



P O L I T E C H N I K A   Ś L Ą S K A  
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA

## Rozprawa doktorska

Temat:

Opracowanie teoretycznych podstaw nowego sposobu rektyfikacji budynków poddanych wpływom górniczym, który pozwala na minimalizację kosztów z tym związanych

### Wykonująca rozprawę doktorską

mgr inż. Katarzyna Małgorzata Nowak

imię i nazwisko

inżynieria lądowa, geodezja i transport

dyscyplina

4659

numer albumu

### Promotor rozprawy doktorskiej

prof. dr hab. inż. Leszek Szojda

imię i nazwisko, tytuł/stopień naukowy

### Promotor pomocniczy rozprawy doktorskiej

dr inż. Adam Marek

imię i nazwisko, tytuł/stopień naukowy

Rok akademicki 2022/2023





Gliwice, czerwiec 2023



## Spis treści

<b>1. WPROWADZENIE</b> .....	<b>7</b>
<b>2. CEL, TEZA I ZAKRES ROZPRAWY</b> .....	<b>9</b>
<b>3. REKTYFIKACJA BUDYNKÓW NA TERENACH GÓRNICZYCH</b> .....	<b>11</b>
3.1. METODY REKTYFIKACJI BUDYNKÓW .....	11
3.1.1. Metoda dźwigni jednostronnej .....	13
3.1.2. Metoda DMT .....	14
3.1.3. Metoda kompensacji osiadań .....	14
3.1.4. Metoda iniekcji .....	15
3.1.5. Metoda posadowienia elastycznego GERB .....	16
3.1.6. Metoda grawitacyjno-wiertnicza .....	17
3.1.7. Metoda wycinania warstw gruntu .....	18
3.1.8. Metoda przystosowania podstawy fundamentowej – skrzyni fundamentowej na ławach .....	19
3.1.9. Metoda przystosowania podstawy fundamentowej – płyty fundamentowej jako ostrosłupa .....	20
3.1.10. Metoda fundamentu dzielonego poziomo .....	21
3.1.11. Metoda podnośników w chodniku pod budowlą .....	21
3.1.12. Metoda odwiertów pod fundamentem budowli .....	21
3.1.13. Metoda wycianania klina muru .....	22
3.1.14. Podsumowanie .....	22
3.2. SPOŁECZNE I EKONOMICZNE ASPEKTY REKTYFIKACJI BUDYNKÓW .....	22
3.2.1. Aspekty społeczne .....	22
3.2.2. Aspekty ekonomiczne .....	23
3.2.3. Procedura usuwania szkód górniczych w obiektach budowlanych .....	33
<b>4. WARSTWA POŚLIZGOWA FUNDAMENTU JAKO PRZEDMIOT BADAŃ</b> .....	<b>37</b>
4.1. CEL NAUKOWY BADAŃ .....	37
4.2. ZNACZENIE BADAŃ .....	40
<b>5. BADANIA LABORATORYJNE WARSTWY POŚLIZGOWEJ</b> .....	<b>41</b>
5.1. METODOLOGIA BADAŃ .....	41
5.2. BUDOWA WARSTWY POŚLIZGOWEJ .....	41
5.2.1. Smar LOTOS LT4 S-2 .....	41
5.2.2. Smar LOTOS GRAFITOWANY .....	43
5.2.3. Smar LOTOS MONILIT EP 23 .....	44
5.2.4. Smar LOTOS SULFOCAL 302 .....	45
5.2.5. Folia izolacyjna FOLIAREX IZ 300-N .....	46
5.3. OPIS BADAŃ LABORATORYJNYCH SMARÓW .....	47
5.3.1. Oznaczenie liczby kwasowej .....	47
5.3.2. Oznaczenie liczby zasadowej .....	49
5.3.3. Oznaczenie zawartości składników stałych w smarze .....	50
5.3.4. Badania pod skaningowym mikroskopem elektronowym .....	52
5.4. OPIS BADAŃ LABORATORYJNYCH WARSTWY POŚLIZGOWEJ .....	53
<b>6. WYNIKI BADAŃ LABORATORYJNYCH WARSTWY POŚLIZGOWEJ</b> .....	<b>61</b>
<b>7. BADANIA LABORATORYJNE MODELU POWIERZCHNI SFERYCZNEJ</b> .....	<b>75</b>
7.1. METODOLOGIA BADAŃ .....	75
7.2. BUDOWA WARSTWY POŚLIZGOWEJ .....	75
7.3. OPIS BADAŃ LABORATORYJNYCH MODELU POWIERZCHNI SFERYCZNEJ .....	75
<b>8. WYNIKI BADAŃ LABORATORYJNYCH MODELU POWIERZCHNI SFERYCZNEJ ...</b>	<b>83</b>
<b>9. ANALIZA NUMERYCZNA WARSTWY POŚLIZGOWEJ</b> .....	<b>91</b>
9.1. OPIS ANALIZY NUMERYCZNEJ WARSTWY POŚLIZGOWEJ .....	91

---

9.1.1. Geometria modelu.....	92
9.1.2. Parametry materiałowe .....	92
9.1.3. Warunki brzegowe .....	92
9.1.4. Warunki kontaktowe .....	93
9.1.5. Siatkowanie.....	94
9.1.6. Zdefiniowane obciążenia .....	95
9.2. WYNIKI ANALIZY NUMERYCZNEJ WARSTWY POŚLIZGOWEJ .....	95
<b>10. ANALIZA NUMERYCZNA MODELU POWIERZCHNI SFERYCZNEJ.....</b>	<b>107</b>
10.1. OPIS ANALIZY NUMERYCZNEJ MODELU POWIERZCHNI SFERYCZNEJ .....	108
10.1.1. Geometria modelu .....	108
10.1.2. Parametry materiałowe.....	108
10.1.3. Warunki brzegowe .....	109
10.1.4. Warunki kontaktowe .....	109
10.1.5. Siatkowanie .....	110
10.1.6. Zdefiniowane obciążenia.....	111
10.2. WYNIKI ANALIZY NUMERYCZNEJ MODELU POWIERZCHNI SFERYCZNEJ .....	111
<b>11. WNIOSKI.....</b>	<b>127</b>
11.1. WPŁYW TEMPERATURY NA EFEKTYWNOŚĆ PROCESU REKTYFIKACJI.....	127
11.2. WPŁYW KSZTAŁTU FUNDAMENTU NA EFEKTYWNOŚĆ PROCESU REKTYFIKACJI .....	129
11.3. PROGRAM DALSZYCH BADAŃ .....	130
<b>12. BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>131</b>
12.1. PUBLIKACJE.....	131
12.2. NORMY .....	133
12.3. MATERIAŁY INFORMACYJNE.....	134
<b>STRESZCZENIE .....</b>	<b>135</b>

# 1. WPROWADZENIE

W wyniku eksploatacji podziemnej kopalni, szczególnie węgla kamiennego w regionie Górnego Śląska, występują wstrząsy pochodzenia górniczego, a pierwotna powierzchnia terenu podlega wymuszonym zmianom w postaci osiadania (Kawulok 2010, Kolej 1980, Sroka 2006). Jednym z takich efektów jest nachylenie terenu i wiążące się z nim pochylenie obiektów budowlanych znajdujących się na tym obszarze (Słowik 2015). Pomimo, że zagrożenie dla konstrukcji obiektu, wywołane jego wychyleniem od pionu rzędu maksymalnie kilku procent, nie jest wielkie, to użytkowanie takich budowli jest bardzo uciążliwe. Prowadzi to do konieczności rektyfikacji obiektów, a to generuje duże koszty, często dochodzące do wartości wyprostowywanych obiektów (Szojda 2019). Dodatkowo, budynki usytuowane na terenach szkód górniczych, narażone są na dodatkowe oddziaływania. Siły pochodzące od deformacji powierzchni, przekazywane są z podłoża na budowlę, powodując jej odkształcenia, a w konsekwencji powstanie dodatkowego układu obciążeń (Kawulok 2010, Kolej 1980).

Zgodnie z polskim Prawem geologicznym i górniczym „Odpowiedzialność za szkodę ponosi przedsiębiorca prowadzący ruch zakładu górniczego, wskutek którego wystąpiła szkoda” (Dz. U. 2011 nr 163 poz. 981). Jak powszechnie wiadomo, wszystkim uczestnikom procesu budowlanego, a także w późniejszym czasie użytkownikom, zależy w głównej mierze na długotrwałej i bezawaryjnej eksploatacji obiektów budowlanych. Niewątpliwie uszkodzenia fragmentów konstrukcji spowodowane zjawiskami towarzyszącymi jak odkształceniami i krzywiznami terenu oraz wstrząsami parasejsmicznymi, generują czasem niemałe uszkodzenia elementów wykończeniowych, co z kolei powoduje konieczność przeprowadzania dodatkowych remontów i napraw (Pachla i Tatar 2012, Szojda 2019). Oczywiście prawidłowe zaprojektowanie obiektów budowlanych na wpływy podziemnej eksploatacji górniczej daje nam możliwość znacznego obniżenia ich późniejszych kosztów utrzymania. Jednakże nie daje nam stuprocentowej gwarancji, iż taki obiekt nie ulegnie niepożądanemu przechyleniu, gdzie nieodzownym będzie przeprowadzenie, na chwilę obecną dość drogiego procesu prostowania bryły budynku.

Prowadzenie podziemnej eksploatacji kopalni praktycznie zawsze połączone jest z negatywnym wpływem na powierzchnię terenu, powodując jego: deformacje, zmianę stosunków wodnych w górotworze oraz powstawanie zjawisk parasejsmicznych w postaci wstrząsów górniczych (Kwiatek 2004, Popiołek 2009). Polska w głównej mierze na masową skalę prowadzi eksploatację dwóch mineralnych surowców energetycznych, należą do nich złoża węgla kamiennego oraz węgla brunatnego. Rynek tych dwóch dóbr przemysłowych ma ogromne znaczenie w naszej gospodarce narodowej, ponieważ około 50% energii

elektrycznej wytwarzane jest ze spalania węgla kamiennego, natomiast około 30% udziałów w krajowej produkcji energii elektrycznej stanowią elektrownie zasilane węglem brunatnym (Szojda 2019, Polskie Sieci Elektroenergetyczne 2022).

Podobnie rzecz ma się w kwestii eksploatacji węgla brunatnego, która z racji swojej specyfiki odbywa się metodą odkrywkową, a nie tak jak w przypadku węgla kamiennego metodą głębinową. W tej sytuacji zmiany warunków wodnych generują przemieszczenia elementów górotworu do wyrobiska, a także teren przyległy do kopalni odkrywkowej może być wystawiony na działanie wstrząsów parasejsmicznych. Natomiast wydobywanie złóż węgla kamiennego powoduje dodatkowe, najbardziej niepożądane dla terenów zagospodarowanych, deformacje powierzchni (Szojda 2019). W Polsce występują również inne kopaliny, takie jak: rudy miedzi (największe w Europie oraz jedno z największych na świecie), sól kamienna, czy siarka. Następstwa podziemnej eksploatacji złóż miedzi, występujących w Legnicko-Głogowskim Okręgu Miedziowym (LGOM), w podobny sposób doprowadzają do znacznych deformacji terenów górniczych. Analogicznie rzecz ma się w przypadku wydobywania pokładów siarki i soli kamiennej, ale w dużo mniejszej skali (Szojda 2019).

Zgodnie z zaleceniami Komisji Europejskiej nasz kraj jest zobligowany zwiększyć udział energii z odnawialnych źródeł oraz zredukować jej wytwarzanie w elektrowniach konwencjonalnych do 50% (aktualnie 85% polskiej energii elektrycznej wytwarzane jest ze spalania węgla kamiennego i brunatnego) (Ministerstwo Aktywów Państwowych 2022). Powinno się mieć jednak na względzie również to, że problem występowania deformacji terenów górniczych zmniejszy się tylko nieznacznie, a zagadnienie przemieszczania elementów górotworu będzie pojawiało się na tych obszarach przez kolejne kilkadziesiąt lat (Popiołek 2009).

Stąd też zdefiniowanie wymagań nowego, prawdopodobnie tańszego sposobu rektyfikacji obiektów budowlanych, które zostaną do tego procesu przystosowane już na etapie projektu podjęto w niniejszej rozprawie. Dodatkową zaletą takiego systemu jest fakt, że samo przeprowadzenie procesu rektyfikacji będzie wymagało minimalnych przygotowań, a sam proces będzie można powtarzać wielokrotnie, co przy obecnie stosowanych procesach rektyfikacji jest niemożliwe.



## **2. CEL, TEZA I ZAKRES ROZPRAWY**

Celem rozprawy doktorskiej jest opracowanie teoretycznych podstaw nowego, tańszego i opartego na przesuwie poziomym, sposobu rektyfikacji budynków poddanych wpływom górniczym. Obiekty budowlane zostaną do tego procesu przystosowane już na etapie projektowania.

Przedmiotowe badania obejmują analizę zachowania warstw poślizgowych fundamentów budynku, a także analizę zachowania warstw poślizgowych oraz konstrukcji zdublowanego płytowego fundamentu żelbetowego z warstwą poślizgową na styku pomiędzy jego obydwoma częściami, pod obciążeniami pionowymi (symulującymi obciążenia wywierane na podłoże przez średniej wielkości budynki mieszkalne jednorodzinne i wielorodzinne) oraz poziomymi (symulującymi obciążenia wywierane na fundament przez siłowniki hydrauliczne podczas procesu rektyfikacji).

Teoretycznym potwierdzeniem możliwości przeprowadzenia tego procesu rektyfikacji jest analiza numeryczna wykonana w celu opracowania modelu komputerowego umożliwiającego symulację badań laboratoryjnych:

- pracy warstwy poślizgowej na styku pomiędzy dwoma częściami zdublowanego fundamentu żelbetowego oraz
- całego obiektu budowlanego z odpowiednio wykształtowaną warstwą poślizgową.

Wnioski wyciągnięte po przeprowadzeniu analiz teoretycznych, laboratoryjnych i numerycznych mają charakter zarówno naukowy jak i praktyczny. Umożliwią one bowiem zabezpieczenie i ochronę obiektów budowlanych przed wpływem górniczych deformacji terenu. Podjęte próby analiz numerycznych przeprowadzania rektyfikacji na dowolnych terenach objętych problemem szkód górniczych stanowią szansę na uogólnienie twierdzeń wynikających z rozprawy. Zatem prawidłowe ukształtowanie, skonstruowanie, a także obliczenie nowoprojektowanych budynków, aby były one zdolne do przejścia oddziaływań górniczych wywołanych ciągłymi deformacjami terenu, zagwarantuje jednocześnie właściwe decyzje dotyczące wyboru sposobu posadowienia oraz ewentualnego przyjętego rozwiązania prostowania obiektów nowo wznoszonych.

Zgodnie z wyznaczonym celem postawiono następujące tezy:

1. Występuje procedura określania wartości współczynników tarcia warstw poślizgowych, a dzięki temu realnych wielkości sił poziomych wywieranych przez siłowniki hydrauliczne na fundament podczas procesu prostowania rzeczywistej konstrukcji, stosownie do wykonanych badań laboratoryjnych warstwy poślizgowej występującej na styku zdublowanego, płytowego fundamentu rektyfikacyjnego.

2. Istnieje możliwość skonstruowania sferycznego kształtu styku zdublowanego, płytowego fundamentu rektyfikacyjnego, który doprowadzi do wypoziomowania wychylonego z pionu obiektu budowlanego, na skutek deformującego się podłoża, na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych modelu powierzchni sferycznej.

W celu potwierdzenia przyjętych tez rozprawy doktorskiej przeprowadzono:

– przegląd literatury dotyczący aktualnie stosowanych metod rektyfikacji obiektów budowlanych na terenach górniczych,

– badania laboratoryjne warstw poślizgowych oraz obliczenia współczynników tarcia dla różnych zakresów temperatur oraz naprężeń,

– badania laboratoryjne pomniejszonej konstrukcji zdublowanego płytowego fundamentu żelbetowego z warstwą poślizgową na styku pomiędzy jego obydwoma częściami, a także obliczenia współczynników tarcia dla jednego wytypowanego rozwiązania materiałowego oraz temperatury,

– modelowanie numeryczne wpływu przyjętych rozwiązań materiałowych, temperatury oraz wartości naprężeń na wartości współczynników tarcia warstw poślizgowych.

### **3. REKTYFIKACJA BUDYNKÓW NA TERENACH GÓRNICZYCH**

W niniejszym rozdziale podjęto najistotniejsze tematy z punktu widzenia rektyfikacji budynków na terenach górniczych. Przeprowadzony przegląd literaturowy obejmuje problematykę związaną z aktualnie stosowanymi sposobami prostowania budynków podlegających wpływom szkód górniczych oraz społeczny aspekt użytkowania obiektów budowlanych wychylonych od pionu.

#### **3.1. Metody rektyfikacji budynków**

Największym problemem dla użytkowników budynków posadowionych na terenach górniczych, jest ich trwałe odchylenie od pionu (Kolej 1980, Słowik 2015). Usunięcie takiej niedogodności jest nieodzownie związane z koniecznością rektyfikacji takich obiektów. Z tego też względu proces prostowania budowli jest jednym z najistotniejszych zagadnień związanych z usuwaniem negatywnych skutków podziemnej eksploatacji górniczej (Kwiatek 2004).

Wartości odchyień obiektów budowlanych od pionu zależą w głównej mierze od warunków geologiczno-górniczych (Kwiatek 2004, Kwiatek 2007, Sroka 2006). Trwałe nachylenie powierzchni może występować w rejonach krawędzi eksploatacji bądź w miejscu dochodzenia do wspólnej krawędzi w rzucie pionowym kilku pokładów (Kwiatek 2004, Kwiatek 2007, Słowik 2005, Sroka 2006, Zych 1987). Z racji tego, że dopuszczalne wychylenie budowli od pionu nie są w Polsce uregulowane normowo, powszechnie przyjęto, iż za trwałe odchylenie budynków mieszkalnych, użyteczności publicznej oraz gospodarczych od pionu przyjmuje się wartości do 10 mm/m, natomiast za przejściowe odchylenie do 15 mm/m. Wystąpienie w obiektach budowlanych takich maksymalnych wielkości odchyień spowoduje odpowiednio tylko nieodczuwalną bądź małą uciążliwość w ich użytkowaniu (Kwiatek 1998, Kwiatek 2004, Kwiatek 2007). Zupełnie inaczej jednak jest w przypadku budowli z zainstalowanymi urządzeniami, które są bardzo czułe na pionowe lub poziome ustawienie (Kwiatek 1998, Kwiatek 2004, Kwiatek 2007). W takiej sytuacji dopuszczalne odchylenia powinny być ustalane indywidualnie. Nieprzekroczenie przedstawionych wielkości gwarantuje brak nadmiernego utrudnienia w użytkowaniu takich obiektów na terenach górniczych. Wszakże na podstawie wykonanych badań można przyjąć, że niedopuszczalne wychylenia budowli nie powinny przekraczać 25 mm/m ze względu na znaczną uciążliwość w ich użytkowaniu (Kwiatek 1998, Popiołek 2009, Szojda 2019).

Dodatkowo, należy nadmienić, iż problematyka wychylenia budynków od pionu nie dotyczy tylko i wyłącznie terenów górniczych. Zagadnienie to może wstępować również na

obszarach nie górniczych (Kwiatek 2004, Kwiatek 2007). W tym przypadku, powodem są najczęściej błędy w rozwiązaniach geotechnicznych (Kwiatek 2004, Kwiatek 2007, Rossiński 1978).

Aktualnie znanych jest wiele sposobów rektyfikacji obiektów budowlanych. Pomimo tego, można te metody generalnie podzielić na dwie grupy, w których prostowanie budowli odbywa się poprzez:

- podnoszenie części obiektu znajdującej się zbyt nisko. Wówczas proces rektyfikacji jest przeprowadzany za pomocą siłowników hydraulicznych bądź
- obniżanie części obiektu znajdującej się zbyt wysoko. Wtedy proces prostowania jest możliwy do osiągnięcia poprzez lokalne zmniejszenie nośności podłoża i wykorzystanie sił grawitacji (Kwiatek 1984, Kwiatek 1998, Kwiatek 2004, Kwiatek 2007, Ledwoń 1983, Niemiec 2001, Szojda 2019).

Mimo tego, niezależnie od wybranej metody rektyfikacji budowli, konieczne jest wyznaczenie jej kierunku oraz zakresu (Kwiatek 1998, Kwiatek 2004, Kwiatek 2007).

Wśród powszechnie stosowanych sposobów prostowania obiektów budowlanych przy użyciu podnośników można wymienić:

- metodę dźwigni jednostronnej,
- metodę DMT,
- metodę kompensacji osiadań oraz
- posadowienie elastyczne GERB (Kwiatek 1998).

Z kolei do drugiego rodzaju rektyfikacji budynków (wykonywanej przy wykorzystaniu sił grawitacji) zalicza się:

- metodę grawitacyjno-wiertniczą oraz
- metodę wycinania warstw gruntu (Kwiatek 1998).

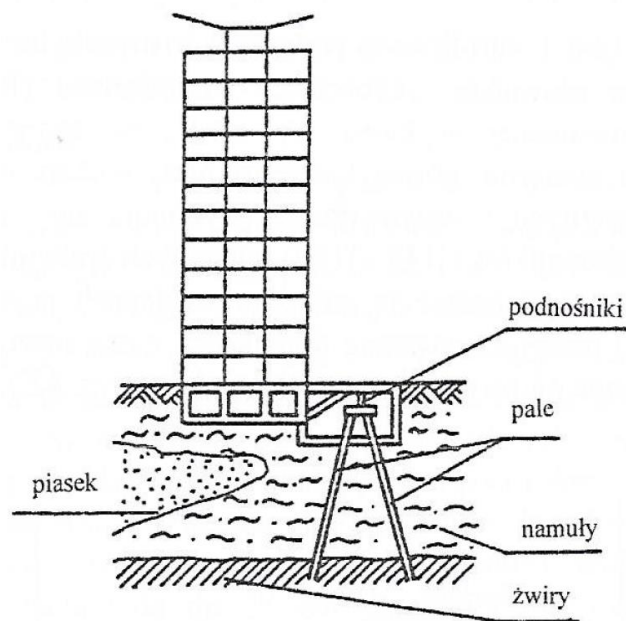
Prostowanie przy zastosowaniu podnośników może być przeprowadzane w budowlach przystosowanych do takiej rektyfikacji już na etapie budowy. Wówczas podnośniki instaluje się w stosownie do tego przygotowanych gniazdach w ścianach budynku (Kwiatek 2004, Kwiatek 2007). W ścianach budowli nieprzystosowanych do takiego procesu, również można wykonać takie gniazda (Gromysz i Niemiec 1995, Gromysz 2007, Gromysz i Niemiec 2010, Gromysz i in. 2015). W obydwu sytuacjach obiekt budowlany zostaje podzielony na dwie części w poziomie podnośników. Przy czym dolny fragment budynku pozostaje w swoim pierwotnym położeniu po procesie prostowania, natomiast górny zostaje doprowadzony do prawidłowego położenia (Kwiatek 2004, Kwiatek 2007).

Dodatkowo, budowle mogą być poddawane procesowi rektyfikacji przy użyciu podnośników opartych na specjalnych podporach, którymi mogą być zainstalowane pod budynkiem pale MEGA. Następnie, cały obiekt jest doprowadzany do właściwego położenia (Kwiatek 2004, Kwiatek 2007).

W rozdziale przedstawiono przykładowe metody rektyfikacji budynków, tj. za pomocą podnośników oraz przy wykorzystaniu sił grawitacji.

### 3.1.1. Metoda dźwigni jednostronnej

Metoda dźwigni jednostronnej (rys. 3-1) sprostka się do podniesienia nadmiernie obniżonej części obiektu budowlanego, przy jednoczesnym podkopaniu przeciwnej części (Kwiatek 1998, Szojda 2019).



Rys. 3-1. Rektyfikacja metodą dźwigni jednostronnej (Kwiatek 1998)

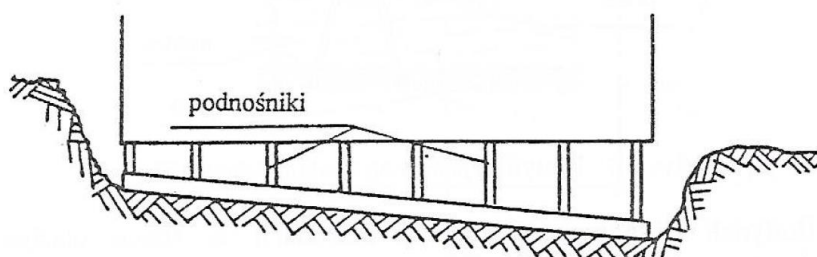
W praktyce, sposób ten został wykorzystany do rektyfikacji trzynastokondygnacyjnego budynku w Rzeszowie, który był wychylony od pionu o około 40 cm (Kwiatek 1998, Rossiński 1978). Prostowany obiekt budowlany był posadowiony na namułach w stanie plastycznym i miękkoplastycznym, a pod jedną z jego krawędzi była soczewka piasku o grubości około 2 m. Grunty nośne występowały na głębokości 12 m (Kwiatek 1998, Rossiński 1978). Takie warunki posadowienia spowodowały pochylenie budowli.

Celem rektyfikacji obiektu, przekonstruowano oraz wzmocniono jego skrzynię fundamentową, dobudowując do niej wspornik w części, która podlegała większym osiadaniom. W następnej kolejności, pod wspornikiem wprowadzono w grunt pale Wolfsholza, po czym na tych palach oparto podnośniki hydrauliczne, które oddziaływały na wystający z fundamentu wspornik i rozpoczęto podnoszenie obniżonej części budynku (Kwiatek 1998, Rossiński 1978).

Jednakże ten sposób prostowania obiektów budowlanych znajduje zastosowanie tylko i wyłącznie, gdy kierunek pochylenia budowli jest równoległy do jego układu konstrukcyjnego, a warstwy nośne gruntów nie zalegają głęboko (Kwiatek 1998).

### 3.1.2. Metoda DMT

Metoda DMT (rys. 3-2) została opracowana w Deutsche Montan Technologie z Essen (Kwiatek 1998).



Rys. 3-2. Rektyfikacja metodą DMT (Kwiatek 1998)

Jej założenia polegają na kontrolowanym podniesieniu przechylonych budynków za pomocą sterowanych komputerowo siłowników hydraulicznych (Gromysz i Niemiec 1995, Gromysz 2007, Gromysz i Niemiec 2010, Gromysz i in. 2015). W ścianach najniższej kondygnacji podziemnej wykuwa się nisze, w których osadza się podnośniki. Na górnej krawędzi nisz, wzdłuż wszystkich ścian nośnych konstruuje się wzmocnienia z kształtowników stalowych (najczęściej C140 – C160) ściąganych śrubami co maksymalnie 80 cm (Gromysz i Niemiec 1995, Kwiatek 1998). Następnie, ceowniki te są instalowane i zabetonowywane w gniazdach ścian prostopadłych. Dzięki temu tworzy się dodatkowy ruszt w płaszczyźnie górnych krawędzi podnośników (Gromysz i Niemiec 1995, Gromysz i in. 2015, Kwiatek 1998).

Prostowanie budowli tą metodą wykonywane jest w trzech fazach:

- faza oderwania: oderwanie obiektu od fundamentu wzdłuż linii rozcięcia ścian. Jest to wywołane wysunięciem wszystkich siłowników na żadaną wysokość,
- faza równoległego podniesienia: przesunięcie osi obrotu poza obrys budowli oraz
- faza wyrównania: nierównomierne podnoszenie budynku, większe tam, gdzie jest bardziej przechylony. Jest to najważniejsza faza procesu rektyfikacji (Gromysz i Niemiec 1995, Gromysz 2007, Gromysz i Niemiec 2010, Kwiatek 1998).

Po zakończeniu prostowania obiektu budowlanego tą metodą, szczeliny, które powstały w ścianach są wypełniane, a wykute nisze oraz wybudowane wzmocnienia-likwidowane (Gromysz i Niemiec 1995, Gromysz 2007, Gromysz i Niemiec 2010, Gromysz i in. 2015, Kwiatek 1998).

Aktualnie jest to najpowszechniej stosowany sposób rektyfikacji budowli w Polsce.

### 3.1.3. Metoda kompensacji osiadań

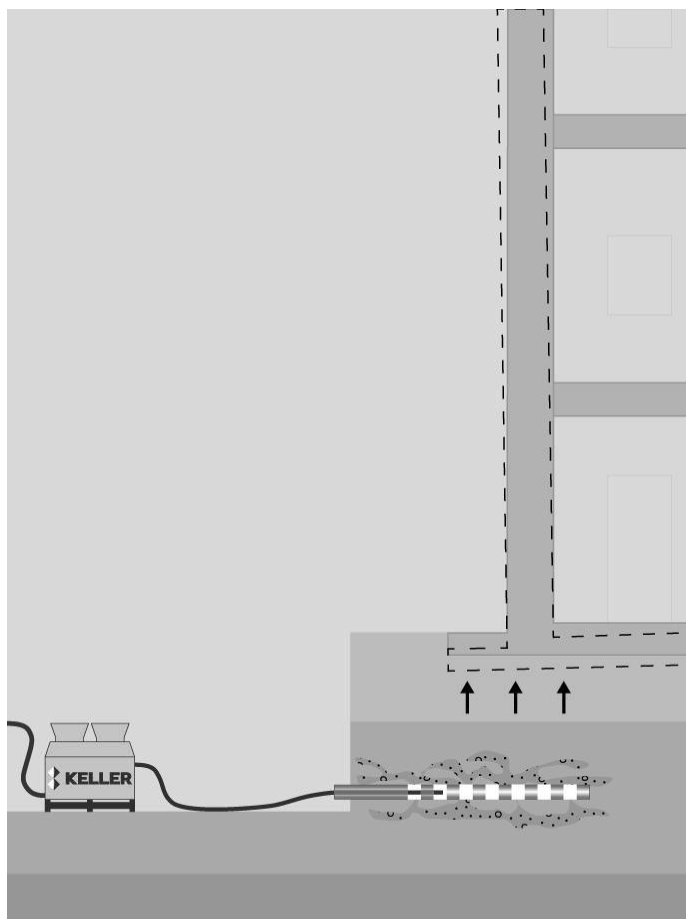
Metoda kompensacji osiadań została opracowana w Naukowo-Badawczym Instytucie Konstrukcji Budowlanych w Kijowie.

Założenia tego sposobu prostowania obiektów budowlanych są bardzo podobne do metody DMT. Różnią się jedynie konstrukcją siłowników oraz ich systemem sterowania (Bolotov 1996).

Metoda ta nie była do tej pory stosowana w Polsce

### 3.1.4. Metoda iniekcji

Metoda iniekcji (rys. 3-3) została pierwszy raz wykorzystana do prostowania dwóch wielokondygnacyjnych obiektów budowlanych połączonych ze sobą przewiązką (Ajdukiewicz 1979), a także do rektyfikacji wieżowca mieszkalnego w Berlinie (Keller 2022).



Rys. 3-3. Rektyfikacja metodą iniekcji (Keller 2022)

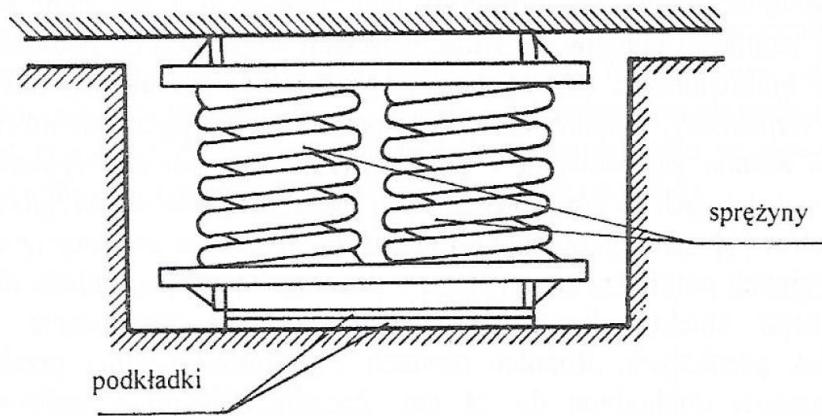
Jej założenia polegają na wtłoczeniu do podłoża obniżonej części budowli specjalnego środka pod dużym ciśnieniem, który posiada zdolność penetracji oraz właściwości wiążące. Do metody tej stosuje się zaczyn cementowy oraz różnego rodzaju dodatki, np. pyły (Kwiatek 1998, Szojda 2019).

W pierwszym przypadku wychylenie budynku doprowadziło do zamknięcia szczelin dylatacyjnych między częścią obiektu, a przewiązką i spowodowało wystąpienie stanu awaryjnego. Powodem pochylenia była aktywizacja starych wyrobisk górniczych (Ajdukiewicz 1979). Zaczyn cementowy wtłoczono przez pionowe otwory rozmieszczone naokoło budynku oraz otwory ukośne sięgające pod budowlę pod ciśnieniem 0,8 MPa aż do niezaciśniętych wyrobisk (Ajdukiewicz 1979).

Z kolei w drugiej sytuacji, pod wieżowcem mieszkalnym zrealizowano układ poziomych rur iniekcyjnych, którymi wpompowano zaczyn cementowy, wraz z montażem zaworów co około 0,5 m, które umożliwiły iniekcję w ściśle określonych miejscach pod fundamentem (Keller 2022).

### 3.1.5. Metoda posadowienia elastycznego GERB

Metoda posadowienia elastycznego (rys. 3-4) została opracowana w firmie GERB w Berlinie (Kwiatek 1998).



Rys. 3-4. Rektyfikacja metodą posadowienia elastycznego GERB (Kwiatek 1998)

Założenia tej technologii rektyfikacji obiektów budowlanych polegają na posadowieniu całego bądź części budynku na sprężynach (GERB 2022). W Polsce bardzo popularne jest budowanie w ten sposób fundamentów maszyn, aczkolwiek takie posadowienie budynków należy do rzadkości. Niemniej w Niemczech metoda ta jest dość powszechnie stosowana na terenach występowania szkód górniczych (Kwiatek 1998).

Stalowe sprężyny śrubowe mocowane są do stalowych płyt i tworzą elementy o różnych wielkościach i nośnościach. Takie pakiety sprężynowe są przytwierdzone w miejscu wbudowania bez śrub, a jedynie przy pomocy samoklejących płyt z tkaniny (GERB 2022). Przedstawione stalowe elementy sprężynowe wykazują stosunek sztywności poziomej do pionowej równy 0,85, co pozwala na przejmowanie przez nie obciążeń od wiatru i innych sił poziomych bez potrzeby stosowania dodatkowych zabezpieczeń. Ponadto, metoda elastycznego posadowienia budynków GERB pozwala również na ich ochronę przed wstrząsami podłoża (GERB 2022). Dodatkowo, pakiety sprężynowe mogą być stosowane jako wstępnie sprężone i działają one dopiero po wybudowaniu budowli. W tym przypadku nie ma miejsca zmiana poziomu posadowienia budynku, co występuje podczas zastosowania elementów wstępnie niesprężanych (GERB 2022).

Aby zabezpieczyć obiekty budowane na terenach występowania szkód górniczych, wykorzystuje się specjalnie dobrane sprężyny, o dużej elastyczności. Znaczne wówczas pionowe różnice przemieszczeń podłoża wywołują niewielkie zmiany w rozkładzie oddziaływań pomiędzy budynkiem, a podłożem i jednocześnie zmniejszają negatywne skutki podziemnej eksploatacji górniczej (GERB 2022). Zazwyczaj używane sprężyny mają to do siebie, że modyfikacja oddziałujących na nie sił nie przekracza 25% obciążeń wyjściowych przy zmianie długości sprężyn o 50 mm. Zazwyczaj budowle są w stanie przejść taki zakres obciążeń bez większych konsekwencji, a poziom zmian długości sprężyn do 50 mm jest w zupełności zadawalający dla większości występujących sytuacji (GERB 2022). Siły występujące w sprężynach oraz zmiany ich długości są kontrolowane elektronicznymi

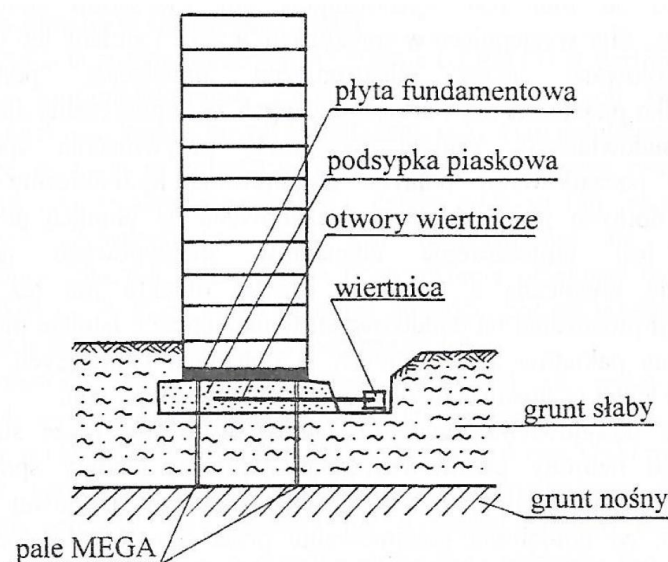


urządzeniami pomiarowymi. W momencie przekroczenia wartości dopuszczalnych dla konkretnego obiektu, można przywrócić sprężynom ich pierwotną wysokość poprzez hydraulicznie wykonaną zmianę położenia dolnych stalowych płyt elementów sprężynowych przy pomocy podkładek (GERB 2022).

Zastosowanie tej metody rektyfikacji zalecane jest dla budynków nowo wznoszonych, aczkolwiek istnieje możliwość wbudowania pakietów sprężynowych w budowlach istniejących. Wówczas takie elementy sprężynowe należy wbudować między najniższą kondygnacją podziemną, a pozostałą częścią obiektu lub poniżej kondygnacji piwnicznej, na dodatkowych fundamentach (GERB 2022).

### 3.1.6. Metoda grawitacyjno-wiertnicza

Do tej pory w Polsce metodą grawitacyjno-wiertniczą (rys. 3-5) wykonano prostowanie dwóch jedenastokondygnacyjnych obiektów budowlanych, które uległy pochyleniu z powodu nierównomiernego osiadania podłoża o niewystarczającej nośności (Kwiatek 1984, Szojda 2019).



Rys. 3-5. Rektyfikacja metodą grawitacyjno-wiertniczą (Kwiatek 1998)

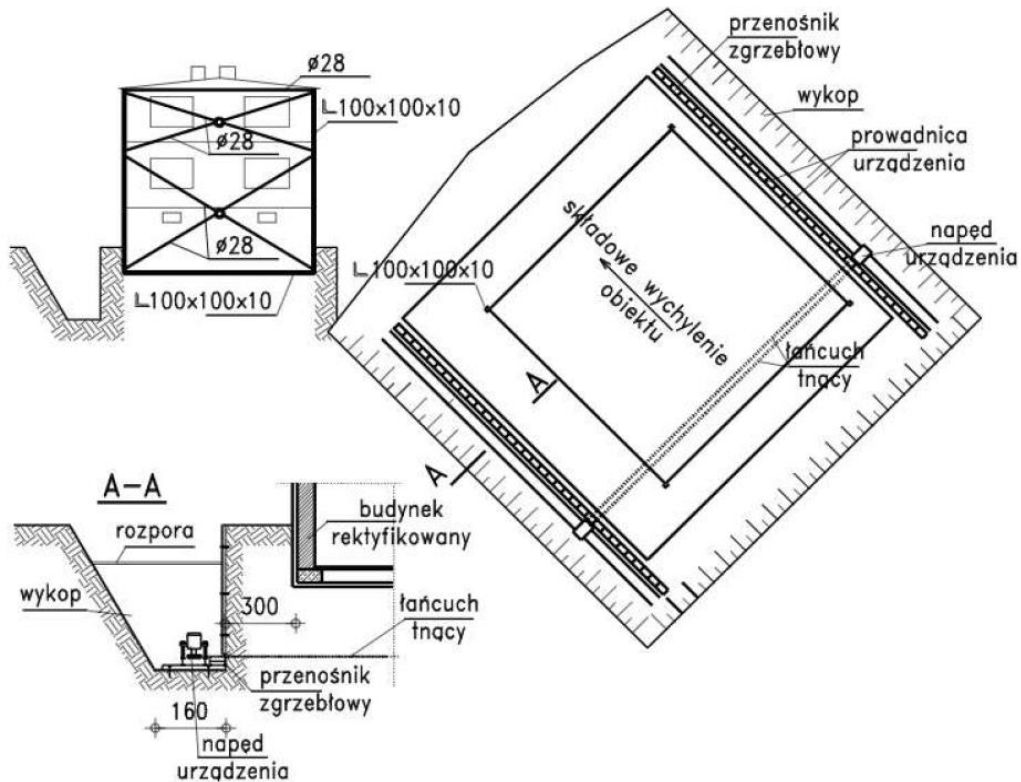
Były to budynki wybudowane w technologii wielkblokowej, posadowione bezpośrednio, na fundamentach płytowych, pod którymi dokonano częściowej wymiany gruntu, poprzez zastosowanie podsypki piaskowej. Po przeprowadzeniu procesu rektyfikacji obydwie budowle zastabilizowano odcinkowymi palami MEGA, które przekazały obciążenie na warstwę podłoża nośnego, które znajdowało się poniżej warstwy gruntu nienośnego (Kwiatek 1984).

Założenia tej metody polega ją na wybraniu przy pomocy poziomych otworów wiertniczych, należytej ilości gruntu spod fundamentu, aby obniżyć fragment budynku znajdujący się nadmiernie wysoko. Poziome otwory są wiercone w wykopie wykonanym naokoło fundamentu (Kwiatek 1984, Szojda 2019). Średnice otworów, ich długość oraz rozmieszczenie są uzależnione od objętości, a także kształtu bryły gruntu przeznaczonej do

wybrania. Jednocześnie wraz z postępem wiercenia, otwory zostają orurowane, natomiast po przygotowaniu otworów o żądanej długości, rury usuwa się (Kwiatek 1984, Szojda 2019).

### 3.1.7. Metoda wycinania warstw gruntu

Jak dotąd metoda wycinania warstw (rys. 3-6) gruntu została wykorzystana do wyprostowania trzech budynków mieszkalnych jednorodzinnych (Gromysz i Niemiec 1995, Gromysz 2006).

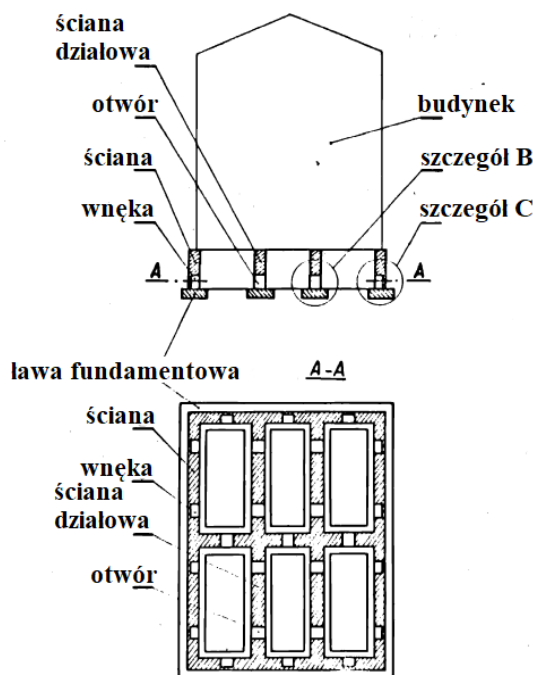


Rys. 3-6. Rektyfikacja metodą wycinania warstw gruntu (Gromysz i Niemiec 1995)

Jej założenia polegają na usunięciu nadmiaru gruntu przy użyciu urządzenia skrawającego. Maszyna do wybierania warstw gruntu wykonana jest zgodnie z technologią powszechnie stosowaną w górnictwie i składa się z: łańcucha urabiającego, silników hydraulicznych, napinaczy łańcucha oraz regulatorów prędkości (Gromysz i Niemiec 1995, Gromysz 2006, Szojda 2019). Łańcuch urabiający, który jest napędzany silnikiem i przesuwany poziomo pod budynkiem, wycina warstwy podłoża, co prowadzi do obniżenia konstrukcji fundamentu, a to kolei pociąga za sobą zredukowanie pochylenia obiektu budowlanego (Gromysz i Niemiec 1995, Gromysz 2006, Szojda 2019).

### 3.1.8. Metoda przystosowania podstawy fundamentowej – skrzyni fundamentowej na ławach

Metoda przystosowania podstawy fundamentowej – skrzyni fundamentowej na ławach (rys. 3-7) polega na odpowiednim skonstruowaniu fundamentu w postaci skrzyni fundamentowej posadowionej na ławach (PAT.088452).

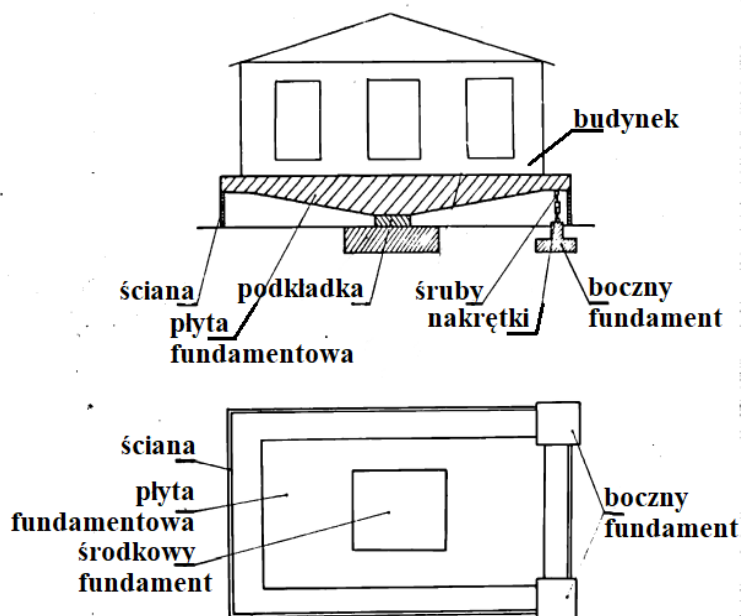


Rys. 3-7. Rektyfikacja metodą przystosowania podstawy fundamentowej – skrzyni fundamentowej na ławach (PAT.088452)

W ścianach bocznych skrzyni są wykonywane wnąki, a w ścianach działowych otwory przelotowe. Następnie w tych wnąkach oraz otworach, instalowane są podnośniki hydrauliczne, dzięki którym możliwe jest wypoziomowanie budowli. Z kolei tak powstałe szczeliny pomiędzy skrzynią, a ławami fundamentowymi są uzupełniane materiałem wypełniającym (PAT.088452).

### 3.1.9. Metoda przystosowania podstawy fundamentowej – płyty fundamentowej jako ostrosłupa

Metoda przystosowania podstawy fundamentowej – płyty fundamentowej jako ostrosłupa (rys. 3-8) polega na prawidłowym skonstruowaniu fundamentu w kształcie niskiego ostrosłupa, którego skierowany w dół wierzchołek oparty jest przez podkładkę na środkowym fundamencie (PAT.088456).

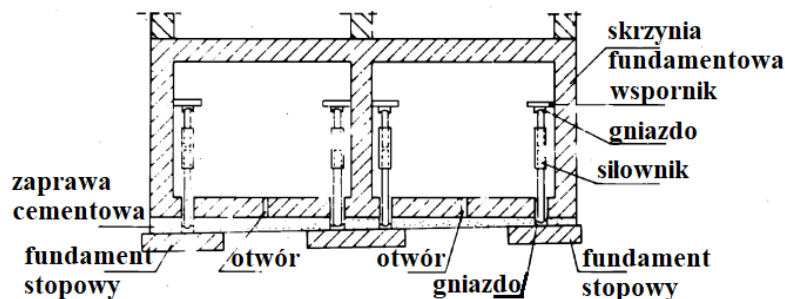


Rys. 3-8. Rektyfikacja metodą przystosowania podstawy fundamentowej – płyty fundamentowej jako ostrosłupa (PAT.088456)

Na płaskiej podstawie ostrosłupa posadawiany jest obiekt budowlany. Na obwodzie płyty fundamentowej występuje boczna ściana osłonowa, a na jednym z jej boków nabija się śruby regulacyjne, które łączą ją z fundamentami bocznymi. Całość procesu prostowania budynku przeprowadzana jest poprzez regulację długości śrub (PAT.088456).

### 3.1.10. Metoda fundamentu dzielonego poziomo

Metoda fundamentu dzielonego poziomo (rys. 3-9) polega na wykonaniu fundamentu w postaci skrzyni, która jest podzielona w poziomie (PAT.103431).



Rys. 3-9. Rektyfikacja metodą fundamentu dzielonego poziomo (PAT.103431)

Jej dolna część przylega bezpośrednio do podłoża i osiada równocześnie wraz z deformującym się gruntem (PAT.103431). Natomiast na dolnej części oddzielnie usytuowany jest jej górny człon, na którym posadowiony jest obiekt budowlany. W dolnym segmencie skrzyni wykonane są gniazda, w których są przegubowo zamocowane siłowniki, a te z kolei są tak umiejscowione, że praktycznie każda z części fundamentu stanowi dla nich element oporowy (PAT.103431). W momencie wychylenia budowli od pionu, za pomocą siłowników zainstalowanych w gniazdach, podnosi się tylko górny fundament wraz z wybudowanym na nim budynkiem i doprowadza do pierwotnego położenia. Natomiast tak powstałe szczeliny między dwoma segmentami fundamentu wypełnia się specjalnie dobranym materiałem (PAT.103431).

### 3.1.11. Metoda podnośników w chodniku pod budowlą

Metoda podnośników w chodniku pod budowlą sprowadza się do mechanicznego bądź ręcznego drażenia poziomego chodnika pod obiektem budowlanym na odpowiednio dobranej głębokości. Jej założenia polegają na ustawieniu w poziomym chodniku zespołu kilku szeregów podnośników hydraulicznych i w następnej kolejności zmienia się kąt pochylenia budynku (PAT.88909). Przy pomocy podnośników, które są zainstalowane pod niższym bądź wyższym segmentem obiektu, odpowiednio podnosi się lub opuszcza całą budowlę łącznie z gruntem. Niewykluczone jest również jednoczesne podnoszenie oraz opuszczanie poszczególnych fragmentów obiektu budowlanego, jednakże wówczas w poziomym chodniku pod budynkiem konstruuje się ławę fundamentową (PAT.88909).

### 3.1.12. Metoda odwiertów pod fundamentem budowli

Metoda odwiertów pod fundamentem budowli polega na wykonaniu otworów wiertniczych pod wybranymi segmentami fundamentu oraz usunięciu należytej ilości gruntu, aby wywołać dodatkowe osiadanie i obrót obiektu budowlanego w zamierzonym kierunku, przeciwnym do już powstałych nierównomiernych osiadań (Szelaąg 1989). Zależnie od lokalnie występujących warunków gruntowych, a także rodzaju zastosowanej konstrukcji, grunt z wykonanych w fundamencie pionowo lub ukośnie otworów wiertniczych usuwa się

do wnętrza budynku albo na zewnątrz, jeśli otwory są poziome, bądź ukośne, poniżej podstawy fundamentu (Szelaąg 1989).

### **3.1.13. Metoda wycinania klina muru**

Metoda wycinania klina muru sprowadza się do poparcia obiektu budowlanego stojakami hydraulicznymi w najniższej położonej kondygnacji i w dalszej kolejności wycięcia, w ścianach zewnętrznych oraz działowych, klina muru równego wychylenia budynku od pionu (Szelaąg 1989). Kształt klina wyznaczany jest na bazie pomiarów geodezyjnych. Natomiast po wybiciu klina opuszcza się podparty na stojakach strop i zarazem całą budowlę (Szelaąg 1989).

### **3.1.14. Podsumowanie**

W rozdziale dokonano przeglądu stosowanych metod rektyfikacji budynków sprowadzających się do podniesienia części obiektu, która bardziej osiadła bądź obniżenia części budowli znajdującej się zbyt wysoko (Szojda 2019). Wybrany sposób procesu prostowania powinien być tak dobrany, aby uzyskać żądane wypoziomowanie budynku. Natomiast na etapie projektowania procedury rektyfikacji, istotnym jest również uwzględnienie wpływu czynników poza górniczych, a w szczególności warunków gruntowych (Szojda 2019). Z tego też względu do każdego problemu inżynierskiego, którym jest prostowanie obiektów budowlanych należy podchodzić indywidualnie.

## **3.2. Społeczne i ekonomiczne aspekty rektyfikacji budynków**

Wychylone od pionu obiekty budowlane powodują znaczną uciążliwość w ich użytkowaniu oraz przyczyniają się do utraty wartości nieruchomości (Kowal 2014). W kolejnych podrozdziałach przeanalizowano jak budynki poddane wpływom podziemnej eksploatacji górniczej wpływają na ich komfort użytkowania oraz kryteria ekonomicznej opłacalności usuwania skutków szkód górniczych. Poruszono także tematykę związaną z ogólnie przyjętymi schematami postępowania w przypadku wystąpienia konieczności napraw usterek w obiekcie.

### **3.2.1. Aspekty społeczne**

Aktualnie budynki mieszkalne posadowione na terenach występowania szkód górniczych odznaczają się bardzo zróżnicowanym stanem technicznym, który jest w głównej mierze uzależniony od wieku obiektu. Generalnie, im starsza budowla, tym jest ona w gorszym stanie technicznym (Kwiatek 1998, Kwiatek 2007). Podstawową przyczyną tego jest naturalne zużycie techniczne obiektów, a także istotne zaniedbania w zakresie bieżących remontów oraz dłuższe narażenie na wpływy podziemnej eksploatacji górniczej.

Na terenie Górnego Śląska w celu nieuciążliwego użytkowania budynków bardzo często przeprowadza się działania, które polegają przede wszystkim na ochronie obiektów budowlanych. Jeżeli natomiast zajdzie taka konieczność to, niekiedy pomimo znacznych nakładów finansowych, wykonuje się renowację, naprawę bądź remont uszkodzonej budowli (Kwiatek 1998, Kwiatek 2007).

Dodatkowo, bardzo ważna z konstrukcyjnego punktu widzenia jest dbałość o zachowanie, ewentualnie rewitalizację oryginalnych, zabytkowych form architektonicznych, ze względu na fakt, iż stanowią one świadectwo materialne, dokumentujące historię rozwoju przemysłowego Górnego Śląska (Mrozek 1988).

Przedstawione aspekty społeczne w pełni wykazują słuszość działania w celu ochrony obiektów budowlanych przez ich remont lub zabezpieczenie. Jednakże jest to nierozdzielnie powiązane z różnymi niedogodnościami dla użytkowników budynków, takich jak na przykład tymczasowe wykwaterowanie, co może wywołać ich niezadowolenie. W związku z tym bardzo istotnym czynnikiem, który może pomóc ułatwić przeprowadzanie zadań profilaktyczno-naprawczych albo konserwatorskich jest dobra strategia informacyjna (Kwiatek 1998, Kwiatek 2007). Należy zapewnić, aby mieszkańcy takich obiektów byli poinformowani odpowiednio wcześniej o terminach lub kolejnych etapach robót budowlanych. Kolejnym niezwykle ważnym elementem jest udzielenie takim użytkownikom wsparcia w staraniach o środki finansowe na realizację renowacji (Kwiatek 1998, Kwiatek 2007).

Niestety, można zauważyć wyraźną sprzeczność interesów mieszkańców budynków poddanych szkodliwym działaniom podziemnej eksploatacji węgla kamiennego, a przedsiębiorcą prowadzącym ruch zakładu górniczego. Zatem tak kluczowym jest obranie dobrej strategii informacyjnej przedsiębiorstwa górniczego, ponieważ jej brak może tylko rodzić niepotrzebne konflikty (Kwiatek 1998, Kwiatek 2007).

Ponadto, konieczność ochrony budowli na terenach szkód górniczych ma już wymiar tradycyjny i kulturowy, ukazujący się w powszechnie wyznawanych zasadach oraz obyczajowości mieszkańców (Kwiatek 1998, Mrozek 1988).

### **3.2.2. Aspekty ekonomiczne**

W Polsce dopuszczalne możliwe wychylenia budynków o pionu nie są normowane. Należy mieć jednak na uwadze, iż maksymalne, dopuszczalne różnice osiadań fundamentów, powodujące pochylenie budynków, wynoszą 3 mm/m (PN-B-03020:1981, PN-B-10020:1968,). Wychylenie konstrukcji budowlanych od pionu pociąga za sobą powstawanie w nich dodatkowych obciążeń. Dodatkowo, bardzo szeroki wachlarz różnorodnych obiektów budowlanych o zróżnicowanych gabarytach sprawia, że wartości granicznych wychyleń od pionu spowodowanych podziemną eksploatacją górnictwem, poniżej których budynek może być użytkowany, należy dobierać indywidualnie. Jednakże powszechnie przyjęto, iż maksymalne nachylenie budowli, które wynika ze stanu granicznego nośności, nie powinno przekraczać 25 mm/m (Kwiatek 1998, Popiołek 2009, Szojda 2019).

Podczas wyznaczania wielkości możliwego pochylenia budynków, ze względu na właściwości użytkowe, bierze się pod uwagę następujące czynniki:

- wpływ na zdrowie, a także samopoczucie użytkowników takich obiektów,
- zagrożenia związane z eksploatacją wychylonych od pionu budowli, jak na przykład samoczynne otwieranie się okien lub drzwi bądź zmniejszenie stabilności wyposażenia meblowego mieszkań,

- brak albo odwrócenie spadków tarasów, rynien, dachów oraz posadzek, które mogą powodować problemy z prawidłowym odprowadzaniem wody,
- nieprawidłowości w funkcjonowaniu grawitacyjnych instalacji centralnego ogrzewania,
- wadliwe działanie urządzeń dźwigowych (Kwiatek 1998, Kwiatek 2007).

Niezaprzeczalnym faktem jest, że każda podziemna eksploatacja górnicza jest bardzo uciążliwa dla wszystkich użytkowników obiektów budowlanych, a w szczególności budynków mieszkalnych. Priorytetem jednak jest, aby negatywny wpływ wydobycia kopalin nie zagrażał bezpieczeństwu budowli i jego użytkownikom, a związane z nim niedogodności (użytkowe i estetyczne) nie były większe od typowych w danych warunkach (Kwiatek 2004, Kwiatek 2007). Stopnie uciążliwości użytkowania obiektów budowlanych na terenach górniczych w zależności od zakłóceń normalnego użytkowania, odczuwalności skutków eksploatacji przez ludzi i potrzeb w zakresie naprawiania szkód przedstawiono w tablicy 3-1.

Tablica 3-1. Stopnie uciążliwości użytkowania obiektów budowlanych (Kwiatek 2004)

Uciążliwość	Zakłócenia normalnego użytkowania	Odczuwalność skutków eksploatacji przez ludzi	Naprawianie szkód
Nieodczuwalna	Praktycznie nie występują	Znikoma	Nie występują skutki wymagające usuwania
Mała	Nieistotne	Zauważalna	W ramach okresowych remontów
Średnia	Utrudniają użytkowanie	Wzbudzająca niekorzystne reakcje	Po zakończeniu eksploatacji
Duża	Mogą wystąpić przerwy w użytkowaniu	Dokuczliwa	Zachodzi potrzeba bieżących interwencji

Przyjęto cztery stopnie uciążliwości: nieodczuwalną, małą, średnią i dużą, jednakże rekomendowane jest nieprzekraczanie uciążliwości małej. Skutki, jakie mogą wystąpić w budynkach po dopuszczeniu uciążliwości większej, wiążą się ze znaczącymi problemami w użytkowaniu obiektów (Kwiatek 2004, Kwiatek 2007). Zaprezentowana charakterystyka uciążliwości użytkowania obiektów budowlanych na terenach górniczych według stopnia jej nasilenia ma charakter ogólny i może dotyczyć różnego rodzaju budowli. Natomiast w wypadku budynków mieszkalnych, podporządkowano uciążliwość ich użytkowania ciągłym deformacjom terenu wobec odchylenia od pionu  $T_b$ , rozwartości pojedynczych rys  $d$  i kąta odkształcenia postaciowego ścian budynków  $\gamma_k$ , co zestawiono w tablicy 3-2 (12/2000, Kawulok 2010, Kawulok 2022, Kawulok i in. 2019, Kwiatek 1998, Kwiatek 2004, Kwiatek 2007).

Tablica 3-2. Stopnie uciążliwości użytkowania budynków (12/2000)

Skutki w budynku	Uciążliwość			
	nieodczuwalna	mała	średnia	duża
$T_b$ [mm/m]	$T_b \leq 10$	$10 < T_b \leq 15$	$15 < T_b \leq 20$	$T_b > 20$
$d$ [mm]	$d \leq 1$	$1 < d \leq 3$	$3 < d \leq 8$	$d > 8$
$\gamma_k$ [rad]	$\gamma_k \leq 10^{-3}$	$10^{-3} < \gamma_k \leq 2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3} < \gamma_k \leq 3 \cdot 10^{-3}$	$\gamma_k > 3 \cdot 10^{-3}$



Opisane stopnie uciążliwości użytkowania budynków mogą być także podstawą do sformułowania zakresu koniecznych prac remontowych, które usuną lub zniwelują utrudnienia w eksploatacji obiektów budowlanych poddanych wpływowi podziemnej eksploatacji górniczej.

W zdecydowanej większości przypadków schemat postępowania wygląda następująco:

– wychylenia nieodczuwalne — brak konieczności wykonywania jakichkolwiek robót remontowych,

– wychylenia o małej uciążliwości — zaleca się przeprowadzenie robót naprawczych, które spowodują zminimalizowanie uciążliwości w użytkowaniu obiektów budowlanych. Przeważnie sprowadzają się one do poziomowania bądź przywracania prawidłowych spadków posadzek, rynien oraz tarasów, a także do regulowania stolarki okiennej oraz drzwiowej,

– wychylenia o średniej uciążliwości — zależnie od stanowiska użytkowników takiego budynku można przeprowadzić roboty remontowe tak jak w przypadku konstrukcji o małej uciążliwości użytkowania albo wykonanie procesu prostowania obiektu. Jednakże w głównej mierze sugeruje się zrealizowanie prac naprawczych,

– wychylenia o dużej uciążliwości — preferuje się działania analogiczne jak dla budowli o średniej uciążliwości użytkowania, jednak w tym wypadku bardziej optuje się za dokonaniem rektyfikacji budynku,

– wychylenia niedopuszczalne — konieczne jest prostowanie bryły obiektu budowlanego, natomiast do momentu jej skutecznienia, eksploatacja takiej budowli jest do przyjęcia tylko i wyłącznie stosownie do zasad określonych w analizie zagrożenia (Kwiatek 1998, Kwiatek 2004, Kwiatek 2007).

Fundamentalnym terminem opisującym możliwość przejęcia przez obiekt budowlany negatywnych wpływów ciągłych deformacji terenu, spowodowanych podziemną eksploatacją górniczą, jest jego odporność na te wpływy. Przez odporność rozumie się, scharakteryzowaną poprzez wskaźniki deformacji powierzchni w rejonie krawędzi eksploatacji, zdolność budynku do przejęcia wpływu eksploatacji przy zachowaniu bezpiecznego użytkowania obiektu oraz wystąpieniu co najwyżej małej uciążliwości użytkowania budynku (Kwiatek 1998, Kwiatek 2004, Kwiatek 2007).

Odporność już wybudowanych obiektów budowlanych na wpływy ciągłych deformacji podłoża wywołanych podziemną eksploatacją górniczą można oszacować metodą:

– punktową oceny odporności,

– skali odporności lub

– parametryczną oceny odporności (Kwiatek 1998).

Są one dedykowane do oceny odporności obiektów celem ich ochrony przed pierwszą bądź kolejną eksploatacją górniczą na obszarze ich usytuowania, a także sformułowania warunków oraz możliwości jej prowadzenia. Powyższe metody są jednak przeznaczone tylko i wyłącznie do oceny odporności budynków mieszkalnych o konstrukcji ścianowej murowanych z elementów drobnowymiarowych, usytuowanych w zabudowie wolnostojącej lub zwartej o wysokości do pięciu kondygnacji. Mogą one być również wykorzystane do oceny odporności obiektów użyteczności publicznej, przemysłowych oraz gospodarczych

o konstrukcji i użytych materiałach podobnych do stosowanych w budowlach o konstrukcji murowej (Kawulok 2010, Kwiatek 1998, Kwiatek 2004, Kwiatek 2007, Szojda 2019).

Jednakże najczęściej stosowaną metodą jest metoda punktowa oceny odporności obiektu budowlanego. Opiera się ona na przyporządkowaniu konkretnej liczby punktów, każdej z siedmiu wyszczególnionych charakterystycznych cech podłoża gruntowego oraz budynku mieszkalnego:

- wymiary rzutu poziomego – długość,
- kształt bryły budynku,
- posadowienie budynku,
- podłoże (grunt) budynku,
- konstrukcja budynku,
- istniejące zabezpieczenia na wpływy górnicze oraz
- stan techniczny budynku (Przybyła i Świądrowski 1968, Świądrowski 1972, Świądrowski 1989).

Zakwalifikowanie obiektu budowlanego do danej kategorii odporności dokonuje się na podstawie tablicy kwalifikacyjnej, zależnie od łącznej liczby przydzielonych budowli punktów. Ostatecznie, rodzaj faktycznej kategorii odporności obiektu na wpływy podziemnej eksploatacji górniczej jest uzależniony od stosowanych w głównej mierze wskaźników deformacji powierzchni, takich jak: promień krzywizny  $R$  i poziome odkształcenia  $\varepsilon$  podłoża, czyli wskaźników deformacji w szczególności decydujących o stanie naprężenia w konstrukcji. Kategorie odporności obiektów budowlanych w zależności od wartości promienia krzywizny  $R$  i poziomego odkształcenia  $\varepsilon$  podłoża przedstawiono w tablicy 3-3 (Kwiatek 2004, Kwiatek 2007).

Tablica 3-3. Kategorie odporności obiektów budowlanych na krzywizny i poziome odkształcenia powierzchni (Kwiatek 2004)

Kategoria odporności obiektu	Dopuszczalne wartości bezwzględne	
	promienia krzywizny $R$ [km]	poziomego odkształcenia $\varepsilon$ [mm/m]
0	40	0,3
1	20	1,5
2	12	3
3	6	6
4	4	9

W zależności od intensywności deformacji powierzchni wybiera się odpowiedni rodzaj konstrukcji projektowanego obiektu oraz sposób jego zabezpieczenia. Jednakże w następujących przypadkach należy definitywnie unikać lokalizowania budynków na terenach o prognozowanych deformacjach ciągłych:

- jeżeli po wystąpieniu obniżenia terenu woda gruntowa podniesie się do poziomu posadowienia obiektu,

– jeżeli prognozowane deformacje terenu mogą występować w czasie wznoszenia budynku,

– jeżeli wskaźnik poziomych odkształceń terenu  $|\varepsilon| > 9$  mm/m lub gdy promień krzywizny terenu  $|R| < 4$  km, względnie, kiedy moduł pierwotnego odkształcenia  $E_0 > 80$  MPa, przy dowolnym promieniu krzywizny terenu,

– jeżeli w obszarze projektowanej lokalizacji obiektów mieszkalnych przewidywane nachylenie terenu będzie przekraczało 10 mm/m (416/2006, Kwiatek 2004, Kwiatek 2007).

Przez wzgląd na powyższe wymogi, w polskim Prawie geologicznym i górniczym, a także w Kodeksie cywilnym unormowano sposoby ustalania ekonomicznych kryteriów opłacalności związanych z prowadzonymi robotami budowlanymi w budynkach w zakresie usuwania skutków postępującej podziemnej eksploatacji górniczej oraz zasady wyznaczania wartości odszkodowawczej.

Zgodnie z polskim Prawem geologicznymi i górniczym:

– art. 28 ust. 1 Koncesji na podziemne składowanie odpadów udziela się pod warunkiem ustanowienia zabezpieczenia roszczeń mogących powstać wskutek wykonywania takiej działalności.

– art. 28 ust. 2 Jeżeli przemawia za tym szczególnie ważny interes państwa lub szczególnie ważny interes publiczny związany w szczególności z ochroną środowiska lub gospodarką kraju, koncesja na działalność inną niż określona w ust. 1, z wyjątkiem koncesji na podziemne składowanie dwutlenku węgla, może zostać udzielona pod warunkiem ustanowienia zabezpieczenia roszczeń mogących powstać wskutek wykonywania objętej nią działalności.

– art. 28 ust. 3 Zabezpieczenie może w szczególności przyjąć formę ubezpieczenia od odpowiedzialności cywilnej przedsiębiorcy, gwarancji bankowej albo poręczenia bankowego.

– art. 28 ust. 4 O formie, zakresie oraz sposobie zabezpieczenia, a w przypadku działalności innej niż określona w ust. 1 – także o potrzebie ustanowienia zabezpieczenia, rozstrzyga organ koncesyjny, działając w drodze postanowienia, na które przysługuje zażalenie.

– art. 28 ust. 5 W przypadkach ustanowienia zabezpieczenia udzielenie koncesji może nastąpić dopiero po przedstawieniu dowodu jego ustanowienia.

– art. 28 ust. 6 Corocznie, w terminie do końca stycznia, przedsiębiorca przedkłada organowi koncesyjnemu aktualny dowód istnienia zabezpieczenia.

– art. 147 ust. 1 Przywrócenie stanu poprzedniego może w szczególności nastąpić przez dostarczenie gruntów, obiektów budowlanych, urządzeń, lokali, wody lub innych dóbr tego samego rodzaju.

– art. 147 ust. 2 Naprawienie szkody w gruncie rolnym lub leśnym zdegradowanym lub zdewastowanym na skutek ruchu zakładu górniczego następuje w sposób określony przepisami o ochronie tych gruntów.

– art. 147 ust. 3. Obowiązek przywrócenia stanu poprzedniego ciąży na tym, kto jest odpowiedzialny za szkodę. Poszkodowany, za zgodą podmiotu odpowiedzialnego za szkodę, może wykonać obowiązek w zamian za zapłatę odpowiedniej kwoty pieniężnej.

Art. 148. Jeżeli poszkodowany poniósł nakłady na naprawienie szkody, odszkodowanie ustala się z uwzględnieniem wartości uzasadnionych nakładów (Dz. U. 2011 nr 163 poz. 981).

Natomiast z Kodeksu cywilnego wynika, iż:

– Art. 361 § 1. Zobowiązany do odszkodowania ponosi odpowiedzialność tylko za normalne następstwa działania lub zaniechania, z którego szkoda wynikła.

– art. 361 § 2 W powyższych granicach, w braku odmiennego przepisu ustawy lub postanowienia umowy, naprawienie szkody obejmuje straty, które poszkodowany poniósł, oraz korzyści, które mógłby osiągnąć, gdyby mu szkody nie wyrządzono.

– art. 363 § 1 Naprawienie szkody powinno nastąpić, według wyboru poszkodowanego, bądź przez przywrócenie stanu poprzedniego, bądź przez zapłatę odpowiedniej sumy pieniężnej. Jednakże gdyby przywrócenie stanu poprzedniego było niemożliwe albo gdyby pociągało za sobą dla zobowiązanego nadmierne trudności lub koszty, roszczenie poszkodowanego ogranicza się do świadczenia w pieniądzu.

– art. 363 § 2 Jeżeli naprawienie szkody ma nastąpić w pieniądzu, wysokość odszkodowania powinna być ustalona według cen z daty ustalenia odszkodowania, chyba że szczególne okoliczności wymagają przyjęcia za podstawę cen istniejących w innej chwili (Dz. U. nr 16, poz. 93).

Zatem z przedstawionych wyżej przepisów prawa wynika potrzeba określenia poniższych wartości ekonomicznych, które stanowią wartości kosztorysowe, rynkowe, bądź techniczne:

- wartości gruntów,
- wartości obiektów budowlanych,
- wartości lokali,
- wartości robót związanych z przywróceniem do stanu poprzedniego,
- wartości urządzeń,
- wartości odszkodowawczej w przypadku niemożliwości przywrócenia stanu poprzedniego lub kosztów naprawy rażąco przekraczających wielkość szkody,
- wartości utraconych korzyści,
- wartości zabezpieczenia roszczeń (Dydenko 2020, Kucharska-Stasiak 2016).

W sytuacji konieczności przeprowadzenia robót budowlanych mających na celu przywrócenie obiektu budowlanego do stanu poprzedniego, mamy do czynienia z wartością kosztorysową. Natomiast w pozostałych przypadkach jest to wartość rynkowa lub techniczna (odtworzeniowa netto), w zależności od tego, która z nich jest większa. Jedynie oprócz gruntów, które są zawsze oceniane w wartości rynkowej (Sekunda i Więclaw-Bator 2022).

Zamiarem wykonanych do tej pory działań jest usystematyzowanie oraz ujednoczenie kryteriów, a także ocen ekonomicznych w dziedzinie ochrony budowli wybudowanych na terenach szkód górniczych. Poniżej zaprezentowano trzy główne zasady określania wartości ekonomicznych związanych z naprawą szkód bądź zabezpieczeniem roszczeń (Sekunda i Więclaw-Bator 2022):

- naprawienie szkody poprzez przywrócenie do stanu poprzedniego, gdy koszty naprawy  $K_{Ni}$  nie przekraczają wartości obiektu budowlanego  $V_{Bi}$  (3-1).

$$K_{Ni} < V_{Bi} \quad (3-1)$$

– naprawienie szkody poprzez przywrócenie do stanu poprzedniego, gdy koszty naprawy  $K_{Ni}$  są równe wartości obiektu budowlanego  $V_{Bi}$  (3-2).

$$K_{Ni} = V_{Bi} \quad (3-2)$$

– naprawienie szkody poprzez przywrócenie do stanu poprzedniego, gdy koszty naprawy  $K_{Ni}$  przekraczają wartość obiektu budowlanego  $V_{Bi}$  (3-3).

$$K_{Ni} > V_{Bi} \quad (3-3)$$

W przypadku zaistnienia dwóch pierwszych sytuacji występuje naprawa szkód, natomiast w trzeciej wypłata odszkodowania. Z tego też względu decydującym jest kryterium ekonomicznej opłacalności naprawy szkody, po uwzględnieniu kryterium społecznego i technicznego (Kwiatek 1998, Sekunda i Więclaw-Bator 2022).

Jednakże w sytuacji, gdy w danym budynku lub części lokali budynku mieszkalnego prowadzona jest działalność gospodarcza, wówczas wartość dochodu lub utraconych korzyści może zadecydować o kosztach napraw przekraczających wartość obiektu budowlanego (Konowalczyk 2014). W tym wypadku, mimo iż koszty robót budowlanych przewyższają wysokość poniesionej szkody, czyli wartość budynku, o jej naprawie poprzez przywrócenie do stanu poprzedniego decydują czynniki społeczno-gospodarcze. Zastosowanie przedstawionego kryterium ekonomicznego dyktuje jednak konieczność wyszczególnienia składników kosztów naprawienia szkody oraz wyznaczenia wartości obiektu budowlanego (Sekunda i Więclaw-Bator 2022).

Koszty operacji  $K_O$  powiązanej z naprawą szkody składają się z następujących elementów (3-4) (Sekunda i Więclaw-Bator 2022):

$$K_O = K_S + K_N \quad (3-4)$$

gdzie:

$K_S$  – koszty postępowania sądowego, w tym opinii biegłych,

$K_N$  – koszty napraw.

Koszty postępowania sądowego są kosztami wyjściowymi, które są potrzebne do określenia dalszego przebiegu sprawy, lecz nie wpływają one na kryteria ekonomiczne. Koszty napraw składają się z takich oto części składowych (3-5) (Sekunda i Więclaw-Bator 2022):

$$K_N = K_{DN} + K_W + K_R + K_D + K_P \quad (3-5)$$

gdzie:

$K_{DN}$  – koszty dokumentacji, dodatkowych ekspertyz i nadzoru,

$K_W$  – koszty wykonawstwa,

$K_R$  – koszty rektyfikacji budynku,

$K_D$  – wartość utraconych korzyści, w przypadku prowadzonej działalności gospodarczej w budynku,

$K_P$  – koszty robót porządkowych oraz ewentualnych rekompensat za utrudnienia lub niemożności użytkowania budynku w okresie występowania szkód i ich naprawy.

Koszty wykonawstwa można oszacować za pomocą wzoru (3-6) (Sekunda i Więclaw-Bator 2022):

$$K_W = \sum_{i=1}^n J_i \cdot C_{ji} \quad (3-6)$$

gdzie:

$n$  – ilość pozycji kosztorysowych,

$J_i$  – ilość poszczególnych zobmiarowanych robót budowlanych,

$C_{ji}$  – ceny jednostkowe poszczególnych robót budowlanych — robocizny  $R_i$ , materiałów  $M_i$  i sprzętu  $S_i$  — łącznie z kosztami zakupu materiałów  $K_z$ , kosztami pośrednimi  $K_p$  i zyskiem  $Z$  (3-7) (Sekunda i Więclaw-Bator 2022):

$$C_{ji} = R_i + M_i + S_i + K_z + K_p + Z \quad (3-7)$$

Zgodnie z definicją wartość rynkowa nieruchomości to najbardziej prawdopodobna cena możliwa do osiągnięcia w warunkach normalnie funkcjonującego rynku przy założeniu, że strony transakcji:

- są niezależne od siebie i działają w sposób racjonalny nie kierując się szczególnymi motywami,
- nie działają w sytuacji przymusowej,
- są świadome zalet i wad nieruchomości,
- mają stanowczy zamiar zawarcia transakcji,
- nieruchomość jest eksponowana na rynku wystarczająco długo, z uwzględnieniem charakteru praw do nieruchomości i strat rynku (Cymerman i Cymerman 2020, Korenik i Zakrzewska-Półtorak 2021).

W sprawach odszkodowawczych określa się wartość rynkową dla dotychczasowego sposobu użytkowania (Cymerman i Cymerman 2020, Korenik i Zakrzewska-Półtorak 2021). Zgodnie z polskim Kodeksem cywilnym wysokość odszkodowania, czyli wartość rynkowa nieruchomości powinna być ustalona według cen z daty odszkodowania (Dz. U. nr 16, poz. 93). Wartość rynkową nieruchomości formułuje się w podejściu dochodowym i porównawczym (Trojanek 2018).

Koncepcja porównawcza opiera się wyznaczeniu wartości nieruchomości przy założeniu, że wartość wycenianej nieruchomości odpowiada cenie, jaką uzyskano za porównywalne nieruchomości będące przedmiotem obrotu rynkowego, skorygowanej z uwagi na czynniki różniące te nieruchomości, a także ustalonej z uwzględnieniem zmian

poziomu cen ze względu na upływ czasu (Prystupa 2014, Żróbek 2000). Dodatkowo, przy tym podejściu wykorzystuje się metodę cenowo- porównawczą, gdzie przedmiotem porównania są ceny otrzymane w obrocie nieruchomościami oraz pozostałe aspekty nieruchomości wpływające na ich wartość. Stosuje się poniższe techniki:

- analizy statystycznej rynku oraz
- porównywania nieruchomości parami (Prystupa 2014, Żróbek 2000).

Biorąc pod uwagę technikę analizy statystycznej rynku do porównania przyjmuje się grupę nieruchomości, które stanowią próbkę reprezentatywną na rozpatrywanym rynku (Prystupa 2014, Żróbek 2000). Natomiast uwzględniając technikę porównywania nieruchomości parami, porównuje się nieruchomość wycenianą, której cechy są znane, ale nie jest znana jej wartość, z nieruchomościami, które był przedmiotem obrotu rynkowego i których wszystkie cechy są znane, jednakowoż z ceną (Prystupa 2014, Żróbek 2000).

Przedstawione podejście porównawcze daje najlepsze wyniki, gdy porównywane nieruchomości są bardzo podobne do wycenianej i blisko siebie położone (Prystupa 2014, Żróbek 2000). Z tego też względu jest ono najczęściej wykorzystywanym podejściem przy wycenie nieruchomości mieszkaniowych (Kwiatek 1998).

Natomiast podejście dochodowe podczas wyceny nieruchomości wyraża jej wartość w stosunku do dochodu, który nieruchomość może przynieść obecnemu właścicielowi (Trojanek 2018).

Wartość nieruchomości wyceniana metodą dochodową dotyczy tylko i wyłącznie zabudowań i gruntów (Korenik i Zakrzewska-Półtorak 2021). Stosując metodę dochodową używa się dwóch podstawowych metod:

- metodę zysków oraz
- metodę inwestycyjną (Trojanek 2018).

Metodą zysków posługuje się najczęściej do wyceny nieruchomości bardzo nietypowych, które przynoszą dochód, aczkolwiek występują na rynku niezwykle rzadko jako przedmiot obrotu, dlatego też nie pojawiają się porównywalne ceny transakcyjne (Trojanek 2018). Cechą charakterystyczną takich nieruchomości jest również brak możliwości zmiany sposobu ich użytkowania. W związku z tym wycena takich nieruchomości opiera się na określeniu dochodu stosownie do analizy danych księgowych i kolejno na zastosowaniu metody inwestycyjnej (Trojanek 2018).

Metodą inwestycyjną posługuje się podczas wycen nieruchomości przynoszących dochód, jeśli występują podobne nieruchomości na rynku, to wówczas przy użyciu techniki:

- dyskontowania strumieni pieniężnych, a także
- kapitalizacji prostej (Trojanek 2018).

Wykorzystując technikę dyskontowania strumieni pieniężnych, wartość nieruchomości wyraża się poprzez zdyskontowanie do daty wyceny nieruchomości – strumieni pieniężnych dochodów, których uzyskanie z nieruchomości oczekuje się w przewidywanym okresie czasu. Zatem wartość nieruchomości jest obliczana według wzoru (3-8) (Trojanek 2018):

$$V_{DCF} = C_{F1} \cdot \frac{1}{(1+r)} + C_{F2} \cdot \frac{1}{(1+r)^2} + \dots + C_{Ft} \cdot \frac{1}{(1+r)^t} + RV \cdot \frac{1}{(1+r)^t} \quad (3-8)$$

gdzie:

$V_{DCF}$  – wartość nieruchomości,

$C_F$  – wynik finansowy (strumień) na koniec kolejnego roku prognozy, 1, 2, ..., t – kolejne lata prognozy,

$RV$  – wartość rezydualna,

$r$  – stopa dyskonta.

Wartość nieruchomości  $V$  stosując techniki kapitalizacji prostej, uzyskuje się w wyniku pomnożenia jednorocznego dochodu  $D$  z nieruchomości przez współczynnik kapitalizacji  $W_K$ , który jest wyznaczany na podstawie analizy transakcji porównawczych (3-9) (Trojanek 2018).

$$V = D \cdot W_K \quad (3-9)$$

Tym samym konkretny rodzaj nieruchomości, która jest objęta naprawianiem szkody, pociąga za sobą konieczność wyboru najwłaściwszej z wyżej opisanych metod, aby określić jej wartość rynkową, a także porównać ją wartością odtworzeniową netto (Kwiatek 1998).

Wartość odtworzeniową netto obiektu budowlanego oblicza się ze wzoru (3-10) (Sekunda i Więclaw-Bator 2022):

$$V_{BN} = V_B \cdot \left(1 - \frac{S_Z}{100}\right) \quad (3-10)$$

gdzie:

$V_{BN}$  – wartość odtworzeniowa netto,

$V_B$  – wartość odtworzeniowa,

$\left(1 - \frac{S_Z}{100}\right)$  – współczynnik zużycia technicznego, uwzględniający wiek obiektu i rodzaj konstrukcji.

Koszty odtworzenia wyznacza się z pomocą poniższych technik:

- techniki elementów scalonych,
- techniki wskaźnikowej oraz
- techniki szczegółowej.

Koszt odtworzenia w technice elementów scalonych wylicza się ze wzoru (3-11) (Sekunda i Więclaw-Bator 2022):

$$V_B = \sum_{i=1}^n J_e \cdot C_{je} \cdot (1 + W_D) \quad (3-11)$$

gdzie:

$J_e$  – liczba scalonych jednostek jednorodnych robót,

$C_{je}$  – ceny jednostkowe scalonych elementów robót łącznie z kosztami pośrednimi i zyskiem,



$W_D$  – wskaźnik procentowy kosztów opracowania dokumentacji i nadzoru budowlanego.

W technice wskaźnikowej koszty odtworzenia ustala się według wzoru (3-12) (Sekunda i Więclaw-Bator 2022):

$$V_B = Q \cdot C_{jQ} \cdot (1 + W_D) \quad (3-12)$$

gdzie:

$Q$  – ilość jednostek odniesienia, dla których cena została ustalona,

$C_{jQ}$  – cena wskaźnikowa,

$W_D$  – wskaźnik procentowy kosztów opracowania dokumentacji i nadzoru budowlanego.

Koszt odtworzenia w technice szczegółowej oblicza się zgodnie ze wzorem (3-13) (Sekunda i Więclaw-Bator 2022):

$$V_B = \sum_{i=1}^n J_i \cdot C_{ji} \cdot (1 + W_D) \quad (3-13)$$

gdzie:

$J_i$  – liczba robót,

$C_{ji}$  – ceny jednostkowe poszczególnych robót, uwzględniające koszt robocizny, materiału i sprzętu oraz koszty zakupu pośrednie i zysk,

$W_D$  – wskaźnik procentowy kosztów opracowania dokumentacji i nadzoru budowlanego.

### 3.2.3. Procedura usuwania szkód górniczych w obiektach budowlanych

Generalnie to na przedsiębiorcy prowadzącym ruch zakładu górniczego ciąży obowiązek przywrócenia obiektu budowlanego do stanu poprzedniego (Dz. U. nr 163, poz. 981). Niestety, właściciele bądź użytkownicy takich budynków, czyli innymi słowy poszkodowani, nie mają żadnego wpływu na możliwości wyboru formy naprawy. Podjęcie decyzji o trybie eliminacji usterek jest poprzedzone analizą jego kosztów (Kwiatek 1998).

Podczas wystąpienia bezsprzecznego związku przyczynowego między występującymi w obiekcie budowlanym uszkodzeniami, które są wywoływane przez podziemną eksploatację górniczą prowadzoną zgodnie z zatwierdzonym planem ruchu zakładu górniczego, sugeruje się zastosowanie niniejszej procedury postępowania:

- ocenić stan uszkodzeń i aktualnego wychylenia budynku od pionu,
- określić zakres i sposób prac związanych z usuwaniem skutków eksploatacji oraz prac zabezpieczających,
- wyszczególnić składniki kosztów naprawczych,
- sformułować kryterium opłacalności prac naprawczych,
- przeprowadzić negocjacje między właścicielem bądź użytkownikiem obiektu budowlanego, a przedsiębiorcą prowadzącym ruch zakładu górniczego,

– wykonać prace naprawcze lub wpłacić jednorazowe odszkodowanie albo odtworzyć budynek (Kawulok 2010, Kwiatek 1998).

Najważniejszym elementem przedstawionej procedury, pozwalającym na określenie prawidłowej metody postępowania, której celem jest usunięcie szkód górniczych, jest ocena stanu uszkodzeń i aktualnego wychylenia budynku od pionu, która musi zostać dokonana zgodnie z powszechnie obowiązującymi zasadami diagnozowania obiektów budowlanych (Kwiatek 1998). Jej wyniki należy prawidłowo udokumentować, przez co rozumie się sporządzenie fotografii bądź szkiców zaistniałych uszkodzeń, a także uzupełniającego opisu stwierdzonych nieprawidłowości. Natomiast samo wychylenie budynku od pionu musi zostać udokumentowane wynikami pomiarów geodezyjnych (Kawulok 2010, Kwiatek 1998).

Kolejno, zakres i sposób prac związanych z usuwaniem skutków eksploatacji oraz prac zabezpieczających w dużej mierze jest uzależniony od charakteru i rodzaju występujących nieprawidłowości oraz uszkodzeń, a także od typu elementu konstrukcyjnego obiektu budowlanego, który uległ takim uszkodzeniom bądź nieprawidłowościom (Kwiatek 1998).

Następnie, prace naprawcze winny zapewnić:

- odtworzenie walorów użytkowych i estetycznych budynku oraz
- przywrócenie zniszczonym częściom konstrukcji ich pierwotnej nośności (Kwiatek 1998).

Takie przywrócenie zniszczonym częściom konstrukcji ich pierwotnej nośności jest w stanie zagwarantować przede wszystkim bezpieczne użytkowanie obiektu budowlanego zgodnie z jego przeznaczeniem oraz ocalić jego walory estetyczne. Oprócz tego pociąga to za sobą konieczność przeprowadzenia dodatkowych robót remontowych, na przykład w postaci malowania lub kafelkowania pomieszczeń (Kawulok 2010, Kwiatek 1998). Stosowane technologie prac naprawczych na terenach występowania szkód górniczych praktycznie niczym się nie różnią od powszechnie przeprowadzanych. Należy za to pamiętać, aby roboty budowlane zaczynać od głównych elementów konstrukcyjnych, a dopiero w drugiej kolejności przechodzić do działań powiązanych z eliminowaniem usterek w komponentach wyposażeniowych oraz wykończeniowych. W sytuacji zaistnienia wychylenia od pionu budowli, jego usunięcie jest ściśle podporządkowane wartościom tegoż wychylenia (Kawulok 2010, Kwiatek 1998).

Istotą kryterium opłacalności prac naprawczych jest określenie wysokości wszystkich kosztów robót dotyczących usunięcia szkód górniczych powstałych w obiekcie (Kwiatek 1998). W powyższym kryterium, wartością, do której są odnoszone nakłady pieniężne na remonty nie jest jak powszechnie przyjęto 70÷75% wartości technicznej budynku, ale aktualnie obowiązująca jego wartość rynkowa (Kwiatek 1998). Natomiast w sytuacji, gdy o powinności przeprowadzenia prac naprawczych przeważa aspekt społeczny, przedstawione kryterium ekonomiczne nie musi być w ogóle brane pod uwagę (Kwiatek 1998).

Po wyznaczeniu wartości kosztów naprawczych, kolejną częścią składową procedury jest przeprowadzenie negocjacji między właścicielem bądź użytkownikiem obiektu budowlanego, a przedsiębiorcą prowadzącym ruch zakładu górniczego. Takie negocjacje

obydwu zainteresowanych stron, oczywiście uwzględniając kryterium ekonomicznej opłacalności, mogą doprowadzić do:

- jednorazowego odszkodowania bądź odtworzenia budynku lub
- wykonania naprawczych robót budowlanych, usuwających niekorzystne skutki prowadzenia podziemnej eksploatacji górniczej, razem z pracami modernizacyjnymi (Kawulok 2010, Kwiatek 1998).

W trakcie trwania negocjacji należy wziąć pod uwagę:

- zaproponowaną przez użytkownika obiektu budowlanego modernizację oraz
- czynniki nadrzędne, którymi są aspekty społeczne (Kwiatek 1998).

Do aspektów społecznych zalicza się między innymi bezdyskusyjna potrzeba zachowania i ochrony pewnych budynków lub ich zespołów o dużym znaczeniu kulturowym, bądź też ze względu na ochronę środowiska naturalnego lub indywidualnych osób (Kwiatek 1998, Mrozek 1988).

Ponadto, właściciel albo użytkownik obiektu budowlanego, zdając sobie sprawę z wielkości wykonywanego remontu i związanych z tym niedogodności, może w trakcie jego trwania wystąpić z propozycją przeprowadzenia robót modernizacyjnych. Najczęściej odnoszą się one do modyfikacji konstrukcyjnych doprowadzających do zwiększenia bezpieczeństwa budynku albo podniesienia standardu mieszkań lub zmiany funkcji użytkowej, co z kolei prowadzi do zwielokrotnienia wartości obiektu (Kwiatek 1998). Naturalnie, koszty realizacji tych robót budowlanych ponosi sam użytkownik lub właściciel budynku.

Procedura ta dotyczy usuwania szkód powstałych na skutek podziemnej eksploatacji górniczej, w obiektach budowlanych wychylonych od pionu i uszkodzonych (Kwiatek 1998). Jednakże jej zakres stosowania ogranicza się tylko i wyłącznie do budowli usytuowanych:

- na terenie, na którym aktualnie jest prowadzona podziemna eksploatacja górnicza,
- na obszarach górniczych likwidowanych kopalń,
- w miejscach, w których zaprzestano prowadzenia podziemnej eksploatacji górniczej,
- w regionach, w których dopiero planuje się prowadzenie podziemnej eksploatacji górniczej w bardzo odległym okresie czasu i nie ma konieczności na chwilę obecną analizować zakresu i sposobu prac profilaktycznych. Niemniej, w obiektach budowlanych są widoczne nieprawidłowości oraz uszkodzenia spowodowane wpływem dotychczasowych działań górniczych (Kwiatek 1998).



## 4. WARSTWA POŚLIZGOWA FUNDAMENTU JAKO PRZEDMIOT BADAŃ

### 4.1. Cel naukowy badań

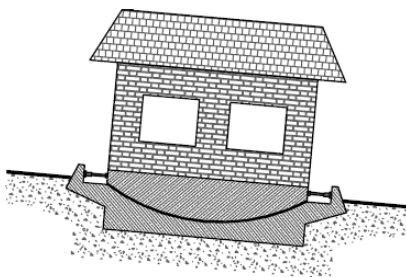
Zaletą nowego, tańszego systemu rektyfikacji budowli, które zostaną do tego procesu przystosowane na etapie projektu jest fakt, że samo przeprowadzenie procesu prostowania będzie zdecydowanie odmienne od aktualnie przyjętych rozwiązań, gdyż będzie wymagało minimalnych przygotowań oraz będzie można go powtarzać wielokrotnie.

Podstawowym założeniem pomysłu jest wykonanie zdublowanego fundamentu budynku, w którym styk pomiędzy jego obydwojema częściami wyposażony będzie w warstwę poślizgową składającą z folii budowlanej oraz smaru, ułożoną bezpośrednio na przygotowanej dolnej części fundamentu. Przyjęto takie ułożenie warstw w warstwie poślizgowej, z uwagi na to, że rozprowadzenie smaru na folii budowlanej pozwala zmniejszyć współczynnik tarcia pomiędzy powierzchniami. Jednakże warto zwrócić uwagę, iż powierzchnia betonu sama w sobie nie jest idealnie gładka, dlatego koniecznym jest zastosowanie folii budowlanej, ponieważ samo użycie smaru bez folii nie spowodowałoby zmniejszenia tarcia między warstwami. Ponadto, folia budowlana zabezpiecza powierzchnię betonu przed wnikaniem smaru w jego strukturę. Powierzchnia styku będzie miała kształt części sfery z wypukłością skierowaną ku dołowi (rys. 4-1).

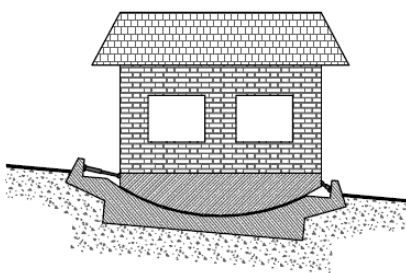


Rys. 4-1. Schemat zdublowanego fundamentu budynku

W przypadku pojawienia się nachylenia terenu, któremu towarzyszyć będzie pochylenie całego budynku (rys. 4-2), w celu doprowadzenia konstrukcji do stanu wyjściowego, wystarczy odpowiednio przesunąć w kierunku poziomym górną część fundamentu, co dzięki ukształtowaniu powierzchni styku doprowadzi do wypoziomowania budowli (rys. 4-3).



Rys. 4-2. Schemat zdublowanego fundamentu budynku w przypadku pochylenia budynku



Rys. 4-3. Schemat zdublowanego fundamentu budynku w momencie wypoziomowania budynku

Pozwoli to na łatwe, nieuciążliwe dla użytkowników obiektu budowlanego i niemalże bezkosztowe wykonywanie procesu rektyfikacji w dowolnym momencie istnienia budynku. Sam proces prostowania będzie przeprowadzany poprzez poziome przesunięcie górnej części fundamentu względem dolnej za pomocą siłowników hydraulicznych w kontrolowanym kierunku i zakresie. Tego rodzaju rozwiązanie konstrukcyjne będzie mogło być wykorzystywane dla wszystkich obiektów kubaturowych o regularnym, nierozczłonkowanym rzucie fundamentów. W praktyce oznacza to, że procesowi rektyfikacji będą mogły być poddane praktycznie wszystkie budynki w ten sposób skonstruowane, co nie jest ekonomicznie możliwe w obecnym momencie ze względu na liczbę obiektów i koszt jednostkowy rektyfikacji.

Niniejsza rozprawa doktorska ma na celu ustalenie optymalnych parametrów pracy zdublowanego płytowego fundamentu żelbetowego z warstwą poślizgową na styku pomiędzy jego obydwoma częściami, przy przeprowadzaniu procesu prostowania obiektu. Składały się na to:

- badania laboratoryjne warstw poślizgowych dla czterech różnych rozwiązań materiałowych smarów Grupy LOTOS S. A. w przedziale temperatur od 5°C do 50°C,
- obliczenia współczynników tarcia dla czterech różnych rozwiązań materiałowych smarów w przedziale temperatur od 5°C do 50°C. Powodem wyboru takiego zakresu temperatur był zamiar sprawdzenia jak będą kształtowały się wartości współczynników tarcia w przypadku temperatur zwykle występujących w poziomie posadowienia obiektu budowlanego, a także w sytuacji podgrzania warstw poślizgowych do dużo wyższych temperatur,
- wytypowanie warstwy poślizgowej o najmniejszym współczynniku tarcia w temperaturze pokojowej wynoszącej 20°C,
- badanie zachowania warstw poślizgowych oraz pomniejszonej konstrukcji zdublowanego płytowego fundamentu żelbetowego z warstwą poślizgową na styku pomiędzy jego obydwoma częściami dla jednego wytypowanego rozwiązania materiałowego smaru o najniższych współczynnikach tarcia w temperaturze pokojowej równej 20°C,
- obliczenia współczynników tarcia dla jednego wytypowanego rozwiązania materiałowego smaru dla modelu powierzchni sferycznej, w temperaturze pokojowej wynoszącej 20°C,
- analiza wpływu przyjętych rozwiązań materiałowych smaru, temperatury oraz wartości naprężeń na wartości współczynników tarcia warstw poślizgowych,
- analiza porównawcza współczynników tarcia podczas badań laboratoryjnych warstwy poślizgowej oraz modelu powierzchni sferycznej, dla wytypowanego rozwiązania materiałowego smaru w temperaturze pokojowej równej 20°C,
- modelowanie numeryczne wpływu przyjętych rozwiązań materiałowych smaru, temperatury oraz wartości naprężeń na wartości współczynników tarcia warstw poślizgowych.

Idea zaprojektowania nowego sposobu posadowienia obiektów, która będzie umożliwiała łatwe, tanie i wielokrotne doprowadzanie obiektów do poziomu wymagała przeprowadzenia działań w kilku kierunkach jednocześnie. Z jednej strony konieczne było stwierdzenie jakiej siły należy spodziewać się w czasie przesuwania konstrukcji, jaki jest optymalny kształt powierzchni styku i wreszcie określenie modelu numerycznego, na podstawie którego będzie można opracować optymalny kształt budynku. W ramach pierwszej części stwierdzono, iż wartości współczynników tarcia spoczynkowego i suwnego, wartości równomiernie rozłożonych obciążeń pionowych wywieranych na fundament oraz wartości temperatur odgrywają bardzo istotną rolę w nośności warstw poślizgowych na przeniesienie siły poziomej. Instrukcja Instytutu Techniki Budowlanej ITB nr 416/2006 zaleca przyjęcie konkretnych wartości współczynników tarcia w zależności od przedstawionych kilku warstw, nie podając jednak szczegółowych procedur. Brakuje wytycznych umożliwiających wyznaczenie wartości współczynników tarcia spoczynkowego i suwnego dla różnego rodzaju fundamentów (np. promieni krzywizny fundamentów płytowych o kształcie części sfery), warstw (np. folii), przekładek (np. smarów), obciążeń pionowych (np. równomiernie rozłożonych obciążeń wywieranych na podłoże przez różnej wielkości budynki i budowle) oraz temperatur (np. obniżonych bądź podwyższonych).

## **4.2. Znaczenie badań**

Ze względu na brak badań empirycznych i opracowań w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport na temat proponowanego w rozprawie innowacyjnego rozwiązania konstrukcyjnego polegającego na zdublowanym fundamencie o charakterystycznym kształcie styku, cały opis idei takiego pionierskiego rozwiązania konstrukcyjnego budynku, który byłby prawie niewrażliwy na wpływy deformacji podłoża wypełnia lukę badawczą. Dodatkowo, opracowane analizy numeryczne umożliwiają symulację zachowania konstrukcji fundamentu oraz całego obiektu budowlanego, z odpowiednio wykształconą warstwą poślizgową, przy wykonywaniu procesu prostowania budowli bez konieczności przeprowadzania czasochłonnych i pracochłonnych badań laboratoryjnych.



## **5. BADANIA LABORATORYJNE WARSTWY POŚLIZGOWEJ**

### **5.1. Metodologia badań**

Podstawową zastosowaną metodologią naukową jest metodologia nauk indukcyjnych (empirycznych), ponieważ aby uzasadnić twierdzenie, że istnieje nowy, być może tańszy system rektyfikacji budynku, wykorzystano spostrzeżenia z badań eksperymentalnych. Ponadto w badaniach również posłużono się obserwacjami, pomiarami, eksperymentami i testowaniem hipotez.

Dodatkowo, w badaniach wykorzystano jedną główną metodę. W celu potwierdzenia hipotez dotyczących nowej metody rozwiązania konstrukcyjnego, przeprowadzono eksperymenty laboratoryjne modelu obiektu wykonanego w sztucznie stworzonym środowisku, na mniejszą skalę, w laboratorium, przy użyciu specjalistycznych przyrządów.

Przy tym, w badaniach wykorzystano także metodę analizy regresji wyników, ponieważ jest to najbardziej podstawowa i powszechnie stosowana technika określania, w jaki sposób na zmienną odpowiedzi wpływają zmiany jednej lub większej liczby zmiennych objaśniających (Hoang 2019). W przypadku niniejszej rozprawy model regresji badał, jak zmienia się typowa wartość zmiennej współczynnika tarcia przy różnych wartościach zmiennej objaśniającej, tj. wartościach naprężeń wywieranych na podłoże przez budynki.

### **5.2. Budowa warstwy poślizgowej**

Podczas przeprowadzania badań laboratoryjnych, na warstwę poślizgową składały się dwie warstwy folii budowlanej PE (FOLIAREX IZ 300-N), każda o grubości 0,3 mm, pomiędzy którymi znajdowała się warstwa jednego z czterech rodzajów smarów dostarczonych przez Grupę LOTOS S. A., a mianowicie LOTOS: LT4 S-2, GRAFITOWANY, MONILIT EP 23 oraz SULFOCAL 302. Z racji tego, iż idea nowego sposobu rektyfikacji budynków poddanych wpływom górnicyzmu ma pozwolić na minimalizację kosztów z tym procesem związanych, dokonano takiego doboru materiałów na projektowaną warstwę poślizgową, które są powszechnie dostępne w sprzedaży detalicznej.

#### **5.2.1. Smar LOTOS LT4 S-2**

Zgodnie z kartą charakterystyki smar samochodowy LOTOS LT4 S-2 (rys. 5-1) przeznaczony jest do smarowania łożysk tocznych, ślizgowych oraz innych średnio obciążonych węzłów tarcia pracujących w zakresie temperatur od  $-30^{\circ}\text{C}$  do  $+120^{\circ}\text{C}$ . Natomiast jego zastosowania odradzane nie określono (LOTOS LO 205). Podstawowe właściwości fizyczne i chemiczne smaru LOTOS LT4 S-2 przedstawiono w tabelicy 5-1.



Rys. 5-1. Smar samochodowy LOTOS LT4 S-2

Tablica 5-1. Podstawowe właściwości fizyczne i chemiczne smaru LOTOS LT4 S-2

Stan skupienia	substancja stała
Kolor	barwa zielona
Zapach	charakterystyczny dla smarów
Próg zapachu	nieokreślony
pH	brak danych
Temperatura topnienia/krzepnięcia	brak danych dla mieszaniny
Temperatura wrzenia lub początkowa temperatura wrzenia i zakres temperatur wrzenia [°C]	brak danych dla mieszaniny
Temperatura zapłonu [°C]	>210 (tygiel otwarty)
Szybkość parowania	brak danych
Palność materiałów	nie dotyczy
Dolna i górna granica wybuchowości	brak danych
Prężność par [hPa]	brak danych dla mieszaniny
Względna gęstość pary	brak danych dla mieszaniny
Gęstość lub gęstość względna w 15°C [g/cm <sup>3</sup> ]	nie normalizuje się (podana w atestach)
Rozpuszczalność	rozpuszcza się w większości rozpuszczalników organicznych; nie rozpuszcza się w wodzie
Współczynnik podziału n-oktanol/woda (log KO/W)	nieokreślony
Temperatura samozapłonu	brak danych
Temperatura rozkładu	brak danych
Lepkość kinematyczna w 40°C [mm <sup>2</sup> /s]	nie dotyczy
Właściwości wybuchowe	nie posiada właściwości wybuchowych
Właściwości utleniające	na podstawie struktury chemicznej substancji (głównego składnika) nie wchodzi ona w reakcje egzotermiczne z materiałami łatwopalnymi

Charakterystyka cząsteczek	nie posiada właściwości wybuchowych, nie ma grup chemicznych związanych z właściwościami wybuchowymi, nie posiada właściwości utleniających
----------------------------	---

### 5.2.2. Smar LOTOS GRAFITOWANY

Zgodnie z kartą charakterystyki smar GRAFITOWANY LOTOS (rys. 5-2) przeznaczony jest do smarowania piór resorów, gwintów śrub, łańcuchów, otwartych przekładni zębatych, przekładni ślimakowych oraz innych silnie obciążonych węzłów tarcia. Może być także stosowany jako smar montażowy (LOTOS LO 204). Natomiast nie nadaje się on do smarowania łożysk i tocznych i mechanizmów precyzyjnych. Ponadto, smar grafitowy posiada zakres temperatur roboczych od -20°C do +60°C (LOTOS LO 204). Podstawowe właściwości fizyczne i chemiczne smaru GRAFITOWANEGO LOTOS przedstawiono w tablicy 5-2.



Rys. 5-2. Smar LOTOS GRAFITOWANY

Tablica 5-2. Podstawowe właściwości fizyczne i chemiczne smaru GRAFITOWANEGO LOTOS

Wygląd	substancja stała barwy czarnej
Zapach	charakterystyczny dla smarów
Próg zapachu	w temperaturze pokojowej słabo wyczuwalny
pH	brak danych
Temperatura topnienia/krzepnięcia	brak danych
Początkowa temperatura wrzenia i zakres temperatur wrzenia [°C]	nie dotyczy
Temperatura zapłonu [°C]	>210 (tygiel otwarty)
Szybkość parowania	brak danych
Palność (ciała stałego, gazu)	nie dotyczy
Górna/dolna granica palności lub górna/dolna granica wybuchowości	nie dotyczy
Prężność par [hPa]	brak danych

Gęstość par	brak danych
Gęstość względna w 15°C [g/cm <sup>3</sup> ]	nie normalizuje się
Rozpuszczalność	rozpuszcza się w większości rozpuszczalników organicznych; nie rozpuszcza się w wodzie
Współczynnik podziału n-oktanol/woda (log KO/W)	nieokreślony
Temperatura samozapłonu	brak danych
Temperatura rozkładu	brak danych
Lepkość kinematyczna w 100°C [cSt]	nie dotyczy
Właściwości wybuchowe	nie posiada właściwości wybuchowych, nie ma grup chemicznych związanych z właściwościami wybuchowymi
Właściwości utleniające	nie posiada właściwości utleniających, nie wchodzi w reakcje egzotermiczne z materiałami łatwopalnymi

### 5.2.3. Smar LOTOS MONILIT EP 23

Zgodnie z kartą charakterystyki smar LOTOS MONILIT EP 23 (rys. 5-3) przeznaczony jest do smarowania wysoko obciążonych węzłów tarcia urządzeń stosowanych w górnictwie, hutnictwie, transporcie i przemyśle budowlanym. Dodatkowo może być on stosowany do łożysk oraz połączeń przegubowych pracujących w warunkach wysokiej wibracji i przy zapyleniu, w zakresie temperatur od -30°C do +140°C. Natomiast jego zastosowania odradzanego nie określono (LOTOS LO 221-0). Podstawowe właściwości fizyczne i chemiczne smaru LOTOS MONILIT EP 23 przedstawiono w tabelicy 5-3.



Rys. 5-3. Smar LOTOS MONILIT EP 23

Tablica 5-3. Podstawowe właściwości fizyczne i chemiczne smaru LOTOS MONILIT EP 23

Wygląd	substancja stała barwy ciemnoszarej
Zapach	charakterystyczny dla smarów
Próg zapachu	brak danych

pH	brak danych
Temperatura topnienia/krzepnięcia	nie dotyczy
Początkowa temperatura wrzenia i zakres temperatur wrzenia [°C]	nie dotyczy
Temperatura zapłonu [°C]	>210 (tygiel otwarty)
Szybkość parowania	brak danych
Palność (ciała stałego, gazu)	nie dotyczy
Górna/dolna granica palności lub górna/dolna granica wybuchowości	nie dotyczy
Prężność par [hPa]	brak danych
Gęstość par	brak danych
Gęstość względna w 15°C [g/cm <sup>3</sup> ]	nie normalizuje się (podana w atestach)
Rozpuszczalność	rozpuszcza się w większości rozpuszczalników organicznych; nie rozpuszcza się w wodzie
Współczynnik podziału n-oktanol/woda (log KO/W)	nieokreślony
Temperatura samozapłonu	brak danych
Temperatura rozkładu	brak danych
Lepkość kinematyczna w 40°C [mm <sup>2</sup> /s]	nie dotyczy
Właściwości wybuchowe	nie posiada właściwości wybuchowych, nie ma grup chemicznych związanych z właściwościami wybuchowymi
Właściwości utleniające	nie posiada właściwości utleniających, nie wchodzi w reakcje egzotermiczne z materiałami łatwopalnymi

#### 5.2.4. Smar LOTOS SULFOCAL 302

Zgodnie z kartą charakterystyki smar LOTOS SULFOCAL 302 (rys. 5-4) przeznaczony jest do smarowania silnie obciążonych oraz narażonych na wmywanie wodą łożysk oraz innych węzłów tarcia, pracujących w zakresie temperatur od -30°C do +180°C (okresowo do +200°C). Natomiast jego zastosowania odradzane nie określono (LOTOS LO/15/18). Podstawowe właściwości fizyczne i chemiczne smaru LOTOS SULFOCAL 302 przedstawiono w tablicy 5-4.



Rys. 5-4. Smar LOTOS SULFOCAL 302

Tablica 5-4. Podstawowe właściwości fizyczne i chemiczne smaru LOTOS SULFOCAL 302

Wygląd	substancja stała barwy ciemnoszarej
Zapach	charakterystyczny dla smarów
Próg zapachu	brak danych
pH	brak danych
Temperatura topnienia/krzepnięcia	nie dotyczy
Początkowa temperatura wrzenia i zakres temperatur wrzenia [°C]	nie dotyczy
Temperatura zapłonu [°C]	>250 (tygiel otwarty)
Szybkość parowania	brak danych
Palność (ciała stałego, gazu)	nie dotyczy
Górna/dolna granica palności lub górna/dolna granica wybuchowości	nie dotyczy
Prężność par [hPa]	brak danych
Gęstość par	brak danych
Gęstość względna w 15°C [g/cm <sup>3</sup> ]	nie normalizuje się (podana w atestach)
Rozpuszczalność	rozpuszcza się w większości rozpuszczalników organicznych; nie rozpuszcza się w wodzie
Współczynnik podziału n-oktanol/woda (log KO/W)	nieokreślony
Temperatura samozapłonu	brak danych
Temperatura rozkładu	brak danych
Lepkość kinematyczna w 40°C [mm <sup>2</sup> /s]	nie dotyczy
Właściwości wybuchowe	nie posiada właściwości wybuchowych, nie ma grup chemicznych związanych z właściwościami wybuchowymi
Właściwości utleniające	nie posiada właściwości utleniających, nie wchodzi w reakcje egzotermiczne z materiałami łatwopalnymi

### 5.2.5. Folia izolacyjna FOLIAREX IZ 300-N

Zgodnie z kartą techniczną folia izolacyjna FOLIAREX IZ 300-N to wyrób przeznaczony do wykonywania:

- warstw przeciwilgociowych pod podłogi, posadzki i wylewki,
- warstw poślizgowych na nawierzchni tarasów,
- warstw ochronnych zabezpieczających przed zawilgoceniem izolacji termicznej

i akustycznej,

- prowizorycznych zabezpieczeń połączeń dachowych,
- osłon elewacyjnych oraz stolarki okiennej w czasie robót wykończeniowych oraz
- czasowych przenośnych osłon stanowisk pracy i materiałów budowlanych

(FOLIAREX). Podstawowe właściwości użytkowe folii izolacyjnej FOLIAREX IZ 300-N przedstawiono w tablicy 5-5.

Tablica 5-5. Podstawowe właściwości użytkowe folii izolacyjnej FOLIAREX IZ 300-N

Zastosowanie		Typ tworzywa sztucznego
Izolacja przeciwwilgociowa		LDPE
Właściwość		Wartość deklarowana
Wymiary	grubość [mm]	0,30 (± 40%)
	szerokość [m]	(4-12)-0/+1%
	długość nawoju [m]	(20-50)-0/+2%
Gramatura (masa powierzchniowa) [g/m <sup>2</sup> ]		278± 40%
Reakcja na ogień		Klasa F
Wodoszczelność (2 kPa)		spełnienie wymagań
Wytrzymałość na rozdzieranie	wzdłuż [N]	≥80
	poprzek [N]	≥80
Wytrzymałość na rozciąganie	wzdłuż [N/50 mm]	≥70
	poprzek [N/50 mm]	≥60
Wydłużenie przy zerwaniu	wzdłuż [%]	≥240
	poprzek [%]	≥240
Opór dyfuzyjny pary wodnej [m <sup>2</sup> sPa/kg]		4,0*10 <sup>11</sup> ± 20%
Odporność chemiczna		nie określono
Wytrzymałość złącza na ścinanie		nie określono
Odporność na uderzenie [mm]		nie określono
Zakres temperatur stosowania [°C]		-30 ÷ 80
Substancje niebezpieczne		nie określono
Trwałość po sztucznym starzeniu		nie określono
Trwałość po działaniu alkaliów		nie określono
Odporność na zginanie w niskiej temperaturze [°C]		-30

### 5.3. Opis badań laboratoryjnych smarów

Badania laboratoryjne smarów wykonano w laboratorium Wydziału Chemicznego Politechniki Śląskiej, które dysponuje wymaganym sprzętem laboratoryjnym i odczynnikami chemicznymi. Przeprowadzono następujące oznaczenia:

- oznaczenie liczby kwasowej,
- oznaczenie liczby zasadowej,
- oznaczanie zawartości stałych składników oraz
- badania z skaningowym mikroskopem elektronowym.

#### 5.3.1. Oznaczenie liczby kwasowej

Liczba kwasowa wyraża ilość miligramów wodorotlenku potasu (KOH), niezbędnego do zobojętnienia wolnych kwasów obecnych w jednym gramie próbki. Zatem liczba kwasowa jest miarą liczby grup kwasowych (karboksylowych) związku chemicznego (Marczenko i Minczewski 2001).

Celem oznaczenia było określenie liczby kwasowej smarów, mianowicie LOTOS: LT4 S-2, GRAFITOWANY oraz MONILIT EP 23 metodą miareczkową.

Metoda oznaczenia polegała na miareczkowaniu badanej próbki smaru mianowanym roztworem wodorotlenku potasu (KOH) w alkoholu etylowym wobec fenoloftaleiny, jako wskaźnika, do wyraźnie malinowego zabarwienia. Pierwsze trwałe zabarwienie się roztworu na kolor malinowy (utrzymujące się około 15 s) wskazało punkt końcowy miareczkowania.

Oznaczenie opierało się na:

- wprowadzeniu 25 cm<sup>3</sup> mieszaniny ksylenu z 2-metylo-2,4-pentadiolem w stosunku 2:1 do kolby stożkowej o pojemności 300 cm<sup>3</sup>,
- dodaniu 0,5 g próbki smaru,
- podgrzewaniu pod chłodnicą zwrotną aż do uzyskania klarownego roztworu,
- dodaniu do próbki smaru czterech kropel fenoloftaleiny,
- miareczkowaniu roztworu próbki smaru 0,053 molowym roztworem wodorotlenku potasu (KOH) do różowego zabarwienia,
- odczytaniu ilości zużytego wodorotlenku potasu (KOH).

Liczbę kwasową smarów obliczono ze wzoru (5-1) (Marczenko i Minczewski 2001):

$$LK = \frac{C_{KOH} \cdot V_{KOH} \cdot 56,105}{m}, \frac{\text{mg}_{KOH}}{\text{g}} \quad (5-1)$$

gdzie:

$LK$  – liczba kwasowa, mg<sub>KOH</sub>/g,

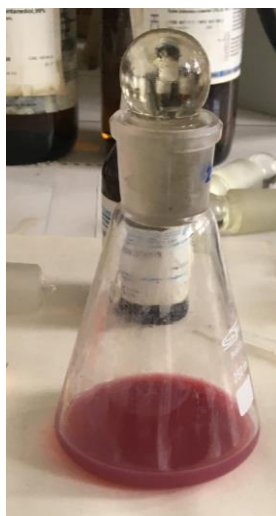
$C_{KOH}$  – stężenie roztworu wodorotlenku potasu (KOH) (0,053), mol/dm<sup>3</sup>,

$V_{KOH}$  – objętość roztworu wodorotlenku potasu (KOH), która zesza z biurety, cm<sup>3</sup>,

56,105 – masa molowa wodorotlenku potasu (KOH), g/mol

$m$  – masa próbki.

W przypadku smaru SULFOCAL 302 stwierdzono, że ma on charakter zasadowy (roztwór barwił się na różowy natychmiast po dodaniu kilku kropel fenoloftaleiny (rys. 5-5). Dla tego smaru wykonano oznaczenie liczby zasadowej.



Rys. 5-5. Próbką smaru LOTOS SULFOCAL 203 po dodaniu fenoloftaleiny



Natomiast po dodaniu do pozostałych trzech smarów LOTOS: LT4 S-2, GRAFITOWANY oraz MONILIT EP 23 czterech kropeł fenoloftaleiny ich roztwory pozostały bezbarwne, zatem zmiareczkowano próbki 0,053 molowym wodorotlenkiem potasu (KOH) do uzyskania różowego zabarwienia.

Wyniki przedstawiono w tablicy 5-6.

Tablica 5-6. Liczba kwasowa smaru

Rodzaj smaru LOTOS	Liczba kwasowa <i>LK</i> , mg <sub>KOH</sub> /g
LT4 S-2	0,29
GRAFITOWANY	0,73
MONILIT EP 23	0,68
SULFOCAL 302	–

W wyniku oznaczenia stwierdzono, że stosowane w badaniach smary mają niskie liczby kwasowe, odpowiednio równe: LT4 S-2 ( $LK = 0,29$  mg<sub>KOH</sub>/g), GRAFITOWANY ( $LK = 0,73$  mg<sub>KOH</sub>/g) oraz SULFOCAL 302 ( $LK = 0,68$  mg<sub>KOH</sub>/g).

Wysokie liczby kwasowe smarów lub olejów często świadczą o postępie procesów degradacji oraz starzenia, co jednak nie miało miejsca w tym przypadku (Baczewski i Szczawiński 2016, Kałdoński i Król 2010, Smoliło 2020).

### 5.3.2. Oznaczenie liczby zasadowej

Celem oznaczenia było określenie liczby zasadowej smaru LOTOS SULFOCAL 302 metodą miareczkową. Oznaczenie wykonano tylko i wyłącznie dla tego rodzaju smaru, ponieważ jako jedyny wykazywał charakter zasadowy (podczas oznaczenia liczby kwasowej).

Liczba zasadowa to jeden z ważniejszych wskaźników charakteryzujących smary i oleje smarowe, obok liczby kwasowej, wskazujący na zawartość dodatków alkalicznych. Celem tych dodatków jest neutralizacja kwaśnych produktów powstających w wyniku spalania paliw silnikowych zawierających związki siarki. Wyrażana jest w mg KOH/g.

Metoda oznaczenia polegała na miareczkowaniu badanej próbki smaru LOTOS SULFOCAL 302 mianowanym roztworem kwasu solnego (HCl) wobec fenoloftaleiny do zaniku różowego zabarwienia.

Oznaczenie opierało się na:

- wprowadzeniu 25 cm<sup>3</sup> mieszaniny ksyleny z 2-metylo-2,4-pentadiolem w stosunku 2:1 do kolby stożkowej o pojemności 300 cm<sup>3</sup>,
- dodaniu 1 g próbki smaru,
- podgrzewaniu pod chłodnicą zwrotną aż do uzyskania klarownego roztworu,
- dodaniu do próbki smaru czterech kropeł fenoloftaleiny,
- miareczkowaniu roztworu próbki smaru 0,1 molowym roztworem kwasu solnego (HCl) aż do odbarwienia,
- odczytaniu ilości zużytego kwasu solnego (HCl).

Liczbę zasadową obliczono ze wzoru (5-2) (Marczenko i Minczewski 2001):

$$LZ = \frac{C_{HCl} \cdot V_{HCl} \cdot 56,105}{m}, \frac{\text{mg}_{\text{KOH}}}{\text{g}} \quad (5-2)$$

gdzie:

$LZ$  – liczba zasadowa,  $\text{mg}_{\text{KOH}}/\text{g}$ ,

$C_{HCl}$  – stężenie molowe kwasu solnego (HCl) (0,1),  $\text{mol}/\text{dm}^3$ ,

$V_{HCl}$  – objętość kwasu solnego (HCl), która zeszła z biurety,  $\text{cm}^3$ ,

56,105 – masa molowa wodorotlenku potasu (KOH),  $\text{g}/\text{mol}$

$m$  – masa próbki.

Wyniki przedstawiono w tabelicy 5-7.

Tablica 5-7. Liczba zasadowa smaru

Rodzaj smaru LOTOS	Liczba zasadowa $LZ$ , $\text{mg}_{\text{KOH}}/\text{g}$
SULFOCAL 302	13,18

Po wykonaniu obliczeń, liczba zasadowa smaru LOTOS SULFOCAL 302 wykazała wysoką wartość równą 13,18  $\text{mg}_{\text{KOH}}/\text{g}$ .

Wysokie liczby zasadowe smarów lub olejów świadczą o ich dużej wartości użytkowej oraz zapewniają rezerwę alkaliczną. Zatem im wyższe są jej wartości, tym odporniejszy na zakwaszenie jest smar (Budzik i Jakóbiec 2007, Kałdoński i Król 2010, Krasodomski 2015).

### 5.3.3. Oznaczenie zawartości składników stałych w smarze

Celem oznaczenia było określenie zawartości składników stałych w masie dwóch smarów LOTOS: GRAFITOWANY oraz MONILIT EP 23. Pierwszy zawierał grafit, drugi natomiast disiarczek molibdenu. W obu przypadkach producent nie podaje zawartości tych składników w kartach charakterystyki.

Oznaczenie polegało na rozpuszczeniu 3 g smaru w wybranym rozpuszczalniku organicznym, którym po serii prób wstępnych okazał się być toluen. Procedura analizy wyglądała następująco:

- dodaniu do próbki smaru około 30  $\text{cm}^3$  rozpuszczalnika organicznego (toluenu),
- ogrzewaniu i mieszaniu całości w temperaturze 60°C przez okres 20 min.,
- chłodzeniu mieszaniny w temperaturze pokojowej przez około 5 min.,
- odwirowaniu próbki w wirówce stołowej Centrifuge 5804 EPPENDORF (7000 rpm, 4 min.),
- zlanie roztworu z nad osadu.

Powyższe czynności powtórzono trzykrotnie, a na koniec przemyto raz jeszcze etanolem w ilości 20  $\text{cm}^3$  i suszono w suszarce próżniowej w temperaturze 60°C przez około 24 h do stałej masy, tzn. do momentu, gdy dwa kolejne pomiary nie różniły się od siebie więcej niż 0,0005 g. (rys. 5-6, rys. 5-7).



Rys. 5-6. Pozostałość stała z próbki smaru LOTOS GRAFITOWANY po wymyciu toluenem



Rys. 5-7. Pozostałość stała z próbki smaru LOTOS EP 23 po wymyciu toluenem

Zawartość składników stałych w smarze obliczono ze wzoru (5-3) (Biegańska 2008):

$$X = \frac{m_2}{m_1} \cdot 100\% \quad (5-3)$$

gdzie:

$X$  – zawartość stałej substancji w smarze,

$m_1$  – masa próbki smaru wzięta do oznaczenia, g,

$m_2$  – masa próbki smaru po wymyciu, g.

Wyniki przedstawiono w tablicy 5-8.

Tablica 5-8. Zawartość składników stałych i rozpuszczalnych w smarze

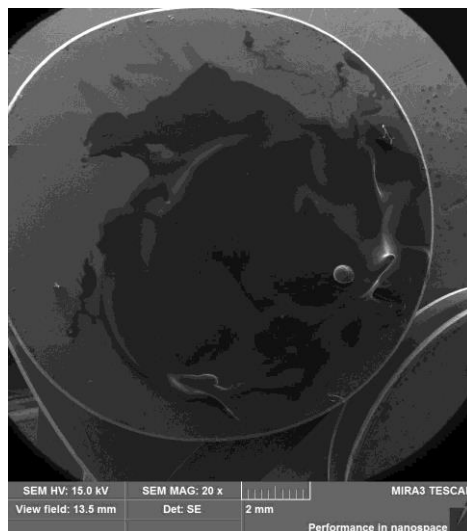
Rodzaj smaru LOTOS	Zawartość składników stałych $X$ , %	Zawartość substancji rozpuszczalnych w toluenie $X_1$ , %
GRAFITOWANY	84,24	15,76
MONILIT EP 23	82,25	17,75

Oznacza to, iż badane smary LOTOS GRAFITOWANY oraz MONILIT EP 23 w ponad 80% składają się ze składników stałych, smar LOTOS GRAFITOWANY w 84,24%, natomiast LOTOS MONILIT EP 23 w 82,25%. Dodatkowo, analizowane smary zawierają ponad 15% substancji rozpuszczalnych w toluenie, smar LOTOS GRAFITOWANY zawiera 15,76%, natomiast LOTOS MONILIT EP 23 zawiera 17,75%.

Obecność dodatków decyduje o właściwościach użytkowych smarów. W ciężkich warunkach pracy, stałe dodatki smarne zwiększają skuteczność działania smaru dzięki odporności na działanie czynników chemicznych. Najczęściej stosowanymi dodatkami są grafit, który stopniowo przywiera do powierzchni pod wpływem tarcia, a także disiarczki molibdenu, który szybko tworzy warstwę ochronną na powierzchniach trących (Krawiec 2011, Młynarczyk 2010, TOTAL).

#### 5.3.4. Badania pod skaningowym mikroskopem elektronowym

Dzięki uprzejmości Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytutowi Ceramiki i Materiałów Budowlanych Oddziałowi Materiałów Ogniotrwałych w Gliwicach, próbka jednego wybranego smaru LOTOS, a mianowicie LOTOS SULFOCAL 302 została zbadana pod skaningowym mikroskopem elektronowym (SEM) (rys. 5-8) i poddana analizie składu chemicznego za pomocą rentgenowskiej spektroskopii energodispersyjnej (EDS).



Rys. 5-8. Próbkę smaru LOTOS SULFOCAL 302 widziana pod skaningowym mikroskopem elektronowym (powiększenie x20)

Jednakże ze względu na charakter próbki smaru i problem z jej obrazowaniem nie wykonywano dalszych badań w tym kierunku. Ze względu na znaczną ilość substancji organicznych na rys. 5-8 widać jedynie czarno szarą plamę.

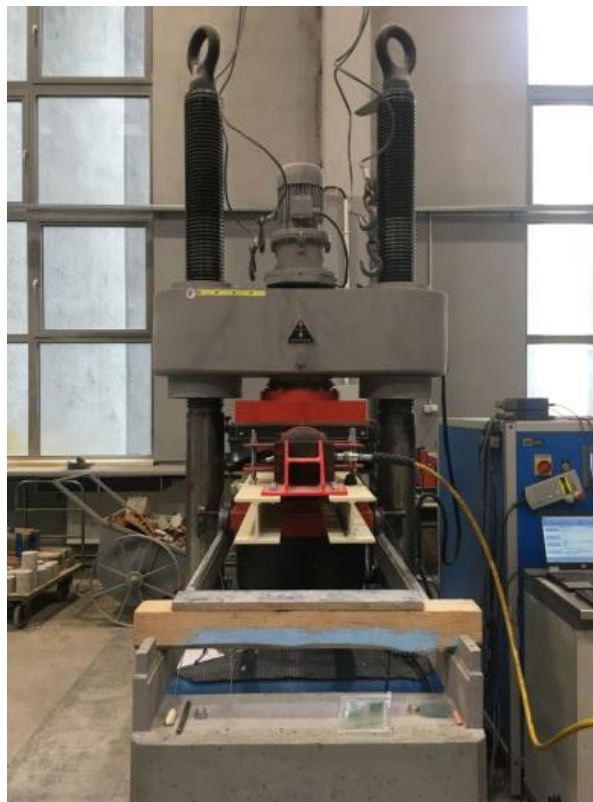
#### **5.4. Opis badań laboratoryjnych warstwy poślizgowej**

Laboratorium Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej dysponuje podstawowymi urządzeniami do przeprowadzenia doświadczeń. Należą do nich maszyny wytrzymałościowe (rys. 5-10), siłowniki hydrauliczne (rys. 5-9) oraz zaawansowane urządzenia rejestrujące przemieszczenia w elementach (rys. 5-14). W ramach badań wykonano model badawczy oraz drobne elementy mocowań elementów badawczych.



Rys. 5-9. Elektryczna pompa hydrauliczna z siłownikiem

Dotychczasowy zakres badań obejmował ustalenie optymalnych parametrów warstwy poślizgowej, na co składały się badania laboratoryjne współczynników tarcia oraz wyznaczenie wielkości tarcia spoczynkowego dla każdego różnego rozwiązania materiałowego. Cztery różne rodzaje smarów LOTOS (LT4 S-2, GRAFITOWANY, MONILIT EP 23 oraz SULFOCAL 302) zostało przetestowanych w specjalnie przygotowanej maszynie wytrzymałościowej (rys. 5-10).



Rys. 5-10. Maszyna wytrzymałościowa ze stanowiskiem badawczym

Badania laboratoryjne współczynników tarcia polegały po pierwsze na wykonaniu trzech betonowych płyt o wymiarach 500 x 500 x 50 mm (1). Następnie tak przygotowane płyty ułożono jedna na drugiej. Pomiedzy płytą środkową i dolną oraz środkową i górną, umieszczono warstwę poślizgową, czyli dwie warstwy folii budowlanej PE o grubości 0,3 mm każda (2), pomiędzy którymi znajdowała się warstwa badanego smaru (rys. 5-11).



Rys. 5-11. Betonowe płyty (1) z warstwami folii PE (2) i smaru

W celu przeprowadzenia badań zostało zaprojektowane specjalne urządzenie badawcze – stanowisko laboratoryjne, które wykonała firma Zakład Blacharsko – Ślusarski Usługowo – Wytwórczy Jan Rzepka z Łazisk Górnych. Składało się ono z:

- podstawy: dwóch dwuteowników szerokostopowych HE 120 B, a także przyspawanej do nich formy wykonanej z blachy o grubości 5 mm i wymiarach 500 mm x 500 mm x 50 mm, w której została zabetonowana dolna płyta oraz elementów usztywniających również wykonanych z blach o grubości 5 mm,

- opory 1: przykręconego do podstawy śrubami, specjalnego kształtownika wraz z elementami usztywniającymi, wytworzonego z blach o grubości 5 mm, blokującego przesuwanie się w poziomie betonowej płyty górnej,

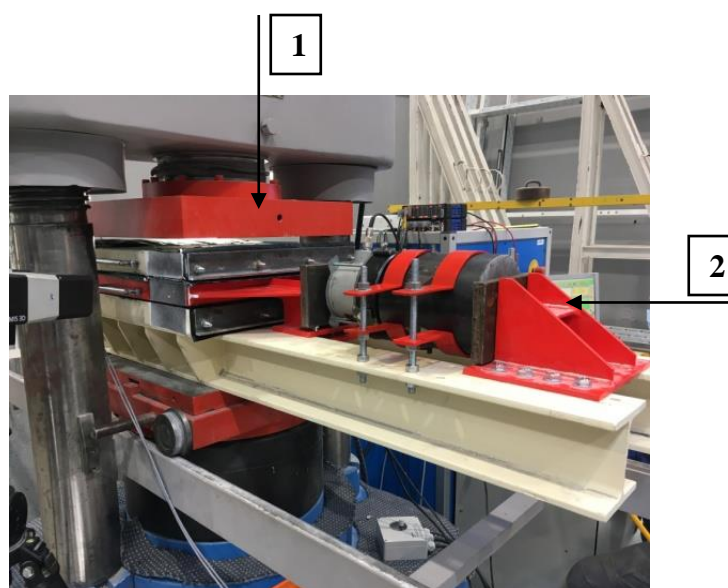
- tłoka: celowo ukształtowanego i odpowiednio usztywnionego elementu z blach o grubości 5 mm, posiadającego swobodę przesuwu w poziomie, przenoszącego siłę horyzontalną z siłownika na środkową, przesuwającą się względem dwóch skrajnych, betonową płytę,

- opory 2: przykręconego do podstawy śrubami, specjalnego usztywnionego kształtownika wykonanego z blach o grubości 5 mm, umożliwiającego prawidłowe oraz stabilne usytuowanie siłownika wywierającego siłę poziomą i powodującego przesuw środkowej betonowej płyty,

- trzech betonowych płyt o wymiarach 500 x 500 x 50 mm wraz z warstwą poślizgową, a także

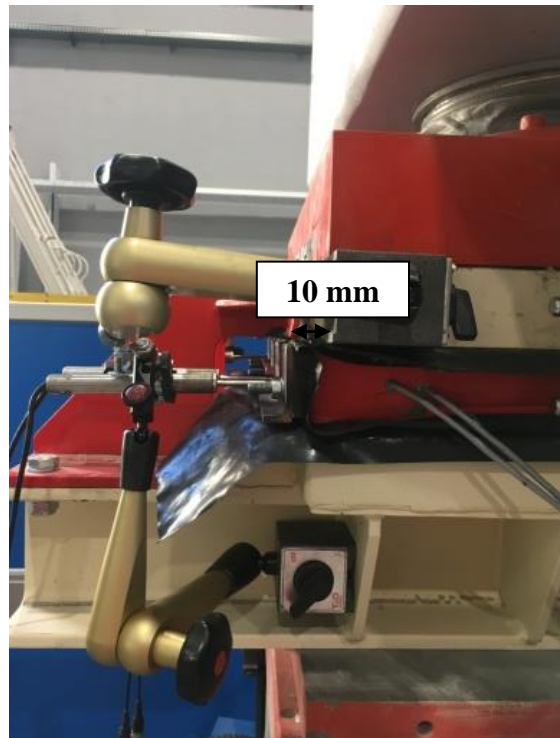
- siłownika ENERPAC 20t.

Tak przygotowane betonowe płyty poddano obciążeniu pionowemu z maszyny wytrzymałościowej (1) oraz środkową betonową płytę – obciążeniu poziomemu z prasy hydraulicznej (2) (rys. 5-12). Wartości przyłożonych sił pionowych wynosiły: 25 kN, 37,5 kN, 50 kN, 62,5 kN oraz 75 kN. Odpowiadają one stosownie naprężeniom wywieranym na podłoże przez średniej wielkości budynek mieszkalny jednorodzinny 100 kPa (25 kN) i budynek mieszkalny wielorodzinny 300 kPa (75 kN).



Rys. 5-12. Betonowe płyty poddane obciążeniu pionowemu (1) i poziomemu (2)

Przesunięcie poziome środkowej płyty betonowej wynosiło każdorazowo 10 mm (rys. 5-13).



Rys. 5-13. Wysunięta środkowa betonowa płyta po przeprowadzeniu badania

Analizę przemieszczeń środkowej betonowej płyty wykonano liniowymi czujnikami przemieszczeń (rys. 5-14) z dokładnością wynoszącą  $\pm 0,05\%$ .



Rys. 5-14. Rozmieszczenie liniowych czujników przemieszczeń



Dla odczytanej z aparatury największej wartości siły poziomej oraz odpowiadającej jej wartości siły pionowej obliczono stosunek wartości tych sił, będący jednocześnie współczynnikiem tarcia spoczynkowego. Dodatkowo, warunki pracy smaru zależą od temperatury, która w przypadku przeprowadzonych badań wynosiła 5°C, 10°C, 20°C, 30°C, 40°C oraz 50°C. Powodem wyboru takich temperatur był zamiar sprawdzenia jak będą kształtowały się wartości współczynników tarcia w przypadku temperatur zwykle występujących w poziomie posadowienia obiektu budowlanego, a także w sytuacji podgrzania warstw poślizgowych do dużo wyższych temperatur.

Temperatury równe 20°C, 30°C, 40°C oraz 50°C uzyskano poprzez zainstalowanie w środkowej betonowej płycie o wymiarach 500 x 500 x 50 mm przewodu grzejnego TV SHTV 30 W/m firmy THERMOVAL (rys. 5-15).



Rys. 5-15. Szalunek środkowej betonowej płyty z przewodem grzejnym TV SHTV 30 W/m THERMOVAL

Został on wykorzystany, ponieważ jest przewodem zasilanym jednostronnie, przeznaczonym do instalacji w zewnętrznych systemach przeciwołodziennych budynków oraz części maszyn i urządzeń. Przewód składał się z dwużyłowego kabla grzejnego, ekranowanego oplotem z ocynowanego drutu miedzianego, izolacji wewnętrznej XLPE, a także izolacji zewnętrznej PVC odpornej na UV (THERMOVAL). Zewnętrzna powłoka posiadała dodatkowe zabezpieczenia przed zniszczeniem na połączeniach elektrycznych. Dodatkowo przewód przeznaczony jest do instalacji w takich miejscach jak: dachy, rynny, rury spustowe, rurociągi, rury transmisyjne, podjazdy, chodniki, schody, kanały odpływowe, ochrona elementów konstrukcyjnych maszyn i urządzeń oraz ochrona przeciwzamrożeniowa konstrukcji betonowych (THERMOVAL). Przystosowany jest on także do montażu w podkładach sypkich, pól sypkich, betonowych, w klejach oraz montażu

napowierzchniowego. Ponadto, przewód zasilający posiada również żyłę uziemiającą (THERMOVAL).

Żądana temperatura ustawiana była za pomocą regulatora manualnego UTR 60 firmy THERMOVAL (rys. 5-16), który jest elektronicznym, uniwersalnym regulatorem z nastawą manualną za pomocą pokrętki, przeznaczonym do kontroli systemów grzewczych, obsługującym zakres temperatur od 0 do +60°C (THERMOVAL).



Rys. 5-16. Regulator manualny UTR 60 THERMOVAL

Kontrola pracy systemu odbywała się na podstawie odczytów parametrów temperatury z pięciu różnych typów czujników. Regulator manualny UTR 60 może być wykorzystywany do kontroli ogrzewania podłogowego, układów grzewczych podtrzymania ruchu oraz systemów niskotemperaturowych. Regulator umieszczony jest w hermetycznej puszcze posiadającej klasę ochrony IP 67, dlatego może być on montowany w pomieszczeniach o dużej wilgotności, zapyleniu lub innych niesprzyjających warunkach pracy (THERMOVAL).

Natomiast temperatury wynoszące 5°C oraz 10°C otrzymano poprzez zamontowanie w środkowej betonowej płycie o wymiarach 500 x 500 x 50 mm parownika w postaci płyty chłodzącej (rys. 5-17).



Rys. 5-17. Szalunek środkowej betonowej płyty z płytą chłodzącą

W skład specjalnie skonstruowanego stanowiska badawczego, które wykonała firma Chłodnictwo i Klimatyzacja Rogulski z Mikołowa wchodziły jeszcze: sprężarka wraz z elektrycznym silnikiem napędowym, skraplacz, zawór rozprężny, termostat (wartość temperatury wyświetlana była na panelu wskaźnika) oraz czynnik chłodniczy R134a (rys. 5-18).



Rys. 5-18. Elementy chłodzące do stanowiska badawczego

Dla każdego rodzaju smaru, temperatury oraz wartości siły pionowej przeprowadzono pięć pomiarów. Ze względu na to, iż każda pierwsza próba odbiegała znacznie od pozostałych, przypuszczalnie doszło w tym miejscu do wypaczenia eksperymentu i wyniki takie odrzucono podczas analizy statystycznej.

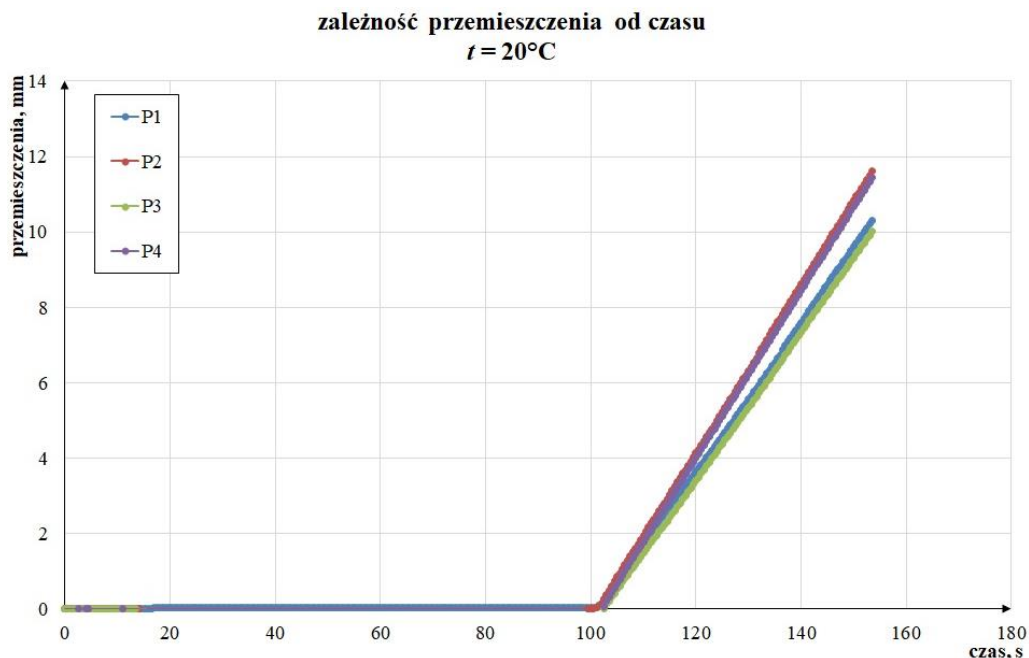


## 6. WYNIKI BADAŃ LABORATORYJNYCH WARSTWY POŚLIZGOWEJ

Uzyskane dane dla każdego wytypowanego rodzaju smaru Grupy LOTOS S. A. (LT4 S-2, GRAFITOWANY, MONILIT EP 23 oraz SULFOCAL 302), temperatury (5°C, 10°C, 20°C, 30°C, 40°C i 50°C) oraz wartości przyłożonych sił pionowych (odpowiadających naprężeniom równym 100 kPa, 150 kPa, 200 kPa, 250 kPa i 300 kPa), pozwoliły na przeprowadzenie szczegółowych obserwacji wpływu zastosowanego środka smarnego, temperatury oraz naprężeń na wartości współczynnika tarcia statycznego.

Na przykładzie jednego wybranego smaru SULFOCAL 302 Grupy LOTOS S. A., który w temperaturze pokojowej wynoszącej 20°C, dla każdej wielkości naprężeń, wykazywał najmniejsze wartości współczynników tarcia, przedstawiono uzyskane zależności:

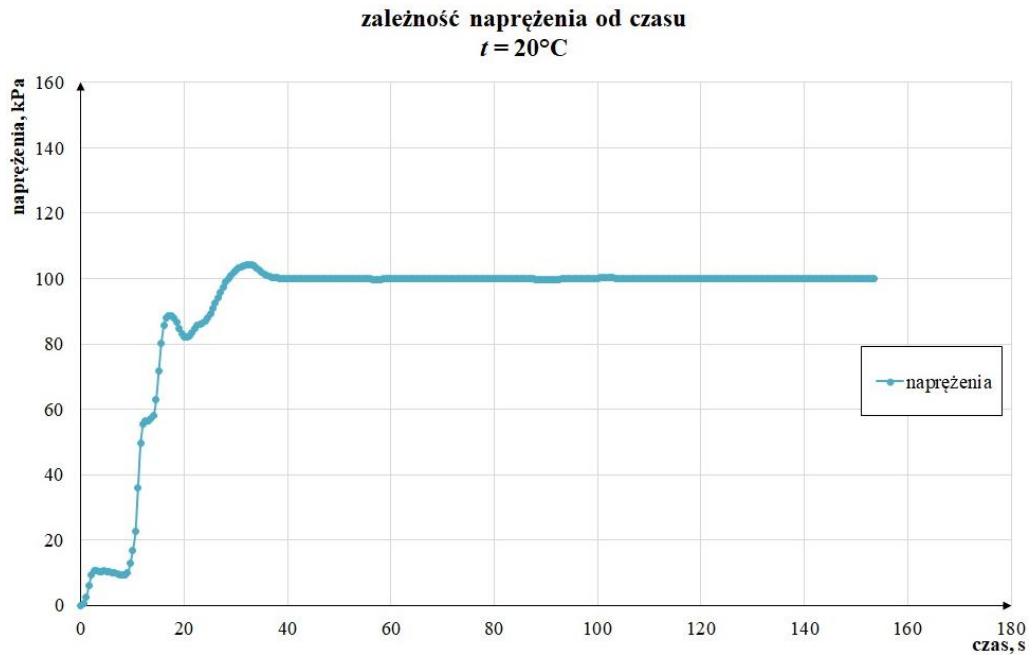
- przemieszczenia poziomej środkowej płyty betonowej od czasu (rys. 6-1),
- naprężenia pionowego odpowiadającego przyłożonej sile pionowej od czasu (rys. 6-2) oraz
- przyłożonej siły pionowej, a także poziomej od czasu (rys. 6-3).



Rys. 6-1. Wykres zależności przemieszczenia od czasu dla temperatury  $t = 20^{\circ}\text{C}$

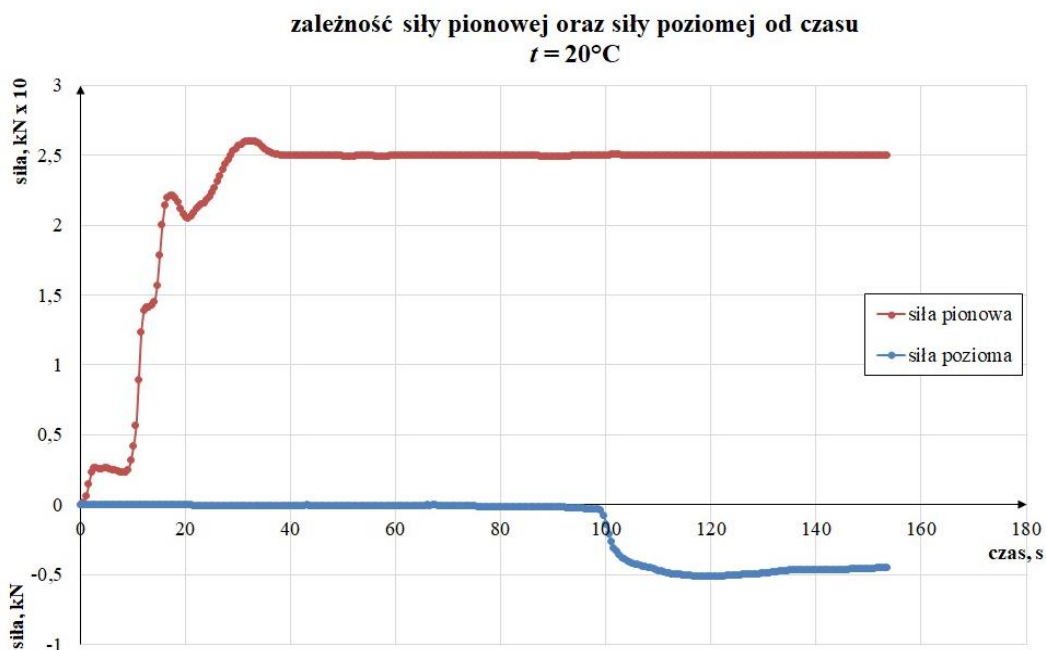
Jak wynika z powyższej zależności, przemieszczenia poziome środkowej betonowej płyty, mierzone za pomocą czterech liniowych czujników przemieszczeń (P1, P2, P3 i P4),

wzrastały liniowo w funkcji czasu, aż do osiągnięcia założonej wartości równej 10 mm. Po zarejestrowaniu tej wielkości przemieszczenia przez każdy z czterech czujników, kończono próbę badawczą.



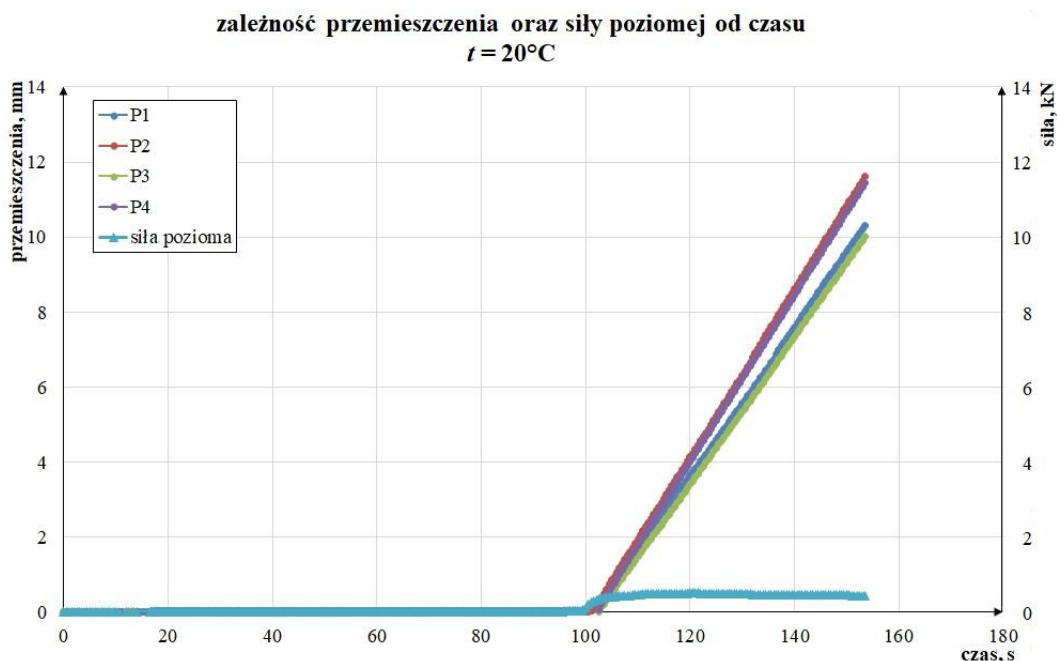
Rys. 6-2. Wykres zależności naprężenia od czasu dla temperatury  $t = 20^{\circ}\text{C}$

Na podstawie przedstawionego wykresu zależności wartości naprężenia w funkcji czasu można stwierdzić, że naprężenia odpowiadające przyłożonej sile pionowej (w tym przypadku wynoszącej 25 kN) posiadały stałą wartość równą 100 kPa w trakcie całego przeprowadzanego eksperymentu, czyli począwszy od około 100 s czasu trwania badania, kiedy to rozpoczęło się przemieszczanie poziome środkowej betonowej płyty.



Rys. 6-3. Wykres zależności siły pionowej oraz siły poziomej od czasu dla temperatury  $t = 20^{\circ}\text{C}$

Stosownie do wykresu zależności przyłożonej siły pionowej oraz poziomej do środkowej betonowej płyty w funkcji czasu, można zaobserwować, iż siła pionowa odpowiadająca stosownie wywieranemu naprężeniu na betonową płytę (w tym przypadku wynoszącemu 100 kPa) posiadała stałą wartość równą 25 kN w trakcie całego przeprowadzanego badania, czyli począwszy od około 100 s czasu trwania eksperymentu, kiedy to do betonowej płyty została przyłożona siła pozioma i rozpoczęło się jej przemieszczanie (rys. 6-4).



Rys. 6-4. Wykres zależności przemieszczenia oraz siły poziomej od czasu dla temperatury  $t = 20^{\circ}\text{C}$

Jednakowoż, zarejestrowane zmiany siły pionowej, a także naprężeń w fazie początkowej, czyli do około 40 s prac badawczych, były spowodowane uruchomieniem maszyny wytrzymałościowej i nie wpłynęły one na wytrzymałość betonowych płyt.

Dla odczytanych, w danej temperaturze i dla każdego z otrzymanego od Grupy LOTOS S. A. rodzaju smaru, wartości siły poziomej w momencie rozpoczęcia poruszania się środkowej betonowej płyty oraz odpowiadającej jej wartości siły pionowej, obliczono ze wzoru (6-1) (Halliday i in. 2022) stosunek wartości tych sił, będący jednocześnie współczynnikiem tarcia statycznego  $f$ :

$$f = \frac{T}{N}, - \quad (6-1)$$

gdzie:

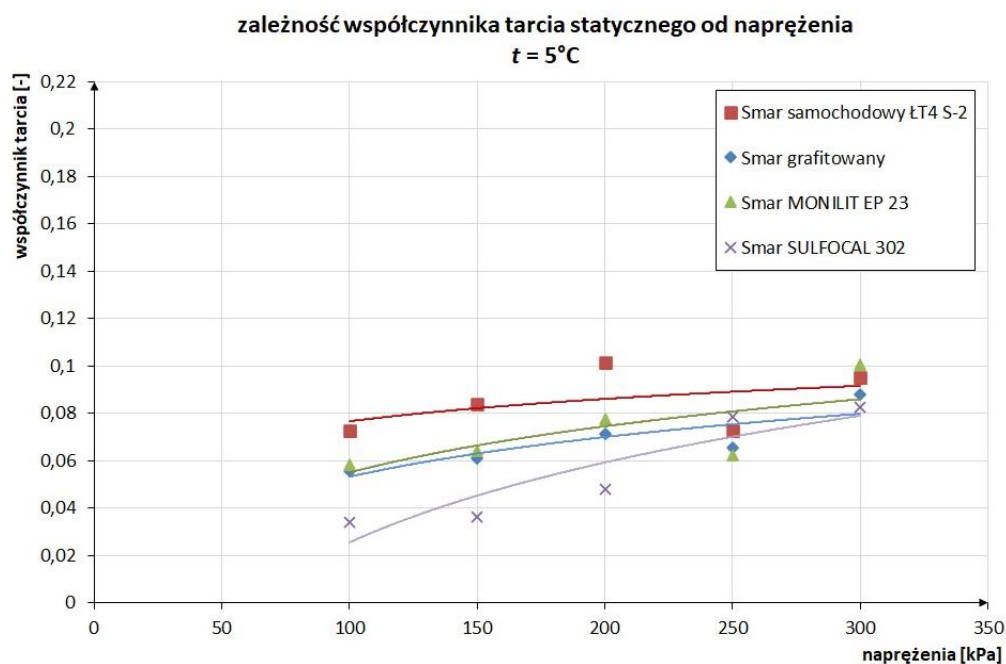
$f$  – współczynnik tarcia statycznego, –,

$T$  – wartość siły poziomej w momencie rozpoczęcia poruszania się płyty, kN,

$N$  – wartość siły pionowej odpowiadająca wartości siły poziomej, kN.

Natomiast dla tych warunków styk występuje z obu stron środkowej płyty, zatem w efekcie współczynnik tarcia  $f$  jest w rzeczywistości dwa razy mniejszy. Na wykresach dla

danych temperatur: 5°C (rys. 6-5), 10°C (rys. 6-6), 20°C (rys. 6-7), 30°C (rys. 6-8), 40°C (rys. 6-9) i 50°C (rys. 6-10), przedstawiono zależności średniego współczynnika tarcia statycznego  $f$  od naprężenia  $\sigma$ , odpowiadającego stosownie przyłożonym siłom pionowym. Dla tak wyznaczonych wszystkich zależności poprowadzono logarytmiczne linie trendu, gdyż w każdym przypadku charakteryzowały się one największą wartością R-kwadrat. Natomiast wartości średnich współczynników tarcia statycznego  $f$  dla analizowanych temperatur zestawiono odpowiednio w tablicach 6-1, 6-2, 6-3, 6-4, 6-5 i 6-6.



Rys. 6-5. Wykres zależności współczynnika tarcia statycznego od naprężenia dla temperatury  $t = 5^{\circ}\text{C}$

Z powyższej zależności współczynnika tarcia statycznego  $f$  od naprężenia  $\sigma$  dla temperatury  $t = 5^{\circ}\text{C}$  dla wszystkich rodzajów smarów otrzymanych od Grupy LOTOS S. A. wynika, iż wartość współczynnika tarcia statycznego  $f$  rośnie wraz ze wzrostem naprężeń  $\sigma$ . Najniższe wartości współczynnika tarcia statycznego odnotowano dla smaru LOTOS SULFOCAL 302, natomiast najwyższe dla smaru samochodowego LOTOS LT 4 S-2.

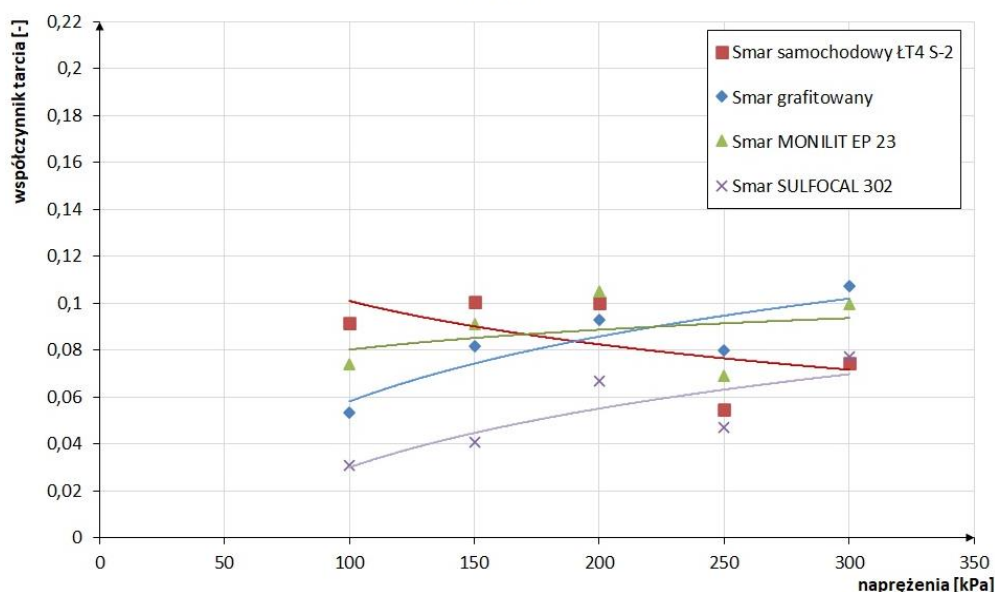
Tablica 6-1. Wartości średnich współczynników tarcia w temperaturze  $t = 5^{\circ}\text{C}$

Rodzaj smaru LOTOS	Naprężenia $\sigma$ , kPa	Średni współczynnik tarcia $f$ , –
LT4 S-2	100	0,073
	150	0,084
	200	0,100
	250	0,073
	300	0,095
GRAFITOWANY	100	0,056
	150	0,061
	200	0,071
	250	0,066
	300	0,088



MONILIT EP 23	100	0,058
	150	0,064
	200	0,077
	250	0,062
	300	0,100
SULFOCAL 302	100	0,034
	150	0,036
	200	0,048
	250	0,079
	300	0,082

zależność współczynnika tarcia statycznego od naprężenia  
 $t = 10^{\circ}\text{C}$



Rys. 6-6. Wykres zależności współczynnika tarcia statycznego od naprężenia dla temperatury  $t = 10^{\circ}\text{C}$

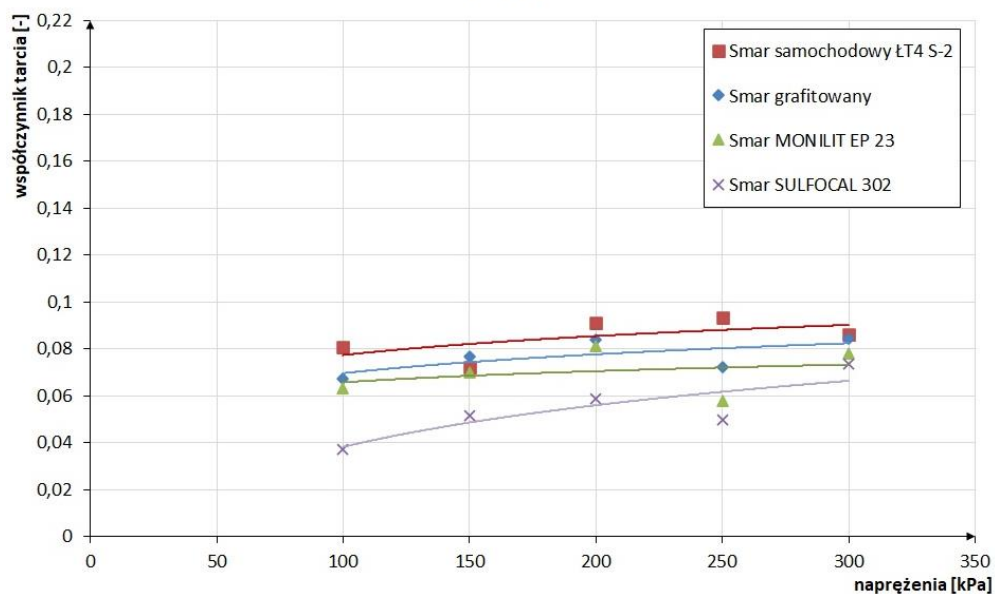
Z powyższej zależności współczynnika tarcia statycznego  $f$  od naprężenia  $\sigma$  dla temperatury  $t = 10^{\circ}\text{C}$  dla trzech rodzajów smarów otrzymanych od Grupy LOTOS S. A. (GRAFITOWANY, MONILIT EP 23 oraz SULFOCAL 302) wynika, iż wartość współczynnika tarcia statycznego  $f$  rośnie wraz ze wzrostem naprężeń  $\sigma$ , natomiast dla smaru samochodowego LOTOS LT4 S-2 maleje wraz ze wzrostem naprężeń  $\sigma$ . Najniższe wartości współczynnika tarcia statycznego odnotowano dla smaru LOTOS SULFOCAL 302, natomiast najwyższe dla smaru samochodowego LOTOS LT 4 S-2 przy najniższych naprężeniach  $\sigma$  i dla smaru GRAFITOWANEGO przy najwyższych naprężeniach  $\sigma$ .

Tablica 6-2. Wartości średnich współczynników tarcia w temperaturze  $t = 10^{\circ}\text{C}$

Rodzaj smaru LOTOS	Naprężenia $\sigma$ , kPa	Średni współczynnik tarcia $f$ , -
LT4 S-2	100	0,091
	150	0,100
	200	0,100
	250	0,055

	300	0,075
GRAFITOWANY	100	0,053
	150	0,081
	200	0,093
	250	0,080
	300	0,110
MONILIT EP 23	100	0,074
	150	0,091
	200	0,100
	250	0,069
	300	0,100
SULFOCAL 302	100	0,031
	150	0,041
	200	0,067
	250	0,047
	300	0,075

zależność współczynnika tarcia statycznego od naprężenia  
 $t = 20^{\circ}\text{C}$

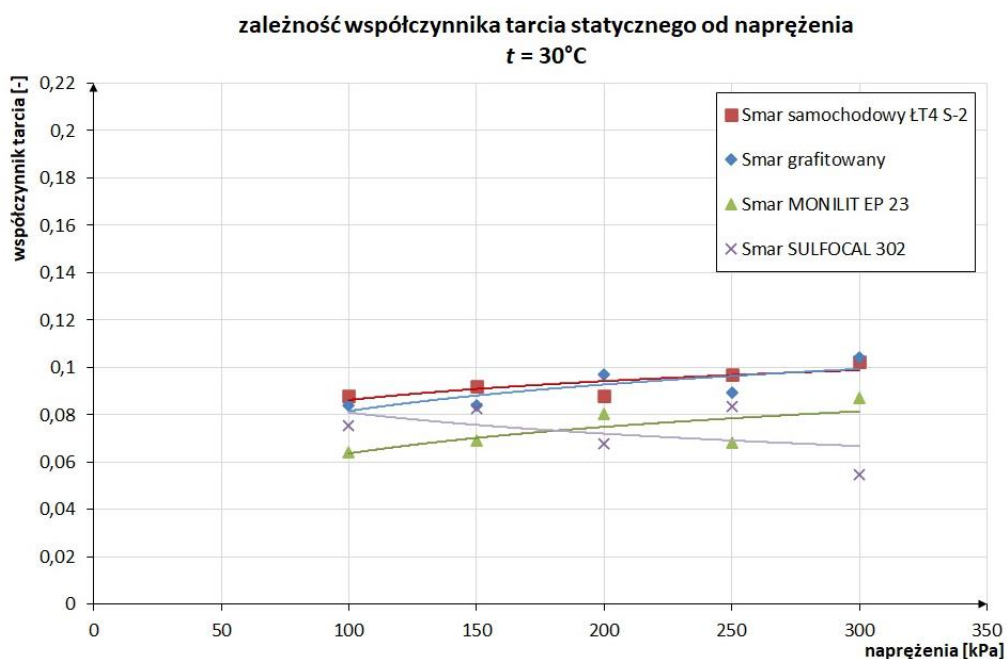


Rys. 6-7. Wykres zależności współczynnika tarcia statycznego od naprężenia dla temperatury  $t = 20^{\circ}\text{C}$

Z powyższej zależności współczynnika tarcia statycznego  $f$  od naprężenia  $\sigma$  dla temperatury  $t = 20^{\circ}\text{C}$  dla wszystkich rodzajów smarów otrzymanych od Grupy LOTOS S. A. wynika, iż wartość współczynnika tarcia statycznego  $f$  rośnie wraz ze wzrostem naprężeń  $\sigma$ . Najniższe wartości współczynnika tarcia statycznego odnotowano dla smaru LOTOS SULFOCAL 302, natomiast najwyższe dla smaru samochodowego LOTOS LT 4 S-2.

Tablica 6-3. Wartości średnich współczynników tarcia w temperaturze  $t = 20^{\circ}\text{C}$

Rodzaj smaru LOTOS	Naprężenia $\sigma$ , kPa	Średni współczynnik tarcia $f_s$ , -
LT4 S-2	100	0,081
	150	0,072
	200	0,091
	250	0,093
	300	0,086
GRAFITOWANY	100	0,067
	150	0,077
	200	0,084
	250	0,072
	300	0,084
MONILIT EP 23	100	0,063
	150	0,070
	200	0,081
	250	0,058
	300	0,078
SULFOCAL 302	100	0,037
	150	0,052
	200	0,059
	250	0,050
	300	0,074



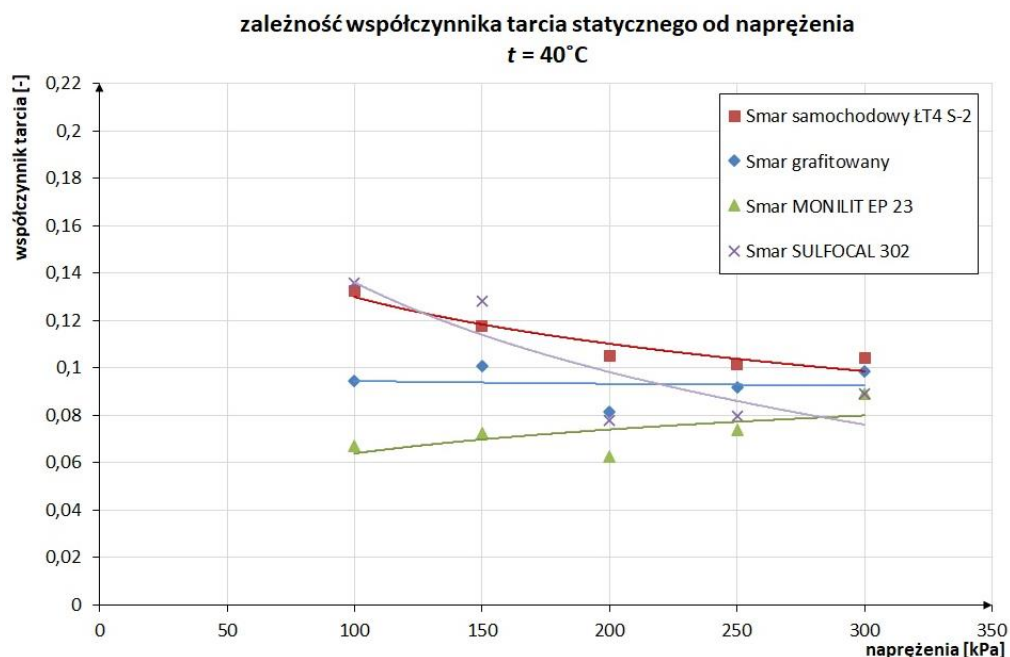
Rys. 6-8. Wykres zależności współczynnika tarcia statycznego od naprężenia dla temperatury  $t = 30^{\circ}\text{C}$

Z powyższej zależności współczynnika tarcia statycznego  $f$  od naprężenia  $\sigma$  dla temperatury  $t = 30^{\circ}\text{C}$  dla trzech rodzajów smarów otrzymanych od Grupy LOTOS S. A. (SAMOCHODOWY LT4 S-2, GRAFITOWANY oraz MONILIT EP 23) wynika, iż wartość

współczynnika tarcia statycznego  $f$  rośnie wraz ze wzrostem naprężeń  $\sigma$ , natomiast dla smaru LOTOS SULFOCAL 302 maleje wraz ze wzrostem naprężeń  $\sigma$ . Najwyższe wartości współczynnika tarcia statycznego odnotowano dla smaru samochodowego LOTOS LT4 S-2. Natomiast przy najniższych wartościach naprężeń  $\sigma$  najniższe wartości współczynnika tarcia statycznego odnotowano dla smaru LOTOS MONILIT 302, a przy najwyższych wartościach naprężeń  $\sigma$ , najniższe wartości współczynnika tarcia statycznego  $f$  zaobserwowano dla smaru LOTOS SULFOCAL 302.

Tablica 6-4. Wartości średnich współczynników tarcia w temperaturze  $t = 30^{\circ}\text{C}$

Rodzaj smaru LOTOS	Naprężenia $\sigma$ , kPa	Średni współczynnik tarcia $f$ , –
LT4 S-2	100	0,088
	150	0,092
	200	0,088
	250	0,097
	300	0,100
RAFITOWANY	100	0,084
	150	0,084
	200	0,097
	250	0,089
	300	0,100
MONILIT EP 23	100	0,064
	150	0,069
	200	0,081
	250	0,068
	300	0,087
SULFOCAL 302	100	0,076
	150	0,083
	200	0,068
	250	0,084
	300	0,055



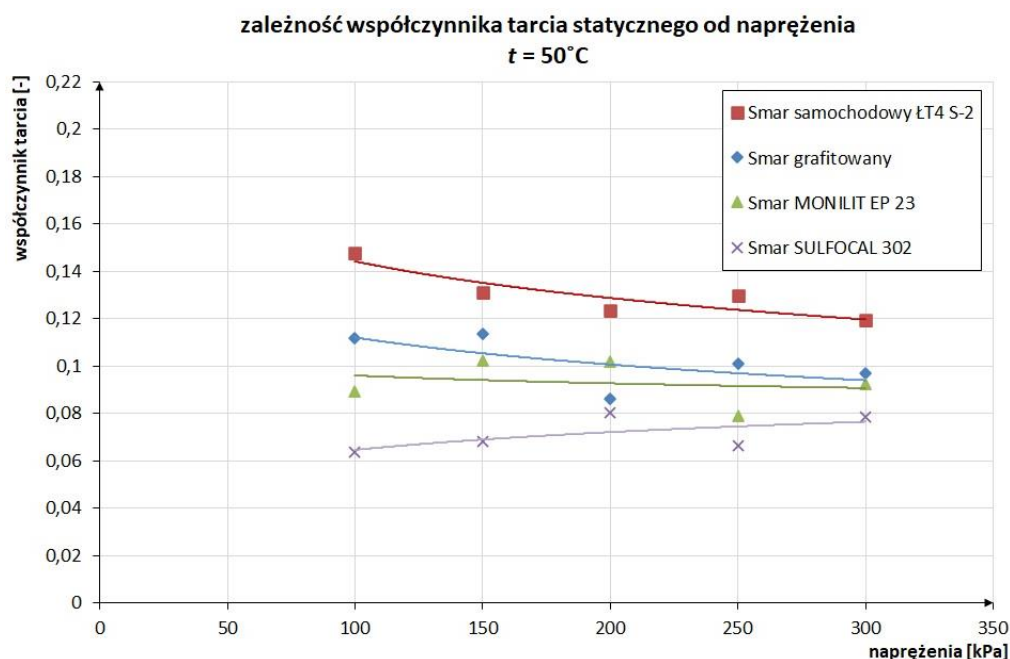
Rys. 6-9. Wykres zależności współczynnika tarcia statycznego od naprężenia dla temperatury  $t = 40^{\circ}\text{C}$

Z powyższej zależności współczynnika tarcia statycznego  $f$  od naprężenia  $\sigma$  dla temperatury  $t = 40^{\circ}\text{C}$  dla trzech rodzajów smarów otrzymanych od Grupy LOTOS S. A. (SAMOCHODOWY LT4 S-2, GRAFITOWANY i SULFOCAL 302) wynika, iż wartość współczynnika tarcia statycznego  $f$  maleje wraz ze wzrostem naprężeń  $\sigma$ , natomiast dla smaru LOTOS MONILIT EP 23 rośnie wraz ze wzrostem naprężeń  $\sigma$ . Najwyższe wartości współczynnika tarcia statycznego odnotowano dla smaru samochodowego LOTOS LT4 S-2. Natomiast przy najniższych wartościach naprężeń  $\sigma$  najniższe wartości współczynnika tarcia statycznego odnotowano dla smaru LOTOS MONILIT 302, a przy najwyższych wartościach naprężeń  $\sigma$ , najniższe wartości współczynnika tarcia statycznego  $f$  zaobserwowano dla smaru LOTOS SULFOCAL 302.

Tablica 6-5. Wartości średnich współczynników tarcia w temperaturze  $t = 40^{\circ}\text{C}$

Rodzaj smaru LOTOS	Naprężenia $\sigma$ , kPa	Średni współczynnik tarcia $f_s$ -
LT4 S-2	100	0,130
	150	0,120
	200	0,110
	250	0,100
	300	0,100
GRAFITOWANY	100	0,095
	150	0,100
	200	0,082
	250	0,092
	300	0,099
MONILIT EP 23	100	0,067
	150	0,072
	200	0,062

	250	0,074
	300	0,089
SULFOCAL 302	100	0,140
	150	0,130
	200	0,078
	250	0,080
	300	0,090



Rys. 6-10. Wykres zależności współczynnika tarcia statycznego od naprężenia dla temperatury  $t = 50^{\circ}\text{C}$

Z powyższej zależności współczynnika tarcia statycznego  $f$  od naprężenia  $\sigma$  dla temperatury  $t = 50^{\circ}\text{C}$  dla trzech rodzajów smarów otrzymanych od Grupy LOTOS S. A. (samochodowy LT4 S-2, GRAFITOWANY i MONILIT EP 23) wynika, iż wartość współczynnika tarcia statycznego  $f$  maleje wraz ze wzrostem naprężeń  $\sigma$ , natomiast dla smaru LOTOS MONILIT EP 23 rośnie wraz ze wzrostem naprężeń  $\sigma$ . Najniższe wartości współczynnika tarcia statycznego odnotowano dla smaru LOTOS SULFOCAL 302, natomiast najwyższe dla smaru samochodowego LOTOS LT 4 S-2.

Tablica 6-6. Wartości średnich współczynników tarcia w temperaturze  $t = 50^{\circ}\text{C}$

Rodzaj smaru LOTOS	Naprężenia $\sigma$ , kPa	Średni współczynnik tarcia $f$ , -
LT4 S-2	100	0,150
	150	0,130
	200	0,120
	250	0,130
	300	0,120
GRAFITOWANY	100	0,110
	150	0,110
	200	0,086

	250	0,100
	300	0,097
MONILIT EP 23	100	0,089
	150	0,100
	200	0,100
	250	0,079
	300	0,092
SULFOCAL 302	100	0,063
	150	0,068
	200	0,080
	250	0,066
	300	0,079

W tablicy 6-7 zestawiono wszystkie wartości średnich współczynników tarcia statycznego  $f$  dla analizowanych rodzajów smarów (LOTOS LT4 S-2, GRAFITOWANY, MONILIT EP 23 oraz SULFOCAL 302), temperatur ( $5^{\circ}\text{C}$ ,  $10^{\circ}\text{C}$ ,  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $30^{\circ}\text{C}$ ,  $40^{\circ}\text{C}$  i  $50^{\circ}\text{C}$ ) oraz wartości naprężeń  $\sigma$  (odpowiadających przyłożonym siłom pionowym) równych 100 kPa, 150 kPa, 200 kPa, 250 kPa i 300 kPa.

Tablica 6-7. Wartości średnich współczynników tarcia

Rodzaj smaru LOTOS	Temperatura $t$ , $^{\circ}\text{C}$	Naprężenia $\sigma$ , kPa	Średni współczynnik tarcia $f$ , –
LT4 S-2	5	100	0,073
		150	0,084
		200	0,100
		250	0,073
		300	0,095
	10	100	0,091
		150	0,100
		200	0,100
		250	0,055
		300	0,075
	20	100	0,081
		150	0,072
		200	0,091
		250	0,093
		300	0,086
	30	100	0,088
		150	0,092
		200	0,088
		250	0,097
		300	0,100
40	100	0,130	
	150	0,120	
	200	0,110	
	250	0,100	
	300	0,100	

	50	100	0,150
		150	0,130
		200	0,120
		250	0,130
		300	0,120
GRAFITOWANY	5	100	0,056
		150	0,061
		200	0,071
		250	0,066
		300	0,088
	10	100	0,053
		150	0,081
		200	0,093
		250	0,080
		300	0,110
	20	100	0,067
		150	0,077
		200	0,084
		250	0,072
		300	0,084
	30	100	0,084
		150	0,084
		200	0,097
		250	0,089
		300	0,100
	40	100	0,095
		150	0,100
		200	0,082
		250	0,092
		300	0,099
50	100	0,110	
	150	0,110	
	200	0,086	
	250	0,100	
	300	0,097	
MONILIT EP 23	5	100	0,058
		150	0,064
		200	0,077
		250	0,062
		300	0,100
	10	100	0,074
		150	0,091
		200	0,100
		250	0,069
		300	0,100
	20	100	0,063
		150	0,070
		200	0,081



		250	0,058
		300	0,078
	30	100	0,064
		150	0,069
		200	0,081
		250	0,068
		300	0,087
	40	100	0,067
		150	0,072
		200	0,062
		250	0,074
		300	0,089
	50	100	0,089
		150	0,100
		200	0,100
		250	0,079
		300	0,092
SULFOCAL 302	5	100	0,034
		150	0,036
		200	0,048
		250	0,079
		300	0,082
	10	100	0,031
		150	0,041
		200	0,067
		250	0,047
		300	0,075
	20	100	0,037
		150	0,052
		200	0,059
		250	0,050
		300	0,074
	30	100	0,076
		150	0,083
		200	0,068
		250	0,084
		300	0,055
40	100	0,140	
	150	0,130	
	200	0,078	
	250	0,080	
	300	0,090	
50	100	0,063	
	150	0,068	
	200	0,080	
	250	0,066	
	300	0,079	

Z wszystkich powyższych zależności współczynnika tarcia statycznego  $f$  od naprężenia  $\sigma$  można stwierdzić, że:

- wartość współczynnika tarcia statycznego  $f$  zależna jest od rodzaju zastosowanego smaru, temperatury  $t$  oraz wartości naprężeń  $\sigma$ ,
- dla wszystkich rodzajów smarów im wyższe są wartości temperatur  $t$ , tym wyższe są wartości współczynnika tarcia statycznego  $f$  dla danych naprężeń  $\sigma$ ,
- w obrębie jednej wartości temperatury dla  $t = 5^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 10^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 20^{\circ}\text{C}$  i  $t = 30^{\circ}\text{C}$  wartości współczynnika tarcia statycznego  $f$  są tym wyższe, im wyższe są wartości naprężeń  $\sigma$  (wyjątek stanowi smar samochodowy LOTOS LT4 S-2 oraz smar SULFOCAL 302, gdzie w temperaturze odpowiednio  $t = 10^{\circ}\text{C}$  i  $t = 30^{\circ}\text{C}$  wartości współczynnika tarcia statycznego  $f$  maleją wraz ze wzrostem naprężeń  $\sigma$ ),
- w obrębie jednej wartości temperatury dla  $t = 40^{\circ}\text{C}$  i  $t = 50^{\circ}\text{C}$  wartości współczynnika tarcia statycznego  $f$  są tym niższe, im wyższe są wartości naprężeń  $\sigma$  (wyjątek stanowi smar LOTOS MONIIT EP 23 oraz smar SULFOCAL 302, gdzie w temperaturze odpowiednio  $t = 40^{\circ}\text{C}$  i  $t = 50^{\circ}\text{C}$  wartości współczynnika tarcia statycznego  $f$  rosną wraz ze wzrostem naprężeń  $\sigma$ ),
- najwyższe wartości współczynnika tarcia statycznego  $f$  dla danych temperatur  $t$  i naprężeń  $\sigma$  odnotowano dla smaru samochodowego LOTOS LT4 S-2,
- najniższe wartości współczynnika tarcia statycznego  $f$  dla danych temperatur  $t$  i naprężeń  $\sigma$  odnotowano dla smaru LOTOS SULFOCAL 302 (wyjątek stanowi smar LOTOS MONILIT w temperaturze  $t = 30^{\circ}\text{C}$  i  $t = 40^{\circ}\text{C}$  przy najniższych wartościach naprężeń  $\sigma$ ).

Analiza warunków pracy smarów w zależności od temperatury wykazała, iż wartości współczynników tarcia statycznego  $f$  są tym wyższe im wyższe są wartości temperatur  $t$  dla danych naprężeń  $\sigma$ . Tym samym niezbędne są większe siły poziome do przesunięcia jednej części zdublowanego fundamentu żelbetowego względem drugiej. Zatem można stwierdzić, iż najniższe wartości współczynników tarcia statycznego  $f$  zostają osiągnięte bez konieczności instalacji przewodów grzejnych, a jedynie w przedziale naturalnie występujących temperatur w poziomie posadowienia obiektu budowlanego ( $t = 5^{\circ}\text{C}$  lub  $t = 10^{\circ}\text{C}$ ). Najniższe wartości współczynnika tarcia statycznego  $f$  dla temperatur  $t = 5^{\circ}\text{C}$  oraz  $t = 10^{\circ}\text{C}$  i naprężeń  $\sigma$  odnotowano dla smaru LOTOS SULFOCAL 302. W związku z tym jest to najbardziej odpowiedni smar do zastosowania w warstwie poślizgowej zdublowanego żelbetowego fundamentu podczas rektyfikacji różnej wielkości obiektów budowlanych poddanych wpływom górniczym w warunkach temperaturowych zwykle panujących w poziomie posadowienia budowli.

## **7. BADANIA LABORATORYJNE MODELU POWIERZCHNI SFERYCZNEJ**

### **7.1. Metodologia badań**

Podczas przeprowadzania prac badawczych oprócz badań laboratoryjnych warstwy poślizgowej dokonano również pomiarów na modelu powierzchni sferycznej zdublowanego żelbetowego fundamentu służącego do rektyfikacji budynków poddanych wpływom górnictwem. Analogicznie jak w trakcie realizowania analiz warstwy poślizgowej, wykorzystano jedną zasadniczą metodę. W związku z tym, aby potwierdzić hipotezę dotyczącą nowego rozwiązania konstrukcyjnego, przeprowadzono eksperymenty laboratoryjne modelu powierzchni sferycznej wykonanego w sztucznie stworzonym środowisku, na mniejszą skalę, w laboratorium, przy użyciu specjalistycznych przyrządów, w celu określenia wielkości siły jaką należałoby użyć przy rektyfikacji budowli. Taki pomniejszony model powierzchni sferycznej ma potwierdzić, że wyznaczone wcześniej współczynniki tarcia będą mogły służyć do określenia wielkości siły poziomej, która będzie niezbędna do przesunięcia budynku – jego rektyfikacji oraz że krzywizna powierzchni styku wpłynie na zmianę współczynnika tarcia dla danego smaru.

### **7.2. Budowa warstwy poślizgowej**

W trakcie przeprowadzania badań laboratoryjnych modelu powierzchni sferycznej, na warstwę poślizgową składały się także dwie warstwy folii budowlanej PE (FOLIAREX IZ 300-N), o grubości 0,3 mm każda, pomiędzy którymi znajdowała się warstwa jednego rodzaju smaru Grupy LOTOS S. A., czyli LOTOS SULFOCAL 302. Z racji tego, iż analiza warstwy poślizgowej zawierającej ten smar, w temperaturze pokojowej równej 20°C, dla każdej wielkości naprężeń, wykazała, iż smar LOTOS SULFOCAL 302 charakteryzował się najmniejszymi wartościami współczynników tarcia. Celem porównania wyników otrzymanych współczynników tarcia statycznego podczas prac badawczych nad warstwą poślizgową pomiary modelu powierzchni sferycznej zostały wykonane tylko i wyłącznie dla takiej wartości temperatury  $t = 20^{\circ}\text{C}$ .

### **7.3. Opis badań laboratoryjnych modelu powierzchni sferycznej**

Laboratorium Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej dysponuje podstawowymi urządzeniami do przeprowadzenia doświadczeń. Należą do nich ramy wykonane z kształtowników walcowanych na gorąco pozwalające na przykładanie do badanego modelu powierzchni sferycznej sił pionowych oraz poziomych (rys. 7-3), siłowniki hydrauliczne (rys. 7-1), sprężyny walcowe ze stałą odległością zwojów (rys. 7-2) oraz zaawansowane

urządzenia rejestrujące przemieszczenia w elementach (rys. 7-8). W ramach badań wykonano model badawczy oraz drobne elementy mocowań elementów badawczych.



Rys. 7-1. Układ trzech siłowników podłączonych do elektrycznych pomp hydraulicznych



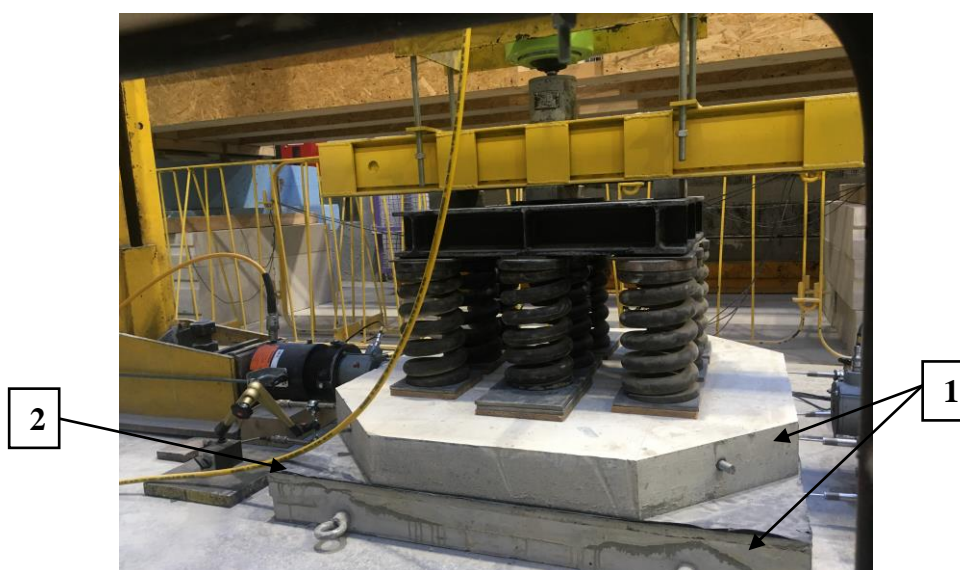
Rys. 7-2. Układ dziewięciu sprężyn walcowych ze stałą odległością zwojów

Zakres badań modelu powierzchni sferycznej obejmował analizę porównawczą wyników otrzymanych współczynników tarcia statycznego podczas badań warstwy poślizgowej zawierającej smar LOTOS SULFOCAL 302, w temperaturze pokojowej równej 20°C, dla każdej wielkości naprężeń, w specjalnie przygotowanym stanowisku badawczym (rys. 7-3).



Rys. 7-3. Rama ze stanowiskiem badawczym

Badania laboratoryjne modelu powierzchni sferycznej polegały po pierwsze na wykonaniu dwóch betonowych płyt o wymiarach 1000 x 1000 x 100 mm (1). Powierzchnia styku tychże płyt miała kształt części sfery z wypukłością skierowaną ku dołowi o promieniu równym 20000 mm. Płyta górna została wykonana ze wszystkimi narożnikami ściętymi o wymiarach 200 x 200 mm, aby dochodziło do przesuwu poziomego tylko na powierzchni styku o kształcie części sfery, a także żeby na najbardziej oddalonych od miejsca przyłożonej siły narożnikach nie występowało ich podnoszenie oraz odrywanie od płyty dolnej i przez to, aby nie pracowały one jak wsporniki, ponieważ mogłoby to doprowadzić do zafałszowania wyników wartości współczynników tarcia statycznego. Następnie tak przygotowane płyty ułożono jedna na drugiej. Pomiędzy płytami umieszczono warstwę poślizgową, czyli dwie warstwy folii budowlanej PE, każda o grubości 0,3 mm (2), pomiędzy którymi znajdowała się warstwa badanego smaru (rys. 7-4).



Rys. 7-4. Rama ze stanowiskiem badawczym

W celu przeprowadzenia badań zostało zaprojektowane specjalne urządzenie – stanowisko laboratoryjne (rys. 7-5) umożliwiające uzyskanie górnej powierzchni dolnej betonowej płyty w kształcie części sfery z wypukłością skierowaną ku dołowi o promieniu równym dokładnie 20000 mm, które wykonała firma Metal-Montaż Jacek Kuczyński z Chylic.



Rys. 7-5. Urządzenie służące do nadania kształtu części sfery górnej powierzchni betonowej płyty

Składało się ono z:

- ramy: trzech rur kwadratowych RK 50 x 50 x 2,5 oraz elementów usztywniających wykonanych z blach o grubości 5 mm. Dwie rury kwadratowe pionowe umożliwiały regulację wysokości całej ramy dzięki wykonaniu w nich otworu na śrubę M8. Natomiast do poziomej rury kwadratowej przyspawany został uchwyt wykonany z blachy o grubości 5 mm, do którego przykręcono rurę kwadratową z przyspawaną blachą nadającą kształt części sfery górnej powierzchni betonowej płyty,

- podstawy: dwóch rur kwadratowych RK 40 x 40 x 2,5 wraz z elementami usztywniającymi wykonanymi z blach o grubości 5 mm. Na dwie pionowe rury kwadratowe z otworami na śrubę M8 nasunięta została rama na zadaną wysokość poprzez wkręcenie śruby w konkretny otwór i tym samym zablokowano także przesuwanie się ramy w pionie,

- blachy nadającej kształt części sfery górnej powierzchni betonowej płyty: specjalnie ukształtowanej i odpowiednio usztywnionej blachy o grubości 5 mm, posiadającej możliwość obrotu o 360° względem jej pionowej osi. Blacha przyspawana została do rury kwadratowej RK 40 x 40 x 2,5 przykręconej do uchwyty na poziomej rurze kwadratowej ramy.

- dwóch betonowych płyt o wymiarach 1000 x 1000 x 10 mm wraz z warstwą poślizgową. Powierzchnia styku płyty górnej i dolnej miała kształt części sfery z wypukłością skierowaną ku dołowi o promieniu równym 20000 mm. Jako pierwsza została wykonana płyta dolna przy użyciu specjalnie zaprojektowanego urządzenia – stanowiska laboratoryjnego umożliwiającego uzyskanie takiego kształtu jej górnej powierzchni.

Następnie, aby otrzymać identyczny promień wypukłości płyty górnej, na płycie dolnej została zabetonowana druga, górna płyta ze wszystkimi narożnikami ściętymi o wymiarach 200 x 200 mm, a także

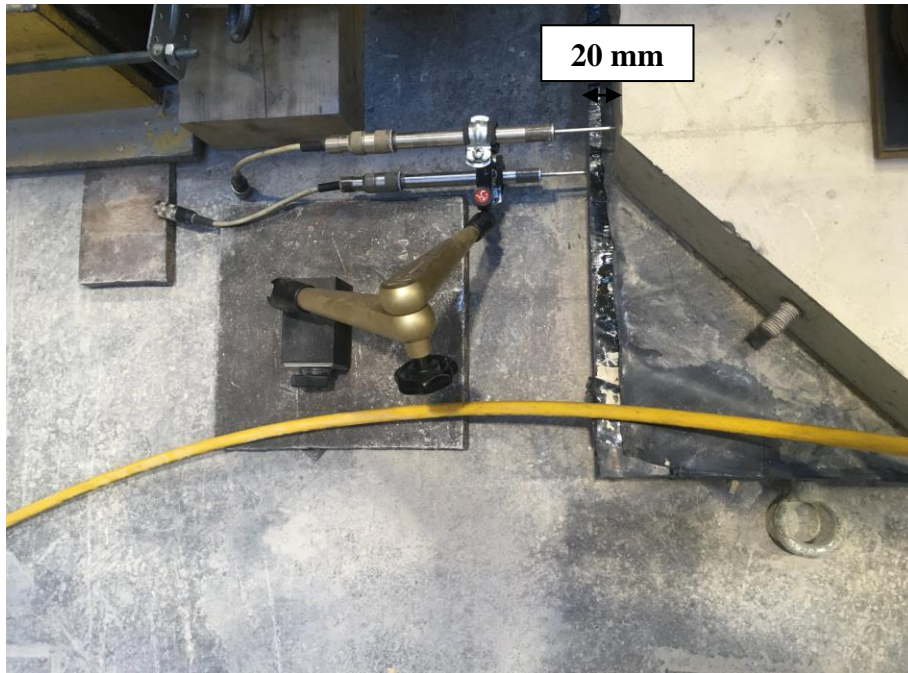
– jednego siłownika ENERPAC 50t oraz dwóch siłowników ENERPAC 20t, po jednym z każdej strony górnej betonowej płyty.

Tak przygotowane płyty betonowe poddano obciążeniu pionowemu przez siłownik hydrauliczny ENERPAC 50t przykręcony do ramy stanowiska badawczego (1) oraz górną betonową płytę – obciążeniu poziomemu z siłownika hydraulicznego ENERPAC 20t (2) (rys. 7-6). Wartości przyłożonych sił pionowych wynosiły: 100 kN, 150 kN, 200 kN, 250 kN oraz 300 kN, a ponieważ górna płyta miała ścięte narożniki i powierzchnia styku była równa 0,92 m<sup>2</sup>, zatem z tego wynika, że naprężenia odpowiadały stosownie naprężeniom wywieranym na podłoże przez średniej wielkości budynek mieszkalny jednorodzinny 109 kPa (100 kN) i budynek mieszkalny wielorodzinny 326 kPa (300 kN).



Rys. 7-6. Betonowe płyty poddane obciążeniu pionowemu (1) i poziomemu (2)

Przesunięcie poziome górnej płyty betonowej wynosiło każdorazowo 20 mm (rys. 7-7).



Rys. 7-7. Wysunięta górna betonowa płyta po przeprowadzeniu badania

Analizę przemieszczeń górnej betonowej płyty wykonano liniowymi czujnikami przemieszczeń (rys. 7-8) z dokładnością wynoszącą  $\pm 0,05\%$ .



Rys. 7-8. Rozmieszczenie liniowych czujników przemieszczeń



Dla odczytanej z aparatury największej wartości siły poziomej oraz odpowiadającej jej wartości siły pionowej obliczono stosunek wartości tych sił, będący jednocześnie współczynnikiem tarcia statycznego. Dodatkowo, warunki pracy smaru zależą od temperatury, która w przypadku przeprowadzonych badań wynosiła 20°C. Powodem wyboru takiej temperatury był zamiar porównania wyników otrzymanych wartości współczynników tarcia statycznego podczas prac badawczych nad warstwą poślizgową, dlatego pomiary modelu powierzchni sferycznej zostały wykonane tylko i wyłącznie dla takiej wartości temperatury  $t = 20^{\circ}\text{C}$ .

Dla smaru LOTOS SULFOCAL 302, temperatury  $t = 20^{\circ}\text{C}$  oraz wartości siły pionowej wynoszącej: 100 kN, 150 kN, 200 kN, 250 kN oraz 300 kN przeprowadzono pięć pomiarów. Ze względu na to, iż każda pierwsza próba odbiegała znacznie od pozostałych, przypuszczalnie doszło w tym miejscu do wypaczenia eksperymentu i wyniki takie odrzucono podczas analizy statystycznej.

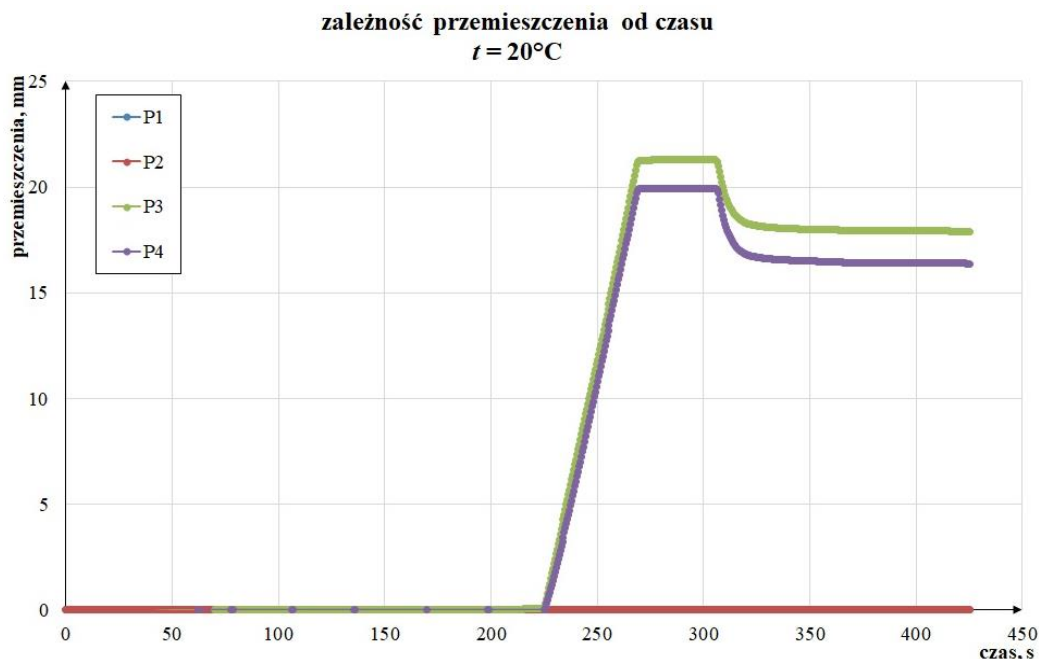


## 8. WYNIKI BADAŃ LABORATORYJNYCH MODELU POWIERZCHNI SFERYCZNEJ

Uzyskane dane dla modelu powierzchni sferycznej, w którym powierzchnia styku płyt betonowych miała kształt części sfery z wypukłością skierowaną ku dołowi o promieniu równym 20000 mm, wykorzystując w warstwie poślizgowej smar Grupy LOTOS S. A. SULFOCAL 302, w temperaturze pokojowej wynoszącej 20°C oraz wartości przyłożonych sił pionowych (odpowiadających naprężeniom równym 100 kPa, 150 kPa, 200 kPa, 250 kPa i 300 kPa), pozwoliły na przeprowadzenie obserwacji wpływu zastosowanego środka smarnego, temperatury, naprężeń oraz kształtu powierzchni stykających się ze sobą, na wartości współczynnika tarcia statycznego.

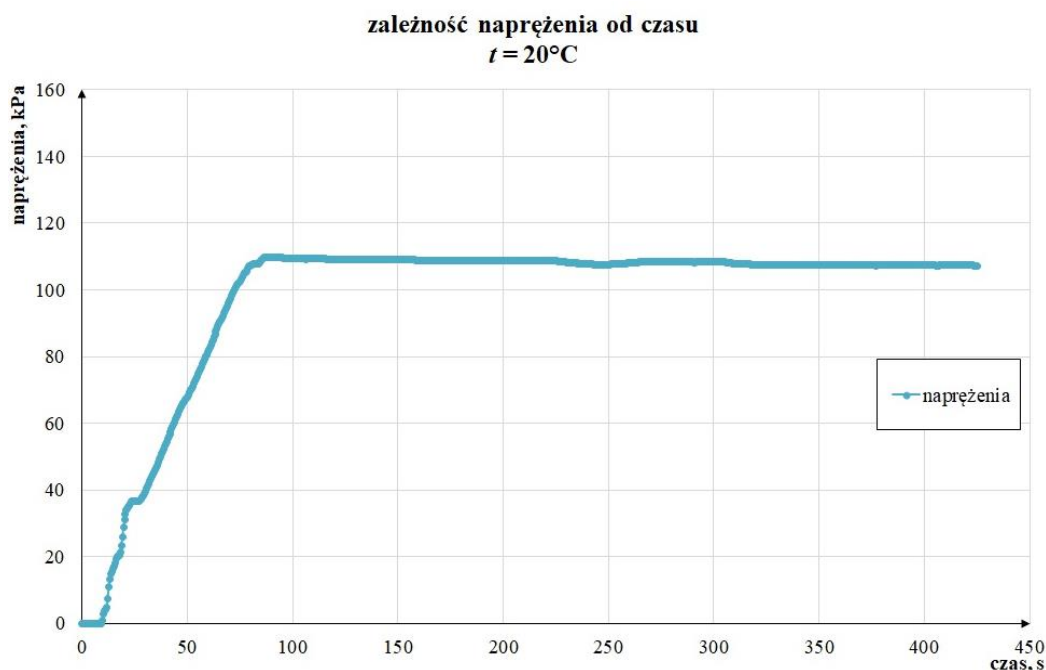
Dla przyjętego smaru SULFOCAL 302 Grupy LOTOS S. A., który w temperaturze pokojowej osiągającej 20°C, dla każdej wielkości naprężeń, wykazywał najmniejsze wartości współczynników tarcia, przedstawiono uzyskane zależności:

- przemieszczenia poziomego górnej betonowej płyty od czasu (rys. 8-1),
- naprężenia pionowego odpowiadającego przyłożonej sile pionowej od czasu (rys. 8-2) oraz
- przyłożonej siły pionowej, a także poziomej od czasu (rys. 8-4).



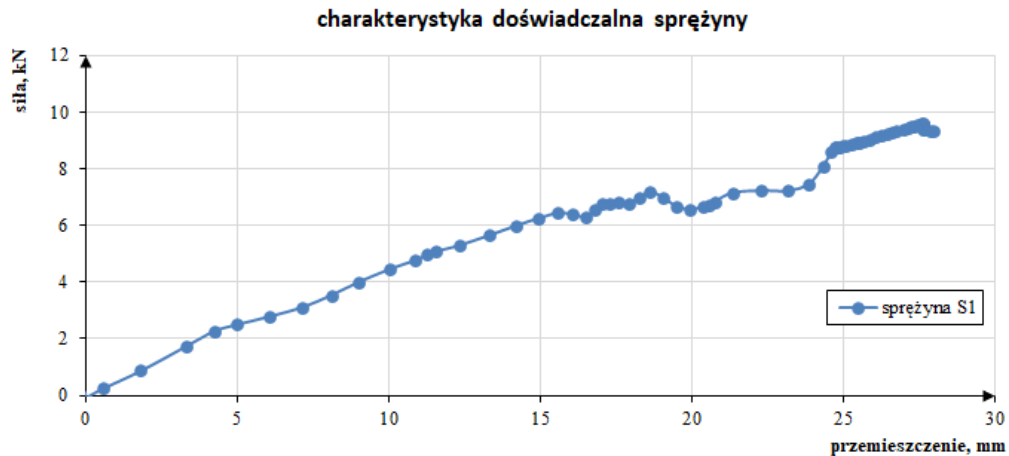
Rys. 8-1. Wykres zależności przemieszczenia od czasu dla temperatury  $t = 20^{\circ}\text{C}$

Jak wynika z powyższej zależności, przemieszczenia poziome górnej betonowej płyty, mierzone za pomocą dwóch liniowych czujników przemieszczeń (P3 i P4), wzrastały liniowo w funkcji czasu, aż do osiągnięcia założonej wartości równej 20 mm. Po zarejestrowaniu tej wielkości przemieszczenia przez każdy z dwóch czujników P3 i P4, kończono próbę badawczą. Natomiast przemieszczenia poziome dolnej betonowej płyty, również mierzone dwoma liniowymi czujnikami przemieszczeń (P1 i P2), podczas przeprowadzania eksperymentu wskazywały wartość wynoszącą 0 mm. Oznacza to, iż dolna płyta nie przemieszczała się, a jedynie płyta górna poruszała się względem nieruchomej dolnej płyty. Warto również zwrócić uwagę na końcową część wykresu, gdzie przemieszczenia się „cofają”. Zjawisko to występuje w momencie redukcji siły wywołującej przemieszczenie poziome. W rzeczywistej konstrukcji należy spodziewać się pozostania górnej części fundamentu względem dolnej w takiej pozycji, jaka zaistniała, gdy zaprzestano przykładania siły poziomej. „Cofanie się” górnej płyty w modelu laboratoryjnym wynika ze sprężystości elementów wywołujących naprężenie pionowe – sprężyn, które mają swoją sztywność również w kierunku prostopadłym do osi.



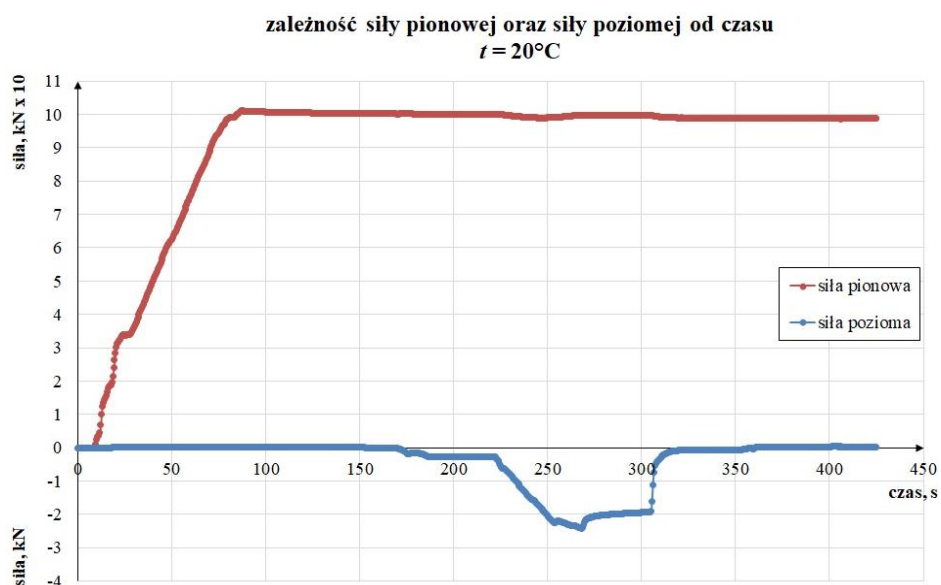
Rys. 8-2. Wykres zależności naprężenia od czasu dla temperatury  $t = 20^{\circ}\text{C}$

Na podstawie przedstawionego wykresu zależności wartości naprężenia w funkcji czasu można stwierdzić, że naprężenia odpowiadające przyłożonej sile pionowej (w tym przypadku wynoszącej 100 kN) posiadały stałą wartość równą 109 kPa w trakcie całego przeprowadzanego eksperymentu, czyli począwszy od około 90 s czasu trwania badania, wówczas w 225 s testu rozpoczęło się przemieszczanie poziome górnej betonowej płyty.



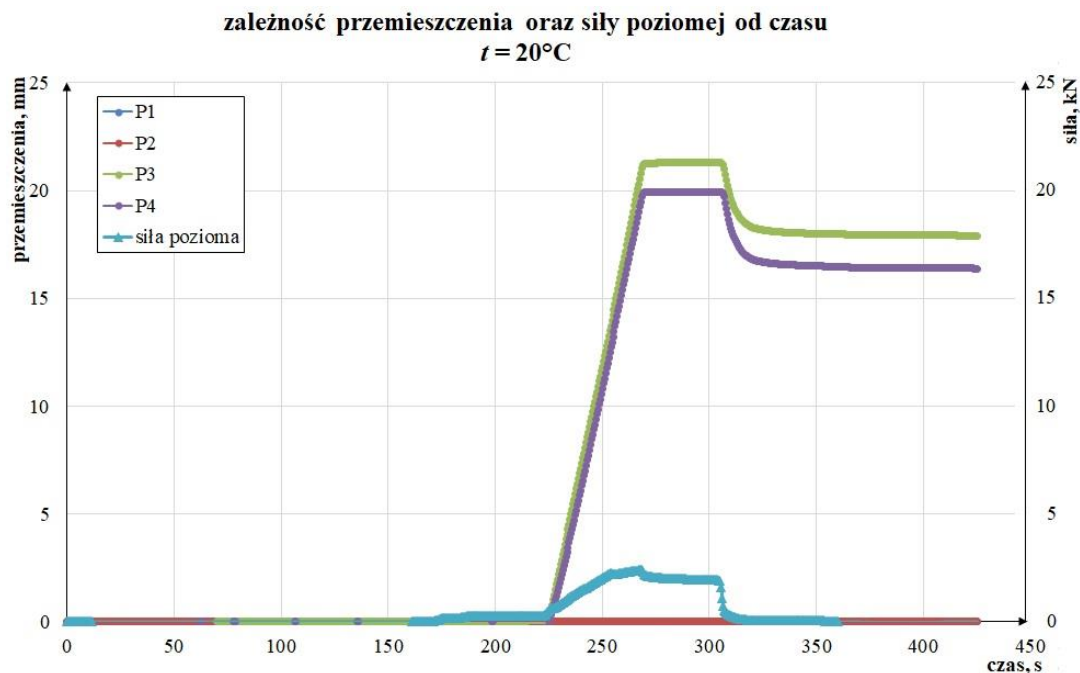
Rys. 8-3. Wykres zależności siły pionowej oraz siły poziomej od czasu dla temperatury  $t = 20^{\circ}\text{C}$

Z racji tego, iż siła pionowa, wywołująca naprężenia pionowe, przekazywana była z siłownika na górną betonową płytę przy pomocy dziewięciu sprężyn walcowych posiadających sztywność w kierunku prostopadłym do osi, wyznaczono o jaką wartość należy pomniejszyć siłę poziomą uzyskaną na siłomierzu, by ostatecznie móc ją przyjąć do obliczeń współczynnika tarcia statycznego  $f$ . W związku z tym zdefiniowano doświadczalnie charakterystykę sprężyn wykorzystywanych w badaniach laboratoryjnych. Liniową zależność przemieszczenia prostopadłego do osi sprężyny w zależności od przyłożonej siły przedstawia rys. 8-3. Po osiągnięciu założonego przemieszczenia równego 20 mm, siła pozioma osiąga wartość 6,5 kN. Tak otrzymane wielkości sił poziomych koniecznych do przemieszczenia tylko samych sprężyn walcowych użytych podczas przeprowadzania eksperymentu, pomnożono razy liczbę sprężyn i finalnie uzyskaną wartość odjęto od wielkości wyświetlonej na siłomierzu. Na poniższych wykresach przedstawiono już końcową, zredukowaną siłę poziomą przyjętą do obliczeń współczynnika tarcia statycznego  $f$ .



Rys. 8-4. Wykres zależności siły pionowej oraz siły poziomej od czasu dla temperatury  $t = 20^{\circ}\text{C}$

Stosownie do wykresu zależności przyłożonej siły pionowej oraz poziomej do górnej betonowej płyty w funkcji czasu, można zaobserwować, iż siła pionowa odpowiadająca stosownie wywieranemu naprężeniu na betonową płytę (w tym przypadku wynoszącemu 109 kPa) posiadała stałą wartość równą 100 kN w trakcie całego przeprowadzanego badania, czyli począwszy od około 90 s czasu trwania eksperymentu, wówczas do betonowej płyty została przyłożona siła pozioma i w 225 s testu rozpoczęło się jej przemieszczanie (rys. 8-5).



Rys. 8-5. Wykres zależności przemieszczenia oraz siły poziomej od czasu dla temperatury  $t = 20^{\circ}\text{C}$

Dla odczytanych, w danej temperaturze i dla otrzymanego od Grupy LOTOS S. A. smaru SULFOCAL 302, wartości siły poziomej w momencie rozpoczęcia poruszania się górnej betonowej płyty oraz odpowiadającej jej wartości siły pionowej, obliczono ze wzoru (8-1) (Halliday i in. 2022) stosunek wartości tych sił, będący jednocześnie współczynnikiem tarcia statycznego  $f$ :

$$f = \frac{T}{N}, - \quad (8-1)$$

gdzie:

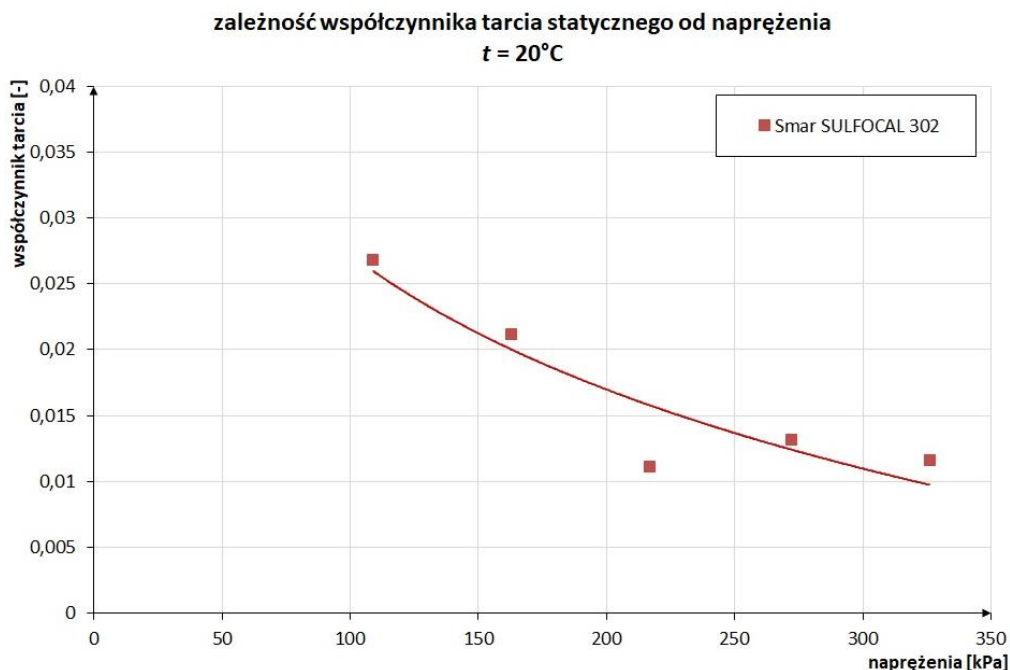
$f$  – współczynnik tarcia statycznego, –,

$T$  – wartość siły poziomej w momencie rozpoczęcia poruszania się płyty, kN,

$N$  – wartość siły pionowej odpowiadająca wartości siły poziomej, kN.

Na wykresie dla danej temperatury równej  $20^{\circ}\text{C}$  (rys. 8-6), przedstawiono zależność średniego współczynnika tarcia statycznego  $f$  od naprężenia  $\sigma$ , odpowiadającego stosownie przyłożonym siłom pionowym. Dla tak wyznaczonych wszystkich zależności poprowadzono logarymiczną linię trendu, gdyż charakteryzowała się ona największą wartością R-kwadrat. Natomiast wartości średnich współczynników tarcia statycznego  $f$  dla analizowanej

temperatury  $t = 20^{\circ}\text{C}$ , rodzaju smaru LOTOS SULFOCAL 302, kształtu powierzchni stykających się ze sobą oraz wielkości naprężeń, zestawiono w tablicy 8-1.



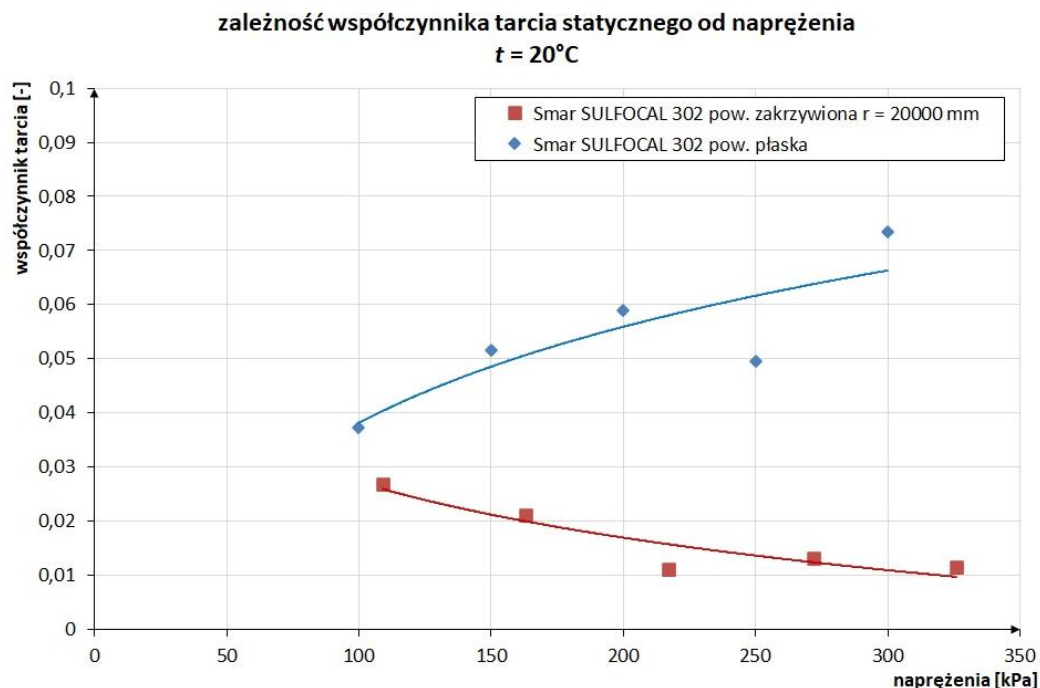
Rys. 8-6. Wykres zależności współczynnika tarcia statycznego od naprężenia dla temperatury  $t = 20^{\circ}\text{C}$

Z powyższej zależności współczynnika tarcia statycznego  $f$  od naprężenia  $\sigma$  dla temperatury  $t = 20^{\circ}\text{C}$  dla smaru SULFOCAL 302 otrzymanego od Grupy LOTOS S. A. wynika, iż wartość współczynnika tarcia statycznego  $f$  maleje wraz ze wzrostem naprężeń  $\sigma$ .

Tablica 8-1. Wartości średnich współczynników tarcia w temperaturze  $t = 20^{\circ}\text{C}$

Rodzaj smaru LOTOS	Naprężenia $\sigma$ , kPa	Średni współczynnik tarcia $f_s$ -
SULFOCAL 302	109	0,027
	163	0,021
	217	0,011
	272	0,013
	326	0,012

Wyniki w postaci średnich współczynników tarcia  $f$  dla warstwy poślizgowej zawierającej smar LOTOS SULFOCAL 302, w temperaturze  $t = 20^{\circ}\text{C}$  dla danych wartości naprężeń  $\sigma$ , z podziałem na kształt stykających się powierzchni przedstawiono w tablicy 8-2, zaś graficzny rozkład na rysunku 8-7.



Rys. 8-7. Wykres zależności współczynnika tarcia statycznego od naprężenia dla temperatury  $t = 20^{\circ}\text{C}$ , dla różnych kształtów stykających się powierzchni

Z powyższej zależności współczynnika tarcia statycznego  $f$  od naprężenia  $\sigma$  dla temperatury  $t = 20^{\circ}\text{C}$  dla smaru SULFOCAL 302 otrzymanego od Grupy LOTOS S. A. dla różnych kształtów stykających się powierzchni wynika, iż wartość współczynnika tarcia statycznego  $f$  maleje wraz ze wzrostem naprężeń  $\sigma$  dla powierzchni zakrzywionych. Natomiast wartość współczynnika tarcia statycznego  $f$  rośnie wraz ze wzrostem naprężeń  $\sigma$  dla powierzchni płaskich.

Tablica 8-2. Wartości średnich współczynników tarcia w temperaturze  $t = 20^{\circ}\text{C}$  dla różnych kształtów stykających się powierzchni

Rodzaj smaru LOTOS	Naprężenia $\sigma$ , kPa	Średni współczynnik tarcia $f$ , -
SULFOCAL 302	powierzchnia płaska $r = \infty$	
	100	0,037
	150	0,052
	200	0,059
	250	0,050
	300	0,074
	powierzchnia zakrzywiona $r = 20000$ mm	
	109	0,027
	163	0,021
	217	0,011
	272	0,013
326	0,012	



Z powyższych zależności współczynnika tarcia statycznego  $f$  od naprężenia  $\sigma$  można stwierdzić, że:

– wartość współczynnika tarcia statycznego  $f$  zależna jest od rodzaju zastosowanego smaru, temperatury  $t$ , wartości naprężeń  $\sigma$  oraz przede wszystkim kształtu powierzchni stykających się ze sobą,

– w obrębie jednej wartości temperatury dla  $t = 20^{\circ}\text{C}$  wartości współczynnika tarcia statycznego  $f$  dla powierzchni zakrzywionej  $r = 20000$  mm są tym niższe, im wyższe są wartości naprężeń  $\sigma$ . Natomiast wartości współczynnika tarcia statycznego  $f$  dla powierzchni płaskiej  $r = \infty$  są tym wyższe, im wyższe są wartości naprężeń  $\sigma$ .

Analiza warunków pracy smaru LOTOS SULFOCAL 302 w temperaturze pokojowej wynoszącej  $t = 20^{\circ}\text{C}$  wykazała, iż wartości współczynników tarcia statycznego  $f$  są niższe im mniejszy jest promień  $r$  zakrzywienia powierzchni stykających się ze sobą dla danych naprężeń  $\sigma$ . Dodatkowo, wartości współczynników tarcia statycznego  $f$  zależą od rodzaju powierzchni, jakimi obiekty trą o siebie, czyli pośrednio od technologii wykonania. W przypadku badań laboratoryjnych warstw poślizgowych, do eksperymentów użyto trzech betonowych płyt, w których oprócz piasku drobnego (frakcja 0 – 2 mm) zastosowano również kruszywo grube (frakcja 2 – 8 mm). W sytuacji testowania modelu powierzchni sferycznej, aby otrzymać identyczny promień wypukłości płyty górnej, na płycie dolnej zabetonowano drugą, górną płytę. Ponadto, aby uzyskać ściśle określony promień  $r$  krzywizny, górną powierzchnię dolnej betonowej płyty wykończono warstwą 10 mm zaprawy cementowej niezawierającej kruszywa, a jedynie piasek drobny (frakcja 0 – 2 mm). W efekcie uzyskano idealnie przylegające do siebie powierzchnie trące. Z tego względu można stwierdzić, iż najniższe wartości współczynników tarcia statycznego  $f$  w temperaturze równej  $20^{\circ}\text{C}$  zostają osiągnięte im mniejszy jest promień  $r$  zakrzywienia powierzchni stykających się ze sobą oraz im dokładniejsza jest technologia wykonania, pozwalająca osiągnąć ściślejsze przyleganie powierzchni trących. Najniższe wartości współczynnika tarcia statycznego  $f$  dla smaru LOTOS SULFOCAL 302, temperatury  $t = 20^{\circ}\text{C}$  i naprężeń  $\sigma$  odnotowano dla modelu powierzchni sferycznej o powierzchni styku w kształcie części sfery z wypukłością skierowaną ku dołowi. W związku z tym, tak odpowiednio przylegające do siebie powierzchnie trące o założonym promieniu zakrzywienia  $r$  są najbardziej odpowiednie do zastosowania jako zdublowany płytowy fundament żelbetowy z warstwą poślizgową pomiędzy jego obydwoma częściami, podczas rektyfikacji obiektów budowlanych poddanych wpływowi górnicyz.



## 9. ANALIZA NUMERYCZNA WARSTWY POŚLIZGOWEJ

Przeprowadzona we wcześniejszym rozdziale analiza warstw poślizgowych wykazała, że na wartości współczynnika tarcia statycznego  $f$  mają wpływ: rodzaj zastosowanego smaru w warstwie poślizgowej, temperatura oraz wartości naprężeń  $\sigma$ . Oprócz badań laboratoryjnych, obserwacji wpływu tych zmiennych dokonano także za pomocą analiz numerycznych w programie ABAQUS 2020. Modelowanie wykonano w przestrzeni trójwymiarowej (3D) z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES). Celem porównania wyników otrzymanych podczas analizy numerycznej z rzeczywistymi pomiarami zrealizowanymi w trakcie badań laboratoryjnych warstwy poślizgowej, odwzorowano sytuację na przykładzie warstwy poślizgowej zawierającej jeden wybrany smar Grupy LOTOS S. A. – SULFOCAL 302, który w temperaturze pokojowej wynoszącej 20°C, dla każdej wielkości naprężeń  $\sigma$  (100 kPa, 150 kPa, 200 kPa, 250 kPa i 300 kPa), wykazywał najmniejsze wartości współczynników tarcia. Modelowanie numeryczne sprowadziło się do wyznaczenia wielkości siły poziomej, która musi zadziałać na betonową płytę o wymiarach 500 x 500 x 50 mm, aby przesunąć ją poziomo o 10 mm, dla określonych wartości naprężeń  $\sigma$  i współczynnika tarcia statycznego  $f$  warstwy poślizgowej.

Wytypowana warstwa poślizgowa składała się z dwóch warstw folii budowlanej PE o grubości 0,3 mm każda, pomiędzy którymi była warstwa badanego smaru LOTOS SULFOCAL 302. Warstwa poślizgowa znajdowała się między betonowymi płytami środkową i dolną oraz środkową i górną, ponieważ badania laboratoryjne wykonywano na trzech betonowych płytach o wymiarach 500 x 500 x 50 mm ułożonych jedna na drugiej. Eksperyment przeprowadzono w temperaturze równej 20°C. Tak przygotowane betonowe płyty poddano obciążeniu pionowemu oraz środkową betonową płytę – obciążeniu poziomemu. Przesunięcie poziome środkowej płyty wynosiło każdorazowo 10 mm. Wartość przyłożonej siły pionowej była równa 25 kN, co odpowiadało naprężeniom wywieranym na podłoże przez średniej wielkości budynek mieszkalny jednorodzinny 100 kPa. Dla tak przyjętych założeń, wartość siły poziomej powodującej przesuw poziomy środkowej płyty wyniosła 1,864 kN, natomiast współczynnik tarcia statycznego był równy 0,037.

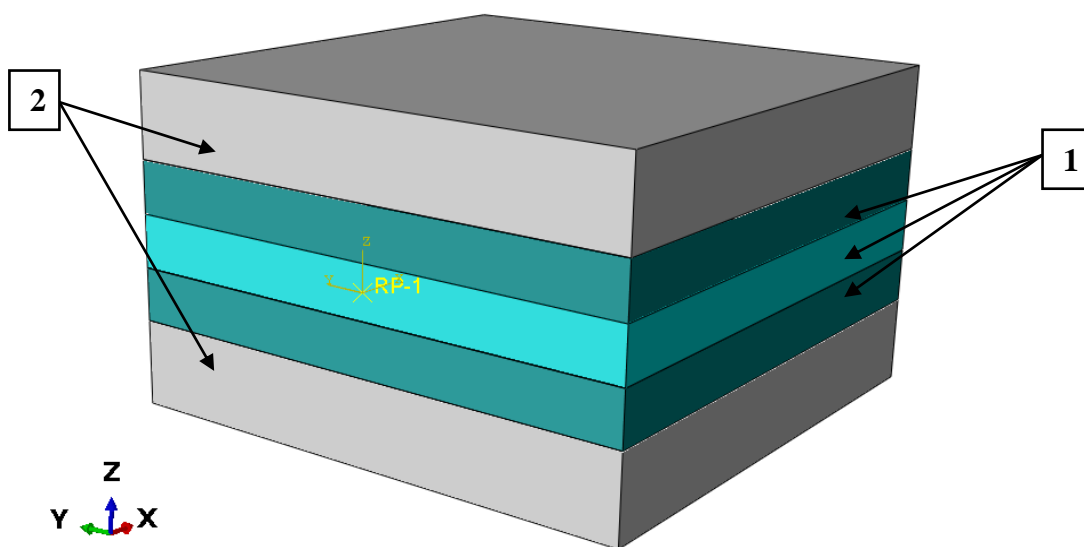
### 9.1. Opis analizy numerycznej warstwy poślizgowej

Sporządzenie modelu numerycznego rozpoczęto od nadania mu właściwych wymiarów, łącznie ze zróżnicowaniem na poszczególne elementy, czyli trzy betonowe płyty, pomiędzy którymi znajdowała się warstwa poślizgowa oraz dwie sztywne płyty oporowe. Kolejno, każdemu elementowi modelu nadano parametry materiałowe, a także zadano

siatkowanie. Następnie określono warunki brzegowe oraz zdefiniowano warstwę kontaktową na stykach betonowych płyt środkowej i dolnej oraz środkowej i górnej. Ostatecznie założono wartość przesunięcia poziomego środkowej płyty, wielkość przyłożonej siły pionowej oraz wymiar współczynnika tarcia statycznego warstw poślizgowych.

### 9.1.1. Geometria modelu

Na geometrię modelu składały się trzy bryły stanowiące betonowe płyty o wymiarach 500 x 500 x 50 mm z dwoma bryłami będącymi sztywnymi stalowymi płytami oporowymi o wymiarach 500 x 500 x 100 mm (rys. 9-1).



Rys. 9-1. Geometria modelu: płyty betonowe (1) oraz stalowe płyty oporowe (2)

### 9.1.2. Parametry materiałowe

Bryły odpowiadające płytom betonowym i stalowym zamodelowano jako izotropowe liniowo – sprężyste i zadano trzem wewnętrznym elementom parametry materiałowe betonu. Natomiast dwóm skrajnym płytom oporowym – parametry materiałowe stali (tablica 9-1).

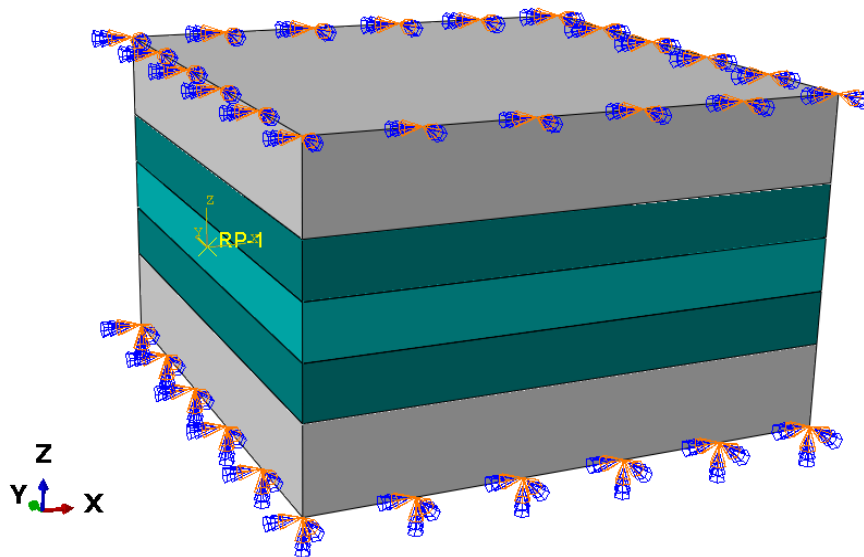
Tablica 9-1. Wartości parametrów materiałowych

Nazwa materiału	Parametry materiału		
	Ciężar objętościowy $\gamma$ , kN/m <sup>3</sup>	Moduł Younga $E$ , GPa	Współczynnik Poissona $\nu$ , –
<i>concrete</i>	25	33	0,2
<i>steel</i>	78,5	210	0,3

### 9.1.3. Warunki brzegowe

Sformułowanie warunków brzegowych modelu sprowadziło się do wprowadzenia dwóch podpór powierzchniowych na płytach oporowych górnej oraz dolnej. Na płycie oporowej dolnej zablokowano przemieszczenia, a także obroty w trzech kierunkach. Natomiast na płycie oporowej górnej zapewniono swobodę przemieszczenia i obrotu

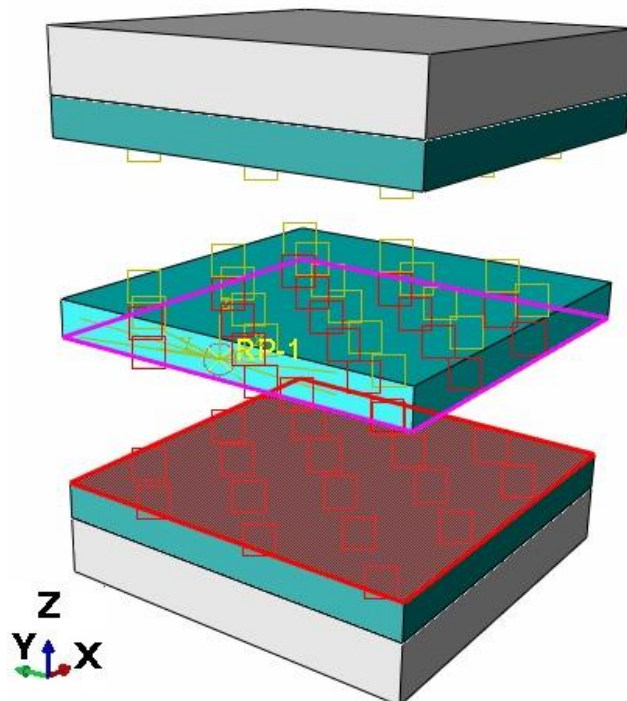
w kierunku pionowym, aby więzy nie odebrały możliwości przyłożenia siły pionowej do tej płyty – aby siła nie została przejęta przez podpory pionowe. (rys. 9-2).



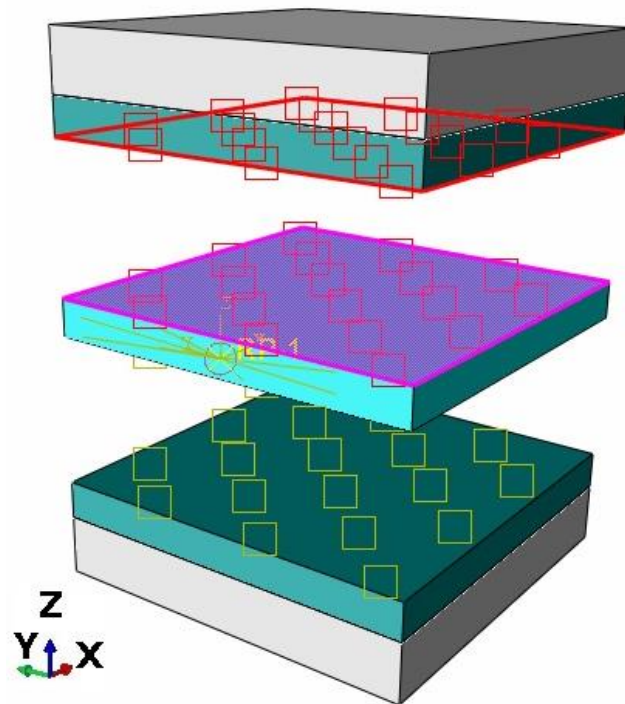
Rys. 9-2. Warunki brzegowe modelu

#### 9.1.4. Warunki kontaktowe

Warunki kontaktowe typu *surface to surface* zadano w modelu na stykach betonowych płyt środkowej i dolnej oraz środkowej i górnej (rys. 9-3 i rys. 9-4) oraz wprowadzono wartość współczynnika tarcia statycznego warstw poślizgowych.



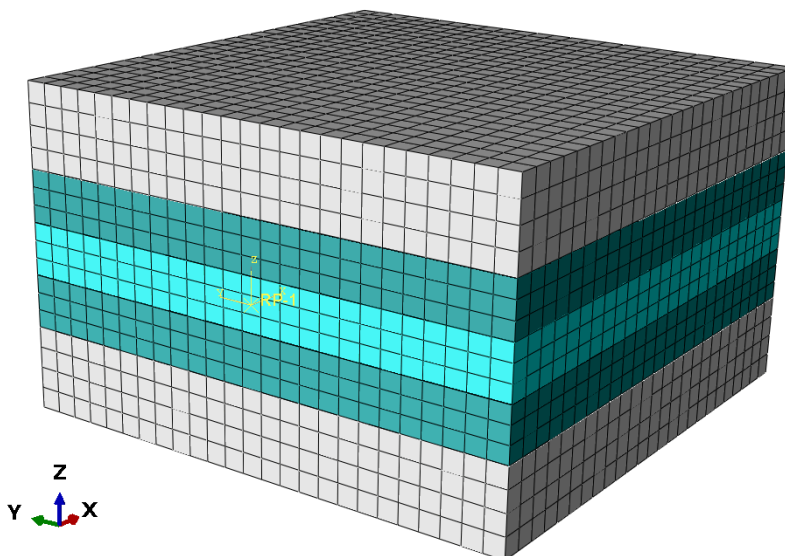
Rys. 9-3. Warunek kontaktowy na styku płyty środkowej i dolnej modelu



Rys. 9-4. Warunek kontaktowy na styku płyty środkowej i górnej modelu

#### 9.1.5. Siatkowanie

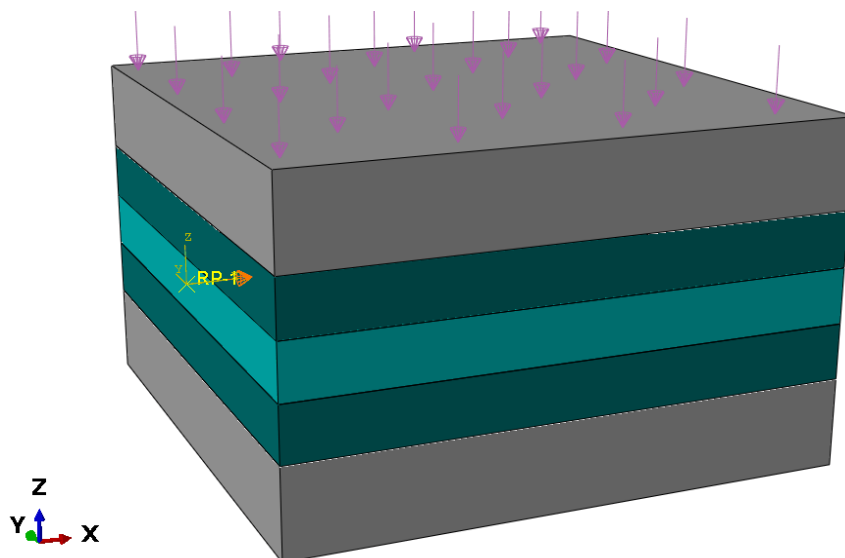
Dla potrzeb analizy numerycznej modelu przyjęto siatkowanie kwadratowe o boku oczka równym 25 mm (rys. 9-5).



Rys. 9-5. Siatkowanie modelu

### 9.1.6. Zdefiniowane obciążenia

W tak przygotowanym modelu numerycznym zdefiniowano obciążenia. Zamodelowane trzy betonowe płyty poddano równomiernie rozłożonemu obciążeniu pionowemu *pressure* o wartości 25 kN, 37,5 kN, 50 kN, 62,5 kN oraz 75 kN co odpowiada naprężeniom wywieranym na płyty 100 kPa, 150 kPa, 200 kPa, 250 kPa i 300 kPa (rys. 9-6).



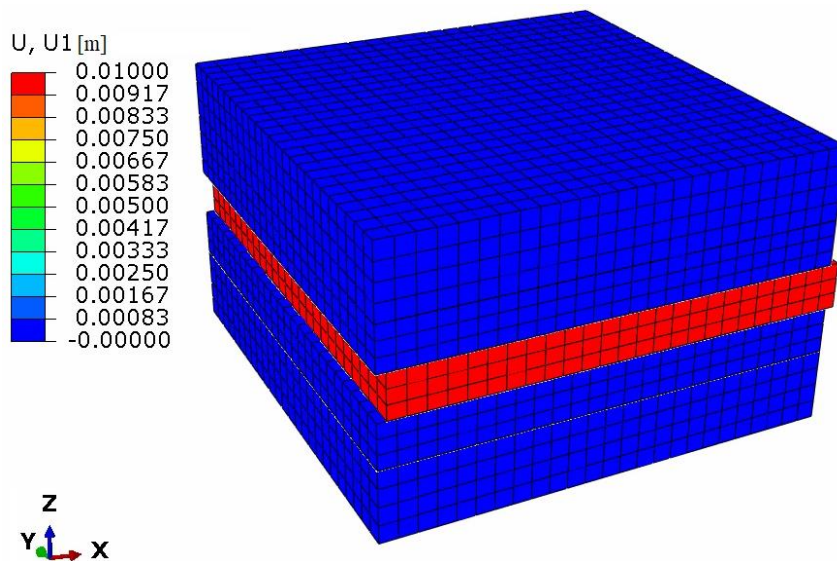
Rys. 9-6. Przyłożone równomiernie rozłożone obciążenie pionowe modelu

Natomiast w kolejnym kroku, po zadaniu równomiernie rozłożonego obciążenia pionowego, środkowej betonowej płycie założono wymuszenie przemieszczenia poziomego, którego wartość wynosiła 10 mm. Miejscem przyłożenia siły poziomej do środkowej betonowej płyty był umieszczony centralnie na jej bocznej płaszczyźnie punkt *reference point*, który jest więzłem kinetycznym łączącym całą powierzchnię płyty od czoła.

## 9.2. Wyniki analizy numerycznej warstwy poślizgowej

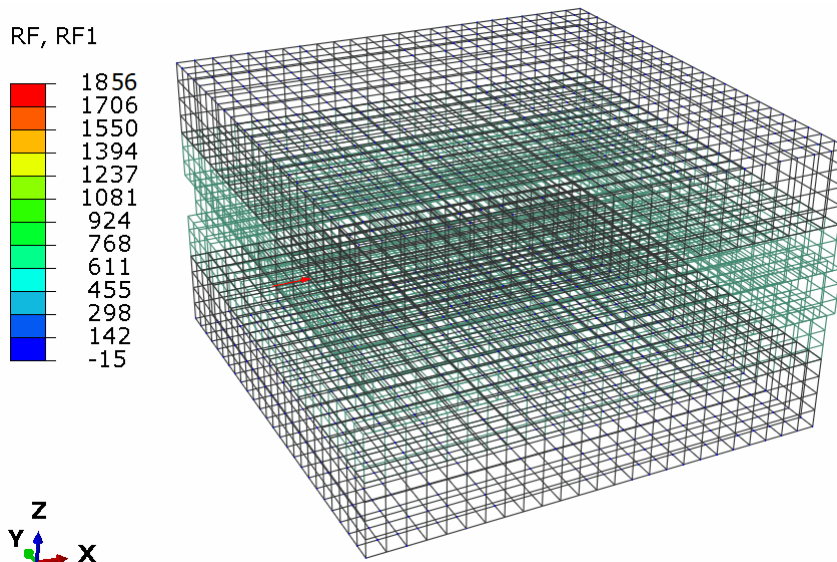
Analizę numeryczną modelu warstwy poślizgowej przeprowadzono jako geometrycznie nieliniową, ponieważ właściwości obciążenia poziomego znacznie się zmieniają w wyniku poziomego przemieszczenia środkowej betonowej płyty. Ponadto, do przeprowadzenia obliczeń wykorzystano solver typu *implicit* opierający się na iteracyjnej metodzie obliczania przemieszczeń w przyroście czasu. W celu uzyskania żądanych wyników w postaci siły poziomej powodującej przesuw poziomy środkowej płyty, zastosowano metodę *arc – length method* (ALM), gdyż dzięki niej możliwe było wprowadzenie parametru ograniczającego wartość przyrostu przemieszczenia poziomego środkowej płyty, które wynosiło 10 mm.

W pierwszym etapie analizy wyników obliczeń numerycznych sprawdzono wielkość zadanego poziomego przemieszczenia środkowej betonowej płyty (rys. 9-7)



Rys. 9-7. Wyniki przemieszczenia poziomego środkowej betonowej płyty modelu

Po pozytywnym wyniku pierwszego etapu analizy, czyli po stwierdzeniu, iż maksymalne przemieszczenie poziome środkowej betonowej płyty wyniosło 10 mm, przystąpiono do kolejnego etapu analizy wyników obliczeń numerycznych. W drugim kroku odczytano wartość siły poziomej powodującej przesuw poziomy środkowej płyty (rys. 9-8) i porównano ją z rezultatami uzyskanymi podczas przeprowadzania badań laboratoryjnych warstwy poślizgowej.



Rys. 9-8. Wyniki wartości siły poziomej powodującej przesuw poziomy środkowej betonowej płyty modelu

Wyniki w postaci wartości siły poziomej powodującej przesuw poziomy środkowej betonowej płyty z podziałem na uzyskane z badań laboratoryjnych oraz z analizy numerycznej warstwy poślizgowej przedstawiono w tabelicy 9-2.

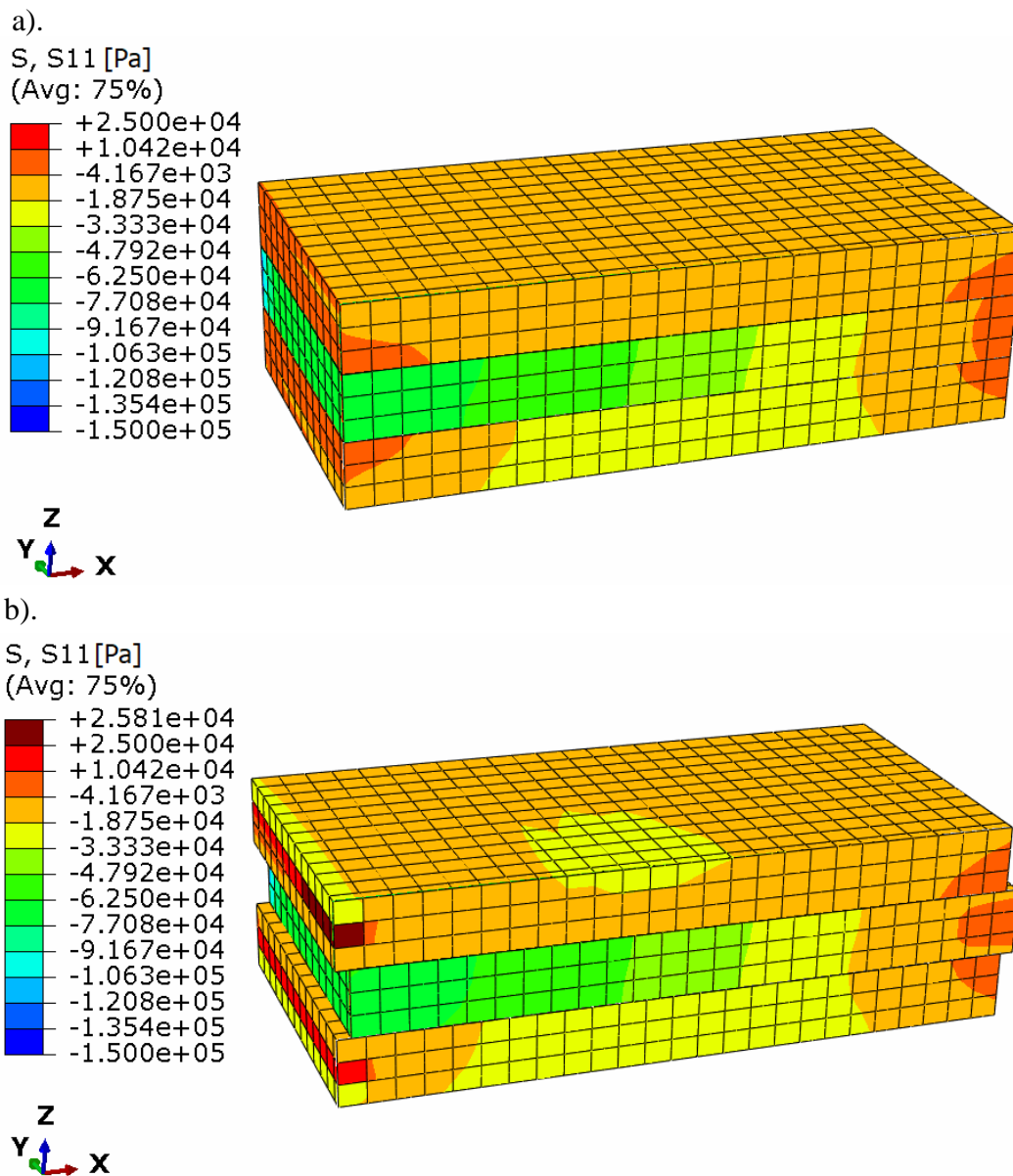


Tablica 9-2. Wartości siły poziomej powodującej przesuw poziomy środkowej betonowej płyty

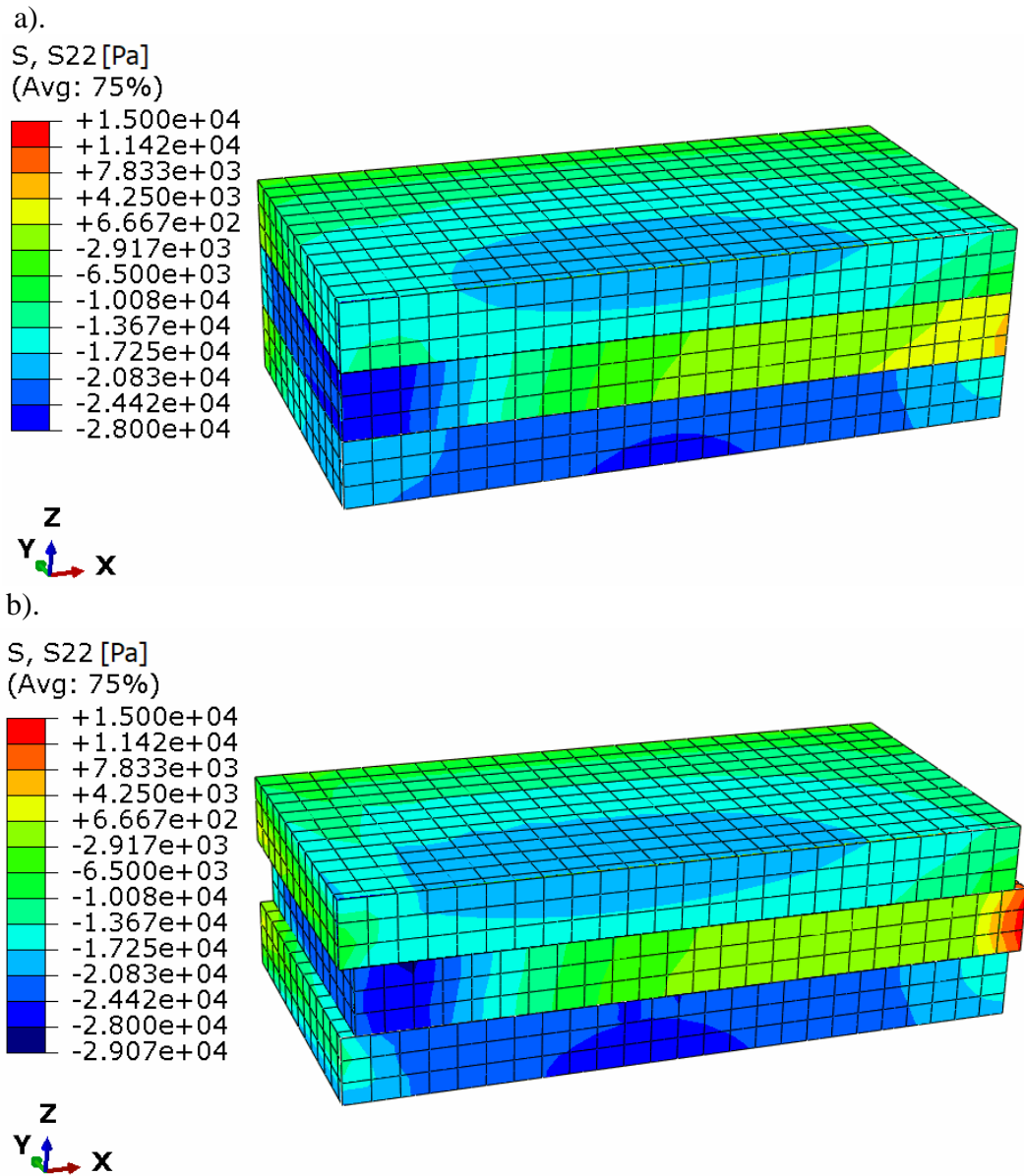
Naprężenia $\sigma$ , kPa	Rodzaj analizy	Współczynnik tarcia $f$ , –	Siła pozioma $N$ , kN	Różnica $\Delta N$ , kN
100	modelowanie numeryczne	0,038	1,856	0,008
	badania laboratoryjne	0,037	1,864	
150	modelowanie numeryczne	0,048	3,602	0,261
	badania laboratoryjne	0,052	3,863	
200	modelowanie numeryczne	0,056	5,511	0,365
	badania laboratoryjne	0,059	5,876	
250	modelowanie numeryczne	0,061	7,564	1,381
	badania laboratoryjne	0,050	6,183	
300	modelowanie numeryczne	0,066	9,917	1,097
	badania laboratoryjne	0,074	11,014	

Na podstawie powyższych otrzymanych danych można stwierdzić, że dla przyjętych założeń, czyli dla określonych wartości naprężeń  $\sigma$  i współczynnika tarcia statycznego  $f$  warstwy poślizgowej, analiza numeryczna wykazuje bardzo dużą zgodność uzyskanej wielkości siły poziomej z przeprowadzonymi badaniami laboratoryjnymi. Modelowanie numeryczne pracy warstwy poślizgowej zawierającej smar LOTOS SULFOCAL 302 w temperaturze wynoszącej  $t = 20^{\circ}\text{C}$  i dla naprężeń  $\sigma$  równych 100 kPa, 150 kPa, 200 kPa, 250 kPa i 300 kPa wykazało, iż z wysoką dokładnością da się wyznaczyć wartość siły poziomej niezbędnej do przemieszczenia betonowej płyty o konkretny wymiar, znając współczynnik tarcia statycznego  $f$  warstwy poślizgowej.

Uzyskane rezultaty w formie rozkładu naprężeń głównych w elementach modelu na początku oraz na końcu czasu trwania przyłożenia obciążenia przedstawiono na rysunkach 9-9, 9-10 i 9-11.



Rys. 9-9. Rozkład naprężeń głównych równoległych do osi X w elementach modelu a). na początku oraz b). na końcu czasu trwania przyłożenia obciążenia

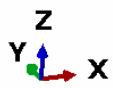
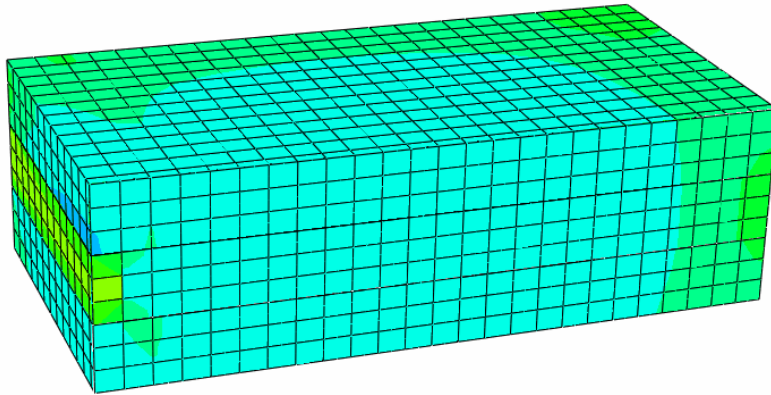
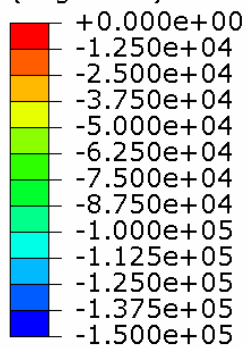


Rys. 9-10. Rozkład naprężeń głównych równoległych do osi Y w elementach modelu a). na początku oraz b). na końcu czasu trwania przyłożenia obciążenia

a).

S, S33 [Pa]

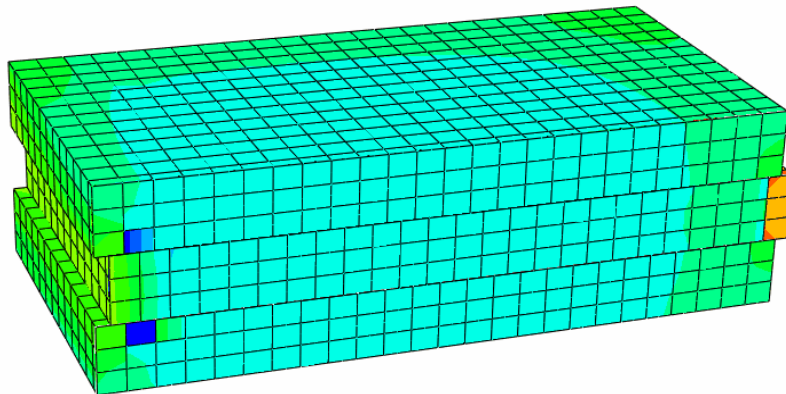
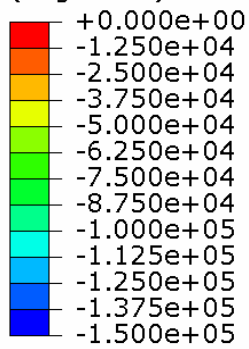
(Avg: 75%)



b).

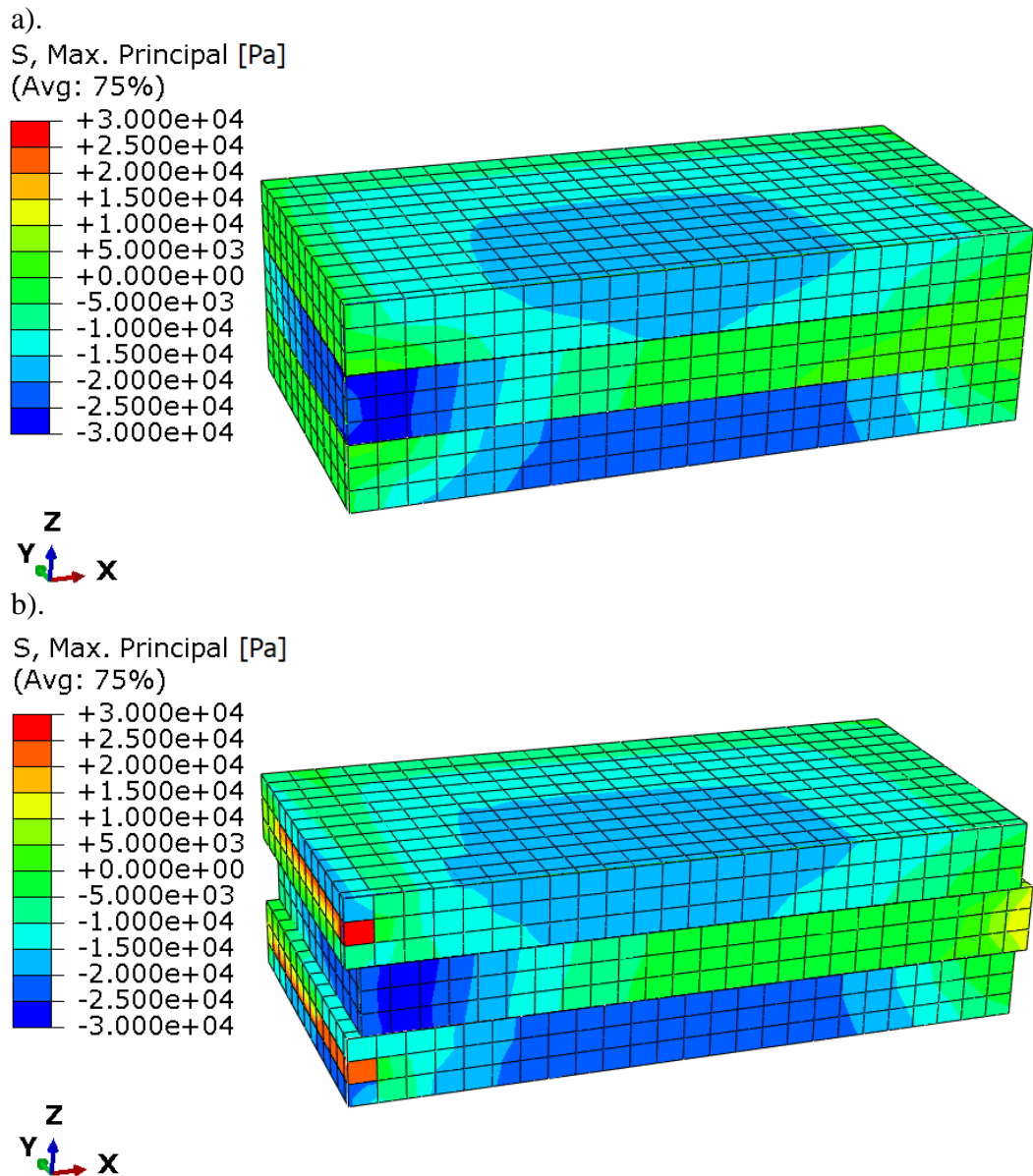
S, S33 [Pa]

(Avg: 75%)



Rys. 9-11. Rozkład naprężeń głównych równoległych do osi Z w elementach modelu a). na początku oraz b). na końcu czasu trwania przyłożenia obciążenia

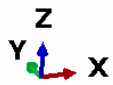
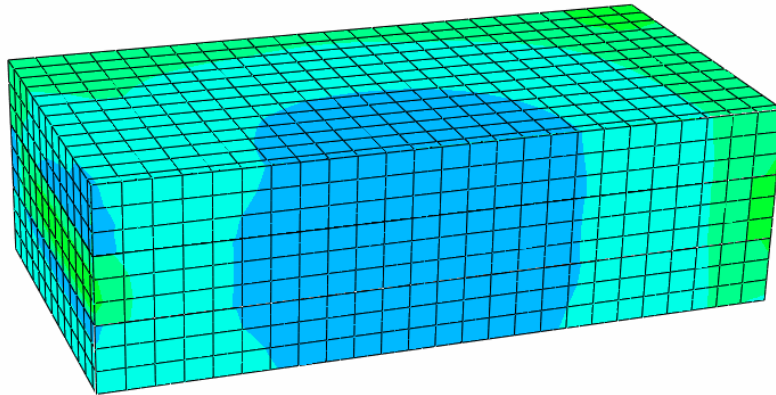
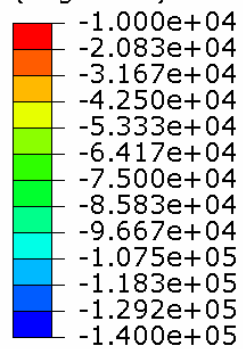
Otrzymane wyniki w formie rozkładu naprężeń normalnych w elementach modelu na początku oraz na końcu czasu trwania przyłożenia obciążenia ukazano na rysunkach 9-12 oraz 9-13.



Rys. 9-12. Rozkład naprężeń normalnych maksymalnych w elementach modelu a). na początku oraz b). na końcu czasu trwania przyłożenia obciążenia

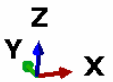
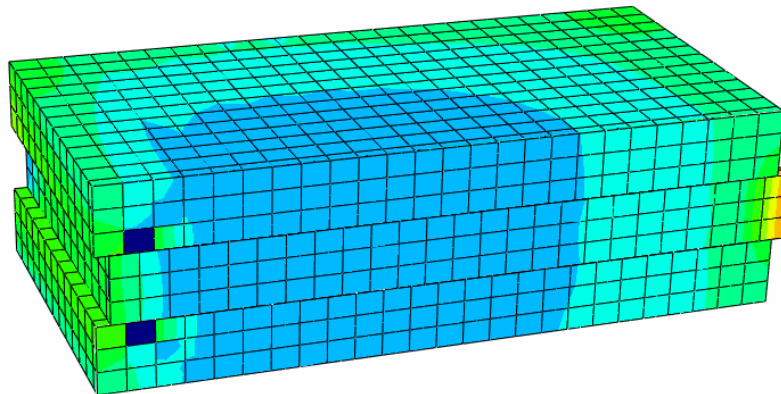
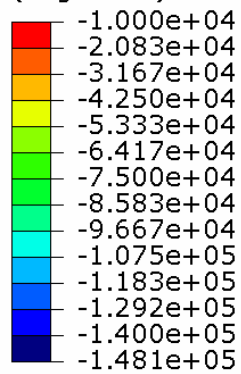
a).

S, Min. Principal [Pa]  
(Avg: 75%)



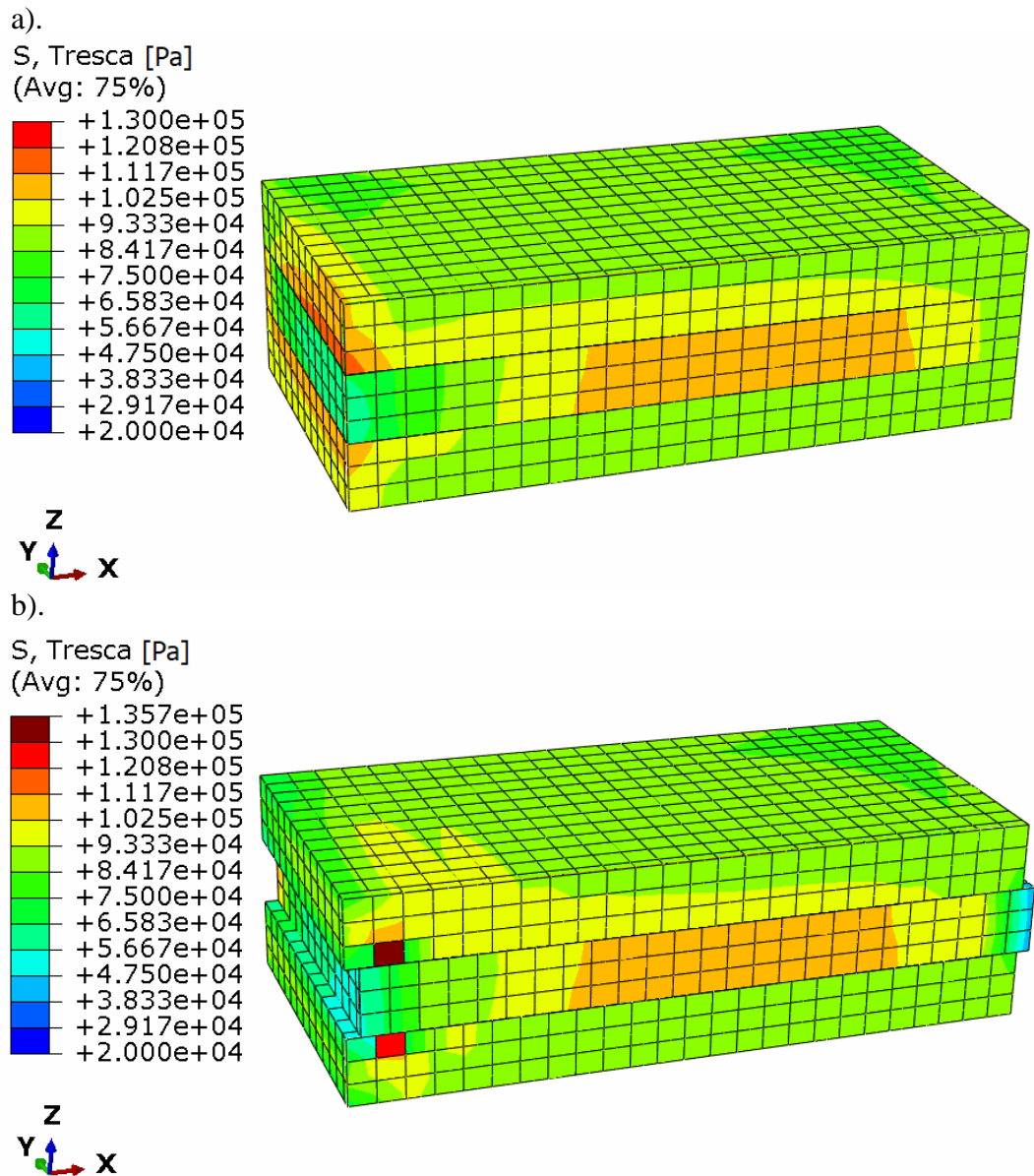
b).

S, Min. Principal [Pa]  
(Avg: 75%)



Rys. 9-13. Rozkład naprężeń normalnych minimalnych w elementach modelu a). na początku oraz b). na końcu czasu trwania przyłożenia obciążenia

Uzyskane rezultaty w formie rozkładu naprężeń zredukowanych w elementach modelu na początku oraz na końcu czasu trwania przyłożenia obciążenia przedstawiono na rysunkach 9-14 i 9-15.

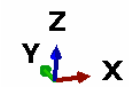
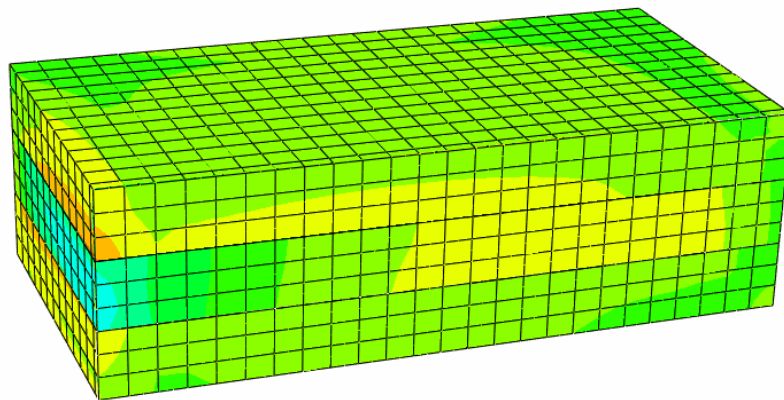
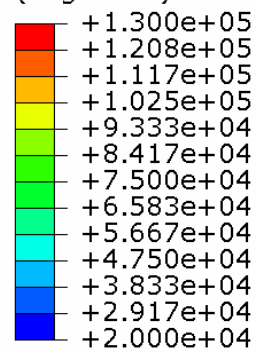


Rys. 9-14. Rozkład naprężeń zredukowanych Coulomba – Tresci – Guesta w elementach modelu  
a). na początku oraz b). na końcu czasu trwania przyłożenia obciążenia

a).

S, Mises [Pa]

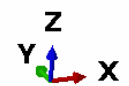
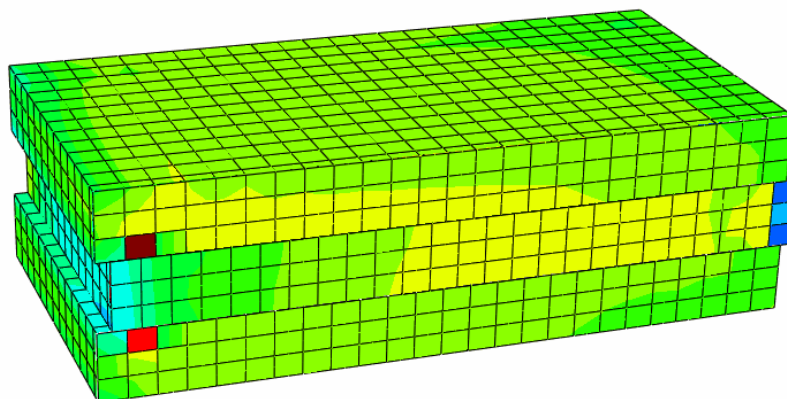
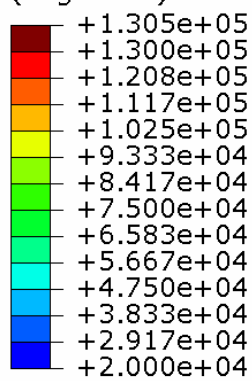
(Avg: 75%)



b).

S, Mises [Pa]

(Avg: 75%)



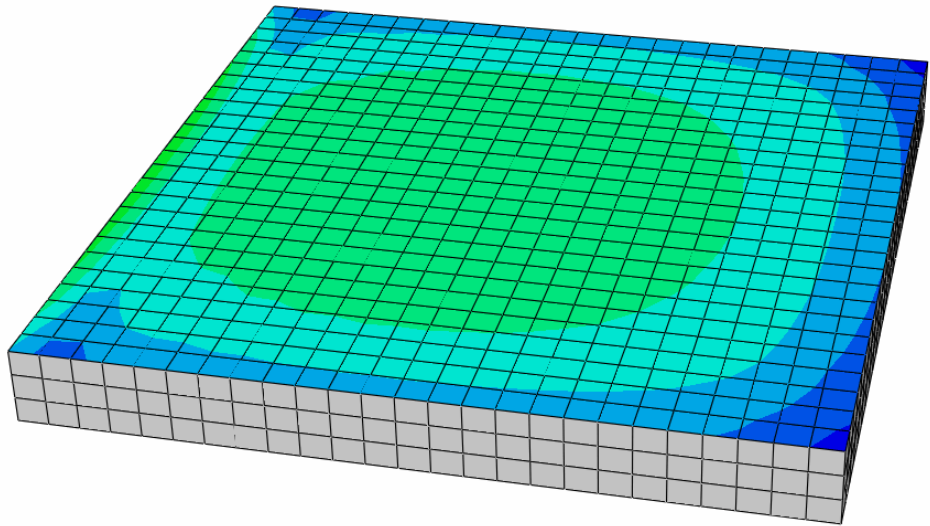
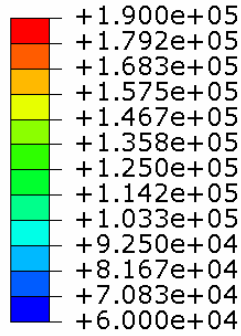
Rys. 9-15. Rozkład naprężeń zredukowanych Hubera – Misesa – Hencky’ego w elementach modelu  
a). na początku oraz b). na końcu czasu trwania przyłożenia obciążenia



Natomiast otrzymane wyniki w formie rozkładu naprężeń ściskających jak też ścinających na stykach zamodelowanych betonowych płyt środkowej i dolnej oraz środkowej i górnej, na początku, a także na końcu czasu trwania przyłożenia obciążenia ukazano na rysunkach 9-16 oraz 9-17.

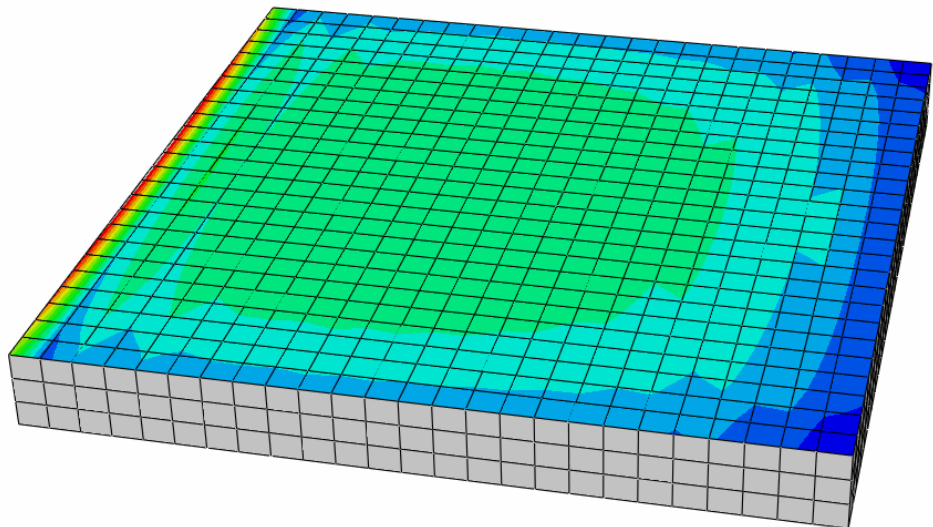
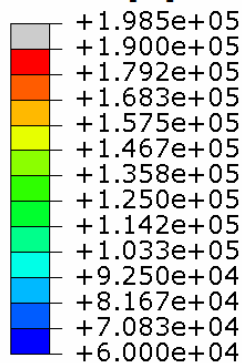
a).

CPRESS [Pa]



b).

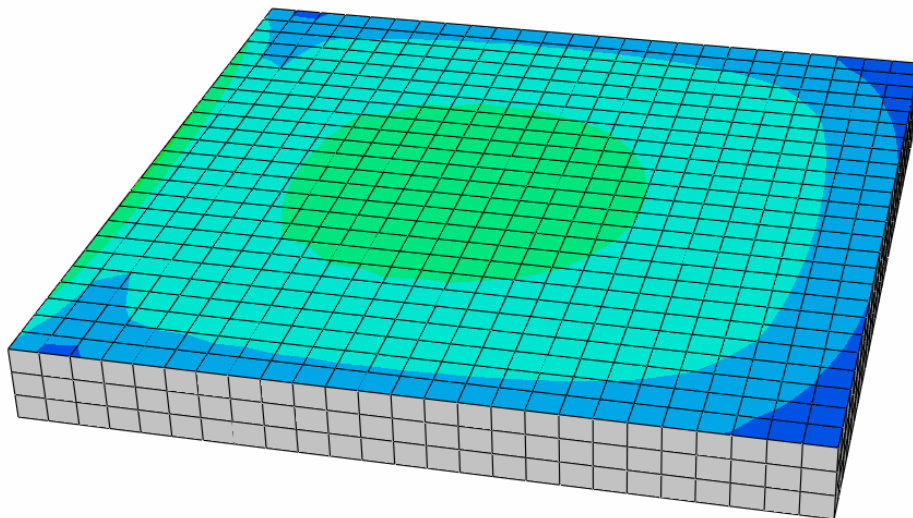
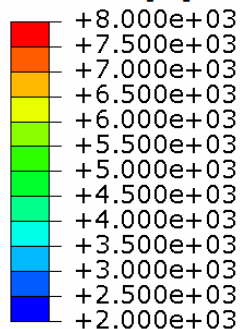
CPRESS [Pa]



Rys. 9-16. Rozkład naprężeń ściskających na stykach zamodelowanych betonowych płyt a). na początku oraz b). na końcu czasu trwania przyłożenia obciążenia

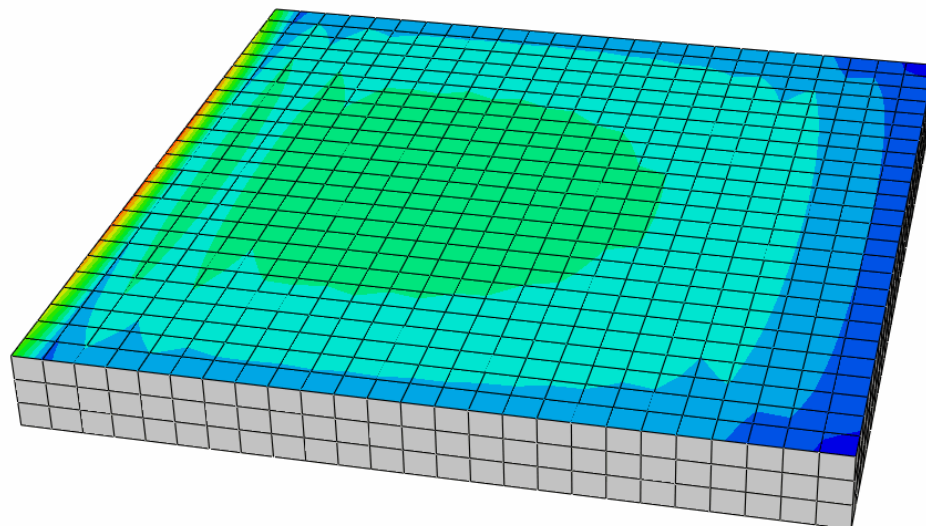
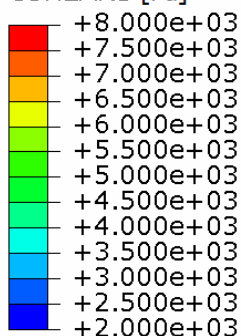
a).

CSHEAR1 [Pa]



b).

CSHEAR1 [Pa]



Rys. 9-17. Rozkład naprężeń ścinających na stykach zamodelowanych betonowych płyt a). na początku oraz b). na końcu czasu trwania przyłożenia obciążenia

Analizując otrzymane wyniki rozkładu naprężeń głównych, normalnych, a także zredukowanych w trzech betonowych płytach oraz na ich stykach, na powierzchniach płaskich można zauważyć nieznaczny wpływ samego obciążenia pionowego. Natomiast znacznie większe naprężenia obserwuje się na płaszczyznach czołowych, w miejscu przyłożenia siły poziomej.

W związku z tym, opracowane analizy numeryczne pracy warstwy poślizgowej na styku pomiędzy obydwoema częściami betonowych płyt umożliwiają symulację zachowania różnych, odpowiednio wykształtowanych warstw poślizgowych praktycznie bez konieczności przeprowadzania badań laboratoryjnych.

## 10. ANALIZA NUMERYCZNA MODELU POWIERZCHNI SFERYCZNEJ

Przeprowadzona we wcześniejszym rozdziale analiza modelu powierzchni sferycznej wykazała, że na wartości współczynnika tarcia statycznego  $f$  mają wpływ: rodzaj zastosowanego smaru w warstwie poślizgowej, temperatura, wartości naprężeń  $\sigma$  oraz przede wszystkim kształt powierzchni stykających się ze sobą. Poza badaniami laboratoryjnymi, dokonano także analizy numerycznej w programie ABAQUS 2020, jak powyższe zmienne wpływają na wartości współczynnika tarcia. Model numeryczny opracowano w przestrzeni trójwymiarowej (3D) wykorzystując metodę elementów skończonych (MES). W celu porównania wyników uzyskanych w trakcie analizy numerycznej z pomiarami wykonanymi podczas badań laboratoryjnych modelu powierzchni sferycznej, odwzorowano rzeczywiste warunki na przykładzie warstwy poślizgowej zawierającej smar Grupy LOTOS S. A. – SULFOCAL 302, który w temperaturze pokojowej równej 20°C, dla każdej wielkości naprężeń  $\sigma$  (109 kPa, 163 kPa, 217 kPa, 272 kPa i 326 kPa), wykazywał najmniejsze wartości współczynników tarcia. Wykorzystując modelowanie numeryczne, wyznaczono wielkości siły poziomej działającej na betonową płytę o wymiarach 960 x 960 x 100 mm i powierzchni równej 0,92 m<sup>2</sup>, z dolną powierzchnią styku w kształcie części sfery i wypukłością skierowaną ku dołowi, aby przesunąć ją poziomo o 20 mm, dla zadanych wartości naprężeń  $\sigma$  i współczynnika tarcia statycznego  $f$  warstwy poślizgowej.

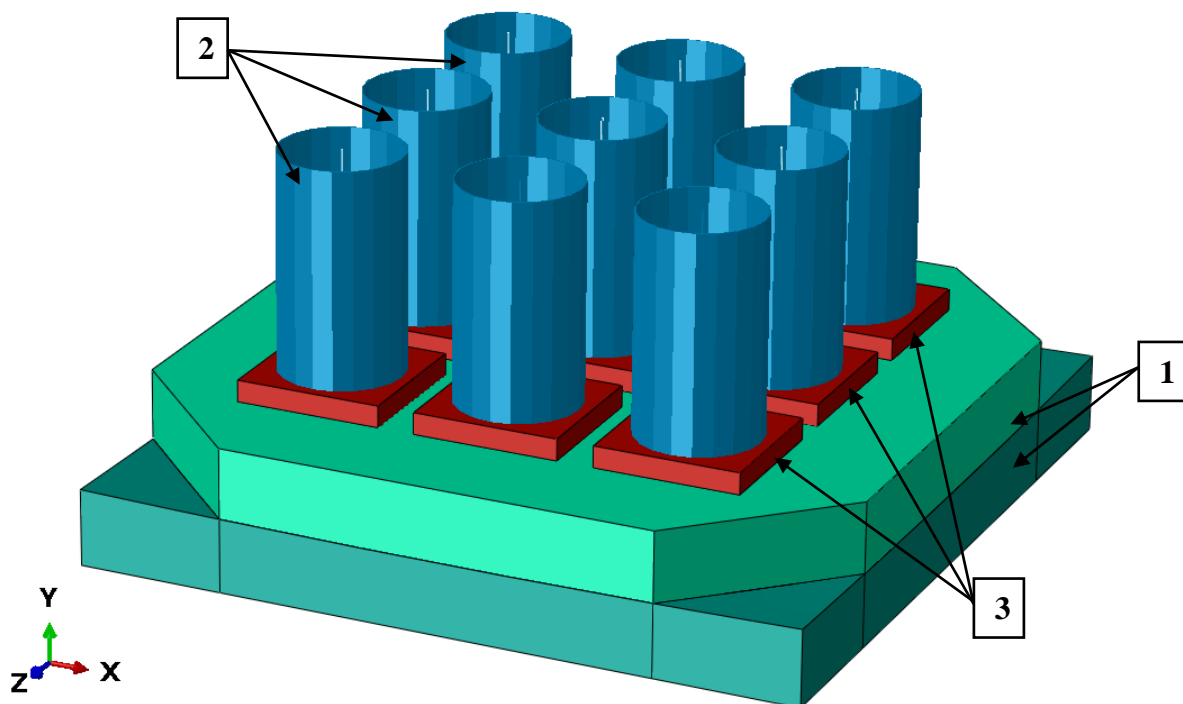
Wybrana warstwa poślizgowa składała się z dwóch warstw folii budowlanej PE, każda o grubości 0,3 mm, pomiędzy którymi była warstwa badanego smaru LOTOS SULFOCAL 302. Warstwa poślizgowa znajdowała się między dolną i górną betonową płytą, z racji tego, iż eksperyment laboratoryjny przeprowadzono na dwóch betonowych płytach o wymiarach 1000 x 1000 x 100 mm ułożonych jedna na drugiej, a płyta górna została wykonana ze wszystkimi narożnikami ściętymi o wymiarach 200 x 200 mm i powierzchni równej 0,92 m<sup>2</sup>. Powierzchnia styku tychże płyt miała kształt części sfery z wypukłością skierowaną ku dołowi o promieniu równym 20000 mm. Badania wykonano w temperaturze wynoszącej 20°C. Tak ustawione betonowe płyty obciążono siłą pionową oraz górną betonową płytę – siłą poziomą. Przesunięcie poziome górnej płyty wynosiło za każdym razem 20 mm. Wartość przyłożonej siły pionowej była równa 100 kN, co odpowiadało naprężeniom wywieranym na podłoże przez średniej wielkości budynek mieszkalny jednorodzinny 109 kPa. Dla tak obranych założeń, wielkość siły poziomej powodującej przesuw poziomy górnej płyty wyniosła 2,668 kN, natomiast współczynnik tarcia statycznego był równy 0,027.

### 10.1. Opis analizy numerycznej modelu powierzchni sferycznej

Stworzenie modelu numerycznego rozpoczęto od nadania mu odpowiednich wymiarów, jednocześnie ze zróżnicowaniem na poszczególne elementy, czyli dwie betonowe płyty o powierzchni styku w kształcie części sfery z wypukłością skierowaną ku dołowi, pomiędzy którymi znajdowała się warstwa poślizgowa. Następnie, każdemu elementowi modelu nadano parametry materiałowe, a także założono siatkowanie. Kolejno, określono warunki brzegowe oraz zdefiniowano warstwę kontaktową na styku betonowych płyt. Ostatecznie zadano wartość przesunięcia poziomego górnej płyty, wielkość przyłożonej siły pionowej oraz wymiar współczynnika tarcia statycznego warstw poślizgowych.

#### 10.1.1. Geometria modelu

Na geometrię modelu składały się: dwie bryły stanowiące betonowe płyty o wymiarach 1000 x 1000 x 100 mm i powierzchni równej 0,92 m<sup>2</sup> z płaszczyzną styku w kształcie części sfery i wypukłością skierowaną ku dołowi o promieniu równym 20000 mm (1), dziewięć brył ukształtowanych jako rury okrągłe odwzorowujących sprężyny walcowe (2) oraz dziewięć stalowych podkładek znajdujących się pomiędzy górną betonową płytą, a sprężynami (3). Odzwierciedlając dokładnie elementy wykonane w trakcie badań laboratoryjnych, płytę górną zamodelowano ze wszystkimi narożnikami ściętymi o wymiarach 200 x 200 mm (rys. 10-1).



Rys. 10-1. Geometria modelu: płyty betonowe (1), stalowe sprężyny walcowe (2) oraz podkładki (3)

#### 10.1.2. Parametry materiałowe

Bryły odpowiadające betonowym płytom zamodelowano jako izotropowe liniowo – sprężyste i zadano tym dwóm elementom płytowym parametry materiałowe betonu.

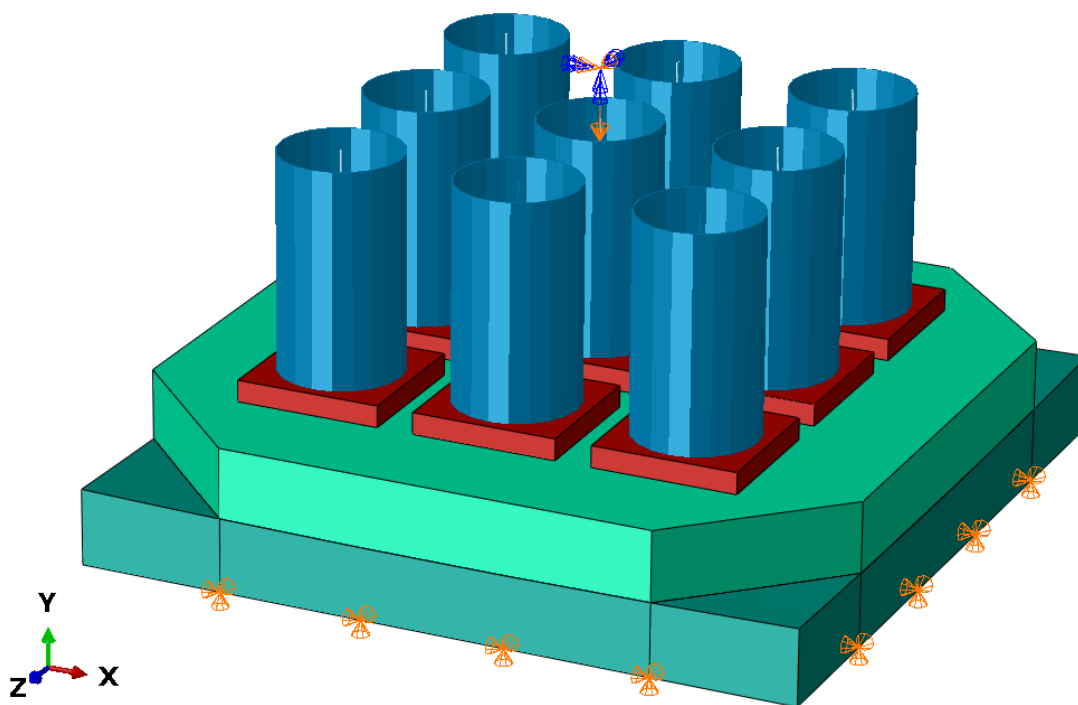
Natomiast dziewięciu rurom okrągłym oraz podkładkom – parametry materiałowe stali (tablica 10-1).

Tablica 10-1. Wartości parametrów materiałowych

Nazwa materiału	Parametry materiału		
	Ciężar objętościowy $\gamma$ , kN/m <sup>3</sup>	Moduł Younga $E$ , GPa	Współczynnik Poissona $\nu$ , –
<i>concrete</i>	25	33	0,2
<i>steel</i>	78,5	210	0,3
<i>wire</i>	78,5	210	0,3

### 10.1.3. Warunki brzegowe

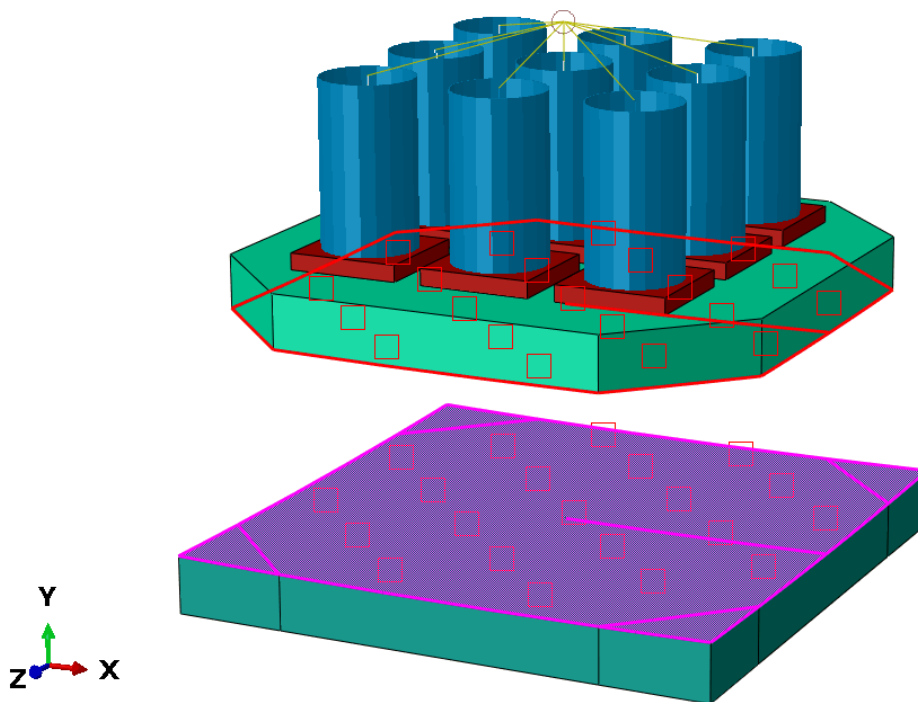
Zdefiniowanie warunków brzegowych modelu sprowadziło się do wprowadzenia podpory powierzchniowej na płycie dolnej, a także punktowej w więźie kinetycznym łączącym wszystkie zamodelowane sprężyny walcowe od czoła oraz zablokowano ich przemieszczenia i obroty w trzech kierunkach (rys. 10-2).



Rys. 10-2. Warunki brzegowe modelu

### 10.1.4. Warunki kontaktowe

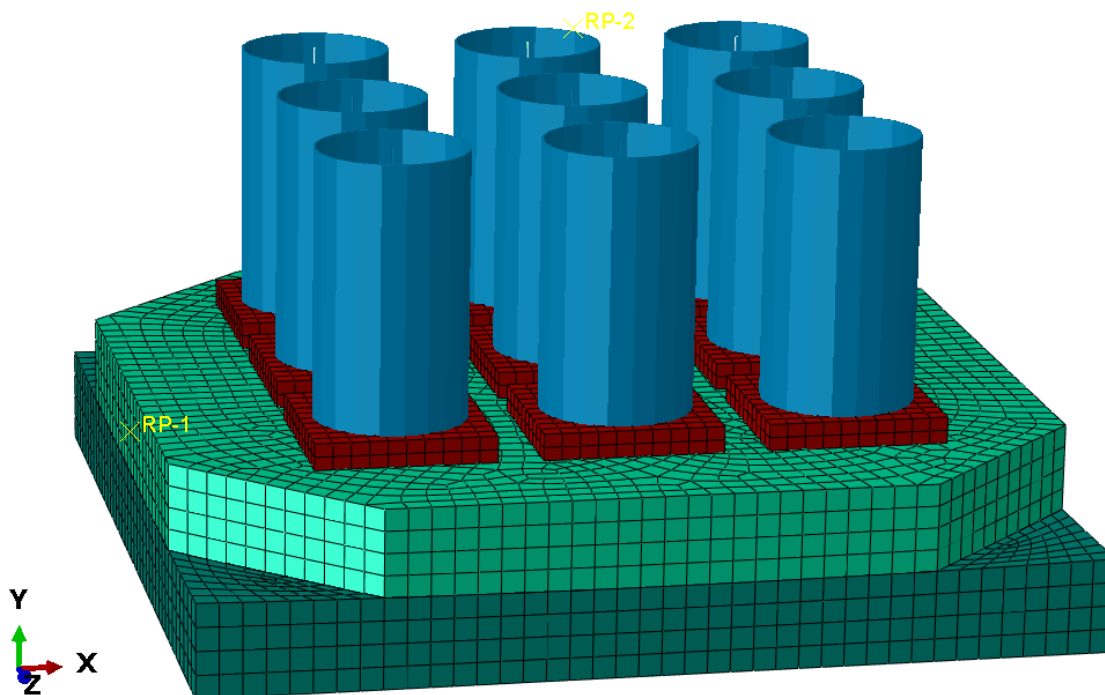
Warunki kontaktowe typu *surface to surface* zadano w modelu na styku betonowych płyt górnej i dolnej (rys. 10-3) oraz wprowadzono wartość współczynnika tarcia statycznego  $f$  warstw poślizgowych.



Rys. 10-3. Warunek kontaktowy na styku płyty górnej i dolnej modelu

#### 10.1.5. Siatkowanie

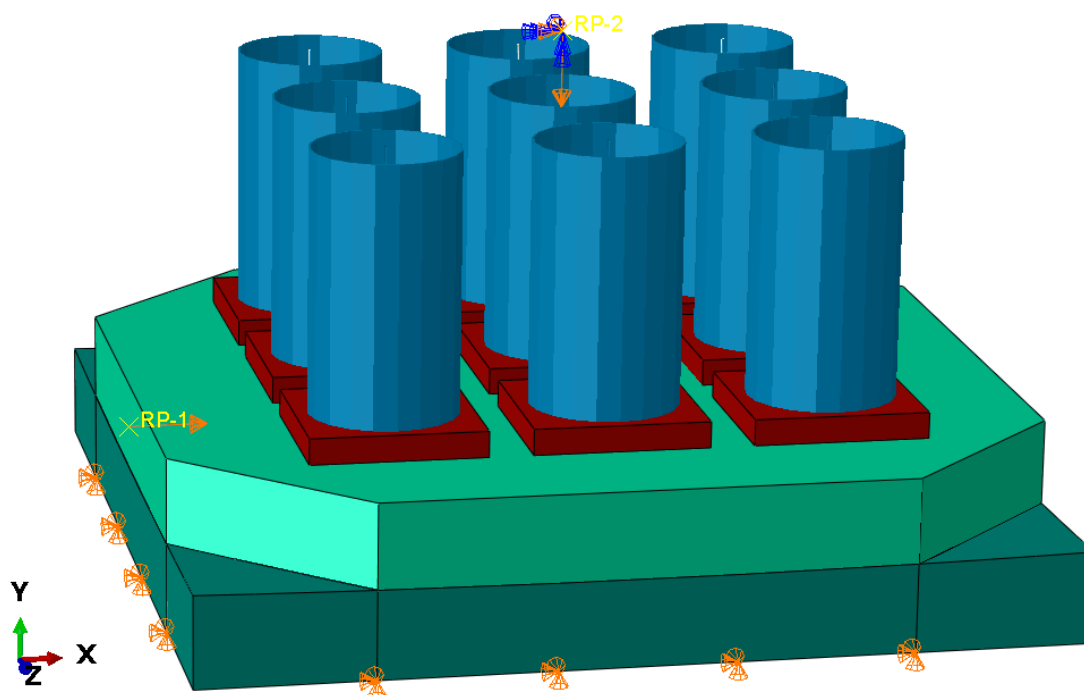
Na potrzeby analizy numerycznej modelu przyjęto siatkowanie kwadratowe o boku oczka równym 25 mm (rys. 10-4).



Rys. 10-4. Siatkowanie modelu

### 10.1.6. Zdefiniowane obciążenia

W tak sporządzonym modelu numerycznym zadano obciążenia. Zamodelowane dwie betonowe płyty poddano równomiernie rozłożonemu obciążeniu pionowemu *pressure* poprzez układ dziewięciu stalowych rur okrągłych i podkładek, o wartości 100 kN, 150 kN, 200 kN, 250 kN oraz 300 kN co odpowiada naprężeniom wywieranym na płyty 109 kPa, 163 kPa, 217 kPa, 272 kPa i 326 kPa. Siłę pionową do górnej betonowej płyty przyłożono w centralnie umieszczonym punkcie *reference point* – 2 znajdującym się na płaszczyźnie czołowej stalowych sprężyn, będącym więzem kinetycznym łączącym całą tą powierzchnię (rys. 10-5).



Rys. 10-5. Przyłożone równomiernie rozłożone obciążenie pionowe modelu

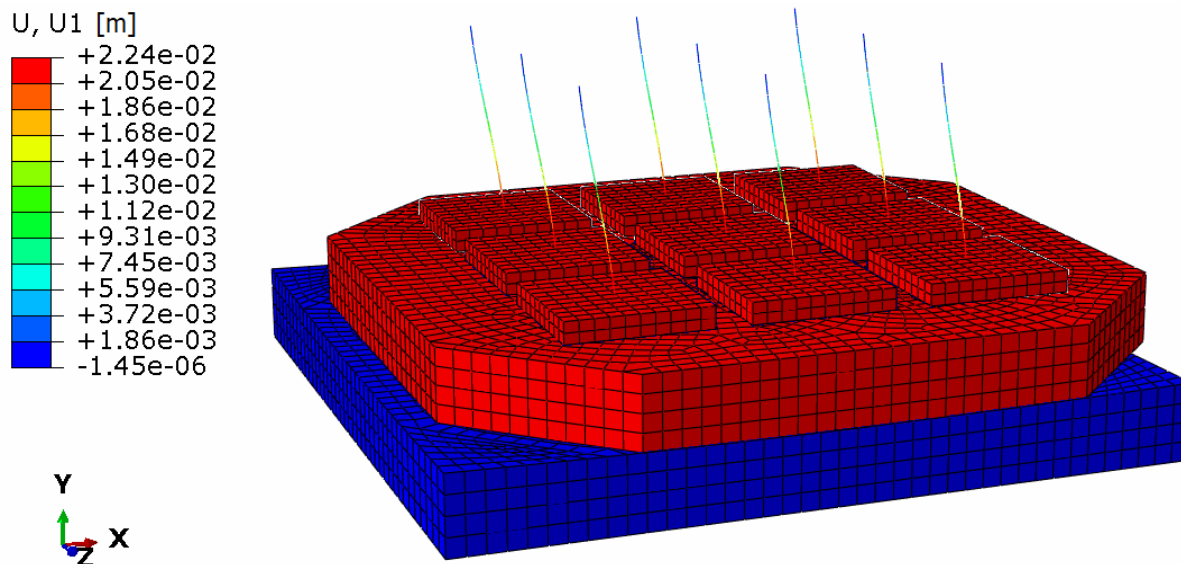
W kolejnym kroku, po przyłożeniu równomiernie rozłożonego obciążenia pionowego, górnej betonowej płycie założono wymuszenie przemieszczenia poziomego, którego wartość wynosiła 20 mm. Siłę poziomą do górnej betonowej płyty zadano w centralnie umieszczonym na jej bocznej płaszczyźnie punkcie *reference point* – 1, który również jest więzem kinetycznym i łączy całą powierzchnię płyty od czoła.

## 10.2. Wyniki analizy numerycznej modelu powierzchni sferycznej

Analizę numeryczną modelu powierzchni sferycznej wykonano jako geometrycznie nieliniową, ponieważ właściwości obciążenia poziomego znacząco się zmieniają w wyniku przemieszczenia poziomego górnej płyty betonowej. Przy tym, do realizacji obliczeń wykorzystano solver typu *implicit* wykorzystujący iteracyjną metodę obliczania przemieszczeń w funkcji czasu. Celem otrzymania wymaganych wyników w postaci siły poziomej powodującej przesuw poziomy górnej płyty, posłużono się metodą *arc – length*

method (ALM), dzięki której było możliwe przyjęcie parametru ograniczającego wartość przyrostu przemieszczenia poziomego górnej płyty, które było równe 20 mm.

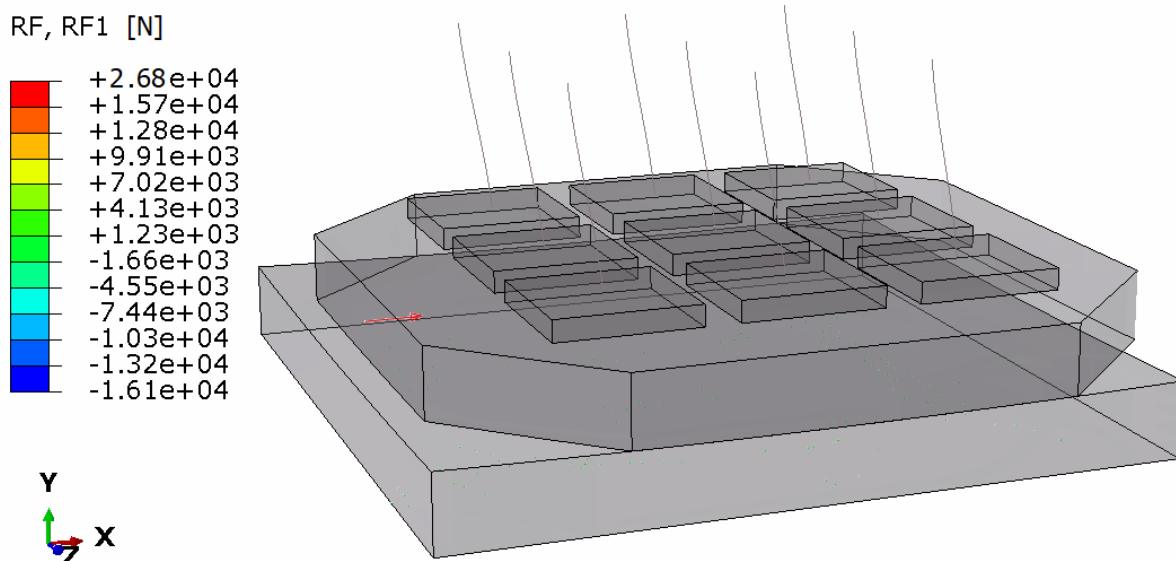
W pierwszym etapie analizy wyników obliczeń numerycznych sprawdzono wielkość zadanego poziomego przemieszczenia górnej betonowej płyty (rys. 10-6)



Rys. 10-6. Wyniki przemieszczenia poziomego górnej betonowej płyty modelu

Po uzyskaniu pozytywnych rezultatów pierwszego etapu analizy, czyli po stwierdzeniu, iż maksymalne przemieszczenie poziome górnej betonowej płyty wyniosło 20 mm, rozpoczęto kolejny etap analizy wyników obliczeń numerycznych. W drugim kroku odczytano wartość siły poziomej powodującej przesuw poziomy górnej płyty (rys. 10-7) i porównano ją z wynikami otrzymanymi podczas wykonywania badań laboratoryjnych modelu powierzchni sferycznej.





Rys. 10-7. Wyniki wartości siły poziomej powodującej przesuw poziomy górnej betonowej płyty modelu

Wyniki w postaci wartości siły poziomej powodującej przesuw poziomy górnej betonowej płyty z podziałem na otrzymane z badań laboratoryjnych, a także z analizy numerycznej modelu powierzchni sferycznej zestawiono w tabelicy 10-2.

Tablica 10-2. Wartości siły poziomej powodującej przesuw poziomy górnej betonowej płyty

Naprężenia $\sigma$ , kPa	Rodzaj analizy	Współczynnik tarcia $f$ , -	Promień $r$ , mm	Siła pozioma $N$ , kN	Różnica $\Delta N$ , kN
109	modelowanie numeryczne	0,025	20000	2,680	0,012
	badania laboratoryjne	0,027		2,668	
163	modelowanie numeryczne	0,019	20000	3,072	0,111
	badania laboratoryjne	0,021		3,183	
217	modelowanie numeryczne	0,015	20000	3,166	1,399
	badania laboratoryjne	0,011		1,767	
272	modelowanie numeryczne	0,011	20000	3,057	0,216
	badania laboratoryjne	0,013		3,273	
326	modelowanie numeryczne	0,009	20000	2,777	0,712
	badania laboratoryjne	0,012		3,489	

Zgodnie z otrzymanymi danymi, można stwierdzić, iż dla przyjętych założeń, czyli dla zadanych wartości naprężeń  $\sigma$ , współczynnika tarcia statycznego  $f$  warstwy poślizgowej oraz

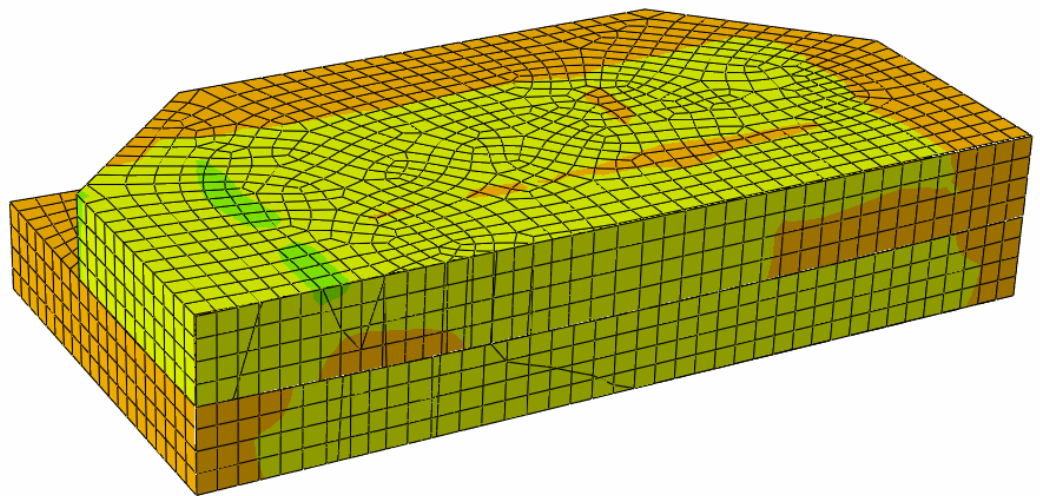
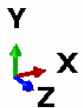
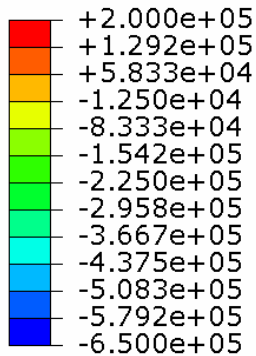
promienia  $r$  zakrzywienia powierzchni stykających się ze sobą, analiza numeryczna wykazuje dużą zgodność osiągniętej wielkości siły poziomej w porównaniu z siłą uzyskaną z badań laboratoryjnych. Modelowanie numeryczne powierzchni sferycznej z warstwą poślizgową zawierającą smar LOTOS SULFOCAL 302 w temperaturze równej  $20^{\circ}\text{C}$  oraz dla naprężeń  $\sigma$  równych 109 kPa, 163 kPa, 217 kPa, 272 kPa i 326 kPa wykazało, iż z wysoką dokładnością można wyznaczyć wielkość siły poziomej koniecznej do przemieszczenia betonowej płyty o potrzebną wartość, dysponując współczynnikiem tarcia statycznego  $f$  warstwy poślizgowej.

Uzyskane rezultaty w formie rozkładu naprężeń głównych w elementach modelu powierzchni sferycznej na początku oraz na końcu czasu trwania przyłożenia obciążenia przedstawiono na rysunkach 10-8, 10-9 i 10-10.

a).

S, S11 [Pa]

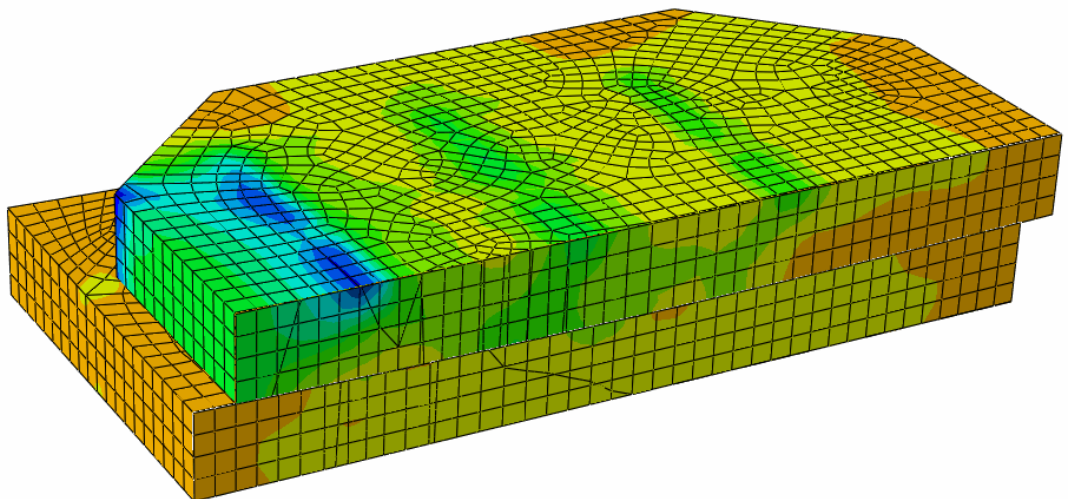
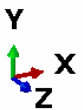
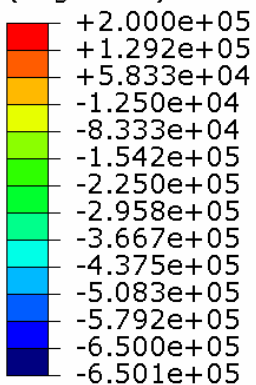
(Avg: 75%)



b).

S, S11 [Pa]

(Avg: 75%)

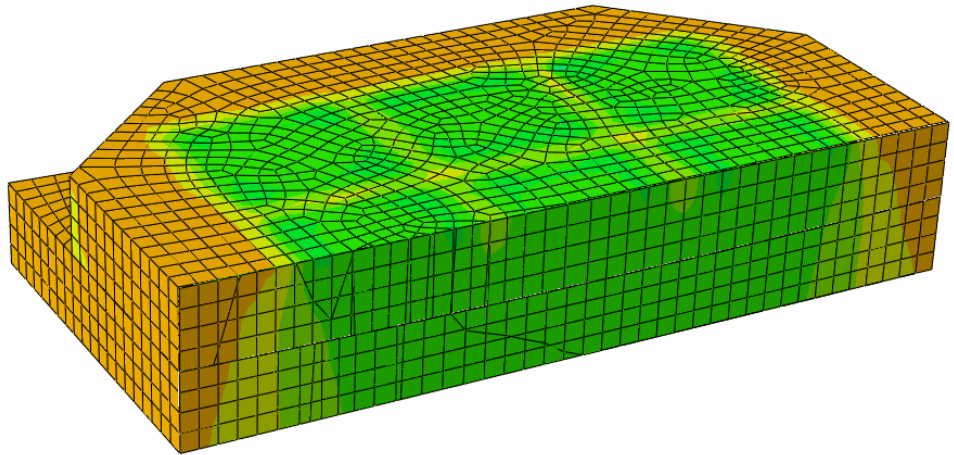
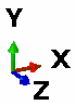
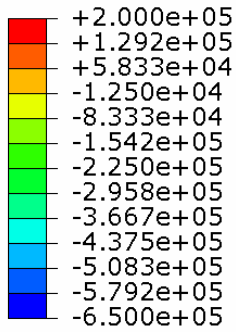


Rys. 10-8. Rozkład naprężeń głównych równoległych do osi X w elementach modelu powierzchni sferycznej  
a). na początku oraz b). na końcu czasu trwania przyłożenia obciążenia

a).

S, S22 [Pa]

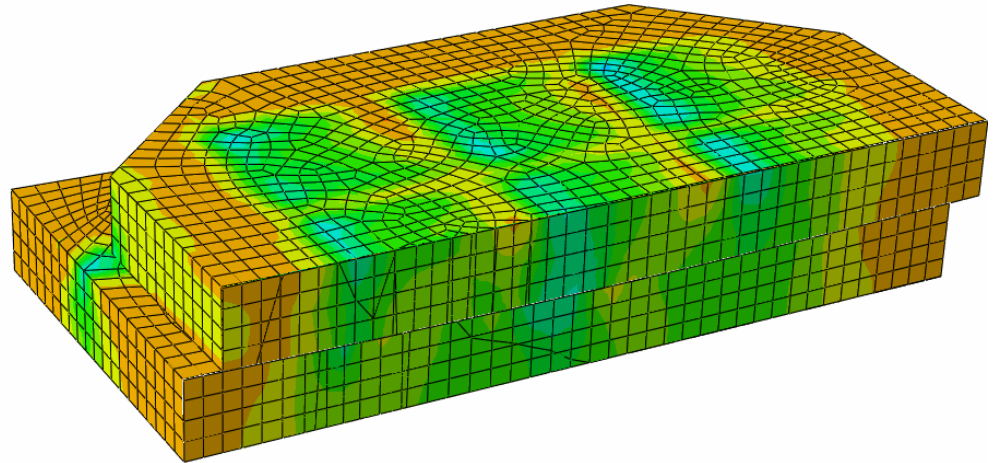
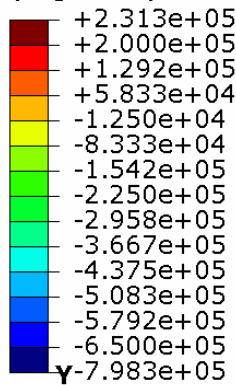
(Avg: 75%)



b).

S, S22 [Pa]

(Avg: 75%)

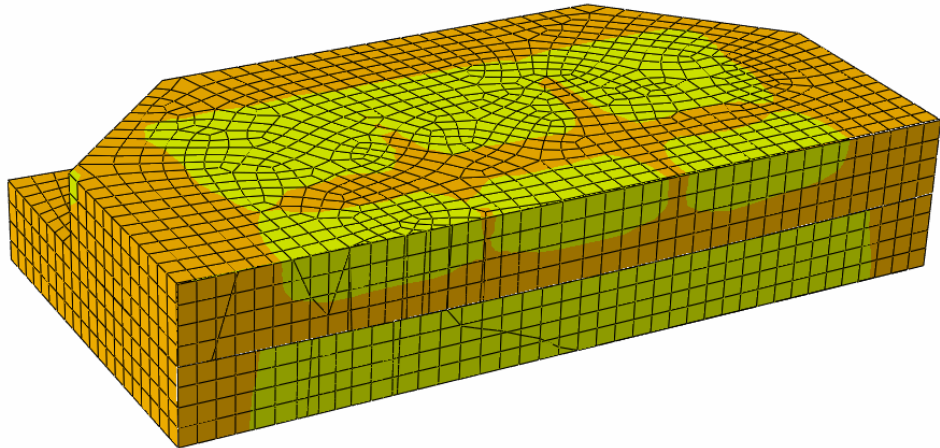
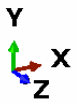
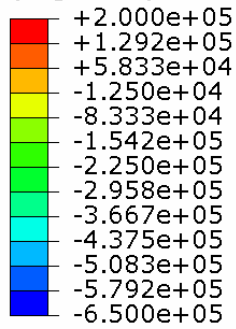


Rys. 10-9. Rozkład naprężeń głównych równoległych do osi Y w elementach modelu powierzchni sferycznej  
a). na początku oraz b). na końcu czasu trwania przyłożenia obciążenia

a).

S, S33 [Pa]

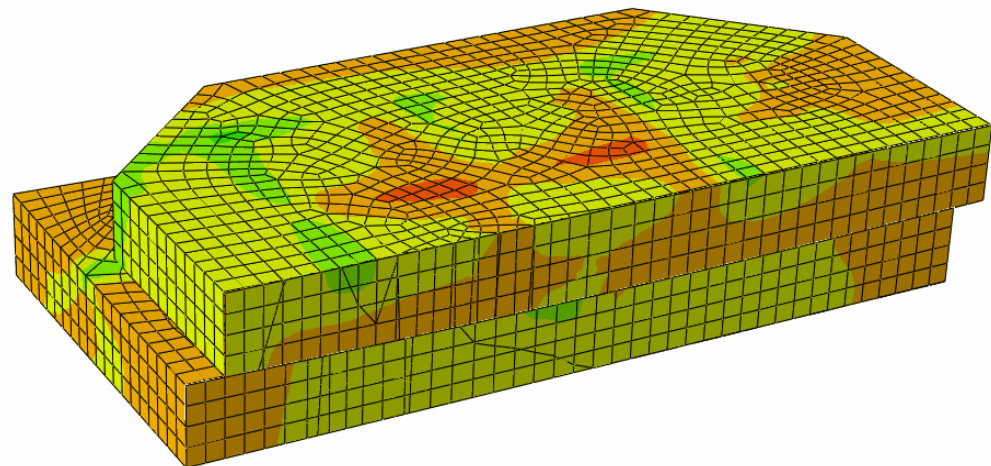
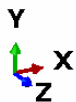
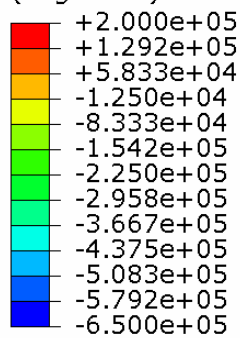
(Avg: 75%)



b).

S, S33 [Pa]

(Avg: 75%)

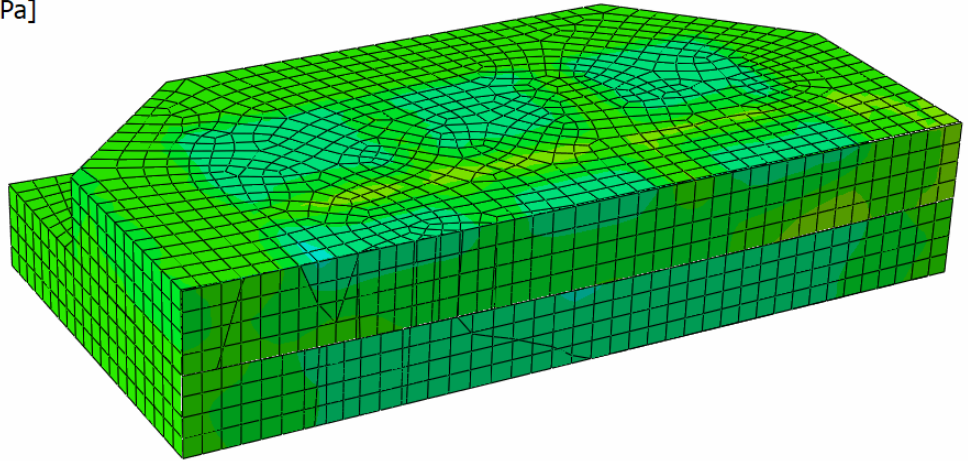
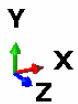
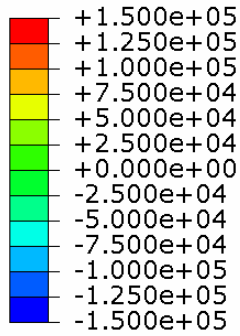


Rys. 10-10. Rozkład naprężeń głównych równoległych do osi Z w elementach modelu powierzchni sferycznej  
a). na początku oraz b). na końcu czasu trwania przyłożenia obciążenia

Otrzymane wyniki w formie rozkładu naprężeń normalnych w elementach modelu powierzchni sferycznej na początku oraz na końcu czasu trwania przyłożenia obciążenia ukazano na rysunkach 10-11 oraz 10-12.

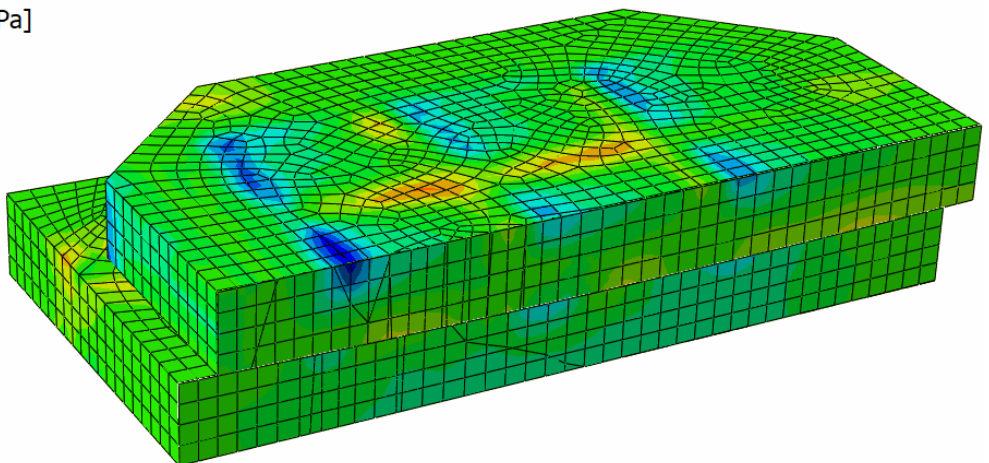
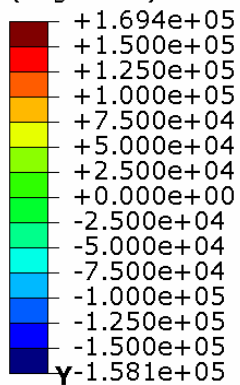
a).

S, Max. Principal [Pa]  
(Avg: 75%)



b).

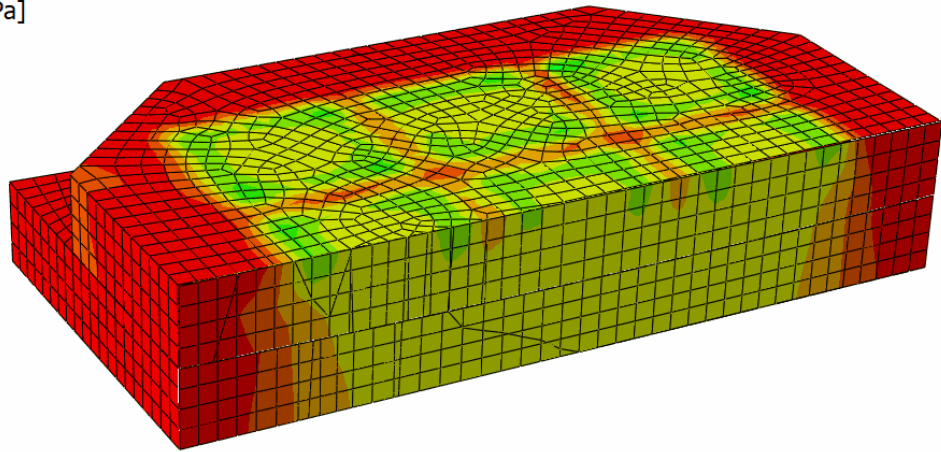
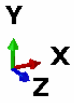
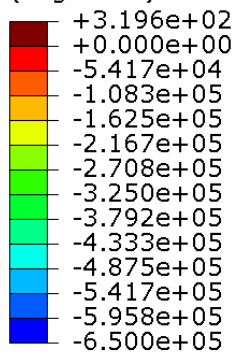
S, Max. Principal [Pa]  
(Avg: 75%)



Rys. 10-11. Rozkład naprężeń normalnych maksymalnych w elementach modelu powierzchni sferycznej a). na początku oraz b). na końcu czasu trwania przyłożenia obciążenia

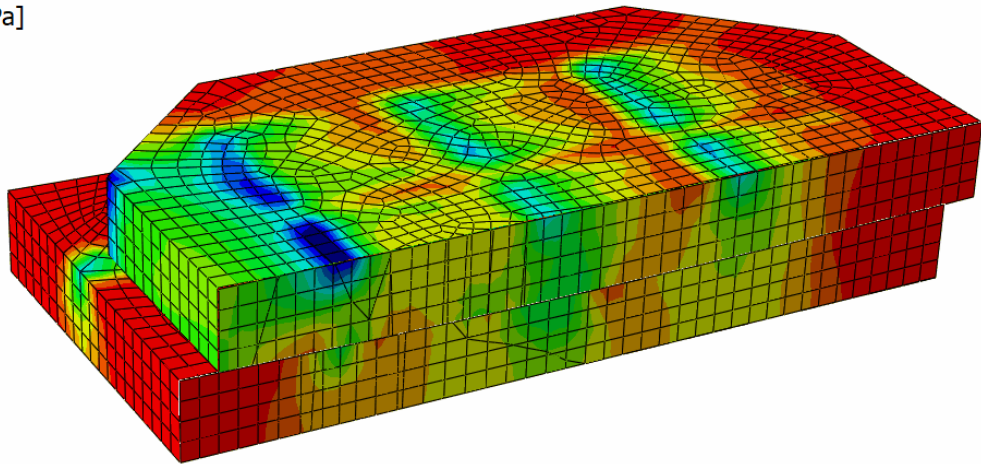
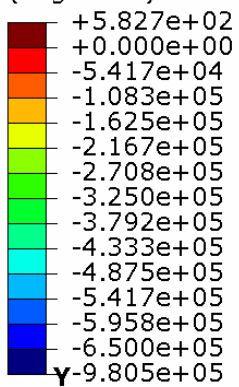
a).

S, Min. Principal [Pa]  
(Avg: 75%)



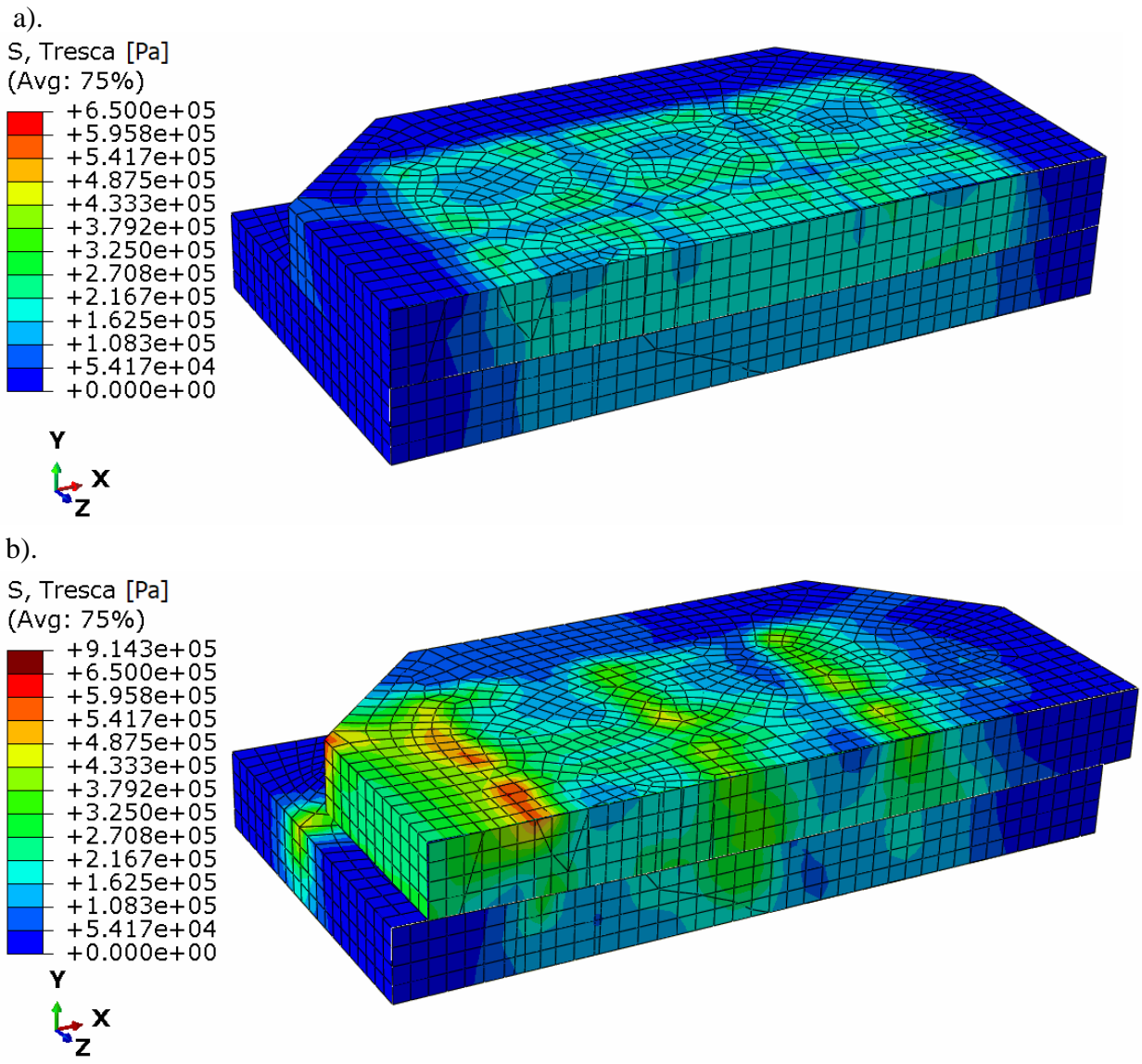
b).

S, Min. Principal [Pa]  
(Avg: 75%)



Rys. 10-12. Rozkład naprężeń normalnych minimalnych w elementach modelu powierzchni sferycznej  
a). na początku oraz b). na końcu czasu trwania przyłożenia obciążenia

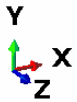
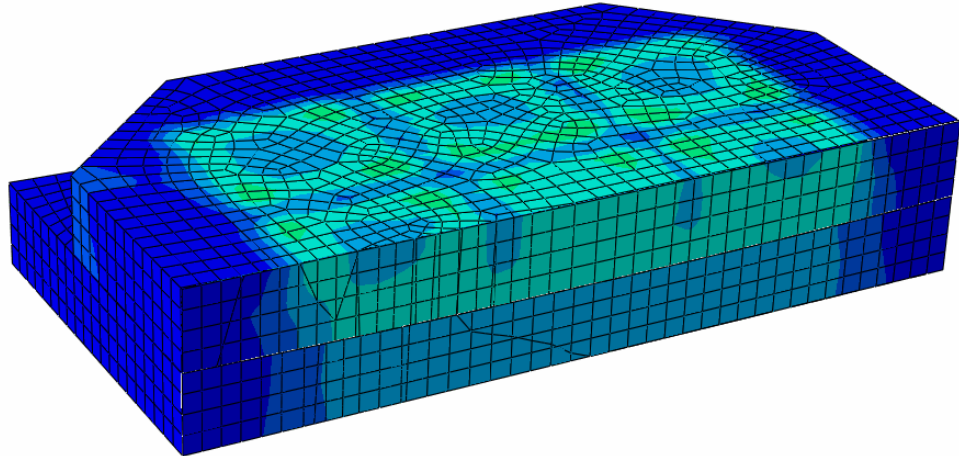
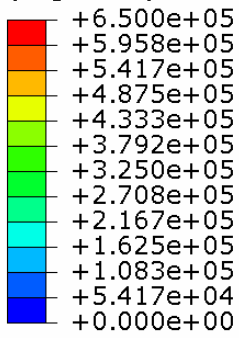
Uzyskane rezultaty w formie rozkładu naprężeń zredukowanych w elementach modelu powierzchni sferycznej na początku oraz na końcu czasu trwania przyłożenia obciążenia przedstawiono na rysunkach 10-13 i 10-14.



Rys. 10-13. Rozkład naprężeń zredukowanych Coulomba – Tresci – Guesta w elementach modelu powierzchni sferycznej a). na początku oraz b). na końcu czasu trwania przyłożenia obciążenia

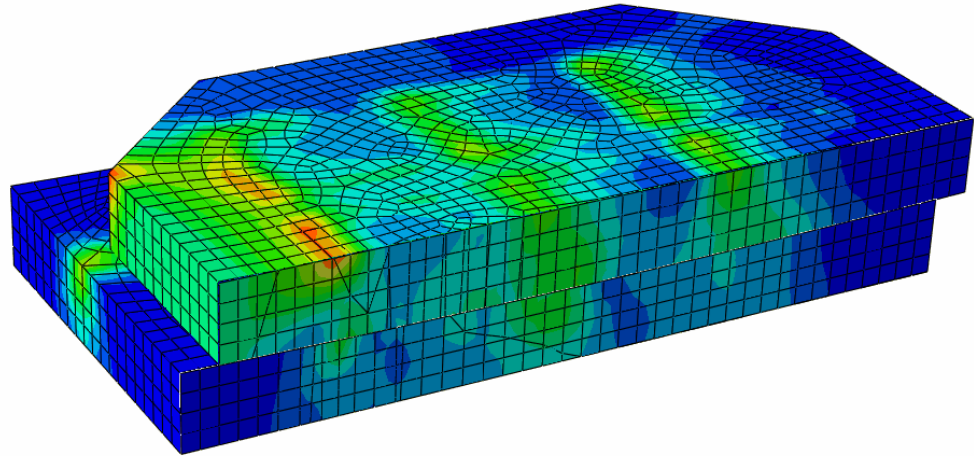
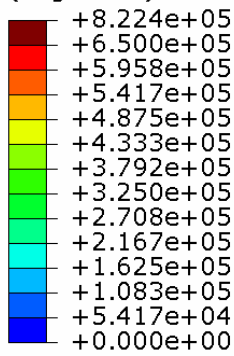
a).

S, Mises [Pa]  
(Avg: 75%)

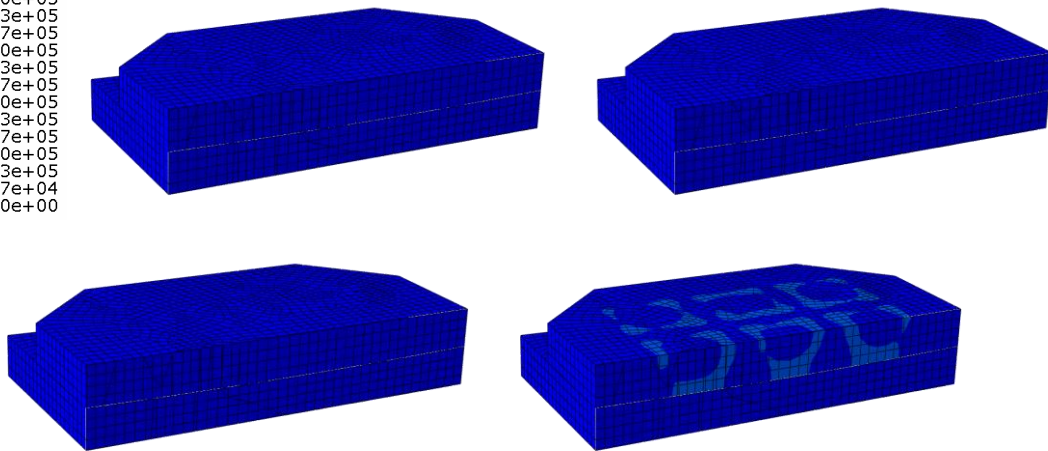
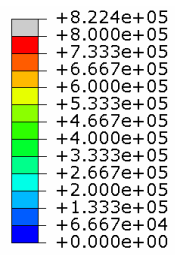


b).

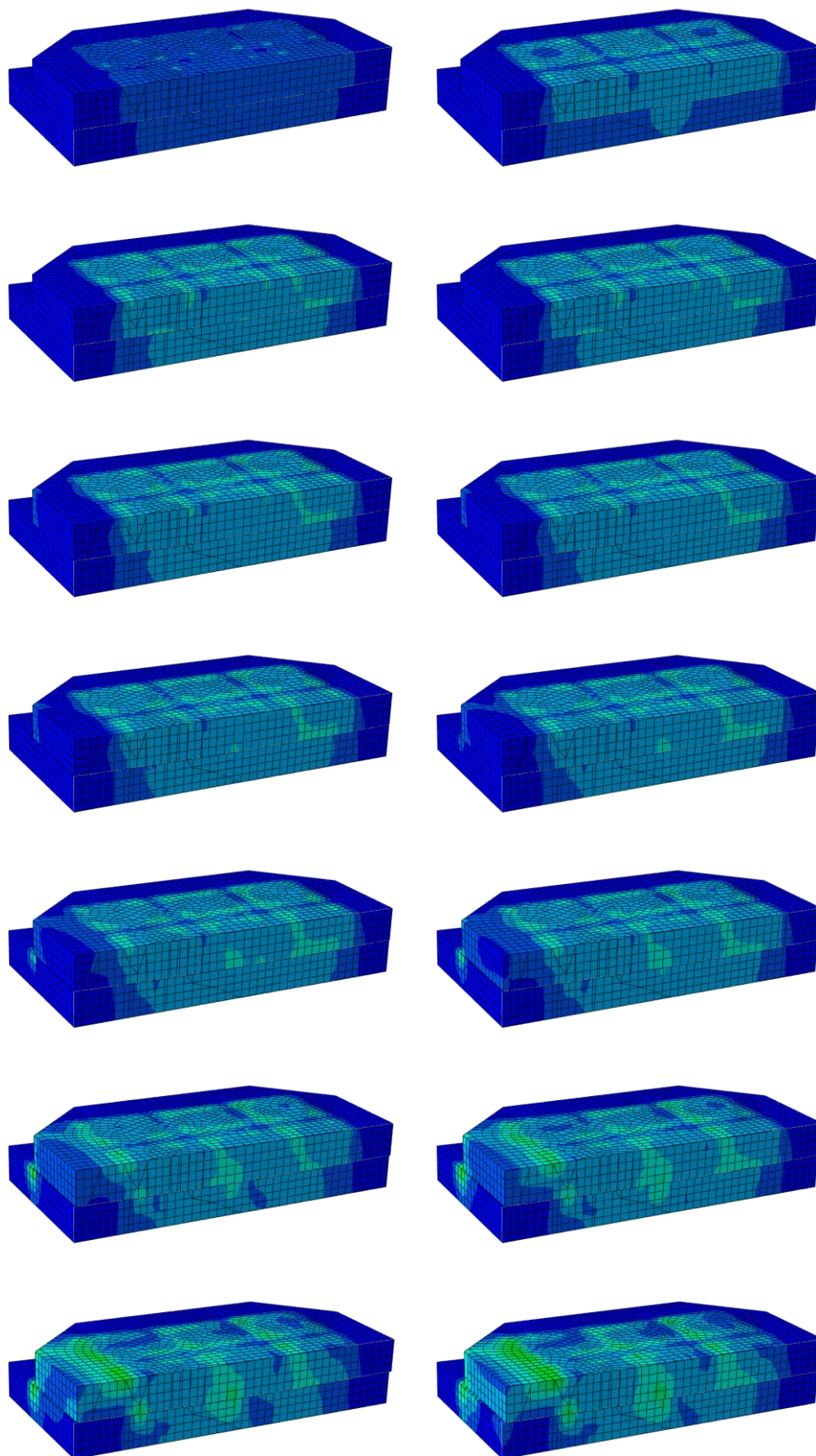
S, Mises [Pa]  
(Avg: 75%)

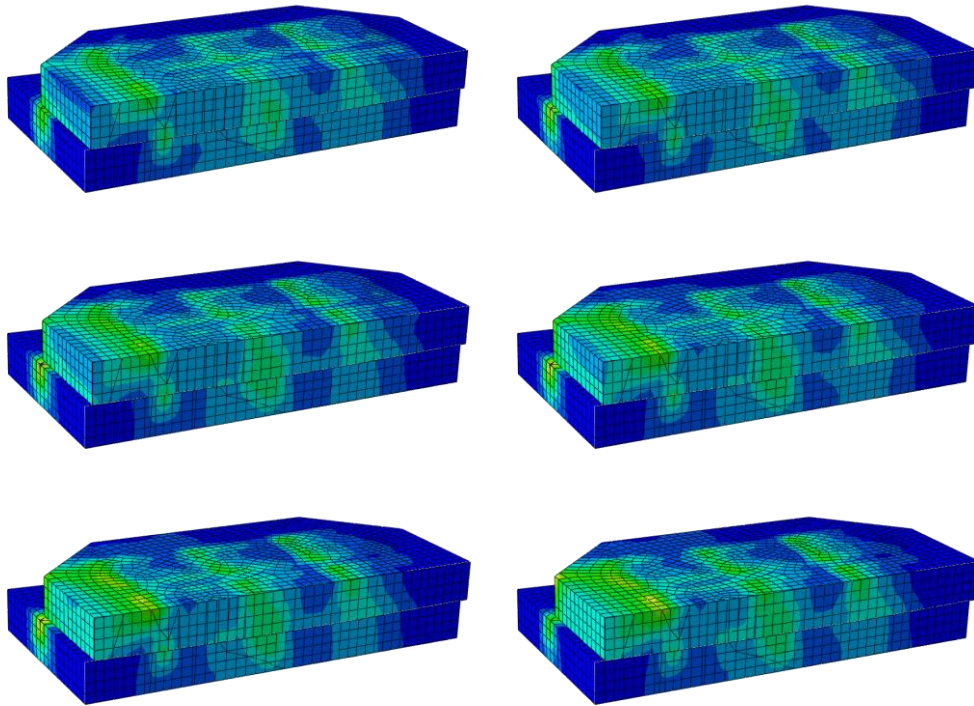


c).







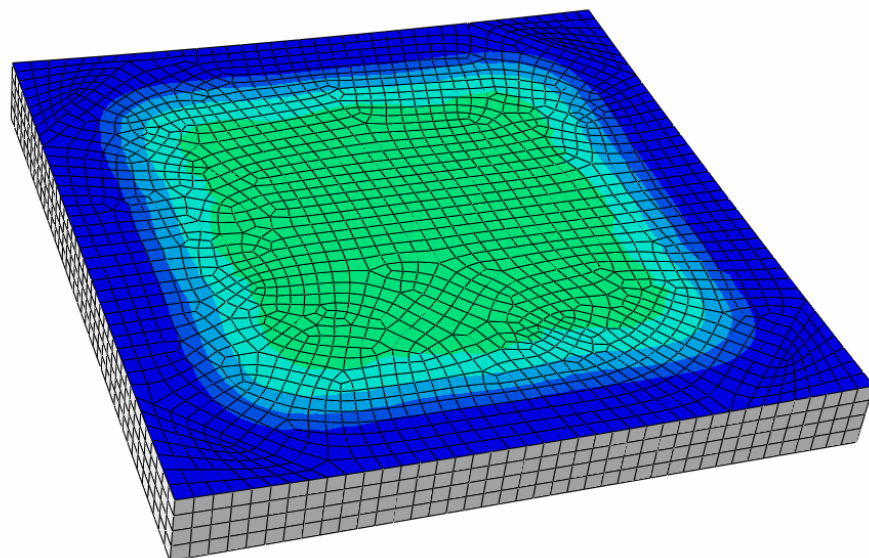
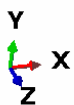
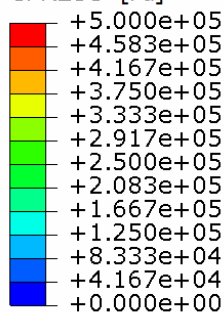


Rys. 10-14. Rozkład naprężeń zredukowanych Hubera – Misesa – Hencky’ego w elementach modelu powierzchni sferycznej a). na początku, b). na końcu oraz c). w krokach od 0 do 23 czasu trwania przyłożenia obciążenia

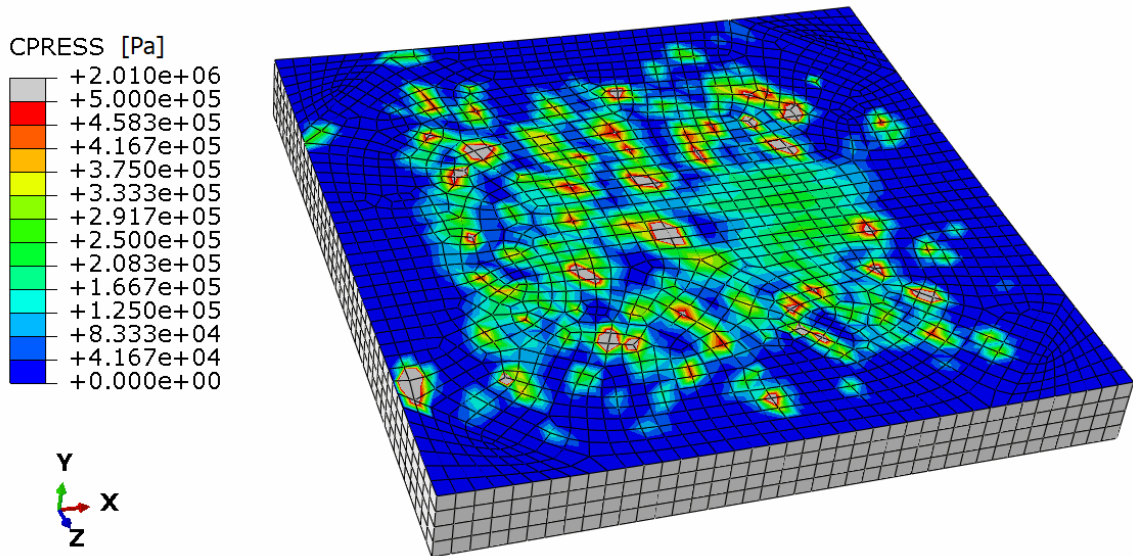
Natomiast otrzymane wyniki w formie rozkładu naprężeń ściskających jak też ścinających na stykach zamodelowanych betonowych płyt, na początku, a także na końcu czasu trwania przyłożenia obciążenia ukazano na rysunkach 10-15 oraz 10-16.

a).

CPRESS [Pa]

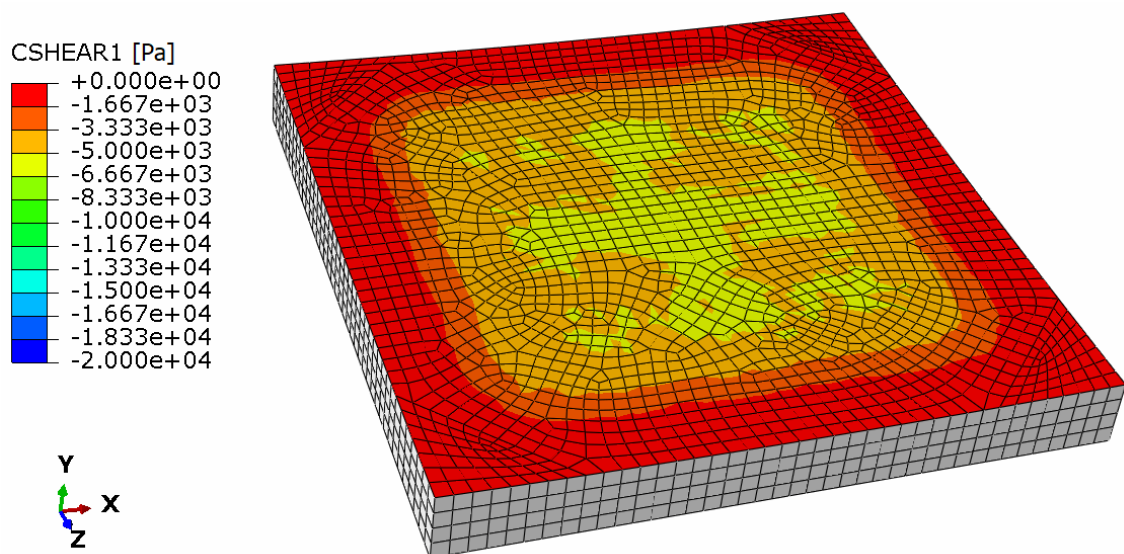


b).

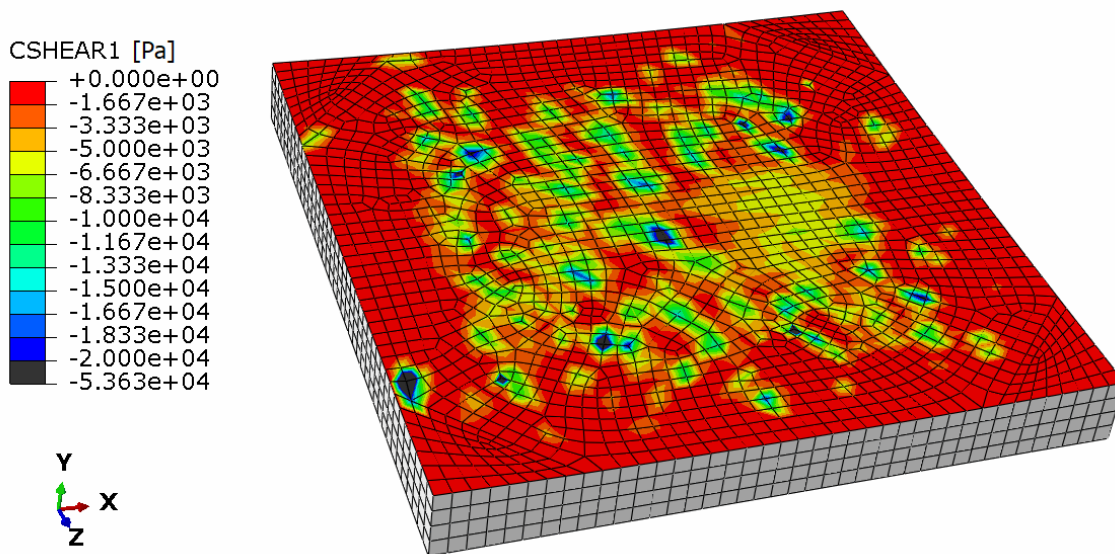


Rys. 10-15. Rozkład naprężeń ściskających na stykach zamodelowanych betonowych płyt a). na początku oraz b). na końcu czasu trwania przyłożenia obciążenia

a).



b).

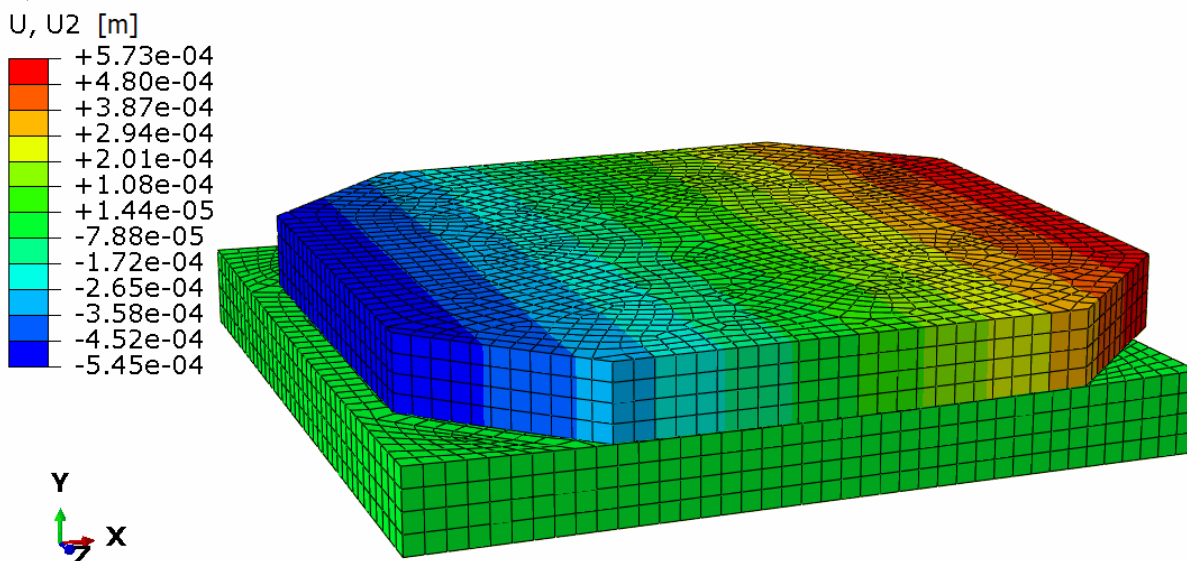


Rys. 10-16. Rozkład naprężeń ścinających na stykach zamodelowanych betonowych płyt a). na początku oraz b). na końcu czasu trwania przyłożenia obciążenia

Analizując otrzymane wyniki rozkładu naprężeń głównych, normalnych, a także zredukowanych w płytach górnej i dolnej modelu powierzchni sferycznej oraz na ich stykach, na powierzchniach płaskich można zauważyć znaczny wpływ obciążenia pionowego w miejscach przekazywania go przez stalowe sprężyny walcowe na górną betonową płytę. W szczególności jest on widoczny na końcu czasu trwania przyłożenia obciążenia w rejonie trzech skrajnych sprężyn ulokowanych od strony działającej siły poziomej i zmniejsza się on w kierunku naprzeciwległego brzegu płyty. Natomiast mniejsze naprężenia obserwuje się na płaszczyźnie czołowej, w miejscu przyłożenia siły poziomej, a także na środku powierzchni styku w kształcie części sfery z wypukłością skierowaną ku dołowi.

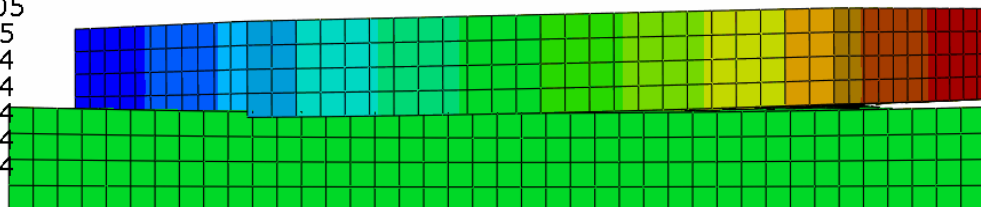
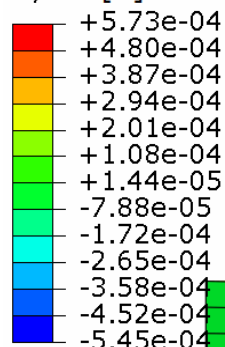
Uzyskane rezultaty pochylenia górnej betonowej płyty po przesunięciu poziomym przedstawiono na rysunku 10-17.

a).



b).

U, U2 [m]



Rys. 10-17. Wyniki pochylenia górnej betonowej płyty po przesunięciu poziomym a). widok w izometrii oraz b). widok w płaszczyźnie XY

Przyglądając się pozyskanym wynikom pochylenia górnej powierzchni betonowej płyty po przesunięciu poziomym można zaobserwować znikome przemieszczenie w pionie na środku powierzchni styku w kształcie części sfery z wypukłością skierowaną ku dołowi. Za to na dwóch przeciwległych krawędziach, prostopadłych do przyłożonej siły poziomej, zauważa się praktycznie równomierne obniżenie oraz podniesienie górnej betonowej płyty. W przypadku płyt poddanych równomiernie rozłożonemu obciążeniu pionowemu o wartości 100 kN, co odpowiada naprężeniom równym 109 kPa, wartość pochylenia górnej betonowej płyty wynosi odpowiednio -0,5 mm (przemieszczenie pionowe w dół) w miejscu przyłożenia siły poziomej oraz +0,5 mm (przemieszczenie pionowe w górę) na krawędzi przeciwnej.

Wobec powyższego, opracowane analizy numeryczne pracy całego modelu zdublowanego płytowego fundamentu żelbetowego z warstwą poślizgową pomiędzy jego obydwoma częściami, umożliwiają ocenę zachowania konstrukcji całego budynku przy wykonywaniu procesu prostowania obiektu poddanego wpływom górniczym, bez konieczności przeprowadzania czasochłonnego i pracochłonnego badania laboratoryjnego.



## 11. WNIOSKI

Prostowanie obiektów budowlanych, które są poddawane wpływowi górniczym, do tej pory było utożsamiane z koniecznością przeprowadzania bardzo niedogodnego dla mieszkańców oraz przede wszystkim kosztownego procesu rektyfikacji. Ponadto, zdecydowana większość aktualnie wznoszonych budynków jest niewystarczająco przystosowana na etapie projektowania do efektywnej procedury rektyfikacji. Dodatkowo, błędem może być również podczas projektowania sposobu posadowienia budowli nieuwzględnienie wpływu warunków gruntowych, a także pozostałych czynników poza górniczych powodujących widoczne nieprawidłowości oraz uszkodzenia budynku.

Przeprowadzone badania wskazują, że istnieją teoretyczne możliwości opracowania metody prostowania obiektów budowlanych polegające na wykonaniu zdublowanego fundamentu budynku. Styk pomiędzy jego obydwoma częściami wyposażony zostałby w warstwę poślizgową składającą z folii budowlanej oraz smaru, ułożoną bezpośrednio na przygotowanej dolnej części fundamentu. Powierzchnia styku miałaby kształt części sfery z wypukłością skierowaną ku dołowi. Z kolei w przypadku pojawienia się nachylenia terenu, któremu towarzyszy pochylenie całego budynku, w celu doprowadzenia konstrukcji do stanu wyjściowego, wystarczyłoby odpowiednio przesunąć w kierunku poziomym górną część fundamentu, co dzięki ukształtowaniu powierzchni styku doprowadzi do wypoziomowania budowli. Pozwoli to na łatwe i co ważniejsze nieuciążliwe dla użytkowników budynków, a także niemalże bezkosztowe wykonywanie procesu rektyfikacji w dowolnym momencie istnienia budowli. Z racji tego, iż idea nowego sposobu prostowania budynków poddanych wpływom górniczym uwzględnia taki dobór materiałów na projektowaną warstwę poślizgową pomiędzy dwoma częściami zdublowanego płytowego fundamentu żelbetowego, które są powszechnie dostępne w sprzedaży detalicznej. Tego rodzaju opracowane rozwiązanie konstrukcyjne będzie mogło być wykorzystywane dla wszystkich obiektów kubaturowych o regularnym, nierozczłonkowanym rzucie fundamentów. Zatem w praktyce oznacza to, iż procesowi temu będzie mogła być poddana praktycznie całość budynków posadawianych na terenach szkód górniczych tak przygotowanych, co nie jest możliwe ze względów ekonomicznych w obecnym momencie.

### ***11.1. Wpływ temperatury na efektywność procesu rektyfikacji***

Celem zbadania wpływu temperatury na efektywność procesu rektyfikacji było wytypowanie warstwy poślizgowej o najmniejszym współczynniku tarcia dla czterech różnych rozwiązań materiałowych smarów w przedziale temperatur od 5°C do 50°C. Powodem wyboru takiego zakresu temperatur był zamiar sprawdzenia jak będą kształtowały się wartości współczynników tarcia w przypadku temperatur zwykle występujących

w poziomie posadowienia obiektu budowlanego, a także w sytuacji podgrzania warstw poślizgowych do dużo wyższych temperatur. Tym sposobem ustalono optymalne parametry pracy zdublowanego płytowego fundamentu żelbetowego z warstwą poślizgową na styku pomiędzy jego obydwoma częściami, podczas procesu prostowania obiektu.

Przeprowadzone analizy warunków pracy warstw poślizgowych znajdujących się pomiędzy dwoma częściami fundamentu rektyfikacyjnego, wykazały, iż temperatura  $t$  ma znaczny wpływ na wartość współczynnika tarcia statycznego  $f$ . Dla wszystkich przebadanych czterech rodzajów smarów Grupy LOTOS S. A., wraz ze wzrostem wartości temperatur  $t$ , uzyskano coraz to wyższe wartości współczynnika tarcia statycznego  $f$  dla danych naprężeń  $\sigma$  odpowiadającym naprężeniom wywieranym na podłoże począwszy od średniej wielkości budynków mieszkalnych jednorodzinnych, na budynkach mieszkalnych wielorodzinnych kończąc. Tym samym niezbędne są większe siły poziome do przesunięcia jednej części zdublowanego fundamentu żelbetowego względem drugiej, co jest zjawiskiem niepożądanym w trakcie wykonywania procesu rektyfikacji budynku. Zatem wartości temperatur  $t$  odgrywają bardzo istotną rolę w nośności warstw poślizgowych na przeniesienie siły poziomej.

Można także stwierdzić, iż najkorzystniejsze, najniższe wartości współczynników tarcia statycznego  $f$  warstw poślizgowych zostają osiągnięte bez konieczności ich podgrzewania za pomocą instalacji przewodów grzejnych w płytach fundamentowych, co również przyczynia się do minimalizacji kosztów. Najniższe wartości współczynników tarcia statycznego  $f$  warstw poślizgowych fundamentu rektyfikacyjnego występują w przedziale naturalnie utrzymujących się temperatur w poziomie posadowienia obiektu budowlanego ( $t = 5^{\circ}\text{C} \div 10^{\circ}\text{C}$ ).

W takich temperaturach najniższe wartości współczynnika tarcia statycznego  $f$  dla konkretnych naprężeń  $\sigma$  odnotowano dla smaru LOTOS SULFOCAL 302. Zatem jest to najodpowiedniejszy smar do zastosowania w warstwie poślizgowej zdublowanego fundamentu żelbetowego podczas rektyfikacji budynków poddanych wpływom górniczym.

Ponadto, specyfika pracy danej warstwy poślizgowej w konkretnej temperaturze uzależniona jest również od rodzaju zastosowanego smaru oraz wartości naprężeń  $\sigma$ . Z tego też względu w zależności od przyjętego rodzaju warstwy poślizgowej zastosowanej w fundamencie rektyfikacyjnym, do każdego wariantu należy podchodzić bardzo indywidualnie.

Co więcej, badania laboratoryjne czterech rodzajów smarów Grupy LOTOS S. A. wykonane w laboratorium Wydziału Chemicznego Politechniki Śląskiej wykazały, iż w smarach LOTOS GRAFITOWANY oraz MONILIT EP 23 są obecne najczęściej stosowane dodatki w postaci odpowiednio grafitu, a także disiarczku molibdenu, których to obecność w głównej mierze decyduje o ich właściwościach użytkowych. Dodatkowo, zastosowane w badaniach smary LOTOS (LT4 S-2, GRAFITOWANY oraz MONILIT EP 23) cechują się niskimi wartościami liczb kwasowych, co świadczy o braku zachodzących w nich procesów degradacji oraz starzenia. Natomiast liczba zasadowa smaru LOTOS SULFOCAL 302 charakteryzuje się wysoką wartością, co wskazuje na jego dużą wartość użytkową. Zatem potwierdza to, że jest on najodpowiedniejszym smarem do wykorzystania w warstwie



poślizgowej zdublowanego fundamentu żelbetowego podczas procesu prostowania budynków poddanych wpływom górniczym.

## **11.2. Wpływ kształtu fundamentu na efektywność procesu rektyfikacji**

Celem zbadania wpływu kształtu fundamentu na efektywność procesu rektyfikacji było zbadanie zachowania pomniejszonej konstrukcji zdublowanego płytowego fundamentu żelbetowego z warstwą poślizgową na styku pomiędzy jego obydwoma częściami dla jednego wytypowanego rozwiązania materiałowego smaru o najniższych współczynnikach tarcia w temperaturze pokojowej równej 20°C.

Wykonane badania pracy warstwy poślizgowej znajdującej się pomiędzy dwoma częściami fundamentu rektyfikacyjnego w kształcie części sfery, wykazały, iż kształt powierzchni stykających się ze sobą ma znaczny wpływ na wartość współczynnika tarcia statycznego  $f$ . W obrębie jednej analizowanej wartości temperatury  $t = 20^{\circ}\text{C}$  wielkości współczynnika tarcia statycznego  $f$  dla powierzchni zakrzywionej są niższe, im wyższe są wartości naprężeń  $\sigma$ . Tym samym niezbędne są mniejsze siły poziome do przesunięcia jednej części zdublowanego fundamentu żelbetowego względem drugiej, co jest zjawiskiem niezwykle pożądanym w trakcie wykonywania procesu rektyfikacji budynku. Zatem kształt powierzchni stykających się ze sobą odgrywa bardzo istotną rolę w nośności warstw poślizgowych na przeniesienie siły poziomej.

Badania warstwy poślizgowej zawierającej smar LOTOS SULFOCAL 302, w temperaturze pokojowej równej 20°C, dla każdej wielkości naprężeń, wykazały, iż charakteryzował się on najmniejszymi wartościami współczynników tarcia, dlatego też został on wybrany do drugiego etapu doświadczeń modelu powierzchni sferycznej.

Analiza warunków pracy wybranego smaru Grupy LOTOS S. A. w temperaturze pokojowej  $t = 20^{\circ}\text{C}$  wykazała, iż wartości współczynników tarcia statycznego  $f$  są tym niższe im mniejszy jest promień  $r$  zakrzywienia powierzchni stykających się ze sobą dla danych naprężeń  $\sigma$ . Najniższe wartości współczynnika tarcia statycznego  $f$  dla smaru LOTOS SULFOCAL 302, temperatury  $t = 20^{\circ}\text{C}$  i naprężeń  $\sigma$  odnotowano dla betonowych płyt o powierzchni styku w kształcie części sfery z wypukłością skierowaną ku dołowi. Zatem wykorzystanie smaru LOTOS SULFOCAL 302 w warstwie poślizgowej pomiędzy dwoma odpowiednio przylegającymi do siebie częściami powierzchni trących o założonym promieniu zakrzywienia  $r$  można uznać za najbardziej odpowiednie rozwiązanie fundamentu rektyfikacyjnego do prostowania budynków poddanych wpływom górniczym.

Dodatkowo, wartości współczynników tarcia statycznego  $f$  zależą od rodzaju powierzchni, jakimi obiekty trą o siebie, czyli od dokładności technologii wykonania. W przypadku realizacji fundamentu rektyfikacyjnego, aby otrzymać identyczne promienie wypukłości, płytę górną należy zabetonować na płycie dolnej, co pozwoli na uzyskanie ściśle przylegających do siebie powierzchni trących.

### **11.3. Program dalszych badań**

Wykonane badania laboratoryjne warstw poślizgowych oraz modelu fundamentu do prostowania budynków poddanych wpływom górnicyz wskazują, iż istotny wpływ na efektywność całego procesu rektyfikacji mają kształt fundamentu oraz temperatura, w której jest on przeprowadzany. Z tego też względu analiza innych: wielkości temperatur, wartości naprężeń, typów warstw poślizgowych (folii), rodzajów przekładek (smarów z dodatkiem i bez dodatku nanolubrykantów), a także promieni zakrzywienia powierzchni trących dwóch części fundamentu stykających się ze sobą, będzie celem dalszych prac badawczych dotyczących nowego sposobu prostowania budynków poddanych wpływom górnicyz.

Ponadto, ze względu na bardzo dobrą weryfikację przyjętych modeli obliczeniowych warstw poślizgowych, a także powierzchni sferycznej, przyszłe analizy numeryczne umożliwią symulację zachowania konstrukcji fundamentu oraz całego obiektu budowlanego, z odpowiednio wykształtowaną warstwą poślizgową, przy wykonywaniu procesu prostowania budowli bez konieczności przeprowadzania czasochłonnych i pracochłonnych badań laboratoryjnych.

Co więcej, tak opracowany uniwersalny sposób rektyfikacji obiektów budowlanych poddanych wpływom górnicyz będzie mógł znaleźć szerokie zastosowanie nie tylko w budownictwie kubaturowym, ale również w prostowaniu budowli fundamentów pod maszyny. Realizacja takiego innowacyjnego rozwiązania konstrukcyjnego, dodatkowo umożliwi kontrolowanie parametrów decydujących o stopniu wychylenia budynków od pionu i dzięki temu będzie można prowadzić stały, kluczowy dla bezpieczeństwa obiektu, monitoring konstrukcji.

Z przeprowadzonych badań i analiz wnikają następujące zagadnienia, które należałoby rozwijać w kolejnych etapach lub kierunkach prac:

- znaczne pochylenie budynku dochodzące w niektórych przypadkach do 50% wywołuje redystrybucje sił wewnętrznych w budynku. Należałoby przeprowadzić analizy czy proces prostowania budynku nie spowoduje powstania dodatkowych sił wewnętrznych. W tym celu należałoby przeprowadzić analizy numeryczne przykładowego budynku wraz z zaproponowanym procesem prostowania,

- istotnym elementem przedstawionego zastrzeżenia patentowego jest stabilizacja obiektu w okresie pomiędzy procesami prostowania. Należałoby przeanalizować jakie dodatkowe siły powstaną w elementach stabilizujących konstrukcję w momencie powstania wstrząsu górnicyzowego oraz

- w wyniku pojawienia się nachylenia terenu obiekty znajdujące się na powierzchni pochylają się. Na skutek tego procesu dochodzi do nierównomiernego obciążenia fundamentu, co może wywołać dodatkowe przemieszczenia. Z tego powodu należałoby przeprowadzić analizę zachowania się obiektu z uwzględnieniem współpracy budowlano-podłoże w procesie zaproponowanego sposobu prostowania.

## 12. BIBLIOGRAFIA

### 12.1. Publikacje

- Ajdukiewicz A. (1979): Szkieletowy budynek żelbetowy zagrożony lokalną deformacją podłoża, *Inżynieria i Budownictwo*, nr 2
- Baczewski K., Szczawiński P. (2016): Badania procesu starzenia oleju hydraulicznego podczas użytkowania, *The archives of Automotive Engineering*, nr 3
- Biegańska J. (2008): Metody analizy w gospodarce odpadami, *Wydawnictwo Politechniki Śląskiej*
- Bolotov J. (1996): Zabezpieczenie budynków metodą kompensacji osiadań, *Konferencja Naukowo-Techniczna: Awarie Budowlane*
- Budzik G., Jakóbiec J. (2007): Czynniki mające wpływ na stopień degradacji oleju silnikowego w okresie eksploatacji, *Archiwum Motoryzacji*, nr 3, s. 209–216
- Cymerman J., Cymerman R. (2020): *Wycena nieruchomości*, Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej
- Dydenko J. (2020): *Szacowanie nieruchomości*, Wolters Kluwer Polska
- Gromysz K. (2006): O metodach eliminowania wychyleń obiektów budowlanych, *Inżynieria i Budownictwo*, nr 6, s. 302-307
- Gromysz K. (2007): Prostowanie 11-kondygnacyjnego budynku mieszkalnego wychylonego z pionu, *Inżynieria i Budownictwo*, nr 1, s. 10-14
- Gromysz K., Kowalski A., Mika W., Niemiec T. (2015): Naprawa zabytkowego kościoła drewnianego znajdującego się na terenie górniczym, *Przegląd Górniczy*, nr 3, s. 14–20
- Gromysz K., Niemiec T. (1995): Metody prostowania budynków przechylonych, *Budownictwo Górnicze i Tunelowe*, nr 3
- Gromysz K., Niemiec T. (2010): Wybrane problemy prostowania obiektów budowlanych wychylonych z pionu, *III Konferencja Naukowo-Szkoleniowa, Bezpieczeństwo i ochrona obiektów budowlanych na terenach górniczych*
- Halliday D., Resnick R., Walker J. (2022): *Podstawy fizyki. Tom 1*, Wydawnictwo Naukowe PWN
- Hoang N. (2019): Solving Regression Analysis Problems in Civil Engineering with a Least Squares Support Vector Machine Software Program Developed in Visual C#.NET, *DTU Journal of Science and Technology*, vol. 42, no. 5, p. 20-25
- Kałdoński T., Król A. (2010): Badanie procesów starzenia olejów eksploatowanych w łożyskach porowatych, *Biuletyn WAT*, nr 1
- Kawulok M. (2010): *Szkody górnicze w budownictwie*, Wydawnictwo Instytutu Techniki Budowlanej

- Kawulok M. (2022): *Ocena przydatności terenów górniczych i pogórnich do zabudowy*, Wydawnictwo Instytutu Techniki Budowlanej
- Kawulok M., Konieczny K., Słowik L. (2019): Diagnostowanie budynków zlokalizowanych na terenach górniczych, *Inżynieria i Budownictwo*, nr 9
- Kolej J. (1980): *Wpływ eksploatacji górniczej na wychyłanie budynków i warunki ich użytkowania*, Wydawnictwo Instytutu Techniki Budowlanej
- Konowalczyk J. (2014): *Wycena nieruchomości do celów kredytowych*, Wydawnictwo Poltext
- Korenik S., Zakrzewska-Półtorak A. (2021): *Nieruchomości i ich wycena*, Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu
- Kowal T. (2014): Propozycja ustalania wartości szkody w postaci trwałego wychylenia bryły budynku od pionu, *Przegląd Górniczy*, nr 10, s. 164-169
- Krasodomski M. (2015): Nowoczesne środki smarowe do specjalistycznych zastosowań w urządzeniach przemysłowych, transporcie i komunikacji, Wydawnictwo Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego
- Krawiec S. (2011): Kompozycje smarów plastycznych i stałych w procesie tarcia stalowych węzłów maszyn, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej
- Kucharska-Stasiak E. (2016): *Ekonomiczny wymiar nieruchomości*, Wydawnictwo Naukowe PWN
- Kwiątek J. (1984): Grawitacyjno-wiertniczy sposób prostowania wysokich obiektów budowlanych na terenach górniczych, *Ochrona Terenów Górniczych*, nr 67
- Kwiątek J. (1998): *Ochrona obiektów budowlanych na terenach górniczych*, Wydawnictwo Głównego Instytutu Górnictwa
- Kwiątek J. (2004): *Podstawy budownictwa na terenach górniczych*, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne
- Kwiątek J. (2007): *Obiekty budowlane na terenach górniczych*, Wydawnictwo Głównego Instytutu Górnictwa
- Ledwoń J. (1983): *Budownictwo na terenach górniczych*, Wydawnictwo Arkady
- Marczenko Z., Minczewski J. (2001): *Chemia analityczna 1. Podstawy teoretyczne i analiza jakościowa*, Wydawnictwo Naukowe PWN
- Marczenko Z., Minczewski J. (2001): *Chemia analityczna 2. Chemiczne metody analizy ilościowej*, Wydawnictwo Naukowe PWN
- Młynarczak A. (2010): Preparaty eksploatacyjne stosowane w olejach smarowych, *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni*, nr 64, s. 69-76
- Mrozek W. (1988): *Tradycyjna rodzina górnicza – jej cechy społeczne i kierunki przeobrażeń*, Śląski Instytut Naukowy
- Niemiec T. (2001): Metody rektyfikacji budowli na terenach górniczych, *VI Dni Miernictwa Górniczego i Ochrony Terenów Górniczych*
- Pachla, F., Tataro T. (2012): Uszkodzenia w obiektach budowlanych w warunkach wstrząsów górniczych, *Przegląd Górniczy*, nr 7, s. 1–10
- Popiołek E. (2009): *Ochrona terenów górniczych*, Wydawnictwo Akademii Górniczo-Hutniczej

- Prystupa M. (2014): *Wycena nieruchomości i przedsiębiorstw w podejściu porównawczym*, Wydawnictwo Polskiej Federacji Stowarzyszeń Rzeczoznawców Majątkowych
- Przybyła H., Świądrowski W. (1968): Określenia odporności istniejących obiektów budownictwa powszechnego na wpływ eksploatacji górniczej, *Ochrona Terenów Górniczych*, nr 6
- Rosiński B. (1978): *Błędy w rozwiązaniach geotechnicznych*, Wydawnictwo Geologiczne
- Sekunda R., Więclaw-Bator L. (2022): Koszty robót budowlanych. Ustalanie wartości i rozliczanie zamówień publicznych, Wolters Kluwer Polska
- Słowik L. (2015): *Wpływ nachylenia terenu spowodowanego podziemną eksploatacją górniczą na wychylenie obiektów budowlanych*, Wydawnictwo Instytutu Techniki Budowlanej
- Smoliło M. (2020): Badanie odporności na utlenianie mieszanin olejów otrzymanych z regeneracji olejów przepracowanych z olejami naftenowymi, *Nafta-Gaz*, nr 6
- Sroka A. (2006): Ocena wpływu projektowanej eksploatacji górniczej na obiekty budowlane z uwzględnieniem wiarygodności, wydanie specjalne *Bezpieczeństwo i ochrona obiektów budowlanych na terenach górniczych*, s. 323-335
- Szeląg S. (1989): Ermittlung des Minderwerts von Gebäuden in Bergsenkungsgebieten. *Das Markscheidewesen*, nr 4
- Szojda L. (2019): *Aspekty konstrukcyjne zabezpieczania budynków na terenach górniczych*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej
- Świądrowski W. (1972): Uwagi do metody punktowej określania odporności istniejących budynków na wpływy eksploatacji górniczej, *Ochrona Terenów Górniczych*, nr 21
- Świądrowski W. (1989): Punktowe metody oceny odporności obiektów budowlanych na wpływy eksploatacji górniczej, *Ochrona Terenów Górniczych*, nr 88
- Trojanek M. (2018): *Podejście dochodowe w wycenie nieruchomości*, Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Poznaniu
- Zych J. (1987): Metoda prognozowania wpływów eksploatacji górniczej na powierzchnię terenu uwzględniająca asymetryczny przebieg procesu, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej
- Żróbek S. (2000): *Podejście porównawcze w szacowaniu nieruchomości*, Wydawnictwo Educaterra

## 12.2. Normy

- 12/2000. *Zasady oceny możliwości prowadzenia podziemnej eksploatacji górniczej z uwagi na ochronę obiektów budowlanych*, GIG
- 416/2006. *Instrukcje, wytyczne, poradniki. Projektowanie budynków na terenach górniczych*, ITB
- Opis patentowy 103431 z dnia 30.09.1981
- Opis patentowy 88452 z dnia 30.04.1977
- Opis patentowy 88456 z dnia 30.04.1977
- Opis patentowy – patent tymczasowy 88909 z dnia 30.09.1976

PN-B-03020:1981. *Grunty budowlane – Posadowienie bezpośrednie budowli – Obliczenia statyczne i projektowanie*, PKN

PN-B-10020:1968. *Roboty murowe z cegły. Wymagania i badania przy odbiorze*, PKN

Ustawa z dnia 23 kwietnia 1964 r. *Kodeks cywilny*, Dz. U. nr 16, poz. 93.

Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r. *Prawo geologiczne i górnicze*, Dz. U. nr 163, poz. 981.

### 12.3. Materiały informacyjne

FOLIAREX. *Karta techniczna FOLIAREX IZ – materiały informacyjne*, <https://izosystems.pl/folie-budowlane/1907-folia-budowlana-foiarex-iz-02-mm-4x25.html> (2023)

GERB. *Schwingungsisolierung – materiały informacyjne*, <https://de.gerb.com/> (2023)

Keller. *Soilfrac – materiały informacyjne*, <https://www.kellergrundbau.at/expertise/verfahren/soilfrac> (2023)

LOTOS LO/15/18. *Karta Charakterystyki zgodna z załącznikiem II do Rozporządzenia (WE) nr 1907/2006 (REACH) z późniejszymi zmianami – materiały informacyjne*, [https://www.lotos.pl/upload/files/1648\\_anyFileLive\\_path\\_file\\_lo\\_15\\_18\\_wydanie\\_1\\_smar\\_sulfocal\\_101\\_102\\_301\\_302\\_800\\_801\\_802\\_756797.pdf](https://www.lotos.pl/upload/files/1648_anyFileLive_path_file_lo_15_18_wydanie_1_smar_sulfocal_101_102_301_302_800_801_802_756797.pdf) (2023)

LOTOS LO 204. *Karta Charakterystyki – materiały informacyjne*, [https://www.lotos.pl/upload/files/file\\_lo\\_204\\_wyd5\\_7c7b0d.pdf](https://www.lotos.pl/upload/files/file_lo_204_wyd5_7c7b0d.pdf) (2023)

LOTOS LO 205. *Karta Charakterystyki zgodna z załącznikiem II do Rozporządzenia (WE) nr 1907/2006 (REACH) z późniejszymi zmianami – materiały informacyjne*, [https://www.lotos.pl/upload/files/1644\\_anyFileLive\\_path\\_file\\_smar\\_samochodowy\\_lt4\\_s2\\_s3\\_lo\\_205\\_6\\_2022\\_482db3.pdf](https://www.lotos.pl/upload/files/1644_anyFileLive_path_file_smar_samochodowy_lt4_s2_s3_lo_205_6_2022_482db3.pdf) (2023)

LOTOS LO 221-0. *Karta Charakterystyki zgodna z załącznikiem II do Rozporządzenia (WE) nr 1907/2006 (REACH) z późniejszymi zmianami – materiały informacyjne*, [https://www.lotos.pl/upload/files/1645\\_anyFileLive\\_path\\_file\\_lo\\_221-0\\_4\\_smar\\_monilit\\_ep-23\\_5c1f21.pdf](https://www.lotos.pl/upload/files/1645_anyFileLive_path_file_lo_221-0_4_smar_monilit_ep-23_5c1f21.pdf) (2023)

Ministerstwo Aktywów Państwowych. *Krajowy plan na rzecz klimatu i energii na lata 2021-2030 przekazany do KE – materiały informacyjne*, <https://www.gov.pl/web/aktywa-panstwowe/krajowy-plan-na-rzecz-energii-i-klimatu-na-lata-2021-2030-przekazany-do-ke> (2023)

Polskie Sieci Elektroenergetyczne. *Raporty roczne z funkcjonowania KSE za rok 2018 – materiały informacyjne*, <https://www.pse.pl/dane-systemowe/funkcjonowanie-rb/raporty-roczne-z-funkcjonowania-kse-za-rok/raporty-za-rok-2018> (2023)

THERMOVAL. *Przewód grzejny TV SHTV 30 W/m, 6,0 mb, 180 W, jednostronnie zasilany – materiały informacyjne*, <https://thermoval.pl/produkty/?cat=1247&id=020-SHTV30/6> (2023)

THERMOVAL. *Regulator manualny UTR60 – materiały informacyjne*, <https://thermoval.pl/produkty/?cat=1243&id=020-UTR60> (2023)

TOTAL. *Smary plastyczne – materiały informacyjne*, [https://totalenergies.pl/system/files/atoms/files/rozdzial\\_19\\_smary\\_plastyczne.pdf](https://totalenergies.pl/system/files/atoms/files/rozdzial_19_smary_plastyczne.pdf) (2023)

## STRESZCZENIE

W wyniku eksploatacji podziemnej kopalni, szczególnie węgla kamiennego w regionie Górnego Śląska, występują wstrząsy pochodzenia górniczego, a pierwotna powierzchnia terenu podlega wymuszonym zmianom – deformacjom terenu. Jednym z takich efektów jest nachylenie terenu i wiążące się z nim pochylenie obiektów budowlanych znajdujących się na tym obszarze. Pomimo, że zagrożenie dla konstrukcji obiektu, wywołane jego wychyleniem od pionu rzędu maksymalnie kilku procent, nie jest wielkie, to użytkowanie takich budowli jest bardzo uciążliwe. Prowadzi to do konieczności rektyfikacji obiektów, co z kolei generuje duże koszty, często dochodzące do wartości wyprostowywanych obiektów, a jak wiadomo, wszystkim uczestnikom procesu budowlanego, a także w późniejszym czasie użytkownikom, zależy w głównej mierze na długotrwałej i bezawaryjnej eksploatacji obiektów budowlanych.

Stąd też podjęto w rozprawie doktorskiej zdefiniowanie wymagań nowego, prawdopodobnie tańszego sposobu rektyfikacji obiektów budowlanych, które zostaną do tego procesu przystosowane już na etapie projektu. Dodatkową zaletą takiego systemu jest fakt, że samo przeprowadzenie procesu rektyfikacji będzie wymagało minimalnych przygotowań, a sam proces będzie można powtarzać wielokrotnie, co przy obecnie stosowanych procesach rektyfikacji jest niemożliwe.

W rozprawie doktorskiej przeanalizowano zachowania warstw poślizgowych fundamentów budynku, a także analizę zachowania warstw poślizgowych oraz konstrukcji zdublowanego płytowego fundamentu żelbetowego z warstwą poślizgową na styku pomiędzy jego obydwojma częściami, pod obciążeniami pionowymi (symulującymi obciążenia wywierane na podłoże przez średniej wielkości budynki mieszkalne jednorodzinne i wielorodzinne) oraz poziomymi (symulującymi obciążenia wywierane na fundament przez siłowniki hydrauliczne podczas procesu rektyfikacji).

Wnioski wyciągnięte po przeprowadzeniu analiz teoretycznych, laboratoryjnych i numerycznych mają charakter zarówno naukowy jak i praktyczny. Umożliwią one bowiem zabezpieczenie i ochronę obiektów budowlanych przed wpływem górniczych deformacji terenu. Podjęte próby analiz numerycznych przeprowadzania rektyfikacji na dowolnych terenach objętych problemem szkód górniczych stanowią szansę na uogólnienie twierdzeń wynikających z rozprawy. Zatem prawidłowe ukształtowanie, skonstruowanie, a także obliczenie nowoprojektowanych budynków, aby były one zdolne do przejścia oddziaływań górniczych wywołanych ciągłymi deformacjami terenu, zagwarantuje jednocześnie właściwe decyzje dotyczące wyboru sposobu posadowienia oraz ewentualnego przyjętego rozwiązania prostowania obiektów nowo wznoszonych.





## **ABSTRACT**

As a result of underground mining of minerals, especially hard coal in the region of Upper Silesia, tremors of mining origin occur and the original surface of the land is subject to forced changes in the form of ground deformation. One such effect is the inclination of the terrain and the related leaning of buildings located in this area. Although the threat to the structure of the building, caused by its leaning from the vertical of a maximum of a few percent, is not great, the use of such buildings is very burdensome. This leads to the need to rectify the objects, which in turn generates high costs, often reaching the value of the straightened objects and as we know, all participants in the construction process, as well as later users, depend mainly on long-term and failure-free operation of buildings.

Therefore, in the doctoral dissertation, it was decided to define the requirements of a new, probably cheaper method of rectifying buildings, which will be adapted to this process already at the design stage. An additional advantage of such a system is the fact that the rectification process itself will require minimal preparation and the process itself can be repeated many times, which is impossible with the currently used rectification processes.

In the doctoral dissertation, the behaviour of the sliding layers of the building foundations was analysed, as well as the analysis of the behaviour of the sliding layers and the structure of a double plate reinforced concrete foundation with a sliding layer at the junction between its two parts, under vertical loads (simulating the loads exerted on the ground by medium-sized single-family and multi-family residential buildings) and horizontal (simulating the loads exerted on the foundation by hydraulic cylinders during the rectification process).

Conclusions drawn after carrying out theoretical, laboratory and numerical analyses are both scientific and practical. They will make it possible to secure and protect buildings against the impact of mining ground deformations. Attempts at numerical analyses of rectification in any areas covered by the problem of mining damage are an opportunity to generalize the theorems resulting from the doctoral dissertation. Therefore, the correct shaping, construction and calculation of newly designed buildings, so that they are able to take over the mining impacts caused by continuous deformations of the terrain, will also guarantee the right decisions regarding the choice of the method of foundation and the possible solution of straightening the newly erected objects.

