

## **WYDZIAŁ BUDOWNICTWA I INŻYNIERII ŚRODOWISKA**

**mgr inż. Krzysztof Wiesław Gumny**

### **WSPÓŁPRACA POJEDYNCZEGO FUNDAMENTU PŁYTOWO-PALOWEGO Z GRUNTEM** SOIL – STRUCTURE INTERACTION IN SINGLE PILE-RAFT FOUNDATION

*Rozprawa doktorska*

Promotor:  
**prof. dr hab. inż. Zygmunt Meyer**

Szczecin, 2021 r.

## PODZIĘKOWANIA

*Pragnę podziękować Panu Profesorowi dr. hab. inż. Zygmuntowi Meyerowi za pomoc w kwestiach merytorycznych, za wiele cennych wskazówek oraz duże wsparcie w powstaniu tej pracy.*

*Swoje podziękowania kieruję także do Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie za wsparcie techniczne oraz finansowe podczas powstawania tej pracy.*

*Dziękuję również Pracownikom Laboratorium Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie za pomoc przy pracach laboratoryjnych.*

*W pracach przygotowujących do badań laboratoryjnych zaangażowanych było wiele osób i firm, którym składam serdeczne podziękowania.*

*Podziękowania kieruję również do Najbliższych, którzy zawsze mnie wspierali.*

Krzysztof Wiesław Gumny

*Moim Rodzicom.*

## **SPIS TREŚCI**

<b>1. WSTĘP</b>	<b>5</b>
<b>2. CEL, TEZA I ZAKRES ROZPRAWY</b>	<b>7</b>
2.1. CEL ROZPRAWY.....	7
2.2. TEZA ROZPRAWY .....	7
2.3. ZAKRES ROZPRAWY .....	7
<b>3. ANALIZA LITERATURY Z ZAKRESU POJEDYNCZEGO FUNDAMENTU PŁYTOWO-PALOWEGO</b>	<b>8</b>
3.1. WIADOMOŚCI OGÓLNE.....	8
3.2. WYBRANE BADANIA TERENOWE NAD POJEDYNCZYMI FUNDAMENTAMI PŁYTOWO-PALOWYMI .....	9
3.3. LITERATURA DO OPISU MATEMATYCZNEGO .....	17
<b>4. PROGRAM BADAŃ</b>	<b>18</b>
<b>5. ANALIZA ZJAWISKA</b>	<b>19</b>
<b>6. BADANIA EKSPERYMENTALNE</b>	<b>21</b>
6.1. STANOWISKO BADAWCZE WRAZ Z SIŁOWNIKIEM .....	21
6.2. MODEL POJEDYNCZEGO FUNDAMENTU PŁYTOWO-PALOWEGO .....	25
6.3. CZUJNIKI - REJESTRATOR – PUNKTY POMIAROWE.....	26
6.3.1. POMIAR SIŁY .....	26
6.3.2. POMIAR – ZAGĘSZCZENIE GRUNTU .....	31
6.3.3. POMIAR PRZEMIESZCZENIA.....	31
6.3.4. KRUSZYWO ORAZ ZBIORNIK .....	32
6.4. PRACE PRZYGOTOWAWCZE ORAZ BADANIA .....	34
6.5. PROGRAM BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH.....	35
<b>7. ANALIZA WYNIKÓW UZYSKANYCH Z BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH</b>	<b>36</b>
7.1. WPROWADZENIE.....	36
7.2. WYNIKI SUROWE .....	36
7.3. WSPÓŁPRACA PALA Z GRUNTEM .....	38
7.3.1. WZROST OPORU POBOCZNY - JEDNAKOWE OSIADANIE .....	39
7.3.2. WZROST OPORU POBOCZNY – JEDNAKOWA SIŁA W GŁOWICY PALA .....	41

7.3.3.	ROZKŁAD NAPRĘŻEŃ NA POBOCZNICZY ORAZ SIŁA TARCIA .....	42
7.3.4.	NAPRĘŻENIA $\tau_1$ NA POBOCZNICZY PALA .....	47
7.3.5.	PODSUMOWANIE .....	50
7.4.	<i>WSPÓŁPRACA PŁYTY Z GRUNTEM .....</i>	<i>51</i>
7.5.	<i>ZAŁOŻENIE JEDNAKOWEGO OSIADANIA PALA I PŁYTY - SPRAWDZENIE .....</i>	<i>53</i>
7.5.1.	OSIADANIE PŁYTY .....	53
7.5.2.	OSIADANIE PALA .....	55
7.5.3.	OPIS MATEMATYCZNY OSIADANIA PFPP .....	56
7.5.4.	PODSUMOWANIE .....	57
<b>8.</b>	<b>ZASTOSOWANIE W PRAKTYCE</b>	<b>58</b>
8.1.	<i>OPIS MATEMATYCZNY .....</i>	<i>58</i>
8.2.	<i>PRZYKŁAD OBLICZENIOWY .....</i>	<i>62</i>
8.3.	<i>BADANIA EKSPERYMENTALNE W PRAKTYCE .....</i>	<i>67</i>
<b>9.</b>	<b>PODSUMOWANIE I WNIOSKI</b>	<b>69</b>
<b>10.</b>	<b>PLAN DALSZYCH BADAŃ</b>	<b>71</b>
<b>11.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>72</b>
<b>12.</b>	<b>SPIS RYSUNKÓW</b>	<b>76</b>
<b>13.</b>	<b>SPIS TABEL</b>	<b>79</b>
<b>14.</b>	<b>ZAŁĄCZNIKI</b>	<b>80</b>
<b>15.</b>	<b>STRESZCZENIE / SUMMARY</b>	<b>116</b>

## OZNACZENIA I JEDNOSTKI

### Litery łacińskie:

$C_2$  – parametr krzywej osiadania [mm/kN],

$D_1$  – średnica pala [m],

$D_2$  – średnica płyty przykrywającej [m],

$D_p$  – średnica strefy uplastycznionej pod palem [m],

$E$  – moduł odkształcenia gruntu [MPa],

$f_1$  – bezwymiarowy współczynnik do określania  $\tau_1$  [-],

$f_2$  – bezwymiarowy współczynnik tarcia pomiędzy gruntem a palem stalowym [-],

$FP$  – fundament palowy,

$FPP$  – fundament płytowo-palowy,

$h_1$  – wysokość pala [m],

$h_k$  – wysokość klina ze strefy uplastycznienia [m],

$I_D$  – stopień zagęszczenia gruntu [-],

$L$  – długość pala [m],

$M - K$  – metoda aproksymacji wyników próbnego obciążenia statycznego Meyera-Kowalowa,

$N_1$  – siła w podstawie fundamentu z PP6 [kN],

$N_2^*$  – siła w głowicy pala wyznaczona obliczeniowo [kN],

$N_2$  – siła w głowicy fundamentu z PP1 [kN],

$N_p$  – siła w palu [kN],

$N_{płyta}$  – siła w płycie [kN],

$PFPP$  – pojedynczy fundament płytowo-palowy,

$s_{2,s}$  – osiadanie [mm],

$T_1$  – siła w palu w punkcie PP2 [kN],

$T_2$  – siła w palu w punkcie PP3 [kN],

$T_3$  – siła w palu w punkcie PP4 [kN],

$T_4$  – siła w palu w punkcie PP5 [kN],

$T_p$  – sumaryczny opór na pobocznicę pala [kN],

$z_*$  – strefa aktywna naprężenia gruntu mineralnego [m].

**Litery greckie:**

$\alpha$  – kąt klina strefy uplastycznionej gruntu [°],

$\gamma$  – ciężar objętościowy gruntu [kN/m<sup>3</sup>],

$\kappa_2$  – bezwymiarowy parametr krzywej osiadania w metodzie M-K [-],

$\sigma_0$  – współczynnik bezwymiarowy,

$\sigma_1$  – naprężenia pod podstawą pala [kN/m<sup>2</sup>],

$\sigma_1^{\prime}$  – docisk pala rezultujący ze strefy uplastycznienia [kN/m<sup>2</sup>],

$\sigma_2$  – naprężenia pod płytą [kN/m<sup>2</sup>],

$\tau_1$  – jednostkowy opór na poboczniczy pala – podstawa pala [kN/m<sup>2</sup>],

$\tau_2$  – jednostkowy opór na poboczniczy pala – głowica pala [kN/m<sup>2</sup>],

$\tau_p$  – naprężenia na poboczniczy pala [kN/m<sup>2</sup>],

$\varphi$  – kąt tarcia wewnętrznego gruntu [°].

## 1. WSTĘP

W dobie szybkiego rozwoju budownictwa i przy sprzyjającej koniunkturze projektowane są coraz bardziej złożone i skomplikowane obiekty budowlane. Ich obciążenia muszą być przekazywane do gruntu w sposób bezpieczny z uwzględnieniem takich aspektów ekonomicznych, jak praca, czas oraz stosowane materiały. Nowe projekty obiektów przewidują zwiększenie obciążeń, a przede wszystkim wzrost sił oddziaływujących na fundamenty. Powoduje to, iż szeroko stosowane fundamenty bezpośrednie zastępowane są poprzez fundamenty głębokie. Bardzo szerokie zastosowanie mają fundamenty palowe.

Fundamenty palowe są łączone z konstrukcją naziemną z reguły przy pomocy płyt lub bloków żelbetowych. Dzięki temu połączeniu możemy zagwarantować przeniesienie obciążeń z konstrukcji naziemnych do fundamentu. Często stosowanym uproszczeniem podczas wymiarowania fundamentów palowych jest pomijanie wspomnianej płyty przykrywającej przy przenoszeniu obciążeń do gruntu. Zastosowanie tego rodzaju posadowienia można doszukać się w takich sektorach budownictwa, jak:

- energetyka,
- konstrukcje inżynierskie,
- obiekty kubaturowe,
- infrastruktura transportu kolejowego.

Praktyka wyprzedza często rozwiązania techniczne i badania naukowe. Projektuje się różne warianty posadowienia. Inżynierowie zajmujący się konstrukcjami kolejowymi wypowiadają się pozytywnie na temat stosowania fundamentów palowych z płytą przykrywającą. Zaznaczają, że są to dobre rozwiązania i mają większą nośność, niż wynika to z prostych wzorów dla pali pojedynczych. Do dnia dzisiejszego nikt się tym tematem nie zajął naukowo.

Rozwój kolejnictwa powoduje, że szuka się coraz to nowszych rozwiązań technicznych. Priorytetem jest tu szybkość, tzn. należy budować nie tylko tory, nasypy kolejowe, ale także rozwijać równocześnie wyposażenie elektryczne, tj. słupy trakcyjne wraz z ich wysięgnikami, trawersami, sieciami trakcyjnymi, przewodami napowietrznymi oraz fundamentami. Na drugim miejscu jest optymalizacja i ograniczenie wykorzystania materiałów do budowania infrastruktury kolejowej. Aktualne normy i wytyczne kolejowe wskazują jednoznacznie, jak powinny być budowane fundamenty palowe. Nadal pomija się przy tym płytę przykrywającą. To uproszczenie stosuje się w biurach projektowych, by uniknąć wyższego nakładu pracy inżyniera projektu. Praca ta wynika głównie z czasochłonnych obliczeń przy pomocy programów opierających się na metodzie elementów skończonych. Implementacja metody elementów skończonych powodowałaby opóźnienie w realizacji wielu przedsięwzięć kolejowych. Często w ramach jednego projektu kolejowego wykonuje się obliczenia dla ponad stu tego typu konstrukcji, dla różnych warunków geologicznych oraz obciążeniowych. Kolejnym istotnym czynnikiem jest fakt, iż wiele biur projektowych nie posiada tego typu programów obliczeniowych, co podyktowane jest ich wysoką ceną.

Konstrukcje PFPP są stosowane masowo. Natomiast patrząc na projekty z ich zastosowaniem, okazuje się, że powstają one, opierając się na „wycuciu” inżynierskim i pewnych prostych założeniach. Można powiedzieć, że projekty z wykorzystaniem konstrukcji PFPP mogą być przeszacowane lub niedoszacowane. Inżynierowie z branży kolejowej stoją na stanowisku, że jest to dobre rozwiązanie



konstrukcyjne. Biorąc pod uwagę sposób posadowienia, czyli fundamentowania i brak dowodów naukowych, zasadne jest przeprowadzenie badań naukowych w danej tematyce.

W niniejszej pracy doktorskiej zostanie poruszony temat współpracy gruntu z fundamentami palowymi, które są przykryte płytami lub blokami żelbetowymi. Fundamenty te zostaną poddane obciążeniom pionowym i w dalszej części pracy będą nazywane pojedynczymi fundamentami płytowo-palowymi (PFPP).

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

### **2.1. CEL ROZPRAWY**

Celem rozprawy doktorskiej, która opiera się na badaniach eksperymentalnych i laboratoryjnych, jest analiza współpracy pojedynczego fundamentu płytowo-palowego w gruntach niespoistych.

Uzyskany zbiór danych z badań eksperymentalnych  $\{N_i, s_i\}$ , tj. z próbnych obciążeń statycznych fundamentu, umożliwi przeprowadzenie walidacji metody Meyera-Kowalowa, która została opublikowana w pracy naukowej [20]. Następnie zostanie zweryfikowany dokładny rozkład sił w badanym układzie.

### **2.2. TEZA ROZPRAWY**

- 1) Podczas obciążenia pojedynczego fundamentu płytowo-palowego poprzez docisk płyty przykrywającej podwyższa się naprężenie na poboczniczy pala, co skutkuje zwiększeniem nośności fundamentu.
- 2) Dla badanych pojedynczych fundamentów płytowo-palowych można stosować metodę M-K zamieszczoną w publikacji [20].

### **2.3. ZAKRES ROZPRAWY**

Zakres rozprawy obejmuje następujące zagadnienia:

- 1) analizę literatury w zakresie omawianego tematu,
- 2) analizę zjawiska współpracy PFPP z gruntem,
- 3) badania eksperymentalne,
- 4) weryfikację wyników badań eksperymentalnych,
- 5) analizę praktycznego zastosowania wyników pracy.

### 3. ANALIZA LITERATURY Z ZAKRESU POJEDYNCZEGO FUNDAMENTU PŁYTOWO-PALOWEGO

#### 3.1. WIADOMOŚCI OGÓLNE

Fundamenty płytowo-palowe można współcześnie wymiarować za pomocą różnych narzędzi obliczeniowych, których rozwój następował na przestrzeni wielu poprzednich lat. Są to: metody uproszczone, przybliżone metody numeryczne, szczegółowe metody numeryczne oraz empiryczne. Poznane przez autora metody obliczeniowe fundamentów płytowo-palowych zostały przedstawione w tabeli 3.1. Są to algorytmy obliczeniowe stosowane do płyt wzmacnianych wieloma palami. W literaturze brak jest modeli obliczeniowych dotyczących PFPP, które byłyby zweryfikowane w oparciu o badania eksperymentalne.

W tab. 3.1. przedstawiono, proponowane przez różnych autorów, modele matematyczne weryfikujące fundamenty płytowo-palowe wzmacniane wieloma palami.

Tabela 3.1. Metody obliczeniowe konstrukcji FPP

Literatura	Grupy metod / Autorzy	Opis	Programy
	Algorytmy numeryczne		
32	Poulos (1994)	Metoda Różnic Skończonych / Metoda Superpozycji	GARP
3	Butterfield / Banejee (1971b)	Pełna Metoda Elementów Brzegowych (BEM)	
16	Knabe	Metoda Elementów Skończonych	Program na bazie MES 2D
23	Meyer, Chrusciweicz, Cichocki	Liniowa Teoria Boussinesqu z uwzględnieniem Metody Współczynników Wpływu	Algorytm obliczeniowy (brak nazwy)
6	Davis / Poulos (1972)	BEM, Metoda Superpozycji (sprężysto-izotropowa)	
<b>Algorytm hybrydowy</b>			
8	EI-Mossallamy (1996)	Płyta (FEM - Metoda Elementów Skończonych) / Działanie grupowe (BEM)	GARP
46	Wahrmund (1993)	Pale, Płyta - MES / Grunt: BEM (sprężysto-izotropowy)	PILESET
5	Chow (1986)	Zmodyfikowany model izotropowy	
24	O'Neill et al. (1981)	Model hybrydowy	
12	Hain / Lee (1978)	Płyta: MES, Powierzchnia posadowienia: BEM Metoda Superpozycji, grunt: liniowo- sprężysty lub z MES sprężysto-plastyczny	
<b>Metody analityczne</b>			
18	Lutz (2002)	Metoda Superpozycji (liniowa, elastyczna)	PILERAFT
35	Randolph (1983)	Metoda Superpozycji (liniowa, elastyczna)	PIGLET
8	EI-Mossallamy (1996)	Metoda Podporowa	
37	Russo	Płyta ze sprężynami	
15	Kitiyodom and Matsumoto	Płyta ze sprężynami	PRAB
31	Poulos	Płyta ze sprężynami	
29	Poulos	Ława fundamentowa ze sprężynami	GASP
1	Brown i Wiesner	Ława fundamentowa ze sprężynami	
<b>Modele zastępcze wg teorii sprężystości</b>			
30	Poulos (1993)	Głęboko leżąca powierzchnia zastępcza / Ekwivalentny pojedynczy pał zastępczy	
43	Taher (1991)	Zmodyfikowana Metoda Głęboko Leżącej Powierzchni Zastępczej	
2	Burland	Pał jako reduktor osiadania płyty	
33	Poulos	Pał jako reduktor osiadania płyty	
36	Randolph	Pał jako reduktor osiadania płyty	

Metody numeryczne są najbardziej rozwinięte dzięki, m.in. pracom Knabego, Davisa/Poulosa, Meyera/Cichockiego [16;6;23].

W ostatnich latach badano empirycznie również zachowanie się fundamentów płytowo-palowych w warunkach polowych i laboratoryjnych. Prace badawcze wykonywano głównie w krajach azjatyckich i Bliskiego Wschodu ze względu na duże zapotrzebowanie na tego typu konstrukcje. Okazało się też, że zainteresowanie nimi można zauważyć w niektórych krajach europejskich, takich jak: Czechy, Niemcy, Włochy. Efekty i wyniki tych badań można znaleźć w wielu publikacjach, np. w [6; 11; 13; 19; 24; 28; 32; 35; 36; 38; 39; 43]. Opierając się na wybranych metodach badawczych, powstały też programy obliczeniowe, jak: GARP, PILESET, PILERAFT, PIGLET oraz program opisany, m.in. w publikacji [23]. Część z nich została wykorzystana i porównana w ramach badań w pracy [27].

W ramach przeglądu wybranej literatury skupiono się głównie na badaniach eksperymentalnych pojedynczych fundamentów płytowo-palowych. Badania laboratoryjne i terenowe były prowadzone częściowo na fundamentach w skali naturalnej oraz w laboratoriach w skali pomniejszonej. Pomiary te przeprowadzono w różny sposób i zostaną przedstawione w następnym rozdziale niniejszej pracy.

Analizując literaturę poświęconą fundamentom palowym i płytowym, przedstawiono także publikacje służące do opisu matematycznego mechanizmu przenoszenia obciążeń do gruntu. Jest to metoda M-K, która stosowana jest do pali pojedynczych. W celu uwzględnienia płyty przykrywającej przedstawiona zostanie także metoda Szmecchela- Meyera.

### **3.2. WYBRANE BADANIA TERENOWE NAD POJEDYNCZYMI FUNDAMENTAMI PŁYTOWO-PALOWYMI**

W niniejszym rozdziale analizowane będą wybrane badania, które zostały przeprowadzone w ramach innych testów dla pojedynczych fundamentów płytowo-palowych.

Badania przedstawione w artykule [3] wykonano na Uniwersytecie Technicznym w Ostrawie w skali pomniejszonej. Przeprowadzono próbne obciążenia płyty przykrywającej, pala pojedynczego oraz kompletnej konstrukcji pojedynczego fundamentu płytowo-palowego.

Wyniki dla poszczególnych elementów konstrukcji, jak i całościowego pojedynczego fundamentu płytowo-palowego, zostały przedstawione w publikacji [3]. Podczas badań mierzone były siły globalne. Z tego powodu nie można rozpoznać szczegółowego rozkładu sił w konstrukcji PFPP. Brakującym ogniwem jest rozkład sił w samym palu, który został przykryty płytą żelbetową.

Wymiary fundamentu wykorzystanego do badań były następujące:

- płyta o bokach 600 mm i wysokości 250 mm,
- pal o średnicy 150 mm i długości 850 mm.

Środowiskiem fundamentu była glina o wysokiej plastyczności.

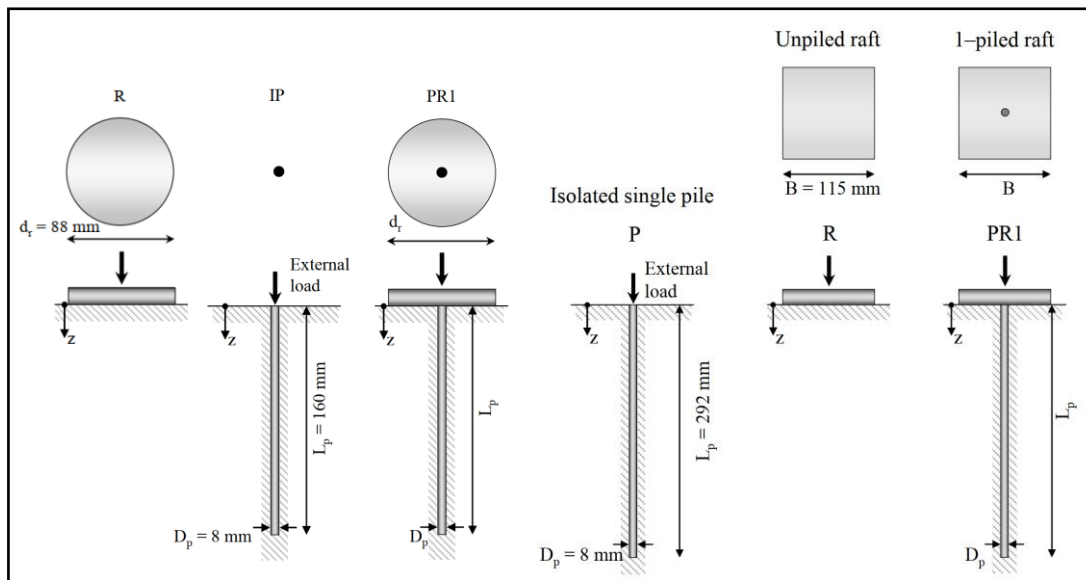


Rys. 3.1. Stanowisko badawcze oraz głowica fundamentu wraz z oprzyrządowaniem (źródło [3])

Podczas badań monitorowano jedynie siłę pionową, która była przykładana do głowicy pała oraz globalne przemieszczenie konstrukcji fundamentu. Przeprowadzone badania nie wykazują poszczególnych komponentów siły w PFPP. To nie pozwala na pełną weryfikację wpływu płyty przykrywającej na zachowanie się oporu poboczny. Brakujące komponenty siły to:

- siła u podstawy pała,
- rozkład naprężeń na pobocznicę pała oraz tarcie,
- siła w głowicy pała.

Testy, przeprowadzone w ramach prac [9], [10] i [11], nie skupiały się na rozkładzie siły na poszczególne elementy konstrukcji fundamentu, ponieważ duży nacisk, tak samo jak w pracy [3], kładziony był na rozmieszczenie pali pod płytą przykrywającą. Stosowano w tym wypadku modele o wymiarach znacznie pomniejszonych, które przedstawiono na rys. 3.2.



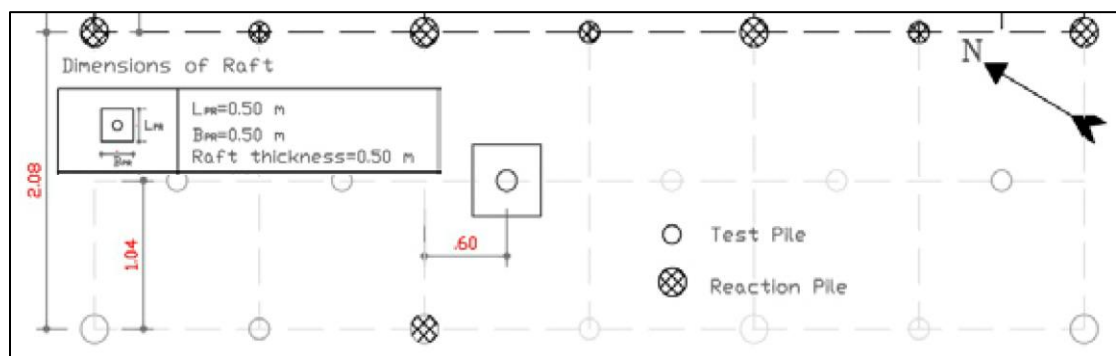
Rys. 3.2. Schematy przebadanych modeli pali (źródło: [9],[10],[11])

Wymiary fundamentu były następujące:

- płyta o średnicy 88 mm oraz pal o średnicy 8,00 mm i długości 160 mm,
- płyta o długości boku 115 mm oraz pal o średnicy 8,00 mm i długości 292 mm.

Z uwagi na wymienione warunki brzegowe uzyskane wyniki w ramach tych badań są również nieprzydatne do przeprowadzenia analizy wpływu płyty przykrywającej na opór pobocznicy. W pracach [9],[10],[11] został wykazany wyraźny wzrost udźwigu pala wskutek użycia płyty przykrywającej w odniesieniu do samego pojedynczego pala.

Podobnie jak w artykule [3], w publikacji [19] analizowano, m.in. pojedyncze fundamenty płytowo-palowe i badano tylko globalne przemieszczenia fundamentu w zależności od wywieranego na niego nacisku. Należy jednak wspomnieć, iż badania były przeprowadzane w terenie w skali naturalnej. Rysunek 3.3. przedstawia specyfikację przebadanego pala.



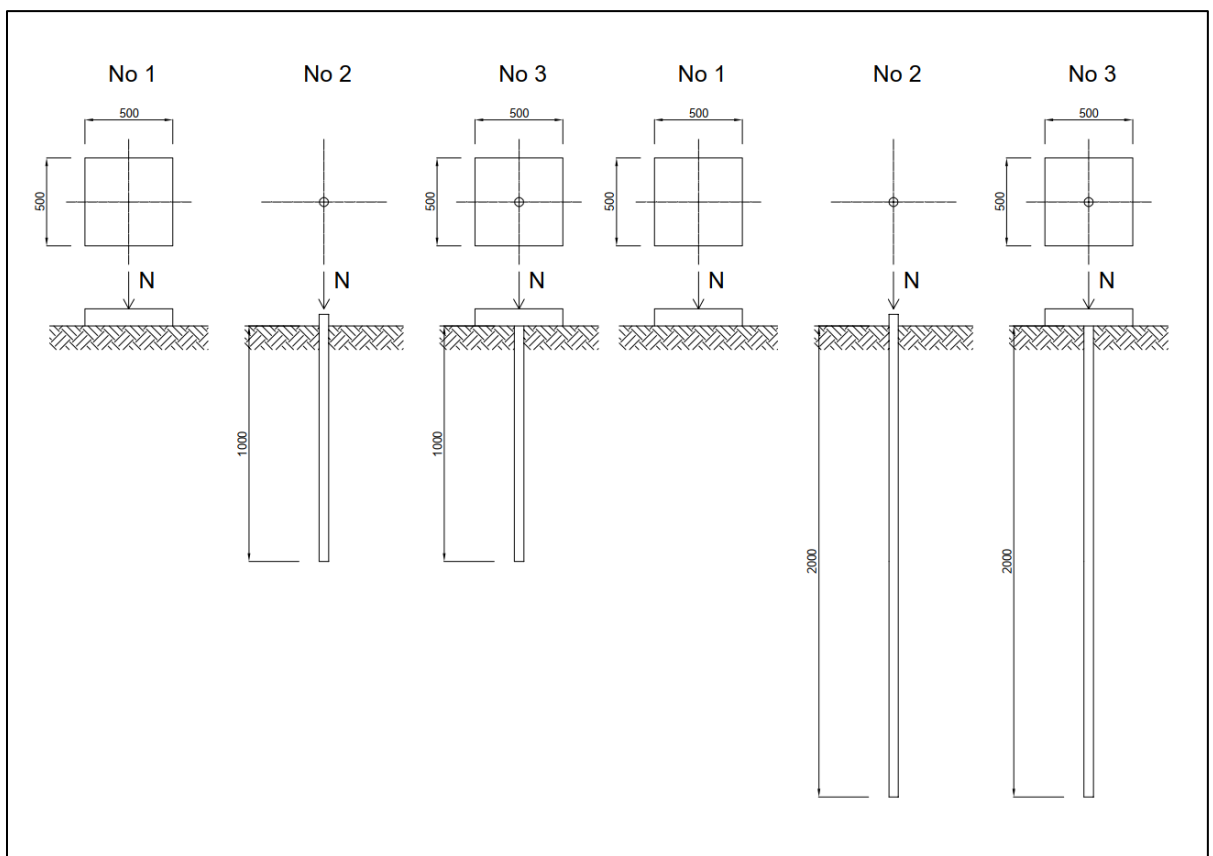
Rys. 3.3. Konfiguracja PFPP (źródło [19])

Wymiary fundamentu były następujące:

- płyta o boku 500 mm i wysokości 500 mm,
- pal o średnicy 130 mm i długości 8000 mm.

Z uwagi na proporcje badanych fundamentów (mikropale) oraz brak informacji na temat rozłożenia reakcji pomiędzy poszczególnymi elementami fundamentu trudno jednoznacznie opisać mechanizm przenoszenia sił do gruntu w analizowanym rodzaju posadowienia. Z badań tych wynika, iż udźwig pala rośnie w przypadku stosowania płyty przykrywającej.

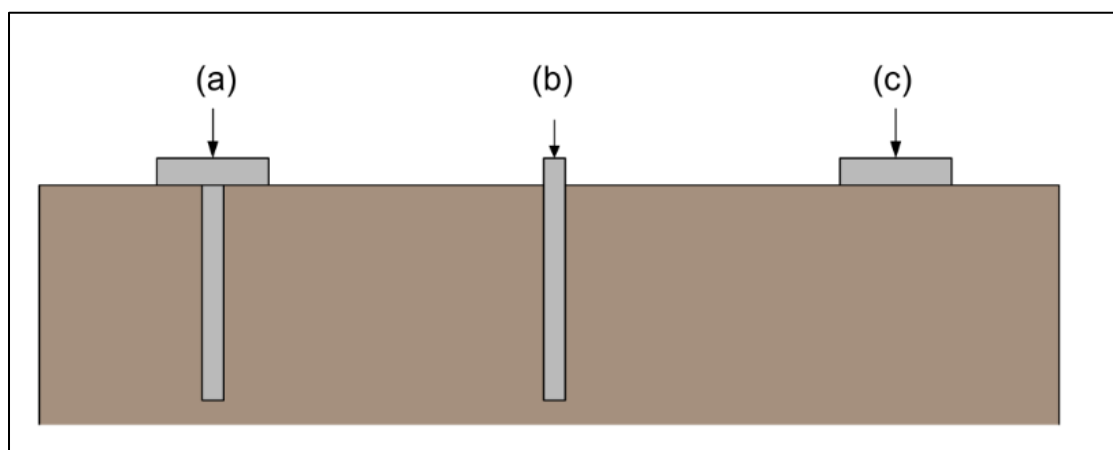
W przypadku badań przeprowadzonych w artykule [39] sprawdzano tylko osiadanie pojedynczego fundamentu płytowo-palowego zależnego od zadanej siły pionowej. Obciążenia próbne były przeprowadzane podobnie do badań opublikowanych w artykule [3], tzn. obciążano płytę przykrywającą pal pojedynczy oraz fundament płytowo-palowy. Należy nadmienić, iż zostały przeprowadzone doświadczenia dla dwóch różnych długości pali, tj. 1000 mm i 2000 mm, których średnica wynosiła  $\varnothing 60\text{ mm}$ .



Rys. 3.4. Zestawienie badanych modeli (źródło [39])

Do badań została zastosowana glina. Więcej informacji dotyczących gruntu nie podano w publikacji [39]. Poza PFPP sprawdzono w ramach publikacji [39] zachowanie fundamentów płytowo-palowych o różnych konfiguracjach pali. W badaniach stwierdzono również znaczny wpływ płyty na udźwig fundamentu.

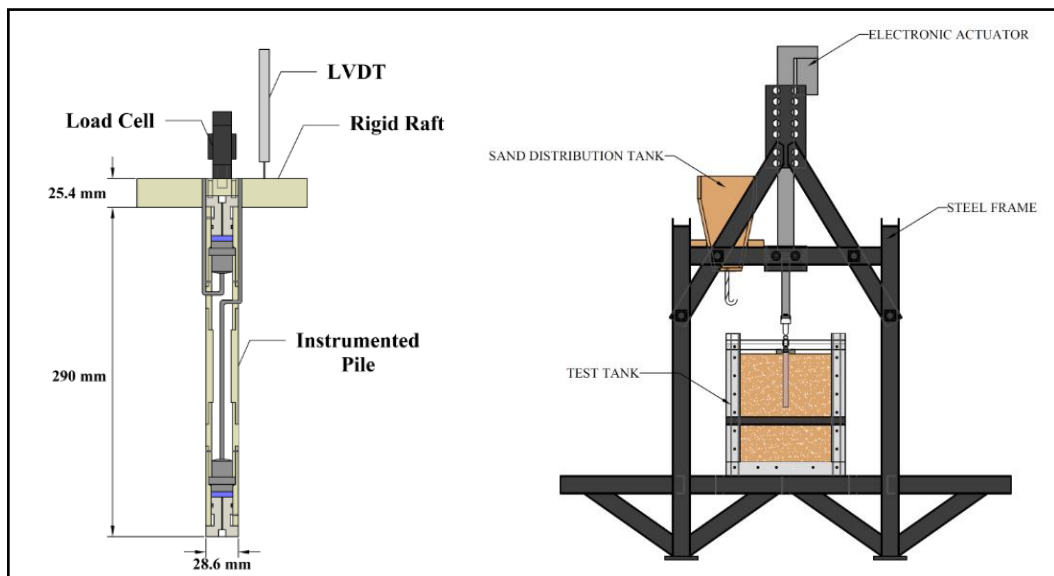
W pracy doktorskiej [44] przeprowadzono badania w małej skali zaprezentowanej na rys.3.5.



Rys. 3.5. Badane elementy w ramach [44]: a) PFPP, b) fundament palowy, c) płyta (źródło [44])

Badania dotyczyły, jak w poprzednio opisanych przypadkach, pojedynczego fundamentu płytowo-palowego (rys. 3.5.a), samej pala (rys. 3.5.b) oraz samej płyty (rys. 3.5.c).

Model fundamentu i stanowiska badawczego zaprezentowano na rys. 3.6.



Rys. 3.6. Model badanego pala oraz stanowisko badawcze (źródło [44])

Wymiary fundamentu przebadanego pala były następujące:

- płyta 1 o bokach 100 mm i wysokości 25,4 mm,
- płyta 2 o bokach 150 mm i wysokości 25,4 mm,
- pal o średnicy 28,6 mm i długości 290 mm.

Badania przeprowadzono dla różnych modeli gruntów. Wzięto pod uwagę:

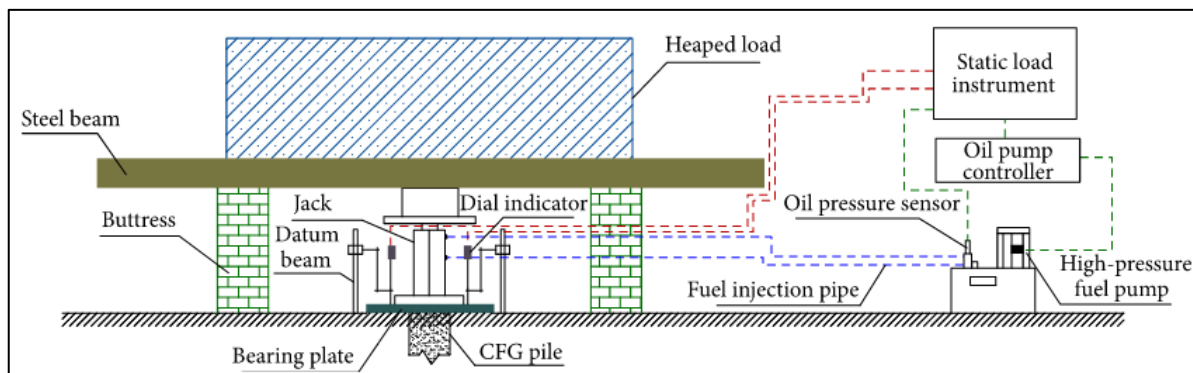
- piaski luźne i średnio zagęszczone,
- piaski luźne i zagęszczone,
- piaski średnio zagęszczone i zagęszczone.



Również i w tym przypadku zwrócono uwagę na znaczny wzrost udźwigu pala.

W publikacji [17] zostały przebadane pojedyncze fundamenty płytowo-palowe, które w tym przypadku zastosowano do umocnienia posadowienia nasypu komunikacyjnego.

Pomiary były prowadzone według następującego schematu zamieszczonego na rys.3.7.



Rys. 3.7. Schemat badania terenowego na palu (źródło [17])

Pomierzono zatem aplikowaną do systemu siłę oraz globalne przemieszczenie fundamentu. Przebadano pojedyncze pale i pojedyncze fundamenty płytowo-palowe.

Wymiary fundamentu (PFPP) były następujące:

- płyta: 1750 mm x 1750 mm,
- pal:  $\varnothing 500$  mm i  $l = 15\ 000$  mm.

Testy przeprowadzono w gruncie spoistym (głina).

Z wykonanych badań wynika również podwyższony udźwig pala. Jednak dla pełnego obrazu brakuje wyników dotyczących reakcji poszczególnych elementów konstrukcji na skutek zadanego obciążenia.

W badaniach przedstawionych w pracy [14] przeanalizowano, m.in. globalną nośność pojedynczych fundamentów płytowo-palowych. Badania były prowadzone w skali naturalnej, dlatego pale miały długość boku 300 mm oraz długość 6000 mm, natomiast płyta przykrywająca długość boku 900mm i wysokość 600mm.

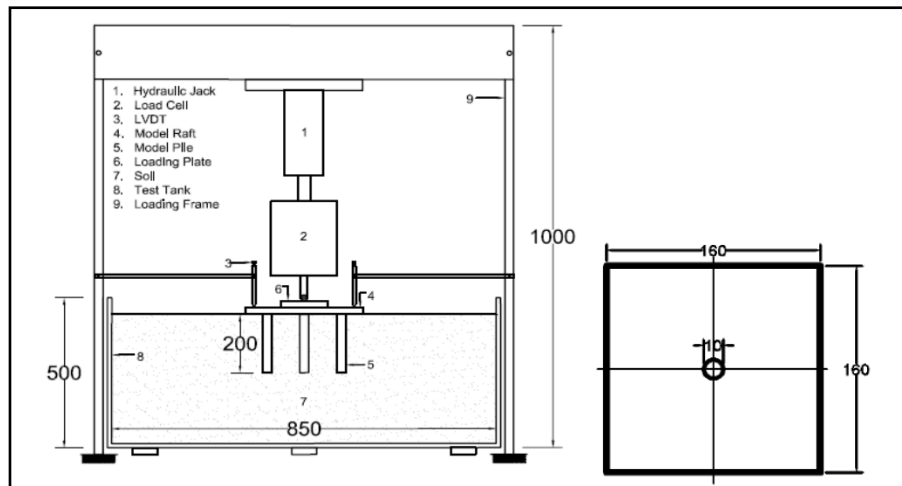
Size of Foundation	0.9×0.9 m (1×1)	0.9×1.8m (1×2)	1.68×1.8 m (3 piles)	1.8×1.m (2×2)	1.8×2.46 m (5 piles)	1.8×2.7 m (2×3)
PRF	240 tons	120 tons	180 tons	504 tons	400 tons	480 tons
PF	150 tons	120 tons	180 tons	504 tons	400 tons	480 tons
RF	120 tons	120 tons	180 tons	320 tons	400 tons	480 tons

Rys. 3.8. Zestawienie badań próbnych obciążeń pojedynczego fundamentu płytowo palowego (PRF – Pile Raft Foundation) oraz samej płyty (Raft Foundation) (źródło [14])

Testy obciążeniowe były przeprowadzone w piaskach bardzo zagęszczonych (0,00 -5,00 m pod poziomem gruntu) i piaskach średnio zagęszczonych (5,00 - 15,00 m pod poziomem gruntu). W ramach pracy [14] przeanalizowano samą płytę oraz PFPP. Publikacja ta potwierdza, że dla pojedynczego

fundamentu płytowo-palowego udźwig jest dwukrotnie wyższy. Na podwyższenie udźwigu pala ma wpływ płyta, która jest umiejscowiona nad palem.

W artykule [25] także przebadano pojedynczy fundament płytowo-palowy w skali pomniejszonej.



Rys. 3.9. Badane warianty fundamentów płytowo-palowych oraz stanowisko badawcze (źródło [25])

Pomiary zostały wykonywane w głowicy pala i zawierają odczyt zadawanej siły oraz przemieszczenia. W badaniach sprawdzono wpływ grubości płyty na rozkład sił pomiędzy palem a płytą.

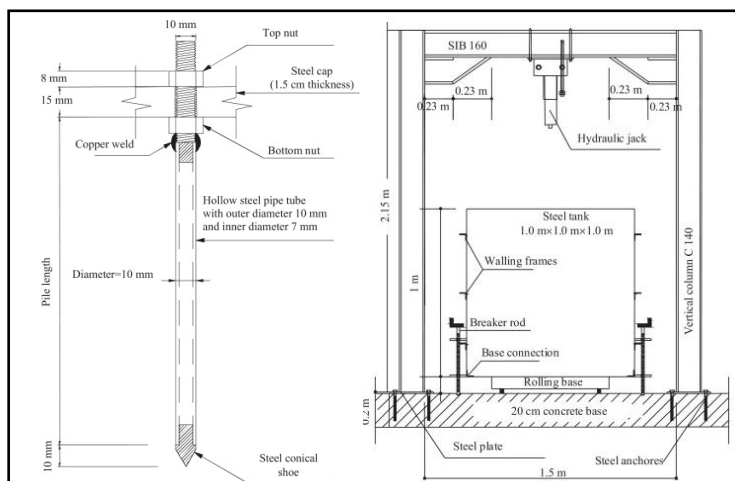
Wymiary fundamentu były następujące:

PFPP 1 - płyta o długości boków 160 mm i wysokości 5 mm, pal o średnicy 10 mm i długości 200 mm.

Testy przeprowadzono w piasku o średnim zagęszczeniu.

Wynik pracy jest analogiczny do pozostałych przeanalizowanych i przedstawionych publikacji. Rozpoznawalny jest jednoznaczny wpływ płyty na udźwig pala.

W publikacji [7] można znaleźć różne modele fundamentów płytowo-palowych, w tym również w kombinacji płyta z jednym palem (PFPP). W większości przypadków badany był globalny udźwig pala. Model badawczy widoczny jest na rys.3.10.

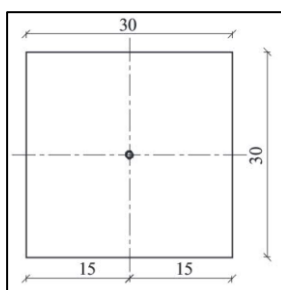


**Rys. 3.10. Model pala oraz stanowisko badawcze (źródło [7])**

Sprawdzono nośność fundamentów o następujących wymiarach:

- PFPP 1 - płyta o długości boków 300 mm i wysokości 5 mm, pal o średnicy 10 mm i długości 200 mm,
- PFPP 2 - płyta o długości boków 300 mm i wysokości 10 mm, pal o średnicy 10 mm i długości 300 mm,
- PFPP 3 - płyta o długości boków 300 mm i wysokości 15 mm, pal o średnicy 10 mm i długości 500 mm.

Testy przeprowadzono w piasku.



**Rys. 3.11. Model płyty przykrywającej z publikacji (źródło [7])**

W publikacji [7] znajduje się zestawienie nośności poszczególnych fundamentów w zależności od osiadania konstrukcji oraz wskazanie na zwiększony udźwig pala wskutek zastosowania płyty.

Po analizie wymienionych prac można stwierdzić, iż ich głównym celem jest określenie globalnego udźwigu fundamentu bez rozkładu reakcji na poszczególne elementy fundamentu (PFPP). Wyniki te nie dają możliwości sprawdzenia dokładnego wpływu płyty przykrywającej na opór poboczny dla pojedynczego fundamentu płytowo-palowego. Niemożliwe jest także sprawdzenie dokładnego mechanizmu pracy tego typu konstrukcji i współpracy z gruntem.

Omówione prace kończyły się wykresem obciążenie-osiadanie i w niektórych przypadkach obliczeniami wykonanymi komercyjnymi programami MES.

### 3.3. LITERATURA DO OPISU MATEMATYCZNEGO

Do opisu matematycznego zjawiska zachodzącego w pojedynczym fundamencie płytowo-palowym zostaną wykorzystane metody opisane w niniejszym miejscu rozprawy. Są to prace:

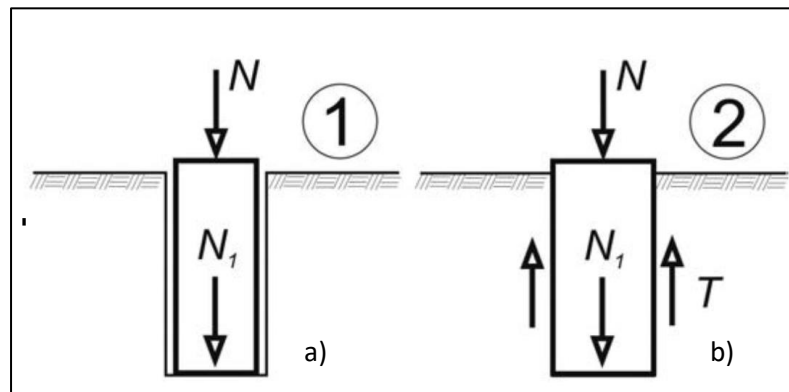
- dotyczące mechanizmu dla fundamentu płytowego [21],
- dotyczące mechanizmu dla fundamentu palowego [48].

Na wstępie przywołana zostanie pozycja [21], dzięki której można określić osiadanie fundamentów płytowych. Wzór opisujący osiadanie fundamentu płytowego dla podłoża jednorodnego ma postać:

$$s = \frac{\sigma_2}{E} \cdot \frac{D \cdot z_*}{D + z_*}, \text{ gdzie} \quad (3.1)$$

$$z_* = \frac{1}{2 \cdot t g \varphi} \cdot \frac{1}{\ln\left(\frac{E}{\sigma_0}\right)} \cdot \frac{\sigma_2}{\gamma}. \quad (3.2)$$

W artykułach [20], [22], [48] został opisany i szczegółowo przebadany mechanizm współpracy pała z gruntem. Analizowano pracę pała w różnych zestawieniach. W pierwszym przypadku (rys. 3.12.a) badano i przeanalizowano samą reakcję u podstawy pała  $N_1$  z wyłączeniem pobocznic pała. W drugim przypadku (rys. 3.12.b) przeanalizowano całościową reakcję fundamentu, z którego można było wyznaczyć  $T$ . Należy również nadmienić, iż  $N_1 \neq N$ .



Rys. 3.12. Schemat badanych pali (źródło [48])

Opis matematyczny stanu drugiego (rys. 3.12.b) wygląda tak:

$$s = C_2 \cdot N_{gr,2} \cdot \frac{\left(1 - \frac{N}{N_{gr,2}}\right)^{-\kappa_2}}{\kappa_2} - 1. \quad (3.3)$$

Zaprezentowane wzory stosowane są w praktyce inżynierskiej i dają miarodajne wyniki przedstawione w pracy [20]. Oba modele matematyczne i ich zależności zostaną sprawdzone pod kątem możliwości opisanego mechanizmu przenoszenia obciążeń PFPP do gruntu.

## 4. PROGRAM BADAŃ

Po przestudiowaniu i omówieniu wybranej literatury można wnioskować, że brak jest prac, które przedstawiałyby jednoznacznie wpływ płyty przykrywającej pojedynczego fundamentu płytowo-palowego na naprężenia występujące na poboczniczy pala. W związku z tym przygotowano następujący program badań, który przewiduje:

- 1) Analityczny opis zjawiska opierający się na analizie literatury w podrozdziałach pracy 3.2. i 3.3. Na podstawie metody Meyera-Kowalowa [20] opisującej współpracę pala z gruntem oraz metody Meyera-Szmechela [20] opisującej współpracę płyty z gruntem zostanie sformułowany model matematyczny dla pojedynczego fundamentu płytowo-palowego.
- 2) Badania eksperymentalne (rozdz. 6) pojedynczego fundamentu płytowo-palowego w gruncie niespoistym w warunkach laboratoryjnych. Celem będzie wyznaczenia siły  $N_2^*$  w głowicy i siły  $N_1$  w podstawie pala, jak również pomiar zanikania siły osiowej w trzonie pala  $N(z)$  w celu określenia oporu poboczniczy  $T$ .
- 3) Analizę wyników otrzymanych w ramach badań eksperymentalnych (rozdz. 7).
- 4) Weryfikację modelu matematycznego (rozdz. 8) opisującego współpracę pala z płytą przykrywającą z gruntem.

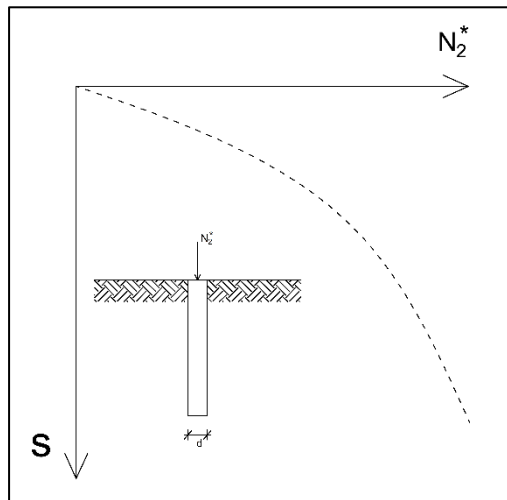
## 5. ANALIZA ZJAWISKA

Mechanizm współpracy PFPP w czasie obciążania został opisany przez autora przy pomocy modelu Meyera-Kowalowa z pracy [48] dla pala oraz modelu Meyera-Szmechela z publikacji [21] dla płyty.

Model Meyera-Kowalowa dla pala:

$$s = C_2 \cdot N_{gr,2} \cdot \frac{\left(1 - \frac{N}{N_{gr,2}}\right)^{-k_2}}{k_2} \quad (5.1)$$

Podczas próbnych obciążeń zostanie otrzymany zbiór  $\{s, N_2^*\}$ , który może zostać przedstawiony na diagramie (rys. 5.1.).



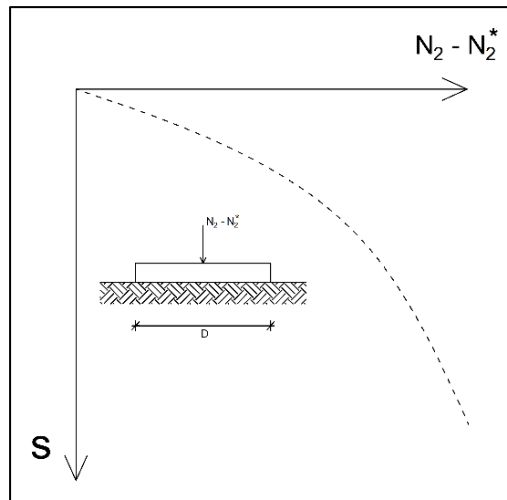
**Rys. 5.1.** Wykres poglądowy wyników dla pala

Model Meyera-Szmechela dla płyty:

$$s = \frac{\sigma_0}{E} \cdot \frac{D \cdot z_*}{D + z_*} \quad , \text{gdzie} \quad (5.2)$$

$$z_* = \frac{1}{2 \cdot \text{tg} \varphi} \cdot \frac{1}{\ln\left(\frac{E}{\sigma_0}\right)} \cdot \frac{\sigma_0}{\gamma} \quad (5.3)$$

Podczas próbnych obciążeń zostanie otrzymany zbiór  $\{s, N_2 - N_2^*\}$ , który może zostać przedstawiony na diagramie (rys. 5.2.).



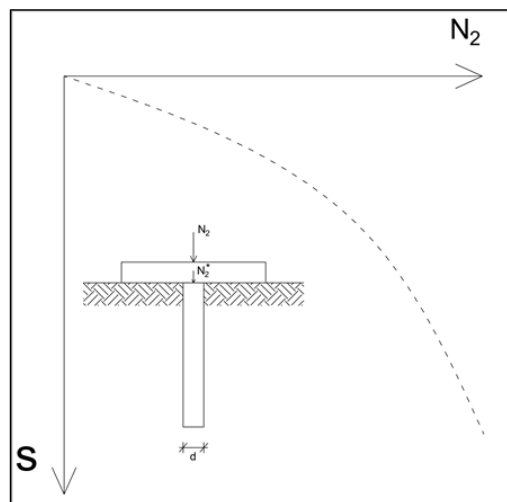
Rys. 5.2. Wykres poglądowy wyników dla płyty

Finalnie zostanie przeprowadzone porównanie osiadania zarówno pala jak i płyty. Osiadanie PFPP zostanie zweryfikowane przy pomocy następujących wzorów z metody M-K:

$$\kappa_2 = \sqrt{\frac{T}{N_1} + 1} - 1 \quad (\text{dla pala}), \quad (5.4)$$

$$\kappa_2 = \sqrt{\frac{N_2^*}{N_1}} - 1 \quad (\text{dla płyty}). \quad (5.5)$$

Otrzymane wyniki mogą zostać pokazane za pomocą diagramu na rys. 5.3.



Rys. 5.3. Wykres poglądowy wyników dla PFPP

## 6. BADANIA EKSPERYMENTALNE

### 6.1. STANOWISKO BADAWCZE WRAZ Z SIŁOWNIKIEM

W celu przeprowadzenia planowanych badań eksperymentalnych wykonano szereg analiz pod kątem doboru środowiska dla modelu pojedynczego fundamentu płytowo-palowego. Najbardziej optymalnym ze wszystkich przeanalizowanych wariantów, które w ramach tej pracy nie będą dalej pogłębiane, była rama obciążeniowa przedstawiona na rys.6.1. i 6.2.



Rys. 6.1. Stanowisko badawcze dla PFPP



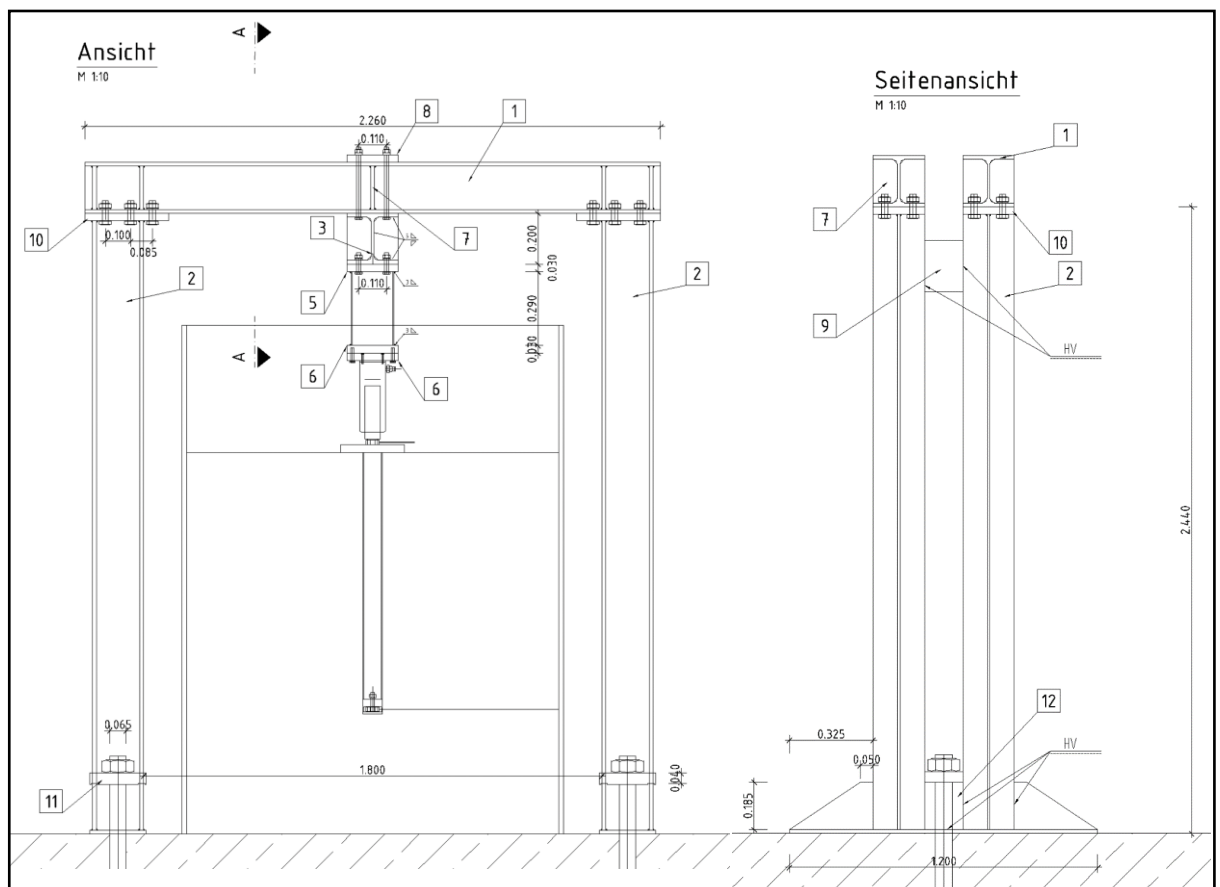
Rys. 6.2. Montaż stanowiska badawczego



Stanowisko badawcze zostało zaprojektowane i przez cały czas nadzorowane przez autora pracy, a wykonane przez firmę SPAW-KON. Gotowe i przetestowane stanowisko zostało zamontowane w Laboratorium Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie.

Cała konstrukcja ramy obciążeniowej składa się z trzech części: dwóch słupów oraz rygla. Wszystkie elementy wykonane są z dwuteowników HEB-200 ze stali S355J0. Konstrukcja przytwierdzona jest dwoma śrubami kotwiącymi o średnicy 150 mm do płyty fundamentowej hali. Do rygla jest przymocowany adapter, do którego zamocowano system hydrauliczny ENERPAC, którym wymusić można obciążenie rzędu 250 kN (25 ton) na badany element.

Rysunek techniczny stanowiska obciążeniowego znajduje się na rys. 6.3.



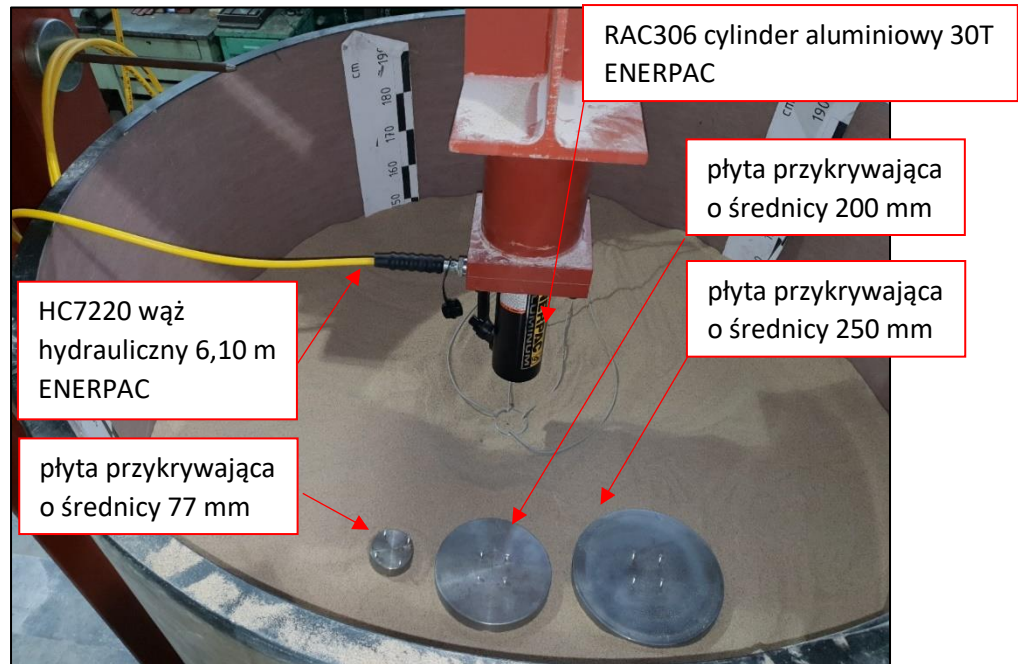
**Rys. 6.3. Rysunek techniczny stanowiska badawczego**

Do implementacji obciążenia został użyty system hydrauliczny ENERPAC o następującej konfiguracji:

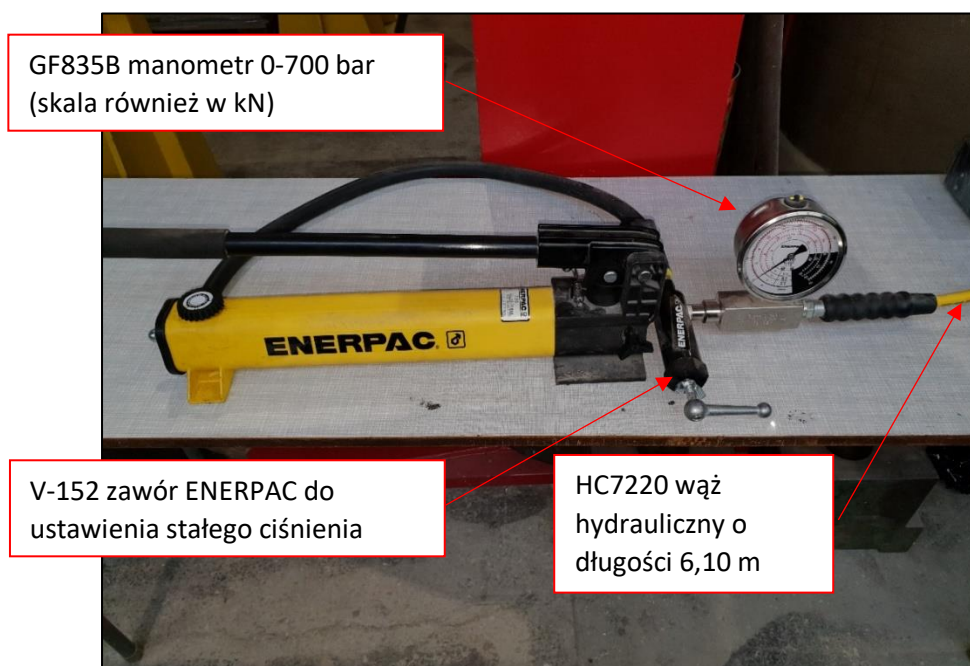
- RAC306 cylinder aluminiowy 30T ENERPAC,
- P392 lekka pompa ręczna ENERPAC,
- HC7220 wąż hydrauliczny 6,10 m ENERPAC,

- GF835B manometr 0-700 bar (skala również w kN),
- GA3 przyłącze manometru ENERPAC,
- V-152 zawór ENERPAC do ustawienia stałego ciśnienia.

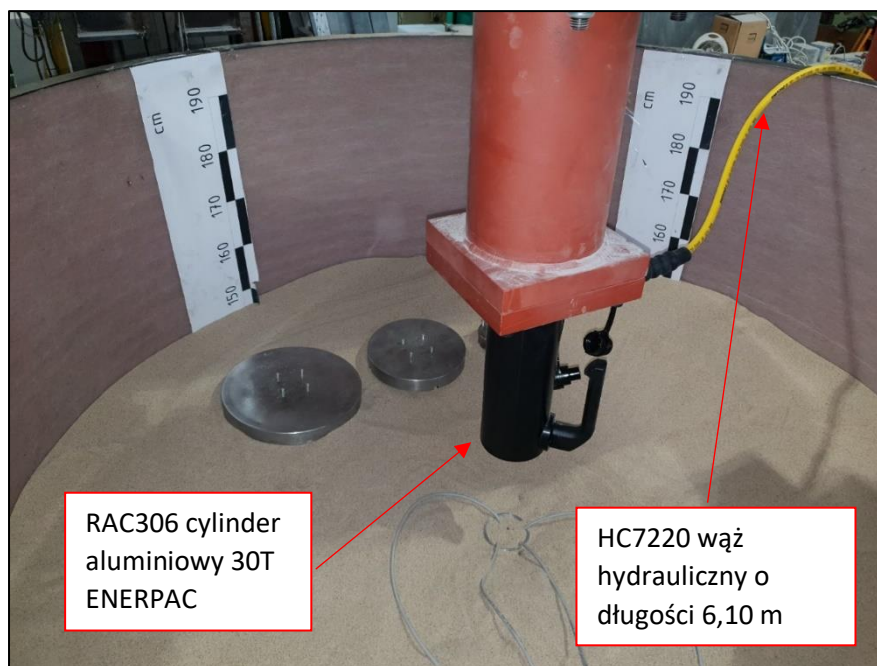
Na rysunkach: 6.4., 6.5., 6.6. znajdują się wyszczególnione elementy układu obciążającego i niektóre elementy modelu pojedynczego fundamentu płytowo-palowego.



Rys. 6.4. RAC306 cylinder aluminiowy 30T ENERPAC oraz płyty przykrywające model pala



Rys. 6.5. P392 lekka pompa ręczna ENERPAC



Rys. 6.6. Wąż hydrauliczny HC7220 oraz cylinder aluminiowy RAC306

## 6.2. MODEL POJEDYNCZEGO FUNDAMENTU PŁYTOWO-PALOWEGO

Model fundamentu odwzorowuje pale stalowe z zamkniętą podstawą oraz z płytą przykrywającą z żelbetu. Tego typu konstrukcje znajdują zastosowanie, m.in. na trakcjach kolejowych i w innych obszarach budownictwa.

Model PFFP wykonany przez firmy RLCNC i FPS Cegielski składa się zasadniczo z trzech elementów. Są to:

- rura ze stali S355J0,
- płyta przykrywająca ze stali S355J0,
- płyta zamykająca podstawę pala ze stali S355J0.

Surowy model jest przedstawiony na rys. 6.7., na którym widać wymienione elementy.



Rys. 6.7. Surowy model pojedynczego fundamentu płytowo-palowego

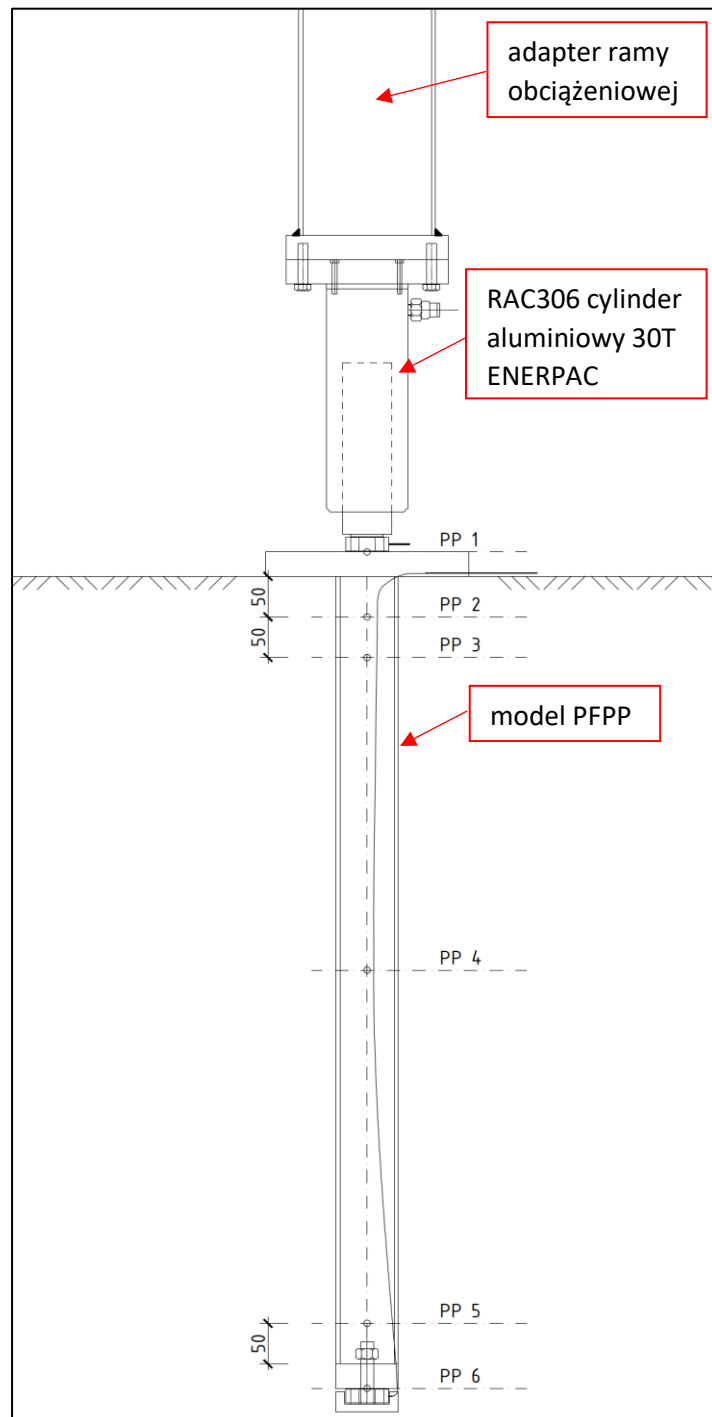
W ramach badań wykonano pale w systemie modułowym w celu przeprowadzenia obciążeń próbnych dla modeli PFFP o różnych wymiarach i uwzględniających różny stopień zagęszczenia gruntu. Wymiary pali i zagęszczenie gruntu ( $I_D$ ) były następujące:

- 1) pojedynczy pal bez płyty o  $L=1000 \text{ mm}$  ( $I_D=0,55$ ),
- 2) pojedynczy pal bez płyty o  $L=700 \text{ mm}$  ( $I_D=0,60$ ),
- 3) pojedynczy pal z płytą o  $\text{Ø}250 \text{ mm}$ ,  $L=1000 \text{ mm}$  ( $I_D=0,55$ ),
- 4) pojedynczy pal z płytą o  $\text{Ø}250 \text{ mm}$ ,  $L=700 \text{ mm}$  ( $I_D=0,60$ ),
- 5) pojedynczy pal z płytą o  $\text{Ø}200 \text{ mm}$ ,  $L=1000 \text{ mm}$  ( $I_D=0,55$ ),
- 6) pojedynczy pal z płytą o  $\text{Ø}200 \text{ mm}$ ,  $L=700 \text{ mm}$  ( $I_D=0,60$ ).

## 6.3. CZUJNIKI - REJESTRATOR – PUNKTY POMIAROWE

### 6.3.1. POMIAR SIŁY

Model fundamentu został uzbrojony odpowiednio w sensory pomiarowe w głowicy, u podstawy oraz na poboczniczy pala. Na rys. 6.8. przedstawiono rozmieszczenie miejsc pomiarowych, które zostały oznaczone skrótem PP.



Rys. 6.8. Rysunek poglądowy modelu PFPP i rozmieszczenie miejsc pomiarowych

Rodzaje urządzeń pomiarowych wykorzystanych w badaniach:

- 1) Głowica/podstawa pała (PP1 i PP6).

W głowicy i podstawie pała został umieszczony czujnik siły ZEPWN CL20-20, którym, według informacji producenta, można pomierzyć siły do 240kN.

Informacje dotyczące czujnika znajdują się w załączniku B.



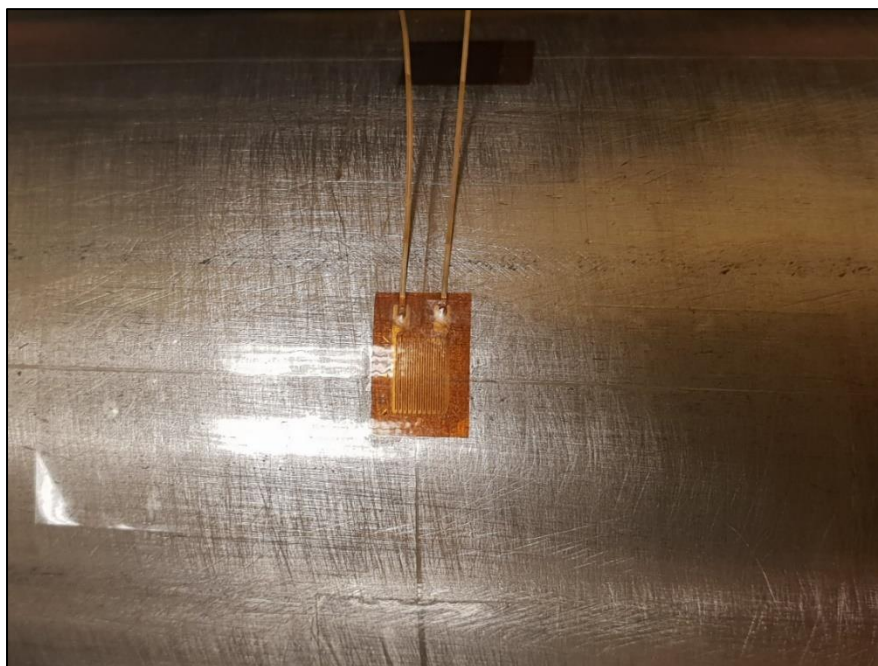
Rys. 6.9. Czujnik siły ZEPWN CL20 – rysunek poglądowy ze strony internetowej producenta (źródło [53])

- 2) Pobocznicza pała (PP2-PP5).

Na poboczniczy pała zostały umieszczone tensometry firmy TENMEX TF-5/120. Naklewanie tensometrów odbywało się we współpracy z Wydziałem Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki ZUT w Szczecinie. Na każdym poziomie tensometrów został utworzony pełen mostek, do którego wygenerowania należało nakleić 8 tensometrów. Łącznie na jeden pał wykorzystano 32 tensometry. Daje to sumarycznie 4 punkty pomiarowe, których rozmieszczenie przedstawione jest na rys. 6.8. Zaprezentowano też kilka rysunków z prac instalacyjnych punktów pomiarowych na poboczniczy pała.



Rys. 6.10. Rura  $\varnothing 76,3 \times 5$ ; L=700 mm - naklewanie tensometrów

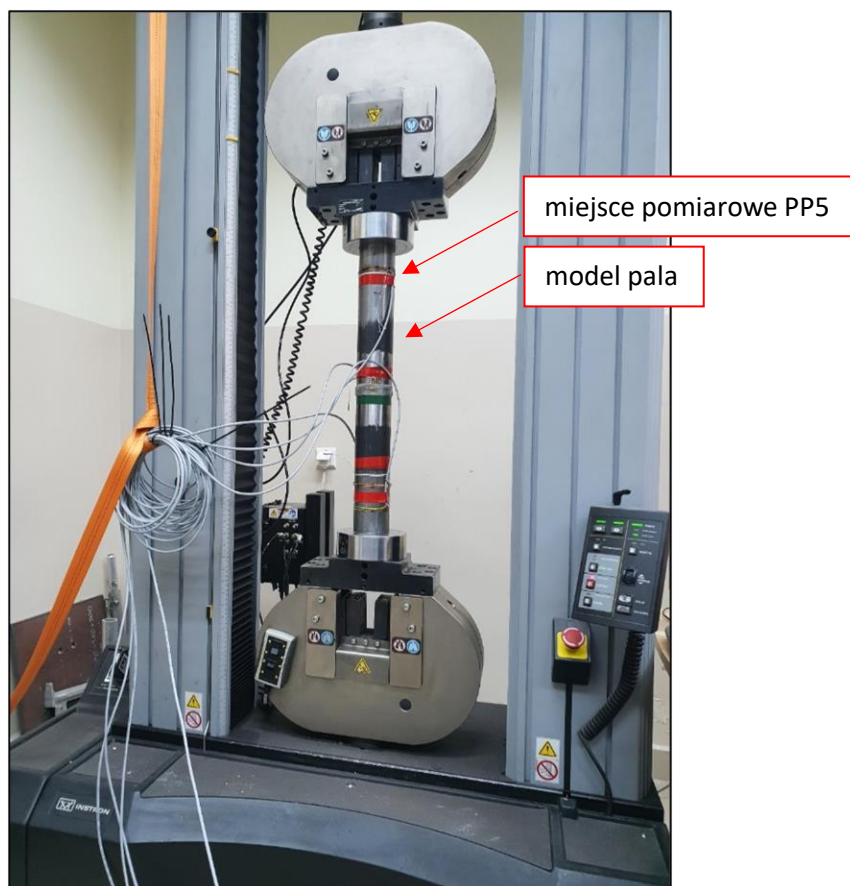


Rys. 6.11. Rura  $\varnothing 76,3 \times 5$ ; L=700 mm - tensometr kompensacyjny TF-5/120 TENMEX



Rys. 6.12. Rura  $\varnothing 76,3 \times 5$ ; L=700 mm – łączenie tensometrów w pełen mostek

Uzbrojone pale w czujniki pomiarowe kalibrowano na maszynie do badań niszczących. Kalibracja została przeprowadzona ze wsparciem Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki ZUT w Szczecinie. Na rys. 6.13. zaprezentowany jest model pala z naklejonymi czujnikami tensometrycznymi. Kalibracja polegała na obciążaniu modelu pala w zakresie sił 0-250 kN przy  $\Delta F = 10\text{kN}$ . Dla każdej siły sprawdzana była odpowiedź czujników tensometrycznych.

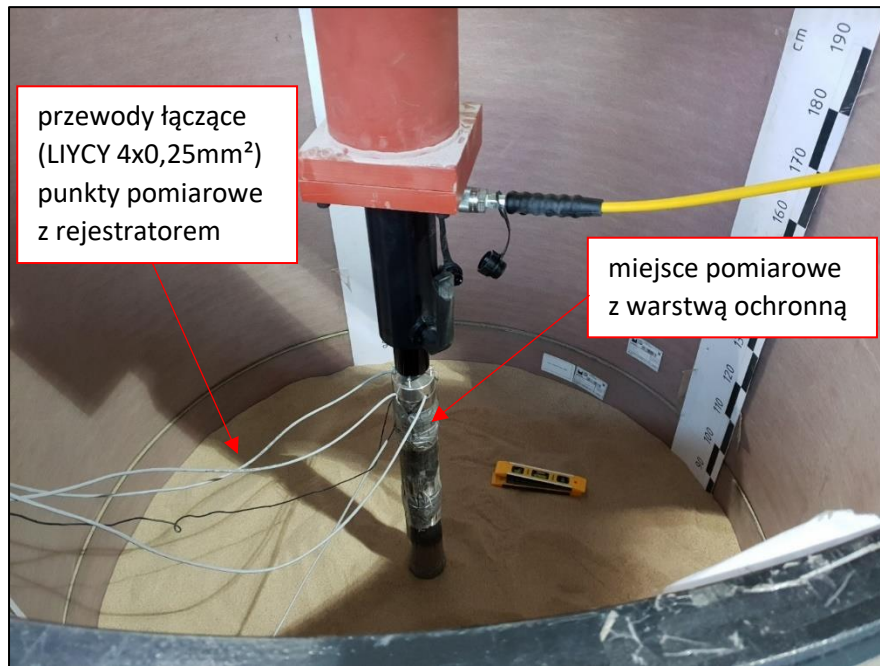


**Rys. 6.13. Kalibracja modelu pala w zakresie sił 0 kN – 250 kN**

Po kalibracji modelu PFPP i miejsc pomiarowych została nałożona warstwa ochronna czujników pomiarowych w celu uniknięcia uszkodzenia mechanicznego. Warstwa ochronna składała się z taśmy ekranująco-zabezpieczającej przed warunkami atmosferycznymi i uszkodzeniami mechanicznymi o wymiarach 200x50x1,2mm ALG-2 firmy TENMEX.

Na rysunku 6.14. widzimy pal z nałożonymi taśmami ALG-2 podczas prac instalacyjnych w zbiorniku z piaskiem razem.





Rys. 6.14. Widok komory podczas montażu pala

Wszystkie punkty pomiarowe zostały połączone z rejestratorem CL460 firmy ZEPWN poprzez 6 przewodów LIYCY 4x0,25mm<sup>2</sup>. Przy pomocy tego urządzenia następował pomiar sił występujących w modelu PFPP. Urządzenie rejestrujące znajduje się na rys. 6.15. Jest to rejestrator 8-kanalowy.

Wszelkie dane dotyczące rejestratora znajdują się w załączniku D.



Rys. 6.15. Rejestrator 8-kanalowy ZEPWN CL460

### **6.3.2. POMIAR – ZAGĘSZCZENIE GRUNTU**

Pomiar zagęszczenia wbudowywanego gruntu był przeprowadzany przy pomocy płyty dynamicznej firmy Zorn Instruments GmbH, model ZFG 3000. Pomiar odbywał się dla każdej wbudowanej warstwy, tj. co 15-20 cm. Sprzęt został użyczony przez firmę GCO – Geotechnical Consulting Office.



Rys. 6.16. Płyta dynamiczna Zorn ZFG 3000

### **6.3.3. POMIAR PRZEMIESZCZENIA**

Pomiar przemieszczenia fundamentu odbywał się przy pomocy mikrometrów z zegarem. Na rys. 6.16. zostały przedstawione użyte urządzenia pomiarowe, które były przytwierdzone do sztywnej głowicy pala. Pomiar odbywał się za każdym razem w momencie uzyskania założonego obciążenia  $\Delta F$ .



Rys. 6.17. Mikrometr użyty do pomiaru pionowego przemieszczenia pala

#### 6.3.4. KRUSZYWO ORAZ ZBIORNIK

Model pala został zasypany piaskiem o ziarnistości 0,2-0,8 mm (ziarno nominalne 0,4 mm), który z kolei znajduje się w zbiorniku o wymiarach  $\varnothing 1500 \times 2000$  mm. Komora badawcza wykonana jest z tworzywa sztucznego i składa się z dwóch równych elementów, które są połączone pierścieniem.

Informacje dot. użytego piasku można znaleźć w załączniku E.



Rys. 6.18. Wypełnianie zbiornika piaskiem

Nasypywanie piasku do komory roboczej odbywało się ręcznie. Worki z kruszywem podnoszone były do wysokości górnej krawędzi zbiornika przy pomocy suwnicy, a następnie wkładane do zbiornika. W komorze piasek został dokładnie i równomiernie rozprowadzony, co 15-20 cm był on warstwowo zagęszczany przy pomocy zagęszczarki TECTools Mini-Rüttelplatte „RÜTTLI”. Proces ten prowadzony był do uzyskania wymaganej wysokości ok. 1,50 m. Jako punkt odniesienia służyły listwy pomiarowe naklejone do wewnętrznej ściany komory, które również widoczne są na rys. 6.19.



**Rys. 6.19. Widok z komory badawczej wypełnionej piaskiem do wysokości 1,50 m**

#### 6.4. PRACE PRZYGOTOWAWCZE ORAZ BADANIA

Prace przygotowawcze poprzedzające przeprowadzenie próbnych obciążeń wykonanych w 2019 roku zostały rozłożone na dwa etapy. Zostaną one przybliżone w tym rozdziale.

Etap pierwszy:

- 1) Projekt stanowiska badawczego.
- 2) Projekt modelu pojedynczego fundamentu płytowo-palowego.
- 3) Wytworzenie stanowiska oraz modelu pojedynczego pala wraz z uzbrojeniem w punkty pomiarowe.
- 4) Instalacja zbiornika w docelowym miejscu prowadzenia badań w Laboratorium ZUT.
- 5) Instalacja stanowiska badawczego.
- 6) Zасыpywanie warstwowe zbiornika piaskiem wraz z jego zagęszczaniem.
- 7) Montaż modelu pala (tymczasowy montaż siłownika w celu ustawienia pozycji pala).
- 8) Kontynuacja zasypywania zbiornika oraz pala wraz z warstwowym zagęszczeniem do wysokości podstawy płyty przykrywającej.
- 9) Montaż docelowy siłownika.
- 10) Montaż zegarów pomiarowych do rejestrowania przemieszczenia fundamentu.
- 11) Podłączenie czujników siły do rejestratora.
- 12) Tarowanie rejestratora.

Po przeprowadzeniu wszystkich czynności można było przejść do przeprowadzenia obciążeń próbnych pojedynczego fundamentu płytowo-palowego. Etap drugi to badania, które zostały przeprowadzone w następujący sposób:

- 1) Wsuniecie kolby siłownika aż do styku z głowicą pala.
- 2) Tarowanie systemu.
- 3) Krokowe obciążanie systemu ( $\Delta F_{\text{pal z płytą}} = 5,00 \text{ kN}$  /  $\Delta F_{\text{pal bez płyty}} = 1,00 \text{ kN}$ ).
- 4) Odczyt i rejestracja sił ze wszystkich punktów pomiarowych oraz osiadania.
- 5) Zakończenie prób przy maksymalnym obciążeniu 25 kN dla PFPP i 17 kN dla FP.
- 6) Powolne odciążanie modelu przy pomocy zaworka regulującego ciśnienie w pompie.
- 7) Ponowne badanie tego samego pala / Wymiana płyty przykrywającej / Wymiana modelu i gruntu.

## 6.5. PROGRAM BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

W ramach badań nad pojedynczym fundamentem płytowo-palowym został zaplanowany następujący program:

1) Zagęszczenie gruntu  $I_D = 0,60$ :

- Pojedynczy pal bez płyty  $L=700$  mm – 4 próby obciążeń.
- Pojedynczy pal z płytą  $\varnothing 250$  mm,  $L=700$  mm – 4 próby obciążeń.
- Pojedynczy pal z płytą  $\varnothing 200$  mm,  $L=700$  mm – 4 próby obciążeń.

2) Zagęszczenie gruntu  $I_D = 0,55$ :

- Pojedynczy pal bez płyty  $L=1000$  mm – 4 próby obciążeń.
- Pojedynczy pal z płytą  $\varnothing 250$  mm,  $L=1000$  mm – 4 próby obciążeń.
- Pojedynczy pal z płytą  $\varnothing 200$  mm,  $L=1000$  mm – 4 próby obciążeń.

Podczas badań eksperymentalnych przeprowadzono ogółem 16 prób obciążeniowych modelu pojedynczego fundamentu płytowo-palowego w wymienionych konfiguracjach. Maksymalne obciążenie wynosiło 25 kN dla pali z płytą przykrywającą, natomiast 17 kN dla pali bez płyty przykrywającej. Obciążenia były zadawane krokowo z następującymi wartościami:

- $\Delta F_{\text{pal z płytą}} = 5,00$  kN,
- $\Delta F_{\text{pal bez płyty}} = 1,00$  kN.

Wyniki z poszczególnych stopni obciążeniowych były rejestrowane dopiero w momencie ustabilizowania się osiadania fundamentu.

## 7. ANALIZA WYNIKÓW UZYSKANYCH Z BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

### 7.1. WPROWADZENIE

W rozdziale 7. wykonano obliczenia, które opierają się na wynikach eksperymentalnych i opisanych w rozdz. 6. Obliczenia obejmują następujący zakres:

- 1) Współpraca pała z gruntem (rozdz. 7.3.).
- 2) Współpraca płyty z gruntem (rozdz. 7.4.).
- 3) Założenia jednakowego osiadania pała i płyty - sprawdzenie (rozdz. 7.5.).

### 7.2. WYNIKI SUROWE

Podstawą obliczeń są wyniki surowe wszystkich prób obciążeniowych wymienionych w rozdziale 6.5. niniejszej pracy. Wyniki badań zostały zestawione w tab. 7.1. – 7.6.

**Tabela 7.1. Wyniki próbnych obciążeń PFPP o parametrach: l=1000 mm, płyta przykrywająca Ø250 mm oraz I<sub>D</sub>=0,55**

L= 1000 mm / Ø250 mm / I <sub>D</sub> =0,55								
s <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> <sup>*</sup>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	N <sub>1</sub>	T <sub>p</sub>
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,15	5,05	1,79	1,74	1,69	1,37	1,17	1,16	0,63
0,32	10,00	3,65	3,55	3,46	2,84	2,45	2,43	1,22
0,55	15,01	5,29	5,14	4,99	4,05	3,49	3,46	1,83
0,76	20,05	7,15	6,96	6,77	5,58	4,88	4,84	2,31
0,95	25,01	8,95	8,69	8,45	6,87	5,93	5,88	3,07

**Tabela 7.2. Wyniki próbnych obciążeń PFPP o parametrach: l=700 mm, płyta przykrywająca Ø250 mm oraz I<sub>D</sub>=0,60**

L= 700 mm / Ø250 mm / I <sub>D</sub> =0,60								
s <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> <sup>*</sup>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	N <sub>1</sub>	T <sub>p</sub>
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,18	5,05	1,76	1,71	1,66	1,46	1,31	1,30	0,46
0,42	10,00	3,54	3,44	3,35	2,96	2,67	2,64	0,90
0,62	15,01	4,57	4,42	4,27	3,69	3,27	3,23	1,34
0,85	20,05	6,31	6,12	5,94	5,18	4,61	4,55	1,76
1,05	25,01	8,85	8,59	8,35	7,36	6,64	6,57	2,28

**Tabela 7.3. Wyniki próbnych obciążeń PFPP o parametrach: l=1000 mm, płyta przykrywająca Ø200 mm oraz I<sub>D</sub>=0,55**

L= 1000 mm / Ø200 mm / I <sub>D</sub> =0,55								
s <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> <sup>*</sup>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	N <sub>1</sub>	T <sub>p</sub>
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,19	5,00	1,95	1,90	1,85	1,53	1,32	1,31	0,64
0,45	10,06	3,86	3,76	3,67	3,05	2,66	2,64	1,22
0,65	15,40	5,71	5,56	5,41	4,45	3,84	3,81	1,90
0,83	20,08	7,85	7,66	7,47	6,25	5,44	5,39	2,46
1,03	25,10	9,69	9,43	9,19	7,57	6,52	6,45	3,24

**Tabela 7.4. Wyniki próbnych obciążeń PFPP o parametrach: l=700 mm, płyta przykrywająca Ø200 mm oraz I<sub>D</sub>=0,60**

L= 700 mm / Ø200 mm / I <sub>D</sub> =0,60								
s <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> *	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	N <sub>1</sub>	T <sub>p</sub>
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,22	5,00	2,10	2,05	2,00	1,79	1,64	1,63	0,47
0,49	10,06	3,85	3,75	3,66	3,27	2,98	2,95	0,90
0,74	15,40	5,68	5,52	5,38	4,78	4,34	4,30	1,37
0,92	20,08	7,65	7,46	7,27	6,51	5,94	5,88	1,77
1,14	25,10	8,79	8,53	8,28	7,28	6,56	6,50	2,29

**Tabela 7.5. Wyniki próbnych obciążeń FP o parametrach: l=1000 mm oraz I<sub>D</sub>=0,55**

L= 1000 mm / Ø77 mm / I <sub>D</sub> =0,55								
s <sub>2</sub>	N <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> *	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	N <sub>1</sub>	T <sub>p</sub>
0,00	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,16	1,00	1,00	1,00	0,99	0,97	0,91	0,90	0,10
0,32	2,00	2,00	1,99	1,99	1,94	1,82	1,80	0,20
0,48	3,00	3,00	2,99	2,98	2,91	2,73	2,70	0,30
0,64	4,00	4,00	3,98	3,98	3,88	3,64	3,60	0,40
0,80	5,00	5,00	4,98	4,97	4,85	4,55	4,51	0,49
0,96	6,00	6,00	5,97	5,97	5,82	5,46	5,41	0,59
1,12	7,00	7,00	6,97	6,96	6,79	6,37	6,31	0,69
1,28	8,00	8,00	7,97	7,96	7,76	7,28	7,21	0,79
1,44	9,00	9,00	8,96	8,95	8,73	8,19	8,11	0,89
1,60	10,00	10,00	9,96	9,95	9,70	9,10	9,01	0,99
1,76	11,00	11,00	10,95	10,94	10,67	10,01	9,91	1,09
1,92	12,00	12,00	11,95	11,93	11,64	10,92	10,81	1,19
2,07	13,00	13,00	12,94	12,93	12,61	11,83	11,71	1,29
2,45	14,00	14,00	13,94	13,92	13,58	12,74	12,62	1,38
2,85	15,00	15,00	14,94	14,92	14,55	13,65	13,52	1,48

**Tabela 7.6. Wyniki próbnych obciążeń FP o parametrach: l=700 mm oraz I<sub>D</sub>=0,60**

L= 700 mm / Ø77 mm / I <sub>D</sub> =0,60								
s <sub>2</sub>	N <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> *	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	N <sub>1</sub>	T <sub>p</sub>
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,20	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	0,93	0,92	0,08
0,40	2,00	2,00	2,00	1,99	1,95	1,85	1,83	0,17
0,59	3,00	3,00	2,99	2,99	2,93	2,78	2,75	0,25
0,79	4,00	4,00	3,99	3,98	3,90	3,71	3,67	0,33
0,99	5,00	5,00	4,99	4,98	4,88	4,64	4,58	0,42
1,19	6,00	6,00	5,99	5,97	5,85	5,56	5,50	0,50
1,38	7,00	7,00	6,98	6,97	6,83	6,49	6,41	0,59
1,58	8,00	8,00	7,98	7,97	7,81	7,42	7,33	0,67
1,78	9,00	9,00	8,98	8,96	8,78	8,34	8,25	0,75
1,98	10,00	10,00	9,98	9,96	9,76	9,27	9,16	0,84
2,17	11,00	11,00	10,97	10,95	10,73	10,20	10,08	0,92
2,37	12,00	12,00	11,97	11,95	11,71	11,12	11,00	1,00
2,57	13,00	13,00	12,97	12,95	12,69	12,05	11,91	1,09
2,84	14,00	14,00	13,97	13,94	13,66	12,98	12,83	1,17
3,15	15,00	15,00	14,96	14,94	14,64	13,91	13,74	1,26

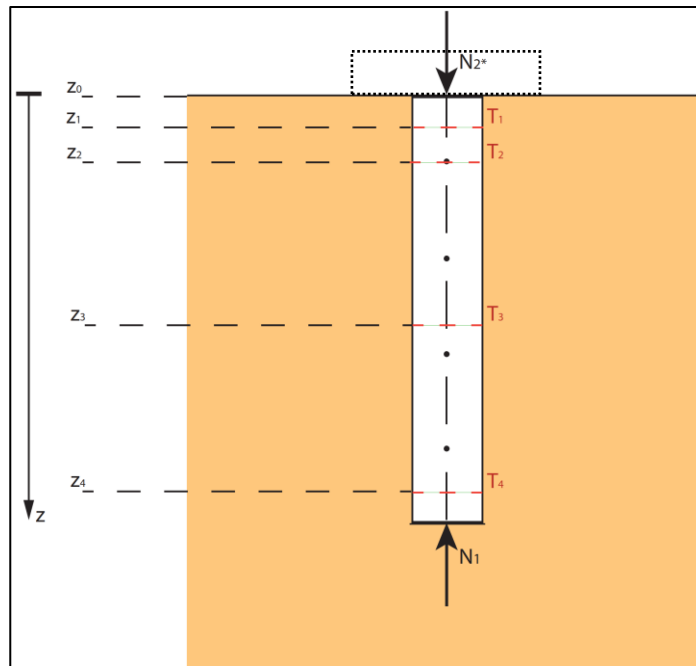


### 7.3. WSPÓŁPRACA PAŁA Z GRUNTEM

Autor pracy na podstawie wyników uzyskanych z badań doszedł do wniosku, iż współpraca pała z gruntem może zostać opisana poprzez funkcję wyrażającą zależność osiadania  $s_2$  od oporu poboczniczy. W matematycznym przybliżeniu, dla opisu tego zjawiska, wykorzystano wykres funkcji kwadratowej. Zmienność funkcji w pału zostanie zdefiniowana przy użyciu funkcji (7.1) :

$$N(z) = a_0 + a_1 \cdot z + a_2 \cdot z^2. \quad (7.1)$$

Siła osiowa podczas badań była mierzona w punktach  $z_1, z_2, z_3, z_4$  i u podstawy pała ( $h$ ). Dla danego zbioru wartości szukana jest funkcja  $N(z)$  dla  $0 < z < h$  oraz dla  $z = 0$ . W punkcie  $z = 0$  znajduje się siła w głowicy pała  $N_2^*$ , która ze względów technicznych nie mogła być mierzona. Rozmieszczenie punktów pomiarowych widać na rys. 7.1.



**Rys. 7.1. Rysunek poglądowy z rozmieszczonymi punktami pomiarowymi ( $T_1$ - $T_4$  i  $N_1$ ) oraz z oznaczonymi siłami u podstawy i w głowicy pała**

W celu znalezienia optymalnej funkcji dla danego zbioru  $\{z_1, T_1\}, \{z_2, T_2\}, \{z_3, T_3\}, \{z_4, T_4\}, \{z_5, N_1\}$  zastosowano metodę regresji liniowej – najmniejsza suma kwadratów odchylek.

Równanie warunkowe, z którego można określić  $N_2^*$ , ma następującą postać:

$$N(z_i) = a_0 + a_1 \cdot z_i + a_2 \cdot z_i^2,$$

$$\delta = \sum_{i=1}^{i=5} [N_i - N(z_i)]^2.$$

Po określeniu wartości  $N_2^*$  dla każdego przypadku można wyznaczyć opór poboczniczy z równania (7.2):

$$N_2^* - N_1 = T. \quad (7.2)$$

Wyznaczanie funkcji opisujących opór poboczniczy w zależności od osiadania zostało przeprowadzone przy pomocy MS Excel i OriginLab. Wszystkie inne wymagane obliczenia wykonano również przy pomocy wymienionych programów.

Współpraca pała z gruntem oraz wzrost oporu pobocznicy zostanie przedstawiony na dwóch przykładach:

- 1) Porównanie siły w trzonie pała przy takim samym osiadaniu pała pojedynczego i PFPP (rozd. 7.3.1.).
- 2) Zestawienie takiej samej siły  $N_2^*$  w głowicy pała konstrukcji PFPP oraz głowicy pała pojedynczego (rozd. 7.3.2.).

### 7.3.1. WZROST OPORU POBOCZNICY - JEDNAKOWE OSIADANIE

Na początku przedstawiono wzrost oporu na pobocznicy wskutek docisku płyty przykrywającej pał dla jednakowych osiadań. Z obliczeń możemy wywnioskować bezsporny wpływ płyty przykrywającej na opór pobocznicy, tzn. wzrost tarcia na pobocznicy pała.

- 1) Porównanie konstrukcji PFPP (płyta przykrywająca o średnicy  $\varnothing 250$  mm, pał o średnicy  $\varnothing 77$  mm i długości 700 mm w piasku o zagęszczeniu  $I_D=0,60$ ) z pałem pojedynczym (pał o średnicy  $\varnothing 77$  mm i długości 700 mm w piasku o zagęszczeniu  $I_D=0,60$ ).

**Tabela 7.7. Tarcie na pobocznicy pała o średnicy  $\varnothing 77$  mm i długości 700mm: a) z płytą przykrywającą o średnicy  $\varnothing 250$  mm, b) bez płyty przykrywającej**

a	L= 700 mm / $\varnothing 250$ mm / $I_D = 0,60$					
$s_2$ [mm]	0,00	0,18	0,42	0,62	0,85	1,05
T [kN]	0,00	0,46	0,90	1,34	1,76	2,28
b	L= 700 mm / $\varnothing 77$ mm / $I_D = 0,60$					
$s_2$ [mm]	0,00	0,18	0,42	0,62	0,85	1,05
T [kN]	0,00	0,07	0,19	0,27	0,35	0,44

W tab. 7.7. zostało przedstawione zjawisko tarcia na pobocznicy pała przy jego jednakowym osiadaniu. Z obliczeń wynika, iż przyrost tarcia na pobocznicy pojedynczego fundamentu płytowo-palowego wzrasta i w przypadku  $s_2=1,05$  mm osiąga ponad pięciokrotnie wyższą wartość niż tarcie na pobocznicy pała pojedynczego, tj. bez płyty przykrywającej.

- 2) Porównanie konstrukcji PFPP (płyta przykrywająca o średnicy  $\varnothing 200$  mm, pał o średnicy  $\varnothing 77$  mm i długości 700 mm w piasku o zagęszczeniu  $I_D=0,60$ ) z pałem pojedynczym (pał o średnicy  $\varnothing 77$  mm i długości 700 mm w piasku o zagęszczeniu  $I_D=0,60$ ).

**Tabela 7.8. Tarcie na pobocznicy pała o średnicy  $\varnothing 77$  mm i długości 700mm: a) z płytą przykrywającą o średnicy  $\varnothing 200$  mm, b) bez płyty przykrywającej**

a	L= 700 mm / $\varnothing 200$ mm / $I_D = 0,60$					
$s_2$ [mm]	0,00	0,22	0,49	0,74	0,92	1,14
T [kN]	0,00	0,47	0,90	1,37	1,77	2,29
b	L= 700 mm / $\varnothing 77$ mm / $I_D = 0,60$					
$s_2$ [mm]	0,00	0,22	0,49	0,74	0,92	1,14
T [kN]	0,00	0,11	0,21	0,31	0,38	0,46

W tab. 7.8. zostało przedstawione zjawisko tarcia na pobocznicy pała przy jego jednakowym osiadaniu. Z obliczeń wynika, iż przyrost tarcia na pobocznicy pojedynczego fundamentu płytowo-palowego wzrasta i w przypadku  $s_2=1,14$  mm osiąga ponad pięciokrotnie wyższą wartość niż tarcie na pobocznicy pała pojedynczego, tj. bez płyty przykrywającej.

- 3) Porównanie konstrukcji PFPP (płyta przykrywająca o średnicy  $\varnothing 250$  mm, pał o średnicy  $\varnothing 77$  mm i długości 1000 mm w piasku o zagęszczeniu  $I_D=0,55$ ) z pałem pojedynczym (pał o średnicy  $\varnothing 77$  mm i długości 1000 mm w piasku o zagęszczeniu  $I_D=0,55$ ).

**Tabela 7.9. Tarcie na pobocznicy pała o średnicy  $\varnothing 77$  mm i długości 1000mm: a) z płytą przykrywającą o średnicy  $\varnothing 250$  mm, b) bez płyty przykrywającej**

a	L= 1000 mm / $\varnothing 250$ mm / $I_D=0,55$					
$s_2$ [mm]	0,00	0,15	0,32	0,55	0,76	0,95
T [kN]	0,00	0,63	1,22	1,83	2,31	3,07
b	L= 1000 mm / $\varnothing 77$ mm / $I_D=0,55$					
$s_2$ [mm]	0,00	0,15	0,32	0,55	0,76	0,95
T [kN]	0,00	0,10	0,20	0,34	0,44	0,58

W tab. 7.9. zostało przedstawione zjawisko tarcia na pobocznicy pała przy jego jednakowym osiadaniu. Z obliczeń wynika, iż przyrost tarcia na pobocznicy pojedynczego fundamentu płytowo-palowego wzrasta i w przypadku  $s_2=0,95$  mm osiąga ok. pięciokrotnie wyższą wartość niż tarcie na pobocznicy pała pojedynczego, tj. bez płyty przykrywającej.

- 4) Porównanie konstrukcji PFPP (płyta przykrywająca o średnicy  $\varnothing 200$  mm, pał o średnicy  $\varnothing 77$  mm i długości 1000 mm w piasku o zagęszczeniu  $I_D=0,55$ ) z pałem pojedynczym (pał o średnicy  $\varnothing 77$  mm i długości 1000 mm w piasku o zagęszczeniu  $I_D=0,55$ ).

**Tabela 7.10. Tarcie na pobocznicy pała o średnicy  $\varnothing 77$  mm i długości 1000mm: a) z płytą przykrywającą o średnicy  $\varnothing 200$  mm, b) bez płyty przykrywającej**

a	L= 1000 mm / $\varnothing 200$ mm / $I_D=0,55$					
$s_2$ [mm]	0,00	0,19	0,45	0,65	0,83	1,03
T [kN]	0,00	0,64	1,22	1,90	2,46	3,24
b	L= 1000 mm / $\varnothing 77$ mm / $I_D=0,55$					
$s_2$ [mm]	0,00	0,19	0,45	0,65	0,83	1,03
T [kN]	0,00	0,12	0,28	0,40	0,51	0,62

W tab. 7.10. zostało przedstawione zjawisko tarcia na pobocznicy pała przy jego jednakowym osiadaniu. Z obliczeń wynika, iż przyrost tarcia na pobocznicy pojedynczego fundamentu płytowo-palowego wzrasta i w przypadku  $s_2=1,03$  mm osiąga ok. pięciokrotnie wyższą wartość niż tarcie na pobocznicy pała pojedynczego, tj. bez płyty przykrywającej.

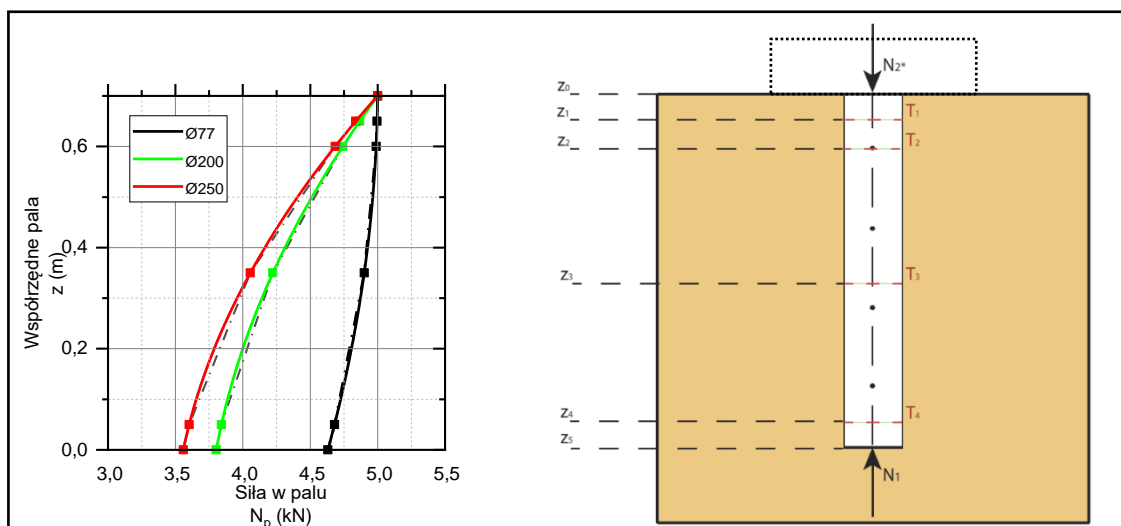
### 7.3.2. WZROST OPORU POBOCZNYCY – JEDNAKOWA SIŁA W GŁOWICY PAŁA

Drugim sposobem na udowodnienie wzrostu oporu poboczny w skutek docisku płyty przykrywającej jest zestawienie zanikania siły w trzonie pała dla przypadku jednakowej siły  $N_2^*$  w głowicy pała.

Zestawione zostały dwa rysunki z diagramami, na których można obserwować zanik siły osiowej w trzonie pała:

1) Zanik siły w trzonie pała na rys. 7.2. został przedstawiony dla przypadków:

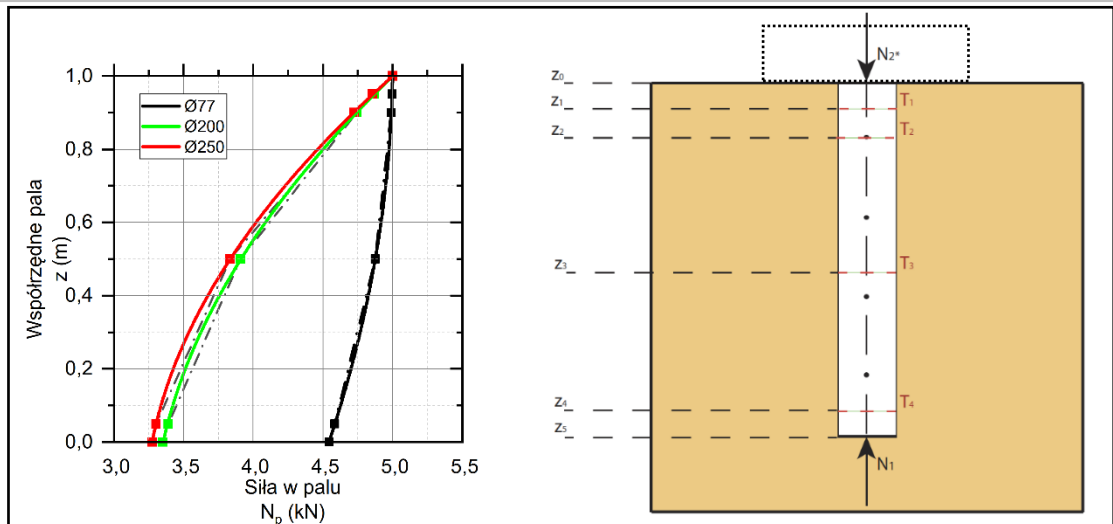
- Pał pojedynczy o średnicy  $\varnothing 77$  mm i długości 700 mm w piasku o zagęszczeniu  $I_D=0,55$  (krzywa czarna na rys. 7.2.).
- PFPP z pałem o średnicy  $\varnothing 77$  mm i długości 700 mm z płytą przykrywającą o średnicy  $\varnothing 200$  mm w piasku o zagęszczeniu  $I_D=0,55$  (krzywa zielona na rys. 7.2.).
- PFPP z pałem o średnicy  $\varnothing 77$  mm i długości 700 mm z płytą przykrywającą o średnicy  $\varnothing 250$  mm w piasku o zagęszczeniu  $I_D=0,55$  (krzywa czerwona na rys. 7.2.).



Rys. 7.2. Porównanie sił osiowych w pału  $\varnothing 77$  mm o długości 700 mm w piasku o zagęszczeniu  $I_D=0,55$

2) Zanik siły w trzonie pała na rys. 7.3. został przedstawiony dla przypadków:

- Pał pojedynczy o średnicy  $\varnothing 77$  mm i długości 1000 mm w piasku o zagęszczeniu  $I_D=0,60$  (krzywa czarna na rys. 7.3.).
- PFPP z pałem o średnicy  $\varnothing 77$  mm i długości 1000 mm z płytą przykrywającą o średnicy  $\varnothing 200$  mm w piasku o zagęszczeniu  $I_D=0,60$  (krzywa zielona na rys. 7.3.).
- PFPP z pałem o średnicy  $\varnothing 77$  mm i długości 1000 mm z płytą przykrywającą o średnicy  $\varnothing 250$  mm w piasku o zagęszczeniu  $I_D=0,60$  (krzywa czerwona na rys. 7.3.).



Rys. 7.3. Porównanie sił osiowych w palu Ø77mm o długości 1000 mm w piasku o zagęszczeniu  $I_D=0,60$

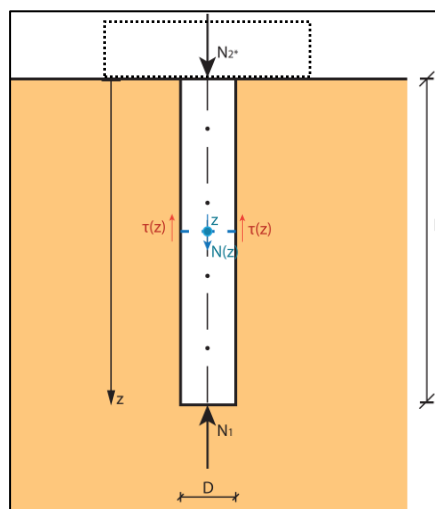
W obu przypadkach (rys. 7.2. i 7.3.) możemy zaobserwować większe zanikanie siły osiowej wskutek oddziaływania płyty przykrywającej na pobocznicy pala (krzywa zielona i czerwona) w porównaniu do rozkładu siły w trzonie pala bez płyty przykrywającej (krzywa czarna). Podczas stosowania płyty opór pobocznicy wzrastał o ok. 0,70 kN - 1,20 kN. We wszystkich przypadkach siła  $N_2^*$  wynosiła 5,00 kN.

### 7.3.3. ROZKŁAD NAPRĘŻEŃ NA POBOCZNICY ORAZ SIŁA TARCIA

W związku z tym, iż siły w trzonie pala można opisać funkcją kwadratową, do celów praktycznych rozkład naprężeń definiowany jest poprzez użycie pierwszej pochodnej funkcji kwadratowej. Autor pracy przyjrzy się rozkładowi naprężeń na pobocznicy pala, który zostanie określony przy pomocy równań:

$$N(z) = N_{2*} - \int_0^z \tau(z) \cdot \pi \cdot D_1 \cdot dz, \quad (7.3)$$

$$\frac{dN(z)}{dz} = -\pi \cdot D_1 \cdot \tau(z). \quad (7.4)$$



Rys. 7.4. Pal z siłami w trzonie oraz z naprężeniami na pobocznicy

Z aproksymacji wyników badań eksperymentalnych mamy równanie (7.1):

$$N(z) = a_0 + a_1 \cdot z + a_2 \cdot z^2.$$

Z zależności otrzymujemy:  $a_0$ ;  $a_1$ ;  $a_2$  obliczone dla danego pala i każdego  $N_2^*$ .

Zgodnie z równaniem (7.1) wynika:

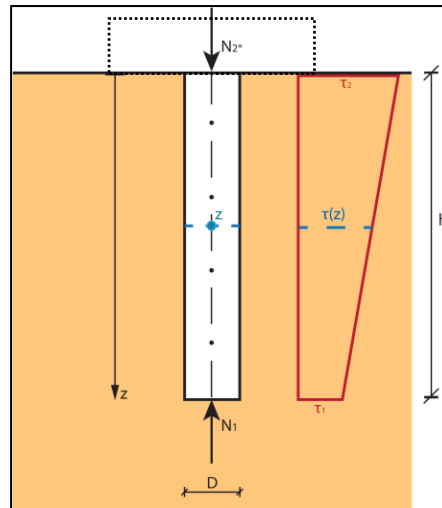
$$\frac{dN(z)}{dz} = -\pi \cdot D_1 \cdot \tau(z) \equiv a_1 + 2a_2 \cdot z. \quad (7.5)$$

Rozkład  $\tau(z)$  jest liniowy, zatem otrzymujemy:

$$\tau(z) = -\frac{a_1}{\pi \cdot D_1} - \frac{2a_2 \cdot z}{\pi \cdot D_1}. \quad (7.6)$$

Możemy go również zapisać w następujący sposób:

$$\tau(z) = \tau_2 - (\tau_2 - \tau_1) \cdot \frac{z}{h}. \quad (7.7)$$



**Rys. 7.5. Rozkład naprężeń na pobocznicy pala**

Po zestawieniu równań (7.6) i (7.7) otrzymamy:

$$\tau_2 = -\frac{a_1}{\pi \cdot D_1}; \frac{\tau_2 - \tau_1}{h} = \frac{2a_2}{\pi \cdot D_1} \rightarrow \tau_1 = \tau_2 - \frac{2 \cdot a_2}{\pi \cdot D_1} \cdot h. \quad (7.8)$$

Zatem  $\tau_2$  i  $\tau_1$  można wyrazić za pomocą równań (7.9) i (7.10):

$$\tau_1 = -\frac{a_1}{\pi \cdot D_1} - \frac{2 \cdot a_2}{\pi \cdot D_1} \cdot h, \quad (7.9)$$

$$\tau_2 = -\frac{a_1}{\pi \cdot D_1}. \quad (7.10)$$

Następnie siła tarcia może zostać wyznaczona przy pomocy wzoru:

$$T = \frac{\tau_2 + \tau_1}{2} \cdot \pi \cdot D_1 \cdot h. \quad (7.11)$$

Równania matematyczne sprawdzono na trzech przykładach:

- 1)  $\varnothing 200$  mm;  $L=700$  mm oraz  $s=1,14$  mm (jednakowe osiadanie konstrukcji).

Z zależności (7.1) metodą najmniejszych kwadratów otrzymamy:

$$a_0 = 8,79 \text{ [kN]},$$

$$a_1 = -5,35 \text{ [kN/m]},$$

$$a_2 = 2,96 \text{ [kN/m}^2\text{]}.$$

Powoduje to, że dla pala o  $D_1 = 0,077$  m uzyskamy:

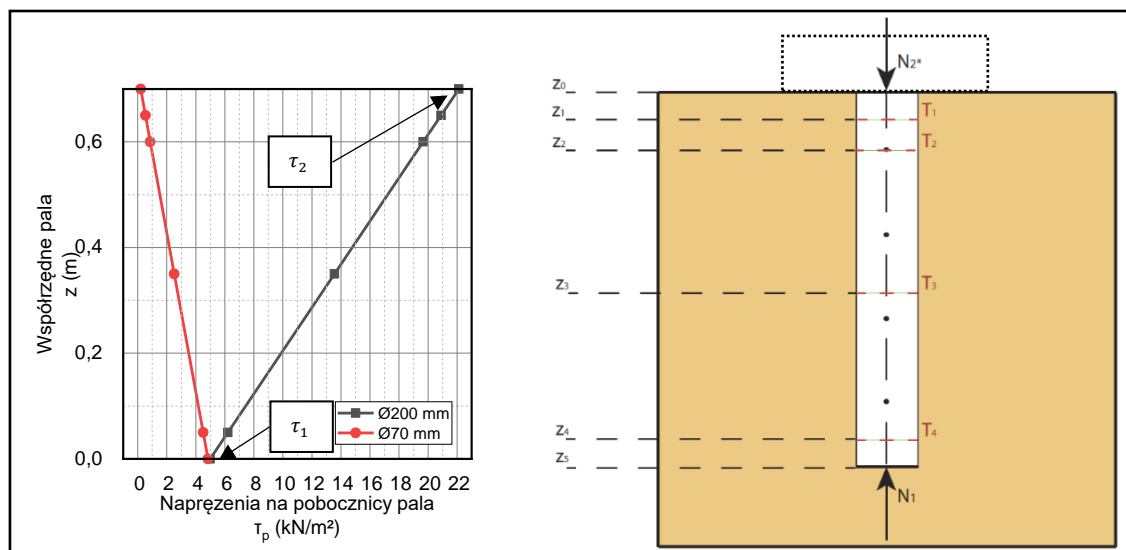
$$\tau_1 = -\frac{-5,35 \frac{\text{kN}}{\text{m}}}{\pi \cdot 0,077 \text{ m}} - \frac{2 \cdot 2,96 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}}{\pi \cdot 0,077 \text{ m}} \cdot 0,70 \text{ m} = 4,98 \text{ kN/m}^2 \text{ (według wzoru 7.9),}$$

$$\tau_2 = -\frac{-5,35 \frac{\text{kN}}{\text{m}}}{\pi \cdot 0,077 \text{ m}} = 22,12 \text{ kN/m}^2 \text{ (według wzoru 7.10).}$$

Opór poboczny wynosi wg zależności (7.11) oraz (7.2):

$$T = \frac{4,98 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + 22,12 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}}{2} \cdot \pi \cdot 0,077 \text{ m} \cdot 0,70 \text{ m} = 2,29 \text{ kN (według wzoru 7.11),}$$

$$T = 8,79 \text{ kN} - 6,50 \text{ kN} = 2,29 \text{ kN (według wzoru 7.2).}$$



Rys. 7.6. Rozkład naprężeń na pobocznicę pala o długości 700 mm z płytą przykrywającą  $\varnothing 200$  mm dla  $s_2 = 1,14$  mm

- 2)  $\varnothing 250$  mm;  $L=700$  mm oraz  $N_2^* = 5,00$  kN (jednakowa siła w głowicy pala).

Z zależności (7.1) metodą najmniejszych kwadratów uzyskamy:

$$a_0 = 5,00 \text{ [kN]},$$

$$a_1 = -3,33 \text{ [kN/m]},$$

$$a_2 = 1,82 \text{ [kN/m}^2\text{]}.$$

Dla  $D_1 = 0,077$  m otrzymamy:

$$\tau_1 = 3,24 \text{ kN/m}^2 \text{ (według wzoru 7.9),}$$

$$\tau_2 = 13,79 \text{ kN/m}^2 \text{ (według wzoru 7.10).}$$

Siła tarcia w palu:

$$T = 1,44 \text{ kN (według wzoru 7.11),}$$

$$T = 1,45 \text{ kN (według wzoru 7.2).}$$

Drobna różnica pomiędzy wynikami wynika z zaokrągleń obliczeń matematycznych.

3)  $\varnothing 200$  mm;  $L=700$  mm oraz  $N_2^* = 5,00$  kN (jednakowa siła w głowicy pala).

Z zależności (7.1) metodą najmniejszych kwadratów uzyskamy:

$$a_0 = 5,00 \text{ [kN]},$$

$$a_1 = -2,72 \text{ [kN/m]},$$

$$a_2 = 1,45 \text{ [kN/m}^2\text{]}.$$

Dla  $D_1 = 0,077$  m otrzymamy:

$$\tau_1 = 2,86 \text{ kN/m}^2 \text{ (według wzoru 7.9),}$$

$$\tau_2 = 11,28 \text{ kN/m}^2 \text{ (według wzoru 7.10).}$$

Siła tarcia w palu:

$$T = 1,19 \text{ kN (według wzoru 7.11),}$$

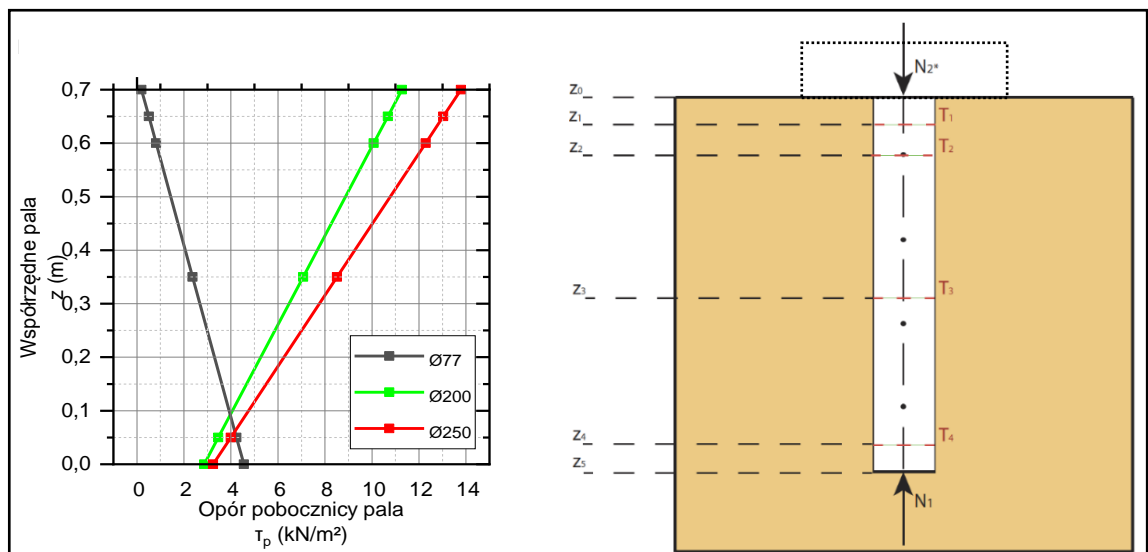
$$T = 1,20 \text{ kN (według wzoru 7.2).}$$



Naprężenia na poboczniczy pala z przykładu 2. (str. 44-45) i przykładu 3. (str. 45) zostały zestawione na rys. 7.7. Dla podkreślenia problemu rysunek ten został uzupełniony o pal bez płyty przykrywającej. Rysunek 7.7. zawiera zatem trzy krzywe:

- pal bez płyty przykrywającej – linia czarna,
- pal z płytą przykrywającą  $\varnothing 200$  mm – linia zielona (przykład 3),
- pal z płytą przykrywającą  $\varnothing 250$  mm – linia czerwona (przykład 2).

We wszystkich trzech przypadkach zakłada się siłę w głowicy pala równej  $N_2^* = 5,00$  kN.



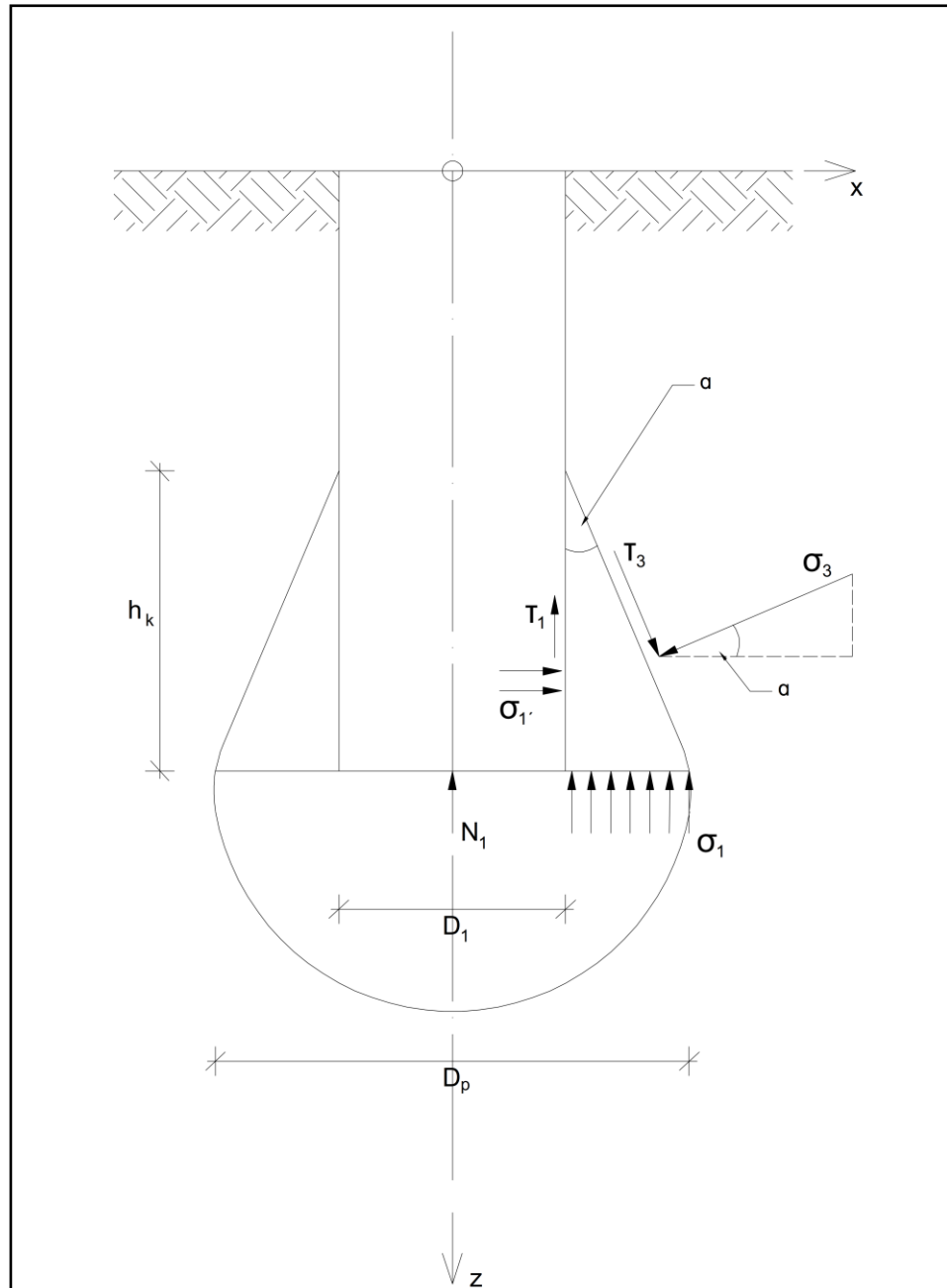
Rys. 7.7. Rozkład naprężeń na poboczniczy pala o długości 700 mm i dla  $N_2^* = 5,00$  kN

Wyniki obliczeń znajdują się w załącznikach F i G oraz w tabelach 7.1.-7.6.

Z rysunków 7.6. i 7.7. można wnioskować, iż mobilizowane naprężenia na poboczniczy pala w istotny sposób zależą od tego, czy palec jest przykryty płytą czy nie. Jeżeli palec jest bez płyty przykrywającej, to naprężenia na poboczniczy rosną wraz z głębokością. W momencie zainstalowania płyty przykrywającej do pala możemy zauważyć, że naprężenia maleją wraz z głębokością. Ponadto mają one duże wyższe wartości niż pojedynczy palec bez płyty. Naprężenia na poboczniczy pala z płytą przykrywającą generowane są poprzez docisk płyty przykrywającej.

### 7.3.4. NAPRĘŻENIA $\tau_1$ NA POBOCZNICY PAŁA

W rozdziale 7.3.4. autor pracy pokazuje możliwy sposób wyznaczania naprężeń  $\tau_1$  w zależności od występujących sił u podstawy pała oraz docisku gruntu. Na rysunku 7.8. przedstawiono sytuację schematycznie.



Rys. 7.8. Założony mechanizm strefy uplastycznienia gruntu

Podstawowe założenia wyglądają następująco:

$$\tau_1 = \sigma_1 \cdot f_2,$$

$$\tau_3 = \sigma_3 \cdot \operatorname{tg}(\varphi).$$

Następnie rozkładamy naprężenia  $\sigma_3, \tau_3, \tau_1, \sigma_1$  na składniki pionowe (z) i poziome(x):

1) Naprężenia  $\sigma_3$ :

$$\sigma_3 \rightarrow N_3 = \sigma_3 \cdot \pi \cdot l \cdot \frac{D_p}{2},$$

$$N_3(x) = \sigma_3 \cdot \pi \cdot l \cdot \frac{D_p}{2} \cdot \cos\alpha,$$

$$N_3(z) = \sigma_3 \cdot \pi \cdot l \cdot \frac{D_p}{2} \cdot \sin\alpha.$$

2) Naprężenia styczne  $\tau_3$ :

$$\tau_3 \rightarrow T_3 = \sigma_3 \cdot \operatorname{tg}\varphi \cdot \pi \cdot l \cdot \frac{D_p}{2},$$

$$T_3(x) = \sigma_3 \cdot \operatorname{tg}\varphi \cdot \pi \cdot l \cdot \frac{D_p}{2} \cdot \sin\alpha,$$

$$T_3(z) = \sigma_3 \cdot \operatorname{tg}\varphi \cdot \pi \cdot l \cdot \frac{D_p}{2} \cdot \cos\alpha.$$

3) Naprężenia styczne  $\tau_1$ :

$$\tau_1 \rightarrow T_1 = \sigma_1 \cdot f_2 \cdot \pi \cdot D_1 \cdot h_k,$$

$$T_1(x) = \sigma_1 \cdot f_2 \cdot \pi \cdot D_1 \cdot h_k,$$

$$T_1(z) = 0.$$

4) Naprężenia  $\sigma_1$ :

$$\sigma_1 \rightarrow N_1 = \sigma_1 \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot (D_p^2 - D_1^2),$$

$$N_1(z) = \sigma_1 \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot (D_p^2 - D_1^2).$$

Następnie definiowany jest stan równowagi dla sił pionowych (z) i poziomych (x):

1) Suma sił pionowych:

$$-\sigma_1 \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot (D_p^2 - D_1^2) + \sigma_3 \cdot \pi \cdot l \cdot \frac{D_p}{2} \cdot \sin\alpha + \sigma_3 \cdot \operatorname{tg}\varphi \cdot \pi \cdot l \cdot \frac{D_p}{2} \cdot \cos\alpha - \sigma_1 \cdot f_2 \cdot \pi \cdot D_1 \cdot h_k = 0. \quad (7.12)$$

Po uporządkowaniu i podstawieniu równań (7.13) i (7.14) do równania (7.12)

$$\frac{D_p - D_1}{2} = \sin\alpha, \quad (7.13)$$

$$\frac{h_k}{l} = \cos\alpha, \quad (7.14)$$

otrzymujemy ostatecznie równanie (7.15) sumy sił pionowych w postaci:

$$\frac{1}{2} \sigma_1 \cdot \left(1 + \frac{D_1}{D_p}\right) \cdot \sin\alpha + 2 \cdot \sigma_1 \cdot f_2 \cdot \frac{D_1}{D_p} \cdot \cos\alpha = \sigma_3 \cdot \frac{\sin(\alpha + \varphi)}{\cos\varphi}. \quad (7.15)$$

2) Suma sił poziomych:

$$\sigma_1 \cdot \pi \cdot D_1 \cdot h_1 + \sigma_3 \cdot \operatorname{tg}\varphi \cdot \pi \cdot l \cdot \frac{D_p}{2} \cdot \sin\alpha - \sigma_3 \cdot \pi \cdot l \cdot \frac{D_p}{2} \cdot \cos\alpha = 0. \quad (7.16)$$

Po uporządkowaniu równania (7.16) otrzymujemy wyrażenie:

$$\sigma_3 = 2 \cdot \sigma_1 \cdot \frac{D_1}{D_p} \cdot \frac{\cos\alpha \cdot \cos\varphi}{\cos(\alpha + \varphi)}. \quad (7.17)$$

Po podstawieniu równania (7.17) do równania (7.15) uzyskamy wzór na naprężenia dociskające pał:

$$\sigma_1 = \frac{1}{4} \cdot \sigma_1 \cdot \left( \frac{D_p}{D_1} + 1 \right) \cdot \frac{\operatorname{tg}\alpha}{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi) - f_2}. \quad (7.18)$$

Z równania (7.18) otrzymamy, po uwzględnieniu współczynnika tarcia pomiędzy gruntem a pałem stalowym  $f_2$ , równanie dla  $\tau_1$ :

$$\tau_1 = \frac{1}{4} \cdot \sigma_1 \cdot \left( \frac{D_p}{D_1} + 1 \right) \cdot f_2 \cdot \frac{\operatorname{tg}\alpha}{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi) - f_2}. \quad (7.19)$$

Przy pomocy wzoru (7.19) można wyznaczyć naprężenia występujące na poboczniczy  $\tau_1$ .

Wzór (7.19) zostanie uproszczony do formy:

$$\tau_1 = \frac{1}{4} \cdot \sigma_1 \cdot \left( \frac{D_p}{D_1} + 1 \right) \cdot f_2 \cdot \frac{\operatorname{tg}\alpha}{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi) - f_2},$$

gdzie

$$f_1 = f_2 \cdot \frac{\operatorname{tg}\alpha}{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi) - f_2},$$

$$\tau_1 = \frac{1}{4} \cdot \sigma_1 \cdot \left( \frac{D_p}{D_1} + 1 \right) \cdot f_1. \quad (7.20)$$

Dodatkowo należy sprawdzić, jak zmienia się kąt  $\alpha$  dla każdego ze zbiorów  $\{\tau_{1,i}; N_{1,i}\}$ , co zostało przedstawione w załączniku G. Z analizy wynika, iż kąt  $\alpha$  wynosi ok.  $3^\circ$ , co wskazuje na bardzo małą strefę uplastycznienia gruntu.

### **7.3.5. PODSUMOWANIE**

W tym rozdziale autor pracy przeanalizował współpracę pala z gruntem i doszedł do następujących wniosków:

- 1) Z przeprowadzonych analiz i badań pod kątem współpracy pala z gruntem można zaobserwować wyraźny wzrost i mobilizację naprężeń na pobocznicę pala wskutek zastosowania płyty przykrywającej.
- 2) Podczas stosowania płyty przykrywającej generowane są pod płytą naprężenia, które powodują docisk trzonu pala oraz podwyższenie naprężeń.
- 3) Wraz ze wzrostem naprężeń na pobocznicę wzrasta również siła tarcia pomiędzy gruntem a powierzchnią pala.
- 4) Naprężenia w PFPP maleją wraz z głębokością fundamentu wskutek zmniejszenia się wpływu płyty wraz z głębokością pod powierzchnią gruntu.
- 5) Ostatecznie naprężenia u podstawy pala były porównywalne do naprężeń występujących w pojedynczym palu bez płyty przykrywającej.
- 6) Ponadto kolejnym mechanizmem, który został zaobserwowany poprzez przeprowadzenie analizy matematycznej, jest uplastycznienie się gruntu pod podstawą pala. W związku z tym, iż większość obciążenia przenoszona jest poprzez płytę oraz pobocznicę pala, siły występujące u podstawy pala doprowadzają do uplastycznienia się gruntu pod jego podstawą i do wytworzenia się tzw. „gruszki”. Siły te są tak małe, że kąt  $\alpha$  nie przekracza  $3,00^\circ$ , co przekłada się na znikomy wpływ na tarcie występujące u podstawy pala  $\tau_1$ .

#### 7.4. WSPÓŁPRACA PŁYTY Z GRUNTEM

Na podstawie obliczeń przeprowadzonych w rozdziale 7.3. i wyznaczonych wartości dla  $N_2^*$  (załącznik F oraz G) możemy wyznaczyć naprężenia występujące pod płytą przykrywającą pojedynczego fundamentu płytowo-palowego. Od pełnego obciążenia rozłożonego równomiernie na płycie przykrywającej pal zostanie odjęta siła równomiernie rozłożona na powierzchni głowicy pala. Zabieg ten można wyrazić w postaci wzoru:

$$\sigma_2 = \frac{N_2 - N_2^*}{\frac{\pi \cdot D_2^2}{4} - \frac{\pi \cdot D_1^2}{4}} \quad (7.21)$$

Opierając się na wyrażeniu:

$$\tau_{2,obl} = \sigma_2 \cdot \tan^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \cdot f_2, \quad (7.22)$$

gdzie  $f_2$  – współczynnik tarcia pomiędzy stalą a gruntem, możemy wyznaczyć naprężenia na poboczniczy pala  $\tau_{2,obl}$  z dużą dokładnością.

Wzory te zostały sprawdzone na przykładzie o parametrach:  $\varnothing 250\text{mm}$ ;  $L=700\text{mm}$  oraz  $\sigma_2= 363,90 \text{ kN/m}^2$ .

Z równania (7.22) otrzymamy:

$$\tau_{2,obl} = 363,90 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot \tan^2 \left( 45^\circ - \frac{33^\circ}{2} \right) \cdot 0,20 = 21,46 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2},$$

$$\tau_{2,pom} = 21,73 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}.$$

Z wykonanych obliczeń i pomiarów można wnioskować zgodność wartości pomierzonych i obliczonych. Opis matematyczny opierający się na wzorach (7.21) oraz (7.22) został sprawdzony we wszystkich przypadkach, które przeanalizowano w laboratorium. Wyniki wszystkich obliczeń znajdują się w tabeli 7.11.

**Tabela 7.11. Naprężenia pod płytą przykrywającą  $\sigma_2$  oraz naprężenia na pobocznicę  $\tau_2$**

<b>a</b>	<b>L= 700 mm / Ø250 mm / l<sub>D</sub> =0,60</b>					
s <sub>2</sub> [mm]	0,00	0,18	0,42	0,62	0,85	1,05
$\sigma_2$ [kN/m <sup>2</sup> ]	0,00	74,16	145,47	235,10	309,35	363,90
T <sub>2,pom</sub>	0,00	4,34	8,37	12,91	16,33	21,73
T <sub>2,obl</sub>	0,00	4,12	8,15	13,17	16,42	21,46
f <sub>2</sub>	0,00	0,21	0,19	0,19	0,18	0,20
<b>b</b>	<b>L= 700 mm / Ø200 mm / l<sub>D</sub> =0,60</b>					
s <sub>2</sub> [mm]	0,00	0,22	0,49	0,74	0,92	1,14
$\sigma_2$ [kN/m <sup>2</sup> ]	0,00	108,43	232,19	363,59	464,75	609,82
T <sub>2,pom</sub>	0,00	4,49	8,35	13,00	16,48	22,12
T <sub>2,obl</sub>	0,00	4,41	8,49	13,30	17,00	22,31
f <sub>2</sub>	0,00	0,15	0,14	0,14	0,14	0,14
<b>c</b>	<b>L= 1000 mm / Ø250 mm / l<sub>D</sub> =0,55</b>					
s <sub>2</sub> [mm]	0,00	0,15	0,32	0,55	0,76	0,95
$\sigma_2$ [kN/m <sup>2</sup> ]	0,00	73,41	142,99	218,88	290,49	361,64
T <sub>2,pom</sub>	0,00	4,37	8,35	12,95	16,36	21,70
T <sub>2,obl</sub>	0,00	4,33	8,43	12,91	16,27	21,32
f <sub>2</sub>	0,00	0,20	0,20	0,20	0,19	0,20
<b>d</b>	<b>L= 1000 mm / Ø200 mm / l<sub>D</sub> =0,55</b>					
s <sub>2</sub> [mm]	0,00	0,19	0,45	0,65	0,83	1,03
$\sigma_2$ [kN/m <sup>2</sup> ]	0,00	114,04	231,81	362,30	457,27	576,17
T <sub>2,pom</sub>	0,00	4,35	8,36	12,93	16,35	21,65
T <sub>2,obl</sub>	0,00	4,42	8,48	13,25	16,73	21,86
f <sub>2</sub>	0,00	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14

Naprężenia występujące pod płytą, zgodnie z rozdz. 7.3. i załącznikiem G, mają duży wpływ na naprężenia na pobocznicę pała. Wyznaczyć można je za pomocą wzoru (7.22), który uwzględnia: naprężenia występujące poniżej płyty, współczynnik parcia czynnego gruntu oraz współczynnik tarcia pomiędzy gruntem a pałem stalowym  $f_2$ . Zgodnie z tabelą 7.11. współczynnik  $f_2$  wynosi: 0,14-0,21.

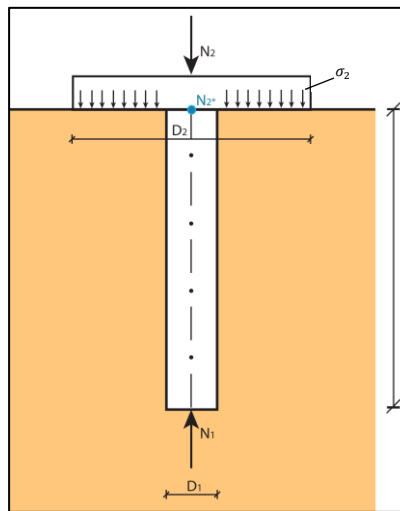
## 7.5. ZAŁOŻENIE JEDNAKOWEGO OSIADANIA PAŁA I PŁYTY - SPRAWDZENIE

Przyjęte założenie w ramach niniejszej pracy brzmiało, iż współpracę układu płyta-pał z gruntem można ustalić w oparciu o zasadę jednakowego osiadania podstawy pała oraz podstawy płyty. Ta zasada zostanie sprawdzona na podstawie zebranych informacji z badań laboratoryjnych. Weryfikacja odbywa się osobno dla pała i osobno dla płyty. W obu przypadkach jest sprawdzany moduł ściśliwości oraz zastosowanie metody M-K przy pomocy współczynnika  $k_2$ .

### 7.5.1. OSIADANIE PŁYTY

Przemieszczenie się płyty jest wyznaczane za pomocą następującego wzoru:

$$S_2 = \frac{\sigma_2}{E} \cdot \frac{D_2 \cdot z_*}{z_* + D_2} \quad (7.23)$$



Rys. 7.9. Schemat obrazujący przekazywanie obciążeń do gruntu

Równanie (7.23) można uprościć do formy:

$$S_2 = \frac{\sigma_2 \cdot D_2}{E} \cdot \frac{1}{1 + \frac{D_2}{z_*}} \quad (7.24)$$

gdzie

$$z_* = \frac{1}{2 \cdot \text{tg}\varphi} \cdot \frac{1}{\ln\left(\frac{E}{\sigma_2}\right)} \cdot \frac{\sigma_2}{\gamma}$$



Podstawiając do równania (7.24):

$$\frac{E}{\sigma_2} = x,$$

otrzymujemy równanie (7.25), z którego można wyznaczyć moduł ściśliwości występujący pod płytą:

$$\frac{D_2}{s_2} = x \left( 1 + 2\text{tg}\varphi \cdot \frac{\gamma \cdot D_2}{\sigma_2} \cdot \ln x \right). \quad (7.25)$$

Przykładowo zostanie przeanalizowany przypadek, gdzie długość pala wynosi 1000 mm, średnica płyty przykrywającej 250 mm, a stopień zagęszczenia  $I_D=0,55$ , natomiast siła w głowicy  $N_2=5,05$  kN. Wartości dla tego przypadku to:

$$s_2 = 0,15\text{mm},$$

$$N_2 = 5,05 \text{ kN},$$

$$N_2^* = 1,79 \text{ kN},$$

$$N_1 = 1,17 \text{ kN},$$

$$D_2 = 0,25 \text{ m},$$

$$D_1 = 0,077 \text{ m}.$$

Wyniki:

$$\sigma_2 = 73,41 \text{ kPa}; E = 77225 \text{ kPa}; q_b = 12,248 \text{ MPa},$$

$$\frac{N_2^*}{N_1} = (1 + \kappa_2)^2 \rightarrow \kappa_2 = 0,238 \text{ (sprawdzenie wartości } \kappa_2 \text{)}.$$

Płyta osiada według wzoru:

$$s_2 = \frac{D_2}{x(1+2\text{tg}\varphi \cdot \frac{\gamma \cdot D_2}{\sigma_2} \cdot \ln x)}. \quad (7.26)$$

### 7.5.2. OSIADANIE PALA

Osiadanie podstawy pała zostało przeanalizowane przy pomocy wzoru (7.27):

$$s = \frac{\sigma_1}{E} \cdot D_1 = \frac{4 \cdot N_1}{\pi \cdot D_1^2} \cdot \frac{D_1}{E} \quad (7.27)$$

Stąd otrzymujemy:

$$E = \frac{4 \cdot N_1}{\pi \cdot D_1 \cdot s} \quad (7.28)$$

Sprawdzenie współczynnika  $\kappa_2$  przeprowadzane jest według wzoru z metody M-K:

$$\kappa_2 = \sqrt{\frac{T}{N_1} + 1} - 1 \quad (7.29)$$

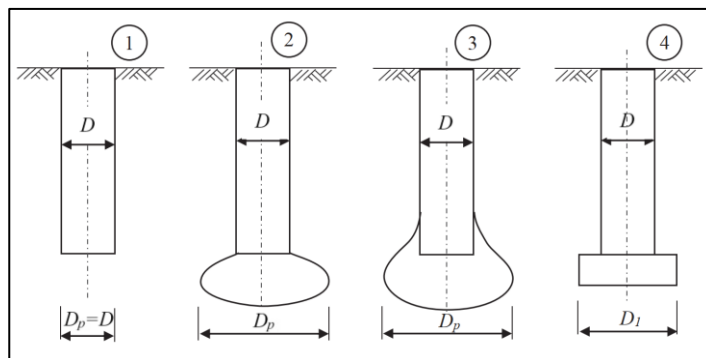
Została przeprowadzona weryfikacja wzorów (7.28) i (7.29) dla przypadku:  $L=1000$  mm,  $\varnothing 250$  mm,  $l_D=0,55$ ,  $N_2 = 5,05$  kN.

Obliczenia:

$$E = \frac{4 \cdot 1,17 \text{ kN}}{\pi \cdot 0,077 \text{ m} \cdot 0,00015 \text{ m}} = 128,97 \text{ MPa (zgodnie ze wzorem 7.28),}$$

$$\kappa_2 = \sqrt{\frac{0,62 \text{ kN}}{1,17 \text{ kN}} + 1} - 1 = 0,236 \text{ (zgodnie ze wzorem 7.29).}$$

Odnosząc się do wyników z rozdz. 7.5.1. i 7.5.2. stwierdzić można, iż współczynnik  $\kappa_2$  jest taki sam jak dla obliczeń płyty. Ponadto należy wskazać, że pod podstawą pała występuje bardzo duży obliczeniowy moduł ściśliwości, który nie koresponduje z wynikami otrzymanymi w ramach rozdziału 7.5.1. Powodem takiego stanu rzeczy może być formowanie się strefy gruntu uplastycznionego pod podstawą pała, co zostało pokazane w rozdz. 7.3.4. Zagadnienie zostało szerzej opisane w publikacji [41].



Rys. 7.10. Modele uplastycznienia gruntu pod podstawą pała (źródło [41])

Strefa uplastyczniona gruntu pod podstawą pała prowadzi do powiększenia powierzchni dystrybucji siły z podstawy pała. Zgodnie z wynikami badań, opublikowanych w publikacji [41], występuje w większości przypadków uplastycznienie gruntu pod podstawą pała w formie trzeciej, tj. w formie „gruszki” z rys. 7.10.

W dalszej części zostanie wyznaczona strefa uplastycznienia gruntu pod podstawą pała za pomocą zmodyfikowanego równania 7.27. Do wzoru 7.27 podstawiamy  $D_p$  zamiast  $D_1$  i stąd uzyskujemy:

$$s = \frac{\sigma_1}{E} \cdot D_p = \frac{4 \cdot N_1}{\pi \cdot D_p^2} \cdot \frac{D_p}{E} \quad (7.30)$$

Po przekształceniu wzoru (7.30) otrzymamy:

$$E = \frac{4 \cdot N_1}{\pi \cdot D_p \cdot s} \quad (7.31)$$

Została przeprowadzona weryfikacja wzoru (7.31) dla przypadku:  $L=1000$  mm,  $\varnothing 250$  mm,  $I_D=0,55$ ,  $N_2 = 5,05$  kN.

Obliczenia:

$$E = \frac{4 \cdot 1,17 \text{ kN}}{\pi \cdot 0,128 \text{ m} \cdot 0,00015 \text{ m}} = 77,588 \text{ MPa (zgodnie ze wzorem 7.31).}$$

Pod  $D_p$  została podstawiona średnica strefy uplastycznionej gruntu  $\varnothing 128$  mm w celu otrzymania takiego samego modułu ściśliwości  $E$  jak w przypadku płyty. Oznacza to, iż w danym przypadku aktywowana strefa przenoszenia obciążenia z podstawy pala ma średnicę ok.  $1,50 \cdot D_1$ .

### 7.5.3. OPIS MATEMATYCZNY OSIADANIA PFPP

Uwzględniając wyniki uzyskane w rozdz. 7.5.1. i 7.5.2. autor przedstawia propozycję opisu matematycznego do wyznaczenia siły w głowicy pala, stosując zasadę jednakowego osiadania dla pala i płyty. Pod uwagę wzięto również fakt tworzenia się obszaru gruntu uplastycznego pod podstawą pala.

Proponowany opis matematyczny dla PFPP zgodnie ze wzorami (7.24) i (7.30) wygląda następująco:

$$S_{\text{płyty}} = \frac{4 \cdot (N_2 - N_2^*)}{\pi \cdot (D_2^2 - D_1^2) \cdot E} \cdot D_2 \cdot \frac{1}{1 + \frac{D_2}{z_*}}$$

$$S_{\text{pala}} = \frac{4 \cdot N_1}{\pi \cdot D_p \cdot E}$$

W związku z jednakowym osiadaniem obu elementów można zestawić wzory (7.24) i (7.30) ze sobą. Stąd otrzymamy:

$$\frac{4 \cdot (N_2 - N_2^*)}{\pi \cdot (D_2^2 - D_1^2) \cdot E} \cdot D_2 \cdot \frac{1}{1 + \frac{D_2}{z_*}} = \frac{4 \cdot N_1}{\pi \cdot D_p \cdot E} \quad (7.32)$$

Z tego wyrażenia można wyznaczyć  $N_2^*$  poprzez jego przekształcenie do następującej postaci:

$$N_2^* = N_2 - N_1 \cdot \frac{(D_2^2 - D_1^2) \cdot \left(1 + \frac{D_2}{z_*}\right)}{D_p \cdot D_2} \quad (7.33)$$

Sprawdzenie wzoru (7.33) zostało przeprowadzone na przykładzie:  $L=1000$  mm,  $\varnothing 250$  mm,  $I_D=0,55$ ,  $N_2 = 5,05$  kN.

Obliczenia:

$$N_{2,\text{obl.}}^* = 5,05 \text{ kN} - 1,17 \text{ kN} \cdot \frac{(0,25 \text{ m}^2 - 0,077 \text{ m}^2) \cdot \left(1 + \frac{0,25 \text{ m}}{0,427}\right)}{0,128 \text{ m} \cdot 0,25 \text{ m}} = 1,77 \text{ kN (zgodnie ze wzorem 7.33),}$$

$$N_{2,\text{ext.}}^* = 1,79 \text{ kN.}$$

Niniejszym można potwierdzić poprawność wzoru (33). Wyniki obliczeniowe korespondują z dużą dokładnością z wynikami otrzymanymi w ramach badań laboratoryjnych.

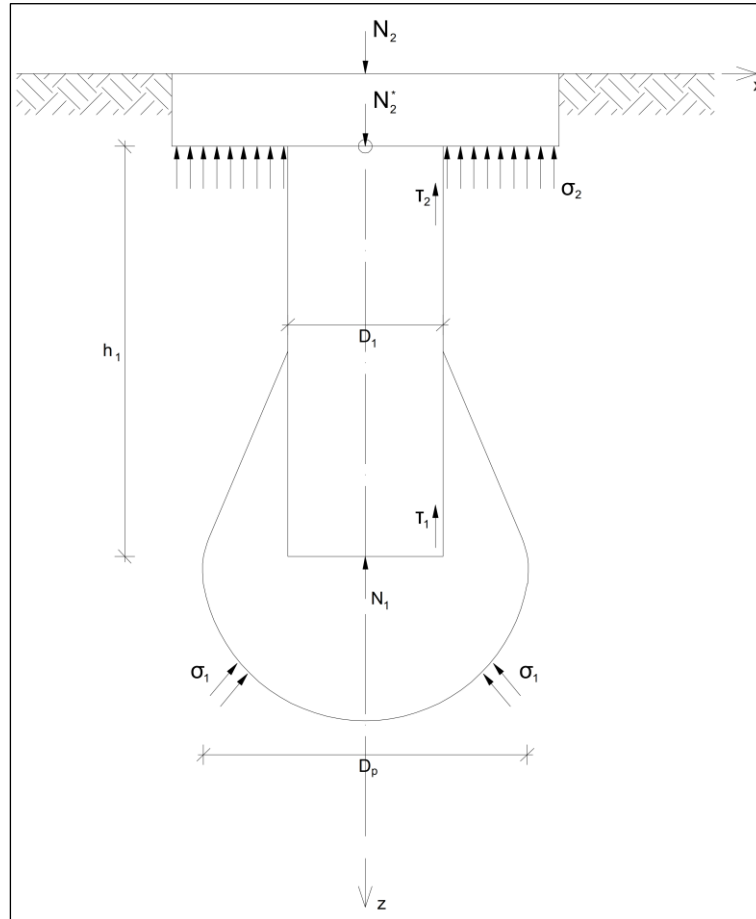
#### **7.5.4. PODSUMOWANIE**

Porównując osiadania płyty oraz pala i uwzględniając strefę uplastycznienia gruntu pod podstawą pala, zgodnie z rozdz. 7.5.2. oraz 7.3.4. niniejszej pracy, można stwierdzić, iż przyjęty opis matematyczny jest poprawny. Osiadanie obu elementów fundamentu jest takie samo. Stosując wzory z rozdz. 7.5.1. i 7.5.2. oraz wychodząc z założenia jednakowego osiadania, co zostało potwierdzone, proponuje się wzór matematyczny (7.33), dzięki któremu można wyznaczyć siły występujące w głowicy pala z dużą dokładnością.

## 8. ZASTOSOWANIE W PRAKTYCE

### 8.1. OPIS MATEMATYCZNY

Uwzględniając dotychczas przeprowadzone badania laboratoryjne jak i analizę otrzymanych wyników, autor pracy przedstawił sposób obliczeniowy PFPP dla celów praktycznych. Schemat modelu znajduje się na rys. 8.1.



Rys. 8.1. Schemat modelu PFPP

Naprężenia styczne w podstawie pala  $\tau_1$  oraz w poziomie głowicy  $\tau_2$  wynikają z docisku gruntu do powierzchni pobocznic palu w stanie granicznym, który generuje tarcie posuwiste gruntu o pobocznice. Wobec tego przyjmujemy:

$$\tau_2 = \sigma_2 \cdot \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \cdot f_2 \quad (\text{zgodnie z rozdz. 7.4. – wzór 7.22}),$$

$$\tau_1 = \frac{1}{4} \cdot \sigma_1 \cdot \left( \frac{D_p}{D_1} + 1 \right) \cdot f_1 \quad (\text{zgodnie z rozdz. 7.3.4. – wzór 7.20}).$$

Dla naprężeń  $\sigma_2$  zakładamy, że są one odporem gruntu na docisk  $N_2 - N_2^*$ , stąd wynika następujący zapis:

$$\sigma_2 = \frac{4 \cdot (N_2 - N_2^*)}{\pi \cdot (D_2^2 - D_1^2)} \quad (\text{zgodnie z rozdz. 7.4. – wzór 7.21}).$$

Natomiast dla naprężeń  $\sigma_1$  zakładamy, że pod podstawą pala tworzy się obszar gruntu uplastycznionego i dlatego tworzy się obszar w formie „gruszki” o średnicy  $D_p$  zgodnie z rozdz. 7.5.2. Zatem otrzymujemy:

$$\sigma_1 = \frac{N_1}{4 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D_p}{2}\right)^2} = \frac{N_1}{\pi \cdot D_p^2} \cdot \quad (8.1)$$

Do dalszych obliczeń wprowadza się następujące oznaczenia:

$$f_0 = \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right),$$

$$A_1 = \pi \cdot D_p^2,$$

$$A_2 = \frac{\pi}{4} \cdot (D_2^2 - D_1^2),$$

$$N_2 - N_2^* = \sigma_2 \cdot A_2,$$

$$N_1 = \sigma_1 \cdot A_1,$$

$$T = \frac{\tau_2 + \tau_1}{2} \cdot \pi \cdot D_1 \cdot h_1.$$

Do dyspozycji mamy dwa równania:

- 1) Równanie równowagi sił osiowych.
- 2) Równość osiadania podstawy płyty i podstawy pala. Zakładamy, że można pominąć skrócenie sprężyste trzonu pala.

Pierwsze równanie ma zatem postać:

$N_2 - (N_2 - N_2^*) = T + N_1$ , co po podstawieniu naprężeń daje:

$$N_2 - \sigma_2 \cdot A_2 = \frac{\sigma_2 \cdot \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) \cdot f_2 + \frac{1}{4} \sigma_1 \cdot \left(\frac{D_p}{D_1} + 1\right) \cdot f_1}{2} \cdot \pi \cdot D_1 \cdot h_1 + \sigma_1 \cdot A_1 \cdot \quad (8.2)$$

Równanie (8.2) zawiera dwie niewiadome:  $\sigma_2$  oraz  $\sigma_1$ . Po uporządkowaniu równania (8.2) otrzymamy:

$$N_2 = \frac{\sigma_2 \cdot f_0 \cdot f_2 + \frac{1}{4} \sigma_1 \cdot \left(\frac{D_p}{D_1} + 1\right) \cdot f_1}{2} \cdot \pi \cdot D_1 \cdot h_1 + \sigma_1 \cdot A_1 + \sigma_2 \cdot A_2 \cdot \quad (8.3)$$

Drugie równanie wymaga określenia osiadania płyty i podstawy pala zgodnie z rozdz. 7.5. Zatem mamy:

$$s_2 = D_2 \cdot \frac{\sigma_2}{E_2} \cdot \frac{1}{1 + 2 \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot \frac{\gamma \cdot D_2 \cdot \ln\left(\frac{E_2}{\sigma_2}\right)}{\sigma_2}}, \text{ gdzie}$$

$E_2$  – jest modułem ścisłości gruntu pod płytą.

Do dalszych obliczeń podstawia się:

$\sigma_0 = 2 \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot \gamma \cdot D_2$ , wtedy wzór (7.24) przyjmie postać:

$$s_2 = D_2 \cdot \frac{1}{\frac{E_2}{\sigma_2} \left[1 + \frac{\sigma_0}{\sigma_2} \ln\left(\frac{E_2}{\sigma_2}\right)\right]} \cdot \quad (8.4)$$

Równanie osiadania podstawy pala (7.30) ma postać:

$$s_1 = \frac{\sigma_1}{E_1} \cdot D_p,$$

gdzie  $E_1$  – jest modułem ścisłości gruntu pod podstawą pała.

Wychodząc z założenia, że osiadanie jest równe dla płyty i podstawy pała, możemy to zapisać:

$$s_1 = s_2,$$

stąd otrzymujemy:

$$\frac{\sigma_1}{E_1} \cdot D_p = D_2 \cdot \frac{1}{\frac{E_2}{\sigma_2} \left[ 1 + \frac{\sigma_0}{\sigma_2} \right] \cdot \ln\left(\frac{E_2}{\sigma_2}\right)}. \quad (8.5)$$

Przekształcając wzór (8.5) pod  $\sigma_1$ , uzyskujemy:

$$\sigma_1 = \sigma_2 \cdot \frac{E_1}{E_2} \cdot \frac{D_2}{D_p} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\sigma_0}{\sigma_2} \cdot \ln\left(\frac{E_2}{\sigma_2}\right)}. \quad (8.6)$$

Z podstawienia równania (8.6) do równania (8.3) wynika wzór:

$$\sigma_2 = \frac{N_2}{0,50 \cdot f_0 \cdot f_1 \cdot \pi \cdot D_1 \cdot h_1 + 0,125 \cdot \frac{E_1 \cdot D_2}{E_2 \cdot D_p} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\sigma_0}{\sigma_2} \cdot \ln\left(\frac{E_2}{\sigma_2}\right)} \cdot \left(\frac{D_p}{D_1} + 1\right) \cdot \pi \cdot D_1 \cdot h_1 + \frac{E_1 \cdot D_2}{E_2 \cdot D_p} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\sigma_0}{\sigma_2} \cdot \ln\left(\frac{E_2}{\sigma_2}\right)} \cdot A_1 + A_2}. \quad (8.7)$$

Jest to równanie z jedną niewiadomą  $\sigma_2$  w postaci uwikłanej i rozwiązujemy je, stosując metodę kolejnych iteracji. W równaniu należy dokładniej określić wartość  $D_p$ , którą wyznaczamy za pomocą wzoru:

$$D_p = D_1 \cdot (1 + \kappa_2). \quad (8.8)$$

Do zerowej iteracji zakładamy, że:

- $\sigma_2^{(0)} = \frac{4 \cdot N_2}{\pi \cdot (D_2^2 - D_1^2)},$
- $\kappa_2^{(0)} = 0,$
- $D_p = D_1.$

Metodą kolejnych iteracji obliczamy  $\sigma_2$  zgodnie ze wzorem (8.7), a następnie ze wzoru  $\sigma_1$  (8.6) wyliczamy naprężenia pod podstawą pała. Kolejno wyznaczamy siły:

$$N_2^* = N_2 - \sigma_2 \cdot A_2, \quad (8.9)$$

$$N_1 = \sigma_1 \cdot A_1. \quad (8.10)$$

Z wcześniejszych badań mamy zależność (na podstawie metody M-K):

$$\kappa_2^{(1)} = \sqrt{\frac{N_2^*}{N_1}} - 1. \quad (8.11)$$

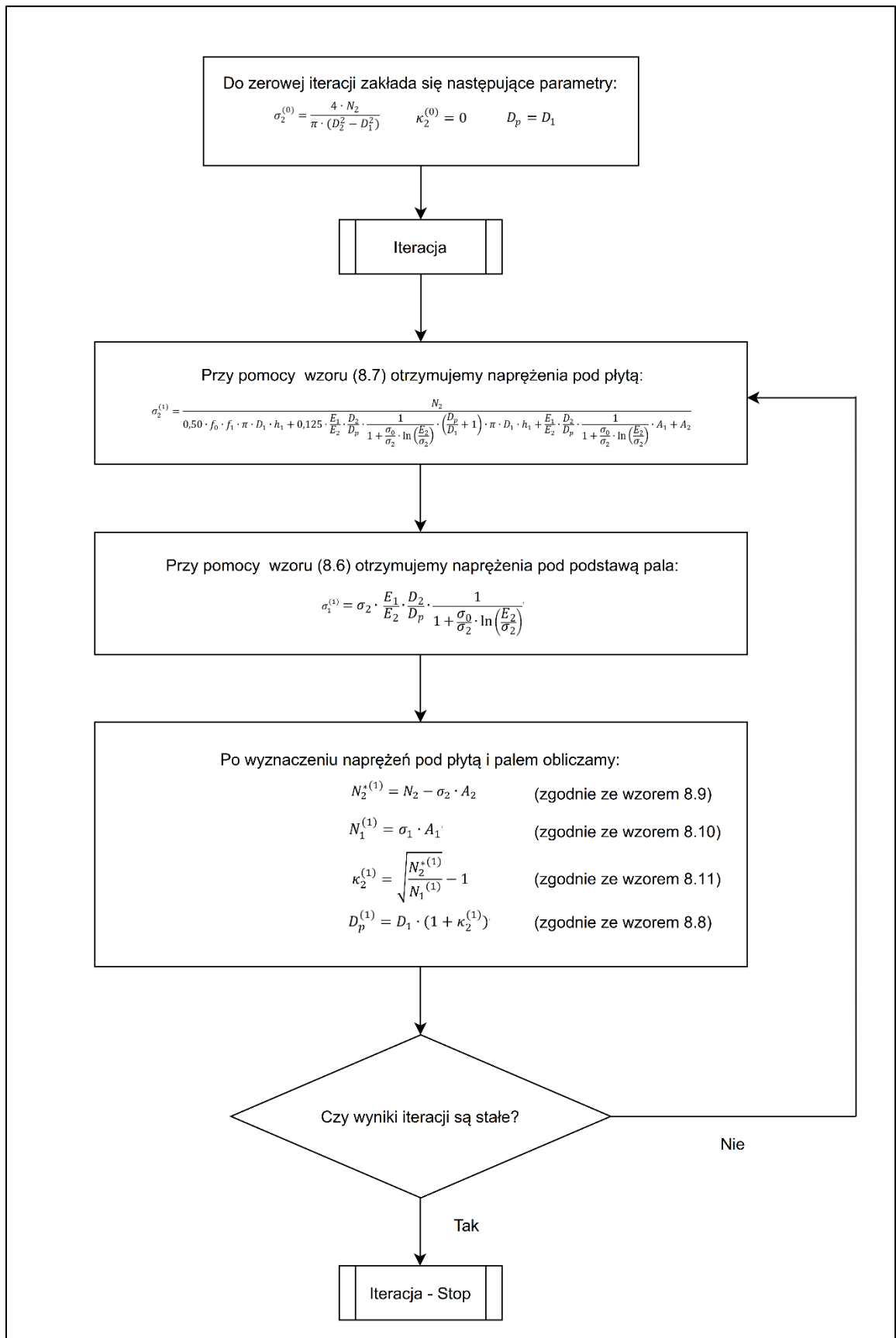
Pierwsza iteracja:

$$D_p^{(1)} = D_1 \cdot (1 + \kappa_2^{(1)}),$$

$$\sigma_2^{(1)} \text{ (zgodnie ze wzorem 8.7).}$$

Obliczenia są prowadzone tak długo, aż wyniki będą stabilne.

Schemat obliczeniowy został przedstawiony na rys. 8.2.



Rys. 8.2. Schemat obliczeniowy

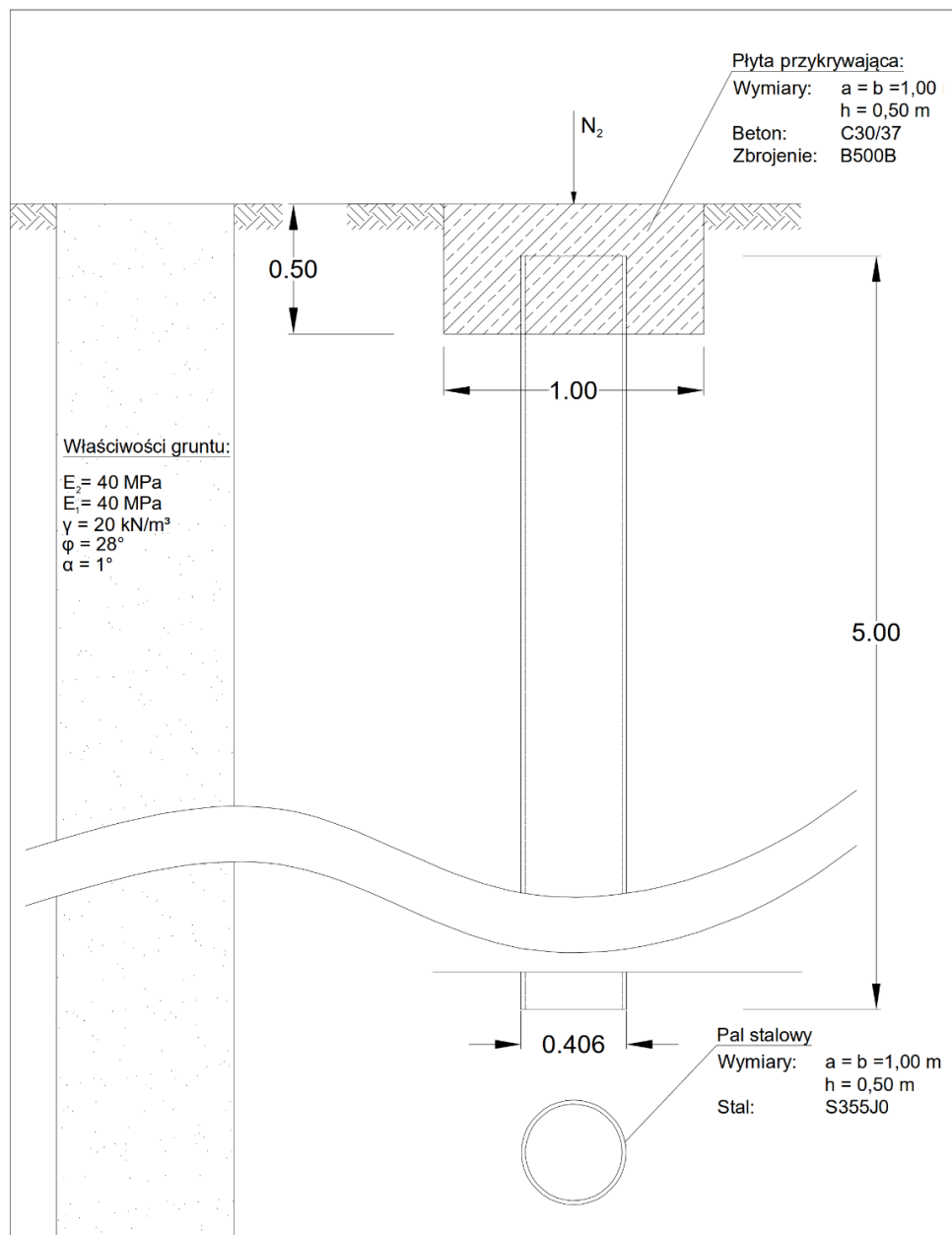


## 8.2. PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

Autor pracy przedstawił jeden przykład obliczeniowy dla podanego opisu matematycznego zgodnie z rozdz. 8.1. Wartości wejściowe oraz konstrukcja znajdują się na rys. 8.3. w formie schematycznej.

### Przykład:

Krawężnik masztu kratownicowego został posadowiony na pojedynczym fundamencie płytowo-palowym. Pionowe obciążenia oddziałujące na fundament to  $N_k = 385$  kN. Jest to siła charakterystyczna, którą należy podwyższyć, uwzględniając odpowiednio współczynnik bezpieczeństwa  $\gamma = 1,30$  zgodnie z normą PN EN 50119 [51]. Siły poziome w ramach niniejszego przykładu obliczeniowego zostały pominięte. Opisana sytuacja przedstawiona jest na rys. 8.3.



Rys. 8.3. Przykład obliczeniowy – rysunek poglądowy

Obciążenie:

$$N_2 = G_d,$$

$$N_2 = 500 \text{ kN}.$$

Geometria pala:

średnica pala –  $\varnothing 406,4 \text{ mm}$ ,

grubość ścianki pala –  $16 \text{ mm}$ ,

długość pala –  $5,00 \text{ m}$ .

Geometria płyty przykrywającej (płyta kwadratowa):

$$D_2 = 1,00 \text{ m}.$$

Materiały:

stal dla pala - S355J0,

stal zbrojeniowa - B500B.

Właściwości gruntu:

$$E_s = 40 \text{ MPa},$$

$$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3,$$

$$\phi = 28^\circ,$$

$$\alpha = 1^\circ,$$

$$q_{s,k} = 0,05 \text{ MN/m}^2,$$

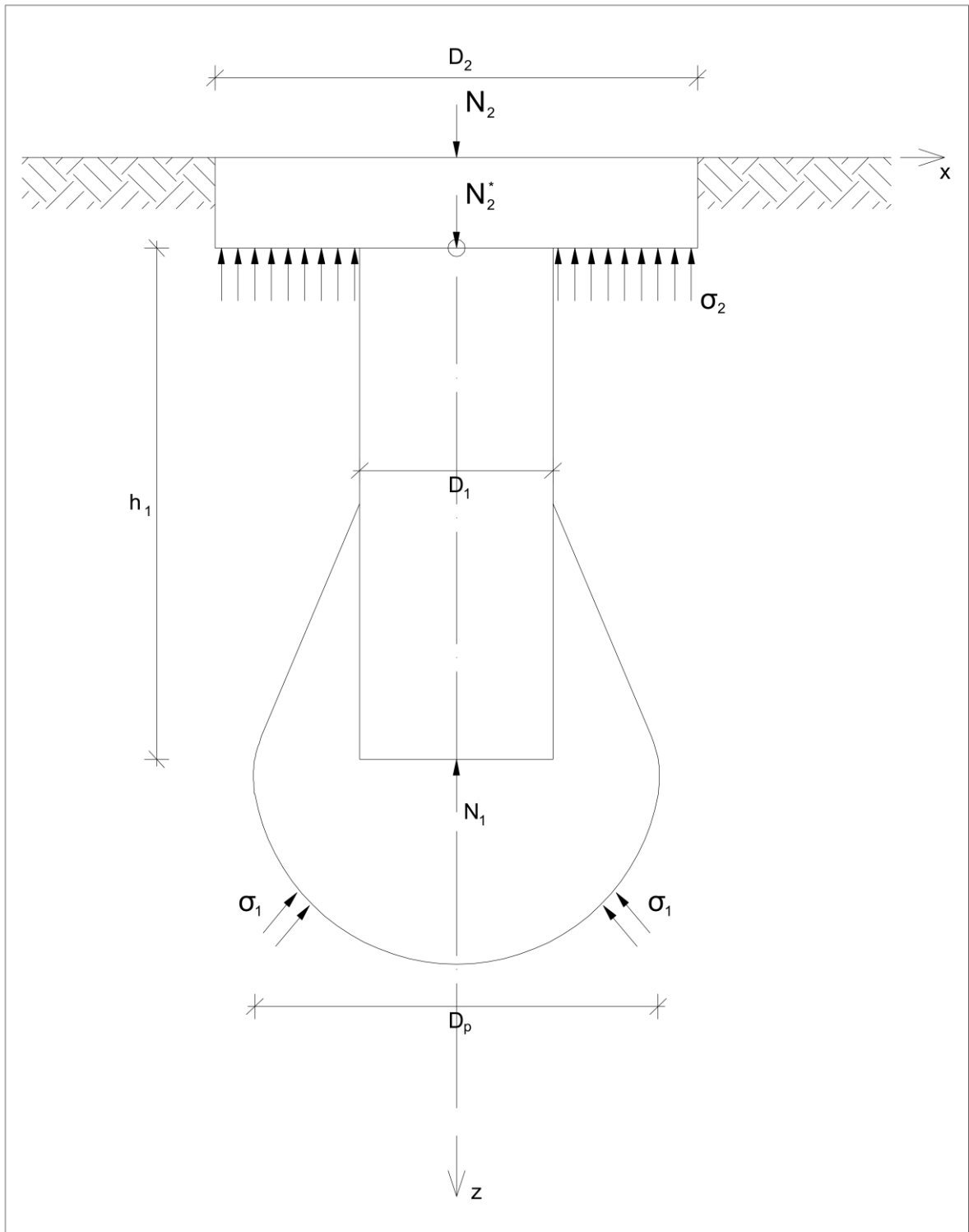
$$q_{b,k} = 5,10 \text{ MN/m}^2.$$

Pal znajduje się w jednej warstwie gruntu, a wody gruntowe  $3,00 \text{ m}$  pod podstawą pala.

Współczynnik tarcia dla pala stalowego:

$$f_2 = 0,20.$$

W celu objaśnienia tab. 8.1., z wynikami dla przykładu obliczeniowego, został wykorzystany rys. 8.4., na którym umieszczono schemat PFPP oraz rozkład sił i naprężeń.



Rys. 8.4. Rysunek schematyczny – rozkład sił i naprężeń

Wyniki obliczeń dla analizowanego przykładu PFPF zestawiono w tab. 8.1.

**Tabela 8.1. Wyniki dla przykładu obliczeniowego**

Wartości stałe		Wartości zmienne							Iteracja
$D_1$ [m]	0,40	$D_p$ [m]	$\kappa_2$ [-]	$A_1$ [m <sup>2</sup> ]	$\sigma_2$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_1$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$N_2^*$ [kN]	$N_1$ [kN]	Iteracja <sup>0</sup>
$D_2$ [m]	1,00	0,40	0,00	0,50	757,88				Iteracja <sup>1</sup>
$h_1$ [m]	5,00	0,51	0,27	0,80	243,64	421,45	339,26	211,84	Iteracja <sup>2</sup>
$E_2$ [kN/m <sup>2</sup> ]	40000	0,44	0,10	0,61	248,65	342,41	335,96	275,64	Iteracja <sup>3</sup>
$E_1$ [kN/m <sup>2</sup> ]	40000	0,44	0,11	0,62	266,05	430,10	324,48	263,50	Iteracja <sup>4</sup>
$N_2$ [kN]	500	0,45	0,12	0,63	262,01	419,17	327,15	259,46	Iteracja <sup>5</sup>
$\varphi$ [°]	28	0,45	0,12	0,63	261,15	412,42	327,71	261,39	Iteracja <sup>6</sup>
$\alpha$ [°]	1	0,45	0,12	0,63	261,69	414,76	327,35	261,38	Iteracja <sup>7</sup>
$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	20	0,45	0,12	0,63	261,66	414,91	327,37	261,20	Iteracja <sup>8</sup>
$f_0$ [-]	0,36	0,45	0,12	0,63	261,62	414,66	327,40	261,24	Iteracja <sup>9</sup>
$f_1$ [-]	0,01	0,45	0,12	0,63	261,63	414,70	327,39	261,25	Iteracja <sup>10</sup>
$f_2$ [-]	0,20	0,45	0,12	0,63	261,63	414,72	327,39	261,24	Iteracja <sup>11</sup>
$\kappa_2$ [-]	0,00	0,45	0,12	0,63	261,63	414,71	327,39	261,24	Iteracja <sup>12</sup>
$A_2$ [m <sup>2</sup> ]	0,66	0,45	0,12	0,63	261,63	414,71	327,39	261,24	Iteracja <sup>13</sup>
$\sigma_0$ [kN/m <sup>2</sup> ]	21,27	0,45	0,12	0,63	261,63	414,71	327,39	261,24	Iteracja <sup>14</sup>
		0,45	0,12	0,63	261,63	414,71	327,39	261,24	Iteracja <sup>15</sup>
		0,45	0,12	0,63	261,63	414,71	327,39	261,24	Iteracja <sup>16</sup>

W ramach obliczeń autor wykonał 15 kroków iteracyjnych. Wartość stała została osiągnięta w 11. kroku iteracyjnym. Rozkład reakcji w fundamencie przy obciążeniu  $N_2 = 500$  kN wynosi:

$$N_{\text{płyta}} = 172,61 \text{ kN},$$

$$N_2^* = 327,39 \text{ kN},$$

$$T = 66,15 \text{ kN},$$

$$N_1 = 261,24 \text{ kN}.$$

Zaobserwować można utworzenie się strefy gruntu uplastycznionego o współczynniku:

$$D_p/D_1 = 1,125.$$

Współczynnik  $\kappa_2$  wynosi dla fundamentu:

$$\kappa_2 = 0,12.$$

Kolejno zostanie przeprowadzony dowód dla pała na siłę ściskającą zgodnie z normą PN EN 1993 [49]. Ze względu na warunki gruntowe problem stateczności pała nie musi być zbadany. Dla wymiarowania pała został przyjęty mimośród  $e = 0,15$  m, by uwzględnić tolerancję wykonawczą.

Obliczenia zgodnie z normą PN EN 1993 [49]:

$$N_2^* = N_d = 327,39 \text{ kN},$$

$$M_d = 327,39 \text{ kN} \cdot 0,15 \text{ m} = 49,05 \text{ kNm},$$

$$N_{Rd} = 6,95 \text{ MN},$$

$$M_{Rd,el} = 654 \text{ kNm}.$$

Wykorzystanie dobranego przekroju pała wynosi ok. 13%.

Siły występujące na poboczniczy i siły u podstawy pala mogą zostać wprowadzone do gruntu. Dowody przeprowadza się zgodnie z normą PN EN 1997 [50] oraz z wytyczną EA-Pfähle [52].

Obliczenia:

$$T_d = 66 \text{ kN} < T_{Rd} = 190 \text{ kN},$$

$$N_{1,d} = 261,24 \text{ kN} < B_{Rd} = 265 \text{ kN}.$$

Z przeprowadzonych dowodów wynika, iż dobór konstrukcji jest właściwy, a jej dopuszczalne obciążenie wykorzystane jest w 98%.

**Wskazówka dla obliczeń:**

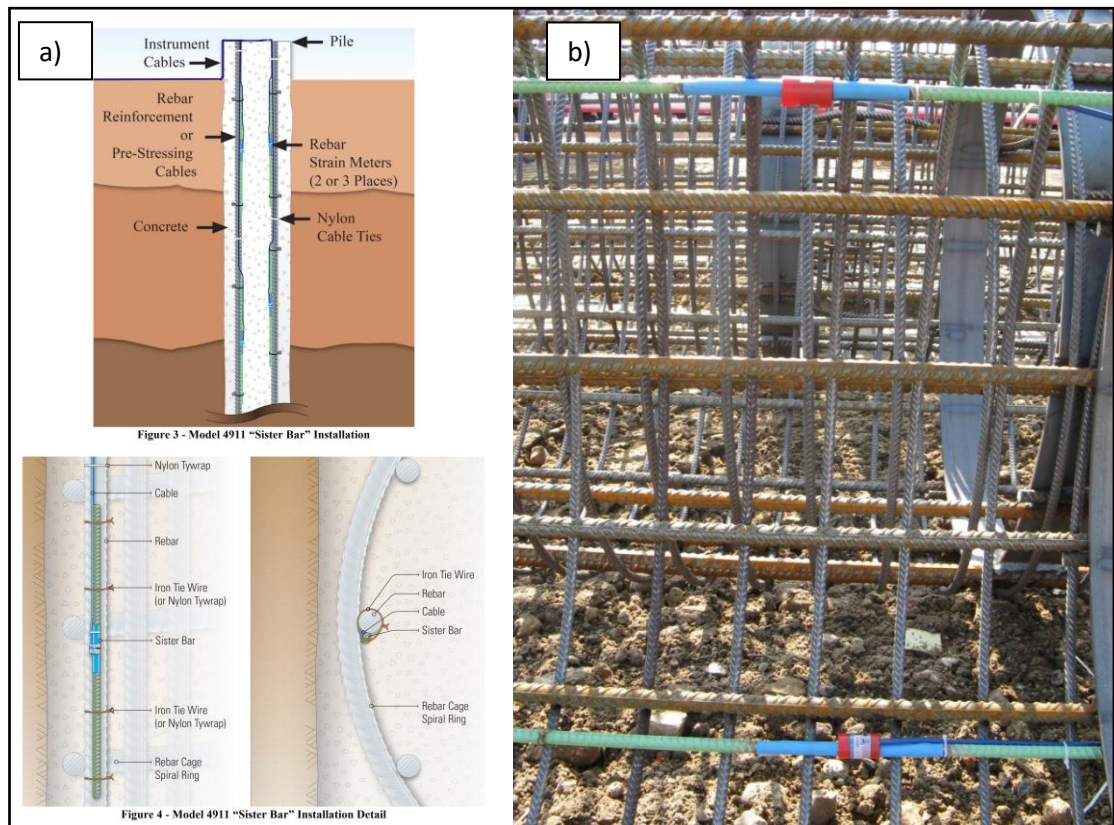
Gdy pal nie jest uzbrojony w urządzenia pomiarowe, a wyznaczenie kąta  $\alpha$  niemożliwe jest, proponuje się zastosowanie wzoru (8.12) dla określenia  $f_1$ :

$$f_1 = \frac{\tan^2\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right)}{\tan^2\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right)} \cdot f_2. \quad (8.12)$$

### 8.3. BADANIA EKSPERYMENTALNE W PRAKTYCE

W ostatnich latach do celów optymalizacji fundamentów często stosowane są punkty pomiarowe. Są to czujniki mierzące siły w osi pala oraz czujnik mierzący siłę u podstawy pala. Przy pomocy tego typu urządzeń z dużo większą dokładnością można wyznaczyć poszczególne siły i naprężenia występujące w fundamencie w zależności od obciążenia. Czujniki używa się podczas fazy projektowej w czasie przeprowadzania statycznych próbnych obciążeń pala. Stosowane czujniki w przemyśle budowlanym to:

- 1) Sister bars – pomiary na poboczniczy pala.



Rys. 8.5. Sister bars: a) schemat (źródło [56]), b) zdjęcie kosza zbrojeniowego z Sister bars (źródło Firma Ed. Züblin AG / Zentrale Technik TBT-Berlin)

Zgodnie z danymi producenta [56] Sister bars (dalej jako sb) stosowane są wyłącznie do pali żelbetowych i mocowane do kosza zbrojeniowego. Łączenie pomiędzy sb a koszem zbrojeniowym wykonywane jest przy pomocy spoiny tak, że sb staje się nieodłącznym jego elementem. Sb są ponadto na tyle długie, aby miały odpowiedni kontakt z okalającym ją betonem. Punkty pomiarowe umiejscawia się z reguły co  $90^\circ$  na obwodzie kosza zbrojeniowego w celu zneutralizowania ewentualnych momentów zginających, które wynikają z mimośrodów.

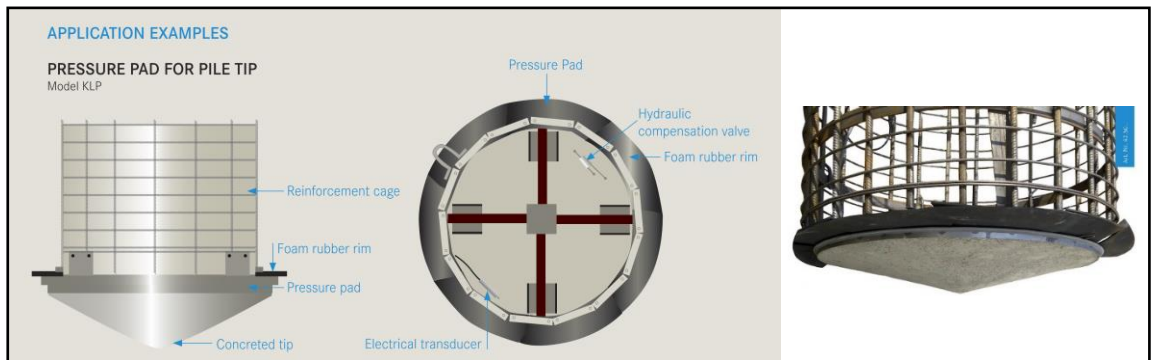
Na rysunku 8.5. przedstawiono schematycznie rozmieszczenie i oznaczenia punktów pomiarowych. Zostało pokazane też przykładowe zastosowanie dla pali żelbetowych (rys. 8.5.). Dla pali stalowych nie instaluje się obecnie żadnych punktów pomiarowych na poboczniczy pala.

2) Poduszki pomiarowe - pomiary u podstawy pala.

Na rysunku 8.6. znajduje się poduszka pomiarowa umiejscawiana u podstawy pala firmy Glötzl. Poduszka składa się z:

- ramienia montażowego,
- gumy uszczelniającej,
- betonowego stożka.

Poduszka łączona jest z podstawą pala. Stosuje się ją do pomiaru sił występujących u podstawy pala. Opierając się o dane producenta, można stwierdzić, iż występujące ciśnienie w poduszce pomiarowej może być przeliczone na siły zgodnie z tabelami, które dostarczane są z czujnikami pomiarowymi. Maksymalny zakres techniczny podstawowych poduszek to 60 MN i  $\varnothing 1500$  mm (pal). Najmniejszy dostępny model to KLP 450 o maksymalnym dopuszczalnym obciążeniu 8 MN i  $\varnothing 600$  mm (pal). Są to zatem urządzenia o bardzo szerokim zakresie zastosowania dla pali żelbetowych jak i stalowych. Przy wariancie stalowym należy przeprowadzić dodatkowe prace adaptacyjne.



Rys. 8.6. Schemat dla poduszek pomiarowych firmy Glötzl (źródło [57])

## 9. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W pracy przedstawiono analizę współpracy pala z płytą zamocowaną w głowicy pala z podłożem gruntowym. Przypadek taki, zgodnie z przeanalizowaną literaturą, nie posiada dostatecznego rozpoznania naukowego, chociaż takie rozwiązanie konstrukcyjne jest często stosowane w praktyce. Szczególnie w kolejnictwie. Mając na względzie ten fakt, doktorant podjął próbę stworzenia modelu matematycznego opisującego współpracę pojedynczego fundamentu płytowo-palowego (PFPP) z gruntem.

Do opisu matematycznego przyjęto model współpracy pala z gruntem określony poprzez zależność obciążenie – osiadanie w postaci krzywej próbnych statycznych obciążeń. Zależność ta jest powszechnie akceptowanym sposobem na przygotowanie dopuszczalnych obciążeń i określenie dopuszczalnych osiadań konstrukcji.

Do analizy krzywej próbnych obciążeń wykorzystano przygotowaną w Katedrze Geotechniki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie krzywą Meyera-Kowalowa, tzw. krzywą M-K, która posiada trzy parametry. Jest to krzywa spełniająca warunki fizyczne statycznego próbnego obciążenia. Dla małych obciążeń związek pomiędzy obciążeniem a osiadaniem jest liniowy. Dochodząc do wartości krytycznej, pal zaczyna osiadać w sposób niekontrolowany. Dla tej krzywej opracowano procedury, które pozwalają na obliczenie parametrów. Ten analityczny opis współpracy pala z gruntem stanowił podstawę do weryfikacji modelu PFPP.

Weryfikację przeprowadzono w oparciu o badania eksperymentalne. Badania eksperymentalne wykonano na Wydziale Budownictwa i Inżynierii Środowiska w Laboratorium Wydziałowym. Model fizyczny konstrukcji PFPP składał się z rur o średnicy  $\varnothing 76,1$  mm, grubości ścianki  $t=5,00$  m oraz dwóch długości: 700 mm oraz 1000 mm. Pale były przykrywane płytami stalowymi o następujących średnicach:  $\varnothing 76,1$  mm,  $\varnothing 200$  mm oraz  $\varnothing 250$  mm. Modele PFPP zasypywane były piaskiem klasyfikowanym.

W ramach badań nad PFPP wykonano następujące próby:

- 1) pojedynczy pal bez płyty o długości 1000 mm przy zagęszczeniu gruntu ( $I_D=0,55$ ),
- 2) pojedynczy pal bez płyty o długości 700 mm przy zagęszczeniu gruntu ( $I_D=0,60$ ),
- 3) pojedynczy pal o długości 1000 mm z płytą o średnicy 250mm przy zagęszczeniu gruntu ( $I_D=0,55$ ),
- 4) pojedynczy pal o długości 1000 mm z płytą o średnicy 200mm przy zagęszczeniu gruntu ( $I_D=0,55$ ),
- 5) pojedynczy pal o długości 700 mm z płytą o średnicy 250mm przy zagęszczeniu gruntu ( $I_D=0,60$ ),
- 6) pojedynczy pal o długości 700 mm z płytą o średnicy 250 mm przy zagęszczeniu gruntu ( $I_D=0,60$ ).

Każda z wymienionych konfiguracji obciążana była czterokrotnie. Dla pali bez płyty obciążanie odbywało się w przedziale 0-17 kN, a pomiary odbywały się co 1,00 kN.



Dla pali z płytą przykrywającą obciążanie było przeprowadzone w przedziale 0-25 kN, a rejestracja pomiarowa odbywała się co 5,00 kN.

Dzięki zainstalowanym uprzednio tensometrycznym punktom pomiarowym można było zaobserwować zmianę siły osiowej w trzonie pala. To pozwoliło na ostateczne określenie siły w głowicy pala oraz u jego podstawy. Ponadto umożliwiło to wykorzystanie opisu matematycznego dla PFPP.

Opierając się na badaniach eksperymentalnych, okazało się możliwym ustalenie zmian oporu pobocznicy pala wraz z głębokością. Dla uproszczenia można przyjąć liniowy rozkład naprężeń na pobocznicę. Ta symplifikacja ma również wpływ na obliczenia i pozwala na ich uproszczenie. Równaniem zamykającym było równanie krzywej M-K, które pozwoliło na określenie naprężeń w podstawie pala i pod płytą w głowicy pala. W wyniku tych badań przygotowano metodę obliczeniową, która może mieć zastosowanie w praktycznych obliczeniach.

Do określenia osiadania płyty stosuje się równania dużej płyty zgodnie z metodą Szmechela-Meyera. Natomiast dla części pala pod płytą od głowicy w dół do podstawy wykorzystuje się równanie M-K, które pozwala na rozdzielenie oporu pobocznicy i podstawy pala w taki sposób, aby można było zamknąć pracę pala. Na tej podstawie przygotowano wzory, które pozwalają określić: naprężenia pod płytą, naprężenia w podstawie pala oraz naprężenia na pobocznicę pala. Znając wymienione naprężenia, można rozwinąć całą procedurę obliczeniową dla PFPP. Można też określić wszystkie elementy reakcji PFPP.

W trakcie badań eksperymentalnych dla różnych stosunków wysokość/średnica i dla różnego zakresu sił otrzymano rozkłady oporu pobocznicy pala, które dla praktycznych celów można określić liniową zależnością. Dla tej liniowej zależności przedstawiono, jak wyznaczyć  $\tau_1$  i  $\tau_2$ . To pozwala na zamknięcie układu równań, które opisują stan równowagi konstrukcji PFPP. Obserwując zachowanie się płyty i pala w głowicy PFPP, dochodzi się do wniosku, że dla celów praktycznych obliczeń można przyjąć, iż naprężenia styczne w poziomie głowicy pod płytą można określić wzorem (7.22). Natomiast w podstawie PFPP można zastosować wzór (7.20). W ten sposób oprócz rozpoznania naukowego problemu uzyskano również zależności, które mogą mieć praktyczne zastosowanie.

W ten sposób została potwierdzona teza, że poprzez docisk płyty przykrywającej podwyższa się naprężenie na pobocznicę pala, co skutkuje zwiększeniem się nośności fundamentu. Natomiast dla PFPP może z powodzeniem być stosowana metoda M-K.

## 10. PLAN DALSZYCH BADAŃ

Autor niniejszej pracy przygotował również plan dalszych badań nad pojedynczymi fundamentami płytowo-palowymi. Plan ten składa się z następujących punktów:

- 1) Określenie wpływu technologii pala na sposób rozwiązania PFPP. W szczególności na rozkład naprężeń w podstawie i głowicy pala.
- 2) Uwzględnienie sił poziomych dla PFPP.
- 3) Przeprowadzenie badań w skali naturalnej.
- 4) Przygotowanie tablic, które umożliwią projektowanie PFPP analogicznie do projektowania pali pojedynczych w zależności od rodzaju gruntu. Projektowanie mogłoby się odbywać na dwa sposoby:
  - projektowanie na dopuszczalne osiadanie konstrukcji,
  - projektowanie na dopuszczalną siłę przykładaną do systemu.
- 5) Przygotowanie programu obliczeniowego dla celów praktycznych.

## 11. BIBLIOGRAFIA

- [1] Brown, P.T. and Wiesner, T.J. (1975): *The Behaviour of Uniformly Loaded Piled Strip Footings*; Soils and Foundations; 15(4), 13-21.
- [2] Burland, J.B. (1995): *Piles as Settlement Reducers*; 18th Italian Congress on Soil Mechanics, Pavia, Włochy.
- [3] Burkovic K., Buchta V.,(2014): *Experimental Measurements of a Model of Pile, Slab and Raft Foundation*; No. 2, Vol. 14, Civil Engineering Series, paper #17.
- [4] Butterfield / Banerjee (1971): *The Problem of Pile Ground-Pile Cap Interaction*; Geotechnique 21, No. 2, s. 135-142.
- [5] Chow, Y. K. (1986): *Analysis of Vertically Loaded Pile Groups*; International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 10, No. 1, s- 59-72.
- [6] Davis Poulos (1972): *The Analysis of Pile raft Systems*; The Australian Geomechanics Journal, Vol. G2, No. 1, s. 21-27.
- [7] El-Garhy, B., Galil, A., Youssef, A., Raia, M. (2013): *Behavior of Raft on Settlement Reducing Piles: Experimental Model Study*; Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Volume-5, pp. 389-399, 2013.
- [8] El-Mossallamy (1996): *Ein Berechnungsmodell zum Tragverhalten der Kombinierten Pfahl-Platten-gründung*; Mitteilung des Instituts und der Versuchsanstalt für Geotechnik der TU Darmstadt, Heft 36.
- [9] Fioravante, V., and Giretti, D. and Jamiolkowski, M. (2008): *Physical Modeling of Raft on Settlement Reducing Piles*; Proceeding, Research to Practice in Geotechnical Engineering Congress, ASCE, 206-229.
- [10] Fioravante, V., and Giretti, D. (2010): *Contact Versus Noncontact Piled Raft Foundation*; Canadian Geotechnical Journal, 47, pp. 1271-1287.
- [11] Giretti (2009): *Modelling of Piled Raft Foundations in Sand*; PhD thesis, Università degli Studi di Ferrara.
- [12] Hain Lee (1978): *The Analysis of Flexible Raft-Pile Systems*; Geotechnique 28, No. 1, s. 65-83.
- [13] Hemsley, J. A. (2000): *Design Application of Raft Foundation*; Thomas Telford Publishing.
- [14] Hussein, H. (2020): *Analysis of Piled Raft Foundation in Sandy Soil Using Full Scale Models*; IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 737 012102.
- [15] Kitiyodom, P., Matsumoto, T. (2003): *A Simplified Analysis Method for Piled Raft Foundation in Non-Homogeneous Soils*; Int. J. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 27, No. 2, pp. 85-109.
- [16] Knabe W. (1977): *Wzajemne Oddziaływanie Ośrodka Gruntowego i Płyty Fundamentowej na Palach – Część III*; Rozprawy Hydrotechniczne, Zeszyt 38/1977.

- [17] Lai, J., Liu, H. Qiu, J., Fan, H. Zhang, Q., Hu, Z., Wang, J. (2016): *Stress Analysis of CFG Pile Composite Foundation in Consolidating Saturated Mine Tailings Dam*; Advances in Materials Science and Engineering, 2, pp. 1-12.
- [18] Lutz, B. (2002): *Beitrag zur Modellierung des Tragverhaltens Kombinerter Pfahl-Platengründungen (KPP) unter Verwendung Geotechnischer Messungen*; Mitteilung des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der TU Darmstadt, Heft 63.
- [19] Mendoza, Cunha, Ruge, Lizcano (2014): *Some Contributions to the Analysis of Piled-Rafts Made up by Self-Drilling Piles Founded in a Tropical Soil of Brazil*; EJGE, Vol.19, Bund. Z5.
- [20] Meyer Z., Kowalow M., Wasiluk A., Wolff Ch.(2015): *Optymalizacja Warunków Posadowienia Dużej Hali Produkcyjnej na Przykładzie Budowy Fabryki Samochodów Marki Volkswagen we Wrześni*; XXVII Konferencja Naukowo-Techniczna – awarie budowlane.
- [21] Meyer Z., Szmechel G.(2012): *Uwagi do Obliczania Osiadania Dużych Płyt Fundamentowych*; Inżynieria Morska i Geotechnika nr 1/2012.
- [22] Meyer Z., Żarkiewicz K. (2015): *Analiza Współpracy Pala z Gruntem w Dużym Zakresie Osiadania*; XXVII Konferencja Naukowo-Techniczna – awarie budowlane.
- [23] Meyer Z., Cichocki P. (2015): *Wpływ Zasięgu Strefy Aktywnej Naprężeń na Szywny Fundament Płytowo-Palowy*; Analiza mechanizmów formowania się oporów pobocznic i podstawy pala (wybrane prace), Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie – Wydział Budownictwa i Architektury – Katedra Geotechniki, Szczecin, s. 41-48.
- [24] O'Neill M. W. (1981): *Field Study of Pile Group Action*; Report No. FHWA/RD-81/001, federal Highway Administration, Offices of Research & Development, Materials Division, Washington, D.C. 20590.
- [25] Patil, Vasawala, Solanki (2015): *An Experimental Investigation on Behavior of Piled Raft Foundation*; International Journal of Geomatics and Geosciences, Volume-5, ISSN-0976-4380, 2014.
- [26] Patil, Vasawala, Solanki (2015): *Investigation of the Behavior of Piled Raft in Sand: an Experimental Study*; International journal of structural and civil engineering research, Volume-4, ISSN-2319-6009, February-2015.
- [27] Pirrello, Poulos (2013): *Comparison of Four Pile Group Analysis Programs*; ISBN: 978-981-07-4623-0.
- [28] Poulos, H.G. and Davis, E.H. (1980): *Pile Foundation Analysis and Design*; Wiley, New York.
- [29] Poulos, H.G. (1991): *Analysis of Piled Strip Foundation*; Comp. Methods & Advances in Geomechs., ed. Beer et al, Balkema, Rotterdam, 1: 183-191.
- [30] Poulos (1993): *Settlement Prediction for Bored Pile Groups, Deep Foundations on Bored and Auger Piles*; Van Impe, Balkema, Rotterdam, s. 103-117.
- [31] Poulos, H.G. (1994): *An Approximate Numerical Analysis of Pile-Raft Interaction*; Int. J. NAM Geomechs., 18:73-92.
- [32] Poulos (1994): *An Approximate Numerical Analysis of Pile-Raft Interaction*; Research Report No. R692, University of Sydney, Australia.

- [33] Poulos, H.G. (2001): *Piled Raft Foundations – Design and Applications*; Geotechnique, Vol. 50, (2): 95-113.
- [34] Radiha, Jeyapriya, Soundrapandiyan (2015): *Parametric Study and Numerical Analysis of Piled Raft Foundation on Soft Clay*; International journal for research in emerging science and technology, Volume-2, Issue-4, april-2015.
- [35] Randolph (1983): *Design of Piles Raft Foundations*; CUED/D-Soils, Tr. 143, Cambridge University.
- [36] Randolph (1994): *Design Methods for Pile Groups and Piled Rafts*; S.O.A. Report, 13 ICSMFE, New Delhi, 5: 61-82.
- [37] Russo, G. (1998): *Numerical Analysis of Piled Rafts*, Int. Jnl. Anal. & Num. Methods in Geomechs., 22(6): 477-493.
- [38] Sernov (2010): *The Increase of Bearing Capacity of Pile Foundations Taking into Account Soil-Raft Interaction*; The 10th International Conference – May 19-21, 2010, Vilnius, Lithuania.
- [39] Sernov (2012): *Investigation of Piled-Raft Foundations in Soil Conditions of Minsk*; Baltic Piling – Mets & Raudsepp; Proceedings of the Conference on Baltic Piling Days 2012; Tallin, Estonia.
- [40] Shen, Y. (2006): *Unterfangung Belasteter Fundamente Durch Bohrpfähle*; Veröffentlichungen des Fachgebietes Bodenmechanik und Grundbau der Technischen Universität Kaiserslautern – Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. C. Vrettos., Heft 11.
- [41] Siemaszko, P., Meyer, Z. (2019): *Static Load Test Curve Analysis Based on Soil Field Investigations*; 329Bull. Pol. Ac.: Tech. 67(2) 2019BULLETIN OF THE POLISH ACADEMY OF SCIENCES TECHNICAL SCIENCES, Vol. 67, No. 2, 2019.
- [42] Singh (2013): *Study of Piled Raft Foundation*; Proceeding of Indian Geotechnical Conference, 22-24 December, 2013, Roorkee.
- [43] Taher (1991): *Tragverhalten von Pfahl-Platten-Gründungen im Bindigen Baugrund, Berechnungsmodelle und Zentrifugen-Modellversuche*; Schriftenreihe des Institutes für Grundbau, Wasserwesen und Verkehrswesen; Ruhr-Universität Bochum; Serie Grundbau, Heft 15.
- [44] Vakili, R. (2015): *Load Sharing Mechanism of Piled-Raft Foundation in Sand*; PhD thesis; Concordia University.
- [45] Venkateshwaran, Jeyapriya (2015): *Experimental Observations and Parametric Study of Piled Raft Foundation Using Plaxis*.
- [46] Wahrmund, H. (1993): *Numerische Berechnungsmethoden zur Abschätzung der Lastverteilung und des Last-Setzungsverhaltens Vertikal Belasteter Pfahlgruppen und Pfahlplatten-Gründungen*; Hochschule der Architektur und Bauwesen Weimar.
- [47] Witt (2009): *Grundbau-Taschenbuch: Teil 3: Gründungen und geotechnische Bauwerke*; Ernst & Sohn; Auflage: 7. überarb. u. aktualis. Auflage, ISBN-13: 978-3433018460.
- [48] Żarkiewicz K. (2018): *Laboratory Research of Toe Resistance Based on Static Pile Load Tests in Different Schemes*; Civil and Environmental Engineering Reports; CEER 2018; 28 (1); 172-181.

**Normy - Wytyczne:**

- [49] PN EN 1993-1-1:2006 – Eurokod 3 - Projektowanie konstrukcji stalowych --  
Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [50] PN-EN 1997-1:2008 – Eurokod 7 – Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne.
- [51] PN EN 50119: 2020-12 - Zastosowania kolejowe -- Urządzenia stacjonarne -- Sieć jezdna górna trakcji elektrycznej.
- [52] EA – Pfähle:2012 - Empfehlungen des Arbeitskreises "Pfähle".

**Witryny internetowe:**

- [53] [www.zepwn.com.pl](http://www.zepwn.com.pl).
- [54] [www.tenmex.pl](http://www.tenmex.pl).
- [55] [www.enerpac.com](http://www.enerpac.com).
- [56] [www.geokon.com](http://www.geokon.com).
- [57] [www.gloetzl.de](http://www.gloetzl.de).

**Zdjęcia:**

Firma Ed. Züblin AG / Zentrale Technik TBT-Berlin.

## 12. SPIS RYSUNKÓW

Rys. 3.1. Stanowisko badawcze oraz głowica fundamentu wraz z oprzyrządowaniem (źródło [3]).....	10
Rys. 3.2. Schematy przebadanych modeli pali (źródło: [9],[10],[11]) .....	10
Rys. 3.3. Konfiguracja PFPP (źródło [19]) .....	11
Rys. 3.4. Zestawienie badanych modeli (źródło [39]) .....	12
Rys. 3.5. Badane elementy w ramach [44]: a) PFPP, b) fundament palowy, c) płyta (źródło [44]) .....	12
Rys. 3.6. Model badanego pala oraz stanowisko badawcze (źródło [44]) .....	13
Rys. 3.7. Schemat badania terenowego na palu (źródło [17]).....	14
Rys. 3.8. Zestawienie badań próbnych obciążeń pojedynczego fundamentu płytowo palowego (PRF – Pile Raft Foundation) oraz samej płyty (Raft Foundation) (źródło [14]) .....	14
Rys. 3.9. Badane warianty fundamentów płytowo-palowych oraz stanowisko badawcze (źródło [25]) .....	15
Rys. 3.10. Model pala oraz stanowisko badawcze (źródło [7]).....	16
Rys. 3.11. Model płyty przykrywającej z publikacji (źródło [7]).....	16
Rys. 3.12. Schemat badanych pali (źródło [48]) .....	17
Rys. 5.1. Wykres poglądowy wyników dla pala .....	19
Rys. 5.2. Wykres poglądowy wyników dla płyty .....	20
Rys. 5.3. Wykres poglądowy wyników dla PFPP .....	20
Rys. 6.1. Stanowisko badawcze dla PFPP .....	21
Rys. 6.2. Montaż stanowiska badawczego .....	21
Rys. 6.3. Rysunek techniczny stanowiska badawczego.....	22
Rys. 6.4. RAC306 cylinder aluminiowy 30T ENERPAC oraz płyty przykrywające model pala .....	23
Rys. 6.5. P392 lekka pompa ręczna ENERPAC .....	23
Rys. 6.6. Wąż hydrauliczny HC7220 oraz cylinder aluminiowy RAC306.....	24
Rys. 6.7. Surowy model pojedynczego fundamentu płytowo-palowego.....	25
Rys. 6.8. Rysunek poglądowy modelu PFPP i rozmieszczenie miejsc pomiarowych .....	26
Rys. 6.9. Czujnik siły ZEPWN CL20 – rysunek poglądowy ze strony internetowej producenta (źródło [53]).....	27
Rys. 6.10. Rura $\varnothing 76,3 \times 5$ ; L=700 mm - naklejanie tensometrów.....	27
Rys. 6.11. Rura $\varnothing 76,3 \times 5$ ; L=700 mm - tensometr kompensacyjny TF-5/120 TENMEX .....	28
Rys. 6.12. Rura $\varnothing 76,3 \times 5$ ; L=700 mm – łączenie tensometrów w pełen mostek.....	28
Rys. 6.13. Kalibracja modelu pala w zakresie sił 0 kN – 250 kN.....	29
Rys. 6.14. Widok komory podczas montażu pala .....	30
Rys. 6.15. Rejestrator 8-kanałowy ZEPWN CL460.....	30
Rys. 6.16. Płyta dynamiczna Zorn ZFG 3000 .....	31
Rys. 6.17. Mikrometr użyty do pomiaru pionowego przemieszczenia pala.....	32
Rys. 6.18. Wypełnianie zbiornika piaskiem .....	32
Rys. 6.19. Widok z komory badawczej wypełnionej piaskiem do wysokości 1,50 m .....	33
Rys. 7.1. Rysunek poglądowy z rozmieszczonymi punktami pomiarowymi ( $T_1$ - $T_4$ i $N_1$ ) oraz z oznaczonymi siłami u podstawy i w głowicy pala .....	38
Rys. 7.2. Porównanie sił osiowych w palu $\varnothing 77$ mm o długości 700 mm w piasku o zagęszczeniu $I_D=0,55$ .....	41
Rys. 7.3. Porównanie sił osiowych w palu $\varnothing 77$ mm o długości 1000 mm w piasku o zagęszczeniu $I_D=0,60$ .....	42
Rys. 7.4. Pal z siłami w trzonie oraz z naprężeniami na poboczniczy .....	42
Rys. 7.5. Rozkład naprężeń na poboczniczy pala .....	43
Rys. 7.6. Rozkład naprężeń na poboczniczy pala o długości 700 mm z płytą przykrywającą $\varnothing 200$ mm dla $s_2 = 1,14$ mm.....	44

Rys. 7.7. Rozkład naprężeń na pobocznicy pala o długości 700 mm i dla $N_2^* = 5,00$ kN .....	46
Rys. 7.8. Założony mechanizm strefy uplastycznienia gruntu .....	47
Rys. 7.9. Schemat obrazujący przekazywanie obciążeń do gruntu .....	53
Rys. 7.10. Modele uplastycznienia gruntu pod podstawą pala (źródło [41]) .....	55
Rys. 8.1. Schemat modelu PFPP.....	58
Rys. 8.2. Schemat obliczeniowy.....	61
Rys. 8.3. Przykład obliczeniowy – rysunek poglądowy .....	62
Rys. 8.4. Rysunek schematyczny – rozkład sił i naprężeń .....	64
Rys. 8.5. Sister bars: a) schemat (źródło [56]), b) zdjęcie kosza zbrojeniowego z Sister bars (źródło Firma Ed. Züblin AG / Zentrale Technik TBT-Berlin).....	67
Rys. 8.6. Schemat dla poduszek pomiarowych firmy Glötzl (źródło [57]) .....	68
Rys. 14.1. Rozkład sił w palu o długości 700 mm z płytą przykrywającą $\varnothing 200$ mm dla $s_2 = 0,22$ mm ..	94
Rys. 14.2. Rozkład naprężeń w palu o długości 700 mm z płytą przykrywającą $\varnothing 200$ mm dla $s_2 = 0,22$ mm.....	94
Rys. 14.3. Rozkład sił w palu o długości 700 mm z płytą przykrywającą $\varnothing 200$ mm dla $s_2 = 0,49$ mm ..	95
Rys. 14.4. Rozkład naprężeń w palu o długości 700 mm z płytą przykrywającą $\varnothing 200$ mm dla $s_2 = 0,49$ mm.....	95
Rys. 14.5. Rozkład sił w palu o długości 700 mm z płytą przykrywającą $\varnothing 200$ mm dla $s_2 = 0,74$ mm ..	96
Rys. 14.6. Rozkład naprężeń w palu o długości 700 mm z płytą przykrywającą $\varnothing 200$ mm dla $s_2 = 0,74$ mm.....	96
Rys. 14.7. Rozkład sił w palu o długości 700 mm z płytą przykrywającą $\varnothing 200$ mm dla $s_2 = 0,92$ mm ..	97
Rys. 14.8. Rozkład naprężeń w palu o długości 700 mm z płytą przykrywającą $\varnothing 200$ mm dla $s_2 = 0,92$ mm.....	97
Rys. 14.9. Rozkład sił w palu o długości 700 mm z płytą przykrywającą $\varnothing 200$ mm dla $s_2 = 1,14$ mm ..	98
Rys. 14.10. Rozkład naprężeń w palu o długości 700 mm z płytą przykrywającą $\varnothing 200$ mm dla $s_2 = 1,14$ mm.....	98
Rys. 14.11. Rozkład sił w palu o długości 1000 mm z płytą przykrywającą $\varnothing 200$ mm dla $s_2 = 0,19$ mm.....	99
Rys. 14.12. Rozkład naprężeń w palu o długości 1000 mm z płytą przykrywającą $\varnothing 200$ mm dla $s_2 = 0,19$ mm.....	99
Rys. 14.13. Rozkład sił w palu o długości 1000 mm z płytą przykrywającą $\varnothing 200$ mm dla $s_2 = 0,45$ mm.....	100
Rys. 14.14. Rozkład naprężeń w palu o długości 1000 mm z płytą przykrywającą $\varnothing 200$ mm dla $s_2 = 0,45$ mm.....	100
Rys. 14.15. Rozkład sił w palu o długości 1000 mm z płytą przykrywającą $\varnothing 200$ mm dla $s_2 = 0,65$ mm.....	101
Rys. 14.16. Rozkład naprężeń w palu o długości 1000 mm z płytą przykrywającą $\varnothing 200$ mm dla $s_2 = 0,65$ mm.....	101
Rys. 14.17. Rozkład sił w palu o długości 1000 mm z płytą przykrywającą $\varnothing 200$ mm dla $s_2 = 0,83$ mm.....	102
Rys. 14.18. Rozkład naprężeń w palu o długości 1000 mm z płytą przykrywającą $\varnothing 200$ mm dla $s_2 = 0,83$ mm.....	102
Rys. 14.19. Rozkład sił w palu o długości 1000 mm z płytą przykrywającą $\varnothing 200$ mm dla $s_2 = 1,03$ mm.....	103
Rys. 14.20. Rozkład naprężeń w palu o długości 1000 mm z płytą przykrywającą $\varnothing 200$ mm dla $s_2 = 1,03$ mm.....	103
Rys. 14.21. Rozkład sił w palu o długości 700 mm z płytą przykrywającą $\varnothing 250$ mm dla $s_2 = 0,18$ mm.....	104



Rys. 14.22. Rozkład naprężeń w palu o długości 700 mm z płytą przykrywającą $\varnothing 250$ mm dla $s_2 = 0,18$ mm.....	104
Rys. 14.23. Rozkład sił w palu o długości 700 mm z płytą przykrywającą $\varnothing 250$ mm dla $s_2 = 0,42$ mm.....	105
Rys. 14.24. Rozkład naprężeń w palu o długości 700 mm z płytą przykrywającą $\varnothing 250$ mm dla $s_2 = 0,42$ mm.....	105
Rys. 14.25. Rozkład sił w palu o długości 700 mm z płytą przykrywającą $\varnothing 250$ mm dla $s_2 = 0,62$ mm.....	106
Rys. 14.26. Rozkład naprężeń w palu o długości 700 mm z płytą przykrywającą $\varnothing 250$ mm dla $s_2 = 0,62$ mm.....	106
Rys. 14.27. Rozkład sił w palu o długości 700 mm z płytą przykrywającą $\varnothing 250$ mm dla $s_2 = 0,85$ mm.....	107
Rys. 14.28. Rozkład naprężeń w palu o długości 700 mm z płytą przykrywającą $\varnothing 250$ mm dla $s_2 = 0,85$ mm.....	107
Rys. 14.29. Rozkład sił w palu o długości 700 mm z płytą przykrywającą $\varnothing 250$ mm dla $s_2 = 1,05$ mm.....	108
Rys. 14.30. Rozkład naprężeń w palu o długości 700 mm z płytą przykrywającą $\varnothing 250$ mm dla $s_2 = 1,05$ mm.....	108
Rys. 14.31. Rozkład sił w palu o długości 1000 mm z płytą przykrywającą $\varnothing 250$ mm dla $s_2 = 0,15$ mm.....	109
Rys. 14.32. Rozkład naprężeń w palu o długości 1000 mm z płytą przykrywającą $\varnothing 250$ mm dla $s_2 = 0,15$ mm.....	109
Rys. 14.33. Rozkład sił w palu o długości 1000 mm z płytą przykrywającą $\varnothing 250$ mm dla $s_2 = 0,32$ mm.....	110
Rys. 14.34. Rozkład naprężeń w palu o długości 1000 mm z płytą przykrywającą $\varnothing 250$ mm dla $s_2 = 0,32$ mm.....	110
Rys. 14.35. Rozkład sił w palu o długości 1000 mm z płytą przykrywającą $\varnothing 250$ mm dla $s_2 = 0,55$ mm.....	111
Rys. 14.36. Rozkład naprężeń w palu o długości 1000 mm z płytą przykrywającą $\varnothing 250$ mm dla $s_2 = 0,55$ mm.....	111
Rys. 14.37. Rozkład sił w palu o długości 1000 mm z płytą przykrywającą $\varnothing 250$ mm dla $s_2 = 0,76$ mm.....	112
Rys. 14.38. Rozkład naprężeń w palu o długości 1000 mm z płytą przykrywającą $\varnothing 250$ mm dla $s_2 = 0,76$ mm.....	112
Rys. 14.39. Rozkład sił w palu o długości 1000 mm z płytą przykrywającą $\varnothing 250$ mm dla $s_2 = 0,95$ mm.....	113
Rys. 14.40. Rozkład naprężeń w palu o długości 1000 mm z płytą przykrywającą $\varnothing 250$ mm dla $s_2 = 0,95$ mm.....	113

### 13. SPIS TABEL

Tabela 3.1. Metody obliczeniowe konstrukcji FPP .....	8
Tabela 7.1. Wyniki próbnych obciążeń PFPP o parametrach: $l=1000$ mm, płyta przykrywająca $\varnothing 250$ mm oraz $I_D=0,55$ .....	36
Tabela 7.2. Wyniki próbnych obciążeń PFPP o parametrach: $l=700$ mm, płyta przykrywająca $\varnothing 250$ mm oraz $I_D=0,60$ .....	36
Tabela 7.3. Wyniki próbnych obciążeń PFPP o parametrach: $l=1000$ mm, płyta przykrywająca $\varnothing 200$ mm oraz $I_D=0,55$ .....	36
Tabela 7.4. Wyniki próbnych obciążeń PFPP o parametrach: $l=700$ mm, płyta przykrywająca $\varnothing 200$ mm oraz $I_D=0,60$ .....	37
Tabela 7.5. Wyniki próbnych obciążeń FP o parametrach: $l=1000$ mm oraz $I_D=0,55$ .....	37
Tabela 7.6. Wyniki próbnych obciążeń FP o parametrach: $l=700$ mm oraz $I_D=0,60$ .....	37
Tabela 7.7. Tarcie na pobocznicy pała o średnicy $\varnothing 77$ mm i długości 700mm: a) z płytą przykrywającą o średnicy $\varnothing 250$ mm, b) bez płyty przykrywającej .....	39
Tabela 7.8. Tarcie na pobocznicy pała o średnicy $\varnothing 77$ mm i długości 700mm: a) z płytą przykrywającą o średnicy $\varnothing 200$ mm, b) bez płyty przykrywającej .....	39
Tabela 7.9. Tarcie na pobocznicy pała o średnicy $\varnothing 77$ mm i długości 1000mm: a) z płytą przykrywającą o średnicy $\varnothing 250$ mm, b) bez płyty przykrywającej .....	40
Tabela 7.10. Tarcie na pobocznicy pała o średnicy $\varnothing 77$ mm i długości 1000mm: a) z płytą przykrywającą o średnicy $\varnothing 200$ mm, b) bez płyty przykrywającej .....	40
Tabela 7.11. Naprężenia pod płytą przykrywającą $\sigma_2$ oraz naprężenia na pobocznicy $\tau_2$ .....	52
Tabela 8.1. Wyniki dla przykładu obliczeniowego .....	65
Tabela 14.1. Wyniki pomiarów dla modelu PFPP .....	114
Tabela 14.2. Obliczenia dla modelu PFPP .....	115

## 14. ZAŁĄCZNIKI

Załącznik A – Siłownik Enerpac RAC 306 .....	81
Załącznik B – Czujnik ZEPWN CL20 .....	83
Załącznik C – Tensometry TENMEX TF-5/120.....	85
Załącznik D – Rejestrator ZEPWN CL460.....	86
Załącznik E – Świadectwo Badania Ścierniwa Suszonego.....	91
Załącznik F - Wyniki do rozdziału 7.3.3. ....	94
Załącznik G - Pomiary i obliczenia dla modelu PFPP.....	114

**Załącznik A – Siłownik Enerpac RAC-306**

**RAC-Series, Aluminium Cylinders**



▼ Shown from left to right: RAC-5010, RAC-15010, RAC-304, RAC-208



**Lightweight for Maximum Portability**



**Saddles**  
All RAC-cylinders are equipped with bolt-on removable hardened steel saddles. For Tilt Saddles see next page.

Page: 13



**Lightweight Hand Pumps**  
The Enerpac composite lightweight hand pumps P-392 or P-802 make the optimal lightweight set.

Page: 74

- Composite bearings prevent metal-to-metal contact, increasing cylinder life and resistance to side-loads of up to 10%
- Hard-Coat finish on all surfaces resists damage and extends cylinder life
- Handles included on all 30 - 150 ton models
- For protection against load-induced damage a saddle is standard on all models
- Steel base plate is standard on RAC 20 ton models and above. The steel base plate is optional only on RAC10 and 15 ton models
- Integral stop ring prevents plunger over-travel and is capable of withstanding the full cylinder capacity
- High strength return spring for rapid cylinder retraction
- CR-400 coupler and dustcap included on all models
- All cylinders meet ASME B-30.1 standard.

Cylinder Capacity at 700 bar ton (kN)	Stroke (mm)	Model Number	Cylinder Effective Area (cm <sup>2</sup> )
10 (88)	50	RAC-102	12,6
	100	RAC-104	12,6
	150	RAC-106	12,6
15 (137)	50	RAC-152	19,6
	100	RAC-154	19,6
	150	RAC-156	19,6
20 (218)	50	RAC-202	31,2
	100	RAC-204	31,2
	150	RAC-206	31,2
	200	RAC-208	31,2
	250	RAC-2010	31,2
30 (309)	50	RAC-302	44,2
	100	RAC-304	44,2
	150	RAC-306	44,2
	200	RAC-308	44,2
	250	RAC-3010	44,2
50 (496)	50	RAC-502	70,9
	100	RAC-504	70,9
	150	RAC-506	70,9
	200	RAC-508	70,9
	250	RAC-5010	70,9
100 (1002)	50	RAC-1002	143,1
	100	RAC-1004	143,1
	150	RAC-1006	143,1
	200	RAC-1008	143,1
	250	RAC-10010	143,1
150 (1589)	50	RAC-1502	227,0
	100	RAC-1504	227,0
	150	RAC-1506	227,0
	200	RAC-1508	227,0
	250	RAC-15010	227,0

Wybrany siłownik



◀ The unique Enerpac RA-Series cylinders – lightweight and made of aluminium alloy – these RAC-506 cylinders are ideal for the positioning of tunnel elements under the river (High Speed Train Line, The Netherlands).

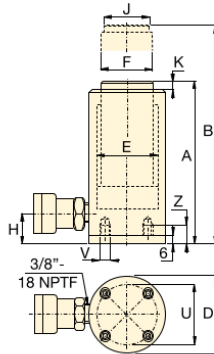
## Single-Acting, Aluminium Cylinders

Optional Bolt-on Tilt Saddle Dimensions (mm)			
For Cylinder Model / Capacity ton	Tilt Saddle * Model Number	Tilt Saddle Diameter J1	Saddle Protrusion from Plunger K1
RAC-50	CATG-50	50	24
RAC-100	CATG-150	91	31
RAC-150	CATG-200	118	35

\* Tilt saddles not available for less than 50 ton.

Optional Steel Base Plate	
For Cylinder Model / Capacity ton	Base Plate <sup>2)</sup> Model Number
RAC-10	JBA-10
RAC-15	JBA-15

<sup>2)</sup> Base Plate Height of 6 mm and four (4) base plate bolts.  
Base Plate included on all 20 - 150 ton cylinder models. Base Plate is optional on 10 - 15 ton cylinders.



### RAC Series



Capacity:

**10 - 150 ton**

Stroke:

**50 - 250 mm**

Maximum Operating Pressure:

**700 bar**



#### Steel Base Plate

The steel base plate protects the cylinder from damage, it should not be removed. See warning on page 11.

Oil Capacity (cm <sup>3</sup> )	Collapsed Height A (mm)	Extended Height B (mm)	Outside Diameter D (mm)	Cylinder Bore Diameter E (mm)	Plunger Diameter F (mm)	Bottom to Advance Port H (mm)	Saddle Diameter J (mm)	Saddle Protrusion from Plunger K (mm)	Bolt Circle U (mm)	Thread V (mm)	Thread Depth Z (mm)	Weight (kg)	Model Number
60	154	201	58	40	32	23	24	3	39	M6	12	1,3	RAC-102
130	204	304	58	40	32	23	24	3	39	M6	12	1,7	RAC-104
190	254	404	58	40	32	23	24	3	39	M6	12	2,0	RAC-106
100	161	211	70	50	40	23	29	3	48	M6	12	1,9	RAC-152
200	211	311	70	50	40	23	29	3	48	M6	12	2,4	RAC-154
290	261	411	70	50	40	23	29	3	48	M6	12	2,9	RAC-156
156	174	224	85	63	50	27	40	3	70	M6	12	3,6	RAC-202
312	224	324	85	63	50	27	40	3	70	M6	12	4,1	RAC-204
468	274	424	85	63	50	27	40	3	70	M6	12	4,6	RAC-206
624	324	524	85	63	50	27	40	3	70	M6	12	5,1	RAC-208
780	374	624	85	63	50	27	40	3	70	M6	12	5,6	RAC-2010
221	181	231	100	75	60	32	40	3	80	M6	12	4,5	RAC-302
442	231	331	100	75	60	32	40	3	80	M6	12	5,2	RAC-304
663	281	431	100	75	60	32	40	3	80	M6	12	5,9	RAC-306
884	331	531	100	75	60	32	40	3	80	M6	12	6,6	RAC-308
1105	381	631	100	75	60	32	40	3	80	M6	12	7,3	RAC-3010
354	186	236	130	95	80	30	50	3	110	M6	12	8,5	RAC-502
709	236	336	130	95	80	30	50	3	110	M6	12	9,8	RAC-504
1063	286	436	130	95	80	30	50	3	110	M6	12	11,1	RAC-506
1417	336	536	130	95	80	30	50	3	110	M6	12	12,4	RAC-508
1771	386	636	130	95	80	30	50	3	110	M6	12	13,7	RAC-5010
715	221	271	180	135	110	46	94	3	150	M10	12	17,3	RAC-1002
1431	271	371	180	135	110	46	94	3	150	M10	12	19,6	RAC-1004
2147	321	471	180	135	110	46	94	3	150	M10	12	21,9	RAC-1006
2863	371	571	180	135	110	46	94	3	150	M10	12	24,2	RAC-1008
3578	421	671	180	135	110	46	94	3	150	M10	12	26,5	RAC-10010
1135	243	293	230	170	140	51	113	3	200	M10	12	25,3	RAC-1502
2270	293	393	230	170	140	51	113	3	200	M10	12	29,3	RAC-1504
3405	343	493	230	170	140	51	113	3	200	M10	12	33,3	RAC-1506
4540	393	593	230	170	140	51	113	3	200	M10	12	37,3	RAC-1508
5675	443	693	230	170	140	51	113	3	200	M10	12	41,3	RAC-15010

Wybrany siłownik RAC-306

## Załącznik B – Czujnik ZEPWN CL20

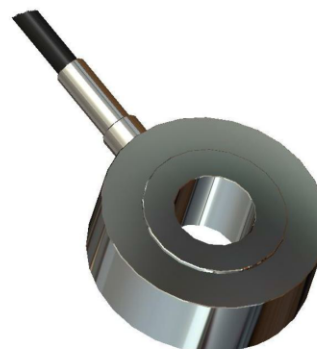
**ZEPWN**

Zakład Elektroniki Pomiarowej Wielkości Nielektrycznych

**CL 20**

### Czujnik CL20 do pomiaru sił wywieranych przez śruby

- Pomiar sił ściskających
- Dla sił statycznych i dynamicznych
- Dla śrub o średnicy od M8 do M20
- Duża niezawodność i powtarzalność
- Kompatybilny w stosunku do urządzeń pomiarowych uznanych firm
- Trzy lata gwarancji oraz serwis pogwarancyjny
- Spełnia dyrektywy Unii Europejskiej



Czujniki typoszeregu CL20 przeznaczone są do pomiaru sił nacisku wywieranych przez dokręcane śruby o średnicach od M8 do M20 odpowiednio w zakresie od 25kN do 250kN.

Zakresy pomiarowe stosownie do średnicy śruby	według tabeli
Przebieżalność	50%
Czułość	1,5 mV/V
Odchyłka czułości	10%
Zasilanie	10V
Rezystancja wejściowa	700Ω
Rezystancja wyjściowa	700Ω
Rezystancja izolacji	< 40GΩ
Nieliniowość odniesiona do zakresu nominalnego*	< 1%
Zakres temperatur roboczych (ztr)	253K do 353K
Zakres temperatur kompensacji (ztk)	293K do 363K
Temperaturowy współczynnik rozrównoważenia dla ztk	< 0,1%/10K
Temperaturowy współczynnik czułości dla ztk	< 0,1%/10K
Długość kabla - <i>na życzenie</i>	1m standardowo
Wymiary	według tabeli
Materiał	stal nierdzewna

\* F = 100% siły nominalnej i z zachowaniem zaleceń montażu (rys. 2).

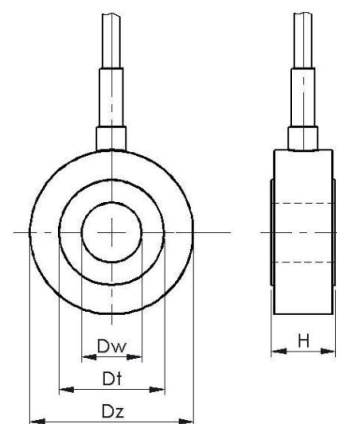
Dla  $D_w \leq 10$  mm tak określona nieliniowość może osiągnąć wartość powyżej 2%.

## Czujnik CL 20 do pomiaru sił wywieranych przez śruby

### Wymiary i odpowiadające im zakresy sił

Typ	Zakres	Dw	Dt	Dz	H
	kN	mm	mm	mm	mm
CL20-8	25	8,1	14	26	10
CL20-10	50	10,1	19	31	11
CL20-12	75	12,1	23	35	12
CL20-14*	10	14,1	16,5	28	11
CL20-14	100	14,1	27	39	13
CL20-16	150	16,1	32	44	14
CL20-18	200	18,1	37	49	15
CL20-20	240	20,1	40,5	52,5	16

\*Wykonywane w wersji 1mV/V



Rys.1. Rysunek czujnika

### Oznaczenie kodowe

**CL20-10-1-R1.5-10-O1-3-P**

Wymiar śruby: 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20mm

Nieliniowość: <1%

Czułość: R1,5

Napięcie zasilania: 10V

Wyprowadzenie: kabel z odciążką

Długość przewodu: m

Podkładka: P

1,5mV/V

10V

O1

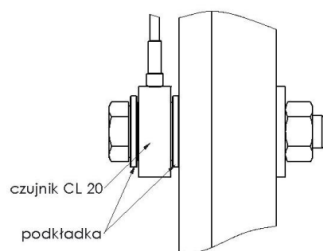
m

P

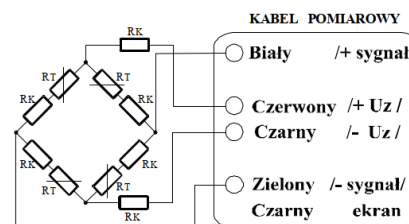
### Przykład zamawiania: CL20-10-1-R1,5-10-O1-3-P

czujnik zgodny z rysunkiem, dla śruby M10, błąd sumaryczny 1%, czułość 1,5mV/V, zasilanie 10Vdc, wyprowadzenie kabel z odciążką, długość przewodu 3m, z podkładką\*

\* podkładka może być wykonana samodzielnie przez Klienta na podstawie dokumentacji dostarczonej przez ZEPWN lub wykonana odpłatnie przez ZEPWN w ramach zamówienia.



Rys.2. Sposób montażu

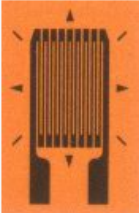


Rys.3. Oznaczenia i kolorystyka wyprowadzenia przewodów

### Producent i dystrybutor

ZEPWN J.Czerwiński i Wspólnicy spółka jawna, 05-270 Marki, ul. Kołtątaja 8  
tel./fax: (022) 7812169, 7712411, e-mail: [zepwn@zepwn.com.pl](mailto:zepwn@zepwn.com.pl), <http://www.zepwn.com.pl>

### Załącznik C – Tensometry TENMEX TF-5/120

Typ:		Tensometr	
TF-5/120		Rezystancja:	120±0.2% Ω
		Szerokość:	4.5 mm
		Długość:	8.2 mm
		Grubość:	60 μm
		Max. natężenie prądu pomiarowego:	50 mA
		Skrajne temperatury użytkowania:	- 40 ÷ +200 °C
		Wytrzymałość zmęczeniowa:	n>10 <sup>7</sup> dla ε = 1 ‰
		Odształcenie max.:	ok. 4%
		Współczynnik czułości odkształceniowej k:	2.1-2.2
		Tolerancja współczynnika k:	0.5%
		Materiał:	Constantan
		Termiczny współczynnik zmiany rezystancji:	α = 0.04×10 <sup>-3</sup> /°C
		Grubość:	5 μm
		Długość czynna ścieżek:	5.0 mm
		Podkładka nośna	
		Materiał:	Modyfikowana żywica epoksydowo-fenolowa
		Szerokość:	7.2 mm
		Długość:	11.0 mm
		Grubość:	30 μm
<<	Charakterystyki	>>	
Cena netto PLN:		Oporność izolacji:	powyżej 100 MΩ
(P) 24,00		Wytrzymałość elektryczna:	powyżej 1 kV U <sub>zn</sub>
(K) 26,00			



## Załącznik D – Rejestrator ZEPWN CL460

ZEPWN<sup>®</sup>

Zakład Elektroniki Pomiarowej Wielkości Nielektrycznych

# CL 460

### Rejestrator wielokanałowy CL 460

- jednoczesna rejestracja pomiarów z wielu czujników tensometrycznych
- od 2 do 16 wejść tensometrycznych
- siedem banków parametrów czujników
- opcjonalnie 4 lub 8 wejść dwustanowych
- opcjonalnie 4 lub 8 wyjść przekaźnikowych
- łącze USB



### Zastosowanie

Rejestrator CL460 służy do jednoczesnego, precyzyjnego pomiaru i rejestracji wielkości fizycznych przetwarzanych na sygnały elektryczne za pomocą mostków tensometrycznych, w układzie pełnego mostka, półmostka lub ćwierćmostka lub przetworników z wyjściem prądowym (4+20 mA) w wielu kanałach. Do pomiarów tensometrami w układzie ćwierćmostka lub półmostka wymagane są adaptery, wbudowane we wtyczkach dla poszczególnych kanałów, dedykowane dla tensometrów o określonej rezystancji (typowo 120Ω lub 350Ω).

Wyniki pomiarów uwidaczniane są na wyświetlaczu OLED. Zarejestrowane przebiegi pamiętane są na wewnętrznej karcie pamięci typu SD. Rejestrator posiada łącze USB, pozwalające na przesłanie zarejestrowanych przebiegów do komputera. Dodatkowo rejestrator może być wyposażony w łącze RS485 obsługujące protokół MODBUS RTU. Opcjonalnie rejestrator CL460 może mieć cztery lub osiem wejść dwustanowych (reagujących na zwarcie do masy) oraz cztery lub osiem wyjść przekaźnikowych (z przekaźnikami elektronicznymi) o funkcjach definiowanych przez Użytkownika.

Pracą rejestratora steruje program, którego parametry mogą być modyfikowane również przez łącze USB. Parametry te są zapisywane w nieulotnej pamięci typu EEPROM – wyłączenie napięcia zasilania nie powoduje utraty tych danych.

Programowe procedury analizujące zmierzone wielkości pozwalają na uśrednianie pomiarów, korekcję nieliniowości czujników oraz sterowanie wyjściami przekaźnikowymi.

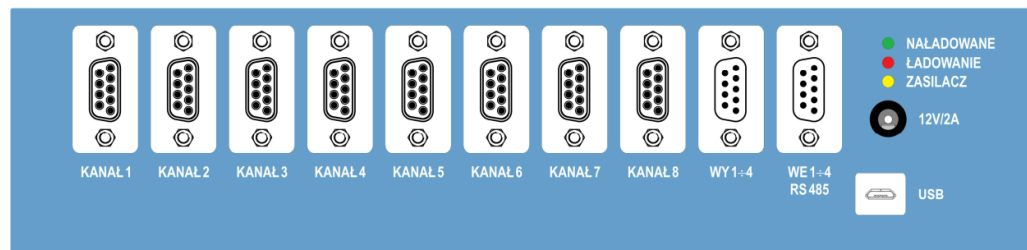
### Program CL460\_PARAM.EXE do komunikacji z rejestratorem CL460

Program CL460\_PARAM umożliwia zapamiętywanie parametrów rejestratorów CL460 w dowolnym podkatalogu na dysku komputera – pliki z parametrami mają rozszerzenie 460. Dodatkowo można parametry rejestratorów CL460 zapisywać w plikach tekstowych (rozszerzenie TXT). Parametry z dowolnego pliku (z rozszerzeniem 460) mogą być ponownie zapisane w rejestratorze CL460.

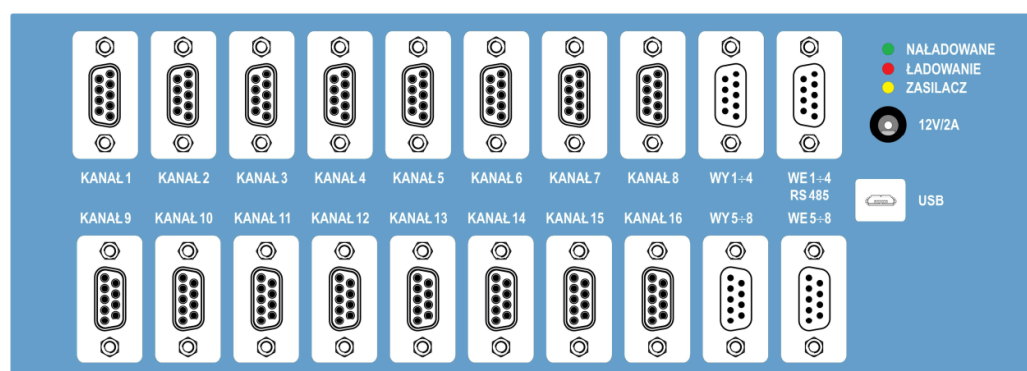
Program CL460\_PARAM zapisuje zarejestrowane przebiegi (odczytane z CL460) w plikach tekstowych (rozszerzenie TXT). Pliki te mogą być w łatwy sposób wczytywane do dowolnego arkusza kalkulacyjnego.

## Rejestrator CL 460

### Płyta tylna rejestratora CL 460



Wygląd płyty tylnej miernika w wersji zmniejszonej (od 2 do 8 kanałów)



Wygląd płyty tylnej miernika w wersji pełnej (od 9 do 16 kanałów)

### Parametry techniczne

Liczba wejść analogowych	od 2 do 16 (tensometryczne lub prąd 4÷20 mA)
Liczba banków pamięci parametrów	do 7
Zasilanie czujników tensometrycznych	5,0Vdc (±0,2V) maks. 50 mA lub 1mA <sub>dc</sub> (±2%)
Rezystancja czujników tensometrycznych	minimum 110Ω maksimum 4000Ω
Czułość czujników tensometrycznych	0,5÷92mV/V
Rezystancja tensometrów w układzie ćwierćmostka	minimum 110Ω, maksimum 4000Ω, typowo: 120Ω lub 350Ω do każdego kanału wymagany jest adapter ćwierćmostka (przeznaczony do współpracy z tensometrami o jednej wartości rezystancji)
Jednostka dla pomiarów w układzie ćwierćmostka	μm/m
Rozdzielczość pomiarów w układzie ćwierćmostka	1 μm/m
Rezystancja wejściowa kanału skonfigurowanego do pomiaru prądu	110÷160Ω
Zakres pomiaru prądu	2,5÷28 mA
Długość przewodów do czujników	< 30,0 metrów

### Rejestrator CL 460

Tryby pracy przetworników analogowo-cyfrowych	normalny lub z minimalizacją dryftu
Częstotliwość próbkowania	od 1,25 do 2400 próbek na sekundę (jednoczesny pomiar we wszystkich kanałach)
Czas ustalania wyniku dla nagłej zmiany sygnału mierzonego	4 próbki dla filtru sinc <sup>4</sup> i normalnego trybu pracy, 3 próbki dla filtru sinc <sup>3</sup> i normalnego trybu pracy, 2 próbki dla pracy z minimalizacją dryftu
Rozdzielczość przetworników analogowo-cyfrowych	24 bity
Rozdzielczość pomiaru	2000 działek dla czujnika o czułości 0,5mV/V i maksymalnej prędkości pomiaru 50000 działek dla czujnika o czułości 0,5mV/V i minimalnej prędkości pomiaru 4000 działek dla czujnika o czułości 1mV/V i maksymalnej prędkości pomiaru 100000 działek dla czujnika o czułości 1mV/V i minimalnej prędkości pomiaru 8000 działek dla czujnika o czułości 2mV/V (lub dla pomiaru prądu) i maksymalnej prędkości pomiaru 200000 działek dla czujnika o czułości 2mV/V (lub dla pomiaru prądu) i minimalnej prędkości pomiaru
Błąd pomiaru (dla 300K)	< 0,0025% (w stosunku do pełnej skali)
Błąd temperaturowy pomiaru	< 0,015%/10K (w stosunku do pełnej skali)
Błąd długoterminowy pomiaru	< 0,010%/1000h (w stosunku do pełnej skali)
Dodatkowe uśrednianie pomiaru (opcja)	od 2 do 32 próbek w przesuwającym się oknie czasowym
Korekcja nieliniowości czujnika (dla pełnego mostka tensometrycznego)	do 14 punktów
Jednostki wyświetlane	dowolne (maksymalnie 5 znaków) – wpisywane podczas wprowadzania parametrów miernika
Rozpoczęcie rejestracji pomiaru	natychmiastowe lub po przekroczeniu poziomu startu rejestracji w wybranych kanałach analogowych, lub zboczem na wybranych wejściach dwustanowych
Zakończenie rejestracji pomiaru	ręczne lub zboczem na wybranych wejściach dwustanowych
Zapis próbek do pamięci podczas rejestracji	ciągły z zadeklarowaną częstotliwością próbkowania albo krokiem zapisu lub zapis próbek do pamięci w momencie naciśnięcia klawisza PROG albo zewnętrznego przycisku
Czas aktualizacji wyświetlacza	0,2s
Tarowanie	0÷100% wartości nominalnej
Wyświetlacz	OLED, kolor żółty, 2 linie po 16 znaków alfanumerycznych
Wysokość znaków	8,9mm
Maksymalne wskazanie	±999999
Sygnalizacja akustyczna	brzęczyk
Pamięć rejestrowanych przebiegów	nieulotna (zabudowana karta SD)
Maksymalna liczba pamiętanych przebiegów (pomiarów)	1023

### Rejestrator CL 460

Maksymalna liczba pamiętanych próbek (limitowana pojemnością karty SD)	14531961 dla 16 kanałów 27449260 dla 8 kanałów 49408668 dla 4 kanałów
Wejścia dwustanowe ( <b>opcja</b> )	4 lub 8 szt. – podciągane do 3,3V przez R>10kΩ
Napięcie na rozwartym wejściu	3,3V
Prąd wejścia zwartego do masy	< 0,35mA
Napięcie stanu niskiego (zwarcia)	< 0,5V
Napięcie stanu wysokiego (rozwarcia)	> 2,0V
Wyjścia przekaźnikowe ( <b>opcja</b> )	4 lub 8 szt.
Typ wyjść przekaźnikowych	C-NO (elektroniczne)
Maksymalne napięcie na przekaźniku	50Vdc, 50VAC (amplituda)
Maksymalny prąd obciążenia	400mA
Rezystancja załączonego przekaźnika	< 2,5Ω
Upływność wyłączonego przekaźnika	< 1μA
Czas włączania przekaźnika	< 2,5ms
Czas wyłączenia przekaźnika	< 0,2ms
Typy komparacji	alarm górny, alarm dolny, alarm w przedziale, alarm poza przedziałem
Napięcie izolacji dla przekaźników	> 100VAC
Łącze do komputera	USB 2.0
Gniazdo	microUSB typu B
Prędkość odczytu zarejestrowanych przebiegów przez łącze USB	około 3MB/s
Dodatkowe łącze szeregowo ( <b>opcja</b> )	RS485 – protokół MODBUS RTU – slave
Prędkość transmisji	1200, 2400, 4800, 9600, 19200, 38400, 76800
Zegar czasu rzeczywistego	wbudowany z własnym podtrzymaniem
Zasilanie	wbudowany blok akumulatorów litowo-jonowych 8,4V/3Ah
Pobór prądu z akumulatorów	< 500 mA w stanie aktywnym (dla 16 kanałów z czujnikami 350Ω) < 300 mA w stanie aktywnym (dla 8 kanałów z czujnikami 350Ω) maks. 0,1 mA w stanie wyłączonym
Czas pracy między ładowaniami	> 5 h (dla 16 kanałów z czujnikami 350Ω) > 8 h (dla 8 kanałów z czujnikami 350Ω)
Czas ładowania akumulatorów	do 5 h
Zasilacz do ładowania akumulatorów	zewnętrzny stabilizowany 12V/min. 2A
Wymiary obudowy	wersja zmniejszona: 274mm × 72mm × 130mm (szer.xwys.xgłęb.) wersja pełna: 274mm × 102mm × 130mm (szer.xwys.xgłęb.)
Masa	wersja pełna: max. 3,42 kg wersja zmniejszona: max. 2,57 kg
Temperatura pracy	253K do 323K (-20°C do +50°C)
Wilgotność względna	20+80%
Stopień ochrony	IP40

## Rejestrator CL 460

---

### W skład wyposażenia fabrycznego wchodzi:

1. Rejestrator CL460	szt. 1
2. Kabel USB	szt. 1
3. Zasilacz 12V/2A do ładowania akumulatorów	szt. 1
4. Program CL460_PARAM.	szt. 1
5. Instrukcja obsługi rejestratora i programu CL460_PARAM.	szt. 1
6. Karta gwarancyjna	szt. 1

### Możliwości konfiguracji rejestratora CL460

W zależności od liczby kanałów oraz wejść i wyjść opcje wykonania rejestratora CL460 oznaczane są w następujący sposób:

#### CL460-Ka-Wb-Pc

gdzie:

**a** – liczba kanałów pomiarowych (od 2 do 16),

**b** – wejścia dwustanowe i RS485:

**0** – brak wejść dwustanowych i brak RS485 (domyślnie),

**4** – 4 wejścia dwustanowe i jeden RS485,

**8** – 8 wejść dwustanowych i jeden RS485.

**c** – wyjścia przekaźnikowe:

**0** – brak wyjść przekaźnikowych (domyślnie),

**4** – 4 wyjścia przekaźnikowe,

**8** – 8 wyjść przekaźnikowych.

Dla liczby kanałów powyżej ośmiu lub dla ośmiu wejść dwustanowych lub dla ośmiu wyjść przekaźnikowych rejestrator montowany jest w obudowie w wersji pełnej.

Istnieje możliwość dostosowania dowolnych kanałów pomiarowych do sygnałów prądowych 4+20 mA (rezystancja obciążenia 110Ω). W zamówieniu należy wyszczególnić numery kanałów, które mają współpracować z czujnikami z wyjściem prądowym 4+20 mA – należy również podać parametry do kalibracji tych kanałów (wartość wskazywaną dla 4 mA, wartość wskazywaną dla 20 mA oraz rozdzielczość). W przypadku zamawiania adapterów ćwierćmostka należy dla każdego adaptera podać rezystancję tensometrów, które będą dołączane do niego.

Na życzenie Odbiorcy CL460 może być dostosowany do pracy ciąglej z zasilaniem 230VAC. W takim przypadku w rejestratorze nie są montowane akumulatory, a zamiast zasilacza do ładowania akumulatorów dostarczany jest zewnętrzny stabilizowany zasilacz sieciowy (transformatorowy) o napięciu 7,5V i prądzie 1,4A.

### Producent i dystrybutor

ZEPWN J. Czerwiński i Wspólnicy – spółka jawna, 05-270 Marki, ul. Kołtątaja 8  
tel./fax: 22 7812169, 22 7712411, e-mail: [zepwn@zepwn.com.pl](mailto:zepwn@zepwn.com.pl), <http://www.zepwn.com.pl>

## Załącznik E – Świadectwo Badania Ścierniwa Suszonego



CORROSION EXPERTISES & SERVICES

### Dr inż. Jacek Bordziłowski

*Długoletni kierownik zespołu naukowego w Katedrze Technologii Zabezpieczeń Przeciwkorozyjnych Politechniki Gdańskiej, adiunkt w Zespole Antykorozji IBDiM Warszawa, rzeczoznawca SITPChem NOT, ekspert Forum Inżynierów Polskich, biegły sądowy*

Ekspertyzy, nadzory, badania i projektowanie w antykorozji metali i betonu

80-308 Gdańsk, ul. Jasia i Małgosi 7A, tel/ fax (058) 552-02-26, tel. kom. 0501 505 529

NIP: 584-102-26-98, Regon: 190366340, Email: jbordzilowski@wp.pl

## ŚWIADECTWO BADANIA ŚCIERNIWA SUSZONEGO

### 1. Granulacja: 0,4-0,8 mm

2. Zleceniodawca; Kruszywa Polskie S. A., Rybaki, ul. Wdzydzka 4, 83-406 Wąglkowice, zlecenie z 11.02. 2019 r.

### 3. Podstawy normowe:

1. Specyfikacja ścierniw niemetalicznych ISO 11126
2. Skład ziarnowy – PN-EN ISO 11127-2
3. Gęstość właściwa - PN-EN ISO 11127-3
4. Twardość w skali Mohs'a PN-EN ISO 11127-4
5. Zawartość wilgoci – PN-EN ISO 11127-5
6. Zanieczyszczenia rozpuszczalne w wodzie metodą przewodnictwo elektrolitycznego wodnego eluatu – PN-EN ISO 11127-6
7. Zawartość chlorków rozpuszczalnych w wodzie – PN-EN ISO 11127-7
8. Pobieranie próbek - PN-EN ISO 11125-1
9. Korozyjność w stosunku do metali - BN-66/2320-01
10. Substancje oleiste - metodą ekstrakcyjną z eterem naftowym
11. Odczyn pH - BN-72/0520-09
12. Części rozpuszczalne w HCl - BN-73/7011
13. Zanieczyszczenia organiczne - PN-78/B-06714/26
14. Straty prażenia - PN-76/B-06714/35
15. Analiza chemiczna ilościowa - PN-85/H-04154
16. Pyły mineralne - PN-76/B-06714/13
17. Badanie właściwości kruszyw. Analiza chemiczna. PN-EN 1744-1
18. Zawartość krzemionki PN-85/H-04154/03. Oznaczanie zawartości krzemionki (analityczna ilościowa metoda wagowa polegająca na odparowaniu krzemionki z kwasem fluorowodorowym).

### 4. Wyniki badań.

Wyniki badań właściwości próbek ścierniwa przedstawiono w tabelach 1-4.

Kruszywa Polskie S.A. Ścierniwo suszone 0,4+0,8 mm 2019



Tabela 1. Analiza granulometryczna próbki

Granulacja	Oczka sita, mm	Próbka 0,4-0,8 mm [%]	Wymaganie [%]
Pozostałość, %	3,15	0,0	0,00
Nadziarno, %	0,8	0,2	Max.10,00
Ziarno nominalne, %	0,4	99,1	Min. 85,00
Podziarno, %	0,4	0,6	Max.5,00

Tabela 2. Właściwości fizyko-chemiczne

Właściwość	Próbka 0,4-0,8 mm	Wymagania
Gęstość właściwa	2,61 kg/dcm <sup>3</sup>	Nie podano
Twardość w skali Mohsa	Powyżej 6	Powyżej 6
Zawartość wilgoci	0,011%	Nie więcej 0,2%
Zanieczyszczenia rozpuszczalne w wodzie met. konduktometryczną	6,2 mS/m	Nie więcej 25 mS/m
Chlorki rozpuszczalne w wodzie	0,001%	0,0025%
Substancje oleiste	Brak	Max 0,005%
Zanieczyszczenia organiczne	Brak	Brak
pH	6,8	6,2-7,5
Części rozpuszczalne w HCl	4,24%	Max 7%
Straty prażenia	2,11%	3,5%
Pyły mineralne	Poniżej 0,1%	Max. 0,5%



Kruszywa Polskie S.A. Ścierniwo suszone 0,4+0,8 mm 2019

Tabela 3. Wyniki oznaczenia zawartości krzemionki

Granulacja	Zawartość krzemionki
0,4-0,8 mm	91,5 %

Tabela 4. Korozyjność w stosunku do metali

Metal	Próbka 0,4-0,8	Wymaganie
Stal	Brak	Brak
Cynk	Brak	Brak
Aluminium	Brak	Brak
Miedź	Brak	Brak

Skład granulometryczny i chemiczny oraz właściwości fizyko-chemiczne badanych próbek w pełni odpowiadają wymaganiom stawianym ścierniom niemetalicznym zgodnie z ISO 11126, ISO 11127 oraz są zgodne z wymaganiami stawianymi w Rozporządzeniu Ministra Gospodarki, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 14 stycznia 2004 r (Dziennik Ustaw Nr 16 poz. 156 z 2004 r.), str. 747, Rozdział 2 pt. Czyszczenie powierzchni metodami strumieniowo-ściernymi, pod warunkiem używania ścierniwa w postaci mokrej lub w mieszaninie z wodą.

Badane próbki nie wykazują korozyjności w stosunku do badanych, podstawowych metali konstrukcyjnych (stali, cynku, aluminium i miedzi).

Niniejsze ścierniwo nadaje się do obróbki aluminium.

Zawartość margla wyliczona z części rozpuszczalnych w HCl wynosi 4,24% wagowego

Niniejsza ocena jest ważna w okresie roku od daty wystawienia.

Gdańsk, dnia 22.02.2019 r.

Opracował:

RZECZOZNAWCA leg. Nr 576  
dr inż. Jacek Bordziłowski  
Zespolu Rzeczoznawców  
przy Zarządzie Głównym Stowarzyszenia  
Inżynierów i Techników Przemysłu Chemicznego

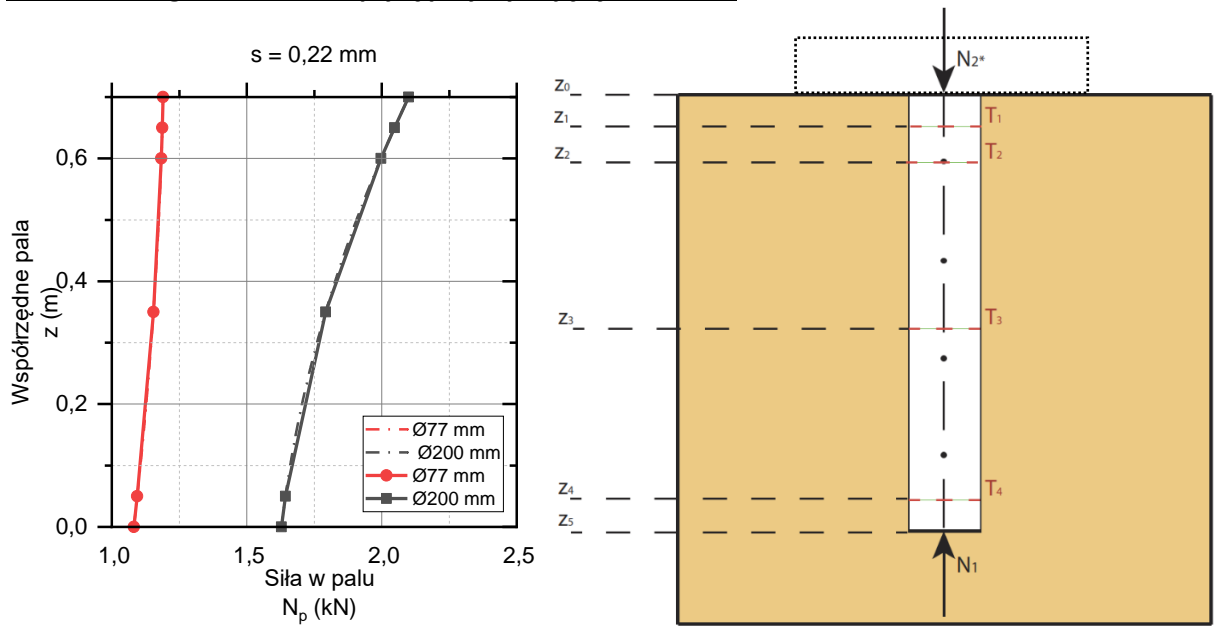


Dr inż. Jacek Bordziłowski

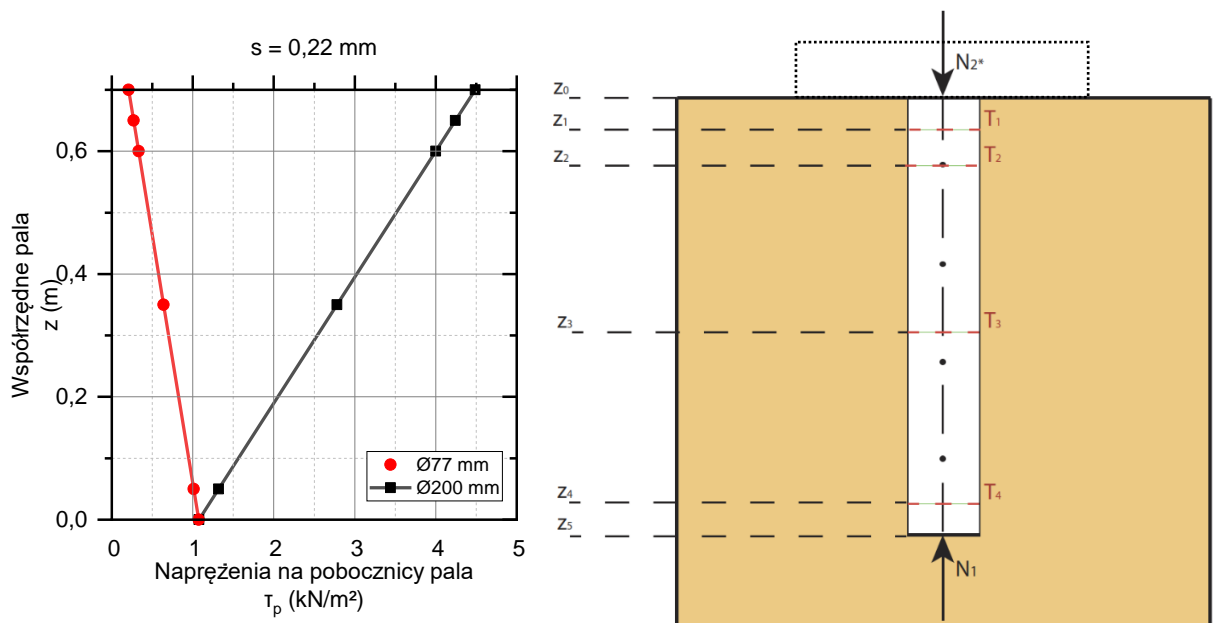


**Załącznik F – Wyniki do rozdziału 7.3.3.**

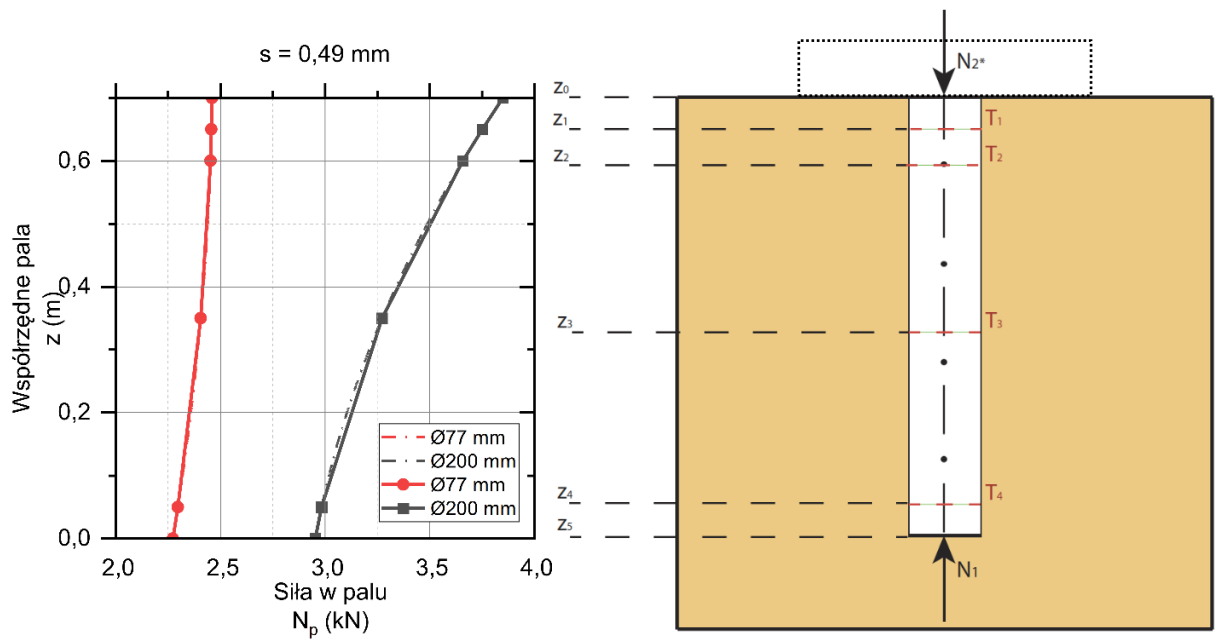
**Pał Ø77 o długości 700 mm z płytą przykrywającą Ø200 mm.**



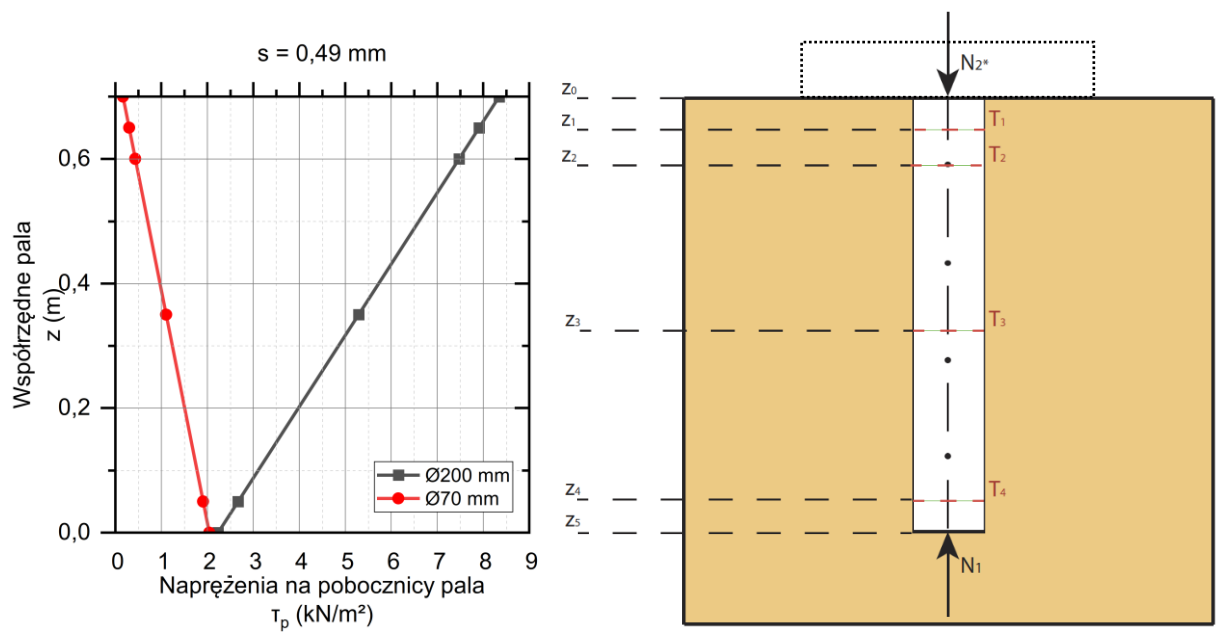
**Rys. 14.1. Rozkład sił w pału o długości 700 mm z płytą przykrywającą Ø200 mm dla  $s_2 = 0,22 \text{ mm}$**



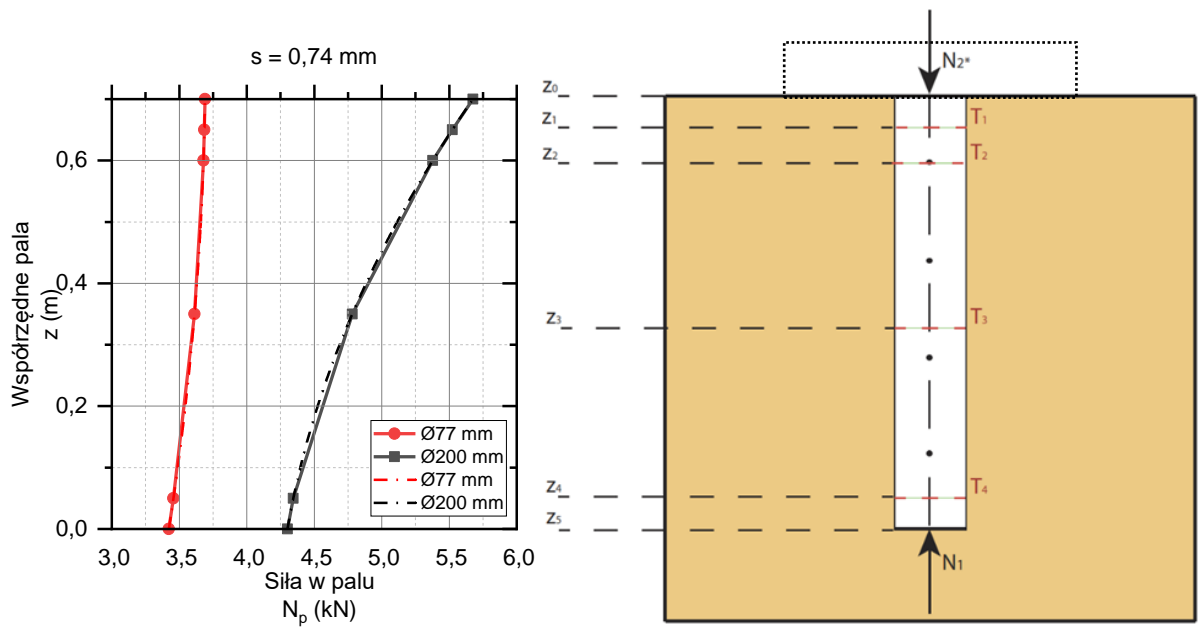
**Rys. 14.2. Rozkład naprężeń w pału o długości 700 mm z płytą przykrywającą Ø200 mm dla  $s_2 = 0,22 \text{ mm}$**



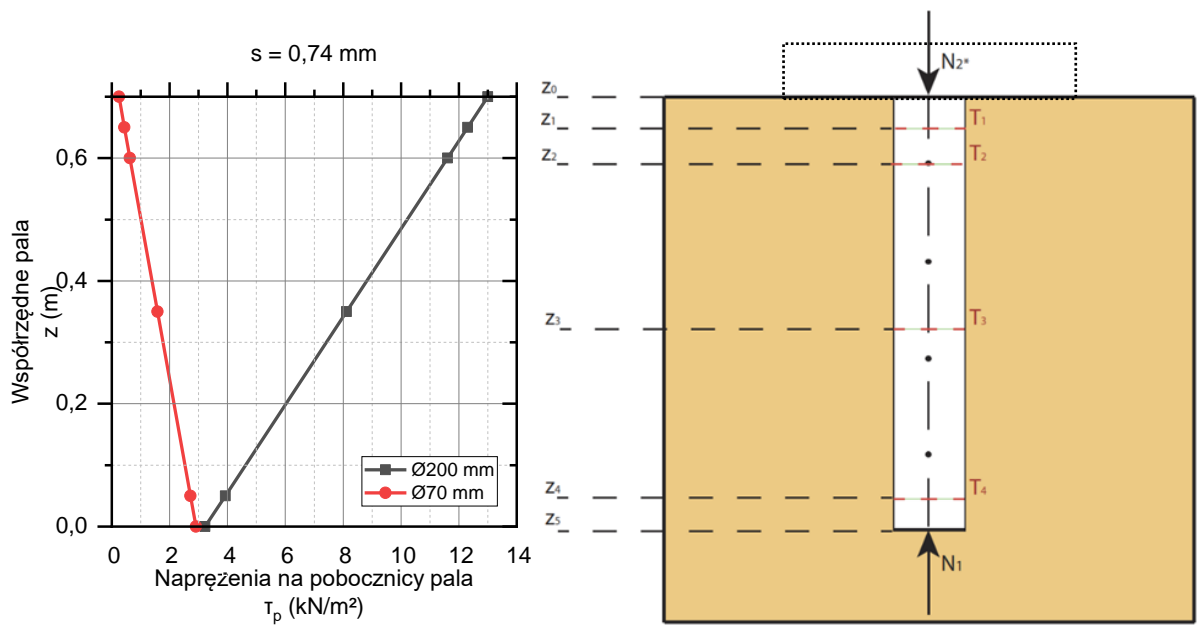
Rys. 14.3. Rozkład sił w palu o długości 700 mm z płytą przykrywającą Ø200 mm dla  $s_2 = 0,49$  mm



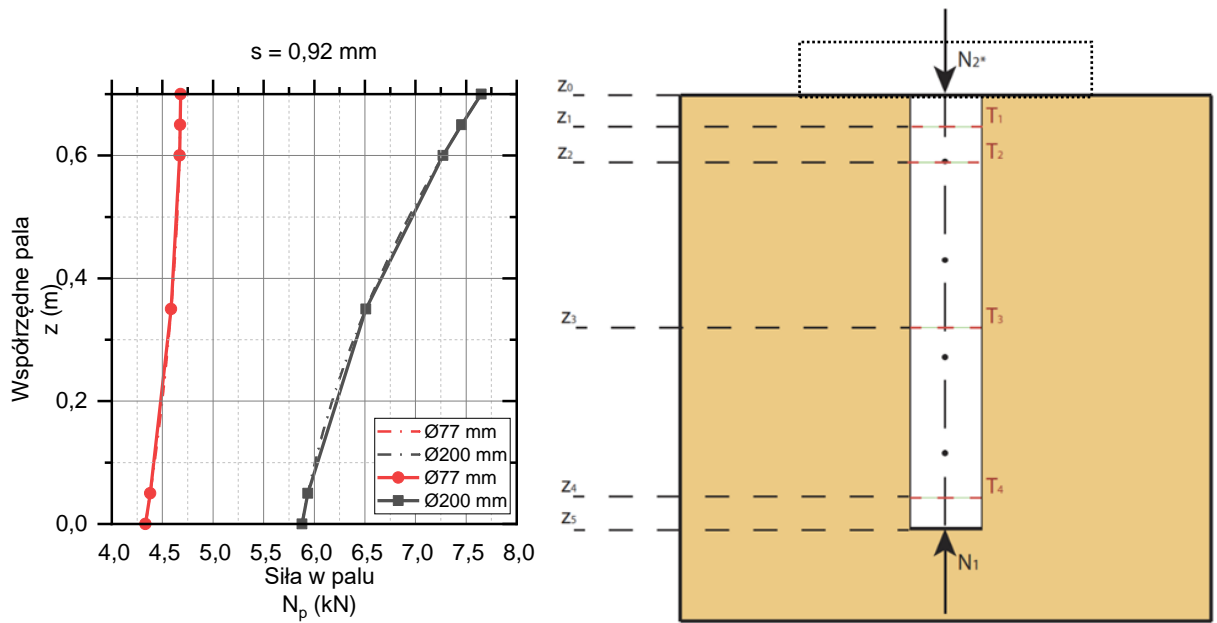
Rys. 14.4. Rozkład naprężeń w palu o długości 700 mm z płytą przykrywającą Ø200 mm dla  $s_2 = 0,49$  mm



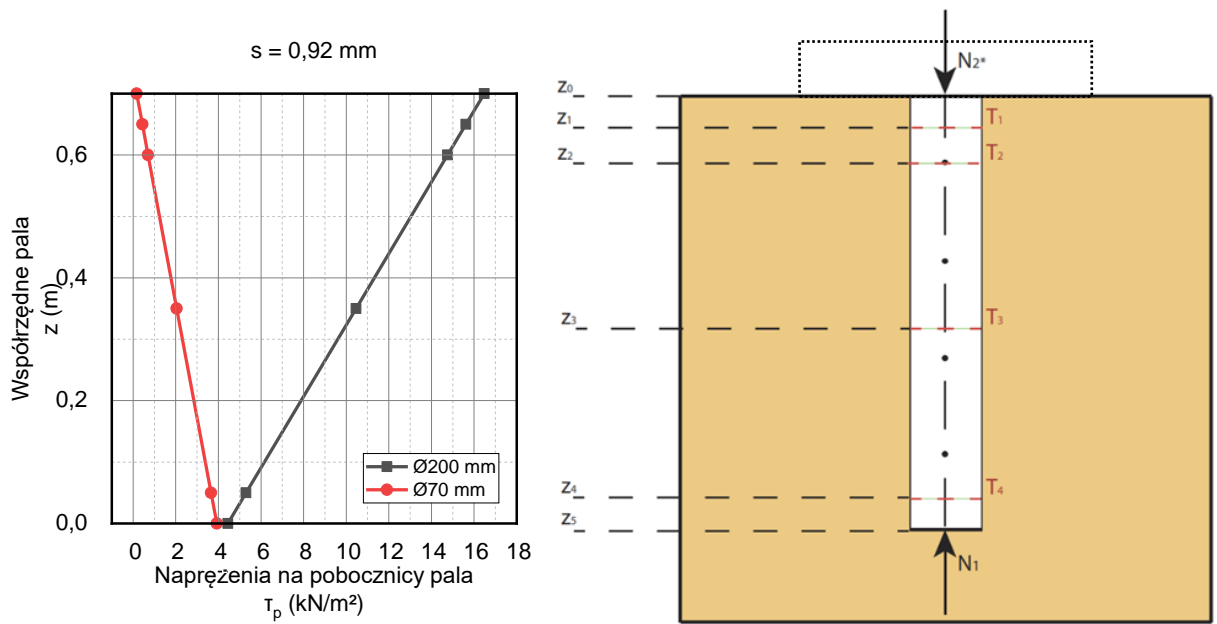
Rys. 14.5. Rozkład sił w palu o długości 700 mm z płytą przykrywającą  $\varnothing 200$  mm dla  $s_2 = 0,74$  mm



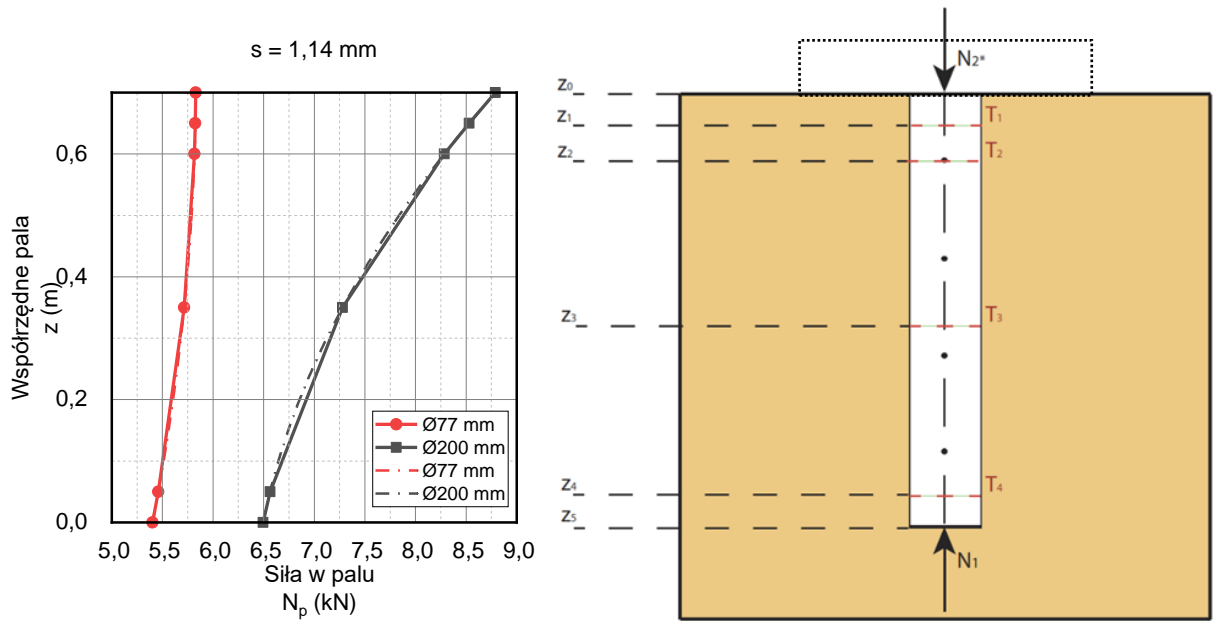
Rys. 14.6. Rozkład naprężeń w palu o długości 700 mm z płytą przykrywającą  $\varnothing 200$  mm dla  $s_2 = 0,74$  mm



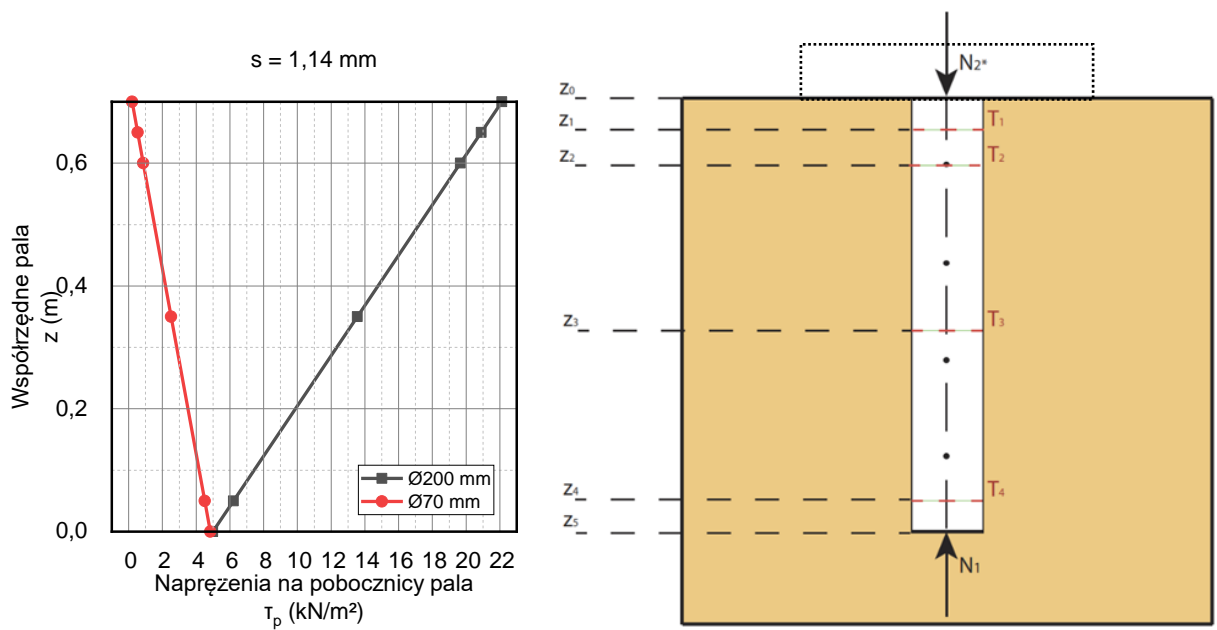
Rys. 14.7. Rozkład sił w palu o długości 700 mm z płytą przykrywającą  $\varnothing 200$  mm dla  $s_2 = 0,92$  mm



Rys. 14.8. Rozkład naprężeń w palu o długości 700 mm z płytą przykrywającą  $\varnothing 200$  mm dla  $s_2 = 0,92$  mm

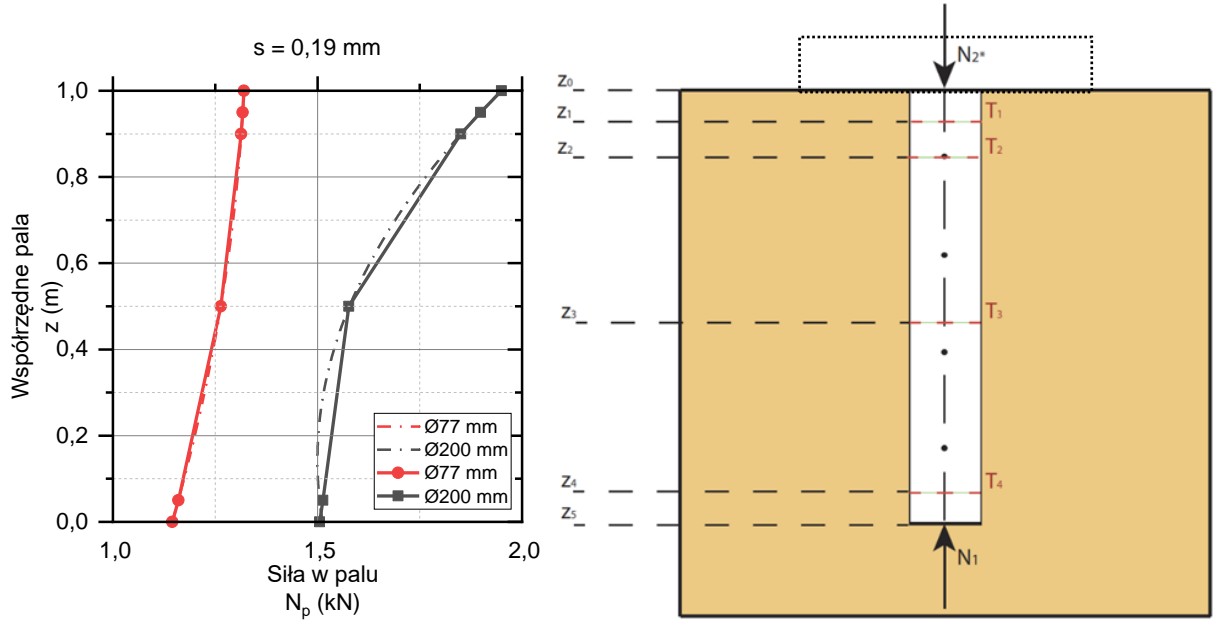


Rys. 14.9. Rozkład sił w palu o długości 700 mm z płytą przykrywającą  $\varnothing 200 \text{ mm}$  dla  $s_2 = 1,14 \text{ mm}$

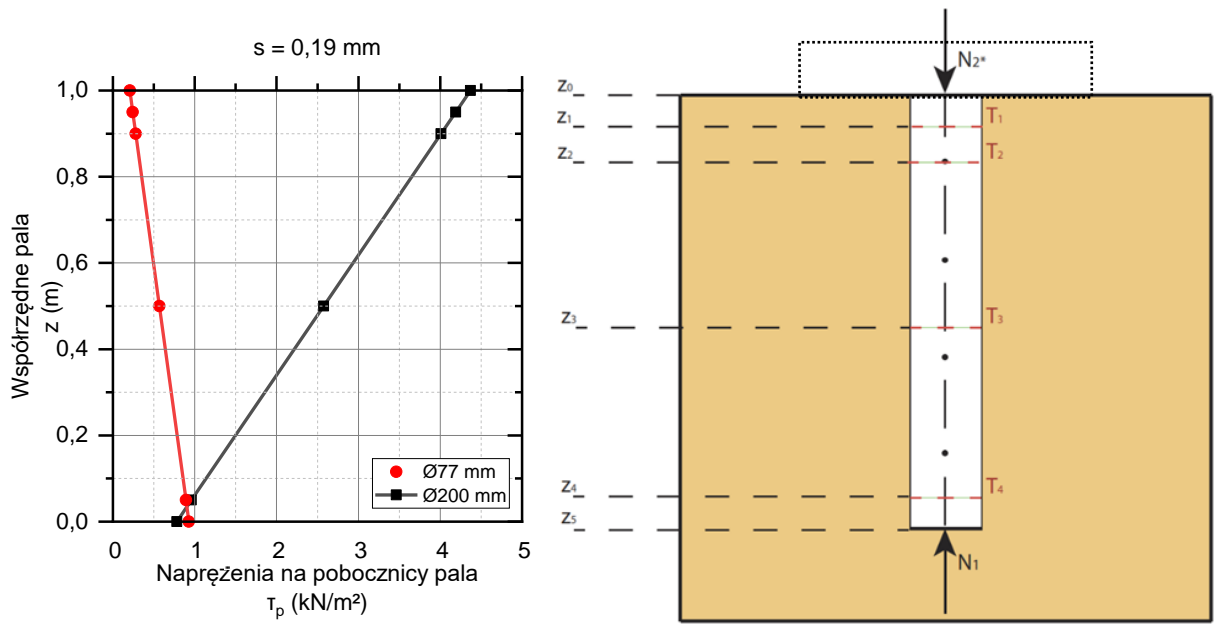


Rys. 14.10. Rozkład naprężeń w palu o długości 700 mm z płytą przykrywającą  $\varnothing 200 \text{ mm}$  dla  $s_2 = 1,14 \text{ mm}$

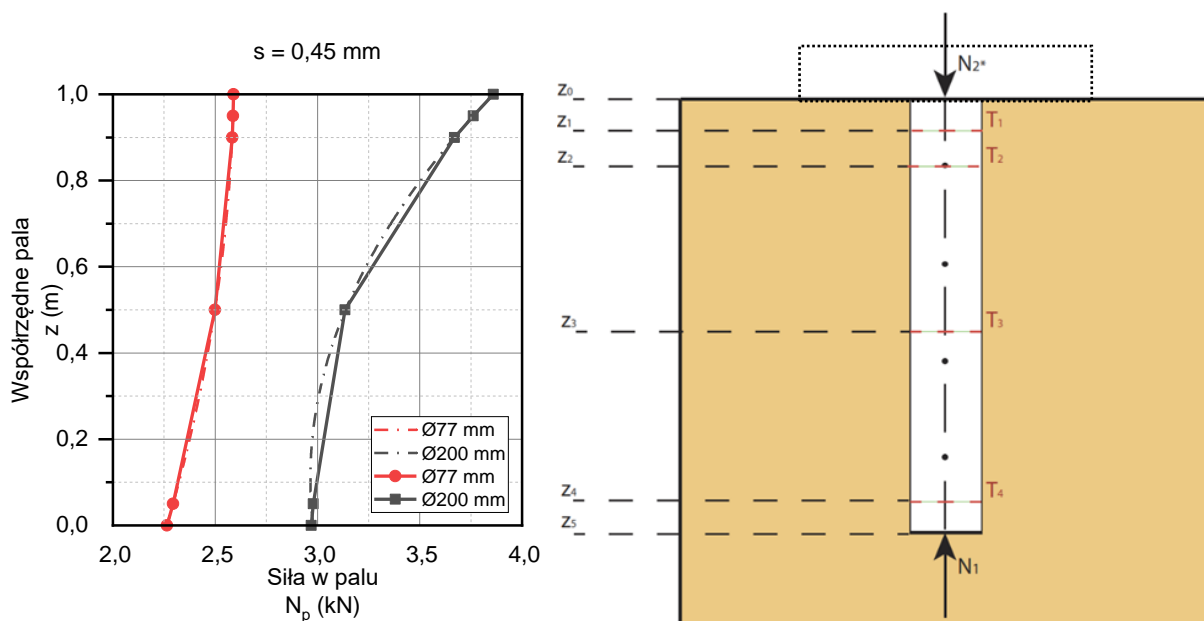
**Pal Ø77 o długości 1000 mm z płytą przykrywającą Ø200 mm.**



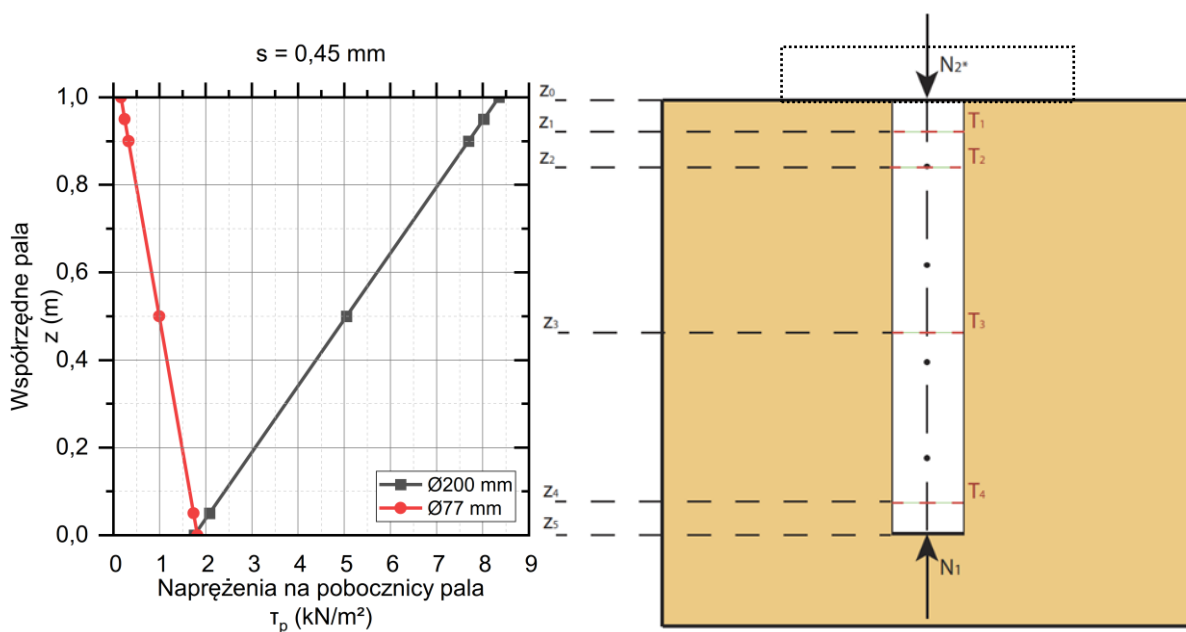
**Rys. 14.11. Rozkład sił w palu o długości 1000 mm z płytą przykrywającą Ø200 mm dla  $s_2 = 0,19$  mm**



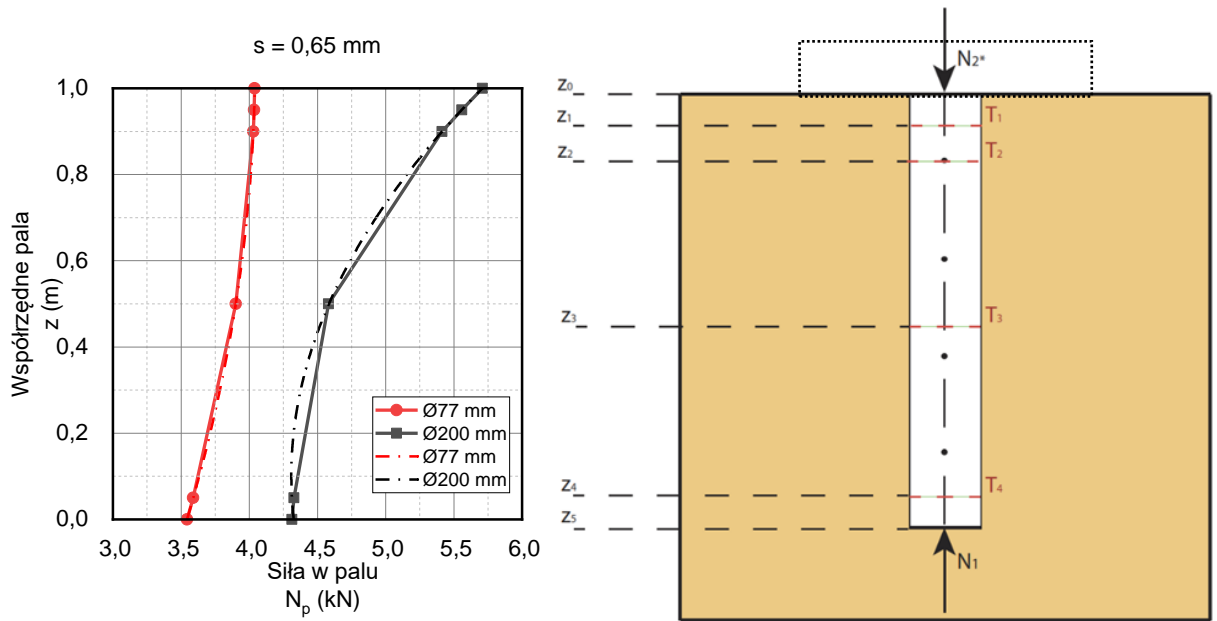
**Rys. 14.12. Rozkład naprężeń w palu o długości 1000 mm z płytą przykrywającą Ø200 mm dla  $s_2 = 0,19$  mm**



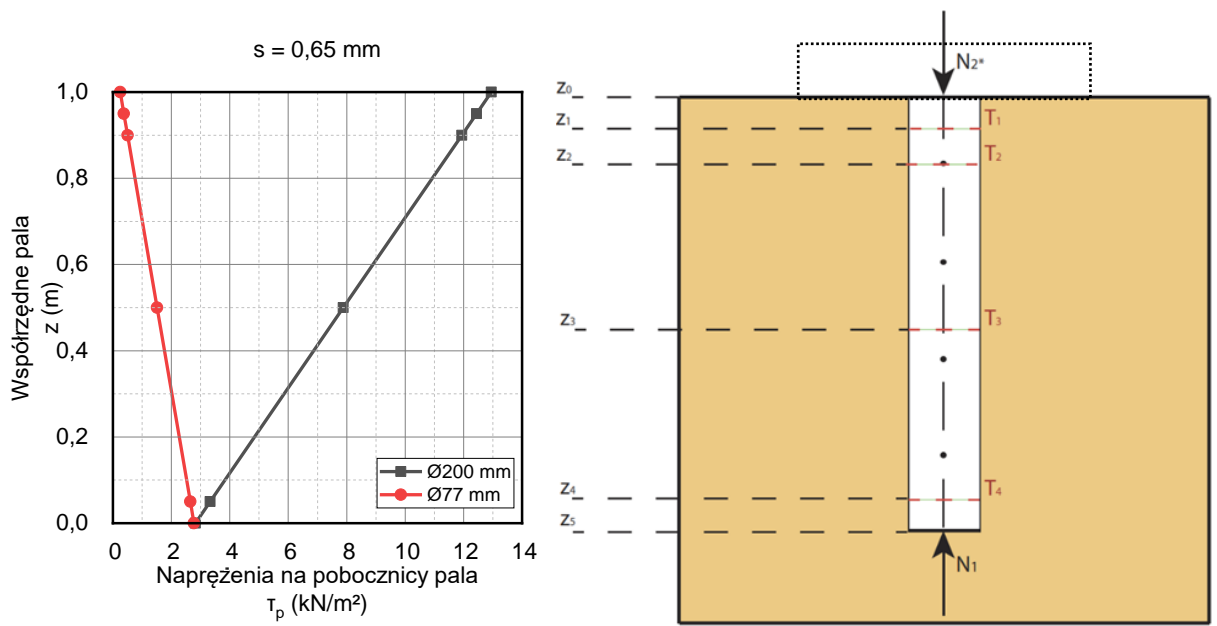
Rys. 14.13. Rozkład sił w palu o długości 1000 mm z płytą przykrywającą  $\varnothing 200 \text{ mm}$  dla  $s_2 = 0,45 \text{ mm}$



Rys. 14.14. Rozkład naprężeń w palu o długości 1000 mm z płytą przykrywającą  $\varnothing 200 \text{ mm}$  dla  $s_2 = 0,45 \text{ mm}$

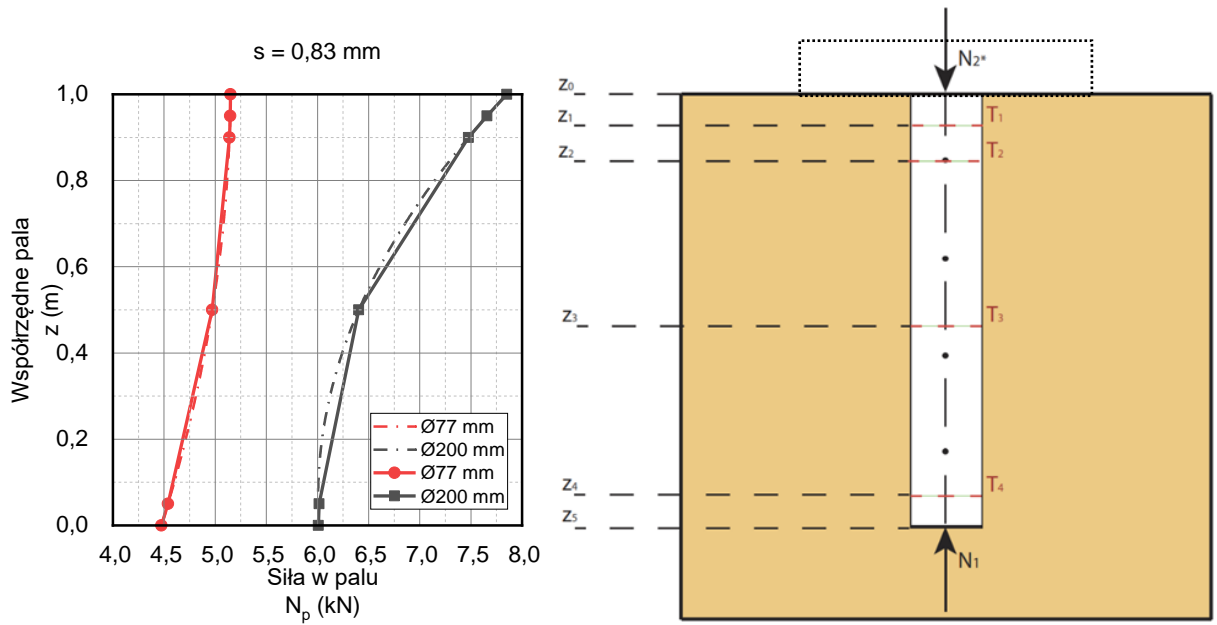


Rys. 14.15. Rozkład sił w palu o długości 1000 mm z płytą przykrywającą  $\varnothing 200$  mm dla  $s_2 = 0,65$  mm

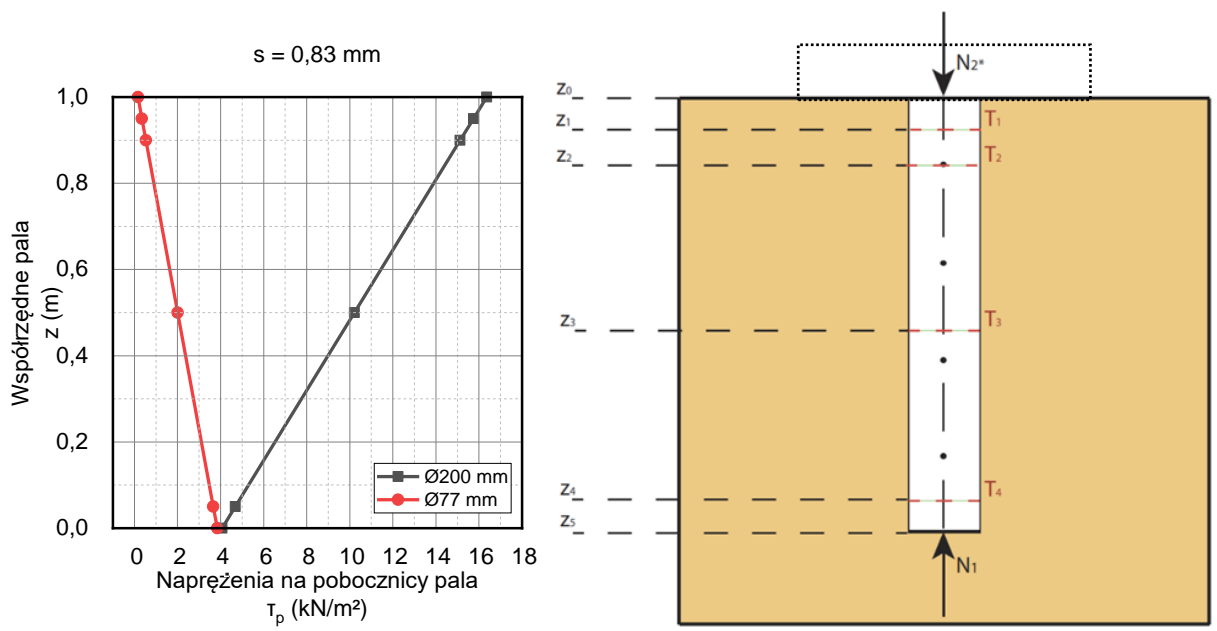


Rys. 14.16. Rozkład naprężeń w palu o długości 1000 mm z płytą przykrywającą  $\varnothing 200$  mm dla  $s_2 = 0,65$  mm

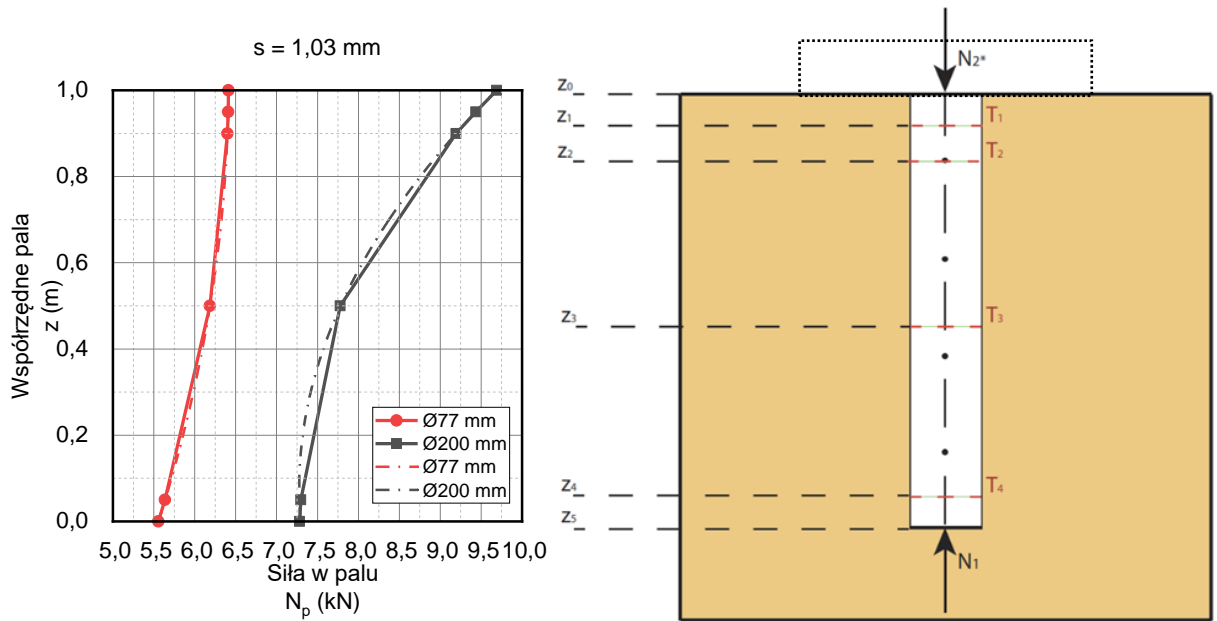




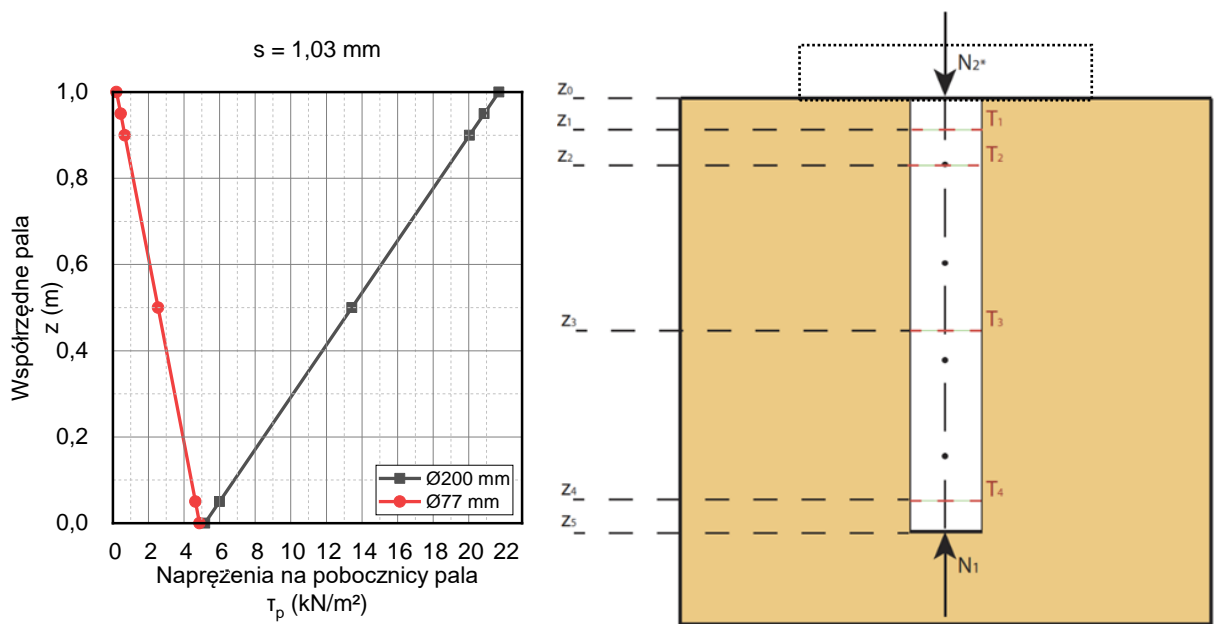
Rys. 14.17. Rozkład sił w palu o długości 1000 mm z płytą przykrywającą  $\varnothing 200 \text{ mm}$  dla  $s_2 = 0,83 \text{ mm}$



Rys. 14.18. Rozkład naprężeń w palu o długości 1000 mm z płytą przykrywającą  $\varnothing 200 \text{ mm}$  dla  $s_2 = 0,83 \text{ mm}$

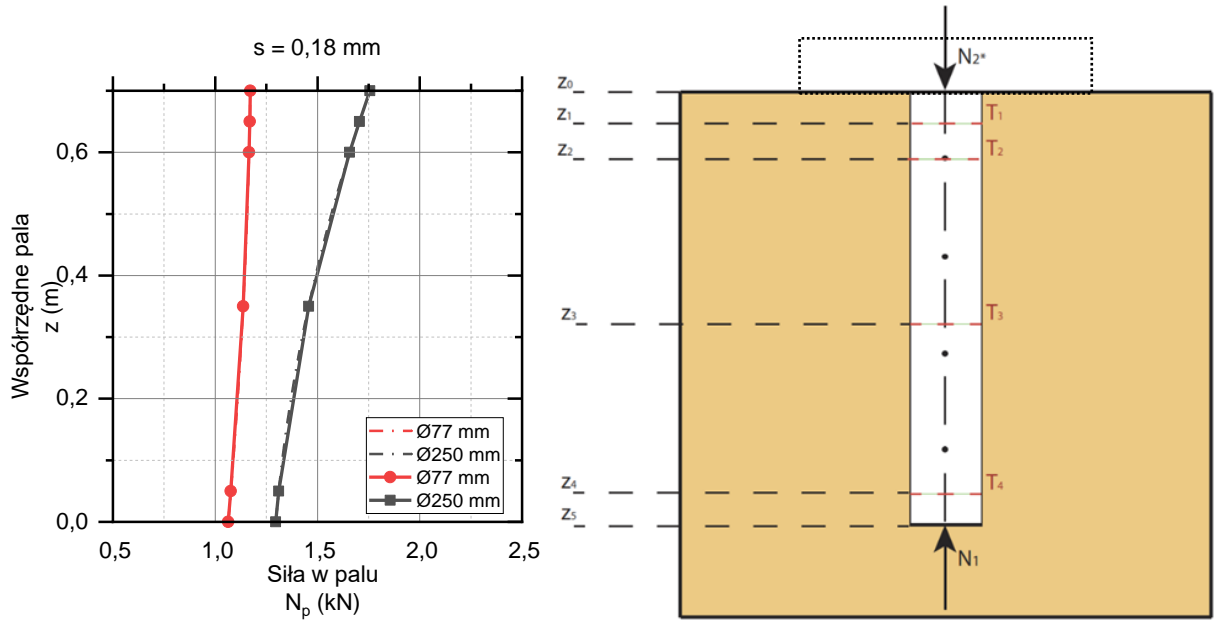


Rys. 14.19. Rozkład sił w palu o długości 1000 mm z płytą przykrywającą  $\varnothing 200 \text{ mm}$  dla  $s_2 = 1,03 \text{ mm}$

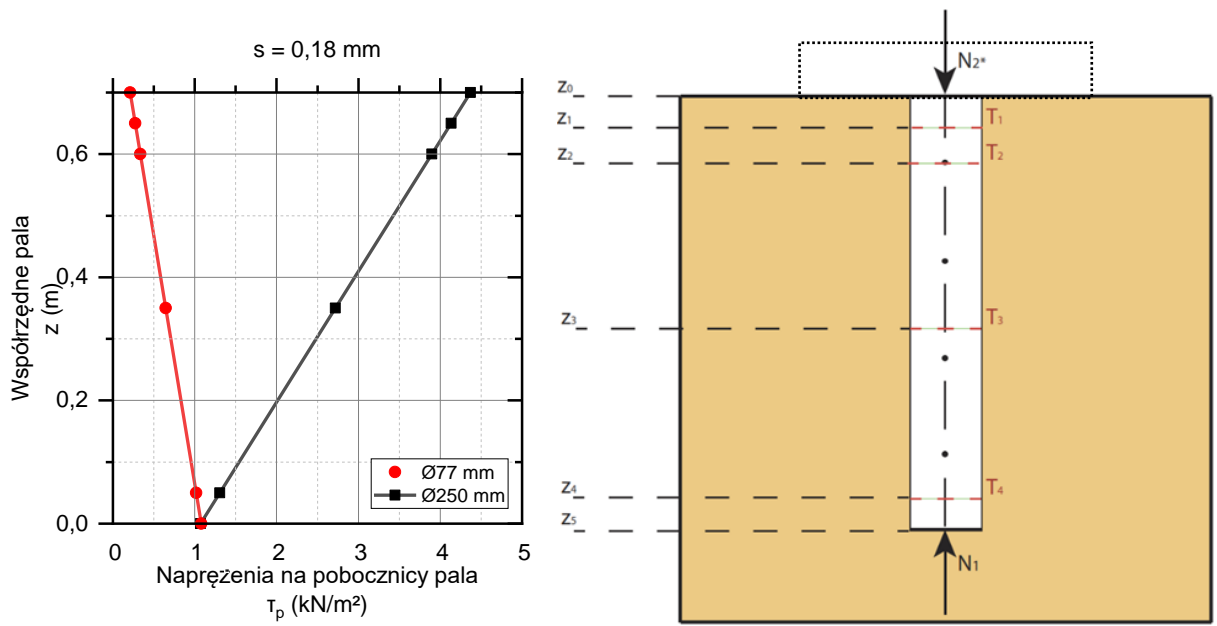


Rys. 14.20. Rozkład naprężeń w palu o długości 1000 mm z płytą przykrywającą  $\varnothing 200 \text{ mm}$  dla  $s_2 = 1,03 \text{ mm}$

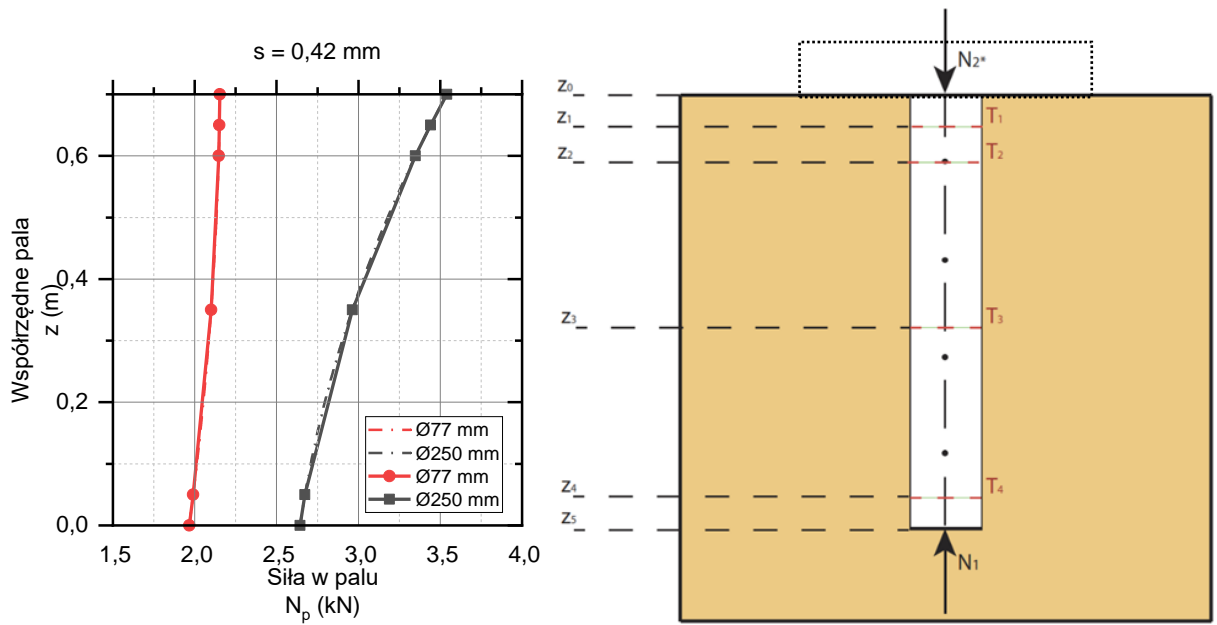
**Pal  $\varnothing 77$  o długości 700 mm z płytą przykrywającą  $\varnothing 250$  mm**



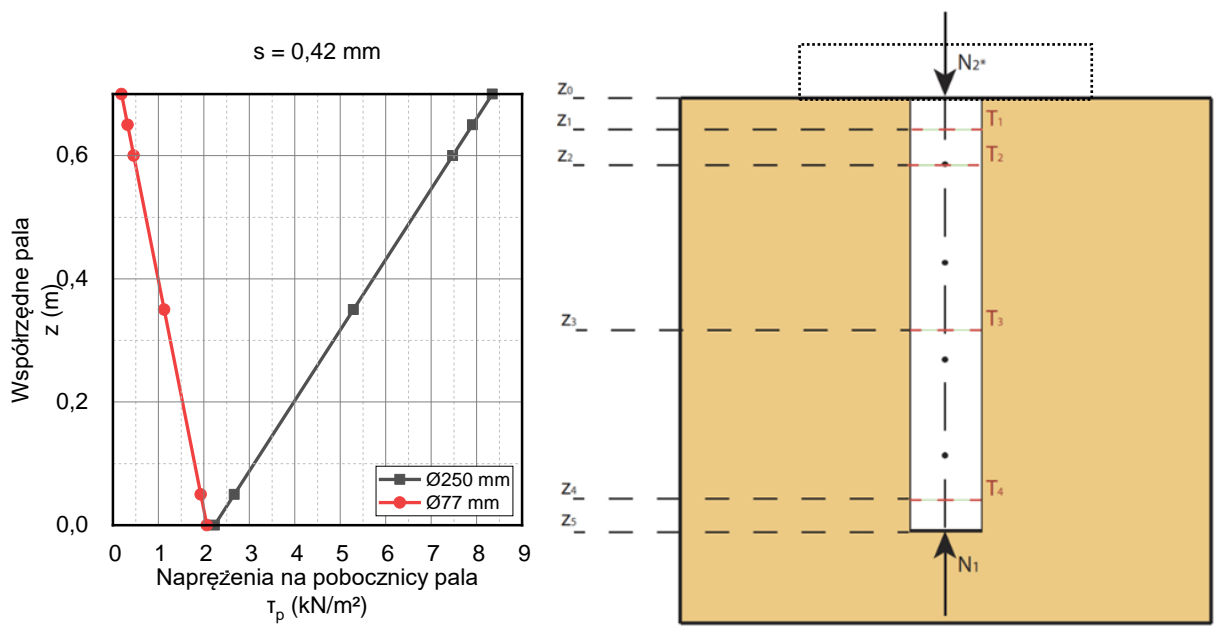
**Rys. 14.21. Rozkład sił w palu o długości 700 mm z płytą przykrywającą  $\varnothing 250$  mm dla  $s_2 = 0,18$  mm**



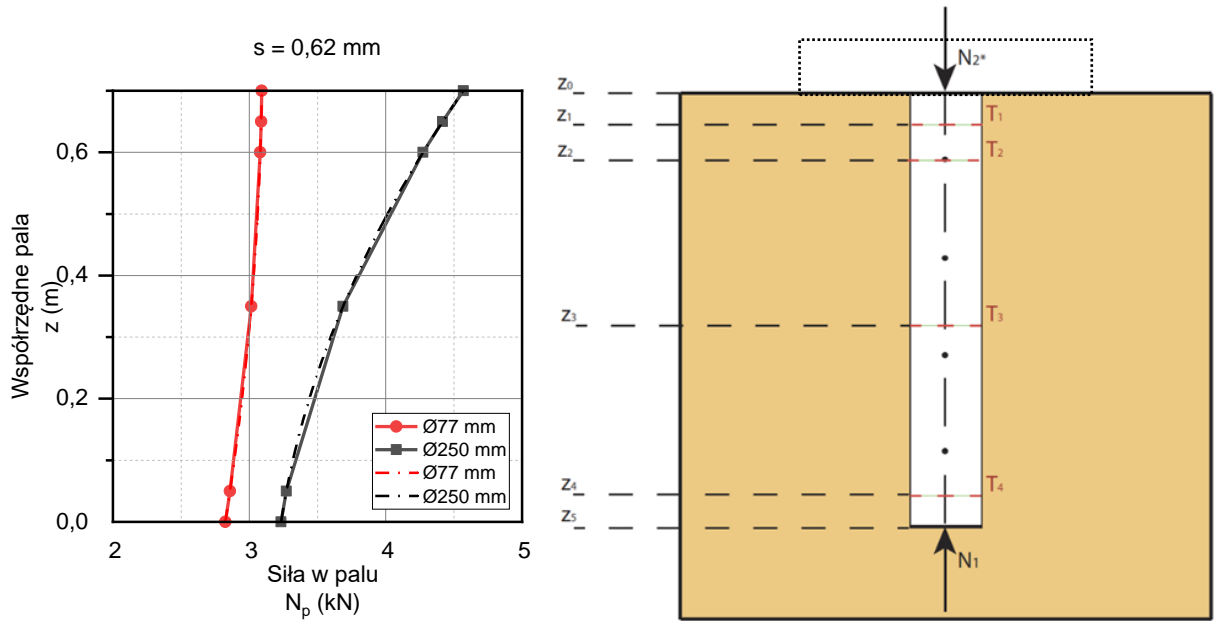
**Rys. 14.22. Rozkład naprężeń w palu o długości 700 mm z płytą przykrywającą  $\varnothing 250$  mm dla  $s_2 = 0,18$  mm**



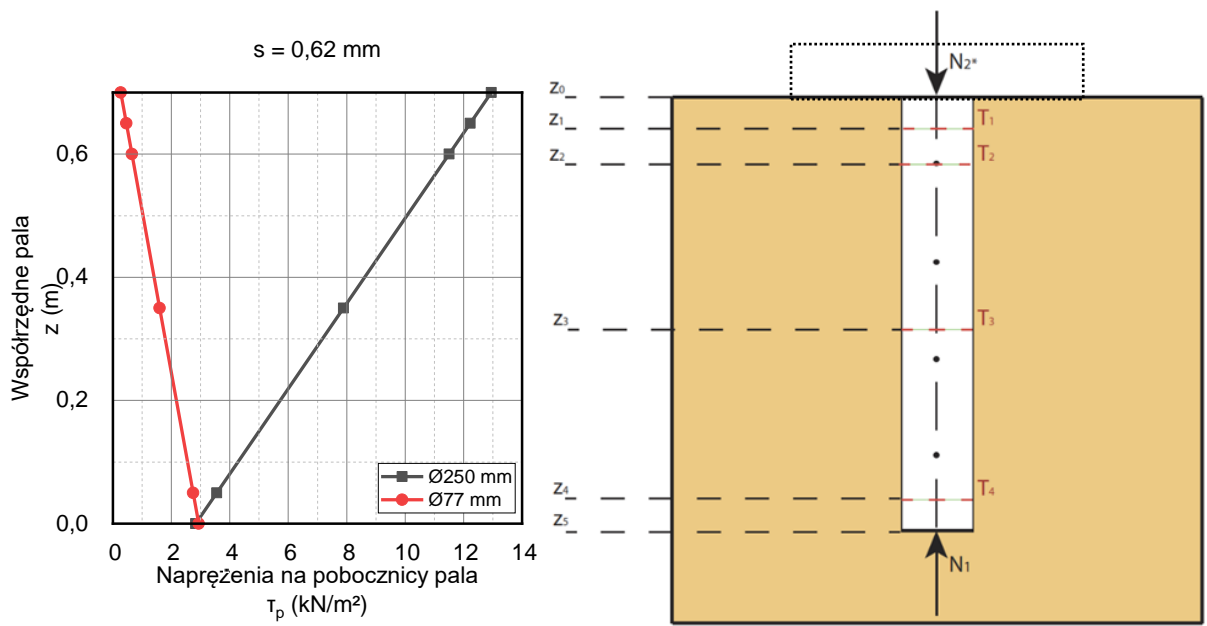
Rys. 14.23. Rozkład sił w palu o długości 700 mm z płytą przykrywającą  $\varnothing 250 \text{ mm}$  dla  $s_2 = 0,42 \text{ mm}$



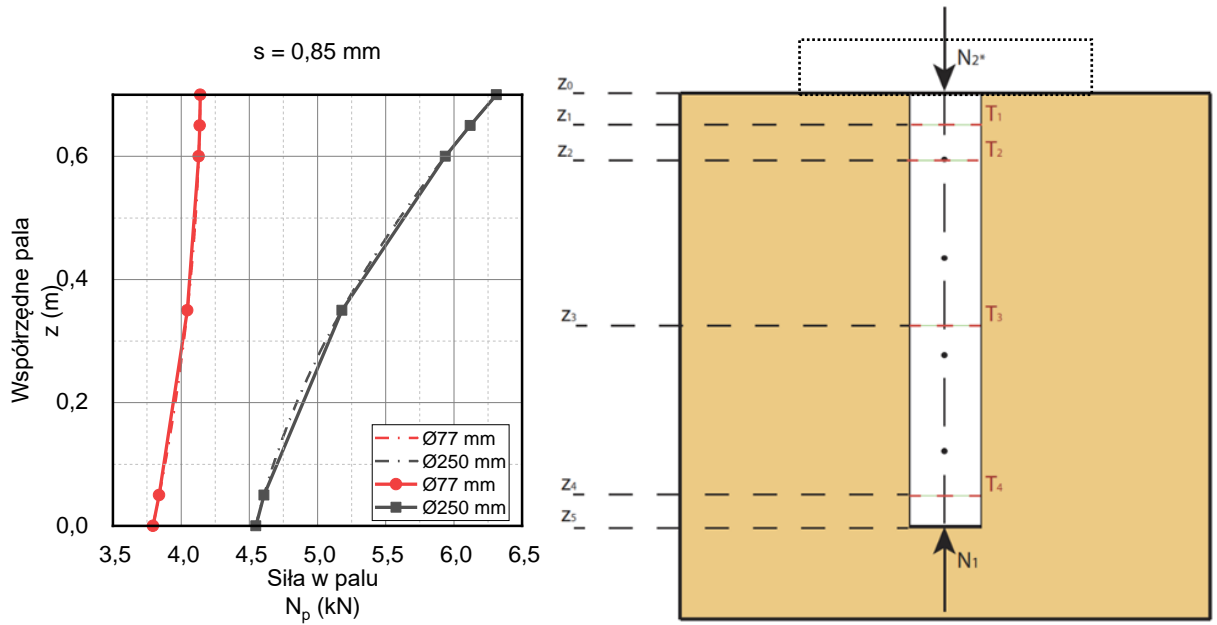
Rys. 14.24. Rozkład naprężeń w palu o długości 700 mm z płytą przykrywającą  $\varnothing 250 \text{ mm}$  dla  $s_2 = 0,42 \text{ mm}$



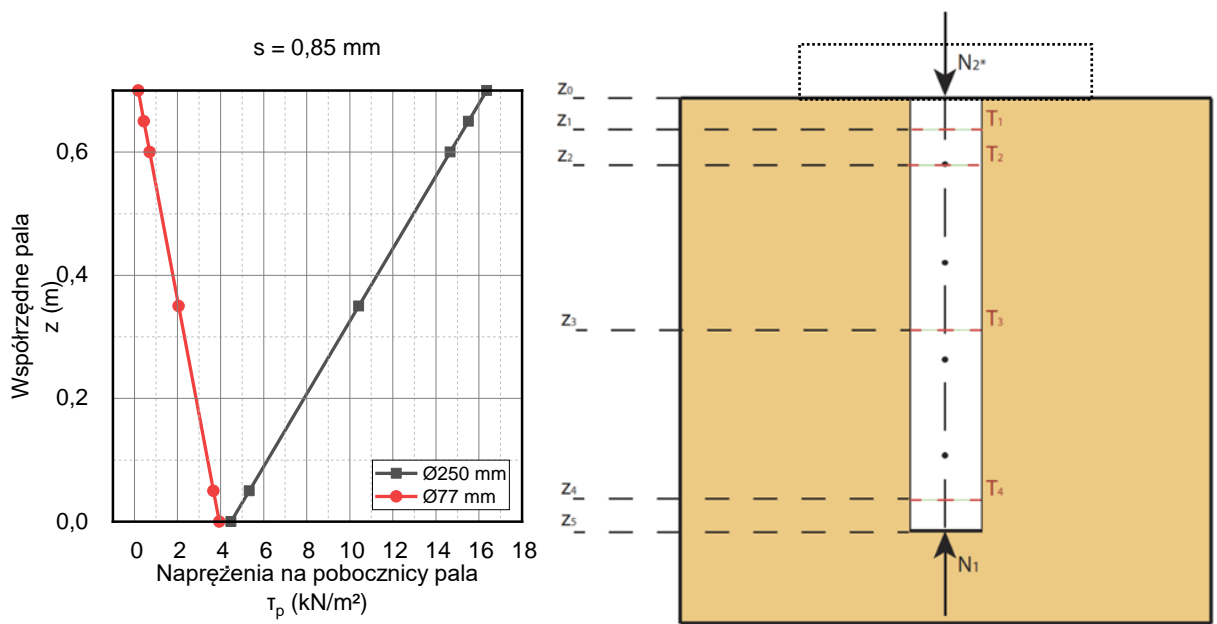
Rys. 14.25. Rozkład sił w palu o długości 700 mm z płytą przykrywającą  $\varnothing 250$  mm dla  $s_2 = 0,62$  mm



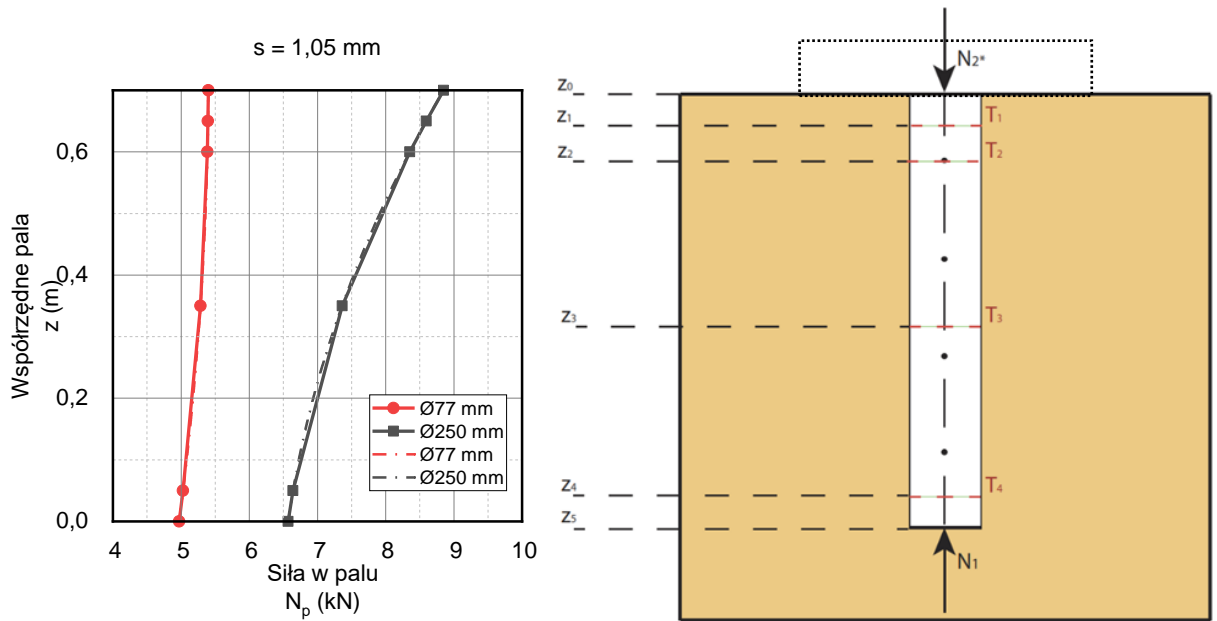
Rys. 14.26. Rozkład naprężeń w palu o długości 700 mm z płytą przykrywającą  $\varnothing 250$  mm dla  $s_2 = 0,62$  mm



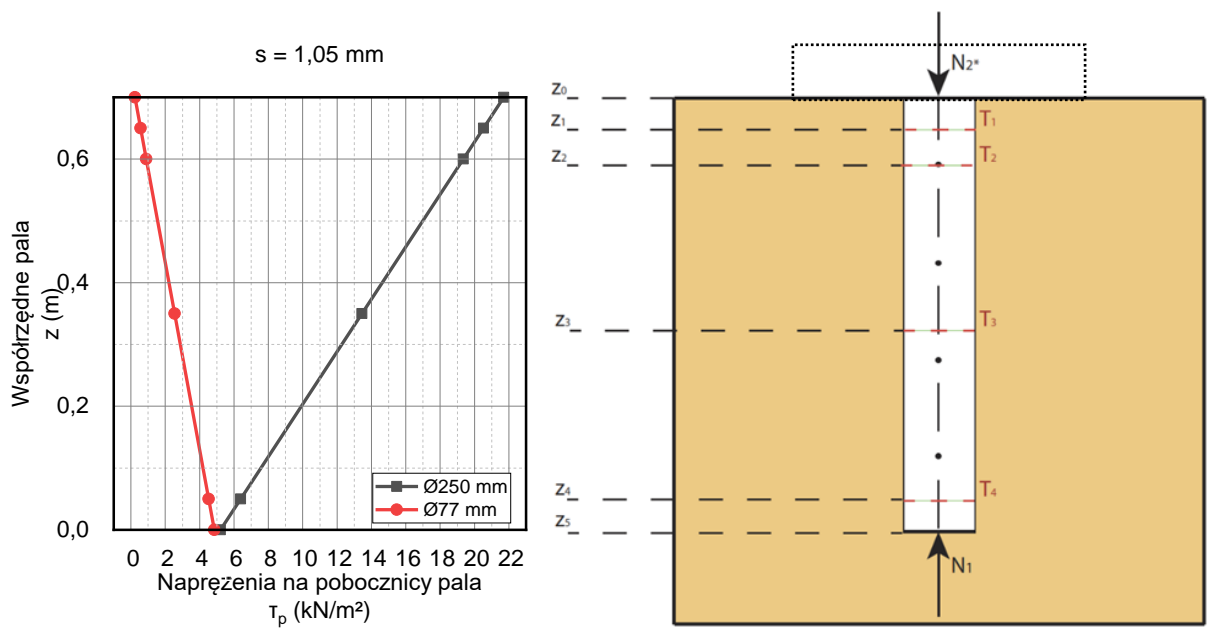
Rys. 14.27. Rozkład sił w palu o długości 700 mm z płytą przykrywającą  $\varnothing 250 \text{ mm}$  dla  $s_2 = 0,85 \text{ mm}$



Rys. 14.28. Rozkład naprężeń w palu o długości 700 mm z płytą przykrywającą  $\varnothing 250 \text{ mm}$  dla  $s_2 = 0,85 \text{ mm}$

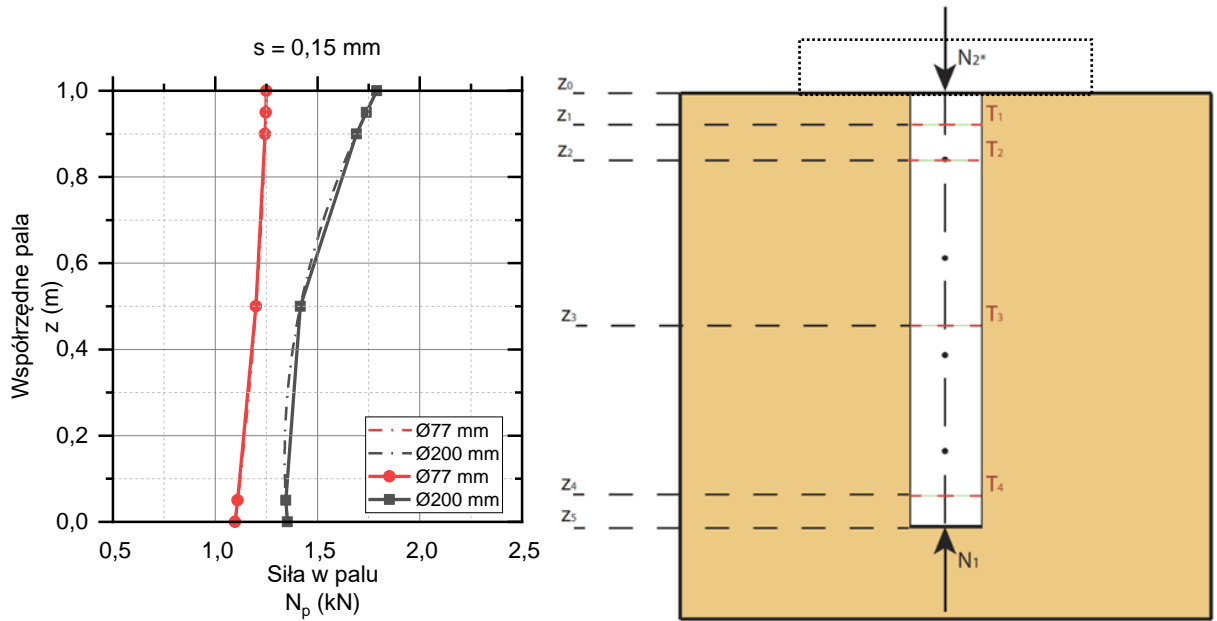


Rys. 14.29. Rozkład sił w palu o długości 700 mm z płytą przykrywającą  $\varnothing 250$  mm dla  $s_2 = 1,05$  mm

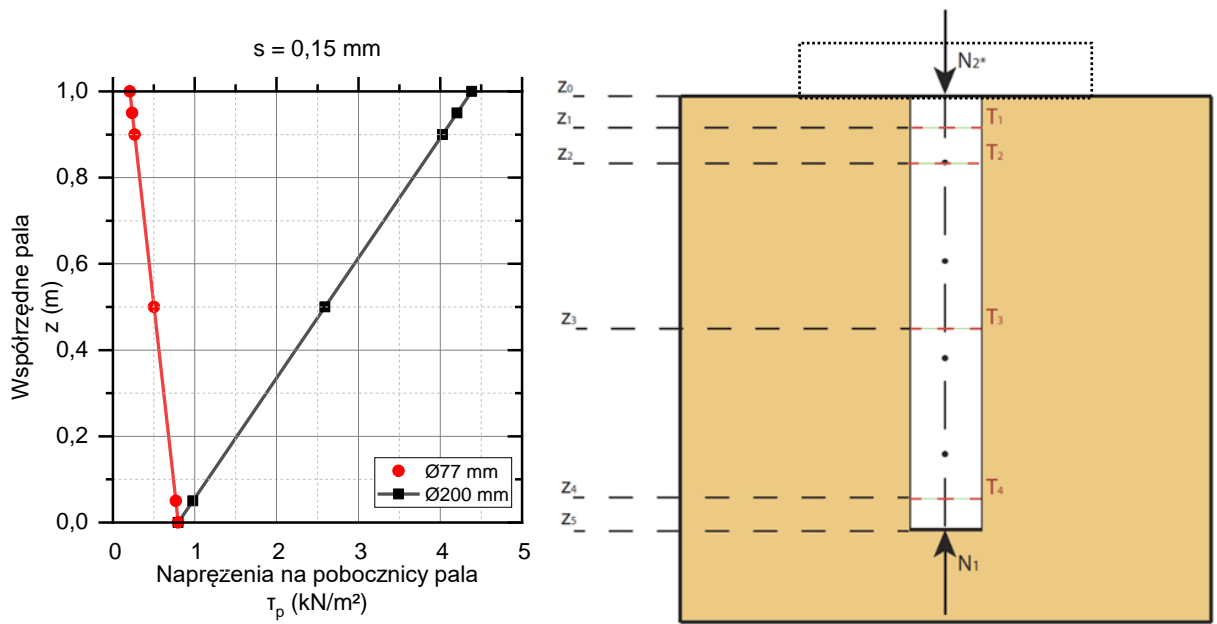


Rys. 14.30. Rozkład naprężeń w palu o długości 700 mm z płytą przykrywającą  $\varnothing 250$  mm dla  $s_2 = 1,05$  mm

**Pal  $\varnothing 77$  o długości 1000 mm z płytą przykrywającą  $\varnothing 250$  mm**

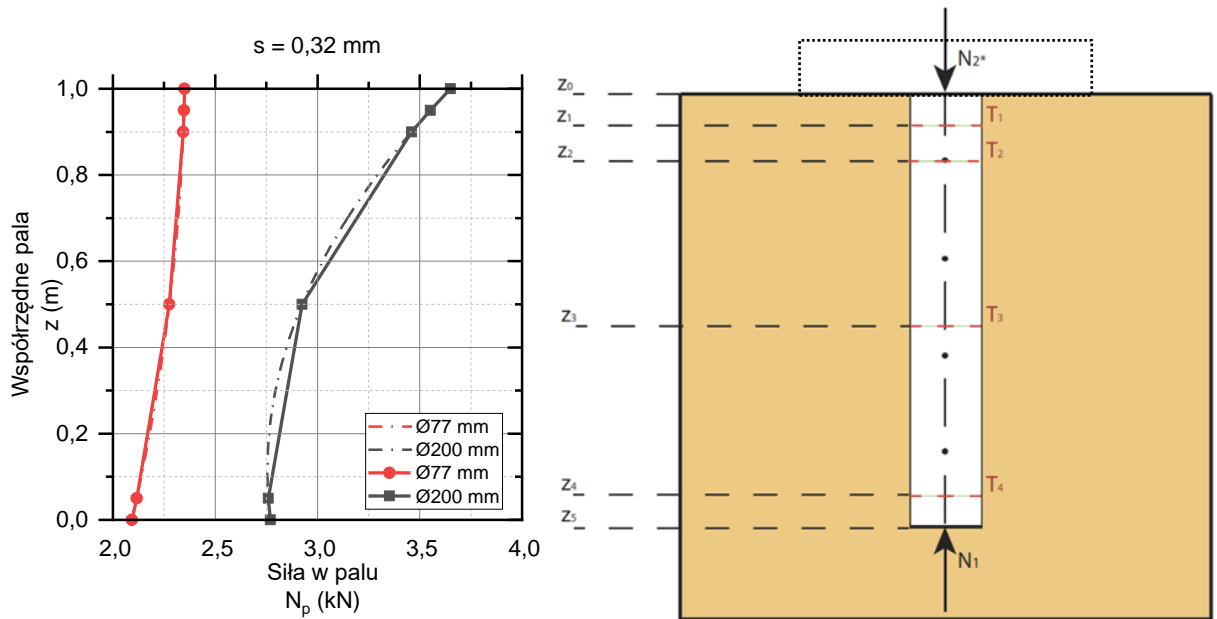


**Rys. 14.31. Rozkład sił w palu o długości 1000 mm z płytą przykrywającą  $\varnothing 250$  mm dla  $s_2 = 0,15$  mm**

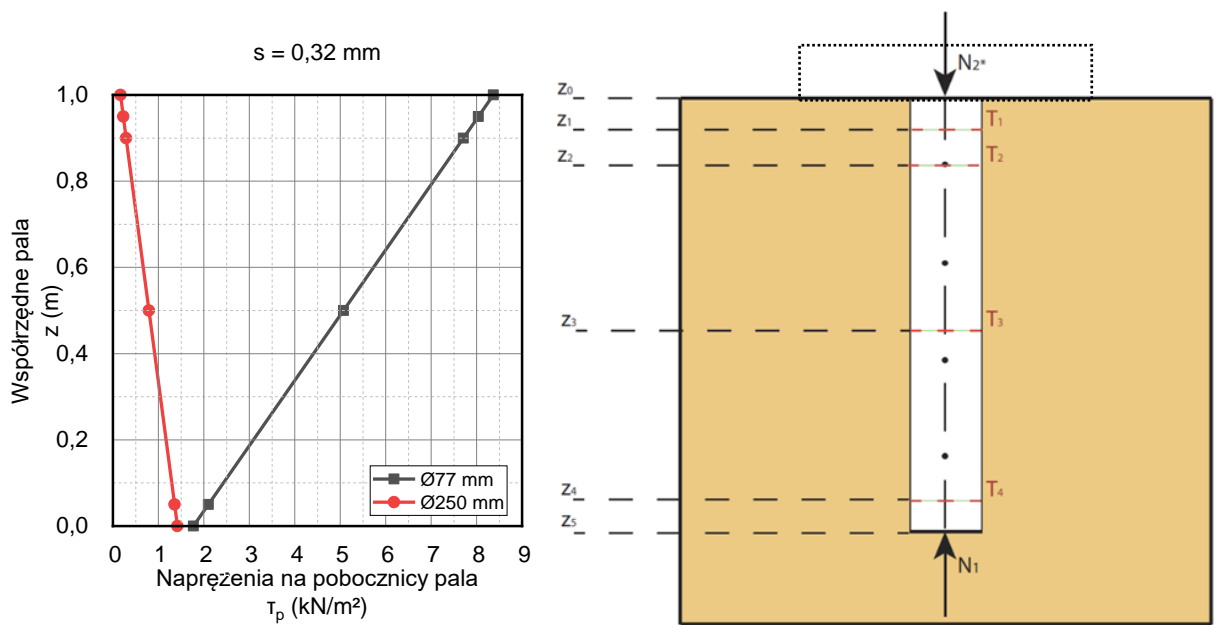


**Rys. 14.32. Rozkład naprężeń w palu o długości 1000 mm z płytą przykrywającą  $\varnothing 250$  mm dla  $s_2 = 0,15$  mm**

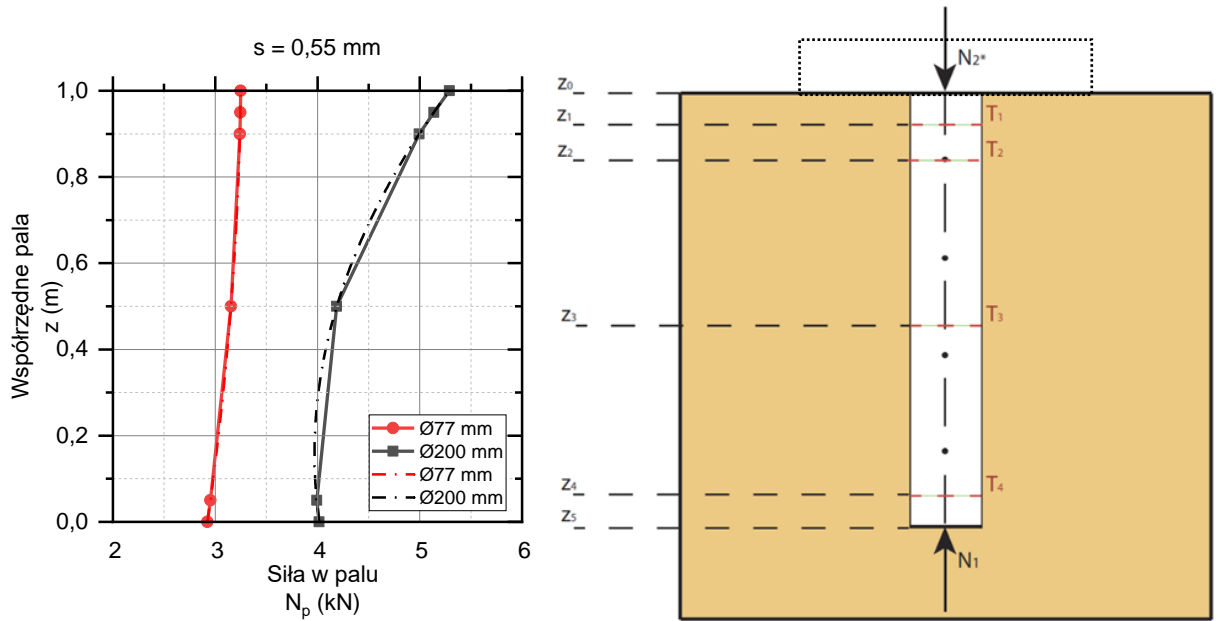




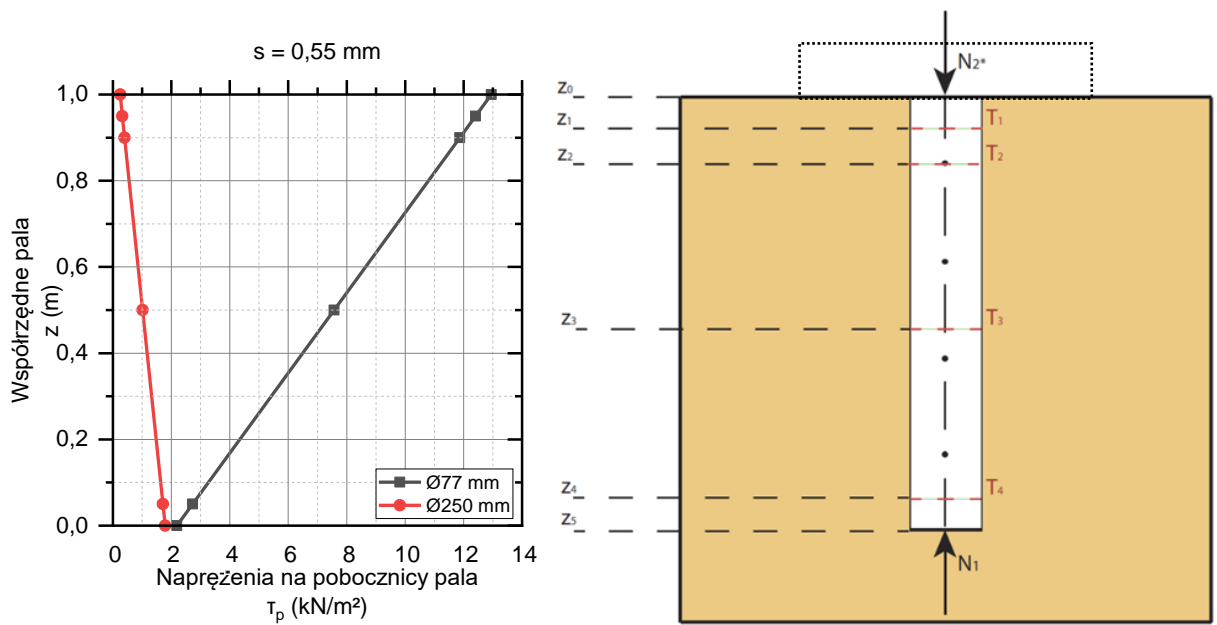
Rys. 14.33. Rozkład sił w palu o długości 1000 mm z płytą przykrywającą  $\varnothing 250 \text{ mm}$  dla  $s_2 = 0,32 \text{ mm}$



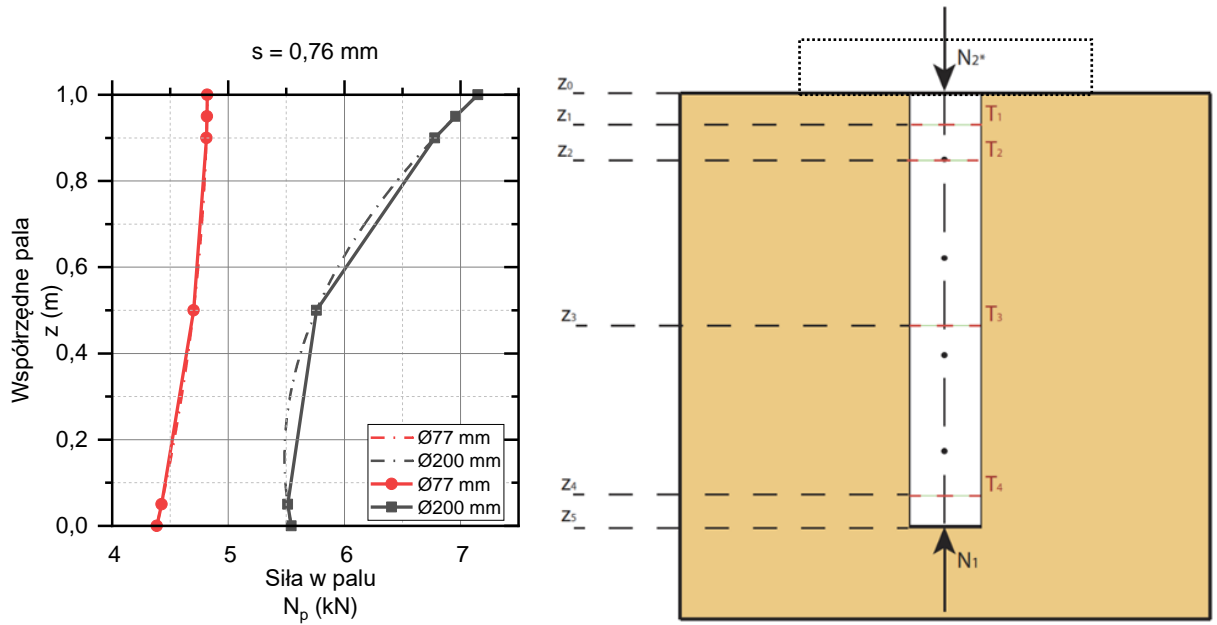
Rys. 14.34. Rozkład naprężeń w palu o długości 1000 mm z płytą przykrywającą  $\varnothing 250 \text{ mm}$  dla  $s_2 = 0,32 \text{ mm}$



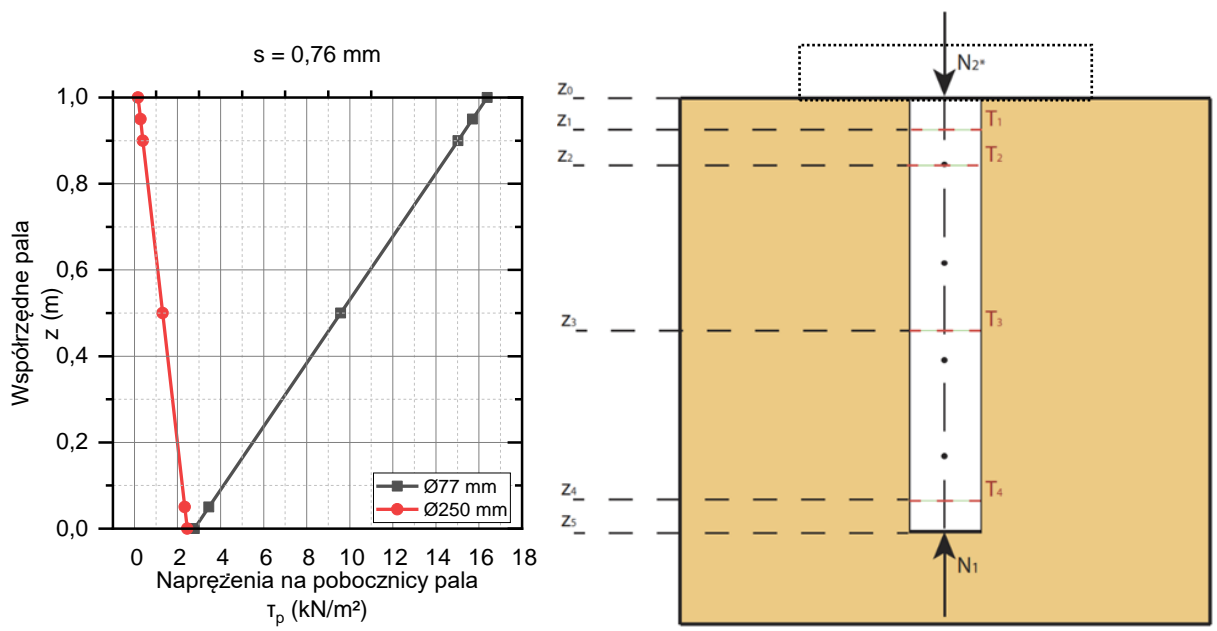
Rys. 14.35. Rozkład sił w palu o długości 1000 mm z płytą przykrywającą  $\varnothing 250 \text{ mm}$  dla  $s_2 = 0,55 \text{ mm}$



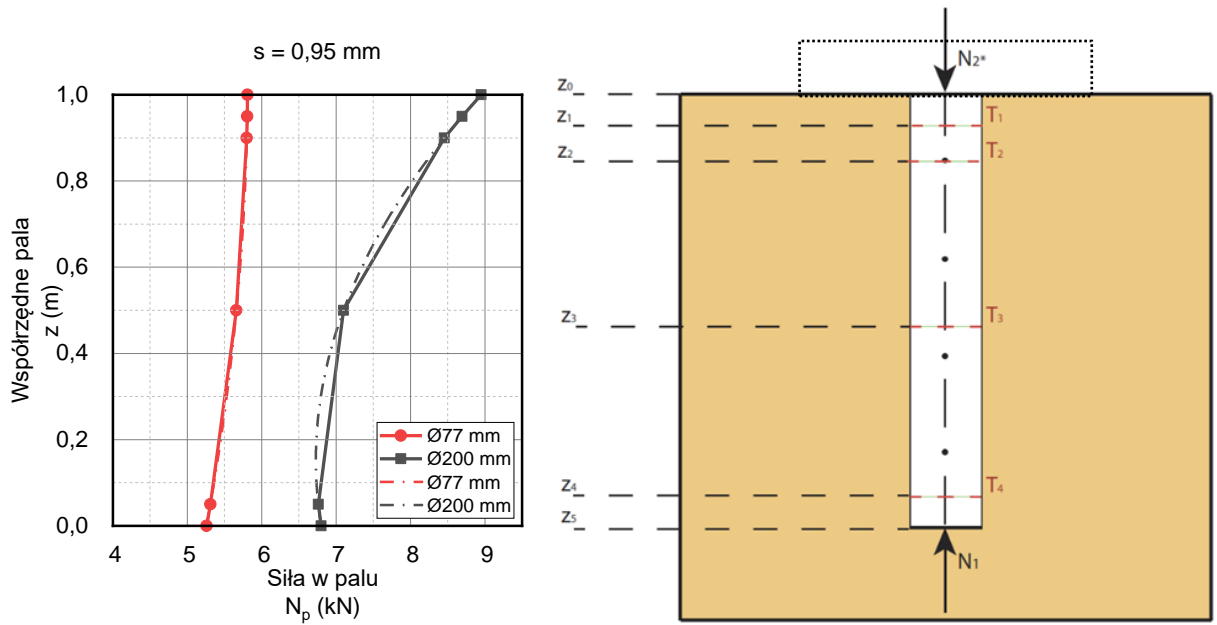
Rys. 14.36. Rozkład naprężeń w palu o długości 1000 mm z płytą przykrywającą  $\varnothing 250 \text{ mm}$  dla  $s_2 = 0,55 \text{ mm}$



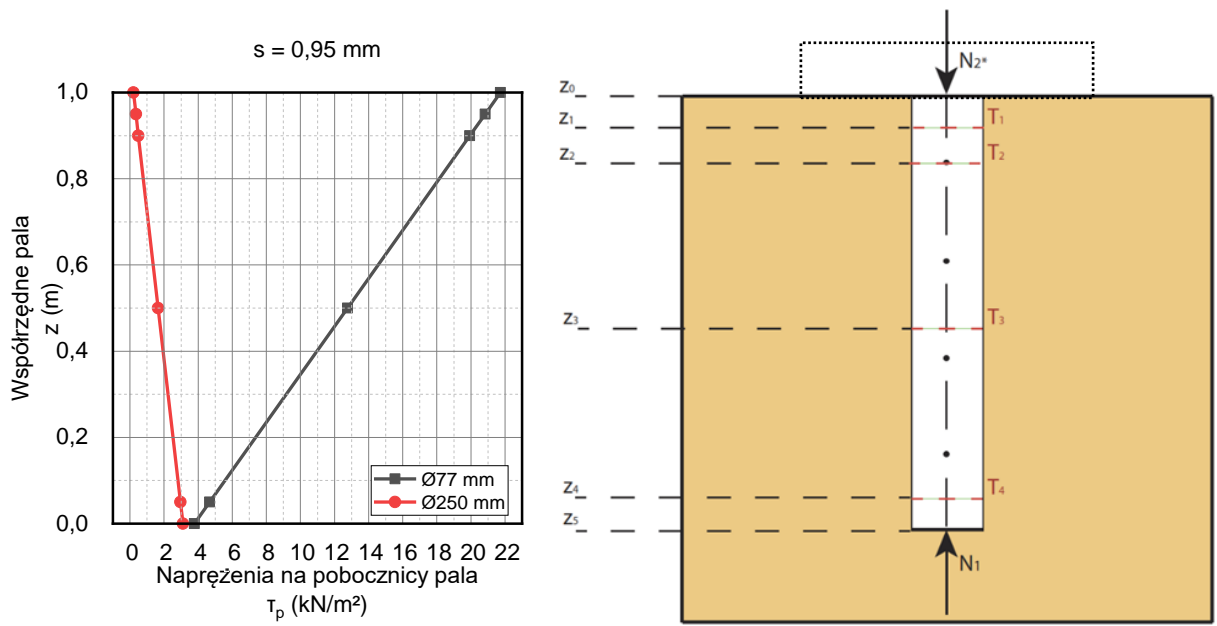
Rys. 14.37. Rozkład sił w palu o długości 1000 mm z płytą przykrywającą  $\varnothing 250$  mm dla  $s_2 = 0,76$  mm



Rys. 14.38. Rozkład naprężeń w palu o długości 1000 mm z płytą przykrywającą  $\varnothing 250$  mm dla  $s_2 = 0,76$  mm



Rys. 14.39. Rozkład sił w palu o długości 1000 mm z płytą przykrywającą  $\varnothing 250$  mm dla  $s_2 = 0,95$  mm



Rys. 14.40. Rozkład naprężeń w palu o długości 1000 mm z płytą przykrywającą  $\varnothing 250$  mm dla  $s_2 = 0,95$  mm

**Załącznik G - Pomiary i obliczenia dla modelu PFPP**

**Tabela 14.1. Wyniki pomiarów dla modelu PFPP**

Pomiary - L = 1000 mm / Ø250 mm / ID = 0,55

$s_2$ [mm]	$N_4$ [kN]	$N_2$ [kN]	$T_1$ [kN]	$T_2$ [kN]	$T_3$ [kN]	$T_4$ [kN]	$N_1$ [kN]	$T_p$ [kN]	$\tau_1$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\tau_2$ [kN/m <sup>2</sup> ]
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,15	5,05	1,79	1,74	1,69	1,37	1,17	1,17	0,62	0,78	4,37
0,32	10,00	3,65	3,55	3,46	2,84	2,45	2,43	1,22	1,75	8,35
0,55	15,01	5,29	5,14	4,99	4,05	3,49	3,46	1,83	2,19	12,95
0,76	20,05	7,15	6,96	6,77	5,58	4,88	4,84	2,31	2,76	16,36
0,95	25,01	8,95	8,69	8,45	6,87	5,93	5,87	3,08	3,76	21,70

Pomiary - L = 1000 mm / Ø200 mm / ID = 0,55

$s_2$ [mm]	$N_4$ [kN]	$N_2$ [kN]	$T_1$ [kN]	$T_2$ [kN]	$T_3$ [kN]	$T_4$ [kN]	$N_1$ [kN]	$T_p$ [kN]	$\tau_1$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\tau_2$ [kN/m <sup>2</sup> ]
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,19	5,00	1,95	1,90	1,85	1,53	1,32	1,33	0,62	0,78	4,35
0,45	10,06	3,86	3,76	3,67	3,05	2,66	2,64	1,22	1,75	8,36
0,65	15,40	5,71	5,56	5,41	4,45	3,84	3,81	1,90	2,82	12,93
0,83	20,08	7,85	7,66	7,47	6,25	5,44	5,38	2,47	4,07	16,35
1,03	25,10	9,69	9,43	9,19	7,57	6,52	6,45	3,24	5,17	21,65

Pomiary - L = 700 mm / Ø250 mm / ID = 0,60

$s_2$ [mm]	$N_4$ [kN]	$N_2$ [kN]	$T_1$ [kN]	$T_2$ [kN]	$T_3$ [kN]	$T_4$ [kN]	$N_1$ [kN]	$T_p$ [kN]	$\tau_1$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\tau_2$ [kN/m <sup>2</sup> ]
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,18	5,05	1,76	1,71	1,66	1,46	1,31	1,30	0,46	1,07	4,34
0,42	10,00	3,54	3,44	3,35	2,96	2,67	2,64	0,90	2,23	8,37
0,62	15,01	4,57	4,42	4,27	3,69	3,27	3,23	1,34	2,83	12,91
0,85	20,05	6,31	6,12	5,94	5,18	4,61	4,55	1,76	4,48	16,33
1,05	25,01	8,85	8,59	8,35	7,36	6,64	6,57	2,28	5,21	21,73

Pomiary - L = 700 mm / Ø200 mm / ID = 0,60

$s_2$ [mm]	$N_4$ [kN]	$N_2$ [kN]	$T_1$ [kN]	$T_2$ [kN]	$T_3$ [kN]	$T_4$ [kN]	$N_1$ [kN]	$T_p$ [kN]	$\tau_1$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\tau_2$ [kN/m <sup>2</sup> ]
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,22	5,00	2,10	2,05	2,00	1,79	1,64	1,63	0,47	1,08	4,49
0,49	10,06	3,85	3,75	3,66	3,27	2,98	2,95	0,90	2,23	8,35
0,74	15,40	5,68	5,52	5,38	4,78	4,34	4,30	1,37	3,23	13,00
0,92	20,08	7,65	7,46	7,27	6,51	5,94	5,88	1,77	4,44	16,48
1,14	25,10	8,79	8,53	8,28	7,28	6,56	6,50	2,29	4,99	22,12

Tabela 14.2. Obliczenia dla modelu PFPP

Obliczenia - L = 1000 mm / Ø250 mm / ID = 0,55																
Płyta							Pal									
$\sigma_2$ [kN/m <sup>2</sup> ]	E [kN/m <sup>2</sup> ]	$q_b$ [MPa]	$k_2$ [-]	$f_2$	$T_2$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$E_{pala}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{plyta}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$S_{pala}$ [m]	$D_p$ [m]	$D_p/D_1$	$N_2^*$ [kN]	$k_2$ [-]	$\sigma_1$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$T_1$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\alpha$ [°]	$f_1$
0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00000	0,077	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
73,41	77225	12,248	0,24	0,20	4,33	128,76	77225	0,00015	0,128	1,66	1,78	0,24	90,72	0,73	2,15	0,01
142,99	87463	13,685	0,23	0,20	8,43	125,56	87463	0,00032	0,110	1,43	3,62	0,23	253,55	1,71	1,95	0,01
218,88	85150	13,36	0,24	0,20	12,91	104,08	85150	0,00055	0,094	1,22	5,28	0,24	498,61	2,16	1,40	0,01
290,49	85150	13,36	0,22	0,19	16,27	105,35	85150	0,00076	0,095	1,23	7,13	0,22	682,73	2,79	1,40	0,01
361,64	87020	13,62	0,23	0,20	21,32	102,26	87020	0,00096	0,090	1,17	8,87	0,23	923,04	3,77	1,35	0,01

Obliczenia - L = 1000 mm / Ø200 mm / ID = 0,55																
Płyta							Pal									
$\sigma_2$ [kN/m <sup>2</sup> ]	E [kN/m <sup>2</sup> ]	$q_b$ [MPa]	$k_2$ [-]	$f_2$	$T_2$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$E_{pala}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{plyta}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$S_{pala}$ [m]	$D_p$ [m]	$D_p/D_1$	$N_2^*$ [kN]	$k_2$ [-]	$\sigma_1$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$T_1$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\alpha$ [°]	$f_1$
0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00000	0,077	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
114,04	93500	14,52	0,21	0,14	4,42	115,78	93500	0,00019	0,097	1,26	1,99	0,21	179,94	0,75	2,00	0,01
231,81	87463	13,72	0,21	0,14	8,48	96,96	87463	0,00045	0,086	1,12	4,18	0,21	454,05	1,78	2,15	0,01
362,30	102000	15,7	0,22	0,14	13,25	96,86	102000	0,00062	0,077	1,00	6,33	0,22	817,27	2,82	2,00	0,01
457,27	102500	15,7	0,21	0,14	16,73	107,27	102500	0,00087	0,077	1,00	7,48	0,21	1155,73	4,08	2,05	0,01
576,17	106000	16,25	0,23	0,14	21,86	103,56	106000	0,00101	0,077	1,00	10,20	0,23	1384,53	5,16	2,07	0,01

Obliczenia - L = 700 mm / Ø250 mm / ID = 0,60																
Płyta							Pal									
$\sigma_2$ [kN/m <sup>2</sup> ]	E [kN/m <sup>2</sup> ]	$q_b$ [MPa]	$k_2$ [-]	$f_2$	$T_2$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$E_{pala}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{plyta}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$S_{pala}$ [m]	$D_p$ [m]	$D_p/D_1$	$N_2^*$ [kN]	$k_2$ [-]	$\sigma_1$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$T_1$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\alpha$ [°]	$f_1$
0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00000	0,077	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
74,16	66000	10,65	0,16	0,21	4,12	119,14	66000	0,00019	0,135	1,75	1,65	0,16	90,56	1,05	2,85	0,02
145,47	68800	11,05	0,16	0,19	8,15	104,15	68800	0,00043	0,115	1,49	3,44	0,16	254,55	2,24	2,65	0,02
235,10	82200	12,95	0,19	0,19	13,17	86,28	82200	0,00063	0,080	1,04	4,46	0,19	643,28	2,84	1,65	0,01
309,35	82100	12,935	0,18	0,18	16,42	88,53	82100	0,00085	0,083	1,08	6,27	0,18	840,64	4,52	2,10	0,01
363,90	79400	12,56	0,16	0,20	21,46	103,54	79400	0,00105	0,100	1,30	8,78	0,16	836,71	5,28	1,95	0,01

Obliczenia - L = 700 mm / Ø200 mm / ID = 0,60																
Płyta							Pal									
$\sigma_2$ [kN/m <sup>2</sup> ]	E [kN/m <sup>2</sup> ]	$q_b$ [MPa]	$k_2$ [-]	$f_2$	$T_2$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$E_{pala}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{plyta}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$S_{pala}$ [m]	$D_p$ [m]	$D_p/D_1$	$N_2^*$ [kN]	$k_2$ [-]	$\sigma_1$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$T_1$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\alpha$ [°]	$f_1$
0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00000	0,077	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
108,43	76000	12,075	0,14	0,15	4,41	122,50	76000	0,00022	0,124	1,61	2,10	0,14	134,89	1,05	3,00	0,01
232,19	84300	13,24	0,14	0,14	8,49	99,74	84300	0,00049	0,091	1,18	3,84	0,14	454,19	2,15	2,50	0,01
363,59	91500	14,25	0,15	0,14	13,30	96,17	91500	0,00074	0,081	1,05	5,67	0,15	834,77	3,24	2,19	0,01
464,75	95500	14,73	0,14	0,14	17,00	105,72	95500	0,00092	0,085	1,10	7,63	0,14	1036,00	4,44	2,35	0,01
609,82	103000	15,85	0,16	0,14	22,31	94,26	103000	0,00113	0,071	0,92	8,87	0,16	1640,59	4,96	1,83	0,01

## 15. STRESZCZENIE / SUMMARY

### STRESZCZENIE

#### WSPÓŁPRACA POJEDYNCZEGO FUNDAMENTU PŁYTOWO-PALOWEGO Z GRUNTEM

Pojedyncze fundamenty płytowo palowe stosowane są do wielu konstrukcji budowlanych. Jest to rozwiązanie, które wyróżniają walory ekonomiczne, niska materiałochłonność, energochłonność i pracochłonność w porównaniu do fundamentów bezpośrednich i głębokich (fundamenty palowe bez płyty przykrywającej).

Opierając się na przeglądzie i badaniach literatury opisujących zagadnienie fundamentów płytowo – palowych stwierdzić można, że brakuje opisu matematycznego, który uwzględniałby współpracę płyty, pala z gruntem, który opierałby się o nieliniowe charakterystyki fundamentu obciążenie - osiadanie.

W pracy sprawdzono możliwość zastosowania metody Meyera – Kowalowa dla opisanie współpracy pojedynczego fundamentu płytowo palowego z gruntem, uwzględniając nieliniowe osiadanie fundamentu. W tym celu przeprowadzono badania laboratoryjne i na ich podstawie został stworzony i potwierdzony model matematyczny. Bazując na otrzymanym wyniku badań eksperymentalnych opracowano i zaproponowano schemat obliczeniowy, który może służyć do celów praktycznych obliczeń inżynierskich w biurach projektowych.

Przeprowadzone badania, potwierdziły i udowodniły stawiane w pracy tezy, że:

- a) w skutek docisku płyty przykrywającej następuje zwiększenie naprężeń na pobocznicę pojedynczego fundamentu płytowo palowego w stosunku do fundamentu bez płyty przykrywającej
- b) można wykorzystać metodę M-K (stosowaną obecnie dla pojedynczych fundamentów palowych)-do opisanie współpracy pojedynczych fundamentów płytowo - palowych z gruntem.

## **SUMMARY**

### **SOIL–STRUCTURE INTERACTION IN SINGLE PILE-RAFT FOUNDATION**

Combined pile raft foundation is applied for many types of structures. It is a solution, which has economic advantages, low cost of materials and low labor costs in comparison to other foundation types like shallow foundations and deep foundations (pile foundation).

Based on the literature research can be stated, that the mathematical description of the problem does not exist, which would consider the interdependence and interaction between slab, pile and soil and would base on the nonlinear behavior load-settlement.

The possibility of utilizing of the Meyer-Kowalow method has been verified for the description of the interaction between single combined pile raft foundation and soil with consideration of nonlinear settlement. For this purpose, many experimental test loads of this foundations have been carried out in the laboratory. The results have been used for verification of the mathematical model. Based on the results of the research a mathematical model for practical purposes has been proposed, which can be used for engineering calculations.

The conducted research has confirmed the thesis of this work:

- a) due to the pressure under the slab increases the skin friction of the single combined pile raft foundation in comparison to a pile foundation without a slab.
- b) the M-K method can be used (now used just for single piles) for description of interdependence between single combined pile raft foundation and soil.



