kąt nachylenia leja do poziomu $\alpha = 60^\circ$
- kąt połówkowy wierzchołka leja $\beta = 30^\circ$

Dla kąta nachylenia leja większego od 5° , na podstawie równania (1.21) określono:

$$\tan\beta = \frac{1 - 0,290}{2 \cdot 0,579} = 0,6131 \rightarrow \beta = 31,5^\circ > 30^\circ$$

Zgodnie z rysunkiem 1.6 lej sklasyfikowano jako lej stromy.

Na poziomie przejścia ściany pionowej w lej, średnie parcie pionowe wynosi odpowiednio:

$$p_{vft} = C_b \cdot p_{vf} = 1,20 \cdot 87,38 = 104,86 \text{ kN/m}^2$$

Wartość p_{vf} przyjęto zgodnie z tabelą 4.18.

- Średnie parcie pionowe p_v

Średnie parcie pionowe na dowolnej wysokości x powyżej wierzchołka leja ze wzoru (1.23) wyznacza się z zależności:

$$p_v = \left(\frac{\gamma \cdot 4,30}{1,60 - 1} \right) \cdot \left\{ \left(\frac{x}{4,30} \right) - \left(\frac{x}{4,30} \right)^{1,60} \right\} + 104,86 \cdot \left(\frac{x}{4,30} \right)^{1,60}$$

Wykładnik w funkcji parcia na lej określony jest wzorem:

$$n = 2 \cdot (1 - 0,2) \cdot 0,579 \cdot \cot 30^\circ = 1,60$$

Tabela 4.24 pokazuje wartości średniego parcia p_v przy napełnianiu silosu w zależności od wysokości x .

Tabela 4.24. Zestawienie wartości średniego parcia ośrodka sypkiego przy napełnianiu

x [m]	Wartość charakterystyczna p_v' [kN/m ²]	Wartość obliczeniowa p_v [kN/m ²]
0,30	8,61	12,91
0,50	14,15	21,23
1,00	27,54	41,31
1,50	40,38	60,58
2,00	52,76	79,14
2,50	64,73	97,09
3,00	76,32	114,48
3,50	87,56	131,33
4,00	98,46	147,69
4,30	104,86	157,29

- Parcie normalne p_{nf}

Wartość ilorazu parcia na lej w warunkach napełniania wynosi:

$$F_f = 1 - \frac{0,2}{\left(1 + \frac{\tan 30^\circ}{0,579}\right)} = 0,90$$

Parcie normalne wyznaczono korzystając ze wzoru (1.27) oraz tabeli 4.25.

$$p_{nf} = 0,90 \cdot p_v$$

Tabela 4.25. Zestawienie wartości parcia normalnego na ściany leja przy napełnianiu

x [m]	Wartość charakterystyczna p_{nf}' [kN/m ²]	Wartość obliczeniowa p_{nf} [kN/m ²]
0,30	7,75	11,62
0,50	12,74	19,11
1,00	24,79	37,18
1,50	36,35	54,52
2,00	47,49	71,23
2,50	58,26	87,38
3,00	68,69	103,03
3,50	78,80	118,20
4,00	88,62	132,93
4,30	94,37	141,56

- Tarcie powierzchniowe p_{tf}

Tarcie powierzchniowe wyznaczono korzystając ze wzoru (1.28) a wartości tarcia zestawiono w tabeli 4.26.

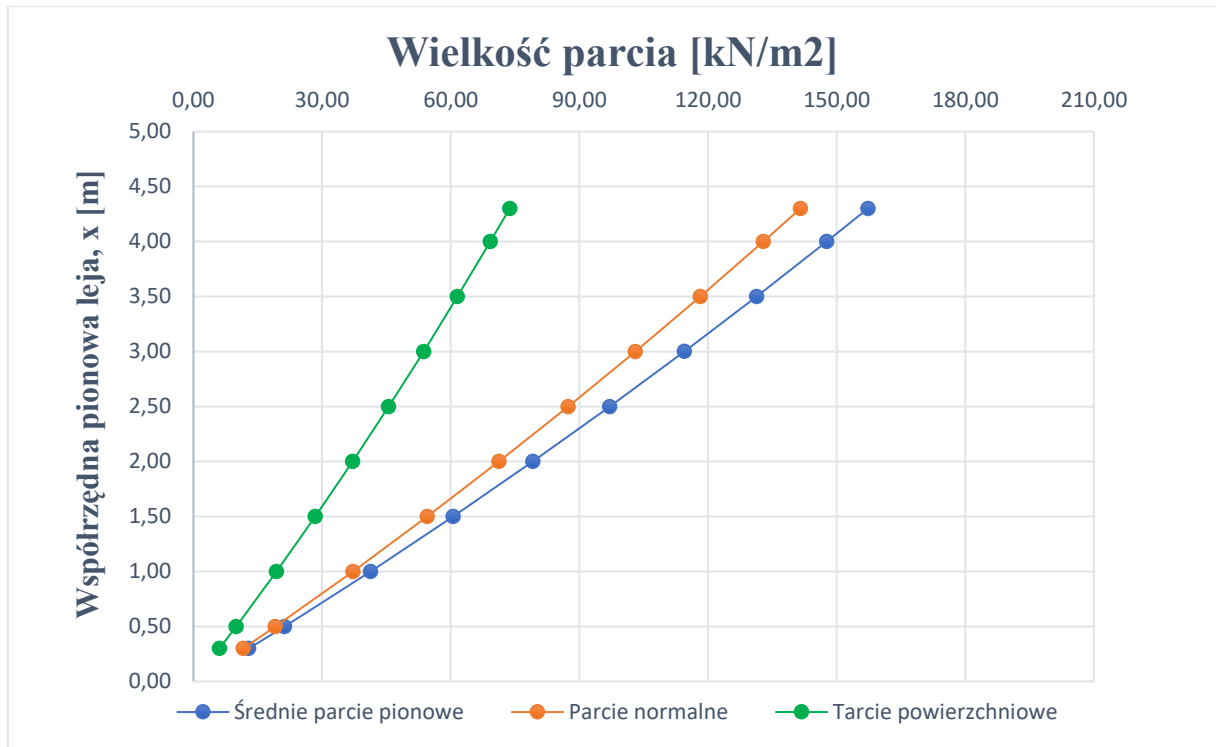
Tabela 4.26. Zestawienie wartości tarcia powierzchniowego o ściany leja przy napełnianiu

x [m]	Wartość charakterystyczna p_{tf}' [kN/m ²]	Wartość obliczeniowa p_{tf} [kN/m ²]
0,30	4,04	6,06
0,50	6,64	9,95
1,00	12,92	19,37
1,50	18,94	28,41
2,00	24,74	37,11
2,50	30,35	45,53
3,00	35,79	53,68
3,50	41,06	61,58
4,00	46,17	69,26
4,30	49,17	73,75

- Zestawienie parć klinkieru cementowego na ściany leja przy napełnianiu

Tabela 4.27. Zestawienie wartości parć na ściany leja przy napełnianiu

x [m]	Wartości obliczeniowe		
	p_v [kN/m ²]	p_{nf} [kN/m ²]	p_{tf} [kN/m ²]
0,30	12,91	11,62	6,06
0,50	21,23	19,11	9,95
1,00	41,31	37,18	19,37
1,50	60,58	54,52	28,41
2,00	79,14	71,23	37,11
2,50	97,09	87,38	45,53
3,00	114,48	103,03	53,68
3,50	131,33	118,20	61,58
4,00	147,69	132,93	69,26
4,30	157,29	141,56	73,75



Rys. 4.7. Wykres parcia klinkieru cementowego na ściany lejki przy napełnianiu

4.2.4. Wyznaczenie parcia klinkieru cementowego na ściany lejki przy opróżnianiu

Charakterystyczne wartości właściwości klinkieru cementowego oraz parametry lejki zestawiono poniżej.

- dolna wartość współczynnika tarcia materiału o ścianę $\mu_h = 0,579$
- górna wartość kąta tarcia wewnętrznego $\varphi_i = 48,00^\circ$
- kąt połówkowy wierzchołka lejki $\beta = 30^\circ$

- Parcie normalne p_{ne}

Kąt tarcia ośrodka o ścianę lejki oraz parametr ε przyjmują odpowiednio wartości:

$$\varphi_{wh} = \tan^{-1}(0,579) = 30,07^\circ$$

$$\varepsilon = 30,07^\circ + \sin^{-1} \left[\frac{\sin 30,07^\circ}{\sin 48,00^\circ} \right] = 72,47^\circ$$

Wartość ilorazu parcia na lejki ze wzoru (1.29) wynosi:

$$F_e = \frac{1 + \sin 48,00^\circ \cdot \cos 72,47^\circ}{1 - \sin 48,00^\circ \cdot \cos (2 \cdot 30^\circ + 72,47^\circ)} = 0,81$$

Wartości parcia normalnego podczas opróżniania silosu wyznacza się na podstawie wzoru (1.32), a uzyskane wyniki zestawiono w tabeli 4.28:

$$p_{ne} = 0,81 \cdot p_v$$

Tabela 4.28. Zestawienie wartości parcia normalnego na ściany leja przy opróżnianiu

x [m]	Wartość charakterystyczna p_{ne}' [kN/m ²]	Wartość obliczeniowa p_{ne} [kN/m ²]
0,30	6,97	10,46
0,50	11,46	17,20
1,00	22,31	33,46
1,50	32,71	49,07
2,00	42,74	64,11
2,50	52,43	78,65
3,00	61,82	92,73
3,50	70,92	106,38
4,00	79,76	119,63
4,30	84,93	127,40

- Tarcie powierzchniowe p_{te}

Wartości tarcia powierzchniowego podczas opróżniania silosu wyznacza się na podstawie wzoru (1.33), a uzyskane wyniki zestawiono w tabeli 4.29:

Tabela 4.29 Zestawienie wartości tarcia powierzchniowego o ściany leja przy opróżnianiu

x [m]	Wartość charakterystyczna p_{te}' [kN/m ²]	Wartość obliczeniowa p_{te} [kN/m ²]
0,30	4,06	6,09
0,50	6,68	10,02
1,00	13,00	19,49
1,50	19,06	28,58
2,00	24,90	37,35
2,50	30,54	45,81
3,00	36,01	54,02
3,50	41,31	61,97
4,00	46,46	69,69
4,30	49,48	74,22

- Zestawienie parć ośrodka sypkiego na ściany leja przy opróżnianiu

Tabela 4.30. Zestawienie wartości parć klinkieru cementowego na ściany leja przy opróżnianiu

x [m]	Wartości obliczeniowe		
	p_v [kN/m ²]	p_{ne} [kN/m ²]	p_{te} [kN/m ²]
0,30	12,91	10,46	6,09
0,50	21,23	17,20	10,02
1,00	41,31	33,46	19,49
1,50	60,58	49,07	28,58
2,00	79,14	64,11	37,35
2,50	97,09	78,65	45,81
3,00	114,48	92,73	54,02
3,50	131,33	106,38	61,97
4,00	147,69	119,63	69,69
4,30	157,29	127,40	74,22



Rys. 4.8. Wykres parcia klinkieru cementowego na ściany leja przy opróżnianiu

5. Analiza oddziaływań termicznych żelbetowej prostopadłościennej baterii silosów

5.1. Wpływ oddziaływania klinkieru cementowego i temperatury otoczenia

Dane wejściowe do obliczeń, ustalone na podstawie lokalizacji silosu w Olsztynie, zestawiono poniżej:

- temperatura klinkieru cementowego $T_{in,1} = 80^{\circ}\text{C}, T_{in,2} = 100^{\circ}\text{C}$ [3]
- temperatura otoczenia latem $T_{out,max} = 36^{\circ}\text{C}$ [N3]
- temperatura otoczenia zimą $T_{out,min} = -32^{\circ}\text{C}$ [N3]
- współczynnik przewodzenia ciepła dla żelbetu $\lambda = 1,70 \text{ W}/(\text{mK})$ [S4]
- opór przejmowania ciepła na powierzchni wewnętrznej $R_{in} = 0,13 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$
- opór przejmowania ciepła na powierzchni zewnętrznej $R_{out} = 0,04 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$

W celu dostosowania danych klimatycznych do rzeczywistych warunków panujących w miejscu występowania konstrukcji, wartości temperatur odczytane z map normowych skorygowano o rzędną posadowienia obiektu: Olsztyn – 120 m n.p.m [N3].

$$T_{max}(H) = -0,0053 \cdot H + T_{max} = -0,0053 \cdot 120 + 36 = 35,36^{\circ}\text{C}$$

$$T_{min}(H) = -0,0035 \cdot H + T_{min} = -0,0035 \cdot 120 - 32 = -32,42^{\circ}\text{C}$$

5.1.1. Obciążenie temperaturą dla ściany o grubości 0,25 m

- Rozkład temperatury bez uwzględnienia warstwy tłumiącej

Dla $t = 0,25$ m całkowity opór cieplny ściany silosu określa się wzorem (1.42):

$$R_{tot} = 0,13 + \frac{0,25}{1,70} + 0,04 = 0,32 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_{(1)} = 0,13 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_{(2)} = 0,13 + \frac{0,25}{1,70} = 0,28 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

Temperatura w warunkach zimowych:

- temperatura klinkieru cementowego $T_{in,1} = 80^{\circ}\text{C}$

Temperatura w punkcie 1:

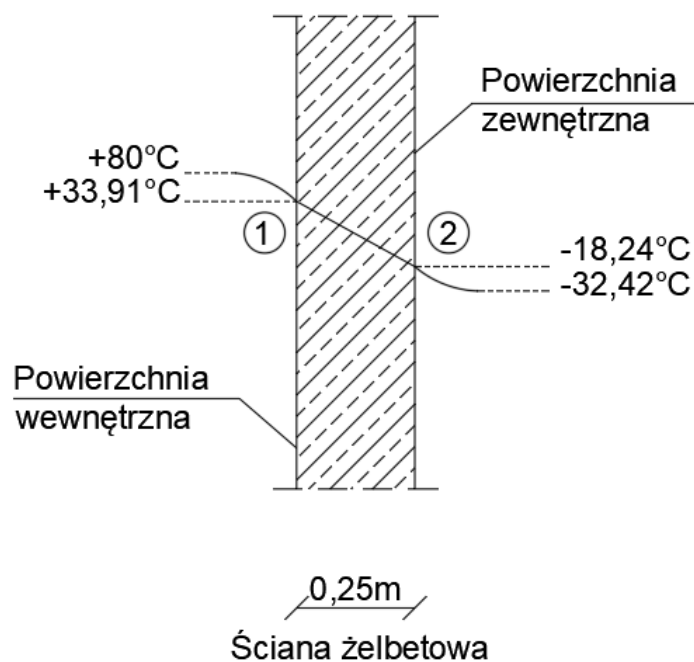
$$T_{80}(1) = 80 - \frac{0,13}{0,32} \cdot (80 + 32,42) = 33,91^{\circ}\text{C}$$

Temperatura w punkcie 2:

$$T_{80}(2) = 80 - \frac{0,28}{0,32} \cdot (80 + 32,42) = -18,24^{\circ}\text{C}$$

Różnica temperatur ΔT :

$$\Delta T_{80} = |33,91 + 18,24| = 52,15^{\circ}\text{C}$$



Rys. 5.1. Schemat rozkładu temperatur w ścianie silosu wypełnionego klinkierem cementowym o $T_{in} = 80^{\circ}\text{C}$ dla warunków zimowych bez uwzględnienia warstwy tłumiącej

- temperatura klinkieru cementowego $T_{in,2} = 100^{\circ}\text{C}$

Temperatura w punkcie 1:

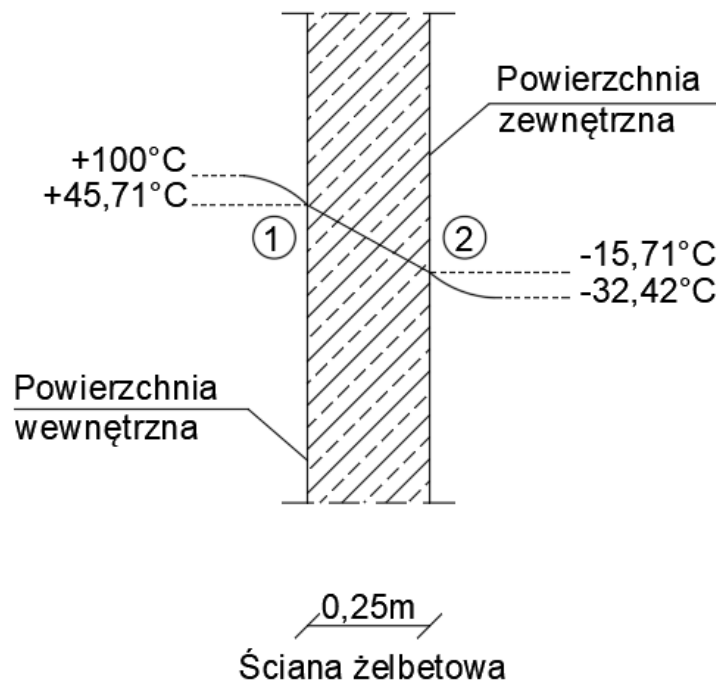
$$T_{100}(1) = 100 - \frac{0,13}{0,32} \cdot (100 + 32,42) = 45,71^{\circ}\text{C}$$

Temperatura w punkcie 2:

$$T_{100}(2) = 100 - \frac{0,28}{0,32} \cdot (100 + 32,42) = -15,71^{\circ}\text{C}$$

Różnica temperatur ΔT :

$$\Delta T_{100} = |45,71 + 15,71| = 61,42^{\circ}\text{C}$$



Rys. 5.2. Schemat rozkładu temperatur w ścianie silosu wypełnionego klinkierem cementowym o $T_{in} = 100^{\circ}\text{C}$ dla warunków zimowych bez uwzględnienia warstwy tłumiącej

Temperatura w warunkach letnich:

- temperatura klinkieru cementowego $T_{in,1} = 80^{\circ}\text{C}$

Temperatura w punkcie 1:

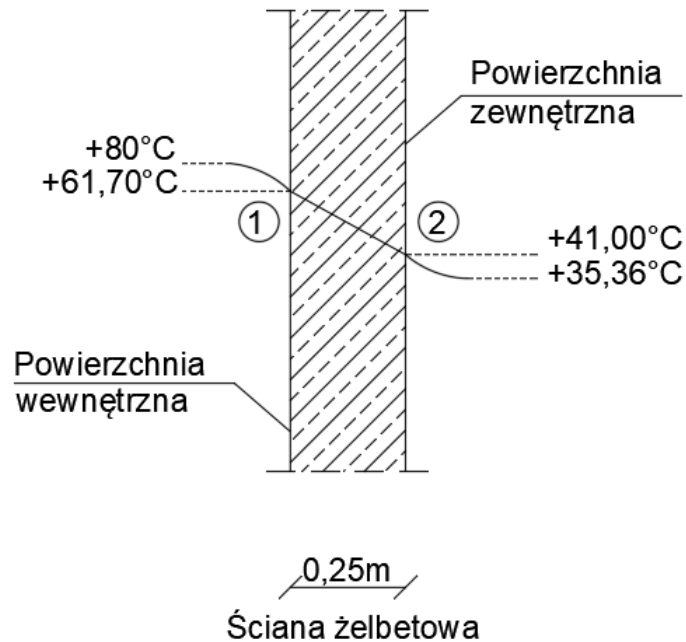
$$T_{80}(1) = 80 - \frac{0,13}{0,32} \cdot (80 - 35,36) = 61,70^{\circ}\text{C}$$

Temperatura w punkcie 2:

$$T_{80}(2) = 80 - \frac{0,28}{0,32} \cdot (80 - 35,36) = 41,00^{\circ}\text{C}$$

Różnica temperatur ΔT :

$$\Delta T_{80} = |61,70 - 41,00| = 20,70^{\circ}\text{C}$$



Rys. 5.3. Schemat rozkładu temperatur w ścianie silosu wypełnionego klinkierem cementowym o $T_{in} = 80^{\circ}\text{C}$ dla warunków letnich bez uwzględnienia warstwy tłumiącej

- temperatura klinkieru cementowego $T_{in,2} = 100^{\circ}\text{C}$

Temperatura w punkcie 1:

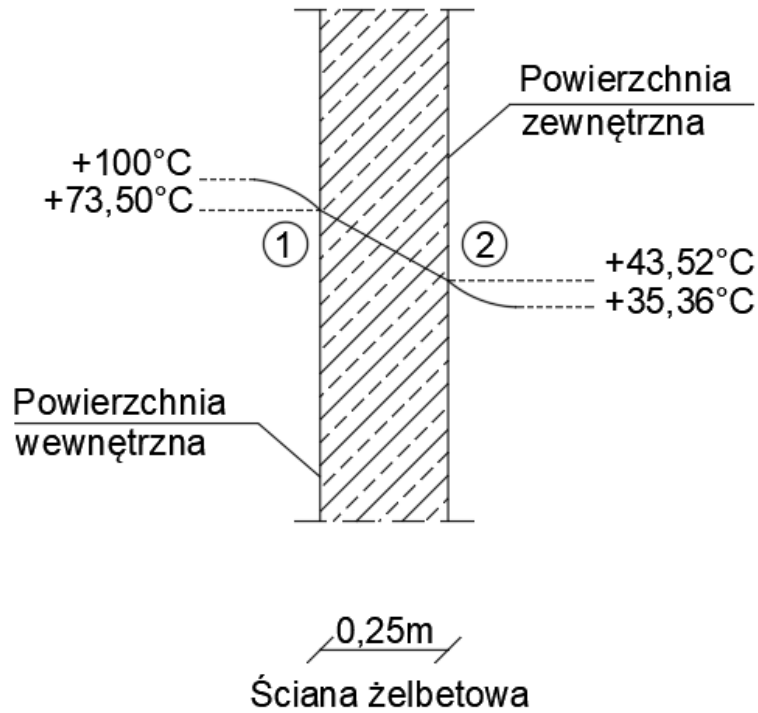
$$T_{100}(1) = 100 - \frac{0,13}{0,32} \cdot (100 - 35,36) = 73,50^{\circ}\text{C}$$

Temperatura w punkcie 2:

$$T_{100}(2) = 100 - \frac{0,28}{0,32} \cdot (100 - 35,36) = 43,52^{\circ}\text{C}$$

Różnica temperatur ΔT :

$$\Delta T_{100} = |73,50 - 43,52| = 29,98^{\circ}\text{C}$$



Rys. 5.4. Schemat rozkładu temperatur w ścianie silosu wypełnionego klinkierem cementowym o $T_{in} = 100^{\circ}\text{C}$ dla warunków letnich bez uwzględnienia warstwy tłumiącej

- Rozkład temperatury z uwzględnieniem warstwy tłumiącej

Warstwę tłumiącą zdefiniowano jako warstwę klinkieru cementowego o grubości 20 cm [N6], dla której współczynnik przewodzenia ciepła wynosi $\lambda = 0,16 \text{ W/mK}$ [S4].

Dla $t = 0,25 \text{ m}$ całkowity opór cieplny ściany silosu określa się wzorem (1.42):

$$R_{tot} = 0,13 + \frac{0,20}{0,16} + \frac{0,25}{1,70} + 0,04 = 1,57 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_{(1)} = 0,13 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_{(2)} = 0,13 + \frac{0,20}{0,16} = 1,38 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_{(3)} = 0,13 + \frac{0,20}{0,16} + \frac{0,25}{1,70} = 1,53 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

Temperatura w warunkach zimowych:

- temperatura klinkieru cementowego $T_{in,1} = 80^{\circ}\text{C}$

Temperatura w punkcie 1:

$$T_{80}(1) = 80 - \frac{0,13}{1,57} \cdot (80 + 32,42) = 70,67^{\circ}\text{C}$$

Temperatura w punkcie 2:

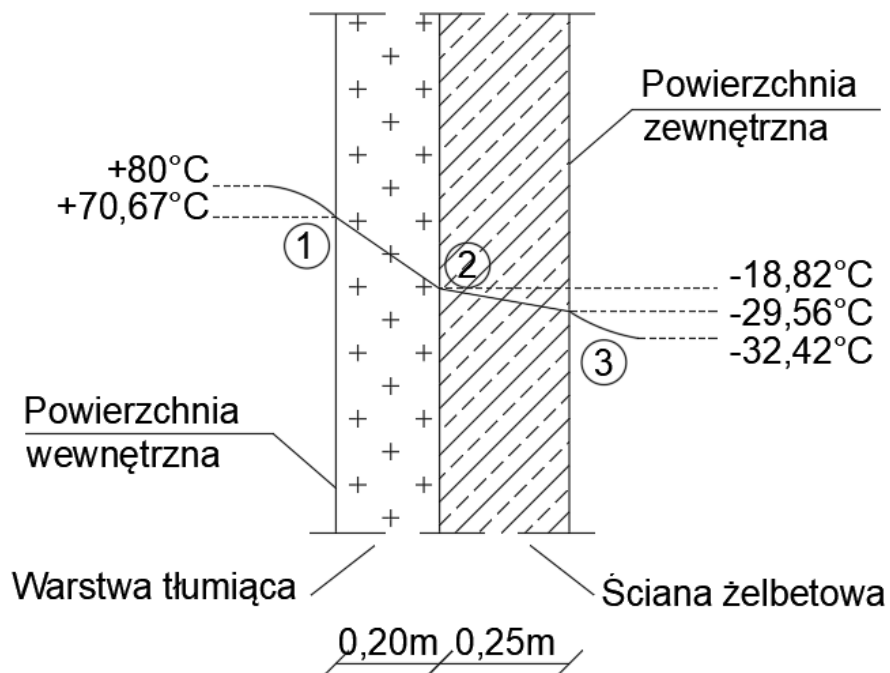
$$T_{80}(2) = 80 - \frac{1,38}{1,57} \cdot (80 + 32,42) = -18,82^{\circ}\text{C}$$

Temperatura w punkcie 3:

$$T_{80}(3) = 80 - \frac{1,53}{1,57} \cdot (80 + 32,42) = -29,56^{\circ}\text{C}$$

Różnica temperatur ΔT :

$$\Delta T_{80} = |-18,82 + 29,56| = 10,74^{\circ}\text{C}$$



Rys. 5.5. Schemat rozkładu temperatur w ścianie silosu wypełnionego klinkierem cementowym o $T_{in} = 80^{\circ}\text{C}$ dla warunków zimowych z uwzględnieniem warstwy tłumiącej

- temperatura klinkieru cementowego $T_{in,2} = 100^{\circ}\text{C}$

Temperatura w punkcie 1:

$$T_{100}(1) = 100 - \frac{0,13}{1,57} \cdot (100 + 32,42) = 89,01^{\circ}\text{C}$$

Temperatura w punkcie 2:

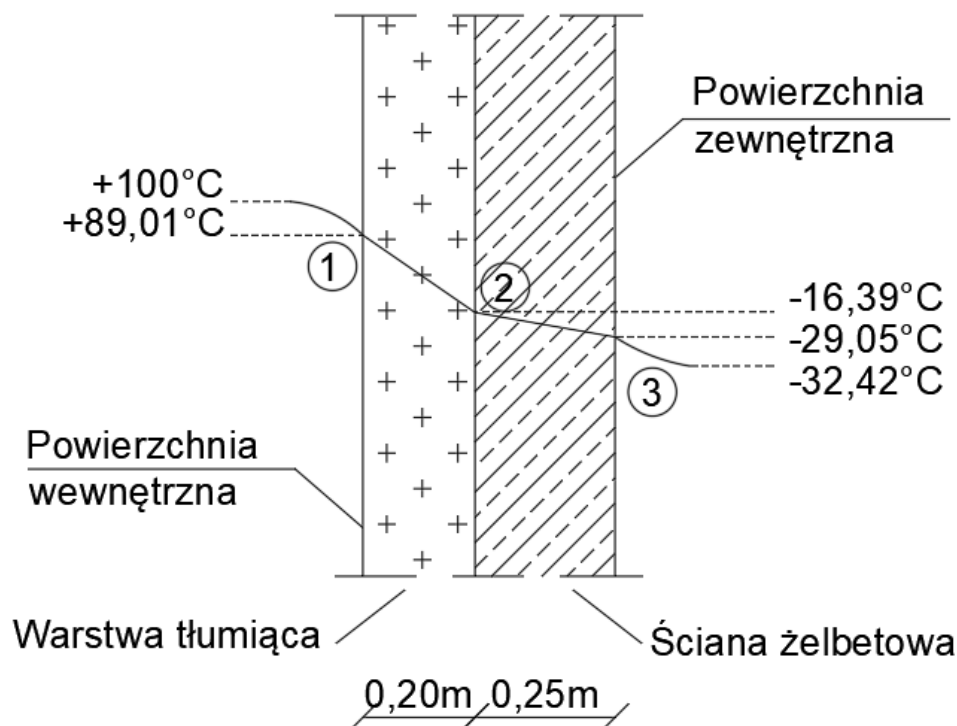
$$T_{100}(2) = 100 - \frac{1,38}{1,57} \cdot (100 + 32,42) = -16,39^{\circ}\text{C}$$

Temperatura w punkcie 3:

$$T_{100}(3) = 100 - \frac{1,53}{1,57} \cdot (100 + 32,42) = -29,05^{\circ}\text{C}$$

Różnica temperatur ΔT :

$$\Delta T_{100} = |-16,39 + 29,05| = 12,66^{\circ}\text{C}$$



Rys. 5.6. Schemat rozkładu temperatur w ścianie silosu wypełnionego klinkierem cementowym o $T_{in} = 100^{\circ}\text{C}$ dla warunków zimowych z uwzględnieniem warstwy tłumiącej

Temperatura w warunkach letnich:

- temperatura klinkieru cementowego $T_{in,1} = 80^{\circ}\text{C}$

Temperatura w punkcie 1:

$$T_{80}(1) = 80 - \frac{0,13}{1,57} \cdot (80 - 35,36) = 76,30^{\circ}\text{C}$$

Temperatura w punkcie 2:

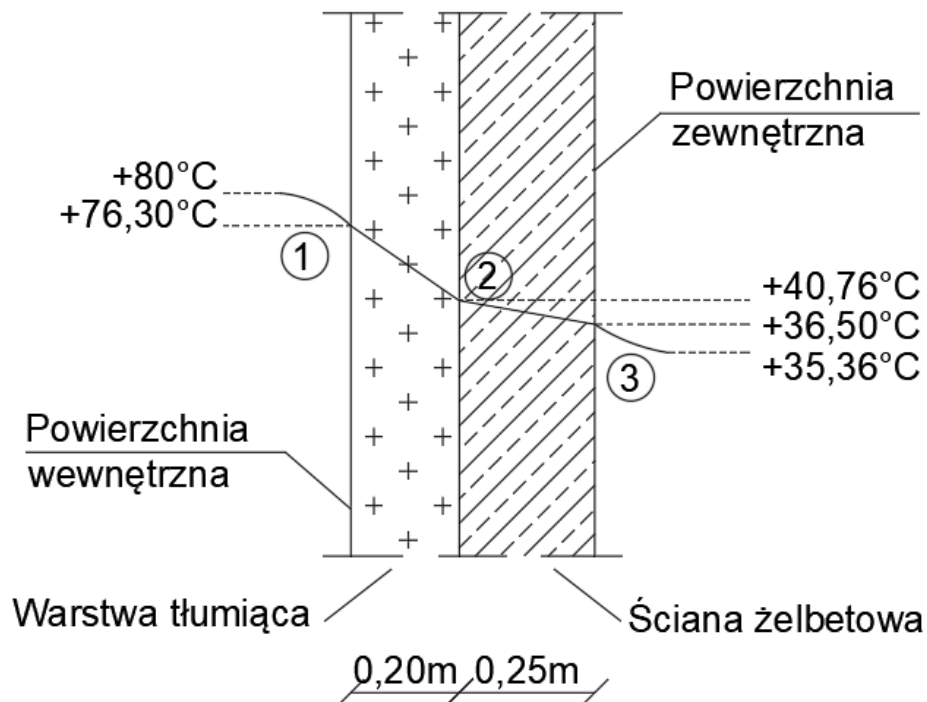
$$T_{80}(2) = 80 - \frac{1,38}{1,57} \cdot (80 - 35,36) = 40,76^{\circ}\text{C}$$

Temperatura w punkcie 3:

$$T_{80}(3) = 80 - \frac{1,53}{1,57} \cdot (80 - 35,36) = 36,50^{\circ}\text{C}$$

Różnica temperatur ΔT :

$$\Delta T_{80} = |40,76 - 36,50| = 4,26^{\circ}\text{C}$$



Rys. 5.7. Schemat rozkładu temperatur w ścianie silosu wypełnionego klinkierem cementowym o $T_{in} = 80^{\circ}\text{C}$ dla warunków letnich z uwzględnieniem warstwy tłumiącej

- temperatura klinkieru cementowego $T_{in,2} = 100^{\circ}\text{C}$

Temperatura w punkcie 1:

$$T_{100}(1) = 100 - \frac{0,13}{1,57} \cdot (100 - 35,36) = 94,64^{\circ}\text{C}$$

Temperatura w punkcie 2:

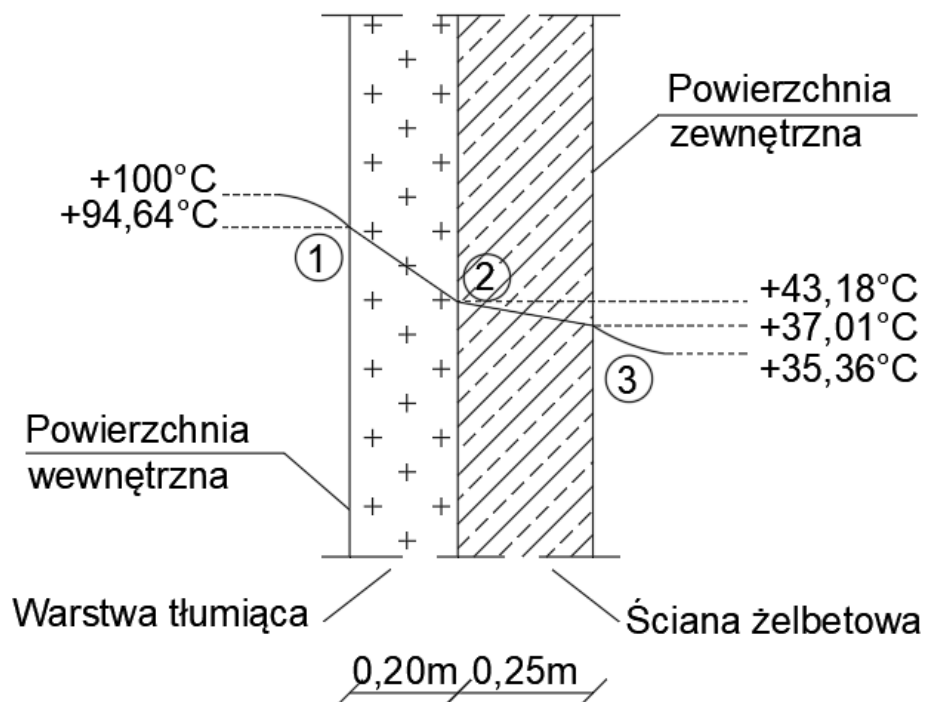
$$T_{100}(2) = 100 - \frac{1,38}{1,57} \cdot (100 - 35,36) = 43,18^{\circ}\text{C}$$

Temperatura w punkcie 3:

$$T_{100}(3) = 100 - \frac{1,53}{1,57} \cdot (100 - 35,36) = 37,01^{\circ}\text{C}$$

Różnica temperatur ΔT :

$$\Delta T_{100} = |43,18 - 37,01| = 6,17^{\circ}\text{C}$$



Rys. 5.8. Schemat rozkładu temperatur w ścianie silosu wypełnionego klinkierem cementowym o $T_{in} = 100^{\circ}\text{C}$ dla warunków letnich z uwzględnieniem warstwy tłumiącej

- Zestawienie wartości temperatur dla grubości ściany $t = 0,25$ m

Rozkład temperatur w charakterystycznych punktach ściany silosu przedstawiono w tabelach 5.1 i 5.2. W obu przypadkach analizę przeprowadzono w dwóch wariantach: z uwzględnieniem oraz bez uwzględnienia przysięennej warstwy tłumiącej w komorze silosu.

Tabela 5.1. Zestawienie wartości temperatur w poszczególnych punktach ściany bez uwzględnienia warstwy tłumiącej

Temperatura klinkieru cementowego	$T(1) [^{\circ}\text{C}]$	$T(2) [^{\circ}\text{C}]$	$\Delta T [^{\circ}\text{C}]$
Warunki zimowe			
$T_{in} = 80^{\circ}\text{C}$	33,91	-18,24	52,14
$T_{in} = 100^{\circ}\text{C}$	45,71	-15,71	61,42
Warunki letnie			
$T_{in} = 80^{\circ}\text{C}$	61,70	41,00	20,70
$T_{in} = 100^{\circ}\text{C}$	73,50	43,52	29,98

Tabela 5.2. Zestawienie wartości temperatur w poszczególnych punktach ściany z uwzględnieniem warstwy tłumiącej

Temperatura klinkieru cementowego	$T(1) [^{\circ}\text{C}]$	$T(2) [^{\circ}\text{C}]$	$T(3) [^{\circ}\text{C}]$	$\Delta T [^{\circ}\text{C}]$
Warunki zimowe				
$T_{in} = 80^{\circ}\text{C}$	70,67	-18,82	-29,56	10,74
$T_{in} = 100^{\circ}\text{C}$	89,01	-16,39	-29,05	12,66
Warunki letnie				
$T_{in} = 80^{\circ}\text{C}$	76,30	40,76	36,50	4,26
$T_{in} = 100^{\circ}\text{C}$	94,64	43,18	37,01	6,17

5.1.2. Obciążenie temperaturą dla ściany o grubości 0,30 m

- Rozkład temperatury bez uwzględnienia warstwy tłumiącej

Dla $t = 0,30$ m całkowity opór cieplny ściany silosu określa się wzorem (1.42):

$$R_{tot} = 0,13 + \frac{0,30}{1,70} + 0,04 = 0,35 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_{(1)} = 0,13 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_{(2)} = 0,13 + \frac{0,30}{1,70} = 0,31 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

Temperatura w warunkach zimowych:

- temperatura klinkieru cementowego $T_{in,1} = 80^{\circ}\text{C}$

Temperatura w punkcie 1:

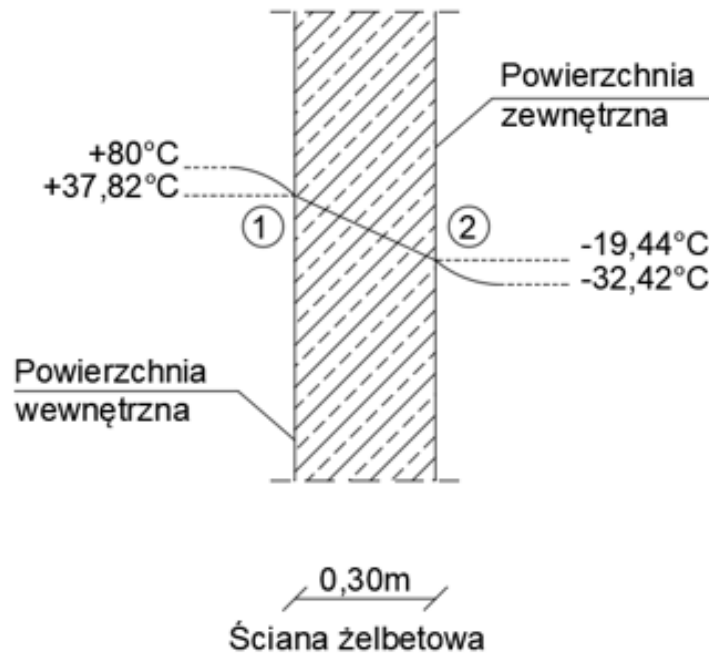
$$T_{80}(1) = 80 - \frac{0,13}{0,35} \cdot (80 + 32,42) = 37,82^{\circ}\text{C}$$

Temperatura w punkcie 2:

$$T_{80}(2) = 80 - \frac{0,31}{0,35} \cdot (80 + 32,42) = -19,44^{\circ}\text{C}$$

Różnica temperatur ΔT :

$$\Delta T_{80} = |37,82 + 19,44| = 57,26^{\circ}\text{C}$$



Rys. 5.9. Schemat rozkładu temperatur w ścianie silosu wypełnionego klinkierem cementowym o $T_{in} = 80^{\circ}\text{C}$ dla warunków zimowych bez uwzględnienia warstwy tłumiącej

- temperatura klinkieru cementowego $T_{in,2} = 100^{\circ}\text{C}$

Temperatura w punkcie 1:

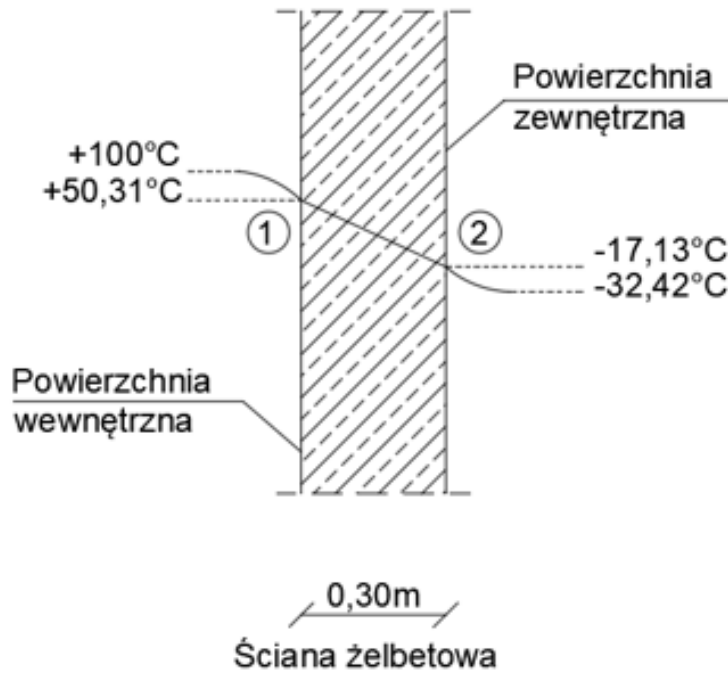
$$T_{100}(1) = 100 - \frac{0,13}{0,35} \cdot (100 + 32,42) = 50,31^{\circ}\text{C}$$

Temperatura w punkcie 2:

$$T_{100}(2) = 100 - \frac{0,31}{0,35} \cdot (100 + 32,42) = -17,13^{\circ}\text{C}$$

Różnica temperatur ΔT :

$$\Delta T_{100} = |50,31 + 17,13| = 67,45^{\circ}\text{C}$$



Rys. 5.10. Schemat rozkładu temperatur w ścianie silosu wypełnionego klinkierem cementowym o $T_{in} = 100^{\circ}\text{C}$ dla warunków zimowych bez uwzględnienia warstwy tłumiącej

Temperatura w warunkach letnich:

- temperatura klinkieru cementowego $T_{in,1} = 80^{\circ}\text{C}$

Temperatura w punkcie 1:

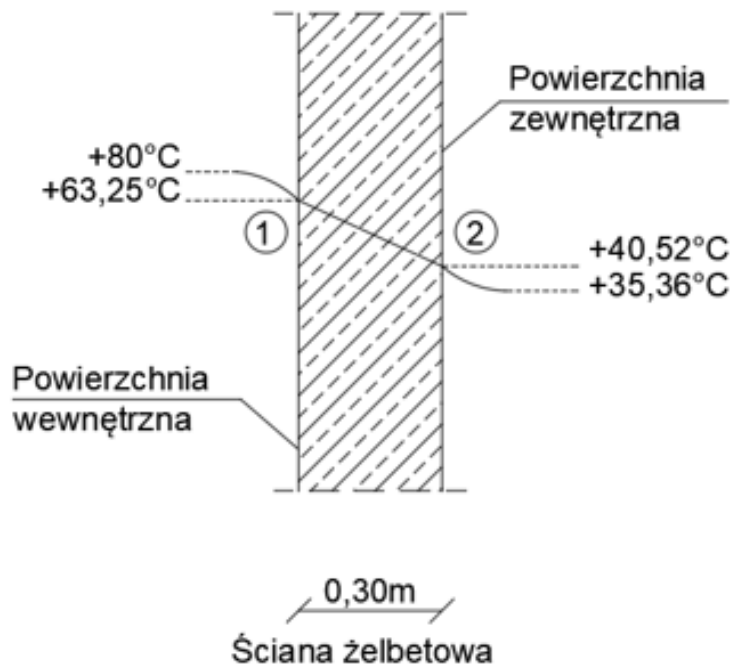
$$T_{80}(1) = 80 - \frac{0,13}{0,35} \cdot (80 - 35,36) = 63,25^{\circ}\text{C}$$

Temperatura w punkcie 2:

$$T_{80}(2) = 80 - \frac{0,31}{0,35} \cdot (80 - 35,36) = 40,52^{\circ}\text{C}$$

Różnica temperatur ΔT :

$$\Delta T_{80} = |63,25 - 40,52| = 22,73^{\circ}\text{C}$$



Rys. 5.11. Schemat rozkładu temperatur w ścianie silosu wypełnionego klinkierem cementowym o $T_{in} = 80^{\circ}\text{C}$ dla warunków letnich bez uwzględnienia warstwy tłumiącej

- temperatura klinkieru cementowego $T_{in,2} = 100^{\circ}\text{C}$

Temperatura w punkcie 1:

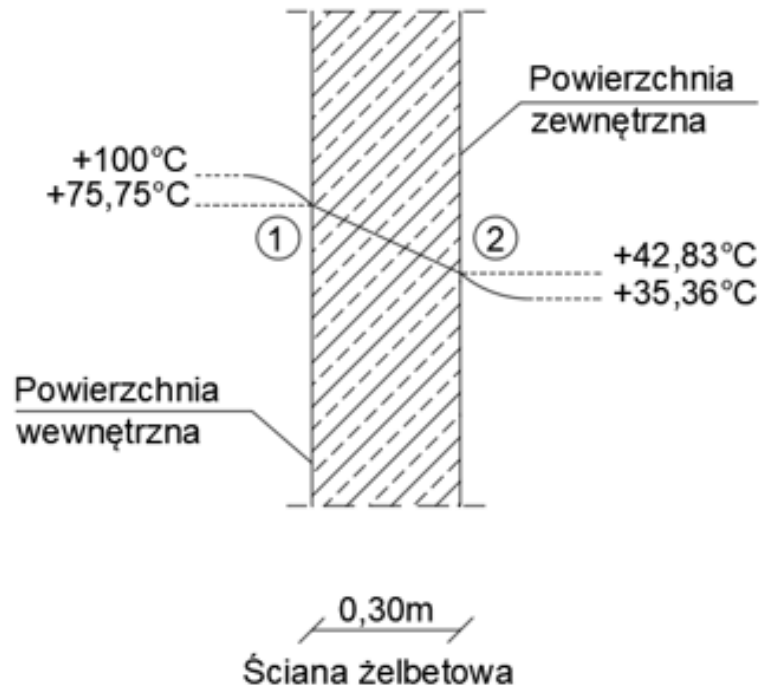
$$T_{100}(1) = 100 - \frac{0,13}{0,35} \cdot (100 - 35,36) = 75,75^{\circ}\text{C}$$

Temperatura w punkcie 2:

$$T_{100}(2) = 100 - \frac{0,31}{0,35} \cdot (100 - 35,36) = 42,83^{\circ}\text{C}$$

Różnica temperatur ΔT :

$$\Delta T_{100} = |75,75 - 42,83| = 32,92^{\circ}\text{C}$$



Rys. 5.12. Schemat rozkładu temperatur w ścianie silosu wypełnionego klinkierem cementowym o $T_{in} = 100^{\circ}\text{C}$ dla warunków letnich bez uwzględnienia warstwy tłumiącej

- Rozkład temperatury z uwzględnieniem warstwy tłumiącej

Warstwę tłumiącą zdefiniowano jako warstwę klinkieru cementowego o grubości 20 cm [N6], dla której współczynnik przewodzenia ciepła wynosi $\lambda = 0,16 \text{ W/mK}$ [S4].

Dla $t = 0,30 \text{ m}$ całkowity opór cieplny ściany silosu określa się wzorem (1.42):

$$R_{tot} = 0,13 + \frac{0,20}{0,16} + \frac{0,30}{1,70} + 0,04 = 1,60 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_{(1)} = 0,13 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_{(2)} = 0,13 + \frac{0,20}{0,16} = 1,38 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_{(3)} = 0,13 + \frac{0,20}{0,16} + \frac{0,30}{1,70} = 1,56 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

Temperatura w warunkach zimowych:

- temperatura klinkieru cementowego $T_{in,1} = 80^{\circ}\text{C}$

Temperatura w punkcie 1:

$$T_{80}(1) = 80 - \frac{0,13}{1,60} \cdot (80 + 32,42) = 70,85^{\circ}\text{C}$$

Temperatura w punkcie 2:

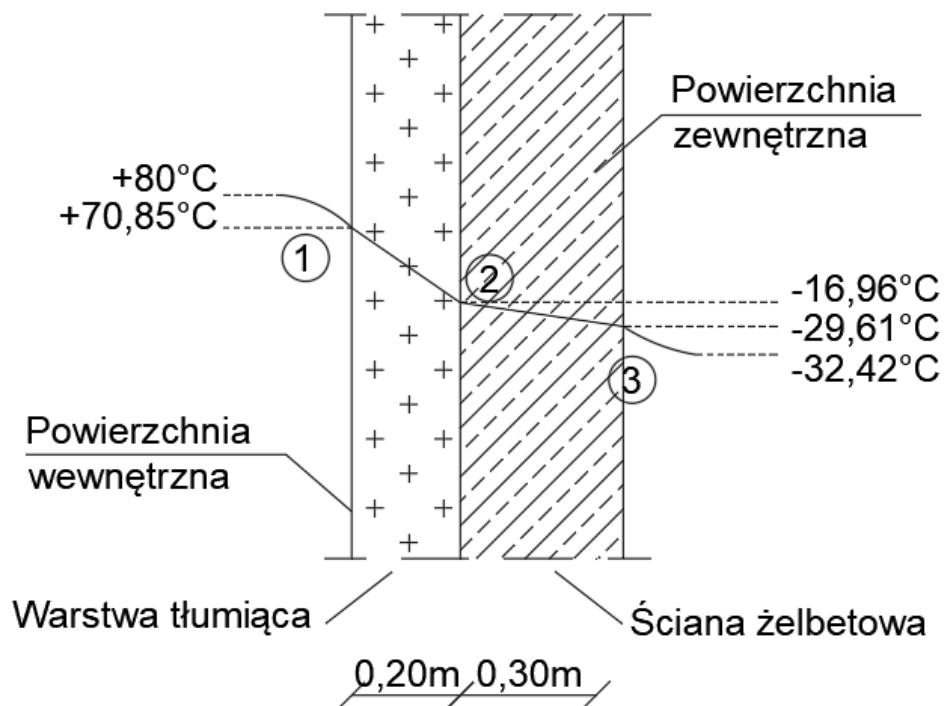
$$T_{80}(2) = 80 - \frac{1,38}{1,60} \cdot (80 + 32,42) = -16,96^{\circ}\text{C}$$

Temperatura w punkcie 3:

$$T_{80}(3) = 80 - \frac{1,56}{1,60} \cdot (80 + 32,42) = -29,61^{\circ}\text{C}$$

Różnica temperatur ΔT :

$$\Delta T_{80} = |-16,96 + 29,61| = 12,65^{\circ}\text{C}$$



Rys. 5.13. Schemat rozkładu temperatur w ścianie silosu wypełnionego klinkierem cementowym o $T_{in} = 80^{\circ}\text{C}$ dla warunków zimowych z uwzględnieniem warstwy tłumiącej

- temperatura klinkieru cementowego $T_{in,2} = 100^{\circ}\text{C}$

Temperatura w punkcie 1:

$$T_{100}(1) = 100 - \frac{0,13}{1,60} \cdot (100 + 32,42) = 89,22^{\circ}\text{C}$$

Temperatura w punkcie 2:

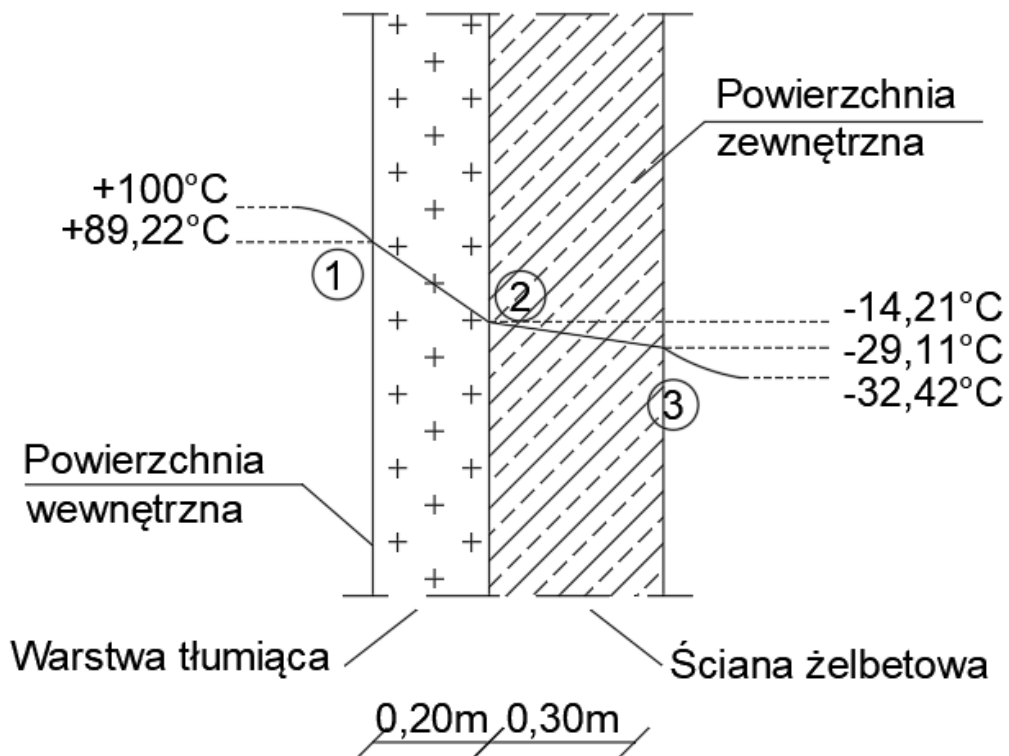
$$T_{100}(2) = 100 - \frac{1,38}{1,60} \cdot (100 + 32,42) = -14,21^{\circ}\text{C}$$

Temperatura w punkcie 3:

$$T_{100}(3) = 100 - \frac{1,56}{1,60} \cdot (100 + 32,42) = -29,11^{\circ}\text{C}$$

Różnica temperatur ΔT :

$$\Delta T_{100} = |-14,21 + 29,11| = 14,90^{\circ}\text{C}$$



Rys. 5.14. Schemat rozkładu temperatur w ścianie silosu wypełnionego klinkierem cementowym o $T_{in} = 100^{\circ}\text{C}$ dla warunków zimowych z uwzględnieniem warstwy tłumiącej

Temperatura w warunkach letnich:

- temperatura klinkieru cementowego $T_{in,1} = 80^{\circ}\text{C}$

Temperatura w punkcie 1:

$$T_{80}(1) = 80 - \frac{0,13}{1,60} \cdot (80 - 35,36) = 76,37^{\circ}\text{C}$$

Temperatura w punkcie 2:

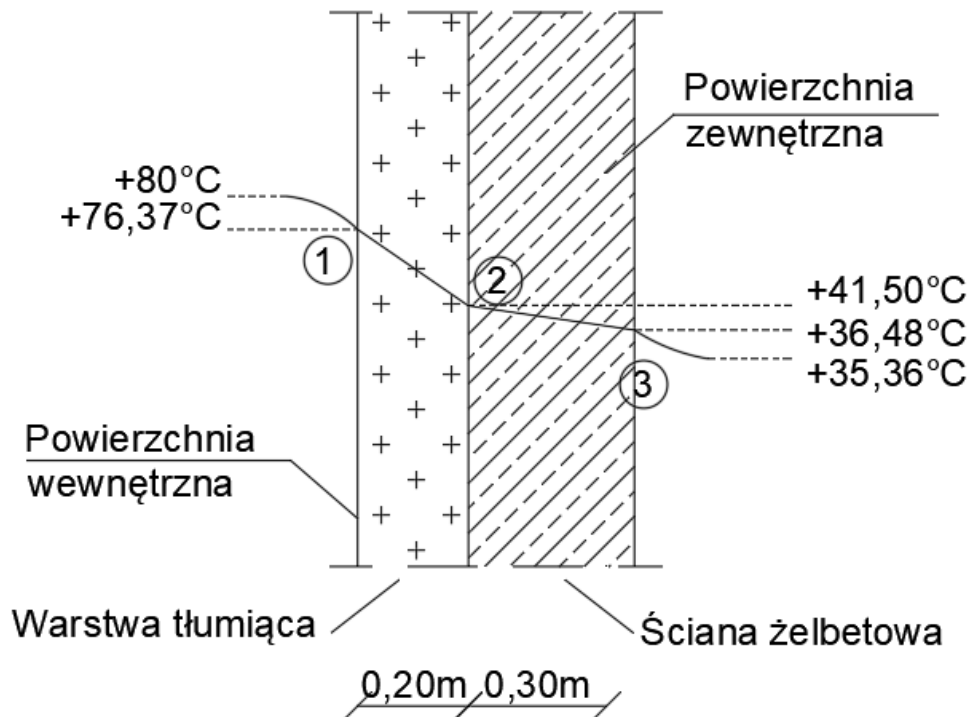
$$T_{80}(2) = 80 - \frac{1,38}{1,60} \cdot (80 - 35,36) = 41,50^{\circ}\text{C}$$

Temperatura w punkcie 3:

$$T_{80}(3) = 80 - \frac{1,56}{1,60} \cdot (80 - 35,36) = 36,48^{\circ}\text{C}$$

Różnica temperatur ΔT :

$$\Delta T_{80} = |41,50 - 36,48| = 5,02^{\circ}\text{C}$$



Rys. 5.15. Schemat rozkładu temperatur w ścianie silosu wypełnionego klinkierem cementowym o $T_{in} = 80^{\circ}\text{C}$ dla warunków letnich z uwzględnieniem warstwy tłumiącej

- temperatura klinkieru cementowego $T_{in,2} = 100^{\circ}\text{C}$

Temperatura w punkcie 1:

$$T_{100}(1) = 100 - \frac{0,13}{1,60} \cdot (100 - 35,36) = 94,74^{\circ}\text{C}$$

Temperatura w punkcie 2:

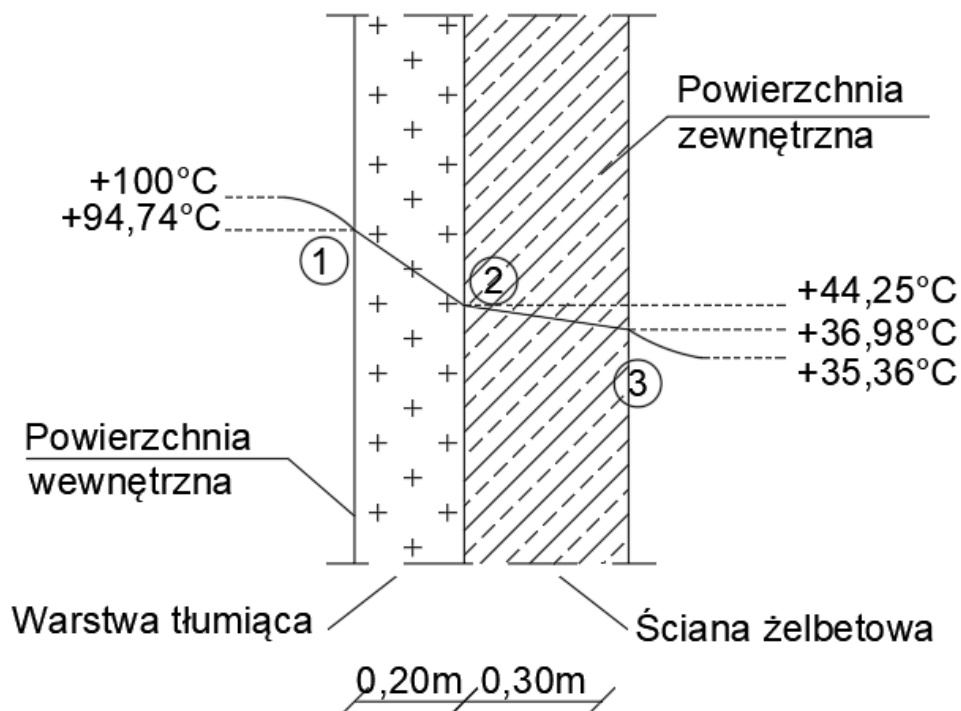
$$T_{100}(2) = 100 - \frac{1,38}{1,60} \cdot (100 - 35,36) = 44,25^{\circ}\text{C}$$

Temperatura w punkcie 3:

$$T_{100}(3) = 100 - \frac{1,56}{1,60} \cdot (100 - 35,36) = 36,98^{\circ}\text{C}$$

Różnica temperatur ΔT :

$$\Delta T_{100} = |44,25 - 36,98| = 7,27^{\circ}\text{C}$$



Rys. 5.16. Schemat rozkładu temperatur w ścianie silosu wypełnionego klinkierem cementowym o $T_{in} = 100^{\circ}\text{C}$ dla warunków letnich z uwzględnieniem warstwy tłumiącej

- Zestawienie wartości temperatur dla grubości ściany $t = 0,30$ m

Rozkład temperatur w charakterystycznych punktach ściany silosu przedstawiono w tabelach 5.3 i 5.4. W obu przypadkach analizę przeprowadzono w dwóch wariantach: z uwzględnieniem oraz bez uwzględnienia przysięciennej warstwy tłumiącej.

Tabela 5.3. Zestawienie wartości temperatur w poszczególnych punktach ściany bez uwzględnienia warstwy tłumiącej

Temperatura klinkieru cementowego	$T(1) [^{\circ}\text{C}]$	$T(2) [^{\circ}\text{C}]$	$\Delta T [^{\circ}\text{C}]$
Warunki zimowe			
$T_{in} = 80^{\circ}\text{C}$	37,82	-19,44	57,26
$T_{in} = 100^{\circ}\text{C}$	50,31	-17,13	67,45
Warunki letnie			
$T_{in} = 80^{\circ}\text{C}$	63,25	40,52	22,73
$T_{in} = 100^{\circ}\text{C}$	75,75	42,83	32,92

Tabela 5.4. Zestawienie wartości temperatur w poszczególnych punktach ściany z uwzględnieniem warstwy tłumiącej

Temperatura klinkieru cementowego	$T(1) [^{\circ}\text{C}]$	$T(2) [^{\circ}\text{C}]$	$T(3) [^{\circ}\text{C}]$	$\Delta T [^{\circ}\text{C}]$
Warunki zimowe				
$T_{in} = 80^{\circ}\text{C}$	70,85	-16,96	-29,61	12,65
$T_{in} = 100^{\circ}\text{C}$	89,22	-14,21	-29,11	14,90
Warunki letnie				
$T_{in} = 80^{\circ}\text{C}$	76,37	41,50	36,48	5,02
$T_{in} = 100^{\circ}\text{C}$	94,74	44,25	36,98	7,27

5.1.3. Obciążenie temperaturą dla ściany o grubości 0,35 m

- Rozkład temperatury bez uwzględnienia warstwy tłumiącej

Dla $t = 0,35$ m całkowity opór cieplny ściany silosu określa się wzorem (1.42):

$$R_{tot} = 0,13 + \frac{0,35}{1,70} + 0,04 = 0,38 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_{(1)} = 0,13 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_{(2)} = 0,13 + \frac{0,30}{1,70} = 0,34 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

Temperatura w warunkach zimowych:

- temperatura klinkieru cementowego $T_{in,1} = 80^{\circ}\text{C}$

Temperatura w punkcie 1:

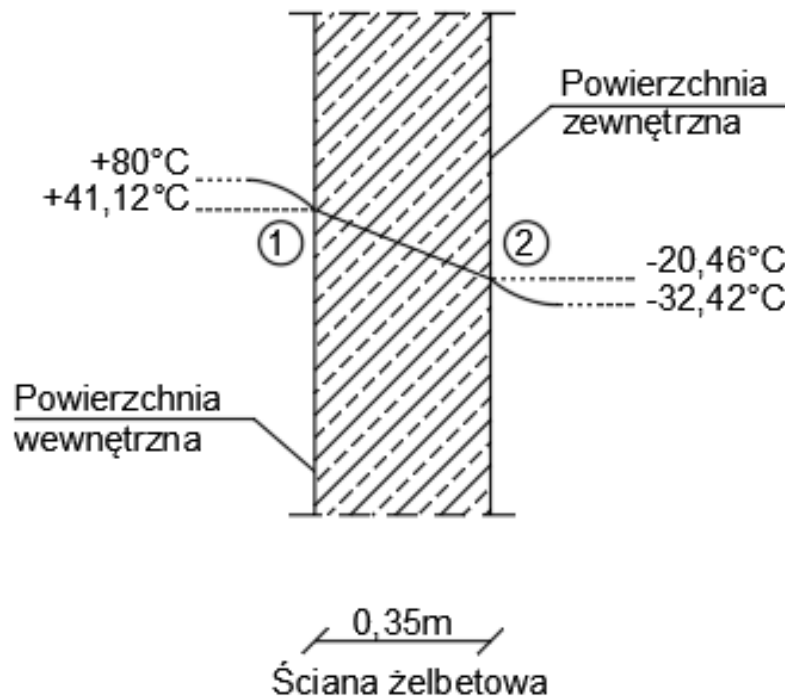
$$T_{80}(1) = 80 - \frac{0,13}{0,38} \cdot (80 + 32,42) = 41,12^{\circ}\text{C}$$

Temperatura w punkcie 2:

$$T_{80}(2) = 80 - \frac{0,34}{0,38} \cdot (80 + 32,42) = -20,46^{\circ}\text{C}$$

Różnica temperatur ΔT :

$$\Delta T_{80} = |41,12 + 20,46| = 61,58^{\circ}\text{C}$$



Rys. 5.17. Schemat rozkładu temperatur w ścianie silosu wypełnionego klinkierem cementowym o $T_{in} = 80^{\circ}\text{C}$ dla warunków zimowych bez uwzględnienia warstwy tłumiącej

- temperatura klinkieru cementowego $T_{in,2} = 100^{\circ}\text{C}$

Temperatura w punkcie 1:

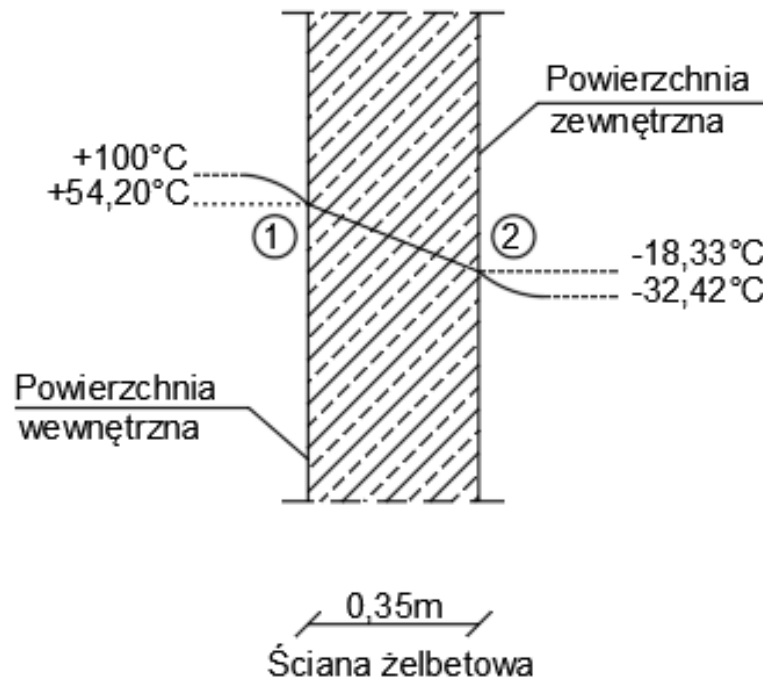
$$T_{100}(1) = 100 - \frac{0,13}{0,38} \cdot (100 + 32,42) = 54,20^{\circ}\text{C}$$

Temperatura w punkcie 2:

$$T_{100}(2) = 100 - \frac{0,34}{0,38} \cdot (100 + 32,42) = -18,33^{\circ}\text{C}$$

Różnica temperatur ΔT :

$$\Delta T_{100} = |54,20 + 18,33| = 72,53^{\circ}\text{C}$$



Rys. 5.18. Schemat rozkładu temperatur w ścianie silosu wypełnionego klinkierem cementowym o $T_{in} = 100^{\circ}\text{C}$ dla warunków zimowych bez uwzględnienia warstwy tłumiącej

Temperatura w warunkach letnich:

- temperatura klinkieru cementowego $T_{in,1} = 80^{\circ}\text{C}$

Temperatura w punkcie 1:

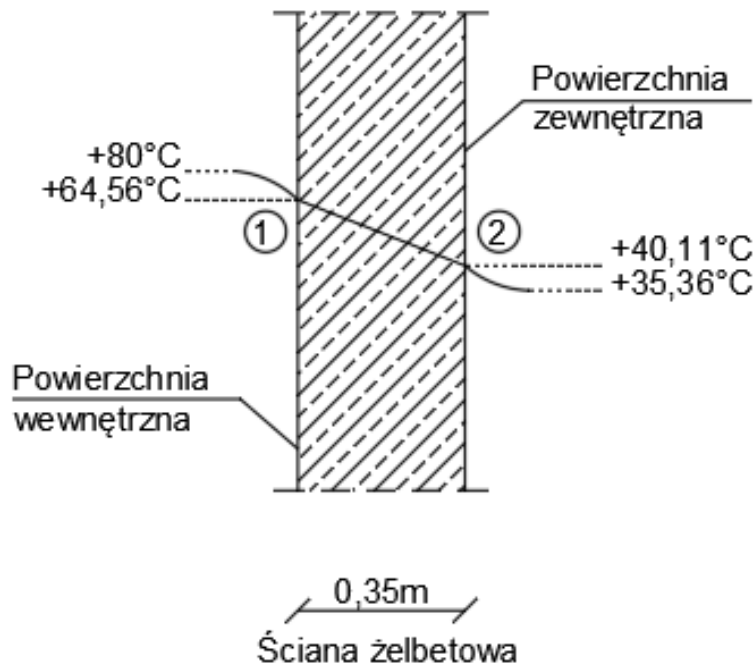
$$T_{80}(1) = 80 - \frac{0,13}{0,38} \cdot (80 - 35,36) = 64,56^{\circ}\text{C}$$

Temperatura w punkcie 2:

$$T_{80}(2) = 80 - \frac{0,34}{0,38} \cdot (80 - 35,36) = 40,11^{\circ}\text{C}$$

Różnica temperatur ΔT :

$$\Delta T_{80} = |64,56 - 40,11| = 24,45^{\circ}\text{C}$$



Rys. 5.19. Schemat rozkładu temperatur w ścianie silosu wypełnionego klinkierem cementowym o $T_{in} = 80^{\circ}\text{C}$ dla warunków letnich bez uwzględnienia warstwy tłumiącej

- temperatura klinkieru cementowego $T_{in,2} = 100^{\circ}\text{C}$

Temperatura w punkcie 1:

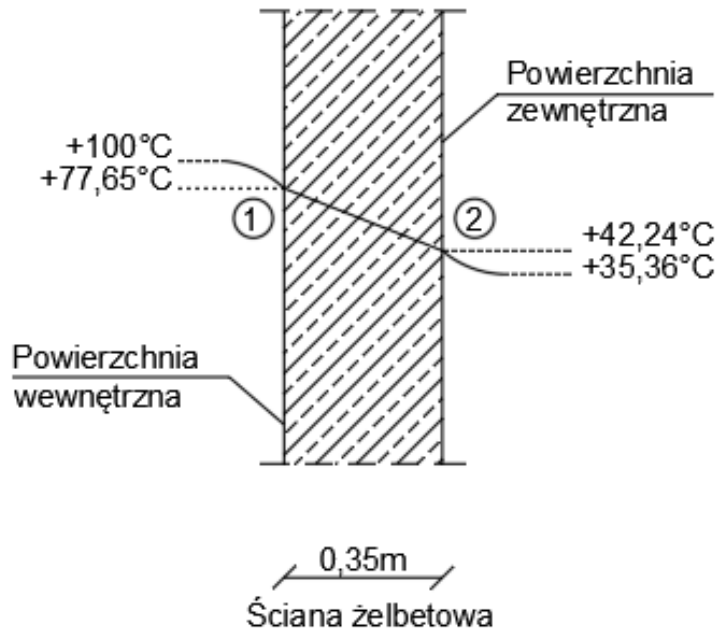
$$T_{100}(1) = 100 - \frac{0,13}{0,38} \cdot (100 - 35,36) = 77,65^{\circ}\text{C}$$

Temperatura w punkcie 2:

$$T_{100}(2) = 100 - \frac{0,34}{0,38} \cdot (100 - 35,36) = 42,24^{\circ}\text{C}$$

Różnica temperatur ΔT :

$$\Delta T_{100} = |77,65 - 42,24| = 35,40^{\circ}\text{C}$$



Rys. 5.20. Schemat rozkładu temperatur w ścianie silosu wypełnionego klinkierem cementowym o $T_{in} = 100^{\circ}\text{C}$ dla warunków letnich bez uwzględnienia warstwy tłumiącej

- Rozkład temperatury z uwzględnieniem warstwy tłumiącej

Warstwę tłumiącą zdefiniowano jako warstwę klinkieru cementowego o grubości 20 cm [N6], dla której współczynnik przewodzenia ciepła wynosi $\lambda = 0,16 \text{ W/mK}$ [S4].

Dla $t = 0,35 \text{ m}$ całkowity opór cieplny ściany silosu określa się wzorem (1.42):

$$R_{tot} = 0,13 + \frac{0,20}{0,16} + \frac{0,35}{1,70} + 0,04 = 1,63 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_{(1)} = 0,13 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_{(2)} = 0,13 + \frac{0,20}{0,16} = 1,38 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_{(3)} = 0,13 + \frac{0,20}{0,16} + \frac{0,35}{1,70} = 1,59 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

Temperatura w warunkach zimowych:

- temperatura klinkieru cementowego $T_{in,1} = 80^{\circ}\text{C}$

Temperatura w punkcie 1:

$$T_{80}(1) = 80 - \frac{0,13}{1,63} \cdot (80 + 32,42) = 71,01^{\circ}\text{C}$$

Temperatura w punkcie 2:

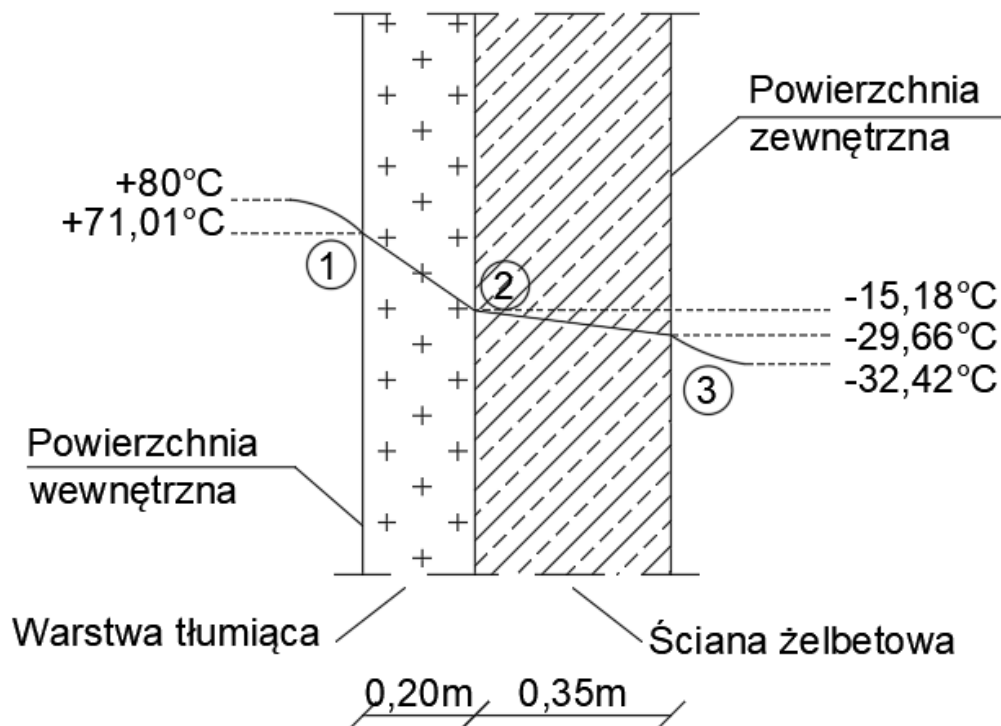
$$T_{80}(2) = 80 - \frac{1,38}{1,63} \cdot (80 + 32,42) = -15,18^{\circ}\text{C}$$

Temperatura w punkcie 3:

$$T_{80}(3) = 80 - \frac{1,59}{1,63} \cdot (80 + 32,42) = -29,66^{\circ}\text{C}$$

Różnica temperatur ΔT :

$$\Delta T_{80} = |-15,18 + 29,66| = 14,47^{\circ}\text{C}$$



Rys. 5.21. Schemat rozkładu temperatur w ścianie silosu wypełnionego klinkierem cementowym o $T_{in} = 80^{\circ}\text{C}$ dla warunków zimowych z uwzględnieniem warstwy tłumiącej

- temperatura klinkieru cementowego $T_{in,2} = 100^{\circ}\text{C}$

Temperatura w punkcie 1:

$$T_{100}(1) = 100 - \frac{0,13}{1,63} \cdot (100 + 32,42) = 89,41^{\circ}\text{C}$$

Temperatura w punkcie 2:

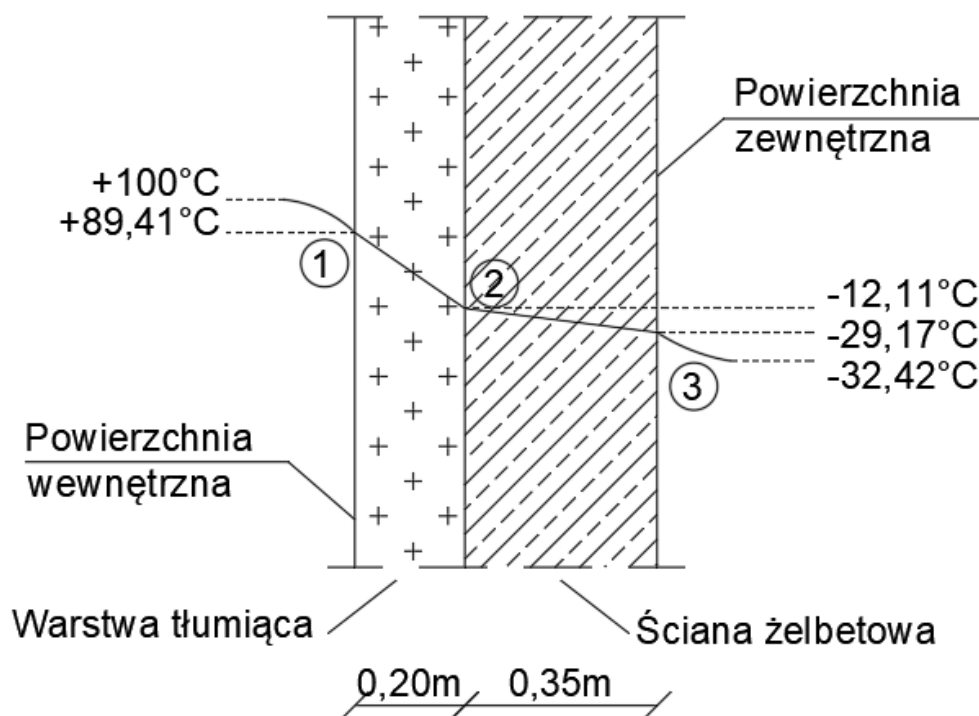
$$T_{100}(2) = 100 - \frac{1,38}{1,63} \cdot (100 + 32,42) = -12,11^{\circ}\text{C}$$

Temperatura w punkcie 3:

$$T_{100}(3) = 100 - \frac{1,59}{1,63} \cdot (100 + 32,42) = -29,17^{\circ}\text{C}$$

Różnica temperatur ΔT :

$$\Delta T_{100} = |-12,11 + 29,17| = 17,06^{\circ}\text{C}$$



Rys. 5.22. Schemat rozkładu temperatur w ścianie silosu wypełnionego klinkierem cementowym o $T_{in} = 100^{\circ}\text{C}$ dla warunków zimowych z uwzględnieniem warstwy tłumiącej

Temperatura w warunkach letnich:

- temperatura klinkieru cementowego $T_{in,1} = 80^{\circ}\text{C}$

Temperatura w punkcie 1:

$$T_{80}(1) = 80 - \frac{0,13}{1,63} \cdot (80 - 35,36) = 76,43^{\circ}\text{C}$$

Temperatura w punkcie 2:

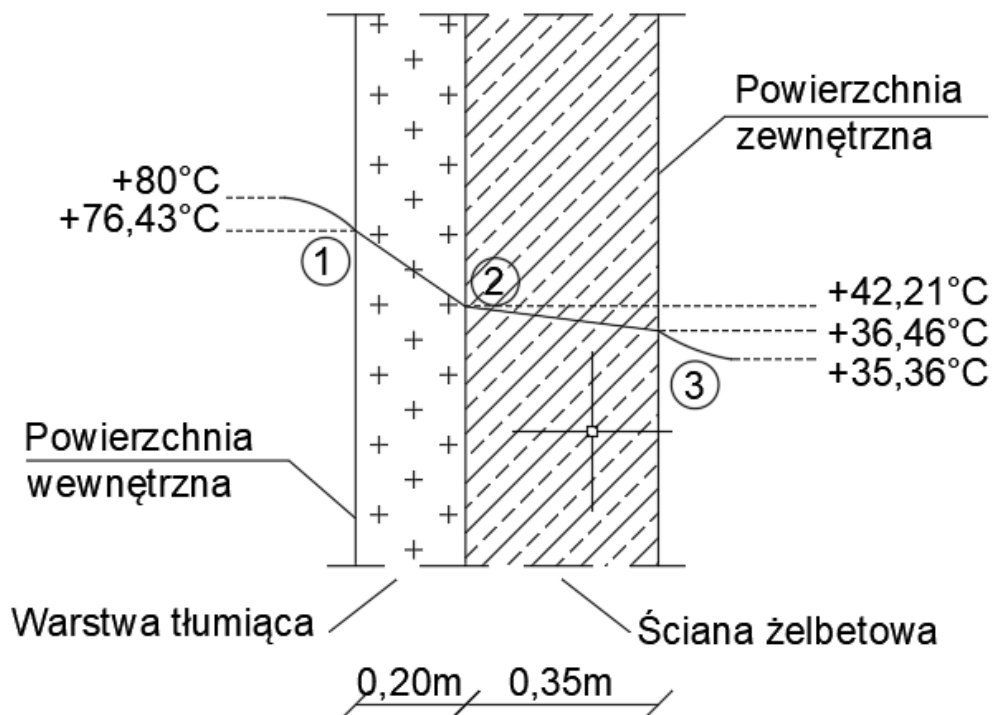
$$T_{80}(2) = 80 - \frac{1,38}{1,63} \cdot (80 - 35,36) = 42,21^{\circ}\text{C}$$

Temperatura w punkcie 3:

$$T_{80}(3) = 80 - \frac{1,59}{1,63} \cdot (80 - 35,36) = 36,46^{\circ}\text{C}$$

Różnica temperatur ΔT :

$$\Delta T_{80} = |42,21 - 36,46| = 5,75^{\circ}\text{C}$$



Rys. 5.23. Schemat rozkładu temperatur w ścianie silosu wypełnionego klinkierem cementowym o $T_{in} = 80^{\circ}\text{C}$ dla warunków letnich z uwzględnieniem warstwy tłumiącej

- temperatura klinkieru cementowego $T_{in,2} = 100^{\circ}\text{C}$

Temperatura w punkcie 1:

$$T_{100}(1) = 100 - \frac{0,13}{1,63} \cdot (100 - 35,36) = 94,83^{\circ}\text{C}$$

Temperatura w punkcie 2:

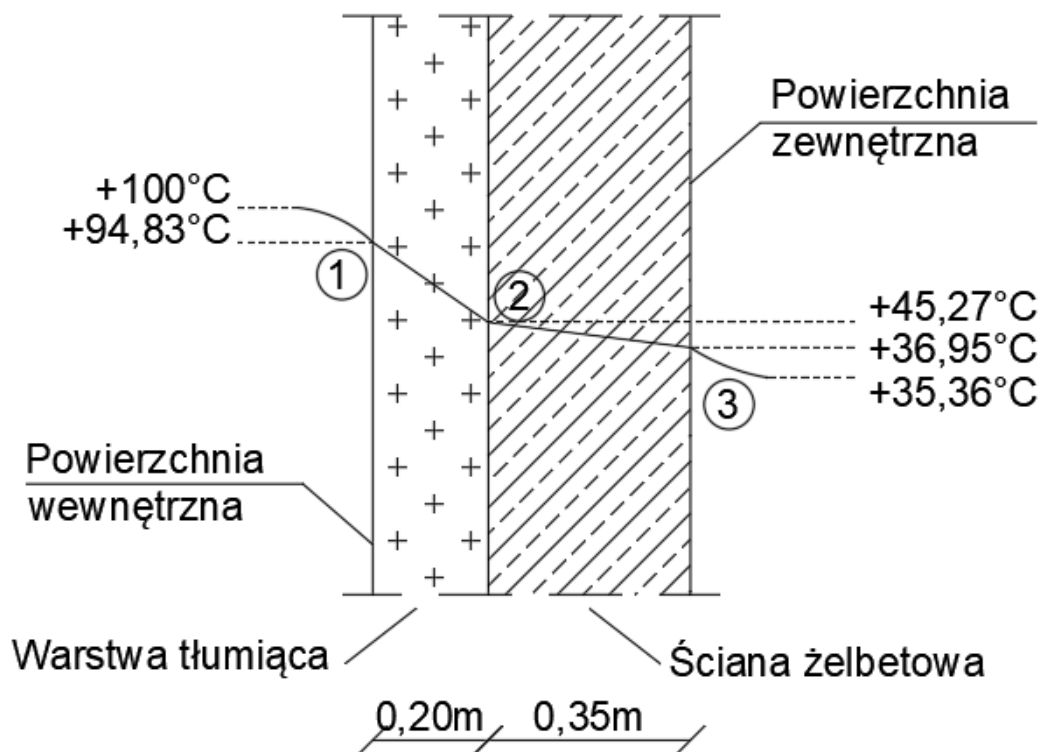
$$T_{100}(2) = 100 - \frac{1,38}{1,63} \cdot (100 - 35,36) = 45,27^{\circ}\text{C}$$

Temperatura w punkcie 3:

$$T_{100}(3) = 100 - \frac{1,59}{1,63} \cdot (100 - 35,36) = 36,95^{\circ}\text{C}$$

Różnica temperatur ΔT :

$$\Delta T_{100} = |45,27 - 36,95| = 8,32^{\circ}\text{C}$$



Rys. 5.24. Schemat rozkładu temperatur w ścianie silosu wypełnionego klinkierem cementowym o $T_{in} = 100^{\circ}\text{C}$ dla warunków letnich z uwzględnieniem warstwy tłumiącej

- Zestawienie wartości temperatur dla grubości ściany $t = 0,35$ m

Rozkład temperatur w charakterystycznych punktach ściany silosu przedstawiono w tabelach 5.5 i 5.6. W obu przypadkach analizę przeprowadzono w dwóch wariantach: z uwzględnieniem oraz bez uwzględnienia przysięciennej warstwy tłumiącej.

Tabela 5.5. Zestawienie wartości temperatur w poszczególnych punktach ściany bez uwzględnienia warstwy tłumiącej

Temperatura klinkieru cementowego	$T(1) [^{\circ}\text{C}]$	$T(2) [^{\circ}\text{C}]$	$\Delta T [^{\circ}\text{C}]$
Warunki zimowe			
$T_{in} = 80^{\circ}\text{C}$	41,12	-20,46	61,58
$T_{in} = 100^{\circ}\text{C}$	54,20	-18,33	72,53
Warunki letnie			
$T_{in} = 80^{\circ}\text{C}$	64,56	40,11	24,45
$T_{in} = 100^{\circ}\text{C}$	77,65	42,24	35,40

Tabela 5.6. Zestawienie wartości temperatur w poszczególnych punktach ściany z uwzględnieniem warstwy tłumiącej

Temperatura klinkieru cementowego	$T(1) [^{\circ}\text{C}]$	$T(2) [^{\circ}\text{C}]$	$T(3) [^{\circ}\text{C}]$	$\Delta T [^{\circ}\text{C}]$
Warunki zimowe				
$T_{in} = 80^{\circ}\text{C}$	71,01	-15,18	-29,65	14,47
$T_{in} = 100^{\circ}\text{C}$	89,41	-12,11	-29,17	17,06
Warunki letnie				
$T_{in} = 80^{\circ}\text{C}$	76,43	42,21	36,46	5,75
$T_{in} = 100^{\circ}\text{C}$	94,83	45,27	36,95	8,32

5.1.4. Obciążenie temperaturą dla ściany o grubości 30 cm przy częściowym zapełnieniu komory silosu

W analizie rozkładu temperatur w komorach silosów wypełnionych klinkierem kluczowe znaczenie ma prawidłowe określenie temperatury materiału w bezpośrednim sąsiedztwie ścian konstrukcji. Wartość ta jest bezpośrednio zależna od temperatury klinkieru w momencie jego wprowadzania do komory oraz od stopnia napełnienia silosu. Zgodnie z literaturą [3] przyjęto rzeczywiste warunki eksploatacyjne, w których poziom napełnienia silosu przekracza połowę wysokości jego ściany. Do dalszych analiz i obliczeń cieplnych

przyjęto temperaturę materiału przy ścianie na poziomie 63% temperatury materiału wprowadzanego.

$$T_{in,1} = 80^{\circ}\text{C} \cdot 63\% = 50,40^{\circ}\text{C}$$

$$T_{in,2} = 100^{\circ}\text{C} \cdot 63\% = 63,00^{\circ}\text{C}$$

- Rozkład temperatury bez uwzględnienia warstwy tłumiącej

Dla $t = 0,30$ m całkowity opór cieplny ściany silosu określa się wzorem (1.42):

$$R_{tot} = 0,13 + \frac{0,30}{1,70} + 0,04 = 0,35 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_{(1)} = 0,13 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_{(2)} = 0,13 + \frac{0,30}{1,70} = 0,31 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

Temperatura w warunkach zimowych:

- temperatura klinkieru cementowego $T_{in,1} = 50,40^{\circ}\text{C}$

Temperatura w punkcie 1:

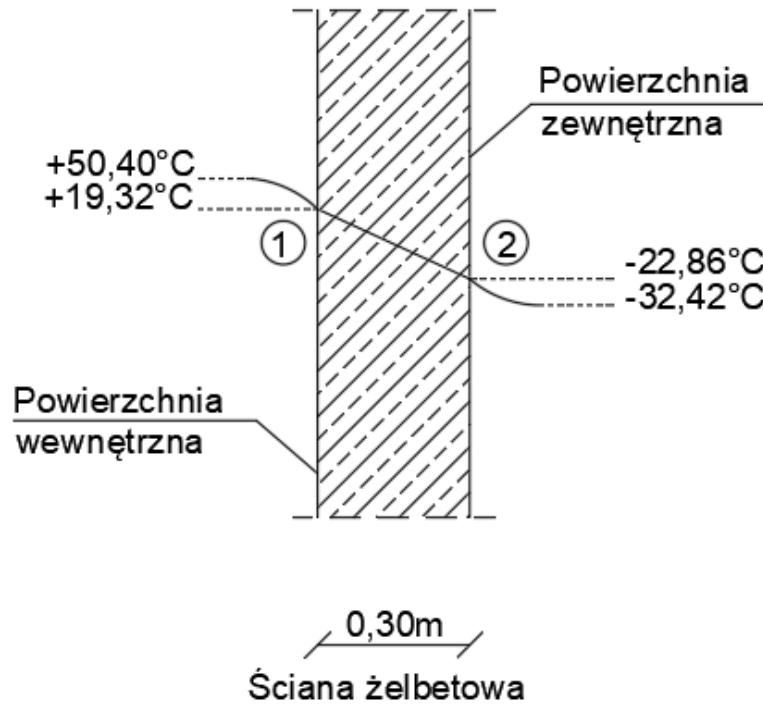
$$T_{50,40}(1) = 50,40 - \frac{0,13}{0,35} \cdot (50,40 + 32,42) = 19,32^{\circ}\text{C}$$

Temperatura w punkcie 2:

$$T_{50,40}(2) = 50,40 - \frac{0,31}{0,35} \cdot (50,40 + 32,42) = -22,86^{\circ}\text{C}$$

Różnica temperatur ΔT :

$$\Delta T_{50,40} = |19,32 + 22,86| = 42,18^{\circ}\text{C}$$



Rys. 5.25. Schemat rozkładu temperatur w ścianie silosu wypełnionego klinkierem cementowym o $T_{in} = 50,40^{\circ}\text{C}$ dla warunków zimowych bez uwzględnieniem warstwy tłumiącej dla częściowo wypełnionej komory silosu

- temperatura klinkieru cementowego $T_{in,2} = 63,00^{\circ}\text{C}$

Temperatura w punkcie 1:

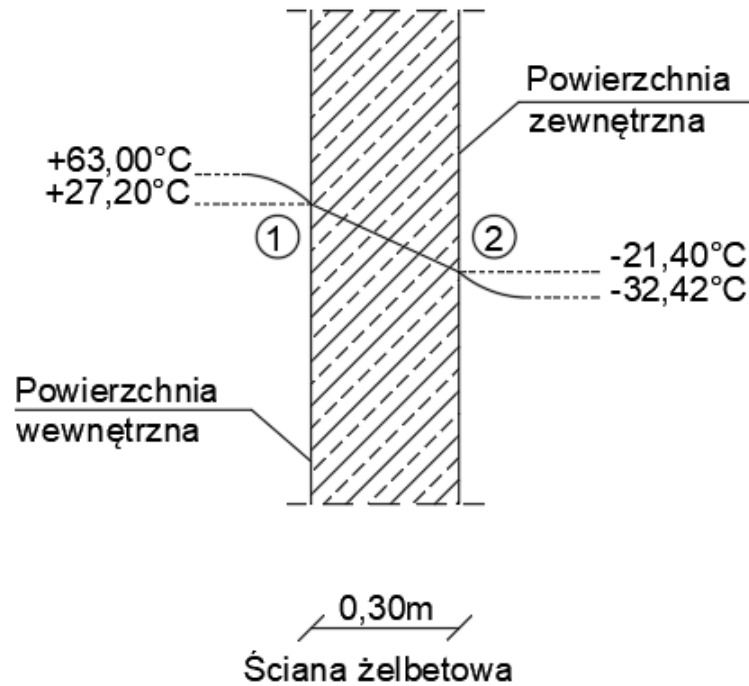
$$T_{63,00}(1) = 63,00 - \frac{0,13}{0,35} \cdot (63,00 + 32,42) = 27,20^{\circ}\text{C}$$

Temperatura w punkcie 2:

$$T_{63,00}(2) = 63,00 - \frac{0,31}{0,35} \cdot (63,00 + 32,42) = -21,40^{\circ}\text{C}$$

Różnica temperatur ΔT :

$$\Delta T_{63,00} = |27,20 + 21,40| = 48,60^{\circ}\text{C}$$



Rys. 5.26. Schemat rozkładu temperatur w ścianie silosu wypełnionego klinkierem cementowym o $T_{in} = 63,00^{\circ}\text{C}$ dla warunków zimowych bez uwzględnieniem warstwy tłumiącej dla częściowo wypełnionej komory silosu

Temperatura w warunkach letnich:

- temperatura klinkieru cementowego $T_{in,1} = 50,40^{\circ}\text{C}$

Temperatura w punkcie 1:

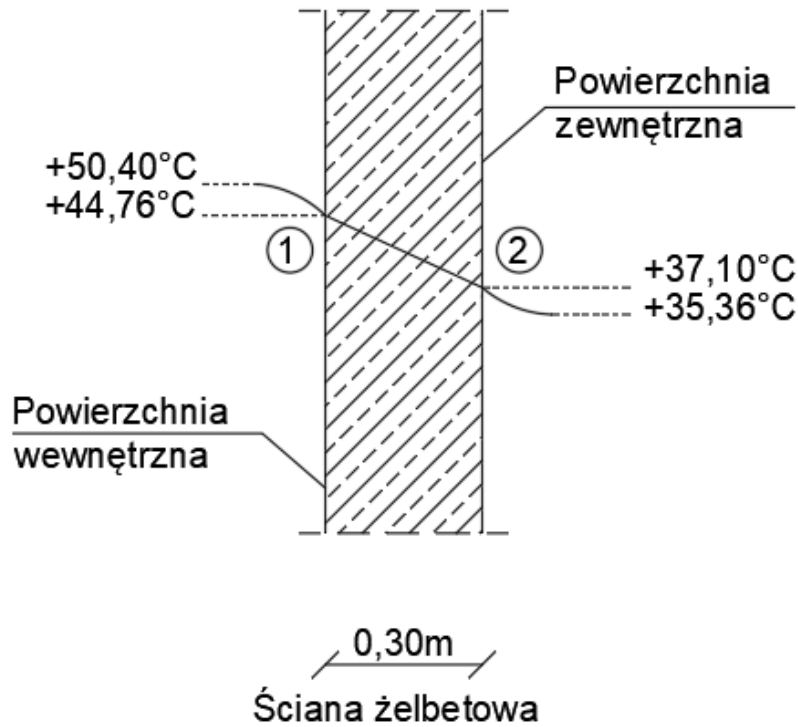
$$T_{50,40}(1) = 50,40 - \frac{0,13}{0,35} \cdot (50,40 - 35,36) = 44,76^{\circ}\text{C}$$

Temperatura w punkcie 2:

$$T_{50,40}(2) = 50,40 - \frac{0,31}{0,35} \cdot (50,40 - 35,36) = 37,10^{\circ}\text{C}$$

Różnica temperatur ΔT :

$$\Delta T_{50,40} = |44,76 - 37,10| = 7,66^{\circ}\text{C}$$



Rys. 5.27. Schemat rozkładu temperatur w ścianie silosu wypełnionego klinkierem cementowym o $T_{in} = 50,40^{\circ}\text{C}$ dla warunków letnich bez uwzględnieniem warstwy tłumiącej dla częściowo wypełnionej komory silosu

- temperatura klinkieru cementowego $T_{in,2} = 63,00^{\circ}\text{C}$

Temperatura w punkcie 1:

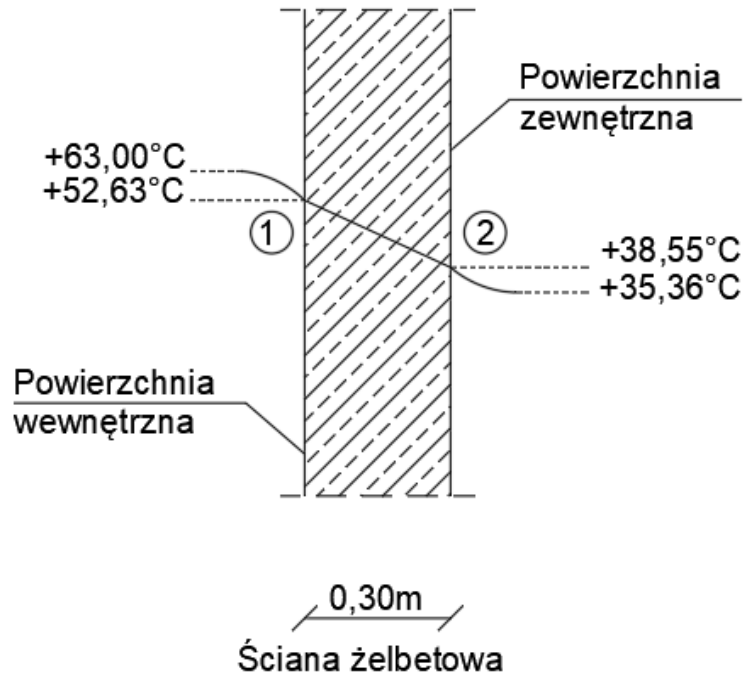
$$T_{63,00}(1) = 63,00 - \frac{0,13}{0,35} \cdot (63,00 - 35,36) = 52,63^{\circ}\text{C}$$

Temperatura w punkcie 2:

$$T_{63,00}(2) = 63,00 - \frac{0,31}{0,35} \cdot (63,00 - 35,36) = 38,55^{\circ}\text{C}$$

Różnica temperatur ΔT :

$$\Delta T_{63,00} = |52,63 - 38,55| = 14,08^{\circ}\text{C}$$



Rys. 5.28. Schemat rozkładu temperatur w ścianie silosu wypełnionego klinkierem cementowym o $T_{in} = 63,00^{\circ}\text{C}$ dla warunków letnich bez uwzględnienia warstwy tłumiącej dla częściowo wypełnionej komory silosu

- Zestawienie wartości temperatur dla grubości ściany $t = 0,30\text{ m}$ przy częściowym wypełnieniu komory

Rozkład temperatur w charakterystycznych punktach ściany silosu przedstawiono w tabeli 5.7. Analizę przeprowadzono dla wariantu bez uwzględnienia przyściennej warstwy tłumiącej.

Tabela 5.7. Zestawienie wartości temperatur w poszczególnych punktach ściany bez warstwy tłumiącej

Temperatura klinkieru cementowego	$T(1) [^{\circ}\text{C}]$	$T(2) [^{\circ}\text{C}]$	$\Delta T [^{\circ}\text{C}]$
Warunki zimowe			
$T_{in} = 50,40^{\circ}\text{C}$	19,32	-22,86	42,18
$T_{in} = 63,00^{\circ}\text{C}$	27,20	-21,40	48,60
Warunki letnie			
$T_{in} = 50,40^{\circ}\text{C}$	44,63	37,10	7,66
$T_{in} = 63,00^{\circ}\text{C}$	52,63	38,55	14,08

5.1.5. Obciążenie temperaturą dla ścian wewnętrznych o grubości 30 cm

W kolejnym kroku obliczenia przeprowadzono dla ścian wewnętrznych. Założono tutaj, że materiał znajduje się po obu stronach ściany, przy czym jedna komora jest całkowicie pełna, a druga napełniona tylko częściowo.

Warto dodać, że ze względu na położenie tych ścian w środku obiektu, temperatura wewnątrz komór będzie taka sama zarówno w warunkach letnich, jak i zimowych. Zmiany pór roku na zewnątrz nie wpływają na ten układ, dlatego obliczenia temperatur dla obu tych okresów wyglądają identycznie. Poniżej przedstawiono szczegółowe wyliczenia temperatur dla tego przypadku.

- Rozkład temperatury bez uwzględnienia warstwy tłumiącej

Dla $t = 0,30$ m całkowity opór cieplny ściany silosu określa się wzorem (1.42):

$$R_{tot} = 0,13 + \frac{0,30}{1,70} + 0,13 = 0,44 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_{(1)} = 0,13 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_{(2)} = 0,13 + \frac{0,30}{1,70} = 0,31 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

- temperatura klinkieru cementowego dla ścian wewnętrznych przy założeniu temperatury $80,00^\circ\text{C} - 50,40^\circ\text{C}$

Temperatura w punkcie 1:

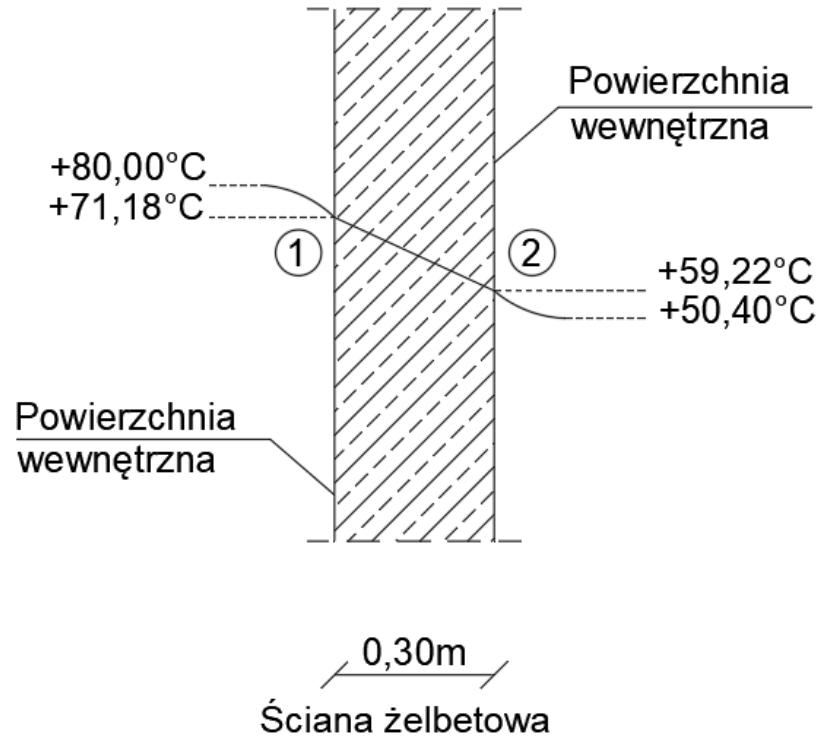
$$T_{80-50,40}(1) = 80,00 - \frac{0,13}{0,44} \cdot (80,00 - 50,40) = 71,18^\circ\text{C}$$

Temperatura w punkcie 2:

$$T_{80-50,40}(2) = 80,00 - \frac{0,31}{0,44} \cdot (80,00 - 50,40) = 59,22^\circ\text{C}$$

Różnica temperatur ΔT :

$$\Delta T_{80-50,40} = |71,18 - 59,22| = 11,97^\circ\text{C}$$



Rys. 5.29. Schemat rozkładu temperatur w ścianie wewnętrznej silosu wypełnionego klinkierem cementowym przy założeniu temperatury komór 80,00°C – 50,40°C bez uwzględnienia warstwy tłumiącej

- temperatura klinkieru cementowego dla ścian wewnętrznych przy założeniu temperatury komór 100,00°C – 63,00°C

Temperatura w punkcie 1:

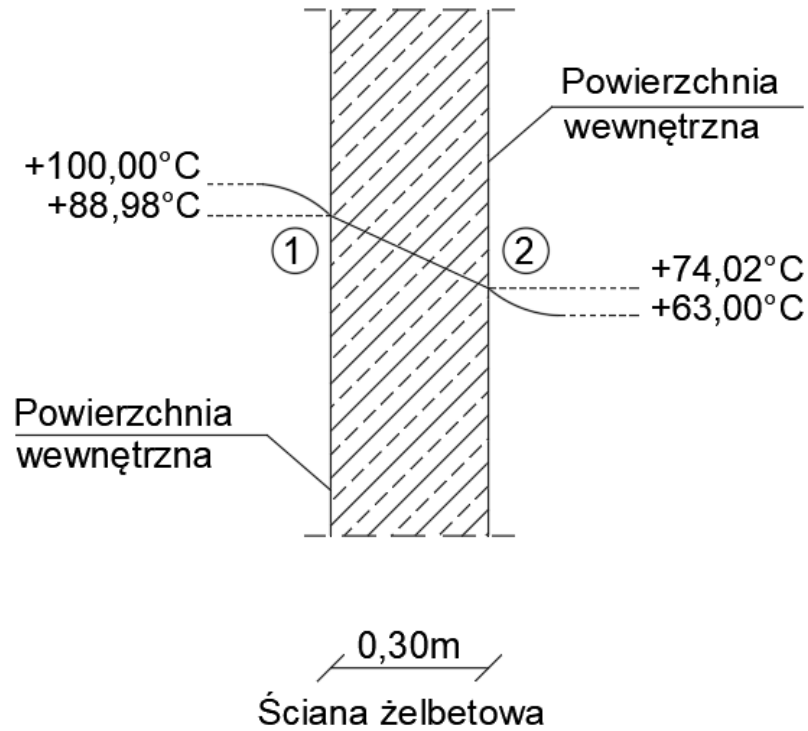
$$T_{100-63,00}(1) = 100,00 - \frac{0,13}{0,44} \cdot (100,00 - 63,00) = 88,98^{\circ}\text{C}$$

Temperatura w punkcie 2:

$$T_{100-63,00}(2) = 100,00 - \frac{0,31}{0,44} \cdot (100,00 - 63,00) = 74,02^{\circ}\text{C}$$

Różnica temperatur ΔT :

$$\Delta T_{100-63,00} = |88,98 - 74,02| = 14,96^{\circ}\text{C}$$



Rys. 5.30. Schemat rozkładu temperatur w ścianie wewnętrznej silosu wypełnionego klinkierem cementowym przy założeniu temperatury komór 100,00°C – 63,00°C bez uwzględnienia warstwy tłumiącej

- Rozkład temperatury z uwzględnieniem warstwy tłumiącej

Warstwę tłumiącą zdefiniowano jako warstwę klinkieru cementowego o grubości 20 cm [N6], dla której współczynnik przewodzenia ciepła wynosi $\lambda = 0,16 \text{ W/mK}$ [S4].

Dla $t = 0,30 \text{ m}$ całkowity opór cieplny ściany silosu określa się wzorem (1.42):

$$R_{tot} = 0,13 + \frac{0,20}{0,16} + \frac{0,30}{1,70} + 0,13 = 1,69 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_{(1)} = 0,13 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_{(2)} = 0,13 + \frac{0,20}{0,16} = 1,38 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_{(3)} = 0,13 + \frac{0,20}{0,16} + \frac{0,30}{1,70} = 1,56 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

- temperatura klinkieru cementowego dla ścian wewnętrznych przy założeniu temperatury komór $80^{\circ}\text{C} - 50,40^{\circ}\text{C}$

Temperatura w punkcie 1:

$$T_{80-50,40}(1) = 80,00 - \frac{0,13}{1,69} \cdot (80,00 - 50,40) = 77,72^{\circ}\text{C}$$

Temperatura w punkcie 2:

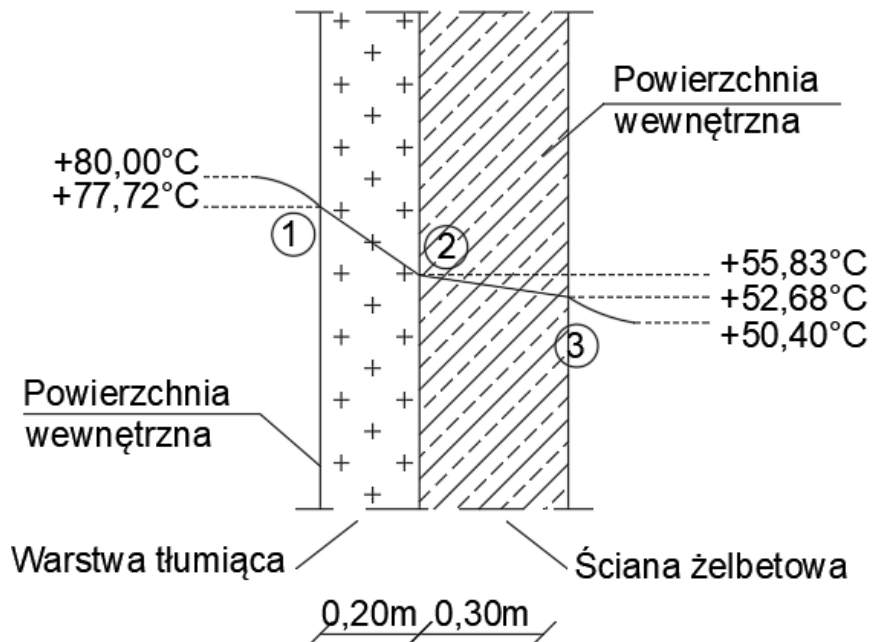
$$T_{80-50,40}(2) = 80,00 - \frac{1,38}{1,69} \cdot (80,00 - 50,40) = 55,83^{\circ}\text{C}$$

Temperatura w punkcie 3:

$$T_{80-50,40}(3) = 80,00 - \frac{1,56}{2,94} \cdot (80,00 - 50,40) = 52,68^{\circ}\text{C}$$

Różnica temperatur ΔT :

$$\Delta T_{80-50,40} = |55,83 - 52,68| = 3,15^{\circ}\text{C}$$



Rys. 5.31. Schemat rozkładu temperatur w ścianie wewnętrznej silosu wypełnionego klinkierem cementowym przy założeniu temperatury komór $80,00^{\circ}\text{C} - 50,40^{\circ}\text{C}$ z uwzględnieniem warstwy tłumiącej

- temperatura klinkieru cementowego dla ścian wewnętrznych przy założeniu temperatury komór 100°C – 63,00°C

Temperatura w punkcie 1:

$$T_{100-63,00}(1) = 100,00 - \frac{0,13}{1,69} \cdot (100,00 - 63,00) = 97,15^{\circ}\text{C}$$

Temperatura w punkcie 2:

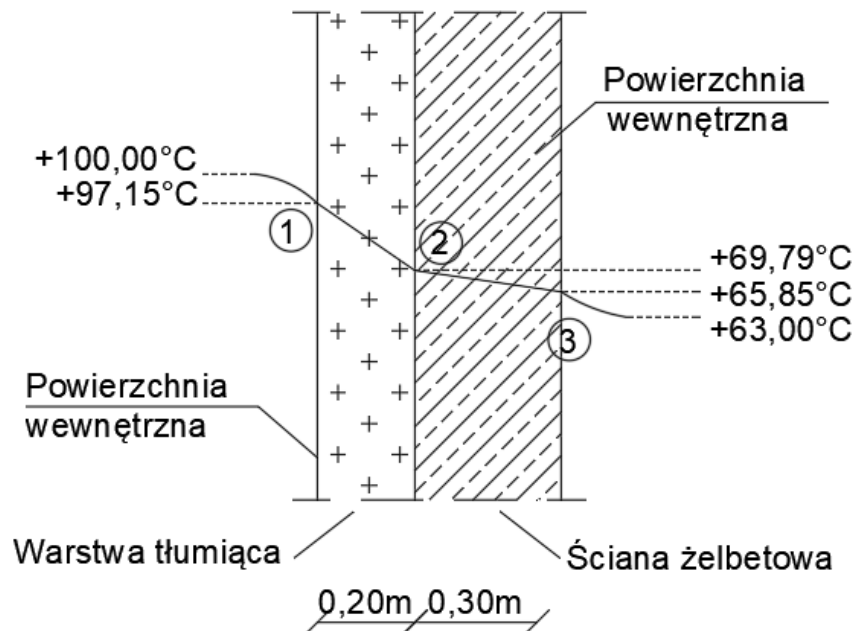
$$T_{100-63,00}(2) = 100,00 - \frac{1,38}{1,69} \cdot (100,00 - 63,00) = 69,79^{\circ}\text{C}$$

Temperatura w punkcie 3:

$$T_{100-63,00}(3) = 100,00 - \frac{1,56}{1,69} \cdot (100,00 - 63,00) = 65,85^{\circ}\text{C}$$

Różnica temperatur ΔT :

$$\Delta T_{100-63,00} = |69,79 - 65,85| = 3,94^{\circ}\text{C}$$



Rys. 5.32. Schemat rozkładu temperatur w ścianie wewnętrznej silosu wypełnionego klinkierem cementowym przy założeniu temperatury komór 100,00°C – 63,00°C z uwzględnieniem warstwy tłumiącej

- Zestawienie wartości temperatur dla ścian wewnętrznych o grubości ściany $t = 0,30$ m

Rozkład temperatur w charakterystycznych punktach ściany silosu przedstawiono w tabeli 5.8 oraz tabeli 5.9. Analizę przeprowadzono dla wariantu bez uwzględnienia przyściennej warstwy tłumiącej oraz z uwzględnieniem przyściennej warstwy tłumiącej.

Tabela 5.8. Zestawienie wartości temperatur w poszczególnych punktach ścian wewnętrznych bez warstwy tłumiącej

Temperatura klinkieru cementowego	$T(1) [^{\circ}\text{C}]$	$T(2) [^{\circ}\text{C}]$	$\Delta T [^{\circ}\text{C}]$
Warunki zimowe oraz letnie			
$80^{\circ}\text{C} - 50,40^{\circ}\text{C}$	71,18	59,22	11,97
$100^{\circ}\text{C} - 63,00^{\circ}\text{C}$	88,98	74,02	14,96

Tabela 5.9. Zestawienie wartości temperatur w poszczególnych punktach ścian wewnętrznych z uwzględnieniem warstwy tłumiącej

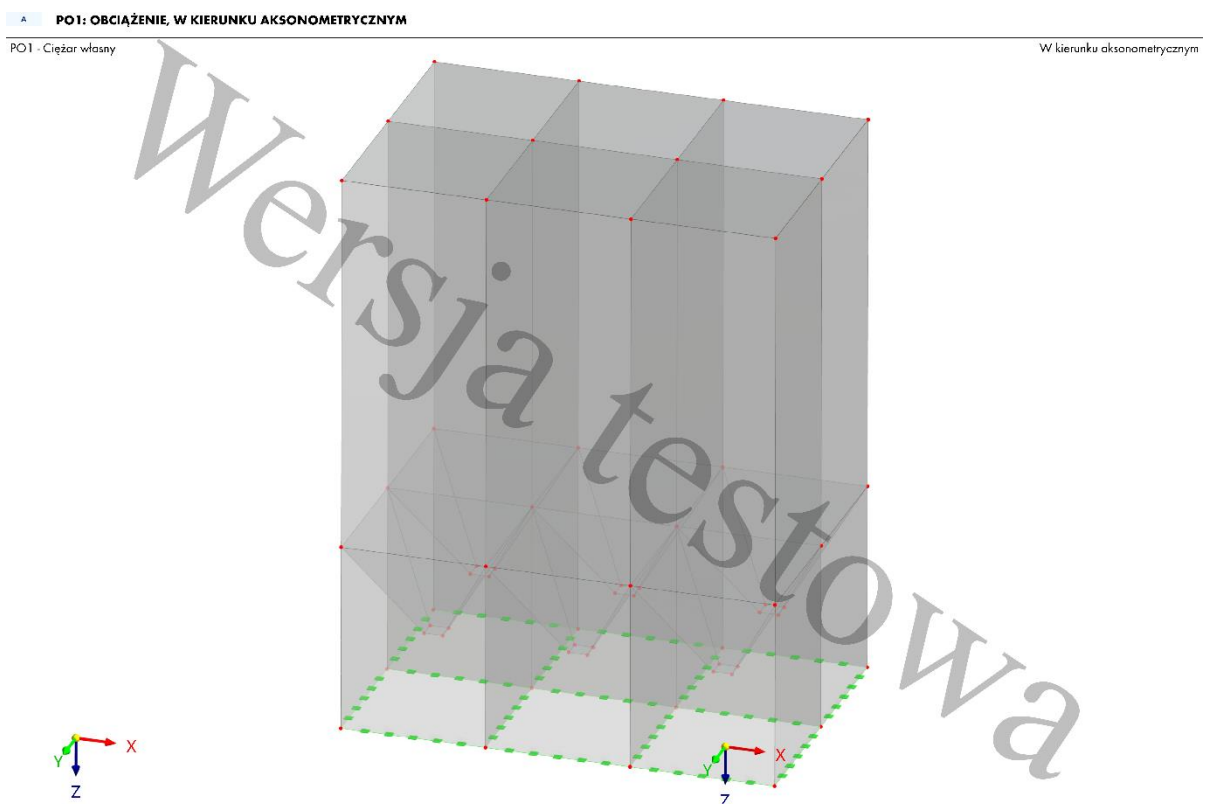
Temperatura klinkieru cementowego	$T(1) [^{\circ}\text{C}]$	$T(2) [^{\circ}\text{C}]$	$T(3) [^{\circ}\text{C}]$	$\Delta T [^{\circ}\text{C}]$
Warunki zimowe oraz letnie				
$80^{\circ}\text{C} - 50,40^{\circ}\text{C}$	77,72	55,83	52,68	3,15
$100^{\circ}\text{C} - 63,00^{\circ}\text{C}$	97,15	69,79	65,85	3,94

6. Wyznaczenie sił wewnętrznych w baterii silosów prostokątnych

6.1. Model konstrukcji baterii silosów

Obliczenia sił wewnętrznych zrealizowano za pomocą programu numerycznego RFEM [P2] z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES). Modelowanie konstrukcji oparte zostało na elementach powłokowych, co pozwoliło na precyzyjne uwzględnienie cech geometrycznych oraz grubości poszczególnych przegród (rys. 6.1). Analizę wielowariantową przeprowadzono na trzech odrębnych modelach obliczeniowych, zróżnicowanych pod względem grubości ścian. W skład struktury projektowanej baterii silosów wchodzi następujące elementy:

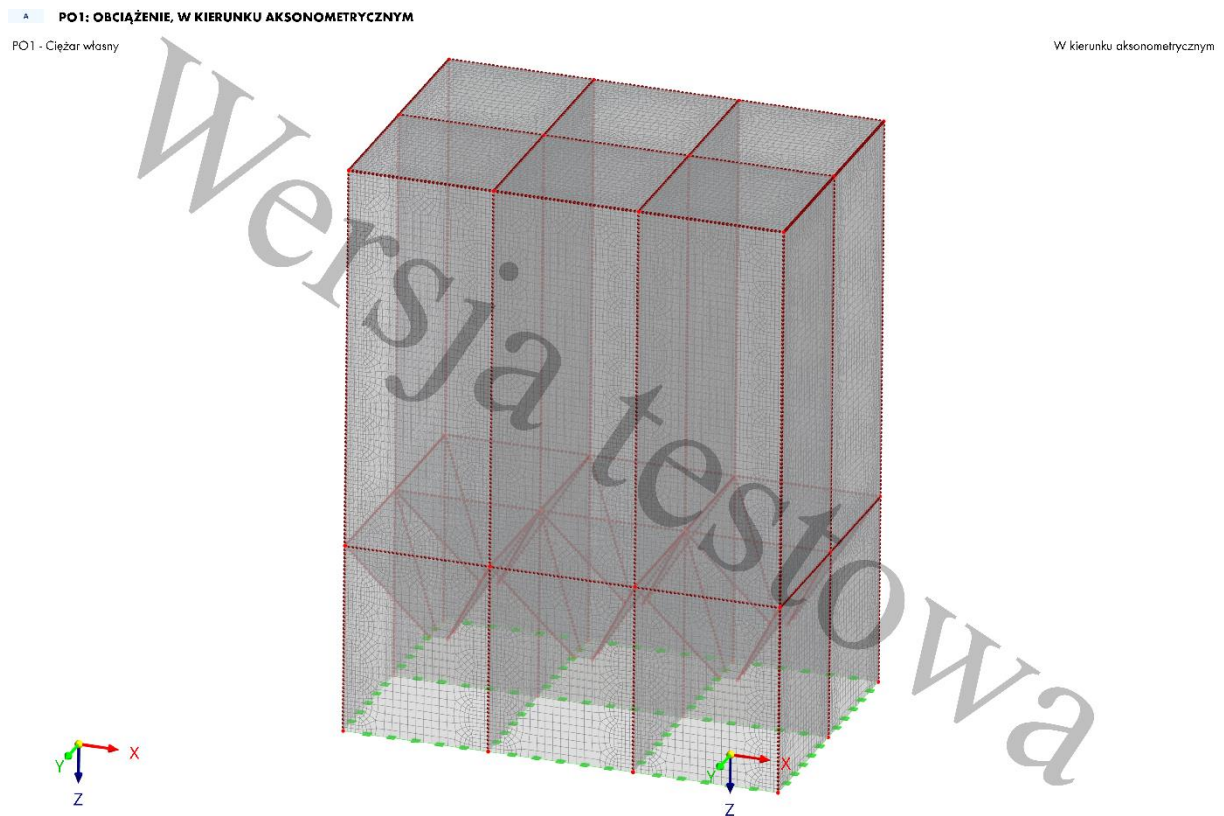
- płyta przekrycia – grubość: 0,35m,
- ściany pionowe oraz ściany leja silosu – trzy warianty grubości: 0,25m, 0,30m oraz 0,35m,
- ściany podpierające – grubość odpowiadająca odpowiedniemu wariantowi grubości ścian pionowych i ścian leja: 0,25m, 0,30m oraz 0,35m.



Rys. 6.1. Model baterii silosów prostokątnych na klinkier cementowy z podziałem na panele

Model numeryczny baterii silosów w całości przygotowano z wykorzystaniem elementów powłokowych, przypisując im grubości odpowiadające analizowanym wariantom konstrukcyjnym. Warunki brzegowe na styku ścian podpierających z fundamentem zdefiniowano jako utwierdzenie sztywne. Płyta przekrycia wraz ze ścianami baterii silosów prostokątnych została połączona w sposób przegubowy. Dodatkowo na krawędziach oparcia płyty przekrycia na ścianach zbiornika uwzględniono pełną swobodę przemieszczeń na wszystkich kierunkach.

Elementy żelbetowe zaprojektowano z betonu klasy C35/45, dla którego moduł sprężystości wynosi $E_{cm} = 34\text{GPa}$. Obciążenie ciężarem własnym konstrukcji zostało wygenerowane automatycznie przez program RFEM na podstawie wprowadzonej geometrii oraz gęstości objętościowej materiału.



Rys. 6.2. Dyskretyzacja konstrukcji baterii silosów – siatka elementów skończonych wygenerowana w programie RFEM

Wzdłuż wszystkich krawędzi ścian, w narożach komór, na stykach powłok oraz w miejscach zmian geometrii wprowadzono lokalne zagęszczenie siatki do wymiaru $0,15 \times 0,15$ m. Krawędzie, w których dokonano lokalnego zagęszczenia siatki, zostały na modelu wyróżnione kolorem czerwonym (rys. 6.2). W środkowych obszarach ścian pionowych oraz elementów leja wygenerowano siatkę o podstawowym wymiarze oczka $0,30 \times 0,30$ m.

6.2. Obciążenia konstrukcji baterii silosu prostopadłościennego

Siły wewnętrzne wywołane parciem materiału sypkiego określono dla fazy statycznej po napełnieniu komory. Efekty oddziaływań termicznych wywołanych wysoką temperaturą składowanego klinkieru cementowego, uwzględniające zarówno wymuszenia równomierne (ogrzewanie/chłodzenie), jak i nierównomierne (gradient temperatury), wprowadzono do programu obliczeniowego na podstawie zestawienia w tabeli 6.1.

W modelu uwzględniono następujące kategorie obciążeń:

- płyta przekrycia,
 - ciężar własny – wygenerowany automatycznie przez program numeryczny,
 - ciężar warstw płyty przekrycia – zgodnie z tabelami 3.1-3.4 przyłożono obciążenia stałe oraz zmienne na płytę przekrycia jako obciążenie powierzchniowe jednorodne,
- komora silosu
 - ciężar własny – wygenerowany automatycznie przez program numeryczny,
 - oddziaływanie materiału sypkiego w fazie po napełnieniu:
 - * parcie poziome wraz z parciem lokalnym na całej wysokości napełnienia komór baterii silosów oraz parcie styczne na ściany komór, jako obciążenie powierzchniowe zmienne po wysokości,
 - * parcie poziome w przypadku częściowego napełnienia komór baterii silosów oraz parcie styczne na ściany komór, jako obciążenie powierzchniowe zmienne po wysokości,
 - * parcie poziome oraz parcie styczne przyłożone na ściany leja, jako obciążenie powierzchniowe zmienne po wysokości,
 - efekty oddziaływania temperatury – obciążenie powierzchniowe termiczne,
- ścianki podpierające
 - ciężar własny – wygenerowany automatycznie przez program numeryczny.

Oznaczenia przypadków obciążenia zastosowane w rozdziale 6 przyjęto zgodnie z tabelą 2.4, w której zestawiono warianty testów obliczeniowych dla analizowanej baterii silosów.

Tabela 6.1. Zestawienie wartości temperatur na powierzchni ścian zadanych w programie numerycznym

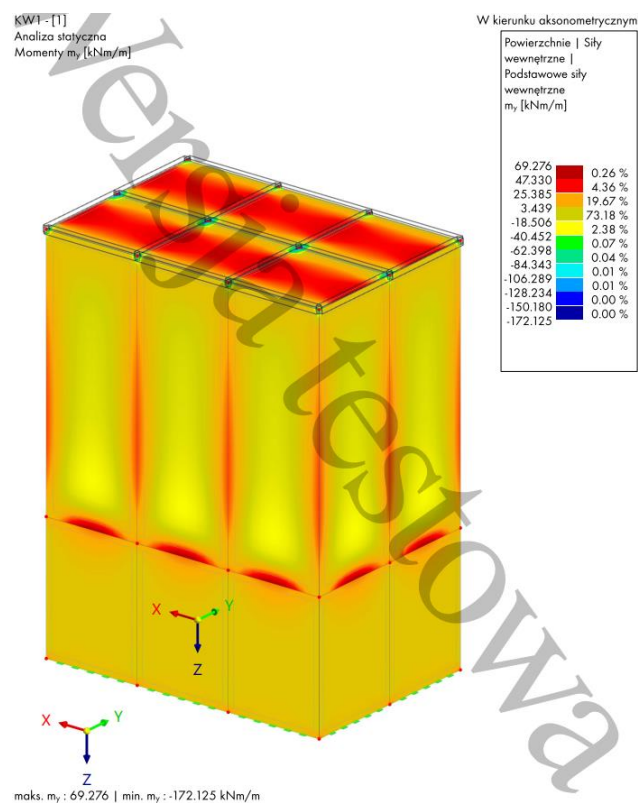
Temperatura klinkieru cementowego	Średnia temperatura w osi ściany $T [^{\circ}\text{C}]$	Temperatura początkowa $T_0 [^{\circ}\text{C}]$	Temperatura ogrzania/oziębienia ściany $\Delta T_u [^{\circ}\text{C}]$	$\Delta T [^{\circ}\text{C}]$
Dla $t = 0,25\text{m}$				
Warunki zimowe				
$T_{in} = 80^{\circ}\text{C bwt}$	7,83	8,00	-0,17	52,15
$T_{in} = 80^{\circ}\text{C zwt}$	-24,19	8,00	-32,19	10,74
$T_{in} = 100^{\circ}\text{C bwt}$	15,00	8,00	7,00	61,42
$T_{in} = 100^{\circ}\text{C zwt}$	-22,72	8,00	-30,72	12,66
Warunki letnie				
$T_{in} = 80^{\circ}\text{C bwt}$	51,34	8,00	43,35	20,71
$T_{in} = 80^{\circ}\text{C zwt}$	38,63	8,00	30,63	4,26
$T_{in} = 100^{\circ}\text{C bwt}$	58,51	8,00	50,51	29,98
$T_{in} = 100^{\circ}\text{C zwt}$	40,09	8,00	32,09	6,17
Dla $t = 0,30\text{m}$				
Warunki zimowe				
$T_{in} = 80^{\circ}\text{C bwt}$	9,19	8,00	1,19	57,26
$T_{in} = 80^{\circ}\text{C zwt}$	-23,28	8,00	-31,28	12,65
$T_{in} = 100^{\circ}\text{C bwt}$	16,59	8,00	8,59	67,45
$T_{in} = 100^{\circ}\text{C zwt}$	-21,66	8,00	-29,66	14,90
Warunki letnie				
$T_{in} = 80^{\circ}\text{C bwt}$	51,88	8,00	43,88	22,73
$T_{in} = 80^{\circ}\text{C zwt}$	38,99	8,00	30,99	5,02
$T_{in} = 100^{\circ}\text{C bwt}$	59,29	8,00	51,29	32,92
$T_{in} = 100^{\circ}\text{C zwt}$	40,62	8,00	32,62	7,27
Dla $t = 0,35\text{m}$				
Warunki zimowe				
$T_{in} = 80^{\circ}\text{C bwt}$	10,33	8,00	2,33	61,58
$T_{in} = 80^{\circ}\text{C zwt}$	-22,42	8,00	-30,42	14,47
$T_{in} = 100^{\circ}\text{C bwt}$	17,94	8,00	9,94	72,53
$T_{in} = 100^{\circ}\text{C zwt}$	-20,64	8,00	-28,64	17,06
Warunki letnie				
$T_{in} = 80^{\circ}\text{C bwt}$	52,34	8,00	44,34	24,45
$T_{in} = 80^{\circ}\text{C zwt}$	39,34	8,00	31,34	5,75
$T_{in} = 100^{\circ}\text{C bwt}$	59,94	8,00	51,94	35,40
$T_{in} = 100^{\circ}\text{C zwt}$	41,11	8,00	33,11	8,32
Dla $t = 0,30\text{m}$ w przypadku częściowego zapełnienia komór silosu				
Warunki zimowe				
$T_{in} = 50,40^{\circ}\text{C bwt}$	-1,77	8,00	-9,77	42,18
$T_{in} = 63,00^{\circ}\text{C bwt}$	2,90	8,00	-5,10	48,60
Warunki letnie				
$T_{in} = 50,40^{\circ}\text{C bwt}$	40,93	8,00	32,93	7,66
$T_{in} = 63,00^{\circ}\text{C bwt}$	45,59	8,00	37,59	14,08

Dla ścian wewnętrznych o grubości $t = 0,30\text{m}$				
Warunki zimowe oraz letnie				
80°C – 50,40°C bwt	65,20	8,00	57,20	11,97
80°C – 50,40°C zwt	54,26	8,00	46,26	3,15
100°C – 63,00°C bwt	81,50	8,00	73,50	14,96
100°C – 63,00°C zwt	67,82	8,00	59,82	3,94

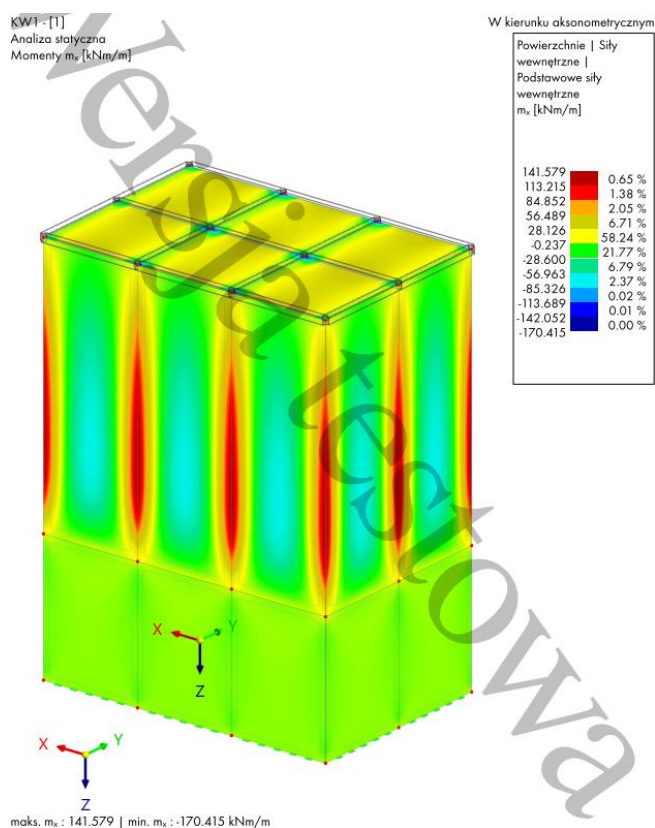
Objaśnienie skrótów w tabeli: bwt – bez warstwy tłumiącej, zwt – z warstwą tłumiącą.

6.3. Wyniki obliczeń statycznych

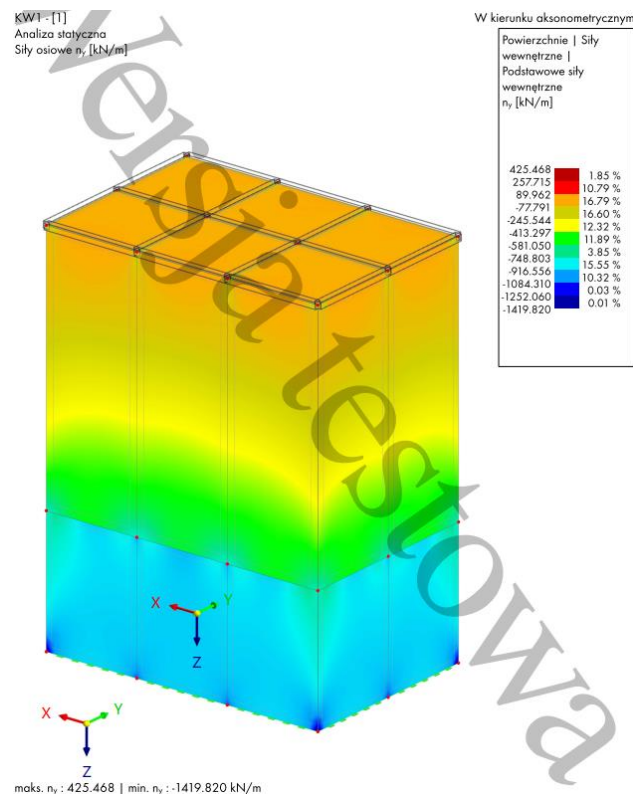
W celu uzyskania wartości ekstremalnych sił wewnętrznych, przeprowadzono analizę kombinacji obciążeń, w której uwzględniono ciężar własny konstrukcji, statyczne parcie klinkieru cementowego oraz technologiczne oddziaływania termiczne. Na podstawie przyjętego zestawienia wariantów testów obliczeniowych wykonano łącznie 40 testów numerycznych. Dla pełnego napełnienia komór przeanalizowano 30 wariantów, obejmujących trzy grubości ścian, dwie temperatury klinkieru cementowego oraz przypadki statyczne i termiczne dla warunków zimowych i letnich. Dodatkowo dla grubości ściany $t = 0,30\text{m}$ wykonano 10 wariantów dotyczących napełnienia komór w układzie szachownicowym. Numerację przypadków obciążenia przyjęto zgodnie z tabelą 2.4. Wyselekcjonowane mapy rozkładu sił wewnętrznych, wygenerowane w programie RFEM zestawiono na rysunkach 6.3 – 6.42. Mapy pozostałych kombinacji zostały zamieszczone w Załącznikach 1,2 oraz 3.



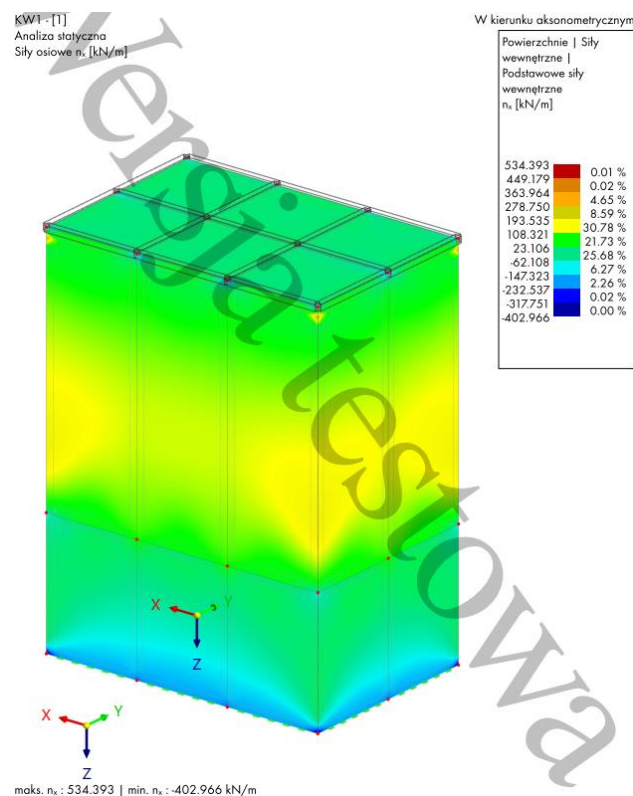
Rys. 6.3. Mapa momentów zginających pionowych M_N baterii silosów prostokątnych o grubości ściany $t = 0,25$ m na klinkier cementowy dla przypadku (1)



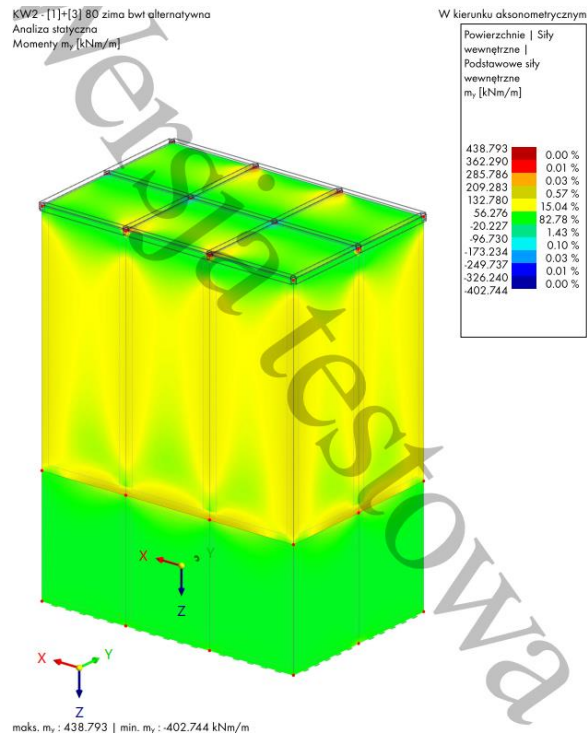
Rys. 6.4. Mapa momentów zginających poziomych M_R baterii silosów prostokątnych o grubości ściany $t = 0,25$ m na klinkier cementowy dla przypadku (1)



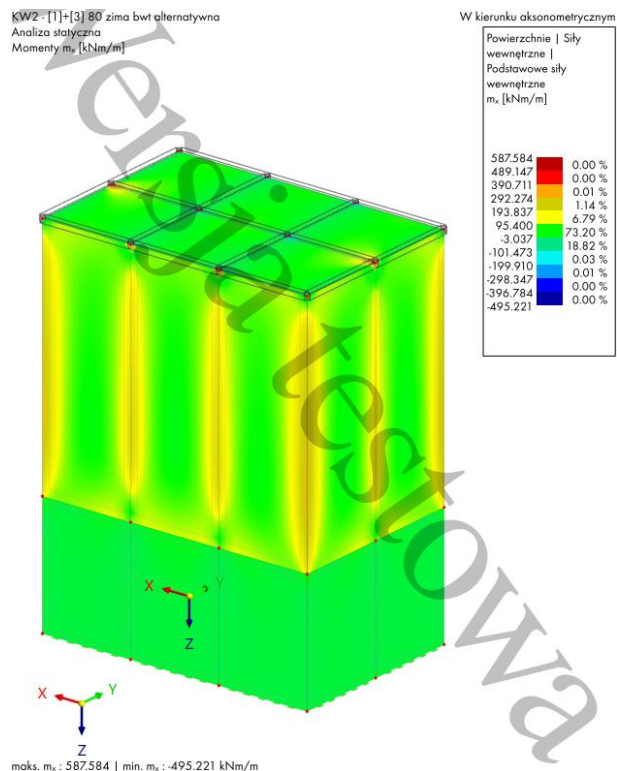
Rys. 6.5. Mapa sił podłużnych pionowych N baterii silosów prostokątnych o grubości ściany $t = 0,25$ m na klinkier cementowy dla przypadku (1)



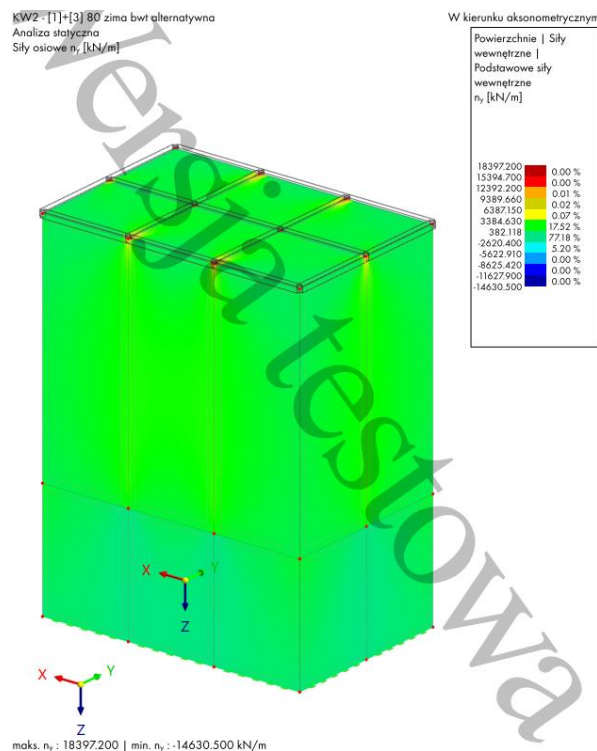
Rys. 6.6. Mapa sił podłużnych poziomych R baterii silosów prostokątnych o grubości ściany $t = 0,25$ m na klinkier cementowy dla przypadku (1)



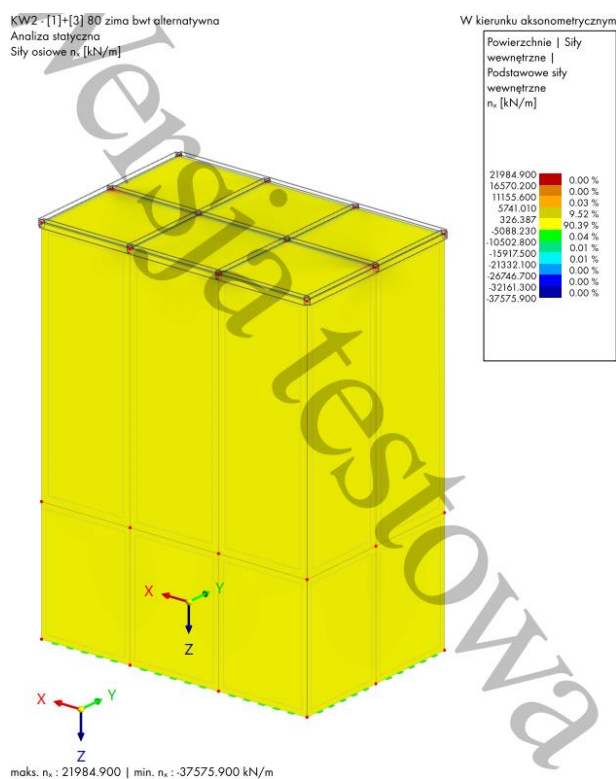
Rys. 6.7. Mapa momentów zginających pionowych M_N baterii silosów prostokątnych o grubości ściany $t = 0,25$ m na klinkier cementowy o temperaturze $T=80^\circ\text{C}$ dla przypadku (1) + (3) dla warunków zimowych



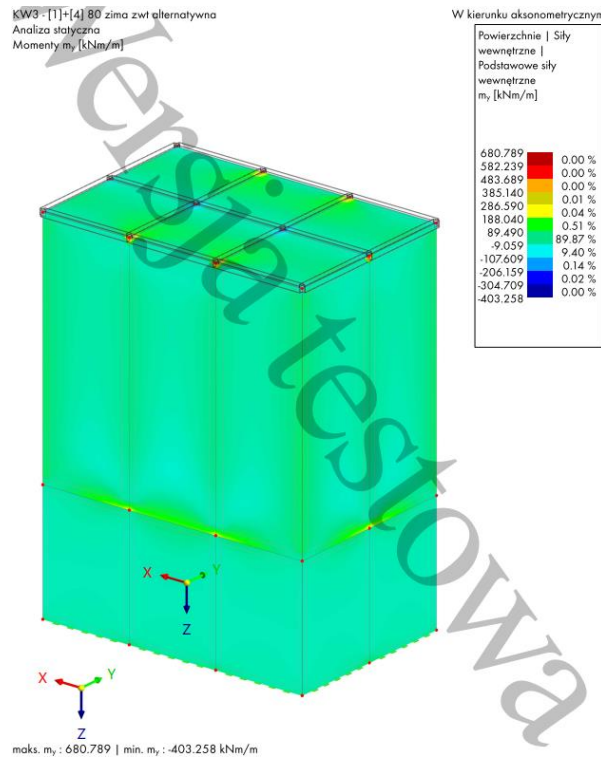
Rys. 6.8. Mapa momentów zginających poziomych M_R baterii silosów prostokątnych o grubości ściany $t = 0,25$ m na klinkier cementowy o temperaturze $T=80^\circ\text{C}$ dla przypadku (1) + (3) dla warunków zimowych



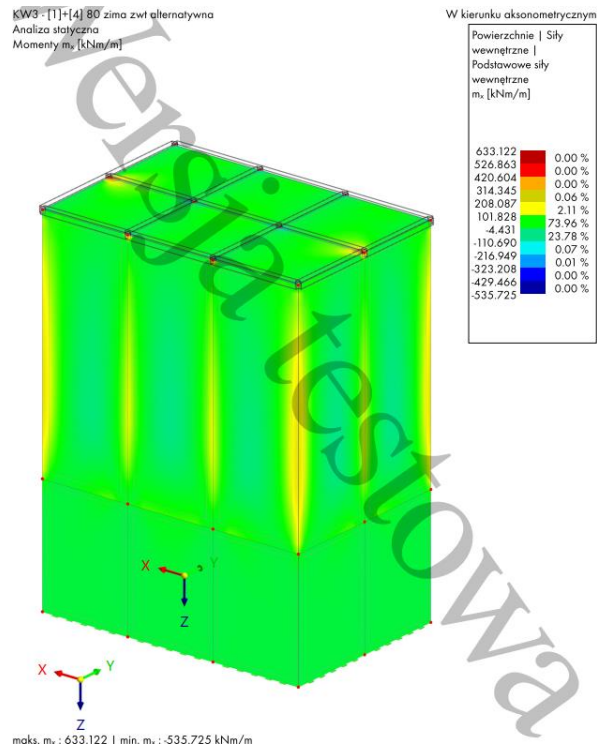
Rys. 6.9. Mapa sił podłużnych pionowych N baterii silosów prostopadłościennych o grubości ściany $t = 0,25$ m na klinkier cementowy o temperaturze $T=80^{\circ}\text{C}$ dla przypadku (1) + (3) dla warunków zimowych



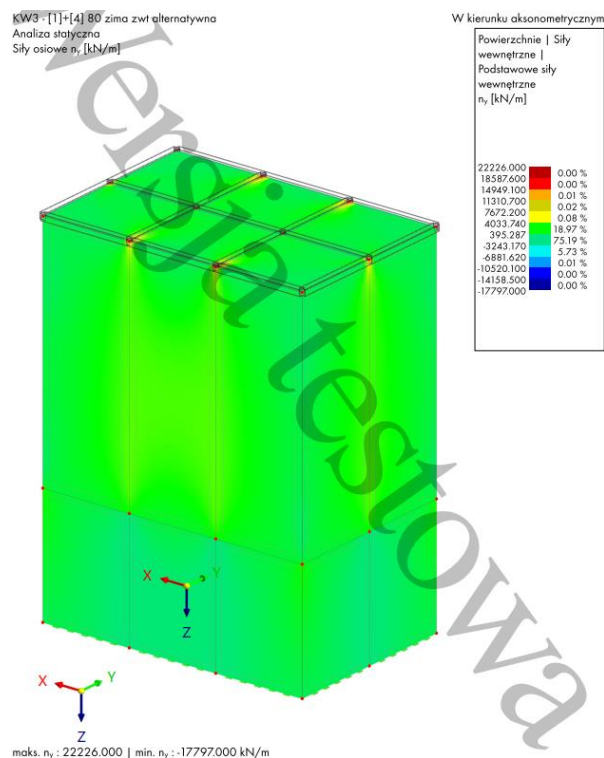
Rys. 6.10. Mapa sił podłużnych poziomych R baterii silosów prostopadłościennych o grubości ściany $t = 0,25$ m na klinkier cementowy o temperaturze $T=80^{\circ}\text{C}$ dla przypadku (1) + (3) dla warunków zimowych



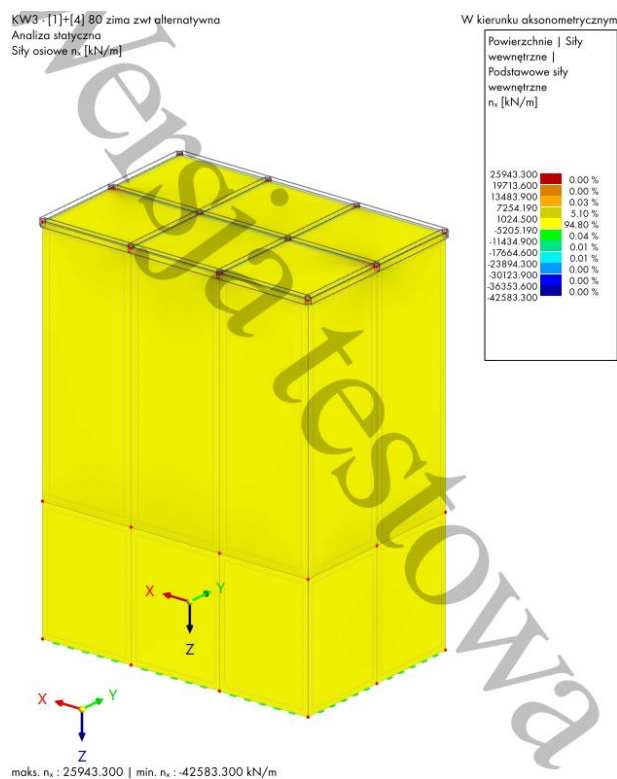
Rys. 6.11. Mapa momentów zginających pionowych M_N baterii silosów prostokątnych o grubości ściany $t = 0,25$ m na klinkier cementowy o temperaturze $T=80^\circ\text{C}$ dla przypadku (1) + (4) dla warunków zimowych



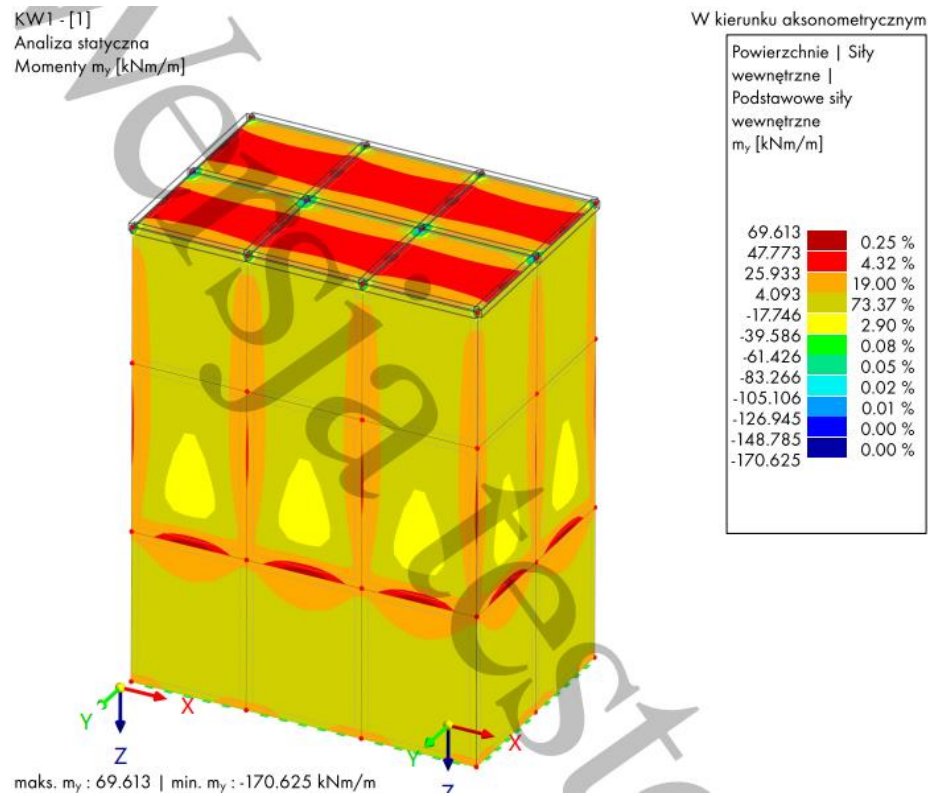
Rys. 6.12. Mapa momentów zginających poziomych M_R baterii silosów prostokątnych o grubości ściany $t = 0,25$ m na klinkier cementowy o temperaturze $T=80^\circ\text{C}$ dla przypadku (1) + (4) dla warunków zimowych



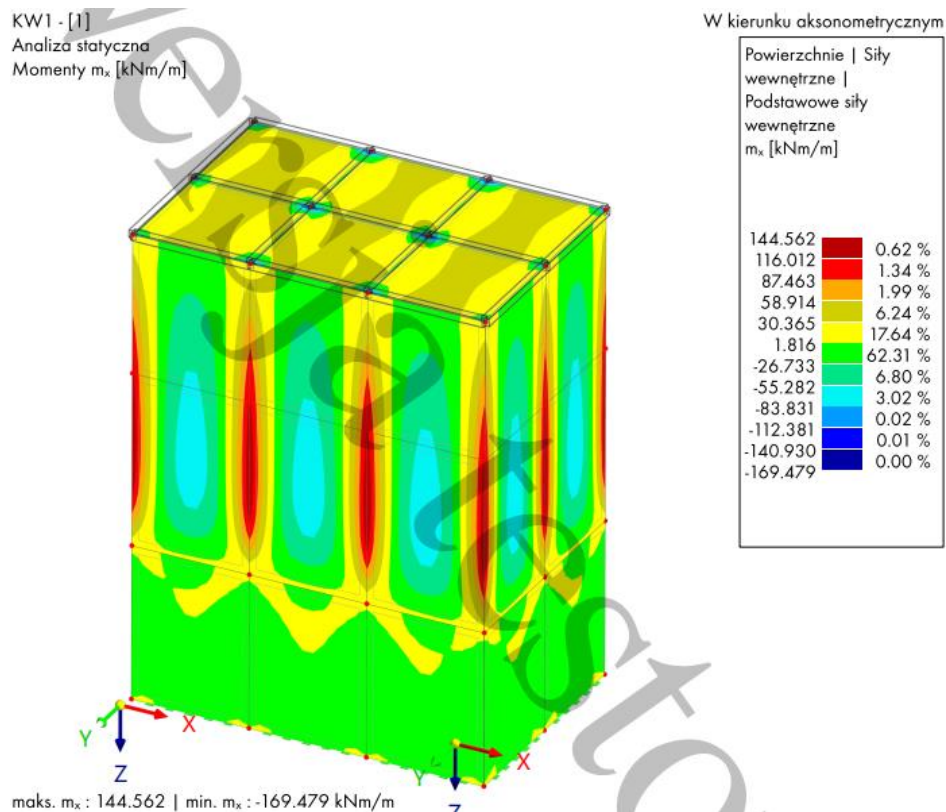
Rys. 6.13. Mapa sił podłużnych pionowych N baterii silosów prostokątnych o grubości ściany $t = 0,25$ m na klinkier cementowy o temperaturze $T=80^{\circ}\text{C}$ dla przypadku (1) + (4) dla warunków zimowych



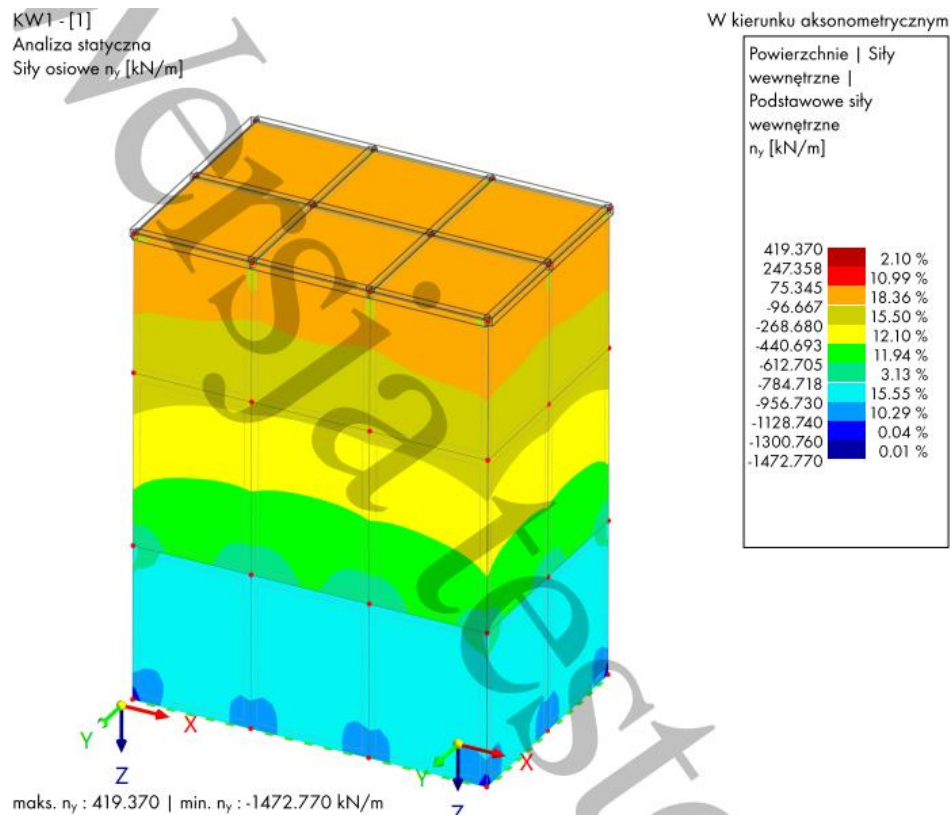
Rys. 6.14. Mapa sił podłużnych poziomych R baterii silosów prostokątnych o grubości ściany $t = 0,25$ m na klinkier cementowy o temperaturze $T=80^{\circ}\text{C}$ dla przypadku (1) + (4) dla warunków zimowych



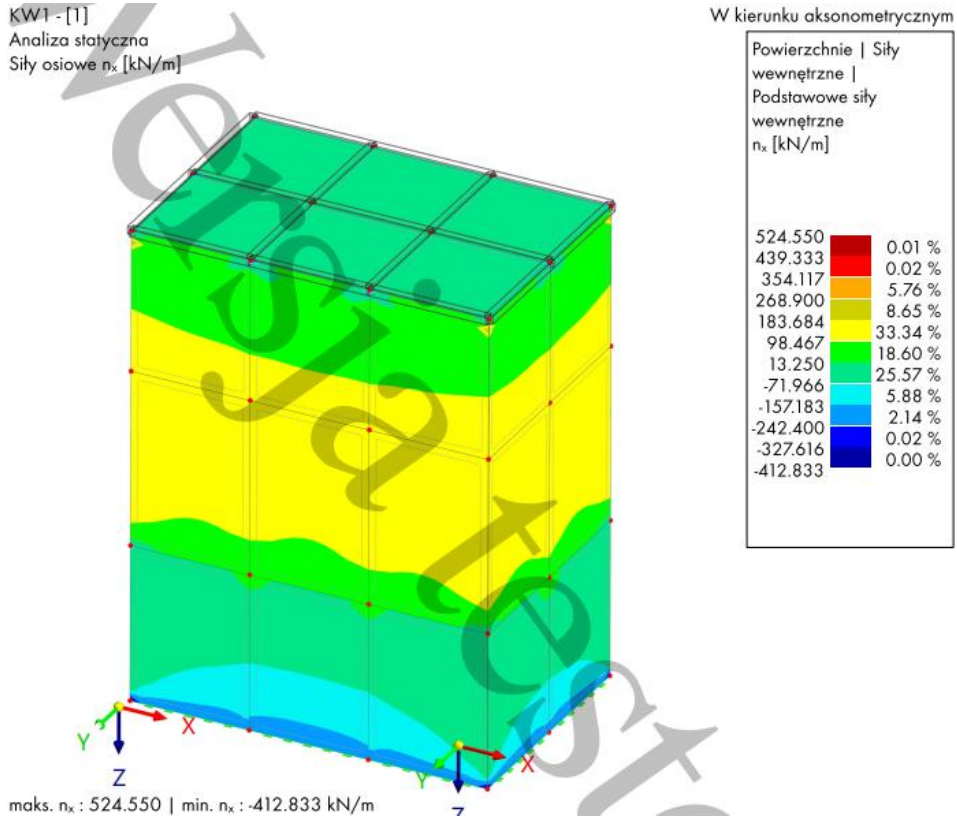
Rys. 6.15. Mapa momentów zginających pionowych M_N baterii silosów prostokątnych o grubości ściany $t = 0,30$ m na klinkier cementowy dla przypadku (1)



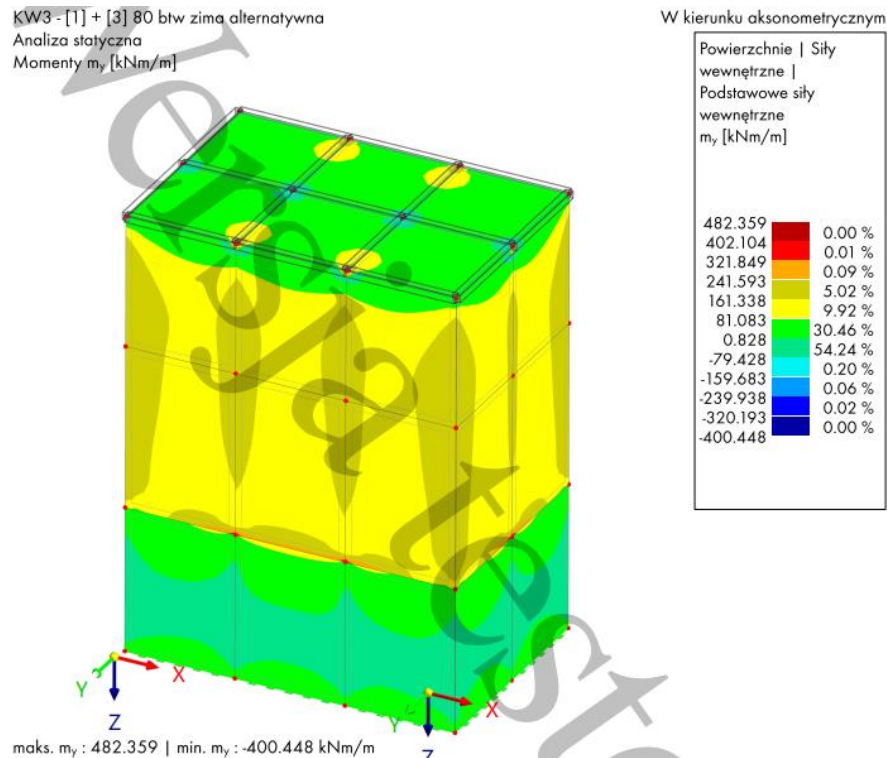
Rys. 6.16. Mapa momentów zginających poziomych M_R baterii silosów prostokątnych o grubości ściany $t = 0,30$ m na klinkier cementowy dla przypadku (1)



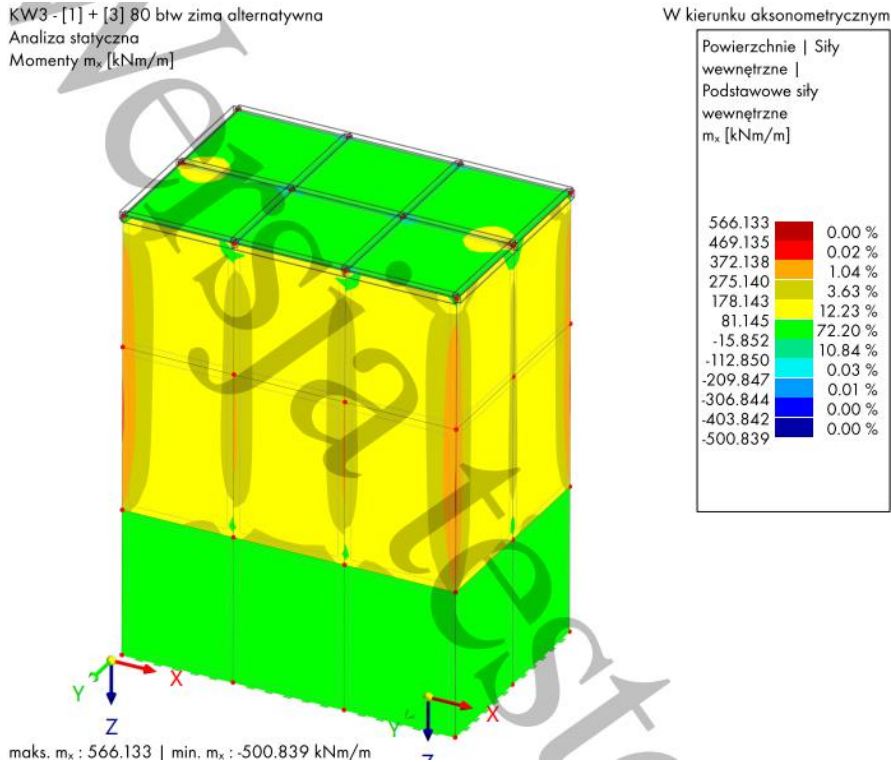
Rys. 6.17. Mapa sił podłużnych pionowych N baterii silosów prostokątnych o grubości ściany $t = 0,30$ m na klinkier cementowy o temperaturze dla przypadku (1)



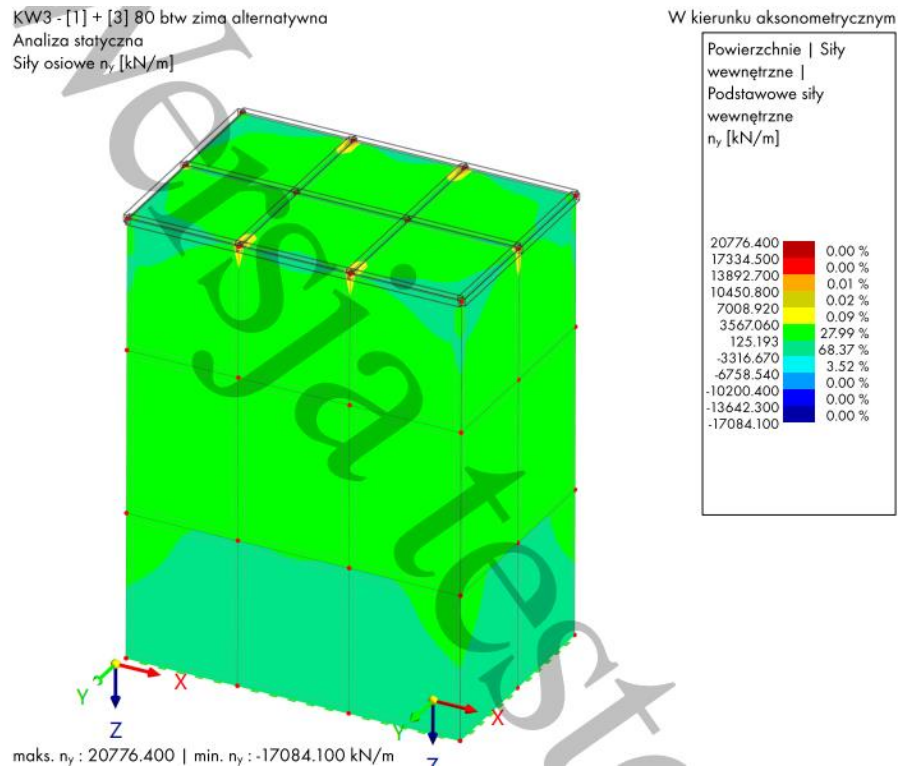
Rys. 6.18. Mapa sił podłużnych poziomych R baterii silosów prostokątnych o grubości ściany $t = 0,30$ m na klinkier cementowy o temperaturze dla przypadku (1)



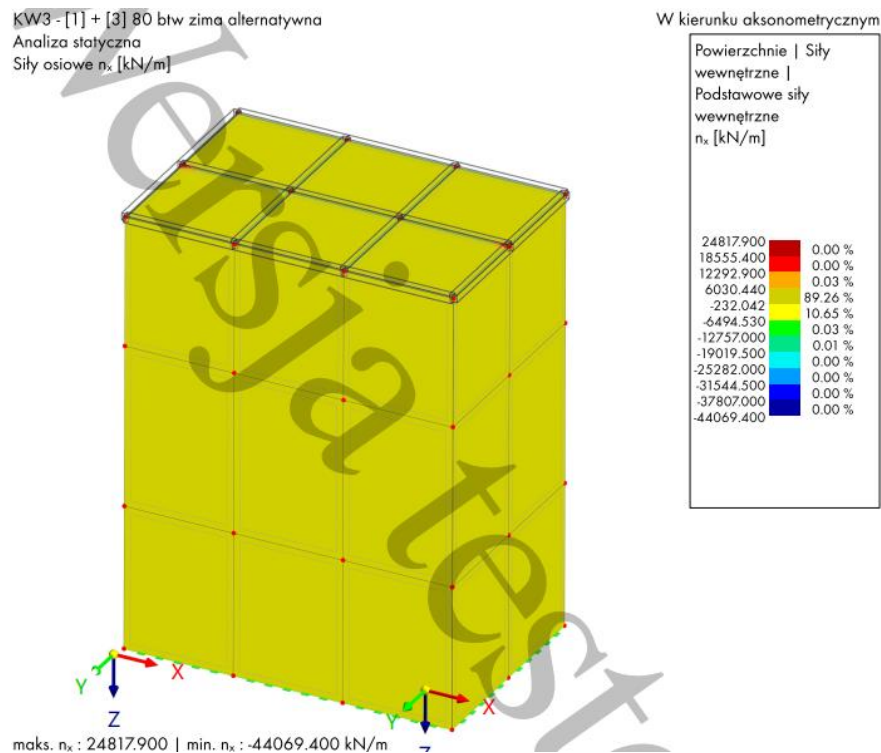
Rys. 6.19. Mapa momentów zginających pionowych M_N baterii silosów prostokątnych o grubości ściany $t = 0,30$ m na klinkier cementowy o temperaturze $T=80^\circ\text{C}$ dla przypadku (1) + (3) dla warunków zimowych



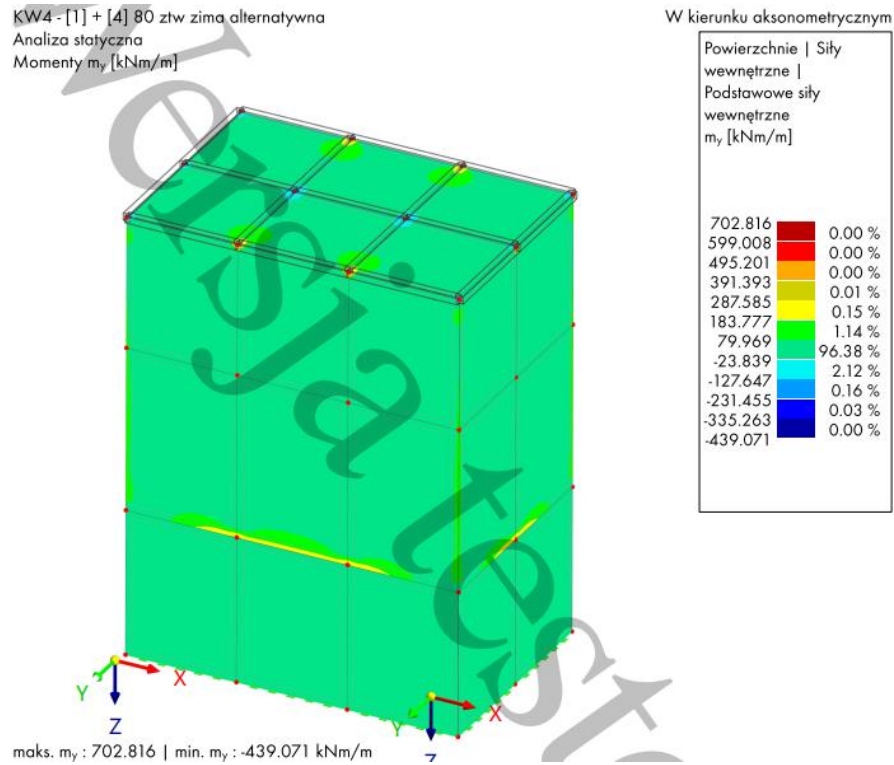
Rys. 6.20. Mapa momentów zginających poziomych M_R baterii silosów prostokątnych o grubości ściany $t = 0,30$ m na klinkier cementowy o temperaturze $T=80^\circ\text{C}$ dla przypadku (1) + (3) dla warunków zimowych



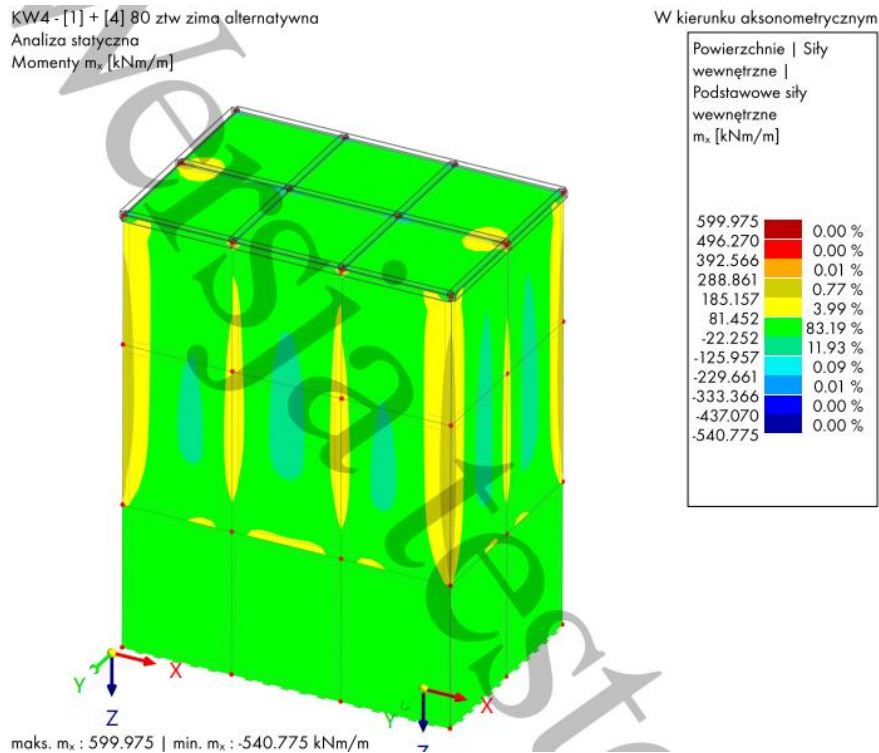
Rys. 6.21. Mapa sił podłużnych pionowych N baterii silosów prostopadłościennych o grubości ściany $t = 0,30$ m na klinkier cementowy o temperaturze $T=80^{\circ}\text{C}$ dla przypadku (1) + (3) dla warunków zimowych



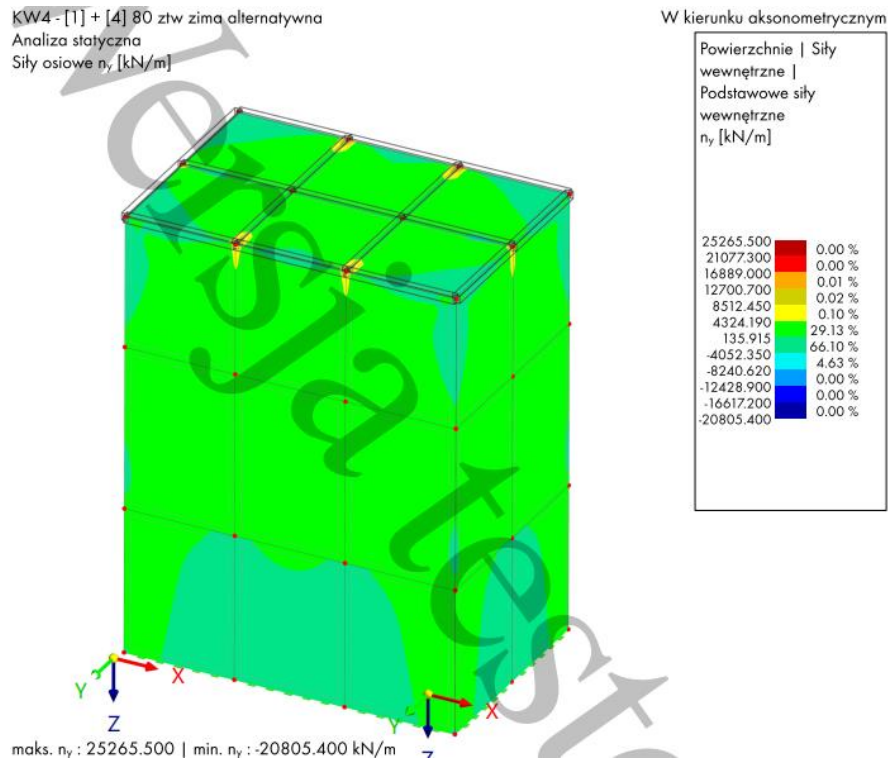
Rys. 6.22. Mapa sił podłużnych poziomych R baterii silosów prostopadłościennych o grubości ściany $t = 0,30$ m na klinkier cementowy o temperaturze $T=80^{\circ}\text{C}$ dla przypadku (1) + (3) dla warunków zimowych



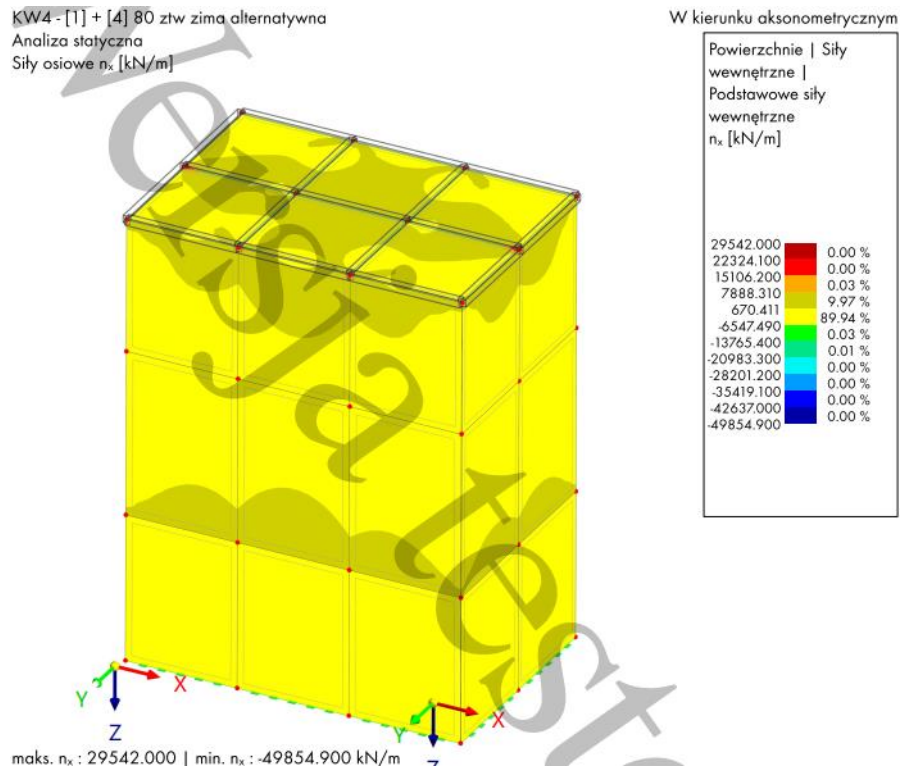
Rys. 6.23. Mapa momentów zginających pionowych M_N baterii silosów prostokątnych o grubości ściany $t = 0,30$ m na klinkier cementowy o temperaturze $T=80^\circ\text{C}$ dla przypadku (1) + (4) dla warunków zimowych



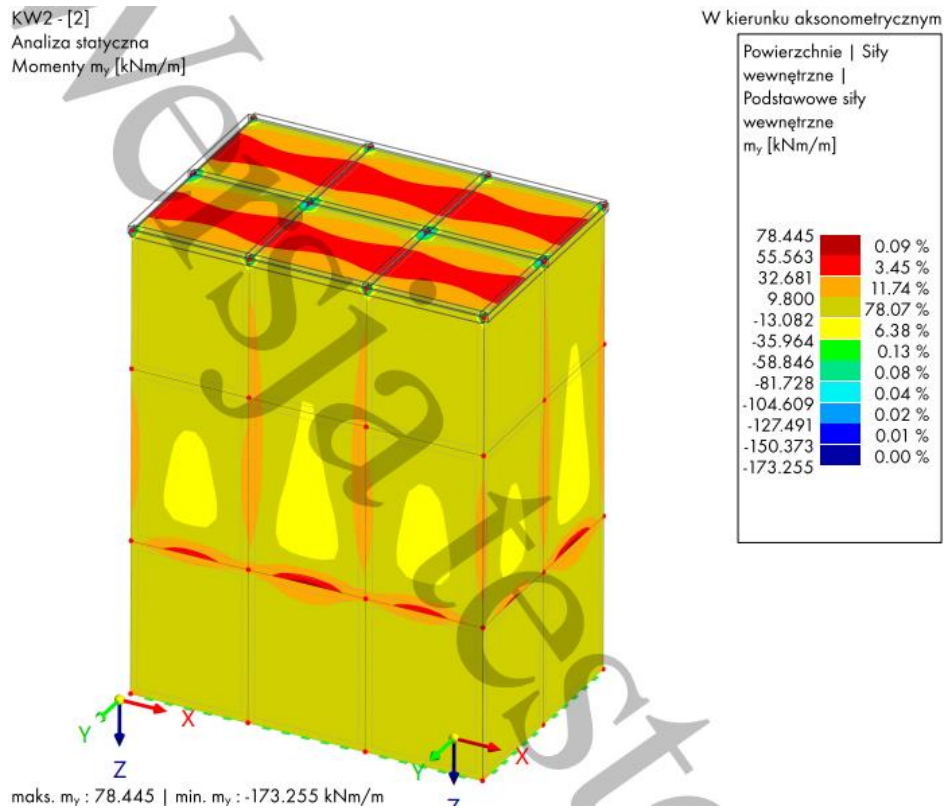
Rys. 6.24. Mapa momentów zginających poziomych M_R baterii silosów prostokątnych o grubości ściany $t = 0,30$ m na klinkier cementowy o temperaturze $T=80^\circ\text{C}$ dla przypadku (1) + (4) dla warunków zimowych



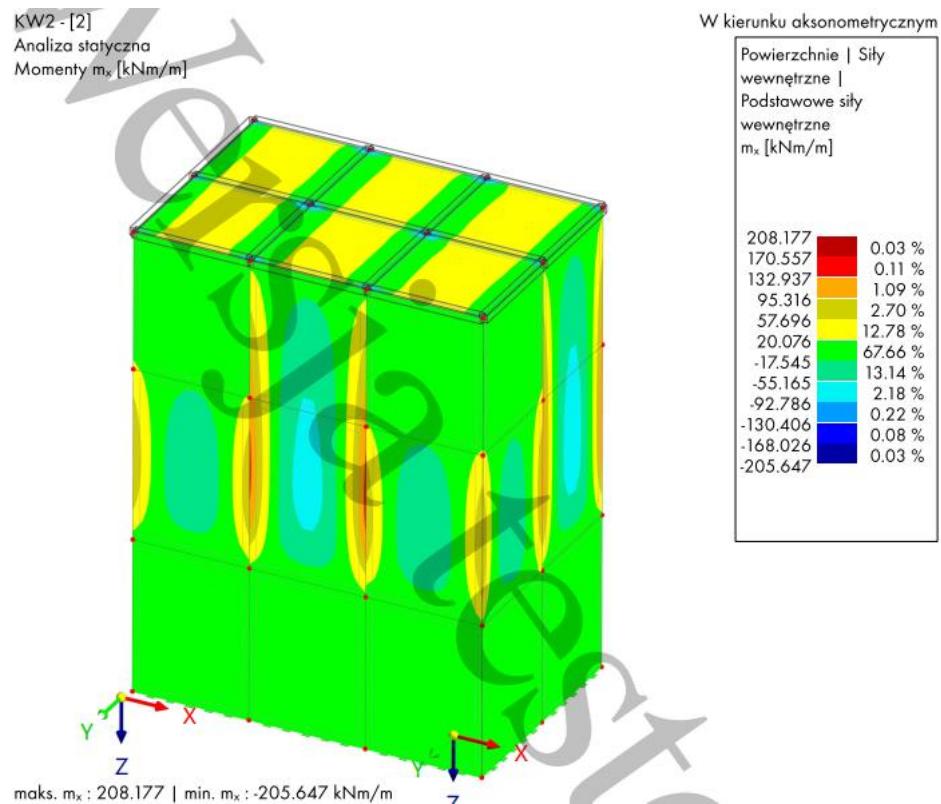
Rys. 6.25. Mapa sił podłużnych pionowych N baterii silosów prostopadłościennych o grubości ściany $t = 0,30$ m na klinkier cementowy o temperaturze $T=80^{\circ}\text{C}$ dla przypadku (1) + (4) dla warunków zimowych



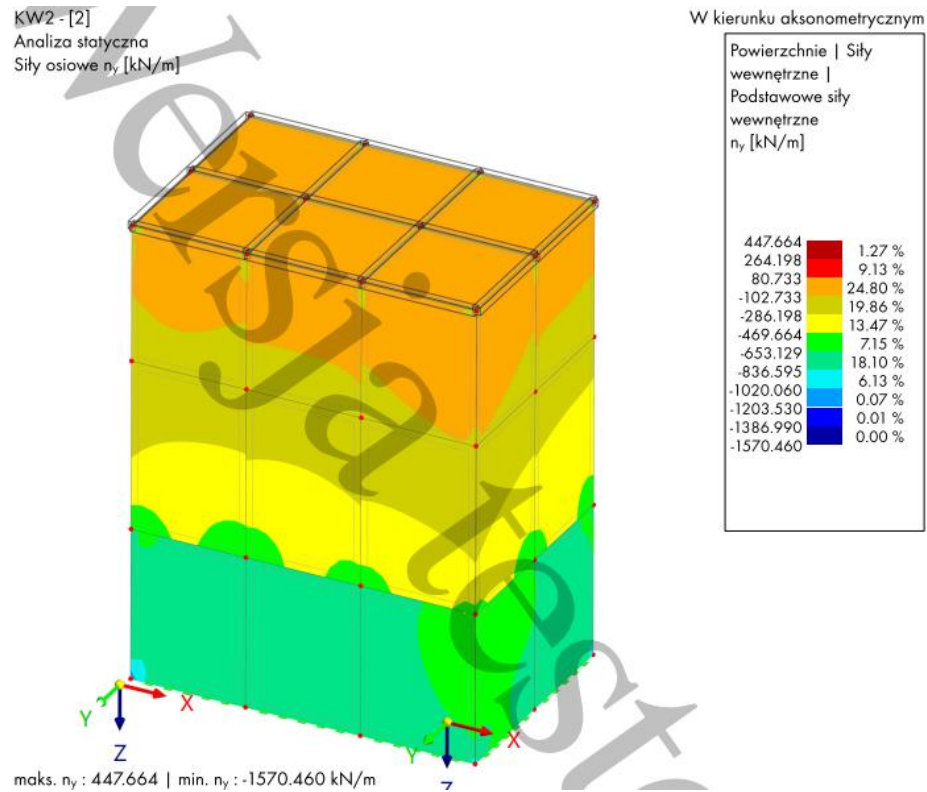
Rys. 6.26. Mapa sił podłużnych poziomych R baterii silosów prostopadłościennych o grubości ściany $t = 0,30$ m na klinkier cementowy o temperaturze $T=80^{\circ}\text{C}$ dla przypadku (1) + (4) dla warunków zimowych



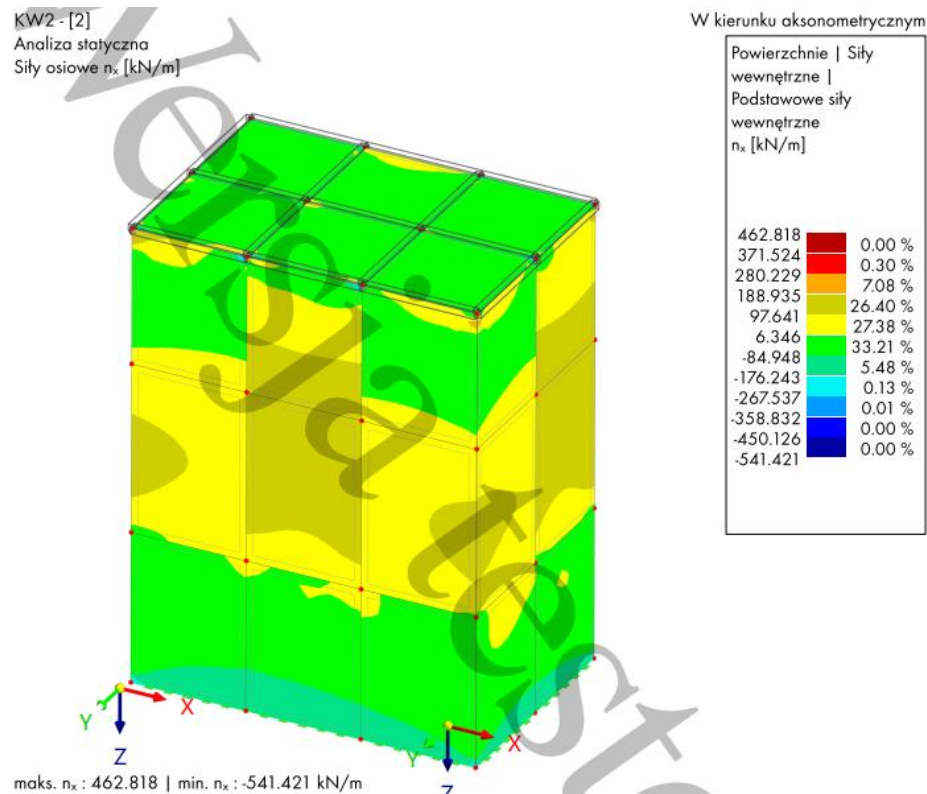
Rys. 6.27. Mapa momentów zginających pionowych M_N baterii silosów prostokątnych o grubości ściany $t = 0,30$ m na klinkier cementowy dla przypadku (2)



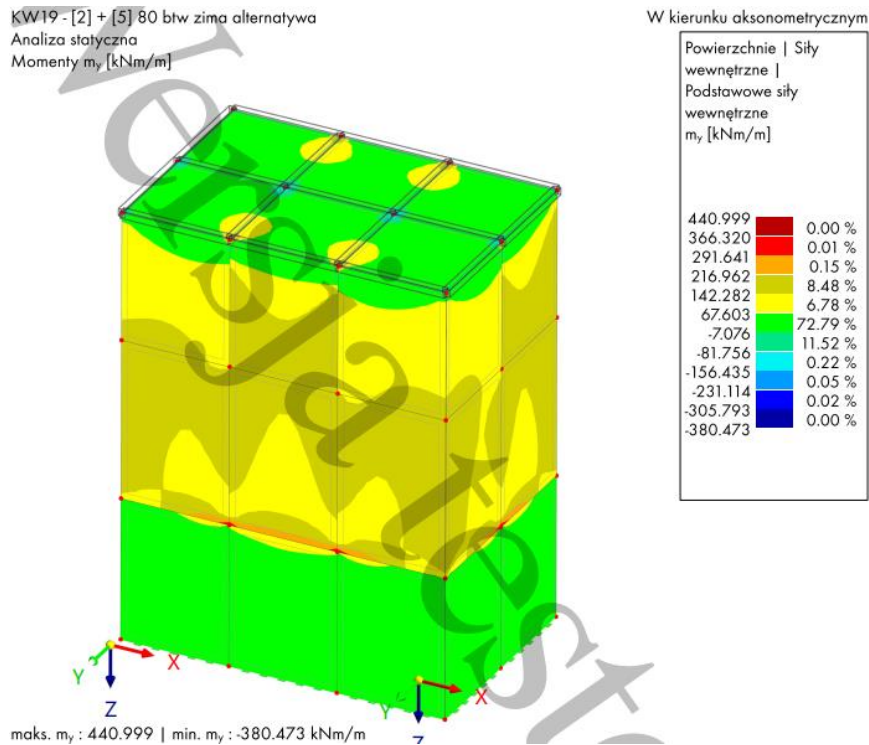
Rys. 6.28. Mapa momentów zginających poziomych M_R baterii silosów prostokątnych o grubości ściany $t = 0,30$ m na klinkier cementowy dla przypadku (2)



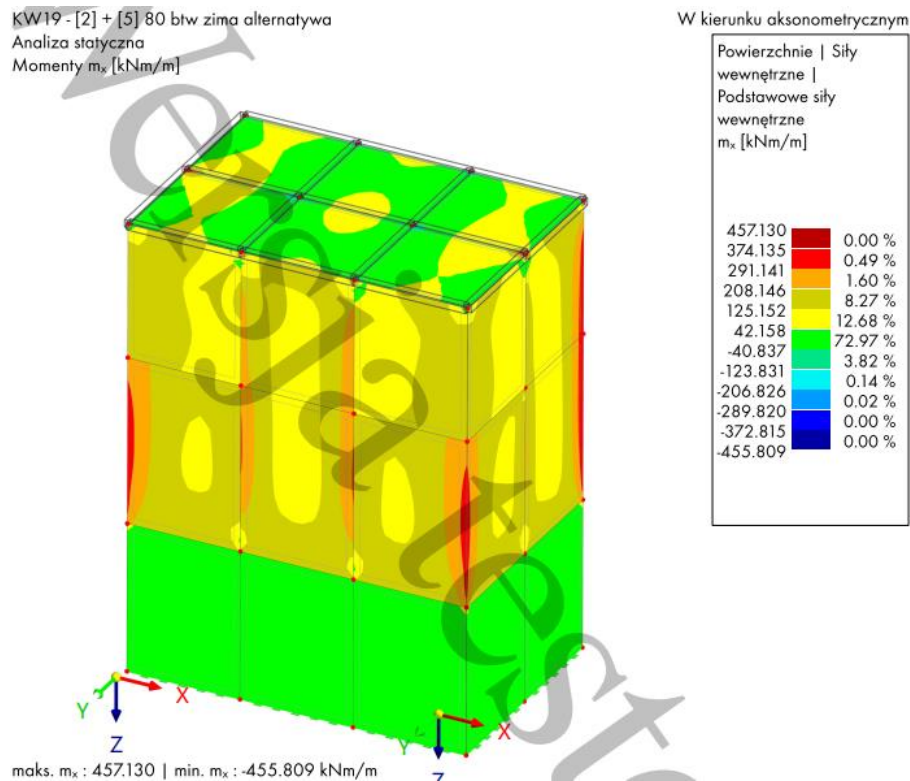
Rys. 6.29. Mapa sił podłużnych pionowych N baterii silosów prostokątnych o grubości ściany $t = 0,30$ m na klinkier cementowy dla przypadku (2)



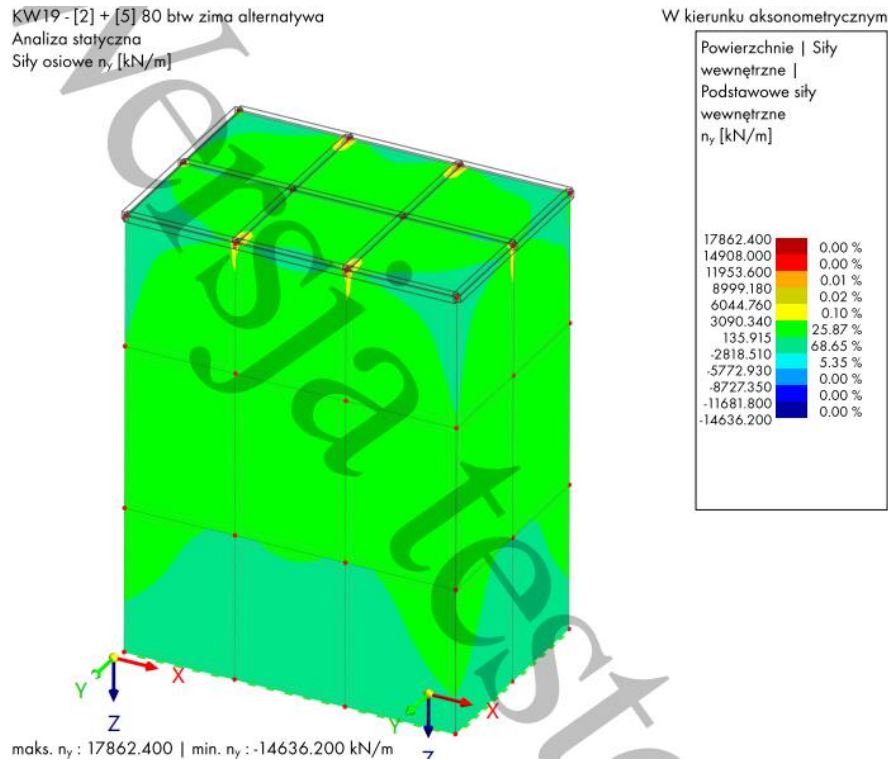
Rys. 6.30. Mapa sił podłużnych poziomych R baterii silosów prostokątnych o grubości ściany $t = 0,30$ m na klinkier cementowy dla przypadku (2)



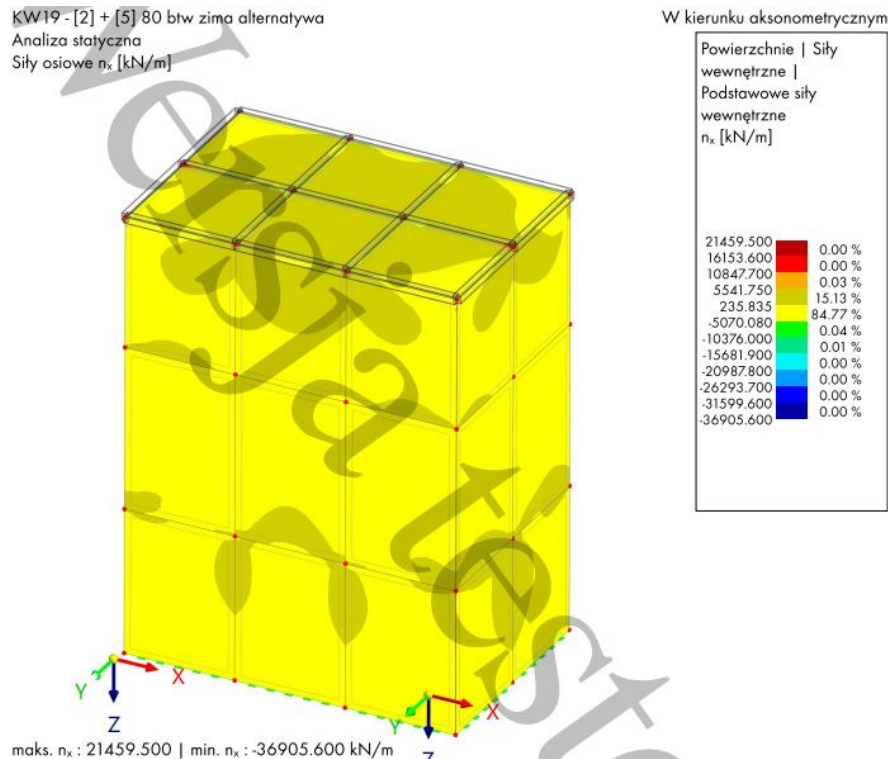
Rys. 6.31. Mapa momentów zginających pionowych M_N baterii silosów prostokątnych o grubości ściany $t = 0,30$ m na klinkier cementowy o temperaturze $T=80^\circ\text{C}$ dla przypadku (2) + (5) dla warunków zimowych



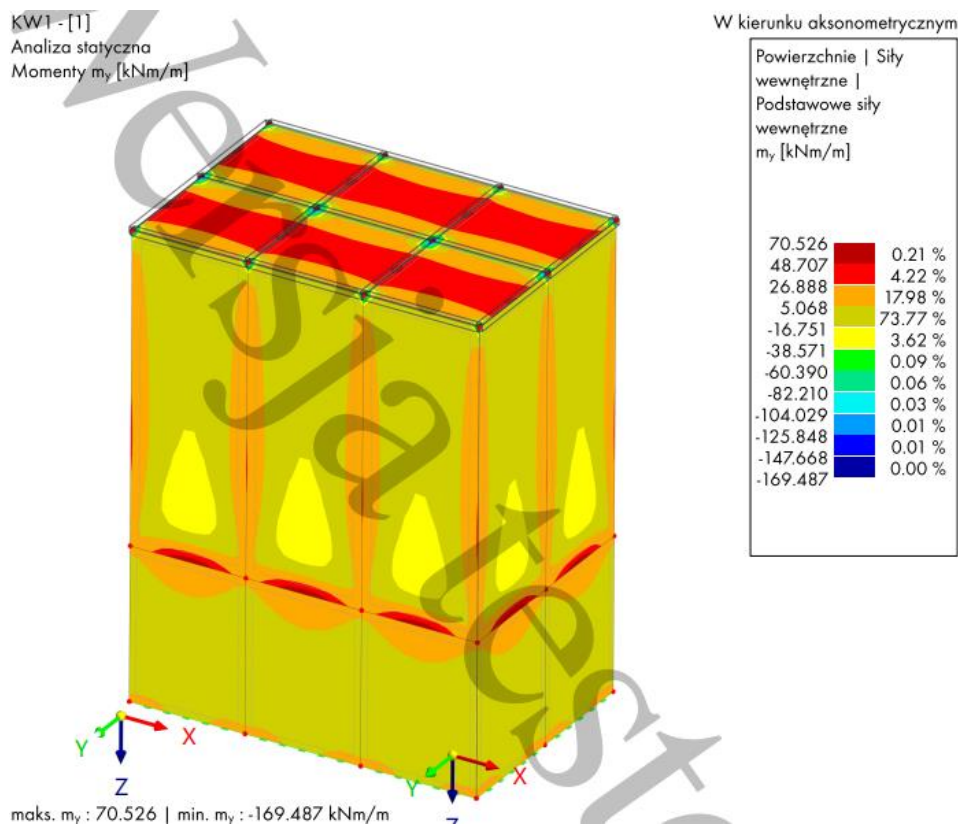
Rys. 6.32. Mapa momentów zginających poziomych M_R baterii silosów prostokątnych o grubości ściany $t = 0,30$ m na klinkier cementowy o temperaturze $T=80^\circ\text{C}$ dla przypadku (2) + (5) dla warunków zimowych



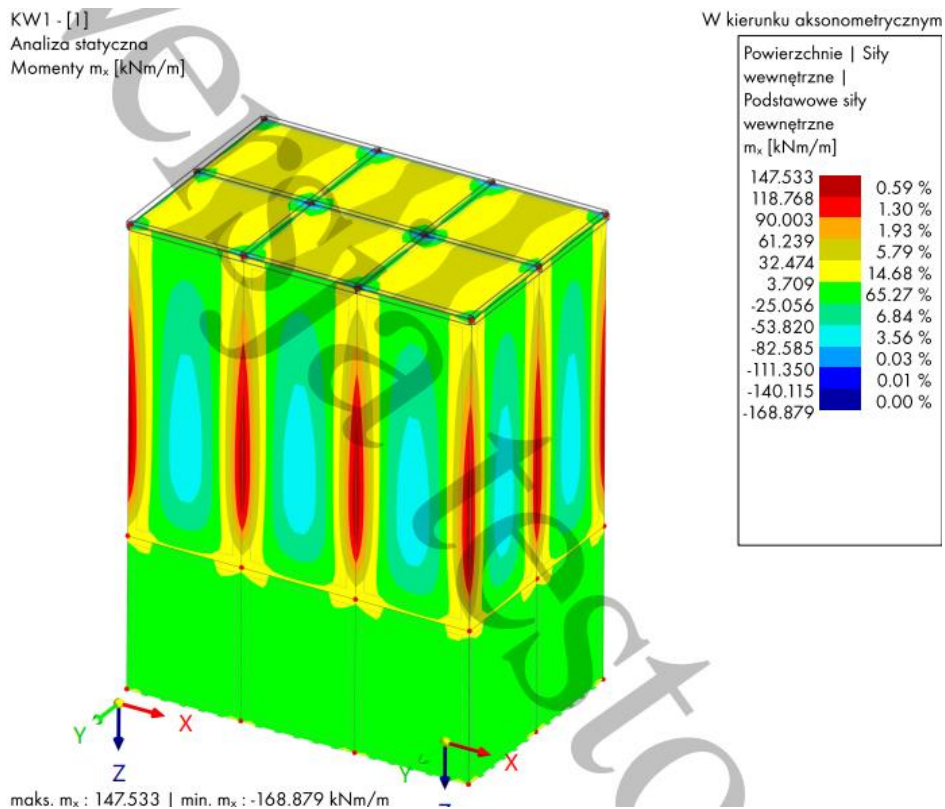
Rys. 6.33. Mapa sił podłużnych pionowych N baterii silosów prostokątnych o grubości ściany $t = 0,30$ m na klinkier cementowy o temperaturze $T=80^{\circ}\text{C}$ dla przypadku (2) + (5) dla warunków zimowych



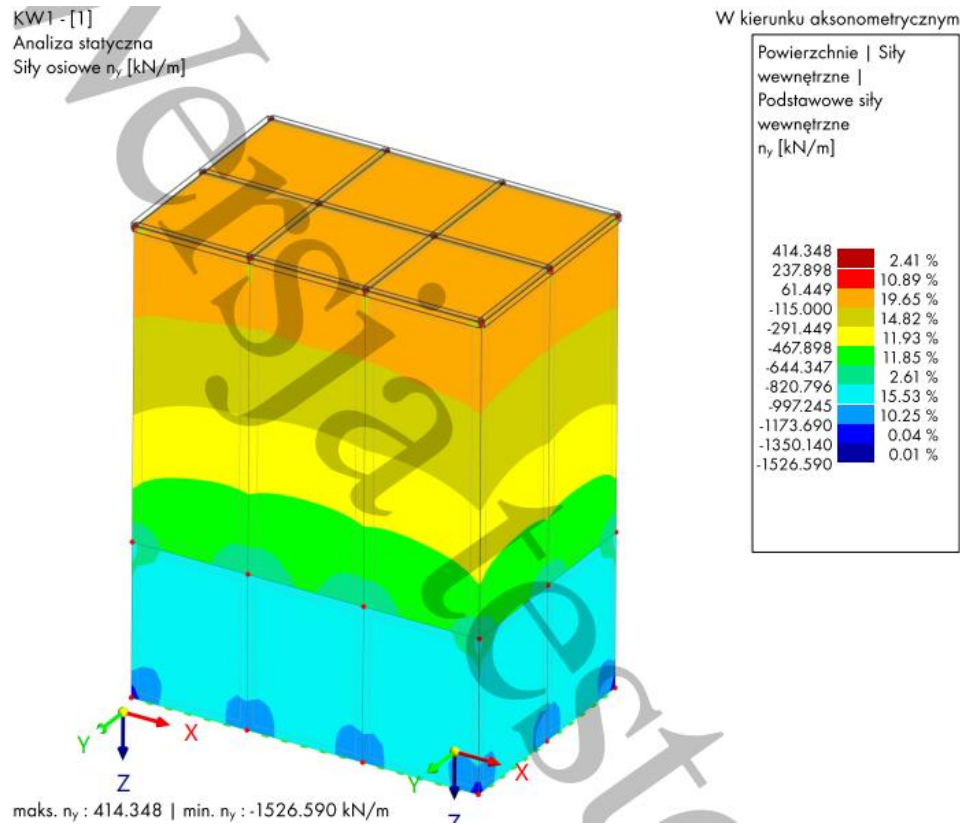
Rys. 6.34. Mapa sił podłużnych poziomych R baterii silosów prostokątnych o grubości ściany $t = 0,30$ m na klinkier cementowy o temperaturze $T=80^{\circ}\text{C}$ dla przypadku (2) + (5) dla warunków zimowych



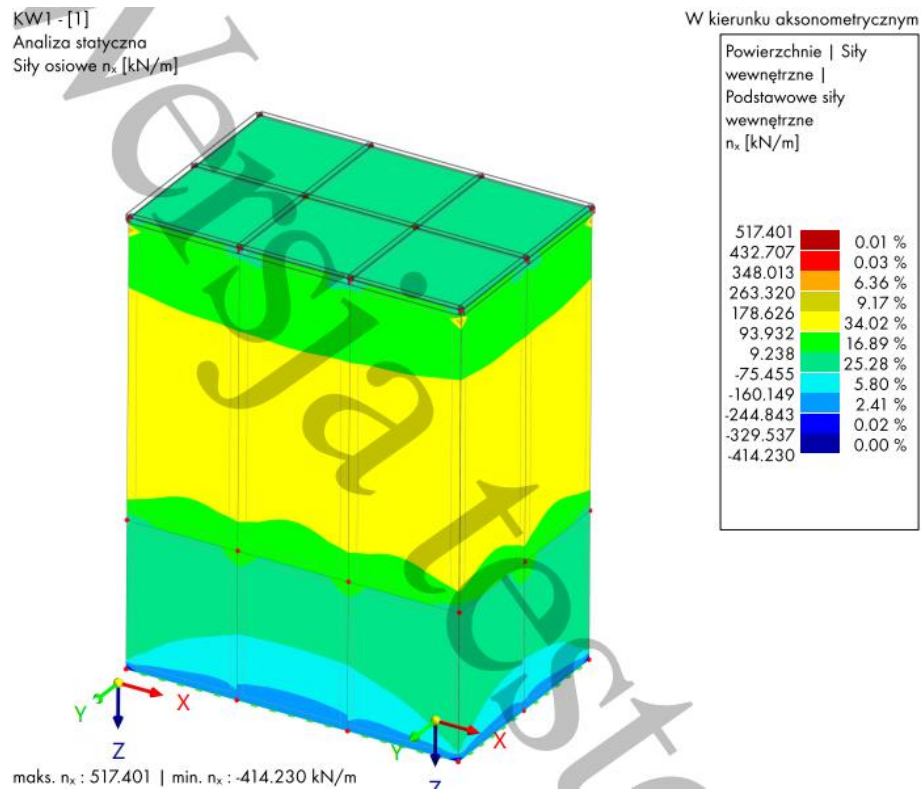
Rys. 6.35. Mapa momentów zginających pionowych M_N baterii silosów prostopadłościennych o grubości ściany $t = 0,35$ m na klinkier cementowy dla przypadku (1)



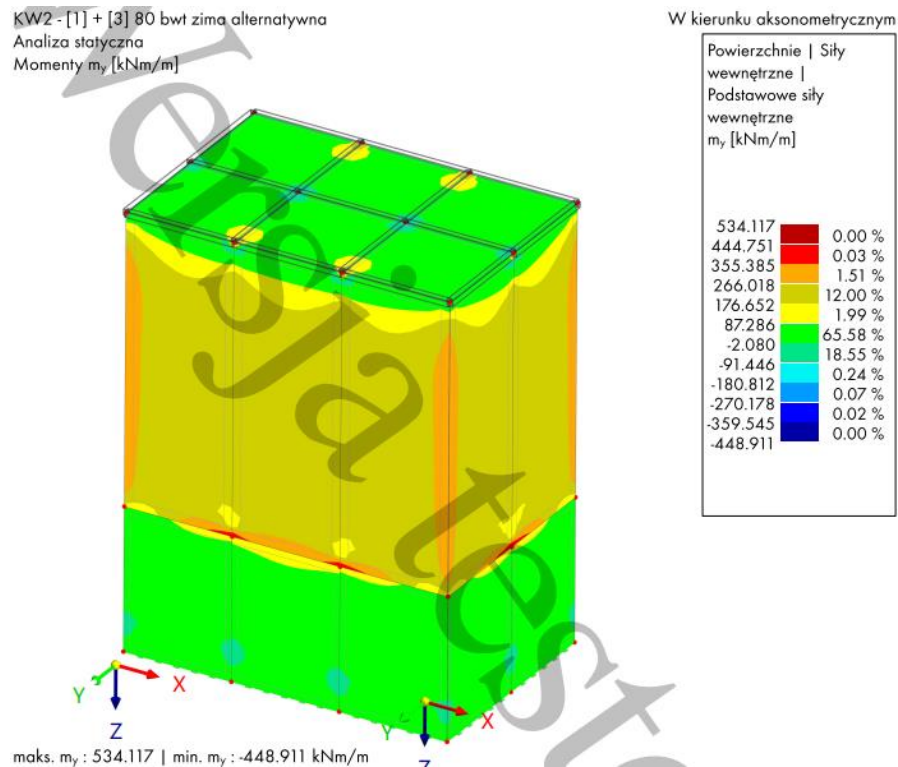
Rys. 6.36. Mapa momentów zginających poziomych M_R baterii silosów prostopadłościennych o grubości ściany $t = 0,35$ m na klinkier cementowy dla przypadku (1)



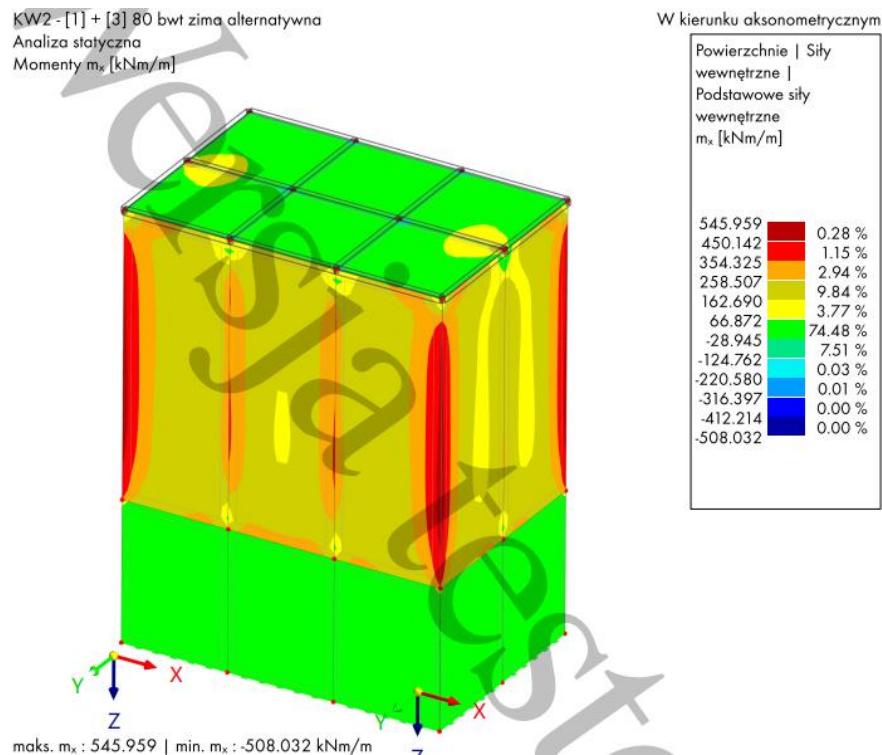
Rys. 6.37. Mapa sił podłużnych pionowych N baterii silosów prostopadłościennych o grubości ściany $t = 0,35$ m na klinkier cementowy dla przypadku (1)



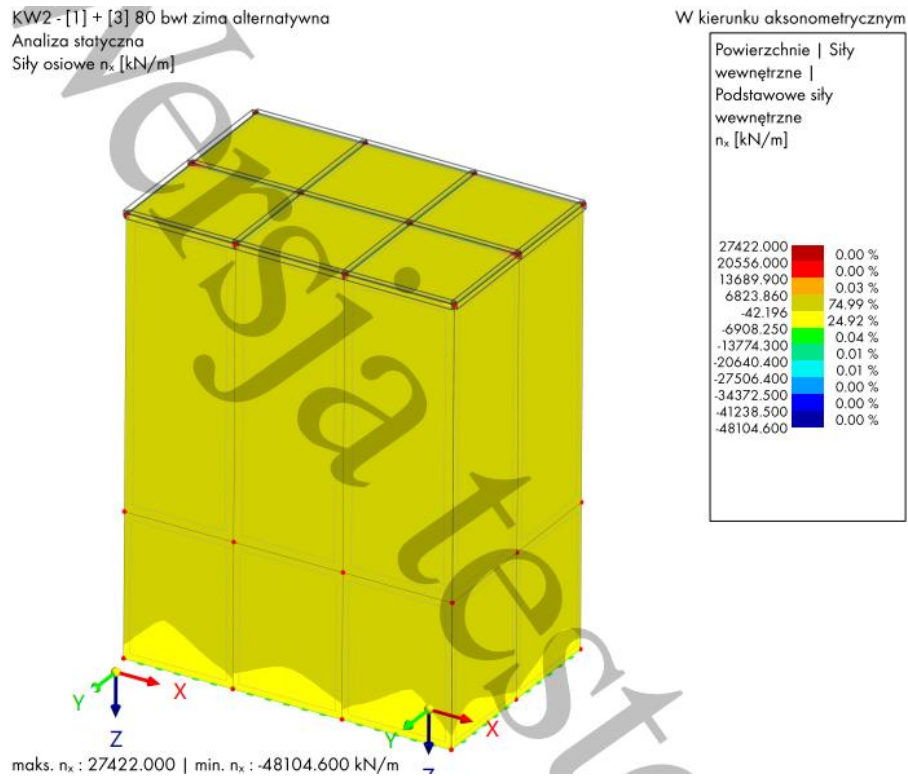
Rys. 6.38. Mapa sił podłużnych poziomych R baterii silosów prostopadłościennych o grubości ściany $t = 0,35$ m na klinkier cementowy przypadku (1)



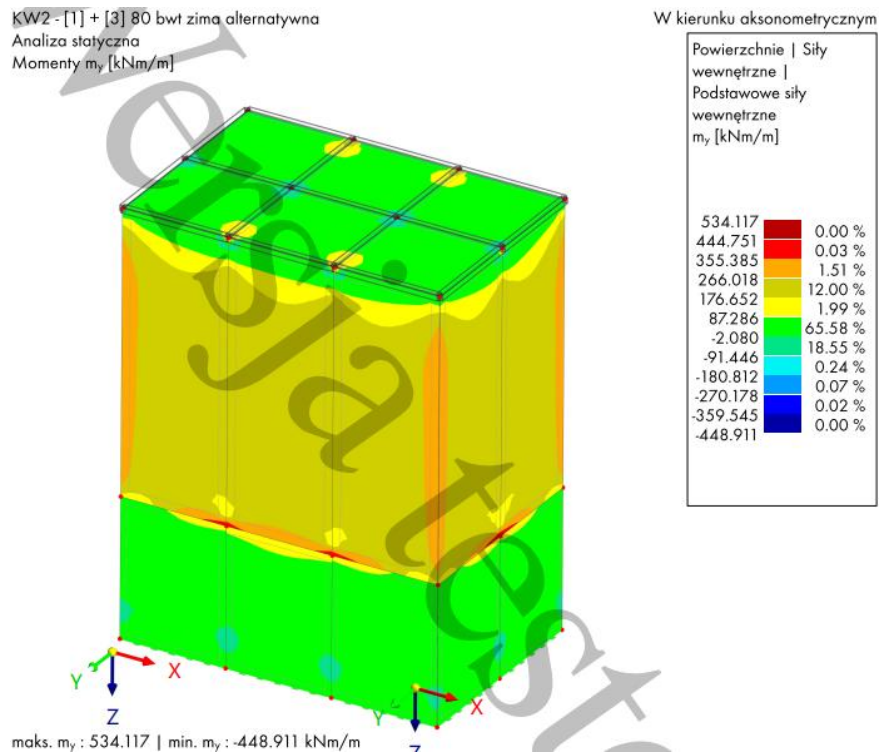
Rys. 6.39. Mapa momentów zginających pionowych M_N baterii silosów prostopadłościennych o grubości ściany $t = 0,35$ m na klinkier cementowy o temperaturze $T=80^\circ\text{C}$ dla przypadku (1) + (3) dla warunków zimowych



Rys. 6.40. Mapa momentów zginających poziomych M_R baterii silosów prostopadłościennych o grubości ściany $t = 0,35$ m na klinkier cementowy o temperaturze $T=80^\circ\text{C}$ dla przypadku (1) + (3) dla warunków zimowych



Rys. 6.41. Mapa sił podłużnych pionowych N baterii silosów prostopadłościennych o grubości ściany $t = 0,35$ m na klinkier cementowy o temperaturze $T=80^{\circ}\text{C}$ dla przypadku (1) + (3) dla warunków zimowych



Rys. 6.42. Mapa sił podłużnych poziomych R baterii silosów prostopadłościennych o grubości ściany $t = 0,35$ m na klinkier cementowy o temperaturze $T=80^{\circ}\text{C}$ dla przypadku (1) + (3) dla warunków zimowych

Analiza map sił wewnętrznych wykazała, że sam wpływ parcia statycznego klinkieru cementowego powoduje umiarkowane wartości momentów zginających i sił membranowych w ścianach baterii silosów. Zdecydowanie większe znaczenie mają jednak przypadki sprzężone, obejmujące jednocześnie działanie parcia materiału sypkiego oraz oddziaływań termicznych. W tych przypadkach obserwuje się wielokrotny wzrost wartości momentów zginających M_N i M_R oraz sił podłużnych N i R .

Największe koncentracje sił występują w strefach naroży komór, przy połączeniu ścian z lejem ostrosłupowym oraz w rejonie górnego zamocowania ścian przez płytę przekrycia. Oznacza to, że baterii silosów nie należy analizować jako układu niezależnych ścian, lecz jako przestrzenny ustrój powłokowo-tarczowy.

Wyniki potwierdzają również, że zwiększenie grubości ścian zmienia rozkład sił wewnętrznych, lecz nie eliminuje wpływu wymuszeń termicznych. W przypadku obciążeń termicznych większa sztywność ścian może prowadzić do powstawania znacznych sił wymuszonych.

6.4. Kontrola poprawności otrzymanych wyników za pomocą metody analitycznej

W celu oceny poprawności modelu obliczeniowego przeprowadzono analizę sił wewnętrznych występujących w ścianach wielokomorowej baterii silosów. Obliczenia wykonano z uwzględnieniem oddziaływania materiału sypkiego na ściany komór oraz wzajemnej współpracy konstrukcyjnej ścian wspólnych pomiędzy sąsiadującymi komorami [3].

Do wyznaczenia sił wewnętrznych przyjęto całkowite parcie poziome materiału sypkiego, obejmujące parcie symetryczne oraz składową lokalną związaną z procesem napełniania komór. Wartość obliczeniowego parcia poziomego określono jako sumę obu oddziaływań. Tak przyjęte obciążenie stanowi podstawę do wyznaczenia sił rozciągających oraz momentów zginających w ścianach komór.

$$p_h = p_{he} + p_{pe,nc} \quad (6.1)$$

gdzie: p_{he} – parcie poziome przy napełnianiu, $p_{pe,nc}$ – parcie lokalne przy napełnianiu

W ścianach komór pod wpływem parcia poziomego powstają poziome siły rozciągające działające w płaszczyźnie ściany. W przypadku baterii silosów ich rozkład zależy nie tylko od wartości parcia materiału sypkiego, lecz również od wzajemnego oddziaływania sąsiadujących

komór. Szczególnie istotne są ściany wewnętrzne, które mogą być obciążane z obu stron, co wpływa na wartości sił normalnych oraz momentów zginających.

$$R = \frac{p_h \cdot l}{2} \quad (6.2)$$

gdzie: p_h – parcie poziome, l – szerokość ściany.

Maksymalne wartości poziomych momentów zginających w przęśle oraz w narożu ściany wyznacza się następująco:

$$M_R = -\frac{1}{24} \cdot p_h \cdot l^2 \quad (6.2)$$

$$M_{R1-2} = \frac{1}{12} \cdot p_h \cdot l^2 \quad (6.3)$$

Podłużne siły pionowe wynikające z działania obciążeń pionowych wyznacza się następująco:

$$N = -(Q_{prz} + Q_{\acute{s}c} + n_{zsk}) \quad (6.4)$$

gdzie: Q_{prz} – obciążenie od płyty przekrycia, $Q_{\acute{s}c}$ – ciężar pochodzący od ściany, n_{zsk} – wypadkowa siła parcia stycznego (tarcia powierzchniowego).

W lejach ostrosłupowych o symetrycznej geometrii na poziomie połączenia leja ze ścianami komory działają dodatkowe siły pionowe o równomiernym rozkładzie obwodowym. Oddziaływania te pochodzą od ciężaru własnego leja oraz ciężaru materiału sypkiego wypełniającego jego objętość i wpływają na stan naprężeń w dolnej części ścian komory.

$$N_{leja} = \frac{p_v \cdot A + G}{U \cdot \sin \alpha} \quad (6.5)$$

gdzie: A – pole przekroju leja, G – ciężar leja wraz z wypełnionym poniżej materiałem dla rozpatrywanego przekroju poziomego, U – obwód leja, α – kąt nachylenia ścian leja do poziomu, P_t – wypadkowa parcia stycznego liczona od wierzchołka leja do rozpatrywanego poziomu.

Porównanie wyników analitycznych i numerycznych przeprowadzono dla charakterystycznych poziomów wysokości komór. Analizie poddano wartości poziomych momentów zginających, sił rozciągających oraz sił podłużnych. Weryfikację przeprowadzono dla przypadku ściany o grubości 0,35m. Przyjęto szerokość ściany w osiach równą $l = 5,35\text{m}$. Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 6.2.

Wartości sił podłużnych N oraz R z modelu MES odczytano dla wybranej ściany zewnętrznej baterii silosów, w przekrojach odpowiadających przyjętym poziomom wysokości. Odczytu dokonano w środkowej części analizowanej ściany, traktując uzyskane wartości jako reprezentatywne dla danego przekroju. Nie przyjmowano wartości skrajnych występujących przy krawędziach, narożach oraz w miejscach połączeń elementów powłokowych, ponieważ są one silnie zależne od lokalnej pracy przestrzennej konstrukcji i mogą prowadzić do zawyżenia różnic względem uproszczonych obliczeń analitycznych.

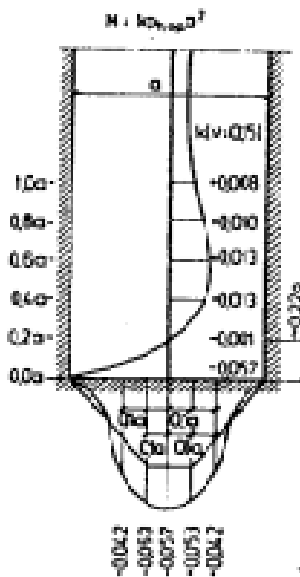
Tabela 6.2. Zestawienie wartości weryfikacji sił wewnętrznych w ścianie silosu ($t = 0,35\text{ m}$) – symetryczne parcie ośrodka sypkiego po napełnieniu z uwzględnieniem parcia lokalnego na całej wysokości komory

Parametr	M_R [kNm/m]	M_{RI-2} [kNm/m]	N [kN/m]	R [kN/m]	p_h [kN/m ²]
przekrój 0,25H (3,5m) – od góry komory					
MES	-42,46	89,34	-120,84	93,76	34,62
Analitycznie	-40,52	81,04	-103,33	91,74	34,62
Różnica w %	4,79	10,24	16,95	2,20	-
przekrój 0,50H (7,0m) – od góry komory					
MES	-64,27	134,64	-282,83	145,20	50,07
Analitycznie	-58,59	117,18	-241,39	132,66	50,07
Różnica w %	9,69	14,90	17,17	9,45	-
przekrój 0,75H (10,5m) – od góry komory					
MES	-67,04	143,41	-470,95	143,70	56,94
Analitycznie	-66,64	133,29	-399,80	150,89	56,94
Różnica w %	0,60	7,59	17,80	4,77	-
przekrój 1,0H (14,0m) – od góry komory					
MES	-	-	-824,15	73,73	60,01
Analitycznie	-	-	-897,50	159,03	60,01
Różnica w %	-	-	8,17	53,64	-

Pionowe momenty zginające osiągają największe wartości oraz wykazują największe zróżnicowanie w strefie przydennej silosu. Wraz ze wzrostem odległości od dna ich wartości stopniowo się wyrównują. Analizę momentów przeprowadza się do wysokości a komory, a ich wyznaczenie opiera się na schemacie przedstawionym na rysunku 6.43 oraz zależności:

$$M_N = k \cdot p_h \cdot a^2 \quad (6.6)$$

gdzie: k – współczynnik zgodny z rysunkiem 6.51, $a = l$ – szerokość boku komory.



Rys. 6.43. Schemat wyznaczania momentów zginających pionowych (przy $v = 0,15$) [3]

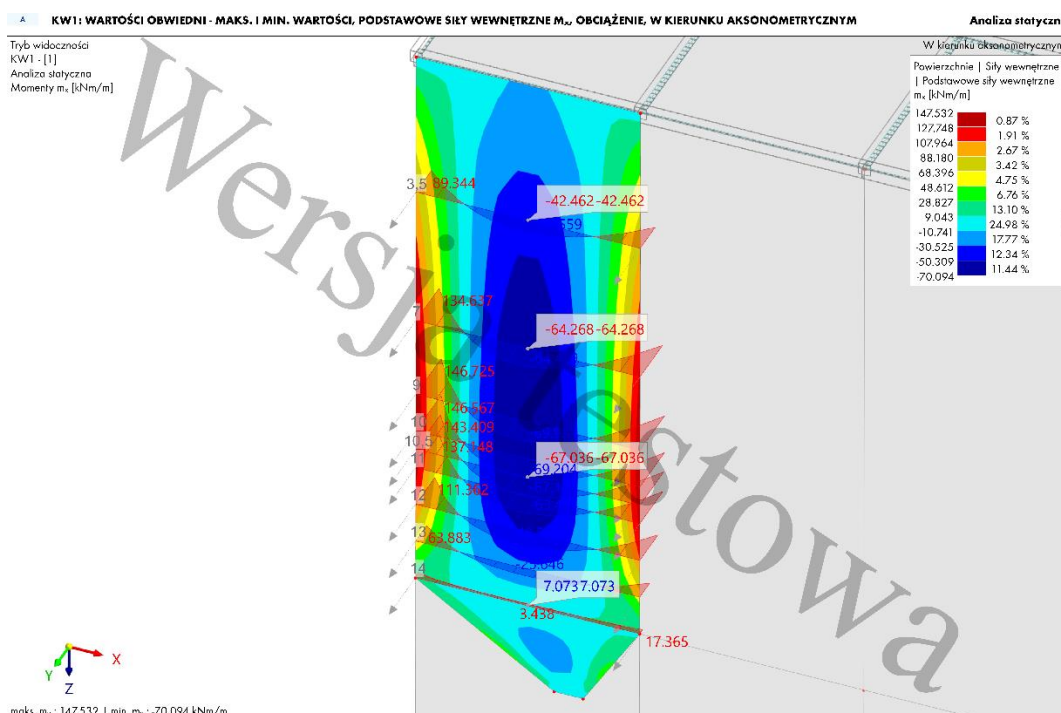
Zestawienie porównania obliczeń analitycznych do wyników MES dla silosu o grubości $t = 0,35\text{m}$ przedstawiono w tabeli 6.3.

Tabela 6.3. Zestawienie wartości weryfikacji momentów zginających pionowych na wysokości komory a silosu – symetryczne parcie ośrodka sypkiego po napełnieniu z uwzględnieniem parcia lokalnego dla $t = 0,35\text{m}$

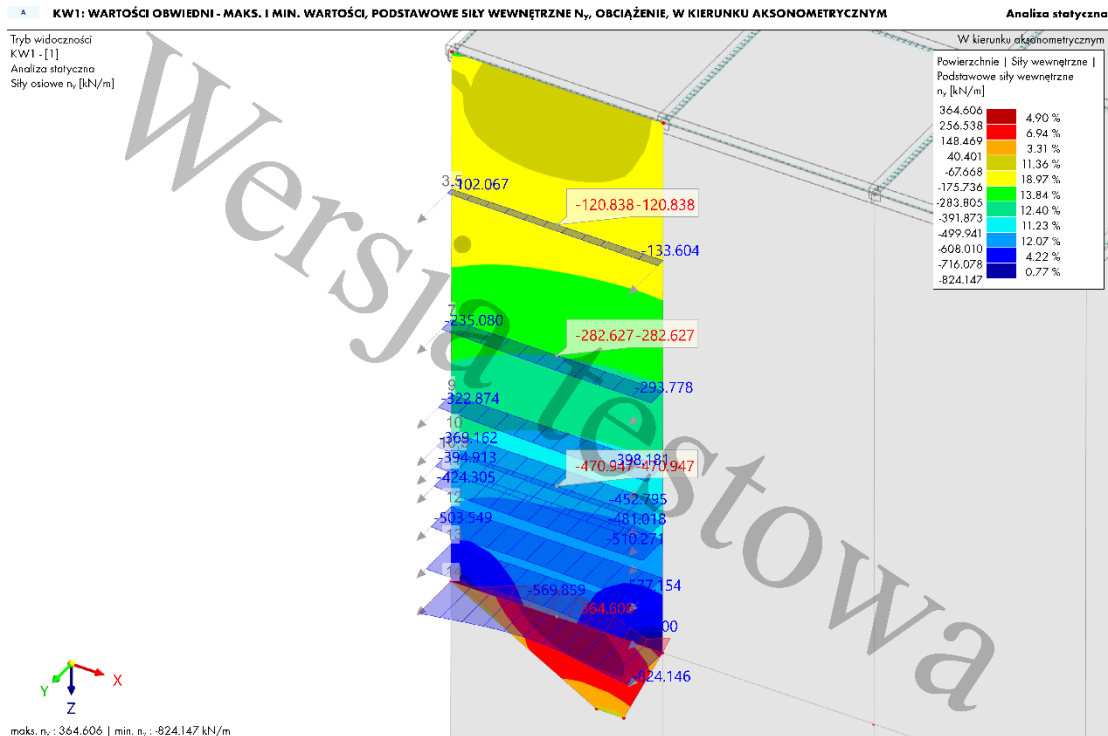
Odległość od dna	M_N [kNm/m]		%	p_h [kN/m ²]
	MES	Analitycznie		
1a (9,0m)	-19,11	-12,51	52,76	54,65
0,8a (10,0m)	-23,11	-16,10	43,54	56,26
0,6a (11,0m)	-27,61	-21,41	28,96	57,55
0,4a (12,0m)	-27,24	-21,79	25,01	58,56
0,2a (13,0m)	-6,22	-1,70	265,88	59,37
0,0a (14,0m)	67,84	97,91	30,71	60,01



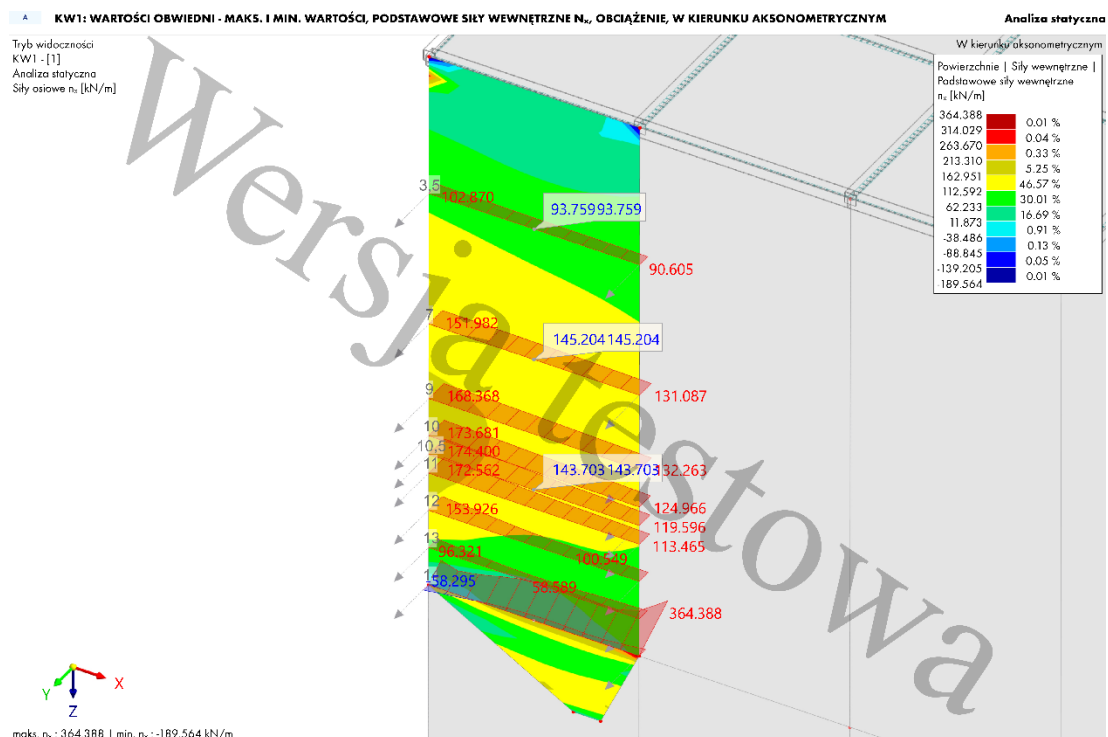
Rys. 6.44. Mapa momentów zginających pionowych M_N baterii silosów prostokątnych o grubości ściany $t = 0,35$ m na klinkier cementowy dla ściany wybranej do weryfikacji sił wewnętrznych w przypadku (1)



Rys. 6.45. Mapa momentów zginających poziomych M_R baterii silosów prostokątnych o grubości ściany $t = 0,35$ m na klinkier cementowy dla ściany wybranej do weryfikacji sił wewnętrznych w przypadku (1)



Rys. 6.46. Mapa sił podłużnych pionowych N baterii silosów prostopadłościennych o grubości ściany $t = 0,35$ m na klinkier cementowy dla ściany wybranej do weryfikacji sił wewnętrznych w przypadku (1)



Rys. 6.47. Mapa sił podłużnych poziomych R baterii silosów prostopadłościennych o grubości ściany $t = 0,35$ m na klinkier cementowy dla ściany wybranej do weryfikacji sił wewnętrznych w przypadku (1)

Przeprowadzone porównanie wyników uzyskanych metodą elementów skończonych z wynikami obliczeń analitycznych wykazało dobrą zgodność obu podejść dla przypadku symetrycznego parcia klinkieru cementowego po napełnieniu komory. Do porównania przyjęto wartości sił wewnętrznych odczytane w środkowej części wybranej ściany zewnętrznej, dzięki czemu ograniczono wpływ lokalnych koncentracji występujących przy narożach, krawędziach oraz w miejscach połączeń elementów powłokowych.

W zakresie poziomych momentów zginających M_R oraz M_{R1-2} uzyskano zadowalającą zgodność wyników. W przekrojach $0,25H$, $0,50H$ oraz $0,75H$ różnice między modelem MES a obliczeniami analitycznymi mieszczą się głównie w przedziale od kilku do kilkunastu procent. Oznacza to, że przyjęty schemat analityczny dobrze opisuje ogólną pracę ściany pod wpływem parcia poziomego materiału sypkiego, szczególnie w przekrojach oddalonych od stref lokalnych zaburzeń.

Podobną zgodność uzyskano dla sił podłużnych pionowych N . W przekrojach pośrednich różnice wynoszą od kilku do kilkunastu procent, co potwierdza poprawność przyjętego sposobu wyznaczania pionowego obciążenia ściany. Istotną zmianą względem wcześniejszych obliczeń jest uwzględnienie dodatkowego wpływu leja w przekroju $1,0H$. Po doliczeniu oddziaływania pochodzącego od ciężaru leja, ciężaru klinkieru znajdującego się w leju oraz parcia pionowego w poziomie połączenia ściany z lejem, wartość analityczna siły N wyniosła $-897,50$ kN/m. W porównaniu z wynikiem MES równym $-824,15$ kN/m daje to różnicę $8,17\%$. Oznacza to bardzo dobrą zgodność i potwierdza, że wpływ leja powinien być uwzględniany przy analitycznym wyznaczaniu siły pionowej w dolnym przekroju ściany.

Większa różnica w przekroju $1,0H$ pozostała natomiast dla siły poziomej R . Wynika ona z lokalnego charakteru pracy konstrukcji w strefie połączenia ściany pionowej z lejem ostrosłupowym. W tym miejscu występuje zmiana geometrii, redystrybucja sił membranowych oraz przestrzenna współpraca ścian i leja. Uproszczony model analityczny nie odwzorowuje w pełni tych efektów, dlatego dla siły R w dolnej części ściany różnice mogą być większe niż w przekrojach pośrednich.

Analiza pionowych momentów zginających M_N , zestawiona w tabeli 6.3, wykazała większe rozbieżności procentowe niż w przypadku momentów poziomych i sił podłużnych. Należy jednak zauważyć, że różnice te częściowo wynikają z małych wartości momentów w niektórych przekrojach. Szczególnie w przekroju $0,2a$ niewielka wartość analityczna powoduje bardzo dużą różnicę procentową, mimo że różnica bezwzględna nie jest tak znacząca.

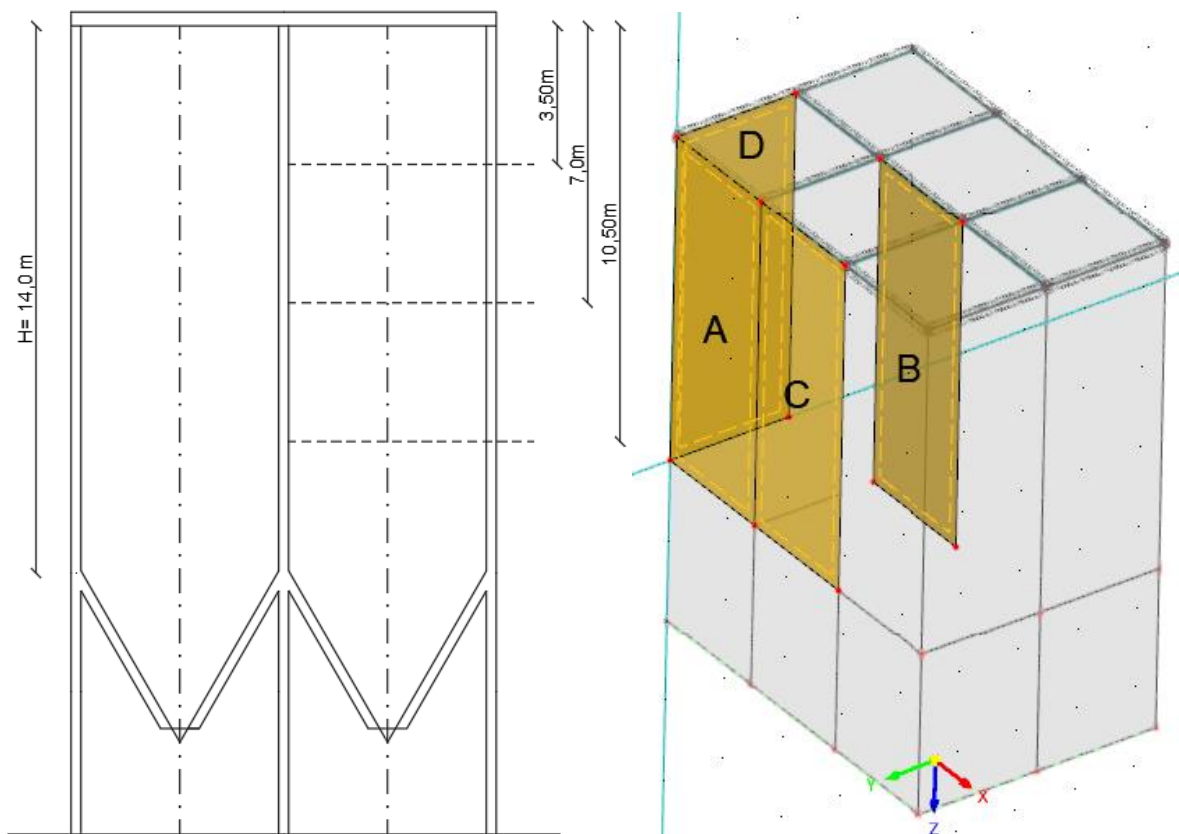
Na podstawie przeprowadzonego porównania można stwierdzić, że obliczenia analityczne dobrze potwierdzają rząd wielkości wyników uzyskanych w modelu numerycznym szczególnie dla poziomych momentów zginających oraz pionowych sił podłużnych.

Metoda analityczna może być zatem stosowana jako skuteczne narzędzie kontrolne do oceny poprawności wyników MES w przekrojach reprezentatywnych. Nie powinna jednak zastępować modelu przestrzennego w miejscach, gdzie występuje złożona praca konstrukcji, takich jak naroża komór, połączenie ścian z lejem, okolice płyty przekrycia oraz strefy lokalnych koncentracji sił. Pełna ocena pracy żelbetowej baterii silosów wymaga zastosowania modelu MES, ponieważ tylko analiza przestrzenna pozwala uwzględnić współpracę ścian, leja, naroży oraz elementów wspólnych dla sąsiednich komór.

7. Zestawienie porównawcze wartości sił wewnętrznych w żelbetowej baterii silosów

W ramach pracy dyplomowej magisterskiej zrealizowano wielowariantowe obliczenia numeryczne dla baterii silosów prostokątnych poddanych działaniu obciążeń statycznych i termicznych. W analizowanych modelach zróżnicowano grubość ich ścian oraz temperaturę zasypywanego klinkieru cementowego. W analizie uwzględniono warunki sezonowe (letnie oraz zimowe), odpowiadające najmniej korzystnym warunkom eksploatacyjnym konstrukcji. Dodatkowo zbadano wpływ przyściennej warstwy ośrodka sypkiego na wartości sił wewnętrznych w komorze silosu. Przyjęto przy tym liniowy rozkład temperatury na grubości poszczególnych ścian.

Przekroje konstrukcji wytypowane do zestawień porównawczych zilustrowano na rysunku 7.1.



Rys. 7.1. Miejsca przeprowadzenia analizy porównawczej w baterii silosów prostokątnych [P1]

W tabelach 7.1–7.30 zestawiono rezultaty analizy porównawczej sił wewnętrznych dla poszczególnych wariantów testów numerycznych baterii silosów prostopadłościennych wypełnionych gorącym klinkierem cementowym. Wskazano wartości sił podłużnych poziomych R i pionowych N oraz momentów zginających poziomych M_R i pionowych M_N w wybranych przekrojach zgodnie z rysunkiem 7.1. Określono procentowe zmiany wywołane wpływem obciążeń termicznych. Wyraźny wpływ oddziaływań temperaturowych na stan wyężenia jednoznacznie wskazuje na konieczność ich uwzględnienia na etapie projektowania konstrukcji. W tabelach 7.1–7.14 zestawiono wyniki dla ściany A i B, natomiast w tabelach 7.15–7.30 przedstawiono wyniki dla ściany C i D, zgodnie z rysunkiem 7.1.

Zgodnie z punktem 2.4 pracy przyjęto następujące numerowanie poszczególnych testów numerycznych:

- (1) – Oddziaływanie statyczne od parcia materiału sypkiego dla wszystkich komór baterii silosów,
- (2) – Oddziaływanie statyczne od parcia materiału sypkiego przyłożone w kształcie szachownicy na komory baterii silosów z uwzględnieniem całkowitego i częściowego zapełnienia komór wewnątrz baterii,
- (3) – Oddziaływanie termiczne wywołane temperaturą składowanego materiału dla wszystkich komór baterii silosów bez uwzględnienia warstwy tłumiącej,
- (4) – Oddziaływanie termiczne wywołane temperaturą składowanego materiału dla wszystkich komór baterii silosów z uwzględnieniem warstwy tłumiącej,
- (5) – Oddziaływanie termiczne wywołane temperaturą składowanego materiału przyłożone w kształcie szachownicy na komory baterii silosów bez uwzględnienia warstwy tłumiącej,
- (6) – Oddziaływanie termiczne wywołane temperaturą składowanego materiału przyłożone w kształcie szachownicy na komory baterii silosów z uwzględnieniem warstwy tłumiącej.

Wykresy porównujące siły wewnętrzne w przyjętych przekrojach silosów przedstawiono na rysunkach 7.2–7.109 (rys. 7.2–7.81 – ściana A, rys. 7.82–7.109 – ściana B). Analizę wykonano dla różnych grubości ścian, warunków letnich i zimowych, temperatury klinkieru cementowego 80°C i 100°C oraz wariantów z przyścienną warstwą tłumiącą i bez niej. Wartości sił wewnętrznych odczytano zgodnie z rysunkiem 7.1. Różnice procentowe w tabelach 7.1–7.30 określono względem przypadku bazowego, czyli obciążenia statycznego od parcia materiału sypkiego. Pokazują one wpływ temperatury oraz warstwy tłumiącej na zmianę wartości sił N , R i momentów zginających M_N i M_R .

Tabela 7.1. Zestawienie wartości sił podłużnych pionowych N dla odpowiednich grubości ściany zewnętrznej A baterii silosów prostopadłościennych przy różnych wariantach obciążenia w wybranych przekrojach na wysokości komory

Poziom h/H	Grubość ściany	Temperatura	Siły podłużne pionowe N [kN/m]								
			(1)	(1) + (3) zima	%	(1) + (4) zima	%	(1) + (3) lato	%	(1) + (4) lato	%
0,25 (3,5m)	0,25m	80°C	-108,48	879,14	910,42	1246,37	1248,94	377,85	448,31	523,74	582,80
		100°C	-108,48	1070,34	1086,67	1502,95	1485,46	569,17	624,68	780,43	819,42
	0,30m	80°C	-114,66	1028,15	996,69	1468,72	1380,93	446,19	489,14	621,10	641,69
		100°C	-114,66	1249,22	1189,50	1768,23	1642,15	667,13	681,83	920,46	902,77
	0,35m	80°C	-120,84	1169,98	1068,21	1681,79	1491,75	510,41	522,38	713,58	690,52
		100°C	-120,84	1419,22	1274,46	2022,15	1773,41	759,81	728,77	1054,09	972,30
0,50 (7,0m)	0,25m	80°C	-258,23	1214,33	570,25	1708,11	761,47	539,27	308,83	735,42	384,79
		100°C	-258,23	1511,43	685,30	2093,10	910,56	836,52	423,94	1120,57	533,94
	0,30m	80°C	-270,47	1450,87	636,43	2045,67	856,34	661,67	344,64	897,80	431,94
		100°C	-270,47	1798,33	764,89	2499,01	1023,95	1008,95	473,04	1350,95	599,48
	0,35m	80°C	-282,63	1680,15	694,47	2372,84	939,56	779,92	375,95	1054,88	473,24
		100°C	-282,63	2076,16	834,59	2892,16	1123,30	1176,15	516,14	1574,41	657,06
0,75 (10,5m)	0,25m	80°C	-432,42	1101,13	354,64	1721,59	498,13	248,74	157,52	495,21	214,52
		100°C	-432,42	1385,76	420,47	2116,67	589,49	533,56	223,39	890,49	305,93
	0,30m	80°C	-451,88	1342,46	397,08	2095,29	563,68	339,66	175,17	638,52	241,30
		100°C	-451,88	1674,82	470,63	2561,66	666,89	671,79	248,67	1104,66	344,46
	0,35m	80°C	-470,95	1575,60	434,56	2458,41	622,01	425,70	190,39	776,13	264,80
		100°C	-470,95	1953,50	415,80	2993,47	735,62	803,87	270,69	1311,46	378,47

Tabela 7.2. Zestawienie wartości sił podłużnych poziomych R dla odpowiednich grubości ściany zewnętrznej A baterii silosów prostopadłościennych przy różnych wariantach obciążenia w wybranych przekrojach na wysokości komory

Poziom <i>h/H</i>	Grubość ściany	Temperatura	Siły podłużne poziome <i>R</i> [kN/m]								
			(1)	(1) + (3) zima	%	(1) + (4) zima	%	(1) + (3) lato	%	(1) + (4) lato	%
0,25 (3,5m)	0,25m	80°C	91,59	169,53	85,10	236,68	158,41	50,92	44,40	72,73	20,59
		100°C	91,59	171,52	87,27	250,62	173,63	52,93	42,21	78,40	14,40
	0,30m	80°C	92,69	204,14	120,24	282,46	204,74	57,90	37,53	77,89	15,97
		100°C	92,69	210,96	127,60	303,22	227,13	59,01	36,34	85,99	7,23
	0,35m	80°C	93,76	246,02	162,39	334,26	256,51	63,48	32,30	84,87	9,48
		100°C	93,76	259,24	176,49	363,20	287,37	66,24	29,35	91,53	2,38
0,50 (7,0m)	0,25m	80°C	142,39	60,37	57,60	48,56	65,90	74,20	47,89	69,51	51,18
		100°C	142,39	39,88	71,99	25,97	81,76	53,71	62,28	46,92	67,05
	0,30m	80°C	143,79	57,33	64,98	48,13	73,47	65,66	54,31	62,01	56,85
		100°C	143,79	34,69	75,87	23,85	83,41	43,03	70,07	37,73	73,76
	0,35m	80°C	145,20	58,75	59,54	54,31	62,60	58,62	59,63	56,86	60,84
		100°C	145,20	34,71	76,10	29,49	79,69	34,58	76,18	32,03	77,94
0,75 (10,5m)	0,25m	80°C	142,03	123,72	12,89	247,56	74,30	-51,82	136,49	-2,98	102,10
		100°C	142,03	90,52	36,27	235,35	129,07	-85,87	160,46	-15,15	110,67
	0,30m	80°C	142,92	125,64	12,09	286,83	100,69	-95,82	167,04	-32,84	122,98
		100°C	142,92	86,97	39,15	273,88	91,63	-137,07	195,91	-45,84	132,07
	0,35m	80°C	143,70	128,49	10,58	332,23	131,20	-141,13	198,21	-62,86	143,74
		100°C	143,70	86,86	39,55	319,16	122,10	-189,25	231,70	-75,87	152,80

Tabela 7.3. Zestawienie wartości momentów zginających pionowych M_N dla odpowiednich grubości ściany zewnętrznej A baterii silosów prostopadłościennych przy różnych wariantach obciążenia w wybranych przekrojach na wysokości komory

Poziom h/H	Grubość ściany	Temperatura	Momenty zginające pionowe M_N [kNm/m]								
			(1)	(1) + (3) zima	%	(1) + (4) zima	%	(1) + (3) lato	%	(1) + (4) lato	%
0,25 (3,5m)	0,25m	80°C	-10,37	93,57	1002,31	14,11	236,07	28,16	371,55	-3,38	67,41
		100°C	-10,37	111,59	1176,08	18,03	273,87	46,19	545,42	0,52	105,01
	0,30m	80°C	-10,62	153,23	1542,84	30,86	390,58	49,75	568,46	1,19	111,21
		100°C	-10,62	181,62	1810,17	37,47	452,82	78,13	835,69	7,80	173,45
	0,35m	80°C	-10,88	228,41	2199,36	53,68	593,38	76,80	805,88	7,46	168,57
		100°C	-10,88	269,74	2579,23	64,02	688,42	118,12	1185,66	17,72	262,87
0,50 (7,0m)	0,25m	80°C	-14,29	91,39	739,54	9,11	163,75	27,24	290,62	-5,45	61,86
		100°C	-14,29	110,10	870,47	13,22	192,51	45,95	421,55	-1,36	90,48
	0,30m	80°C	-14,70	152,61	1138,16	25,05	270,41	50,90	446,26	0,26	101,77
		100°C	-14,70	182,25	1339,80	31,99	317,62	80,54	647,89	7,20	148,98
	0,35m	80°C	-15,13	230,12	1620,95	46,85	409,65	80,89	634,63	8,14	153,80
		100°C	-15,13	273,51	1907,73	57,72	481,49	124,28	921,41	18,93	225,12
0,75 (10,5m)	0,25m	80°C	-23,67	78,43	431,35	-4,16	82,43	13,34	156,36	-19,48	17,70
		100°C	-23,67	95,99	505,53	-1,26	94,68	30,91	230,59	-16,60	29,87
	0,30m	80°C	-24,47	136,77	658,93	9,14	137,35	33,20	235,68	-17,49	28,52
		100°C	-24,47	164,41	771,88	14,06	157,46	60,85	348,67	-12,56	48,67
	0,35m	80°C	-25,38	210,29	928,57	27,56	208,59	57,84	327,90	-14,72	42,00
		100°C	-25,38	250,48	1086,92	35,32	239,16	98,04	486,29	-7,03	72,30

Tabela 7.4. Zestawienie wartości momentów zginających poziomych M_R dla odpowiednich grubości ściany zewnętrznej A baterii silosów prostopadłościennych przy różnych wariantach obciążenia w wybranych przekrojach na wysokości komory

Poziom h/H	Grubość ściany	Temperatura	Momenty zginające poziome M_R [kNm/m]									
			-	(1)	(1) + (3) zima	%	(1) + (4) zima	%	(1) + (3) lato	%	(1) + (4) lato	%
0,25 (3,5m)	0,25m	80°C	Przęsło	-40,92	61,00	249,07	-14,80	63,83	-1,68	95,89	-31,81	22,26
			Podpora	85,47	242,76	184,03	168,47	97,11	149,91	75,39	120,81	41,35
		100°C	Przęsło	-40,92	78,92	292,86	-10,35	74,71	16,24	139,69	-27,38	33,09
			Podpora	85,47	271,05	217,13	184,76	116,17	178,20	108,49	136,08	59,21
	0,30m	80°C	Przęsło	-41,69	119,55	386,76	2,66	106,38	20,34	148,79	-26,08	37,44
			Podpora	87,40	340,78	289,91	229,36	162,43	191,24	118,81	147,01	68,20
		100°C	Przęsło	-41,69	147,92	454,81	10,22	124,51	48,72	216,86	-18,53	55,55
			Podpora	87,40	386,41	342,12	255,16	191,95	236,86	171,01	172,80	97,71
	0,35m	80°C	Przęsło	-42,46	193,66	556,10	26,64	162,74	48,36	213,90	-17,96	57,70
			Podpora	89,34	466,93	422,64	309,80	246,77	244,10	173,23	181,74	103,43
		100°C	Przęsło	-42,46	235,16	653,84	38,50	190,67	89,88	311,68	-6,17	85,47
			Podpora	89,34	534,88	498,70	349,89	291,64	312,06	249,29	221,75	148,21
0,50 (7,0m)	0,25m	80°C	Przęsło	-61,95	46,22	174,61	-33,92	45,25	-19,44	68,62	-51,28	17,22
			Podpora	128,78	276,18	114,46	212,53	65,03	187,82	45,85	162,53	26,21
		100°C	Przęsło	-61,95	65,37	205,52	-28,99	53,37	-0,29	99,53	-46,37	25,15
			Podpora	128,78	302,47	134,87	227,53	76,68	214,11	66,26	177,52	37,85
	0,30m	80°C	Przęsło	-63,10	108,22	271,51	-15,64	75,21	4,10	106,50	-45,07	28,57
			Podpora	131,67	368,42	179,81	272,77	107,16	226,53	72,04	188,56	43,21
		100°C	Przęsło	-63,10	138,57	319,60	-7,33	88,38	34,46	154,61	-36,76	41,74
			Podpora	131,67	410,70	211,92	298,03	126,35	268,80	104,15	213,80	62,38
	0,35m	80°C	Przęsło	-64,27	186,93	390,85	9,51	114,80	34,15	153,14	-36,27	43,57
			Podpora	134,64	486,33	261,21	353,06	162,23	275,64	104,72	222,74	65,43

Analiza oddziaływań statycznych i termicznych w żelbetowej baterii silosów

0,75 (10,5m)		100°C	Przęsło	-64,27	231,38	460,01	22,48	134,98	78,60	222,30	-23,38	63,62
			Podpora	134,64	549,10	307,83	392,20	191,30	338,43	151,36	261,82	94,46
	0,25m	80°C	Przęsło	-65,02	41,04	163,12	-37,21	42,77	-23,24	64,26	-54,31	16,47
			Podpora	138,28	284,48	105,73	216,24	56,38	195,35	41,27	168,24	21,67
		100°C	Przęsło	-65,02	59,84	192,03	-32,29	50,34	-4,44	93,17	-49,42	23,99
			Podpora	138,28	310,31	124,41	229,96	66,30	221,18	59,95	181,95	31,58
	0,30m	80°C	Przęsło	-66,03	101,59	253,85	-19,42	70,59	0,09	100,14	-47,94	27,40
			Podpora	140,85	375,64	166,70	272,60	93,54	232,06	64,76	191,14	35,70
		100°C	Przęsło	-66,03	131,35	298,92	-11,20	83,04	29,85	145,21	-39,71	39,86
			Podpora	140,85	417,09	196,12	295,71	109,95	273,49	94,17	214,24	52,11
	0,35m	80°C	Przęsło	-67,04	178,28	365,93	4,81	107,17	29,92	144,63	-38,92	41,95
			Podpora	143,41	492,05	243,11	347,80	142,52	278,15	93,95	220,88	54,02
		100°C	Przęsło	-67,04	221,83	430,89	17,57	126,21	73,46	209,58	-26,22	60,89
			Podpora	143,41	553,43	285,91	383,61	167,49	339,55	136,77	256,63	78,95

Tabela 7.5. Zestawienie wartości sił podłużnych pionowych N dla ściany zewnętrznej A o grubości 0,30m baterii silosów prostopadłościennych przy różnych wariantach obciążenia w wybranych przekrojach na wysokości komory

Poziom <i>h/H</i>	Grubość ściany	Temperatura	Siły podłużne pionowe <i>N</i> [kN/m]								
			(2)	(2) + (5) zima	%	(2) + (6) zima	%	(2) + (5) lato	%	(2) + (6) lato	%
0,25 (3,5m)	0,30m	80°C	-87,86	1127,14	1382,88	830,96	1045,78	544,99	720,29	366,74	517,41
		100°C	-87,86	1366,07	1654,83	1010,61	1250,25	784,18	992,53	545,99	721,43
0,50 (7,0m)		80°C	-180,71	1506,76	933,80	1841,57	1119,07	717,5	497,04	806,89	546,51
		100°C	-180,71	1845,69	1121,35	2233,94	1336,20	1056,97	684,90	1199,89	763,99
0,75 (10,5m)		80°C	-346,93	1444,05	516,24	2110,34	708,29	441,23	227,18	693,15	299,80
		100°C	-346,93	1775,55	611,79	2556,29	836,83	772,54	322,68	1141,25	428,96

Tabela 7.6. Zestawienie wartości sił podłużnych poziomych R dla ściany zewnętrznej A o grubości 0,30m baterii silosów prostopadłościennych przy różnych wariantach obciążenia w wybranych przekrojach na wysokości komory

Poziom <i>h/H</i>	Grubość ściany	Temperatura	Siły podłużne poziome <i>R</i> [kN/m]								
			(2)	(2) + (5) zima	%	(2) + (6) zima	%	(2) + (5) lato	%	(2) + (6) lato	%
0,25 (3,5m)	0,30m	80°C	-6,49	146,11	2351,31	30,28	566,56	-12,94	871,49	-63,05	871,49
		100°C	-6,49	163,14	2613,71	30,63	571,96	-9,36	44,22	-71,01	994,14
0,50 (7,0m)		80°C	51,71	-328,68	735,62	599,55	1059,45	-320,07	718,97	60,12	16,26
		100°C	51,71	-424,51	920,94	666,41	1188,74	-416,47	905,40	126,19	144,03
0,75 (10,5m)		80°C	95,98	74,36	22,53	274,14	185,62	-147,88	254,07	-66,49	169,27
		100°C	95,98	33,64	64,95	266,48	177,64	-190,42	298,40	-73,53	176,61

Tabela 7.7. Zestawienie wartości momentów zginających pionowych M_N dla ściany zewnętrznej A o grubości 0,30m baterii silosów prostopadłościennych przy różnych wariantach obciążenia w wybranych przekrojach na wysokości komory

Poziom <i>h/H</i>	Grubość ściany	Temperatura	Momenty zginające pionowe M_N [kNm/m]								
			(2)	(2) + (5) zima	%	(2) + (6) zima	%	(2) + (5) lato	%	(2) + (6) lato	%
0,25 (3,5m)	0,30m	80°C	2,46	129,94	5182,11	120,68	4805,69	26,57	980,08	22,63	819,92
		100°C	2,46	149,24	5966,67	138,31	5522,36	45,88	1765,04	40,24	1535,77
0,50 (7,0m)		80°C	-4,57	148,99	3360,18	57,33	1354,49	47,3	1135,01	10,56	331,07
		100°C	-4,57	175,2	3933,70	67,17	1569,80	73,5	1708,32	20,41	546,61
0,75 (10,5m)		80°C	-19,65	141,02	817,66	13,35	167,94	37,46	290,64	-13,33	32,16
		100°C	-19,65	168,52	957,61	18,1	192,11	64,97	430,64	-8,56	56,44

Tabela 7.8. Zestawienie wartości momentów zginających poziomych M_R dla ściany zewnętrznej A o grubości 0,30m baterii silosów prostopadłościennych przy różnych wariantach obciążenia w wybranych przekrojach na wysokości komory

Poziom h/H	Grubość ściany	Temperatura	Momenty zginające poziome M_R [kNm/m]									
			-	(2)	(2) + (5) zima	%	(2) + (6) zima	%	(2) + (5) lato	%	(2) + (6) lato	%
0,25 (3,5m)	0,30m	80°C	Przęsło	-1,26	128,09	10265,87	107,31	8616,67	28,82	2387,30	19,42	1641,27
			Podpora	2,73	186,04	6714,65	225,42	8157,14	40,22	1373,26	49,20	1702,20
		100°C	Przęsło	-1,26	148,47	11883,33	123,86	9930,16	49,20	4004,76	35,98	2955,56
			Podpora	2,73	214,14	7743,96	260,15	9429,30	64,63	2267,40	83,96	2975,46
0,50 (7,0m)	0,30m	80°C	Przęsło	-23,07	146,48	734,94	27,79	220,46	42,36	283,62	-5,29	77,07
			Podpora	48,42	285,32	489,26	166,92	244,73	143,42	196,20	95,05	96,30
		100°C	Przęsło	-23,07	176,39	864,59	36,50	258,21	72,28	413,31	3,43	114,87
			Podpora	48,42	327,64	576,66	187,82	287,90	185,72	283,56	116,09	139,76
0,75 (10,5m)	0,30m	80°C	Przęsło	-44,32	122,21	375,74	2,83	106,39	20,70	146,71	-26,79	39,55
			Podpora	96,04	332,24	245,94	222,96	132,15	188,65	96,43	144,95	50,93
		100°C	Przęsło	-44,32	151,70	442,28	11,05	124,93	50,19	213,24	-18,56	58,12
			Podpora	96,04	374,04	289,46	245,17	155,28	230,44	139,94	167,25	74,15

Tabela 7.9. Zestawienie wartości sił podłużnych pionowych N dla ściany wewnętrznej B o grubości 0,30m baterii silosów prostopadłościennych przy różnych wariantach obciążenia w wybranych przekrojach na wysokości komory

Poziom <i>h/H</i>	Grubość ściany	Temperatura	Siły podłużne pionowe <i>N</i> [kN/m]								
			(2)	(2) + (5) zima	%	(2) + (6) zima	%	(2) + (5) lato	%	(2) + (6) lato	%
0,25 (3,5m)	0,30m	80°C	-110,15	-1421,6	1190,60	-1566,94	1322,55	-1074,54	875,52	-1074,83	875,79
		100°C	-110,15	-1731,87	1472,28	-1895,25	1620,61	-1384,73	1157,13	-1403,89	1174,53
0,50 (7,0m)		80°C	-225,00	-2418,01	974,67	-2821,57	1154,03	-1718,3	663,69	-1848,71	721,65
		100°C	-225,00	-2912,4	1194,40	-3382,47	1403,32	-2212,58	883,37	-2411,04	971,57
0,75 (10,5m)		80°C	-389,70	-2778,3	612,93	-3350,71	759,82	-1881,66	382,85	-2112,33	442,04
		100°C	-389,70	-3291,97	744,74	-3964,49	917,32	-2395,19	514,62	-2727,91	600,00

Tabela 7.10. Zestawienie wartości sił podłużnych poziomych R dla ściany wewnętrznej B o grubości 0,30m baterii silosów prostopadłościennych przy różnych wariantach obciążenia w wybranych przekrojach na wysokości komory

Poziom <i>h/H</i>	Grubość ściany	Temperatura	Siły podłużne poziome <i>R</i> [kN/m]								
			(2)	(2) + (5) zima	%	(2) + (6) zima	%	(2) + (5) lato	%	(2) + (6) lato	%
0,25 (3,5m)	0,30m	80°C	81,99	-676,44	925,03	-250,74	405,82	-442,13	639,25	25,96	68,34
		100°C	81,99	-865,53	1155,65	-327,89	499,91	-631,24	869,90	-51,41	162,69
0,50 (7,0m)		80°C	109,16	-2010,87	1942,13	-2697,58	2571,22	-1390,65	1373,96	-1842,44	1787,83
		100°C	109,16	-2484,78	2376,27	-3313,83	3135,75	-1864,49	1808,03	-2459,87	2353,45
0,75 (10,5m)		80°C	58,43	-2750,32	4807,03	-3336,09	5809,55	2133,65	3551,63	-2437,01	4270,82
		100°C	58,43	-3423,75	5959,58	-4120,57	7152,15	-2806,95	4903,95	-3222,89	5615,81

Tabela 7.11. Zestawienie wartości momentów zginających pionowych M_N dla ściany wewnętrznej B o grubości 0,30m baterii silosów prostopadłościennych przy różnych wariantach obciążenia w wybranych przekrojach na wysokości komory

Poziom <i>h/H</i>	Grubość ściany	Temperatura	Momenty zginające pionowe M_N [kNm/m]								
			(2)	(2) + (5) zima	%	(2) + (6) zima	%	(2) + (5) lato	%	(2) + (6) lato	%
0,25 (3,5m)	0,30m	80°C	-13,53	20,29	249,96	-3,99	70,51	20,29	249,96	-4,5	66,74
		100°C	-13,53	28,73	312,34	-1,67	87,66	28,73	312,34	-2,17	83,96
0,50 (7,0m)		80°C	-7,62	1,22	116,01	-5,17	32,15	1,22	116,01	-5,27	30,84
		100°C	-7,62	3,42	144,88	-4,57	40,03	3,42	144,88	-4,66	38,85
0,75 (10,5m)		80°C	1,2	0,64	46,67	0,93	22,50	0,64	46,67	1,03	14,17
		100°C	1,2	0,51	57,50	0,87	27,50	0,51	57,50	0,97	19,17

Tabela 7.12. Zestawienie wartości momentów zginających poziomych M_R dla ściany wewnętrznej B o grubości 0,30m baterii silosów prostopadłościennych przy różnych wariantach obciążenia w wybranych przekrojach na wysokości komory

Poziom h/H	Grubość ściany	Temperatura	Momenty zginające poziome M_R [kNm/m]									
			-	(2)	(2) + (5) zima	%	(2) + (6) zima	%	(2) + (5) lato	%	(2) + (6) lato	%
0,25 (3,5m)	0,30m	80°C	Przęsło	-37,90	-7,66	79,79	-28,21	25,57	-7,66	79,79	-29,60	79,79
			Podpora	87,40	129,52	48,19	100,88	15,42	129,52	48,19	98,96	48,19
		100°C	Przęsło	-37,90	-0,11	99,71	-25,94	31,56	-0,11	99,71	-27,34	99,71
			Podpora	87,40	140,04	60,23	104,03	19,03	140,04	60,23	102,11	60,23
0,50 (7,0m)	0,30m	80°C	Przęsło	-32,34	-28,62	11,50	-30,50	5,69	-28,62	11,50	-31,19	11,50
			Podpora	111,92	100,99	12,21	109,72	1,97	100,99	12,21	109,17	12,21
		100°C	Przęsło	-32,34	-27,69	14,38	-30,12	6,86	-27,69	14,38	-30,81	14,38
			Podpora	111,92	98,25	12,21	109,11	2,51	98,25	12,21	108,54	12,21
0,75 (10,5m)	0,30m	80°C	Przęsło	-13,37	-12,76	4,56	-13,09	2,09	-12,76	4,56	-13,19	4,56
			Podpora	98,67	97,92	0,76	98,12	0,56	97,92	0,76	98,40	0,76
		100°C	Przęsło	-13,37	-12,61	5,68	-13,03	2,54	-12,61	5,68	-13,13	5,68
			Podpora	98,67	97,73	0,95	98,02	0,66	97,73	0,95	98,30	0,95

Tabela 7.13. Zestawienie wartości sił podłużnych pionowych N dla ściany wewnętrznej B o grubości 0,30m baterii silosów prostopadłościennych przy różnych wariantach obciążenia w wybranych przekrojach na wysokości komory

Poziom <i>h/H</i>	Grubość ściany	Temperatura	Siły podłużne pionowe <i>N</i> [kN/m]								
			(1)	(1) + (3) zima	%	(1) + (4) zima	%	(1) + (3) lato	%	(1) + (4) lato	%
0,25 (3,5m)	0,30m	80°C	-148,60	-1584,15	966,05	-1834,99	1134,85	-1237,09	732,50	-1336,67	799,51
		100°C	-148,60	-1925,44	1195,72	-2220,93	1394,57	-1578,3	962,11	-1722,53	1059,17
0,50 (7,0m)		80°C	-340,61	-2573,70	655,61	-3099,35	809,94	-1874,01	450,19	-2082,69	511,46
		100°C	-340,61	-3078,13	803,71	-3697,36	985,51	-2378,28	598,24	-2680,53	686,98
0,75 (10,5m)		80°C	-529,28	-2870,25	442,29	-3546,95	570,15	-1973,64	272,89	-2242,28	323,65
		100°C	-529,28	-3372,04	537,10	-4169,20	687,71	-2475,22	367,66	-2864,32	441,17

Tabela 7.14. Zestawienie wartości sił podłużnych poziomych R dla ściany wewnętrznej B o grubości 0,30m baterii silosów prostopadłościennych przy różnych wariantach obciążenia w wybranych przekrojach na wysokości komory

Poziom <i>h/H</i>	Grubość ściany	Temperatura	Siły podłużne poziome <i>R</i> [kN/m]								
			(1)	(1) + (3) zima	%	(1) + (4) zima	%	(1) + (3) lato	%	(1) + (4) lato	%
0,25 (3,5m)	0,30m	80°C	159,15	-1220,31	866,77	-1437,79	1003,42	-986,05	719,57	-1072,38	773,82
		100°C	159,15	-1564,70	1083,16	-1820,89	1244,13	-1330,37	935,92	-1455,42	1014,50
0,50 (7,0m)		80°C	237,36	-1441,84	707,45	-1941,15	917,81	-821,66	446,17	-1019,88	529,68
		100°C	237,36	-1805,58	860,69	-2393,77	1108,50	-1185,25	599,35	-1472,35	720,30
0,75 (10,5m)		80°C	208,51	-2432,83	1266,77	-2919,85	1500,34	-1816,16	971,02	-2009,50	1063,74
		100°C	208,51	-3064,41	1569,67	-3638,13	1844,82	-2447,6	1273,85	-2727,64	1408,16

W przypadku ścian wewnętrznych dla ściany B o grubości $t = 0,30$ m obciążonych symetrycznie z obu stron parciem materiału sypkiego uzyskano wzajemne zrównoważenie oddziaływań normalnych do powierzchni ściany. Parcie działające z jednej komory jest równoważone przez parcie działające z komory sąsiedniej, dlatego w ścianie wewnętrznej nie powstają istotne efekty zginania. W związku z tym momenty zginające pionowe M_N oraz momenty zginające poziome M_R przyjmują wartości równe zero lub pomijalnie małe.

Tabela 7.15. Zestawienie wartości sił podłużnych pionowych N dla odpowiednich grubości ściany zewnętrznej C baterii silosów prostopadłościennych przy różnych wariantach obciążenia w wybranych przekrojach na wysokości komory

Poziom h/H	Grubość ściany	Temperatura	Siły podłużne pionowe N [kN/m]								
			(1)	(1) + (3) zima	%	(1) + (4) zima	%	(1) + (3) lato	%	(1) + (4) lato	%
0,25 (3,5m)	0,25m	80°C	-124,69	1571,24	1360,12	2416,36	2037,89	420,30	437,08	756,03	706,33
		100°C	-124,69	1851,46	1584,85	2847,03	2383,29	700,79	662,03	1186,96	1051,93
	0,30m	80°C	-130,95	1838,22	1503,76	2845,24	2272,77	509,67	489,21	909,44	794,49
		100°C	-130,95	2165,20	1753,46	3351,49	2659,37	836,34	738,67	1415,37	1180,85
	0,35m	80°C	-137,20	2095,67	1627,46	3258,24	2474,81	596,63	534,86	1058,11	871,22
		100°C	-137,20	2467,46	1898,44	3836,99	2896,64	968,78	806,11	1637,21	1293,30
0,50 (7,0m)	0,25m	80°C	-282,66	2034,08	819,62	3179,32	1224,79	475,83	268,34	930,78	429,29
		100°C	-282,66	2419,20	955,87	3768,31	1433,16	861,31	404,72	1520,13	637,79
	0,30m	80°C	-295,57	2417,16	917,80	3799,64	1385,53	596,79	301,91	1145,61	487,59
		100°C	-295,57	2869,24	1070,75	4497,82	1621,74	1048,44	454,72	1843,36	723,66
	0,35m	80°C	-308,28	2790,73	1005,26	4405,70	1529,12	714,95	331,92	1356,01	539,86
		100°C	-308,28	3307,52	1172,89	5209,98	1790,02	1232,24	499,71	2160,79	800,92
0,75 (10,5m)	0,25m	80°C	-457,93	1752,43	482,69	2825,81	717,08	282,36	161,66	711,75	255,43
		100°C	-457,93	2123,13	563,64	3387,58	839,76	656,39	243,34	1273,86	378,18
	0,30m	80°C	-477,97	2121,06	543,76	3423,18	816,19	397,52	183,17	914,44	291,32
		100°C	-477,97	2557,60	635,10	4091,51	956,02	833,66	274,42	1582,37	431,06
	0,35m	80°C	-497,59	2481,79	598,76	4009,04	905,69	507,37	201,97	1113,61	323,80
		100°C	-497,59	2982,15	699,32	4781,29	1060,89	1008,20	302,62	1886,31	479,09

Tabela 7.16. Zestawienie wartości sił podłużnych poziomych R dla odpowiednich grubości ściany zewnętrznej C baterii silosów prostopadłościennych przy różnych wariantach obciążenia w wybranych przekrojach na wysokości komory

Poziom <i>h/H</i>	Grubość ściany	Temperatura	Siły podłużne poziome <i>R</i> [kN/m]								
			(1)	(1) + (3) zima	%	(1) + (4) zima	%	(1) + (3) lato	%	(1) + (4) lato	%
0,25 (3,5m)	0,25m	80°C	86,22	246,33	185,70	539,30	525,49	-172,84	300,46	-56,45	165,47
		100°C	86,22	221,29	156,66	566,42	556,95	-197,78	329,39	-29,24	133,91
	0,30m	80°C	87,03	295,78	239,86	644,77	640,86	-193,22	322,02	-54,68	162,83
		100°C	87,03	272,79	213,44	683,91	685,83	-216,33	348,57	-15,66	117,99
	0,35m	80°C	87,89	352,95	301,58	757,74	762,15	-206,99	335,51	-46,31	152,69
		100°C	87,89	333,78	279,77	810,63	822,32	-226,04	357,19	6,70	92,38
0,50 (7,0m)	0,25m	80°C	130,42	-106,12	181,37	-109,19	183,72	-112,26	186,08	-113,48	187,01
		100°C	130,42	-172,84	232,53	-176,46	235,30	-178,99	237,24	-180,75	238,59
	0,30m	80°C	131,19	-130,05	199,13	-120,22	191,64	-158,68	220,95	-154,78	217,98
		100°C	131,19	-207,36	258,06	-195,78	249,23	-235,99	279,88	-230,34	275,58
	0,35m	80°C	131,96	-146,64	211,12	-118,97	190,16	-204,45	254,93	-193,46	246,61
		100°C	131,96	-233,61	277,03	-201,00	252,32	-291,40	320,82	-275,49	308,77
0,75 (10,5m)	0,25m	80°C	121,71	60,55	50,25	458,69	276,87	-490,37	502,90	-332,22	372,96
		100°C	121,71	47,81	60,72	421,19	246,06	-598,60	591,82	-369,57	403,65
	0,30m	80°C	121,40	87,85	27,64	553,52	355,95	-631,81	620,44	-431,07	455,08
		100°C	121,40	45,13	62,83	510,55	320,55	-764,95	730,11	-474,19	490,60
	0,35m	80°C	121,11	137,21	13,29	655,94	441,61	-777,50	741,98	-531,90	539,19
		100°C	121,11	101,13	16,50	607,76	401,82	-936,65	873,39	-579,90	578,82

Tabela 7.17. Zestawienie wartości momentów zginających pionowych M_N dla odpowiednich grubości ściany zewnętrznej C baterii silosów prostopadłościennych przy różnych wariantach obciążenia w wybranych przekrojach na wysokości komory

Poziom h/H	Grubość ściany	Temperatura	Momenty zginające pionowe M_N [kNm/m]								
			(1)	(1) + (3) zima	%	(1) + (4) zima	%	(1) + (3) lato	%	(1) + (4) lato	%
0,25 (3,5m)	0,25m	80°C	-10,45	89,71	958,47	8,23	178,76	26,96	357,99	-5,42	48,13
		100°C	-10,45	107,13	1125,17	11,18	206,99	44,37	524,59	-2,49	76,17
	0,30m	80°C	-10,74	146,99	1468,62	21,34	298,70	47,71	544,23	-2,17	79,80
		100°C	-10,74	174,37	1723,56	26,36	345,44	75,08	799,07	2,85	126,54
	0,35m	80°C	-11,04	219,09	2084,51	39,46	457,43	73,62	766,85	2,34	121,20
		100°C	11,04	258,91	2445,20	47,40	529,35	113,45	1127,63	10,20	192,39
0,50 (7,0m)	0,25m	80°C	-14,44	87,45	705,61	3,51	124,31	25,55	276,94	-7,80	45,98
		100°C	-14,44	105,48	830,47	6,64	145,98	43,58	401,80	-4,68	67,59
	0,30m	80°C	-14,92	146,04	1078,82	15,58	204,42	48,10	422,39	-3,69	75,27
		100°C	-14,92	174,54	1269,84	20,86	239,81	76,60	613,40	1,59	110,66
	0,35m	80°C	-15,44	220,01	1524,94	32,15	308,23	76,57	595,92	1,99	112,89
		100°C	-15,44	261,64	1794,56	40,43	361,85	118,19	865,48	10,20	166,06
0,75 (10,5m)	0,25m	80°C	-24,06	69,52	388,94	-17,01	29,30	9,88	141,06	-24,50	1,83
		100°C	-24,06	85,62	455,86	-16,27	32,38	25,98	207,98	-23,64	1,75
	0,30m	80°C	-24,98	122,24	589,35	-12,02	51,88	27,54	210,25	-24,79	0,76
		100°C	-24,98	147,46	690,31	-10,70	57,17	52,76	311,21	-24,44	2,16
	0,35m	80°C	-26,02	188,35	823,87	-4,64	82,17	49,27	289,35	-25,78	0,92
		100°C	-26,02	224,94	964,49	-2,40	90,78	85,76	429,59	-24,88	4,38

Tabela 7.18. Zestawienie wartości momentów zginających poziomych M_R dla odpowiednich grubości ściany zewnętrznej C baterii silosów prostopadłościennych przy różnych wariantach obciążenia w wybranych przekrojach na wysokości komory

Poziom h/H	Grubość ściany	Temperatura	Momenty zginające poziome M_R [kNm/m]									
			-	(1)	(1) + (3) zima	%	(1) + (4) zima	%	(1) + (3) lato	%	(1) + (4) lato	%
0,25 (3,5m)	0,25m	80°C	Przęsło	-41,08	50,66	223,32	-29,20	28,92	-6,32	84,62	-38,04	7,40
			Podpora	84,72	198,61	134,43	105,83	24,92	132,30	56,16	95,49	12,71
		100°C	Przęsło	-41,08	66,69	262,34	-27,34	33,45	9,70	123,61	-36,21	11,85
			Podpora	84,72	219,24	158,78	109,96	29,79	152,93	80,51	99,67	17,65
	0,30m	80°C	Przęsło	-41,92	102,31	344,06	-21,63	48,40	12,74	130,39	-36,47	13,00
			Podpora	86,29	267,31	209,78	122,51	41,97	161,90	87,62	104,42	21,01
		100°C	Przęsło	-41,92	127,55	404,27	-18,46	55,96	37,99	190,62	-33,29	20,59
			Podpora	86,29	300,14	247,83	129,55	50,13	195,73	126,83	111,49	29,20
	0,35m	80°C	Przęsło	-42,78	167,17	490,77	-11,04	74,19	36,90	186,26	-33,86	20,85
			Podpora	87,84	354,21	303,24	144,71	64,74	199,08	126,64	115,89	31,93
		100°C	Przęsło	-42,78	203,89	576,60	-5,95	86,09	73,59	272,02	-28,85	32,56
			Podpora	87,84	402,48	358,20	155,80	77,37	247,35	181,59	126,92	44,49
0,50 (7,0m)	0,25m	80°C	Przęsło	-62,17	36,15	158,15	-48,22	22,44	-23,75	61,80	-57,26	7,90
			Podpora	127,61	226,71	77,66	141,70	11,04	167,41	31,19	133,63	4,72
		100°C	Przęsło	-62,17	53,52	186,09	-45,82	26,30	-6,37	89,75	-54,88	11,73
			Podpora	127,61	244,39	91,51	144,30	13,08	185,09	45,04	136,21	6,74
	0,30m	80°C	Przęsło	-63,43	91,47	244,21	-39,68	37,44	-3,01	95,25	-55,08	13,16
			Podpora	129,99	286,31	120,26	153,88	18,38	192,87	48,37	140,27	7,91
		100°C	Przęsło	-63,43	118,86	287,39	-35,63	43,83	24,38	138,44	-51,03	19,55
			Podpora	129,99	314,26	141,76	158,26	21,75	220,82	69,87	144,65	11,28
	0,35m	80°C	Przęsło	-64,71	161,26	349,20	-27,64	57,29	23,30	136,01	-51,68	20,14
			Podpora	132,38	360,69	172,47	169,55	28,08	224,42	69,53	148,51	12,18

Analiza oddziaływań statycznych i termicznych w żelbetowej baterii silosów

0,75 (10,5m)		100°C	Przęsło	-64,71	201,16	410,86	-21,27	67,13	63,19	197,65	-45,39	29,86
			Podpora	132,38	401,51	203,30	176,45	33,29	265,23	100,36	155,32	17,33
	0,25m	80°C	Przęsło	-64,96	37,36	157,51	-41,95	35,42	-25,56	60,65	-57,07	12,15
			Podpora	136,70	232,04	69,74	140,73	2,95	175,13	28,11	138,56	1,36
		100°C	Przęsło	-64,96	55,35	185,21	-38,04	41,44	-7,58	88,33	-53,18	18,13
			Podpora	136,70	249,04	82,18	141,49	3,50	192,15	40,56	139,28	1,89
	0,30m	80°C	Przęsło	-66,01	95,21	244,24	-27,83	57,84	-3,81	94,23	-52,65	20,24
			Podpora	138,64	289,02	108,47	146,14	5,41	198,65	43,28	141,58	2,12
		100°C	Przęsło	-66,01	123,60	287,24	-21,33	67,69	24,58	137,24	-46,16	30,07
			Podpora	138,64	315,80	127,78	147,45	6,35	225,45	62,62	142,87	3,05
	0,35m	80°C	Przęsło	-67,06	168,13	350,72	-8,78	86,91	23,93	135,68	-46,30	30,96
			Podpora	140,48	359,88	156,18	153,28	9,11	227,21	61,74	145,06	3,26
		100°C	Przęsło	-67,06	209,56	412,50	1,25	101,86	65,36	197,46	-36,33	45,82
			Podpora	140,48	398,78	183,87	155,51	10,70	266,13	89,44	147,20	4,78

Tabela 7.19. Zestawienie wartości sił podłużnych pionowych N dla ściany zewnętrznej C o grubości 0,30m baterii silosów prostopadłościennych przy różnych wariantach obciążenia w wybranych przekrojach na wysokości komory

Poziom <i>h/H</i>	Grubość ściany	Temperatura	Siły podłużne pionowe <i>N</i> [kN/m]								
			(2)	(2) + (5) zima	%	(2) + (6) zima	%	(2) + (5) lato	%	(2) + (6) lato	%
0,25 (3,5m)	0,30m	80°C	-95,57	1463,42	1631,25	2639,81	2862,17	134,99	241,25	473,68	595,64
		100°C	-95,57	1687,23	1865,44	3052,29	3293,77	358,25	474,86	890,32	1031,59
0,50 (7,0m)		80°C	-204,58	2247,07	1198,38	3757,64	1936,76	426,77	308,61	946,59	562,70
		100°C	-204,58	2633,96	1387,50	4397,57	2249,56	813,08	497,44	1591,48	877,93
0,75 (10,5m)		80°C	-340,49	2187,42	742,43	3645,71	1170,72	463,93	236,25	1033,86	403,64
		100°C	-340,49	2606,22	865,43	4317,41	1368,00	882,23	359,11	1710,03	602,23

Tabela 7.20. Zestawienie wartości sił podłużnych poziomych R dla ściany zewnętrznej C o grubości 0,30m baterii silosów prostopadłościennych przy różnych wariantach obciążenia w wybranych przekrojach na wysokości komory

Poziom <i>h/H</i>	Grubość ściany	Temperatura	Siły podłużne poziome <i>R</i> [kN/m]								
			(2)	(2) + (5) zima	%	(2) + (6) zima	%	(2) + (5) lato	%	(2) + (6) lato	%
0,25 (3,5m)	0,30m	80°C	92,57	218,04	135,54	582,68	529,45	-270,96	392,71	-153,6	265,93
		100°C	92,57	174,23	88,21	598,93	547,00	-314,9	440,18	-136,11	247,03
0,50 (7,0m)		80°C	151,56	-171,59	213,22	190,19	25,49	-200,12	232,04	-36,25	123,92
		100°C	151,56	-264,28	274,37	166,3	9,73	-293,01	293,33	-62,44	141,20
0,75 (10,5m)		80°C	130,48	-39,66	130,40	684,18	424,36	-639,93	590,44	-374,49	387,01
		100°C	130,48	-97,57	174,78	660,37	406,11	-777,42	695,82	-396,38	403,79

Tabela 7.21. Zestawienie wartości momentów zginających pionowych M_N dla ściany zewnętrznej C o grubości 0,30m baterii silosów prostopadłościennych przy różnych wariantach obciążenia w wybranych przekrojach na wysokości komory

Poziom <i>h/H</i>	Grubość ściany	Temperatura	Momenty zginające pionowe M_N [kNm/m]								
			(2)	(2) + (5) zima	%	(2) + (6) zima	%	(2) + (5) lato	%	(2) + (6) lato	%
0,25 (3,5m)	0,30m	80°C	-10,45	146,99	1506,60	21,34	304,21	47,71	556,56	-2,17	79,23
		100°C	-10,45	174,37	1768,61	26,36	352,25	75,08	818,47	2,85	127,27
0,50 (7,0m)		80°C	-14,19	146,04	1129,18	15,58	209,80	48,11	439,04	-3,69	74,00
		100°C	-14,19	174,52	1329,88	20,87	247,08	76,61	639,89	1,59	111,21
0,75 (10,5m)		80°C	-24,37	122,24	601,60	-12,02	50,68	27,54	213,01	-24,79	1,72
		100°C	-24,37	147,46	705,09	-10,71	56,05	52,76	316,50	-24,44	0,29

Tabela 7.22. Zestawienie wartości momentów zginających poziomych M_R dla ściany zewnętrznej C o grubości 0,30m baterii silosów prostopadłościennych przy różnych wariantach obciążenia w wybranych przekrojach na wysokości komory

Poziom h/H	Grubość ściany	Temperatura	Momenty zginające poziome M_R [kNm/m]									
			-	(2)	(2) + (5) zima	%	(2) + (6) zima	%	(2) + (5) lato	%	(2) + (6) lato	%
0,25 (3,5m)	0,30m	80°C	Przęsło	-41,14	96,00	333,35	0,37	100,90	6,43	115,63	-30,94	24,79
			Podpora	87,06	272,40	212,89	159,34	83,02	166,99	91,81	114,52	31,54
		100°C	Przęsło	-41,14	119,47	390,40	6,87	116,70	29,89	172,65	-24,42	40,64
			Podpora	87,06	306,32	251,85	172,22	97,82	200,91	130,77	127,41	46,35
0,50 (7,0m)	0,30m	80°C	Przęsło	-62,04	89,84	244,81	-27,79	55,21	-4,65	92,50	-50,96	17,86
			Podpora	133,88	287,21	114,53	134,79	0,68	193,54	44,56	130,95	2,19
		100°C	Przęsło	-62,04	116,47	287,73	-22,04	64,47	21,99	135,44	-45,22	27,11
			Podpora	133,88	315,33	135,53	134,77	7,39	221,67	65,57	131,12	2,06
0,75 (10,5m)	0,30m	80°C	Przęsło	-65,06	95,63	246,99	-25,94	60,13	-3,39	94,79	-51,73	20,49
			Podpora	143,40	293,91	104,96	150,38	4,87	203,49	41,90	146,44	2,12
		100°C	Przęsło	-65,06	123,89	290,42	-19,34	70,27	24,87	138,23	-45,12	30,65
			Podpora	143,40	320,71	123,65	151,65	5,75	230,33	60,62	147,65	2,96

Tabela 7.23. Zestawienie wartości sił podłużnych pionowych N dla odpowiednich grubości ściany zewnętrznej D baterii silosów prostopadłościennych przy różnych wariantach obciążenia w wybranych przekrojach na wysokości komory

Poziom <i>h/H</i>	Grubość ściany	Temperatura	Siły podłużne pionowe <i>N</i> [kN/m]								
			(1)	(1) + (3) zima	%	(1) + (4) zima	%	(1) + (3) lato	%	(1) + (4) lato	%
0,25 (3,5m)	0,25m	80°C	-102,41	930,72	1008,82	1305,61	1374,89	419,01	509,15	567,93	654,56
		100°C	-102,41	1132,85	1206,19	1574,46	1637,41	621,25	706,63	836,91	917,22
	0,30m	80°C	-108,57	1085,92	1100,20	1536,46	1515,18	488,90	550,31	668,11	715,37
		100°C	-108,57	1317,86	1313,83	1849,66	1803,66	721,59	764,63	981,17	1003,72
	0,35m	80°C	-114,78	1230,97	1172,46	1757,11	1630,85	553,38	582,12	762,23	764,08
		100°C	-114,78	1492,48	1400,30	2112,28	1940,29	815,05	810,10	1117,56	1073,65
0,50 (7,0m)	0,25m	80°C	-246,31	1227,46	598,34	1680,11	782,11	607,28	346,55	787,11	419,56
		100°C	-246,31	1533,99	722,79	2067,22	939,28	913,95	471,06	1174,35	576,78
	0,30m	80°C	-258,41	1462,43	665,93	2012,03	878,62	731,26	382,98	949,44	467,42
		100°C	-258,41	1819,36	804,06	2466,79	1054,60	1088,02	521,04	1404,03	643,33
	0,35m	80°C	-270,55	1689,35	724,41	2334,03	970,09	848,87	413,76	1104,77	508,34
		100°C	-270,55	2094,47	874,15	2853,91	1154,85	1254,19	563,57	1624,85	700,57
0,75 (10,5m)	0,25m	80°C	-418,64	1091,44	360,71	1686,14	502,77	274,63	165,60	510,87	222,03
		100°C	-418,64	1375,45	428,55	2076,02	595,90	558,82	233,48	900,93	315,20
	0,30m	80°C	-437,77	1325,27	402,73	2050,36	568,36	359,66	182,16	647,50	247,91
		100°C	-437,77	1655,10	478,08	2509,27	673,19	689,26	257,45	1106,18	352,69
	0,35m	80°C	-456,68	1549,81	439,36	2403,67	626,34	437,85	195,88	776,79	270,10
		100°C	-456,68	1922,87	521,05	2928,74	741,31	811,18	277,63	1302,11	385,13

Tabela 7.24. Zestawienie wartości sił podłużnych poziomych R dla odpowiednich grubości ściany zewnętrznej D baterii silosów prostopadłościennych przy różnych wariantach obciążenia w wybranych przekrojach na wysokości komory

Poziom <i>h/H</i>	Grubość ściany	Temperatura	Siły podłużne poziome <i>R</i> [kN/m]								
			(1)	(1) + (3) zima	%	(1) + (4) zima	%	(1) + (3) lato	%	(1) + (4) lato	%
0,25 (3,5m)	0,25m	80°C	94,09	110,88	17,84	100,41	6,72	114,72	21,93	107,33	14,07
		100°C	94,09	114,81	22,02	103,02	9,49	118,81	26,27	108,88	15,72
	0,30m	80°C	95,09	130,47	37,21	126,99	33,55	124,28	30,70	113,87	19,75
		100°C	95,09	138,60	45,76	142,17	49,51	130,55	37,29	117,75	23,83
	0,35m	80°C	96,10	154,62	60,89	134,84	40,31	136,88	42,43	122,08	27,03
		100°C	96,10	167,46	74,26	142,74	48,53	149,45	55,52	129,37	34,62
0,50 (7,0m)	0,25m	80°C	148,38	-50,56	134,07	-216,11	245,65	172,85	16,49	107,09	27,83
		100°C	148,38	-68,77	146,35	-263,78	277,77	156,38	5,39	59,36	59,99
	0,30m	80°C	150,08	-72,48	148,29	-269,98	279,89	183,96	22,57	105,55	29,67
		100°C	150,08	-91,83	161,19	-324,49	316,21	164,66	9,71	51,10	65,95
	0,35m	80°C	151,81	-89,66	159,06	-317,54	309,17	197,03	29,79	106,57	29,80
		100°C	151,81	-109,22	171,95	-377,66	348,77	177,40	16,86	46,38	69,45
0,75 (10,5m)	0,25m	80°C	148,78	65,74	55,81	57,04	61,66	65,71	55,83	62,88	57,74
		100°C	148,78	42,67	71,32	33,80	77,28	42,64	71,34	38,54	74,10
	0,30m	80°C	150,01	62,14	58,58	61,10	59,27	47,39	68,41	46,98	68,68
		100°C	150,01	35,29	76,47	34,07	77,29	20,54	86,31	19,94	86,71
	0,35m	80°C	151,13	62,48	58,66	63,77	57,80	28,37	81,23	31,35	79,26
		100°C	151,13	32,20	78,69	36,53	75,83	-1,91	101,26	2,42	98,40

Tabela 7.25. Zestawienie wartości momentów zginających pionowych M_N dla odpowiednich grubości ściany zewnętrznej D baterii silosów prostokątnych przy różnych wariantach obciążenia w wybranych przekrojach na wysokości komory

Poziom h/H	Grubość ściany	Temperatura	Momenty zginające pionowe M_N [kNm/m]								
			(1)	(1) + (3) zima	%	(1) + (4) zima	%	(1) + (3) lato	%	(1) + (4) lato	%
0,25 (3,5m)	0,25m	80°C	-10,44	91,19	973,47	11,27	207,95	26,42	353,07	-5,32	49,04
		100°C	-10,44	108,68	1141,00	14,57	239,56	43,91	520,59	-2,04	80,46
	0,30m	80°C	-10,71	149,29	1493,93	26,07	343,42	46,96	538,47	-1,94	81,89
		100°C	-10,71	176,79	1750,70	31,65	395,52	74,48	795,42	3,64	133,99
	0,35m	80°C	-10,99	222,44	2124,02	46,29	521,20	72,69	761,42	2,78	125,30
		100°C	-10,99	262,45	2488,08	55,05	600,91	112,71	1125,57	11,47	204,37
0,50 (7,0m)	0,25m	80°C	-14,41	89,06	718,04	6,37	144,21	25,47	276,75	-7,37	48,85
		100°C	-14,41	107,25	844,27	9,89	168,63	43,67	403,05	-3,87	73,14
	0,30m	80°C	-14,88	148,78	1099,87	20,51	237,84	48,02	422,72	-2,91	80,44
		100°C	-14,88	177,56	1293,28	26,46	277,82	76,80	616,13	3,05	120,50
	0,35m	80°C	-15,37	224,29	1559,27	39,92	359,73	76,50	597,72	3,31	121,54
		100°C	-15,37	266,37	1833,05	49,28	420,62	118,58	871,50	12,60	181,98
0,75 (10,5m)	0,25m	80°C	-23,77	76,32	421,08	-6,59	72,28	11,66	149,05	-21,28	10,48
		100°C	-23,77	93,39	492,89	-4,23	82,20	28,74	220,91	-18,94	20,32
	0,30m	80°C	-24,63	133,30	641,21	5,11	120,75	30,47	223,71	-20,44	17,01
		100°C	-24,63	160,15	750,22	9,14	137,11	57,32	332,72	-16,41	33,37
	0,35m	80°C	-25,59	205,05	901,29	21,43	183,74	53,75	310,04	-19,16	25,13
		100°C	-25,59	244,03	1053,61	27,83	208,75	92,74	462,41	-12,83	49,86

Tabela 7.26. Zestawienie wartości momentów zginających poziomych M_R dla odpowiednich grubości ściany zewnętrznej D baterii silosów prostopadłościennych przy różnych wariantach obciążenia w wybranych przekrojach na wysokości komory

Poziom h/H	Grubość ściany	Temperatura	Momenty zginające poziome M_R [kNm/m]									
			-	(1)	(1) + (3) zima	%	(1) + (4) zima	%	(1) + (3) lato	%	(1) + (4) lato	%
0,25 (3,5m)	0,25m	80°C	Przęsło	-41,00	53,98	231,66	-24,76	39,61	-4,66	88,63	-35,95	12,32
			Podpora	84,11	157,68	87,47	169,37	101,37	116,11	38,05	120,77	43,59
		100°C	Przęsło	-41,00	70,64	272,29	-22,08	46,15	11,99	129,24	-33,29	18,80
			Podpora	84,11	171,21	103,55	184,08	118,86	129,65	54,14	136,03	61,73
	0,30m	80°C	Przęsło	-41,86	107,74	357,38	-14,23	66,01	15,31	136,57	-33,13	20,86
			Podpora	87,40	340,77	289,90	229,28	162,33	191,25	118,82	146,99	68,18
		100°C	Przęsło	-41,86	133,99	420,09	-9,69	76,85	41,56	199,28	-28,58	31,72
			Podpora	87,40	386,40	342,11	255,07	191,84	236,87	171,02	172,77	97,68
	0,35m	80°C	Przęsło	-42,69	175,44	510,96	0,42	100,98	40,64	195,20	-28,86	32,40
			Podpora	89,34	466,96	422,68	309,75	246,71	244,14	173,27	181,75	103,44
		100°C	Przęsło	-42,69	213,69	600,56	7,60	117,80	78,88	284,77	-21,75	49,05
			Podpora	89,34	534,91	498,74	349,83	291,57	312,11	249,35	221,75	148,21
0,50 (7,0m)	0,25m	80°C	Przęsło	-62,09	39,08	162,94	-44,08	29,01	-22,45	63,84	-55,49	10,63
			Podpora	126,56	182,31	44,05	212,59	67,98	148,99	17,72	162,56	28,45
		100°C	Przęsło	-62,09	56,98	191,77	-40,95	34,05	-4,56	92,66	-52,37	15,65
			Podpora	126,56	192,27	51,92	227,60	79,84	158,95	25,59	177,55	40,29
	0,30m	80°C	Przęsło	-63,31	96,38	252,24	-32,69	48,37	-0,86	98,64	-52,10	17,71
			Podpora	131,68	368,48	179,83	272,86	107,21	226,55	72,05	188,59	43,22
		100°C	Przęsło	-63,31	124,64	296,87	-27,40	56,72	27,40	143,28	-46,81	26,06
			Podpora	131,68	410,76	211,94	298,12	126,40	268,82	104,15	213,84	62,39
	0,35m	80°C	Przęsło	-64,55	168,84	361,56	-16,75	74,05	26,62	141,24	-47,06	27,10
			Podpora	134,64	486,41	261,27	353,18	162,31	275,67	104,75	222,78	65,46

Analiza oddziaływań statycznych i termicznych w żelbetowej baterii silosów

0,75 (10,5m)		100°C	Przęsło	-64,55	210,09	425,47	-8,43	86,94	67,86	205,13	-38,82	39,86
			Podpora	134,64	549,19	307,90	392,34	191,40	338,46	151,38	261,89	94,51
	0,25m	80°C	Przęsło	-65,10	36,37	155,87	-44,05	32,33	-24,96	61,66	-56,90	12,60
			Podpora	135,92	194,99	43,46	216,12	59,01	159,15	17,09	168,22	23,76
		100°C	Przęsło	-65,10	54,38	183,53	-40,31	38,08	-6,95	89,32	-53,18	18,31
			Podpora	135,92	205,45	51,16	229,83	69,09	169,61	24,79	181,91	33,84
	0,30m	80°C	Przęsło	-66,16	93,88	241,90	-30,86	53,36	-2,77	95,81	-52,27	20,99
			Podpora	140,85	375,63	166,69	272,48	93,45	232,06	64,76	191,10	35,68
		100°C	Przęsło	-66,16	122,33	284,90	-24,60	62,82	25,68	138,81	-46,02	30,44
			Podpora	140,85	417,08	196,12	295,57	109,85	273,49	94,17	214,18	52,06
	0,35m	80°C	Przęsło	-67,21	166,53	347,78	-12,75	81,03	25,55	138,02	-45,59	32,17
			Podpora	143,41	492,06	243,11	347,69	142,44	278,14	93,95	220,82	53,98
		100°C	Przęsło	-67,21	208,08	409,60	-3,01	95,52	67,10	199,84	-35,92	46,56
			Podpora	143,41	553,45	285,92	383,48	167,40	339,53	136,75	256,54	78,89

Tabela 7.27. Zestawienie wartości sił podłużnych pionowych N dla ściany zewnętrznej D o grubości 0,30m baterii silosów prostokątnych przy różnych wariantach obciążenia w wybranych przekrojach na wysokości komory

Poziom <i>h/H</i>	Grubość ściany	Temperatura	Siły podłużne pionowe <i>N</i> [kN/m]								
			(2)	(2) + (5) zima	%	(2) + (6) zima	%	(2) + (5) lato	%	(2) + (6) lato	%
0,25 (3,5m)	0,30m	80°C	-82,50	1172,71	1521,47	878,45	1164,79	576,39	798,65	394,22	577,84
		100°C	-82,50	1420,75	1822,12	1066,97	1393,30	824,68	1099,61	582,37	805,90
0,50 (7,0m)		80°C	-175,38	1517,66	965,36	1802,35	1127,68	786,42	548,41	857,67	589,04
		100°C	-175,38	1867,57	1164,87	2196,61	1352,49	1136,29	747,90	1253,05	814,48
0,75 (10,5m)		80°C	-350,09	1433,76	509,54	2049,79	685,50	468,11	233,71	706,15	301,71
		100°C	-350,09	1768,76	605,23	2491,25	811,60	802,95	329,36	1149,58	428,37

Tabela 7.28. Zestawienie wartości sił podłużnych poziomych R dla ściany zewnętrznej D o grubości 0,30m baterii silosów prostokątnych przy różnych wariantach obciążenia w wybranych przekrojach na wysokości komory

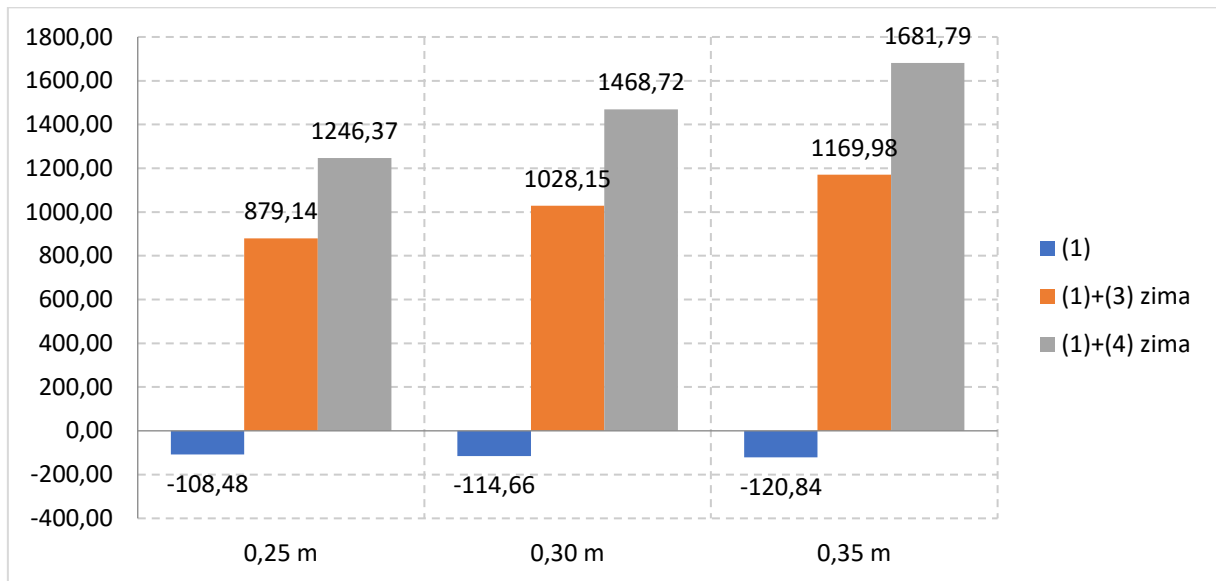
Poziom <i>h/H</i>	Grubość ściany	Temperatura	Siły podłużne poziome <i>R</i> [kN/m]								
			(2)	(2) + (5) zima	%	(2) + (6) zima	%	(2) + (5) lato	%	(2) + (6) lato	%
0,25 (3,5m)	0,30m	80°C	-1,87	83,15	4546,52	-153,64	8116,04	85,91	4694,12	-15,19	712,30
		100°C	-1,87	105,49	5741,18	-172,63	9131,55	108,39	5896,26	-32,66	1646,52
0,50 (7,0m)		80°C	53,83	-430,53	899,80	250,23	364,85	-173,83	422,92	109,23	102,92
		100°C	53,83	-515,07	1056,85	285,83	430,99	-258,85	580,87	146,63	172,39
0,75 (10,5m)		80°C	100,01	15,95	84,05	2,41	97,59	1,21	98,79	-4,31	104,31
		100°C	100,01	-9,96	109,96	-25,91	125,91	-24,71	124,71	-32,62	132,62

Tabela 7.29. Zestawienie wartości momentów zginających pionowych M_N dla ściany zewnętrznej D o grubości 0,30m baterii silosów prostopadłościennych przy różnych wariantach obciążenia w wybranych przekrojach na wysokości komory

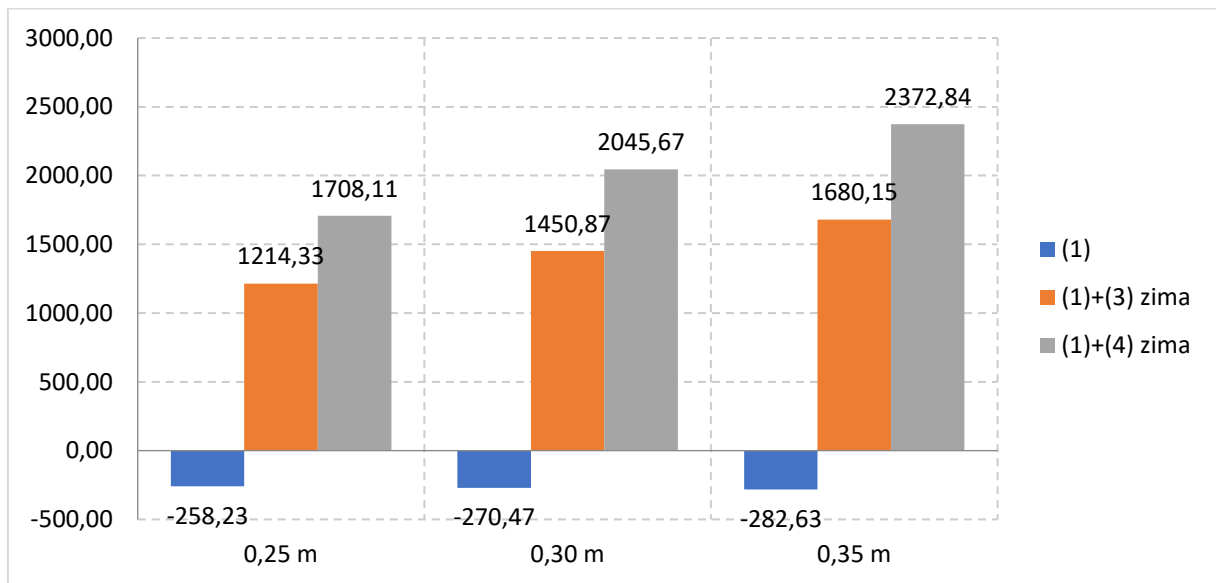
Poziom <i>h/H</i>	Grubość ściany	Temperatura	Momenty zginające pionowe M_N [kNm/m]								
			(2)	(2) + (5) zima	%	(2) + (6) zima	%	(2) + (5) lato	%	(2) + (6) lato	%
0,25 (3,5m)	0,30m	80°C	2,46	126,66	5048,78	118,25	4706,91	24,43	893,09	21,02	754,47
		100°C	2,46	145,22	5803,25	135,32	5400,81	42,99	1647,56	38,07	1447,56
0,50 (7,0m)		80°C	-4,48	145,51	3347,99	53,79	1300,67	44,76	1099,11	8,06	279,91
		100°C	-4,48	170,86	3913,84	62,79	1501,56	70,12	1665,18	17,07	481,03
0,75 (10,5m)		80°C	-19,62	137,58	801,22	9,45	148,17	34,76	277,17	-16,24	17,23
		100°C	-19,62	164,25	937,16	13,28	167,69	61,43	413,10	-12,41	36,75

Tabela 7.30. Zestawienie wartości momentów zginających poziomych M_R dla ściany zewnętrznej D o grubości 0,30m baterii silosów prostopadłościennych przy różnych wariantach obciążenia w wybranych przekrojach na wysokości komory

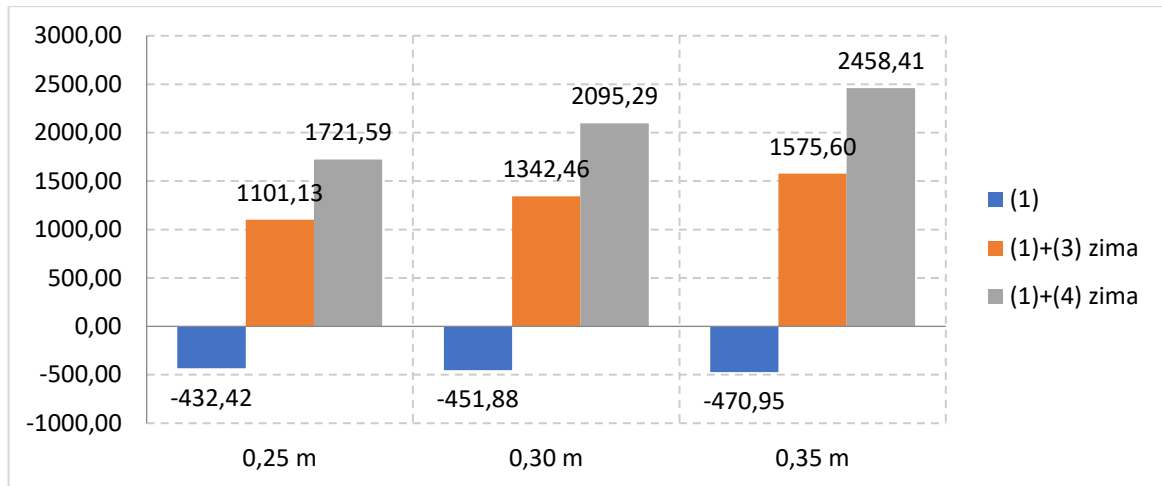
Poziom h/H	Grubość ściany	Temperatura	Momenty zginające poziome M_R [kNm/m]									
			-	(2)	(2) + (5) zima	%	(2) + (6) zima	%	(2) + (5) lato	%	(2) + (6) lato	%
0,25 (3,5m)	0,30m	80°C	Przęsło	-41,14	-0,94	117,96	12648,94	96,43	10358,51	25,48	2810,64	16,03
			Podpora	87,06	2,74	186,02	6689,05	225,33	8123,72	36,51	1232,48	49,15
		100°C	Przęsło	-41,14	-0,94	136,54	14625,53	111,08	11917,02	44,06	4787,23	30,67
			Podpora	87,06	2,74	214,12	7714,60	260,04	9390,51	64,61	2258,03	83,88
0,50 (7,0m)	0,30m	80°C	Przęsło	-62,04	-22,58	136,15	702,97	14,95	166,21	38,90	272,28	-9,58
			Podpora	133,88	48,42	285,36	489,34	167,00	244,90	143,42	196,20	95,05
		100°C	Przęsło	-62,04	-22,58	164,17	827,06	21,35	194,55	66,92	396,37	-3,19
			Podpora	133,88	48,42	327,68	576,75	187,92	288,10	185,72	283,56	116,10
0,75 (10,5m)	0,30m	80°C	Przęsło	-65,06	-43,94	115,36	362,54	-6,95	84,18	18,70	142,56	-29,85
			Podpora	143,40	96,03	332,22	245,95	222,93	132,15	188,64	96,44	144,94
		100°C	Przęsło	-65,06	-43,94	143,63	426,88	-0,44	99,00	46,97	206,90	-23,35
			Podpora	143,40	96,03	374,01	289,47	245,13	155,26	230,43	139,96	167,23



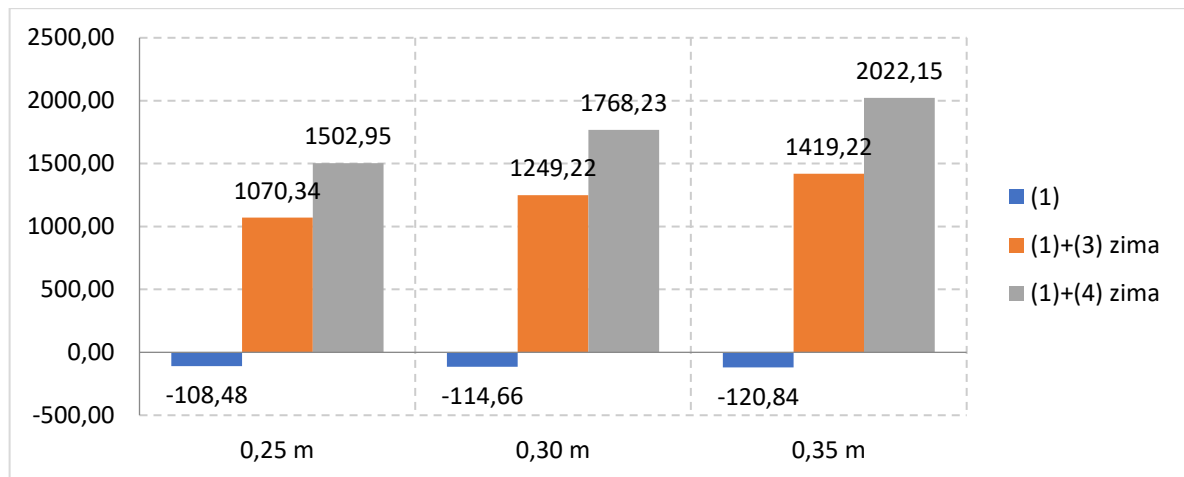
Rys. 7.2. Porównanie wartości sił podłużnych pionowych N dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,25H$ dla warunków zimowych



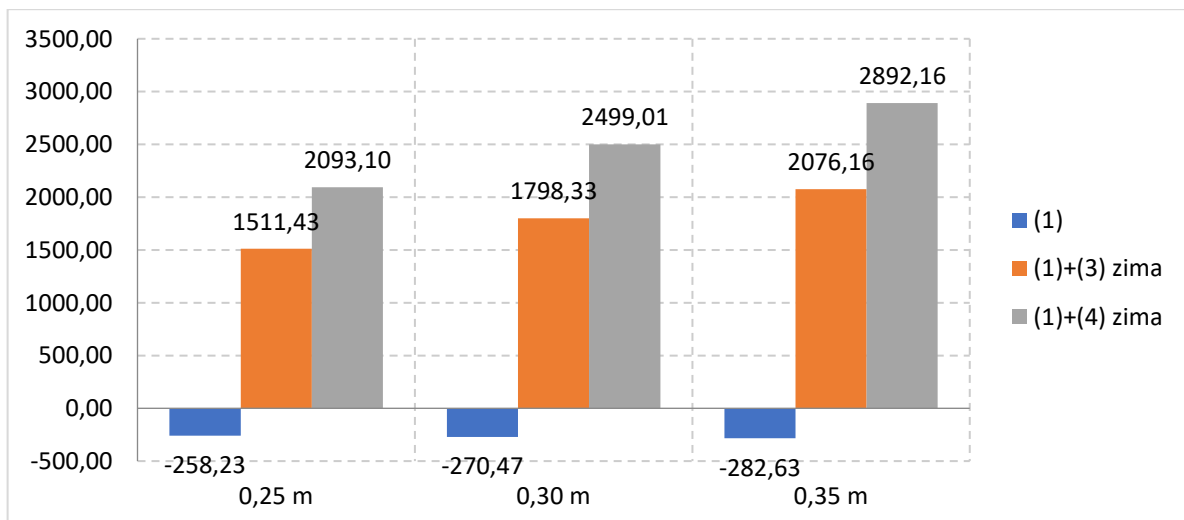
Rys. 7.3. Porównanie wartości sił podłużnych pionowych N dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,50H$ dla warunków zimowych



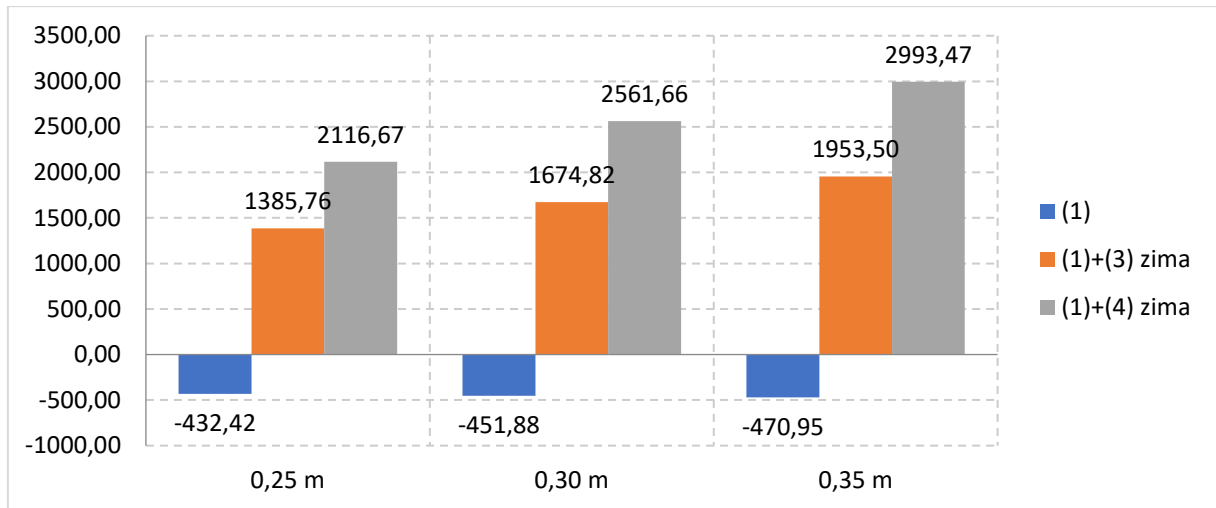
Rys. 7.4. Porównanie wartości sił podłużnych pionowych N dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,75H$ dla warunków zimowych



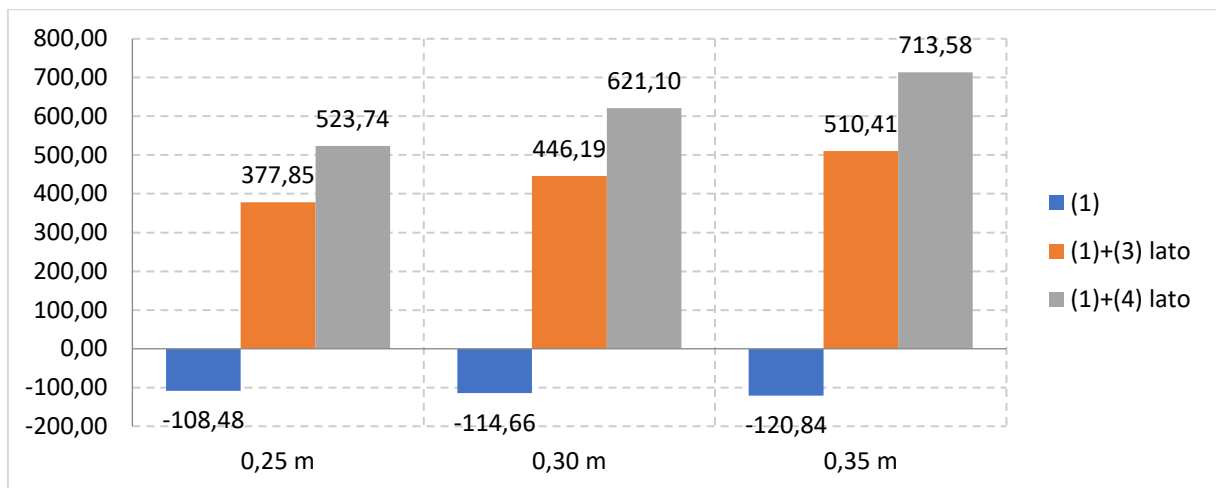
Rys. 7.5. Porównanie wartości sił podłużnych pionowych N dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,25H$ dla warunków zimowych



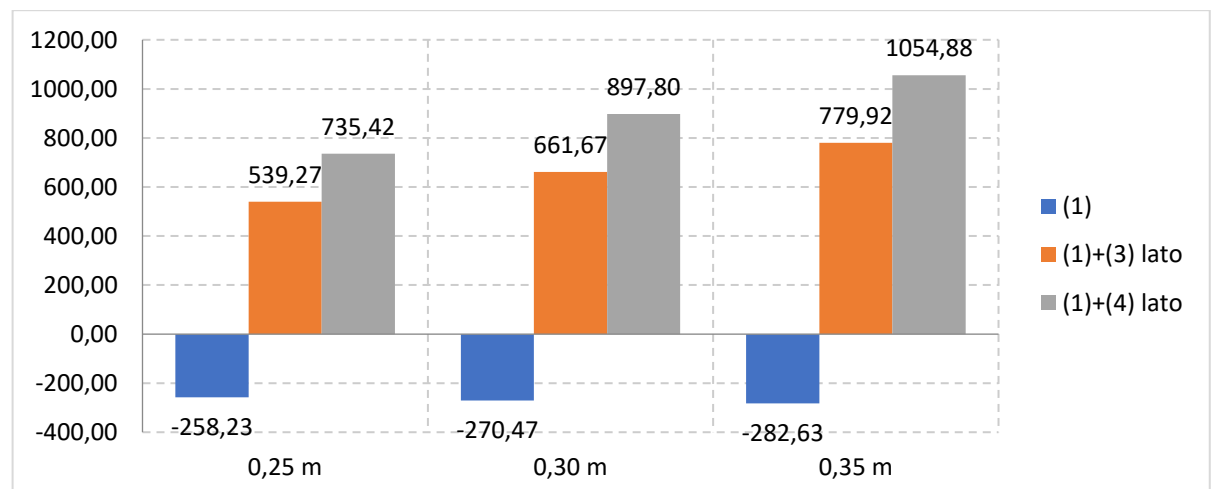
Rys. 7.6. Porównanie wartości sił podłużnych pionowych N dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,50H$ dla warunków zimowych



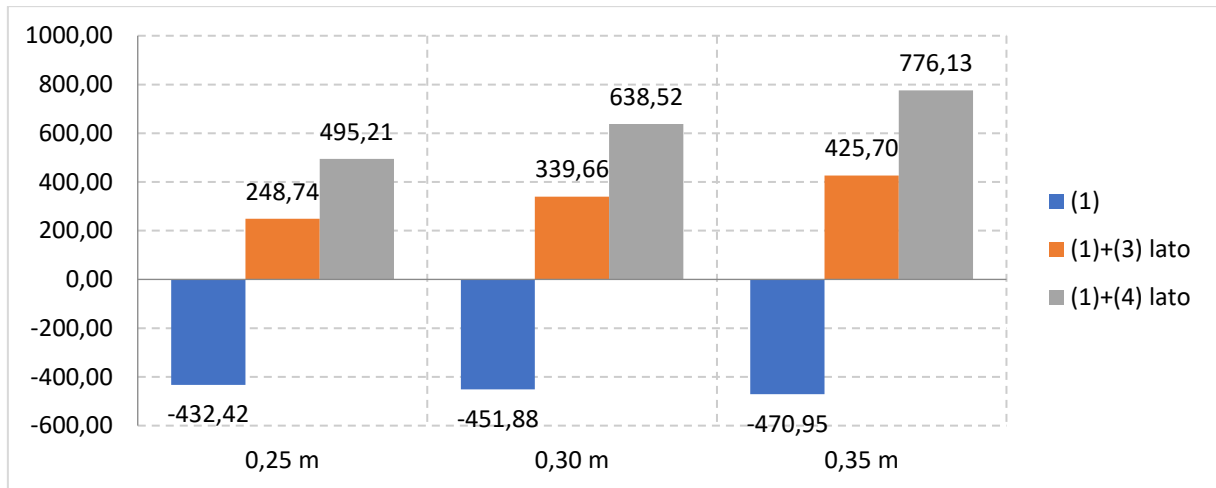
Rys. 7.7. Porównanie wartości sił podłużnych pionowych N dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,75H$ dla warunków zimowych



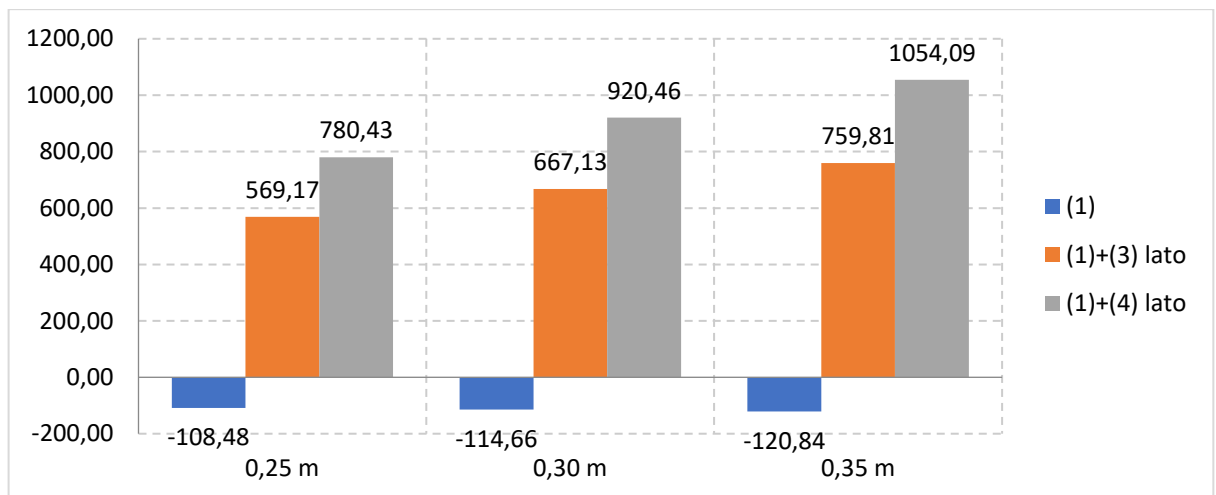
Rys. 7.8. Porównanie wartości sił podłużnych pionowych N dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,25H$ dla warunków letnich



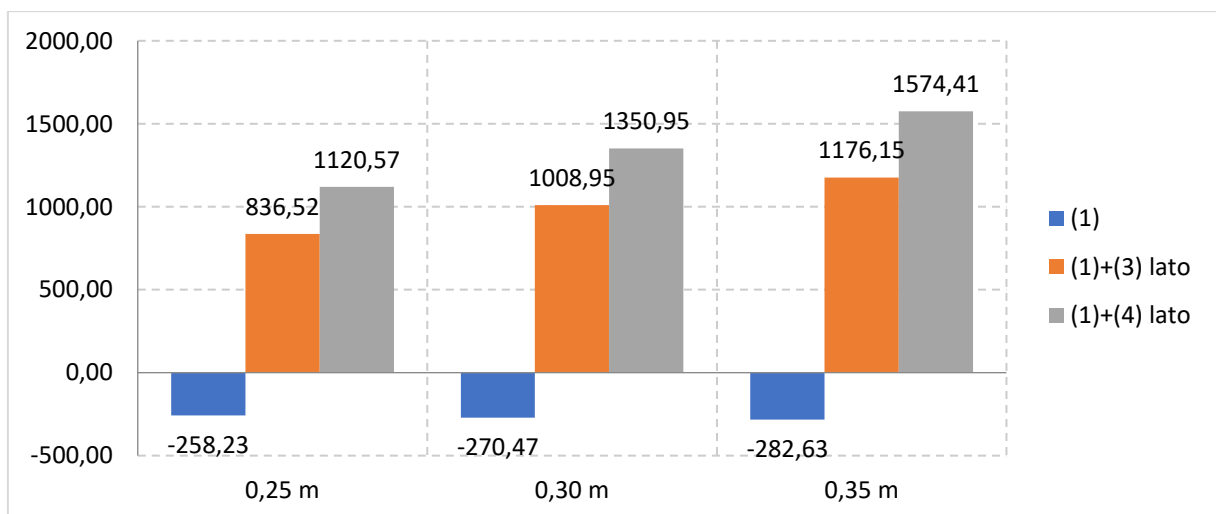
Rys. 7.9. Porównanie wartości sił podłużnych pionowych N dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,50H$ dla warunków letnich



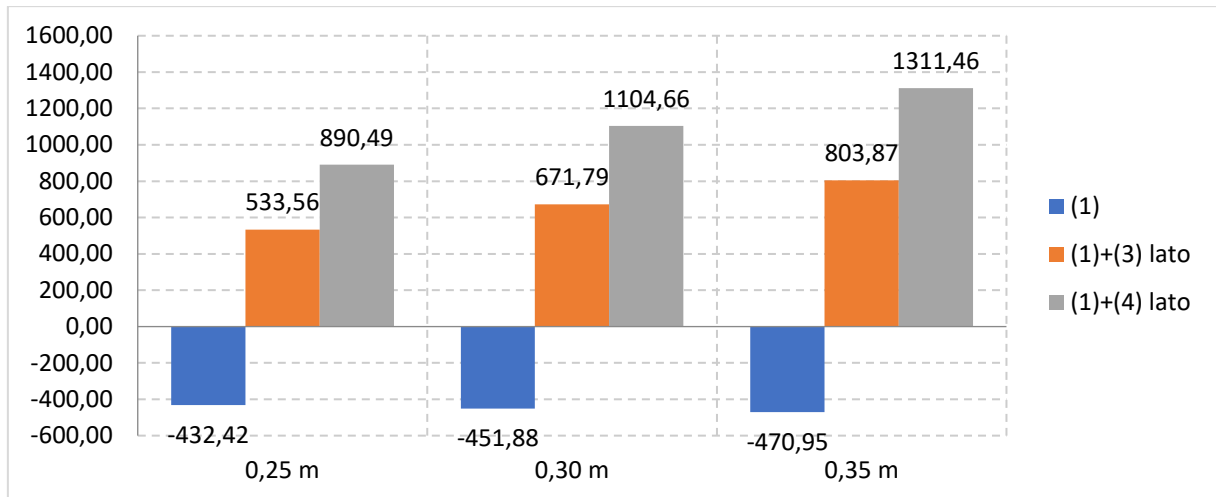
Rys. 7.10. Porównanie wartości sił podłużnych pionowych N dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,75H$ dla warunków letnich



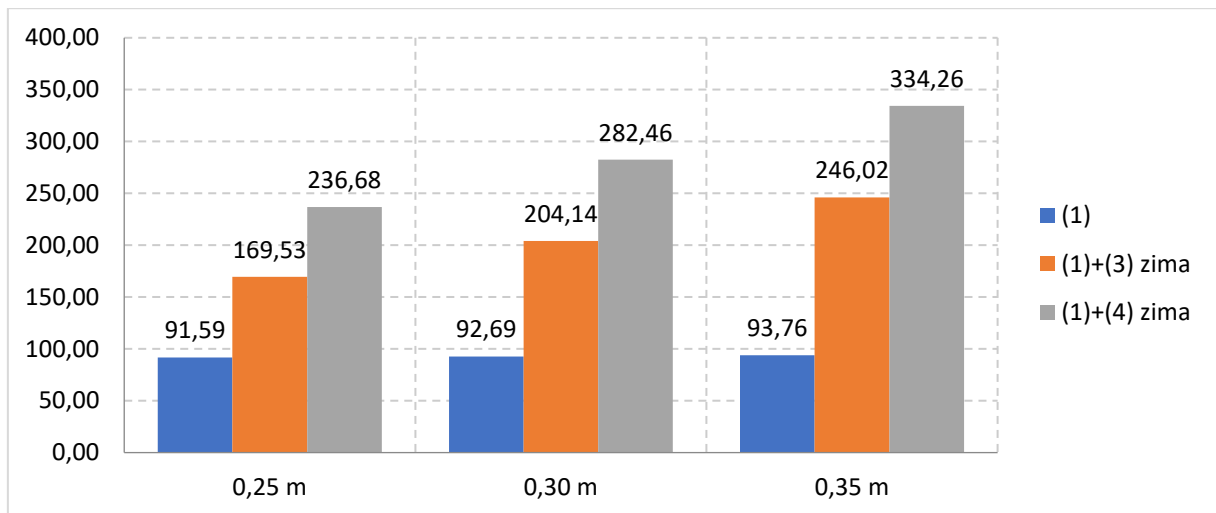
Rys. 7.11. Porównanie wartości sił podłużnych pionowych N dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,25H$ dla warunków letnich



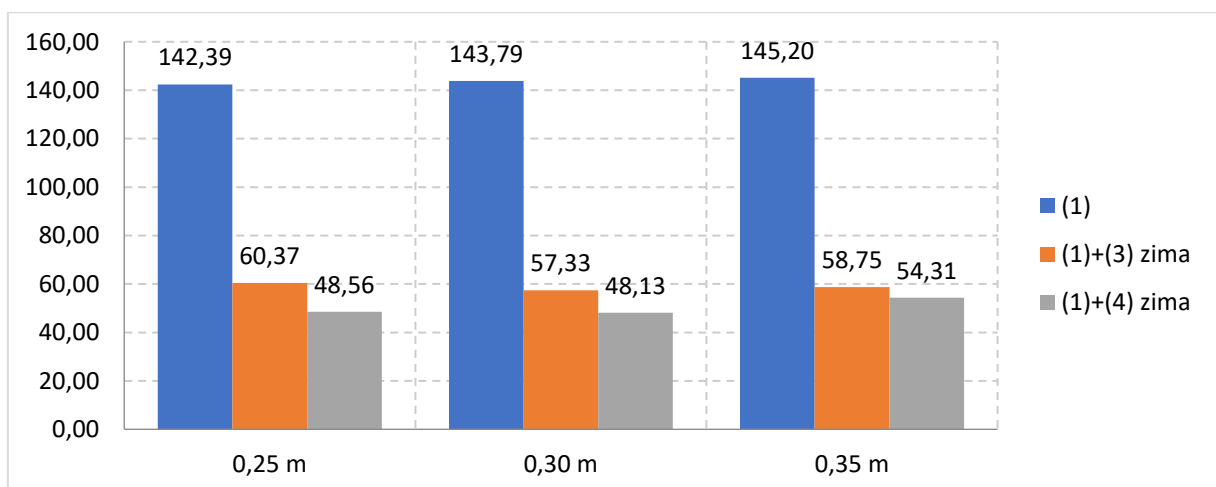
Rys. 7.12. Porównanie wartości sił podłużnych pionowych N dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,50H$ dla warunków letnich



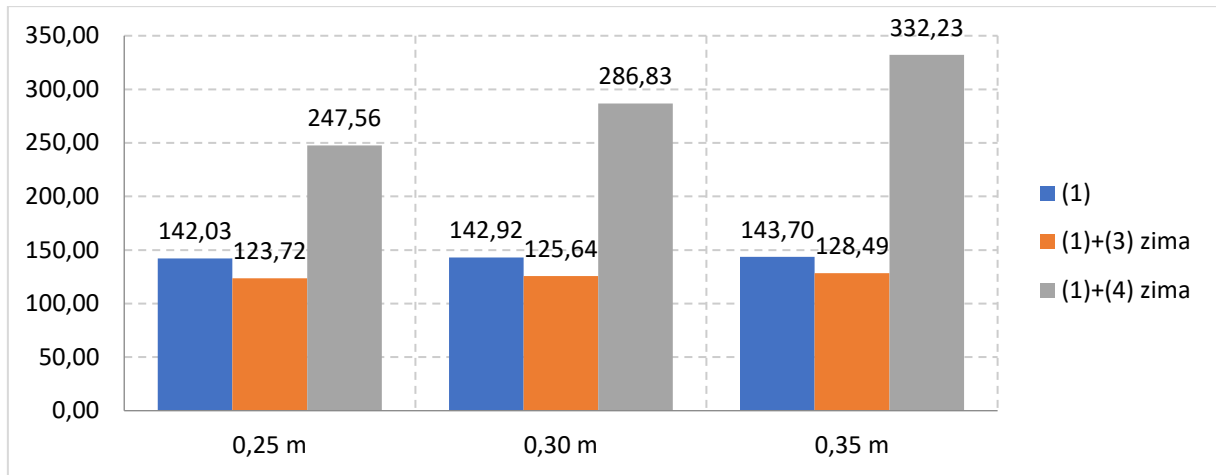
Rys. 7.13. Porównanie wartości sił podłużnych pionowych N dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,75H$ dla warunków letnich



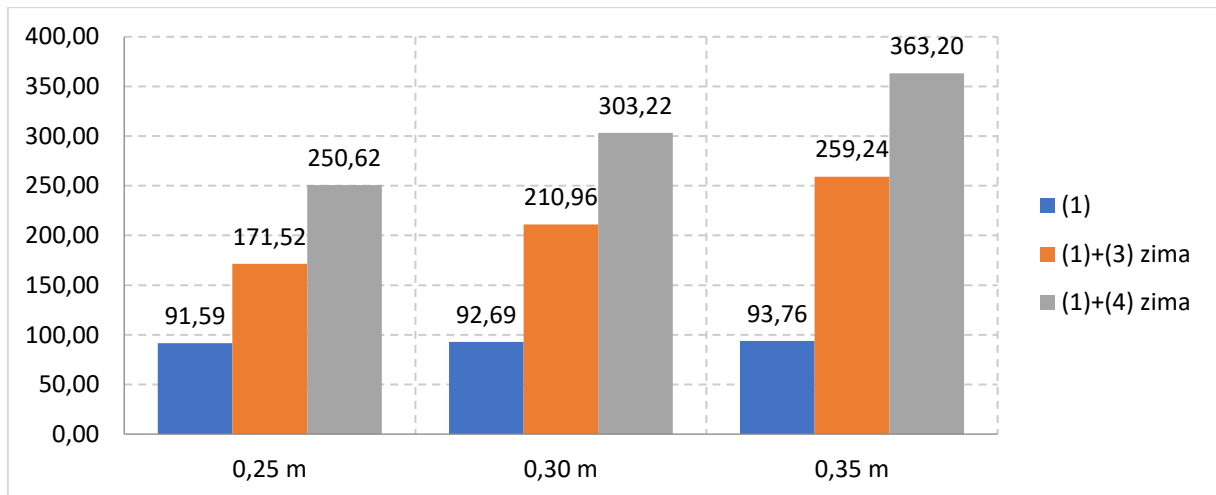
Rys. 7.14. Porównanie wartości sił podłużnych poziomych R dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,25H$ dla warunków zimowych



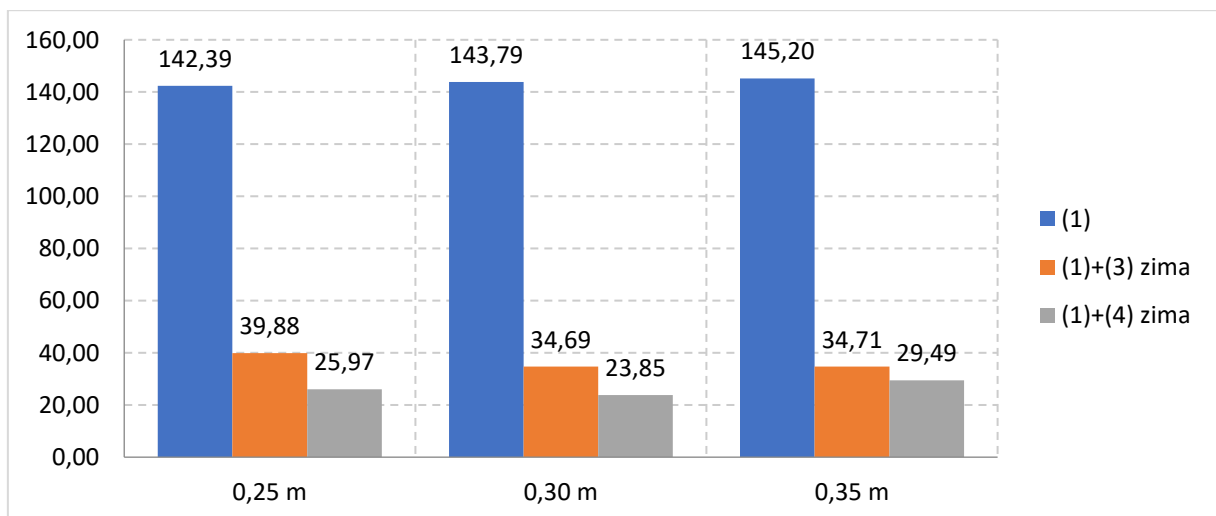
Rys. 7.15. Porównanie wartości sił podłużnych poziomych R dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,50H$ dla warunków zimowych



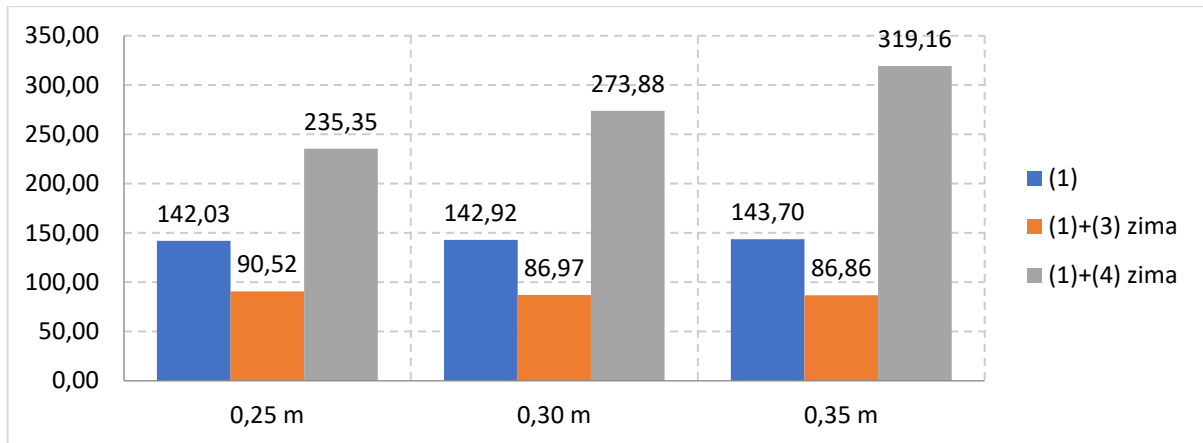
Rys. 7.16. Porównanie wartości sił podłużnych poziomych R dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,75H$ dla warunków zimowych



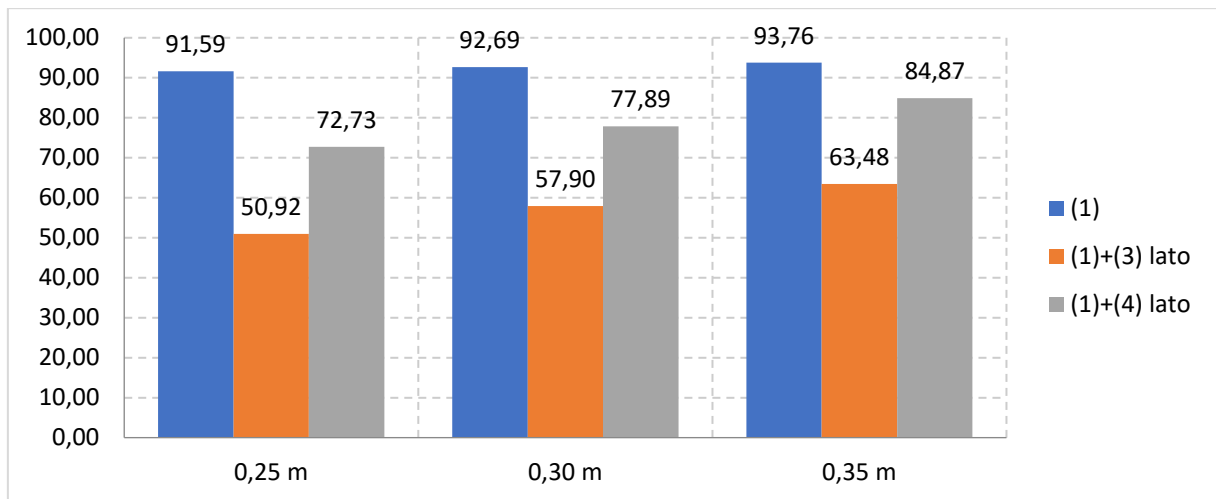
Rys. 7.17. Porównanie wartości sił podłużnych poziomych R dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,25H$ dla warunków zimowych



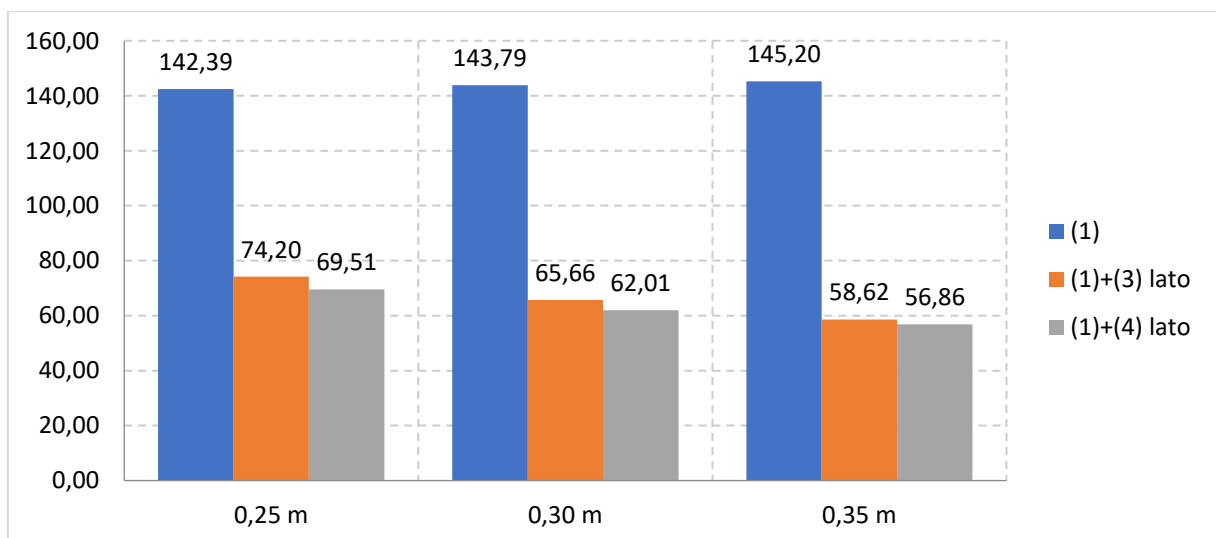
Rys. 7.18. Porównanie wartości sił podłużnych poziomych R dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,50H$ dla warunków zimowych



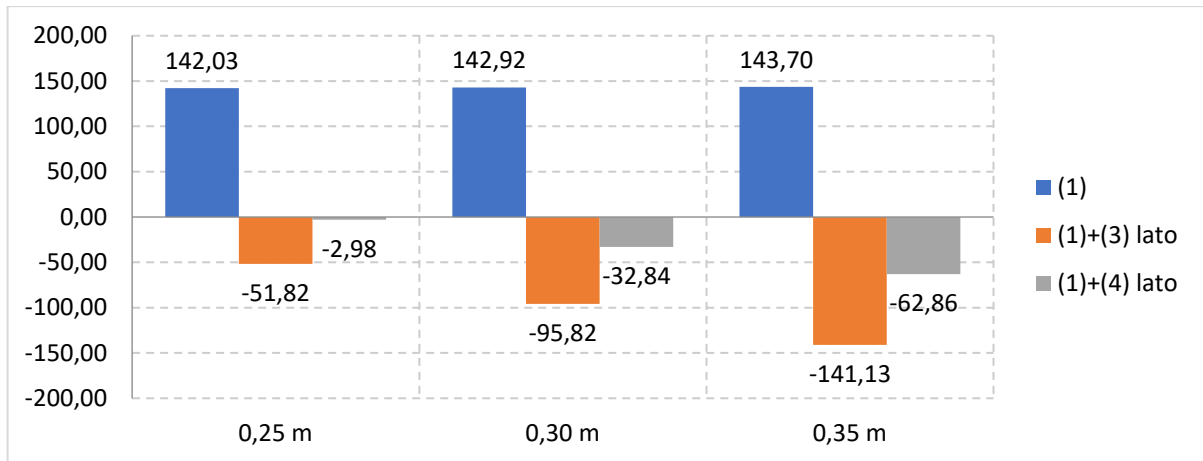
Rys. 7.19. Porównanie wartości sił podłużnych poziomych R dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,75H$ dla warunków zimowych



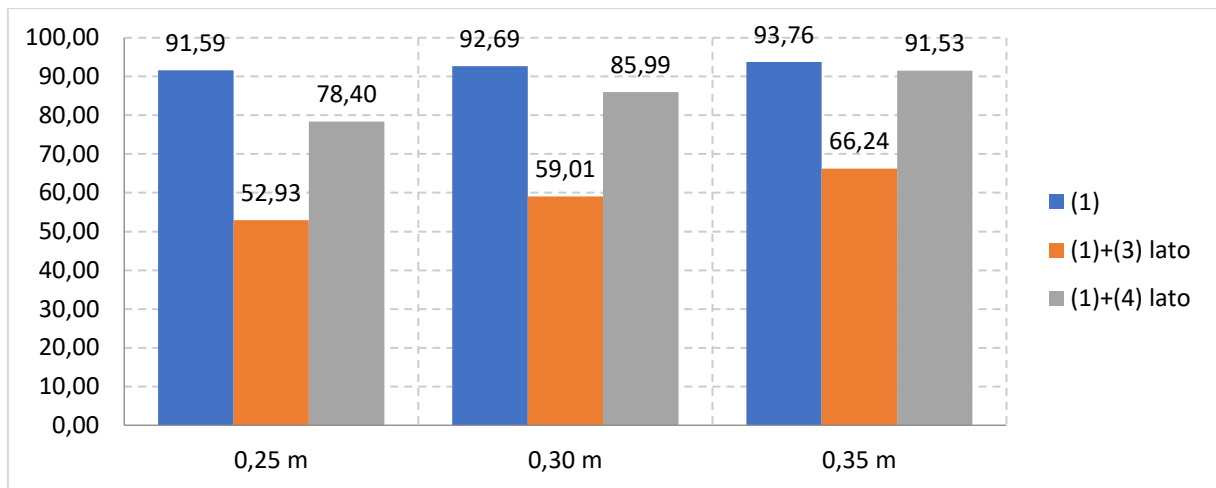
Rys. 7.20. Porównanie wartości sił podłużnych poziomych R dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,25H$ dla warunków letnich



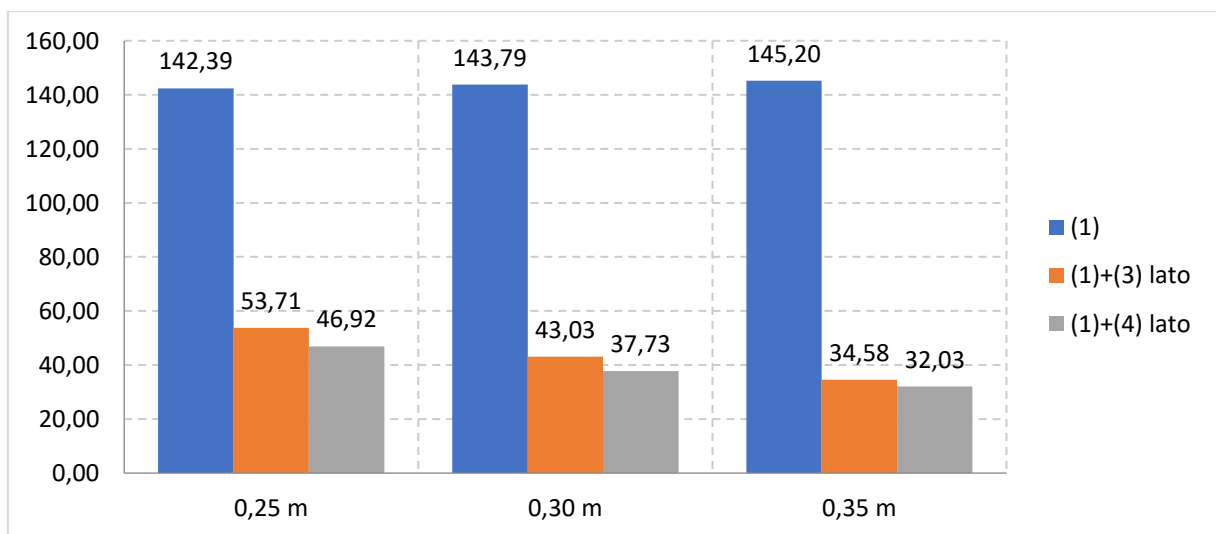
Rys. 7.21. Porównanie wartości sił podłużnych poziomych R dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,50H$ dla warunków letnich



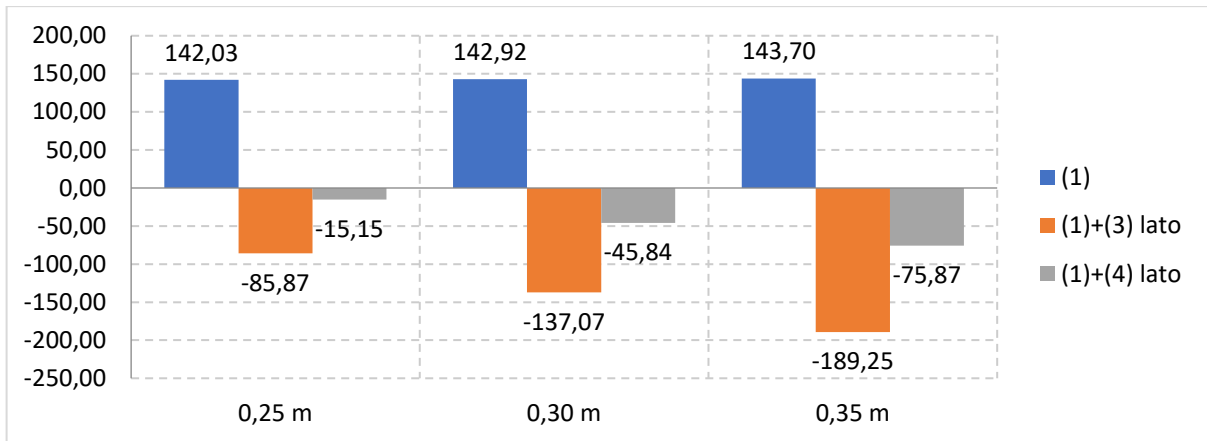
Rys. 7.22. Porównanie wartości sił podłużnych poziomych R dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,75H$ dla warunków letnich



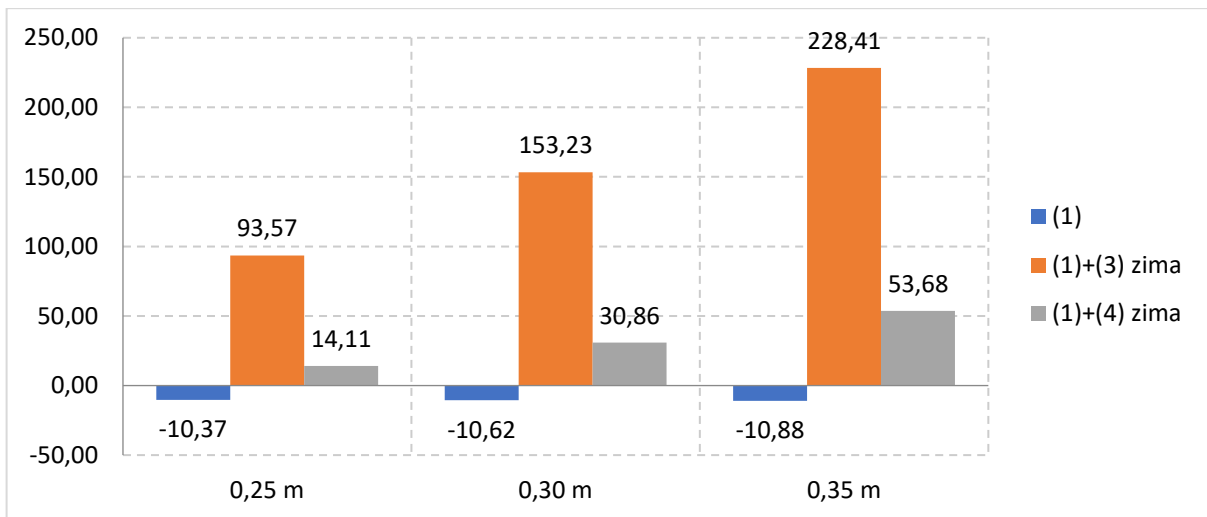
Rys. 7.23. Porównanie wartości sił podłużnych poziomych R dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,25H$ dla warunków letnich



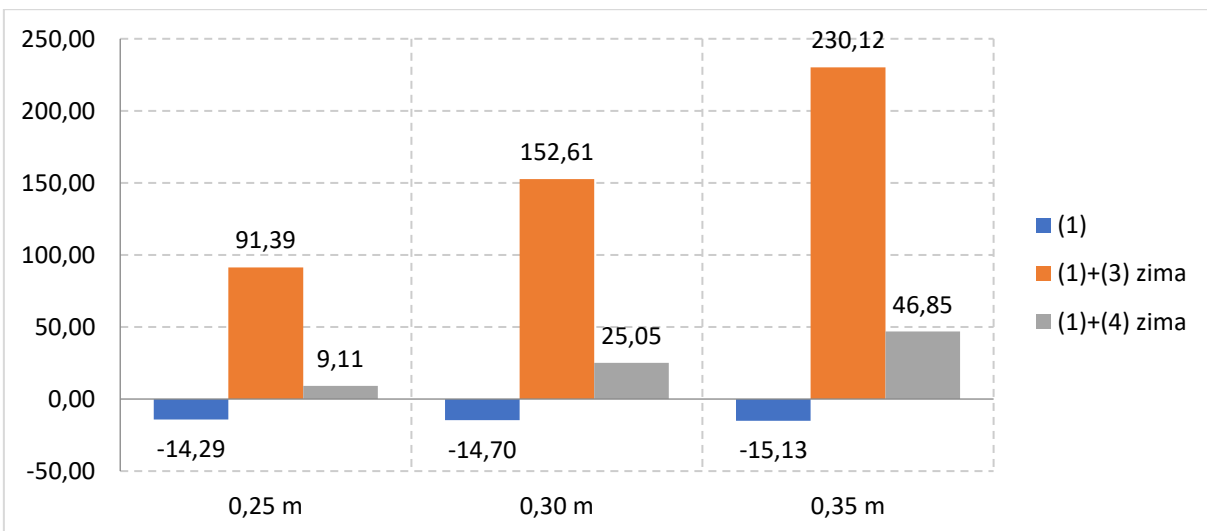
Rys. 7.24. Porównanie wartości sił podłużnych poziomych R dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,50H$ dla warunków letnich



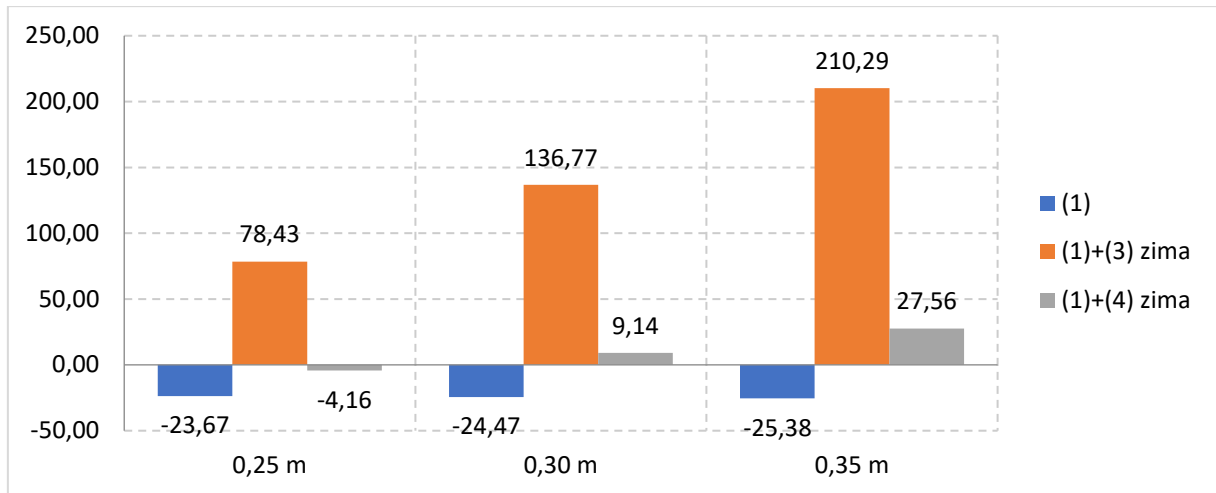
Rys. 7.25. Porównanie wartości sił podłużnych poziomych R dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,75H$ dla warunków letnich



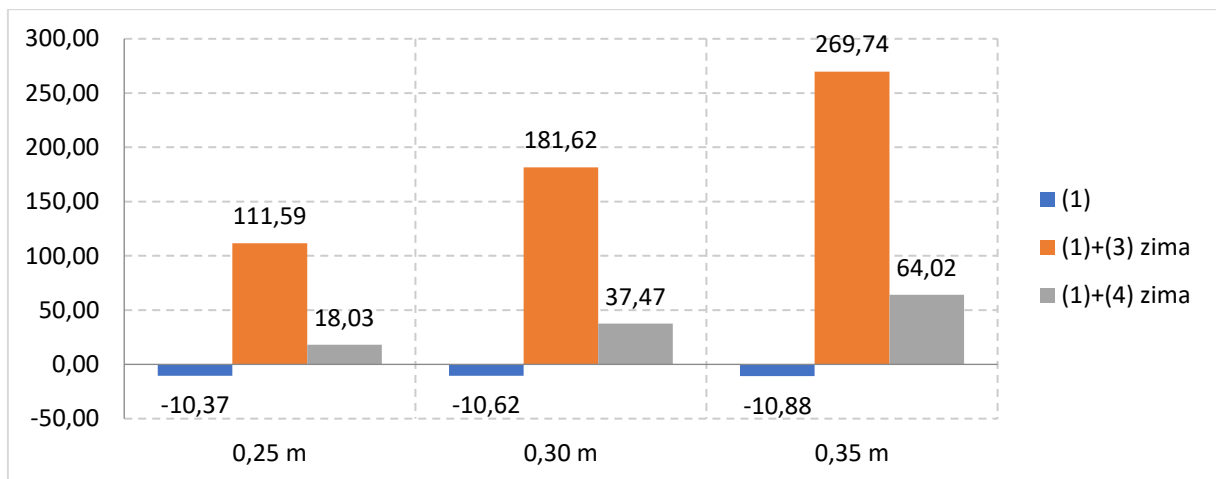
Rys. 7.26. Porównanie wartości momentów zginających pionowych M_N dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,25H$ dla warunków zimowych



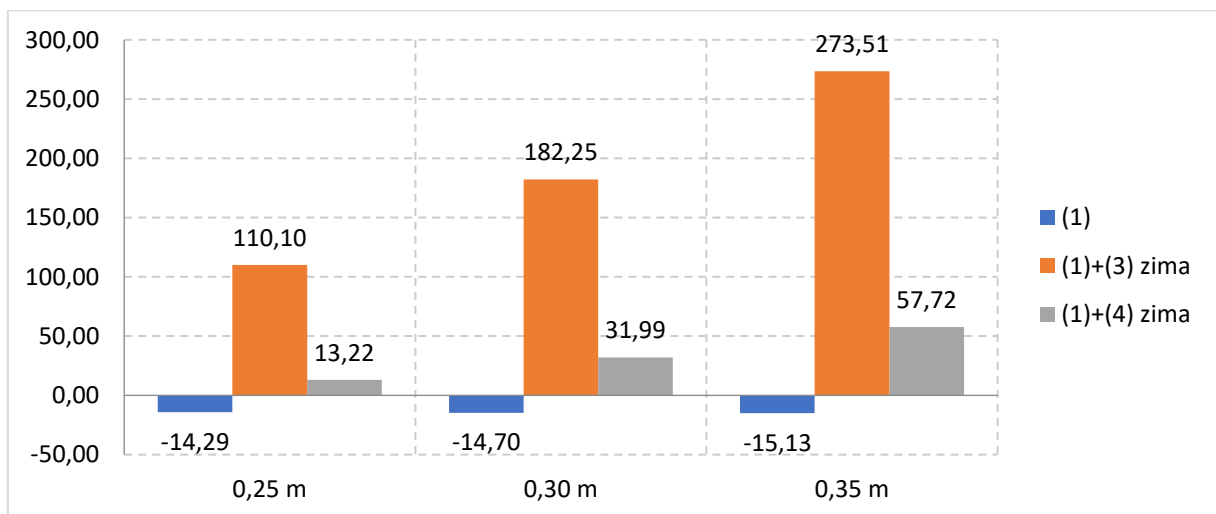
Rys. 7.27. Porównanie wartości momentów zginających pionowych M_N dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,50H$ dla warunków zimowych



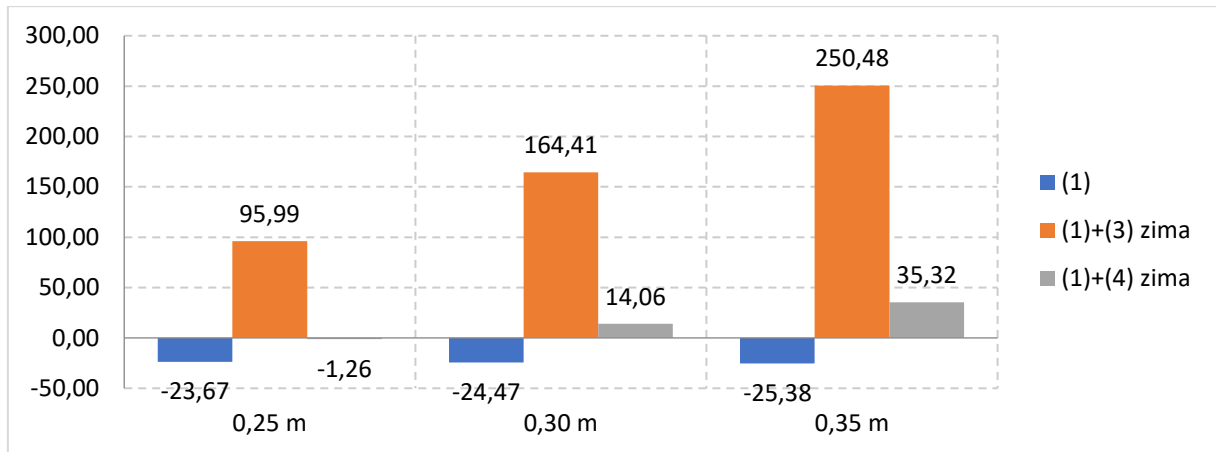
Rys. 7.28. Porównanie wartości momentów zginających pionowych M_N dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,75H$ dla warunków zimowych



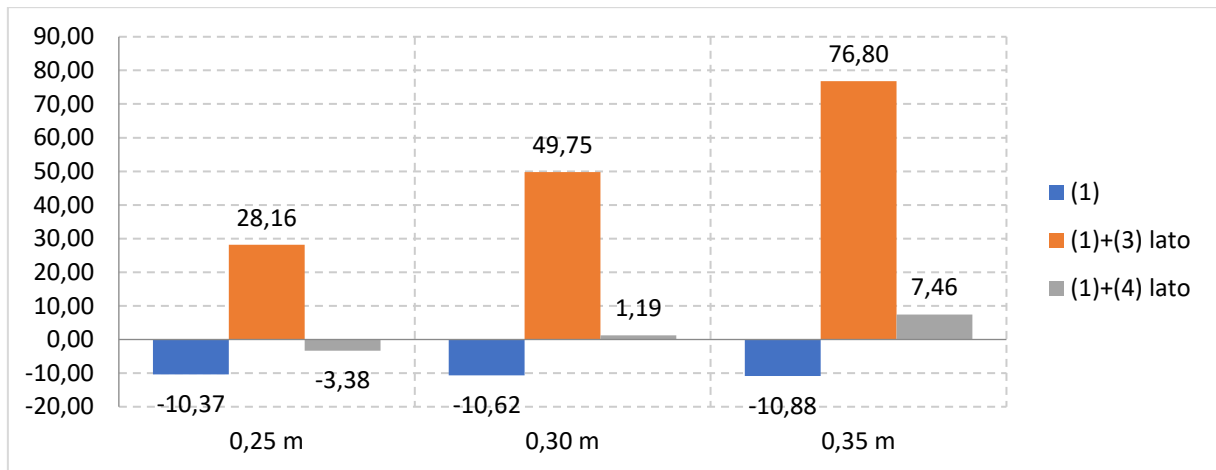
Rys. 7.29. Porównanie wartości momentów zginających pionowych M_N dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,25H$ dla warunków zimowych



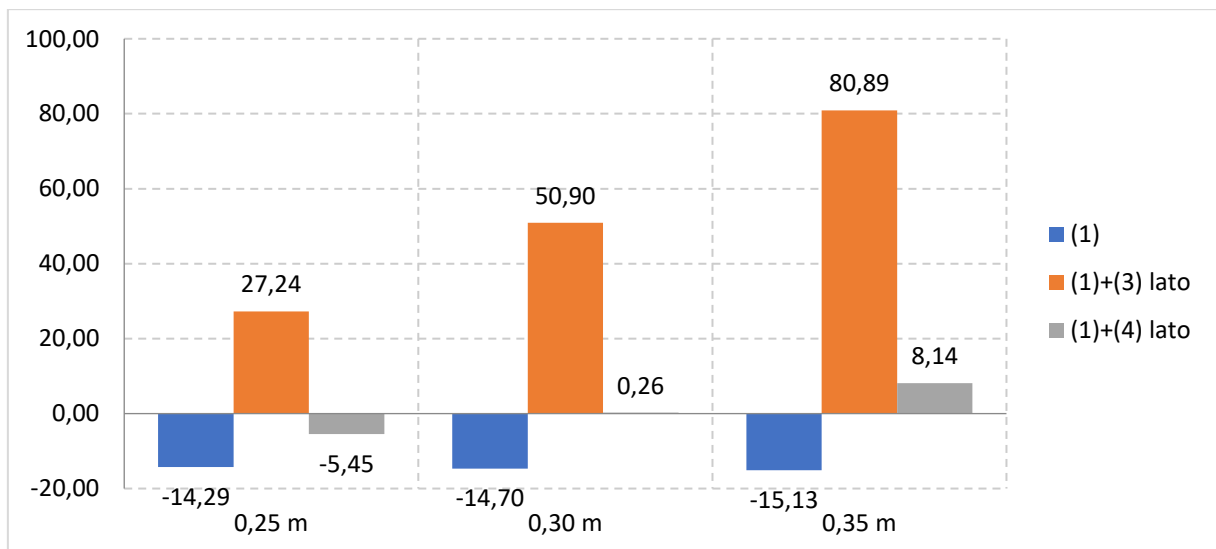
Rys. 7.30. Porównanie wartości momentów zginających pionowych M_N dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,50H$ dla warunków zimowych



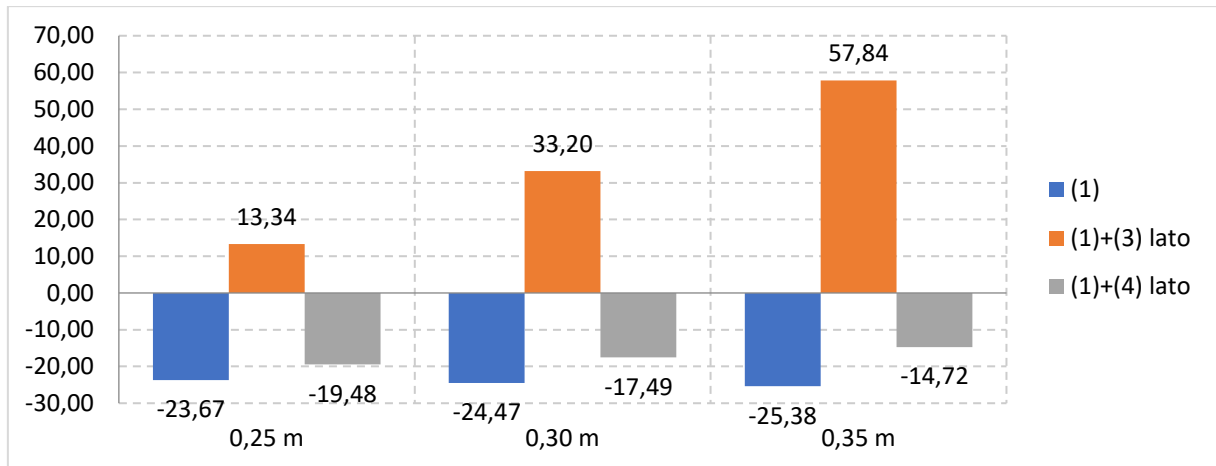
Rys. 7.31. Porównanie wartości momentów zginających pionowych M_N dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,75H$ dla warunków zimowych



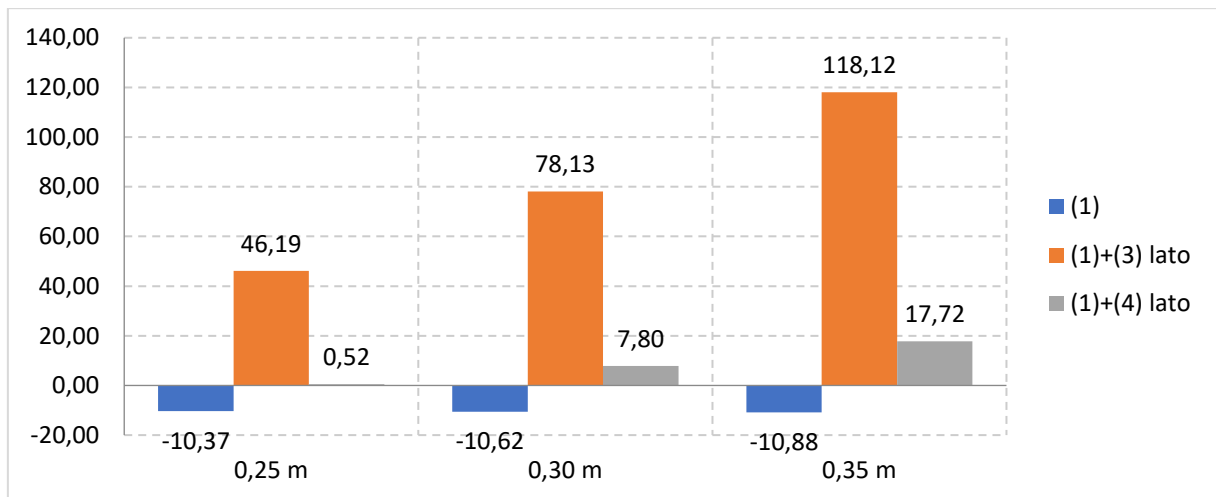
Rys. 7.32. Porównanie wartości momentów zginających pionowych M_N dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,25H$ dla warunków letnich



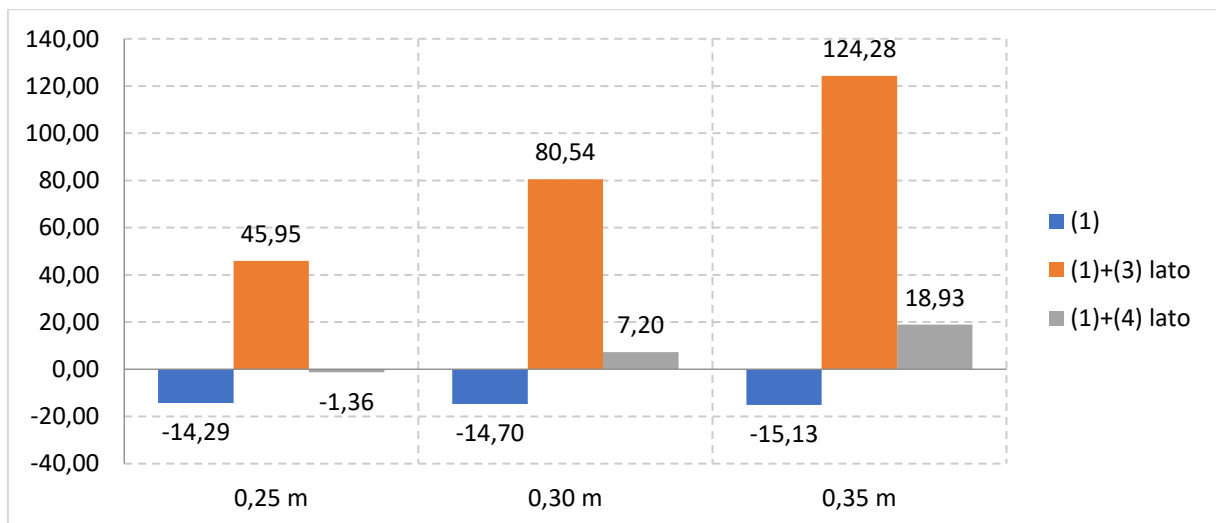
Rys. 7.33. Porównanie wartości momentów zginających pionowych M_N dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,50H$ dla warunków letnich



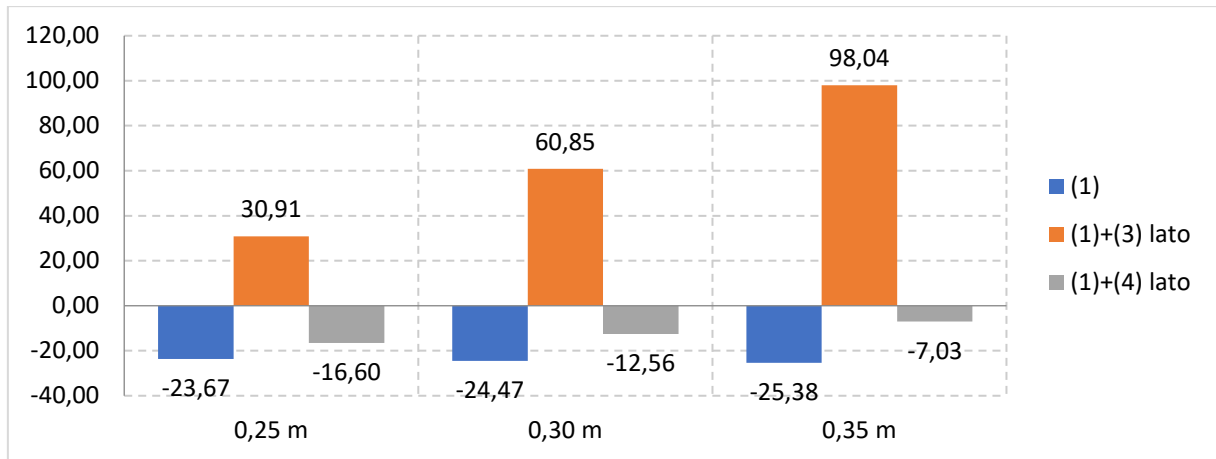
Rys. 7.34. Porównanie wartości momentów zginających pionowych M_N dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,75H$ dla warunków letnich



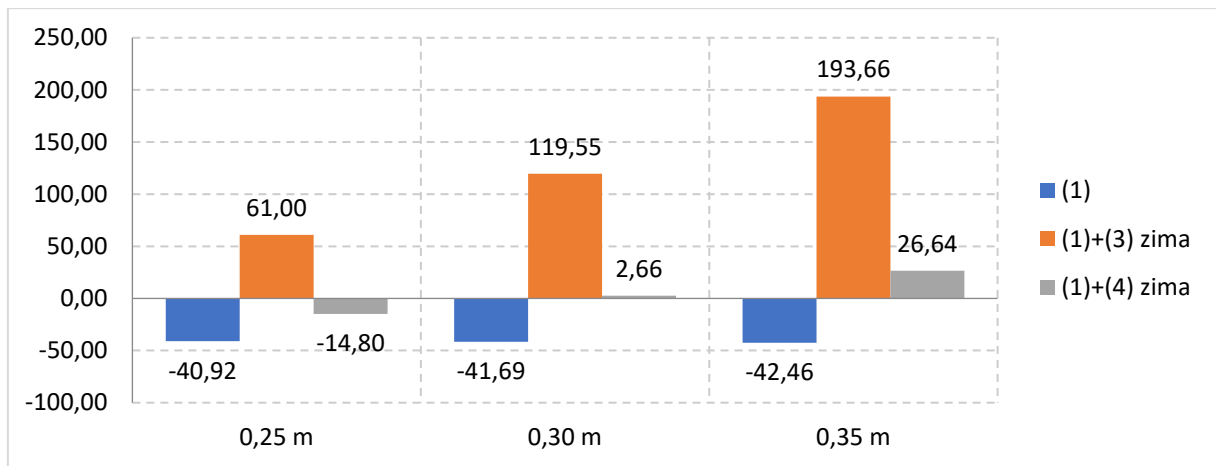
Rys. 7.35. Porównanie wartości momentów zginających pionowych M_N dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,25H$ dla warunków letnich



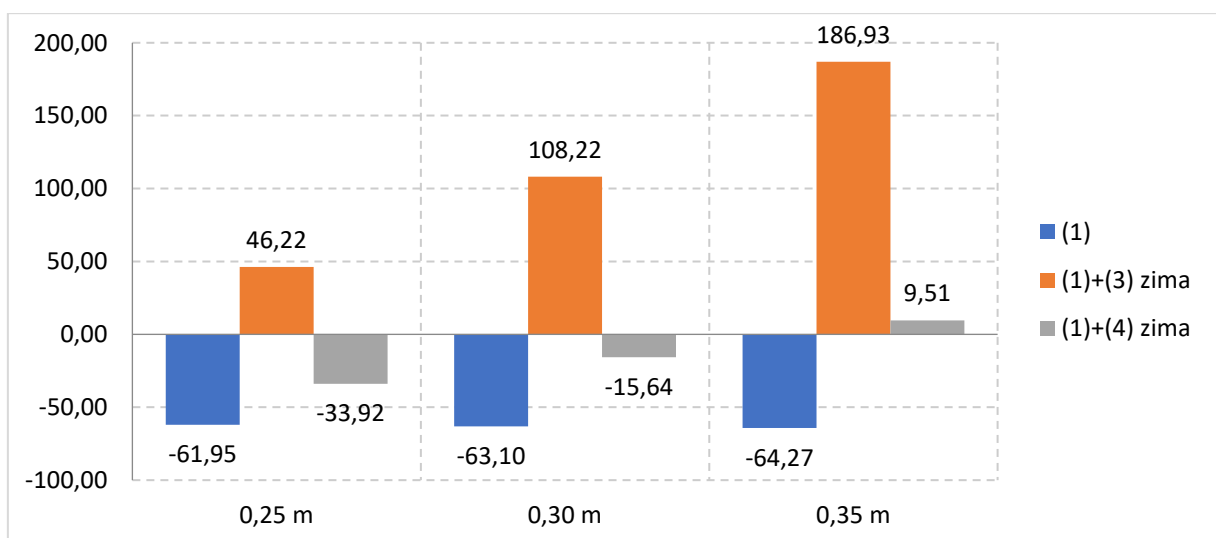
Rys. 7.36. Porównanie wartości momentów zginających pionowych M_N dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,50H$ dla warunków letnich



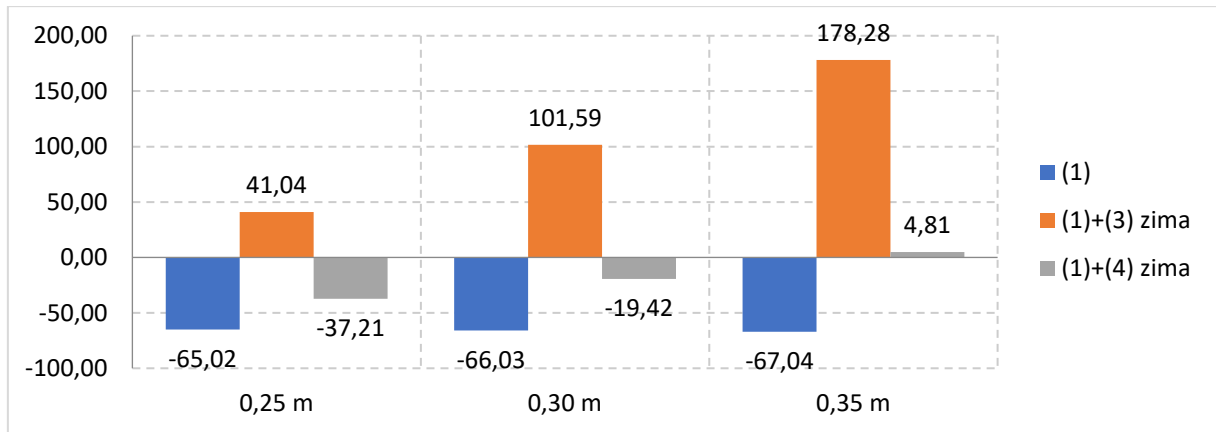
Rys. 7.37. Porównanie wartości momentów zginających pionowych M_N dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,75H$ dla warunków letnich



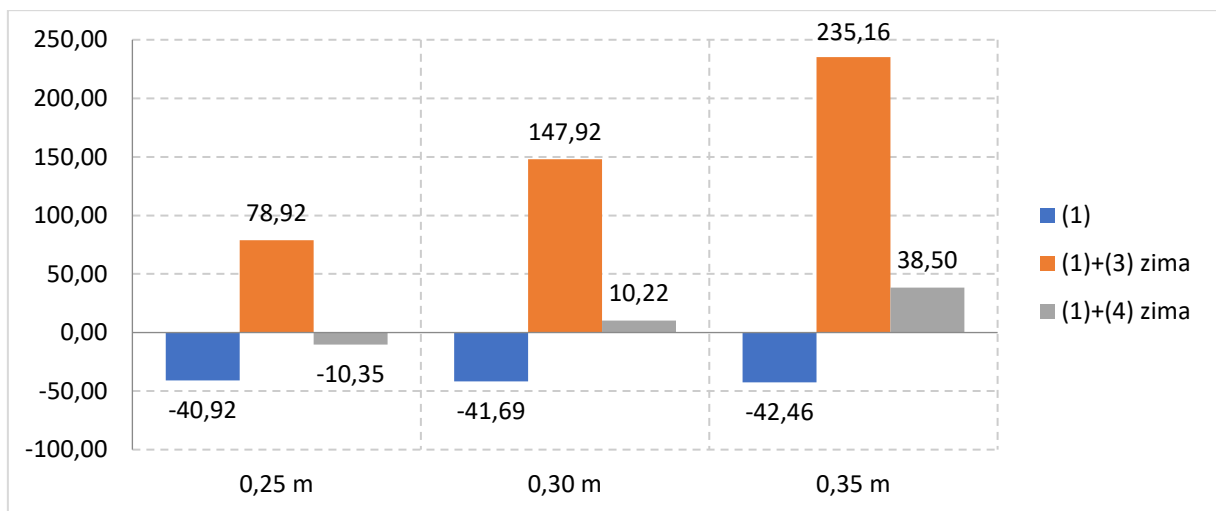
Rys. 7.38. Porównanie wartości momentów zginających poziomych M_R — pręśło dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,25H$ dla warunków zimowych



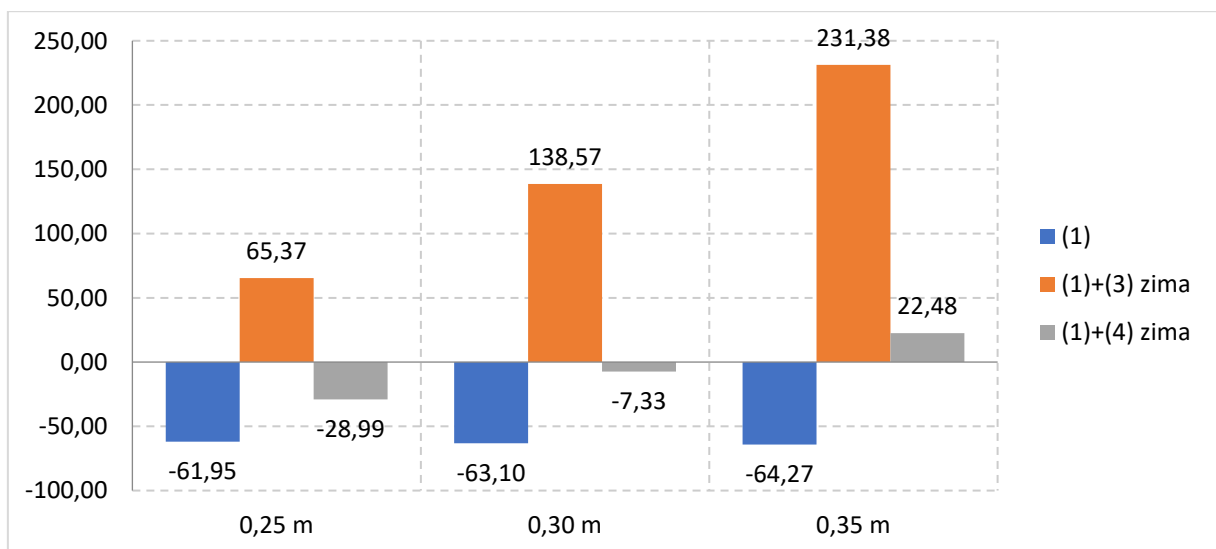
Rys. 7.39. Porównanie wartości momentów zginających poziomych M_R — pręśło dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,50H$ dla warunków zimowych



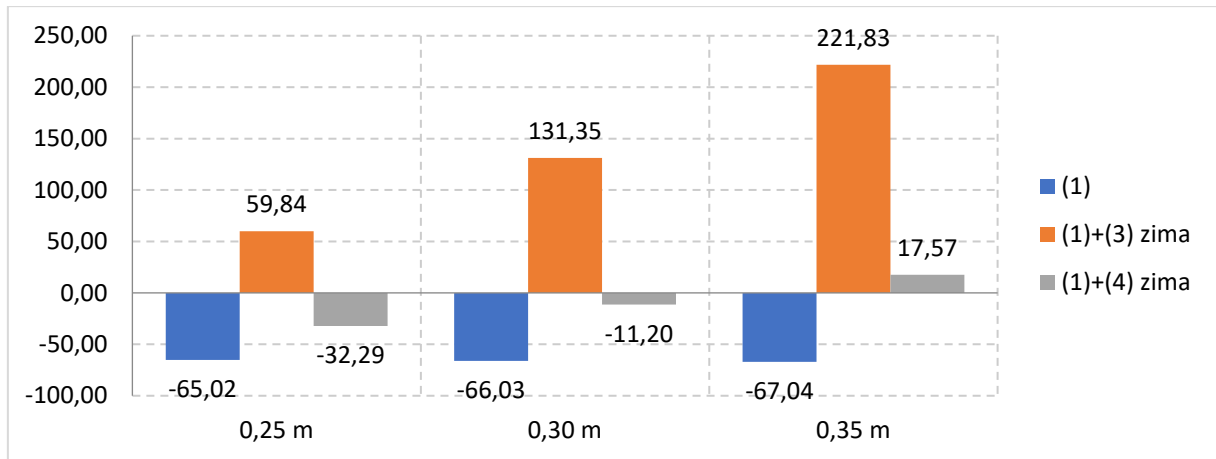
Rys. 7.40. Porównanie wartości momentów zginających poziomych M_R — przeszło dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,75H$ dla warunków zimowych



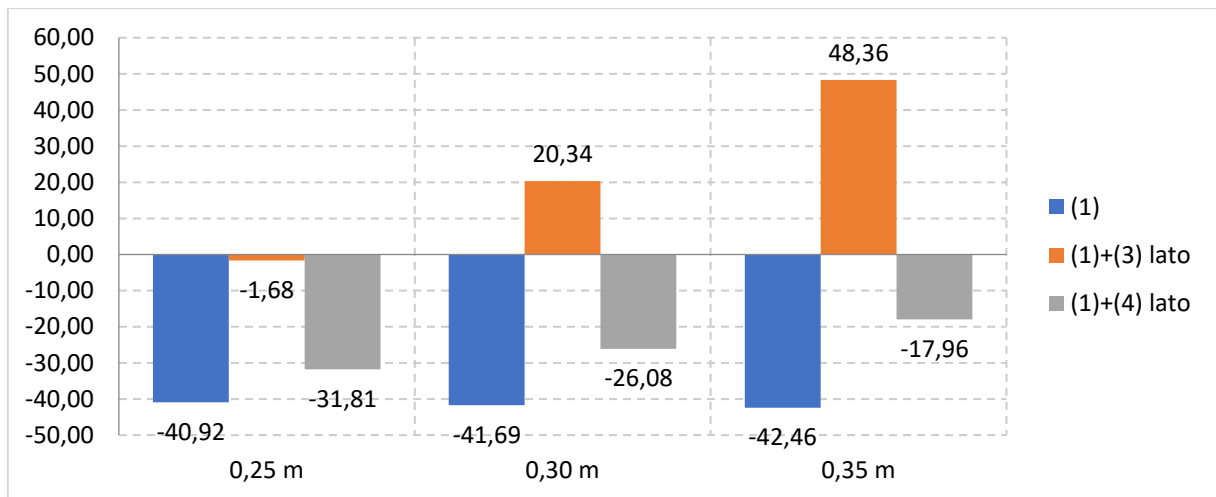
Rys. 7.41. Porównanie wartości momentów zginających poziomych M_R — przeszło dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,25H$ dla warunków zimowych



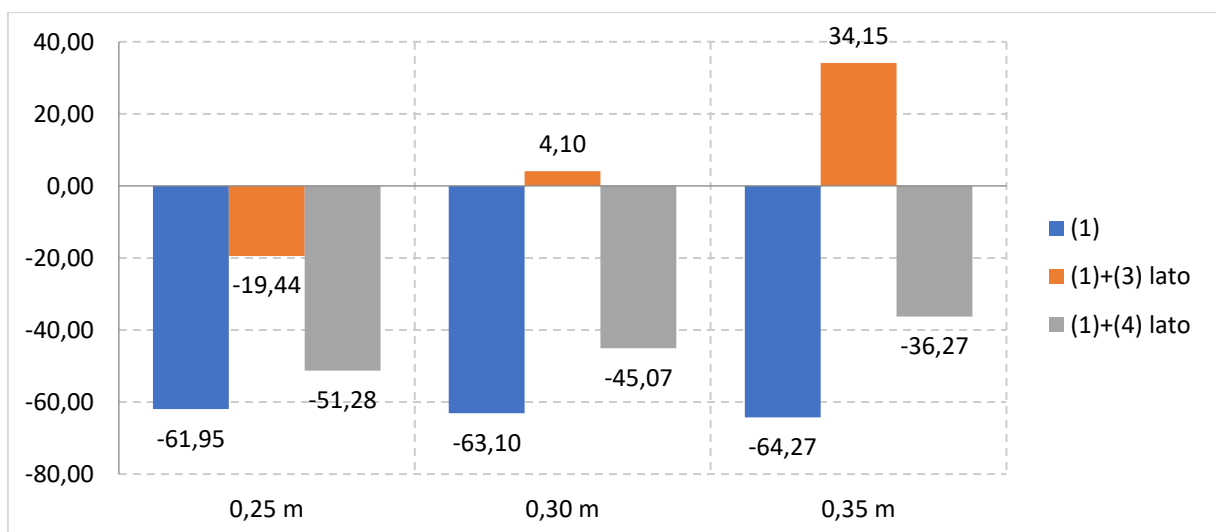
Rys. 7.42. Porównanie wartości momentów zginających poziomych M_R — przeszło dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,50H$ dla warunków zimowych



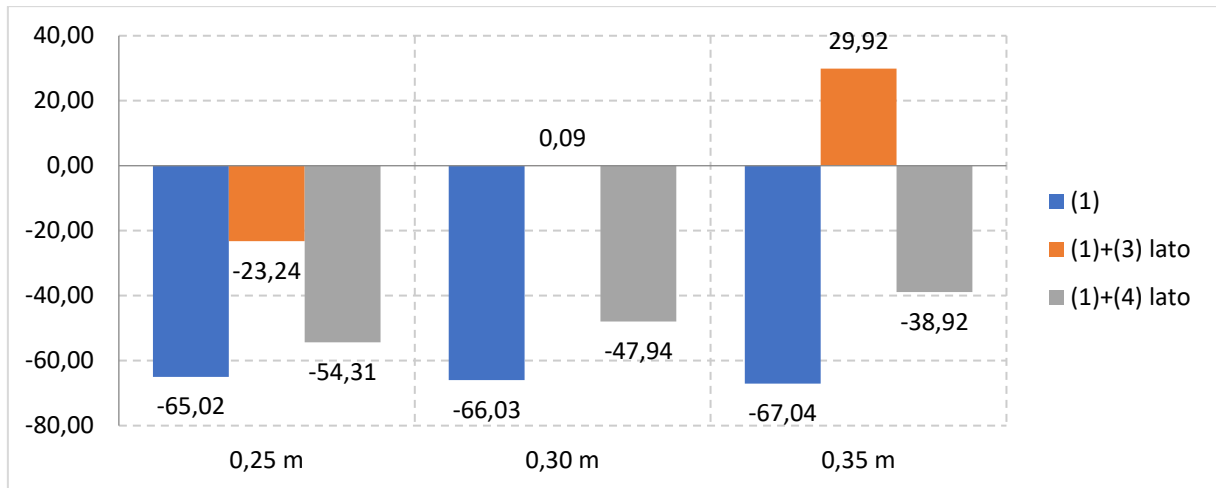
Rys. 7.43. Porównanie wartości momentów zginających poziomych M_R — przeszło dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,75H$ dla warunków zimowych



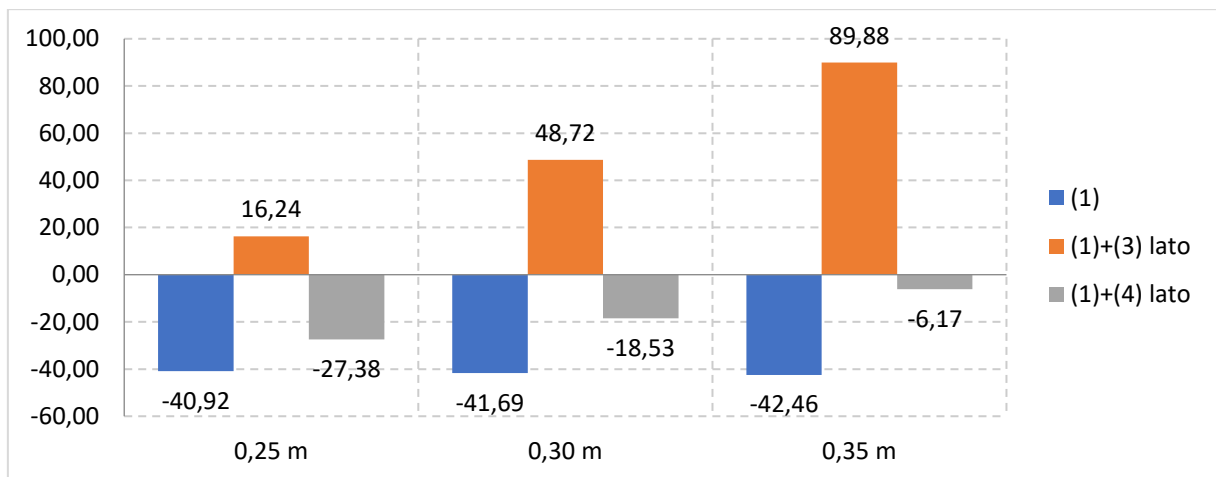
Rys. 7.44. Porównanie wartości momentów zginających poziomych M_R — przeszło dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,25H$ dla warunków letnich



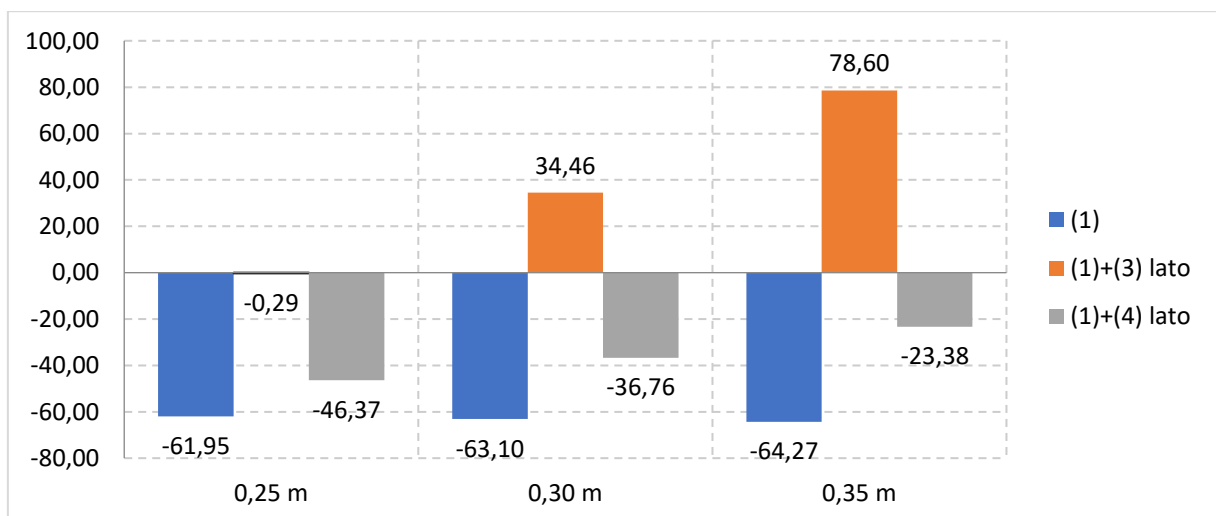
Rys. 7.45. Porównanie wartości momentów zginających poziomych M_R — przeszło dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,50H$ dla warunków letnich



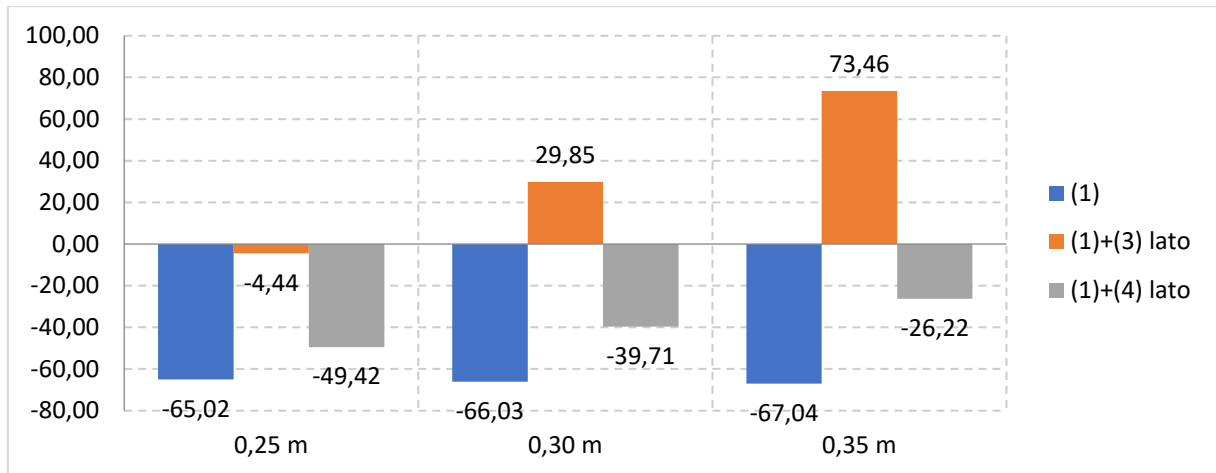
Rys. 7.46. Porównanie wartości momentów zginających poziomych M_R — przeszło dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,75H$ dla warunków letnich



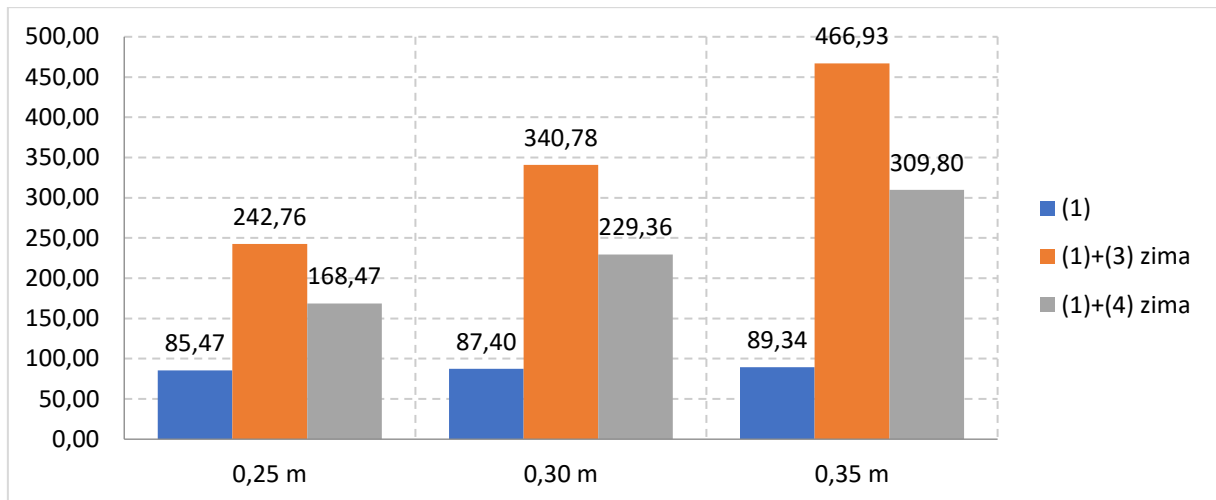
Rys. 7.47. Porównanie wartości momentów zginających poziomych M_R — przeszło dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,25H$ dla warunków letnich



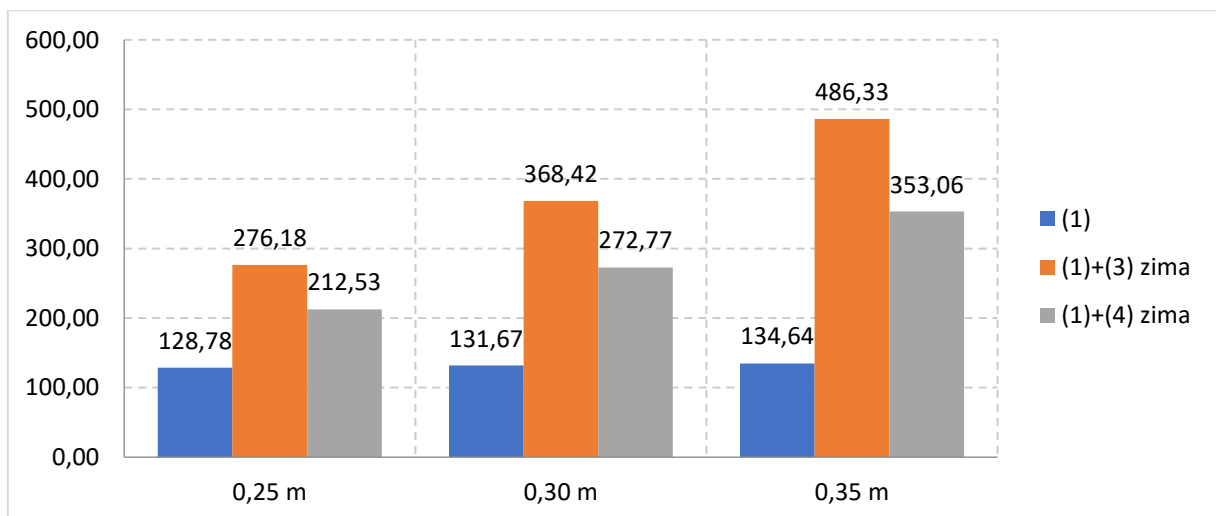
Rys. 7.48. Porównanie wartości momentów zginających poziomych M_R — przeszło dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,50H$ dla warunków letnich



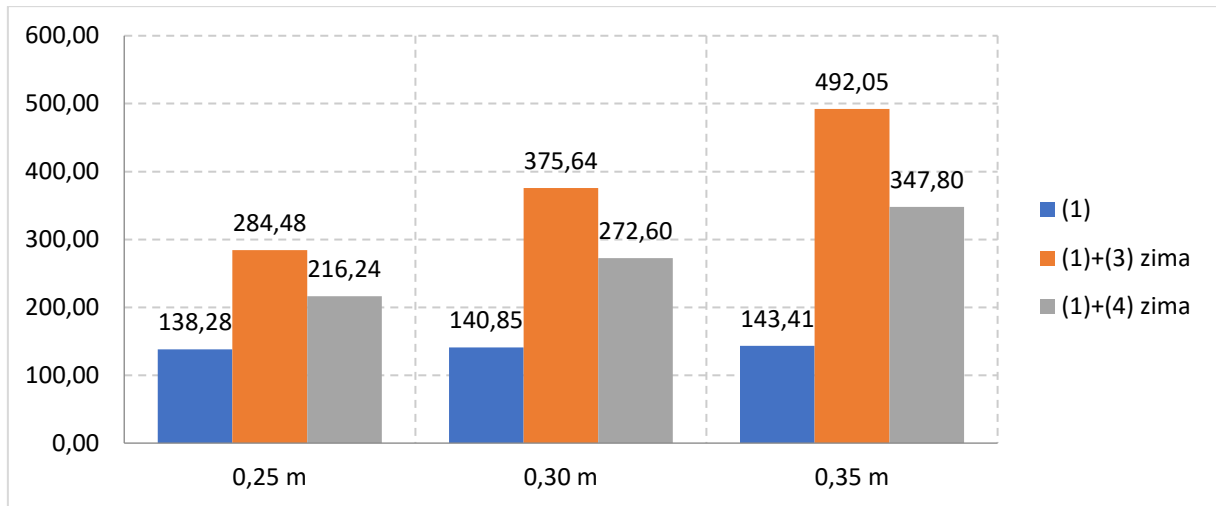
Rys. 7.49. Porównanie wartości momentów zginających poziomych M_R — przęsło dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,75H$ dla warunków letnich



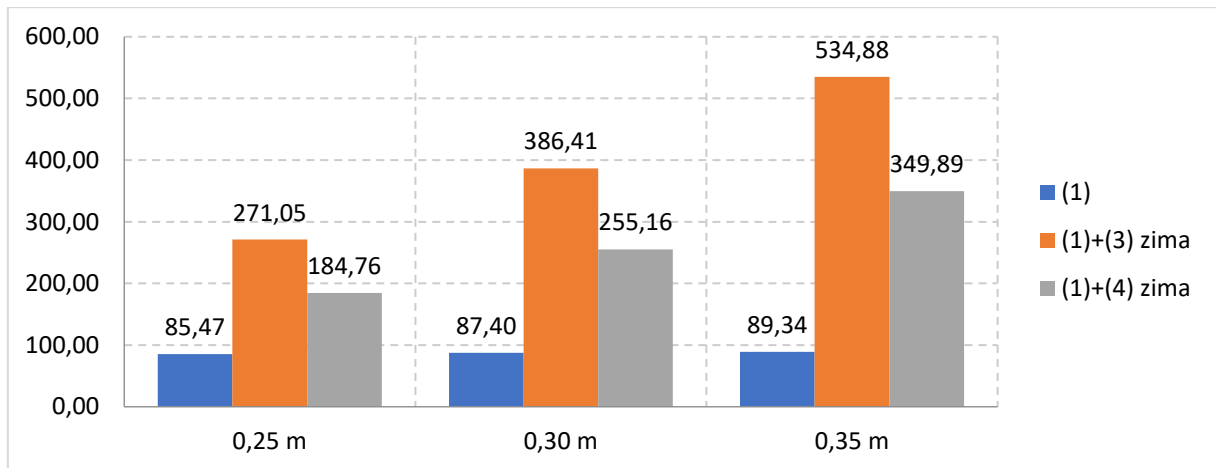
Rys. 7.50. Porównanie wartości momentów zginających poziomych M_R — podpora dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,25H$ dla warunków zimowych



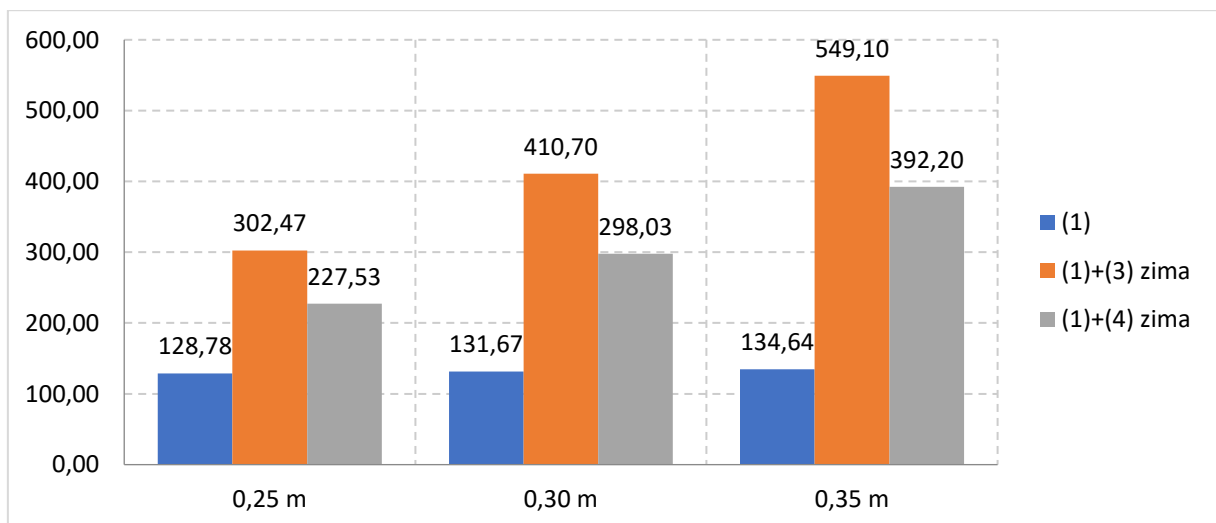
Rys. 7.51. Porównanie wartości momentów zginających poziomych M_R — podpora dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,50H$ dla warunków zimowych



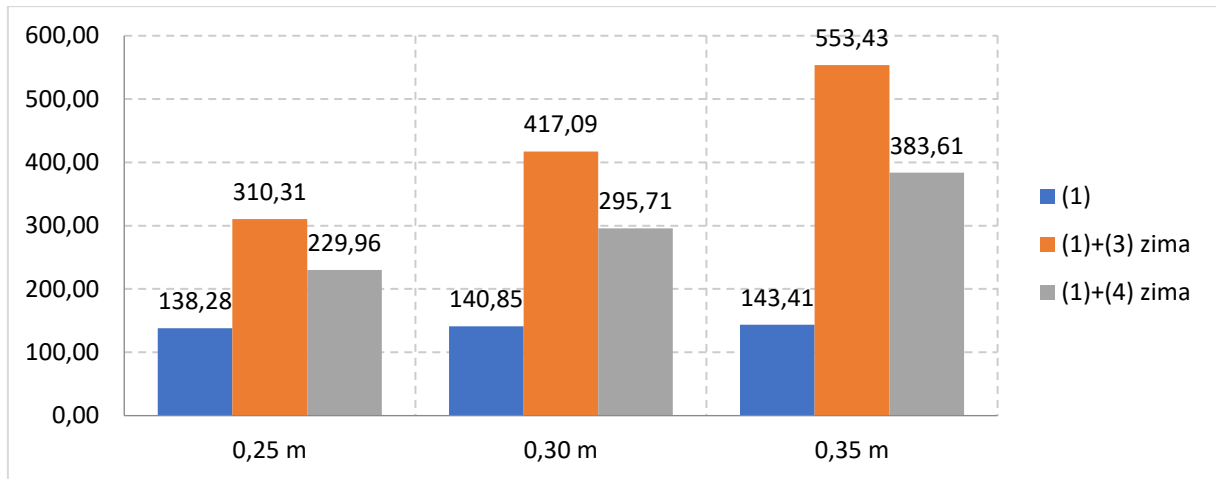
Rys. 7.52. Porównanie wartości momentów zginających poziomych M_R — podpora dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,75H$ dla warunków zimowych



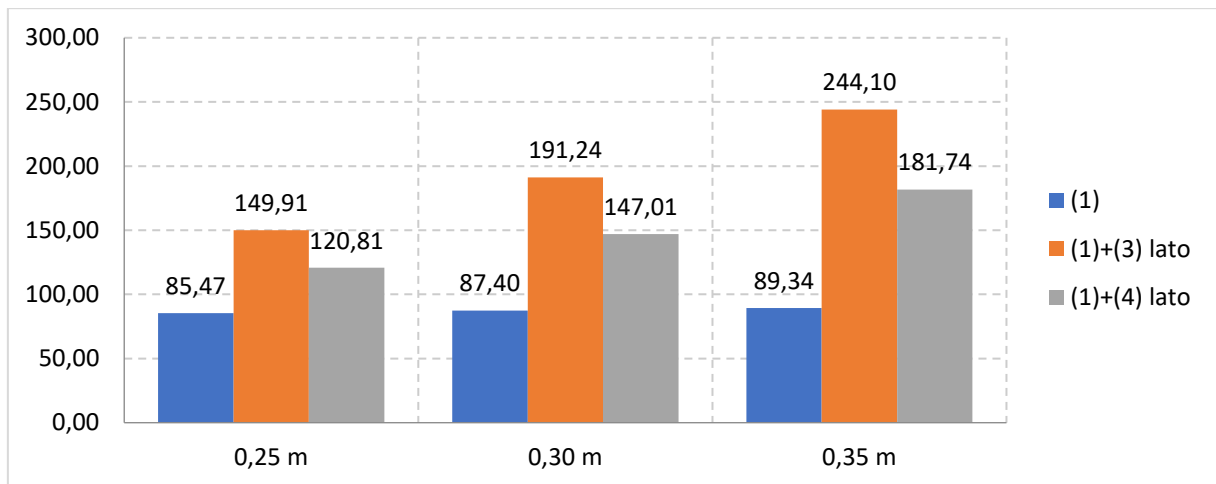
Rys. 7.53. Porównanie wartości momentów zginających poziomych M_R — podpora dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,25H$ dla warunków zimowych



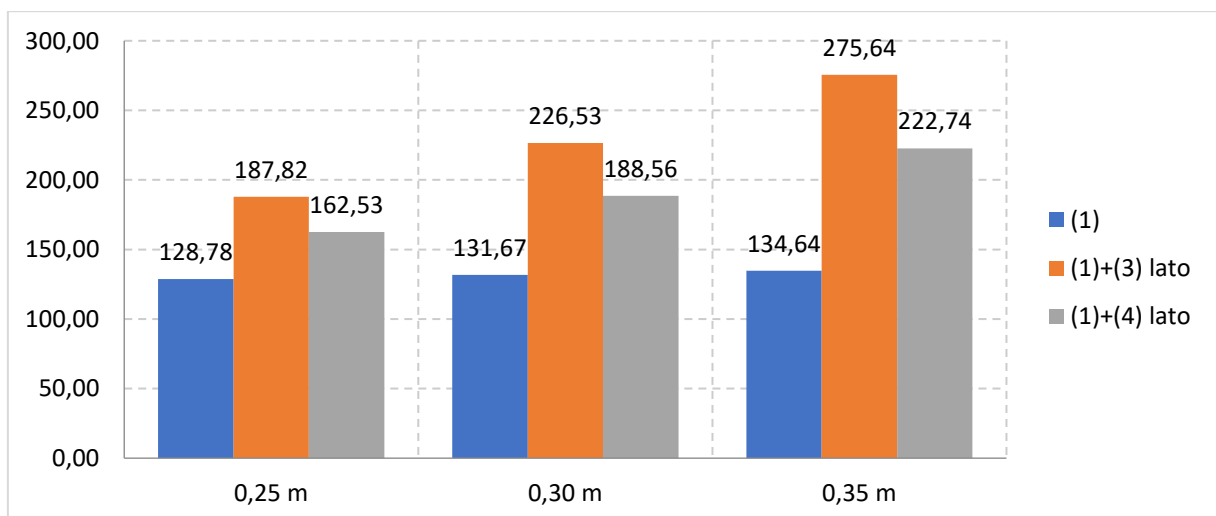
Rys. 7.54. Porównanie wartości momentów zginających poziomych M_R — podpora dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,50H$ dla warunków zimowych



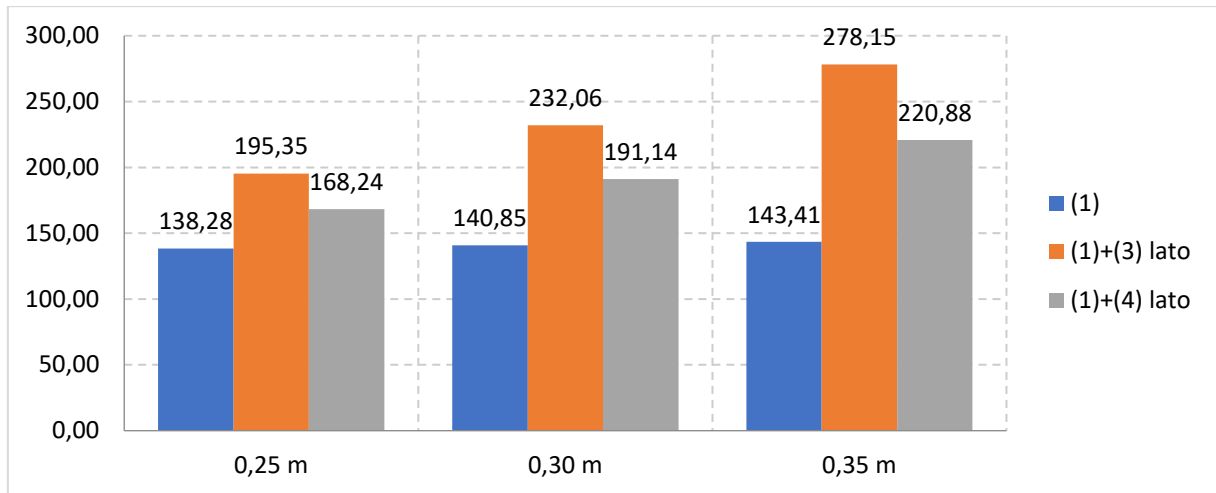
Rys. 7.55. Porównanie wartości momentów zginających poziomych M_R — podpora dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,75H$ dla warunków zimowych



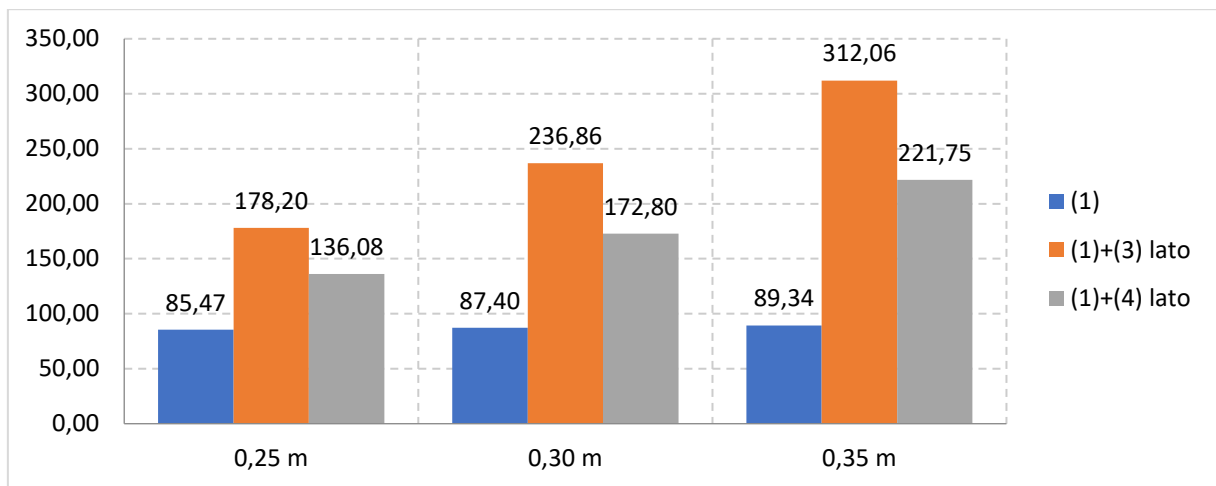
Rys. 7.56. Porównanie wartości momentów zginających poziomych M_R — podpora dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,25H$ dla warunków letnich



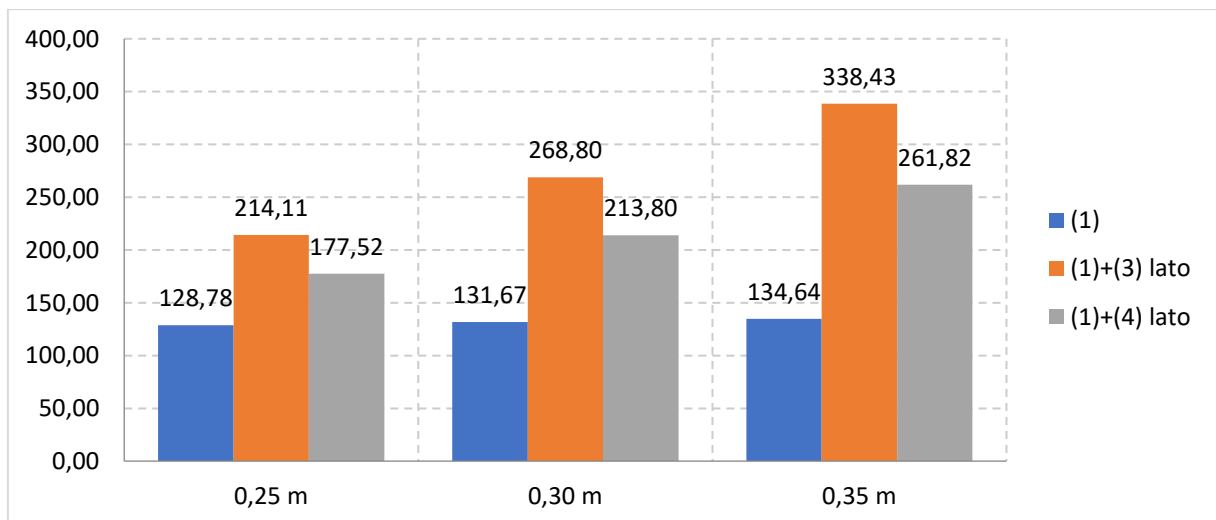
Rys. 7.57. Porównanie wartości momentów zginających poziomych M_R — podpora dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,50H$ dla warunków letnich



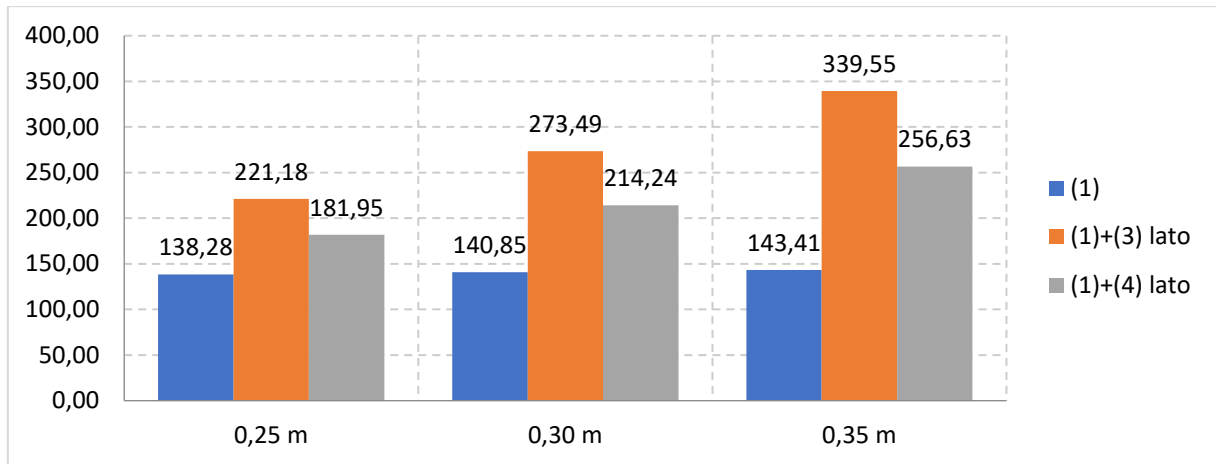
Rys. 7.58. Porównanie wartości momentów zginających poziomych M_R — podpora dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,75H$ dla warunków letnich



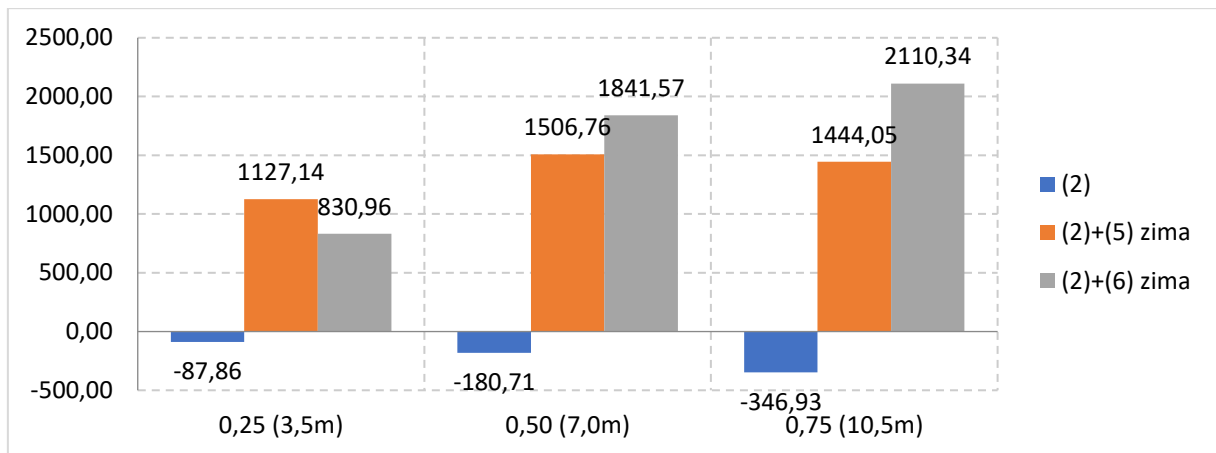
Rys. 7.59. Porównanie wartości momentów zginających poziomych M_R — podpora dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,25H$ dla warunków letnich



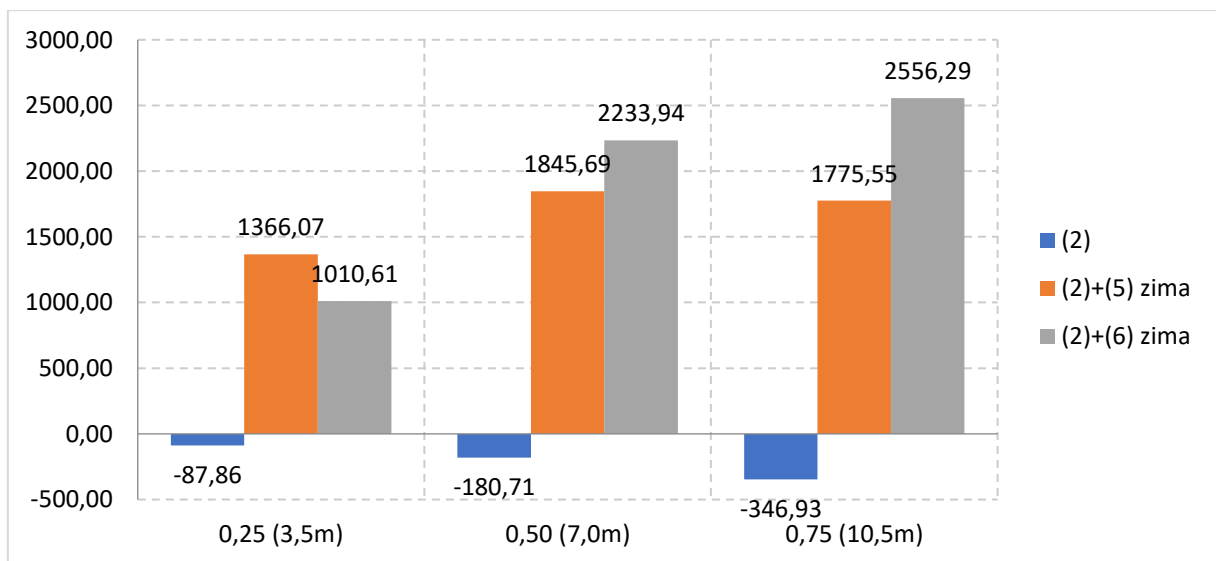
Rys. 7.60. Porównanie wartości momentów zginających poziomych M_R — podpora dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,50H$ dla warunków letnich



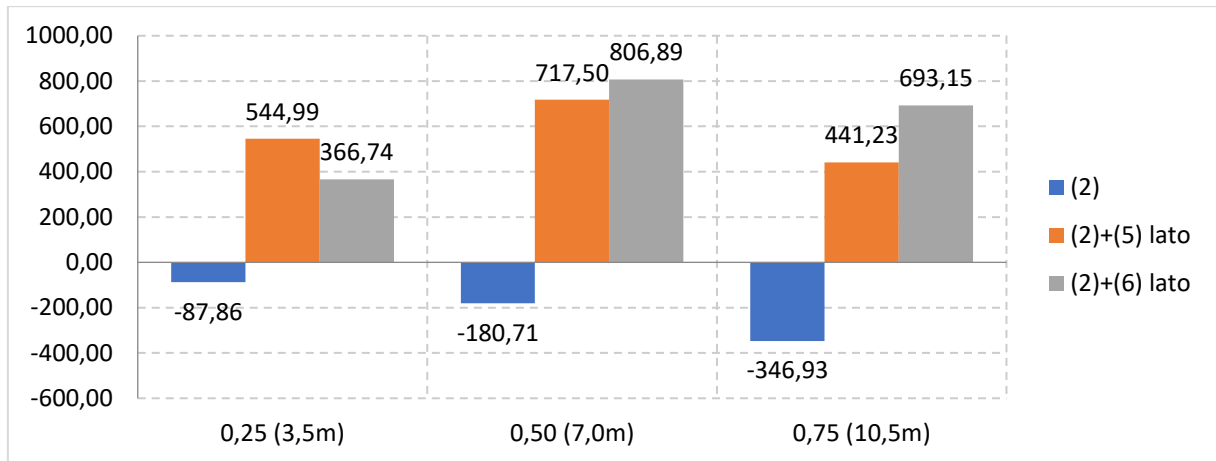
Rys. 7.61. Porównanie wartości momentów zginających poziomych M_R — podpora dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w przekroju $0,75H$ dla warunków letnich



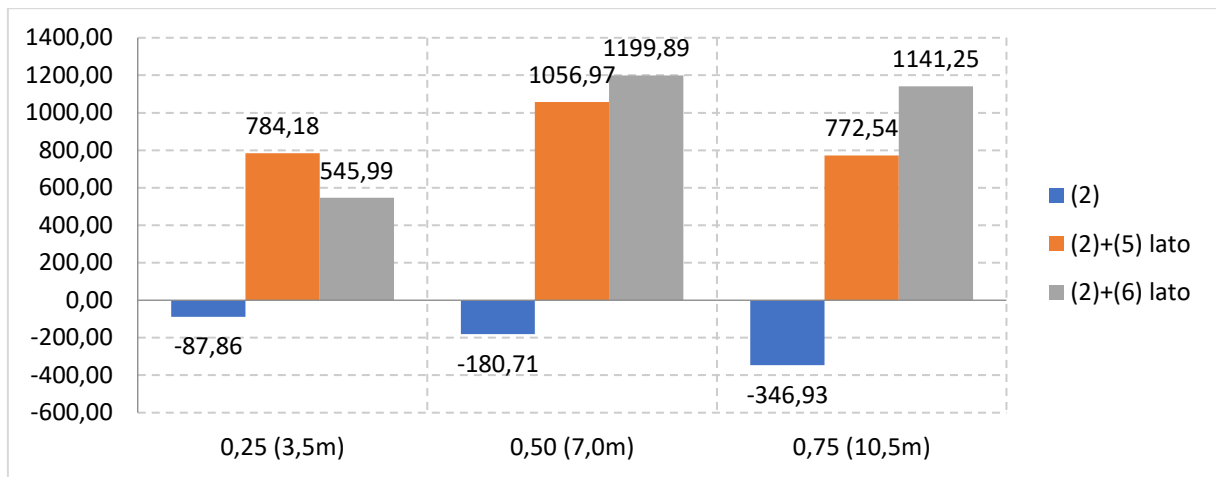
Rys. 7.62. Porównanie wartości sił podłużnych pionowych N dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w warunkach zimowych dla ściany zewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



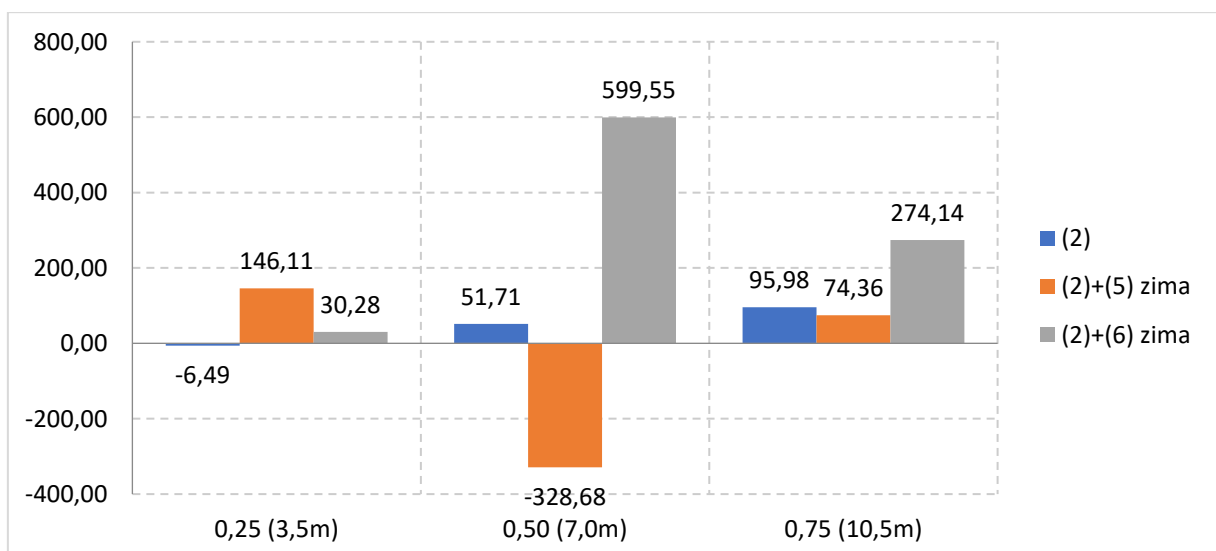
Rys. 7.63. Porównanie wartości sił podłużnych pionowych N dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w warunkach zimowych dla ściany zewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



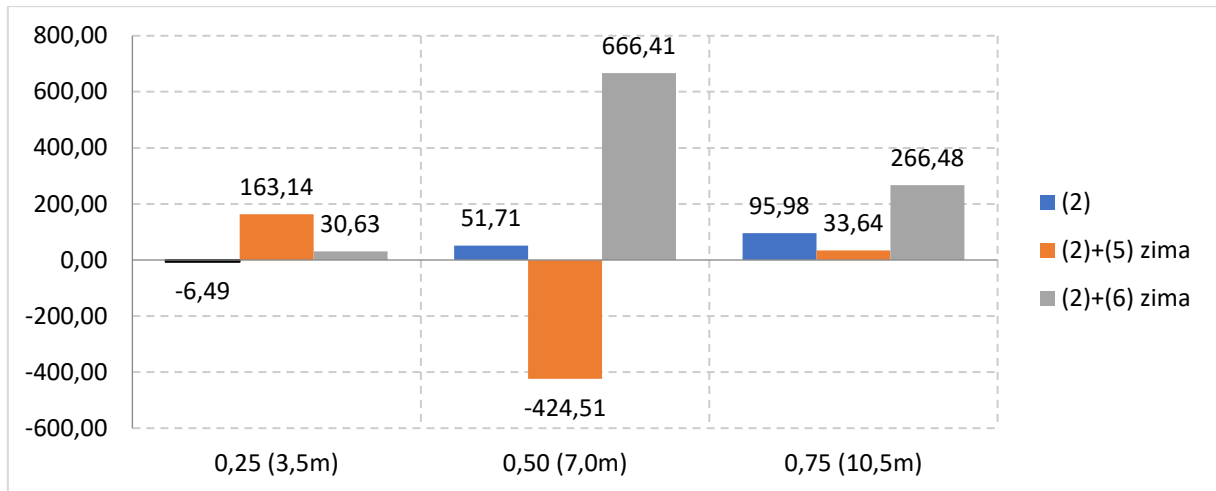
Rys. 7.64. Porównanie wartości sił podłużnych pionowych N dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w warunkach letnich dla ściany zewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



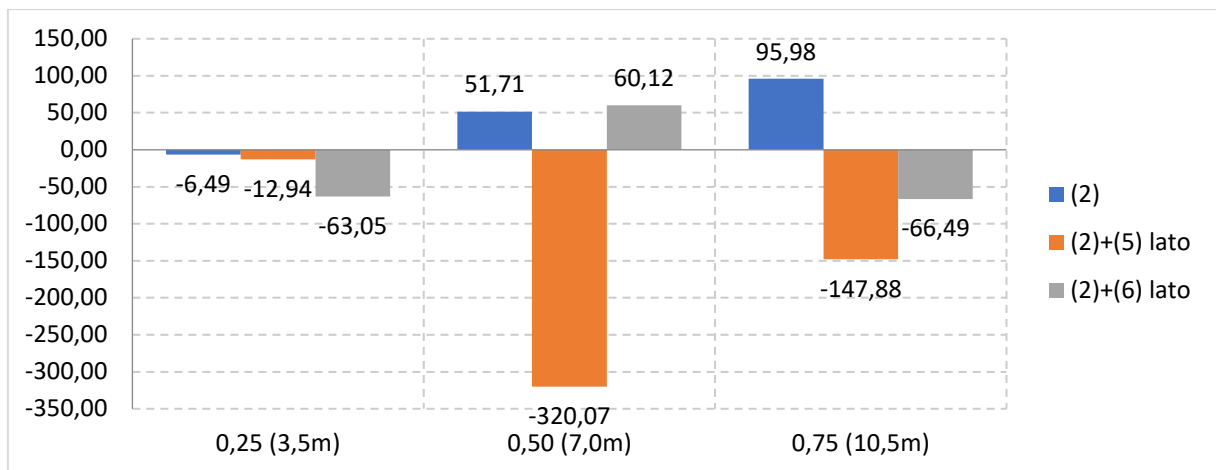
Rys. 7.65. Porównanie wartości sił podłużnych pionowych N dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w warunkach letnich dla ściany zewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



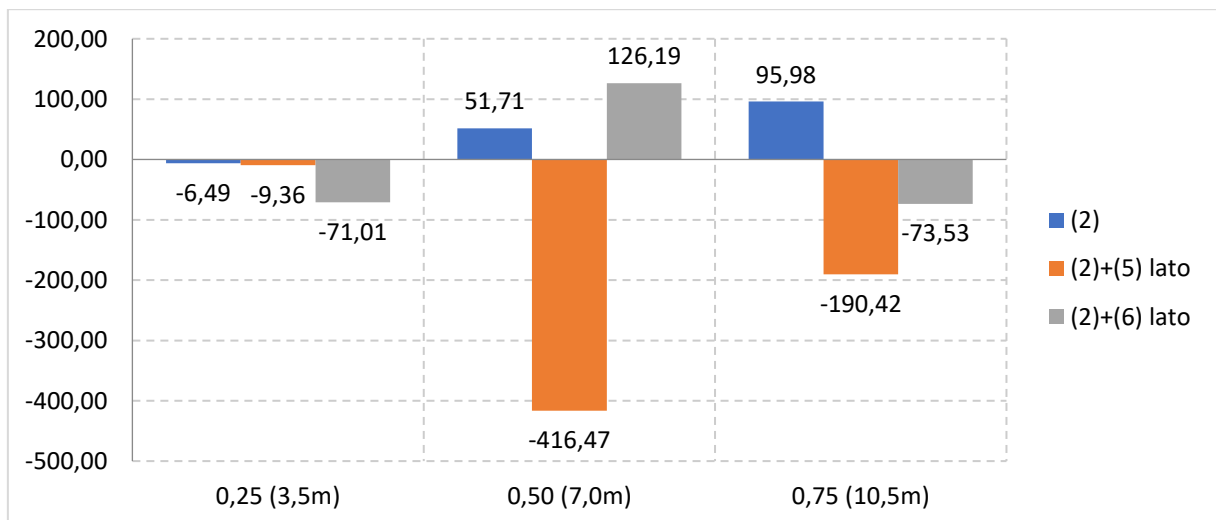
Rys. 7.66. Porównanie wartości sił podłużnych poziomych R dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w warunkach zimowych dla ściany zewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



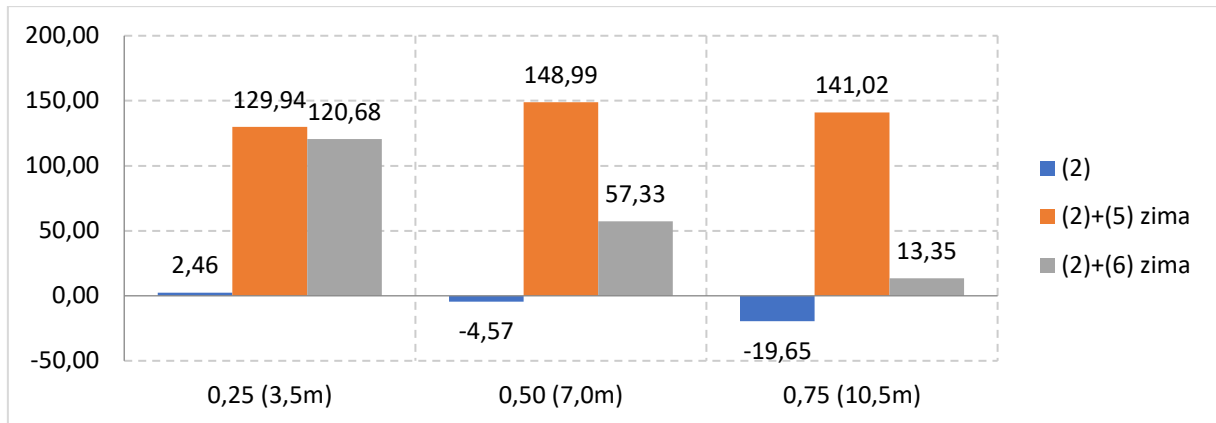
Rys. 7.67. Porównanie wartości sił podłużnych poziomych R dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w warunkach zimowych dla ściany zewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



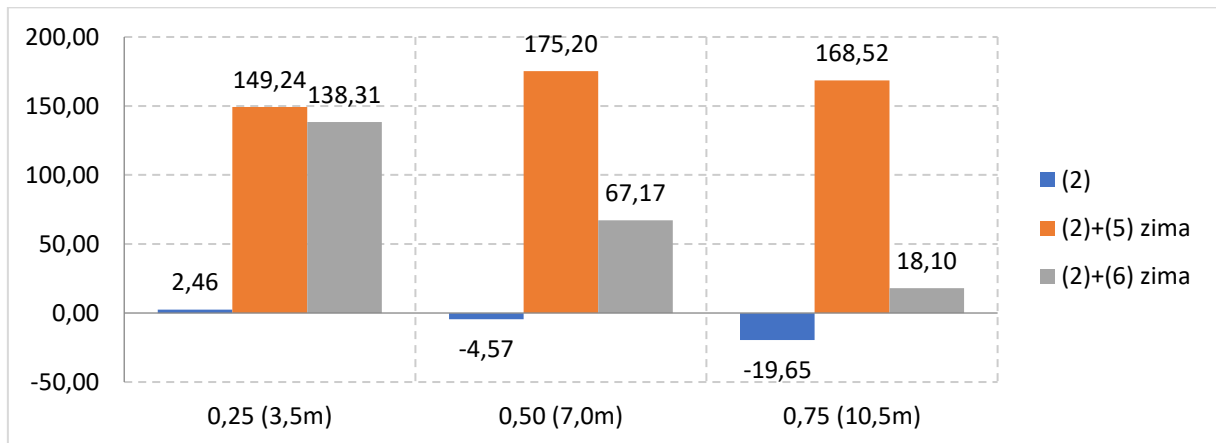
Rys. 7.68. Porównanie wartości sił podłużnych poziomych R dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w warunkach letnich dla ściany zewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



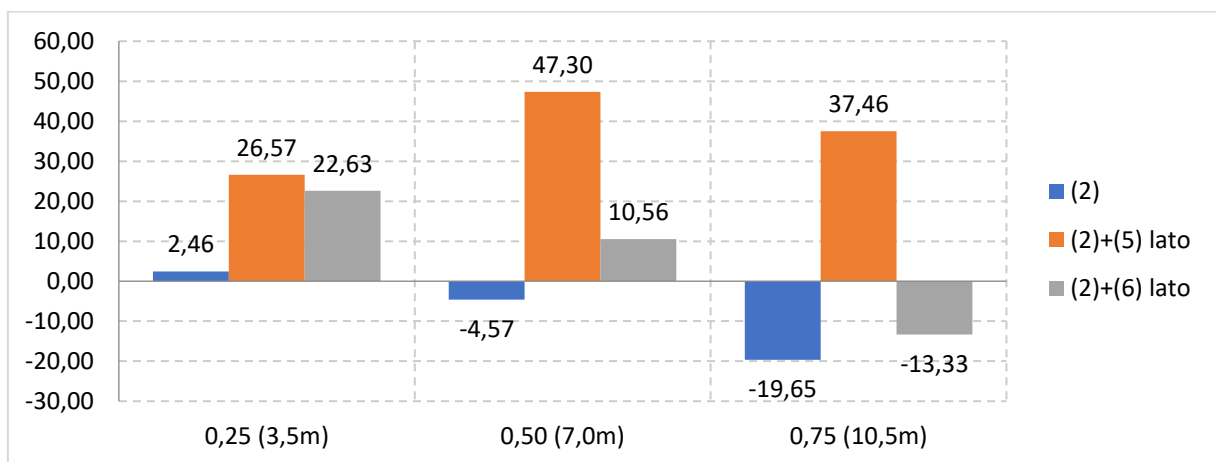
Rys. 7.69. Porównanie wartości sił podłużnych poziomych R dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w warunkach letnich dla ściany zewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



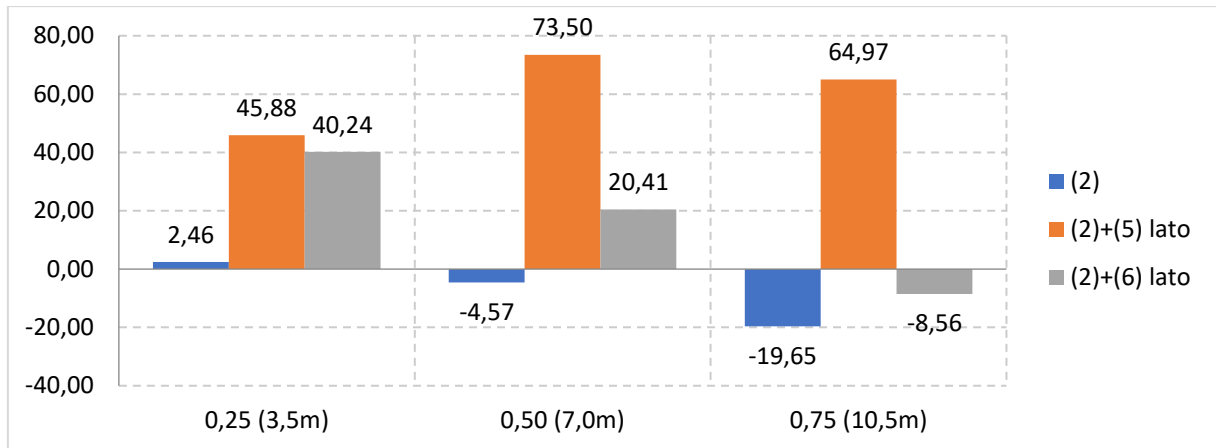
Rys. 7.70. Porównanie wartości momentów zginających pionowych M_N dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w warunkach zimowych dla ściany zewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



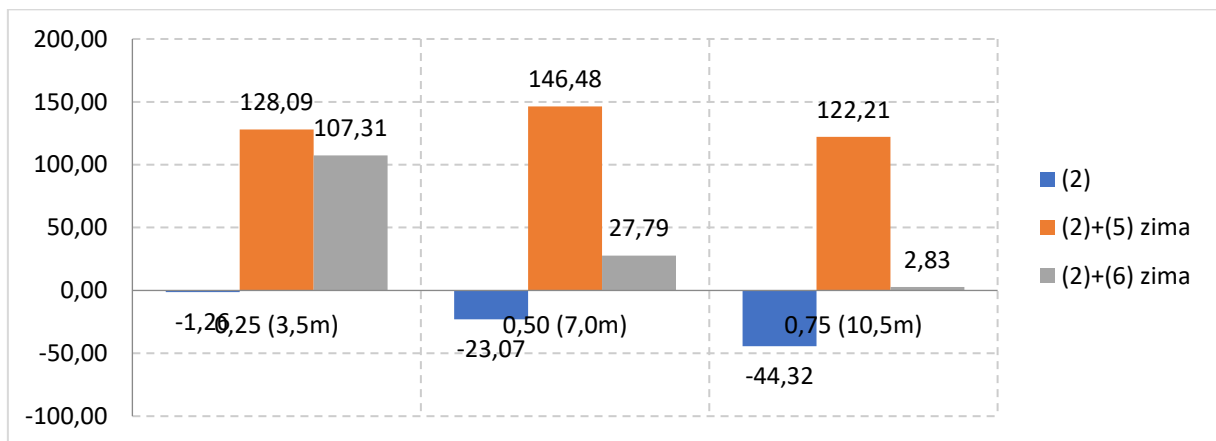
Rys. 7.71. Porównanie wartości momentów zginających pionowych M_N dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w warunkach zimowych dla ściany zewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



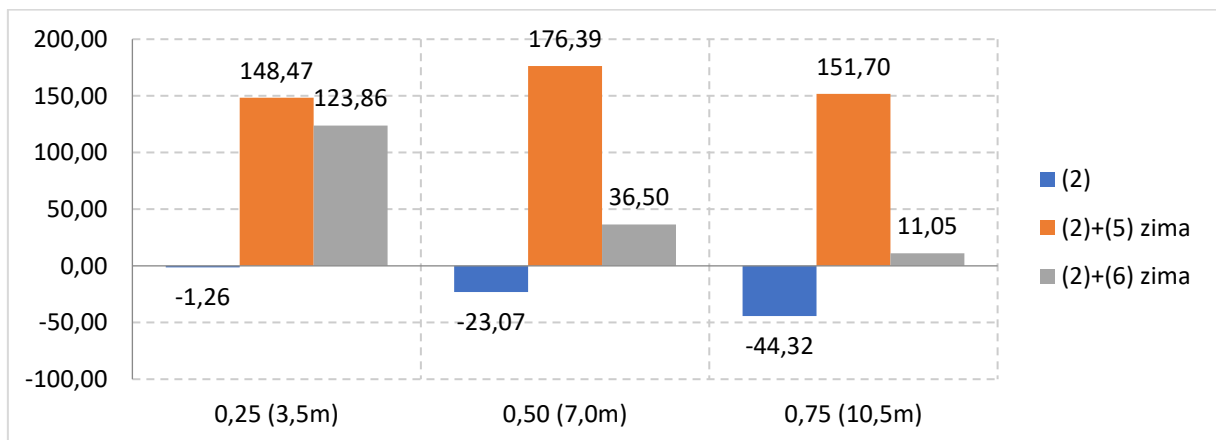
Rys. 7.72. Porównanie wartości momentów zginających pionowych M_N dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w warunkach letnich dla ściany zewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



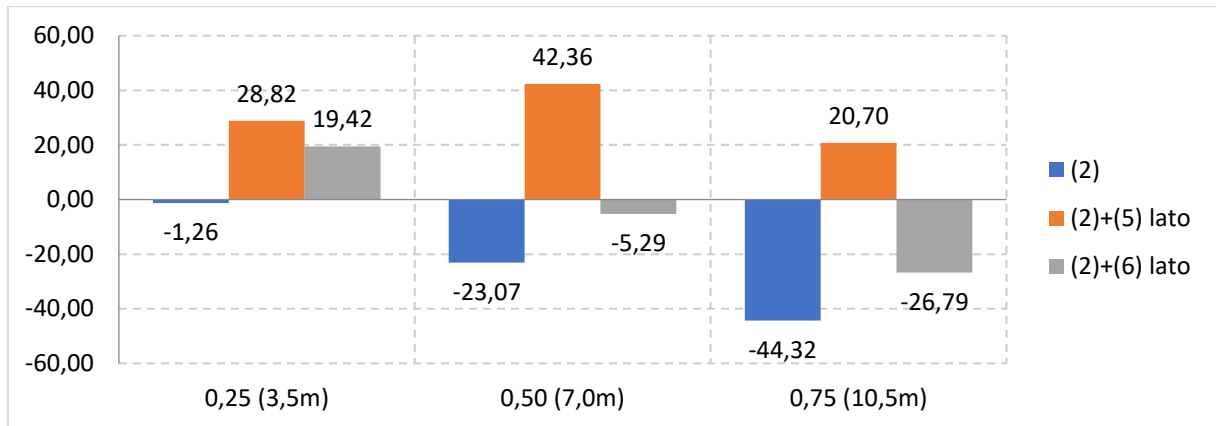
Rys. 7.73. Porównanie wartości momentów zginających pionowych M_N dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w warunkach letnich dla ściany zewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



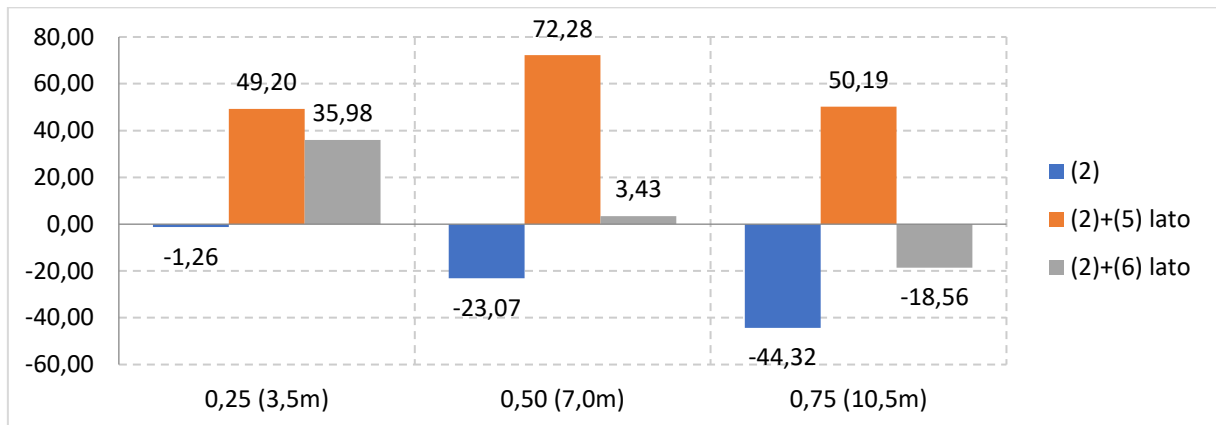
Rys. 7.74. Porównanie wartości momentów zginających poziomych M_R – przęsło dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w warunkach zimowych dla ściany zewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



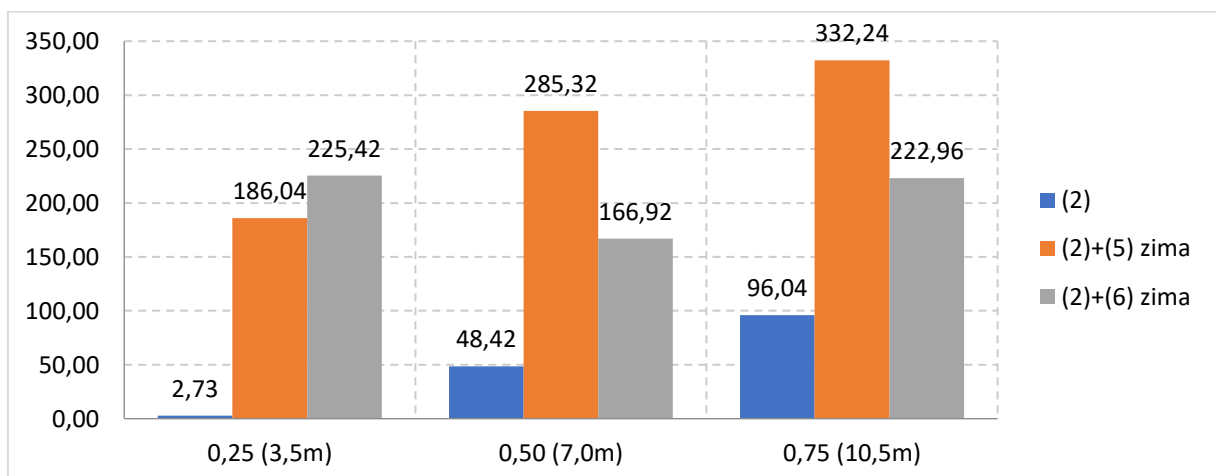
Rys. 7.75. Porównanie wartości momentów zginających poziomych M_R – przęsło dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w warunkach zimowych dla ściany zewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



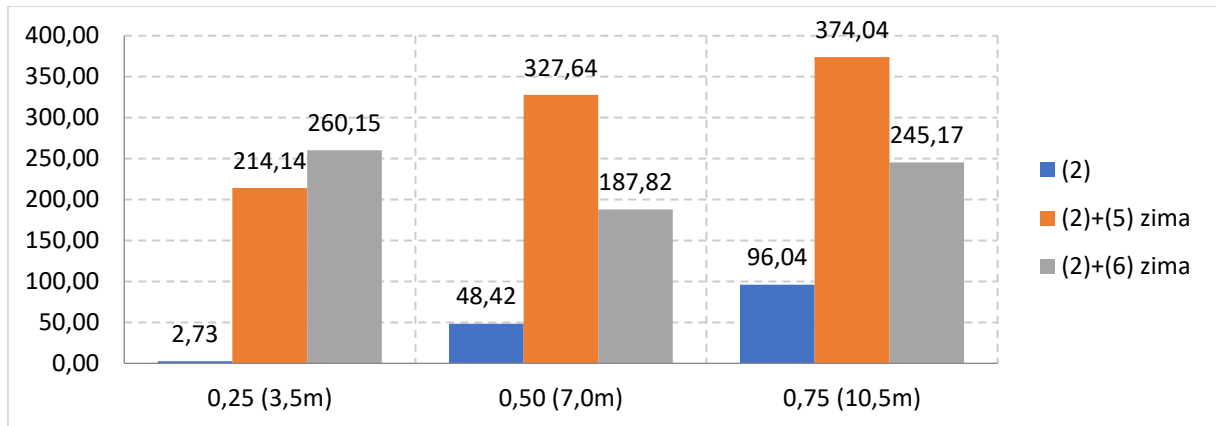
Rys. 7.76. Porównanie wartości momentów zginających poziomych M_R – przęsło dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w warunkach letnich dla ściany zewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



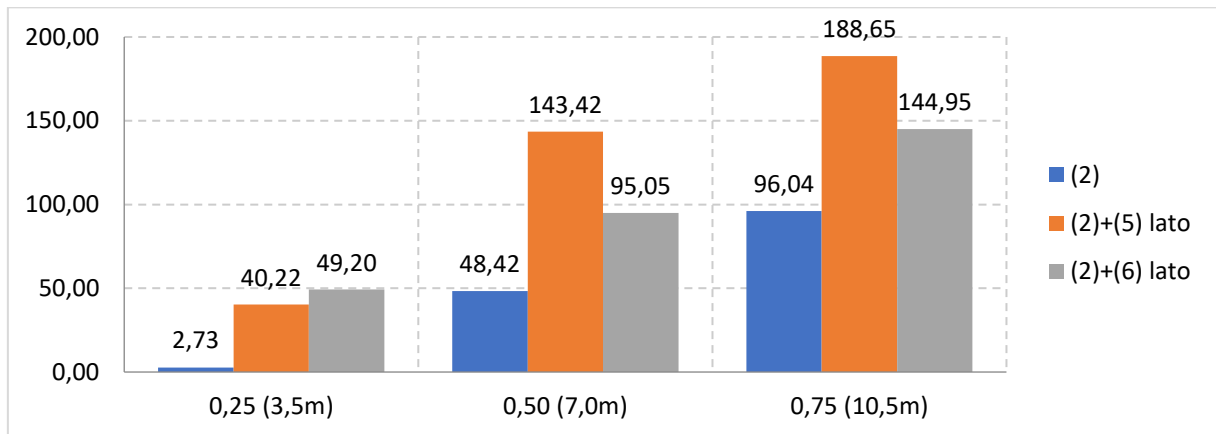
Rys. 7.77. Porównanie wartości momentów zginających poziomych M_R – przęsło dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w warunkach letnich dla ściany zewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



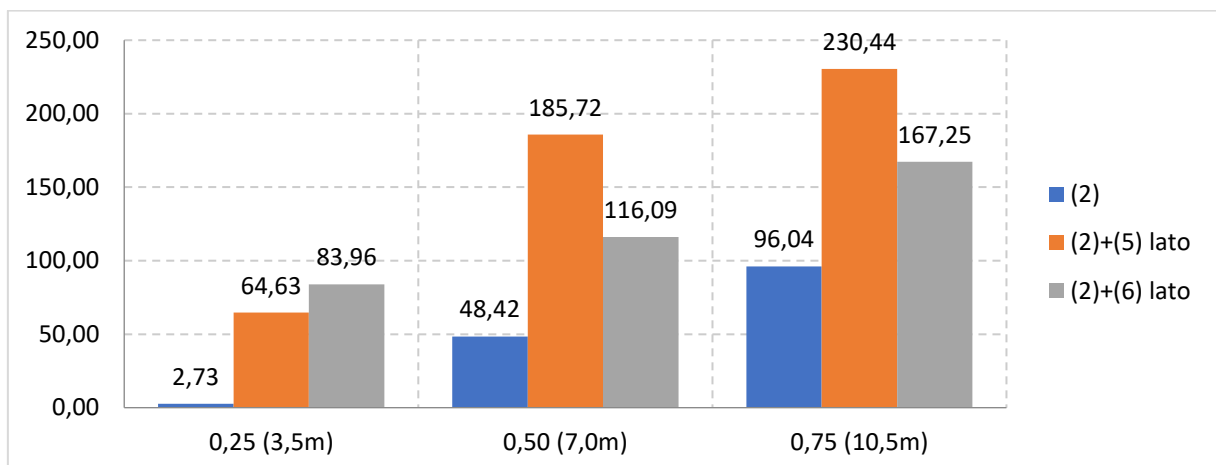
Rys. 7.78. Porównanie wartości momentów zginających poziomych M_R – podpora dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w warunkach zimowych dla ściany zewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



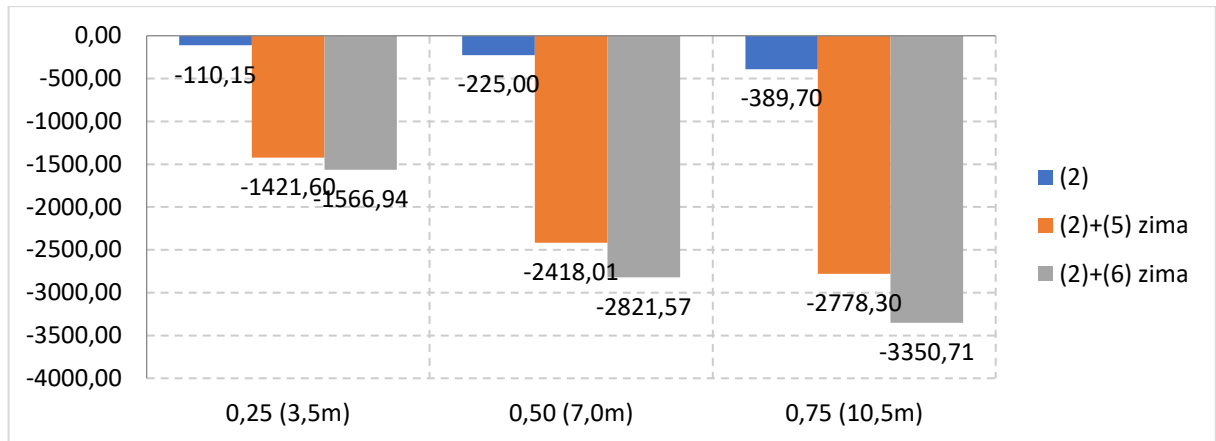
Rys. 7.79. Porównanie wartości momentów zginających poziomych M_R – podpora dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w warunkach zimowych dla ściany zewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



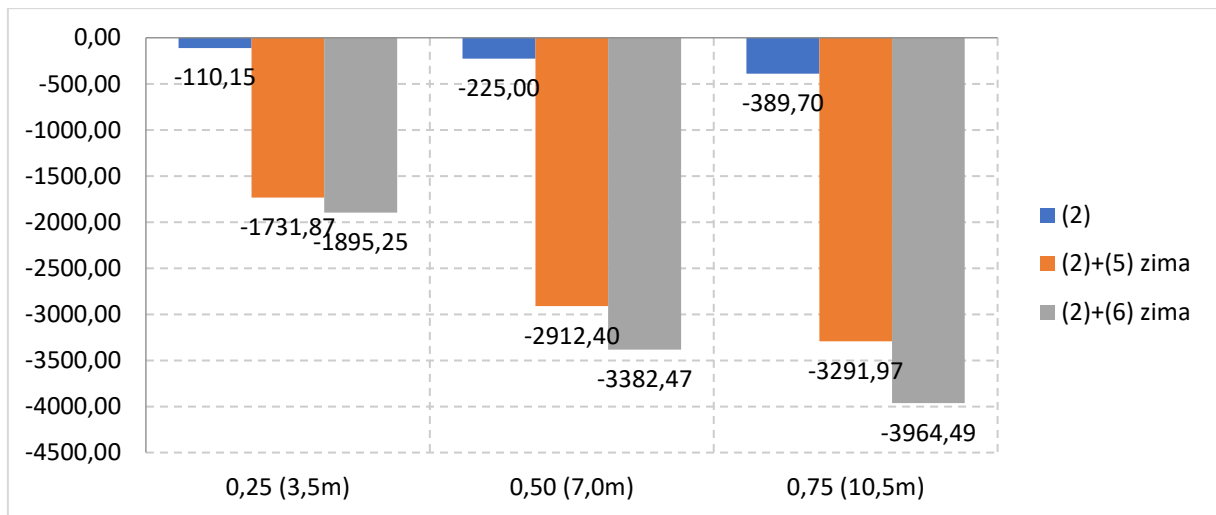
Rys. 7.80. Porównanie wartości momentów zginających poziomych M_R – podpora dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w warunkach letnich dla ściany zewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



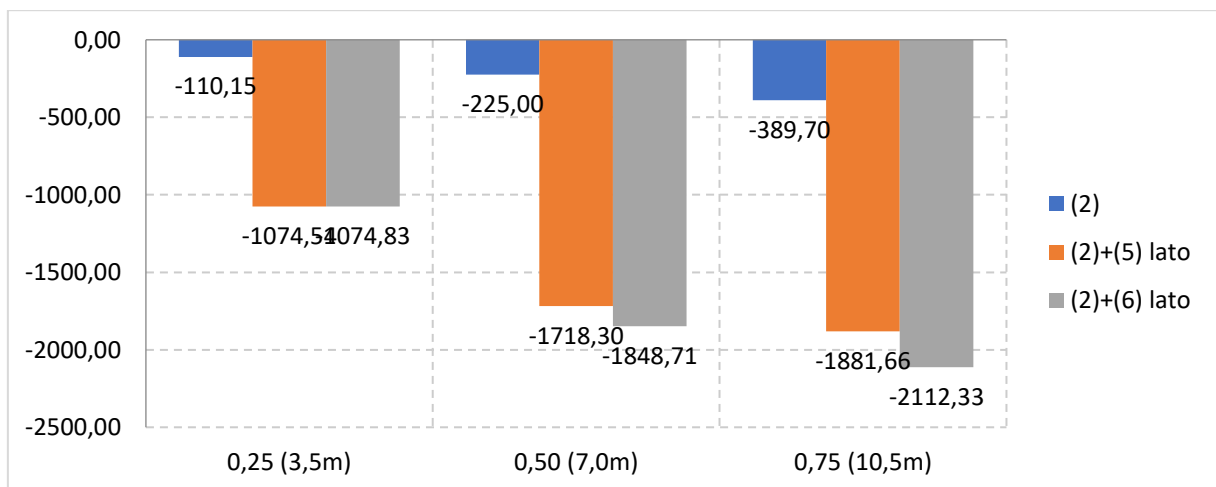
Rys. 7.81. Porównanie wartości momentów zginających poziomych M_R – podpora dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w warunkach letnich dla ściany zewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



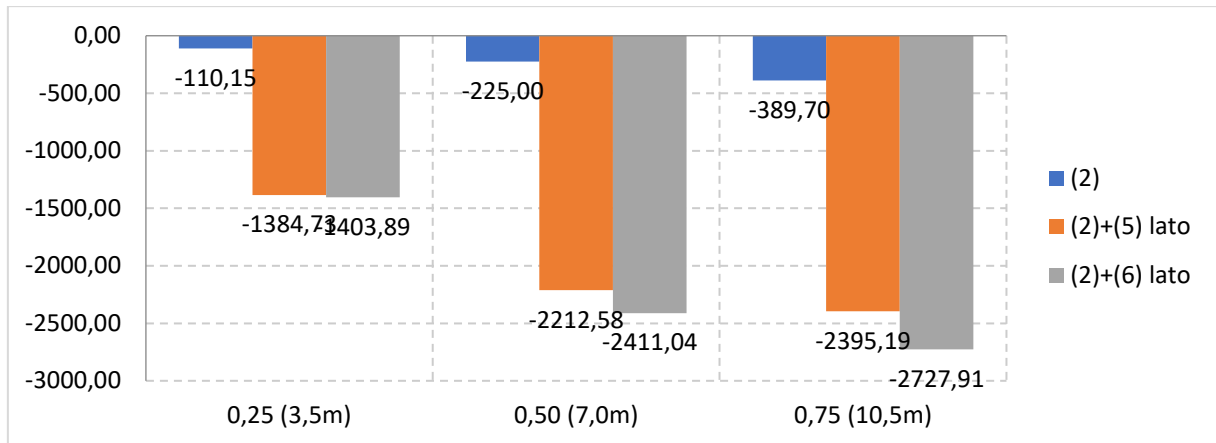
Rys. 7.82. Porównanie wartości sił podłużnych pionowych N dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w warunkach zimowych dla ściany wewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



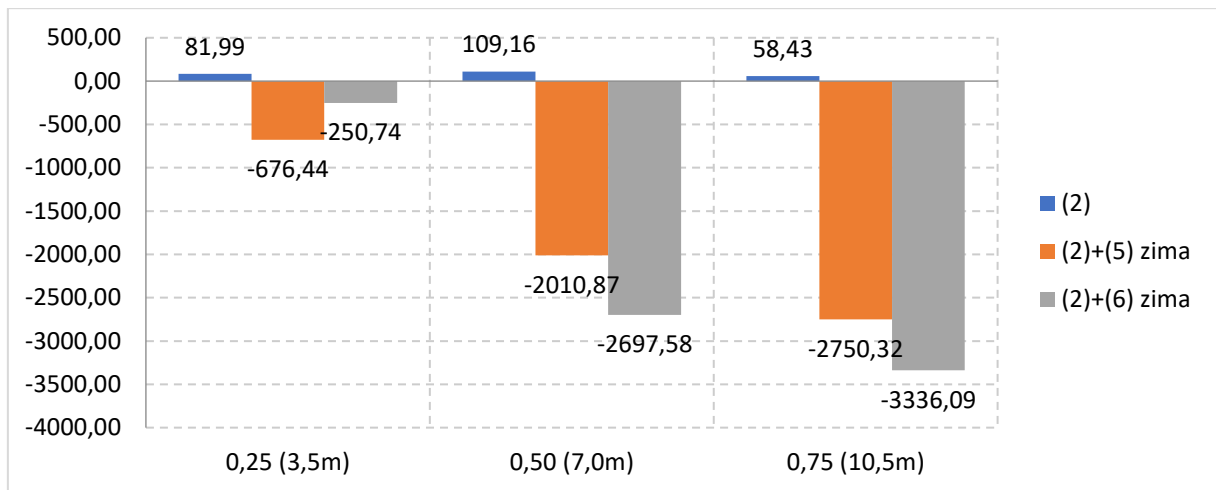
Rys. 7.83. Porównanie wartości sił podłużnych pionowych N dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w warunkach zimowych dla ściany wewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



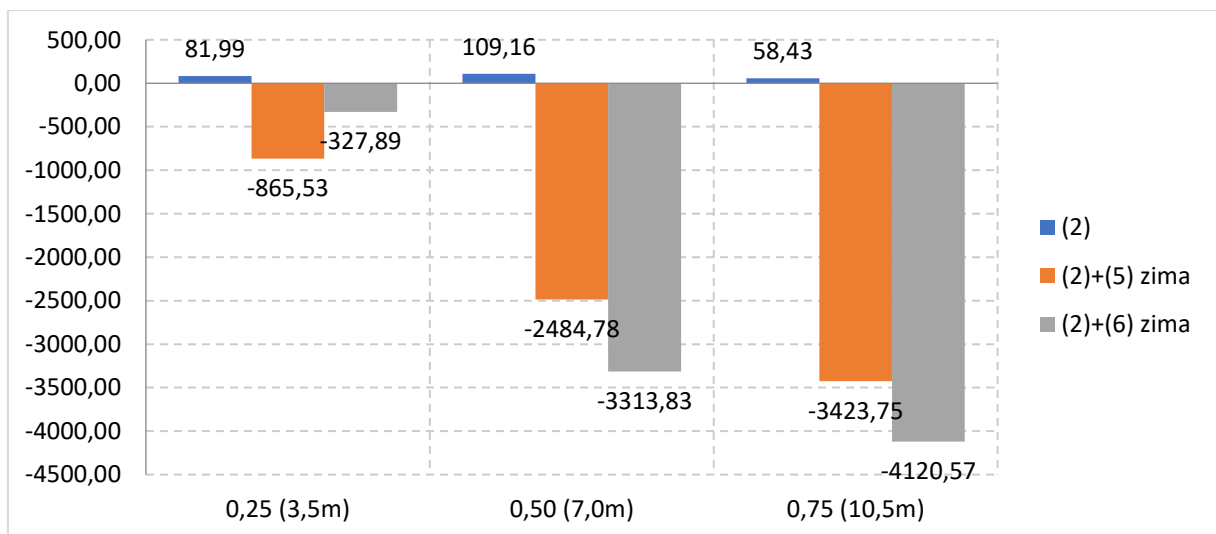
Rys. 7.84. Porównanie wartości sił podłużnych pionowych N dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w warunkach letnich dla ściany wewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



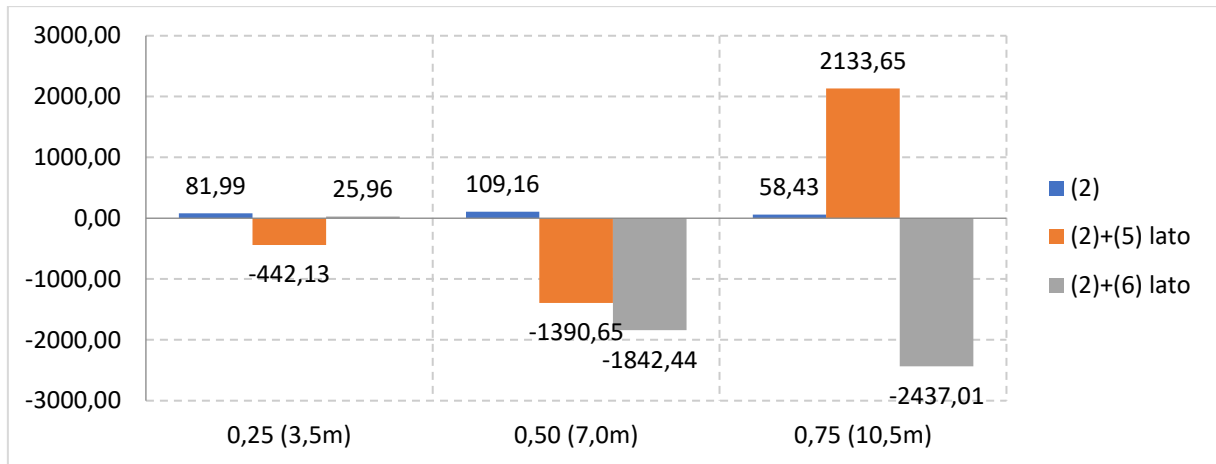
Rys. 7.85. Porównanie wartości sił podłużnych pionowych N dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w warunkach letnich dla ściany wewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



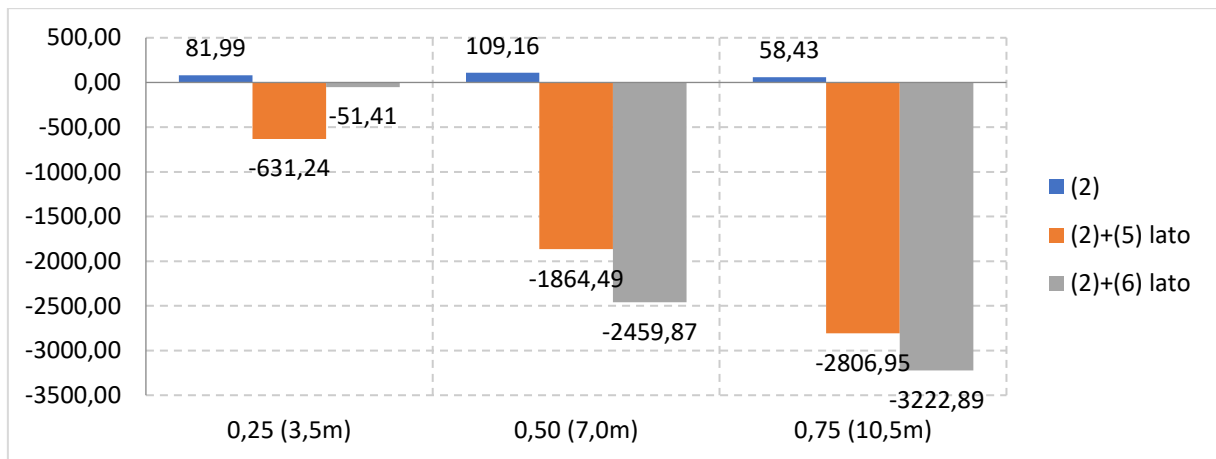
Rys. 7.86. Porównanie wartości sił podłużnych poziomych R dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w warunkach zimowych dla ściany wewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



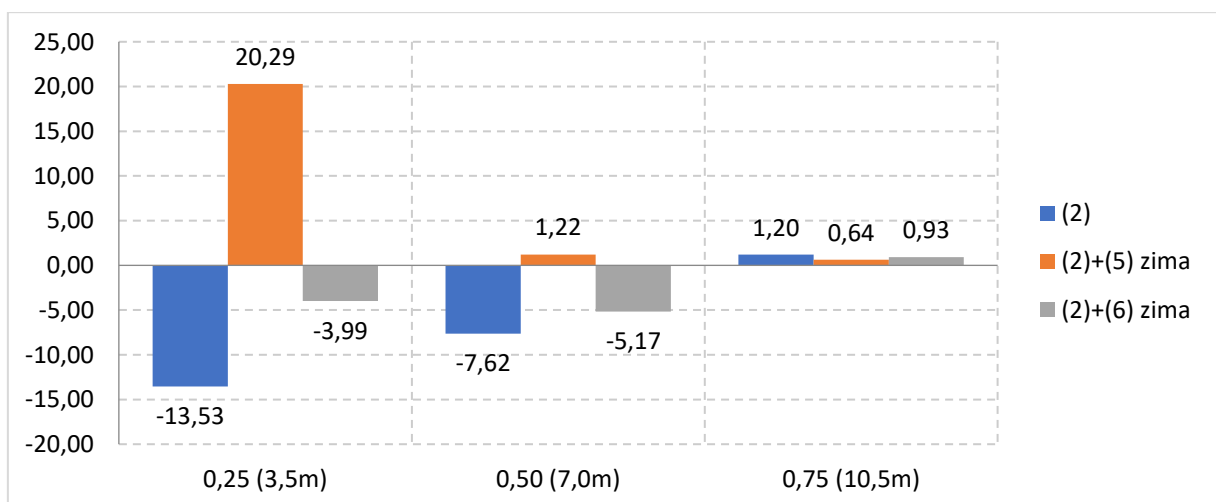
Rys. 7.87. Porównanie wartości sił podłużnych poziomych R dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w warunkach zimowych dla ściany wewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



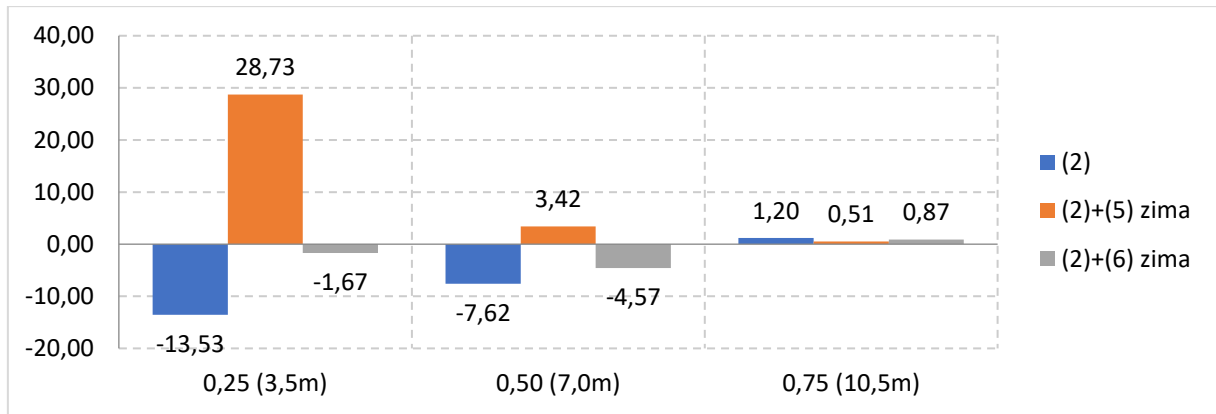
Rys. 7.88. Porównanie wartości sił podłużnych poziomych R dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w warunkach letnich dla ściany wewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



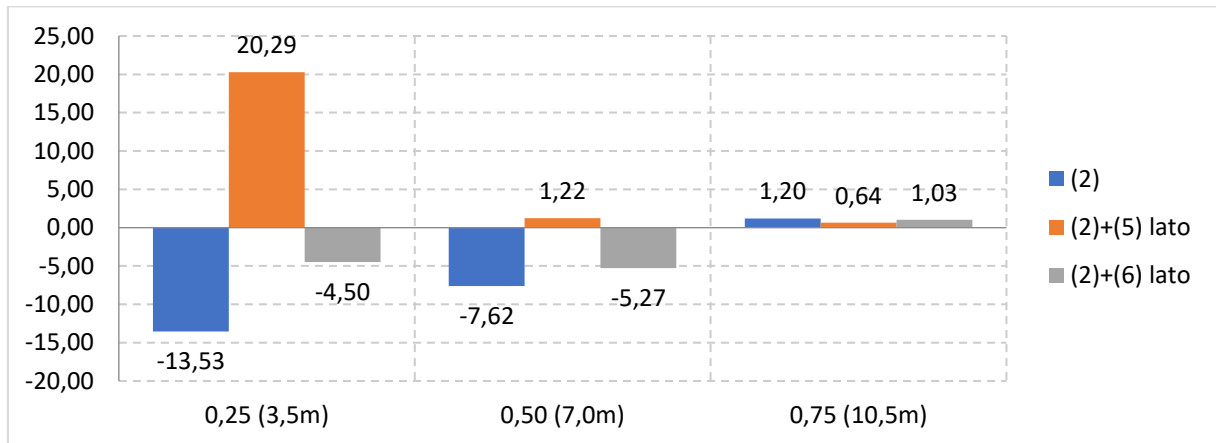
Rys. 7.89. Porównanie wartości sił podłużnych poziomych R dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w warunkach letnich dla ściany wewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



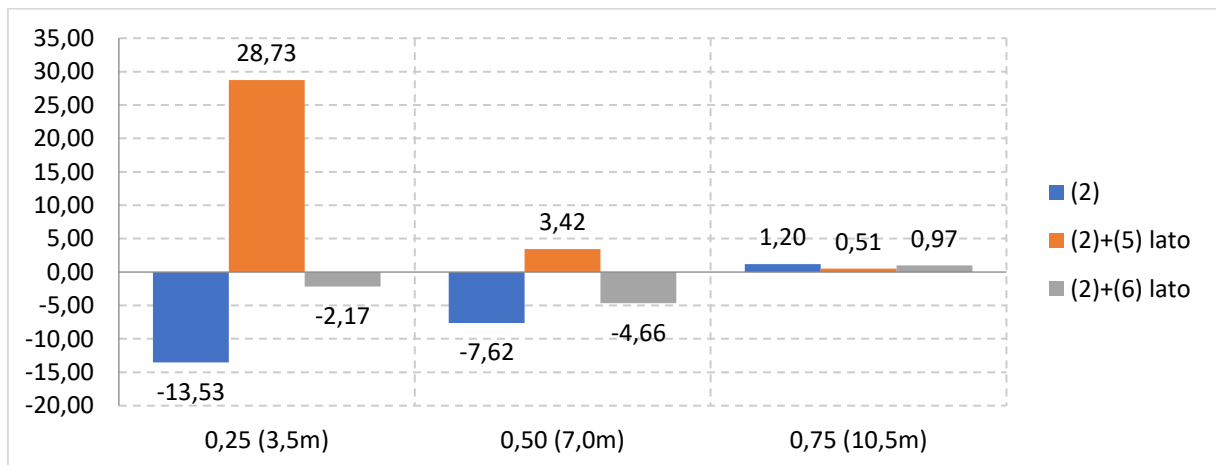
Rys. 7.90. Porównanie wartości momentów zginających pionowych M_N dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w warunkach zimowych dla ściany wewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



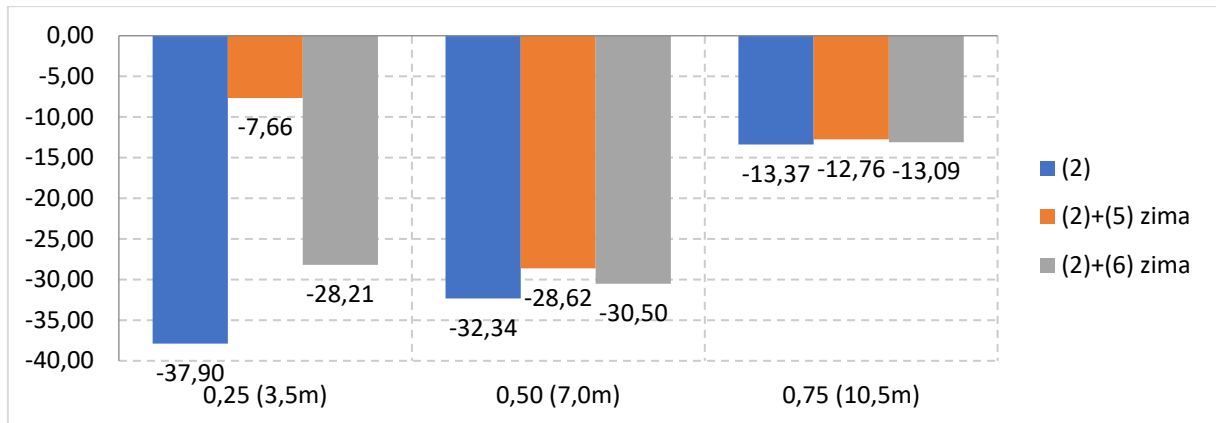
Rys. 7.91. Porównanie wartości momentów zginających pionowych M_N dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w warunkach zimowych dla ściany wewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



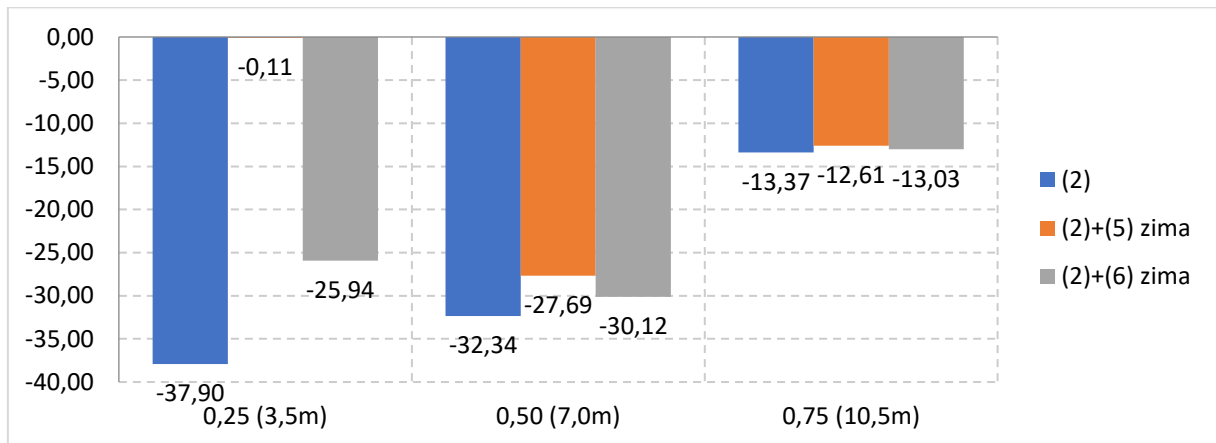
Rys. 7.92. Porównanie wartości momentów zginających pionowych M_N dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w warunkach letnich dla ściany wewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



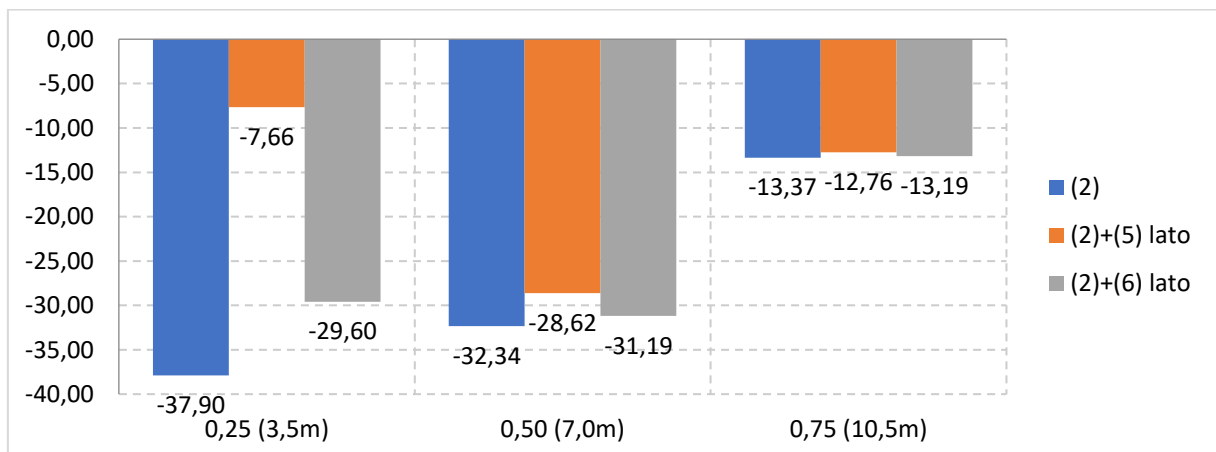
Rys. 7.93. Porównanie wartości momentów zginających pionowych M_N dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w warunkach letnich dla ściany wewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



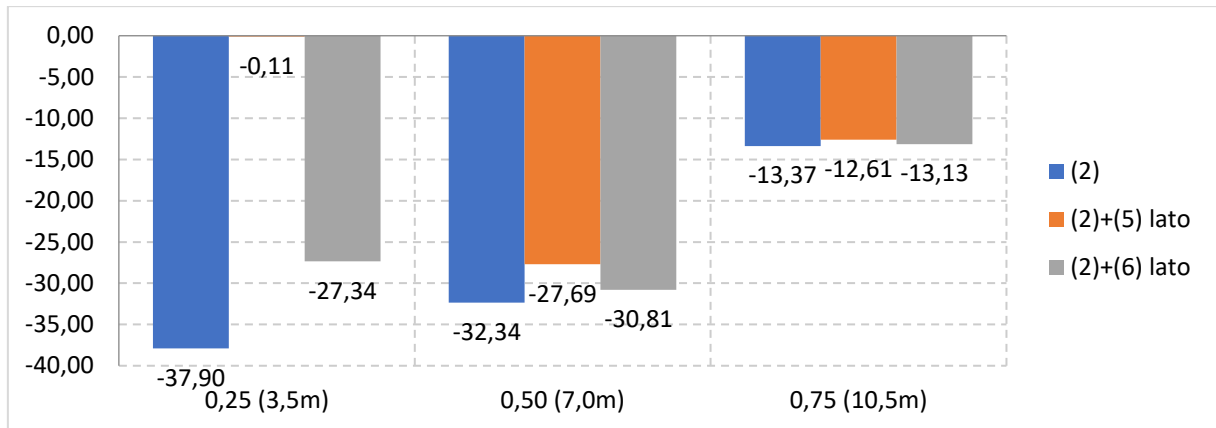
Rys. 7.94. Porównanie wartości momentów zginających poziomych M_R – przęsło dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w warunkach zimowych dla ściany wewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



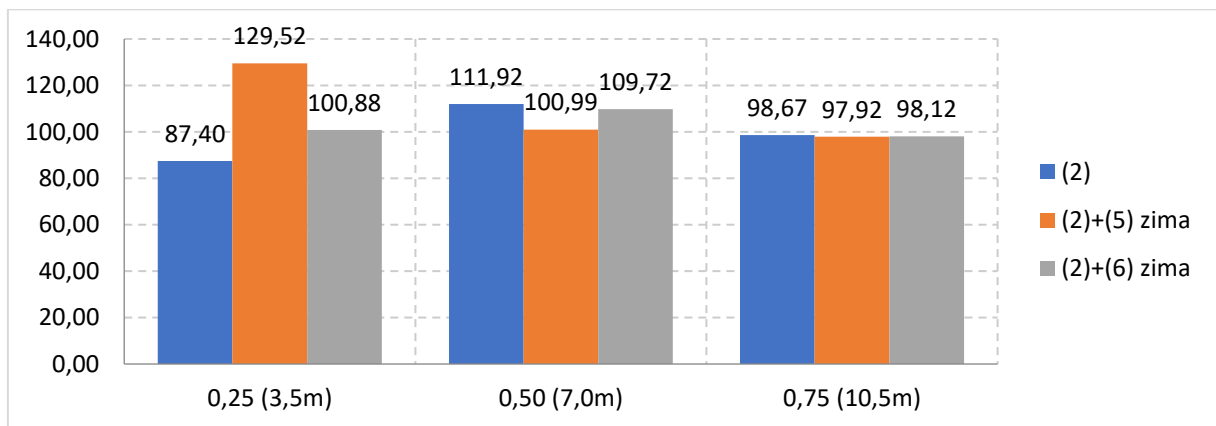
Rys. 7.95. Porównanie wartości momentów zginających poziomych M_R – przęsło dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w warunkach zimowych dla ściany wewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



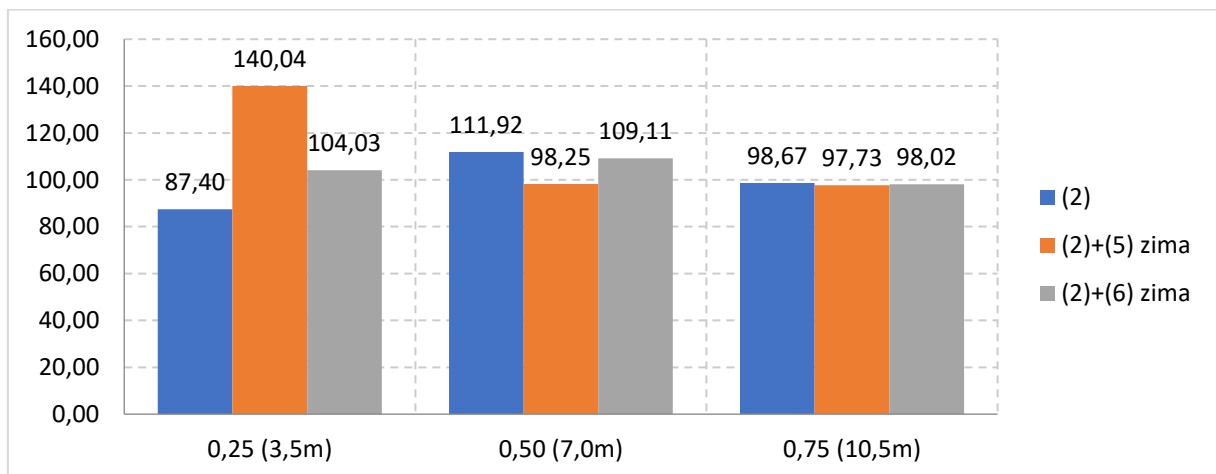
Rys. 7.96. Porównanie wartości momentów zginających poziomych M_R – przęsło dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w warunkach letnich dla ściany wewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



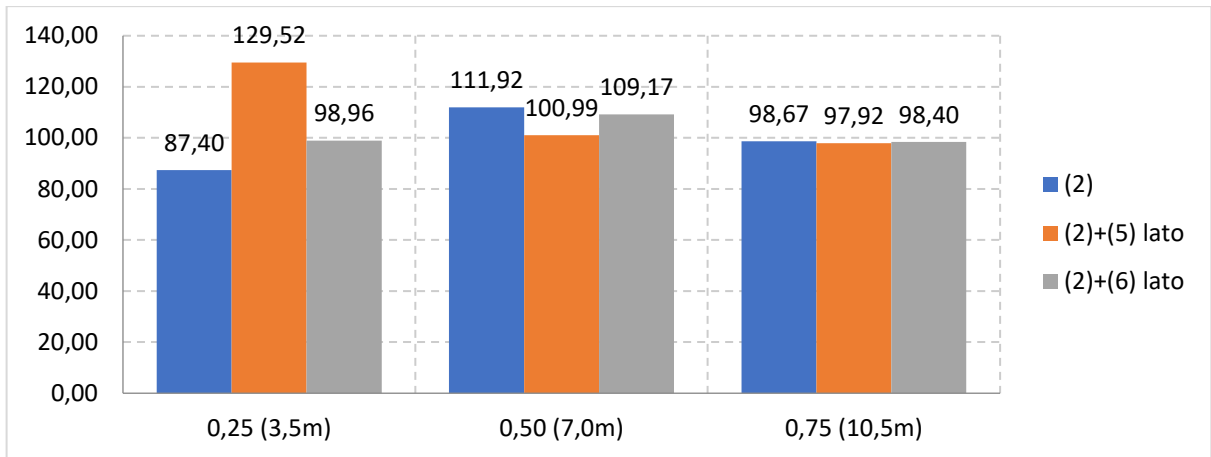
Rys. 7.97. Porównanie wartości momentów zginających poziomych M_R – przęsło dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w warunkach letnich dla ściany wewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



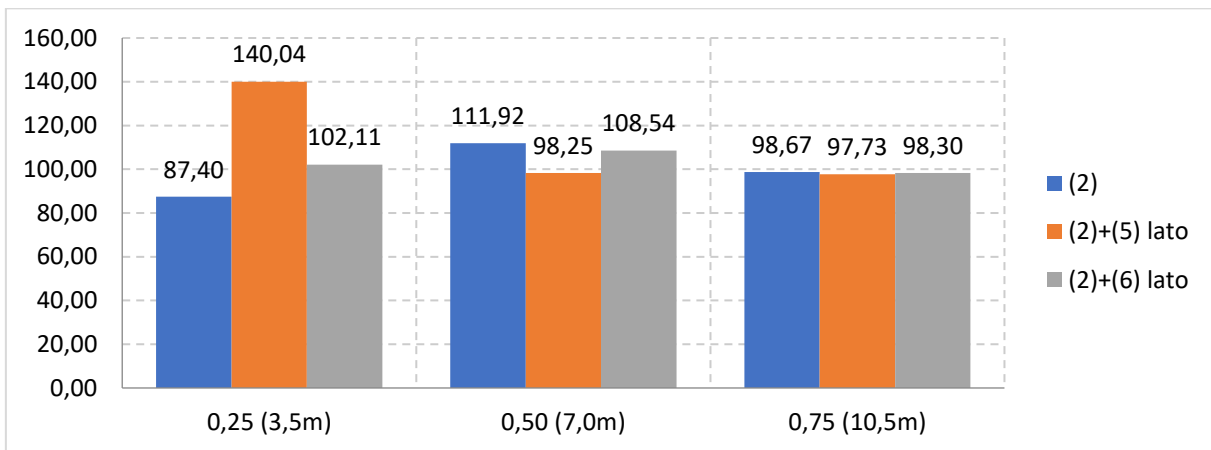
Rys. 7.98. Porównanie wartości momentów zginających poziomych M_R – podpora dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w warunkach zimowych dla ściany wewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



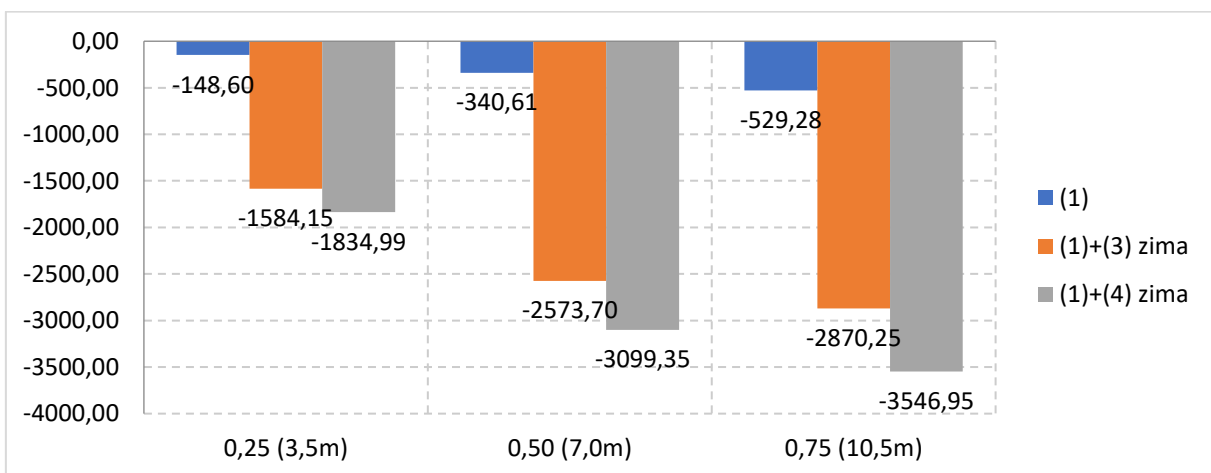
Rys. 7.99. Porównanie wartości momentów zginających poziomych M_R – podpora dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w warunkach zimowych dla ściany wewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



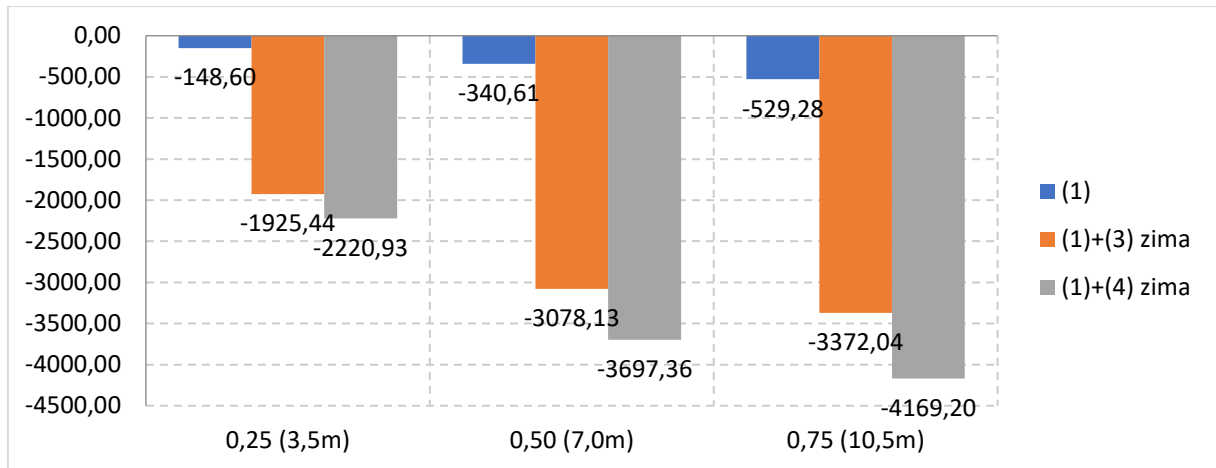
Rys. 7.100. Porównanie wartości momentów zginających poziomych M_R – podpora dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w warunkach letnich dla ściany wewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



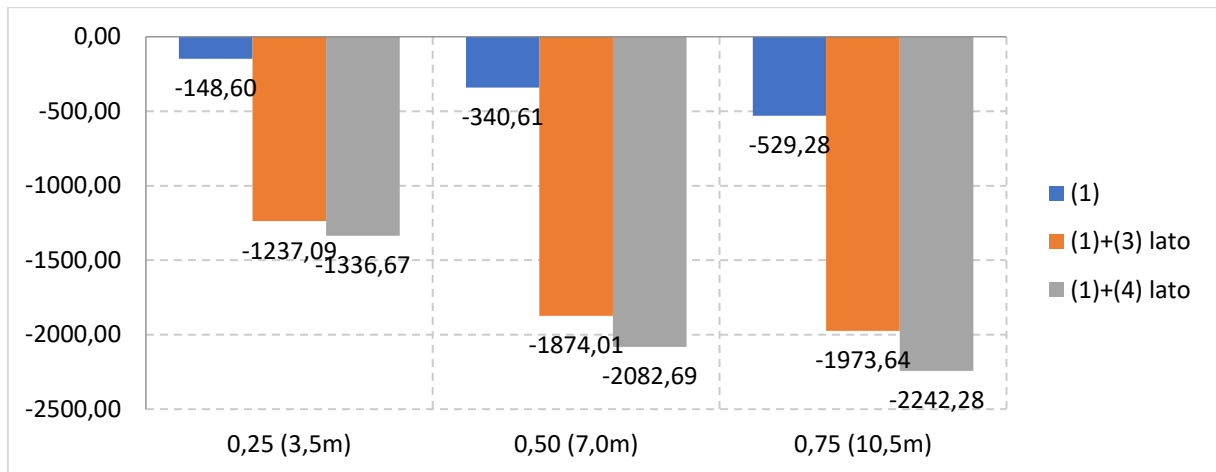
Rys. 7.101. Porównanie wartości momentów zginających poziomych M_R – podpora dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w warunkach letnich dla ściany wewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



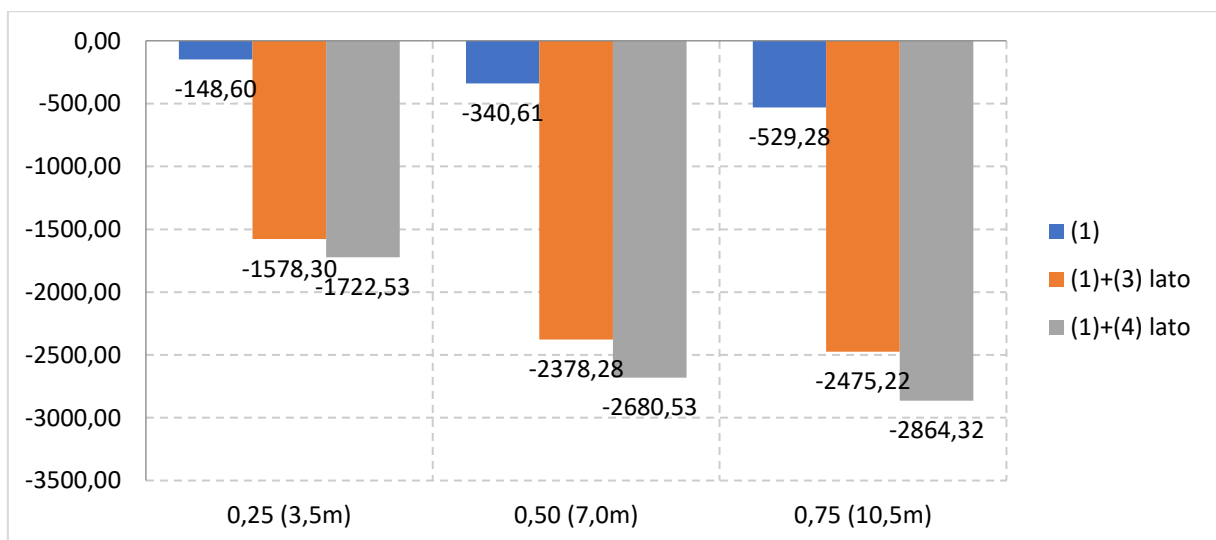
Rys. 7.102. Porównanie wartości sił podłużnych pionowych N dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w warunkach zimowych dla ściany wewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



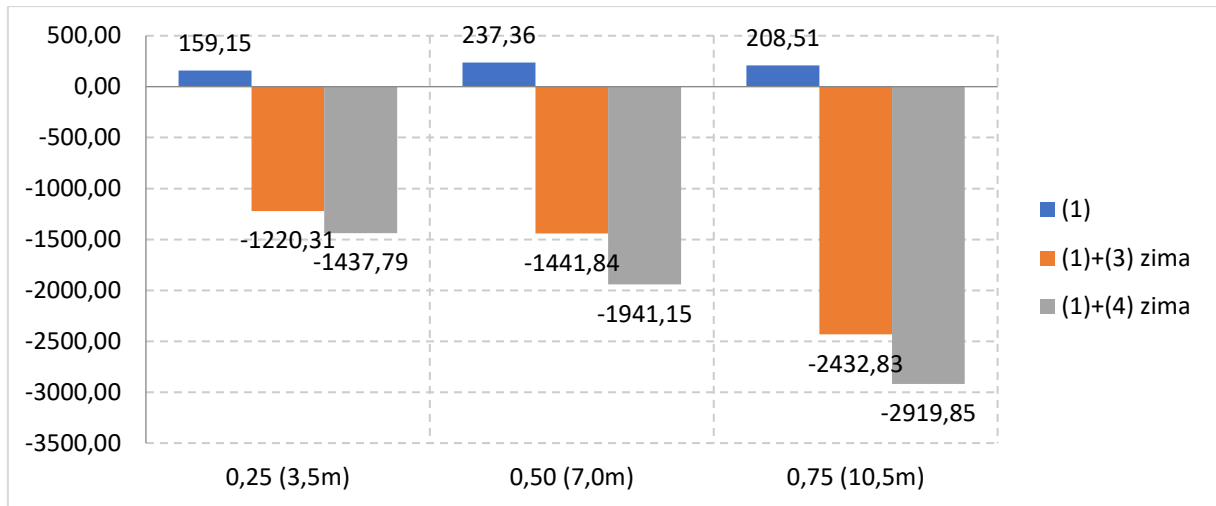
Rys. 7.103. Porównanie wartości sił podłużnych pionowych N dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w warunkach zimowych dla ściany wewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



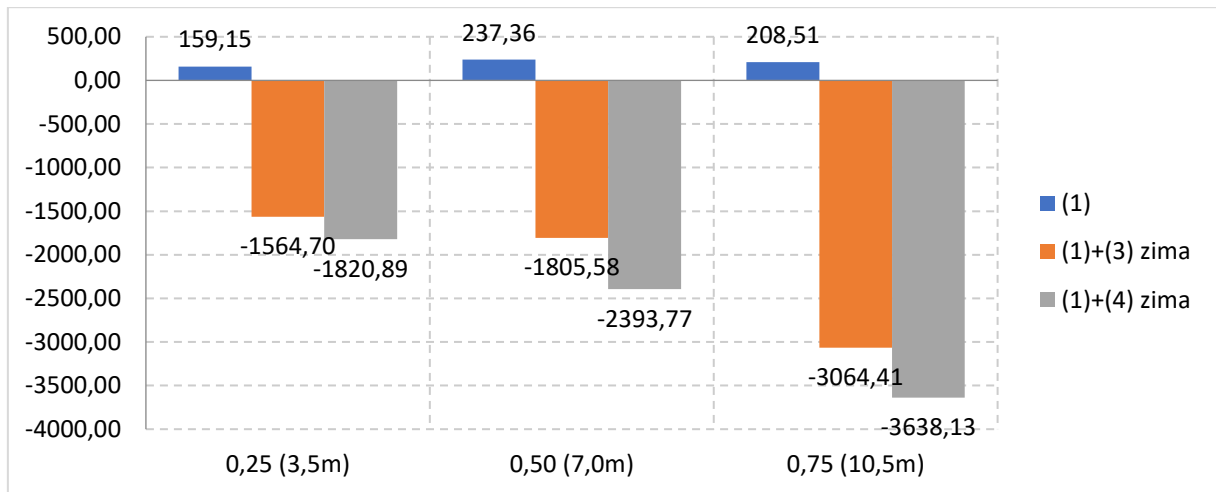
Rys. 7.104. Porównanie wartości sił podłużnych pionowych N dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w warunkach letnich dla ściany wewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



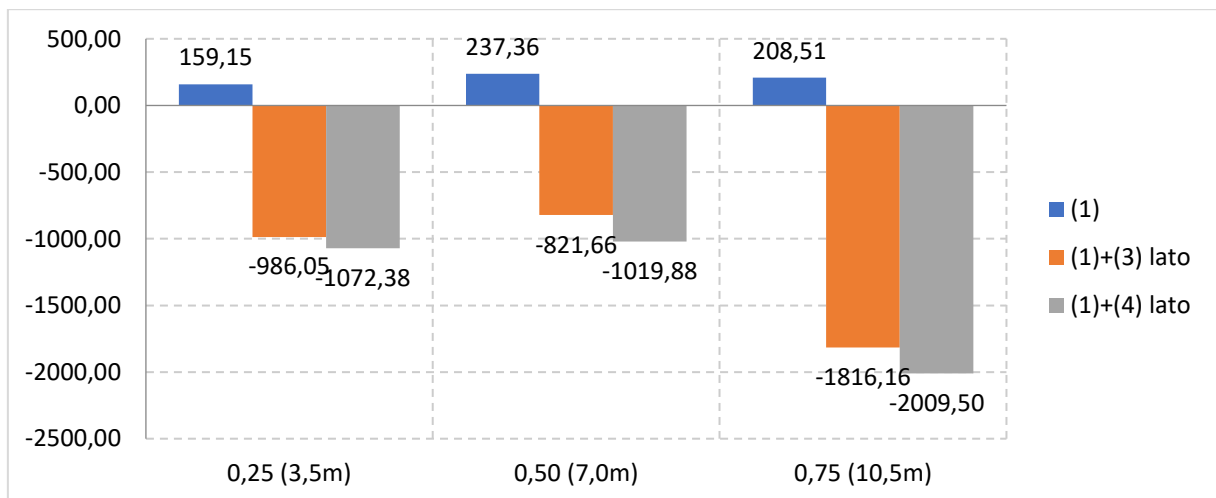
Rys. 7.105. Porównanie wartości sił podłużnych pionowych N dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w warunkach letnich dla ściany wewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



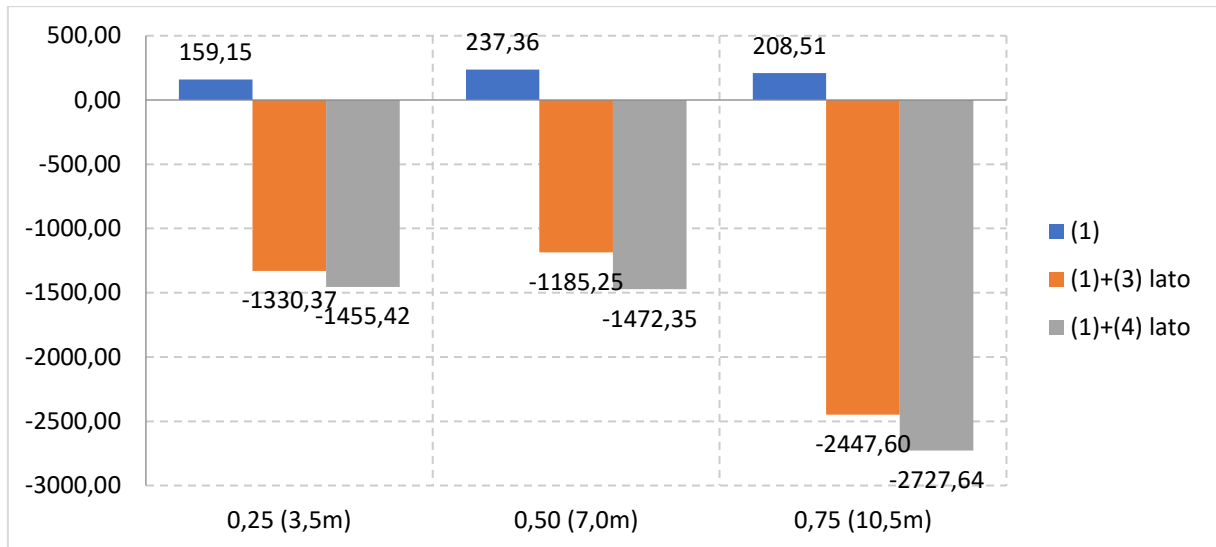
Rys. 7.106. Porównanie wartości sił podłużnych poziomych R dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w warunkach zimowych dla ściany wewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



Rys. 7.107. Porównanie wartości sił podłużnych poziomych R dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w warunkach zimowych dla ściany wewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



Rys. 7.108. Porównanie wartości sił podłużnych poziomych R dla temperatury klinkieru cementowego $T=80^{\circ}\text{C}$ w warunkach letnich dla ściany wewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$



Rys. 7.109. Porównanie wartości sił podłużnych poziomych R dla temperatury klinkieru cementowego $T=100^{\circ}\text{C}$ w warunkach letnich dla ściany wewnętrznej o grubości $t = 0,30\text{m}$

Na podstawie zestawionych wyników można stwierdzić, że oddziaływania termiczne mają istotny wpływ na stan wyężenia żelbetowej baterii silosów. Wartości sił wewnętrznych uzyskane dla kombinacji obejmujących temperaturę są w wielu przypadkach znacznie większe od wartości otrzymanych wyłącznie dla oddziaływań statycznych od parcia i tarcia materiału sypkiego. Dotyczy to szczególnie sił podłużnych pionowych N , dla których przyrosty względem przypadku bazowego są największe. Wynika to z faktu, że temperatura nie działa na konstrukcję jak klasyczne obciążenie siłowe, lecz jako wymuszenie odkształceniowe. Ogrzana ściana dąży do swobodnego wydłużenia, jednak w monolitycznej baterii silosów odkształcenia te są ograniczane przez sąsiednie ściany, naroża, płytę przekrycia, lej ostrosłupowy oraz ściany podpierające. W efekcie w elementach powłokowych powstają dodatkowe siły membranowe, widoczne w wynikach jako znaczny wzrost wartości sił N .

Szczególnie duże wartości sił podłużnych pionowych są związane z równomierną składową temperatury ścian. W przypadku ścian wewnętrznych, przy jednakowej temperaturze materiału po obu stronach przegrody, nie występuje gradient temperatury na grubości ściany, dlatego nie powstają istotne momenty zginające od różnicy temperatur. Nie oznacza to jednak braku oddziaływania termicznego. Ściana wewnętrzna ulega równomiernemu ogrzaniu, a jej odkształcenia w płaszczyźnie są skrępowane przez pozostałe elementy baterii. Z tego powodu nawet przy braku gradientu temperatury mogą powstawać znaczne siły podłużne N . Zjawisko to jest szczególnie widoczne w układzie wielokomorowym, w którym ściany wewnętrzne pracują jako elementy wspólne dla sąsiednich komór i przekazują oddziaływania na ściany zewnętrzne.

Na wartości sił wewnętrznych istotny wpływ mają również warunki brzegowe wynikające z przestrzennej pracy konstrukcji. Ściany baterii silosów nie pracują jako niezależne, swobodnie odkształcalne płyty, lecz jako układ połączonych ze sobą elementów powłokowych. Na krawędziach wspólnych występuje ciągłość przemieszczeń i obrotów, co powoduje wzajemne ograniczenie odkształceń sąsiednich płyt. Takie ograniczenia krawędziowe prowadzą do redystrybucji sił pomiędzy ścianami oraz do lokalnych zaburzeń rozkładu sił wewnętrznych w strefach połączeń. Z tego względu wartości uzyskane w pobliżu krawędzi, naroży, połączenia ścian z lejem oraz styku ścian z płytą przekrycia mogą różnić się od wartości występujących w środkowych częściach ścian.

Wyniki analizy MES wskazują także na występowanie koncentracji naprężeń w narożach komór oraz w rejonach połączeń elementów konstrukcyjnych. Są to miejsca, w których następuje zmiana kierunku pracy płyt, zmiana sztywności układu oraz wzajemne przenikanie się oddziaływań od parcia materiału, tarcia, ciężaru własnego i temperatury. Lokalne spiętrzenia sił w tych obszarach są typowe dla modeli powłokowych konstrukcji złożonych z wielu połączonych płyt. Dlatego interpretując wyniki, należy rozróżniać wartości reprezentatywne dla pracy całej ściany od lokalnych ekstremów występujących przy krawędziach i narożach. Pojedyncze maksima w strefach zaburzeń warunków brzegowych nie powinny być traktowane jako jedyny wyznacznik globalnej pracy ściany, lecz jako informacja o lokalnym wyężeniu wymagającym szczególnej uwagi projektowej.

Największe przyrosty sił wewnętrznych uzyskano zasadniczo w wariantach zimowych, zwłaszcza bez uwzględnienia przyściennnej warstwy tłumiącej. Wynika to z największej różnicy temperatur pomiędzy gorącym klinkierem cementowym a chłodnym środowiskiem zewnętrznym. Warianty bez warstwy tłumiącej powodują większy gradient temperatury w przekroju ściany, co wpływa głównie na wzrost momentów zginających M_N i M_R . Zastosowanie warstwy tłumiącej ogranicza przepływ ciepła do ściany oraz zmniejsza gradient temperatury, dlatego w wielu przypadkach prowadzi do zmniejszenia momentów zginających. Jednocześnie należy zauważyć, że warstwa tłumiąca nie eliminuje całkowicie wpływu równomiernej zmiany temperatury, dlatego siły membranowe N mogą nadal osiągać duże wartości.

Wpływ grubości ściany nie jest jednoznaczny. Zwiększenie grubości powoduje wzrost sztywności elementu, a tym samym większe ograniczenie swobodnych odkształceń termicznych. W przypadku obciążeń mechanicznych większa grubość może korzystnie wpływać na nośność i odkształcalność ściany, natomiast przy oddziaływaniach termicznych większa sztywność może prowadzić do wzrostu sił wymuszonych. Z tego względu w części

analizowanych wariantów ściany grubsze nie wykazują proporcjonalnego zmniejszenia sił wewnętrznych, a w niektórych przypadkach wartości sił i momentów są większe niż dla ścian cieńszych. Oznacza to, że przy projektowaniu silosów na gorące materiały sypkie sama zmiana grubości ściany nie może być traktowana jako jedyny sposób ograniczenia wyężenia konstrukcji.

W przypadku układu szachownicowego oraz częściowego napełnienia komór rozkład sił wewnętrznych jest bardziej złożony niż przy równomiernym obciążeniu wszystkich komór. Wynika to z niesymetrycznej pracy baterii silosów oraz z różnego poziomu obciążenia sąsiednich ścian. W takim układzie ściany wewnętrzne przenoszą oddziaływania z komór o różnych stanach obciążenia, co powoduje większą redystrybucję sił w całej konstrukcji. Wpływ temperatury przyłożonej do części komór może ujawniać się również w ścianach, które nie są bezpośrednio obciążone w taki sam sposób, ponieważ cały układ zachowuje ciągłość geometryczną i sztywnościową.

Podsumowując, wyniki rozdziału 7 potwierdzają, że żelbetowa bateria silosów prostopadłościennych powinna być analizowana jako przestrzenny układ współpracujących płyt, a nie jako zbiór niezależnych ścian. Oddziaływania termiczne, szczególnie równomierne ogrzanie ścian i związane z nim ograniczenie swobodnych odkształceń, mają decydujący wpływ na wartości sił podłużnych pionowych N . Duże wartości tych sił są konsekwencją sztywnego, monolitycznego połączenia elementów konstrukcji oraz kompatybilności odkształceń na krawędziach wspólnych ścian. Jednocześnie w narożach i strefach połączeń występują lokalne koncentracje naprężeń oraz zaburzenia warunków brzegowych, które należy uwzględniać przy interpretacji wyników MES. Uzyskane rezultaty wskazują, że w projektowaniu silosów przeznaczonych do magazynowania gorących materiałów sypkich konieczne jest łączne rozpatrywanie parcia materiału, tarcia oraz oddziaływań termicznych, a także dokładna analiza przestrzennej pracy całej baterii silosów.

Podsumowanie i wnioski końcowe

Celem pracy była analiza wpływu oddziaływań statycznych i termicznych na pracę żelbetowej baterii silosów prostopadłościennych. Analizowana konstrukcja była przeznaczona do składowania gorącego klinkieru cementowego. W pracy rozpatrzono trzy grubości ścian: 0,25 m, 0,30 m i 0,35 m. Przyjęto także dwie temperatury klinkieru: 80°C i 100°C. Uwzględniono warunki letnie i zimowe oraz warianty z przyścienną warstwą tłumiącą i bez warstwy tłumiącej.

W pierwszej części pracy omówiono podstawy projektowania silosów żelbetowych. Przedstawiono zasady wyznaczania parcia materiału sypkiego na ściany pionowe oraz lej. Omówiono także wpływ napełniania i opróżniania komór. Następnie opisano sposób określania oddziaływań termicznych. Szczególną uwagę zwrócono na rozkład temperatury w ścianie oraz na znaczenie równomiernego ogrzania i gradientu temperatury.

W dalszej części pracy wyznaczono obciążenia działające na konstrukcję. Uwzględniono ciężar własny elementów, obciążenia technologiczne, parcie klinkieru cementowego oraz tarcie materiału o ściany. Obciążenia od materiału sypkiego określono dla pełnego i częściowego napełnienia komór. Obliczenia wykonano osobno dla ścian pionowych oraz dla leja ostrosłupowego.

Oddziaływania termiczne określono dla różnych wariantów pracy silosu. Największe różnice temperatur wystąpiły w warunkach zimowych. Wynika to z dużej różnicy między temperaturą gorącego klinkieru a temperaturą otoczenia. Warianty bez warstwy tłumiącej powodowały większy gradient temperatury w ścianie. Zastosowanie warstwy tłumiącej ograniczało przepływ ciepła do betonu. Wpływało to głównie na zmniejszenie momentów zginających.

Model numeryczny wykonano w programie RFEM. Pozwoliło to odwzorować przestrzenną pracę całej baterii silosów. Jest to ważne, ponieważ ściany nie pracują jako oddzielne płyty. Są połączone ze sobą, z płytą przekrycia, lejem oraz ścianami podpierającymi. Taki układ powoduje wzajemne ograniczenie odkształceń. Ma to duże znaczenie szczególnie przy oddziaływaniach termicznych.

Wyniki obliczeń pokazały, że temperatura ma bardzo duży wpływ na wartości sił wewnętrznych. Największe różnice względem samego parcia i tarcia materiału wystąpiły dla sił podłużnych pionowych N . Wynika to z charakteru oddziaływania temperatury. Temperatura nie działa jak zwykłe obciążenie powierzchniowe. Powoduje odkształcenia ścian. Jeżeli ściana nie może odkształcić się swobodnie, powstają siły wymuszone.

Duże wartości sił N są więc skutkiem sztywnej pracy całej konstrukcji. Ogrzana ściana dąży do wydłużenia. W analizowanej baterii silosów jest jednak ograniczana przez sąsiednie ściany, naroża, płytę przekrycia, lej i ściany podpierające. W efekcie w ścianach powstają dodatkowe siły membranowe. Najbardziej widoczne jest to dla ścian wewnętrznych. Przy jednakowej temperaturze po obu stronach nie występuje gradient temperatury. Nie oznacza to jednak braku oddziaływania termicznego. Ściana jest wtedy ogrzana równomiernie, co również wywołuje siły N .

Wyniki pokazały także wpływ warunków brzegowych. W narożach, na krawędziach oraz przy połączeniach ścian z lejem i płytą przekrycia występują lokalne zaburzenia rozkładu sił. Są to miejsca zmiany geometrii i sztywności. W tych strefach pojawiają się koncentracje naprężeń. Dlatego lokalne maksima z modelu MES należy interpretować ostrożnie. Nie zawsze opisują one pracę całej ściany. Często pokazują lokalne wyężenie w strefie połączenia elementów.

Najbardziej niekorzystne wyniki otrzymano dla warunków zimowych bez warstwy tłumiącej. Szczególnie dotyczy to temperatury klinkieru 100°C . W tych wariantach różnica temperatur była największa. Powodowało to większe wartości momentów zginających oraz sił podłużnych. Warstwa tłumiąca wyraźnie ograniczała wpływ temperatury, ale nie usuwała go całkowicie. Siły N nadal mogły osiągać duże wartości, ponieważ zależą głównie od równomiernego ogrzania i stopnia skrępowania konstrukcji.

Nie stwierdzono też prostej zależności, że większa grubość ściany zawsze zmniejsza siły wewnętrzne. Grubsza ściana ma większą sztywność. Przy obciążeniach mechanicznych może to być korzystne. Przy temperaturze większa sztywność może jednak zwiększać siły wymuszone. Z tego powodu dobór grubości ściany powinien uwzględniać nie tylko nośność, ale też wpływ sztywności na odkształcenia termiczne.

W przypadku częściowego napełnienia komór rozkład sił był bardziej nieregularny. Wynika to z niesymetrycznego obciążenia baterii. Część ścian była obciążona inaczej niż ściany sąsiednie. Powodowało to redystrybucję sił w całym układzie. W takich przypadkach szczególnie ważne jest stosowanie modelu przestrzennego. Uproszczona analiza pojedynczej ściany nie oddaje w pełni pracy całej baterii.

Porównanie wyników MES z obliczeniami analitycznymi potwierdziło poprawność przyjętego modelu w zakresie ogólnej pracy konstrukcji. Dobre zgodności uzyskano głównie dla przekrojów oddalonych od stref lokalnych zaburzeń. Większe różnice występowały przy połączeniu ścian z lejem oraz w miejscach koncentracji sił. Jest to zrozumiałe, ponieważ model analityczny nie odwzorowuje w pełni przestrzennej współpracy ścian, naroży i leja.

Podsumowując, praca potwierdziła, że oddziaływania termiczne muszą być uwzględniane przy projektowaniu żelbetowych silosów na gorące materiały sypkie. Ich wpływ może być porównywalny albo większy niż wpływ samego parcia materiału. Szczególnie istotne są siły podłużne pionowe N , które wynikają ze skrępowania odkształceń termicznych. Analizowana bateria silosów pracuje jako jeden przestrzenny układ. Dlatego pełna ocena jej pracy wymaga analizy MES oraz jednoczesnego uwzględnienia parcia, tarcia, temperatury, sztywności połączeń i warunków brzegowych.

Wykaz literatury

Monografie naukowe:

- [1] Halicka A., Franczak D. (2011). Projektowanie zbiorników żelbetowych. Zbiorniki na materiały sypkie. Tom 1, PWN, Warszawa.
- [2] Kamiński M. i Zubrzycki M. (1985). Żelbetowe silosy na zboże. Badania i projektowanie. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- [3] Kobiak J. i Stachurski W. (1991). Konstrukcje żelbetowe – tom 4. Arkady, Warszawa.
- [4] Łapko A. (2007). Modele oddziaływań ośrodka ziarnistego na konstrukcję silosów według PN-EN 1991-4. Inżynier Budowlany, nr 4/2012, 120-124.
- [5] Łapko A. (1989). Efekty oddziaływań materiału sypkiego na żelbetowe ściany komór w eksploatowanych silosach na zboże. Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok.
- [6] Prusiel J. A. i Tomczuk K. (2012). Efekty sprzężenia parcia statycznego i pól temperatury w żelbetowych silosach na gorący ośrodek sypki. Przegląd budowlany, nr 4/2012, 53-57.
- [7] Prusiel J. A. i Kotomska M. D. (2022). Efekty oddziaływań gorącego ośrodka sypkiego w żelbetowym silosie prostopadłościennym. Builder, 4/2022, 75-79.
- [8] Prusiel J. A., Efekty sprzężonych oddziaływań termiczno-wilgotnościowych i statycznych w żelbetowych cylindrycznych silosach na zboże. Rozprawy Naukowe nr 271, Biblioteka Budownictwa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, ISSN 0867-096X, Białystok 2015.
- [9] Siennicki G., Domaszewski H., Kłóś Cz. (1955). Zbiorniki materiałów sypkich. Budownictwo i Architektura, Warszawa.
- [10] Tejchman J. (2010). Budownictwo przemysłowe. Obliczanie i konstrukcja silosów. Politechnika Gdańska, Gdańsk.

Akty ustawodawcze i normy

- [N1] Eurokod 0 PN-EN 1990:2004. Podstawy projektowania konstrukcji
- [N2] Eurokod 1 PN-EN 1991-1-1:2004. Oddziaływania ogólne, ciężar objętościowy, ciężar własny, obciążenia użytkowe w budynkach.
- [N3] Eurokod 1 PN-EN 1991-1-5:2005. Oddziaływania ogólne. Oddziaływania termiczne.
- [N4] Eurokod 1 PN-EN 1991-4:2008. Oddziaływania na konstrukcję. Silosy i zbiorniki.

[N5] Eurokod 2 PN-EN 1992-3:2008. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 3: Silosy i zbiorniki na ciecze.

[N6] PN-B-03262:2002 Silosy żelbetowe na materiały sypkie. Obliczenia statyczne, projektowanie, wykonawstwo i eksploatacja.

Źródła internetowe

[S1] Żelbetowe zbiorniki na materiały sypkie. Podstawy projektowania według norm europejskich. <https://inzynierbudownictwa.pl/zelbetowe-zbiorniki-na-materialy-sypkie-podstawy-projektowania-wedlug-norm-europejskich/>, 14.03.2026

[S2] <https://www.polskicement.pl/przemysl-cementowy/technologia/>, 28.03.2026

[S3] <https://technomaszbud.pl/przenosnik-tasmowy-do-linii-produkcyjnej-pt-250>, 12.04.2026

[S4] <https://izosystems.pl/content/16-wspolczynniki-lambda>, 02.06.2026

Wykaz programów wykorzystanych przy realizacji pracy

[P1] Autodesk AutoCAD

[P2] Dlubal RFEM 6

Załączniki

[Z1] Raport z obliczeń dla ściany o grubości $t = 0,25\text{m}$

[Z2] Raport z obliczeń dla ściany o grubości $t = 0,30\text{m}$

[Z3] Raport z obliczeń dla ściany o grubości $t = 0,35\text{m}$