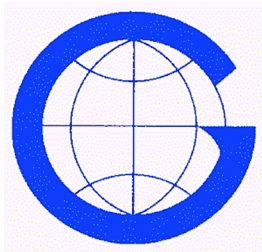


Wydział Budownictwa i Architektury

Katedra Geotechniki



mgr inż. Krzysztof Żarkiewicz

**ANALIZA FORMOWANIA SIĘ OPORU POBOCZNICY
PALA W GRUNTACH NIESPOISTYCH
NA PODSTAWIE MODELOWYCH BADAŃ
LABORATORYJNYCH**

Rozprawa doktorska

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

Szczecin, 2017 r.

SPIS TREŚCI

SPIS TREŚCI	1
OZNACZENIA I JEDNOSTKI.....	3
1. WSTĘP.....	6
1.1. Wprowadzenie	6
1.2. Uzasadnienie podjęcia badań.....	7
2. CEL TEZA i ZAKRES PRACY	10
2.1. Cel pracy	10
2.2. Teza pracy	10
2.3. Zakres pracy	10
3. ANALIZA LITERATURY Z ZAKRESU OPORU PODSTAWY I POBOCZNICY PAŁA.....	12
3.1. Metody określenia oporu poboczniczy i podstawy pała	12
3.2. Metody analizy krzywej osiadania	20
3.3. Badania terenowe i laboratoryjne formowania się oporu na poboczniczy pała .	31
3.4. Podsumowanie opisu literatury	34
4. PROGRAM BADAŃ	38
5. BADANIA ANALITYCZNE	39
5.1. Opis matematyczny krzywej M-K.....	39
5.2. Wpływ parametrów modelu M-K na kształt krzywej aproksymującej	43
5.3. Interpretacja fizyczna parametrów krzywej M-K.....	46
5.4. Opis rozkładu krzywej osiadania na krzywą oporu podstawy i krzywą oporu poboczniczy pała	48
5.5. Podsumowanie badań analitycznych	49
6. BADANIA EKSPERYMENTALNE	52
6.1. Próbné obciążenia pali w warunkach laboratoryjnych	52
6.1.1. Opis badań.....	52

6.1.2.	Przygotowanie stanowiska i badania towarzyszące	53
6.1.3.	Próbnne obciążenia pali w warunkach laboratoryjnych z pomiarem oporu pod podstawą pala. Pierwsza część badań.....	57
6.1.4.	Standardowe próbnne obciążenia pali w warunkach laboratoryjnych. Druga część badań	59
6.1.5.	Próbnne obciążenia pali, bez oporu poboczniczy. Trzecia część badań.....	61
6.2.	Badania fotogrametryczne.....	62
6.2.1.	Opis badań.....	62
6.2.2.	Przygotowanie stanowiska i badania towarzyszące	63
6.2.3.	Interpretacja wyników badań symulacyjnych	65
6.3.	Podsumowanie badań eksperymentalnych	73
7. SFORMUŁOWANIE ZALEŻNOŚCI ANALITYCZNYCH PARAMETRÓW		
	KRZYWEJ M-K.....	75
7.1.	Aproksymacja wyników próbnnych obciążeń statycznych.....	75
7.2.	Analiza parametrów krzywej Meyera-Kowalowa	79
7.3.	Określenie oporu na poboczniczy na podstawie wyników próbnego obciążenia statycznego	83
7.4.	Określenie wpływu współzależności oporu poboczniczy i podstawy pala.....	86
7.5.	Aplikacja danych z badań terenowych do modelu M-K i otrzymanych zależności	87
7.6.	Podsumowanie sformułowanych zależności analitycznych	91
8. ZASTOSOWANIE WYNIKÓW BADAŃ I ANALIZ DO PROJEKTOWANIA		
	PALI RZECZYWISTYCH.....	93
9. WNIOSKI		
101		
BIBLIOGRAFIA		
110		
SPIS RYSUNKÓW		
110		
SPIS TABEL		
113		
SPIS ZAŁĄCZNIKÓW		
114		

OZNACZENIA I JEDNOSTKI

Litery łacińskie

- A_b – powierzchnia podstawy pala [m^2],
- A_{si} – powierzchnia poboczniczy pala w i-tej warstwie [m^2],
- C – parametr krzywej osiadania [mm/kN],
- C_1 – parametr krzywej oporu podstawy pala [mm/kN],
- $C_1^{(Chin)}$ – współczynnik kierunkowy prostej $s/N=f(s)$ w metodzie Chin-Kondnera [$1/\text{kN}$],
- $C_2^{(Chin)}$ – wyraz wolny prostej $s/N=f(s)$ w metodzie Chin-Kondnera [mm/kN],
- $C_1^{(Decourt)}$ – współczynnik kierunkowy prostej na wykresie $s/N=f(s)$ w metodzie Decourta [$1/\text{kN}$],
- $C_2^{(Decourt)}$ – wyraz wolny prostej $s/N=f(s)$ w metodzie Decourta [mm/kN],
- $C_1^{(Hansen)}$ – współczynnik kierunkowy prostej na wykresie $\frac{\sqrt{s}}{N}=f(s)$ według kryterium Hansena,
- $C_2^{(Hansen)}$ – wyraz wolny prostej $\frac{\sqrt{s}}{N}=f(s)$ według kryterium Hansena,
- c_u – wytrzymałość gruntu na ścinanie bez odpływu poniżej podstawy pala [kPa],
- D – średnica pala [m],
- E – moduł sprężystości trzonu pala [MPa],
- E_q, E_p – moduł odkształcenia gruntu pod podstawą pala [MPa],
- f_1 – graniczna wartość składowych stycznych naprężeń na poboczniczy pala [kPa],
- H – zagłębienie pala w gruncie [m],
- K – współczynnik parcia gruntu na pobocznicy pala [-],
- K_0 – współczynnik parcia spoczynkowego gruntu [-],
- M-K - metoda aproksymacji wyników próbnego obciążenia statycznego Meyera-Kowalowa,
- q' – efektywna wartość składowej pionowej naprężenia w gruncie od nadkładu w poziomie posadowienia podstawy pala [kPa],
- q_1 – graniczna wartość składowej pionowej naprężenia pod podstawą pala [kPa],

$\overline{q_c}$ –	uśredniony, jednostkowy opór pod stożkiem sondy CPT na poziomie podstawy pała [kPa],
$\overline{q_{ci}}$ –	uśredniony, jednostkowy opór pod stożkiem sondy CPT w i-tej warstwie [kPa],
q_p –	jednostkowy opór pod podstawą pała [kPa],
N_1 –	opór pod podstawą pała [kN],
N_2 –	siła przyłożona w głowicy pała [kN],
$N_{80\%}$ –	nośność pała wg kryterium Hansena [kN],
$N_{i,pom}$ –	pomierzone obciążenie pała w i-tym stopniu obciążenia [kN],
$N_{i,obl}$ –	obliczone obciążenie pała w i-tym stopniu obciążenia [kN],
N_{gr} –	nośność graniczna pała, przy której pał osiada w sposób niekontrolowany [kN],
$N_{gr}^{(Chin)}$ –	nośność graniczna pała w metodzie Chin-Kondnera [kN].
$N_{gr}^{(Decourt)}$ –	nośność graniczna pała w metodzie Decourta [kN],
$N_{gr,1}$ –	nośność graniczna podstawy pała, graniczny opór pod podstawą pała [kN],
$N_{gr,2}$ –	nośność graniczna pała, graniczna siła przyłożona w głowicy pała [kN],
N_q –	współczynnik nośności [-],
$R_{b,d}$ –	obliczeniowa nośność podstawy pała [kN],
$R_{b,k}$ –	charakterystyczna nośność podstawy pała [kN],
$R_{c,d}$ –	obliczeniowa nośność pała [kN],
$R_{c,k}$ –	charakterystyczna nośność pała [kN],
$R_{s,d}$ –	obliczeniowa nośność pobocznic pała [kN],
$R_{s,k}$ –	charakterystyczna nośność pobocznic pała [kN],
s –	osiadanie pała [mm],
s_{dop} –	dopuszczalne osiadanie pała [mm],
$s_{i,obl}$ –	obliczeniowe osiadanie pała przy obciążeniu N_i [mm],
$s_{i,pom}$ –	pomierzone osiadanie pała w i-tym stopniu obciążenia [mm],
s_{∞} –	końcowe osiadanie pała, matematycznie dążące do nieskończoności [mm],
T –	sumaryczny opór na pobocznic pała [kN],
T_{∞} –	opór na pobocznic pała odpowiadający osiadaniom s_{∞} [kN],

Litery greckie

α –	współczynnik adhezji [-],
β –	współczynnik interakcji pomiędzy gruntem i pobocznica pala [-],
δ –	kąt tarcia na powierzchni kontaktowej pobocznica-grunt [°],
κ –	bezwymiarowy parametr krzywej osiadania w metodzie M-K [-],
κ_1 –	bezwymiarowy parametr krzywej oporu podstawy pala w metodzie M-K [-],
λ –	współczynnik zależny od geometrii pala [-],
σ_1 –	składowa pionowa naprężenia pod podstawą pala [kPa],
σ'_m –	średni opór na pobocznicy pala [kPa],
σ'_v –	efektywna wartość składowych pionowych naprężenia w gruncie [kPa],
τ –	jednostkowy opór na pobocznicy pala [kPa],
τ_i –	jednostkowy opór na pobocznicy pala w i-tej warstwie [kPa],
τ_m –	średnia składowa styczna efektywnego naprężenia geostatycznego na długości pala [kPa],
ϕ –	kąt tarcia wewnętrznego gruntu [°],
Ψ_1 –	współczynnik nośności podstawy pala [-],
Ψ_2 –	współczynnik nośności pobocznicy pala [-],

1. WSTĘP

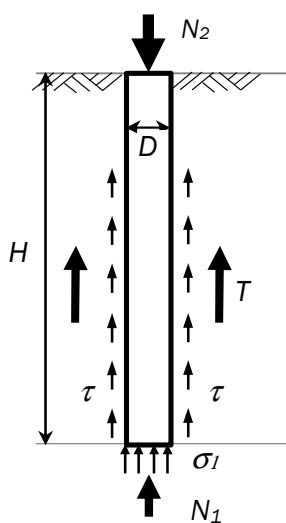
1.1. WPROWADZENIE

Wzrost gospodarczy powoduje, że nowoprojektowane obiekty budowlane mają coraz bardziej złożoną konstrukcję. Ze względu na nierównomierne rozłożenie obciążeń wywołanych skomplikowaną konstrukcją, przekazanie tych sił na podłoże gruntowe również się komplikuje. Okazuje się wówczas, że grunt nie jest w stanie przenieść tak dużych obciążeń przy posadowieniu bezpośrednim. Podobne zjawisko ma miejsce także w przypadkach, gdy wymaga się, aby obiekt był posadowiony na terenach podmokłych, gdzie zalegają grunty słabe. Rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie pali. Pale z dużym powodzeniem były stosowane od wieków. Początkowo stosowanie tego rodzaju fundamentów opierało się głównie na doświadczeniach praktycznych, ale już wtedy znano podstawową zasadę współpracy pala z podłożem gruntowym, która polega na przekazywaniu przyłożonego obciążenia przez opór gruntu na pobocznicy i pod podstawą pala. Nowe doświadczenia, obserwacje i badania doprowadziły do powstania metod obliczeniowych, umożliwiających określenie nośności pali. Najczęściej nośność pala określa się na podstawie wartości oporów pobocznicy i podstawy pala w stanie granicznym, obliczonymi na podstawie wyników badań podłoża gruntowego. W stanie granicznym obserwowane są bardzo duże osiadania o znacznych i często gwałtownych przyrostach. Osiadanie pala jest skutkiem przyłożonego obciążenia w głowicy, a ponadto jest ściśle związane z wartością stanu naprężenia powstałego na pobocznicy i pod podstawą pala. Naprężenia te rosną wraz z przykładanym obciążeniem do wartości granicznej. Próbné obciążenie statyczne umożliwia określenie związku pomiędzy obciążeniem, a osiadaniami głowicy pala. Współpraca pala z podłożem gruntowym opiera się na dwóch stanach granicznych: stan graniczny nośności i stan graniczny użytkowalności (osiadanie). Obecnie podczas projektowania pali bardzo często pomija się, lub lekceważy osiadanie pala. Znajomość osiadań pala jest bardzo ważna, ponieważ określa nie tylko wartość siły przyłożonej w głowicy, ale jest również niejako wyznacznikiem granicznej wartości nośności pala. Jedną z najbardziej popularnych,

a jednocześnie najbardziej pewną metodą weryfikacji nośności pala jest próbne obciążenie statyczne. Badanie to opiera się na analizie zależności obciążenie-osiadanie pala. Interpretacja zbioru danych $\{N_i; s_i\}$ umożliwia sprawdzenie czy nośność pala jest wystarczająca oraz czy osiadanie pala nie przekracza wartości dopuszczalnej. Nośność pala w stanie granicznym nie może być wyłącznym elementem w projektowaniu pala. Dwa pale o jednakowej nośności granicznej mogą osiadać zupełnie inaczej. Wpływ na to ma różny charakter krzywej osiadania. W związku z tym, w projektowaniu pali ważne jest nie tylko określenie nośności granicznej pala, ale także określenie krzywej osiadania pala. Prawidłowe określenie przebiegu krzywej osiadania jest dość trudne ze względu na jednoczesną pracę dwóch mechanizmów - oporu gruntu pod podstawą i oporu gruntu na poboczniczy pala. Opory te mają różne wartości i zmieniając stan naprężenia w podłożu gruntowym w różny sposób oddziałują na siebie. Osiadanie pala jakie obserwuje się podczas próbnego obciążenia statycznego jest skutkiem oporu zmobilizowanego na poboczniczy i pod podstawą pala. Zagadnienie to jest przedmiotem niniejszej rozprawy doktorskiej.

1.2. UZASADNIENIE PODJĘCIA BADAŃ

Osiowa siła wciskająca przyłożona do głowicy pala, rozkłada się w podłożu gruntowym na sumę dwóch sił składowych: opór gruntu na poboczniczy i opór gruntu pod podstawą pala, zgodnie z ogólnym schematem rozkładu sił przedstawionym na rys. 1.



Rys. 1. Schemat współpracy pala z podłożem gruntowym

$$N_2 = N_1 + T \quad (1)$$

Nośność pała oblicza się na podstawie nośności pobocznicy i nośności podstawy pała (1). W praktyce inżynierskiej nośność pobocznicy i podstawy pała określa się oddzielnie na podstawie granicznych wartości oporów wyznaczonych na podstawie wyników badań podłoża gruntowego. Każda siła mniejsza od wartości granicznej przyłożona w głowicy pała powoduje powstanie konkretnej wartości ustabilizowanego osiadania. Wówczas istnieje możliwość przedstawienia tej zależności w postaci tzw. krzywej osiadania. Ponadto korzystając z równania (1), istnieje możliwość uzależnienia oporu zmobilizowanego na pobocznicy i pod podstawą pała od powstałego osiadania. Otrzymuje się wówczas dwie kolejne krzywe: krzywą oporu pobocznicy pała $T(s)$ oraz krzywą oporu podstawy pała $N_1(s)$. Zgodnie z zasadą superpozycji suma dwóch krzywych jest krzywą obciążenie-osiadanie pała.

Znajomość rozkładu siły w trzonie pała podczas próbnego obciążenia statycznego umożliwia określenie formowania się oporu na pobocznicy i pod podstawą pała wraz z osiadaniem głowicy pała.

Podczas projektowania, rozkład nośności na pobocznice i podstawę pała określa się na podstawie parametrów podłoża gruntowego. Określa się wówczas oddzielnie nośność pobocznicy i nośność podstawy pała. Opory obliczone w ten sposób dotyczą wartości granicznych, czyli zmobilizowanych przy bardzo dużych osiadaniach. W warunkach eksploatacyjnych pała, dla których osiadania są ograniczone, może okazać się, że rozkład oporów jest zupełnie inny. Opisano to równaniem (2)

$$\frac{N_1(s_{dop})}{T(s_{dop})} \neq \frac{N_1(s_{\infty})}{T(s_{\infty})} = \frac{N_{gr,1}}{T_{\infty}} \quad (2)$$

Zróżnicowanie rozkładu oporów podczas próbnego obciążenia pała jest wynikiem różnicy w szybkości mobilizacji oporu na pobocznicy i pod podstawą pała wraz z osiadaniem pała. Poznanie tego zjawiska było przedmiotem badań naukowych i analiz przeprowadzonych w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej.

Pomimo wielu badań na temat współpracy pała z podłożem gruntowym zagadnienie mobilizacji oporów na pobocznicy i pod podstawą pała wraz z osiadaniem jest wciąż mało rozpoznane. Brak jest jednoznacznej teorii powszechnie akceptowanej w tym zakresie. Badania takie wymagają ogromnych nakładów finansowych, a mimo to nie gwarantują wyprowadzenia ogólnych zależności opisujących różne pale. Wiąże się to

z dużą zmiennością podłoża gruntowego. Badania w skali laboratoryjnej pozwalają na dokładniejszy pomiar badanych wartości i ograniczenie liczby zmiennych mających wpływ na wynik pomiaru. Problemem w badaniach modelowych pozostaje prawidłowe przeniesienie otrzymanych zależności na pale rzeczywiste.

Badania prowadzone zarówno w Katedrze Geotechniki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu w Szczecinie, jak i inne badania prowadzone w Polsce i na świecie dowodzą, że opór na pobocznicę w większości przypadków jest mobilizowany szybciej niż opór pod podstawą. W związku z tym można stwierdzić, że odgrywa on główną rolę w zakresie obciążeń użytkowych tj. przy małych przemieszczeniach głowicy pala.

Aby warunki eksploatacyjne pracy pala w podłożu gruntowym odpowiadały założeniom projektowym, należy uwzględnić mobilizację oporu pobocznicę i podstawy pala wraz z osiadaniem. Dzięki takiej analizie możliwe będzie bardziej dokładne określenie nośności projektowej pala oraz oszacowanie zapasu nośności w warunkach eksploatacyjnych.

W dostępnej literaturze brak jest jednoznacznej tezy, która byłaby powszechnie akceptowana, a która wyjaśniałaby mechanizm formowania się stanu naprężenia na pobocznicę i pod podstawą pala wraz z osiadaniem, aż do stanu naprężenia granicznego.

2. CEL TEZA I ZAKRES PRACY

2.1. CEL PRACY

Celem pracy jest analiza mechanizmów formowania się oporu poboczniczy pala w gruntach niespoistych, na podstawie laboratoryjnych badań eksperymentalnych.

Zbiór danych obciążenie-osiadanie $\{N_i; s_i\}$ uzyskany z próbnych obciążeń statycznych, przeprowadzonych na palach modelowych w skali laboratoryjnej umożliwi określenie aproksymowanej krzywej osiadania modelu Meyera i Kowalowa [36]. Uzyskane parametry krzywych osiadania umożliwią analizę zależności mających wpływ na kształtowanie się krzywej oporu poboczniczy pala w stosunku do osiadania głowicy pala.

2.2. TEZA PRACY

Tezę pracy sformułowano następująco:

Istnieje możliwość określenia, z dostateczną do celów praktycznych dokładnością, formowania się oporów na poboczniczy pala wraz z osiadaniem, na podstawie próbnego obciążenia statycznego pala.

2.3. ZAKRES PRACY

Zakres pracy obejmuje:

- analizę krzywych opisujących zjawisko obciążenie-osiadanie pala na podstawie literatury;
- badania eksperymentalne związków obciążenie-osiadanie pala wraz z pomiarem naprężenia w podstawie pala;
- wybór modelu opisującego statyczne obciążenie pala;
- sformułowanie mechanizmu opisującego zmianę oporu poboczniczy i oporu podstawy pala;

- analizę wyników badań eksperymentalnych w celu uzyskania praktycznych związków umożliwiających obliczenie parametrów krzywej M-K;
- badania fotogrametryczne;
- opracowanie wzorów pozwalających na praktyczne wykorzystanie opracowanego modelu współpracy pala z gruntem;
- wnioski.

3. ANALIZA LITERATURY Z ZAKRESU OPORU PODSTAWY I POBOCZNICY PALA

3.1. METODY OKREŚLENIA OPORU POBOCZNICY I PODSTAWY PALA

W wyniku oddziaływania podstawy pala na grunt, pod podstawą pala powstaje opór w postaci siły wciskającej. Wartość tego oporu zależy od nośności gruntu. W ogólnym przypadku opór pod podstawą można obliczyć korzystając z równania (3) [12],

$$q_p = q' N_q \leq q_1 \quad (3)$$

gdzie:

q_p – jednostkowy opór pod podstawą pala [kPa],

q' – efektywna składowa pionowa naprężenia od nakładu w poziomie podstawy pala [kPa],

N_q – współczynnik nośności [-],

q_1 – graniczna wartość naprężenia pod podstawą pala [kPa] określany na podstawie tabeli 1.

a w przypadku gruntów spoistych z równania (4).

$$q_p = 9c_u \leq q_1 \quad (4)$$

gdzie:

c_u – wytrzymałość na ścinanie bez odpływu gruntu poniżej podstawy pala [kPa].

Przykładowe dane do obliczeń nośności podstawy pali w gruntach niespoistych przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry obliczeniowe oporu podstawy i poboczniczy pali wbijanych w gruntach niespoistych [63]

Rodzaj gruntu	Zagęszczenie	N_q -	q_1 [MPa]	f_1 [kPa]	δ [°]
piasek piasek pylasty pył	bardzo luźny luźny średniozagęszczony	8	1,9	48	15
piasek piasek pylasty pył	luźny średniozagęszczony zagęszczony	12	2,9	67	20

Rodzaj gruntu	Zagęszczenie	N_q -	q_1 [MPa]	f_1 [kPa]	δ [°]
piasek piasek pylasty	średniozagęszczony zagęszczony	20	4,8	81	25
piasek piasek pylasty	zagęszczony bardzo zagęszczony	40	9,6	96	30
żwir piasek	zagęszczony bardzo zagęszczony	50	12	115	35

Istnieje wiele propozycji przyjmowania współczynników N_q do fundamentów palowych, podają je między innymi Meyerhof [44], Gwizdała, Jacobsen [15] [18], Terzaghi [54], Berezansev i inni [2]. Zalecane przedziały wartości współczynnika N_q w zależności od kąta tarcia wewnętrznego gruntu podano w tabeli 2.

Tabela 2. Współczynnik nośności podstawy pała w zależności od kąta tarcia wewnętrznego gruntu [3]

Rodzaj gruntu	ϕ [°]	N_q [-]
ił	25-30	3-30
pył	28-34	20-40
piasek	32-40	30-150
żwir	35-45	60-300

Jednostkowe opory gruntu pod podstawą pała przyjmuje się na podstawie stanu i rodzaju gruntu jak w przypadku normy PN-B-02482:1983 [64], czy też bezpośrednio na podstawie wyników sondowań CPT [65].

Opór powstający na pobocznicy jest zjawiskiem dużo bardziej złożonym. Wartość oporu uzależniona jest m. in. od składowej poziomej parcia gruntu, szorstkości pobocznicy pała, wytrzymałości na ścinanie gruntu, zróżnicowania warstw podłoża gruntowego, a także od zmiany stanu gruntu spowodowanej wykonaniem pała.

Ogólne metody określania oporu na pobocznicy przedstawia Fellenius [7] i Gwizdała [12]. Pierwsza grupa metod dotyczy pali pogrążonych w gruntach spoistych, gdzie parametrem wiodącym podłoża gruntowego jest wytrzymałość gruntu na ścinanie bez odpływu c_u .

Jednostkowy opór na pobocznicy pała, można określić na podstawie równania (5) [7].

$$\tau = \alpha c_u \leq f_1 \quad (5)$$

gdzie:

- τ – jednostkowy opór na pobocznicy pala [kPa],
- f_1 – graniczna wartość oporu na pobocznicy pala [kPa] określany na podstawie tabeli 1,
- α – współczynnik adhezji [-].

W pracy Gwizdały [12] można znaleźć zbiór propozycji dotyczących przyjmowania parametru α w zależności od rodzaju pala, szorstkości powierzchni pobocznicy pala, długości pala i ciśnienia prekonsolidacji gruntów w otoczeniu pala. Parametr α przyjmuje wartości od 0,1 do 1,0.

Kolejna metoda obejmuje określenie jednostkowego oporu na pobocznicy pala w funkcji składowej pionowej naprężenia w podłożu gruntowym zgodnie z równaniem (6) [12].

$$\tau = K \operatorname{tg} \delta \sigma'_v = \beta \sigma'_v \leq f_1 \quad (6)$$

gdzie:

- τ – jednostkowy opór na pobocznicy pala [kPa],
- K – bezwymiarowy współczynnik parcia gruntu na pobocznice pala [-],
- δ – efektywny kąt tarcia pomiędzy gruntem i poboczną pala [°],
- σ'_v – efektywna wartość składowych pionowych naprężenia w gruncie [kPa],
- β – bezwymiarowy współczynnik interakcji pomiędzy gruntem i poboczną pala [-].

Trudnością w określeniu jednostkowych składowych stycznych naprężenia na pobocznicy pala jest prawidłowe przyjęcie współczynnika K i kąta tarcia gruntu na pobocznicy pala δ lub zastępczego współczynnika β . Współczynnik K , może przyjmować wartości od odpowiadającej parciu czynnemu do wartości oporu. Jednostkowy opór na pobocznicy obliczony na podstawie różnych współczynników parcia może się różnić nawet 20 krotnie. Meyerhof [44] zasugerował, aby do pali wierconych w gruntach spoistych normalnie skonsolidowanych jako współczynnik K przyjąć współczynnik parcia spoczynkowego zgodnie z równaniem (7).

$$K = K_0 = 1 - \sin \phi' \quad (7)$$

gdzie:

- ϕ' – efektywny kąt tarcia wewnętrznego gruntu [°].

W przypadku gruntów prekonsolidowanych równanie (7) należy skorygować o współczynnik prekonsolidacji OCR.

$$K = K_0 = (1 - \sin \phi') \sqrt{OCR} \leq 3 \quad (8)$$

gdzie:

OCR – współczynnik prekonsolidacji [-].

Dla pali wierconych współczynnik parcia zbliżony jest do parcia spoczynkowego i wynosi od $K \approx 0,35$ w piaskach zagęszczonych do $K \approx 0,50$ w piaskach luźnych [12]. Tomlinson [55] dodatkowo uzależnił współczynnik parcia K od technologii wykonania pali, zgodnie z tabelą 3.

Tabela 3. Wartość współczynnika parcia gruntu w zależności od technologii wykonania pala [55]

Technologia wykonania pala	K [-]
pale wbijane, duże przemieszczenia gruntu	$(1,0 - 2,0)K_0$
pale wbijane, małe przemieszczenia gruntu	$(0,75 - 1,25)K_0$
pale wiercone, wykonane w gruncie	$(0,7 - 1,0)K_0$
pale wciskane	$(0,5 - 0,7)K_0$

gdzie: K_0 – parcie spoczynkowe gruntu zgodnie z równaniem (8).

Kąt tarcia gruntu na powierzchni pobocznicy zależy przede wszystkim od szorstkości powierzchni. Współczynnik tarcia określony jako $\tan \delta$ może przyjmować wartości od 0 do 1. W przypadku tarcia gruntu o powierzchnię pala wydaje się być słuszne uzależnienie współczynnika tarcia gruntu od kąta tarcia wewnętrznego gruntu. Przy gładkiej powierzchni pobocznicy (np. pale stalowe) poślizg gruntu następuje na powierzchni kontaktowej pobocznica-grunt. Wówczas kąta tarcia na powierzchni pobocznicy jest odpowiednio pomniejszany. W przypadku bardzo szorstkiej pobocznicy (pale betonowe wykonywane w gruncie) przekroczenie składowych ścinających naprężenia wynika z przekroczenia tych składowych naprężenia w gruncie, zgodnie z równaniem Coulomba-Mohra. W związku z tym, uznaje się, że kąt tarcia gruntu na powierzchni pala nie może przekroczyć wartości kąta tarcia wewnętrznego gruntu. Propozycję określania kąta tarcia pomiędzy pobocznica, a gruntem przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Zależność kąta tarcia wewnętrznego gruntu na powierzchni pobocznicy pala [55]

Rodzaj powierzchni kontaktowej, pobocznica-grunt	δ
gładka, stal-piasek	$(0,5 - 0,7) \phi'$
szorstka, stal-piasek	$(0,7 - 0,9) \phi'$
gładka, beton-piasek	$(0,8 - 1,0) \phi'$
szorstka, beton-piasek	$1,0 \phi'$
drewno-piasek	$(0,8 - 0,9) \phi'$

gdzie: ϕ' – efektywny kąt tarcia wewnętrznego gruntu.

W podejściu tym wartość $tg\delta$ wynosi od około 0,1 do 0,9. Fellenius [7] podaje wartości współczynnika $\beta = tg\delta$ w zależności od rodzaju gruntu, pomijając szorstkość powierzchni pobocznicy i technologię wykonania pala.

Tabela 5. Przybliżone wartości współczynnika β [7]

Rodzaj gruntu	$\phi [^\circ]$	$\beta [-]$
ił	25-30	0,25-0,35
pył	28-34	0,24-0,50
piasek	32-40	0,30-0,60
żwir	35-45	0,35-0,80

Podobne zależności uzyskał Krasieński w modelowych badaniach laboratoryjnych gładkich pali umieszczonych w gruntach niespoistych, podczas których otrzymał współczynnik $\beta \approx (0,2 - 0,3)$ [12].

W metodzie Lambda λ średni opór pobocznicy określany jest na podstawie zarówno informacji o naprężeniu geostatycznym w podłożu gruntowym jak i wytrzymałości gruntu na ścinanie w warunkach bez odpływu, zgodnie z równaniem (9).

$$\tau_m = \lambda(\sigma'_m + 2c_{um}) \leq f_1 \quad (9)$$

gdzie:

τ_m – średni opór na pobocznicy pala [kPa],

λ – bezwymiarowy współczynnik zależny od geometrii pala [-],

σ'_m – średnie efektywne naprężenia geostatyczne na długości pala [kPa],

c_{um} – średnia wytrzymałość na ścinanie bez odpływu gruntu na długości pala [kPa].

Tabela 6. Przybliżone wartości współczynnika λ [7]

Zagłębienie pała [m]	0	3	7	15	23	30	60
λ [-]	0,50	0,36	0,27	0,22	0,17	0,15	0,12

W nawiązaniu do polskiej normy [64] zarówno graniczne wartości oporu gruntu pod podstawą jak i na pobocznicy pała zestawiono w tabeli w zależności od stanu i rodzaju gruntu. Opory pod podstawą pała wynoszą od $q_p = 250$ kPa w pyłach piaszczystych w stanie miękkoplastycznym do $q_p = 7750$ kPa w bardzo zagęszczonych żwirach i pospółkach. Opory te osiągane są na głębokości nie mniejszej niż 10 m dla pała o średnicy 0,4 m. Opory na pobocznicy pała wynoszą od $\tau = 0$ kPa w miękkoplastycznych namulach do $\tau = 165$ kPa w bardzo zagęszczonych żwirach i pospółkach. Jednostkowe opory pobocznicy o wskazanych przez normę wartościach osiągane są na głębokości nie mniejszej niż 5 m p.p.t.

Jednostkowe opory na pobocznicy i pod podstawą pała mogą być również określane na podstawie wyników sondowania CPT. Najważniejszym parametrem jest w tym przypadku opór pod stożkiem sondy q_c . Wówczas jednostkowy opór na pobocznicy określany jest z równania (10), zaś jednostkowy opór pod podstawą pała z równania (11).

$$\tau_i = \frac{\overline{q_{ci}}}{\psi_2} \quad (10)$$

$$q_p = \overline{q_c} \psi_1 \quad (11)$$

gdzie:

τ_i – jednostkowy opór na pobocznicy pała w i-tej warstwie [kPa],

q_p – jednostkowy opór pod podstawą pała [kPa],

$\overline{q_c}$ – uśredniony, jednostkowy opór pod stożkiem sondy CPT na poziomie podstawy pała [kPa],

$\overline{q_{ci}}$ – uśredniony, jednostkowy opór pod stożkiem sondy CPT w i-te warstwie [kPa],

ψ_2 – współczynnik nośności pobocznicy pała [-],

ψ_1 – współczynnik nośności podstawy pała [-].

Istnieje wiele propozycji przyjmowania współczynników ψ_1 , ψ_2 w zależności od rodzaju pała, technologii wykonania i wyników sondowania CPT. Współczynnik ψ_1

przyjmuje wartości przeważnie od 0,1 do 1,0, zaś współczynnik ψ_2 przyjmuje wartości od 100 do 300. Sondowanie CPT polega na wciskaniu sondy z pomiarem oporu pod stożkiem i na tulei sondy. Jest to badanie, które bardzo dobrze odzwierciedla warunki pracy pala w stanie granicznym. Bardziej szczegółowe omówienie współczynników nośności w różnych metodach obliczeniowych podaje Gwizdała [12], Fellenius [7], Tomlinson i Woodward [56].

Przedstawione powyżej metody dotyczą określania jednostkowych oporów na poboczniczy i pod podstawą pala przyjmowanych do obliczenia nośności pala. Na nośność pala składa się suma jednostkowego oporu gruntu na poboczniczy i pod podstawą pala pomnożonych przez pole oddziaływania zgodnie z równaniem (12).

$$R_{c,k} = R_{b,k} + R_{s,k} = A_b q_b + \sum_{i=1}^n A_{si} \tau_i \quad (12)$$

gdzie:

$q_b = q_p$ – jednostkowy opór pod podstawą pala [kPa],

τ_i – jednostkowy opór na poboczniczy pala w i -tej warstwie [kPa],

A_b – pole powierzchni podstawy pala [m²],

A_{si} – pole powierzchni poboczniczy pala w i -tej warstwie [m²].

W Polsce duży wkład w naukowe rozpoznanie współpracy pali z podłożem gruntowym ma Gwizdała [12], który na podstawie szerokiej bazy wyników próbnych obciążeń pali podaje metody określenia nośności pali wykonanych w różnych technologiach. Wiodące badania terenowe pali przeprowadził Krasiński [26], który wykorzystując zestaw do pomiaru odkształceń trzonu pala podczas próbnego obciążenia statycznego, określił zasady współpracy pali przemieszczeniowych w podłożu gruntowym. W literaturze zagranicznej dostępna jest bardzo duża liczba opracowań dotyczących nośności pali, między innymi Salgado [31][47], Fellenius [7][9], White [59][29], Prezzi [47][53][49]. Autorzy analizują metody określania oporów na poboczniczy i pod podstawą pala, związki parametrów podłoża gruntowego z nośnością pala, a także badania pali naturalnych w terenie i modelowych w skali laboratoryjnej. Wartości oporów obliczone na podstawie proponowanych równań dotyczą wartości granicznych, dla których autorzy nie podają wartości osiadań. Można przypuszczać, że dotyczą one przypadków dla których mamy do czynienia z niekontrolowanym i nieograniczonym osiadaniem. Na rysunku 1 i w przedstawionej powyżej interpretacji

podkreślono, że nie bez znaczenia jest osiadanie pala. Związki takie można przedstawić w postaci równań (13-14).

$$\sigma_1 = \sigma_1(s) \quad (13)$$

$$\tau = \tau(s) \quad (14)$$

gdzie:

σ_1 – składowa pionowa naprężenia pod podstawą pala [kPa],

τ – składowa styczna naprężenia na pobocznic pal [kPa],

s – osiadanie głowicy pala [mm].

Zjawisko mobilizacji składowych stycznych naprężenia na pobocznic i naprężenia ściskającego pod podstawą pala można interpretować za pomocą funkcji transformacyjnych. W metodzie tej pal dzieli się na skończoną liczbę sprężystych elementów określających geometrię i charakteryzujących właściwości materiału pala i otaczającego podłoża gruntowego. Współpraca podłoża gruntowego w poszczególnych węzłach określona jest przez nieliniowe charakterystyki współpracy, funkcje transformacyjne t - z do pobocznic pal i q - z do podstawy pala. Interpretacja polega na iteracyjnym znalezieniu zależności pomiędzy obciążeniem a osiadaniem pala w danym węźle [12]. Dokładność obliczeń opiera się na poprawnym przyjęciu postaci funkcji transformacyjnych. Propozycje funkcji transformacyjnych zaproponowanych przez różnych autorów zestawiał Gwizdała [12].

Zarówno naprężenie pod podstawą pala jak i składowe styczne naprężenia na pobocznic pal zależą od osiadań pala. Uważa się, że składowa pionowa naprężenia pod podstawą pala i składowe styczne naprężenia na pobocznic wpływają na siebie. Składowe styczne naprężenia zmobilizowane na pobocznic pal podczas próbnego obciążenia przekazywane są na otaczający grunt zmieniając stan naprężenia gruntu poniżej poziomu podstawy pala, wpływając tym samym na graniczny opór podstawy pala. W obliczeniach często pomija się to oddziaływanie, ze względu na dość trudne jego określenie. Brakuje niestety informacji o tym, czy naprężenie zmobilizowane pod podstawą pala wpływa na wartość składowych stycznych naprężenia na pobocznic pal, i jeśli tak, to w jaki sposób. Próbę określenia tych zależności podjęli m in. Salgado, Tehrani Prezzi, Han, Tovar, Castro [53], White, Bolton [60],[59], [58] w badaniach modelowych. Badania wskazują, że naprężenie powstające na pobocznic pal powoduje ugięcie warstw podłoża gruntowego. Ugięcie to przeciwdziała wyparciu gruntu spod

podstawy pala, tworząc strefę gruntu aktywnie ściskanego obejmującego podstawę pala i dolną część pobocznicy pala, zgodnie z koncepcją Meyerhofa [45]. Oznacza to, że istnieje związek pomiędzy składową styczną naprężenia na pobocznicy i składową pionową naprężenia pod podstawą pala. W niniejszej rozprawie podjęto próbę określenia zależności pomiędzy składowymi stycznymi naprężenia na pobocznicy i składową pionową naprężenia pod podstawą pala.

Ocena nośności pala opiera się na określeniu składowych równania (12). Konieczna jest znajomość geometrii pala, technologii wykonania, a także parametrów podłoża gruntowego. Pale najczęściej stosuje się w dość złożonych warunkach gruntowych, w których mamy do czynienia ze zróżnicowaniem warstw i parametrów podłoża gruntowego. To decyduje o tym, że określenie oporu pobocznicy jest dość skomplikowane.

Jedną z powszechnie stosowanych metod projektowania pali jest metoda opisana w polskiej normie palowej [64]. Opiera się ona na określeniu jednostkowych oporów na pobocznicy i pod podstawą pala jako funkcji rodzaju i stanu gruntu.

3.2. METODY ANALIZY KRZYWEJ OSIADANIA

Głównym zadaniem badania statycznego jest sprawdzenie, czy osiadanie pala przy projektowanym obciążeniu, nie przekroczy wartości dopuszczalnej. Krzywa osiadania pala uzyskana na podstawie wyników próbnego obciążenia statycznego zawiera w sobie wiele cennych informacji. Analizując przebieg krzywej osiadania, istnieje możliwość określenia granicznej wartości siły jaką można obciążyć pał. Wiele z tych metod opiera się na matematycznych lub graficznych podejściach. Najbardziej powszechnymi metodami analizy krzywej osiadania pala są metody: Chin-Kondnera, Hansena, De Beera, Davissona, Decourta i Mazurkiewicza.

Metody te umożliwiają określenie granicznej nośności pala, która nie zawsze jest jednakowo interpretowana. W niektórych metodach za nośność graniczną uznaje się wartość obciążenia, określoną przez asymptotę pionową do ekstrapolowanego wykresu osiadania pala. Według Felleniusa [8] nośność obliczona w wyniku ekstrapolacji nie powinna być podstawą do określenia współczynnika bezpieczeństwa nośności pala. Nie mniej jednak ekstrapolacja wykresu umożliwia sprawdzenie założeń obliczeniowych

w stanie granicznym. W innych metodach, nośność graniczna jest wartością siły, przy której obserwuje się wyraźne zagięcie krzywej osiadania, co odpowiada znacznym przyrostom osiadania w stosunku do stałych przyrostów obciążenia. Wartość tej nośności określa się najczęściej w granicach obciążenia stosowanego podczas próbnego obciążenia statycznego.

Metody analizy krzywej osiadania opierają się przeważnie na analizie pochodnej do krzywej osiadania w danym punkcie.

Ekstrapolacja metodą Chin-Kondnera opiera się na przedstawieniu pochodnej do krzywej osiadania w postaci równania liniowego [7].

$$s = \frac{NC_2^{(Chin)}}{1 - NC_1^{(Chin)}} \quad (15)$$

$$N_{gr}^{(Chin)} = \frac{1}{C_1^{(Chin)}} \quad (16)$$

gdzie:

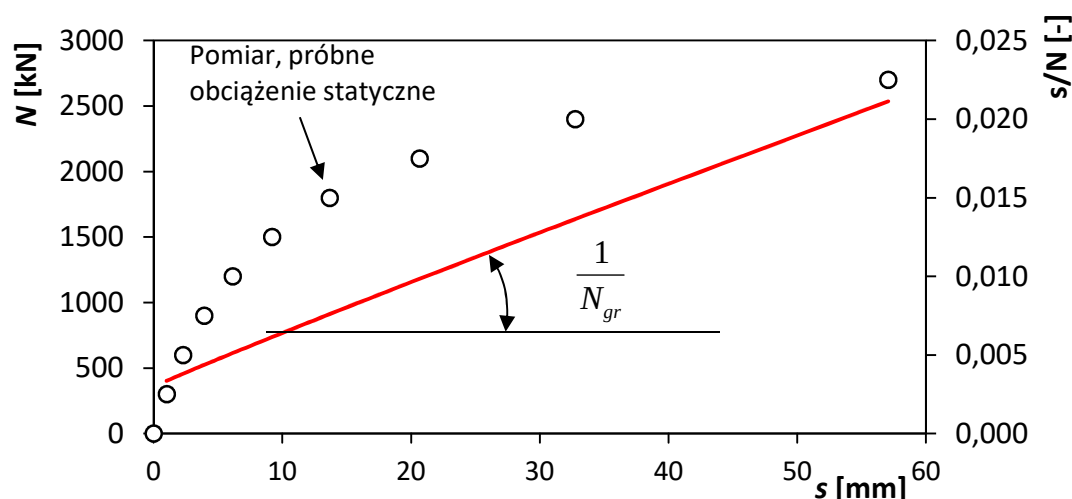
N – siła przyłożona w głowicy pala [kN],

S – osiadania głowicy pala [mm],

$N_{gr}^{(Chin)}$ – nośność graniczna pala [kN],

$C_1^{(Chin)}$ – współczynnik kierunkowy prostej na wykresie $s/N=f(s)$ [1/kN],

$C_2^{(Chin)}$ – wyraz wolny prostej $s/N=f(s)$ [mm/kN].



Rys. 2. Ekstrapolacja nośności granicznej metodą Chin-Kondnera

Nośność graniczna pala, którego wyniki próbnego obciążenia przedstawiono na rys. 2 jest odwrotnością współczynnika kierunkowego prostej (linia czerwona). W tym przypadku wynosi ona 3153 kN.

Decourt zaproponował metodę ekstrapolacji krzywej osiadania opierając się na liniowej zależności obciążenia podzielonego przez osiadanie pala w stosunku do obciążenia pala [7].

$$N = \frac{sC_2^{(Decourt)}}{1 - sC_1^{(Decourt)}} \quad (17)$$

$$N_{gr}^{(Decourt)} = \frac{C_2^{(Decourt)}}{C_1^{(Decourt)}} \quad (18)$$

gdzie:

N – siła przyłożona w głowicy pala [kN],

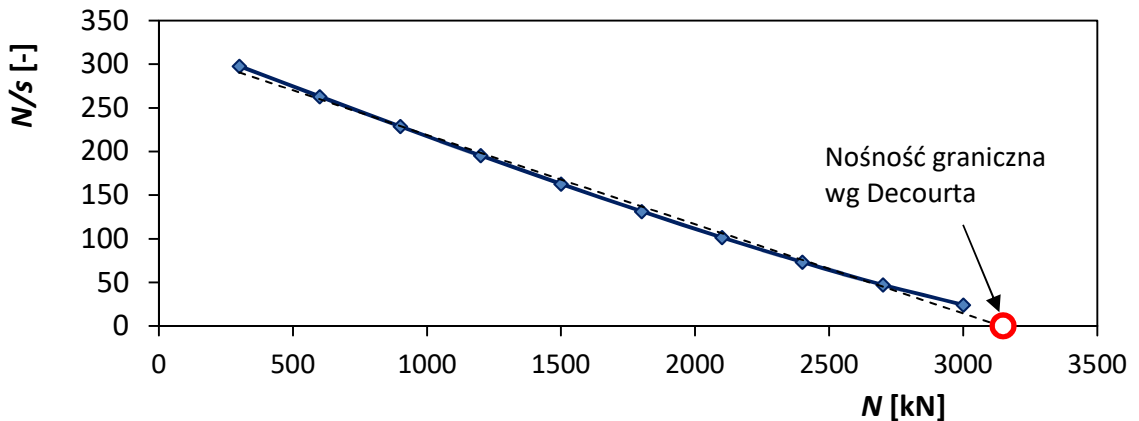
s – osiadania głowicy pala [mm],

$N_{gr}^{(Decourt)}$ – nośność graniczna pala (obciążenie przy nieskończonym osiadaniu; $s \rightarrow \infty$) [kN],

$C_1^{(Decourt)}$ – współczynnik kierunkowy prostej na wykresie $s/N=f(s)$ [1/kN],

$C_2^{(Decourt)}$ – wyraz wolny prostej $s/N=f(s)$ [mm/kN].

Nośność graniczna analizowanego pala według metody Decourta wynosi 3144 kN.



Rys. 3. Ekstrapolacja metodą Decourta

Nośność obliczona metodą Decourta jest w tym przypadku zaledwie 9 kN mniejsza od nośności wg Chin-Kondnera. Analiza powyższą metodą umożliwia prognozowanie nośności granicznej podczas próbnego obciążenia statycznego.

Metoda Davissona opiera się na odkształceniach sprężystych pala oraz wartości osiadania, przy której mobilizowana jest pełna nośność pala.

Skrócenie pala obliczane jest na podstawie równania (19),

$$\Delta = \frac{NL}{AE} \quad (19)$$

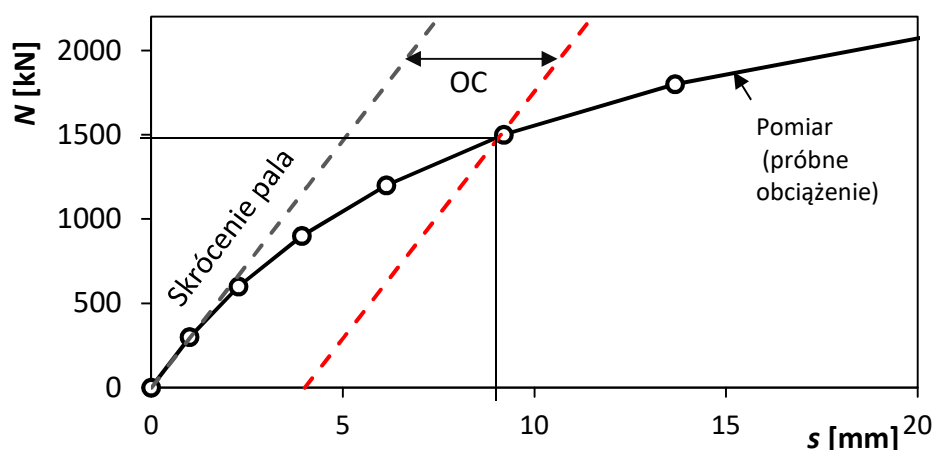
zaś przesunięcie określa równanie (20).

$$OC = 4 + \frac{D}{120} \quad [\text{mm}] \quad (20)$$

gdzie oznaczenie do wzorów (19) i (20):

- N – siła przyłożona w głowicy pala [kN],
- L – długość pala [m],
- E – moduł sprężystości trzonu pala [MPa],
- A – powierzchnia przekroju pala [m²],
- D – średnica pala [m].

Przecięcie krzywej osiadania i linii prostej przesuniętej równolegle o wartość offsetu obliczonego z równania (20) określa nośność pala. Nie jest to, tak jak w poprzednich metodach, nośność, przy której obserwowane są nieskończone osiadania. Nośność ta oznacza siłę, która może być podstawą do określenia projektowanej nośności pala.



Rys. 4. Określenie nośności pala metodą Davissona

Nośność rozpatrywanego pala według Decourta wynosi 1495 kN. Jest to ponad dwukrotnie mniej niż nośność graniczna określona przez asymptotę pionową. Wyznaczona nośność dotyczy także akceptowalnych osiadań. Problemem w stosowaniu tej metody jest prawidłowe określenie modułu sprężystości pala. Ponadto aby wykorzystać tę metodę konieczne jest określenie krzywej w zakresie umożliwiającym wyznaczenie punktu przecięcia, zgodnie z rys. 4.

Metoda Hansena pozwala na określenie 80% nośności pala. W metodzie tej należy wykreślić wykres pomocniczy, na którym określa się współczynniki w przybliżeniu prostego odcinka [1].

$$N = \frac{\sqrt{s}}{C_1^{(Hansen)} s + C_2^{(Hansen)}} \quad (21)$$

$$N_{80\%} = \frac{1}{2\sqrt{C_1^{(Hansen)} C_2^{(Hansen)}}} \quad (22)$$

gdzie:

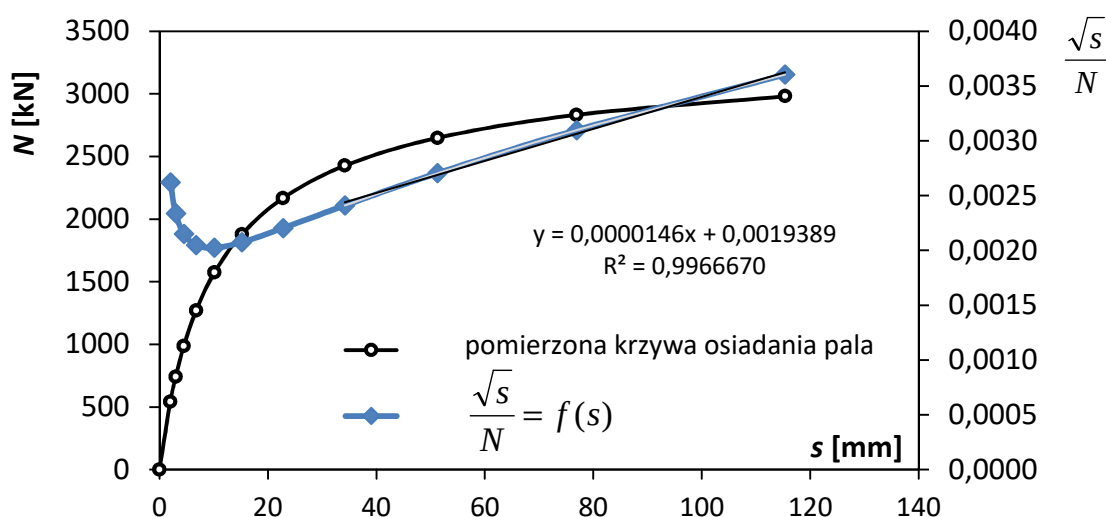
N – siła przyłożona w głowicy pala [kN],

s – osiadania głowicy pala [mm],

$N_{80\%}$ – nośność pala wg kryterium Hansena [kN],

$C_1^{(Hansen)}$ – współczynnik kierunkowy prostej na wykresie $\frac{\sqrt{s}}{N} = f(s)$,

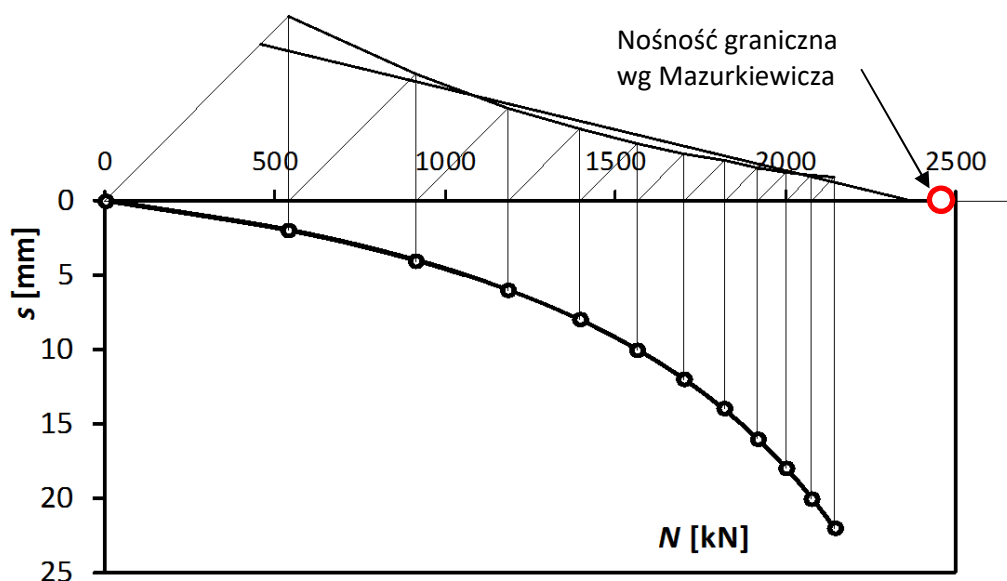
$C_2^{(Hansen)}$ – wyraz wolny prostej $\frac{\sqrt{s}}{N} = f(s)$.



Rys. 5. Nośność pala według kryterium 80 % Hansena

Nośność graniczna pala, według kryterium Hansena wynosi 2972 kN. Metoda ta stosowana jest przeważnie przy analizie próbnych obciążeń statycznych przeprowadzonych do siły bliskiej nośności granicznej pala.

Mazurkiewicz zaproponował metodę opartą na graficznym rozwiązaniu, w którym linia utworzona przez przecięcia punktów określonych przez siły w równych odstępach osiadań i liniami pod kątem 45 stopni, przecina się z osią poziomą w punkcie nośności granicznej. Metoda jest słuszna w odniesieniu do pali obciążanych do siły, przy której obserwuje się znaczący przyrost osiadań. Nośność obliczona tą metodą wynosi 2350 kN.



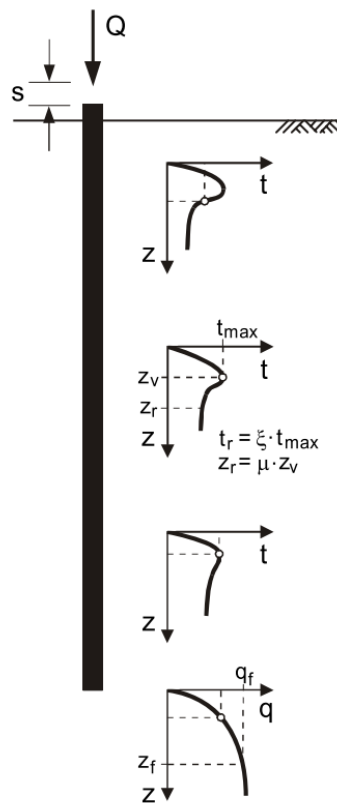
Rys. 6. Graniczna nośność wg metody Mazurkiewicza

Krzywa osiadania powstaje w wyniku analizy jednoczesnego oporu gruntu na pobocznicy i pod podstawą pała. Można zatem stwierdzić, że szczegółowa analiza krzywej osiadania powinna umożliwić uzyskanie informacji o oporze zmobilizowanym na pobocznicy i pod podstawą pała.

Przedstawione powyżej metody umożliwiają określenie nośności pała, która może być podstawą do wyznaczenia współczynnika bezpieczeństwa. Według analizy przeprowadzonej przez Abdelrahmana, Shaarawi, Abouzaida na ponad 60 pałach ekstrapolacje metodą China, Mazurkiewicza i Decourta są najwygodniejszymi metodami pozwalającymi na uzyskanie zadowalających rezultatów. Średnie współczynniki bezpieczeństwa obliczone na podstawie wyników z wyżej przedstawionych 5 metod wahają się od 2 do 2,9 [1].

Odminną metodą analizy zależności obciążenie-osiadanie pała jest metoda funkcji transformacyjnych. Metoda ta umożliwia skonstruowanie krzywej osiadania pała na podstawie znajomości funkcji określających zależności pomiędzy jednostkowym oporem pobocznic lub podstawy pała, a przemieszczeniem rozpatrywanego węzła trzonu pała. Metoda polega na podziale pała na elementy, o danej geometrii i rodzaju materiału. Każdy element pod wpływem obciążenia przemieszcza się zgodnie z funkcją $t-z$ (w odniesieniu do elementów trzonu pała) i $q-z$ (w odniesieniu do podstawy pała), co odzwierciedla się w postaci mobilizacji oporu w danym elemencie. Rozwiązanie wymaga iteracyjnych obliczeń, które prowadzą do uzyskania stanu równowagi przy odpowiednim

rozkładzie oporów w danym stopniu obciążenia pala. Funkcje transformacyjne mogą mieć różną postać matematyczną; są nimi m. in. funkcje liniowe, wykładnicze, hiperboliczne, a także paraboliczne. Istnieje wiele propozycji postaci funkcji transformacyjnych t - z i q - z , a także przyjmowania warunków brzegowych. Zebrano je w pracy Gwizdały [12]. Metoda ta w bardzo dobry sposób odzwierciedla stan mobilizacji jednostkowego oporu w rozpatrywanym punkcie trzonu pala. W związku z tym istnieje możliwość dokonania analizy odcinków pala, w których występują duże zapasy oporu tarcia w stosunku do wartości maksymalnej oraz miejsc, w których opór ten został już przekroczony. Niemniej jednak wiarygodność tej metody zależy od prawidłowej oceny wszystkich parametrów opisujących funkcje t - z i q - z , a błędne założenie parametrów wejściowych prowadzi do znacznych rozbieżności w wynikach.



Rys. 7. Model obliczeniowy sprężystego pala oraz funkcje transformacyjne t - z i q - z [13]

Kolejną metodą pozwalającą na przeprowadzenie analizy wyników próbnego obciążenia statycznego jest metoda krzywej aproksymującej zaproponowanej przez Meyera i Kowalowa w 2010 r. [36]. W metodzie tej zbiór punktów $\{N_i; s_i\}$ aproksymuje się funkcją w postaci równania (23).

$$s_{i,obl} = C \frac{N_{gr}}{\kappa} \left[\left(1 - \frac{N_{i,pom}}{N_{gr}} \right)^{-\kappa} - 1 \right] \quad (23)$$

gdzie:

C - parametr krzywej osiadania [mm/kN],

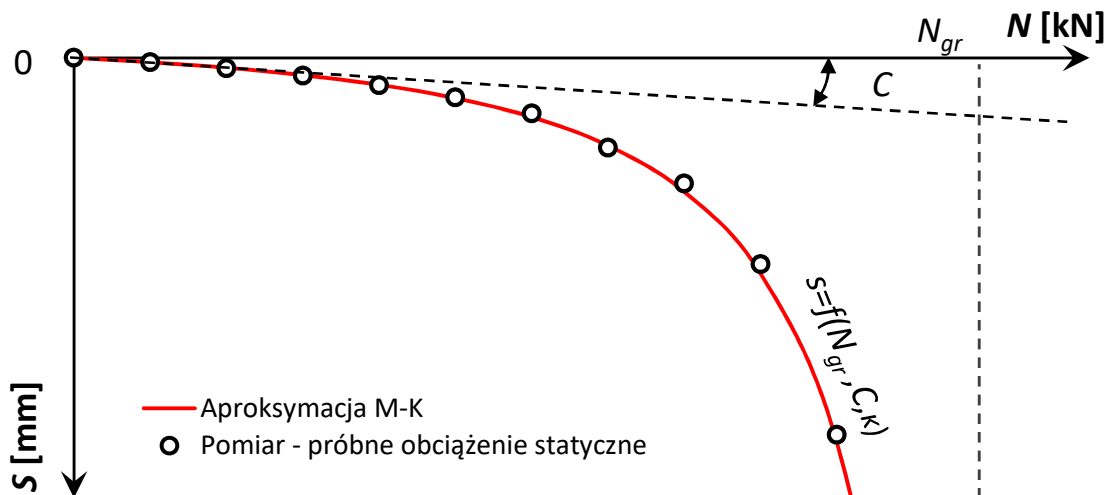
N_{gr} - nośność graniczna pala, przy której pal osiada w sposób niekontrolowany [kN],

κ - bezwymiarowy parametr krzywej osiadania [-],

$N_{i,pom}$ - przyłożona siła w głowicy w i-tym stopniu obciążenia [kN],

$s_{i,pom}$ - pomierzone osiadanie głowicy pala w i-tym stopniu obciążenia [mm].

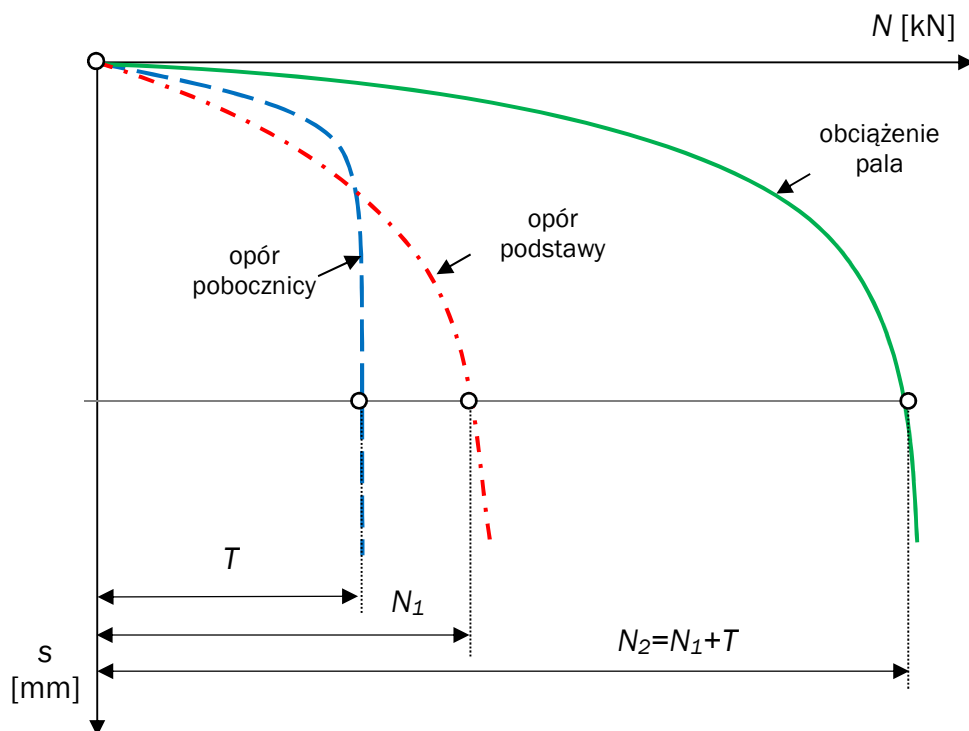
Aproksymacja metodą Meyera-Kowalowa (metoda M-K) polega na wyznaczeniu trzech parametrów równania (23). Jednym z nich jest nośność graniczna pala N_{gr} . Odpowiada ona obciążeniu, przy którym obserwuje się bardzo duże i niekontrolowane osiadania, dążące do nieskończoności. Stała C jest pochodną funkcji w punkcie zerowym, gdy $s=0$ mm i $N=0$ kN, i oznacza ona początkowe nachylenie krzywej aproksymującej. Bezwymiarowy parametr κ odpowiada za kształt krzywej i określa się nim szybkość zbliżania się przyłożonej siły do nośności granicznej przy stałym przyroście osiadania. Propozycje określenia parametrów krzywej M-K opisał Szmechel [40],[38],[52]. Wyniki aproksymacji umożliwiają ekstrapolację krzywej osiadania uzyskanej z próbnego obciążenia statycznego. Znajomość dalszego kształtu krzywej pozwala na prognozowanie osiadań w większym zakresie obciążenia, często trudnym do osiągnięcia w terenie. Wyniki próbnego obciążenia wraz z aproksymowaną krzywą przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8. Wyniki próbnego obciążenia i ich aproksymacja krzywą M-K

Metoda Meyera-Kowalowa różni się od poprzednich podejść do aproksymacji. Do określenia nośności granicznej nie jest potrzebne wyznaczanie

dodatkowych wykresów pomocniczych jako stosunku obciążenia i osiadania. Metoda ta skupia się na matematycznej aproksymacji wyników próbnego obciążenia statycznego i interpretacji parametrów krzywej aproksymującej. Jednym z tych parametrów jest nośność graniczna, która określa się asymptotą pionową do krzywej osiadania. Jest to siła, której praktycznie nie da się przekroczyć podczas próbnego obciążenia statycznego. Kolejnym parametrem jest parametr C opisujący w przybliżeniu liniową zależność osiadania przy małych obciążeniach. Parametr ten może być porównywany z odwrotnością współczynnika Winklera. Szmechel [52] udowodnił, że dla każdego zbioru wyników próbnego statycznego obciążenia pała $\{N_i, s_i\}$ istnieje jeden zbiór parametrów krzywej M-K: C , N_{gr} i κ określany metodą najmniejszej sumy kwadratów odchylek (statystycznie), którym opisuje się przebieg osiadania pała w całym zakresie obciążenia. Mając to na uwadze, posłużyłem się tym modelem do określenia mobilizacji oporu pobocznic pała wraz z osiadaniem. Krzywa osiadania pała jest złożeniem dwóch krzywych, krzywej odpowiadającej za opór gruntu na pobocznicę i krzywej oporu podstawy pała, zgodnie z rys. 9.



Rys. 9. Rozkład krzywej osiadania pała na opór podstawy i pobocznic pała

Charakter przyrostu naprężenia na pobocznicę i pod podstawą pała wraz z osiadaniem głowicy pała nie jest jednakowy. Maksymalny opór pobocznic mobilizowany jest już przy niewielkim osiadaniu. Po osiągnięciu maksymalnej wartości

opór ten nie zawsze jest stały. Może zdarzyć się, że opór pobocznicy po osiągnięciu maksymalnej wartości zaczyna maleć, przy wciąż rosnącym oporze gruntu pod podstawą pala. W związku z tym, procentowy rozkład oporów w stanie granicznym może być zupełnie inny niż przy obciążeniu pala odpowiadającemu dopuszczalnemu osiadaniu. Przyjęcie, za każdym razem, jednakowych współczynników bezpieczeństwa w odniesieniu do oporu podstawy i pobocznicy pala może wiązać się z dużym niedoszacowaniem nośności pala. Ma to dość duże znaczenie, ponieważ niejednokrotnie okazuje się, że większy udział w przekazywaniu obciążenia w warunkach eksploatacyjnych ma pobocznica pala. Ze względu na duże udziały pobocznicy w przekazywaniu obciążenia przyłożonego w głowicy pala, krzywa oporu pobocznicy pala w stosunku do osiadania głowicy ma bardzo duże znaczenie w kształtowaniu się krzywej osiadania. Krzywa oporu pobocznicy pala w początkowym zakresie obciążenia przyjmuje zależność w przybliżeniu liniową, po której następuje wyczerpanie nośności pobocznicy lub nawet redukcja oporów. W krzywej osiadania odzwierciedla się to wyraźnym zagięciem, które powoduje powstanie znacznych i gwałtownie narastających przyrostów osiadania w kolejnych stopniach obciążenia. Przy osiadaniach, w których pobocznica wyczerpuje swoją nośność, nośność podstawy wciąż jest znacznie mniejsza od nośności w stanie granicznym, a zatem pal ma jeszcze duży zapas nośności. Problemem jest wówczas znaczne osiadanie, które może spowodować awarię konstrukcji. Na tej podstawie można stwierdzić, że najważniejszym elementem w projektowaniu pali jest dokładne określenie nośności pobocznicy pala.

Na rysunku 10 przedstawiono dwie przykładowe koncepcje rozkładu oporów mobilizowanych na pobocznicy i pod podstawą pala wraz z osiadaniem głowicy pala. Na obu wykresach przedstawiono pal, którego nośność obliczono z poniższego równania:

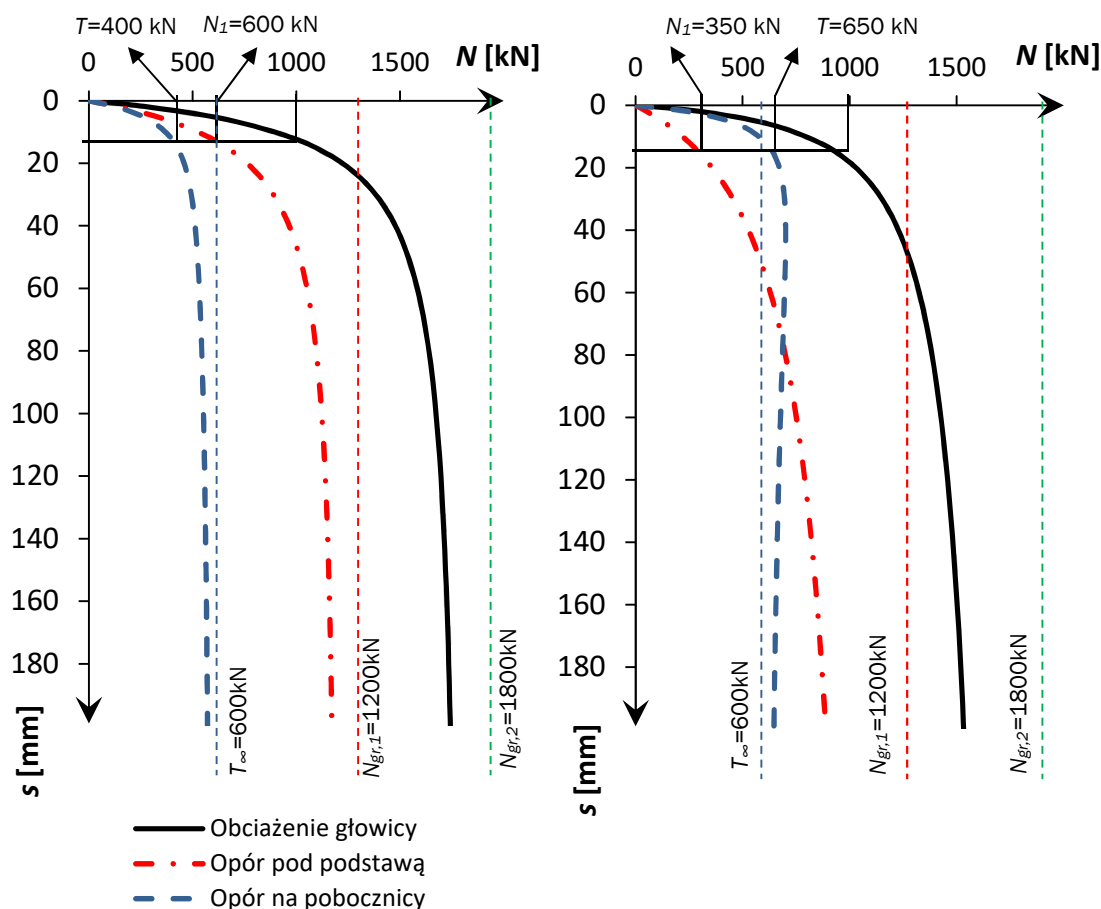
$$R_{c,d} = R_{b,d} + R_{s,d} = 1200 + 600 = 1800 \text{ kN} \quad (24)$$

gdzie:

$R_{c,d}$ – obliczeniowa nośność pala [kN],

$R_{b,d}$ – obliczeniowa nośność podstawy pala [kN],

$R_{s,d}$ – obliczeniowa nośność pobocznicy pala [kN].



Rys. 10. Przykładowe krzywe rozkładu oporów na pobocznicę i podstawę pała wraz z osiadaniem

Na podstawie równania (24) można stwierdzić, że udział pobocznicy w przekazywaniu obciążenia w stanie granicznym wynosi 33%. Przy założeniu, że nośność projektowana pała wynosi 1000 kN, ze względu na możliwy różny przebieg osiadania pała, rozkład oporów może być zupełnie inny. Przedstawiono to na rysunku 10. W pierwszym przypadku udział pobocznicy w nośności projektowanej pała wynosi 40%, a udział podstawy pała 60 %, zaś w drugim przypadku jest zupełnie odwrotnie: udział pobocznicy wynosi 65 %, a udział podstawy 35 %.

3.3. BADANIA TERENOWE I LABORATORYJNE FORMOWANIA SIĘ OPORU NA POBOCZNICY PALA

W ostatnich latach silnie rozwinął się przemysł elektroniczny, a wraz z nim powstały nowe instrumenty pomiarowe, które umożliwiają pomiar naprężenia na pobocznicy i pod podstawą pala na wiele różnych sposobów. Obecnie, badania rozkładu oporów na pobocznicy i pod podstawą pala stają się coraz bardziej powszechne. Dostępność aparatury pomiarowej umożliwiła przeprowadzenie głębszej analizy nad rozkładem oporów na pobocznicy i podstawą pala. Wraz z rozwojem technologii wykonywania pali wzrosło zapotrzebowanie na bardziej dokładne, naukowe określenie sposobu współpracy pali z podłożem gruntowym. Metody te opierają się na określeniu granicznych oporów gruntu na pobocznicy i pod podstawą pala w zależności od warunków gruntowych, geometrii i technologii wykonania pala. Lepsza dostępność aparatury pomiarowej i szybki rozwój technik wykonywania pali powoduje, że zagadnienie nośności pala jest wciąż aktualne. Ze względu na wiele wątpliwości dotyczących rzeczywistego rozkładu oporów podczas próbnego obciążenia statycznego, powinny być one dalej rozwijane.

Analiza wyników próbnych obciążeń statycznych pali była przedmiotem badań naukowców zarówno polskich (Meyer [37], Gwizdała, Krasiński, Dyka [14] i inni), jak i zagranicznych (Fleming [11], England [4], Salgado, Prezzi [47] i inni). Dotyczą one interpretacji próbnych obciążeń statycznych pali, określenia ich nośności oraz prowadzenia badań z wykorzystaniem nowoczesnych technik pomiarowych.

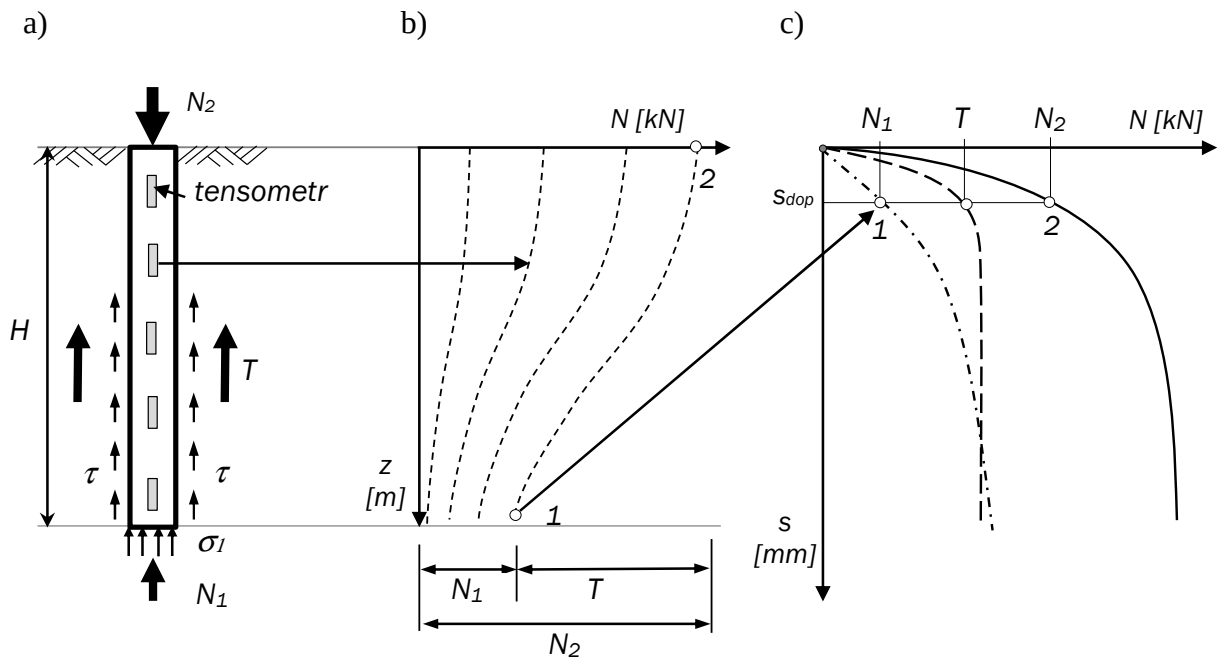
Duża liczba wyników próbnych obciążeń pali umożliwia przeprowadzenie analiz statystycznych, a te z kolei pozwalają na usystematyzowanie wyników dla różnych technologii wykonania pali i różnych warunków gruntowych. Zagadnieniem tym zajmował się m.in. Gwizdała, który usystematyzował aktualną wiedzę o palach w książce: *Fundamenty palowe* [12]. W książce tej zawarte są: technologie wykonywania pali z przykładami realizacji w różnych branżach budownictwa; charakterystyka przekazywanych obciążeń wraz z wyznaczeniem sił w palach z uwzględnieniem oddziaływania pala z podłożem gruntowym, metody obliczeń nośności pionowej pali w kontekście metod stosowanych w Polsce i na świecie.

W ostatnich latach, próbne obciążenia statyczne są udoskonalane poprzez stosowanie różnego rodzaju instrumentów pomiarowych zbierających dodatkowe dane, które głównie dotyczą rozkładu obciążenia na pobocznice i podstawę pala. Metody badań pali zostały opisane w pracy Gwizdały. Pozycja ta zawiera między innymi: metody projektowania pali według Eurokodu 7, badania statyczne i dynamiczne pali, metody interpretacji wyników badań, badania z wykorzystaniem dodatkowym instrumentów pomiarowych umożliwiającymi lepsze poznanie charakterystyki współpracy pala w podłożu gruntowym.

W Polsce duży wkład w badania pali z zastosowaniem nowoczesnych technik pomiarowym ma Krasiński, który przeprowadził badania terenowe próbnymi obciążeniami statycznymi kolumn przemieszczeniowych z zastosowaniem czujników ekstensometrycznych umożliwiającymi określenie rozkładu odkształceń trzonu kolumny. Uzyskane wyniki nie zawsze były oczywiste i przewidywalne, a zatem stały się przedmiotem wielu analiz i dyskusji. Badania wskazywały na bardzo duży udział poboczniczy pali w ogólnej nośności, pomimo iż pale były zagłębione w połowie swojej długości w słabych gruntach organicznych.

Za granicą instrumenty pomiarowe mierzące rozkład oporów wzdłuż trzonu pala są stosowane z dużym powodzeniem od lat [10]. Przykładową interpretację wyników próbnego obciążenia oprzyrządowanego pala przedstawiono na rysunku 11.

Jedną z metod, która umożliwia określenie nośności pala, a jednocześnie pozwala na poznanie rozkładu oporów podczas próbnego obciążenia statycznego jest próbne obciążenie pala wyposażonego w komorę Osterberga. Zachowanie pali wyposażonych w komórki Osterberga badali m.in. Osterberg [46], Meyer [37][42], England [5] [6][4], Hayes [19], Fellenius [7]. Komórka Osterberga umożliwia wykonanie próbnego obciążenia od wewnątrz, poprzez rozpychanie pala w dwie strony w kierunku pionowym. W ten sposób możliwe jest określenie nośności pali przy bardzo dużych obciążeniach sięgających nawet kilkunastu meganiutonów oraz oszacowanie udziału poszczególnych części pali w całkowitej nośności pala. Metoda ta umożliwia nie tylko wykonanie próbnego obciążenia bez konieczności wykonania ogromnego stanowiska balastowego, lecz także określenie nośności poszczególnych części pala.



D – średnica pala [m],
 H – zagłębienie pala w gruncie [m],
 s – osiadanie głowicy pala [mm],
 N_2 – siła przyłożona w głowicy pala [kN],
 N_1 – opór pod podstawą pala [kN],
 T – opór na pobocznicę pala [kN],
 σ_l – naprężenie pod podstawą pala [kPa],
 τ – naprężenie styczne na pobocznicę pala [kPa],
 s_{dop} – dopuszczalne osiadanie pala [mm],
 T_∞ – opór na pobocznicę pala przy osiadaniu dążącym do nieskończoności [kN],
 $N_{gr,1}$ – opór pod podstawą pala przy osiadaniu dążącym do nieskończoności [kN],
 $N_{gr,2}$ – nośność graniczna pala osiągnięta przy osiadaniu dążącym do nieskończoności [kN].

Rys. 11. Schemat interpretacji badań terenowych rozkładu sił w trzonie pala podczas próbnego obciążenia statycznego
 a) geometria pala i rozkład sił, b) rozkład sił w trzonie pala w danym stopniu obciążenia, c) rozkład oporów na pobocznicę i pod podstawą pala mobilizowanych wraz z osiadaniem głowicy pala

Ze względu na duże koszty prowadzenia badań w skali naturalnej, a także ze względu na dużą zmienność parametrów podłoża gruntowego w skali naturalnej wiele badań prowadzonych jest na palach modelowych w warunkach laboratoryjnych. Pomimo małej skali, wyniki badań umożliwiają przeprowadzenie dokładniejszych analiz dotyczących m. in. sposobu formowania się oporów na pobocznicę i pod podstawą pala. Badania rozkładu oporów pali modelowych przeprowadzali Krasiński [26], Der-Wen Chang [21]. Wyniki tych badań poprzez analizę osiadania pala zobrazowały zachowanie się pala w gruntach jednorodnych. Innym rodzajem badań są badania symulacyjne odkształcenia ośrodka gruntowego wokół pala. Badania przeprowadzone przez White'a

[59],[58],[29] umożliwiły zobrazowanie przemieszczeń gruntu podczas obciążania pala, co pozwoliło na sprecyzowanie sposobu zniszczenia ośrodka gruntowego w stanie granicznym. Tehrani, Salgado, Prezzi [53] na podstawie badań modelowych określili wpływ szorstkości pobocznicy pala na sposób odkształcenia ośrodka gruntowego przy pobocznicy.

3.4. PODSUMOWANIE OPISU LITERATURY

Na podstawie analizy literatury można stwierdzić, że liczba badań, metod i analiz współpracy pali z podłożem gruntowym jest bardzo duża. Niemniej jednak, ze względu na rosnącą liczbę nowych technologii wykonywania pali, posadowienie obiektów budowlanych w coraz trudniejszych warunkach gruntowych sprawia, że zagadnienie współpracy pali z podłożem wymaga dalszych analiz. Zmienność podłoża gruntowego utrudnia przeniesienie wyników badań na inne pale pomimo wykonania ich w podobnym podłożu gruntowym. W związku z tym wyprowadzenie dokładnej i jednocześnie ogólnej metody, która miałaby zastosowanie w różnych technologiach wykonywania pali i różnych warunkach gruntowych wymaga dalszych prac. Ponadto kolejne badania wskazują, że problem nośności pali, a przede wszystkim mobilizacji oporu na pobocznicy podczas obciążania pala, jest wciąż nierozwiązany.

W literaturze często wymieniane jest pojęcie nośności pala, a w szczególności nośności granicznej. Okazuje się, że wartość ta w wielu przypadkach nie jest tożsama i dotyczy zupełnie innej wartości siły. Przyjmuje się często, że nośność graniczna to nośność odpowiadająca odporowi pala przy osiadaniu równemu 10% średnicy pala. Analizy próbnych obciążeń statycznych wskazują, że pal można obciążać dalej, podkreślono to również w pracy [20]. Praktycznie każdy z autorów metody analizy krzywej osiadania pala podaje sposób określania nośności granicznej. Nośność graniczna wg metody M-K na tle innych nośności granicznych jest większa, dlatego nośność graniczna z innych metod stanowi jedynie nośność umowną i z powodzeniem może być stosowana w rozwiązaniach praktycznych, ale należy podkreślić, że nie jest to nośność określona przez asymptotę pionową w metodzie M-K. Na rozbieżności w stosowaniu definicji nośności granicznej wskazuje Szmechel [51].

Podsumowanie literatury podzielono na trzy główne grupy prac:

- Pierwsza grupa dotyczy prac opisujących metody określenia jednostkowych oporów gruntu na pobocznicę i pod podstawą pala. Metody te są łatwe do zastosowania w praktyce inżynierskiej i umożliwiają określenie nośności pala wynikającej z sumy, obliczonych na podstawie parametrów gruntu i rodzaju pala, oporów na pobocznicę i pod podstawą pala. W metodach tych obliczenia oporu pobocznicy i podstawy pala wykonywane są niezależnie od siebie. Opor pobocznicy wynika w większości przypadków z ogólnego równania II zasady dynamiki Newtona, w którym uwzględniany jest współczynnik tarcia oraz składowa pozioma naprężeń w podłożu gruntowym. Opor podstawy wynika z wytrzymałości gruntu na ścinanie pod podstawą pala. Obliczone opory na pobocznicę i pod podstawą pala uznawane są za wartości graniczne i stanowią odniesienie w dalszym projektowaniu nośności pala. Metody te nie podają natomiast jak wartości te zależą od osiadania pala. Można uznać, że są to wartości graniczne wynikające z wytrzymałości gruntu i dotyczące niekontrolowanych i znacznych osiadań pala. Oznacza to, że są to wartości odpowiadające bardzo dużym osiadaniom, których w praktyce inżynierskiej dopuścić nie można;
- Druga grupa dotyczy terenowych badań eksperymentalnych, w których przy zastosowaniu zaawansowanej aparatury pomiarowej istnieje możliwość określenia redystrybucji naprężeń na długości pala podczas badania próbnego obciążenia statycznego. Obecnie tego typu badania są coraz częściej stosowane. Wyniki tych badań umożliwiają określenie zmian oporu na pobocznicę wraz z osiadaniem. Ponadto istnieje możliwość określenia wartości oporu pobocznicy w rozpatrywanej warstwie gruntu. Badanie to umożliwia uzyskanie wielu cennych informacji o współpracy pala z podłożem gruntowym. Niemniej jednak ze względu na dużą zmienność podłoża gruntowego interpretacja wyników w celu uzyskania ogólnych zależności jest dość złożona i wymaga wykonania wielu badań;
- Trzecia grupa prac dotyczy interpretacji wyników próbnych obciążeń statycznych. Próbné obciążenie statyczne jest sprawdzeniem nośności pala i współpracy pala z gruntem na podstawie analizy zależności obciążenie-osiadanie pala. W wyniku badania uzyskuje się krzywą Q-s. Spośród wymienionych metod dąży się do wyboru tej metody, którą opisuje się związek obciążenie-osiadanie w całym zakresie osiadania tj. od osiadania równego zero do osiadania niekontrolowanego, dążącego do

nieskończoności, zakres od punktu $\{N=0; s=0\}$ do punktu $\{s=\infty; N=N_{gr}\}$. Przedstawione metody umożliwiają określenie nośności granicznej N_{gr} weryfikującej założenia projektowe, ale nie opisują próbnego obciążenia statycznego przy małych obciążeniach. Krzywa osiadania aproksymująca wyniki próbnego obciążenia statycznego powinna spełniać fizyczne warunki modelu współpracy pala z gruntem, a ponadto:

- a) przy małych obciążeniach mamy małe osiadania i związek ten powinien być liniowy (według teorii Boussinesqa). Krzywa $Q-s$ powinna mieć asymptotę ukośną w punkcie $(0,0)$ [35].
- b) przy dużych obciążeniach na wykresie powinna pojawić się asymptota pionowa tzn. krzywa powinna posiadać asymptotę pionową przy $N=N_{gr}$.

Takie warunki spełnia tylko krzywa M-K. Był to główny argument, aby przyjąć krzywą M-K do dalszej analizy. Metoda M-K, która jest jedną z wielu metod interpretacji krzywej osiadania, poprzez interpretację parametrów krzywej aproksymującej może być podstawą do określenia mobilizacji oporu na poboczniczy i pod podstawą pala podczas próbnego obciążenia statycznego. Aby jednak określić jaką informację o rozkładzie oporów zawierają parametry modelu M-K konieczne jest przeprowadzenie badań i analiz.

Istnieją prace, które obejmują całą krzywą osiadania umożliwiając określenie nośności granicznej pala, ale brakuje prac, które rozkładają tę krzywą na opór poboczniczy i podstawy pala. Jest to o tyle ważne, że nośność pala wynikała z sumy oddzielnie obliczonej nośności podstawy i poboczniczy pala.

Inne metody, w których nie zakłada się nośności granicznej jako asymptoty pionowej nie są matematyczną interpretacją krzywej osiadania, a jedynie umowną wartością przydatną do inżynierskiego określenia dopuszczanego obciążenia pala. Dodatkową zaletą metody Meyera-Kowalowa jest lepsze dopasowanie krzywej aproksymującej do punktów pomiarowych ze względu na dodatkowy parametr κ , którym określa się kształt krzywej osiadania pomiędzy asymptotami określonymi przez parametr C i N_{gr} . Kształt krzywej może mieć duży wpływ na sposób formowania się oporu poboczniczy i rozkład sił podczas próbnego obciążenia statycznego. W związku z tym metodę M-K przyjęto jako ogólny opis do dalszej analizy.

Na podstawie analizy literatury stwierdzono, że brak jest analiz mechanizmów formowania się oporu na poboczniczy pala wraz z jego osiadaniem. W związku z tym istnieje potrzeba dalszego rozwijania tego zagadnienia.

Spośród wielu modeli, którymi opisuje się zależność obciążenie-osiadania pala uzyskaną z próbnego obciążenia statycznego pala, w pełnym zakresie obciążenia, istnieje tylko jeden model, który spełnia wszystkie wcześniej wymienione warunki fizyczne:

- przy małych obciążeniach według liniowej teorii Boussinesqa – asymptota ukośna,
- przy dużych obciążeniach bliskich N_{gr} – asymptota pionowa.

Dlatego do dalszej analizy przyjęto model M-K.

4. PROGRAM BADAŃ

W programie badań zakłada się przeprowadzenie badań w dwóch następujących etapach:

1. Badania analityczne krzywej aproksymującej wyniki próbnego obciążenia statycznego pala (krzywa M-K). Analiza krzywej osiadania pala w zależności od zmienności parametrów modelu Meyera-Kowalowa. Określenie metody wyznaczania parametrów krzywej M-K na podstawie zbioru danych $\{N_i; s_i\}$. Analiza wpływu błędów pomiarowych na kształtowanie się parametrów M-K. Określenie związków pomiędzy parametrami, umożliwiającymi przyspieszenie procedury określania parametrów M-K.
2. Badania eksperymentalne, próbných obciążeń pali w gruntach niespoistych, w warunkach laboratoryjnych. Próbne obciążenia mają na celu pozyskanie danych $\{N_i; s_i\}$ umożliwiających określenie parametrów krzywej M-K. Badania prowadzone na palach o różnej średnicy i zagłębieniu w gruncie., Przeprowadzenie badania pala z wykluczeniem udziału pobocznic w przekazywaniu obciążenia, w celu określenia wpływu oporu pobocznic na kształt krzywej osiadania. Przeprowadzenie badań pala wyposażonego w czujnik siły w podstawie pala umożliwiający określenie udziału podstawy w całkowitym oporze pala. Przeprowadzenie badań fotogrametrycznych wciskania pala modelowego, w celu określenie zasięgu oddziaływania podstawy pala podczas jego wciskania.

5. BADANIA ANALITYCZNE

5.1. OPIS MATEMATYCZNY KRZYWEJ M-K

Wyniki próbnego obciążenia statycznego pała w postaci zbioru punktów $\{N_i, s_i\}$ można aproksymować funkcją zaproponowaną przez Meyera i Kowalowa, którą opisuje równanie (25) [43]:

$$s_{obl} = C \frac{N_{gr}}{\kappa} \left[\left(1 - \frac{N_{pom}}{N_{gr}} \right)^{-\kappa} - 1 \right] \quad (25)$$

gdzie:

- C - parametr krzywej osiadania [mm/kN],
- N_{gr} - nośność graniczna pała, przy której pał osiada w sposób niekontrolowany [kN],
- κ - bezwymiarowy parametr krzywej osiadania [-],
- N_{pom} - przyłożona siła w głowicy [kN],
- s_{pom} - pomierzone osiadanie głowicy pała [mm].

Krzywa ta jest ograniczona asymptotą ukośną której współczynnik kierunkowy określony jest przez pochodną funkcji (25) w punkcie (0,0).

$$\frac{ds}{dN} = C \left(1 - \frac{N}{N_{gr}} \right)^{-\kappa-1} \quad (26)$$

W początku układu współrzędnych pochodna ma wartość określoną równaniem (27).

$$\frac{ds}{dN}(N = 0) = C \quad (27)$$

Drugą asymptotą jest asymptotą pionową funkcji (25), przy której pochodna odwrotności funkcji (25) jest równa zero.

$$\frac{dN}{ds} = \frac{1}{C} \left(1 + \frac{\kappa s}{CN_{gr}} \right)^{-1 - \frac{1}{\kappa}} = 0 \quad (28)$$

$$N = N_{gr} \quad (29)$$

W celu określenia krzywej opisanej równaniem (25) należy wyznaczyć trzy parametry C , N_{gr} i κ . Przedstawiona funkcja jest dość skomplikowana i określenie omawianych parametrów może wydawać się dość trudne, ale korzystając z programów numerycznych i uwzględniając związki przedstawione poniżej znalezienie poprawnych trzech wartości znacznie upraszcza się. Metody określenia parametrów krzywej M-K szczegółowo opisał Szmechel [52]. Jedną z nich przedstawiono poniżej.

Parametr C określono na podstawie aproksymacji liniowej pierwszych punktów pomiarowych (w odniesieniu do małych obciążeń) z próbnego obciążenia. Stosując podstawienie:

$$X_i = \frac{N_{gr}}{\kappa} \left[\left(1 - \frac{N_{i,pom}}{N_{gr}} \right)^{-\kappa} - 1 \right] \quad (30)$$

oraz wymuszając równość osiadań pomierzonych i obliczonych do danego stopnia obciążenia:

$$s_{i,pom}(N_i) = s_{i,obl}(N_i) \quad (31)$$

parametr C można obliczyć statystycznie metodą najmniejszych kwadratów odchylek z zależności (32) [39]:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^4 \left(s_{i,pom} \cdot X_i \right)}{\sum_{i=1}^4 X_i^2} \quad (32)$$

Na podstawie powyższych zależności, parametr C uzależniono od parametru κ oraz nośności granicznej N_{gr} . Znając wartości osiadań pomierzonych istnieje możliwość obliczenia stosunków dwóch kolejnych osiadań:

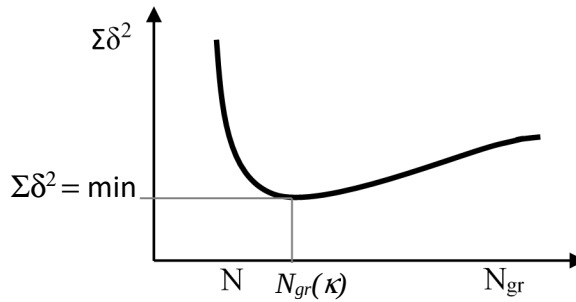
$$Y_{i,pom} = \frac{S_{i+1,pom}}{S_{i,pom}} \quad (33)$$

Wstawiając obliczone wartości do wzoru (33) stosunek ten przyjmie postać (34).

$$Y_{i,obl} = \frac{\left(1 - \frac{N_{i+1,pom}}{N_{gr}}\right)^{-\kappa} - 1}{\left(1 - \frac{N_{i,pom}}{N_{gr}}\right)^{-\kappa} - 1} \quad (34)$$

W celu uzyskania równania (36) przy zastosowaniu metody najmniejszych kwadratów odchyłek, wyznaczono nośności graniczne przy wybranych wartościach parametru κ , dla których spełniony został warunek określonym równaniem (35) i przedstawiony na rysunku 12 [39]:

$$\sum_{i=1}^{n-1} \delta^2 = (Y_{i,pom} - Y_{i,obl})^2 = \min \quad (35)$$

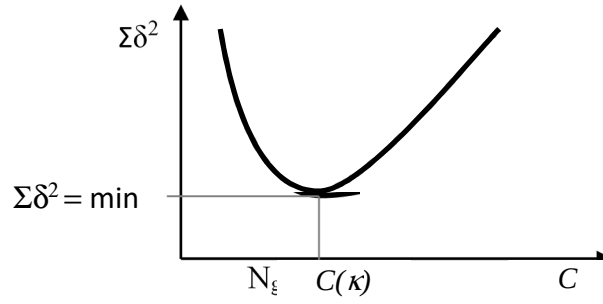


Rys. 12. Warunek minimalnych odchyłek do wyznaczenia N_{gr} przy założonej wartości κ

Do wyznaczonego zbioru danych $\{N_{gr}, \kappa\}$ stosując regresję liniową wyznaczono stałe a i b zależności (36) [40]:

$$N_{gr} = a\kappa + b \quad (36)$$

Przy określaniu wartości N_{gr} określono także wartość stałej C odpowiadającej danej wartości κ , przy spełnieniu równania (35). Otrzymano wówczas, podobnie jak w przypadku N_{gr} , optymalną wartość C . Przedstawiono to na rysunku 13.

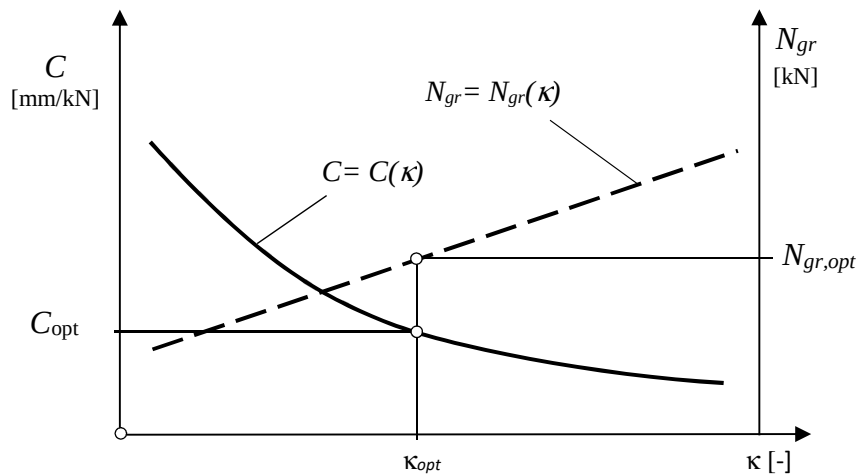


Rys. 13. Warunek minimalnych odchylek do wyznaczenia C przy założonej wartości κ

Równanie opisujące stałą C otrzymuje postać (37).

$$C = c\kappa^2 + d\kappa + e \quad (37)$$

Następnie wykorzystano otrzymaną funkcję liniową (36 i 37) do równania (34) i wyznaczono parametr κ metodą najmniejszej sumy kwadratów odchylek. Parametr κ jest jedyną zmienną tej sumy.



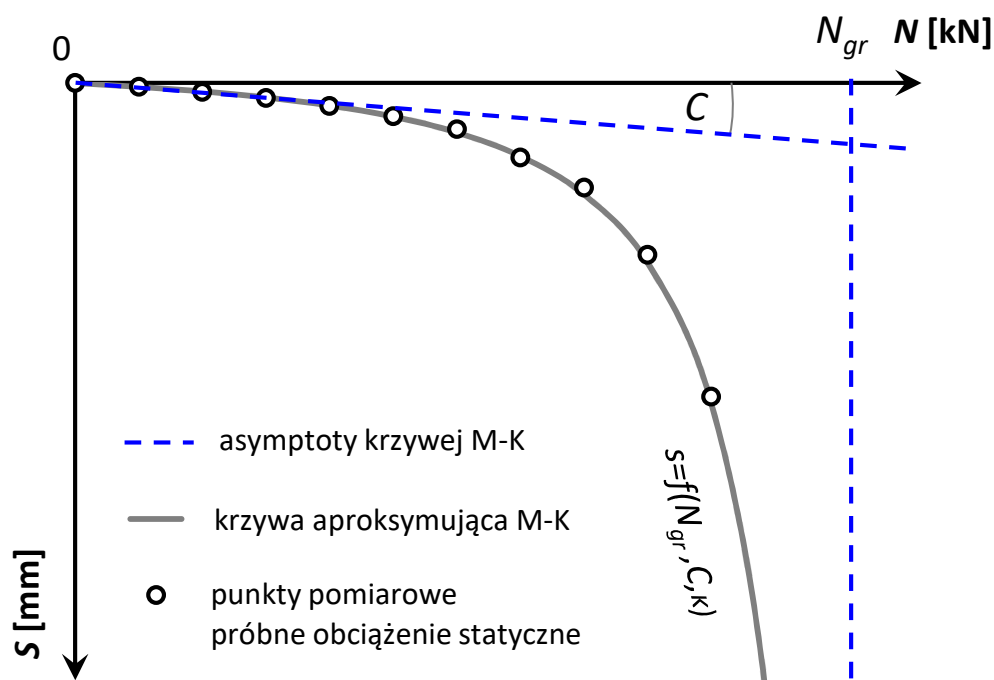
Rys. 14. Zależności $C(\kappa)$ i $N_{gr}(\kappa)$ do określenia optymalnej wartości κ_{opt}

$$\kappa = opt \Leftrightarrow \sum_{i=1}^{n-1} \delta^2 = \min \quad (38)$$

gdzie: $\delta = (s_{i,pom} - s_{i,obl})$

Aproksymacja metodą Meyera-Kowalowa (M-K) polega na wyznaczeniu trzech parametrów równania (25). Jednym z nich jest nośność graniczna pała N_{gr} . Odpowiada

ona obciążeniu, przy którym obserwuje się bardzo duże i niekontrolowane osiadania. Stała C jest pochodną funkcji w punkcie zerowym, gdy $s=0$ mm i można nią wyznaczyć początkowe nachylenie krzywej aproksymującej. Bezwymiarowy parametr κ odpowiada za kształt krzywej i określa szybkość zbliżania się przyłożonej siły do nośności granicznej przy stałym przyroście osiadania. Propozycje określenia parametrów krzywej M-K opisał Szmechel [52]. Wyniki aproksymacji umożliwiają przedłużenie krzywej osiadania uzyskanej z próbnego obciążenia statycznego. Znajomość dalszego kształtu krzywej pozwala na prognozowanie osiadań w większym zakresie obciążenia, często trudnym do osiągnięcia w terenie. Wyniki próbnego obciążenia wraz z aproksymowaną krzywą przedstawiono na rysunku 15.

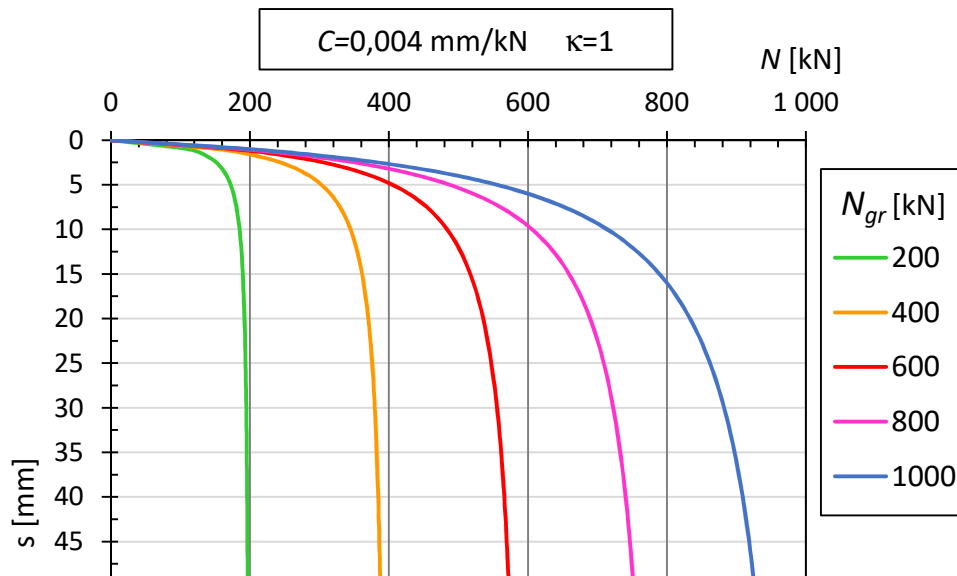


Rys. 15. Interpretacja matematyczna krzywej M-K aproksymującej osiadanie pała.

5.2. WPŁYW PARAMETRÓW MODELU M-K NA KSZTAŁT KRZYWEJ APROKSYMUJĄCEJ

Każdy z parametrów krzywej aproksymującej ma charakterystyczny wpływ na kształt krzywej osiadania. Parametr N_{gr} jest nośnością graniczną określoną przez asymptotę pionową do krzywej osiadania. Siła ta jest zatem maksymalną siłą, której nie można przekroczyć. Zmiana tego parametru przesuwą asymptotę pionową. Nośność

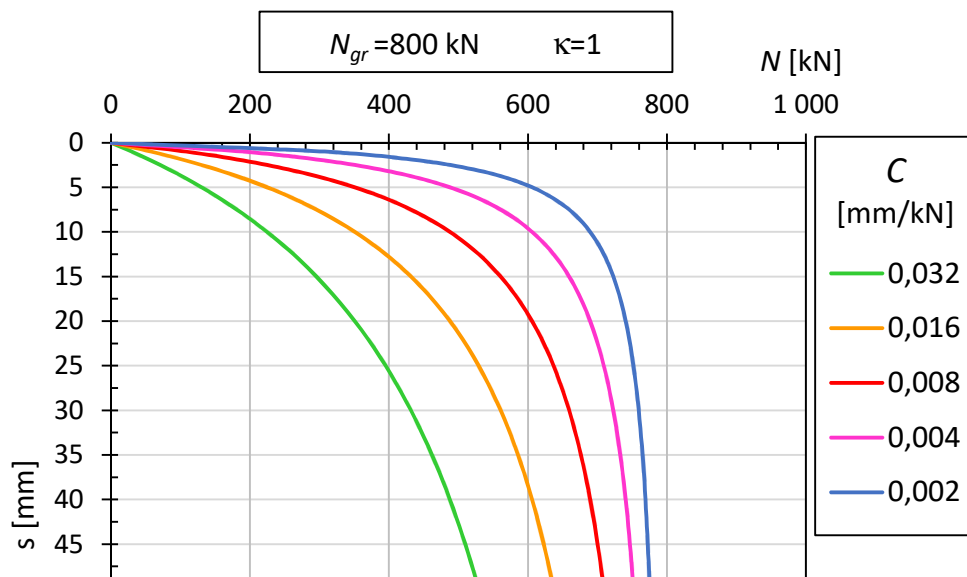
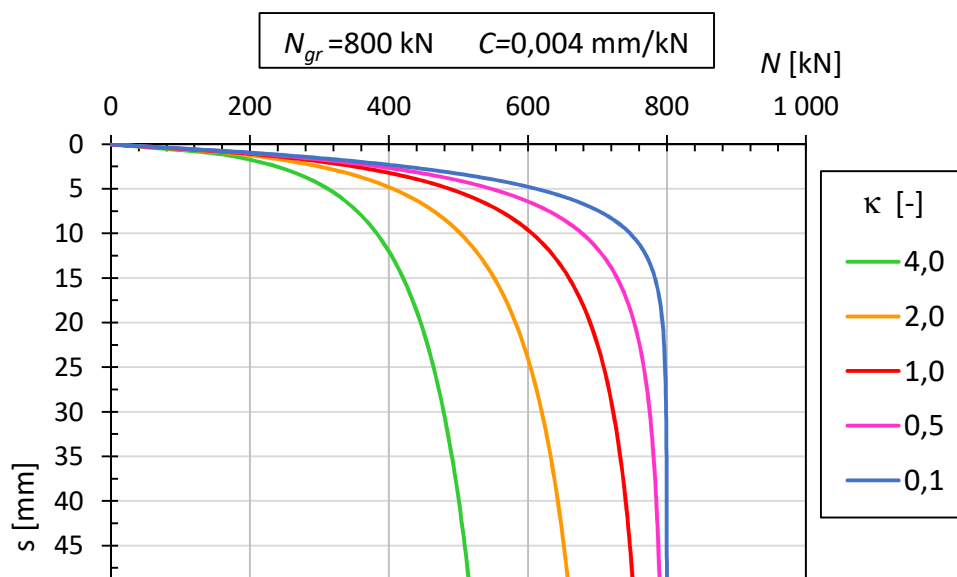
graniczna jest reakcją pała w stanie granicznym określoną przez sumę granicznych oporów pod podstawą i na pobocznicy pała. Zmianę kształtu krzywej osiadania przy różnych parametrach N_{gr} i przy niezmiennych pozostałych parametrach, przedstawiono na rys. 16.



Rys. 16. Wpływ parametru N_{gr} na kształt krzywej osiadania.

Parametrem C określa się początkowe nachylenie krzywej osiadania. Parametr ten można porównywać ze współczynnikiem Winklera, którym określa się podatność podłoża na osiadanie. Im większy jest parametr C tym większe są przyrosty osiadania. Kształt krzywej osiadania przy różnych parametrach C przedstawiono na rysunku 17.

Parametrem κ precyzuje się kształt krzywej osiadania pomiędzy asymptotą ukośną określoną przez parametr C , a asymptotą pionową określoną przez parametr N_{gr} . Parametr ten przyjmuje wartości większe od 0 i mniejsze od 5. Im większa jest wartość parametru κ tym łagodniejszy jest kształt krzywej osiadania. Pały o dużych wartościach parametru κ wykazują dość duże przyrosty osiadań, ale są bardziej „przewidywalne”. Pały o wartościach κ mniejszych od 1 wykazują małe i w przybliżeniu liniowe przyrosty osiadania; przy obciążeniu bliskim nośności granicznej, następuje gwałtowny przyrost osiadań. Kształt krzywej osiadania przy różnych wartościach parametru κ przedstawiono na rysunku 18.

Rys. 17. Kształt krzywej osiadania przy różnych wartościach parametru C Rys. 18. Kształt krzywej osiadania przy różnych wartościach parametru κ

W praktyce kształt krzywej osiadania uzależniony jest od współdziałania wszystkich trzech parametrów jednocześnie. Uważa się, że wartości tych parametrów zawierają w sobie informację o parametrach gruntu, geometrii i technologii wykonania pała, a także o rozkładzie oporów na pobocznicy i podstawę pała.

5.3. INTERPRETACJA FIZYCZNA PARAMETRÓW KRZYWEJ M-K

Każdy z parametrów równania krzywej osiadania, ma swoje uzasadnienie fizyczne.

Nośność graniczna pala jest maksymalną reakcją pala na siłę wciskającą. Nośność ta wynika z sumy dwóch reakcji składowych: granicznego oporu pobocznicy i granicznego oporu podstawy pala zgodnie z równaniem (39). Przy obciążeniu pala siłą bliską nośności granicznej obserwowane są znaczne przyrosty osiadania.

$$N_{gr} = N_{1,gr} + T_{\infty} \quad (39)$$

gdzie:

N_{gr} - nośność graniczna pala, przy której obserwowane są bardzo duże i niekontrolowane osiadania [kN],

$N_{1,gr}$ - nośność graniczna podstawy pala, przy której obserwowane są bardzo duże i niekontrolowane osiadania [kN],

T_{∞} - nośność graniczna pobocznicy pala, przy której obserwowane są bardzo duże i niekontrolowane osiadania [kN].

Zarówno nośność graniczna podstawy pala jak i nośność graniczna pobocznicy są wartościami, które można określić na podstawie parametrów podłoża gruntowego i rodzaju pala. Ważne jest przy tym, aby wartości te dotyczyły stanu granicznego. Kilka sposobów na określenie nośności granicznej na podstawie wyników próbnego obciążenia statycznego i parametrów podłoża gruntowego zaproponował Meyer [34]. Według Autora bardzo dobrym badaniem umożliwiającym określenie wartości granicznych jest sondowanie statyczne CPT. Podczas badania CPT mierzy się wartości graniczne oporu pod stożkiem jak i na pobocznicy sondy CPT, czyli takie które dotyczą ciągłych osiadań. Wartości te są dokładnym odzwierciedleniem granicznych wartości oporu pod podstawą i na pobocznicy wciskanego pala. Należy mieć jednak na uwadze, że nie można bezpośrednio przyjmować wartości granicznych uzyskanych z badania CPT do obliczenia granicznych reakcji w palu, ze względu na inne średnice pala i stożka CPT. Według White'a i Boltana [57] im większa jest średnica pala tym mniejszy jest graniczny opór pod podstawą pala w stosunku do oporu stożka sondy CPT i wynosi od 20% do 100%. Zjawisko to opisali także Salgado i in. [23].

Kolejnym parametrem jest parametr C , który może być porównywany z odwrotnością współczynnika Winklera. Jest to współczynnik kierunkowy asymptoty

ukośnej do krzywej osiadania. Jednostką tego parametru jest mm/kN, oznacza to, że parametrem tym opisuje się podatność pala na osiadanie. Im mniejsza wartość współczynnika C tym mniejsze są osiadania pala. Parametrami jakie wpływają na wartość współczynnika C jest niewątpliwie geometria pala, moduł odkształcenia gruntu i rozkład oporów na pobocznice i podstawę pala.

Meyer opierając się na liniowej teorii Boussinesqa zaproponował, aby parametr C obliczać z równania (40) [34].

$$C = \frac{1}{\pi D E_q \left(1 + \kappa_0 \frac{H}{D} \right)} \quad (40)$$

gdzie:

H, D - odpowiednio długość i średnica pala [m],

E_q – moduł odkształcenia gruntu pod podstawą pala [kN],

κ_0 – bezwymiarowy współczynnik [-],

Parametr κ_0 w równaniu (40) jest parametrem wyrażającym rozkład oporów na pobocznice i podstawę pala. Pomimo iż naprężenie na pobocznicy mobilizowane jest wolniej niż pod podstawą pala, to ze względu na dużo większą powierzchnię pobocznicy w stosunku do powierzchni podstawy pala (od 10 do 300 razy), wpływ naprężenia na pobocznicy na wartość całkowitej reakcji pala jest bardziej wyraźny. W związku z tym w większości przypadków jest tak, że opór na pobocznicy mobilizowany jest szybciej niż opór pod podstawą pala. Aby opór na pobocznicy mobilizowany był szybciej niż opór pod podstawą pala wówczas musi być spełnione równanie (41).

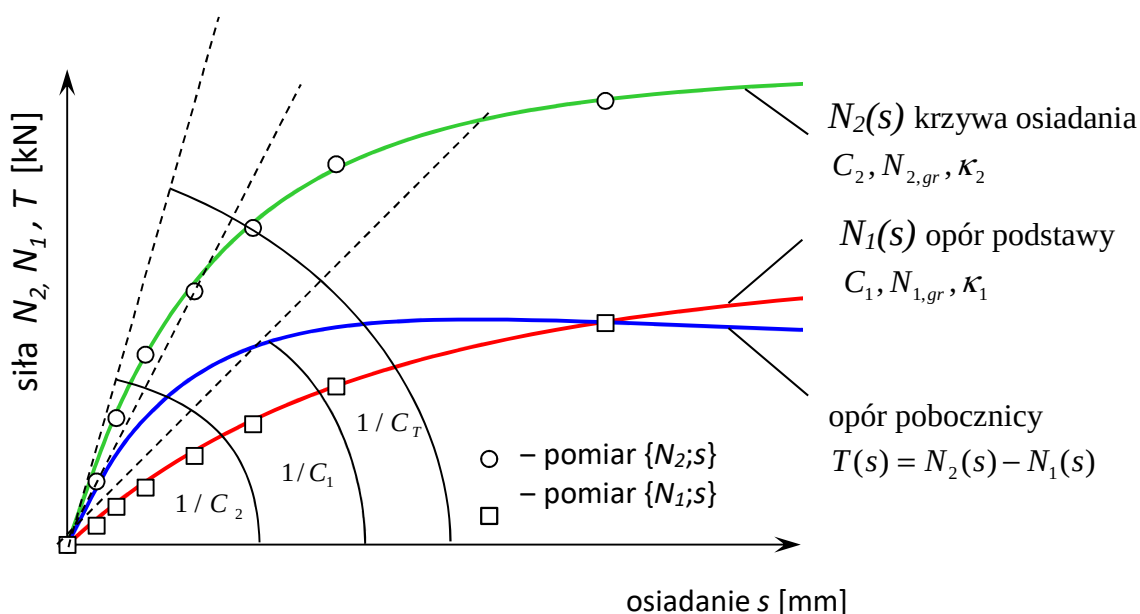
$$\kappa_0 \geq \frac{2D}{H} \quad (41)$$

Kolejnym parametrem krzywej M-K jest bezwymiarowy parametr κ . Określa się nim przebieg krzywej osiadania pomiędzy dwoma asymptotami. Parametr ten jak dotąd nie ma wyjaśnienia fizycznego. Autor niniejszej rozprawy uważa, że wartość tego parametru może być uzależniona od rozkładu oporów na pobocznice i podstawę pala, a szczególnie od sposobu formowania się naprężenia na pobocznicy. Badania terenowe [52,62] wskazują, że dla pali zagłębionych w piaskach parametr ten przyjmuje bardzo małe wartości, w granicach od 0,05 do 2, zaś w palach zagłębionych w grunty spoiste-

wartości od 1 do 5. W związku z tym można stwierdzić, że parametr uzależniony jest między innymi od rodzaju gruntu.

5.4. OPIS ROZKŁADU KRZYWEJ OSIADANIA NA KRZYWĄ OPORU PODSTAWY I KRZYWĄ OPORU POBOCZNICY PAŁA

Krzywą osiadania można rozłożyć na dwie krzywe: krzywą oporu pobocznicy i krzywą oporu podstawy pała zgodnie z rysunkiem 19. W celu umożliwienia interpretacji rozkładu, należało opisać rozkład krzywych zależnościami analitycznymi. Krzywa osiadania opisana jest trzema parametrami modelu M-K: C, N_{gr}, κ . Badania laboratoryjne przeprowadzone przez Autora w laboratorium, na pałach modelowych wskazywały, że wyniki oporu zmobilizowanego pod podstawą pała w stosunku do osiadania głowicy pała można także aproksymować krzywą M-K uzyskując bardzo dobrą zgodność. W ten sposób możliwe było opisanie krzywej oporu podstawy pała trzema parametrami modelu M-K. Parametry dotyczące krzywej oporu podstawy pała oznaczono indeksem 1. Parametry krzywej M-K osiadania pała oznaczono indeksem 2. Krzywa oporu na pobocznicy pała powstała w wyniku odjęcia oporu pod podstawą pała od przyłożonego obciążenia w głowicy przy danym osiadanii pała. Przedstawiono to na rysunku 19.

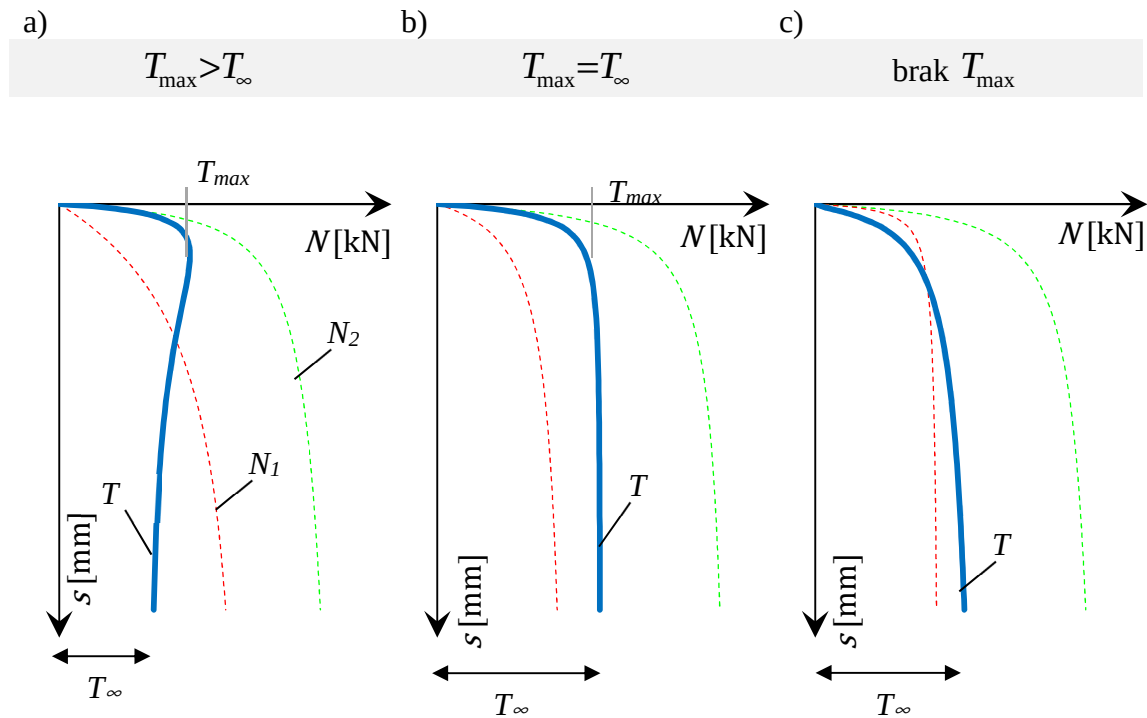


Rys. 19. Rozkład oporów wciskanego pała wyznaczony na podstawie badań laboratoryjnych z zastosowaniem krzywej aproksymującej M-K

$$T(s) = N_2(s) - N_1(s) \quad (42)$$

Istnieje analityczny związek pomiędzy współczynnikami kierunkowymi asymptot omawianych krzywych przedstawionych na rysunku 19. Związek ten opisano równaniem (43).

$$\frac{1}{C_2} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_T} \quad (43)$$



Rys. 20. Przykładowe rozkłady oporów poboczniczy pala przy różnych parametrach $C_1, N_{1,gr}, \kappa_1$ i $C_2, N_{2,gr}, \kappa_2$ w metodzie M-K

5.5. PODSUMOWANIE BADAŃ ANALITYCZNYCH

Wynikiem próbnego obciążenia statycznego pala jest zbiór punktów obciążenie-osiadanie $\{N_i; s_i\}$. Tego rodzaju badanie ma na celu sprawdzenie czy osiadanie pala nie przekracza wartości obciążenia przy projektowanej nośności pala. W wyniku próbnego obciążania pala na podstawie powszechnie dostępnych metod, istnieje możliwość określenia nośności granicznej pala. Nośność graniczna jest pojęciem umownym i nie we wszystkich metodach jest tym samym obciążeniem. Istnieją metody, w których za nośność graniczną przyjmuje się wartość obciążenia, przy ustalonym osiadaniu np. 10% średnicy pala lub kiedy obserwuje się znaczne zwiększenie się przyrostów osiadań

w kolejnych stopniach obciążenia (zjawisko charakterystyczne przy przejściu w etap plastycznej współpracy pala). Zdaniem autora, aby uściślić interpretację próbnego obciążenia statycznego, krzywa osiadania pala powinna obejmować cały zakres obciążeń, jako krzywa styczna do dwóch asymptot. Takie podejście zaproponował Meyer i Kowalów w metodzie krzywej aproksymującej M-K, w której krzywa aproksymująca przedstawiona w układzie $N(s)$ ma dwie asymptoty określone równaniami (44) i (45).

$$N = \frac{1}{C} s \quad (44)$$

$$N = N_{gr} \quad (45)$$

Analizując statystycznie zbiór wartości $\{N_i; s_i\}$ można otrzymać parametry modelu M-K. Przeprowadzone analizy wskazują, że związek $N_{gr}(\kappa)$ ma charakter liniowy natomiast $C(\kappa)$ ma charakter wyraźnie nieliniowy. Określenie analitycznych zależności pomiędzy N_{gr} i κ jest przedmiotem dalszej części pracy, analizującej wyniki badań laboratoryjnych. Związek ten zweryfikowano również wynikami badań pali w warunkach naturalnych.

Na rysunku 20 przedstawiono różne krzywe charakteryzujące mobilizację oporu na pobocznicy pala. Na rysunku 20a przedstawiono przypadek, kiedy mobilizacja pobocznicy następuje w taki sposób, że opór pobocznicy osiąga wartość maksymalną, a następnie zmniejsza się. Cecha ta będzie przedmiotem analizy w dalszej części pracy. W tym przypadku przy stosunkowo niewielkich osiadaniach występuje duży opór pobocznicy, który przy dalszym osiadaniu maleje, wskazując na zmianę proporcji w odporze pobocznicy i w odporze podstawy pala.

Charakter krzywej M-K zależy od trzech parametrów: C, N_{gr}, κ . W powyższym rozdziale przedstawiono metodę określania tych parametrów na podstawie wyników próbnego obciążenia statycznego. W ten sposób dla każdego zbioru danych $\{N_i; s_i\}$ uzyskuje się trzy parametry charakteryzujące współpracę pala z podłożem gruntowym. Parametry te mają swoje uzasadnienie fizyczne. Parametr C określony jednostką [mm/kN] dotyczy podatności pala na osiadanie w pierwszej części obciążenia, kiedy pal pracuje jeszcze w strefie sprężystej. Parametr ten jest odpowiednikiem odwrotności współczynnika sprężystości podłoża określanej jako stała Winklera. Kolejny parametr to N_{gr} wyrażony jednostką [kN] (nośność graniczna pala) jest to wartość maksymalnej siły

jaką może przenieść pal. Przy tej wartości obciążenia obserwuje się ciągły przyrost osiadań pala określany jako niekontrolowany. Ujmując analitycznie, przy wartości siły równej N_{gr} , osiadanie pala dąży do nieskończoności. Trzeci parametr to bezwymiarowa stała κ , którą określa się tempo przyrostu siły od wartości 0 do nośności granicznej N_{gr} . Parametrem tym określa się wpływ oporu poboczniczy pala na kształtowanie się krzywej osiadania [34].

Zgodnie z równaniem (42) siła przyłożona w głowicy jest równoważona przez dwa rodzaje oporów, których kształtowanie zupełnie różni się od siebie. Jest to opór podstawy pala, który wynika ze składowych ściskających naprężeń w gruncie pod podstawą pala i opór poboczniczy, który wynika ze składowych stycznych naprężeń w gruncie na powierzchni kontaktowej poboczniczy pala. W związku z tym krzywa osiadania pala przedstawiona jako $N(s)=N_2(s)$ jest także złożeniem dwóch krzywych: krzywej oporu podstawy pala $N_1(s)$ i krzywej oporu poboczniczy $T(s)$ jak to przedstawiono na rysunku 19.

Określenie nośności pala odbywa się na podstawie obliczeń granicznych oporów podstawy i poboczniczy pala zgodnie z równaniami przedstawionymi w rozdziale 1. Jest to podejście bardzo uogólnione ponieważ, w wielu przypadkach, pomimo jednakowego naprężenia granicznego, charakter krzywej osiadania i rozkład oporów przy dopuszczalnym osiadaniu jest zupełnie inny (rys. 20). Określenie krzywej osiadania i wyodrębnienie z niej dwóch krzywych składowych umożliwia lepszą interpretację współpracy pala z gruntem. Próbné obciążenie statyczne jest także swego rodzaju badaniem podłoża gruntowego, w związku z tym przy znanym rozkładzie oporów możliwe będzie dokładniejsze skorelowanie oporów poboczniczy i podstawy pala z parametrami podłoża gruntowego. W celu określenia zależności mających wpływ na formowanie się naprężeń na poboczniczy i jednocześnie pod podstawą pala należy przeprowadzić badania weryfikujące. W tym celu zdecydowano się na przeprowadzenie badań eksperymentalnych, które opisano w rozdziale 6.

6. BADANIA EKSPERYMENTALNE

6.1. PRÓBNE OBCIĄŻENIA PALI W WARUNKACH LABORATORYJNYCH

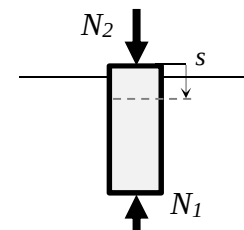
6.1.1. Opis badań

Badania opierały się na przeprowadzeniu próbnych obciążeń statycznych pali modelowych o wymiarach zmniejszonych w stosunku do rzeczywistych. Badania były prowadzone w warunkach laboratoryjnych w gruncie o znanym zagęszczeniu. Program badań podzielono na dwa trzy części:

1. Badania z pomiarem oporu gruntu pod podstawą pala.

Pomiar siły przyłożonej w głowicy pala, oporu zmobilizowanego pod podstawą pala i ustabilizowanego osiadania głowicy pala.

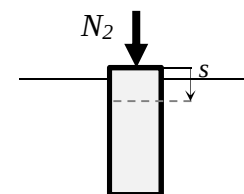
- 10 badań na palu o średnicy 7,00 cm i zagłębieniu w gruncie od 20 cm do 25 cm.



2. Standardowe badanie próbnych obciążeń pali

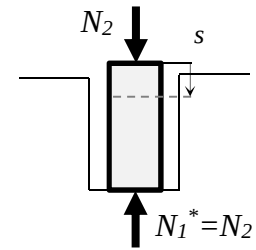
pograżonych w gruncie niespoistym. Pomiar przyłożonej siły w głowicy pala i ustabilizowanego osiadania pala.

- 20 badań na palach o średnicach: 2,86 cm, 4,64 cm, 7,00 cm i zagłębieniu w gruncie od 15 cm do 25 cm.



3. Badania próbnych obciążeń pali, w których pobocznica nie miała kontaktu z gruntem. Pomiar przyłożonej siły w głowicy pala i ustabilizowanego osiadania pala.

- 9 badań na palach o średnicach 2,86 cm, 4,64 cm, 7,00 cm i zagłębieniu w gruncie 20 cm.



Podczas badania, podobnie jak w przypadku standardowych próbnych statycznych obciążeń pali naturalnych, mierzono osiadanie w danym stopniu obciążenia. W ten sposób uzyskano zbiór danych obciążenie-osiadanie $\{N_{2,i}; s_i\}$.

6.1.2. Przygotowanie stanowiska i badania towarzyszące

Przygotowano stanowisko do eksperymentalnych badań laboratoryjnych składające się z komory stalowej w kształcie walca o średnicy 48,5 cm i wysokości 60 cm wypełnionej gruntem niespoistym. Grunt poddano badaniom w celu określenia podstawowych parametrów fizyczno-wytrzymałościowych. Przeprowadzono następujące badania: określenie wskaźników porowatości, określenie krzywej uziarnienia. Wyniki badań umieszczono w załączniku A. Na podstawie badań stwierdzono, że gruntem stosowanym do dalszych badań jest równoziarnisty piasek średni, o krawędziach obtoczonych, zawierający około 2 % frakcji pylastej.

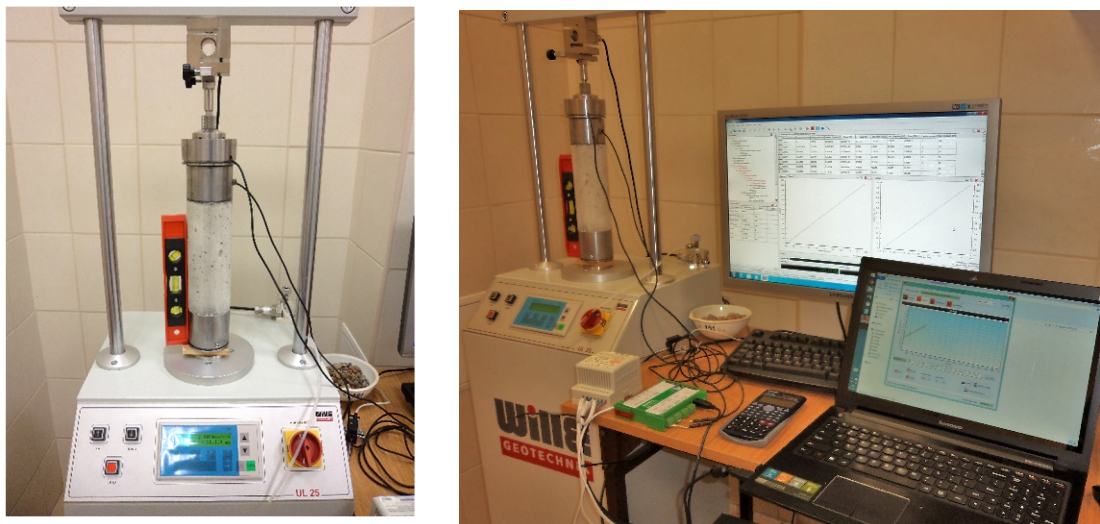
Do pierwszej części badań przygotowano pal z betonu klasy C25/30 o średnicy 7 cm i długości 30 cm. Zarówno głowica jak i podstawa pala była wzmocniona pierścieniem stalowym. Ponadto podstawa pala została odpowiednio skonstruowana, aby umożliwić pomiar oporu gruntu pod podstawą pala podczas próbnego obciążenia statycznego. Podstawa pala składała się ze stalowej zamkniętej komory w kształcie walca, w której umieszczono przetwornik siły o zakresie pomiaru 0-20 kN. Etapy konstrukcji oprzyrządowanego pala przedstawiono na rysunku 21. Przewody przesyłające informacje o zmianie rezystancji poprowadzono w rdzeniu pala i wyprowadzone na zewnątrz przy głowicy pala. Do pomiaru siły w głowicy pala zastosowano przetwornik siły o zakresie 0-50 kN. Oba przetworniki połączono urządzeniem rejestrującym ADT42. Urządzenie rejestrujące połączono z komputerem za pomocą kabla USB wyposażonego w ferrytowy filtr przeciwzakłóceń. Pomiar przemieszczeń głowicy pala odbywał się za pomocą potencjometru liniowego MMR15 o zakresie pomiaru 0-15 mm połączonym z rejestratorem MD150A. Obciążenie pala

realizowane było za pomocą siłownika hydraulicznego z pompą ręczną i manometrem o zakresie ciśnienia 0-25 MPa [41].

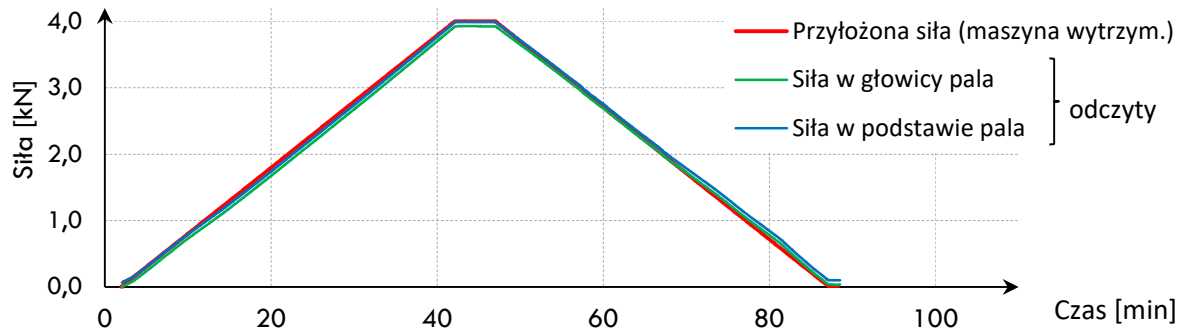


Rys. 21. Elementy składowe oprzyrządowanego pala modelowego [41]

Przeprowadzono kalibrację pala w maszynie wytrzymałościowej (rys. 22). Kalibracja polegała na określeniu zgodności pomiarów siły z odczytami w prasie ściskającej, a także zbadaniu liniowości odczytów. Zgodność pomiarów uzyskanych z oprzyrządowanego pala z pomiarami maszyny wytrzymałościowej przedstawiono na rysunku 23.



Rys. 22. Zdjęcie po lewej: kalibracja pala. Zdjęcie po prawej: pal przygotowany do próbnego obciążenia statycznego



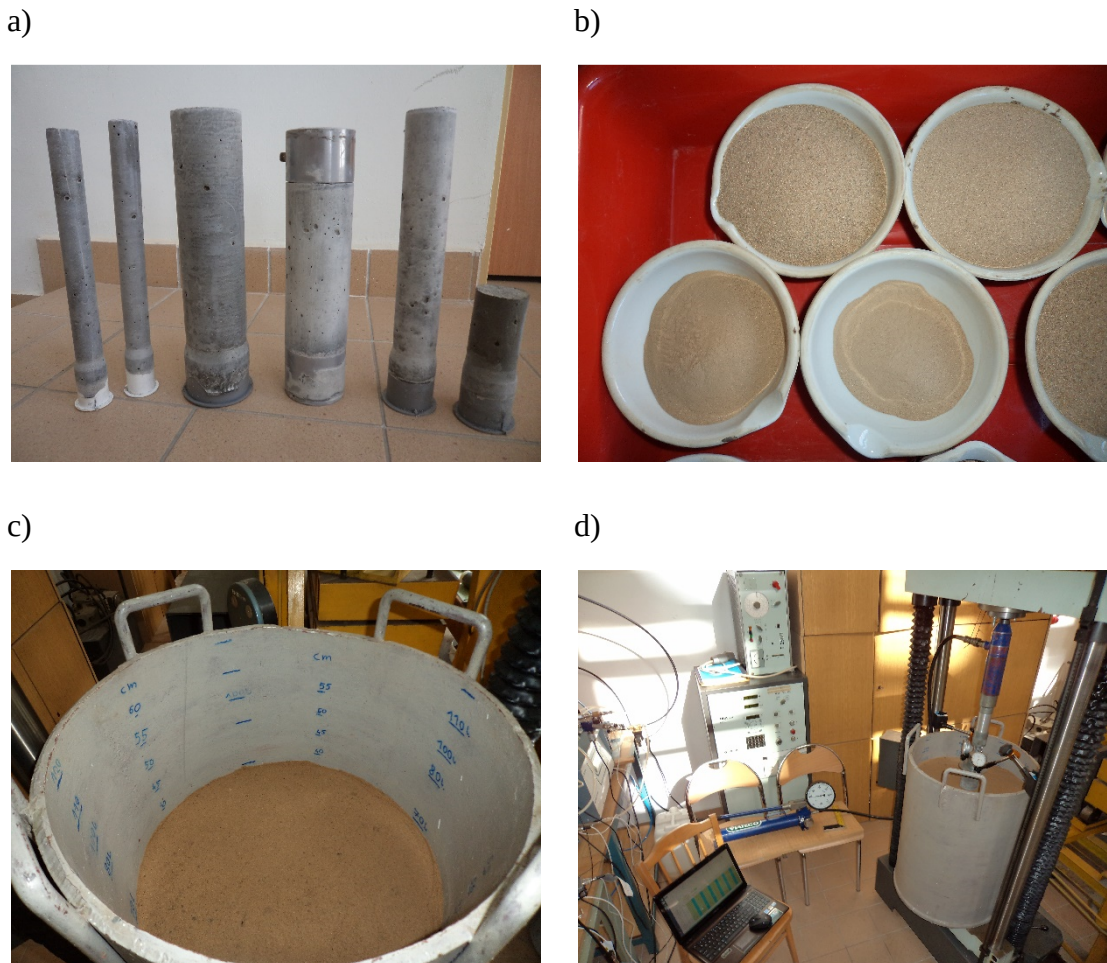
Rys. 23. Wyniki kalibracji oprzyrządowanego pała modelowego



Rys. 24. Przygotowane stanowisko badawcze do próbnych obciążeń statycznych z pomiarem oporu pod podstawą pała. Pierwsza część badań

Komorę stalową wypełniano gruntem warstwami i zagęszczano dynamicznie płytą o masie 15 kg. Każda warstwa składała się z gruntu o określonej masie.

Po wykonaniu 4 warstw pobrano próbkę gruntu o nienaruszonej strukturze w celu określenia gęstości objętościowej i wilgotności. Po wypełnieniu całej komory zmierzono objętość gruntu w komorze. W ten sposób określono zagęszczenia gruntu na 3 głębokościach w komorze oraz z niezależnych pomiarów średnie zagęszczenie w komorze. Zagęszczanie wykonywano w taki sposób, aby uzyskać jednorodne zagęszczenie gruntu w komorze. Wyniki zagęszczeń poszczególnych badań przedstawiono w załączniku B.



Rys. 25. Etapy przygotowania stanowiska badawczego

- a) modelowe pale o różnych średnicach; b) grunt stosowany w badaniach; c) komora w trakcie wypełniania gruntem niespoistym; d) przygotowane stanowisko do badań

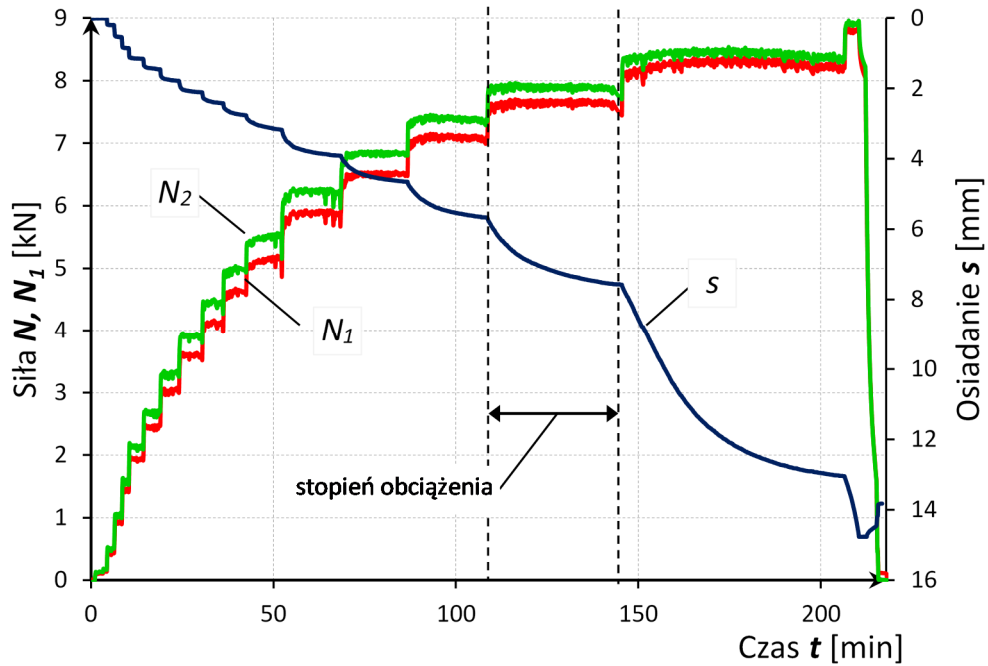
W tak przygotowanym podłożu gruntowym za pomocą rury wykonano otwór o docelowej głębokości na jaką zagłębiony był pal. Następnie umieszczono oprzyrządowany pal w otworze i ostrym narzędziem dogęszczano grunt w 1-2 mm szczelinie w otoczeniu pala. Na tak przygotowanym palu ustawiono czujnik siły

i przemieszczeń oraz siłownik hydrauliczny. Przygotowane stanowisko do badań przedstawiono na zdjęciach rys. 25.

Do drugiej i trzeciej części badań przygotowano pale wykonane z betonu klasy C25/30 o średnicy 2,86 cm, 4,64 cm, 7,00 cm i 10,40 cm i długości od 20 cm do 30 cm. Pale wykonywane były w formie z rury PCV. Po okresie dojrzewania pale rozformowano, a ich powierzchnie obrobiono mechanicznie w celu nadania im większej szorstkości.

6.1.3. Próbné obciążenia pali w warunkach laboratoryjnych z pomiarem oporu pod podstawą pala. Pierwsza część badań

Przeprowadzono próbné obciążenia statyczne pali, wyposażonych w dodatkowy czujnik siły w podstawie pala. W ten sposób możliwy był pomiar oporu gruntu pod podstawą pala w trakcie próbnego obciążenia statycznego. Przeprowadzono 10 badań na palach zagłębionych w gruncie o różnym zagęszczeniu. Surowe wyniki otrzymane z pomiarów stanowiły zależności mierzonych parametrów od czasu. Bezpośrednie pomiary próbnego obciążenia statycznego pala przedstawiono na rysunku 26. Do każdego stopnia obciążenia otrzymywano po 3 dane: $N_{2,i}$, $N_{1,i}$, s_i . W ten sposób z całego badania otrzymano zbiór punktów $\{N_{2,i}$, $N_{1,i}$, $s_i\}$ zależnych od siebie. Punkty te przedstawiono na wykresach $N_1(s)$ oraz $N_2(s)$. Krzywa oporu pobocznic powstała w wyniku bezpośredniego odjęcia przyłożonej siły w głowicy pala i oporu zmobilizowanego pod podstawą pala przy określonym osiadaniu pala. Tak opracowano pozostałe pale uzyskując różne krzywe osiadania charakteryzujące się przede wszystkim różną nośnością graniczną. Przykładowy pomiar przedstawiono na rysunku 26. Pozostałe pomiary zawarto w załącznikach C i D.



Rys. 26. Przykładowe wyniki próbnego obciążenia statycznego

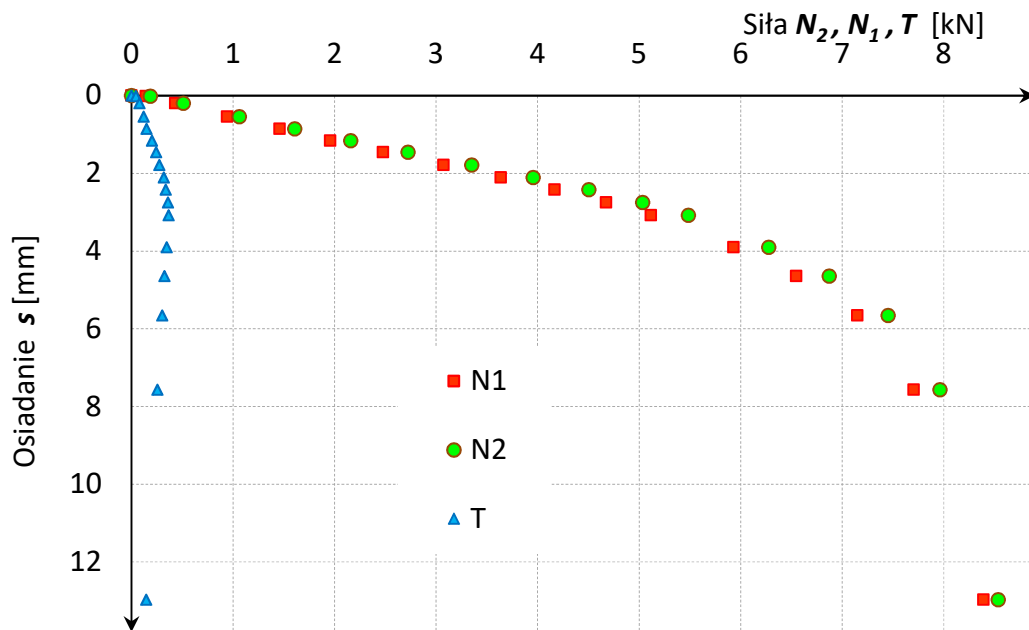
$N_2(t)$ – zależność przyłożonego obciążenia w funkcji czasu;

$N_1(t)$ – zależność oporu pod podstawą pała w funkcji czasu;

$s(t)$ – zależność osiadania głowicy pała w funkcji czasu.

W rezultacie otrzymywano dwa zbiory danych pomiarowych: $\{N_{1i}; s_i\}$ oraz $\{N_{2i}; s_i\}$. Zbiór punktów oporu pobocznicy w postaci niebieskich znaczników na rys. 27 powstał w wyniku odjęcia siły przyłożonej w głowicy i zmobilizowanego osiadania $\{T_i; s_i\} = \{N_{2i} - N_{1i}; s_i\}$.

Zbiory danych $\{N_{1i}; s_i\}$ oraz $\{N_{2i}; s_i\}$ aproksymowano krzywą M-K uzyskując trzy parametry $C_2, N_{2,gr}, \kappa_2$ do zbioru $\{N_{1i}; s_i\}$ oraz $C_1, N_{1,gr}, \kappa_1$ do zbioru $\{N_{2i}; s_i\}$. Parametry M-K, którymi opisano krzywą osiadania $N_2(s)$ oraz krzywą oporu pod podstawą pała $N_1(s)$ umożliwiły przeprowadzenie dalszej analizy w celu sprawdzenia możliwości określenia parametrów $C_1, N_{1,gr}, \kappa_1$ na podstawie znajomości parametrów $C_2, N_{2,gr}, \kappa_2$ i geometrii pała, tak aby można było obliczyć opór pobocznicy pała tylko i wyłącznie na podstawie wyników statycznego, próbnego obciążenia pała.



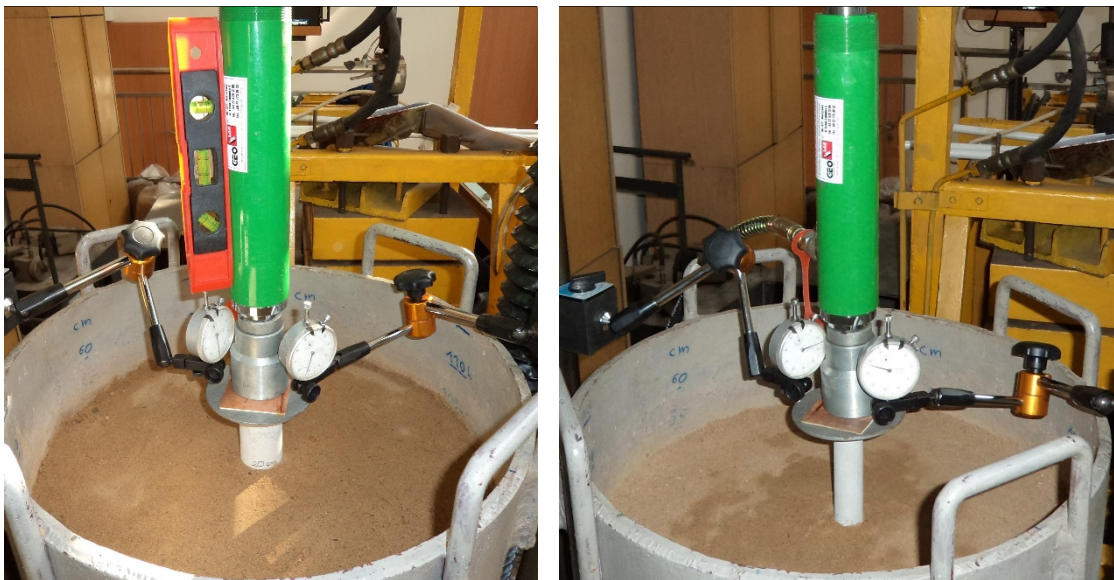
Rys. 27. Wyniki próbnego obciążenia oprzyrządowanego pala P.3

6.1.4. Standardowe próbné obciążenia pali w warunkach laboratoryjnych. Druga część badań

Próbné obciążenia pali w warunkach laboratoryjnych prowadzono analogicznie do badania w warunkach terenowych na palach naturalnych. Badanie polegało na obciążaniu pala stopniami obciążenia. Przy danym obciążeniu notowano wartość przemieszczenia głowicy pala w 2-minutowych odstępach czasu. Przejście na kolejny stopień obciążenia następowało po spełnieniu warunku stabilizacji osiadań: różnica osiadań w dwóch kolejnych odczytach powinna być nie większa niż 0,02 mm. Badanie przeprowadzano po osiągnięciu osiadań około 15 mm. Pomiary manualne były pomiarami kontrolnymi. Do analizy przyjęto dane z pomiarów rejestrowanych automatycznie na komputerze. Wynikami badania były: osiadania głowicy pala, siła przyłożona w głowicy pala oraz opór zmobilizowany pod podstawą pala. W podłożu gruntowym w wyniku przekroczenia naprężenia granicznego utworzyła się strefa gruntu uplastycznionego.

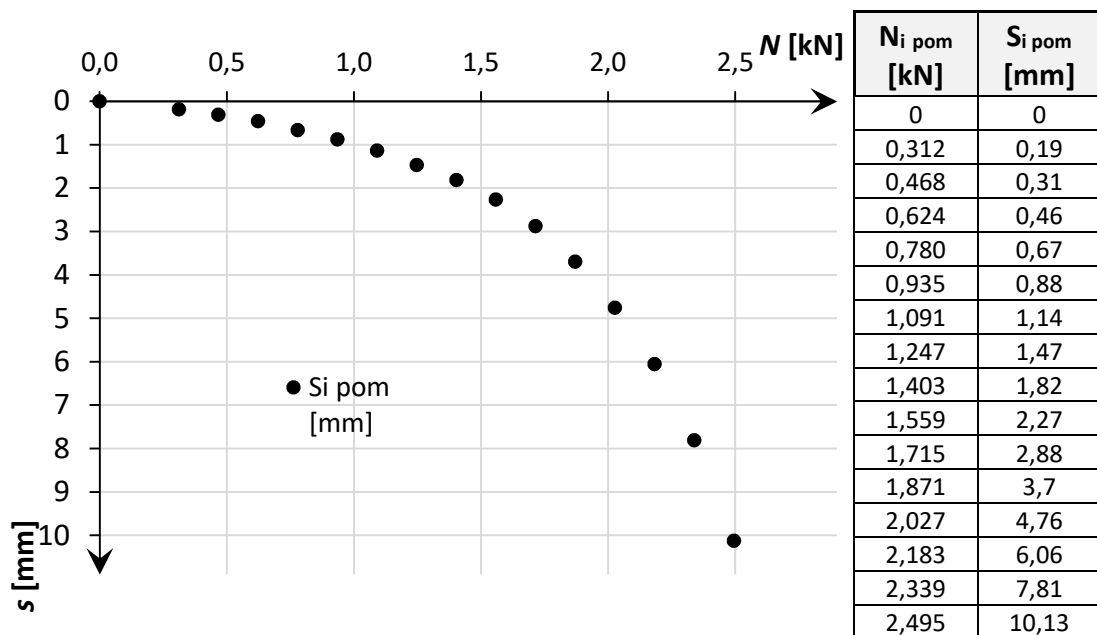
Podczas badań natrafiono na problemy, które wpłynęły na odrzucenie niektórych wyników badań lub przerwanie badania. Były nimi między innymi nierównomierne zagęszczenie gruntu w komorze, zbyt małe zagęszczenie gruntu w komorze, nieosiowe umieszczenie pala w gruncie, zbyt mała dokładność pomiaru. Pierwsze badania

wykonywano w tym samym gruncie, tj. bez wymiany gruntu w komorze po przeprowadzonym próbnym obciążeniu pala. Okazywało się wówczas, że zachowanie pala ponownie umieszczonego w gruncie, w którym wykonywano już wcześniej próbne obciążenie jest zupełnie inne. Pomimo jednakowej nośności granicznej pal wykazywał inny przebieg krzywej osiadania. Początkowo był to przebieg w przybliżeniu liniowy, po którym następowało mocne zagięcie krzywej osiadania, bezpośrednio przed osiągnięciem nośności granicznej. Gdyby nie badano pala do zniszczenia można by powiedzieć, że pal uzyskał większą nośność, ponieważ przy tym samym obciążeniu co poprzedni pal wykazywał mniejsze osiadanie. Zdaniem autora jest to spowodowane pewną pamięcią gruntu, podobnie jak przy obciążaniu wtórym. Ogólne zagęszczenie w komorze było podobne, ale w wyniku przeprowadzonego wcześniej badania zagęszczenie ośrodka gruntowego zostało zaburzone. Powstały obszary o większym i mniejszym zagęszczeniu od zagęszczenia gruntu jednorodnego. Grunt pod podstawą pala został zagęszczony tworząc obszar w kształcie gruszki, zaś na krawędzi tego obszaru, gdzie przekroczona była wytrzymałość na ścinanie, grunt uległ zagęszczeniu lub rozluźnieniu dążąc do linii stanu ustalonego opisanego przez Sawickiego [48]. Ośrodek gruntowy stał się niejednorodny. W związku z tym w celu przeprowadzenia kolejnego badania w środowisku jednorodnym, grunt w komorze był za każdym razem wymieniany [41].



Rys. 28. Próbne obciążenie pali o różnych średnicach i zagłębieniu w gruncie.
Pierwsza część badań

Z badania otrzymywano typową zależność obciążenie-osiadanie, którą przedstawiano tabelarycznie i w formie krzywej osiadania rys. 29.



Rys. 29. Przykładowy wynik próbnego obciążenia statycznego pala o średnicy 28,6 mm

6.1.5. Próbne obciążenia pali, bez oporu pobocznic. Trzecia część badań

W tej części badań badano pale, które umieszczano w wykonanym wcześniej otworze, w taki sposób aby zachować odpowiednie zagłębienie pala pod poziomem terenu, ale także aby pobocznica nie miała kontaktu z gruntem. W ten sposób uzyskano schemat obciążenia, w którym, podczas badania, cała siła przyłożona w głowicy pala była przekazywana bezpośrednio na podstawę pala. Próbne obciążenie prowadzono podobnie jak w pierwszej części badań uzyskując zbiór punktów obciążenie-osiadanie pala $\{N_i; s_i\}$. Przygotowane stanowisko do badań przedstawiono na rysunku 30.



Rys. 30. Próbné obciążenie pala bez oporu pobocznicy. Druga część badań

6.2. BADANIA FOTOGRAOMETRYCZNE

6.2.1. Opis badań

Wcześniejsze badania laboratoryjne oraz badania terenowe wskazują, że w wielu przypadkach udział pobocznicy jest znacznie większy niż spodziewano się. Powstaje wówczas pytanie: jakie jest źródło pochodzenia tak dużego naprężenia na pobocznicy pala?

Próbné obciążenie statyczne nie jest badaniem prostym do interpretacji. Pomimo, iż uzyskuje się jedynie zbiór zależności obciążenie-osiadanie to dokładne obserwacje podczas badania pozwalają dostrzec pewne nieprzewidywalne zjawiska, które wyjaśniały pewne kwestie, ale także były przyczyną powstania nowych pytań. Osiadanie pala jest silnie złożonym zjawiskiem i ma na nie wpływ wiele czynników.

Projektowanie pali opiera się na sumowaniu oporów pobocznicy i podstawy pala obliczanych niezależnie od siebie. Ale czy na pewno można te wartości rozpatrywać oddzielnie? Aby odpowiedzieć na to pytanie i aby lepiej zrozumieć pracę pala w podłożu gruntowym zdecydowano się przeprowadzić badania.

Badania miały na celu zobrazowanie odkształcenia podłoża gruntowego postępującego wraz z wciskaniem pala. Dzięki temu możliwe było określenie wartości i kierunków przemieszczeń ziaren spowodowanych przemieszczaniem pala. Powstałe przemieszczanie było skutkiem powstania stanu naprężenia w otoczeniu pala. Jak się okazało, przemieszczenie może być nie tylko skutkiem, ale także przyczyną powstania dodatkowego naprężenia na poboczniczy pala.

6.2.2. Przygotowanie stanowiska i badania towarzyszące

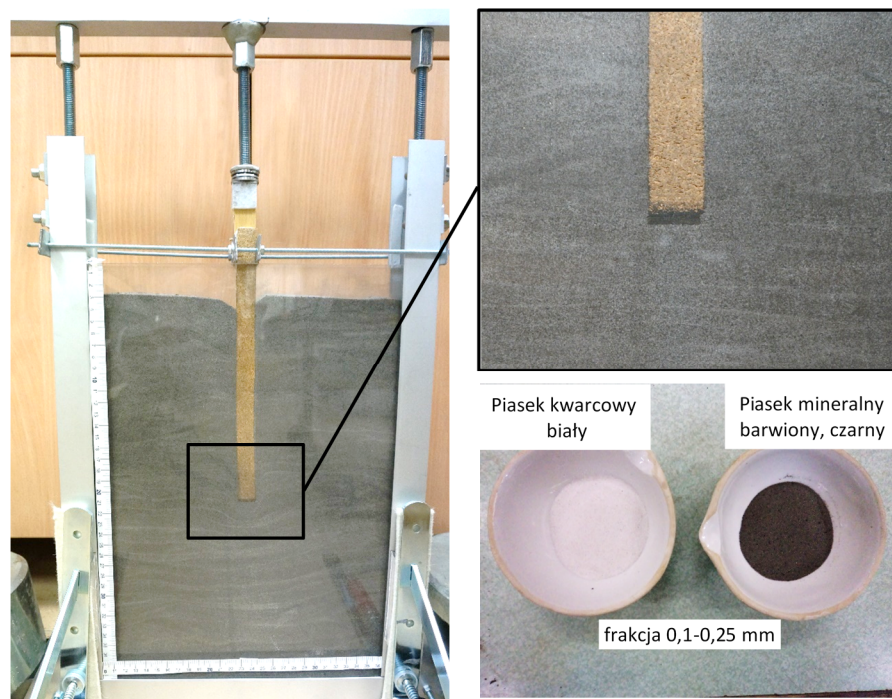
W celu przeprowadzenia badań fotogrametrycznych niezbędne było przygotowanie stanowiska złożonego z przezroczystej komory wypełnionej piaskiem. Komorę wykonano z płyt PCV o grubości 10 mm i ramy wzmacniającej konstrukcję komory, stanowiącej jednocześnie element obciążeniowy pala. Komora o szerokości 300 mm i wysokości 400 mm miała szczelinę o grubości 20 mm, w której umieszczono modelowy pal, o przekroju 15x20 mm. Początkowe zagłębienie pala wynosiło 150 mm. Do badań zastosowano piasek o frakcji 0,1-0,25 lub 0,25-1,2 mm, o różnym zabarwieniu, w celu lepszej identyfikacji ziaren. Zdjęcie stanowiska przedstawiono na rysunku 31.

Przed właściwymi badaniami przeprowadzono serię badań próbnych, które umożliwiły kalibrację stanowiska pod względem światła, częstotliwości wykonywanych zdjęć, rozdzielczości zdjęć. Zgodnie z obliczeniami na jedno ziarenko piasku o średnicy 0,1 mm przypadało około 9 pikseli.

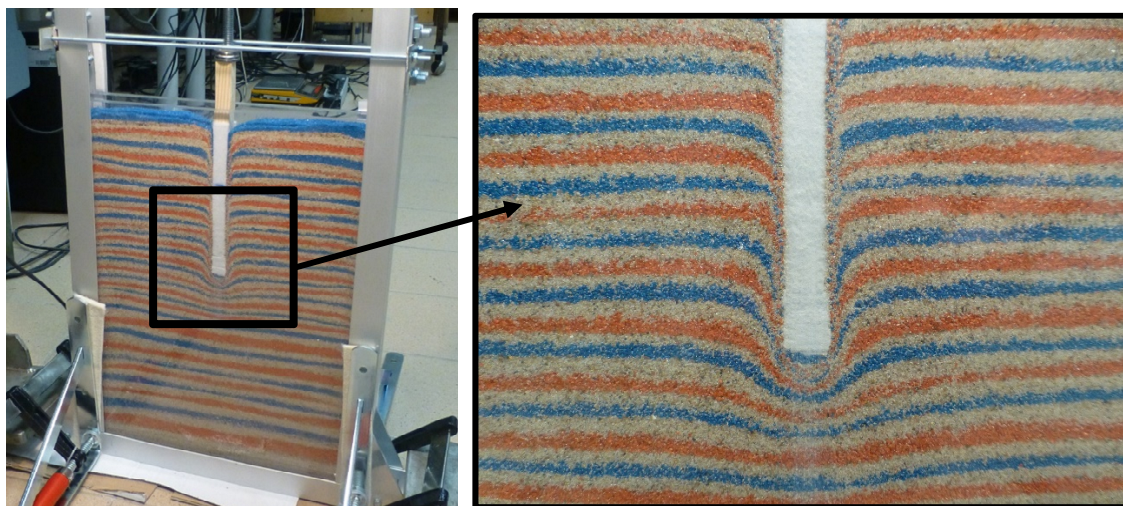
Badanie polegało na wykonywaniu serii zdjęć w jednakowych odstępach czasu. W tym czasie pal był wciskany ze stałą prędkością 1 mm/minutę. Zdjęcia rejestrowały przemieszczenie pala i gruntu w komorze. Podczas wykonywania zdjęć ważne było, aby nie wystąpiło jakiejkolwiek przemieszczenie względne między aparatem, a komorą, w związku z tym zdjęcia były wykonywane za pomocą pilota z jednakowymi ustawieniami, a stanowisko robocze było stale unieruchomione. Po przeprowadzeniu badania przeprowadzono analizę zdjęć w programie PIVlab1.4 uzyskując mapy przemieszczeń.

Badania były prowadzone na dwóch gruntach niespoistych o dwóch przedziałach frakcji. Nie przeprowadzano badań stopnia zagęszczenia z powodu zbyt małej skali, ale przeprowadzono badania w gruncie luźno usypanym jak i zagęszczonym. Ponadto

wykonano badania w gruncie usypanym warstwami różniącymi się kolorami. W ten sposób łatwiejsze było uchwycenie przemieszczenia „gołym okiem” lecz nie miało to najmniejszego znaczenia w realizacji programu. Kolejne badania przeprowadzono w gruncie powstałym ze zmieszania dwóch piasków tej samej frakcji o barwie białej i szarej.



Rys. 31. Stanowisko do modelowych badań fotogrametrycznych



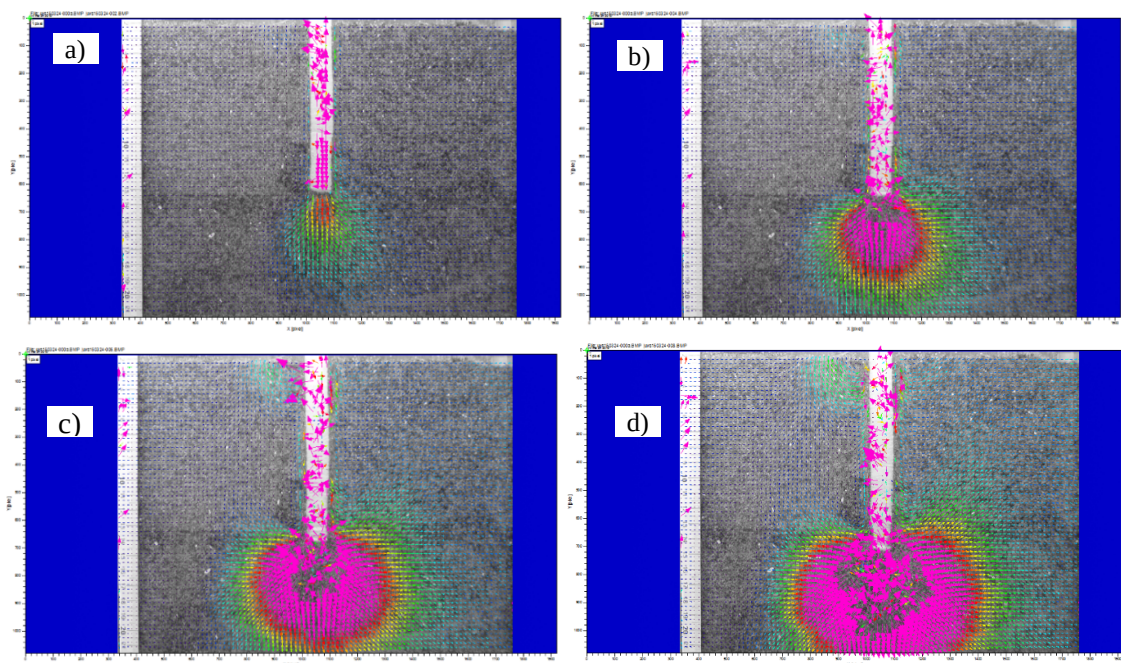
Rys. 32. Badania na gruncie ułożonym warstwami. Przemieszczenia warstw spowodowane osiadaniem pala

6.2.3. INTERPRETACJA WYNIKÓW BADAŃ SYMULACYJNYCH

Wynikiem badania są zdjęcia modelu wykonywane w określonych odstępach czasu. Na zdjęciach przedstawiono układ ziaren gruntu oraz aktualne przemieszczenie pala. Analiza wyników badań polega na interpretacji minimum dwóch zdjęć. Istnieje także możliwość połączenia zdjęć tworząc film poklatkowy pozwalający lepiej dostrzec procesy zachodzące podczas badania, które są zbyt wolne dla ludzkiej percepcji. Aby było możliwe przedstawienie wyników w formie papierowej wykonano analizę par zdjęć programem PIVlab1.4. Program umożliwia tworzenie wektorowych lub powierzchniowych map przemieszczeń.

Mechanizm pracy podstawy pala

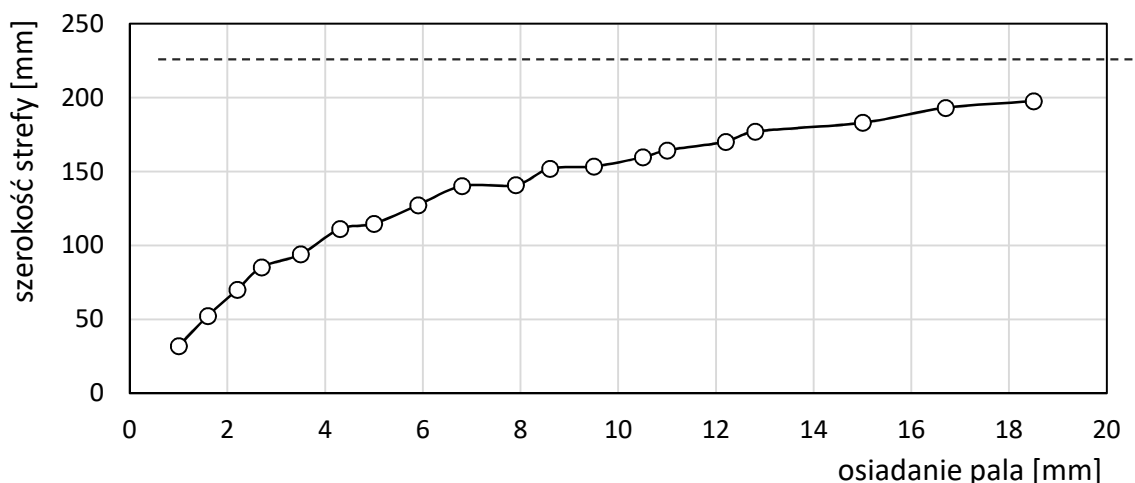
Wyniki badań obrazują strefy przemieszczeń gruntu spowodowanych przez osiadanie pala. Badania wskazują, że przy luźno ułożonych ziarnach, w stanie dylatywnym, w pierwszej kolejności następuje dogęszczanie gruntu, a wektory przemieszczeń skierowane są głównie w dół. Po uzyskaniu odpowiedniego zagęszczenia następuje ścięcie gruntu i utworzenie strefy w kształcie gruszki, która rozpycha grunt radialnie.



Rys. 33. Proces formowania się strefy przemieszczanego gruntu pod podstawą pala w zależności od osiadania s . a) $s=2$ mm, b) $s=4$ mm, c) $s=9$ mm, d) $s=16$ mm

Przy dużym początkowym zagęszczeniu, strefa tzw. gruszki tworzyła się przy dużo mniejszych osiadaniach pala. Grunt rozpychany był nie tylko w dół i na boki, ale także w górę. Wyparcie gruntu było spowodowane przemieszczeniem ziaren z obszaru wysokiego ciśnienia do obszaru o mniejszym ciśnieniu. Wysokie ciśnienie w strefie „gruszki” było spowodowane przeniesieniem obciążenia z wciskanego pala na podłoże gruntowe.

Pal poprzez osiadanie zmniejsza objętość półprzestrzeni gruntowej, osiadanie w głównej mierze spowodowane jest dogęszczeniem gruntu lub przepychaniem go z obszaru większego zagęszczenia do obszaru o mniejszym zagęszczeniu. Szerokość tej strefy uzależniona jest od wielkości ziaren, początkowego zagęszczenia gruntu i stanu dylatacyjnego lub kontraktywnego. Ponadto wielkość tej strefy zależy od rozmiaru podstawy pala. W badaniach fotogrametrycznych sprawdzono także jak zmienia się szerokość strefy gruntu przemieszczanego w zależności od osiadania pala. Okazało się że strefa ta powiększa się liniowo wraz z osiadaniem do osiągnięcia pewnego maksimum. Maksymalna szerokość strefy ustala się przy osiągnięciu nośności granicznej. Jest to także fizyczne wyjaśnienie nośności granicznej, jako siły której nie można przekroczyć ze względu na brak możliwości włączenia do przekazywania obciążenia większej objętości ośrodka gruntowego.



Rys. 34. Zależność szerokości strefy gruntu przemieszczanego pod podstawą pala od osiadania pala

Z wykresu na rysunku 34 można odczytać wartość szerokości strefy dla osiadań równych 0,1D (10% średnicy pala), wynosi ona około 49 mm czyli około 3D. Przeliczając układ płaski na układ przestrzenny szerokość strefy gruntu przemieszczanego przy

osiadaniach równych 10% średnicy pała wynosi zaledwie 1,25D. Szerokość tej strefy nie zależy wyłącznie od geometrii podstawy pała, lecz również od wielkości ziaren i zagęszczenia ośrodka gruntowego. Należy mieć również na uwadze, że powyższe rozważania dotyczą pał modelowych o znacznie mniejszych wymiarach od pał naturalnych.

Mechanizm pracy pobocznic pała

Analizując zachowanie gruntu przy pobocznic pała, można stwierdzić, że przy bardzo małych osiadaniach pała grunt wokół pobocznic przemieszcza się zgodnie z pobocznica pała. Im dalej od pobocznic, tym mniejsza wartość przemieszczenia. Zjawisko to opisał Gwizdała [13]. Wartość składowej przemieszczenia pionowego jest odwrotnie proporcjonalna do odległości poziomej od pobocznic pała. Przemieszczenie gruntu wraz z pobocznica związane jest z tarcie statycznym. Po przekroczeniu granicznej wartości wytrzymałości na ścinanie następuje poślizg gruntu na pobocznica lub ścinanie gruntu w wąskiej strefie otaczającej pobocznica pała. Zaistniały schemat ścinania gruntu, czy to na powierzchni kontaktowej pobocznic pała, czy w strefie otaczającej pobocznica pała zależy od wartości wytrzymałości na ścinanie. W związku z tym maksymalna składowa styczna naprężenia na pobocznica pała $\tau_{\max}$ w gruntach niespoistych określono wzorem (46).

$$\tau_{\max} = \min \begin{cases} \sigma_x \mu \\ \sigma_x \tan \phi \end{cases} \quad (46)$$

gdzie:

μ - współczynnik tarcia statycznego na powierzchni kontaktowej grunt-pobocznica pała [-],

ϕ - kąt tarcia wewnętrznego gruntu otaczającego pobocznica pała [°],

σ_x - składowa normalna naprężenia w podłożu gruntowym [kPa].

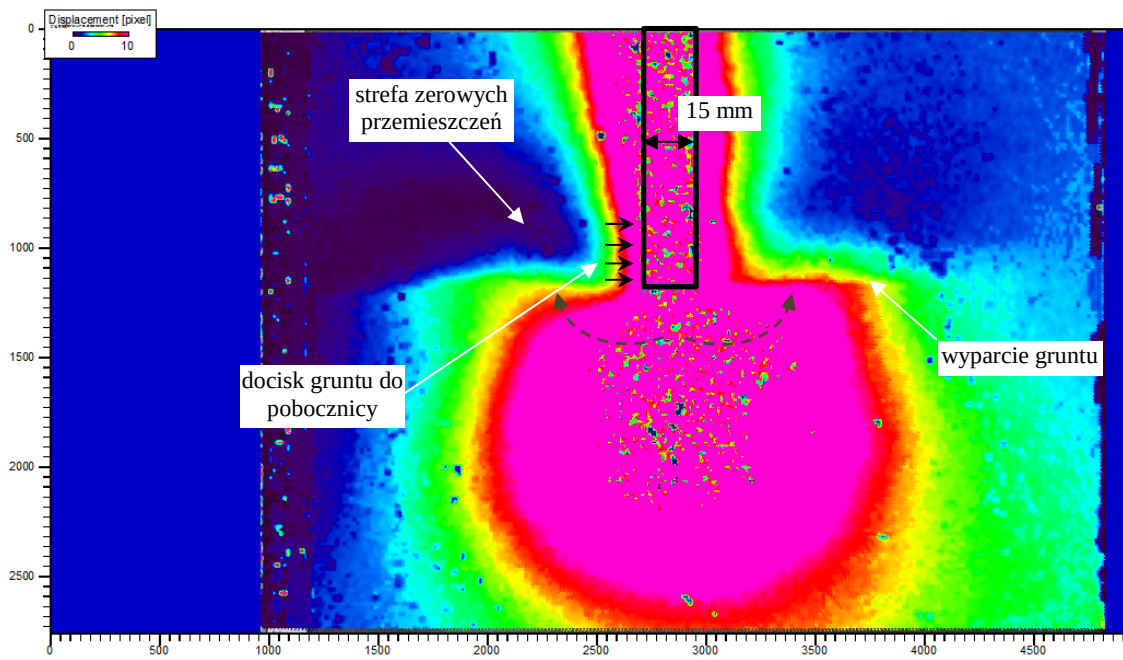
Po przekroczeniu maksymalnych składowych stycznych naprężenia na pobocznica, które, jak wskazują badania na pałach modelowych, następuje przy niewielkich osiadaniach, można zaobserwować poślizg ziaren. Zjawisko to występuje najczęściej na powierzchni kontaktowej pobocznica-grunt lub w bezpośrednim otoczeniu pała (kilka milimetrów od pobocznic pała). Poślizg dotyczy sytuacji kiedy osiągnięto już maksymalne naprężenie na pobocznica. Przy dalszym obciążaniu wartość składowej stycznej naprężenia utrzymuje się na stałym poziomie lub maleje do pewnej wartości.



Rys. 35. Ugięcie warstw podłoża gruntowego spowodowane osiadaniem pala

Interakcje podstawa-pobocznica pala

Badania fotogrametryczne wskazują, że grunt spod podstawy pala przepychany jest powyżej poziomu podstawy. Biorąc pod uwagę również fakt, iż w wyniku tarcia gruntu na pobocznicy grunt wokół pobocznicy pala jest przemieszczany w dół, powstaje wówczas strefa gruntu zaklinowanego (ściskanego z obu stron). W związku ze wzrostem składowych pionowych naprężeń w tej strefie, rośnie również składowa pozioma naprężenia dociskająca do pobocznicy pala. Analizy fotogrametryczne wskazują również, że grunt w obszarze przy bocznicy bezpośrednio nad podstawą pala nie ulega żadnym przemieszczeniom, pomimo osiadań pala. Powstałe nad podstawą pala dodatkowe naprężenie dociskające grunt do pobocznicy pala generuje znaczny przyrost składowych stycznych naprężeń zgodnie z wzorem (46). Podczas badań w gruntach o różnym zagęszczeniu zauważono także, że wyparcie gruntu spod podstawy pala występuje w gruncie o znacznym zagęszczeniu. Przy luźno ułożonych ziarnach wyparcie nie występowało, a przemieszczenie spowodowane oddziaływaniem podstawy pala odbywało się w mniejszej strefie wyłącznie poniżej poziomu podstawy pala.

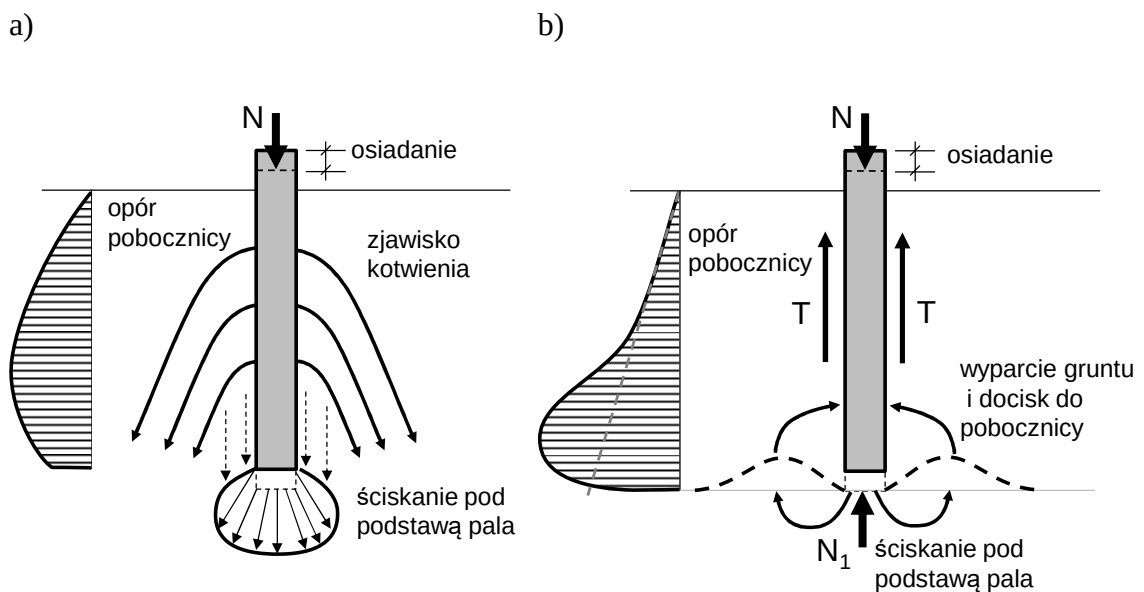


Rys. 36. Wyniki analizy fotogrametrycznej pala. Osiadanie równe 5 mm

Grunt wypierany spod podstawy pala powoduje powstanie dodatkowych naprężeń dociskających, a w związku z tym wzrost składowych stycznych naprężeń na pobocznicy pala. Większe naprężenia na pobocznicy powodują wzrost składowych pionowych naprężeń w otoczeniu pobocznicy pala przy podstawie, a te z kolei przeciwdziałają wyparciu gruntu co wpływa znacząco na wzrost nośności podstawy pala. Słuszność tę potwierdzają wyniki badań próbnych obciążeń statycznych pali prowadzone w dwóch schematach obciążenia. Pierwszy dotyczył sytuacji, w której obciążany pal przekazywał obciążenia do podłoża gruntowego poprzez sumę oporu gruntu na pobocznicy i pod podstawą pala; z kolei drugi schemat dotyczył sytuacji, w której obciążenie przykładane w głowicy pala było równoważone wyłącznie przez opór pod podstawą pala (pobocznica nie miała kontaktu z gruntem). W drugim przypadku opór zmobilizowany pod podstawą pala był mniejszy niż wynikało to z kolejnych badań z oprzyrządowanym palem. Mniejszy opór można wytłumaczyć mniejszą wartością składowych pionowych naprężeń w poziomie podstawy pala. Wzrost nośności podstawy spowodowany oddziaływaniem podstawy wynosił nawet 50 %.

Wiele naukowców podkreśla, że mechanizm transferu obciążenia zewnętrznego na ośrodek gruntowy otaczający pobocznice i pod podstawą pala nie jest jeszcze w pełni wyjaśniony, a wyjaśnienia dotyczące tego zagadnienia w wielu przypadkach są między sobą sprzeczne.

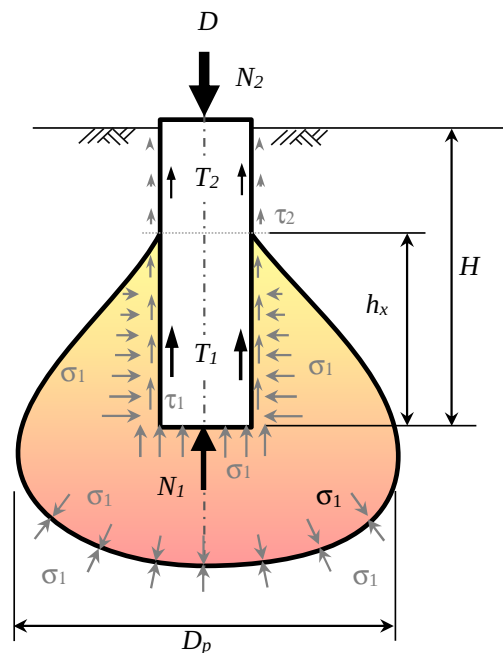
Na przykład Ivšić, Bačić, Librić [22] przedstawiają teorię, w której pobocznica oddziałuje z podłożem gruntowym jak kotwa, powodując powstanie bardzo dużych składowych stycznych naprężeń na pobocznicy pała w środkowej części trzonu rys. 37a. W innym podejściu podają, że grunt wyparty spod podstawy pała powoduje dodatkowe dociski do pobocznicy przy podstawie pała powodując powstanie znacznych składowych stycznych naprężeń na pobocznicy rys. 37b. Koncepcja przedstawiona przez wymienionych autorów na rys. 37b. jest także zgodna z otrzymanymi przez autora niniejszej rozprawy wynikami badań fotogrametrycznych.



Rys. 37. Sposoby przekazywania siły wciskającej pał na otaczający grunt – różne efekty i wyjaśnienia [22]

Zjawisko to można wytłumaczyć rozkładem naprężeń w gruncie zaproponowanym przez Meyera [32]. Naprężenia przyłożone na powierzchni terenu rozchodzą się w podłożu gruntowym zgodnie z liniową teorią Boussinesqa. Naprężenia te maleją wraz z głębokością, i przenoszą się kierunku dolnym i na boki. Rozkład naprężeń w gruncie, w okolicy podstawy pała różni się od typowego rozkładu naprężeń. W tym przypadku naprężenie przenosi się nie tylko ku dołowi i na boki, ale pojawia się także naprężenie skierowane ku górze. Takie naprężenie równoważone jest nie tylko przez naprężenie geostatyczne, ale także przez część składowych pionowych naprężeń spowodowanych oporem gruntu na pobocznicy pała. Wpływa to nie tylko na wzrost oporu na pobocznicy pała, ale także na wzrost nośności podstawy pała. Zjawiska

te występują jednocześnie. Na rysunku 38 przedstawiono schematycznie ideę współpracy podstawy i poboczniczy pala.



Rys. 38. Schemat współpracy podstawy i poboczniczy pala [32]

Wpływ podstawy na wzrost oporu poboczniczy pala:

Podczas obciążania pala, podstawa pala osiada powodując powstanie stanu naprężenia w ośrodku gruntowym pod podstawą. Naprężenie te przenosi się także ku górze powodując dodatkowy docisk gruntu do pobocznic. Docisk ten zgodnie z prawem tarcia mobilizuje większe naprężenie na pobocznic, a w związku z tym - większe opory pobocznic.

Wpływ poboczniczy pala na wzrost oporu podstawy pala:

Opór zmobilizowany na poboczniczy przekazywany jest na podłoże gruntowe powodując wzrost składowych pionowych naprężenia w gruncie. Wzrost ten powoduje, że obszar rozkładu naprężenia powiększa się. W związku z powstaniem większego obszaru oddziaływania podstawy pala opór podstawy pala rośnie.

W wielu przypadkach opór poboczniczy pala oblicza się na podstawie naprężenia geostatycznego i współczynnika tarcia gruntu na poboczniczy zgodnie z podstawowym prawem tarcia. W stanie spoczynku (brak przemieszczenia poziomego między pobocznicą i ośrodkiem gruntowym) naprężenie dociskające obliczane na podstawie

naprężenia geostatycznego i współczynnika parcia spoczynkowego K_0 , który wynosi dla gruntów niespoistych od 0,3 do 0,6. Gdyby założyć, że nie występuje poślizg ziaren po pobocznicy i ścięcie następuje w gruncie wówczas naprężenie na pobocznicy wynosiłoby 25-30% składowej pionowej naprężenia geostatycznego. Badania terenowe wskazują, że naprężenie na pobocznicy jest o wiele większe. Parcie spoczynkowe gruntu na pobocznicy pala występuje wyłącznie w przypadku, gdy pobocznica nie przemieszcza się. Podczas próbnego obciążenia pala, w wyniku przemieszczenia pobocznicy pala następuje proces ścinania gruntu na pobocznicy pala. Procesowi temu towarzyszy zjawisko dylatacji (rozluźniania) lub kontraktacji (zagęszczania) w zależności od początkowego stanu gruntu i stanu naprężenia w ośrodku gruntowym. W przypadku dylatacji (która występuje najczęściej) podczas mobilizacji oporu na pobocznicy rośnie także wartość współczynnika parcia, jednak ze względu na zbyt małe przemieszczenia poziome, wzrost tego współczynnika jest pomijalnie mały. Ze względu na brak informacji o stanie gruntu (dylatywny/kontraktywny) do pali nieprzemieszczeniowych bezpiecznie jest przyjąć wartość parcia spoczynkowego. Skąd zatem dodatkowe naprężenia na pobocznicy? Odpowiedzi na to pytanie należy poszukiwać w wzroście stanu naprężenia w okolicy podstawy pala. Przeprowadzone w laboratorium badania fotogrametryczne wskazują na obszar wokół pobocznicy przy podstawie pala, w którym nie występują żadne przemieszczenia gruntu, pomimo iż pal przemieszcza się. Brak przemieszczeń spowodowany jest wystąpieniem naprężenia o przeciwnym zwrocie. Naprężenie te powoduje wzrost składowych poziomych naprężenia poprzez znaczny wzrost współczynnika parcia, nawet do wartości współczynnika oporu granicznego K_p . Potwierdzają to także badania Krasieńskiego [28].

W analizie literatury, a także przeprowadzonych badaniach laboratoryjnych podkreślono, że oddzielna analiza oporu podstawy i pobocznicy pala wiąże się z bardzo dużym uproszczeniem, ponieważ obserwuje się silne współzależności oporu podstawy i pobocznicy pala. Wcześniejsze badania, w których zakładano określenie oporu na pobocznicy jako różnicy siły przyłożonej w głowicy i oporu pod podstawą pala zmobilizowanego bez udziału pobocznicy zawierały błędne założenia, niemniej jednak dostarczyły wielu cennych informacji. W kolejnym programie badań zakłada się jednoczesny pomiar oporu podstawy i pobocznicy. Porównanie wyników tych badań umożliwiło określenie współzależności w formowaniu się oporu na pobocznicy i pod

podstawą pala. Szczegółowe rozpoznanie tego zjawisko będzie przedmiotem przyszłych badań.

6.3. PODSUMOWANIE BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

W rozdziale szóstym przedstawiono metodologię badań pali w warunkach laboratoryjnych. Badania opierały się na próbnym obciążeniu statycznym w warunkach laboratoryjnych na palach o znacznie mniejszych wymiarach od pali naturalnych. W pierwszej części wykonano próbne obciążenia statyczne oprzyrządowanych pali, podczas których mierzono opór w podstawie pala. Umożliwiło to bezpośrednie pomiar rozkładu oporów podczas próbnego obciążenia statycznego. W drugiej części badań przeprowadzono standardowe próbne obciążenia pali, podczas których stosowano pale o różnych średnicach i długościach. Trzecia część badań laboratoryjnych miała na celu sprawdzenie jak opór pobocznicy wpływa na kształtowanie oporu pod podstawą pala. W tym celu przeprowadzono próbne obciążenia statyczne, w których pobocznica nie miała kontaktu z podłożem gruntowym, a całość obciążenia była przekazywana bezpośrednio na podstawę.

Badania fotogrametryczne wskazywały, iż w badanych przypadkach pod podstawą pala tworzy się obszar o znacznie większych przemieszczeniach ziaren niż w pozostałej części. Na rysunkach 33,36 widać wyraźnie, że do ośrodka gruntowego wokół pobocznicy pala zostaje wprowadzony grunt, który pierwotnie znajdował się pod podstawą pala. Może to sugerować powstanie mechanizmu zwiększonego oporu podstawy i pobocznicy spowodowanego formowaniem się pod podstawą tzw. „gruszki”, która obejmuje również pewną część wysokości pala powyżej podstawy.

W badaniach laboratoryjnych wykazano również, że w celu formowania się typowego układu oporu podstawy i pobocznicy pala, zagłębienie pala w gruncie powinno być większe niż $2,5D$. Wyniki tych badań opisano w [41], [61].

Podczas badań eksperymentalnych próbnym obciążeniem pali w warunkach laboratoryjnych uzyskano podobny kształt krzywej osiadania jaki obserwuje się podczas badań w skali naturalnej. W pierwszej części badań zauważono, że opór pobocznicy rośnie wraz z kolejnymi stopniami obciążenia i już przy niewielkich osiadaniach osiąga wartość maksymalną po której zaczyna maleć. W ten sposób możliwe było określenia charakteru ścięcia gruntu w otoczeniu pobocznicy. Opór ten pomimo małych wartości

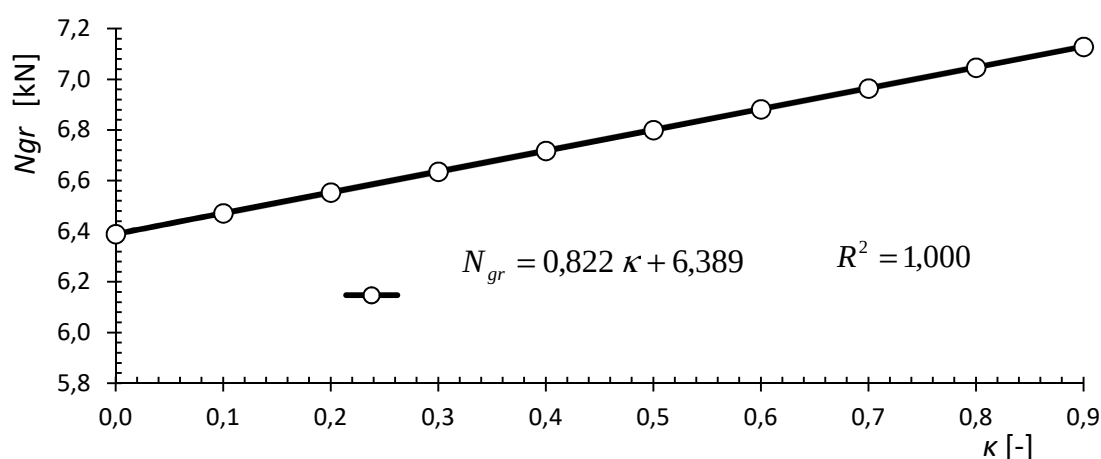
wskazywał na wystąpienie składowych stycznych naprężenia na pobocznicy od 3 do 10 krotnie większych niż naprężenie geostatyczne. Zgodnie z równaniami przedstawionymi w rozdziale pierwszym składowe styczne naprężenia na pobocznicy prawie zawsze są mniejsze niż naprężenie geostatyczne, a w przypadku pali przemieszczeniowych mniejsze niż 3-krotna wartość naprężenia geostatycznego. Należy jednak dodać, że badane pale nie były palami przemieszczeniowymi. W kolejnej części badań sprawdzono jak pobocznica wpływa na opór podstawy. Okazało się wówczas, że gdy nie występuje opór na pobocznicy, wówczas pal wykazuje większe osiadania. W związku z tym występuje wyraźny związek pomiędzy oporem pobocznicy i podstawy pala.

W celu lepszego zrozumienia zasady współpracy pala z podłożem gruntowym przeprowadzono fotogrametryczne badania przemieszczeń ośrodka gruntowego podczas wciskania pala. Badania polegały na określeniu kierunku i wartości przemieszczeń przy danym osiadaniu pala. W ten sposób możliwe było zobrazowanie jak uginają się warstwy podłoża gruntowego wokół pala, a także w jaki sposób przemieszczany jest grunt pod podstawą pala. Ponadto możliwe było zobrazowanie kształtu stref uplastycznionego gruntu przy bardzo dużych przemieszczeniach pala. Przeprowadzono także interpretację wyników badań symulacyjnych. Opisano zależności mające wpływ na kształtowanie się stref przemieszczeń gruntu wokół pala, uzyskanych w badaniach fotogrametrycznych. Zjawisko współpracy pobocznicy i podstawy pala oraz interakcje między nimi wciąż budzą wiele wątpliwości, a w związku z tym podawanych jest wiele możliwych interpretacji. Jedną z nich jest propozycja Meyera, która wyjaśnia sposób formowania się dodatkowych docisków gruntu do pobocznicy powodujących formowanie się większych oporów pobocznicy.

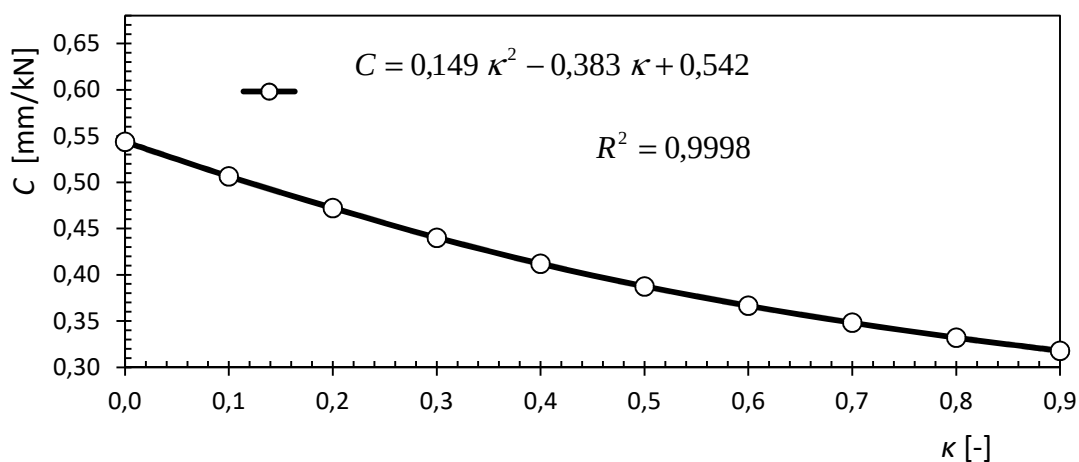
7. SFORMUŁOWANIE ZALEŻNOŚCI ANALITYCZNYCH PARAMETRÓW KRZYWEJ M-K

7.1. APROKSYMACJA WYNIKÓW PRÓBNYCH OBCIĄŻEŃ STATYCZNYCH

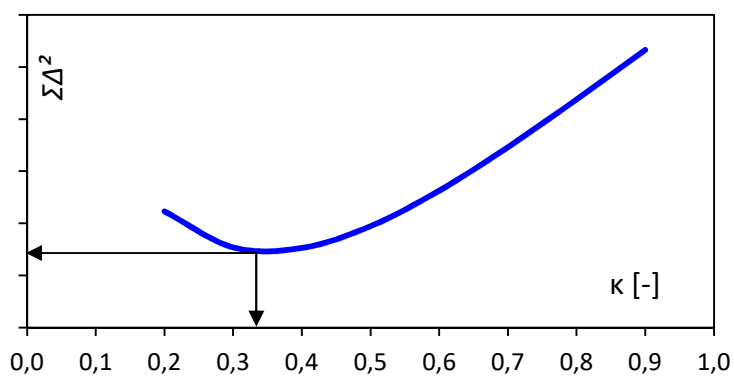
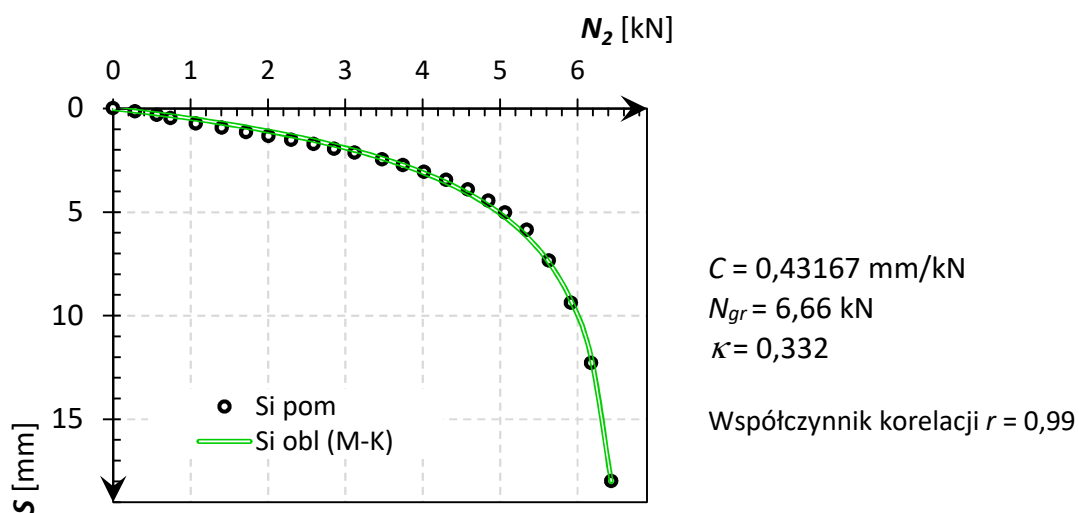
Procedurę aproksymacji parametrów krzywej z metody M-K opisano w punkcie 5.1. Poniżej opisano szczegóły aproksymacji pala P.1. Celem aproksymacji było uzależnienie zarówno N_{gr} jak i C od parametru κ . W tym celu przy zadanym parametrze κ korzystając z równania (34) określono wartość N_{gr} , przy spełnieniu warunku z równania (37). Przy zadanej wartości parametru κ określano także wartość parametru C korzystając z równania (32). Zmieniając wartość parametru κ , przy spełnieniu warunków optymalizacji (35), otrzymano następujące zależności: $N_{gr} = N_{gr}(\kappa)$ oraz $C = C(\kappa)$ przedstawione na rys. 39 i 40.



Rys. 39. Zależność $N_{gr} = N_{gr}(\kappa)$ uzyskana podczas aproksymacji. Pal P.1

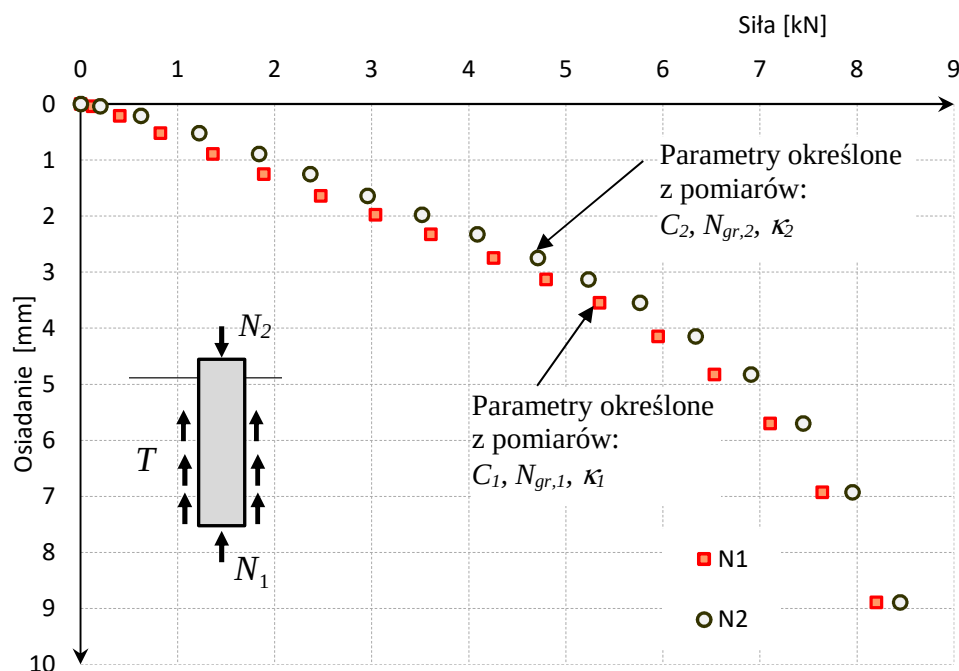
Rys. 40. Zależność $C = C(\kappa)$ uzyskana podczas aproksymacji. Pal P.1

Po uzyskaniu przedstawionych zależności określono optymalną wartość parametru κ .

Rys. 41. Optymalna wartość parametru κ . Pal P.1

Rys. 42. Aproksymująca krzywa osiadania M-K. Pal P.1

Aproksymowaną krzywą osiadania pała P.1 określoną trzema parametrami N_{gr} , C , κ przedstawiono na rys. 42. Pozostałe wyniki aproksymacji przedstawiono w załączniku E.



Rys. 43. Wyniki otrzymane z próbnego obciążenia oprzyrządowanego pała P.1. do określenia parametrów krzywych aproksymujących. Pierwsza część badań, tabela 7.

Tabela 7. Zestawienie wyników aproksymacji M-K oprzyrządowanych pali modelowych z pomiarem oporu pod podstawą pała. Pierwsza część badań

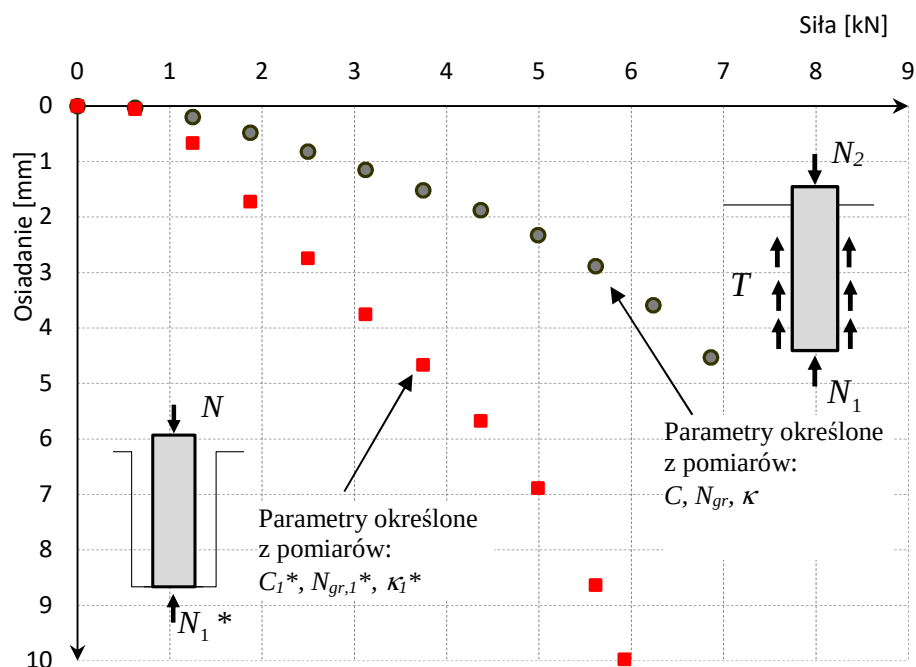
Nr pała	P.1	P.2	P.3	P.4	P.5	P.6	P.7	P.8
H [m]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,25	0,25	0,25
D [m]	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
I_D [%]	0,47	0,70	0,70	0,54	0,78	0,44	0,65	0,69
C_2 [mm/kN]	0,4317	0,3475	0,3046	0,5473	0,1554	0,4317	0,2342	0,2079
$N_{gr,2}$ [kN]	6,66	9,74	8,86	5,21	12,54	6,28	9,99	14,69
κ_2 [-]	0,332	0,268	0,220	0,203	0,251	0,250	0,242	0,348
C_1 [mm/kN]	0,5362	0,3930	0,3477	0,6436	0,1879	0,4960	0,3365	0,2834
$N_{gr,1}$ [kN]	6,28	9,646	8,79	5,07	11,85	6,03	9,04	14,33
κ_1 [-]	0,288	0,242	0,202	0,178	0,227	0,197	0,195	0,238

Tabela 7 zawiera parametry krzywych aproksymujących z metody M-K do pali, w których mierzono dodatkowo opór pod podstawą pała. Parametry z indeksami 2

Tabela 8 zawiera zestawienie parametrów M-K i geometrii pali dotyczących standardowych próbných obciążeń pali, w których otrzymywano zbiory danych $\{N_i; s_i\}$.

Nr pala		L.1	L.2	L.3	L.4	L.5	L.6	L.7	L.8	L.9	L.10
<i>H</i>	[m]	0,15	0,15	0,2	0,15	0,2	0,15	0,15	0,175	0,175	0,175
<i>D</i>	[m]	0,029	0,029	0,029	0,046	0,046	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
<i>C</i>	[mm/kN]	0,128	0,177	0,714	0,414	0,211	0,179	0,115	0,239	0,385	0,421
<i>N_{gr}</i>	[kN]	1,48	1,71	4,25	7,38	10,89	9,27	7,01	10,34	12,13	15,70
<i>κ</i>	[-]	2,582	3,439	2,189	1,044	1,239	0,232	0,398	0,346	0,212	0,361

Nr pala		L.11	L.12	L.13	L.14	L.15	L.16	L.17	L.18	L.19	L.20
<i>H</i>	[m]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
<i>D</i>	[m]	0,07	0,029	0,029	0,029	0,07	0,07	0,07	0,046	0,046	0,046
<i>C</i>	[mm/kN]	0,171	1,779	0,780	0,364	0,107	0,282	0,652	0,061	0,156	0,491
<i>N_{gr}</i>	[kN]	14,37	1,06	3,01	5,77	36,08	8,78	4,74	16,09	4,65	2,19
<i>κ</i>	[-]	0,324	0,985	0,933	0,721	0,138	0,447	0,374	2,094	0,837	0,878



— 78 —

Tabela 9 zawiera zestawienie parametrów M-K próbnych obciążeń pali modelowych, w których pobocznica nie miała kontaktu z gruntem.

Tabela 9. Zestawienie wyników aproksymacji M-K próbnych obciążeń pali modelowych bez udziału pobocznic. Trzecia część badań.

Nr pala		B.12	B.13	B.14	B.15	B.16	B.17	B.18	B.19	B.20
H	[m]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
D	[m]	0,029	0,029	0,029	0,070	0,070	0,070	0,046	0,046	0,046
I_D	[%]	29%	65%	85%	87%	63%	44%	84%	72%	30%
$C1^*$	[mm/kN]	6,119	1,429	0,482	0,181	0,750	1,042	0,540	0,476	1,106
$N_{1,gr}^*$	[kN]	1,06	3,39	5,52	26,30	7,41	4,54	13,89	4,69	2,22
κ^*	[–]	0,092	1,056	1,499	0,842	0,010	0,806	1,083	0,642	0,334

7.2. ANALIZA PARAMETRÓW KRZYWEJ MEYERA-KOWALOWA

Z próbnego obciążenia statycznego po przeprowadzeniu aproksymacji krzywą M-K, otrzymuje się trzy dane C_2 , $N_{2,gr}$, κ_2 . Są to parametry charakteryzujące właściwości pala, ponieważ zawierają istotne informacje o współpracy pala z gruntem, takie jak nośność pala i podatność na osiadanie. Parametry te są niewątpliwie uzależnione od parametrów gruntu, a także od rodzaju i geometrii pala. Na kształt krzywej osiadania składa się suma dwóch oporów: oporu pobocznic i podstawy pala. W związku z tym wpływ na wartości parametrów krzywej M-K ma także rozkład oporów podczas próbnego obciążenia statycznego. Przeprowadzone badania modelowe miały na celu określenie zależności pomiędzy rozkładem oporów i parametrami krzywej M-K przy znanych parametrach podłoża gruntowego, znanej geometrii i jednakowej technologii wykonania pala.

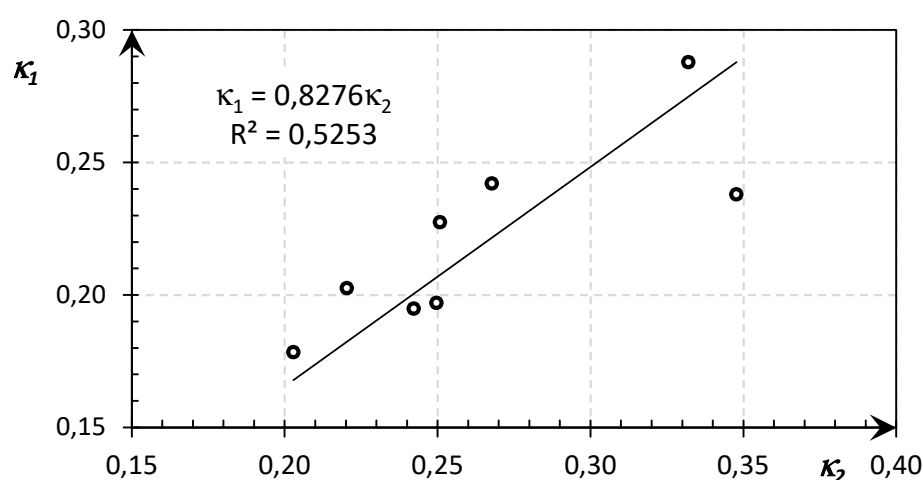
Krzywa osiadania jest złożeniem (superpozycją) krzywej oporu podstawy i krzywej oporu pobocznic pala. Ze względu na możliwość określenia krzywej oporu podstawy pala, z eksperymentalnych badań laboratoryjnych polegających na próbnym obciążeniach statycznych z dodatkowym pomiarem oporu pod podstawą pala, istnieje możliwość analitycznego opisanie tej krzywej za pomocą parametrów krzywej M-K. Uzyskano wówczas parametry: C_1 , $N_{1,gr}$, κ_1 . Poniższa analiza ma na celu określenie związków pomiędzy parametrami C_2 , $N_{2,gr}$, κ_2 i C_1 , $N_{1,gr}$, κ_1 , aby było możliwe

określenie krzywej oporu podstawy pała na podstawie krzywej osiadania pała uzyskanej ze standardowego próbnego obciążenia statycznego.

Krzywa osiadania może być rozłożona na krzywą oporu pobocznicy i krzywą oporu podstawy pała. W związku z tym parametry krzywej M-K: C , N_{gr} , κ powinny zawierać informację o rozkładzie tych oporów. Analiza literatury i wcześniejsze badania wskazują na całkiem odmienny charakter mobilizacji oporów pobocznicy i podstawy pała. Przedstawiona poniżej analiza ma celu określenie związków, które umożliwią wyodrębnienie z krzywej osiadania cech charakterystycznych krzywej oporu podstawy i krzywej oporu pobocznicy pała.

Wyniki badań wskazują na istotny związek pomiędzy parametrem κ_1 i κ_2 w postaci liniowej.

$$\kappa_1 = 0,8276 \kappa_2 \quad (47)$$



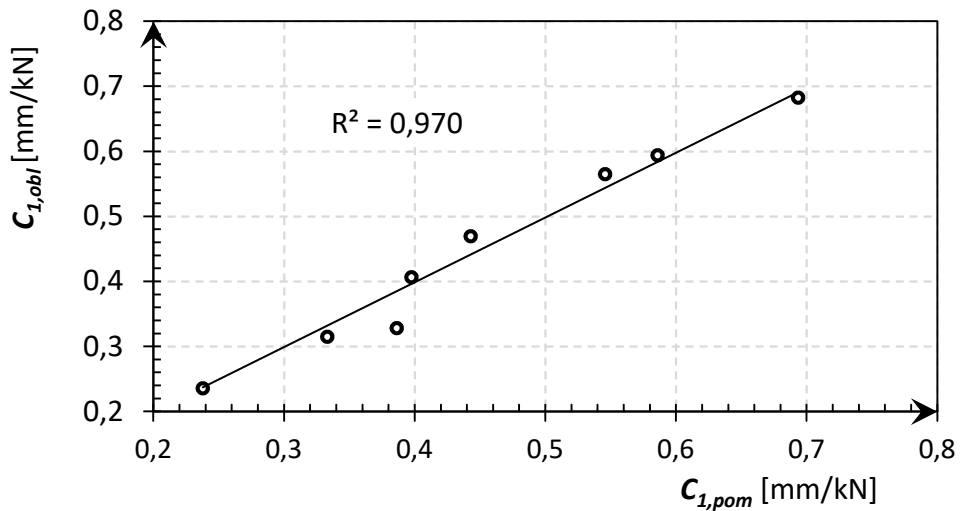
Rys. 45. Zależność κ_1 i κ_2

Współczynnik C_2 jest miarą podatności gruntu na osiadanie, a ponadto zawiera informację współczynnikach C_1 i C_T zgodnie z równaniem (43). W celu określenia parametr C_1 na podstawie parametru C_2 konieczne jest uwzględnienie wpływu pobocznicy. Parametrem który pozwala to uwzględnić jest parametr κ_2 [33]. Na podstawie badań analitycznych Meyer zaproponował zależność pomiędzy parametrem C_1 , C_T oraz κ w postaci równania 48 [32].

$$\frac{C_1}{C_2} = (\kappa_2 + 1)^2 \quad (48)$$

Na podstawie badań laboratoryjnych ustalono, że wzór ten jest bardziej skomplikowany. Wprowadzono stałą przed parametrem κ_2 . Otrzymano wówczas dobrą zgodność dla funkcji w postaci (49).

$$C_1 = C_2 (0,368 \kappa_2 + 1)^2 \quad (49)$$



Rys. 46. Zależność $C_{1,pom}$ i $C_{1,obl}$

Na podstawie analizy parametrów aproksymacji M-K i geometrii pala, odniesionych do parametru $N_{gr,1}$ najlepsze korelacje uzyskiwano związkiem w postaci równania (50). Badania na palach naturalnych i laboratoryjnych umożliwiły określenie związku, w którym najlepsze korelacje uzyskiwano przy $\left(\frac{H}{D}\right)^{1/3}$. Ze względu na mały rozrzut danych $\left(\frac{H}{D}\right)$ zdecydowano się pozostawić wykładnik potęgi.

$$N_{gr,1} = \frac{C_2}{C_1} N_{gr,2} \left[1 + a \left(\frac{H}{D} \right)^{1/3} \kappa_2^{n_1} \right] \quad (50)$$

Po przekształceniu i zlogarytmowaniu równania (50) otrzymano równanie (51)

$$\ln \left(\frac{C_1 N_{gr,1}}{C_2 N_{gr,2}} - 1 \right) - \frac{1}{3} \ln \left(\frac{H}{D} \right) = \ln(a) - n_1 \ln \kappa_2 \quad (51)$$

Równanie (51) rozwiązano stosując metodę wyznaczników, po wprowadzeniu zmiennych pomocniczych.

$$\begin{cases} \sum Y = n \ln(a) + n_1 \sum (X_1) \\ \sum YX_1 = \ln(a) \sum X_1 + n_1 \sum (X_1)^2 \end{cases} \quad (52)$$

gdzie:

$$Y = \ln \left(\frac{C_1 N_{gr,1}}{C_2 N_{gr,2}} - 1 \right) - \frac{1}{3} \ln \left(\frac{H}{D} \right)$$

$$X_1 = \ln \kappa_2$$

Układ równań (52) rozwiązano metodą wskaźnikową. W tym celu stworzono macierze pomocnicze.

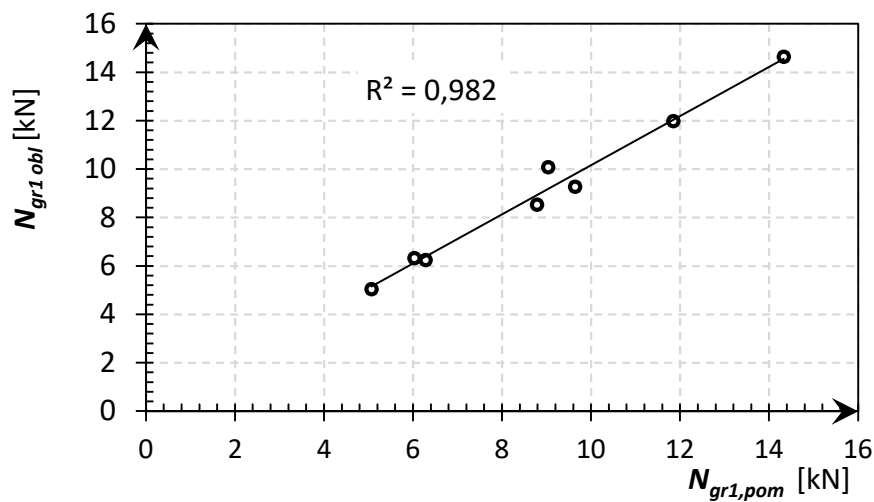
$$M_0 = \begin{bmatrix} n & \sum X_1 \\ \sum X_1 & \sum (X_1)^2 \end{bmatrix} \quad M_1 = \begin{bmatrix} \sum Y & \sum X_1 \\ \sum Y, X_1 & \sum (X_1)^2 \end{bmatrix} \quad M_2 = \begin{bmatrix} n & \sum Y \\ \sum X_1 & \sum Y, X_1 \end{bmatrix}$$

Wyznacznik macierzy jest różny od zera: $\det M_0 \neq 0$ zatem układ określa się jako oznaczony, ma jedno rozwiązanie (53).

$$a = \exp \left(\frac{\det M_1}{\det M_0} \right) = 0,437 \quad n_1 = \left(\frac{\det M_2}{\det M_0} \right) = 1,001 \quad (53)$$

Otrzymano następującą postać równania umożliwiającego określenie $N_{gr,1}$ (54):

$$N_{gr,1} = \frac{C_2}{C_1} N_{gr,2} \left[1 + 0,437 \left(\frac{H}{D} \right)^{1/3} \kappa_2 \right] \quad (54)$$



Rys. 47. Zależność $N_{gr1,pom}$ i $N_{gr1,obl}$

Badania próbnych obciążeń pali z dodatkowym pomiarem oporu pod podstawą umożliwiły określenie następujących związków:

$$C_1 = f(C_2, \kappa_2) \quad (55)$$

$$N_{gr,1} = f(N_{gr,2}, C_2, C_1, \kappa_2, H, D) \quad (56)$$

$$\kappa_1 = f(\kappa_2) \quad (57)$$

7.3. OKREŚLENIE OPORU NA POBOCZNICY NA PODSTAWIE WYNIKÓW PRÓBNEGO OBCIĄŻENIA STATYCZNEGO

Korzystając z równań (47), (49) i (54) oraz parametrów krzywej osiadania $N_{gr,2}$, C_2 , κ_2 uzyskanych z próbnego obciążenia statycznego istnieje możliwość określenia parametrów $N_{gr,1}$, C_1 , κ_1 dotyczących krzywej oporu podstawy pala. Krzywa oporu pobochnicy pala może być obliczona jako różnica krzywej osiadania i krzywej oporu podstawy pala. Opisano to równaniem (58).

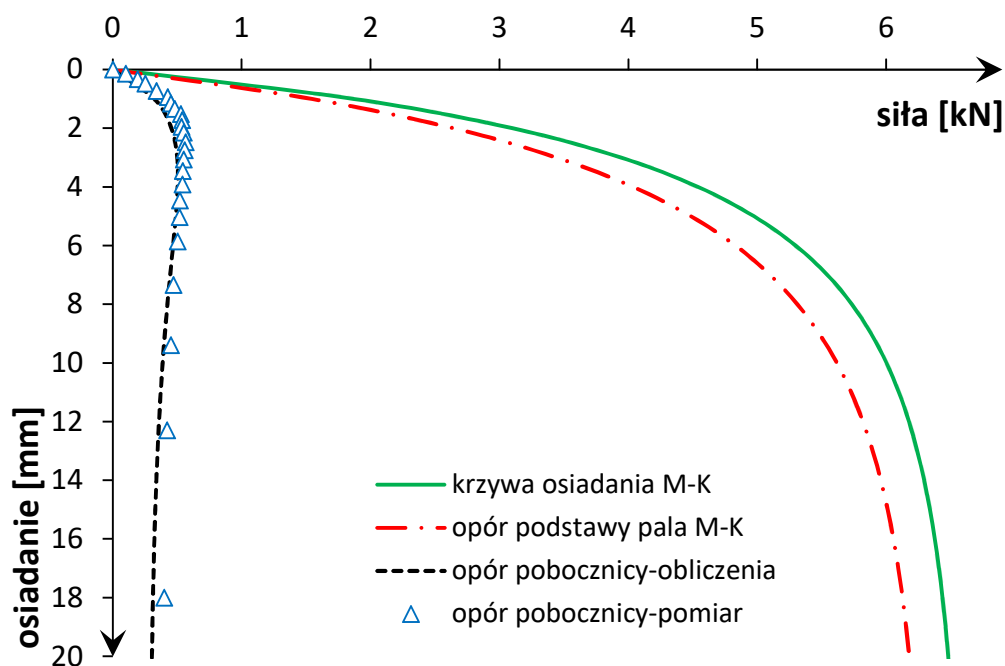
$$T(s) = N_{gr,2} - N_{gr,1} + N_{gr,1} \left[1 - \left(1 + \frac{\kappa_1 \cdot s}{C_1 \cdot N_{gr,1}} \right)^{-\frac{1}{\kappa_1}} \right] - N_{gr,2} \left[1 - \left(1 + \frac{\kappa_2 \cdot s}{C_2 \cdot N_{gr,2}} \right)^{-\frac{1}{\kappa_2}} \right] \quad (58)$$

Tabela 10. Zestawienie obliczonych wartości $N_{gr,1}$, C_1 , κ_1 w stosunku do danych pomierzonych

Nr pala	P.1	P.2	P.3	P.4	P.5	P.6	P.7	P.8
H [m]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,25	0,25	0,25
D [m]	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
I_D [%]	0,47	0,70	0,70	0,54	0,78	0,44	0,65	0,69
C_2 [mm/kN]	0,4317	0,3475	0,3046	0,5473	0,1554	0,4317	0,2342	0,2079
$N_{gr,2}$ [kN]	6,66	9,74	8,86	5,21	12,54	6,28	9,99	14,69
κ_2 [-]	0,332	0,268	0,220	0,203	0,251	0,250	0,242	0,348
C_1 [mm/kN]	0,5362	0,3930	0,3477	0,6436	0,1879	0,4960	0,3365	0,2834
$N_{gr,1}$ [kN]	6,28	9,646	8,79	5,07	11,85	6,03	9,04	14,33
κ_1 [-]	0,288	0,242	0,202	0,178	0,227	0,197	0,195	0,238

Wartości obliczone

C_1 [mm/kN]	0,5436	0,4194	0,356	0,632	0,1854	0,5147	0,2779	0,2645
$N_{gr,1}$ [kN]	6,3795	9,4125	8,6157	5,0834	12,144	6,1427	9,7847	14,226
κ_1 [-]	0,2748	0,2217	0,1824	0,1679	0,2076	0,2067	0,2005	0,2878



Rys. 48. Obliczony rozkład oporów w funkcji osiadania pala. Pal P.1

Pozostałe wykresy umieszczono w załączniku F.

Podobną analizę wykonano do próbnych obciążeń pali laboratoryjnych, w których nie mierzono oporu pod podstawą pala.

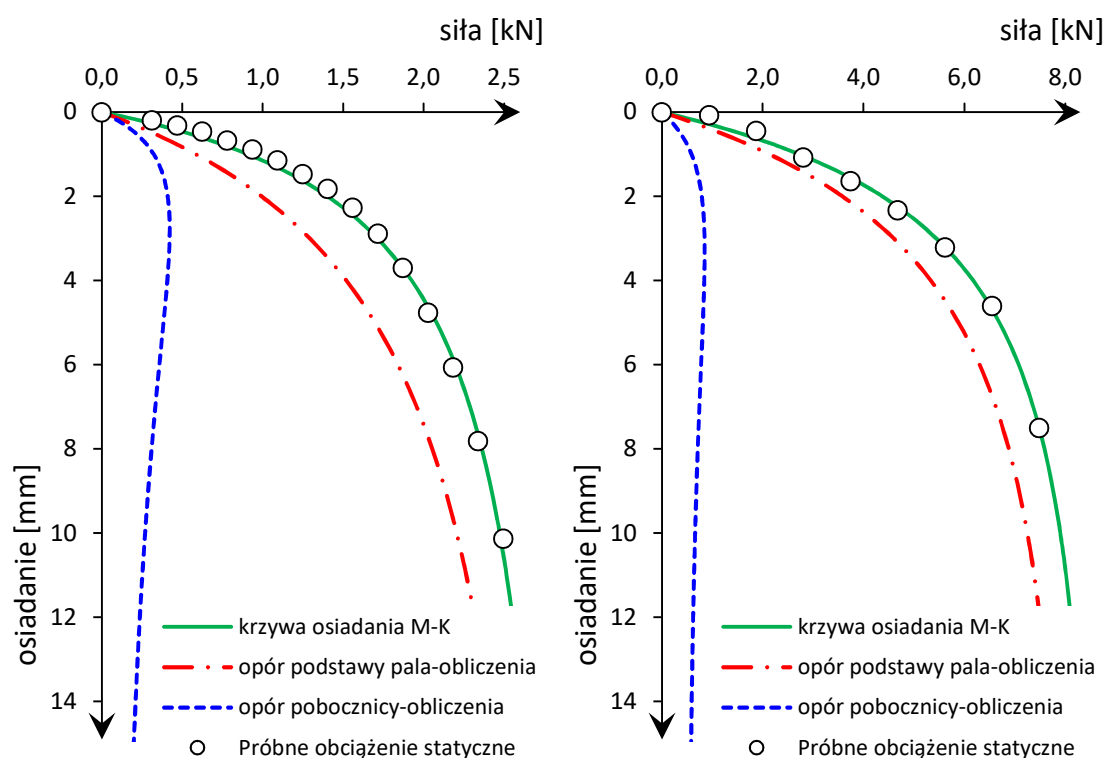
Tabela 11. Obliczone wartości $N_{gr,1}$, C_1 , κ_1 w stosunku do danych pomierzonych. Pale laboratoryjne bez pomiaru oporu podstawy pala.

Nr pala		L.1	L.2	L.3	L.4	L.5	L.6	L.7	L.8	L.9	L.10
H	[m]	0,15	0,15	0,2	0,15	0,2	0,15	0,15	0,175	0,175	0,175
D	[m]	0,029	0,029	0,029	0,046	0,046	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
C	[mm/kN]	0,128	0,177	0,714	0,414	0,211	0,179	0,115	0,239	0,385	0,421
N_{gr}	[kN]	1,48	1,71	4,25	7,38	10,89	9,27	7,01	10,34	12,13	15,70
κ	[-]	2,582	3,439	2,189	1,044	1,239	0,232	0,398	0,346	0,212	0,361
Wartości obliczone											
C_1	[mm/kN]	0,485	0,906	2,328	0,794	0,448	0,211	0,151	0,304	0,447	0,540
$N_{gr,1}$	[kN]	1,15	1,20	3,69	6,45	9,67	8,90	6,53	9,80	11,75	14,85
κ_1	[-]	2,137	2,846	1,811	0,864	1,025	0,192	0,329	0,286	0,175	0,298

ciąg dalszy tabeli 11

Nr pala		L.11	L.12	L.13	L.14	L.15	L.16	L.17	L.18	L.19	L.20
H	[m]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
D	[m]	0,07	0,029	0,029	0,029	0,07	0,07	0,07	0,046	0,046	0,046
C	[mm/kN]	0,171	1,779	0,780	0,364	0,107	0,282	0,652	0,061	0,156	0,491
N_{gr}	[kN]	14,37	1,06	3,01	5,77	36,08	8,78	4,74	16,09	4,65	2,19
κ	[-]	0,324	0,985	0,933	0,721	0,138	0,447	0,374	2,094	0,837	0,878
Wartości obliczone											
C_1	[mm/kN]	0,215	3,302	1,409	0,583	0,118	0,383	0,844	0,191	0,266	0,859
$N_{gr,1}$	[kN]	13,78	1,04	2,97	5,78	35,47	8,27	4,52	12,77	4,33	2,03
κ_1	[-]	0,268	0,815	0,773	0,597	0,115	0,37	0,31	1,733	0,693	0,727

Przykładowy rozkład oporów obliczony do próbnego obciążenia pala w warunkach laboratoryjnych przedstawiono na rysunku 49. Pozostałe wykresy umieszczono w załączniku G.



Rys. 49. Obliczony rozkład oporów. Pal L.13 i L.16

Dane przedstawione w tabeli 8, na rysunku 43 i w załączniku G przedstawiają rozkłady oporów mobilizowanych wraz z osiadaniem pala. Maksymalny opór poboczny osiąga wartości od 0,15 kN do 1,96 kN, z wartością średnią 0,81 kN i medianą 0,72 kN.

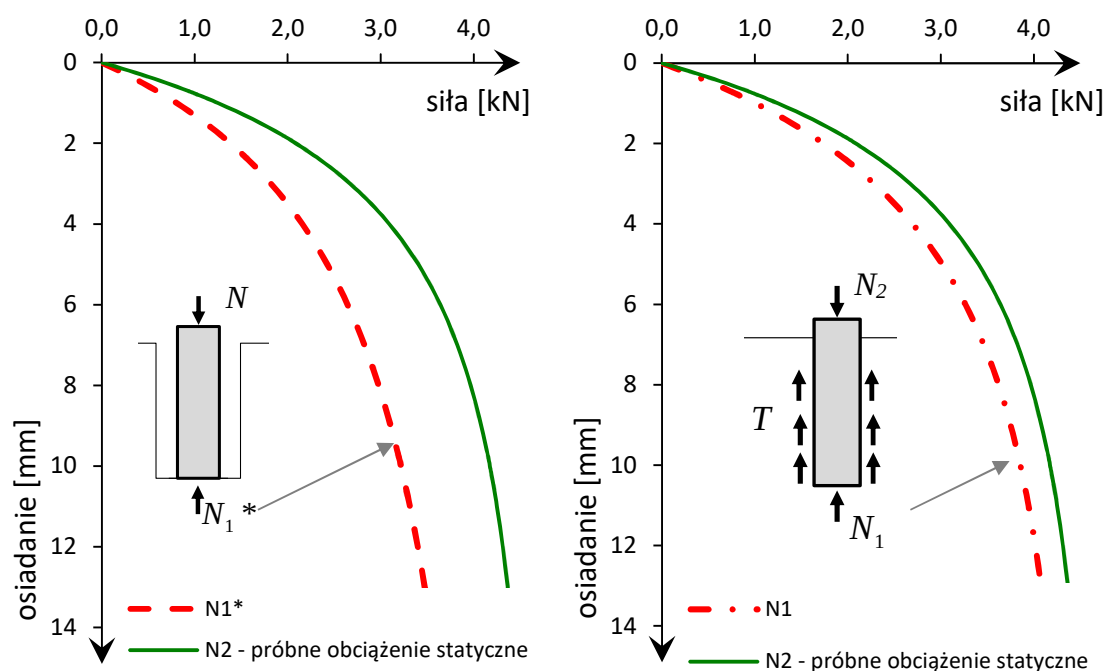
Rozkłady oporów przedstawione na rysunkach 48-49 umożliwiają analizę mobilizacji oporu na pobocznicy. Opór na pobocznicy mobilizowany jest bardzo szybko tj. osiąga maksymalną wartość już przy małych osiadaniach od 0,6 do 3 mm (około 2-5% średnicy pala). Po przekroczeniu tych osiadań opór na pobocznicy, w większości przypadków maleje od kilku do nawet 50 % wartości maksymalnej. Jest to zjawisko typowe w gruntach niespoistych, w których po przekroczeniu wytrzymałości na ścinanie ziarna zaczynają ślizgać się lub toczyć po powierzchni pobocznicy. Opór podstawy mobilizowany jest zupełnie inaczej. Przebieg krzywej jest bardziej przewidywalny. Można zauważyć wyraźne zagięcie krzywej oporu podstawy pala przy osiadaniach wynoszących około 10% średnicy pala.

7.4. OKREŚLENIE WPŁYWU WSPÓŁZALEŻNOŚCI OPORU POBOCZNICY I PODSTAWY PALA

Podczas analiz wyników w drugiej i trzeciej części badań zauważono, że pal, w którym pobocznica nie przenosiła obciążenia, wykazywał znacznie większe osiadania. Przekłada się to na mniejszą nośność i większą podatność podłoża gruntowego na osiadanie (określone współczynnikiem C). Gdyby założyć, że powstała różnica w krzywych osiadania, w obciążaniu pali w drugiej i trzeciej części badań, wynika wyłącznie z oporu gruntu na pobocznicy wówczas opór ten wynosiłby znacznie więcej niż wynika to z pierwszej części badań, gdzie dokonywano pomiaru rozkładu oporów. Na tej podstawie można stwierdzić, że istnieje wpływ oporu zmobilizowanego na pobocznicy na nośność podstawy pala i jej podatność na osiadanie. Przedstawiono to na rysunku 50. Różnice te opisano także zależnościami (59) i (60).

$$C_1^* \neq C_1 \quad (59)$$

$$N_1^* \neq N_1 \quad (60)$$



Rys. 50. Schemat różnicy w nośności podstawy pała w zależności od sposobu obciążenia pała. Po prawej- na podstawie pierwszej części badań (P.4). Po lewej- na podstawie badania z drugiej i trzeciej części (L.17 i B.17)

7.5. APLIKACJA DANYCH Z BADAŃ TERENOWYCH DO MODELU M-K I OTRZYMANYCH ZALEŻNOŚCI

Opracowane równania w wcześniejszym punkcie mają na celu opisanie analitycznie fizycznych zjawisk towarzyszących próbnym obciążeniom statycznym pali. Przeprowadzone badania były badaniami podstawowymi i miały na celu wyjaśnienie podstawowych mechanizmów zachodzących przy współpracy pała z gruntem. W związku z tym wyprowadzone równania wymagają skorelowania ich z danymi uzyskanymi z badań terenowych.

W tym celu wykorzystano badania terenowe i laboratoryjnych próbnych obciążeń statycznych pali wyposażonych w czujniki umożliwiające określenie redystrybucji składowych normalnych naprężeń na długości pała, a także pale analizowane innymi metodami i opublikowane dane pomiarowe. W tabeli 12 zawarto listę analizowanych pali z dostępnej literatury [16,17,24,25,26,27,30,50,62].

Tabela 12. Dane wejściowe do optymalizacji parametrów krzywej M-K uzyskane z próbnych obciążeń statycznych pali w warunkach terenowych.

Nr pala	Źródło	H	D	C_2	$N_{gr,2}$	κ_2	C_1	$N_{gr,1}$	κ_1
		[m]	[m]	[mm/kN]	[kN]	[-]	[mm/kN]	[kN]	[-]
T1	[62]	7,00	0,40	0,0042	2240,3	2,201	0,0194	451,0	1,453
T2	[62]	7,00	0,40	0,0035	2185,9	2,373	0,0580	164,0	2,536
LL3	[25]	1,00	0,07	0,0815	31,3	1,820	0,3480	17,7	1,600
T4	[27]	9,60	0,36	0,0061	1030,9	2,127	0,0427	784,4	1,400
LL5	[25]	1,00	0,06	0,1579	18,0	1,630	0,4840	11,5	1,730
T6	[25]	7,10	0,36	0,0063	1974,0	1,810	0,0158	560,0	1,600
T7	[16]	21,90	0,56	0,0008	6850,1	0,709	0,0092	513,6	0,328
T8	[24]	19,70	1,50	0,0003	13901,8	0,664	0,0012	2030,4	0,954
T9	[17]	12,50	0,50	0,0021	2663,2	2,216	0,0034	999,9	2,057
T10	[17]	14,40	0,42	0,0060	2395,1	2,188	0,0146	1390,7	2,272
T11	[24]	19,70	1,50	0,0005	13060,0	0,930	0,0014	4259,0	0,980
T12	[30]	17,50	0,36	0,0133	1917,6	1,067	0,0313	761,8	2,068
T13	[30]	17,50	0,36	0,0037	1842,5	0,520	0,0131	621,3	0,504
T14	[50]	17,40	0,35	0,0026	2283,4	1,318	0,0069	1147,0	1,248

Badania laboratoryjne umożliwiły określenie zależności pozwalających na określenie parametrów krzywej oporu podstawy pala w postaci równań (61-63).

$$N_{gr,1} = \frac{C_2}{C_1} N_{gr,2} \left[1 + A_1 \left(\frac{H}{D} \right)^{1/3} \kappa_2^{n_1} \right] \quad (61)$$

$$C_1 = C_2 (A_2 \kappa_2 + 1)^2 \quad (62)$$

$$\kappa_1 = A_3 \kappa_2 \quad (63)$$

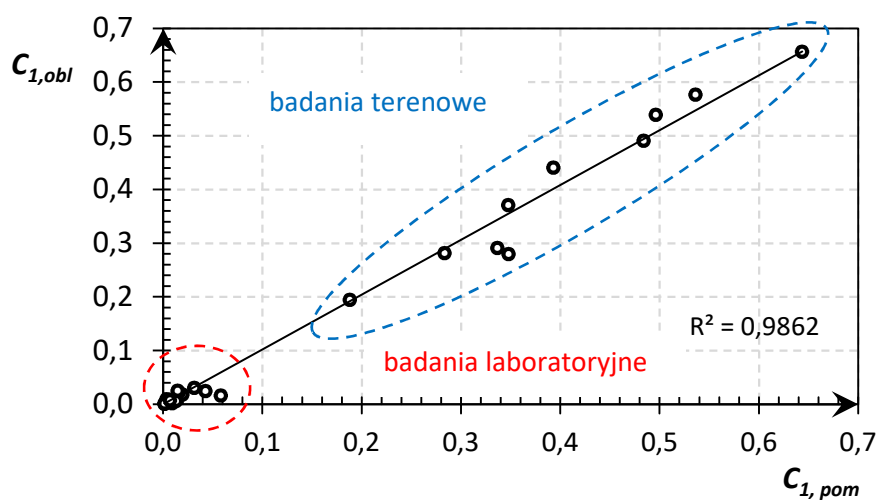
W wyniku uzupełnienia zbioru danych pali laboratoryjnych o wyniki próbnych obciążeń statycznych pali terenowych, określono parametry A_1 , n_1 , A_2 , A_3 równań (61-63). Otrzymano zależności w postaci równań (64-66).

$$C_1 = C_2 (0,467 \kappa_2 + 1)^2 \quad (64)$$

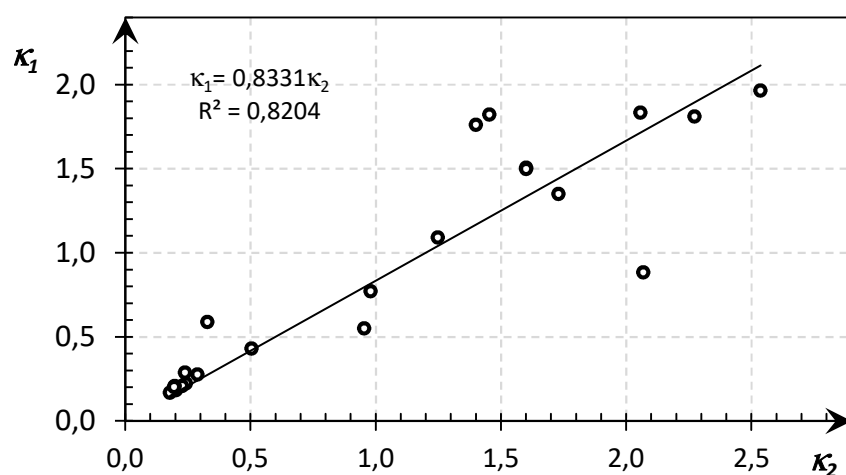
$$\kappa_1 = 0,8331 \kappa_2 \quad (65)$$

$$N_{gr,1} = \frac{C_2}{C_1} N_{gr,2} \left[1 + 0,1435 \left(\frac{H}{D} \right)^{1/3} \kappa_2^{0,5} \right] \quad (66)$$

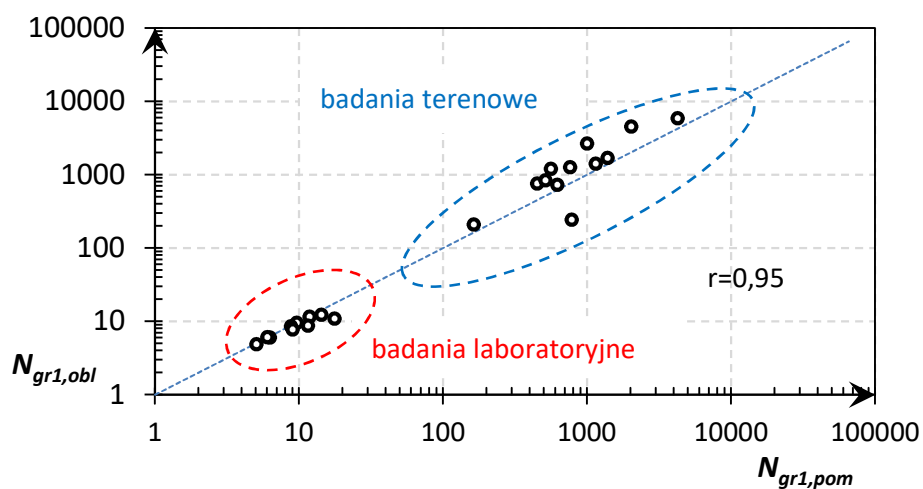
Zgodność danych pomiarowych i obliczonych na podstawie równań (64-66) przedstawiono na rysunkach 51-53.



Rys. 51. Zależność $C_{1,pom}$ i $C_{1,obl}$

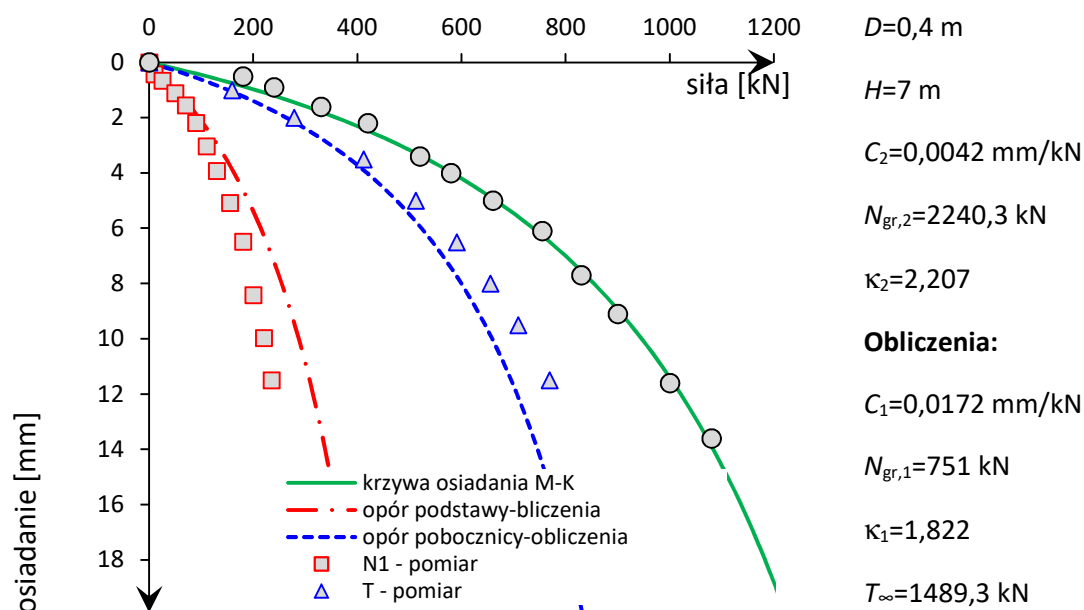


Rys. 52. Zależność κ_1 i κ_2 . Pale laboratoryjne i terenowe

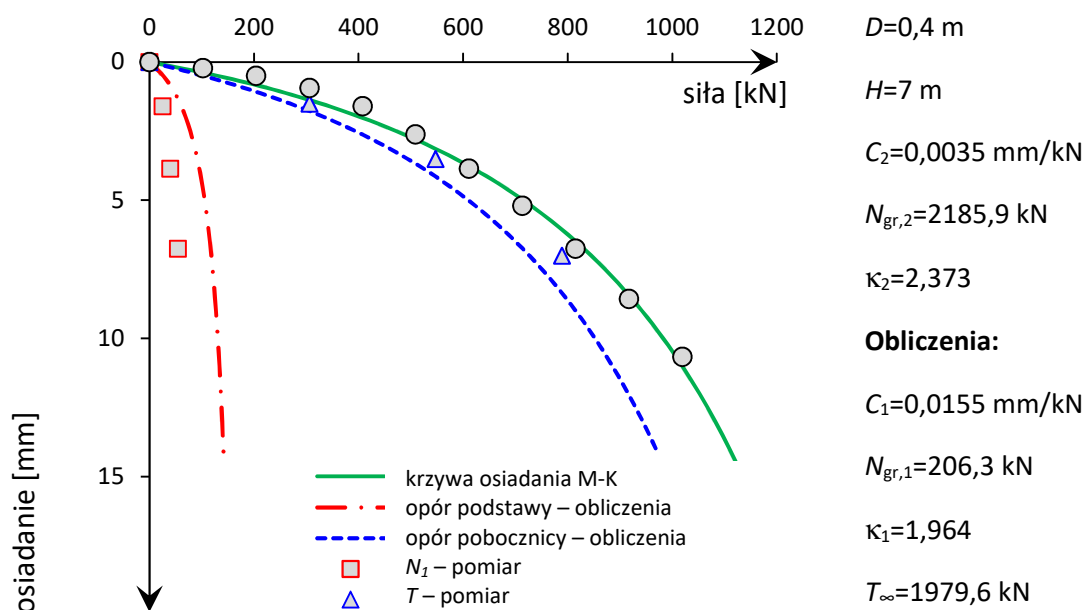


Rys. 53. Zależność $N_{gr,1,pom}$ i $N_{gr,1,obl}$

Uzyskane z obliczeń parametry pozwoliły na określenie rozkładu mobilizacji oporów na pobocznicy i pod podstawą pała wraz z osiadaniem głowicy pała. Wyniki analiz wybranych pali naturalnych przedstawiono na rysunku 54 i 55 oraz w załączniku H i I. Na wykresach zaznaczono także dane zaczerpnięte z literatury w postaci krzywej aproksymowanej metodą M-K oporu pod podstawą pała N_1 (M-K), a także krzywą oporu pobocznicy pała T (M-K).



Rys. 54. Obliczony rozkład oporów. Pał T1



Rys. 55. Obliczony rozkład oporów. Pał T2

7.6. PODSUMOWANIE SFORMUŁOWANYCH ZALEŻNOŚCI ANALITYCZNYCH

Krzywa osiadania uzyskana z próbnego obciążenia statycznego zawiera wiele informacji o pracy pala w ośrodku gruntowym. Krzywa ta jest złożeniem dwóch krzywych: krzywej oporu podstawy i krzywej oporu pobocznicy pala. Parametryzacja wyników próbnego obciążenia metodą M-K umożliwiła porównanie współpracy różnych pali na podstawie wartości charakteryzujących ich parametrów C_2 , $N_{gr,2}$, κ_2 . Dzięki temu możliwe było uzyskanie zależności analitycznych umożliwiających określenie mobilizacji oporu pobocznicy pala wraz z osiadaniem.

Pomiar oporu mobilizowanego na pobocznicy jest dość trudny do pomiaru, ponieważ instrumenty pomiarowe umieszczone na pobocznicy pala ingerują w współpracę pobocznicy pala z gruntem zmieniając całkowicie charakter mobilizacji oporu na pobocznicy. W związku z tym opór na pobocznicy pala mierzony był pośrednio jako różnica siły przyłożonej w głowicy i oporu zmobilizowanego pod podstawą pala. Uzyskanie zależności podstawowych opisujących zjawisko współpracy pala z gruntem w warunkach naturalnych jest bardzo trudne, ze względu na ograniczenia w stosowaniu urządzeń pomiarowych, zmienność podłoża gruntowego, która może wpłynąć na wyniki, a także czasochłonność i kosztowność badań. W związku z tym przeprowadzono badania laboratoryjne. Uzyskane parametry C_2 , $N_{gr,2}$, κ_2 oraz C_1 , $N_{gr,1}$, κ_1 umożliwiły określenie związków pomiędzy parametrami stanu 1 (indeksy z nr 1) opisującego krzywą oporu podstawy pala, a parametrami stanu 2 (indeksy z nr 2) opisującego krzywą osiadania pala uzyskaną na podstawie aproksymacji wyników próbnego obciążenia statycznego. W ten sposób na podstawie wyników próbnego obciążenia statycznego pala możliwe jest określenie oporu gruntu pod podstawą pala.

Przeprowadzono badania laboratoryjne pala, w którym pobocznica nie miała kontaktu z podłożem gruntowym. Badania te wykazały, że w opisie formowania się oporu pobocznicy i podstawy pala nie można stosować prostej zasady superpozycji, kiedy opór podstawy kształtuje się niezależnie od oporu pobocznicy pala. Na rysunku 43 pokazano, że opór podstawy pala, która nie współpracuje w formowaniu składowych stycznych naprężeń na pobocznicy jest znacznie mniejszy niż w przypadku, gdy podstawa pala formuje swój odpór współpracując z pobocznicą. Oznacza to, że istnieje silny związek pomiędzy oporem pobocznicy i podstawy pala i nie można ich rozpatrywać oddzielnie.

Otrzymane w badaniach laboratoryjnych zależności zastosowano do opisu współpracy pali naturalnych. W związku z tym, skorzystano z dostępnych w literaturze badań terenowych i laboratoryjnych rozkładu oporów podczas próbnego obciążenia statycznego, aby skorygować współczynniki równania. Uzyskane zależności posłużyły do analizy próbnych obciążeń statycznych pali naturalnych.

8. ZASTOSOWANIE WYNIKÓW BADAŃ I ANALIZ DO PROJEKTOWANIA PALI RZECZYWISTYCH

Badania laboratoryjne umożliwiły określenie zależności pozwalających na obliczenie parametrów do krzywej oporu podstawy pala z metody M-K. Rozkłady oporów podczas próbnego obciążenia statycznego określone na podstawie badań terenowych różnych autorów umożliwiły weryfikację wyprowadzonych wzorów. Znajomość krzywej oporu podstawy pala przy znanej krzywej osiadania pala umożliwia także określenie mobilizacji oporu poboczniczy pala wraz z osiadaniem. W celu zobrazowania praktycznego zastosowania wyprowadzonych wzorów dokonano analizy trzech pali, na których przeprowadzono próbne obciążenie statyczne. Procedura analizy jest następująca:

1. Aproksymacja wyników próbnego obciążenia statycznego krzywą Meyera-Kowalowa. Uzyskanie trzech parametrów: C_2 , $N_{gr,2}$, κ_2 .
2. Obliczenie parametrów C_1 , $N_{gr,1}$, κ_1 na podstawie wzorów (64-66).
3. Określenie trzech krzywych: krzywej osiadania, krzywej oporu podstawy, krzywej oporu poboczniczy pala.
4. Określenie obliczeniowych wartości nośności pala N_{proj} na podstawie dopuszczalnego osiadania s_{dop} lub współczynnika bezpieczeństwa FS .
5. Porównanie otrzymanych wyników nośności pala z nośnością projektowaną Q_r ,
6. Wnioski.

Do analizy wybrano cztery pale lub kolumny o różnej geometrii, technologii wykonania, nośności i warunkach gruntowych.

Kolumna K.1 jest to kolumna SDC (*Soil Displacement Column*) wykonana w technologii przemieszczeniowej świdrem przemieszczeniowym o specjalnej konstrukcji świda mającego zwoje o przeciwnych zwrotach. Podczas zagłębiania świda w podłoże gruntowe grunt rozpychany jest na boki, dogęszczając grunt wokół pala oraz wprowadzając dodatkową składową poziome naprężenia. Betonowanie pala odbywało

się od dołu pod ciśnieniem. Klasa betonu C25/30. Kolumnę wykonano do posadowienia budynku wielorodzinnego o 12 kondygnacjach. W podłożu zalegały gliny piaszczyste i pylaste. Opór stożka sondy CPT w podstawie kolumny wynosił około 10 MPa. Średni opór stożka na długości kolumny wynosił 7 MPa.

Pal K.2 jest palem Tubex wykonanym w technologii przemieszczeniowej poprzez wkręcanie rury stalowej o średnicy 406 mm. Podczas wkręcania wykonywano iniekcję zaczynem cementowym pod ostrzem pala powodując powstanie poszerzonego trzonu pala o średnicy 560 mm. Rurę stalową pozostawiano i wypełniano zbrojeniem i betonem klasy C30/37. Pal wykonany pod przyczółek Mostu Brdowskiego w Szczecinie. Podłoże gruntowe budują nasypy niekontrolowane do głębokości 3 m, poniżej grunty organiczne do głębokości 10 m, poniżej piaski średnie i grube ze żwirem i kamieniami o zagęszczeniu $I_D=(0,60\div0,85)$. Opór stożka sondy CPT w okolicy podstawy pala wynosił od 30 do 50 MPa.

Pal K.3 podobnie jak K.2 jest palem Tubex. Pal wykonany na Nabrzeżu Szwedzkim w Porcie Gdynia. Ośrodek pala to woda do głębokości 10 m, poniżej piaski drobne, piaski średnie i piaski grube o zagęszczeniu $I_D=0,8$.

Kolumna K.4 jest to kolumna CSC wykonana w technologii przemieszczeniowej. Klasa betonu C16/20. Kolumnę wykonano w celu wzmocnienia podłoża gruntowego pod projektowaną drogę wojewódzką. W podłożu zalegały grunty organiczne do głębokości około 8 m, poniżej glina piaszczysta zwięzła o $I_L=0,3$ do głębokości 10 m, a poniżej glina piaszczysta zwięzła o $I_L=0,2$. Opór stożka sondy CPT w podstawie kolumny wynosił zaledwie 2 MPa.

Kolumna K.1

Analiza nośności pala

Nazwa: ul. Jana Kazimierza 64 w Warszawie

Data badania: 10.2010

Charakterystyka pala

Rodzaj pala: SDC-3 kolumna betonowa, przemieszczeniowa (*Soil Displacement Column*)

Geometria:

$D = 0,40 \text{ m}$ $H = 7,00 \text{ m}$

Nośność obliczeniowa:

$Q_r = 740 \text{ kN}$

Wyniki próbnego obciążenia statycznego

N_{2i} [kN]	0,0	93,0	185,0	278,0	370,0	463,0	555,0	648,0	740,0	833,0	925,0
s_i [mm]	0,00	0,22	0,49	0,93	1,60	2,61	3,85	5,19	6,75	8,57	10,66

Aproksymacja M-K

$C_2 = 0,00381 \text{ mm/kN}$

$N_{gr,2} = 1989,89 \text{ kN}$

$K_2 = 2,394$

Obliczenia (opór podstawy)

$C_1 = 0,01711 \text{ mm/kN}$

$N_{gr,1} = 699,32 \text{ kN}$

$K_1 = 1,994$

Obliczenia (opór poboczny)

$C_T = 0,00491 \text{ mm/kN}$

$T_\infty = 1290,57 \text{ kN}$

N_{1i} [kN]	0,0	12,5	27,0	48,7	78,2	115,8	153,9	187,7	220,1	251,1	280,3
T_i [kN]	0,0	80,5	158,0	229,3	291,8	347,2	401,1	460,3	519,9	581,9	644,7

Kryterium nośności pala:

1. Projektowanie na współczynnik nośności:

$$FS = 2 \Rightarrow N_{FS} = 995 \text{ kN} \Rightarrow s = 13,5 \text{ mm}$$

$$N_1 = 312 \text{ kN}$$

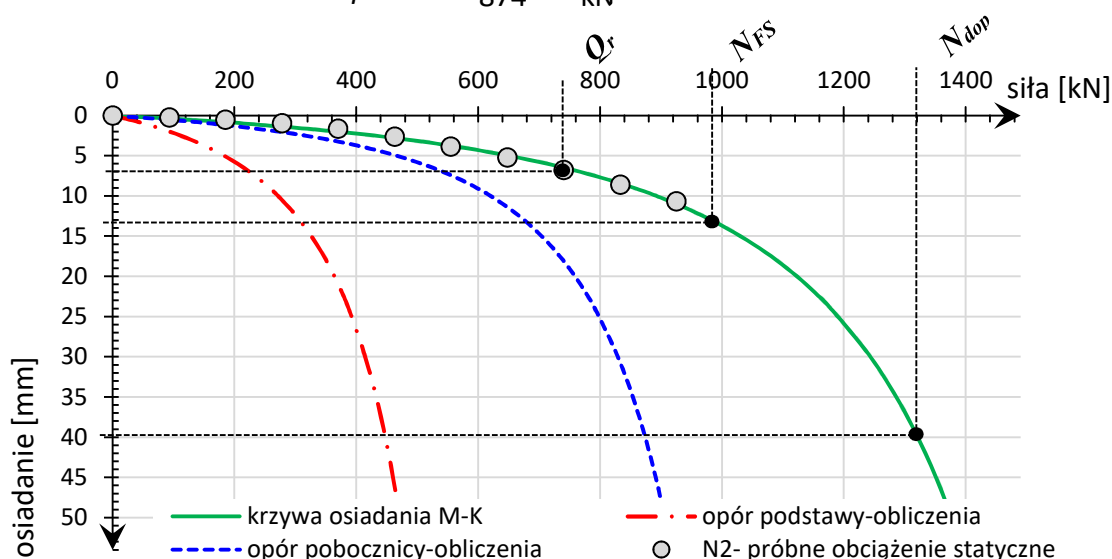
$$T = 683 \text{ kN}$$

2. Projektowanie na dopuszczalne osiadania:

$$s_{dop} = 40 \text{ mm} \Rightarrow N_{dop} = 1321 \text{ kN}$$

$$N_1 = 447 \text{ kN}$$

$$T = 874 \text{ kN}$$



Rys. 56. Obliczony rozkład oporów kolumny rzeczywistej. Kolumna K.1

Pal nr K.2

Analiza nośności pala

Nazwa: Most Brdowski w Szczecinie

Data badania: 09.2014

Charakterystyka pala

Rodzaj pala: Tubex z iniekcją na pobocznicy D=0,406/0,560

Geometria:

$D = 0,56 \text{ m}$ $H = 16,00 \text{ m}$

Nośność obliczeniowa:

$Q_r = 1880 \text{ kN}$

Wyniki próbnego obciążenia statycznego

$N_{2i} \text{ [kN]}$	0	235	470	705	940	1175	1410	1645	1880	2115	2350	2585	2820
$s_i \text{ [mm]}$	0,00	0,27	0,63	1,15	1,78	2,59	3,54	4,48	5,62	7,19	8,51	9,94	11,55

Aproksymacja M-K

$C_2 = 0,00177 \text{ mm/kN}$

$N_{gr,2} = 4321,09 \text{ kN}$

$K_2 = 0,72860$

Obliczenia (opór podstawy)

$C_1 = 0,00317 \text{ mm/kN}$

$N_{gr,1} = 3306,35 \text{ kN}$

$K_1 = 0,607$

Obliczenia (opór pobocznicy)

$C_T = 0,00398 \text{ mm/kN}$

$T_\infty = 1014,74 \text{ kN}$

$N_{1i} \text{ [kN]}$	0	83	189	333	493	680	874	1045	1227	1442	1597	1742	1884
$T_i \text{ [kN]}$	0	152	281	372	447	495	536	600	653	673	753	843	936

Kryterium nośności pala:

1. Projektowanie na współczynnik nośności:

$$FS = 2 \quad \Rightarrow \quad N_{FS} = 2161 \text{ kN} \quad \Rightarrow \quad s = 6,88 \text{ mm}$$

$$N_1 = 1403 \text{ kN}$$

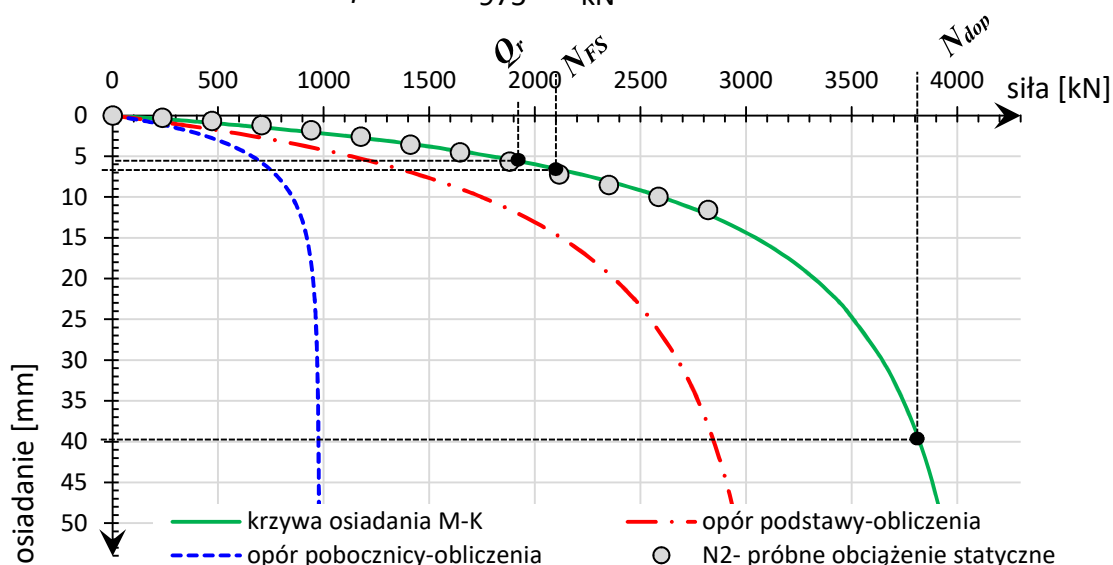
$$T = 757 \text{ kN}$$

2. Projektowanie na dopuszczalne osiadania:

$$s_{dop} = 40 \text{ mm} \quad \Rightarrow \quad N_{dop} = 3822 \text{ kN}$$

$$N_1 = 2847 \text{ kN}$$

$$T = 975 \text{ kN}$$



Rys. 57. Obliczony rozkład oporów pala rzeczywistego. Pal K.2

Pal K.3*Analiza nośności pala***Nazwa:** Nabrzeże Szweckie w Porcie Gdynia**Data badania:** 10.2013Charakterystyka palaRodzaj pala: Tubex z iniekcją na pobocznicy $D=0,406/0,560$ Geometria: $D = 0,56 \text{ m}$ $H = 15,40 \text{ m}$ Nośność obliczeniowa: $Q_r = 2355 \text{ kN}$ Wyniki próbnego obciążenia statycznego

$N_{2i} \text{ [kN]}$	0	294	589	883	1178	1472	1766	2061	2355	2649	2944	3238	3533
$s_i \text{ [mm]}$	0,00	0,18	0,57	1,04	1,60	2,22	2,80	3,45	4,13	5,06	5,90	6,80	7,71

Aproksymacja M-K $C_2 = 0,00119 \text{ mm/kN}$ $N_{gr,2} = 5898,15 \text{ kN}$ $K_2 = 0,488$ Obliczenia (opór podstawy) $C_1 = 0,00179 \text{ mm/kN}$ $N_{gr,1} = 5094,79 \text{ kN}$ $K_1 = 0,407$ Obliczenia (opór pobocznicy) $C_T = 0,00352 \text{ mm/kN}$ $T_\infty = 803,36 \text{ kN}$

$N_{1i} \text{ [kN]}$	0	99	305	538	795	1057	1282	1513	1735	2008	2228	2441	2634
$T_i \text{ [kN]}$	0	195	284	345	383	415	484	548	620	641	716	797	899

Kryterium nośności pala:1. Projektowanie na współczynnik nośności:

$$FS = 2 \quad \Rightarrow \quad N_{FS} = 2949 \text{ kN} \quad \Rightarrow \quad s = 5,77 \text{ mm}$$

$$N_1 = 2195 \text{ kN}$$

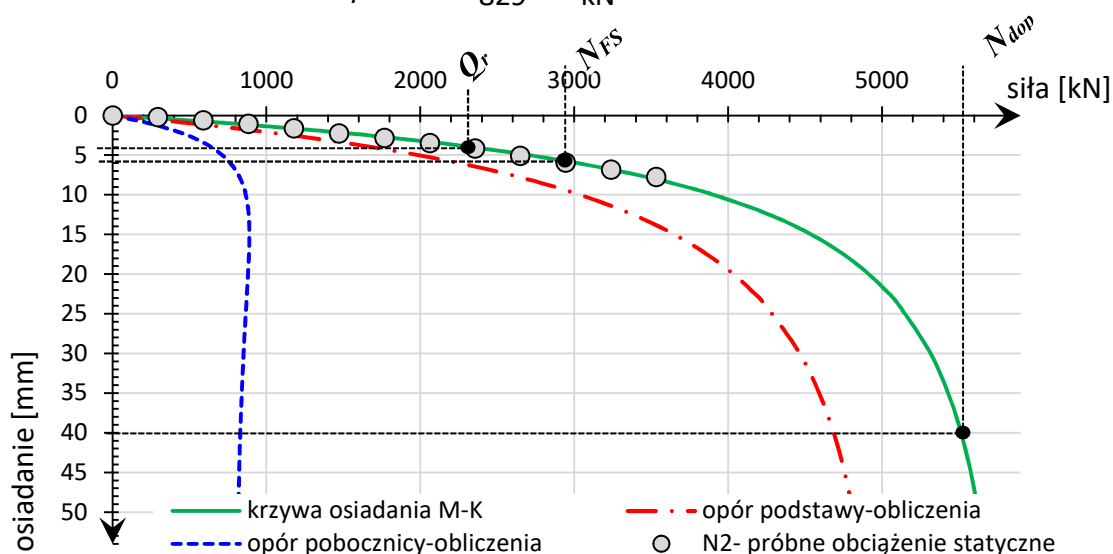
$$T = 755 \text{ kN}$$

2. Projektowanie na dopuszczalne osiadania:

$$s_{dop} = 40 \text{ mm} \quad \Rightarrow \quad N_{dop} = 5514 \text{ kN}$$

$$N_1 = 4685 \text{ kN}$$

$$T = 829 \text{ kN}$$



Rys. 58. Obliczony rozkład oporów pala rzeczywistego. Pal K.3

Kolumna nr K4

Analiza nośności pala

Nazwa: Wzmocnienie pod drogę wojewódzką nr 650

Data badania: 09.2014

Charakterystyka pala

Rodzaj pala: Kolumny betonowe w technologii przemieszczeniowej

Geometria:

 $D = 0,36 \text{ m}$ $H = 12,50 \text{ m}$

Nośność obliczeniowa:

 $Q_r = 106 \text{ kN}$ Wyniki próbnego obciążenia statycznego

$N_{2i} \text{ [kN]}$	0	13	27	40	53	66	80	93	106
$s_i \text{ [mm]}$	0,00	0,18	0,76	1,50	2,36	3,54	4,88	6,35	7,73

Aproksymacja M-K $C_2 = 0,03319 \text{ mm/kN}$ $N_{gr,2} = 187,91 \text{ kN}$ $K_2 = 1,004$ Obliczenia (opór podstawy) $C_1 = 0,07161 \text{ mm/kN}$ $N_{gr,1} = 127,95 \text{ kN}$ $K_1 = 0,836$ Obliczenia (opór poboczniczy) $C_T = 0,06187 \text{ mm/kN}$ $T_\infty = 59,96 \text{ kN}$

$N_{1i} \text{ [kN]}$	0	2	10	18	27	36	46	54	60
$T_i \text{ [kN]}$	0	11	17	22	26	30	34	39	46

Kryterium nośności pala:1. Projektowanie na współczynnik nośności:

$$FS = 2 \Rightarrow N_{FS} = 94 \text{ kN} \Rightarrow s = 6,25 \text{ mm}$$

$$N_1 = 53 \text{ kN}$$

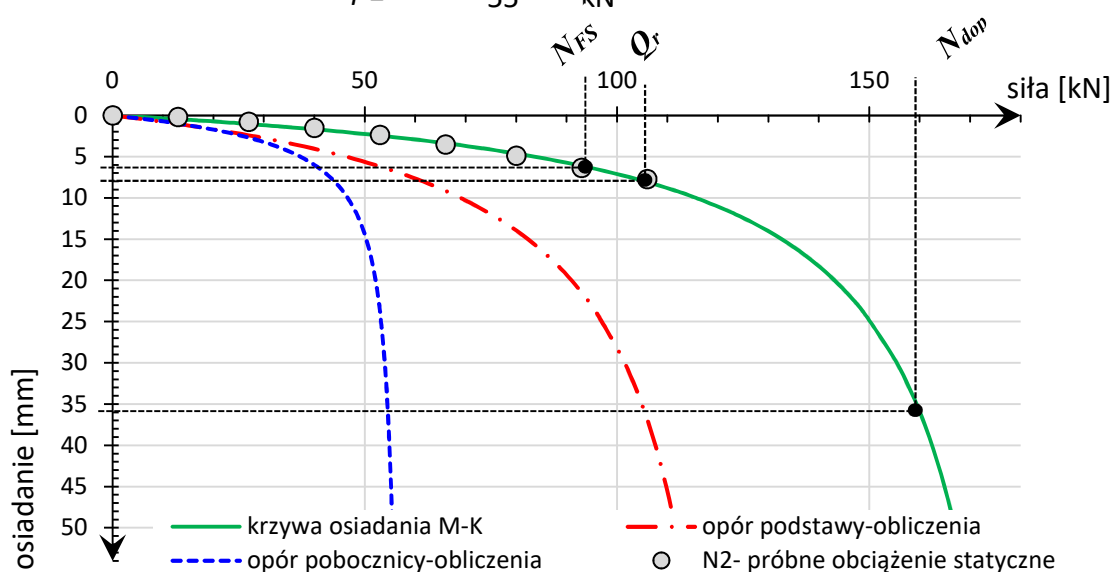
$$T = 41 \text{ kN}$$

2. Projektowanie na dopuszczalne osiadania:

$$s_{dop} = 36 \text{ mm} \Rightarrow N_{dop} = 160 \text{ kN}$$

$$N_1 = 105 \text{ kN}$$

$$T = 55 \text{ kN}$$



Rys. 59. Obliczony rozkład oporów kolumny rzeczywistej. Kolumna K.4

Przedstawione na rysunkach 56-59 wyniki analiz próbnego obciążenia statycznego z zastosowaniem wyprowadzonych w niniejszej rozprawie wzorów umożliwią dalszą interpretację mobilizacji oporu pobocznicy i podstawy pala. Jak przedstawiono na przytoczonych przykładach, rozkład oporów może być całkiem inny w zależności od rodzaju pala i wyników próbnego obciążenia statycznego.

Jedną z podstawowych różnic w oporze pobocznicy i podstawy pala jest szybkość mobilizacji oporów. Okazuje się, że opór pobocznicy mobilizowany jest bardzo szybko i przy niewielkich osiadaniach (w zakresie dopuszczalnych osiadań) osiągany jest maksymalny opór lub ponad 80% oporu pobocznicy osiąganego przy niekontrolowanych osiadaniach. Ponadto analiza krzywej osiadania umożliwia określenie nośności pala ze względu na wybrane kryterium.

W tabeli 13 przedstawiono porównanie obliczeniowej nośności pala określonej na podstawie parametrów podłoża gruntowego, zgodnie z normami: PN-EN 1997-1:2008: „Eurokod 7 - Projektowanie geotechniczne.” oraz PN-83/B-02482 „Fundamenty budowlane. Nośność pali i fundamentów palowych” i nośności określonej na podstawie krzywej osiadania wg zaproponowanego kryterium.

Tabela 13. Zestawienie nośności pali naturalnych.

Podstawa określenia nośności pala:	Parametry podłoża gruntowego. Projektowana wartość obciążenia	Nośność na podstawie N_{gr} i $FS=2$	Nośność przy dopuszczalnym osiadaniu S_{dop}
Nośność pala Nr pala	Q_r [kN]	N_{FS} [kN]	N_{dop} [kN]
K1	740	995	1321
K2	1880	2161	3822
K3	2355	2949	5514
K4	106	94	160

Jeżeli przyjąć za kryterium nośności pala, współczynnik $FS=2$ to wówczas bezpieczne obciążenie pala jest mniejsze od obciążenia dopuszczalnego, które otrzymuje się przy osiadaniu dopuszczalnym. Analiza tych przypadków sugeruje że, przyjmując jako kryterium dopuszczalne osiadanie, takie jakie najczęściej konstruktorzy przyjmują w konstruowaniu obiektów 30, czy 40 mm lub 10% średnicy pala, wówczas siła dopuszczalna niebezpiecznie zbliża się do wartości granicznej. Szczególnie wyraźnie widać to na rys. 56, gdzie przy zaproponowanym osiadaniu pala równym 40 mm, zbliża

siłę do wartości granicznej. To sugeruje potrzebę przeanalizowania nowego spojrzenia na problem kryterium obliczeniowe w projektowaniu dopuszczalnego obciążenia pala.

9. WNIOSKI

W rozprawie doktorskiej zaproponowano metodę analizy mobilizacji oporu poboczniczy pala na podstawie wyników próbnego obciążenia statycznego. Analizę oparto na autorskich badaniach modelowych pali w skali laboratoryjnej, które umożliwiły poznanie podstawowych zjawisk decydujących o rozkładzie oporów na pobocznicę i podstawę pala podczas próbnego obciążenia statycznego. Problem mobilizacji oporów wraz z osiadaniem pala jest zagadnieniem dość trudnym do rozwiązania ze względu na wiele czynników, które mogą mieć wpływ na wynik rozkładu; dotyczy to szczególnie poboczniczy pala. Niemniej jednak rozwiązanie tego problemu jest bardzo ważne, ponieważ umożliwia ono dokładniejszą analizę nośności pala, a także uniknięcie wielu błędów podczas projektowania pali.

Badania eksperymentalne, rozważania analityczne oraz analiza wyników badań pozwoliła na wyciągnięcie następujących wniosków:

1. Przeprowadzone badania i uzyskane wyniki potwierdziły tezę rozprawy doktorskiej, że: *Istnieje możliwość określenia, z dostateczną dokładnością do celów praktycznych obliczeń, formowania się oporów na poboczniczy pala wraz z osiadaniem, na podstawie próbnego statycznego obciążenia pala.*
2. W pracy przeprowadzono rozważania, które miały na celu analityczny opis mechanizmów formujących opór poboczniczy i podstawy pala. Badania eksperymentalne w warunkach laboratoryjnych dostarczyły zbioru danych do analizy parametrów metody M-K i jednocześnie umożliwiły określenie zależności wpływających na formowanie się oporu poboczniczy i podstawy pala podczas próbnego obciążenia statycznego. W analizie tej wykorzystano również pale dostępne w przedmiotowej literaturze. Łącznie w analizie wykorzystano 39 pali laboratoryjnych oraz 14 pali rzeczywistych.
3. Do poprawnej interpretacji oporu poboczniczy pala nie wystarczy znajomość tego oporu w stanie granicznym, ponieważ proces formowania się oporu poboczniczy wraz

z osiadaniem w wielu przypadkach znacznie różni się od siebie. Przeprowadzone analizy wykazały, że przy dopuszczalnych osiadaniach mobilizuje się zaledwie 50% wartości granicznej, a w innych przypadkach osiągane jest 100% granicznej wartości oporu poboczniczy. Dzieje się tak dlatego, że mobilizacja oporu na poboczniczy następuje bardzo szybko i już przy niewielkich osiadaniach (mniejszych od dopuszczalnych) może osiągnąć wartość graniczną. Ponadto opór na poboczniczy odgrywa ważną rolę w przenoszeniu siły przyłożonej w głowicy pala. Pomimo, iż w porównaniu z podstawą pala składowe styczne naprężenia na poboczniczy są znacznie mniejsze, to ze względu na wielokrotnie większą powierzchnię poboczniczy (od około 10 do 300 razy) opór może wynosić nawet do 95% siły przyłożonej w głowicy pala.

4. Przeprowadzone badania eksperymentalne pozwoliły na sformułowanie następującego mechanizmu oporu poboczniczy. Wyszczególniono dwa schematy mobilizacji oporu na poboczniczy pala. Pierwszy dotyczy wzrostu oporu na poboczniczy podczas próbnego obciążenia statycznego pala, do wartości maksymalnej, osiąganej przy osiadaniach oznaczonych jako s^* , przy dalszym obciążeniu opór ten maleje osiągając wartość graniczną przy osiadaniach dążących do nieskończoności. Zjawisko to znane jest w mechanice gruntów przy ścinaniu gruntów dylatywnych. Drugi schemat mobilizacji oporu poboczniczy dotyczy sytuacji, gdy opór ten rośnie i już przy niewielkich osiadaniach osiąga ponad 60% oporu granicznego. Przy dalszym obciążaniu opór ten wciąż rośnie i osiąga wartość graniczną dopiero przy osiadaniach dążących do nieskończoności. Zjawisko to znane jest w mechanice gruntów przy ścinaniu gruntów kontraktywnych. Dokładne przebadanie tych zjawisk będzie przedmiotem dalszych badań.
5. Badania laboratoryjne wskazywały, że opór poboczniczy pala nie pochodzi wyłącznie od naprężenia geostatycznego jak to opisano w rozdziale 1, ponieważ byłoby to za mało. Przeprowadzone badania fotogrametryczne wskazują, że podstawa pala może generować dodatkowe dociski gruntu do poboczniczy, zwiększając jednocześnie wartość zmobilizowanego oporu na poboczniczy pala. Kolejne badania wskazywały także, że opór na poboczniczy wpływa także na powstanie innego mechanizmu mobilizacji oporu podstawy pala. Świadczy to o silnej współzależności oporu poboczniczy i podstawy pala podczas próbnego obciążenia statycznego.

6. Badania eksperymentalne pozwoliły na sformułowanie zależności umożliwiających obliczenie parametrów krzywej oporu podstawy pala C_1 , $N_{gr,1}$, κ_1 na podstawie parametrów C_2 , $N_{gr,2}$, κ_2 uzyskanych na podstawie aproksymacji wyników próbnego obciążenia statycznego $\{N_i:s_i\}$ metodą M-K. To z kolei umożliwia uzyskanie wykresu $T(s)$ – mobilizacji oporu pobocznicy wraz z osiadaniem co było przedmiotem rozprawy doktorskiej.
7. Program dalszych badań przewiduje zgromadzenie wyników próbnych obciążeń statycznych z dodatkowym pomiarem rozkładu oporów na pobocznicy i podstawę pali wykonanych w różnych technologiach, w celu doprecyzowania wzorów zaproponowanych w rozprawie doktorskiej. Ponadto w programie badań zakłada się kontynuację badań zarówno laboratoryjnych jak i terenowych nad zagadnieniem interakcji oporu pobocznicy i podstawy pala podczas próbnego obciążenia statycznego. W przyszłych badaniach i analizach przewiduje się także dalszy rozwój metody Meyera-Kowalowa, jako metody interpretacji próbnych obciążeń statycznych, pozwalającej na określenie nośności granicznej i mobilizacji oporów wraz z osiadaniem, w celu udoskonalenia metod projektowania pali.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Abdelrahman G. E., Shaarawi E. M., Abouzaid K. S. 2003: *Interpretation of axial pile load test results for continuous flight auger piles*. Proceedings of the 9th Arab Structural Engineering Conference Nov 29- Dec 1, 2003, Abu Dhabi, UAE, p.:791–802.
- [2] Berezantsev V.G., Kristoforov V.S., Golubkov V.N. 1961: *Load bearing capacity and deformation of piled foundations*. [w:] Proceeding 5–th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, p.:11–15.
- [3] Braja M. 2010: *Geotechnical Engineering Handbook*. J. Ross Publishing.
- [4] England, M. 2009: *Review of methods of analysis of test results from bi-directional static load tests*. International Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, Van Impe & Van Impe (eds), Taylor & Francis Group, London. p.:235–239.
- [5] England M.: 2007. *World record bi-directional load testing of CFA piles Record du monde: essais de chargement bi-directionnel sur pieux forés à la tarière*. Madrit, 2007, www.loadtest.com.
- [6] England M., Cheesman P. F. 2011: *Optimum loading specifications for O-cell bi-directional static load testing*. Proceedings of the 15th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, A. Anagnostopoulos et al. (Eds.), IOS Press, 2011. p.:855-860.
- [7] Fellenius B.H. 2014: *Basics of Foundation Design*. Electronic. Sidney, British Columbia, Canada.
- [8] Fellenius B.H. 2006: *Basics of Foundation Design*. Electronic edition. www.Fellenius.net. Canada.
- [9] Fellenius B.H. 2001. *Determining the True Distributions of Load in Instrumented Piles*. American Society of Civil Engineers, ASCE, International Deep Foundation Congress, An International Perspective on Theory, Design, Construction and Performance. Geotechnical Special Publication No. 116, Edited by M.W. O'Neill, and F.C. Townsend, Orlando, Florida, February 14 - 16, 2002, Vol. 2, pp. 1455 – 1470 19.

- [10] Fellenius B.H. 2001: *From strain measurements to load in an instrumented pile*. Geotechnical News Magazine, vol.19, no 1, Vancouver, p.:35–38.
- [11] Fleming W.G.K. 1992: *A new method for single pile settlement prediction and analysis*. Geotechnique, vol. 42, p.:411–425.
- [12] Gwizdała K. 2010: *Fundamenty palowe. Technologie i obliczenia*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- [13] Gwizdała K. 2005: *Projektowanie fundamentów na palach*. XX Ogólnopolska Konferencja Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji. Wisła-Ustroń, 1-4 marca 2005.
- [14] Gwizdała K., Dyka I. 2001: *Analityczna metoda prognozowania krzywej osiadania pala pojedynczego*. Inżynieria i Budownictwo, nr 12/2001, s.:729-733.
- [15] Gwizdała, K., Jacobsen M.1992: *Bearing capacity and settlements of piles*. University of Aalborg, Aalborg.
- [16] Gwizdała K., Krasiński A. 2013: *Bearing capacity of displacement piles in layered soils with highly diverse strength parameters*. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, red. Francois Schlosser Pierre Delage, Jacques Desrues, Roger Frank, Alain Puech. Paris.
- [17] Gwizdała K., Stęczniewski M. 2015: *Wykorzystanie metody funkcji transformacyjnych do analizy nośności i osiadań pali CFA*. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 3/2015.
- [18] Gwizdała K., Tejchman A., Kłos J. 1975. *Badania nośności stalowych pali rurowych w Porcie Północnym*. Technika i Gospodarka Morska, nr 6/1975.
- [19] Hayes J., Simmonds T. 2002: *Interpreting strain measurements from load tests in bored piles*. www.loadtest.com.
- [20] Huybrechts N., Maertens J. 2009: *Some new insights with regard to load distribution in piles, based on a detailed interpretation of a large number of instrumented pile load tests*. Proceedings of the 5th International Symposium on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, Ghent, Belgium, Edited by W. F. Van Impe and P. O. Van Impe, p.:249–256.
- [21] Hwang J. H., Chang D.W., Yeh P.Y., Fu Z.X. 2014: *Axial Bearing Behaviour of a Model Pile in Sand Under Multiple Static Cycles*. Geotechnical Engineering of the SEAGS & AGSSEA, vol.45, No 2.

- [22] Ivšić T., Bačić M., Librić L. 2013: *Estimation of bored pile capacity and settlement in soft soils*. Gradjevinar, vol.65, p.:901–918.
- [23] Kim K., Salgado R., Lee J., Paik K. 2002: *Load Tests on Pipe Piles for Development of CPT-Based Design Method*. Publication FHWA/IN/JTRP-2002/04. Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, Indiana.
- [24] Krasiński A. 2015: *Ocena działania iniekcji pod podstawą pala wierconego za pomocą badania statycznego nośności z pomiarem rozkładu siły w trzonie pala*. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 3/2015.
- [25] Krasiński A. 2014: *Pale przemieszczeniowe wkręcane. Współpraca z niespoistym podłożem gruntowym*. Rozprawa habilitacyjna. Politechnika Gdańska, Gdańsk.
- [26] Krasiński A. 2013: *Pale przemieszczeniowe wkręcane: współpraca z niespoistym podłożem gruntowym*. Monografia. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk.
- [27] Krasiński A. 2011: *Wyniki badań terenowych pali i kolumn wkręcanych*. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 6/2011.
- [28] Krasiński A. 2003: *Analiza pracy pobocznicy pala w gruncie niespoistym w świetle wyników badań modelowych*. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 5/2003, s.:319–324.
- [29] Lehane B. M., White D. J. 2004. *Friction fatigue on displacement piles in sand*. Géotechnique, vol. 54, p.:645–658.
- [30] Loukidis D., Salgado R., Abou-Jaoude G. 2008: *Assessment of Axially-Loaded Pile Dynamic Design Methods and Review of INDOT Axially-Loaded Pile Design Procedure*. Publication FHWA/IN/JTRP-2008/06. Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, Indiana.
- [31] Loukidis D., Salgado R. 2008. *Analysis of the shaft resistance of non-displacement piles in sand*. Géotechnique vol. 58, p.283–296.
- [32] Meyer Z. 2016: *Wykorzystanie wyników testu statycznego pala do określenia mobilizacji oporu pobocznicy*. [w:] *Analiza mechanizmów współpracy pala z gruntem*. Wybrane aspekty naukowe, Wyd. ZAPOL, Szczecin.
- [33] Meyer Z. 2014: *Static Load Tests, Short Series Interpretation*. Studia Geotechnica et Mechanica, vol. XXXVI: p.:45–49.
- [34] Meyer Z. 2012: *Obliczenia inżynierskie osiadania fundamentów*. Monografia. Wydawnictwo ZAPOL, Szczecin.

- [35] Meyer Z. 2010: *Analiza naprężeń na pobocznicy pala oraz pod podstawą pojedynczego pala w oparciu o liniową teorię Boussinesqa*. XVIII Seminarium Naukowe. Regionalne Problemy Inżynierii Środowiska. Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Szczecin.
- [36] Meyer Z., Kowalów M. 2010: *Model krzywej aproksymującej wyniki testów statycznych pali*. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 3/2010.
- [37] Meyer Z., Kowalów M. 2009: *Wykorzystanie testu Osterberga do statycznych obciążeń próbnych pali*. [w:] *Awarie Budowlane*, Szczecin-Międzyzdroje. s.:26–29.
- [38] Meyer Z., Szmechel G. 2015: *Problemy zasad wymiarowania pali*. Inżynieria Morska i Geotechnika, 3/2015, s.:444–449.
- [39] Meyer Z., Szmechel G. 2012: *Praktyczne określenie związków pomiędzy parametrami krzywej obciążenie osiadanie w statycznym teście pala*. XX Regionalne Problemy Inżynierii Środowiska. Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Szczecin.
- [40] Meyer Z., Szmechel G. 2010: *Analiza możliwości analitycznej aproksymacji krzywej obciążenie-osiadanie dla testów statycznych pali żelbetowych w gruntach sypkich*. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 4/2010.
- [41] Meyer Z., Żarkiewicz K. 2016: *Formowanie się oporu na pobocznicy pala wyznaczone na podstawie badań laboratoryjnych*. XXIII Seminarium Naukowe z cyklu Regionalne Problemy Inżynierii Środowiska, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Szczecin, s.:79–90.
- [42] Meyer Z., Żarkiewicz K. 2015a: *Optymalizacja równania nośności pala na podstawie laboratoryjnych badań modelowych*. [w:] *XXII Regionalne Problemy Inżynierii Środowiska*. Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Szczecin, s.:83–92.
- [43] Meyer Z., Żarkiewicz K. 2015b: *Analiza mobilizacji oporu pobocznicy i podstawy pala na podstawie interpretacji badań modelowych*. Inżynieria Morska i Geotechnika 3/2015, s.:350–354.
- [44] Meyerhof G., 1976. *Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundations*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, vol.102. ASCE, p.195–228.
- [45] Meyerhof G. 1951: *The Ultimate Bearing Capacity of Foundations*. Géotechnique, vol. 2, p.:301–332.

- [46] Osterberg J.O. 1998: *The Osterberg Load Test Method For Bored And Driven Piles The First Ten Years*. [w:] 7th International Conference & Exhibition on Piling and Deep Foundations, Deep Foundations Institute. Vienna, Austria.
- [47] Salgado R. i inni. 2014. *Instrumentation and axial load testing of displacement piles*. Proceedings of the ICE - Geotechnical Engineering, vol. 167, p.:238–252.
- [48] Sawicki A. 2012: *Zarys mechaniki gruntów sypkich*. Wydawnictwo IBW PAN, Gdańsk.
- [49] Seo H., Basu D., Prezzi M., Salgado R. 2009. *Load-Settlement Response of Rectangular and Circular Piles in Multilayered Soil*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 135, p.:420–430.
- [50] Seo, H., Yildirim I. Z., Prezzi M. 2009: *Assessment of the Axial Load Response of an H Pile Driven in Multilayered Soil*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 135, p.: 1789–1804.
- [51] Szmechel G. 2016: *Obliczeniowa nośność pali, realizm czy fikcja? XXIII Seminarium Naukowe z cyklu Regionalne Problemy Inżynierii Środowiska*. Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Szczecin, s.: 115–125.
- [52] Szmechel G. 2014: *Określenie nośności granicznej pali na podstawie próbných obciążeń statycznych w ograniczonym zakresie*. Rozprawa doktorska. Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie.
- [53] Tehrani F. S., Salgado R., Prezzi M., Tovar R. D. 2016. *Effect of surface roughness on the shaft resistance of non-displacement piles embedded in sand*. Géotechnique, vol. 2, p.:1–15
- [54] Terzaghi K. 1943: *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley & Sons. Hoboken, New York, USA.
- [55] Tomlinson M.J. 1994. *Pile design and construction practice*. Fourth edition. E&FN SPON, London, Glasgow, Weinheim, New York, Tokyo, Melbourne, Madras.
- [56] Tomlinson M., Woodward J. 2007. *Pile design and construction practice*. Fifth edition. Taylor & Francis e-Library.
- [57] White D. J., Bolton M. D. 2005: *Comparing CPT and pile base resistance in sand*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering ICE, Geotechnical Engineering, vol. 158, p.:3–14.
- [58] White D.J., Bolton M.D. 2004. *Displacement and strain paths during plane-strain model pile installation in sand*. Géotechnique, vol. 54, p.: 375–397.

- [59] White D. J., Bolton M. D. 2002. *Soil deformation around a displacement pile in sand*. Proceedings of International Conference on Physical Modelling in Geotechnics, Canada, p.:649–654.
- [60] White D.J., Bolton M.D. 2002. *Observing friction fatigue on a jacked pile*. Centrifuge and constitutive modelling: Two extremes, Springman S.M. (ed.) pub. Balkema, Rotterdam, p.:346–354.
- [61] Żarkiewicz K., Meyer Z. 2016: *Nowe spojrzenie na współpracę pala z gruntem w świetle badań laboratoryjnych*. Wiadomości Projektanta Budownictwa, Izba Projektowania Budowlanego, nr maj/2016, Warszawa.
- [62] Żarkiewicz K. 2012: *Weryfikacja zależności wzorów na osiadania kolumn betonowych w oparciu o badania terenowe*. Praca magisterska. Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Szczecin.

Normy:

- [63] DNV-OS-J101, 2014: Det Norske Veritas, *Design of Offshore Wind Turbine Structures*. May 2014.
- [64] PN-83-B-02482. *Nośność pali i fundamentów palowych*. 1983.
- [65] PN-EN 1997-1. *Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne*.

SPIS RYSUNKÓW

Rys. 1. Schemat współpracy pała z podłożem gruntowym	7
Rys. 2. Ekstrapolacja nośności granicznej metodą Chin-Kondnera	21
Rys. 3. Ekstrapolacja metodą Decourta	22
Rys. 4. Określenie nośności pała metodą Davissona.....	23
Rys. 5. Nośność pała według kryterium 80 % Hansena	24
Rys. 6. Graniczna nośność wg metody Mazurkiewicza	25
Rys. 7. Model obliczeniowy sprężystego pała oraz funkcje transformacyjne t -z i q -z [13]	26
Rys. 8. Wyniki próbnego obciążenia i ich aproksymacja krzywą M-K	27
Rys. 9. Rozkład krzywej osiadania pała na opór podstawy i pobocznicy pała.....	28
Rys. 10. Przykładowe krzywe rozkładu oporów na pobocznice i podstawę pała wraz z osiadaniem	30
Rys. 11. Schemat interpretacji badań terenowych rozkładu sił w trzonie pała podczas próbnego obciążenia statycznego	33
Rys. 12. Warunek minimalnych odchyłek do wyznaczenia N_{gr} przy założonej wartości κ	41
Rys. 13. Warunek minimalnych odchyłek do wyznaczenia C przy założonej wartości κ	42
Rys. 14. Zależności $C(\kappa)$ i $N_{gr}(\kappa)$ do określenia optymalnej wartości κ_{opt}	42
Rys. 15. Interpretacja matematyczna krzywej M-K aproksymującej osiadanie pała.	43
Rys. 16. Wpływ parametru N_{gr} na kształt krzywej osiadania.	44
Rys. 17. Kształt krzywej osiadania przy różnych wartościach parametru C	45
Rys. 18. Kształt krzywej osiadania przy różnych wartościach parametru κ	45
Rys. 19. Rozkład oporów wciskanego pała wyznaczony na podstawie badań laboratoryjnych z zastosowaniem krzywej aproksymującej M-K.....	48
Rys. 20. Przykładowe rozkłady oporów pobocznicy pała przy różnych parametrach $C_1, N_{1,gr}, \kappa_1$ i $C_2, N_{2,gr}, \kappa_2$ w metodzie M-K.....	49
Rys. 21. Elementy składowe oprzyrządowanego pała modelowego [41]	54

Rys. 22. Zdjęcie po lewej: kalibracja pala. Zdjęcie po prawej: pal przygotowany do próbnego obciążenia statycznego	54
Rys. 23. Wyniki kalibracji oprzyrządowanego pala modelowego	55
Rys. 24. Przygotowane stanowisko badawcze do próbnych obciążeń statycznych z pomiarem oporu pod podstawą pala. Pierwsza część badań.....	55
Rys. 25. Etapy przygotowania stanowiska badawczego.....	56
Rys. 26. Przykładowe wyniki próbnego obciążenia statycznego	58
Rys. 27. Wyniki próbnego obciążenia oprzyrządowanego pala P.3.....	59
Rys. 28. Próbné obciążenie pali o różnych średnicach i zagłębieniu w gruncie. Pierwsza część badań	60
Rys. 29. Przykładowy wynik próbnego obciążenia statycznego pala o średnicy 28,6 mm	61
Rys. 30. Próbné obciążenie pala bez oporu pobocznicy. Druga część badań.....	62
Rys. 31. Stanowisko do modelowych badań fotogrametrycznych	64
Rys. 32. Badania na gruncie ułożonym warstwami. Przemieszczenia warstw spowodowane osiadaniem pala.....	64
Rys. 33. Proces formowania się strefy przemieszczanego gruntu pod podstawą pala w zależności od osiadania s. a) $s=2$ mm, b) $s=4$ mm, c) $s=9$ mm, d) $s=16$ mm	65
Rys. 34. Zależność szerokości strefy gruntu przemieszczanego pod podstawą pala od osiadania pala.....	66
Rys. 35. Ugięcie warstw podłoża gruntowego spowodowane osiadaniem pala.....	68
Rys. 36. Wyniki analizy fotogrametrycznej pala. Osiadanie równe 5 mm	69
Rys. 37. Sposoby przekazywania siły wciskającej pal na otaczający grunt – różne efekty i wyjaśnienia [22].....	70
Rys. 38. Schemat współpracy podstawy i pobocznicy pala [32].....	71
Rys. 39. Zależność $N_{gr} = N_{gr}(\kappa)$ uzyskana podczas aproksymacji. Pal P.1.....	75
Rys. 40. Zależność $C = C(\kappa)$ uzyskana podczas aproksymacji. Pal P.1	76
Rys. 41. Optymalna wartość parametru κ . Pal P.1	76
Rys. 42. Aproksymująca krzywa osiadania M-K. Pal P.1	76
Rys. 43. Wyniki otrzymane z próbnego obciążenia oprzyrządowanego pala P.1. do określenia parametrów krzywych aproksymujących. Pierwsza część badań, tabela 7...	77

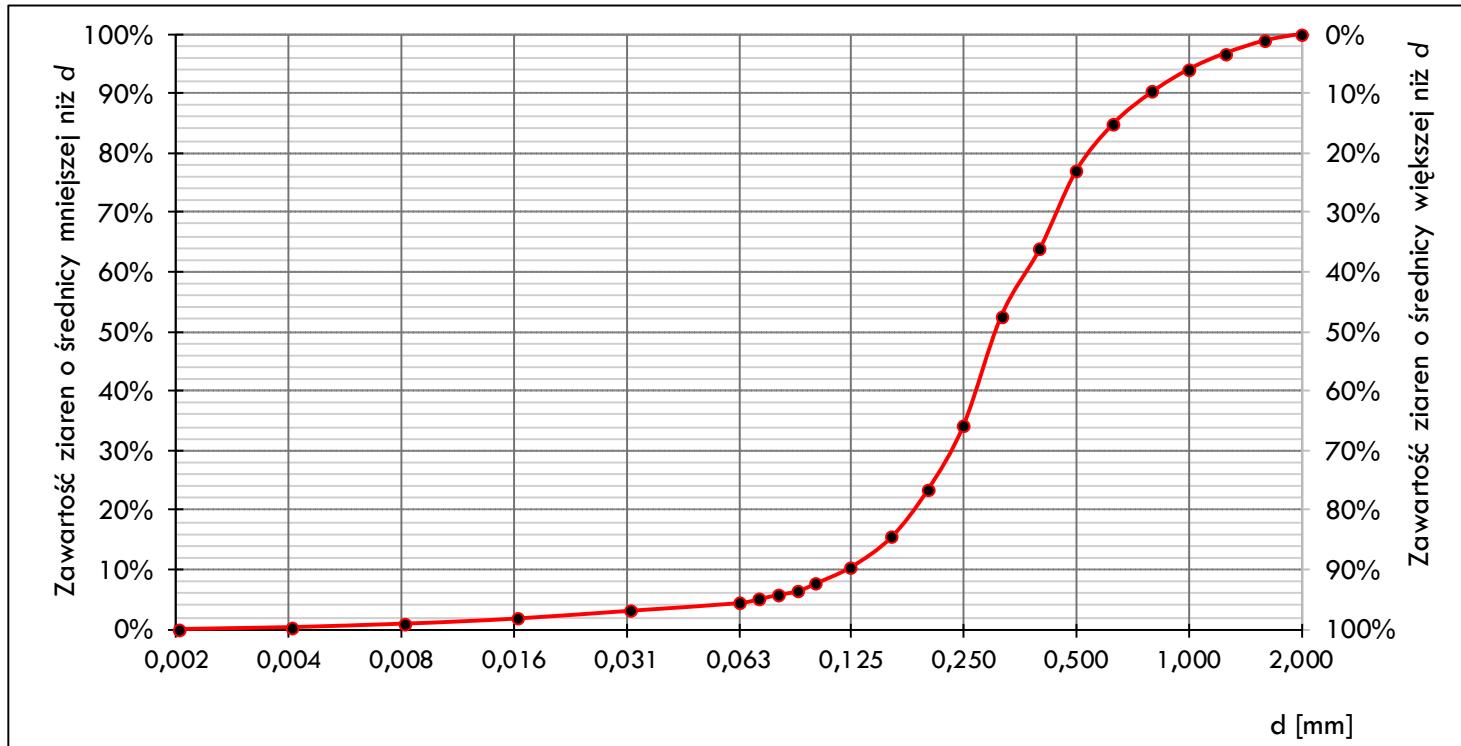
Rys. 44. Wyniki otrzymane z próbnych obciążeń pali do określenia parametrów krzywych aproksymujących. Druga część badań, tabela 8 (L16) – kolor czarny. Trzecia część badań tabela 9 (B16) – kolor czerwony.	78
Rys. 45. Zależność κ_1 i κ_2	80
Rys. 46. Zależność $C_{1,pom}$ i $C_{1,obl}$	81
Rys. 47. Zależność $N_{gr1,pom}$ i $N_{gr1,obl}$	82
Rys. 48. Obliczony rozkład oporów w funkcji osiadania pala. Pal P.1	84
Rys. 49. Obliczony rozkład oporów. Pal L.13 i L.16	85
Rys. 50. Schemat różnicy w nośności podstawy pala w zależności od sposobu obciążenia pala. Po prawej- na podstawie pierwszej części badań (P.4). Po lewej- na podstawie badania z drugiej i trzeciej części (L.17 i B.17)	87
Rys. 51. Zależność $C_{1,pom}$ i $C_{1,obl}$	89
Rys. 52. Zależność κ_1 i κ_2 . Pale laboratoryjne i terenowe.....	89
Rys. 53. Zależność $N_{gr,1,pom}$ i $N_{gr,1,obl}$	89
Rys. 54. Obliczony rozkład oporów. Pal T1	90
Rys. 55. Obliczony rozkład oporów. Pal T2	90
Rys. 56. Obliczony rozkład oporów kolumny rzeczywistej. Kolumna K.1	95
Rys. 57. Obliczony rozkład oporów pala rzeczywistego. Pal K.2	96
Rys. 58. Obliczony rozkład oporów pala rzeczywistego. Pal K.3	97
Rys. 59. Obliczony rozkład oporów kolumny rzeczywistej. Kolumna K.4	98

SPIS TABEL

Tabela 1. Parametry obliczeniowe oporu podstawy i pobocznicy pali wbijanych w gruntach niespoistych [63]	12
Tabela 2. Współczynnik nośności podstawy pala w zależności od kąta tarcia wewnętrznego gruntu [3]	13
Tabela 3. Wartość współczynnika parcia gruntu w zależności od technologii wykonania pala [55]	15
Tabela 4. Zależność kąta tarcia wewnętrznego gruntu na powierzchni pobocznicy pala [55]	16
Tabela 5. Przybliżone wartości współczynnika β [7]	16
Tabela 6. Przybliżone wartości współczynnika λ [7]	17
Tabela 7. Zestawienie wyników aproksymacji M-K oprzyrządowanych pali modelowych z pomiarem oporu pod podstawą pala. Pierwsza część badań	77
Tabela 8. Zestawienie wyników aproksymacji M-K standardowych próbnych obciążeń pali modelowych. Druga część badań	78
Tabela 9. Zestawienie wyników aproksymacji M-K próbnych obciążeń pali modelowych bez udziału pobocznicy. Trzecia część badań	79
Tabela 10. Zestawienie obliczonych wartości $N_{gr,1}$, C_1 , κ_1 w stosunku do danych pomierzonych	83
Tabela 11. Obliczone wartości $N_{gr,1}$, C_1 , κ_1 w stosunku do danych pomierzonych. Pale laboratoryjne bez pomiaru oporu podstawy pala.	84
Tabela 12. Dane wejściowe do optymalizacji parametrów krzywej M-K uzyskane z próbnych obciążeń statycznych pali w warunkach terenowych	88
Tabela 13. Zestawienie nośności pali naturalnych.	99

SPIS ZAŁĄCZNIKÓW

Załącznik A.	Analiza sitowa gruntu użytego w badaniach laboratoryjnych	115
Załącznik B.	Zagęszczenia gruntu w komorze podczas próbnych obciążeń statycznych oprzyrządowanych pali.	116
Załącznik C.	Wyniki próbnych obciążeń statycznych oprzyrządowanego pala.	118
Załącznik D.	Wyniki próbnych obciążeń statycznych oprzyrządowanego pala. Rozkład oporów.	123
Załącznik E.	Aproksymacja M-K wyników próbnych obciążeń statycznych oprzyrządowanych pali.	126
Załącznik F.	Obliczony rozkład oporów w funkcji pomierzonych podczas próbnych obciążeń statycznych. Pale z dodatkowym pomiarem oporu pod podstawą. Wykresy mobilizacji oporu pobocznicy wraz z osiadaniem pala.	146
Załącznik G.	Obliczony rozkład oporów dla próbnych obciążeń statycznych pali w warunkach laboratoryjnych. Standardowe próbne obciążenia pali. Pomiary z drugiej części badań.....	150
Załącznik H.	Wyniki próbnych obciążeń statycznych pali w warunkach terenowych z pomiarem oporu pobocznicy lub oporu podstawy pala. Dane z literatury	161
Załącznik I.	Obliczony rozkład oporów wybranych próbnych obciążeń statycznych pali rzeczywistych	163

Załącznik A. Analiza sitowa gruntu użytego w badaniach laboratoryjnych

Wskaźnik różnoziarnistości

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{0,38}{0,125} = 3,04$$

Wskaźnik krzywizny uziarnienia

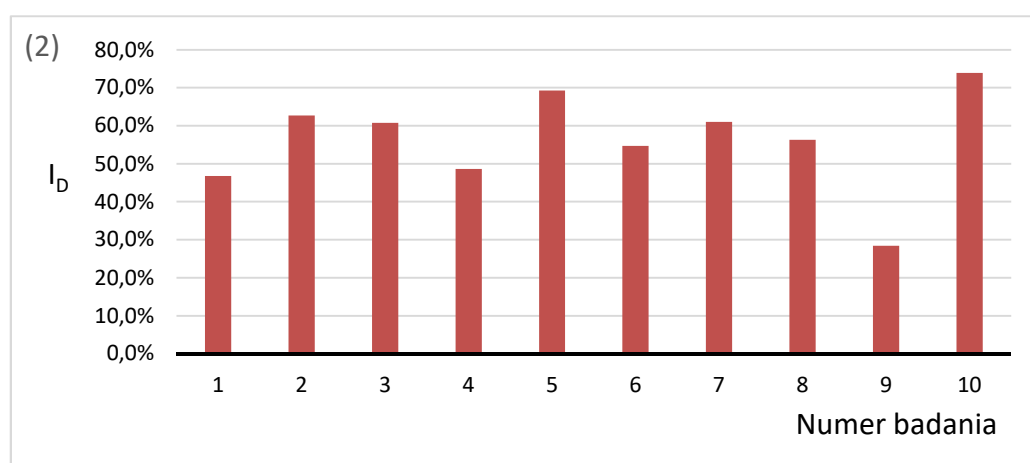
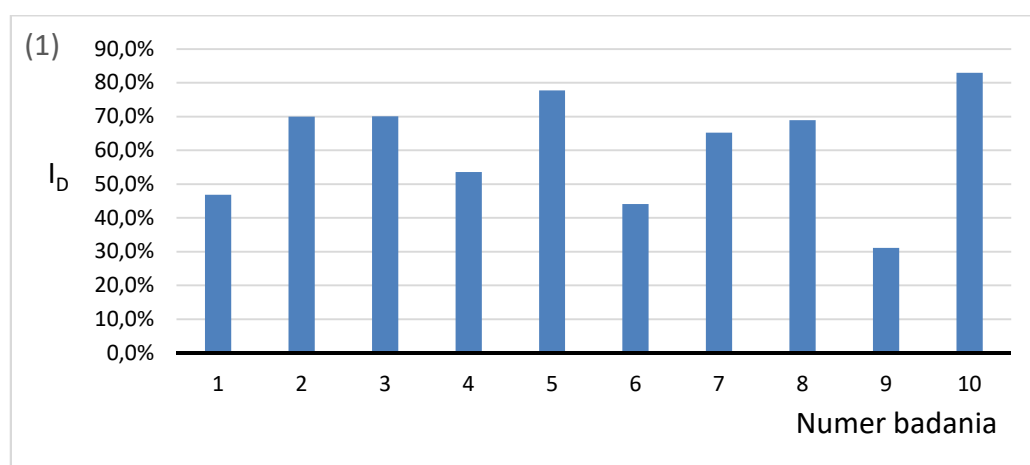
$$C = \frac{d_{30}^2}{d_{10}d_{60}} = \frac{0,23^2}{0,125 \cdot 0,38} = 1,11$$

Rozmiar sita d [mm]	Zawartość ziaren o średnicy mniejszej niż d
2	100,00%
1,6	98,86%
1,25	96,71%
1	94,02%
0,8	90,26%
0,63	84,97%
0,5	76,96%
0,4	63,94%
0,315	52,57%
0,25	34,33%
0,2	23,34%
0,16	15,43%
0,125	10,41%
0,1	7,57%
0,09	6,31%
0,08	5,72%
0,071	5,00%
0,063	4,35%
0,032	3,06%
0,016	1,75%
0,008	0,88%
0,004	0,32%
0,002	0,00%

Załącznik B. Zagęszczenia gruntu w komorze podczas próbnych obciążeń statycznych oprzyrządowanych pali.

Nr badania	P.1	P.2	P.3	P.4	P.5	P.6	P.7	P.8	P.9	P.10
1. I_D [%] (1)	46,8%	70,0%	70,1%	53,6%	77,7%	44,1%	65,2%	68,9%	31,1%	83,0%
2. I_D [%] (2)	46,8%	62,7%	60,8%	48,6%	69,3%	54,7%	61,0%	56,3%	28,4%	73,9%

- (1) - Zagęszczenie średnie w komorze obliczone na podstawie masy gruntu w komorze wilgotności średniej gruntu i objętości komory
- (2) - Zagęszczenie średnie z czterech próbek gruntu NNS pobranych z różnych głębokości

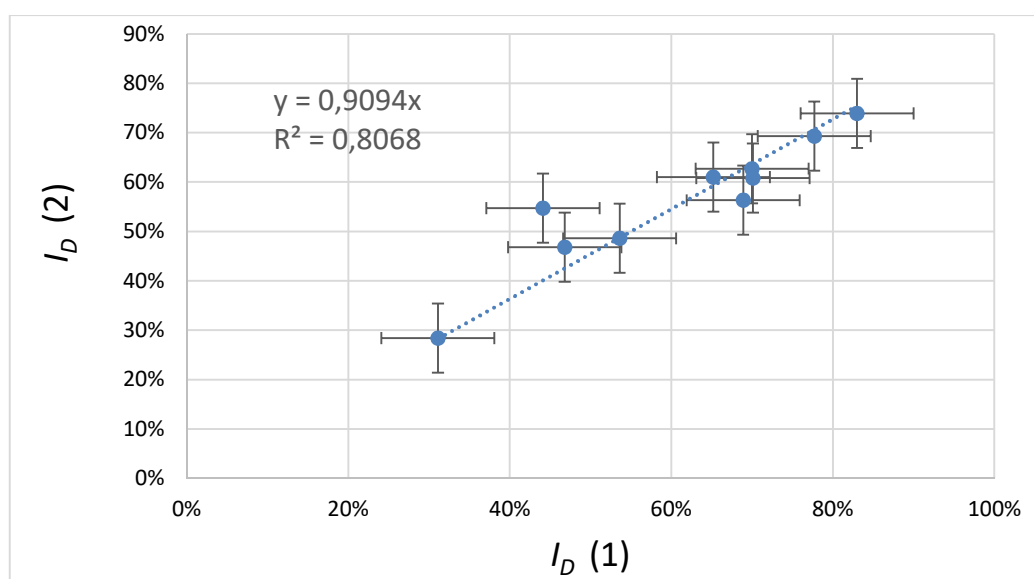


Zagęszczenie średnie: 61,1%
 Maksymalne zagęszczenie: 83,0%
 Minimalne zagęszczenie: 31,1%
 Mediana: 67,1%
 Odchylenie standardowe: 15,6%
 Współczynnik korelacji (1)-(2): 0,93

Parametry brzegowe

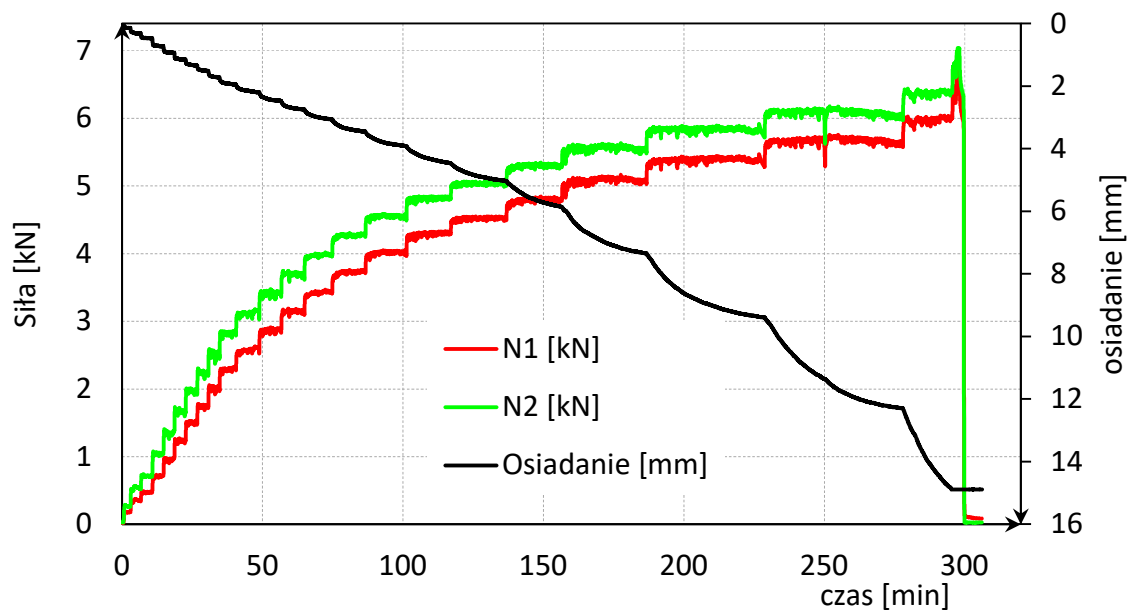
$\rho_{d \min}$	$e_{\max}$
1,492	0,776

$\rho_{d \max}$	$e_{\min}$
1,825	0,452

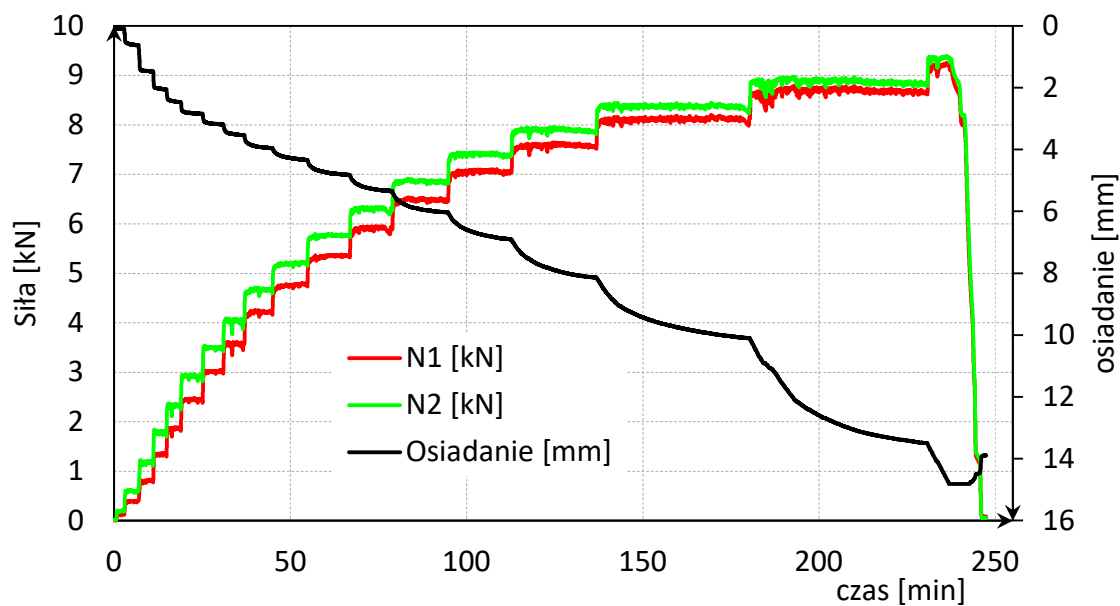


Załącznik C. Wyniki próbnych obciążeń statycznych oprzyrządowanego pala.

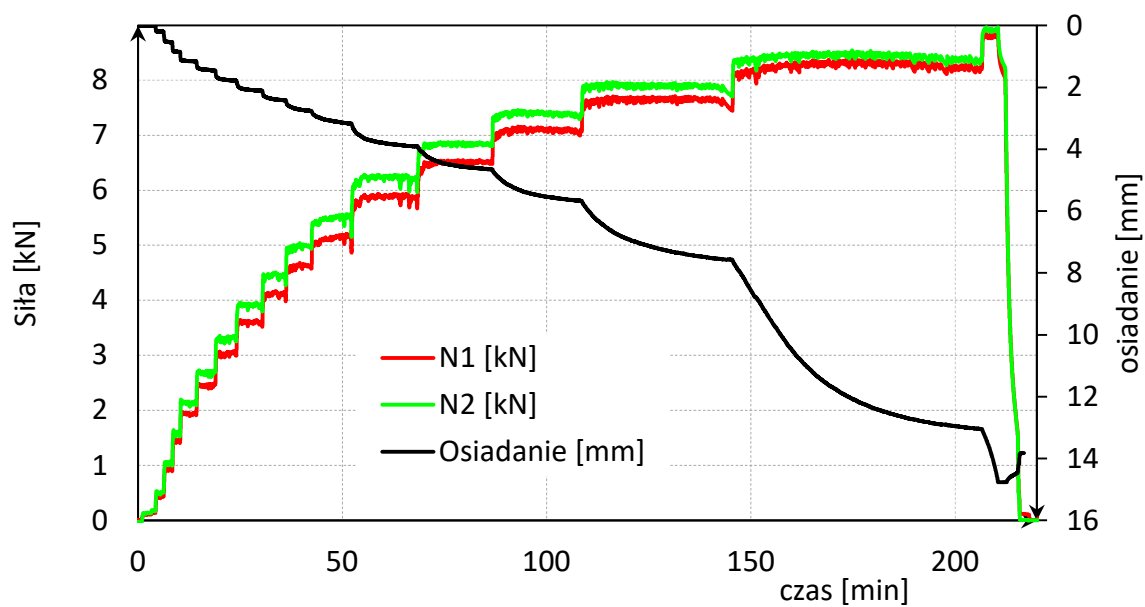
Pal P.1



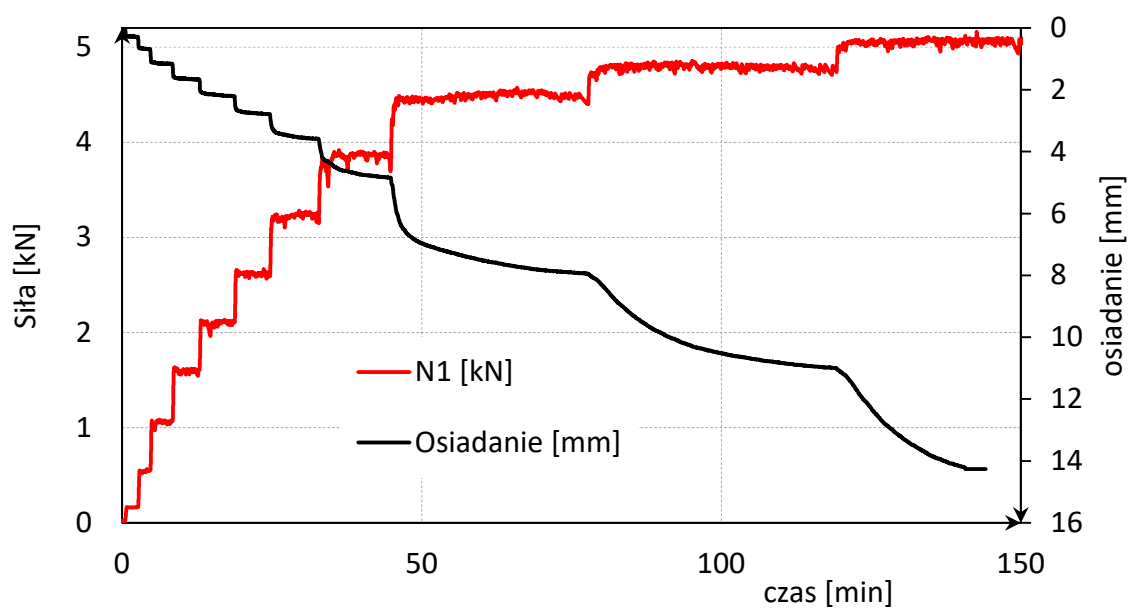
Pal P.2



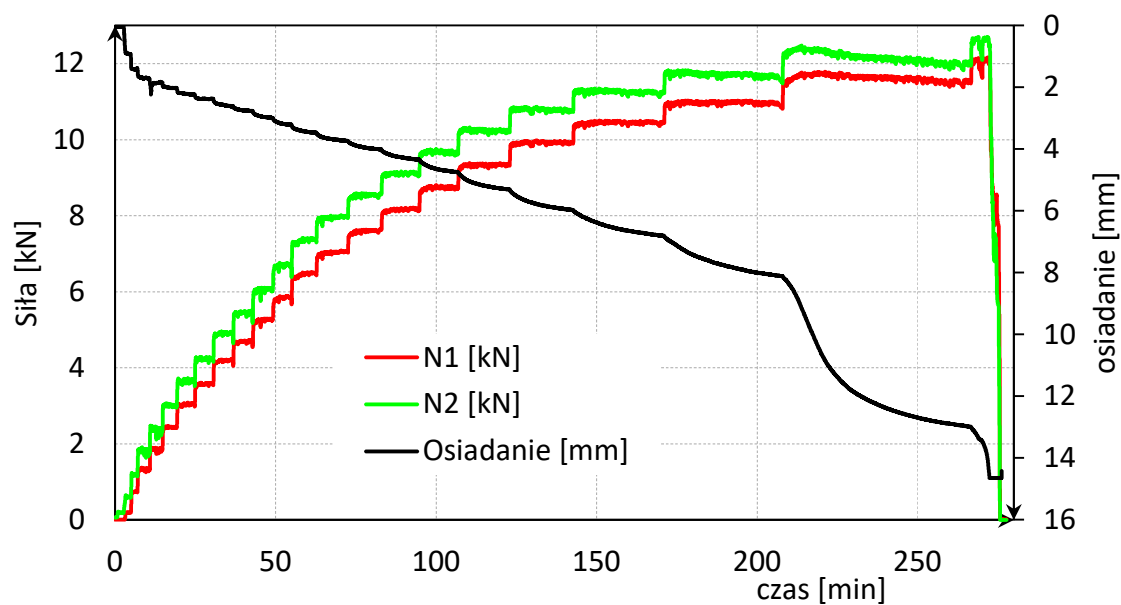
Pal P.3



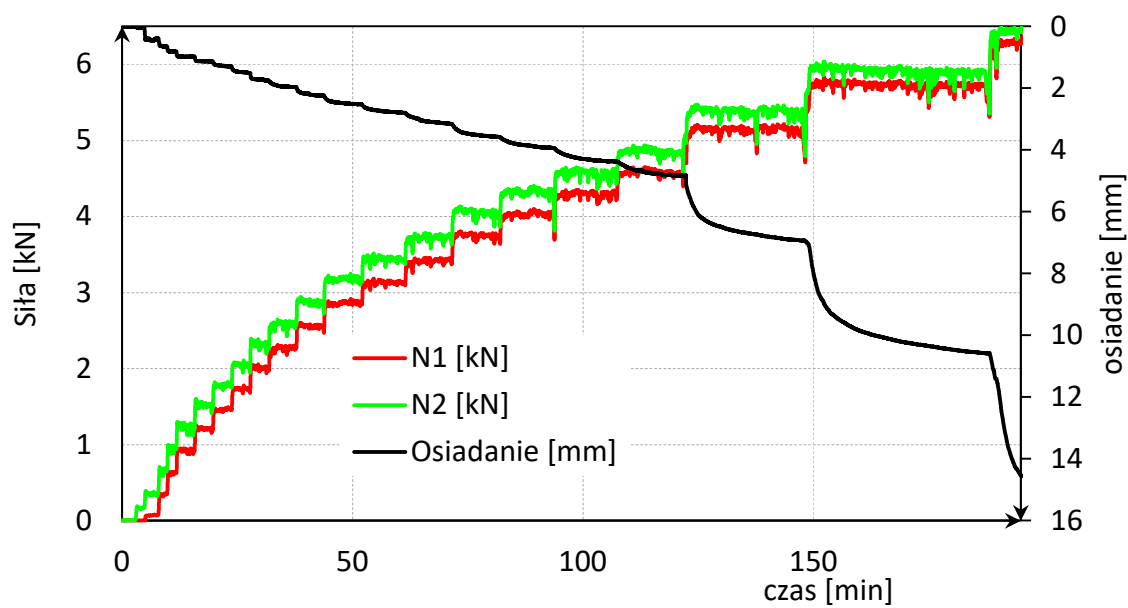
Pal P.4



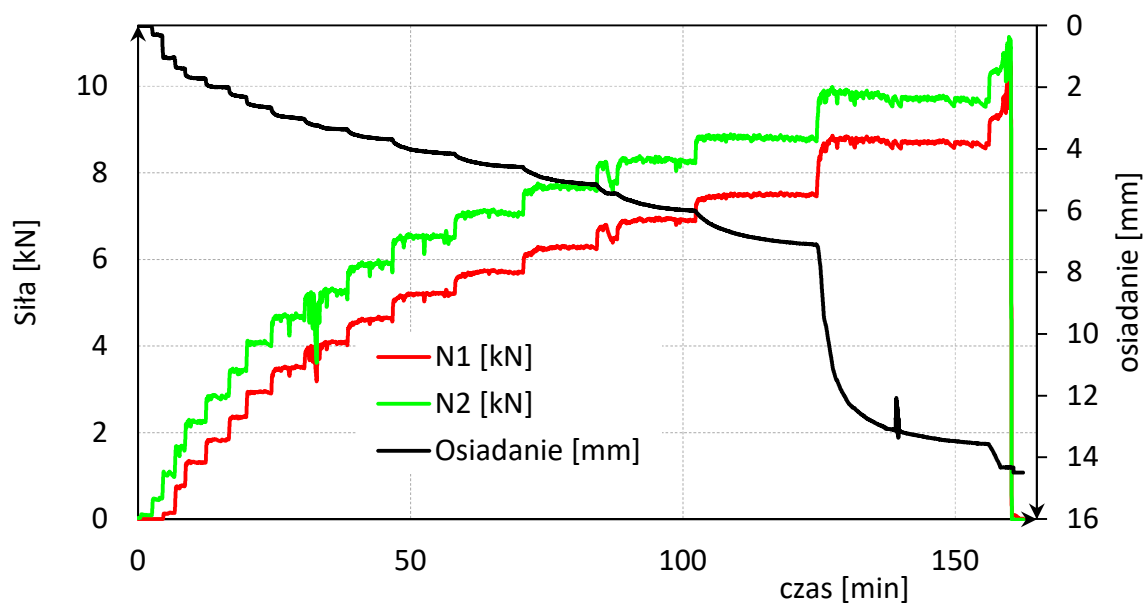
Pal P.5



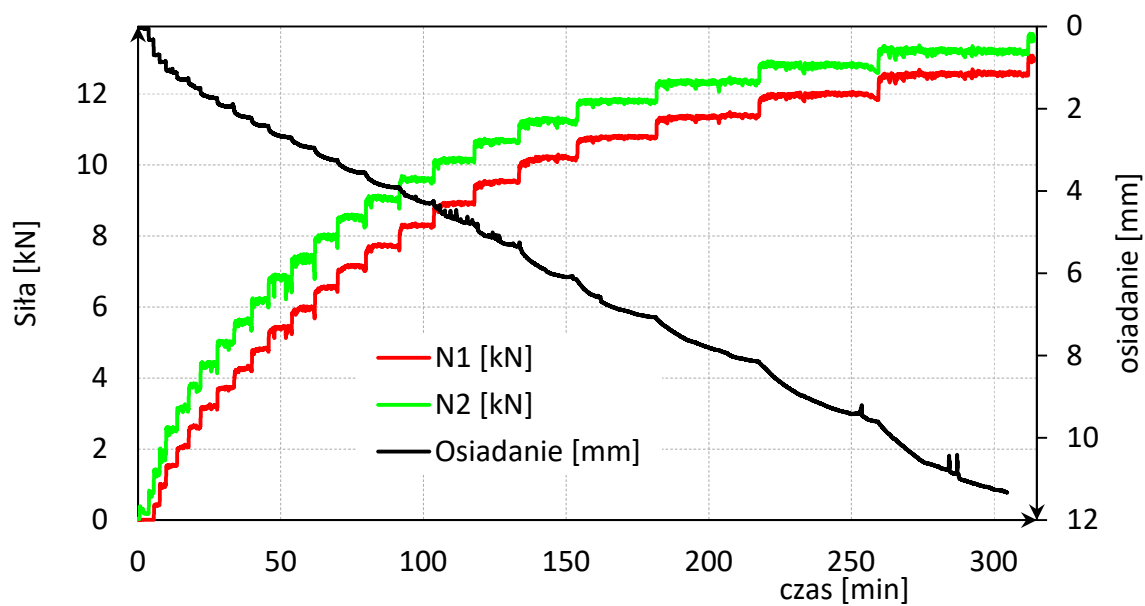
Pal P.6



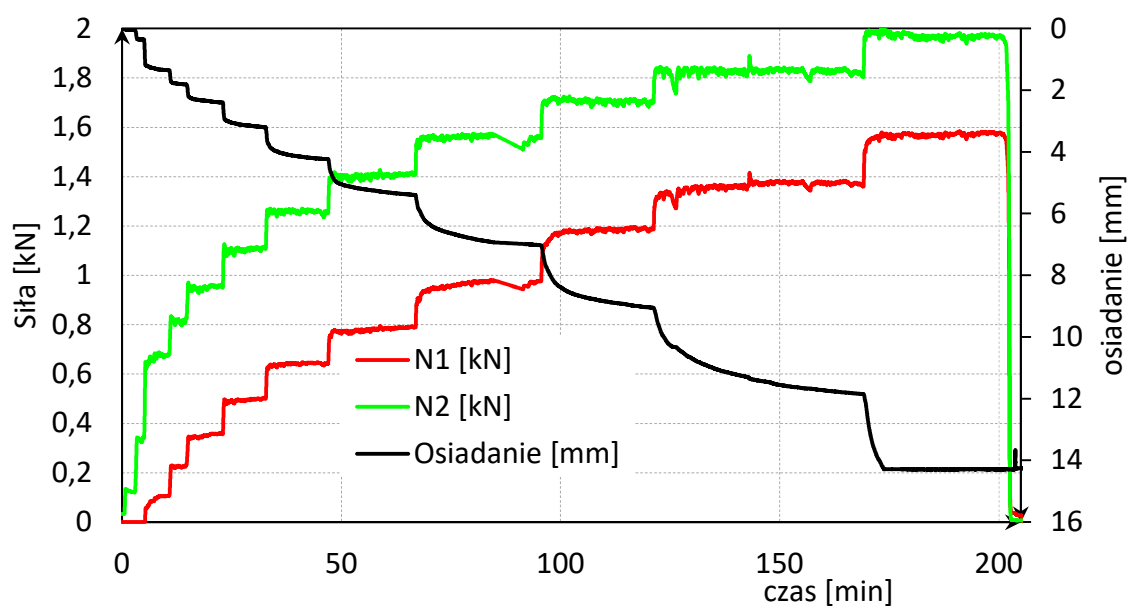
Pal P.7



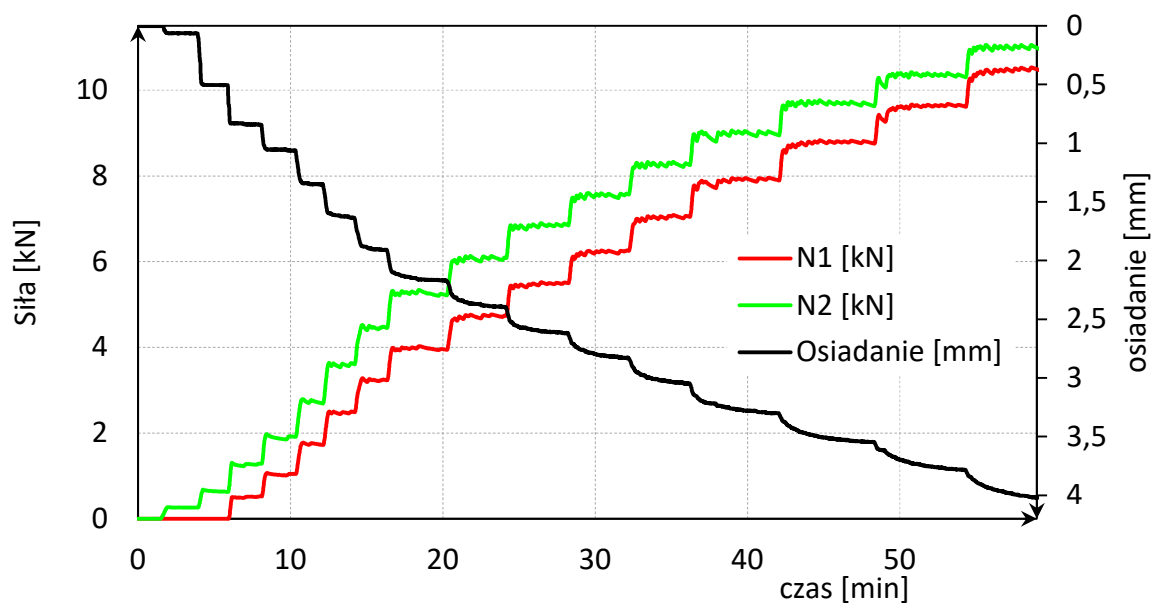
Pal P.8



Pal P.9

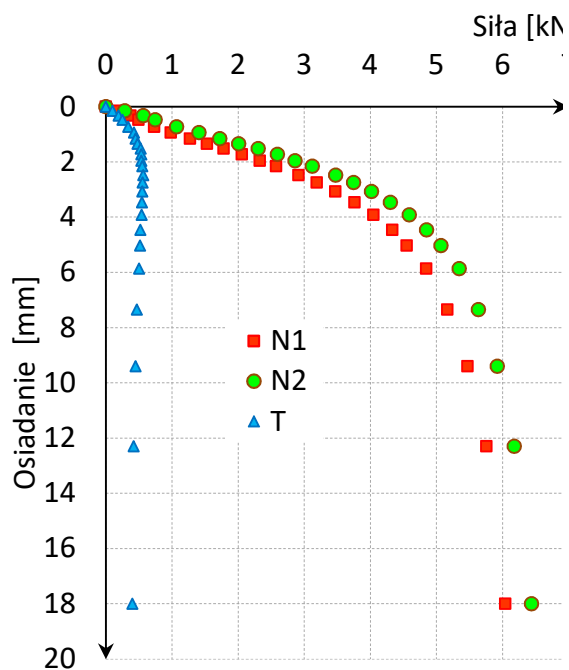


Pal P.10

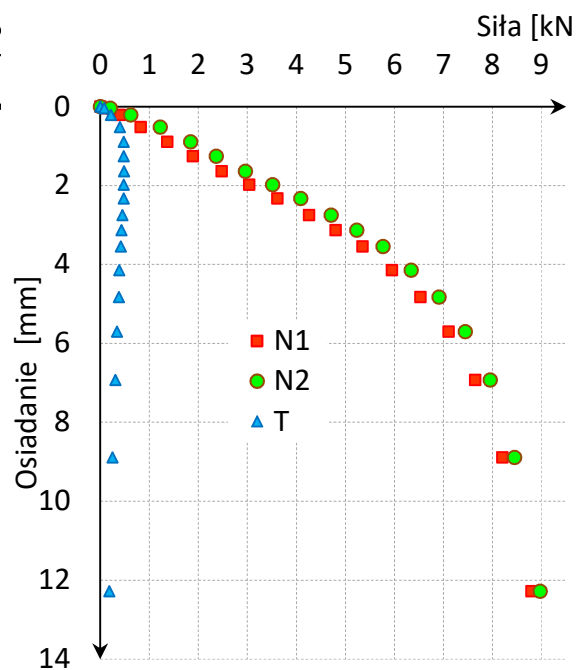


Załącznik D. Wyniki próbnych obciążeń statycznych oprzyrządowanego pala.
Rozkład oporów.

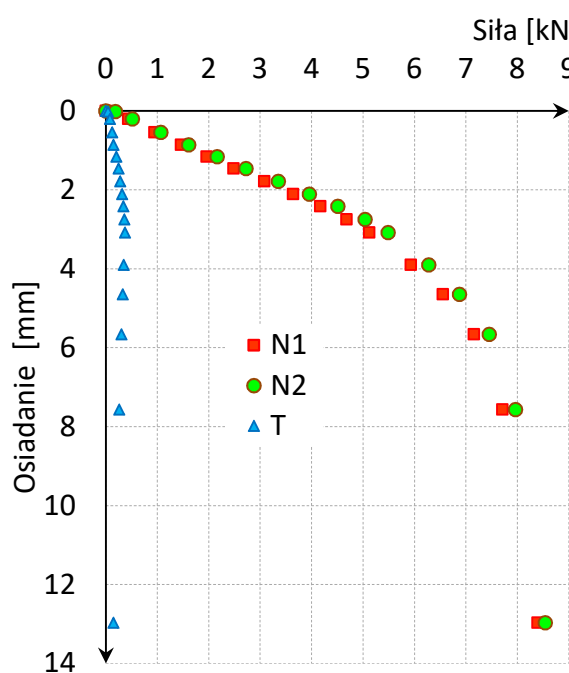
Pal P.1



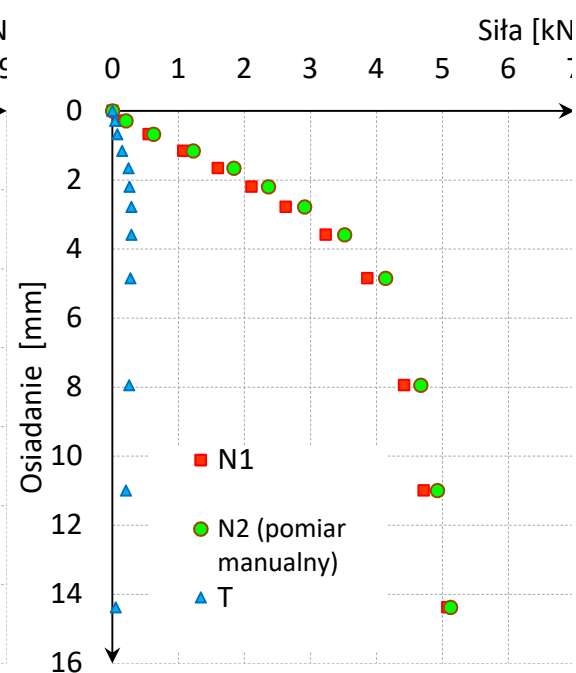
Pal. P.2



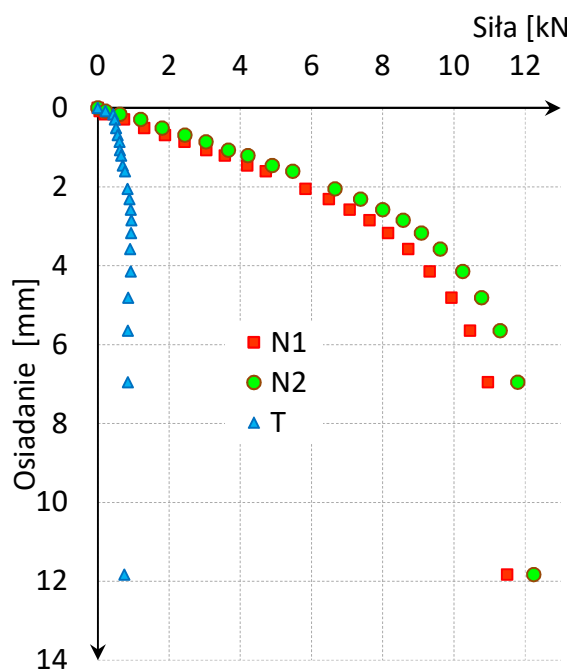
Pal P.3



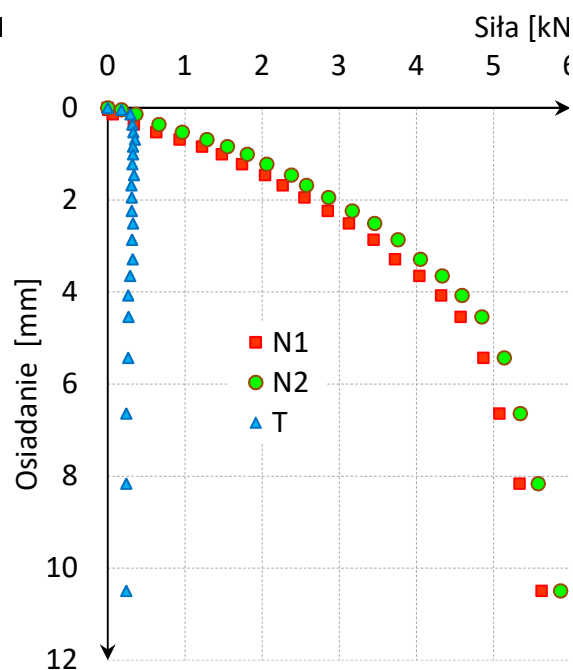
Pal. P.4



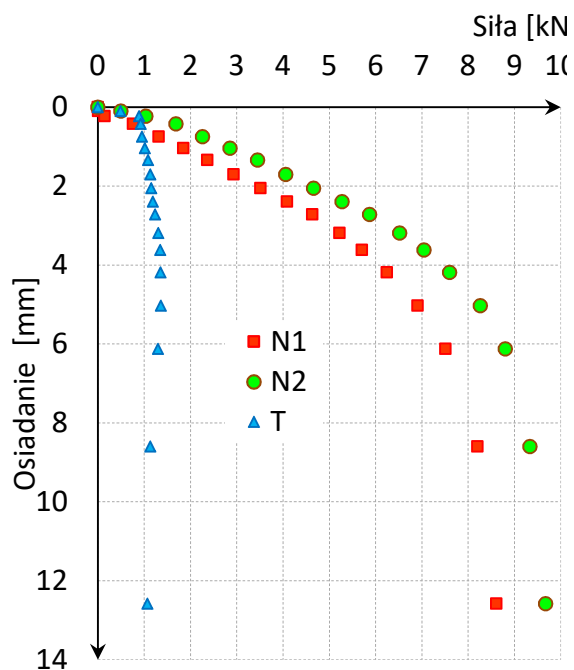
Pal P.5



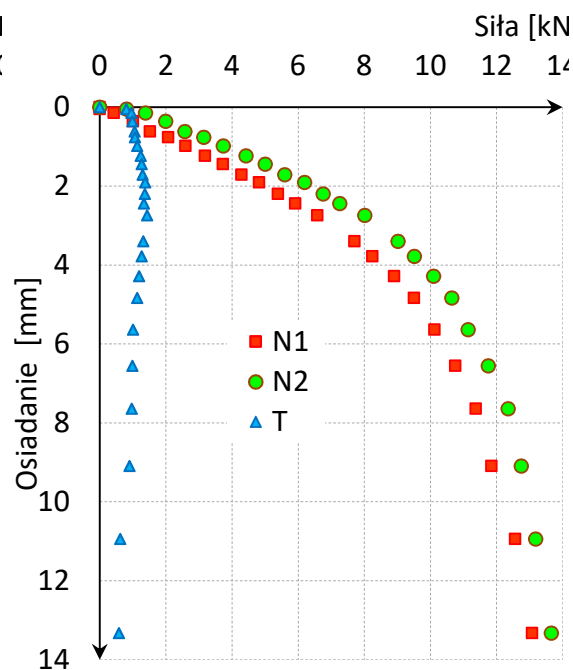
Pal. P.6



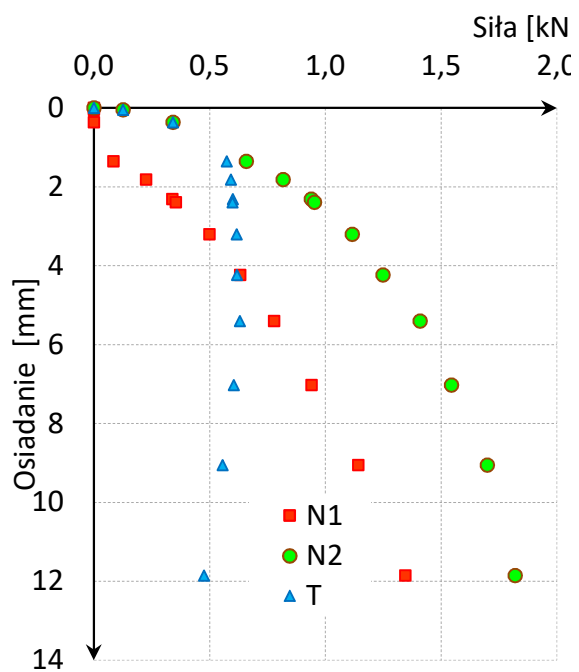
Pal P.7



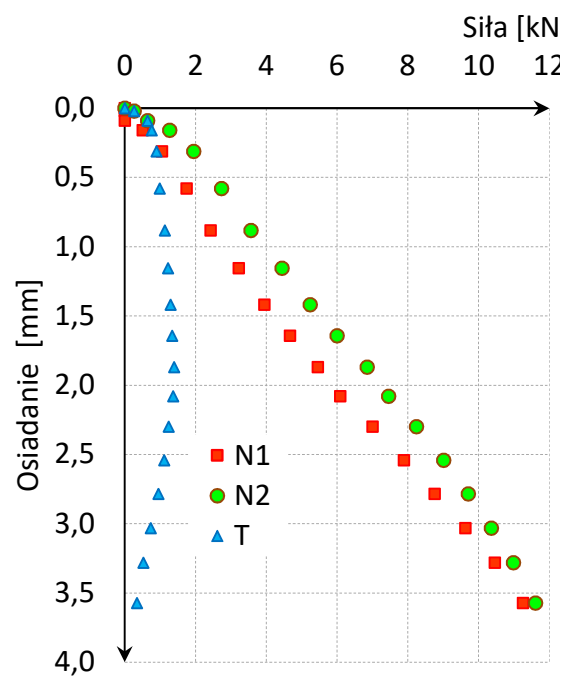
Pal. P.8



Pal P.9



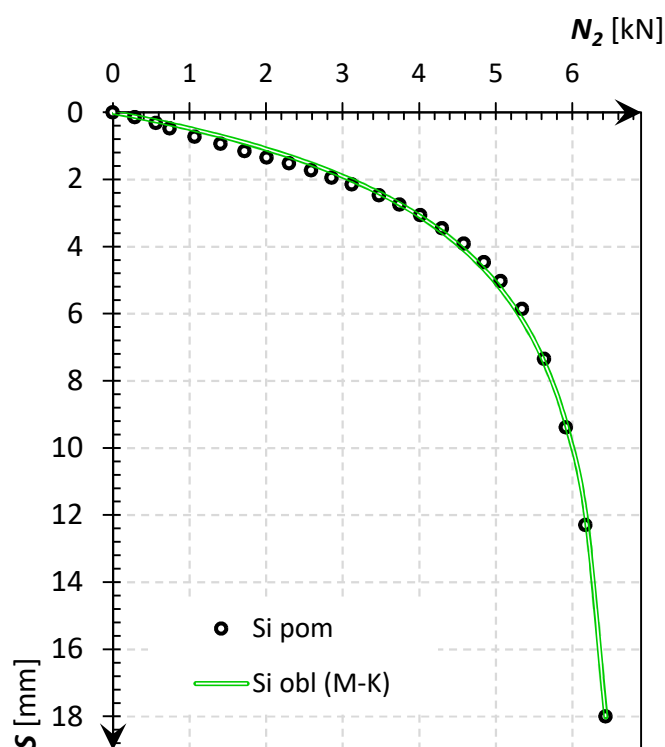
Pal. P.10



Załącznik E. Aproksymacja M-K wyników próbnych obciążeń statycznych oprzyrządowanych pali.

Pal.P.1. Obciążenie głowicy pala.

Próbne obciążenie statyczne		Aproksymacja M-K
N_{2pom} [kN]	S_{ipom} [mm]	$S_{iobl}(M-K)$ [mm]
0,00	0,00	0,00
0,29	0,14	0,13
0,56	0,32	0,26
0,74	0,48	0,35
1,07	0,73	0,52
1,41	0,94	0,71
1,72	1,16	0,90
2,01	1,34	1,10
2,30	1,52	1,31
2,59	1,73	1,54
2,86	1,95	1,77
3,12	2,15	2,02
3,48	2,47	2,40
3,74	2,75	2,73
4,02	3,06	3,11
4,30	3,46	3,56
4,59	3,92	4,09
4,85	4,46	4,68
5,07	5,03	5,26
5,34	5,86	6,17
5,63	7,35	7,44
5,92	9,39	9,27
6,18	12,29	11,98
6,44	18,00	18,02

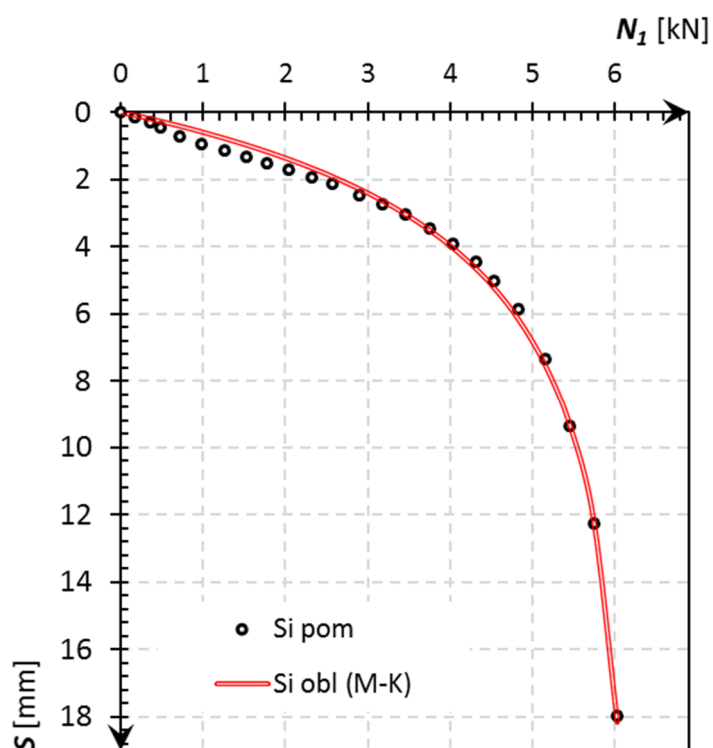


współczynnik korelacji $r = 0,999233$

$C_2 =$	0,43167	mm/kN
$N_{gr2} =$	6,66	kN
$\kappa_2 =$	0,332	

Pal.P.1. Opór pod podstawą pała.

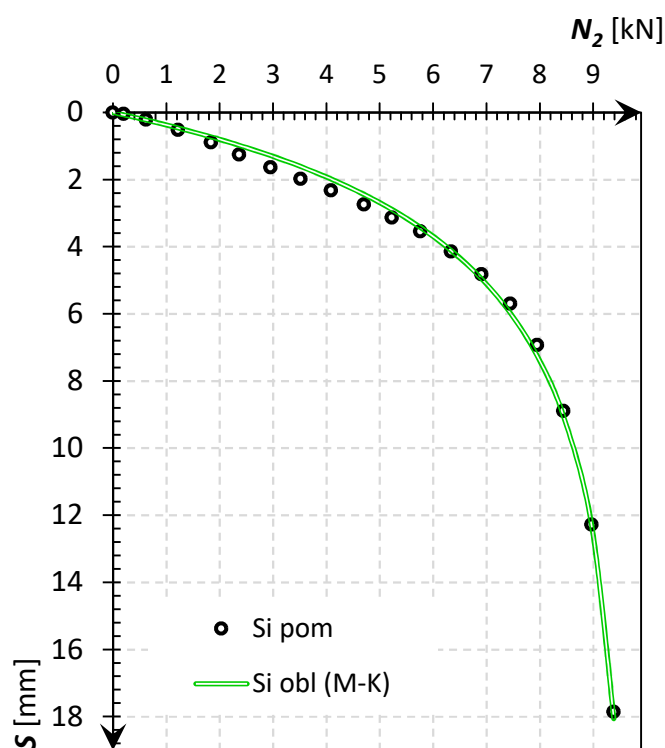
Próbne obciążenie statyczne		Aproksymacja M-K
N_{1pom} [kN]	S_{ipom} [mm]	$S_{iobl}(M-K)$ [mm]
0,00	0,00	0,00
0,18	0,14	0,10
0,37	0,32	0,21
0,49	0,48	0,28
0,73	0,73	0,42
0,98	0,94	0,59
1,27	1,16	0,79
1,53	1,34	0,98
1,78	1,52	1,18
2,05	1,73	1,41
2,32	1,95	1,66
2,57	2,15	1,92
2,91	2,47	2,30
3,19	2,75	2,64
3,47	3,06	3,04
3,76	3,46	3,51
4,05	3,92	4,05
4,33	4,46	4,68
4,55	5,03	5,25
4,84	5,86	6,18
5,16	7,35	7,53
5,47	9,39	9,37
5,75	12,29	12,17
6,04	18,00	18,16

współczynnik korelacji $r = 0,999109$

$C_1 =$	0,53620	mm/kN
$N_{gr1} =$	6,28	kN
$\kappa_1 =$	0,288	

Pal.P.2. Obciążenie głowicy pała.

Próbne obciążenie statyczne		Aproksymacja M-K
N_{2ipom} [kN]	S_{ipom} [mm]	$S_{iobl}(M-K)$ [mm]
0,00	0	0,00
0,20	0,04	0,07
0,62	0,21	0,22
1,22	0,52	0,46
1,84	0,89	0,73
2,36	1,25	0,98
2,96	1,64	1,28
3,52	1,98	1,61
4,09	2,33	1,98
4,71	2,75	2,45
5,23	3,13	2,89
5,76	3,54	3,42
6,34	4,15	4,11
6,91	4,82	4,95
7,45	5,70	5,97
7,95	6,93	7,26
8,45	8,89	9,05
8,97	12,28	12,31
9,39	17,86	18,06

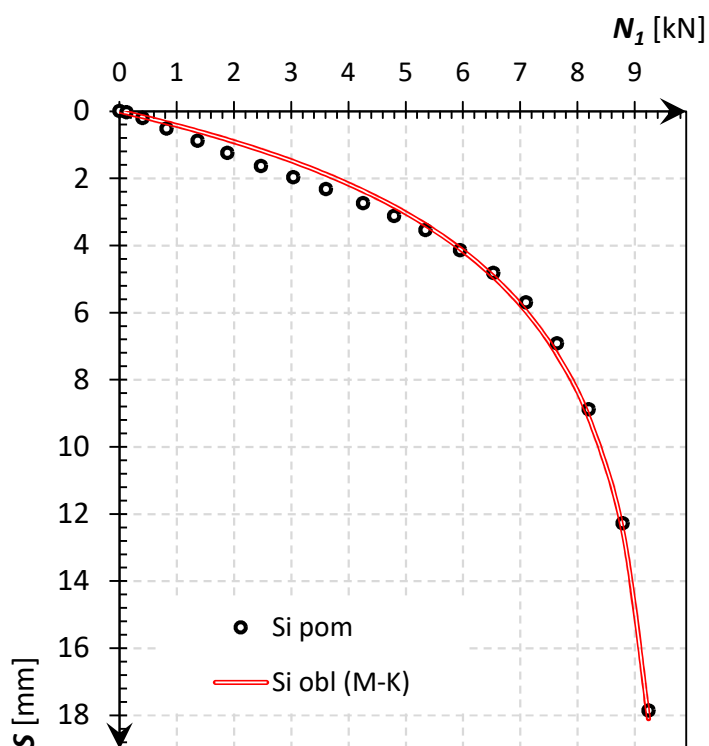


współczynnik korelacji $r = 0,999242$

$C_2 =$	0,34750	mm/kN
$N_{gr2} =$	9,74	kN
$\kappa_2 =$	0,268	

Pal.P.2. Opór pod podstawą pała.

Próbne obciążenie statyczne		Aproksymacja M-K
N_{1pom} [kN]	S_{1pom} [mm]	$S_{1obl}(M-K)$ [mm]
0,00	0	0,00
0,12	0,04	0,05
0,40	0,21	0,16
0,82	0,52	0,34
1,36	0,89	0,59
1,89	1,25	0,85
2,47	1,64	1,16
3,04	1,98	1,50
3,61	2,33	1,88
4,26	2,75	2,37
4,80	3,13	2,84
5,35	3,54	3,38
5,95	4,15	4,09
6,53	4,82	4,93
7,10	5,70	5,96
7,64	6,93	7,25
8,20	8,89	9,12
8,79	12,28	12,49
9,24	17,86	18,10

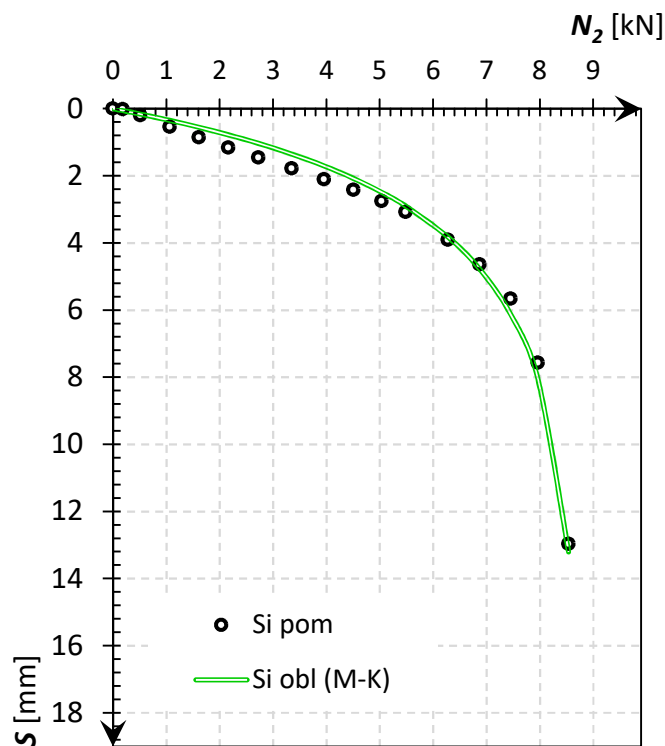


współczynnik korelacji $r=$ 0,99901

$C_1=$	0,39295	mm/kN
$N_{gr1}=$	9,646	kN
$\kappa_1=$	0,242	

Pal.P.3. Obciążenie głowicy pala.

Próbne obciążenie statyczne		Aproksymacja M-K
N_{2ipom} [kN]	S_{ipom} [mm]	$S_{iobl(M-K)}$ [mm]
0,00	0,00	0,00
0,19	0,02	0,06
0,51	0,20	0,16
1,07	0,54	0,35
1,61	0,86	0,55
2,16	1,16	0,78
2,73	1,46	1,03
3,35	1,78	1,35
3,96	2,11	1,71
4,51	2,42	2,08
5,04	2,76	2,49
5,49	3,08	2,90
6,28	3,91	3,83
6,87	4,65	4,78
7,46	5,66	6,13
7,96	7,57	8,04
8,54	12,98	13,21

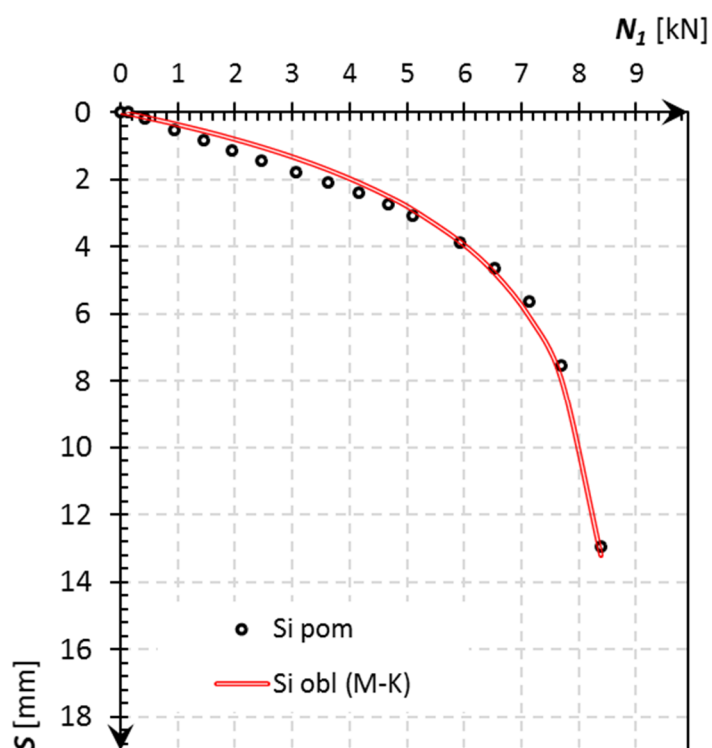


współczynnik korelacji $r = 0,997785$

$C_2 =$	0,30461	mm/kN
$N_{gr2} =$	8,86	kN
$\kappa_2 =$	0,220	

Pal.P.3. Opór pod podstawą pała.

Próbne obciążenie statyczne		Aproksymacja M-K
$N_{i\text{pom}}$ [kN]	$S_{i\text{pom}}$ [mm]	$S_{i\text{obl}}(M-K)$ [mm]
0,00	0,00	0,00
0,14	0,02	0,05
0,43	0,20	0,15
0,94	0,54	0,35
1,46	0,86	0,57
1,96	1,16	0,79
2,48	1,46	1,05
3,08	1,78	1,38
3,64	2,11	1,72
4,17	2,42	2,10
4,68	2,76	2,51
5,12	3,08	2,92
5,93	3,91	3,85
6,55	4,65	4,81
7,15	5,66	6,12
7,71	7,57	7,97
8,39	12,98	13,21

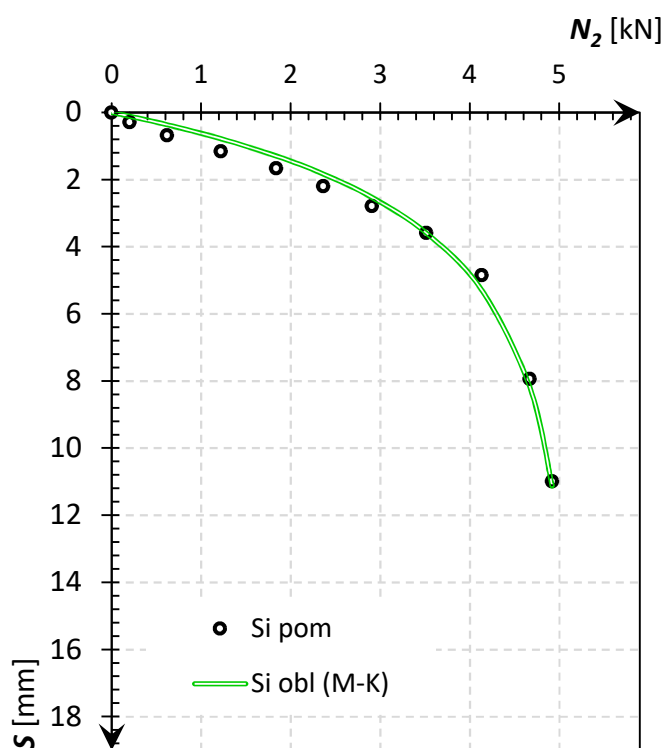


współczynnik korelacji $r = 0,998039$

$C_1 =$	0,34765	mm/kN
$N_{gr1} =$	8,79	kN
$\kappa_1 =$	0,202	

Pal.P.4. Obciążenie głowicy pała.

Próbne obciążenie statyczne		Aproksymacja M-K
N_{2ipom} [kN]	S_{ipom} [mm]	$S_{iobl}(M-K)$ [mm]
0,00	0,00	0,00
0,20	0,29	0,11
0,62	0,68	0,37
1,22	1,16	0,78
1,84	1,66	1,30
2,36	2,20	1,83
2,91	2,79	2,53
3,52	3,59	3,59
4,14	4,85	5,30
4,67	7,94	8,18
4,92	10,99	11,13

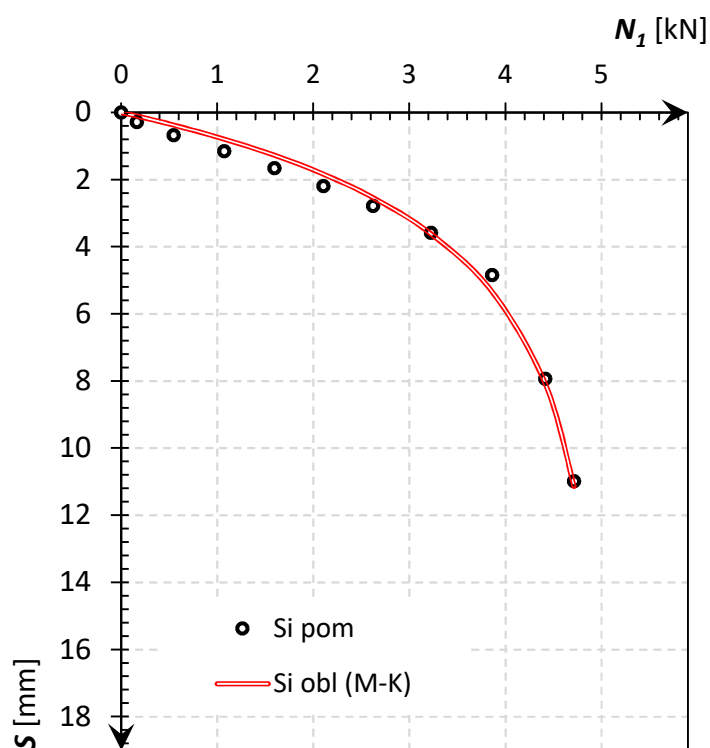


współczynnik korelacji $r = 0,998216$

$C_2 =$	0,54726	mm/kN
$N_{gr2} =$	5,21	kN
$\kappa_2 =$	0,203	

Pal.P.4. Opór pod podstawą pała.

Próbne obciążenie statyczne		Aproksymacja M-K
N_{ipom} [kN]	S_{ipom} [mm]	$S_{iobl}(M-K)$ [mm]
0,00	0,00	0,00
0,17	0,29	0,11
0,55	0,68	0,38
1,07	1,16	0,79
1,60	1,66	1,28
2,11	2,20	1,84
2,62	2,79	2,54
3,23	3,59	3,62
3,86	4,85	5,34
4,42	7,94	8,09
4,72	10,99	11,14

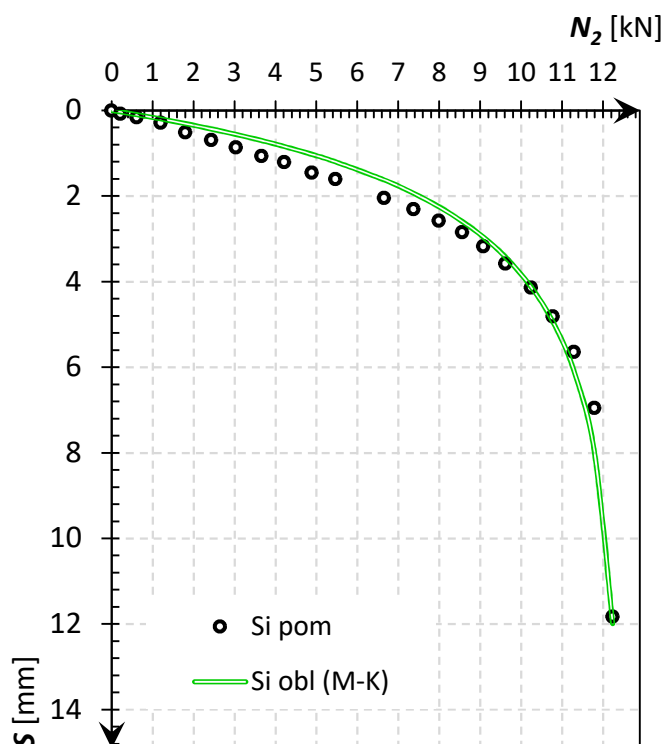


współczynnik korelacji $r = 0,998079$

$C_1 =$	0,64358	mm/kN
$N_{gr1} =$	5,07	kN
$\kappa_1 =$	0,178	

Pal.P.5. Obciążenie głowicy pała.

Próbne obciążenie statyczne		Aproksymacja M-K
N_{2ipom} [kN]	S_{ipom} [mm]	$S_{iobl}(M-K)$ [mm]
0,00	0,00	0,00
0,21	0,08	0,03
0,62	0,16	0,10
1,20	0,29	0,20
1,81	0,51	0,31
2,44	0,69	0,43
3,04	0,86	0,56
3,66	1,07	0,70
4,22	1,21	0,84
4,89	1,46	1,03
5,47	1,61	1,20
6,65	2,05	1,62
7,38	2,31	1,94
8,00	2,58	2,25
8,57	2,85	2,60
9,08	3,18	2,96
9,62	3,58	3,43
10,24	4,14	4,12
10,78	4,81	4,94
11,29	5,64	6,09
11,79	6,95	7,98
12,24	11,83	11,99

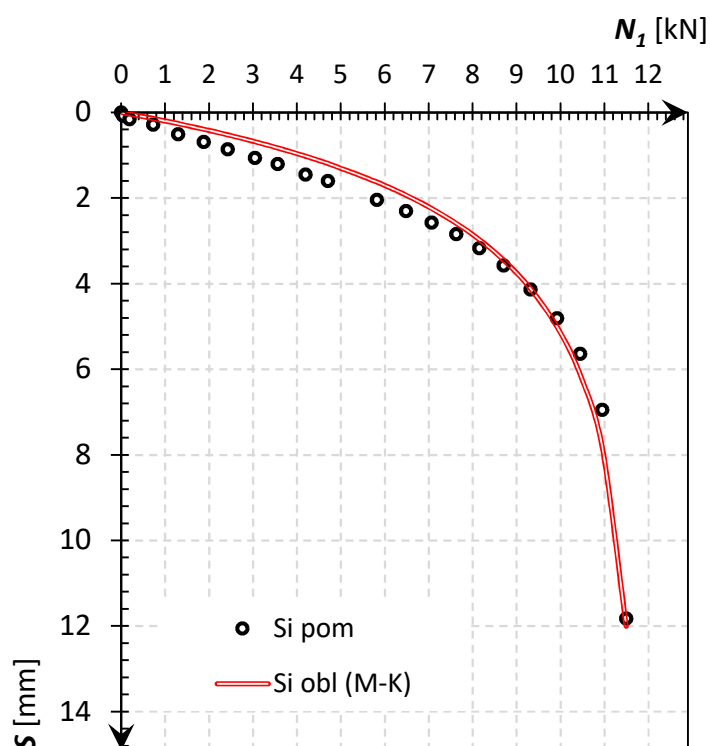


współczynnik korelacji $r = 0,995804$

$C_2 =$	0,15538	mm/kN
$N_{gr2} =$	12,54	kN
$\kappa_2 =$	0,251	

Pal.P.5. Opór pod podstawą pała.

Próbne obciążenie statyczne		Aproksymacja M-K
N_{ipom} [kN]	S_{ipom} [mm]	$S_{iobl}(M-K)$ [mm]
0,00	0,00	0,00
0,05	0,08	0,01
0,19	0,16	0,04
0,73	0,29	0,14
1,30	0,51	0,26
1,88	0,69	0,39
2,43	0,86	0,52
3,05	1,07	0,68
3,57	1,21	0,83
4,20	1,46	1,02
4,71	1,61	1,20
5,83	2,05	1,63
6,49	2,31	1,94
7,07	2,58	2,25
7,63	2,85	2,59
8,15	3,18	2,97
8,71	3,58	3,45
9,32	4,14	4,12
9,93	4,81	5,02
10,45	5,64	6,13
10,95	6,95	7,82
11,50	11,83	12,00

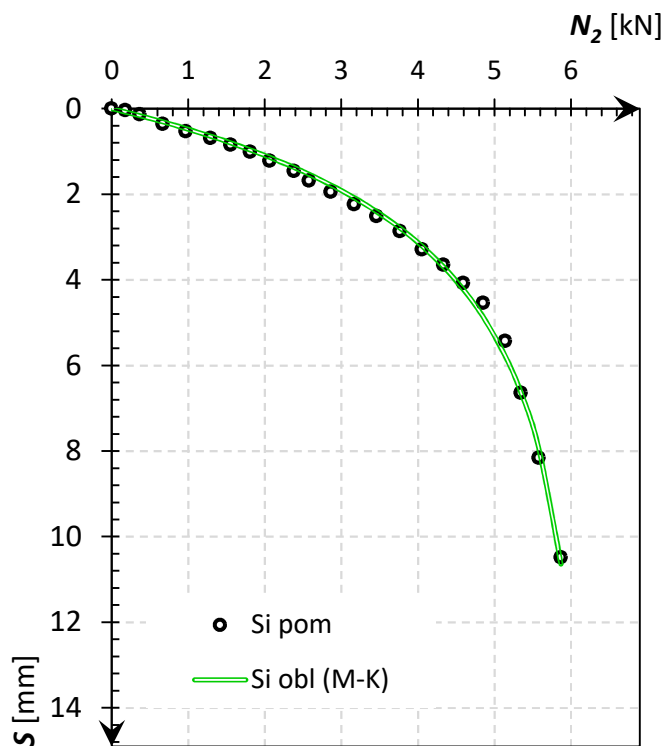


współczynnik korelacji $r = 0,996504$

$C_1 =$	0,18790	mm/kN
$N_{gr1} =$	11,85	kN
$\kappa_1 =$	0,227	

Pal.P.6. Obciążenie głowicy pala.

Próbne obciążenie statyczne		Aproksymacja M-K
N_{2ipom} [kN]	S_{ipom} [mm]	$S_{iobl(M-K)}$ [mm]
0,00	0,00	0,00
0,18	0,04	0,08
0,37	0,14	0,16
0,67	0,36	0,31
0,97	0,53	0,46
1,29	0,69	0,64
1,55	0,84	0,80
1,81	1,01	0,96
2,07	1,22	1,14
2,38	1,46	1,37
2,58	1,68	1,53
2,86	1,95	1,78
3,17	2,24	2,08
3,46	2,51	2,40
3,77	2,86	2,79
4,06	3,29	3,21
4,34	3,65	3,70
4,59	4,08	4,22
4,85	4,54	4,86
5,14	5,43	5,78
5,35	6,64	6,64
5,58	8,16	7,94
5,87	10,49	10,64

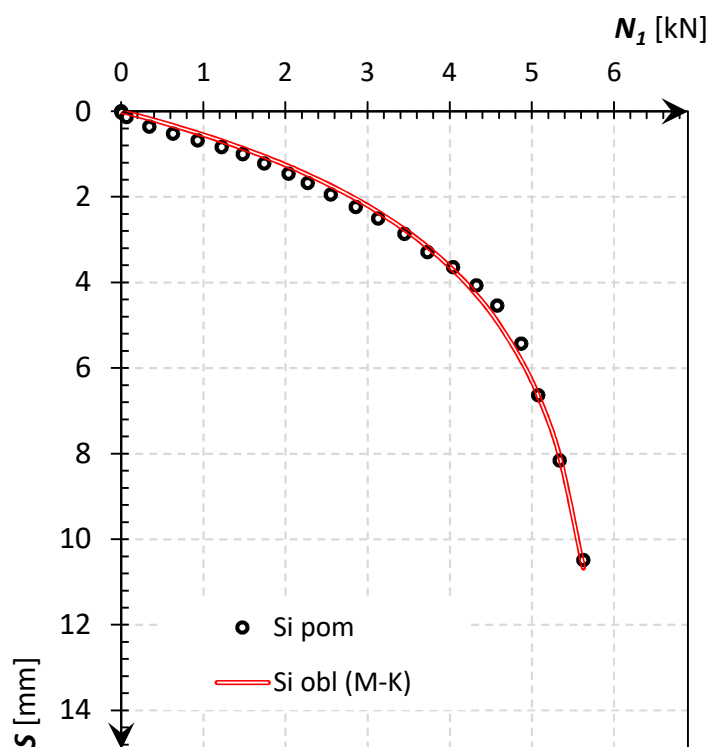


współczynnik korelacji $r = 0,998847$

$C_2 =$	0,43171	mm/kN
$N_{gr2} =$	6,28	kN
$\kappa_2 =$	0,250	

Pal.P.6. Opór pod podstawą pała.

Próbne obciążenie statyczne		Aproksymacja M-K
N_{ipom} [kN]	S_{ipom} [mm]	$S_{iobl}(M-K)$ [mm]
0,00	0,00	0,00
0,01	0,04	0,00
0,07	0,14	0,03
0,34	0,36	0,18
0,63	0,53	0,34
0,93	0,69	0,51
1,23	0,84	0,69
1,48	1,01	0,87
1,74	1,22	1,06
2,04	1,46	1,29
2,27	1,68	1,48
2,55	1,95	1,74
2,86	2,24	2,05
3,13	2,51	2,35
3,45	2,86	2,76
3,73	3,29	3,17
4,04	3,65	3,71
4,33	4,08	4,29
4,58	4,54	4,91
4,87	5,43	5,82
5,08	6,64	6,66
5,34	8,16	8,06
5,63	10,49	10,67

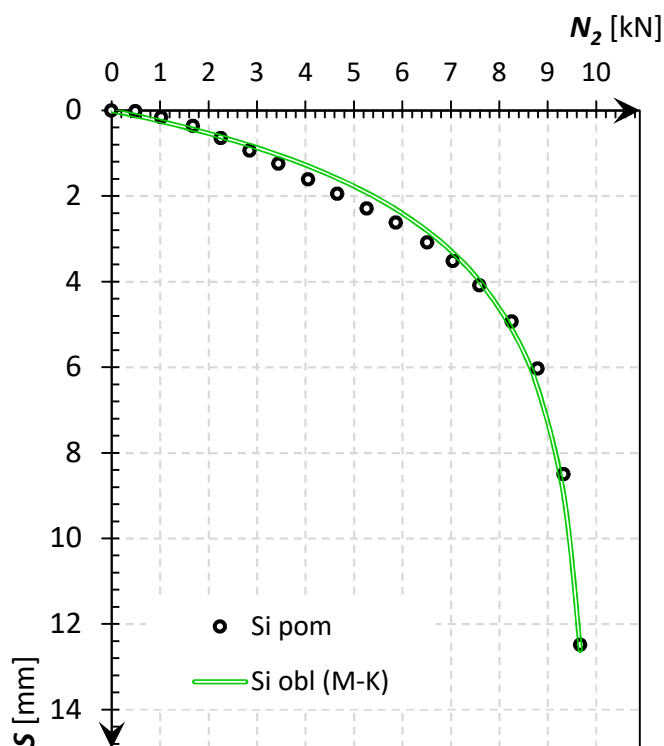


współczynnik korelacji $r = 0,998647$

$C_1 =$	0,49603	mm/kN
$N_{gr1} =$	6,03	kN
$\kappa_1 =$	0,197	

Pal.P.7. Obciążenie głowicy pała.

Próbne obciążenie statyczne		Aproksymacja M-K
N_{2ipom} [kN]	S_{ipom} [mm]	$S_{iobl (M-K)}$ [mm]
0,00	0	0,00
0,49	0,02	0,12
1,03	0,16	0,26
1,68	0,36	0,44
2,26	0,65	0,62
2,85	0,94	0,82
3,44	1,24	1,04
4,06	1,61	1,30
4,66	1,95	1,59
5,27	2,29	1,92
5,87	2,62	2,31
6,52	3,09	2,82
7,05	3,52	3,33
7,59	4,09	3,99
8,26	4,93	5,12
8,80	6,03	6,51
9,33	8,50	9,02
9,67	12,49	12,62

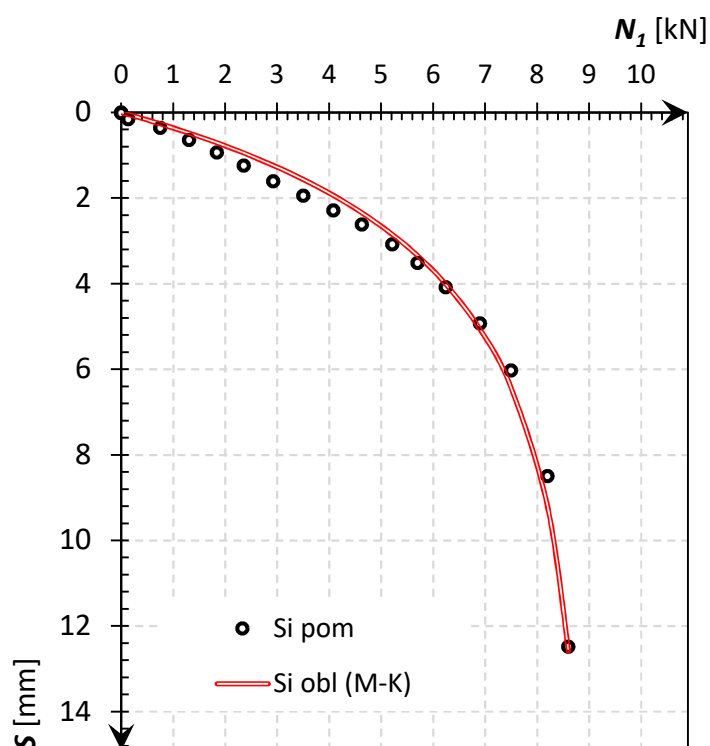


współczynnik korelacji $r = 0,997649$

$C_2 =$	0,23424	mm/kN
$N_{gr2} =$	9,99	kN
$K_2 =$	0,242	

Pal.P.7. Opór pod podstawą pała.

Próbne obciążenie statyczne		Aproksymacja M-K
N_{ipom} [kN]	S_{ipom} [mm]	$S_{iobl}(M-K)$ [mm]
0,00	0	0,00
0,00	0,02	0,00
0,14	0,16	0,05
0,76	0,36	0,27
1,31	0,65	0,48
1,84	0,94	0,71
2,36	1,24	0,95
2,93	1,61	1,24
3,51	1,95	1,57
4,09	2,29	1,94
4,63	2,62	2,35
5,22	3,09	2,85
5,70	3,52	3,34
6,24	4,09	4,01
6,91	4,93	5,07
7,50	6,03	6,44
8,20	8,50	9,20
8,60	12,49	12,59

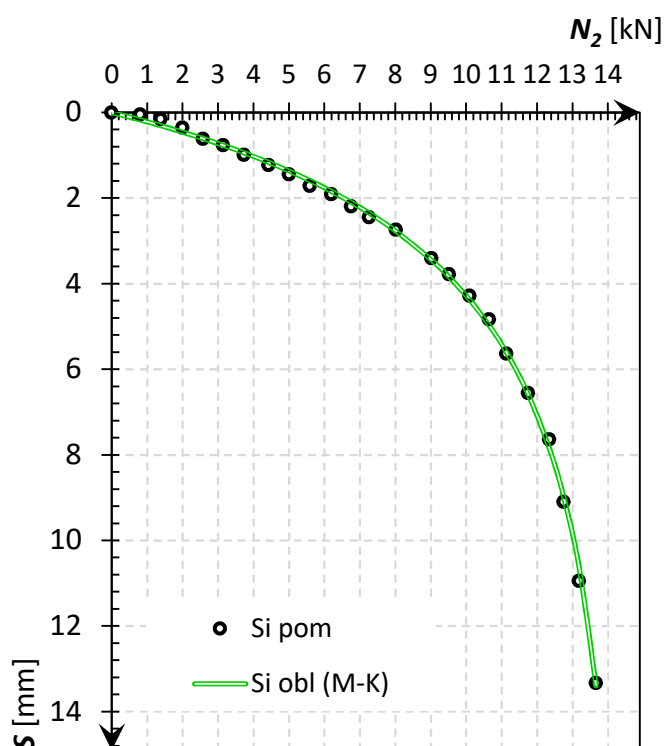


współczynnik korelacji $r = 0,997905$

$C_1 =$	0,33653	mm/kN
$N_{gr1} =$	9,04	kN
$\kappa_1 =$	0,195	

Pal.P.8. Obciążenie głowicy pała.

Próbne obciążenie statyczne		Aproksymacja M-K
N_{2ipom} [kN]	S_{ipom} [mm]	$S_{iobl}(M-K)$ [mm]
0,00	0,00	0,00
0,81	0,05	0,18
1,39	0,15	0,31
2,00	0,36	0,46
2,58	0,62	0,61
3,15	0,76	0,77
3,74	0,99	0,94
4,43	1,23	1,17
5,00	1,44	1,37
5,60	1,71	1,59
6,20	1,91	1,84
6,76	2,20	2,10
7,26	2,45	2,35
8,02	2,74	2,78
9,03	3,41	3,45
9,52	3,78	3,85
10,10	4,28	4,38
10,65	4,84	4,98
11,14	5,64	5,61
11,75	6,56	6,59
12,35	7,64	7,86
12,75	9,10	8,98
13,19	10,95	10,65
13,67	13,33	13,40

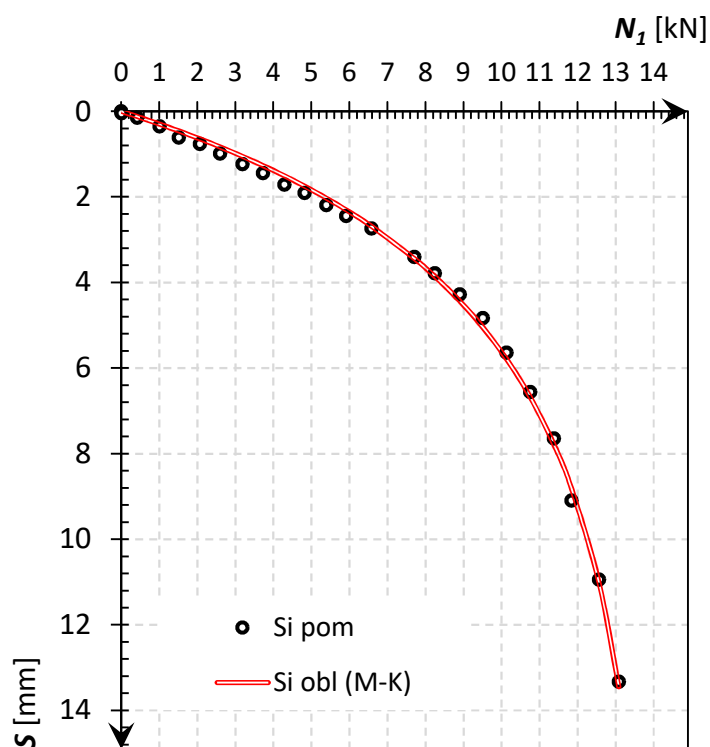


współczynnik korelacji $r = 0,999522$

$C_2 =$	0,20790	mm/kN
$N_{gr2} =$	14,69	kN
$\kappa_2 =$	0,348	

Pal.P.8. Opór pod podstawą pała.

Próbne obciążenie statyczne		Aproksymacja M-K
N_{ipom} [kN]	S_{ipom} [mm]	$S_{iobl}(M-K)$ [mm]
0,00	0,00	0,00
0,01	0,05	0,00
0,43	0,15	0,12
1,01	0,36	0,30
1,52	0,62	0,46
2,08	0,76	0,65
2,60	0,99	0,83
3,19	1,23	1,05
3,73	1,44	1,27
4,29	1,71	1,51
4,83	1,91	1,75
5,40	2,20	2,03
5,92	2,45	2,31
6,58	2,74	2,69
7,71	3,41	3,44
8,25	3,78	3,86
8,91	4,28	4,44
9,51	4,84	5,05
10,13	5,64	5,79
10,76	6,56	6,68
11,38	7,64	7,79
11,85	9,10	8,83
12,57	10,95	11,03
13,09	13,33	13,45

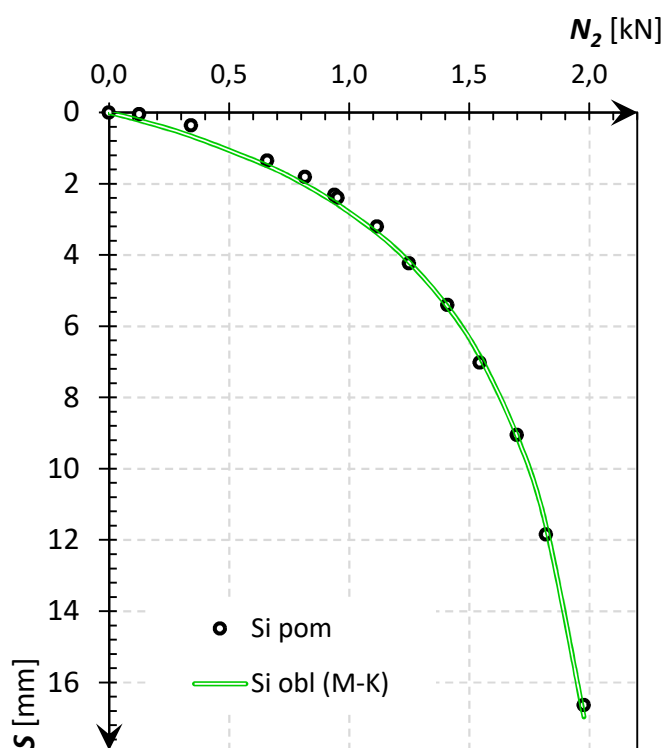


współczynnik korelacji $r=$ 0,999441

$C_1=$	0,28335	mm/kN
$N_{gr1}=$	14,33	kN
$K_1=$	0,238	

Pal.P.9. Obciążenie głowicy pała.

Próbne obciążenie statyczne		Aproksymacja M-K
N_{2ipom} [kN]	S_{ipom} [mm]	$S_{iobl}(M-K)$ [mm]
0,00	0,00	0,00
0,13	0,05	0,22
0,34	0,36	0,66
0,66	1,35	1,50
0,82	1,81	2,03
0,94	2,31	2,52
0,95	2,40	2,58
1,12	3,20	3,39
1,25	4,24	4,20
1,41	5,40	5,45
1,54	7,02	6,86
1,70	9,05	9,09
1,82	11,85	11,63
1,98	16,64	16,96

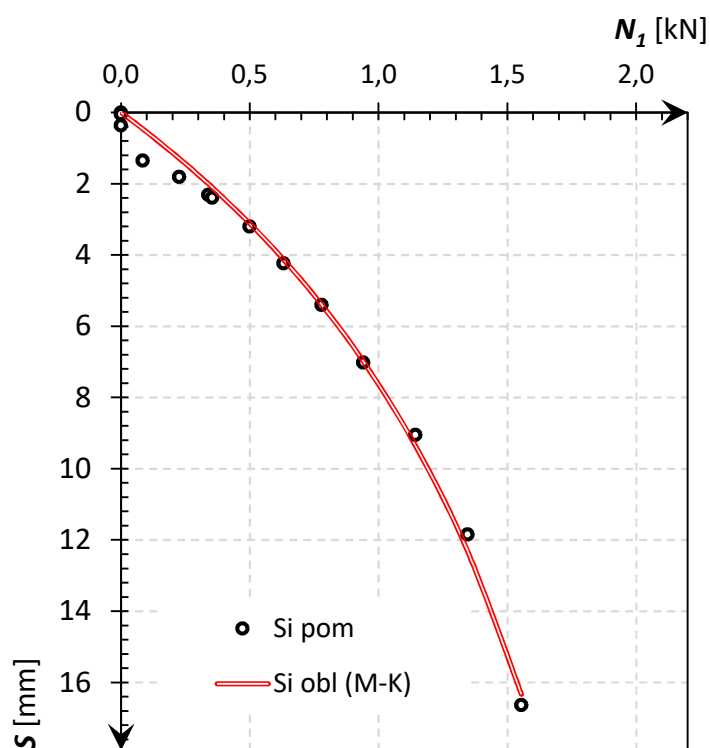


współczynnik korelacji $r = 0,999472$

$C_2 =$	1,67712	mm/kN
$N_{gr2} =$	2,40	kN
$K_2 =$	0,898	

Pal.P.9. Opór pod podstawą pała.

Próbne obciążenie statyczne		Aproksymacja M-K
N_{ipom} [kN]	S_{ipom} [mm]	$S_{iobl}(M-K)$ [mm]
0,00	0,00	0,00
0,00	0,05	0,00
0,00	0,36	0,00
0,09	1,35	0,46
0,23	1,81	1,28
0,34	2,31	2,00
0,35	2,40	2,10
0,50	3,20	3,11
0,63	4,24	4,13
0,78	5,40	5,40
0,94	7,02	6,98
1,14	9,05	9,34
1,35	11,85	12,30
1,55	16,64	16,33

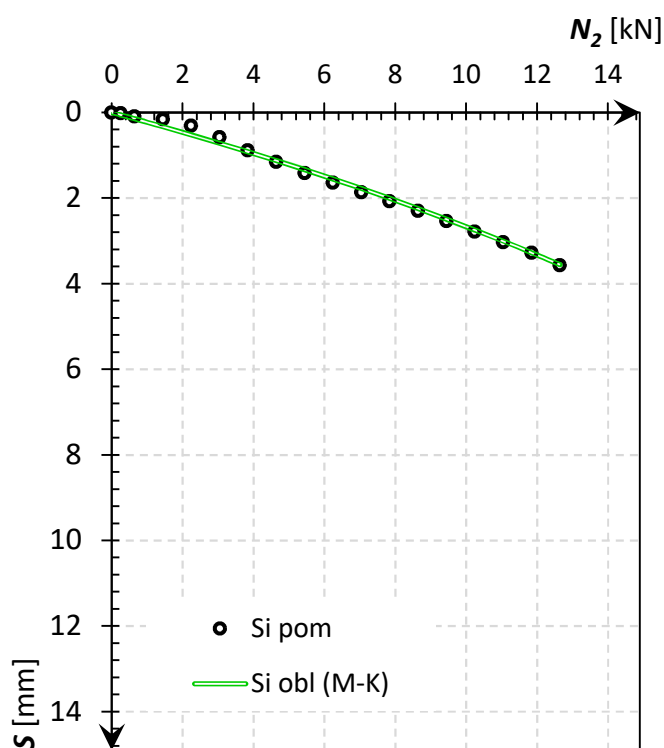


współczynnik korelacji $r = 0,998187$

$C_1 =$	5,31831	mm/kN
$N_{gr1} =$	2,39	kN
$\kappa_1 =$	0,372	

Pal.P.10. Obciążenie głowicy pała.

Próbne obciążenie statyczne		Aproksymacja M-K
N_{2ipom} [kN]	S_{ipom} [mm]	$S_{iobl}(M-K)$ [mm]
0,00	0,00	0,00
0,26	0,02	0,06
0,65	0,09	0,15
1,45	0,16	0,33
2,25	0,31	0,52
3,05	0,58	0,72
3,85	0,88	0,92
4,65	1,16	1,13
5,45	1,42	1,34
6,25	1,64	1,56
7,05	1,87	1,78
7,85	2,08	2,01
8,65	2,30	2,25
9,45	2,54	2,49
10,25	2,79	2,75
11,05	3,03	3,01
11,85	3,28	3,28
12,65	3,57	3,56

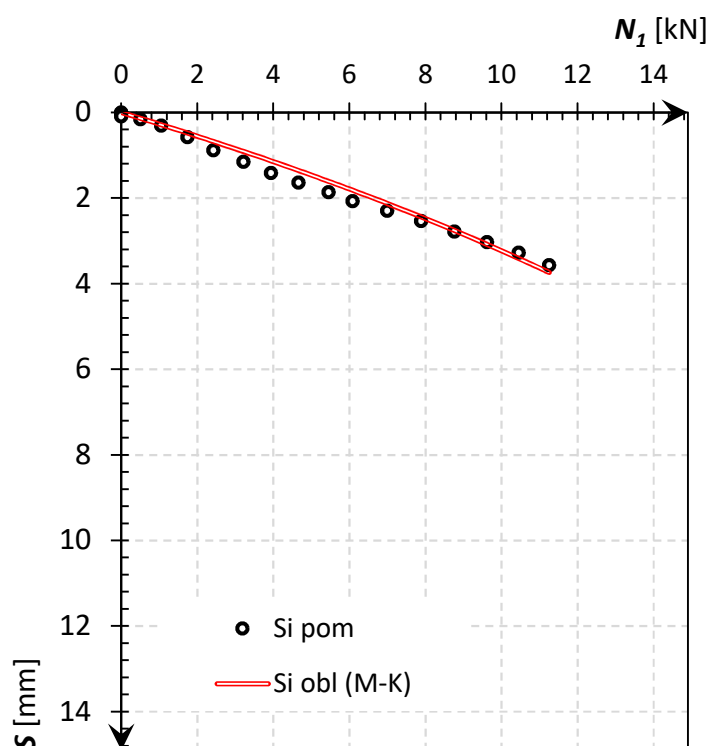


współczynnik korelacji $r = 0,998031$

$C_2 =$	0,22546	mm/kN
$N_{gr2} =$	35,76	kN
$\kappa_2 =$	0,050	

Pal.P.10. Opór pod podstawą pała.

Próbne obciążenie statyczne		Aproksymacja M-K
N_{ipom} [kN]	S_{ipom} [mm]	$S_{iobl}(M-K)$ [mm]
0,00	0,00	0,00
0,00	0,02	0,00
0,00	0,09	0,00
0,51	0,16	0,14
1,05	0,31	0,29
1,75	0,58	0,48
2,43	0,88	0,68
3,22	1,16	0,91
3,94	1,42	1,13
4,67	1,64	1,36
5,46	1,87	1,61
6,08	2,08	1,82
7,00	2,30	2,13
7,89	2,54	2,44
8,76	2,79	2,76
9,62	3,03	3,09
10,46	3,28	3,41
11,26	3,57	3,74

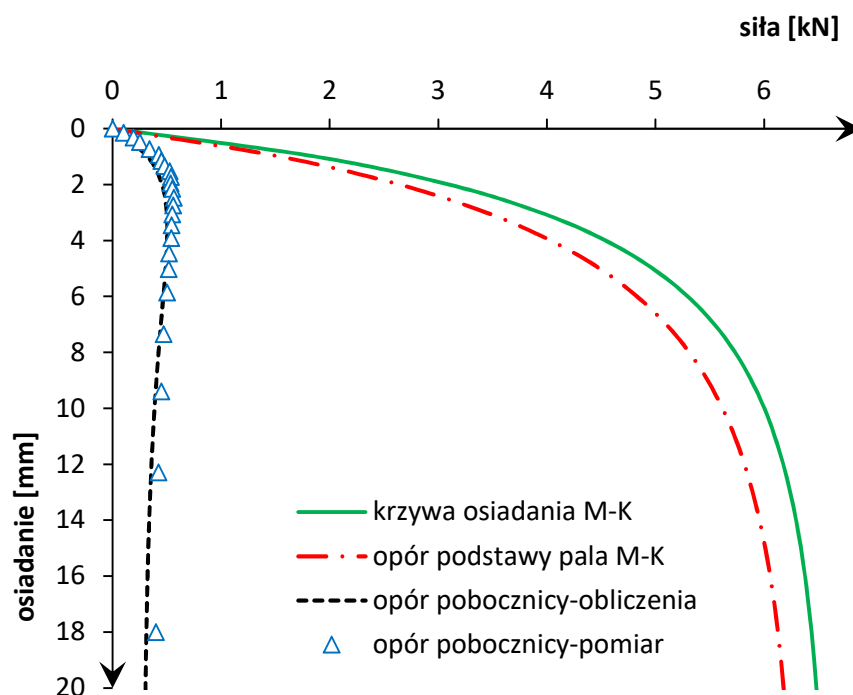


współczynnik korelacji $r = 0,993896$

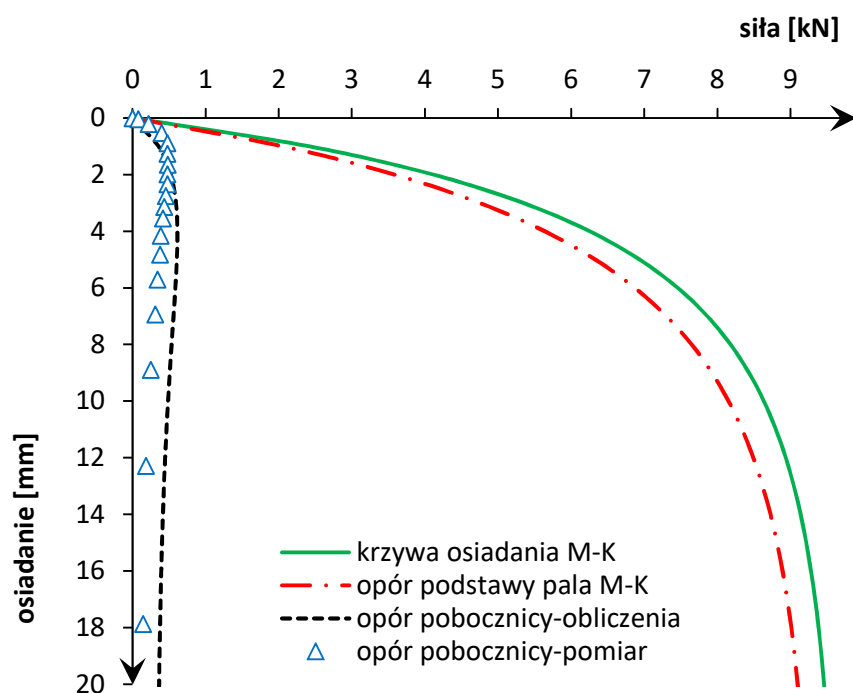
$C_1 =$	0,26813	mm/kN
$N_{gr1} =$	35,76	kN
$\kappa_1 =$	0,165	

Załącznik F. Obliczony rozkład oporów w funkcji pomierzonych podczas próbnych obciążeń statycznych. Pale z dodatkowym pomiarem oporu pod podstawą. Wykresy mobilizacji oporu pobocznicy wraz z osiadaniem pala.

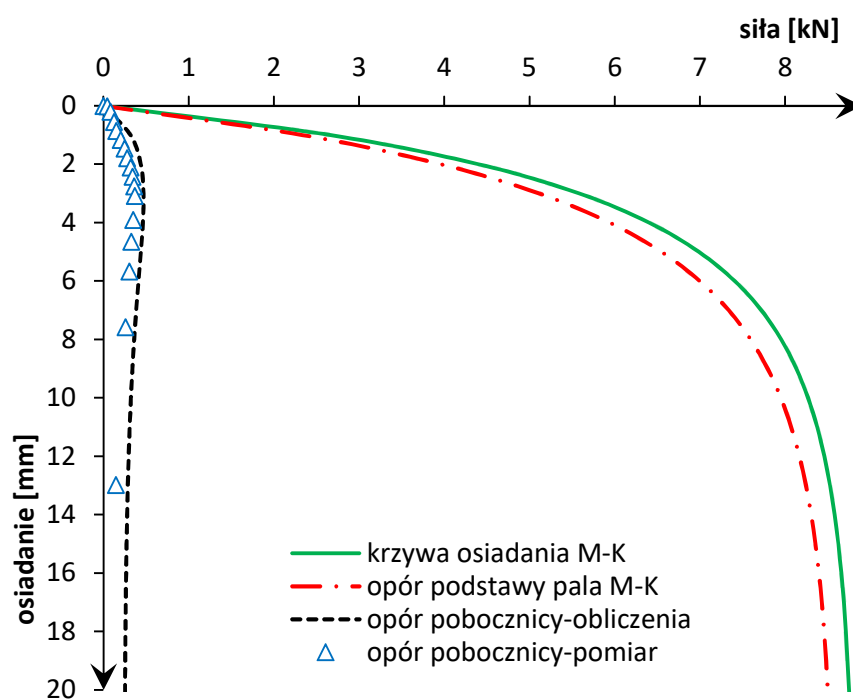
Pal.P.1. Obliczony i pomierzony rozkład oporów w funkcji osiadania pala.



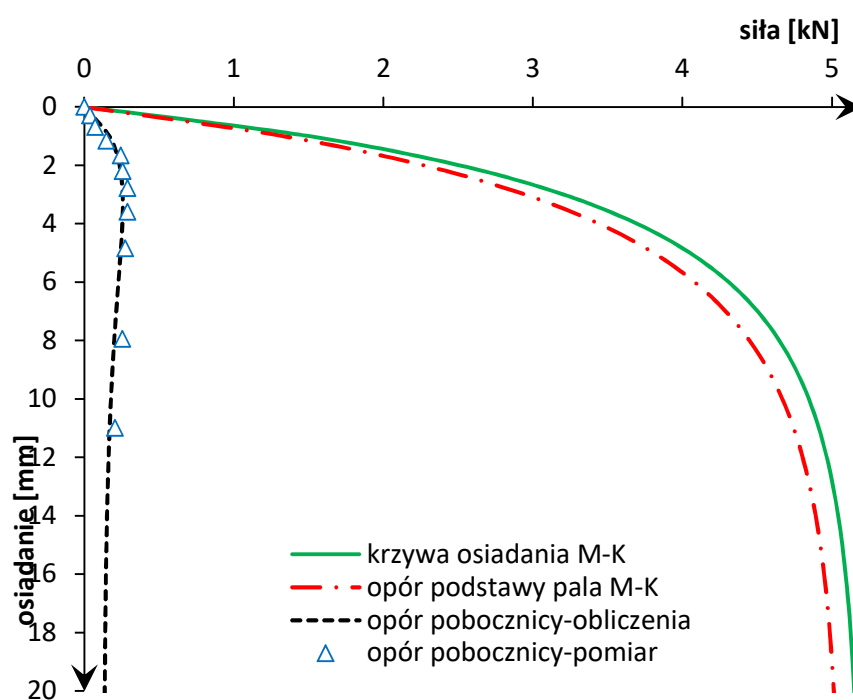
Pal.P.2. Obliczony i pomierzony rozkład oporów w funkcji osiadania pala.



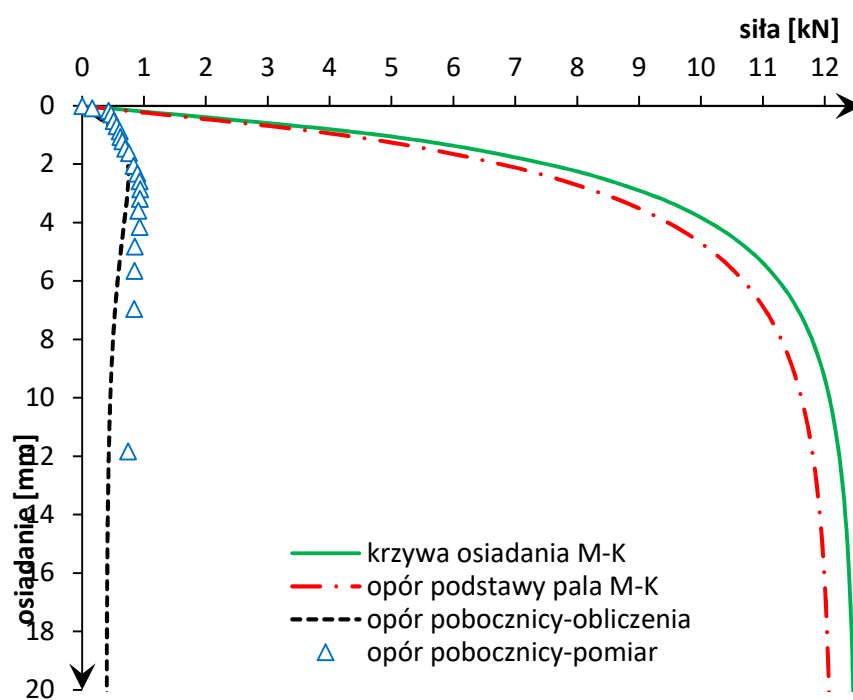
Pal.P.3. Obliczony i pomierzony rozkład oporów w funkcji osiadania pała.



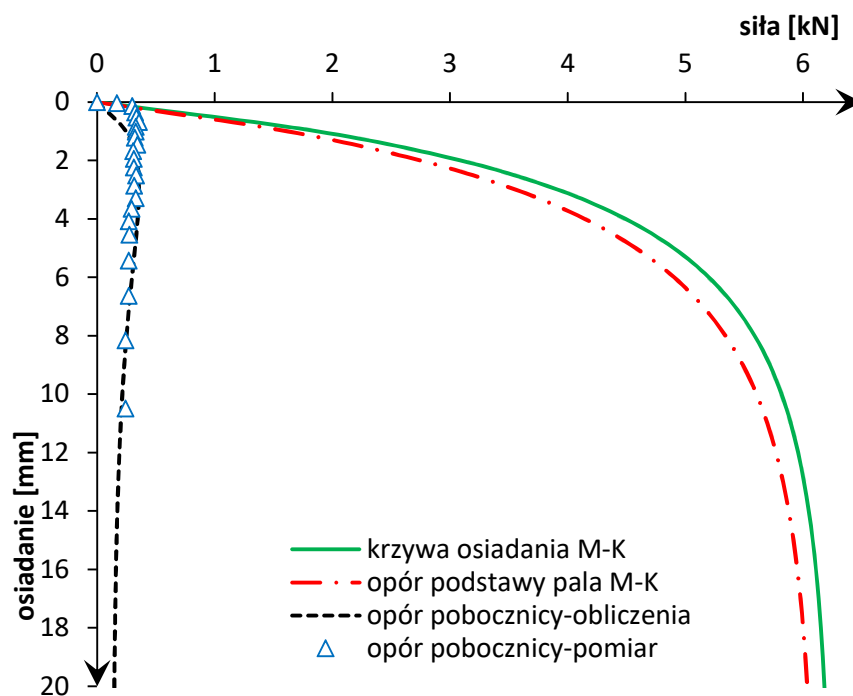
Pal.P.4. Obliczony i pomierzony rozkład oporów w funkcji osiadania pała.



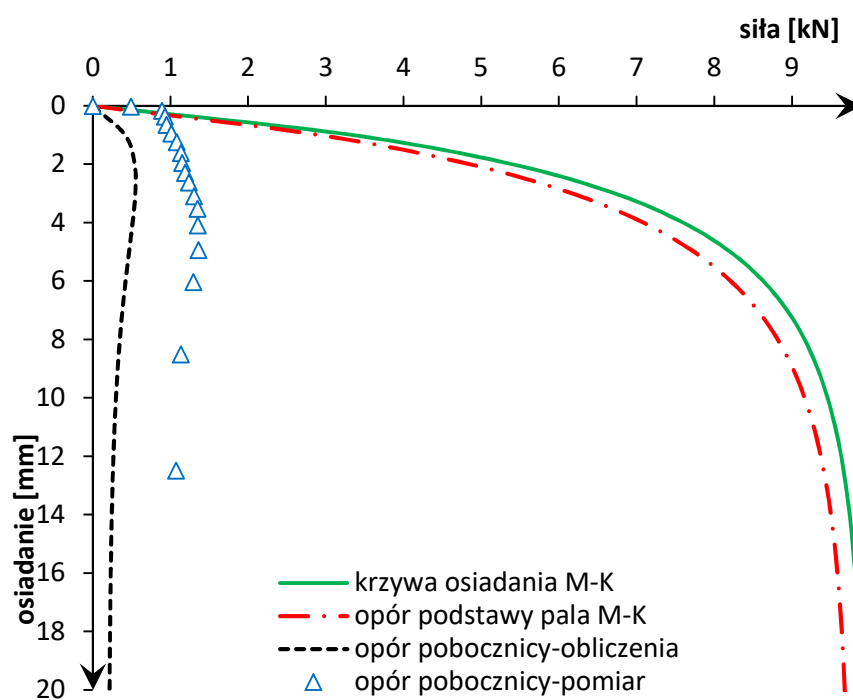
Pal.P.5. Obliczony i pomierzony rozkład oporów w funkcji osiadania pała.



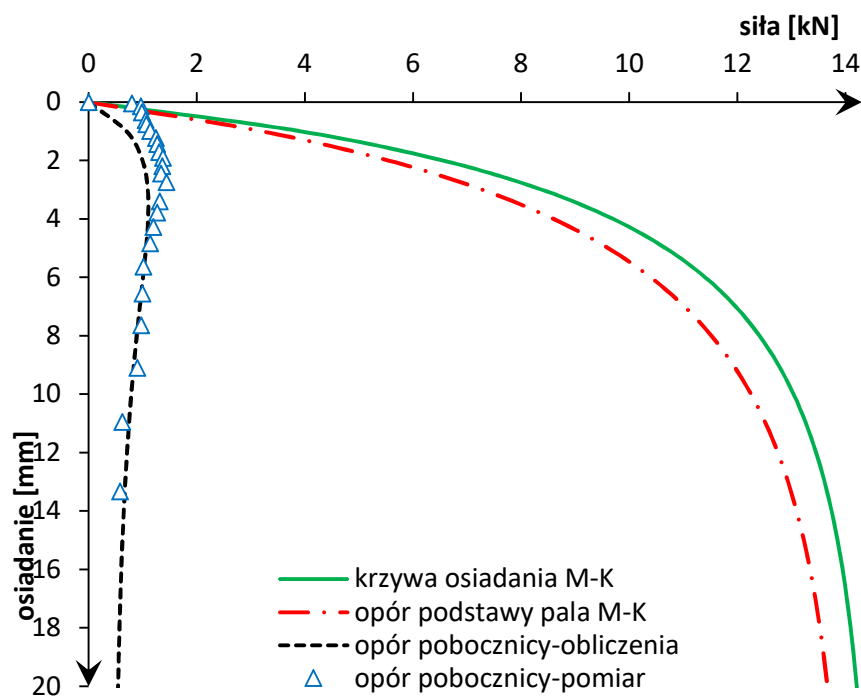
Pal.P.6. Obliczony i pomierzony rozkład oporów w funkcji osiadania pała.



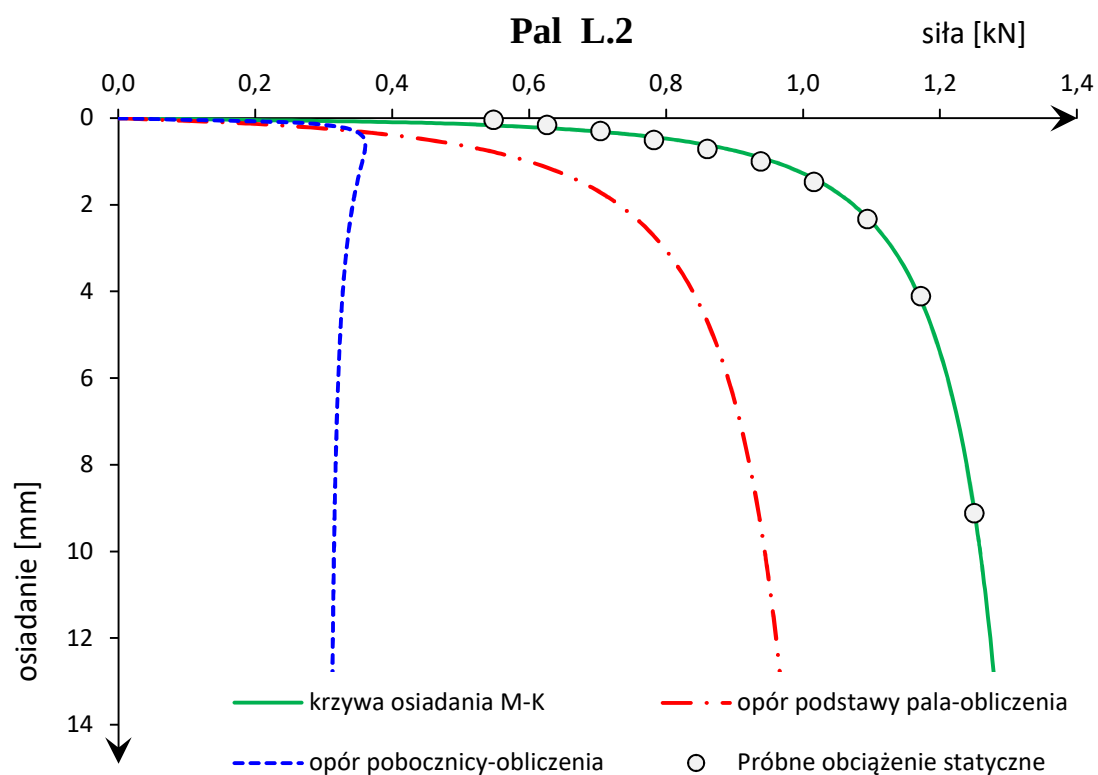
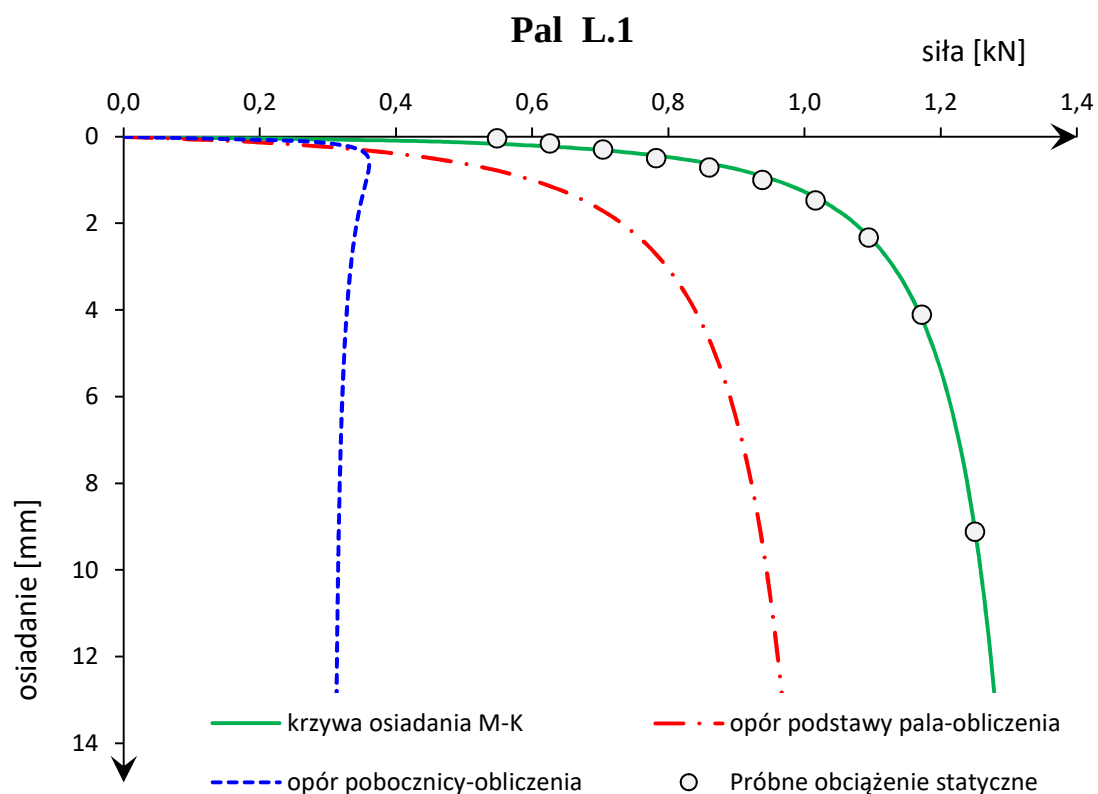
Pal.P.7. Obliczony i pomierzony rozkład oporów w funkcji osiadania pala.

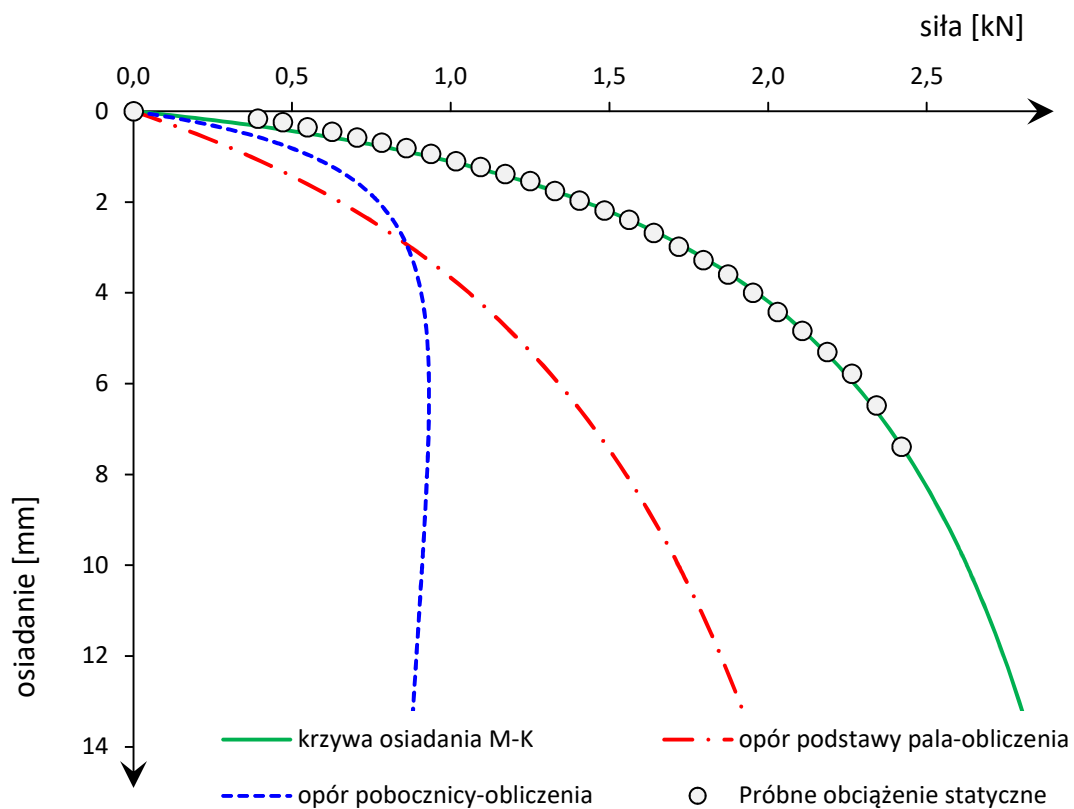
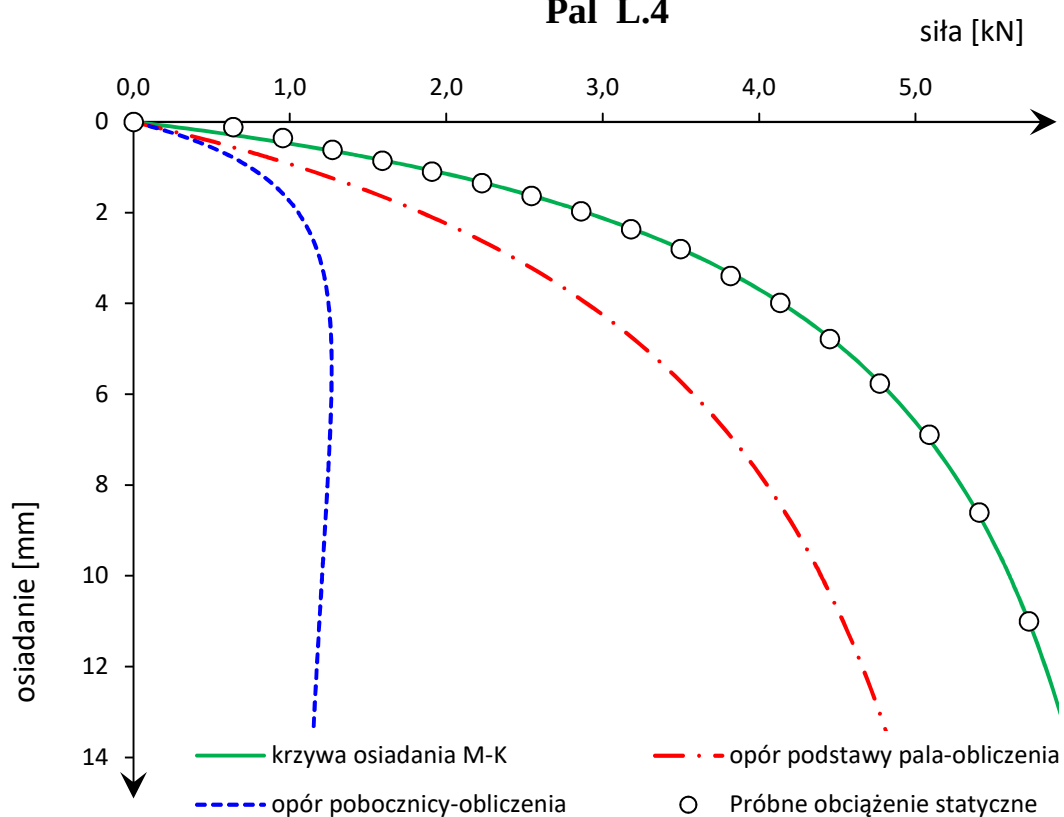


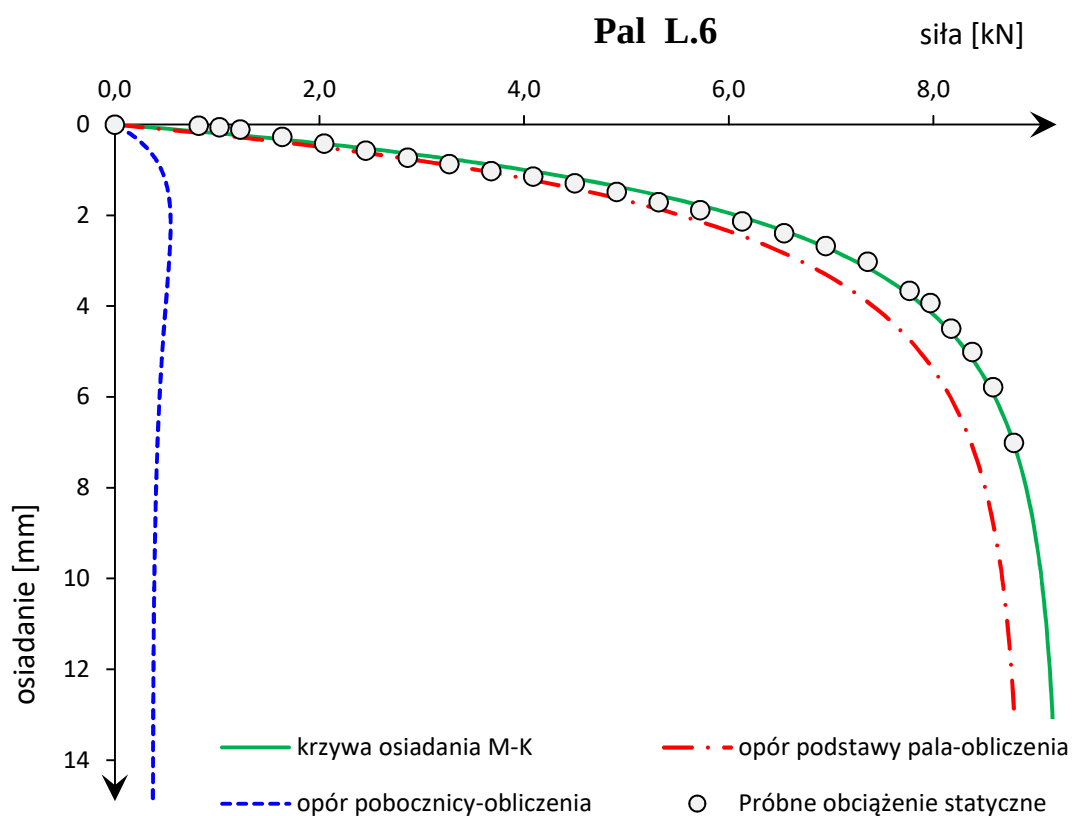
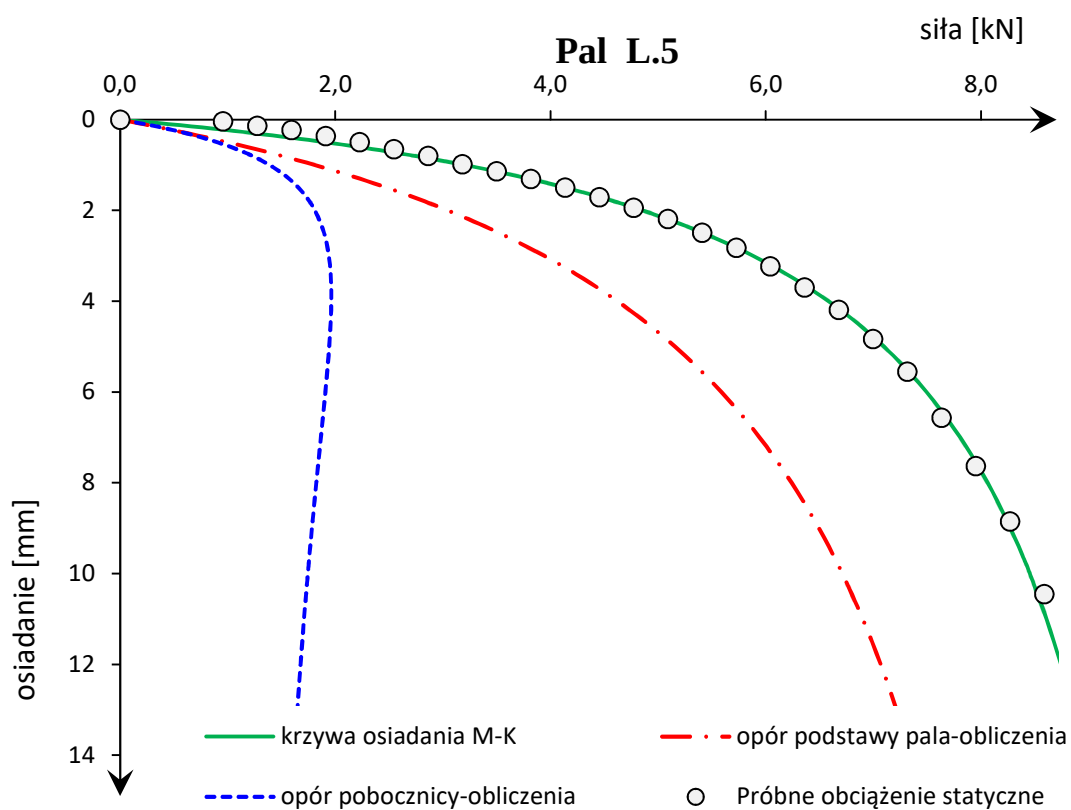
Pal.P.8. Obliczony i pomierzony rozkład oporów w funkcji osiadania pala.

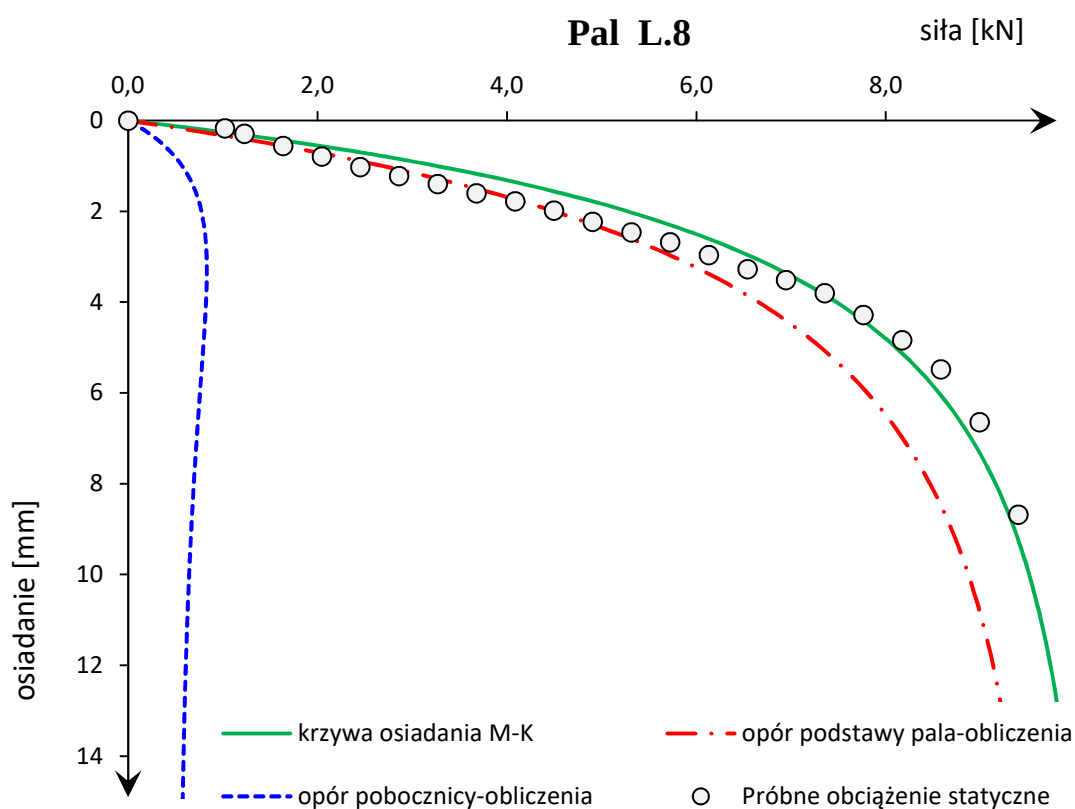
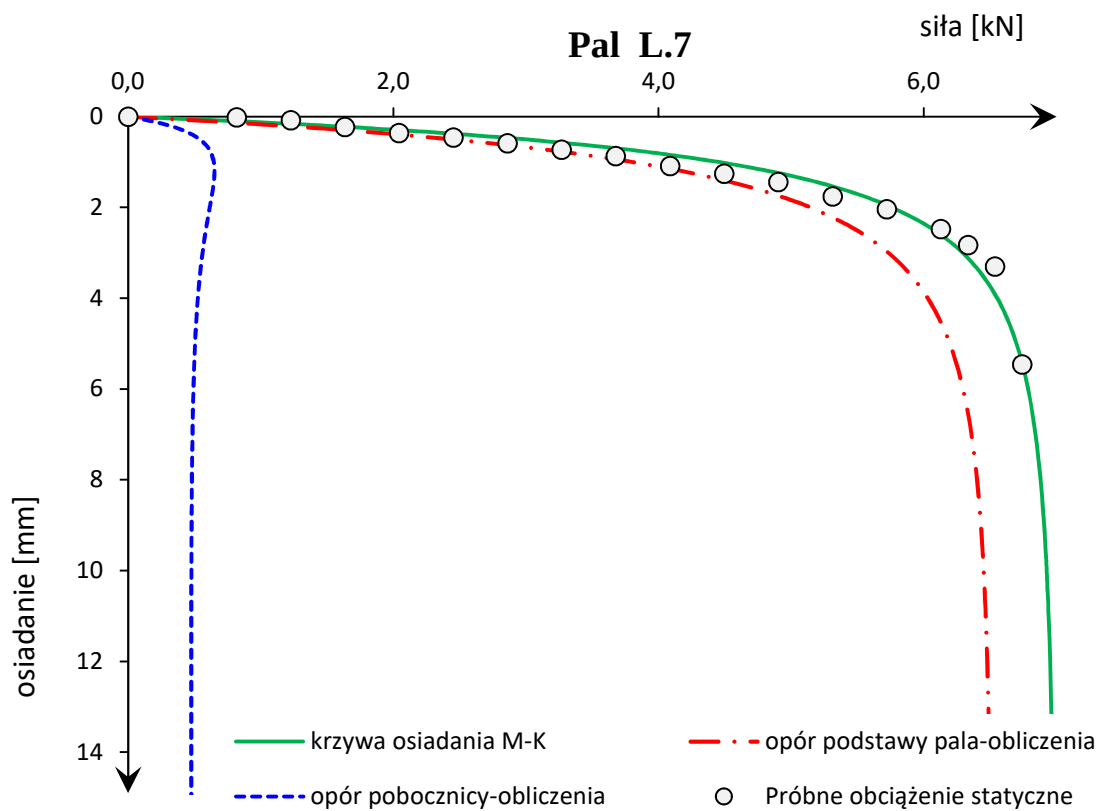


Załącznik G. Obliczony rozkład oporów próbnych obciążeń statycznych pali w warunkach laboratoryjnych. Standardowe próbne obciążenia pali. Pomiary z drugiej części badań.

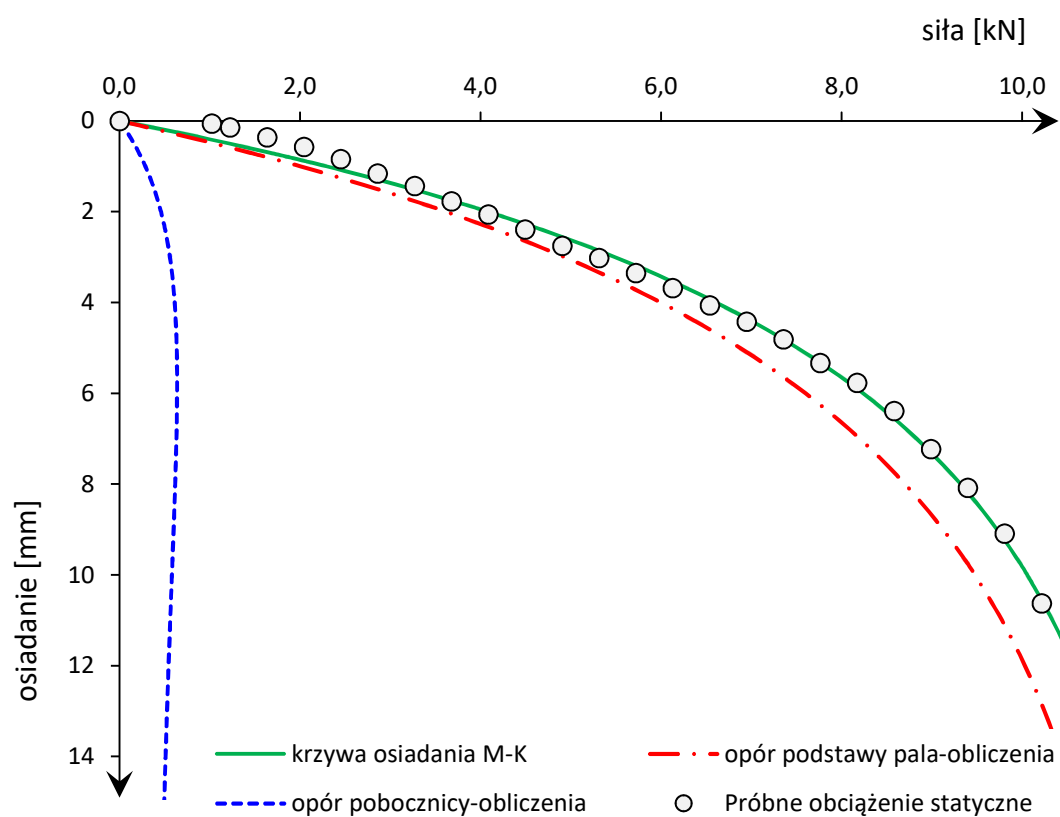


Pal L.3**Pal L.4**

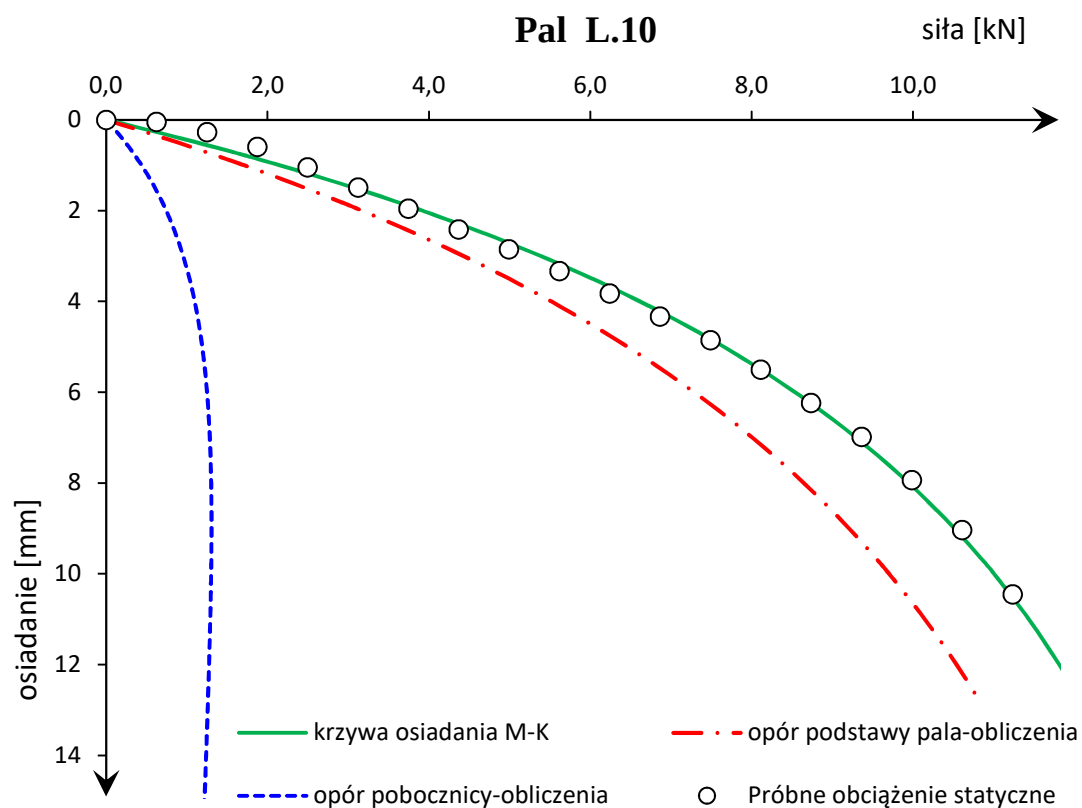


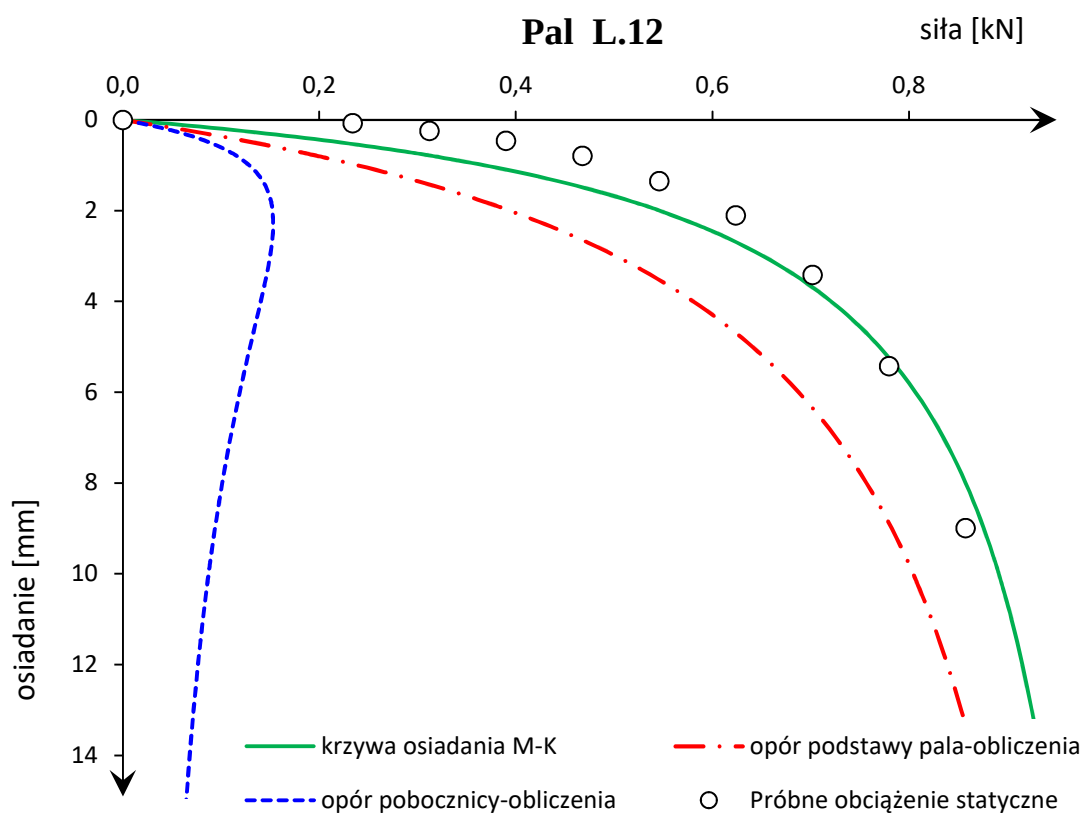
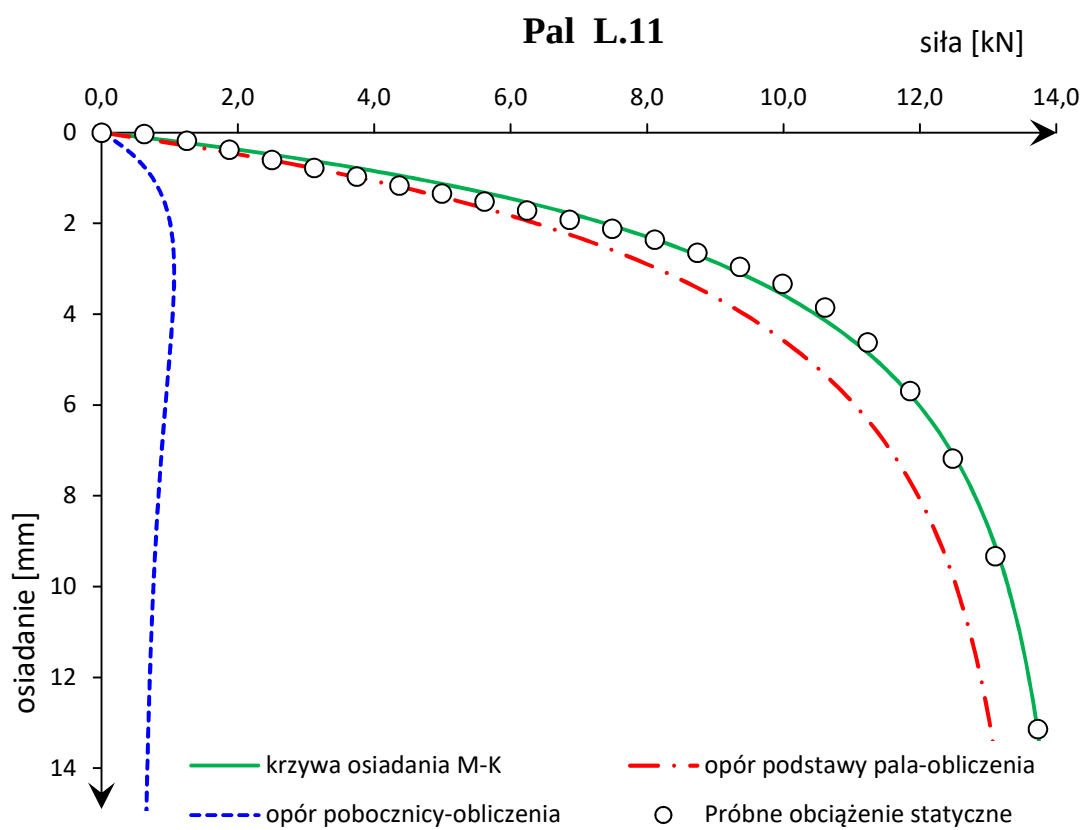


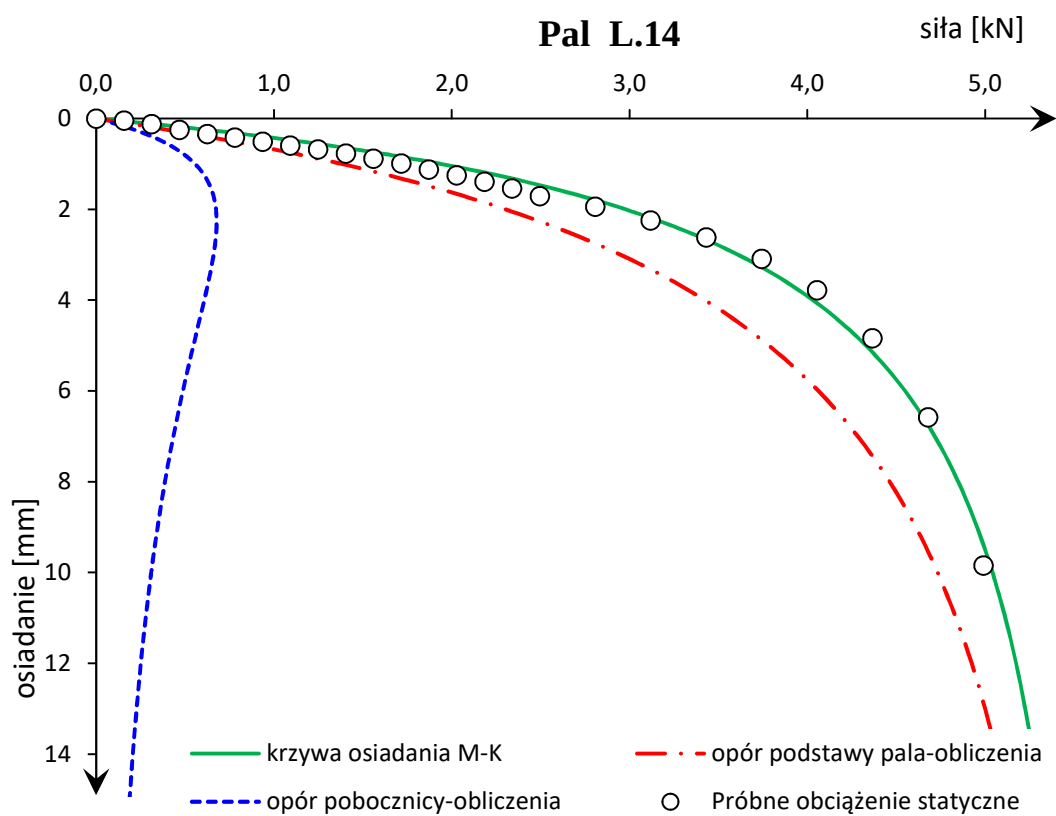
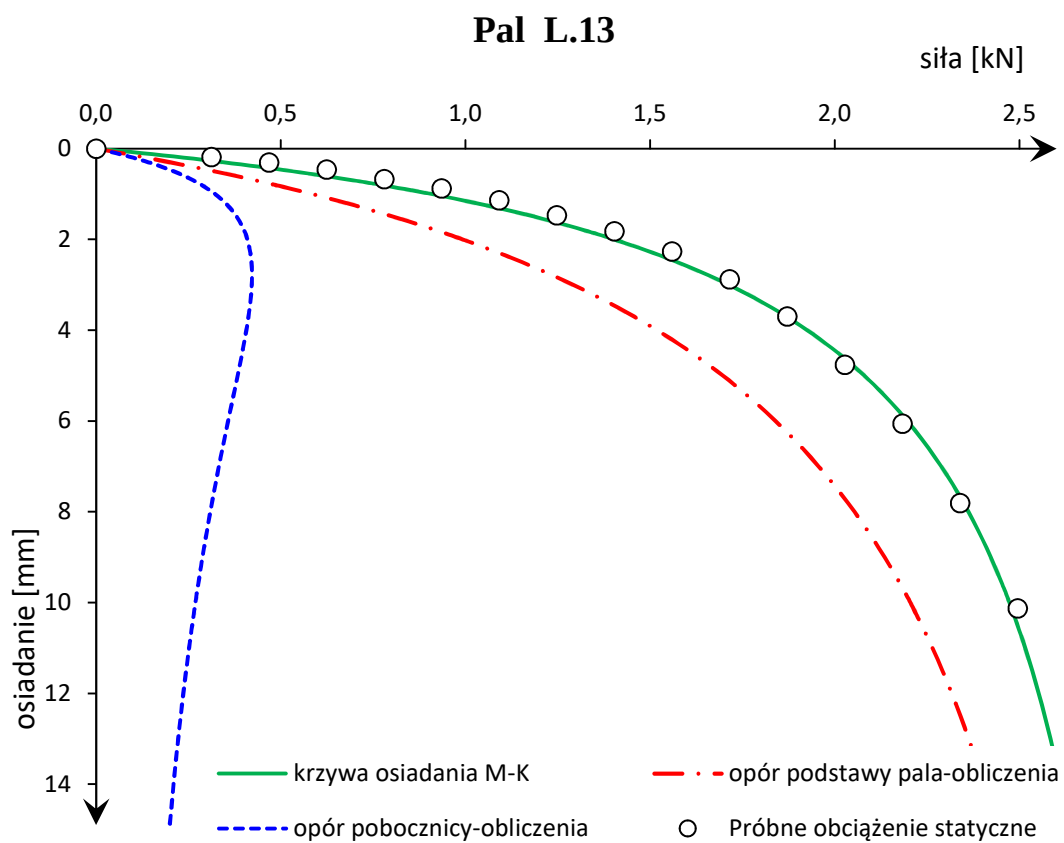
Pal L.9



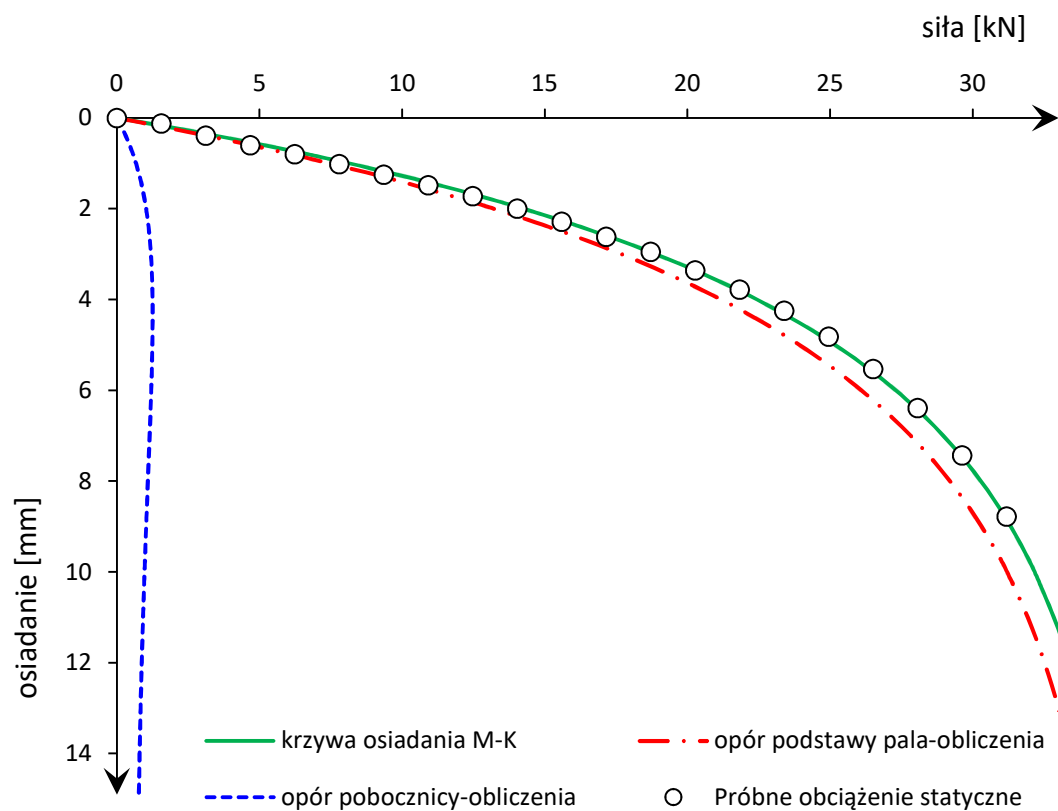
Pal L.10



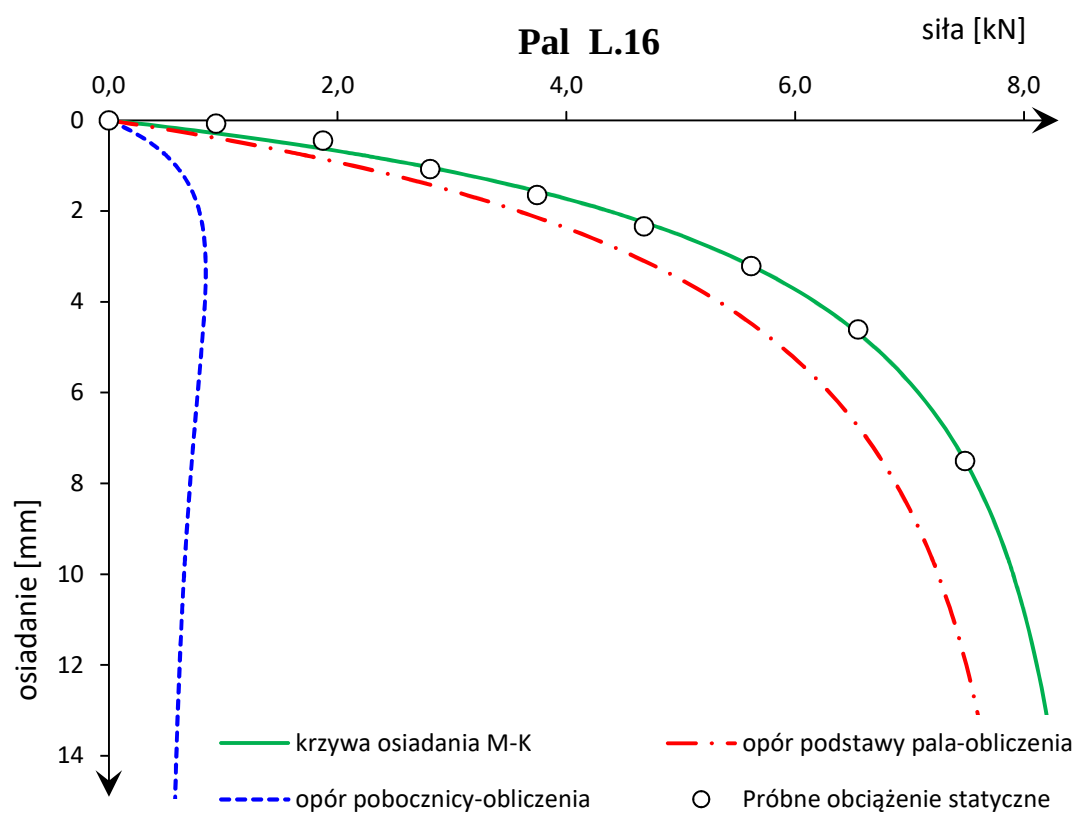


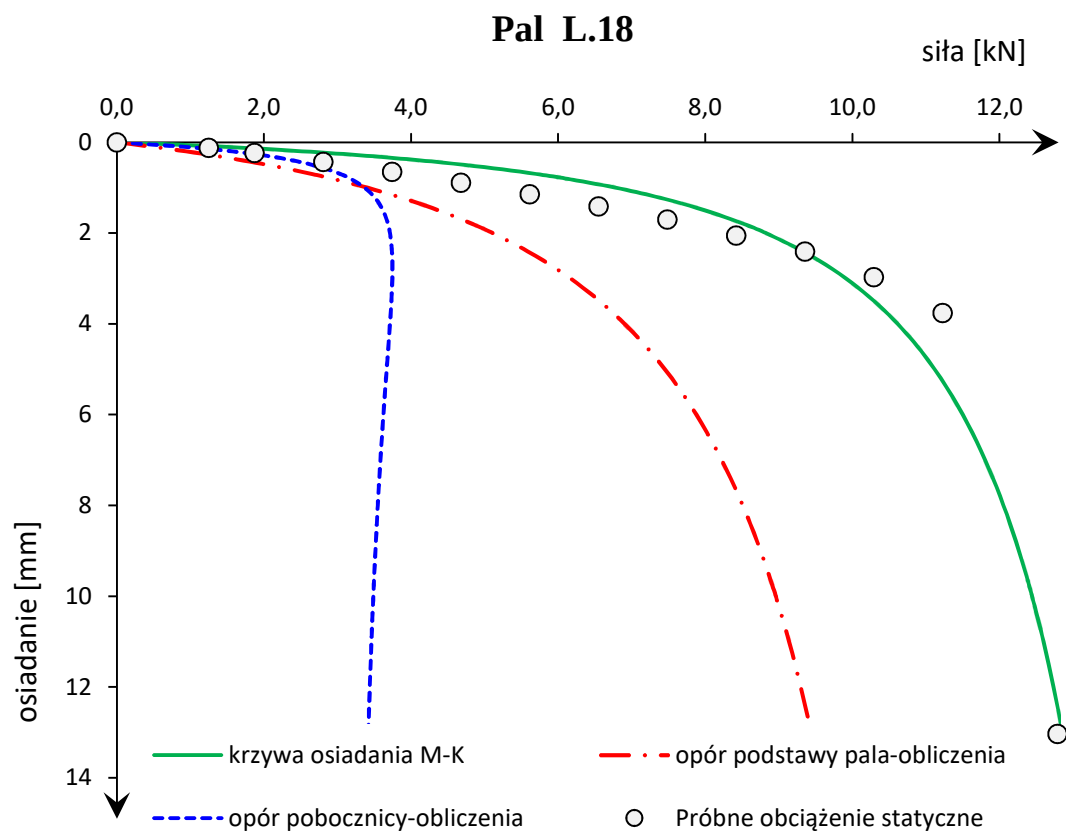
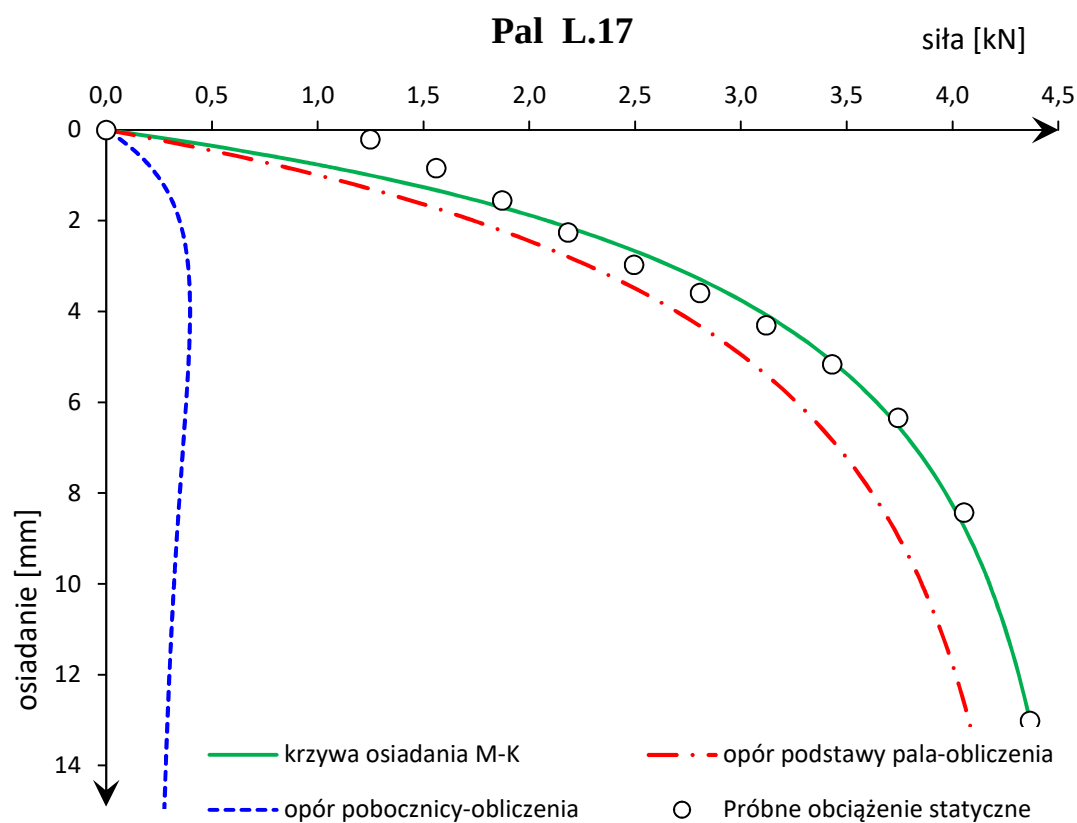


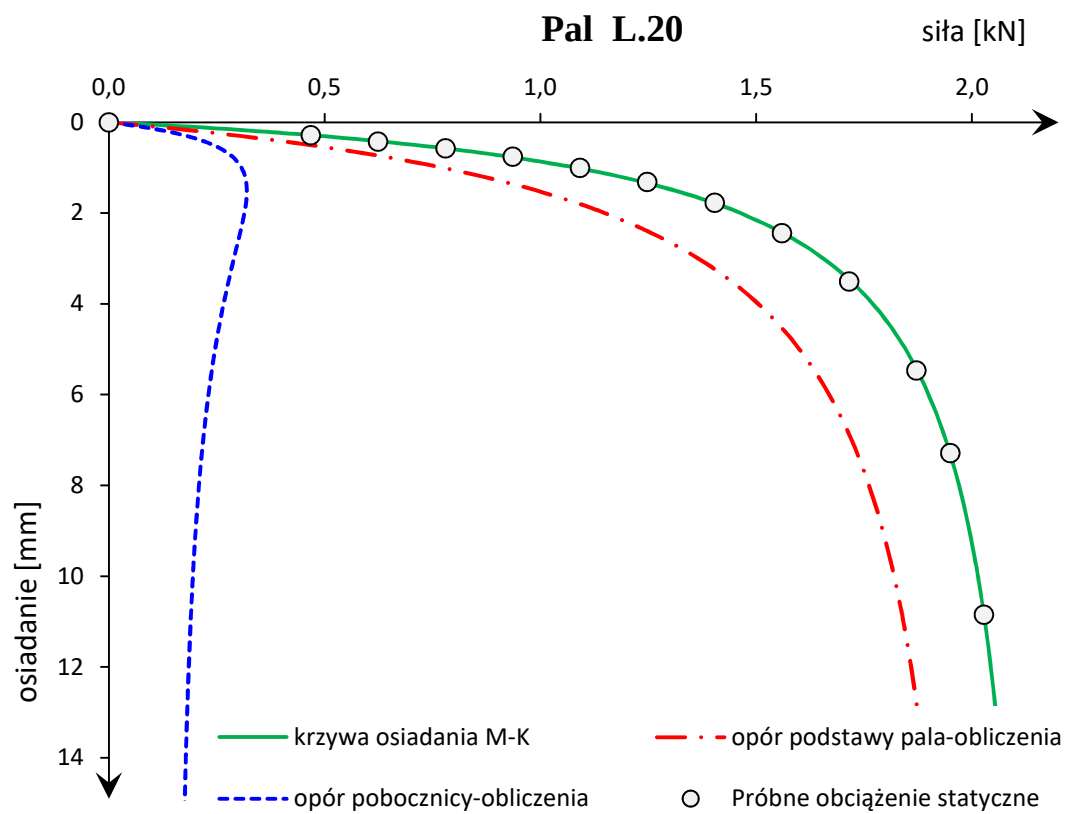
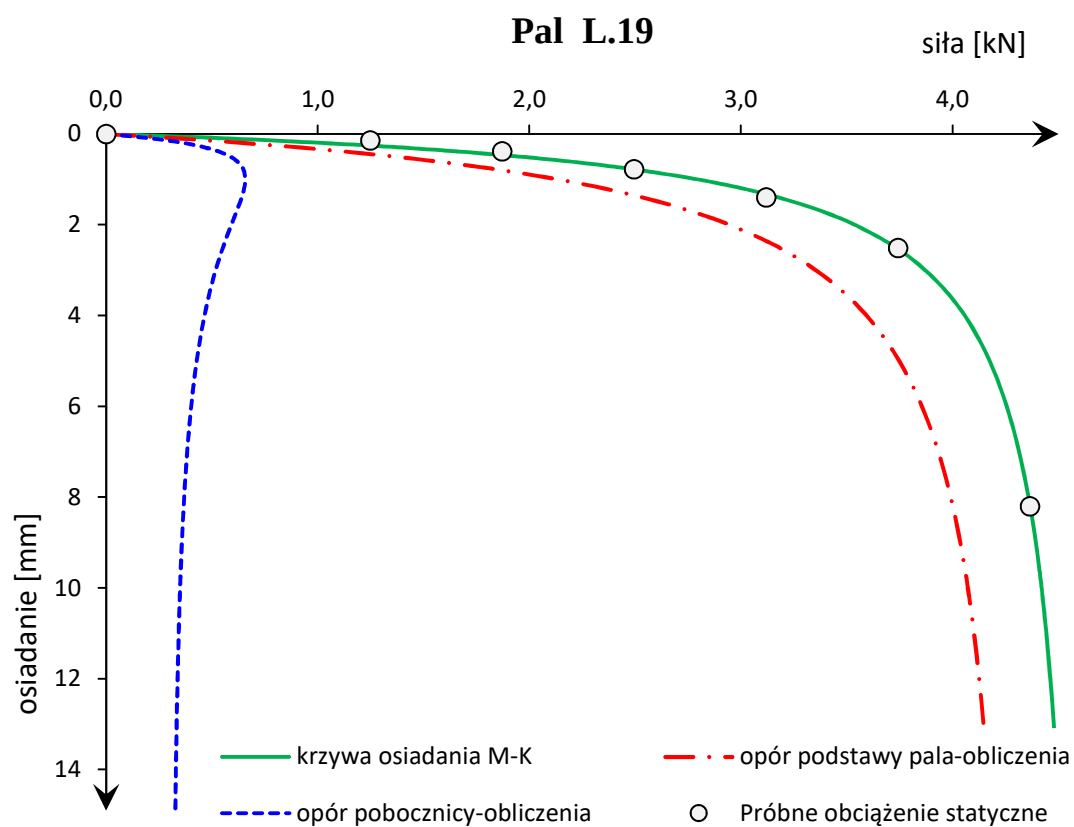
Pal L.15



Pal L.16







Załącznik H. Wyniki próbnych obciążeń statycznych pali w warunkach terenowych z pomiarem oporu poboczniczy lub oporu podstawy pala. Dane z literatury.

Pal T1 [62]

N_{2i}	[kN]	0,0	180,0	240,0	330,0	420,0	520,0	580,0	660,0	755,0	830,0	900,0	1000,0	1080,0
S_i	[mm]	0,00	0,50	0,90	1,60	2,20	3,40	4,00	5,00	6,10	7,70	9,10	11,60	13,60
N_{1i}	[kN]	0,0	10,0	25,0	50,0	70,0	90,0	110,0	130,0	155,0	180,0	200,0	220,0	235,0
S_i	[mm]	0,00	0,42	0,65	1,11	1,55	2,19	3,03	3,92	5,08	6,48	8,42	9,96	11,49

Pal T2 [62]

N _{2i} [kN]		0,0	102,2	204,0	306,0	408,0	509,0	611,0	713,0	815,0	917,0	1019,0
S _i [mm]		0,00	0,22	0,49	0,93	1,60	2,61	3,85	5,19	6,75	8,57	10,66
N _{1i} [kN]		0,00	24,96	39,58	54,58							
S _i [mm]		0,00	1,60	3,85	6,75							

Pal LL3 [25]

N_{2i}	[kN]	0,00	2,32	5,58	9,07	12,55	16,05	19,07	21,49	23,49	25,35
S_i	[mm]	0,00	0,17	0,34	1,03	2,06	3,43	6,00	9,86	17,57	27,00
N_{1i}	[kN]	0,00	0,47	1,63	3,26	5,02	6,47	8,14	9,77	11,40	12,93
S_i	[mm]	0,00	0,17	0,34	1,03	2,06	3,43	6,00	9,86	17,57	27,00

Pal T4 [27]

N_{2i}	[kN]	0,0	235,0	325,0	420,0	490,0	565,0
S_i	[mm]	0,00	2,00	3,50	6,00	9,00	13,00
N_{1i}	[kN]	0,0	50,0	80,0	115,0	155,0	210,0
S_i	[mm]	0,00	2,00	3,50	6,00	9,00	13,00

Pal LL5 [25]

N_{2i}	[kN]	0,00	2,20	5,35	8,40	10,50	11,90	13,80
S_i	[mm]	0,00	0,10	0,50	2,50	5,00	9,50	16,50
N_{1i}	[kN]	0,00	0,93	2,32	3,95	4,88	6,05	7,53
S_i	[mm]	0,00	0,10	0,50	2,50	5,00	9,50	16,50

Pal T6 [25]

N_{2i}	[kN]	0,00	243,24	317,56	398,64	472,97	547,30	648,65	729,73	837,84	918,92	972,97
S_i	[mm]	0,00	1,22	1,84	2,65	3,88	5,42	7,76	9,80	11,84	14,08	16,33

N_{1i}	[kN]	0,00	74,32	108,11	135,14	159,46	189,19	237,84	258,11	290,54	304,05	324,32
S_i	[mm]	0,00	1,22	1,84	2,65	3,88	5,42	7,76	9,80	11,84	14,08	16,33

Pal T7 [16]

N_{2i}	[kN]	0	318	592	885	1150	1422	1697	1977	2242	2509	2791	3025	3232	3462	3663
S_i	[mm]	0,00	0,24	0,49	0,76	1,04	1,39	1,72	2,10	2,49	2,91	3,42	3,92	4,36	4,91	5,53

N_{1i}	[kN]	0,0	28,4	51,4	77,4	100,6	124,7	147,6	173,8	197,3	221,5	245,3	266,8	284,9	305,0	322,5
S_i	[mm]	0,00	0,24	0,49	0,76	1,04	1,39	1,72	2,10	2,49	2,91	3,42	3,92	4,36	4,91	5,53

Pal T8 [24]

N_{2i}	[kN]	0	2800	4800	6100	7300	8000	8500	9200	9800	10500	11000
S_i	[mm]	0,00	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	10,00	12,00

N_{1i}	[kN]	0	300	675	954	1115	1250	1360	1450	1520
S_i	[mm]	0,00	0,30	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00

Pal T9 [17]

N_{2i}	[kN]	0	150	300	450	600	750	850	950	1050	1150	1250	1350	1450
S_i	[mm]	0,00	0,10	0,30	0,70	1,20	2,10	3,00	4,10	5,50	6,80	8,00	9,60	11,10

N_{1i}	[kN]	0	10	40	100	220	340	400	450	510	550	570	605	630
S_i	[mm]	0,00	0,10	0,30	0,70	1,20	2,10	3,00	4,10	5,50	6,80	8,00	9,60	11,10

Pal T10 [17]

N_{2i}	[kN]	0	125	250	375	500	625	750	875	1000	1125
S_i	[mm]	0,00	0,50	0,90	2,10	4,40	6,50	8,80	11,30	15,10	19,60

N_{1i}	[kN]	0	50	80	160	240	310	350	405	490	560
S_i	[mm]	0,00	0,50	0,90	2,10	4,40	6,50	8,80	11,30	15,10	19,60

Pal T11 [24]

N_{2i}	[kN]	0	1109	2215	3330	4463	5561	6670	7380	8267	9143	10000	11173
S_i	[mm]	0,00	0,45	0,85	1,74	2,51	3,59	5,12	7,00	9,85	13,74	19,38	31,84

N_{1i}	[kN]	0	399	721	1101	1573	1958	2290	2486	2706	2939	3223	3635
S_i	[mm]	0,00	0,45	0,85	1,74	2,51	3,59	5,12	7,00	9,85	13,74	19,38	31,84

Pal T12 [30]

N_{2i}	[kN]	0,0	388,9	583,8	781,1	975,1	1173,4	1268,5	1319,7	1370,2	1416,5	1465,7	1563,8	1661,3
S_i	[mm]	0,00	1,45	5,37	12,43	22,50	36,36	50,64	62,01	71,41	80,99	91,60	119,63	185,72

N_{1i}	[kN]	0,00	95,65	243,51	375,04	498,11
S_i	[mm]	0,00	1,45	12,43	36,36	91,60

Pal T13 [30]

N_{2i}	[kN]	0	587	782	978	1177	1370	1566	1763
S_i	[mm]	0,00	3,00	4,85	7,29	9,30	12,46	21,91	54,33

N_{1i}	[kN]	0,0	150,3	233,9	300,7	364,2	424,4	512,9	588,1
S_i	[mm]	0,00	3,00	4,85	7,29	9,30	12,46	21,91	54,33

Pal T14 [50]

N_{2i}	[kN]	0,0	178,7	354,9	535,4	713,5	891,9	1068,3	1247,3	1424,5	1603,2	1781,0	1959,3	2093,2
S_i	[mm]	0,00	0,60	1,57	3,26	4,80	6,34	8,29	10,27	12,89	16,45	23,77	57,80	114,85

N_{1i}	[kN]	0,0	3,2	46,6	135,0	230,1	337,9	433,3	539,6	656,2	766,6	886,3	948,1	1039,0
S_i	[mm]	0,00	0,60	1,57	3,26	4,80	6,34	8,29	10,27	12,89	16,45	23,77	57,80	114,85

Tabela parametrów aproksymacji M-K

Nr pala	Źródło	H	D	C ₂	N _{gr,2}	κ ₂	C ₁	N _{gr,1}	κ ₁
		[m]	[m]	[mm/kN]	[kN]	[-]	[mm/kN]	[kN]	[-]
T1	[62]	7,00	0,40	0,0042	2240,3	2,201	0,0194	451,0	1,453
T2	[62]	7,00	0,40	0,0035	2185,9	2,373	0,0580	164,0	2,536
LL3	[25]	1,00	0,07	0,0815	31,3	1,820	0,3480	17,7	1,600
T4	[27]	9,60	0,36	0,0061	1030,9	2,127	0,0427	784,4	1,400
LL5	[25]	1,00	0,06	0,1579	18,0	1,630	0,4840	11,5	1,730
T6	[25]	7,10	0,36	0,0063	1974,0	1,810	0,0158	560,0	1,600
T7	[16]	21,90	0,56	0,0008	6850,1	0,709	0,0092	513,6	0,328
T8	[24]	19,70	1,50	0,0003	13901,8	0,664	0,0012	2030,4	0,954
T9	[17]	12,50	0,50	0,0021	2663,2	2,216	0,0034	999,9	2,057
T10	[17]	14,40	0,42	0,0060	2395,1	2,188	0,0146	1390,7	2,272
T11	[24]	19,70	1,50	0,0005	13060,0	0,930	0,0014	4259,0	0,980
T12	[30]	17,50	0,36	0,0133	1917,6	1,067	0,0313	761,8	2,068
T13	[30]	17,50	0,36	0,0037	1842,5	0,520	0,0131	621,3	0,504
T14	[50]	17,40	0,35	0,0026	2283,4	1,318	0,0069	1147,0	1,248

Załącznik I. Obliczony rozkład oporów wybranych próbnych obciążeń statycznych pali rzeczywistych

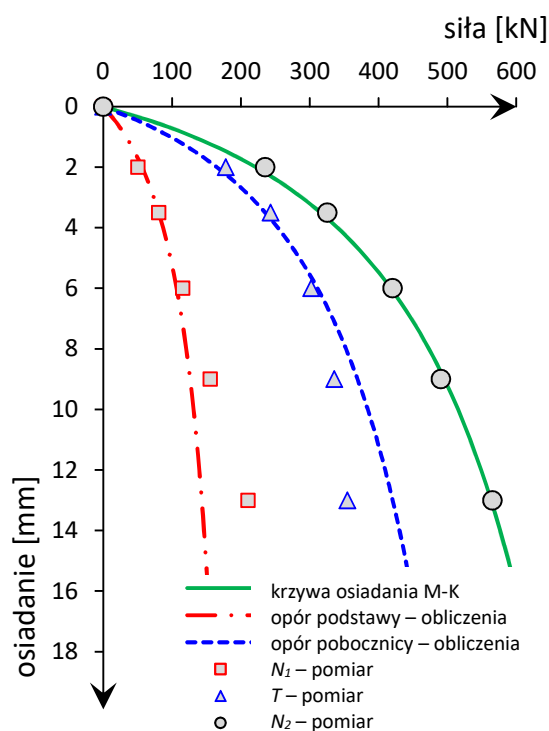
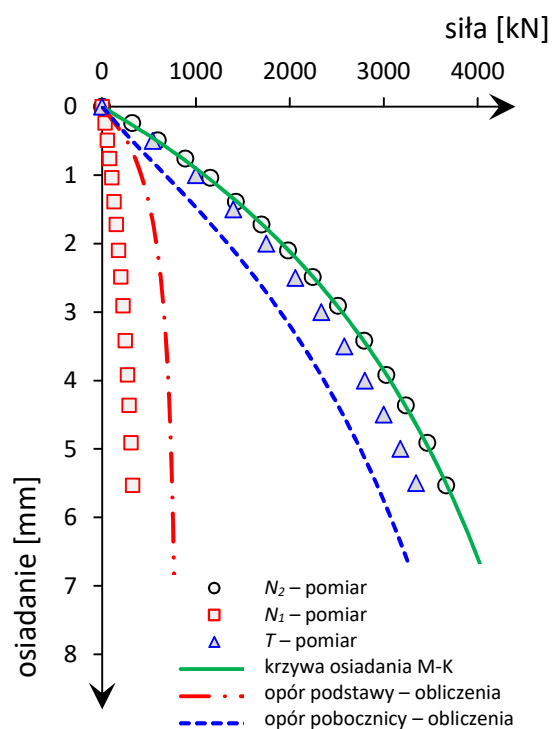
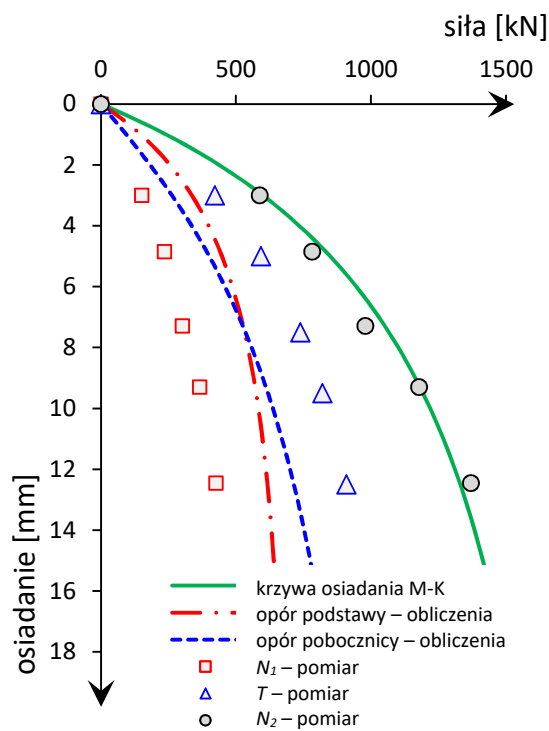
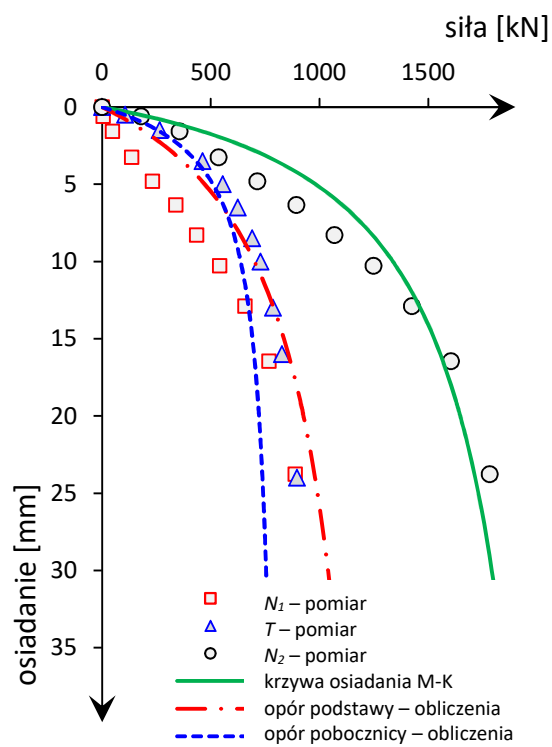
T4**T7****T13****T14**

Tabela danych obliczonych:

				Aproksymacja M-K			Obliczone parametry M-K		
Nr pala	Źródło	H	D	C_2	$N_{gr,2}$	κ_2	C_1	$N_{gr,1}$	κ_1
		[m]	[m]	[mm/ kN]	[kN]	[-]	[mm/ kN]	[kN]	[-]
T1	[62]	7,00	0,40	0,0042	2240,3	2,201	0,0172	751,0	1,822
T2	[62]	7,00	0,40	0,0035	2185,9	2,373	0,0155	206,3	1,964
LL3	[25]	1,00	0,07	0,0815	31,3	1,820	0,2792	10,8	1,506
T4	[27]	9,60	0,36	0,0061	1030,9	2,127	0,0244	240,6	1,760
LL5	[25]	1,00	0,06	0,1579	18,0	1,630	0,4901	8,7	1,349
T6	[25]	7,10	0,36	0,0063	1974,0	1,810	0,0214	1195,0	1,498
T7	[16]	21,90	0,56	0,0008	6850,1	0,709	0,0014	830,2	0,587
T8	[24]	19,70	1,50	0,0003	13901,8	0,664	0,0005	4499,8	0,549
T9	[17]	12,50	0,50	0,0021	2663,2	2,216	0,0086	2624,8	1,834
T10	[17]	14,40	0,42	0,0060	2395,1	2,188	0,0247	1671,2	1,810
T11	[24]	19,70	1,50	0,0005	13060,0	0,930	0,0009	5811,1	0,770
T12	[30]	17,50	0,36	0,0133	1917,6	1,067	0,0298	1252,0	0,883
T13	[30]	17,50	0,36	0,0037	1842,5	0,520	0,0058	721,0	0,430
T14	[50]	17,40	0,35	0,0026	2283,4	1,318	0,0069	1397,3	1,091