



Zachodniopomorski
Uniwersytet Technologiczny
w Szczecinie



Wydział
Budownictwa
i Inżynierii Środowiska

mgr inż. Kamil Stachecki

**ANALIZA MOŻLIWOŚCI KONWERSJI KRZYWEJ PRÓBNEGO
STATYCZNEGO OBCIĄŻENIA PALA PRZY ZMIANIE JEGO GEOMETRII**

**ANALYSIS OF PILE STATIC LOAD TEST CURVE CONVERSION
POSSIBILITIES IN CASE OF CHANGED GEOMETRY**

Rozprawa doktorska

Promotor:

prof. dr hab. inż. Zygmunt Meyer

Szczecin, 2021r.

SPIS TREŚCI

STRESZCZENIE	5
ABSTRACT	6
OZNACZENIA I JEDNOSTKI	7
1. WSTĘP.....	10
1.1 Wprowadzenie	10
1.2 Uzasadnienie podjęcia badań.....	11
2. TEZA, CEL I ZAKRES PRACY	14
2.1 Teza pracy.....	14
2.2 Cel i zakres pracy	14
3. PRZEGLĄD LITERATURY	15
3.1 Analiza literatury dotyczącej współpracy pala z podłożem gruntowym.....	15
3.2 Podsumowanie.....	32
4. ANALIZA ZJAWISKA	34
4.1 Analiza współpracy pala z gruntem dla małych obciążeń.....	34
4.2 Metoda konwersji opierająca się na liniowej teorii sprężystości	42
5. WERYFIKACJA PARAMETRÓW KRZYWEJ M-K.....	47
5.1 Testy statyczne w pełnym zakresie obciążenia	47
5.2 Aproksymacja w przypadku trzech parametrów poddanych optymalizacji	51
5.3 Aproksymacja metodą jednego równania.....	63
5.4 Aproksymacja metodą dwóch równań	66
5.5 Wybór sposobu estymacji.....	68
6. RÓWNANIE OPISUJĄCE NOŚNOŚĆ GRANICZNĄ PALA	70
6.1 Analiza statystyczna	70
7. WPŁYW ROZKŁADU NAPRĘŻEŃ POD PODSTAWĄ PALA NA OSIADANIE.....	79
7.1 Analiza zjawiska.....	79
7.2 Podsumowanie.....	84
8. METODA KONWERSJI DLA PEŁNEGO ZAKRESU OBCIĄŻENIA	86
8.1 Opis metody.....	86
8.2 Przykład obliczeń	89
8.3 Analiza wyników	92
9. PRAKTYCZNE ZASTOSOWANIE	98
9.1 Praktyczne przykłady konwersji.....	98
9.2 Analiza wartości współczynnika bezpieczeństwa	101

10.	WNIOSKI I PROGRAM DALSZYCH BADAŃ	106
11.	ZAŁĄCZNIKI.....	110
	Załącznik A. Wyniki testów statycznych	110
	Załącznik B. Aproksymacja metodami I-III dla całego zbioru wartości	117
	Załącznik C. Aproksymacja metodami I-III dla różnych części zbioru wartości	128
	Załącznik D. Aproksymacja parametrów M-K zmodyfikowaną metodą I	137
	Załącznik E. Aproksymacja metodą jednego równania	141
	Załącznik F. Aproksymacja metodą dwóch równań.	151
	Załącznik G. Funkcje $\beta(n)$ dla poszczególnych pali	161
	Załącznik H. Funkcje $\beta(n)$ po relaksacji statystycznej.....	167
	Załącznik I. Rekomendowana metoda wyznaczania parametrów M-K.....	174
	SPIS RYSUNKÓW	181
	SPIS TABEL	185
	BIBLIOGRAFIA.....	188

STRESZCZENIE

W rozprawie przedstawiono analizę związków między parametrami opisującymi krzywą osiadania pala, a jego długością i średnicą. Określone na tej podstawie związki posłużyły do sformułowania metody konwersji krzywej próbnego statycznego obciążenia pala w przypadku zmiany jego geometrii. Badania opierają się na wykorzystaniu wyników próbnego obciążenia statycznego siedmiu pali, wykonanych w warunkach terenowych. Testy statyczne analizowanych pali przeprowadzone były w pełnym zakresie obciążenia. Umożliwiło to wykorzystanie pomierzonej wartości nośności granicznej pala. Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury w rozdziale 3 stwierdzono, że dalsza część pracy opierać się będzie na metodzie Meyera-Kowalowa (metoda M-K), umożliwiającej uzyskanie z dużą dokładnością ciągłej krzywej opisującej zależność między obciążeniem i osiadaniami pala, zarówno w zakresie liniowym, jak i nieliniowym. W rozdziale 4 przedstawiono analizę zjawiska osiadania pala na podstawie liniowej teorii sprężystości. Następnie przedstawiono założenia oraz sformułowano model matematyczny, który pozwala na konwersję krzywej osiadania pala w oparciu o liniową teorię sprężystości. W praktyce obciążenia wykraczają poza zakres liniowej zależności obciążenie-osiadanie, dlatego metoda konwersji przedstawiona w rozdziale 4 ma ograniczony zakres stosowania. Następnie w rozdziale 5 przeprowadzono analizę sposobów wyznaczania parametrów krzywej M-K, sformułowano rekomendowany do konwersji sposób estymacji. Wykorzystanie wyników testów statycznych pali wykonanych w pełnym zakresie obciążenia umożliwiło przeprowadzenie analizy statystycznej przedstawionej w rozdziale 6. W rezultacie sformułowano zależność empiryczną między nośnością graniczną pala, jego parametrami geometrycznymi oraz oporem gruntu w poziomie podstawy. W dalszej części pracy na podstawie analizy dotyczącej wpływu rozkładu naprężeń z uwzględnieniem różnych powierzchni dopasowania podstawy pala, opisanej w rozdziale 7, sformułowano w rozdziale 8 ostateczną metodę konwersji dla pełnego zakresu obciążenia. Proponowana metoda pozwala na konwersję krzywej osiadania pala w przypadku zmiany długości oraz średnicy pala, przy założeniu, że warunki gruntowe pozostają bez zmian. Na jej podstawie wykonano przykłady obliczeniowe, w których określono zmianę przebiegu zarówno krzywej osiadania pala, jak i krzywej oporu podstawy oraz poboczniczy dla różnych długości i średnic. W rozdziale 9 przedstawiono praktyczny przykład wykorzystania konwersji, wraz z weryfikacją. W rozdziale 10 podsumowano przeprowadzone badania, przedstawiono wnioski oraz sformułowano program dalszych badań.

ABSTRACT

The dissertation presents an analysis of relation between parameters describing pile settlement curve and its length and diameter. The equations determined on this basis were used to formulate the method of static load test curve conversion in case of changed geometry. Research was based upon the results of a static load test of seven piles performed in field conditions. The static tests of analyzed piles were carried out in the full load range, which made it possible to use the measured values of pile bearing capacity. Based on the literature analysis carried out in Chapter 3, it was determined that the rest of the work will be based on the Meyer-Kowalow method (M-K method), which allows to obtain a continuous curve describing with high accuracy the relation between pile load and settlement, both in linear and non-linear range. Chapter 4 presents an analysis of the pile settlement phenomenon based on the linear elasticity theory. Then, the assumptions were presented, and equations were formulated that allow for static load test curve conversion based on the linear theory of elasticity. Due to the fact that in practice, most often we deal with loads exceeding the range of the linear load-settlement relation, the conversion method presented in Chapter 4 has a limited scope of application. Then, in Chapter 5, an analysis of methods of determining the parameters of the M-K curve was carried out. This allows for formulating the estimation method recommended for curve conversion. The use of pile static load tests results conducted in the full load range made it possible to carry out the statistical analysis presented in Chapter 6, as a result of which an empirical relationship was formulated between the pile bearing capacity, its geometric parameters and resistance at the level of its base. In further part of the work, based on the analysis of the influence of stress distribution taking into account different pile base adapt surfaces, described in Chapter 7, the final conversion method for the full load range was formulated in Chapter 8. The proposed method allows for the conversion of the pile settlement curve in the case of changes in the length and diameter, assuming that the soil conditions remain unchanged. On this basis calculation examples were conducted, in which the change in the course of both the pile settlement curve as well as curves describing base and skin resistance was determined for different lengths and diameters. Chapter 9 presents an example of practical use of proposed method of conversion, along with verification. Chapter 10 summarizes carried out research, presents conclusions and formulates program of further research.

OZNACZENIA I JEDNOSTKI

Litery łacińskie

A_1	- parametr funkcji s - N wg China-Kondnera	[1/kN]
A_2	- parametr funkcji s - N wg Decourt	[1/kN]
A_3	- parametr funkcji s - N wg Brinch-Hansena	[1/kN]
A_p	- pole powierzchni strefy aktywnej pod podstawą pała	[m ²]
a_e	- parametr krzywej oporu podstawy wg Hirayamy	[mm/kN]
a_f	- parametr krzywej oporu poboczniczy wg Hirayamy	[mm/kN]
B_1	- stała funkcji s - N wg China-Kondnera	[mm/kN]
B_2	- stała funkcji s - N wg Decourt	[mm/kN]
B_3	- stała funkcji s - N wg Brinch-Hansena	[mm/kN]
b_e	- parametr krzywej oporu podstawy wg Hirayamy	[1/kN]
b_f	- parametr krzywej oporu poboczniczy wg Hirayamy	[1/kN]
C, C_1, C_2	- odwrotność zagregowanej stałej Winklera	[mm/kN]
C_0	- podatność początkowa pała	[mm/kN]
C_2	- aproksymowana wartość C_2	[mm/kN]
D	- średnica pała	[m]
D_p	- zasięg strefy aktywnej pod podstawą pała	[m]
E_p	- moduł sprężystości strefy aktywnej pod podstawą pała	[MPa]
E_q	- moduł sprężystości gruntu pod podstawą pała	[MPa]
E_t	- moduł sprężystości gruntu na poboczniczy pała	[MPa]
$F_{c;d}$	- obliczeniowe obciążenie pała	[kN]
G	- moduł Kirchoffa	[MPa]
H	- długość pała zagłębionego w gruncie	[m]
H_n	- zagłębienie pała w gruncie nośnym	[m]
k_p	- sztywność pała	[mm/kN]
k_{p0}	- sztywność początkowa pała	[mm/kN]
L	- ramię działania naprężeń τ	[m]
n	- zależność między oporem podstawy i poboczniczy	[-]
Q	- skierowana w dół siła, która wywołuje naprężenia σ_z	[kN]
q_c	- opór sondy CPTU wzdłuż poboczniczy	[MPa]
q_b	- opór pod podstawą pała	[MPa]

r	- promień pala	[m]
$R_{b;k}$	- charakterystyczny opór podstawy pala	[kN]
$R_{c;d}$	- nośność obliczeniowa pala	[kN]
$R_{c;k}$	- nośność charakterystyczna pala	[kN]
$(R_{c,m})_{mean}$	- średnia wartość nośności pala	[kN]
$(R_{c,m})_{min}$	- najniższa wartość nośności pala	[kN]
R_{fp}	- współczynnik funkcji sztywności pala wg Poulos'a	[-]
$R_{s;k}$	- charakterystyczny opór poboczniczy pala	[kN]
s	- osiadanie pala	[mm]
s_i	- osiadanie pala od obciążenia N_i	[mm]
s_∞	- osiadanie gruntu dla $t \rightarrow \infty$	[mm]
s^*	- osiadanie odpowiadające T_{max}	[mm]
s_g	- graniczne osiadanie pala	[mm]
s_f	- graniczne osiadanie podstawy pala	[mm]
s_r	- rezydualna wartość osiadania s^*	[mm]
s_{calc}	- osiadanie obliczone	[mm]
$s_{calc,opt}$	- osiadanie obliczone rekomendowaną metodą	[mm]
s_{dop}	- osiadanie dopuszczalne pala	[mm]
s_{pom}	- osiadanie pomierzone	[mm]
SF	- współczynnik bezpieczeństwa	[-]
T	- opór poboczniczy pala	[kN]
$T(s)$	- krzywa oporu poboczniczy pala	[kN]
T_r	- rezydualna wartość oporu poboczniczy T_{max}	[kN]
T_{max}	- maksymalny opór poboczniczy	[kN]
N, N_2	- obciążenie w głowicy pala	[kN]
N_1	- siła w podstawie pala	[kN]
N_i	- obciążenia pala w i -tym przyroście obciążenia	[kN]
$N_1(s)$	- krzywa oporu podstawy pala	[kN]
$N_2(s); Q - s$	- krzywa obciążenia pala	[kN]
N_{dop}	- obciążenie dopuszczalne pala	[kN]
N_{gr1}	- graniczny opór podstawy pala	[kN]
N_{gr2}	- nośność graniczna pala	[kN]

$N_{gr2,pom}$	- pomierzona nośność graniczna pała	[kN]
$N_{gr2,opt}$	- aproksymowana nośność graniczna pała	[kN]
$N_{gr2,obl}$	- obliczona nośność graniczna pała	[kN]
N_{max}	- maksymalne obciążenie przyłożone w teście statycznym	[kN]
U	- parametr konwersji liniowej	[-]
z	- współrzędna na osi pionowej	[m]
z^*	- zasięg strefy aktywnej	[m]
Litery greckie		
α	- parametr dopasowania	[-]
α_h	- współczynnik dla krzywej oporu pobocznicy wg Gwizdały	[-]
β	- parametr równania oporu podstawy pała	[-]
β_h	- współczynnik dla krzywej oporu podstawy wg Gwizdały	[-]
γ	- ciężar właściwy gruntu	[kN/m ³]
$\gamma_b; \gamma_t; \gamma_s$	- współczynniki bezpieczeństwa wg PN-EN 1997-1-1	[-]
δ	- błąd statystyczny	[mm]/[-]
$\kappa, \kappa_1, \kappa_2$	- parametry określające proporcję między oporem podstawy i pobocznicy pała	[-]
$\kappa_{2,opt}$	- aproksymowana wartość parametru κ_2	[-]
λ, μ, ω	- parametry funkcji $s(t, \sigma)$ wg Meyera	[-]
ν	- współczynnik Poissona	[-]
ρ	- współrzędna biegunowa	[m]
σ	- naprężenia przekazywane na podłoże gruntowe	[MPa]
σ_1	- naprężenia pod podstawą pała	[MPa]
σ_z	- pionowa składowa tensora naprężeń	[MPa]
ξ, η	- empiryczne parametry równania nośności granicznej pała	[-]
$\xi_1; \xi_2$	- współczynniki korelacyjne wg tablicy A.9 w PN-EN 1997-1	[-]
τ	- naprężenia na pobocznicy	[MPa]
ϕ	- kąt tarcia wewnętrznego	[°]

1. WSTĘP

1.1 Wprowadzenie

Współczesne budownictwo dzięki szybkiemu rozwojowi zarówno technologii wykonania, jak i metod komputerowych wspomagających projektowanie jest w stanie mierzyć się z coraz bardziej złożonymi problemami. Jednym z takich zagadnień jest optymalne wykorzystanie nośności pali fundamentowych, coraz częściej stosowanych w praktyce inżynierskiej, szczególnie przy posadowieniu na gruntach słabych. Obowiązująca w Polsce norma EC7 [83, 84] w której zawarte są m.in. wytyczne dotyczące projektowania oraz badań dotyczących pali fundamentowych określa kilka sposobów ich projektowania. Jednak w przeciwieństwie do PN-83/B-02482 [82] nie precyzuje konkretnego sposobu prowadzenia obliczeń. Jedną z dopuszczalnych w normie EC7 [83] metod jest projektowanie na podstawie próbnych obciążeń statycznych. W rezultacie testu statycznego uzyskujemy zbiór wartości opisujący obciążenie i odpowiadające mu osiadanie pala $\{N_i, s_i\}$, który jest uważany za jeden z najdokładniejszych sposobów opisanie zależności obciążenie-osiadanie (Q - s) dla badanego pala [3, 16]. Z uwagi jednak na czasochłonność oraz wysoki koszt przeprowadzenia badań pojawia się problem w przypadku, kiedy zachodzi potrzeba ponownego wykonania testu statycznego. Może to utrudnić projektantowi optymalizację parametrów geometrycznych wstępnie przyjętego pala fundamentowego, czyli zmiany jego początkowo przyjętej średnicy lub długości. Możliwość przewidywania krzywej Q - s dla pali o różnych wymiarach geometrycznych na podstawie badań tylko jednego pala pozwoliłaby na analizę współpracy pala z gruntem, wynikającą bezpośrednio z badania próbnym obciążeniem statycznym. W praktycznych obliczeniach inżynierskich korzystne byłoby ułatwienie procesu optymalizacji doboru geometrii, osiągnięte poprzez analityczną konwersję krzywej Q - s dla przypadku zmiany średnicy oraz długości pala, bez potrzeby ponownego przeprowadzenia testu statycznego.

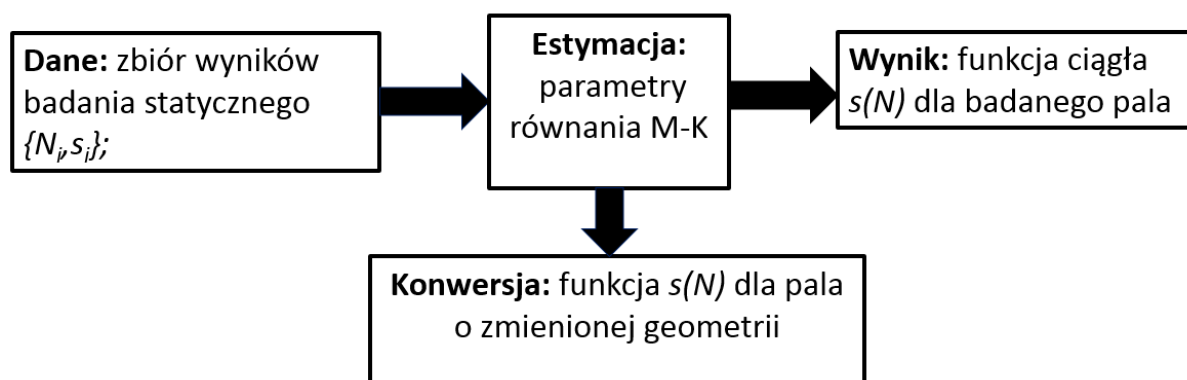
Podjmując przedstawione w niniejszej rozprawie badania autor miał na celu opracowanie analitycznego sposobu konwersji ciągłej krzywej próbnego statycznego obciążenia, co w konsekwencji pozwalałoby na określenie nośności pali o różnych wymiarach geometrycznych. Dałoby to podstawę do dalszych opracowań, które pozwolą na bardziej precyzyjne, zgodne z zasadami mechaniki gruntów, określenie związków opisujących pierwszy i drugi stan graniczny. W praktyce oznacza to zwiększenie rekomendowanego obciążenia użytkowego pala z zachowaniem wymaganego współczynnika bezpieczeństwa. Można to

osiągnąć poprzez dopuszczenie większego osiadanie pala oraz w większym stopniu wykorzystanie jego nośności.

1.2 Uzasadnienie podjęcia badań

Rozwój obliczeniowych metod optymalizacji projektowanych pali, które charakteryzują się łatwością wdrożenia w praktyce, ma istotne znaczenie zarówno z punktu widzenia naukowego, jak i inżynierskiego. Korzyścią byłaby większa łatwość analizy związku między oporem podstawy i poboczniczy pala, a jego długością i średnicą w nawiązaniu do konkretnych warunków gruntowych. Praktyczne zastosowanie analitycznej konwersji krzywej obciążenia pala umożliwi zmniejszenie kosztów wykonania pali, przy zachowaniu wymaganego stopnia bezpieczeństwa konstrukcji. Z uwagi na wysoką cenę robót związanych z fundamentami głębokimi, zoptymalizowanie sposobu ich wymiarowania mogłoby się przyczynić do rozwoju inwestycji budowlanych zarówno w przypadku posadowienia w trudnych warunkach gruntowych, jak również w przypadku konstrukcji przekazujących duże obciążenia na fundamenty.

Zbiór wartości otrzymanych w wyniku przeprowadzenia testów statycznych można wykorzystać do opisu zależności obciążenie-osiadanie pala, co było poruszane zarówno w literaturze zagranicznej [3, 5, 6, 7, 9, 12, 13, 14, 23, 24, 25, 29, 62, 63, 64, 67], jak i polskiej [15, 16, 17, 20, 39, 44, 62, 63, 64, 67, 71, 74, 78]. Dodatkowo badania przeprowadzone przez Meyera [41] dotyczące analizy naprężeń wg teorii Boussinesq'a zostały następnie wykorzystane w pracy Meyera i Stacheckiego [47] do przedstawienia metody konwersji krzywej $Q-s$ opierającej się na liniowej teorii sprężystości z wykorzystaniem metody Meyera-Kowalowa (nazywanej w dalszej części pracy metodą (M-K)). Schemat ideowy metody konwersji przedstawiono na rys. 1.1.



Rys. 1.1 Schemat ideowy konwersji

Założenie liniowej zależności między obciążeniem i osiadaniem jest prawdziwe tylko dla małych obciążeń, w związku z tym stosowanie metody konwersji opierającej się na teorii Boussinesq'a ma ograniczone zastosowanie praktyczne. Na tej podstawie stwierdzono, że istnieje potrzeba dalszego prowadzenia badań mających na celu analizę możliwości konwersji krzywej $Q-s$ w pełnym zakresie obciążenia.

W literaturze brak jest analitycznych metod pozwalających na wykorzystanie wyników próbnego obciążenia statycznego, zarówno do opisanego zarówno krzywej obciążenia badanego pała, jak i pała o innej średnicy oraz długości, bez potrzeby ponownego przeprowadzenia testu statycznego

Badania związane z metodą M-K, które umożliwiają pełny opis krzywej próbnego obciążenia statycznego pała, prowadzone w Katedrze Geotechniki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie [41, 43, 46, 54, 56, 57, 58, 78], wskazują na istnienie związków fizycznych, które można wykorzystać do przeprowadzenia analizy dotyczącej możliwości konwersji krzywej $Q-s$ w zakresie liniowej, jak i nieliniowej zależności obciążenie-osiadanie.

Eurokod 7 [83] w pkt 7.6.2.2 również przewiduje występowanie związków między palami o różnych średnicach i w ust. 3 można przeczytać: *„Jeśli średnice pali próbnych różnią się od średnicy pali konstrukcyjnych to zaleca się uwzględnić możliwe różnice zachowania pali o różnych średnicach”* oraz dalej *„W przypadku pali o bardzo dużej średnicy przeprowadzenie próbnego obciążenia pała o pełnych wymiarach jest często trudne do realizacji. Można zamiennie stosować próbne obciążenia pali o mniejszej średnicy, pod warunkiem, że:*

- *stosunek średnicy pała próbnego do średnicy pała konstrukcyjnego nie jest mniejszy niż 0,5;*
- *pał próbny o mniejszej średnicy jest wykonany i zagłębiony dokładnie w taki sam sposób, jak pale konstrukcyjne wykonane w fundamencie;*
- *pał próbny jest badany z takim oprzyrządowaniem, że z pomiarów można wyznaczyć oddzielnie opory podstawy i poboczniczy.”*

W związku z powyższym stwierdzono, że istnieje potrzeba prowadzenia badań w zakresie dotyczącym analitycznej metody konwersji krzywej obciążenia pała opierającej się na równaniach konstytutywnych mechaniki gruntów. Zagadnienie to jest tematem niniejszej rozprawy.

Przeprowadzenie badań przedstawionych w dalszej części rozprawy było możliwe dzięki wykorzystaniu wyników testów statycznych pali wykonanych w warunkach terenowych, w pełnym zakresie obciążenia. Rezultaty próbných obciążeń statycznych zostały udostępnione przez firmę Energopol S.A w Szczecinie, która była ich wykonawcą. Otrzymane zbiory wartości $\{N_i, s_i\}$ [85] umożliwiły analizę czułości rozwiązań statystycznych, która ma na celu zminimalizowanie wpływu błędów pomiarowych oraz weryfikację wcześniejszych badań, opisanych w pracach Meyera i Stacheckiego [47, 48], prezentujących metodę konwersji opierającą się na liniowej teorii sprężystości.

2. TEZA, CEL I ZAKRES PRACY

2.1 Teza pracy

Istnieje możliwość konwersji z dostateczną dla celów praktycznych obliczeń dokładnością krzywej próbnego statycznego obciążenia pała w przypadku zmiany jego wymiarów.

2.2 Cel i zakres pracy

Celem pracy jest opracowanie metody, która w oparciu o zasady mechaniki gruntów pozwoli na konwersję krzywej $Q-s$ w przypadku zmiany wymiarów geometrycznych pała, czyli jego średnicy oraz długości. Testy statyczne przeprowadzone na palach obciążonych w pełnym zakresie (do osiągnięcia nośności granicznej), wskazują, że pomierzona krzywa $Q-s$ zawiera błędy. Wynikają one ze sposobu prowadzenia badań, odkształcenia przestrzeni gruntowej oraz sposobu współpracy pała z gruntem. Wpływają one na przebieg krzywej zarówno w zakresie liniowym, jak i nieliniowym. W celu zminimalizowania wpływu niedokładności pomiarowych występujących w wynikach próbnego obciążenia statycznego konieczne było poddanie analizie sposobów estymacji parametrów M-K.

W związku z powyższym przewidziano badania dotyczące statystycznych metod wyznaczania parametrów w celu ustalenia, którą część krzywej testu statycznego należy wybrać do estymacji parametrów M-K, aby zminimalizować wpływ błędu pomiarowego. Założenia dotyczące konwersji opierającej się na liniowej teorii sprężystości zostały już opublikowane w pracy Meyera i Stacheckiego [47]. W rozprawie główny nacisk został położony na ustalenie zależności, w oparciu o metodę M-K, które pozwolą na konwersję krzywej próbnego statycznego obciążenia pała w pełnym zakresie obciążenia.

3. PRZEGLĄD LITERATURY

3.1 Analiza literatury dotyczącej współpracy pała z podłożem gruntowym

Literatura dotycząca opisu mechanizmu osiadania pali w gruncie jest bogata. Analizy wykorzystujące testy statyczne pali są szeroko opisane zarówno w literaturze zagranicznej, jak i polskiej. Autorzy zagranicznie w różny sposób opisywali rozwiązanie problemu opierając się na funkcjach transformacyjnych [6, 7, 12, 25, 28, 35 66], na badaniach Chin-Kondnera, Brinch-Hansena oraz Decourta [5, 9, 13, 23, 24, 32], jak również proponowali inne sposoby interpretacji wyników próbnego obciążenia statycznego [27, 29, 30, 32, 37, 38, 62, 63, 67, 76]. Dodatkowo można znaleźć szerokie opracowania omawiające różne sposoby podejścia do problematyki współpracy pała z podłożem gruntowym opisane przez Briauda, Felleniusa, Poulosa oraz Terzaghiego [3, 14, 64, 72]. Tematyka funkcji transformacyjnych jest również szeroko opisana w literaturze polskiej [15, 16, 17, 18, 19, 20, 22]. Wiele prac dotyczy również wykorzystania metody Meyera-Kowalowa [44] do analizy mobilizacji oporu na pobocznicę pała [43, 54, 56, 57, 58, 77, 78, 79], analizy nośności [50, 53, 55, 68, 70, 80], oceny niedokładności pomiarowych [59, 60] oraz możliwości praktycznego wykorzystania proponowanych rozwiązań [8, 42, 46, 49, 50, 51, 52, 53, 71]. Wiele istotnych dla analizy zagadnień było również opisane w monografiach Wiłuna [74] oraz Dembickiego [11]. W literaturze znaleźć można również prace dotyczące wykorzystania badania sondą statyczną CPTU do prognozy osiadania pali [1, 16, 21, 31, 46, 69, 73], jak również analityczne metody obliczeniowe wykorzystujące m.in. metodę elementów skończonych, teorię sprężystości lub probabilistykę [2, 4, 10, 36, 41, 61, 63]. Zwracano także uwagę, m.in. w pracach Poulosa i Felleniusa [14, 64], że wybór optymalnej metody prowadzenia obliczeń jest kłopotliwy. W poniższym rozdziale scharakteryzowane zostaną wybrane metody dotyczące analizy osiadania pała w gruncie. Jednym z celów niniejszej rozprawy jest analiza rezultatów próbnego obciążenia statycznego pali, w związku z tym główny nacisk został położony na przegląd badań dotyczących wykorzystania wyników testów statycznych do obliczeń analitycznych

Jedno z popularnych podejść do analizy osiadania pali polega na wykorzystaniu funkcji transformacyjnych, które zostały po raz pierwszy opisane przez Seed'a i Reese'a w 1957 roku [66] i następnie rozwinięte przez Coyle'a i Reese'a w 1966 roku [6]. Oparte jest ono na założeniu, że zależność obciążenie-osiadanie, odczytana w głowicy pała, wynika bezpośrednio

z reakcji sił wzdłuż trzonu pala na lokalne przemieszczenia. Procedury postępowania opisali m.in. Coyle i Reese [6, 7], Briaud [3], Gwizdała [15].

W odniesieniu do krzywej $T(s)$ (krzywej oporu pobocznic) uogólnioną postać funkcji transformacyjnej można opisać [15]:

- odcinkiem krzywoliniowym w pierwszej fazie narastania oporów pobocznic, tj. od wartości zerowej osiadania do wartości osiadań s^* odpowiadającej granicznej wartości oporu pobocznic T_{max} ;
- punktem odnoszącym się do pełnej mobilizacji pobocznic pala, opisanym przez graniczną wartości oporu T_{max} wraz z odpowiadającym przemieszczeniem s^* ;
- punktem charakterystycznym opisującym początek wystąpienia dużych przemieszczeń;
- wartościami oporu pobocznic T_r oraz osiadania s_r , opisanymi za pomocą współczynników ξ i μ w poniższych równaniach:

$$T_r = \xi T_{max} \quad (3.1)$$

$$s_r = \mu s^* \quad (3.2)$$

Natomiast w odniesieniu do krzywej $N_I(s)$ (krzywej oporu podstawy) właściwości można określić następująco [15]:

- odcinek krzywoliniowy od zera do oporu granicznego podstawy pala N_{gr1} ;
- wartość maksymalnego oporu podstawy pala N_{gr1} odpowiada osiadaniu podstawy pala równemu s_f ;
- dla osiadań większych od s_f wartość oporu podstawy jest stała i równa N_{gr1} , nie występuje osłabienie pala;
- przyrosty oporów pod podstawą dla większego osiadania mogą być pominięte.

Propozycję hiperbolicznego opisu funkcji transformacyjnych dla pali wielkośrednicowych w gruntach spoistych oraz niespoistych przedstawił w 1990 Hirayama [25]:

$$T(s) = \frac{s}{a_f + b_f s} \quad (3.3)$$

$$N_1(s) = \frac{s}{a_e + b_e s} \quad (3.4)$$

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano zależności opisujące parametry występujące w równaniach (3.3) oraz (3.4) [25]:

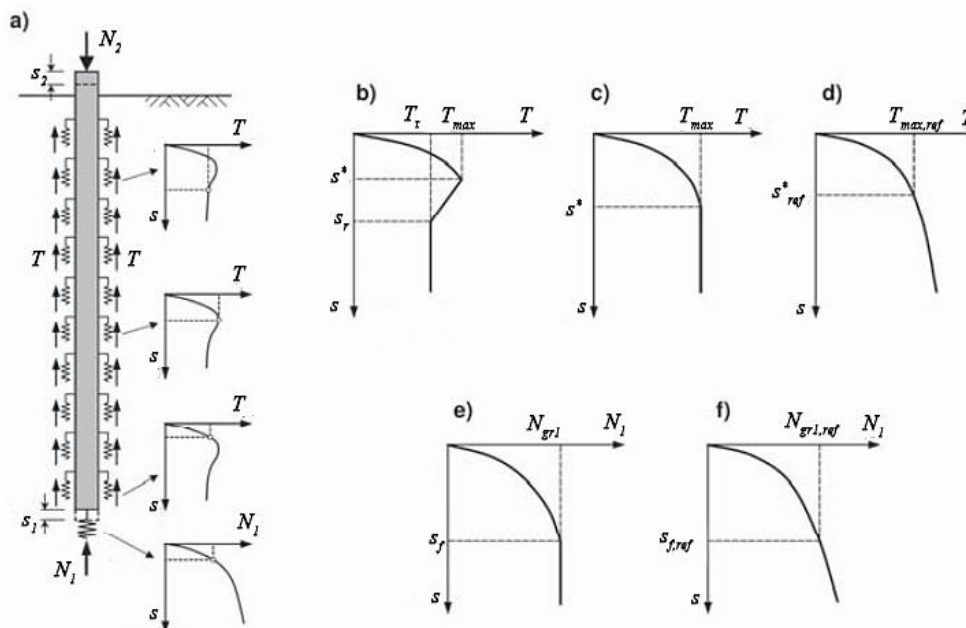
$$b_f = \frac{1}{T_{max}} \quad (3.5)$$

$$b_e = \frac{1}{N_{gr1}} \quad (3.6)$$

$$a_f = \frac{0,0025D}{T_{max}} \quad (3.7)$$

$$a_e = \frac{0,25D}{N_{gr1}} \quad (3.8)$$

Badania prowadzone m.in. przez Gwizdałę [15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22] pozwoliły na scharakteryzowanie [18] rodzaju funkcji transformacyjnej w sposób przedstawiony na rys. 3.1.



Rys. 3.1 Rodzaje funkcji transformacyjnych [20]

a) schemat współpracy pała z gruntem; b) – f) postacie funkcji transformacyjnych

Najczęściej stosowane są postacie funkcji przedstawione na rys. 3.1 w c) i e), które można wyrazić równaniami [18]:

$$N_1(s) = N_{gr1} \left(\frac{s}{s_f} \right)^{\beta_h} \text{ dla } N \leq N_{gr1} \quad (3.9)$$

$$T(s) = T_{max} \left(\frac{s}{s^*} \right)^{\alpha_h} \text{ dla } T \leq T_{max} \quad (3.10)$$

gdzie:

α_h - empiryczny wykładnik potęgi w funkcji oporu poboczniczy przyjmowany w przedziale od 0,3 do 0,5;

s^* - przemieszczenie poboczniczy pała, przy którym mobilizuje się maksymalny opór tarcia gruntu T_{max} ; najczęściej przyjmowane to $0,01D$;

β_h - empiryczny wykładnik potęgi funkcji oporu podstawy przyjmowany w przedziale od 0,25 do 0,6;

s_f - przemieszczenie podstawy pała, przy którym mobilizuje się graniczny opór gruntu N_{gr1} pod podstawą, najczęściej przyjmowane o wartości od $0,05D$ do $0,1D$.

Istotne dla dokładności funkcji transformacyjnych jest poprawne określenie opisujących je parametrów. Dalsze badania umożliwiły utworzenie zestawu proponowanych [20] parametrów przedstawionych w tab. 3.1.

Tab. 3.1 Parametry funkcji transformacyjnych [20]

Rodzaj pała	s^* [mm]	α_h [-]	s_f [mm]	β_h [-]
Pale żelbetowe prefabrykowane wbijane	$0,01D$	0,50	$0,5D$	0,25
Pale wiercone CFA	$0,01D$	0,50	$0,5D$	0,50
Pale Vibro	$0,01D$	0,25	$0,5D$	0,50
Pale wkręcane	$0,01D$	0,25	$0,5D$	0,20
SDP, SDC, CMC	10 mm	0,38	$0,1D$	0,38

W literaturze można znaleźć różne procedury przeprowadzenia obliczeń, które zostały przedstawione w pracach, m.in. Gwizdały [15] i Kacprzaka [26]. Poniżej wyszczególniono trzy z nich.

Procedura wg Coyle'a i Reese'a [6], opisana również w [15]:

1. przyjęcie małego przemieszczenia podstawy s_b ;
2. obliczenie obciążenia całkowitego w podstawie N_1 odpowiadające przemieszczeniu s_b ;

3. przyjęcie przemieszczenia punktu środkowego w pierwszym elemencie przy podstawie; w pierwszym kroku obliczeniowym przemieszczenie to przyjmuje się równe założonemu przemieszczeniu podstawy $s_{1b} \cong s_b$;
4. obliczenie oporu bocznego w dolnym elemencie T_{1b} dla przemieszczenia s_{1b} ;
5. obliczenie obciążenia N na górze segmentu pierwszego;
6. obliczenie sprężystego skrócenia połowy elementu przy podstawie Δs_{1b} ;
7. obliczenie nowego przemieszczenia punktu środkowego w pierwszym segmencie przy podstawie $s_{1b} = \Delta s_b + s_{1b}$;
8. porównanie obliczonego przemieszczenia wg punktu 7 z przemieszczeniem wyznaczonym wg punktu 3 (w pierwszym kroku obliczeniowym);
9. jeśli obliczone przemieszczenie nie mieści się w przyjętej tolerancji należy powtórzyć kroki 2-8;
10. jeśli uzyskano założoną zgodność, należy przejść do obliczania następnego segmentu; obliczenia wykonywane są do powierzchni terenu uzyskując obciążenie N_2 oraz przemieszczenie głowicy s .

Ten sposób postępowania wykonujemy dla założonej liczby kroków. Pozwala to na uzyskanie w rezultacie założonej liczby punktów na krzywej osiadania pała.

Procedura wg Kioussis i Elansary [28], opisana również w [15] jest następującą:

1. założenie pola przemieszczenia $s(z)$ oraz odkształcenia $\varepsilon(z)$,
2. założenie osiadanie pała Δs_{n+1} ;
3. obliczenie siły w podstawie pała N_1 odpowiadającej osiadaniu s_{n+1} ;
4. przyjęcie stałego przyrostu pola odkształcenia $\Delta \varepsilon_z$ wzdłuż pała;
5. obliczenie całkowitego odkształcenia, równego $\varepsilon_z = \varepsilon_z + \Delta \varepsilon_z$;
6. obliczenie pionowego przemieszczenia dla każdego z punktów wg wzoru:

$$s_i = s_{n+1} + \int_{z_i}^H \varepsilon_z dz \quad (3.11)$$

7. wykorzystanie krzywej $T(z)$ do obliczenia oporu wzdłuż pobocznic
8. obliczenie całkowitego obciążenia w głowicy

$$N_2 = N_1 + \int_0^H \pi D(z) T(z) dz \quad (3.12)$$

9. obliczenie rozkładu oporu wzdłuż długości pała z poniższego wzoru:

$$N(z) = N - \int_0^z \pi D(z) T(z) dz \quad (3.13)$$

10. następnie obliczenie skorygowanego rozkładu odkształcenia $\varepsilon_z(z)$ na podstawie rozkładu oporu $N(z)$

$$\varepsilon_z(z) = \frac{N(z)}{EA_p} \quad (3.14)$$

11. powtórzenie kroków 6-10, aż do uzyskania zbieżności,
12. procedura obliczeniowa w zakresie 2-11 pozwala na otrzymanie jednego punktu krzywej osiadania, dla każdego kolejnego punktu należy powtórzyć powyższą procedurę.

Sposób postępowania opisany przez Briaud'a [3], zawiera uzupełnienie o dodatkowe wskazania kryteriów opisanej wcześniej procedury wg Coyle'a i Resse'a:

1. podział pała na elementy - dla obliczeń komputerowych minimalna liczba elementów jest równa 10;
2. określenie krzywej transformacyjnej $T(s)$ dla każdego z elementów oraz krzywej pod podstawą $N_1(s)$, które można opisać poniższymi równaniami [3]:

$$T(s) = \frac{E_t}{(1 + \nu) \left(1 + H_n \left(\frac{H}{D} \right) \right) D} s \quad (3.15)$$

$$N_1(s) = \frac{DE_q}{1 - \nu^2} s \quad (3.16)$$

3. założenie przemieszczenia podstawy o 1mm i obliczenie obciążenia w podstawie odpowiadające założonemu przemieszczeniu;
4. ocena mobilizacji pobocznicy poprzez odczytanie oporu z krzywej $T(s)$ dla przemieszczenia 1mm odpowiadającego elementu;
5. obliczenie obciążenia przenoszonego przez pobocznicy w elemencie;
6. obliczenie przemieszczenia spodu kolejnego elementu;
7. ocena mobilizacji pobocznicy w kolejnym elemencie, analogicznie jak w pkt.4

8. obliczenie obciążenia przenoszonego przez kolejny element;
9. powtarzanie kroków 7-8 dla kolejnych elementów;
10. obliczenie obciążenia w głowicy pała;
11. określenie pierwszego punktu na krzywej obciążenia, czyli osiadania i obciążenia w głowicy pała;
12. wyznaczenie następnych punktów krzywej obciążenie-osiadanie, które otrzymuje się poprzez powtarzanie kroków 3-10 dla kolejnych założonych przemieszczeń podstawy.

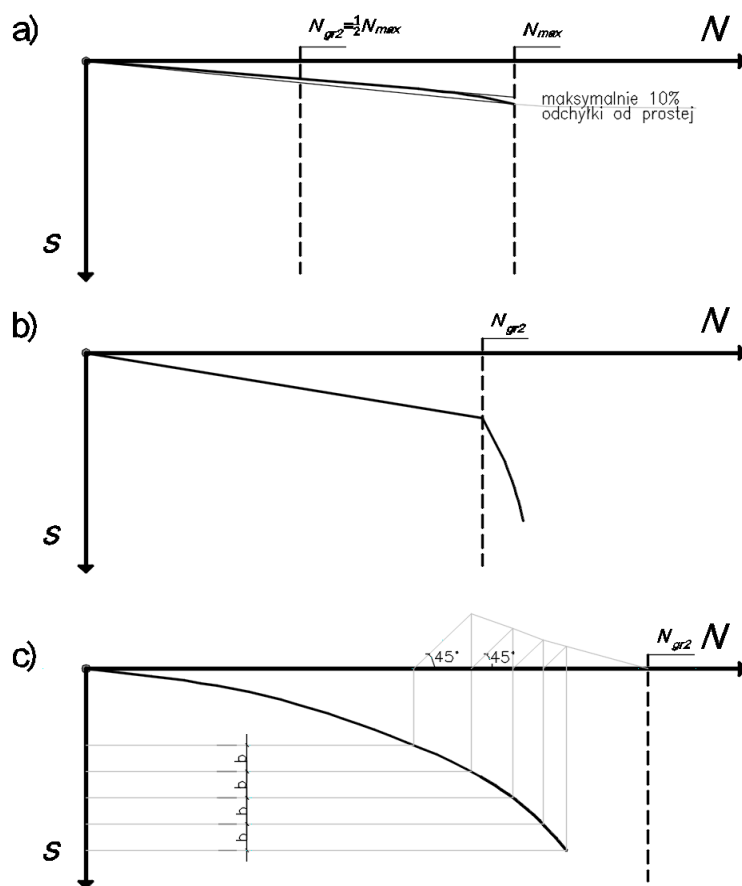
Prowadzenie obliczenia w wielu praktycznych przypadkach odbywa się w oparciu o funkcje transformacyjne wykorzystujące zależność między oporem na poboczniczy, a osiadaniami pała w postaci:

$$T(s) = a \left(1 - \frac{s}{b}\right)^c \quad (3.17)$$

Wartości współczynników a, b, c w powyższej zależności są zależne od rodzaju pała i gruntu. Metody wykorzystujące funkcje transformacyjne opierają się na empirycznych zależnościach, które należy określić na podstawie doświadczenia, albo dużego zbioru pali, który został poddany testom statycznym. Istniejące tabelaryczne propozycje wartości parametrów funkcji wynikają z wieloletniego doświadczenia, potwierdzonego wynikami badań w praktyce [15, 20], powoduje to jednak brak wyraźnego rozróżnienia, w jakiej części stosowane są zasady mechaniki gruntów, a w jakiej części opierają się na doświadczeniu prowadzącego obliczenia. Zależność $T(s)$ jest zależnością podstawową i jej określenie powinno wynikać z równań fizyki matematycznej dotyczących mechaniki gruntów.

Analizą wyników próbnych obciążeń statycznych zajmował się również Mazurkiewicz [39], który opracował metodę wykorzystania rezultatów testu statycznego do określenia nośności granicznej pała. Zaproponowane przez niego podejście zostało wykorzystane w Polskiej Normie z 1969 roku [81] i opiera się na propozycji rozwiązania wykreślnego. Nie jest potrzebne przeprowadzanie obliczeń w celu wyznaczania N_{gr2} , które są konieczne w większości z pozostałych metod. Na rys. 3.2 przedstawiono interpretację trzech przebiegów krzywej obciążenie-osiadanie uzyskanej na podstawie wyników testów statycznych [81]. W pierwszym przypadku, gdy najwyższe przyłożone obciążenie w teście statycznym N_{max} wykazuje proporcjonalność do osiadania (maksymalnie dopuszczalne jest 10% odchylenia

od prostej) można przyjąć, że nośność graniczna pala N_{gr2} jest równa połowie N_{max} lub w przypadku występowania dodatkowych sprzyjających okoliczności można przyjąć $2/3 N_{max}$. Przyłożone obciążenie powinno być co najmniej dwukrotnie większe od obciążenia projektowanego. W drugim przypadku przedstawiona jest krzywa z wyraźnym załamaniem, które oznacza wartość obciążenia, powyżej której obciążenia nie wykazują proporcjonalności względem osiadania. Wówczas można przyjąć jako nośność graniczną pala obciążenie odpowiadające załamaniu krzywej. W trzecim przypadku krzywa obciążenie-osiadanie częściowo ma przebieg nieliniowy i nie wykazuje proporcjonalności obciążenia i osiadania, jednak nie charakteryzuje się wyraźnym załamaniem. Wówczas należy wyznaczyć nośność graniczną pala w sposób wykreślny pokazany na rys. 3.2 [81].



Rys. 3.2 Wyznaczanie nośności granicznej pali wg Mazurkiewicza [81]

a) krzywa próbnego obciążenia statycznego w zakresie liniowym; b) krzywa próbnego obciążenia statycznego z wyraźnym załamaniem; c) krzywa próbnego obciążenia statycznego bez wyraźnego załamania

Instytut Budowy Dróg i Mostów (IBDiM) również sformułował własne zalecenia, dotyczące szacowania sztywności pali [33] w zakresie użytkowym:

$$\text{dla pali CFA} \rightarrow \frac{N}{s} = (17 \pm 7)H \left[\frac{MN}{m} \right]$$

$$\text{dla pali wielkośrednicowych} \rightarrow \frac{N}{s} = (25 \pm 8)DH_n \left[\frac{MN}{m} \right]$$

Kacprzak [26] przedstawił również badania dotyczące wykorzystania modelu osiadania gruntu organicznego zaproponowanego przez Meyera [40, 45] do analizy osiadania kolumn powodujących konsolidację torfów pod podstawą:

$$s(t, \sigma) = s_{\infty}(\sigma)[1 - \exp(-\lambda t^{\mu} - \omega t)] \quad (3.18)$$

Wartości s_{∞} , λ , μ , ω wyznaczone są za pomocą nieliniowej optymalizacji numerycznej. Badania edometryczne przeprowadzone przez Kacprzaka [26] wykazują również, że udział osiadania w wyniku konsolidacji wtórnej w osiadaniu całkowitym nie zależy od wartości naprężenia w ośrodku gruntowym o tej samej konsystencji.

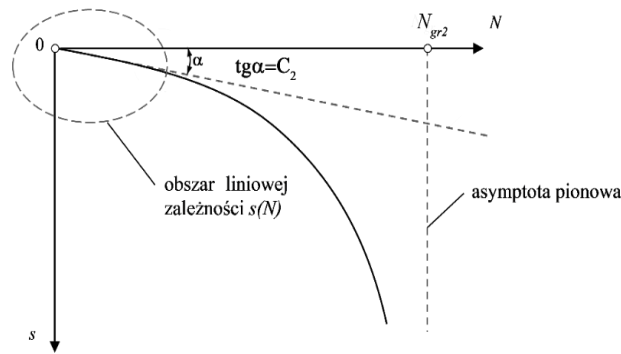
W 2010 roku Meyer i Kowalów przedstawili propozycję pełnego opisu krzywej Q - s [44], która może być wykorzystywana zarówno do fundamentów palowych [42, 46, 49, 53, 54, 55, 57, 68], jak i płytowo-palowych [8]. Równanie opisujące krzywą osiadania pala w modelu M-K można zapisać w postaci:

$$s(N) = CN_{gr} \frac{\left(1 - \frac{N}{N_{gr}}\right)^{-\kappa} - 1}{\kappa} \quad (3.19)$$

Powyższa funkcja ma dwie asymptoty, które pokazano na rys. 3.3, natomiast ich usytuowanie można opisać:

$$\lim_{N \rightarrow 0} s(N) = CN \quad (3.20)$$

$$\lim_{N \rightarrow N_{gr2}} s(N) = \infty \quad (3.21)$$



Rys. 3.3 Charakterystyczne asymptoty ograniczające krzywą $s = s(N)$ [43]

W modelu M-K krzywa osiadania posiada zarówno asymptotę pionową, jak i ukośną, które są związane z parametrami fizycznymi. Powoduje to, że krzywa M-K spełnia warunki zarówno dla małych obciążeń, w zakresie liniowej teorii sprężystości, jak również dla dużych obciążeń, przy wartościach zbliżonych do nośności granicznej pała [43, 51, 50, 52, 55, 56]. Parametry krzywej można wyznaczać za pomocą metod statystyki matematycznej. Wykorzystując metodę najmniejszych kwadratów oraz zbiór wartości osiadań pomierzonych w trakcie testu statycznego można zapisać:

$$\delta_i^2 = \sum (s_{i,pom} - s_{i,calc})^2 = \min \quad (3.22)$$

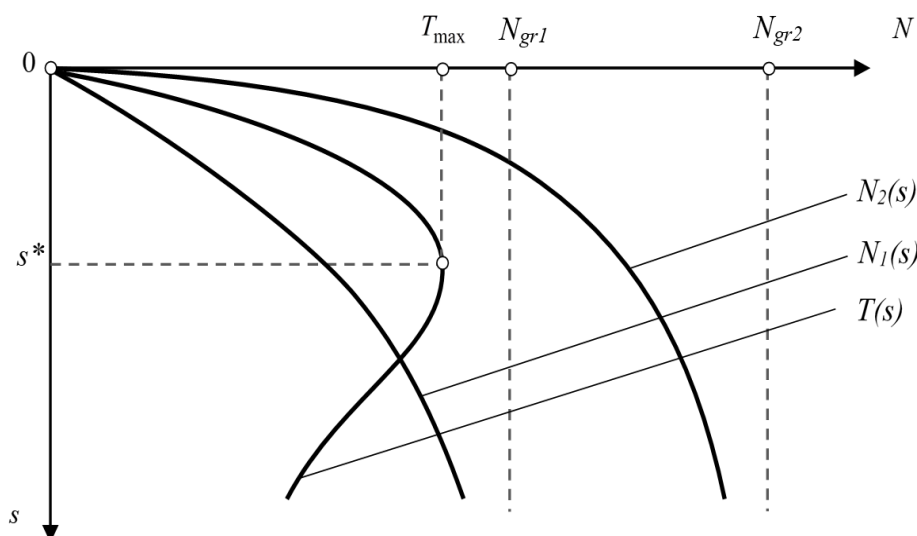
Metoda M-K pozwala na opisanie zarówno krzywej oporu całkowitego, jak i oporu podstawy oraz poboczniczy pała stosując następujące równania:

$$N_1(s) = N_{gr1} \left[1 - \left(1 + \frac{\kappa_1 s}{C_1 N_{gr1}} \right)^{-\frac{1}{\kappa_1}} \right] \quad (3.23)$$

$$N_2(s) = N_{gr2} \left[1 - \left(1 + \frac{\kappa_2 s}{C_2 N_{gr2}} \right)^{-\frac{1}{\kappa_2}} \right] \quad (3.24)$$

$$T(s) = N_2(s) - N_1(s) \quad (3.25)$$

Przykładowy przebieg powyższych zależności przedstawiono na rys. 3.4.



Rys. 3.4 Przykładowe krzywe obciążenia pala [43]

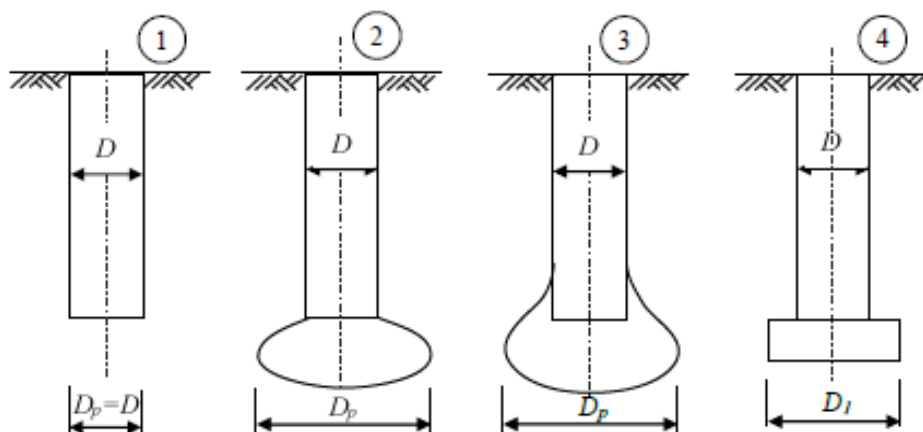
Badania nad krzywą M-K prowadzone przez Szmehela [70, 71] wykazały, że wystarczy przeprowadzenie testów statycznych w ograniczonym zakresie. Na tej podstawie można poprzez ekstrapolację wyników uzyskać pełen opis zależności Q - s i wyznaczyć wartość nośności granicznej pala. Dalsze badania opisane m.in. w pracach Meyera i Żarkiewicza [43, 57, 58, 77, 78] umożliwiły wykazanie związków między występującymi w modelu parametrami dotyczącymi krzywej oporu podstawy oraz krzywej oporu poboczniczy:

$$\frac{C_1}{C_2} = (\kappa_2 + 1)^2 \quad (3.26)$$

$$\kappa_1 = \ln(1 + \kappa_2) \quad (3.27)$$

$$N_{gr1} = \frac{N_{gr2}}{2^{\kappa_2}} \quad (3.28)$$

Aktualnie trwają m.in badania prowadzone przez Żarkiewicza dotyczące m.in formowania się oporu na poboczniczy pala [77, 79, 80]. Zależności opracowane przez Meyera i Siemaszko [46] umożliwiły obliczenie parametru κ_2 na podstawie wyników badania sondą statyczną dla różnego kształtu strefy uplastycznionej pod podstawą pala, co przedstawiono na rys. 3.5.



Rys. 3.5 Strefa uplastyczniona gruntu pod podstawą pała [46]

Analiza zbiorów wartości otrzymanych w wyniku badania próbnym obciążeniem statycznym przeprowadzona przez Meyera i Wasiluka [59, 60] pozwoliła na stwierdzenie, że w niektórych przypadkach testy statyczne są obarczone błędem wynikającym m.in. z dopasowania się pała do gruntu w początkowej fazie obciążenia oraz z ugięcia powierzchni terenu w pobliżu pała.

Chin w 1970 [5] wykorzystując wcześniejsze prace Kondnera [32] zaproponował zapisanie krzywej osiadania, przedstawionej na rys. 3.6, w postaci zależności opisanej poniższym równaniem:

$$\frac{s}{N}(s) = A_1 s + B_1 \quad (3.29)$$

lub:

$$N(s) = \frac{s}{Ns + B_1} \quad (3.30)$$

Można wykazać, że jest to szczególny przypadek równania M-K (3.19), które dla $\kappa_2=1$ przyjmuje postać:

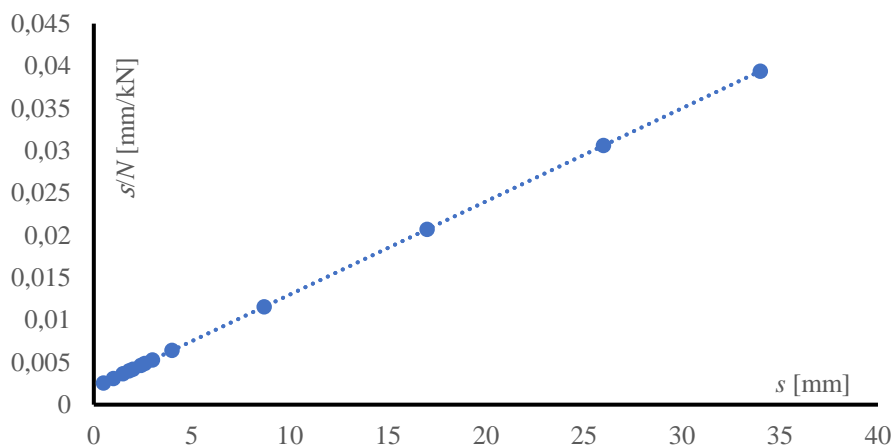
$$\frac{s}{N}(s) = \frac{1}{N_{gr2}} s + C_2 \quad (3.31)$$

Równanie metody Chin-Kondnera (3.29) opisuje liniowy związek, który został przedstawiony na rys. 3.6. Nośność graniczną N_{gr2} można obliczyć z poniższej zależności:

$$N_{gr2} = \frac{1}{A_1} \quad (3.32)$$

Odpowiadające jej osiadanie jest wówczas równe:

$$s_g = \frac{B_1}{A_1} \quad (3.33)$$



Rys. 3.6 Opis zależności obciążenie-osiadanie według metody Chin-Kondnera [65]

Zaproponowane przez Decourta [9] podejście obliczeniowe jest podobne do metody China-Kondnera, jednak różni się opisem zależności N - s , którą można wyrazić poniższym równaniem:

$$N(s) = \frac{B_2 s}{1 - A_2 s} \quad (3.34)$$

Przedstawienie graficzne funkcji przeprowadza się analogicznie, jak w metodzie Chin-Kondnera poprzez oznaczenie na osi pionowej stosunku osiadania do obciążenia $\frac{s}{N}$, natomiast oś pozioma reprezentuje wartości przyłożonego obciążenia N . Powoduje to, że dla dużych wartości obciążenia, zbliżających się do nośności granicznej, punkty na wykresie zaczynają się układać w linię prostą. Można wówczas zastosować regresję liniową. Wartość nośności granicznej wg Decourta [9, 65] to przecięcie prostej otrzymanej na podstawie regresji liniowej z osią poziomą, co można zapisać w postaci poniższego równania:

$$N_{gr2} = \frac{B_2}{A_2} \quad (3.35)$$

Kolejne podejście zostało przedstawione przez Brinch-Hansena [13, 23, 24, 65]. Opiera się ono na badaniu statycznym, które zostało przeprowadzone w zakresie wykraczającym poza pracę sprężystą. Podobnie, jak Metoda China opiera się na przekształceniu krzywej

osiadania do postaci liniowej i następnie aproksymacji współczynników. Kryterium Brinch-Hansena przedstawia zależność (3.36):

$$\frac{\sqrt{s}}{N}(s) = A_3 s + B_3 \quad (3.36)$$

lub alternatywnie można zapisać:

$$N(s) = \frac{\sqrt{s}}{A_3 s + B_3} \quad (3.37)$$

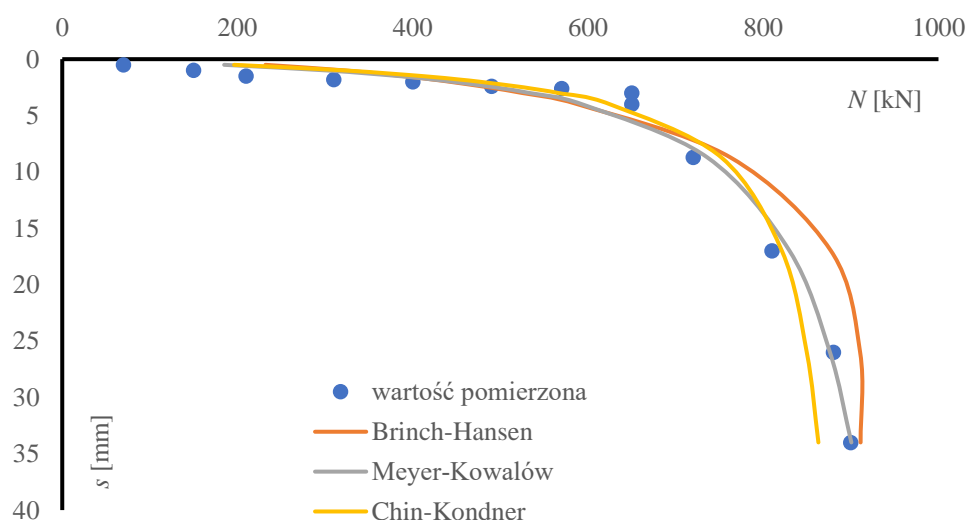
Nośność graniczna pała w metodzie Brinch-Hansena jest równa:

$$N_{gr2} = \frac{1}{2\sqrt{A_3 B_3}} \quad (3.38)$$

Natomiast odpowiadające jej osiadanie wynosi:

$$s_g = \frac{B_3}{A_3} \quad (3.39)$$

Parametry $A_1 - A_3$ w powyższych metodach można porównać do parametru C_2 w metodzie Meyera-Kowalowa. Wykorzystując wyniki testu statycznego przedstawione przez Rybaka [65] na rys. 3.7 zaprezentowano porównanie krzywych obciążenia otrzymanych z wykorzystaniem zaleceń Chin-Kondnera, Brinch-Hansena oraz Meyera-Kowalowa.



Rys. 3.7 Porównanie krzywych obciążenia pała wyznaczonych różnymi metodami

Kolejnym z wariantów interpretacji zależności obciążenie-osiadanie pała przedstawił Poulos [62, 63, 64], w postaci funkcji sztywności pała, którą można opisać równaniem:

$$k_p(N) = k_{p0} \left(1 - R_{fp} \frac{N}{N_{gr2}} \right) \quad (3.40)$$

W równaniu (3.40) wartość sztywności początkowej pała k_{p0} , oznaczającą początkową liniową część zależności między obciążeniem, a osiadaniem jest równa $\frac{s}{N}$.

Osiadanie można również obliczyć według równania (3.41) przedstawionego przez Meyera [43, 44], które zostało wykorzystane m.in. w pracy Kacprzaka [26]:

$$s(N) = -C_0 N_{gr2} \ln \left(1 - \frac{N}{N_{gr2}} \right) \quad (3.41)$$

W powyższej zależności parametr C_0 określa wartość analogiczną do k_{p0} w metodzie Poulosa. Równanie (3.41) stanowi szczególny przypadek równania M-K (3.19), które można zapisać w postaci:

$$\frac{s}{C_2 N_{gr2}} = \frac{1}{\kappa_2} \left[\left(\frac{N_{gr2} - N}{N_{gr2}} \right)^{-\kappa_2} - 1 \right] \quad (3.42)$$

Granica wyrażenia z prawej strony jest równa:

$$\lim_{\kappa_2 \rightarrow 0} \left\{ \frac{1}{\kappa_2} \left[\left(\frac{N_{gr2} - N}{N_{gr2}} \right)^{-\kappa_2} - 1 \right] \right\} = -\ln \left(\frac{N_{gr2} - N}{N_{gr2}} \right) \quad (3.43)$$

Ostatecznie prowadzi to do równania M-K dla przypadku $\kappa_2 = 0$:

$$s(N) = -C_2 N_{gr2} \ln \left[1 - \frac{N}{N_{gr2}} \right] \quad (3.44)$$

Do oceny nośności pali fundamentowych można wykorzystać również badania CPTU sondą statyczną [1, 16, 21, 31, 46, 69, 73]. Pomiar oporu sondy wzdłuż pobocznic pała oraz w poziomie jego podstawy pozwala na dobre scharakteryzowanie zmian jakościowych w podłożu gruntowym, należy jednak pamiętać, że metody interpretacji pomiarów CPTU należy skorelować np. z wynikami próbnych obciążeń statycznych [16]. Pomierzoną wartość oporu sondy statycznej można także wykorzystać do wyznaczenia parametrów krzywej M-K [46, 52, 53, 56, 57].

Stosowane aktualnie w Polsce normy dotyczące projektowania fundamentów, czyli PN-EN 1997-1-1 oraz PN-EN 1997-1-2 wymagają spełnienia przez wciskany pal typowych warunków dla stanu granicznego nośności [34, 75, 83, 84]:

$$F_{c;d} \leq R_{c;d} \quad (3.45)$$

w której:

$$R_{c;d} = \frac{R_{c;k}}{\gamma_t} \quad (3.46)$$

lub

$$R_{c;d} = \frac{R_{b;k}}{\gamma_b} + \frac{R_{s;k}}{\gamma_s} \quad (3.47)$$

Wartości współczynników częściowych zalecanych w PN-EN 1997-1-1 [83] zestawiono poniżej w tab. 3.2 ÷ tab. 3.4.

Tab. 3.2 Współczynniki częściowe dla pali wbijanych [83]

Nośność	Symbol	Zestaw			
		R1	R2	R3	R4
Podstawa	γ_b	1,0	1,1	1,0	1,3
Pobocznica (przy wciskaniu)	γ_s	1,0	1,1	1,0	1,3
Całkowita (przy wciskaniu)	γ_t	1,0	1,1	1,0	1,3
Pobocznica (przy wyciąganiu)	$\gamma_{s;t}$	1,25	1,15	1,1	1,6

Tab. 3.3 Współczynniki częściowe dla pali wierconych [83]

Nośność	Symbol	Zestaw			
		R1	R2	R3	R4
Podstawa	γ_b	1,25	1,1	1,0	1,6
Pobocznica (przy wciskaniu)	γ_s	1,0	1,1	1,0	1,3
Całkowita (przy wciskaniu)	γ_t	1,15	1,1	1,0	1,5
Pobocznica (przy wyciąganiu)	$\gamma_{s;t}$	1,25	1,15	1,1	1,6

Tab. 3.4 Współczynniki częściowe dla pali formowanych świdrem ciągłym CFA [83]

Nośność	Symbol	Zestaw			
		R1	R2	R3	R4
Podstawa	γ_b	1,1	1,1	1,0	1,45
Pobocznicza (przy wciskaniu)	γ_s	1,0	1,1	1,0	1,3
Całkowita (przy wciskaniu)	γ_t	1,1	1,1	1,0	1,4
Pobocznicza (przy wyciąganiu)	$\gamma_{s;t}$	1,25	1,15	1,1	1,6

Składowe oporu granicznego pala $R_{b;k}$ oraz $R_{s;k}$ można wyznaczyć w oparciu o przeprowadzone badania podłoża gruntowego, próbne obciążenia dynamiczne, analizy sprężystej fali odbitej lub na podstawie próbnego obciążenia statycznego. Eurokod 7 pozwala przyjmować, że nośność pala jest równa obciążeniu odpowiadającemu osiadaniu równemu 1/10 średnicy [75, 83]. Jest to dopuszczalne w szczególnych przypadkach, gdy niemożliwe jest określenie nośności z wykresu obciążenie-osiadanie, z uwagi na ciągłą krzywiznę [75, 83]. Ponadto EC7 [83] pozwala, po spełnieniu odpowiednich warunków opisanych w pkt 7.6.2.2, wyznaczyć nośność pali o dużej średnicy na podstawie testu statycznego przeprowadzonego dla pala o mniejszej średnicy. Nie wskazano jednak sposobu prowadzenia obliczeń pozwalających na konwersję wyników testu statycznego na nośność pala o większej lub mniejszej średnicy. W literaturze brakuje również metod opisujących pełną konwersję krzywej osiadania pala określonej w wyniku przeprowadzonych testów statycznych w przypadku zmiany jego średnicy i długości. Nośność pali ustaloną na podstawie próbnych obciążeń statycznych można wyznaczyć wg PN-EN 1997-1 [83] w następujący sposób:

$$R_{c;k} = \min \left\{ \frac{(R_{c,m})_{mean}}{\xi_1}; \frac{(R_{c,m})_{min}}{\xi_2} \right\} \quad (3.48)$$

Wartości współczynników korelacyjnych ξ_1 ; ξ_2 są zależne od liczby próbnych obciążeń pali n , co zaprezentowano w tab. 3.5 [83].

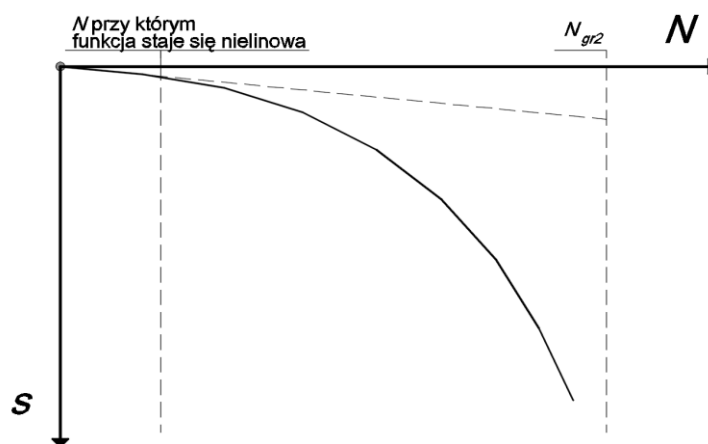
Tab. 3.5 Współczynniki korelacji przy próbnym obciążeniach statycznych [83]

ξ dla $n=$	1	2	3	4	≥ 5
ξ_1	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00
ξ_2	1,40	1,20	1,05	1,00	1,00

3.2 Podsumowanie

Wiele prac naukowych zajmuje się testem statycznym i wnioskowaniem co do zależności, jakie daje się zauważyć pomiędzy wynikami testu statycznego, a parametrami gruntowymi, zarówno w literaturze zagranicznej [3, 5, 13, 14, 23, 27, 29, 30, 32, 61, 64, 67, 72, 76], jak i polskiej [2, 8, 31, 33, 39, 42, 46, 47, 50, 51, 65, 68, 74]. Brakuje jednak badań zajmujących się dalszą analizą $N-s$, jako krzywej ciągłej pod kątem zmiany przebiegu zależności obciążenie-osiadanie przy modyfikacji jego średnicy lub długości. Można znaleźć również wiele prac, które analizują rozkład oporu pobocznic wzdłuż pała z wykorzystaniem funkcji transformacyjnych [3, 6, 7, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 25, 28, 35, 66]. W literaturze przedstawiono również różne badania dotyczące krzywej M-K, m.in. przeprowadzone przez Meyera i Siemaszko analizy związku parametru κ_2 z wynikami badania sondą statyczną [46], badania Żarkiewicza [56, 57, 58, 77, 78, 79, 80] przedstawiające m.in. sposób formowania się oporu na pobocznic pała, Szmechela [52, 53, 54, 55, 70, 71] dotyczące m. in. sposobu formowania się strefy uplastycznionej pod podstawą pała oraz ekstrapolacją krzywej M-K, prace Wasiluka i Meyera [59, 60] dotyczące niedokładności pomiarowych w teście statycznym. Można ogólnie stwierdzić, że brakuje w literaturze prac, które analizowałyby możliwość sformułowania analitycznego związku pozwalającego na konwersję krzywej obciążenie-osiadanie pała. Niewiele jest również badań dotyczących bezpośrednich zależności pomiędzy parametrami M-K, a parametrami geotechnicznymi.

Założenie małych obciążeń pozwoliło sformułować metodę umożliwiającą konwersję krzywej $Q-s$, która została opublikowana w pracach Meyera i Stacheckiego [47, 48], w oparciu o zależności wynikające z liniowej teorii sprężystości wraz z uwzględnieniem teorii Boussinesq'a [41]. Metoda konwersji opierająca się na założeniach prawdziwych dla małych obciążeń [47, 48], czyli w zakresie liniowej zależności $Q-s$, ma ograniczone zastosowanie praktyczne z uwagi na to, że liniowy obszar zależności obejmuje jedynie początkową część krzywej $s(N)$, tak jak pokazano na rys. 3.8. Natomiast występujące w praktyce obciążenia pali wymagają w wielu przypadkach przeprowadzenia analizy dotyczącej nieliniowej zależności pomiędzy obciążeniem, a osiadaniem pała.



Rys. 3.8 Liniowa i nieliniowa część zależności obciążenie-osiadanie

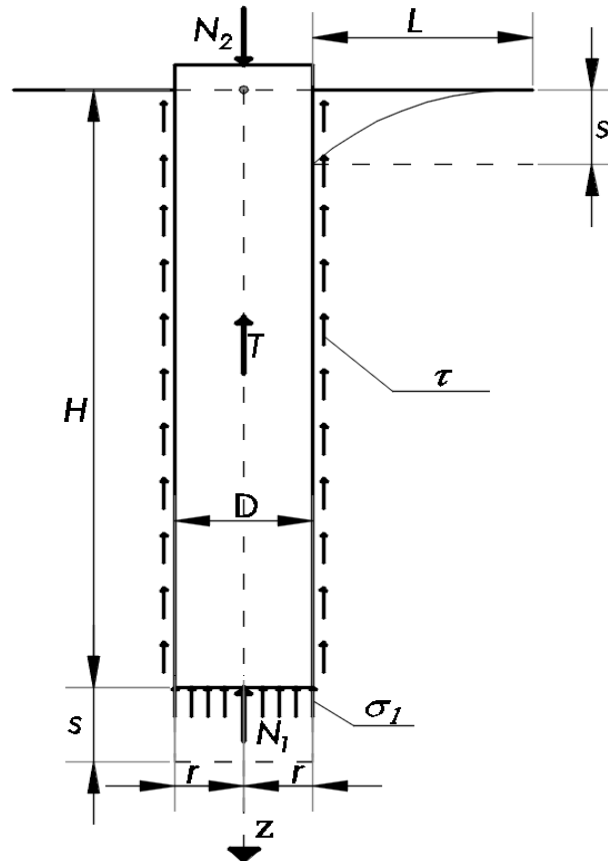
Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury sformułowano następujący program badań:

- analiza numeryczna przeprowadzona w oparciu o pale obciążone do zniszczenia, która ma na celu zoptymalizowanie sposobu estymacji parametrów krzywej M-K, aby zminimalizować wartości błędów pomiarowych wpływających na otrzymane rezultaty;
- analiza możliwości konwersji dla małych obciążeń wynikająca z liniowej teorii sprężystości;
- ustalenie zależności opisującej związek pomiędzy nośnością graniczną pala, a naprężeniami w podstawie pala oraz jego wymiarami geometrycznymi w oparciu o analizę numeryczną zbiorów $\{N_i, s_i\}$ dla pali, obciążonych do wyczerpania nośności;
- opracowanie procedury obliczeniowej konwersji krzywej obciążenia pala z uwzględnieniem nieliniowej zależności $Q-s$ dla większych obciążeń;
- przykłady obliczeniowe oraz praktyczne zastosowanie proponowanej metody;
- analiza krzywych M-K w celu przygotowania zależności, które można wykorzystać do określenia modelu współpracy pala z gruntem.

4. ANALIZA ZJAWISKA

4.1 Analiza współpracy pala z gruntem dla małych obciążeń

Tematyka analizy naprężeń w oparciu o teorię Boussinesq'a była poruszana przez Meyera w [41], gdzie dla opisywanych zależności przyjęto schemat przedstawiony na rys. 4.1.



Rys. 4.1 Schemat naprężeń dla pala zagłębionego w gruncie

W badaniach przedstawionych w [41] wprowadzono uproszczenie polegające na przyjęciu jednorodnego podłoża. Założono również, że palec jest nieodkształcalny oraz nie występuje poślizg gruntu wzdłuż pobocznic palaka. Zmianę pionowej składowej tensora naprężeń σ_z w układzie cylindrycznym z, ρ opisano poniższym równaniem [21,22]:

$$\sigma_z(z, \rho) = \frac{3}{2\pi} Q \frac{z^3}{(z^2 + \rho^2)^{5/2}} \quad (4.1)$$

Na podstawie rys. 4.1 można zapisać równanie równowagi sił działających wzdłuż osi pionowej:

$$N_2 = N_1 + \int_0^H \tau(z) 2\pi r dz \quad (4.2)$$

Zgodnie z powyższymi założeniami można przyjąć:

$$\tau(z) = \text{const} = \tau \quad (4.3)$$

Po podstawieniu (4.3) do (4.2) otrzymano:

$$N_2 = N_1 + 2\pi r \tau \quad (4.4)$$

Na podstawie zależność (4.1) można zapisać:

$$\sigma_z(z, r) = \frac{3}{2\pi} N_1 \frac{(z - H)^3}{[(z - H)^2 + r^2]^{5/2}} \quad (4.5)$$

Podstawiając powyższe równanie do ogólnej zależności opisującej osiadanie, która ma postać:

$$s = \int_{z_1}^{z_2} \frac{\sigma_z}{E} dz \quad (4.6)$$

dla gruntu jednorodnego można przyjąć, że moduł sprężystości E nie zmienia się, czyli:

$$E = \text{const} \quad (4.7)$$

wynika z tego, że dla analizowanego przypadku można zapisać [41]:

$$s(N_1, r, z) = \int_z^\infty \frac{\sigma_z(z, r)}{E} dz \quad (4.8)$$

Ostatecznie po przekształceniach wyrażenia (4.8) otrzymano:

$$s(N, r, z) = \frac{N_1}{2\pi E} \left[\frac{3}{\sqrt{(z - H)^2 + r^2}} - \frac{r^2}{[(z - H)^2 + r^2]^{3/2}} \right] \quad (4.9)$$

Zakładając, że $r \ll H$, można pominąć r^2 w równaniach (4.10) i (4.11) [41]. Po przeprowadzeniu całkowania wyrażenia (4.8) w granicach od z do ∞ , zależności, które opisują

odkształcenie powierzchni terenu ($z = 0$) oraz osiadanie podstawy pała ($z = H$) przyjmują postać [41]:

$$z = 0 \rightarrow s(N_1, r, 0) = \frac{3N_1}{2\pi HE} \quad (4.10)$$

$$z = H \rightarrow s(N_1, r, H) = \frac{N_1}{\pi r E} \quad (4.11)$$

W praktycznych obliczeniach inżynierskich, osiadania nie oblicza się w granicach od z do ∞ , tylko do granicy strefy aktywnej osiadania. Można to uwzględnić na przykład poprzez współczynnik korygujący [41].

Naprężenia styczne τ na pobocznicę powodują osiadanie pała, które można wyznaczyć na podstawie poniższych zależności [41]:

$$\sigma_z(\tau, r, z) = \frac{3}{2\pi} \int_0^H \frac{\tau 2\pi r (z - \xi)^3 d\xi}{[(z - \xi)^2 + r^2]^{5/2}} \quad (4.12)$$

gdzie wyrażenie $2\pi r \tau d\xi$ oznacza siłę zawieszoną w osi z w miejscu o współrzędnej ξ .

Po rozwiązaniu całki (4.12) otrzymano [41]:

$$\sigma_z(\tau, r, z) = \tau r \left\{ \frac{3}{\sqrt{(z-H)^2 + r^2}} - \frac{3}{\sqrt{z^2 + r^2}} + \frac{r^2}{[(z-H)^2 + r^2]^{3/2}} + \frac{r^2}{[z^2 + r^2]^{3/2}} \right\} \quad (4.13)$$

Ostatecznie można zapisać:

$$z = 0 \rightarrow \sigma_z(\tau, r, 0) = 4\tau \quad (4.14)$$

$$z = H \rightarrow \sigma_z(\tau, r, H) = 4\tau \quad (4.15)$$

Dla naprężeń $\sigma_z(\tau, r, z)$ zależność opisującą osiadanie przyjmuje ogólną postać:

$$s(\tau, r, z) = \int_z^\infty \frac{\sigma_z(\tau, r, z)}{E} dz \quad (4.16)$$

Po przekształceniach otrzymano [41]:

$$s(\tau, r, z) = \frac{\tau r}{E} \left\{ 3 \ln \left[\frac{z + \sqrt{z^2 + r^2}}{(z - H) \cdot \sqrt{(z - H)^2 + r^2}} \right] + \frac{z}{\sqrt{z^2 + r^2}} - \frac{z - H}{\sqrt{(z - H)^2 + r^2}} \right\} \quad (4.17)$$

$$z = 0 \rightarrow s(\tau, r, 0) = \frac{\tau r}{E} \left[1 + 3 \ln \frac{2H}{r} \right] \quad (4.18)$$

$$z = H \rightarrow s(\tau, r, H) = \frac{\tau r}{E} \left[1 + 3 \ln \frac{2H}{r} \right] = s(\tau, r, 0) \quad (4.19)$$

Na podstawie powyższych zależności opisujących osiadania dla $z = 0$ oraz $z = H$ stwierdzono, że osiadanie powstałe w wyniku naprężeń na poboczniczy pała na poziomie powierzchni terenu jest równe osiadaniu w podstawie pała. Osiadanie poboczniczy pała spowodowane naprężeniami τ można również obliczyć z wykorzystaniem modułu odkształcenia postaciowego G [41]:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (4.20)$$

$$\tau = \frac{s(\tau, r)}{L} G \rightarrow s(\tau, r) = 2(1 + \nu) \frac{\tau}{E} L \quad (4.21)$$

Zależność opisującą ramię działania naprężeń wyznaczono przyrównując równania (4.18) i (4.21) [41]:

$$2(1 + \nu) \frac{\tau}{E} L = \frac{\tau r}{E} \left[1 + 3 \ln \frac{2H}{r} \right] \rightarrow L = r \frac{1 + 3 \ln \left(\frac{2H}{r} \right)}{2(1 + \nu)} \quad (4.22)$$

W obliczeniach inżynierskich wystarczającą jest uproszczona postać wzoru [41]:

$$L_0 = \frac{3}{2(1 + \nu)} r \ln \left(\frac{2H}{r} \right) \quad (4.23)$$

co pozwala ostatecznie zapisać:

$$L_0 = (4 \div 6)r \quad (4.24)$$

W praktyce sprowadza się to do:

$$L_0 = 3D \quad (4.25)$$

Przedstawione wyżej zależności dają podstawę do sformułowania wniosku, że wykorzystanie mobilizacji naprężeń stycznych, odbywa się dopiero przy rozstawie zewnętrznych powierzchni pali większym lub równym $8r$ [41]. Otrzymano wówczas:

$$s(\tau, r) = 2(1 + \nu) \frac{\tau}{E} L_0 = \frac{\tau}{E} r \left[3 \ln \left(\frac{2H}{r} \right) + 1 \right] \quad (4.26)$$

W przypadku, gdy rozstaw pali jest mniejszy niż $8r$, a co za tym idzie ramię działania naprężeń stycznych L jest mniejsze od L_0 , wartość τ ulegnie zmniejszeniu. Przyjęte założenie braku poślizgu [41] prowadzi do zależności:

$$\frac{q_b}{E} r = \frac{\tau}{E} r \left[3 \ln \left(\frac{2H}{r} \right) + 1 \right] \quad (4.27)$$

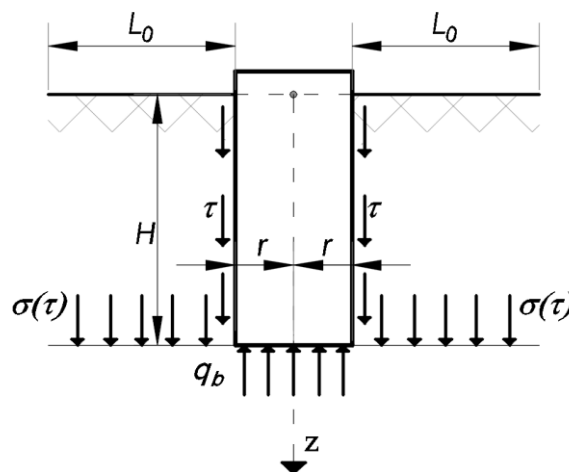
Po przekształceniach otrzymano:

$$\tau = \frac{q_b}{3 \ln \left(\frac{2H}{r} \right) + 1} \quad (4.28)$$

W przybliżonych obliczeniach można skorzystać z poniższej formuły [41]:

$$\tau = \frac{1}{20} q_b \quad (4.29)$$

Możliwe jest również obliczenie zasięgu L_0 w sposób przybliżony wykorzystując równowagę naprężeń w poziomie podstawy pala, które przedstawiono w sposób schematyczny na rys. 4.2 [41].



Rys. 4.2 Schemat równowagi naprężeń na pobocznicy naprężeniami w podstawie [41]

Równowagę sił można zapisać równaniem:

$$2\pi r H \tau = [\pi(r + L_0)^2 - \pi r^2] \sigma(\tau) \quad (4.30)$$

Następnie przyrównując równania (4.11) i (4.21) otrzymano:

$$q_b = 2(1 + \nu) \frac{L_0}{r} \tau \quad (4.31)$$

Przyjmując założenie, że [41]:

$$\sigma(\tau) = q_b \quad (4.32)$$

Po przekształceniach można zapisać:

$$L_{0 \min} = \sqrt[3]{\frac{H r^2}{1 + \nu}} \quad (4.33)$$

Pozwala to na uzyskanie ostatecznie poniższej nierówności, opisującej zasięg działania naprężeń stycznych τ [41]:

$$\sqrt[3]{\frac{r^2 H}{1 + \nu}} < L_0 < r \frac{1 + 3 \ln\left(\frac{2H}{r}\right)}{2(1 + \nu)} \quad (4.34)$$

Dalsze badania przedstawione w pracy Meyera i Stacheckiego [47] wskazują również na alternatywne podejście do sposobu wyznaczania zasięgu naprężeń τ . Zgodnie z zasadami mechaniki gruntów [74] dla małych obciążeń-odkształceń można zapisać:

$$s = \frac{4 N_1}{\pi E_q D} \quad (4.35)$$

$$s = 2(1 + \nu) \frac{\tau}{E_t} L \quad (4.36)$$

Wiedząc, że opór poboczniczy jest równy:

$$T = \pi D H \tau \quad (4.37)$$

Przekształcenie równań (4.7) – (4.10) prowadzi do poniższych zależności:

$$T = \frac{\pi D H}{2(1 + \nu)} E_t \frac{s}{L} \quad (4.38)$$

$$N_1 = \frac{\pi}{4} E_q s D \quad (4.39)$$

$$\frac{T}{N_1} = \frac{2}{1 + \nu} \frac{E_t H}{E_q L} \quad (4.40)$$

Drugie założenie, które zostało przedstawione na rys. 4.2 to wyrównanie naprężeń normalnych w gruncie w poziomie podstawy pala:

$$\frac{T}{\pi L^2} = \frac{N_1}{\pi D^2} \quad (4.41)$$

Stąd:

$$\frac{T}{N_1} = \frac{L^2}{D^2} \quad (4.42)$$

Po podstawieniu do równania (4.40) otrzymano:

$$\frac{2}{1 + \nu} \frac{E_t H}{E_q L} = \frac{L^2}{D^2} \quad (4.43)$$

Umożliwia to opisanie zasięgu działania naprężeń ścinających poniższym wzorem:

$$L = D \sqrt[3]{\frac{2}{1 + \nu} \frac{E_t H}{E_q D}} \quad (4.44)$$

Wartości L obliczone równaniem (4.44) są nieznacznie większe od wartości ustalonych na podstawie równania (4.23). Podstawiając zależność (4.44) do (4.43) otrzymano w konsekwencji dla małych obciążeń – odkształceń:

$$\frac{T}{N_1} = \left(\frac{2}{1 + \nu} \frac{E_t H}{E_q D} \right)^{2/3} \quad (4.45)$$

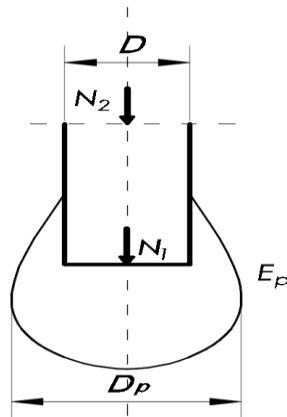
Dla małych $N - s$ zachodzą związki między parametrami krzywej M-K, które można opisać następująco [44]:

$$N_2 = \frac{s}{C_2}; \quad N_1 = \frac{s}{C_1}; \quad T = \frac{s}{C_t} \quad (4.46)$$

Po przeprowadzeniu podstawowych przekształceń, wygodnie jest wprowadzić parametr U omówiony w [47], który wykazuje związek między właściwościami mechanicznymi gruntu, parametrami M-K oraz charakterystykami geometrycznymi pała wynikający z liniowej teorii sprężystości.

$$U = \left(\frac{2}{1 + \nu} \frac{E_t}{E_q} \right)^{2/3} = \frac{C_1}{C_2} - 1 = \frac{C_1}{\left(\frac{H}{D}\right)^{2/3}} \quad (4.47)$$

Dla schematu uplastycznienia gruntu pod podstawą pała przedstawionego na rys. 4.3.



Rys. 4.3 Schemat uplastycznienia gruntu pod podstawą pała

Na podstawie badań przedstawionych w [46, 52, 53, 56, 57] można zapisać zależności:

$$E_p = 4q_b \left(1 + \frac{1}{4} q_b^{1/3} \right) \quad (4.48)$$

$$D_p = D \left(1 + \frac{1}{2} q_b^{1/3} \right) \quad (4.49)$$

Równanie opisujące osiadanie przy uwzględnieniu uplastycznienia gruntu pod podstawą pała ma postać [52]:

$$s = \frac{4}{\pi} \frac{N_1}{E_p D_p} \quad (4.50)$$

Po przekształceniu zależności (4.46) dla $N_I \rightarrow 0$ uzyskano:

$$s = C_1 N_1 \quad (4.51)$$

Stąd wynika:

$$C_1 = \frac{4}{\pi} \frac{1}{E_p D_p} = \frac{1}{\pi D \left(1 + \frac{1}{2} q_b^{1/3}\right) q_b \left(1 + \frac{1}{4} q_b^{1/3}\right)} \quad (4.52)$$

Podstawiając funkcję:

$$F(q_b) = \left(1 + \frac{1}{2} q_b^{1/3}\right) q_b \left(1 + \frac{1}{4} q_b^{1/3}\right) \quad (4.53)$$

Otrzymano:

$$C_1 = \frac{1}{\pi D F(q_b)} \quad (4.54)$$

Założono, że $F(q_b)$ można aproksymować w postaci:

$$F(q_b) = A q_b^B = 1,785 q_b^{1,258} \quad (4.55)$$

Ostatecznie prowadzi to do:

$$C_1 = \frac{1}{1,785 \pi D q_b^{1,258}} \quad (4.56)$$

4.2 Metoda konwersji opierająca się na liniowej teorii sprężystości

Metoda konwersji wykorzystująca liniową teorię sprężystości została opisana szczegółowo przez Meyera i Stacheckiego w [47, 48]. W pkt. 4.1 przedstawiono wyniki dalszych badań umożliwiające uwzględnienie w wartości parametru C_1 wpływu uplastycznienia gruntu pod podstawą pala poprzez parametry E_p oraz D_p . W niniejszym punkcie przedstawiono metodę konwersji opisaną we wcześniejszej publikacji [47], wraz z uzupełnieniem o przedstawioną zależność (4.52) opisującą parametr C_1 .

Dla krzywej obciążenia opisaną geometrią pala $H^{(0)}$; $D^{(0)}$ oraz wynikami testu statycznego $\{N_i; S_i\}$ można wyznaczyć za pomocą statystyki parametry pierwotnej krzywej M-K, która w dalszej części rozprawy będzie opisywana, jako stan „0”. Charakteryzują ją następujące parametry:

$$C_2^{(0)}; \kappa_2^{(0)}; N_{gr2}^{(0)} \quad (4.57)$$

Badania prowadzone w Katedrze Geotechniki Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska [43, 57, 77, 78] wykazały istnienie poniższych zależności między parametrami M-K dotyczącymi krzywej oporu podstawy oraz oporu całkowitego:

$$C_1^{(0)} = C_2^{(0)} \left(1 + \kappa_2^{(0)}\right)^2 \quad (4.58)$$

$$\kappa_1^{(0)} = \ln \left(1 + \kappa_2^{(0)}\right) \quad (4.59)$$

Znając wartość $C_1^{(0)}$, można po przekształceniu równania (4.56) wyznaczyć wartość q_b , która umożliwi obliczenie granicznego oporu podstawy pała [56]:

$$N_{gr1}^{(0)} = \frac{4}{3\pi^2} q_b^{1/4} \left(\frac{H}{D^{(0)}}\right)^{1/3} \frac{\pi(D^{(0)})^2}{4} q_b \quad (4.60)$$

Następnie można przejść do obliczeń parametrów krzywej Q -s dla pała o nowej geometrii $H^{(1)}; D^{(1)}$, która będzie nazywana w dalszej części stanem „1”. Zakładając, że warunki gruntowe pozostają bez zmian można podstawie równania (4.47) zapisać następujący związek między parametrami krzywej M-K dla różnych długości i średnic pała:

$$U^{(0)} = U^{(1)} \rightarrow \frac{\frac{C_1^{(0)}}{C_2^{(0)}} - 1}{\left(\frac{H^{(0)}}{D^{(0)}}\right)^{2/3}} = \frac{\frac{C_1^{(1)}}{C_2^{(1)}} - 1}{\left(\frac{H^{(1)}}{D^{(1)}}\right)^{2/3}} \quad (4.61)$$

Po uporządkowaniu prowadzi to do równania:

$$\frac{C_1^{(1)}}{C_2^{(1)}} = \frac{\left(\frac{C_1^{(0)}}{C_2^{(0)}} - 1\right) \left(\frac{H^{(1)}}{D^{(1)}}\right)^{2/3}}{\left(\frac{H^{(0)}}{D^{(0)}}\right)^{2/3}} + 1 \quad (4.62)$$

W przypadku zmiany parametrów gruntowych w stanie „1” otrzymuje się:

$$\frac{C_1^{(1)}}{C_2^{(1)}} = \left(\frac{E_t^{(1)}}{E_t^{(0)}}\right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{E_q^{(0)}}{E_q^{(1)}}\right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{1 + \nu^{(0)}}{1 + \nu^{(1)}}\right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{H^{(1)}}{H^{(0)}}\right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{D^{(0)}}{D^{(1)}}\right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{C_1^{(0)}}{C_2^{(0)}} - 1\right) + 1 \quad (4.63)$$

Przekształcenie zależności (4.58) oraz (4.61) umożliwia wyznaczenie parametru $\kappa_2^{(1)}$ z poniższego równania:

$$\kappa_2^{(1)} = \kappa_2^{(0)} \frac{\sqrt{\frac{C_1^{(1)}}{C_2^{(1)}} - 1}}{\sqrt{\frac{C_1^{(0)}}{C_2^{(0)}} - 1}} \quad (4.64)$$

oraz analogicznie, jak w stanie „0” zapisano [43, 57, 77, 78]:

$$\kappa_1^{(1)} = \ln(1 + \kappa_2^{(1)}) \quad (4.65)$$

Wartość parametru $C_1^{(1)}$ można obliczyć na podstawie zależności (4.56), która przy założeniu, że wartość q_b nie ulegnie zmianie przyjmuje następującą postać:

$$C_1^{(1)} = C_1^{(0)} \frac{D^{(0)}}{D^{(1)}} \quad (4.66)$$

Znając wartość $C_1^{(1)}$ ze związku (4.62) oblicza się $C_2^{(1)}$. Następnie na podstawie równania (4.60), zakładając, że wartość q_b nie ulegnie zmianie wyznaczono:

$$N_{gr1}^{(1)} = N_{gr1}^{(0)} \left(\frac{D^{(1)}}{D^{(0)}} \right)^{5/3} \left(\frac{H^{(1)}}{H^{(0)}} \right)^{1/3} \quad (4.67)$$

Do wyznaczenia ostatniego z parametrów wykorzystano zależność pomiędzy oporem całkowitym pała, a oporem podstawy opisaną przez Żarkiewicza [77]:

$$\frac{N_{gr1}^{(0)} C_1^{(0)}}{N_{gr2}^{(0)} C_2^{(0)}} = 1 + \beta \left(\frac{H^{(0)}}{D^{(0)}} \right)^{1/3} \sqrt{\kappa_2^{(0)}} \quad (4.68)$$

Założenie, że wartość β nie ulega zmianie na skutek konwersji pozwala na sformułowanie poniższego równania:

$$\frac{N_{gr1}^{(1)}}{N_{gr2}^{(1)}} = \left\{ \left[\frac{N_{gr1}^{(0)} C_1^{(0)}}{N_{gr2}^{(0)} C_2^{(0)}} - 1 \right] \frac{\left(\frac{H^{(1)}}{D^{(1)}} \right)^{1/3} \sqrt{\kappa_2^{(1)}}}{\left(\frac{H^{(0)}}{D^{(0)}} \right)^{1/3} \sqrt{\kappa_2^{(0)}}} + 1 \right\} \frac{C_2^{(1)}}{C_1^{(1)}} \quad (4.69)$$

Na podstawie powyższych związków dla znanych parametrów stanu „0” wyznaczonych na podstawie testu statycznego:

$$H^{(0)} = 27,5m; D^{(0)} = 1m; C_2^{(0)} = 0,000542 \frac{m}{MN}; N_{gr2}^{(0)} = 6490 kN; \kappa_2^{(0)} = 0,6$$

Parametry opisujące krzywą oporu podstawy w stanie „0” przyjmują wartości:

$$C_1^{(0)} = 0,00139 \frac{m}{MN}; \kappa_1^{(0)} = 0,47; N_{gr1}^{(0)} = 4282 kN$$

Następnie dla zmienionej długości i średnicy pała:

$$H^{(1)} = 29m; D^{(1)} = 1,1m;$$

wyznaczono nowe parametry równania M-K opisujące krzywą dla pała o zmienionej długości oraz średnicy:

$$\frac{C_1^{(1)}}{C_2^{(1)}} = \frac{\left(\frac{C_1^{(0)}}{C_2^{(0)}} - 1\right) \left(\frac{H^{(1)}}{D^{(1)}}\right)^{2/3}}{\left(\frac{H^{(0)}}{D^{(0)}}\right)^{2/3}} + 1 = \frac{(2,56 - 1) \cdot (26,36)^{2/3}}{(27,5)^{2/3}} + 1 = 2,52$$

$$C_1^{(1)} = C_1^{(0)} \cdot \frac{D^{(0)}}{D^{(1)}} = 0,00139 \cdot \frac{1}{1,1} = 0,00126 \frac{m}{MN}$$

czyli:

$$C_2^{(1)} = 0,000501 \frac{m}{MN}$$

oraz:

$$\kappa_2^{(1)} = \kappa_2^{(0)} \frac{\sqrt{\frac{C_1^{(1)}}{C_2^{(1)}} - 1}}{\sqrt{\frac{C_1^{(0)}}{C_2^{(0)}} - 1}} = 0,6 \cdot \frac{\sqrt{2,52 - 1}}{\sqrt{2,56 - 1}} = 0,586$$

Wynika z tego, że:

$$\kappa_1^{(1)} = \ln(1 + \kappa_2^{(1)}) = \ln(1 + 0,586) = 0,461$$

Na podstawie równania (4.60) obliczono opór graniczny podstawy, który jest równy:

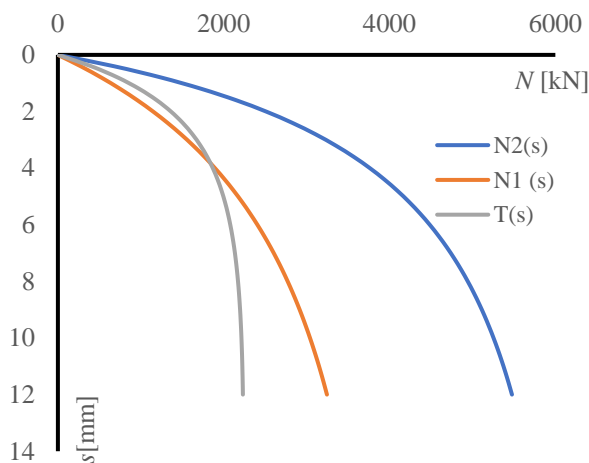
$$N_{gr1}^{(1)} = N_{gr1}^{(0)} \left(\frac{D^{(1)}}{D^{(0)}} \right)^{5/3} \left(\frac{H^{(1)}}{H^{(0)}} \right)^{1/3} = 4282 \cdot \left(\frac{1,1}{1} \right)^{5/3} \cdot \left(\frac{29}{27,5} \right)^{1/3} = 5109 \text{ kN}$$

Co pozwala wyznaczyć ostatni parametr z zależności (4.69):

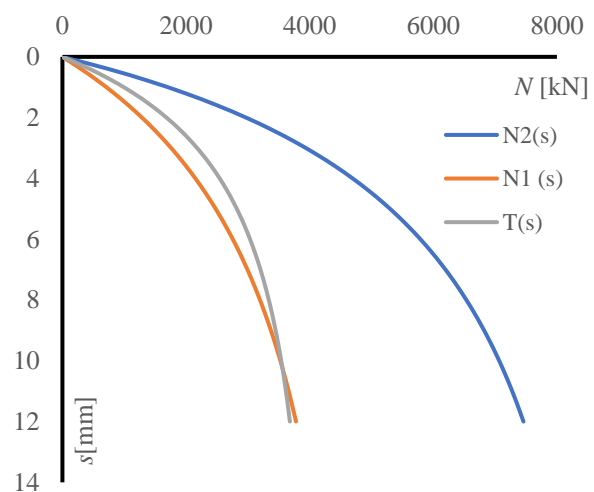
$$\frac{N_{gr1}^{(1)}}{N_{gr2}^{(1)}} = \left\{ \left[\frac{4282 \cdot 0,00139}{6490 \cdot 0,000542} - 1 \right] \cdot \frac{(26,36)^{1/3} \cdot \sqrt{0,586}}{(27,5)^{1/3} \cdot \sqrt{0,6}} + 1 \right\} \cdot 0,397 = 0,539$$

$$N_{gr2}^{(1)} = 9462 \text{ kN}$$

Ostatecznie można na podstawie równań (3.23) – (3.25) opisujących krzywe obciążenia w metodzie M-K opisać zależności Q - s dla zmienionej średnicy oraz długości pała, co przedstawiono na rys. 4.4 oraz rys. 4.5.



Rys. 4.4 Krzywe obciążenia dla pała pierwotnego (stan „0”)



Rys. 4.5 Krzywe obciążenia dla pała po konwersji (stan „1”)

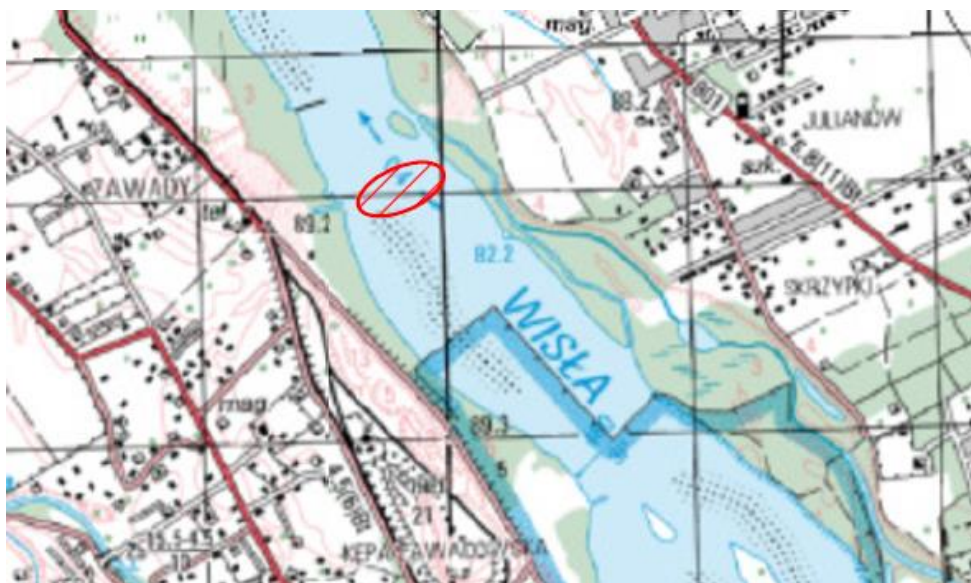
Należy jednak pamiętać, że powyższa metoda opiera się na liniowej teorii sprężystości, co może powodować niedokładność przy opisywaniu przebiegu nieliniowej części zależności Q - s . Zakres jej stosowania ograniczony jest jedynie do przypadku małych obciążeń. W celu uzyskania zgodności wyników konwersji w pełnym zakresie obciążenia, zarówno w części liniowej, jak i nieliniowej, konieczne było zaimplementowanie wyników dalszych badań. Szczególny nacisk położono na określenie zależności pozwalającej na konwersję wartości nośności granicznej pała N_{gr2} , jako że jest to parametr decydujący o bezpieczeństwie konstrukcji. Ostatecznie przyjęta metoda konwersji została opisana w rozdziale 8.

5. WERYFIKACJA PARAMETRÓW KRZYWEJ M-K

Istnieją różne podejścia do aproksymacji krzywej M-K, które zostały opisane m.in. w pracach [44, 59, 70]. Do poprawnego opisanie zależności obciążenie - osiadanie pała po konwersji, konieczne jest wykorzystanie wyników próbnego obciążenia statycznego do dokładnego wyznaczenia wartości parametrów opisujących krzywą M-K w stanie „0”. W niniejszym rozdziale przeprowadzono analizę numeryczną, która ma na celu zminimalizowanie wpływu niedokładności pomiarowych, na estymowane wartości parametrów M-K. Przeprowadzone eksperymenty numeryczne dotyczyły porównania i przanalizowania aproksymowanych wartości parametrów M-K otrzymanych różnymi metodami. W rezultacie umożliwiło to rekomendowanie optymalnej metody estymacji, która następnie będzie mogła być wykorzystana do sformułowania metody konwersji w pełnym zakresie obciążenia.

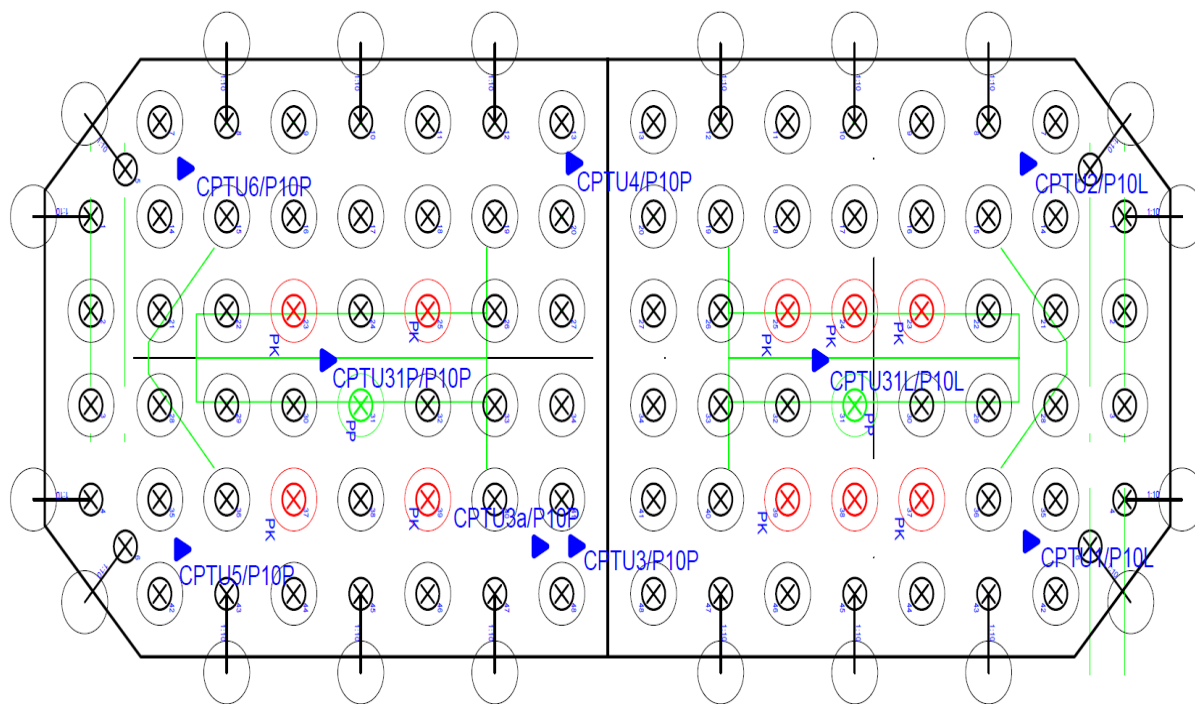
5.1 Testy statyczne w pełnym zakresie obciążenia

Badania próbnym obciążeniem statycznym w pełnym zakresie obciążenia, dzięki którym możliwe było przeprowadzenie analiz zawartych w niniejszej rozprawie, zostały wykonane i udostępnione dla celów naukowych przez firmę Energopol S.A. Szczecin [85]. Testy statyczne przeprowadzone zostały na budowie podpór mostu przez Wisłę będącego częścią inwestycji dotyczącej drogi ekspresowej S2 w Warszawie. Przybliżoną lokalizację przedstawiono na rys. 5.1.



Rys. 5.1 Przybliżona lokalizacja podpory 10 [85]

W przeprowadzonych badaniach wykorzystano pale CFA o średnicach podstawy od 1 do 2m oraz o długości od 27,5 do 33,5m. Układ pali pod jedną z podpór przedstawiono na rys. 5.2.



Rys. 5.2 Rozmieszczenie pali pod jedną z podpór [85]

W efekcie przeprowadzonych testów statycznych uzyskano zbiór wartości s_i opisujących osiadanie pala oraz odpowiadających im wartości obciążenia N_i . Dla każdego z pali przeprowadzono 23 odczyty. Na podstawie zbioru wartości $\{s_i, N_i\}$ otrzymanego w wyniku badania próbnym obciążeniem statycznym możliwe było sporządzenie wykresu zależności między obciążeniem i osiadaniem ($Q-s$). Wyniki testów statycznych dla analizowanych pali zamieszczono w załączniku A. Na rys. 5.3 i rys. 5.4 przedstawiono karty otworu do przekroju geologicznego w miejscu wykonania pala 31P-10P oraz 31L-10L.

Profil	Stacja [m]	Głębokość zwiędziada wody [m p.p.l.]	Przebieg [m]	Opis Litologiczny	Symbol gruntu	IL	ID				
1	2	3	4	5	6	7	8				
	1.0	1.7	1.70	nasyp budowlany	nB(Pd)		0.26				
	2.0		1.70	nasyp budowlany	nB(Pd+Ps)		0.33				
	3.0		3.00	nasyp budowlany			0.17				
	4.0	6.00		6.00	piasek średni przewarstwiony piaskiem drobnym	Ps/Pd		0.49			
	5.0			7.70	pył (B) przewarstwiony piaskiem pylastym	Π//P _z		0.24			
	6.0	8.6	8.60	Piasek drobny przewarstwiony piaskiem średnim	Pd//Ps		0.79				
	7.0							13.50	Piasek drobny	Pd	0.94
	8.0							14.80	piasek pylasty	P _z	0.94
	9.0	16.50	piasek pylasty	0.81							
	10.0	17.40	17.40	il (D) przewarstwiony ilem pylastym	V//I _z		0.02				
	11.0	18.90						pył (B)	Π	0.10	
	12.0	19.50	19.50	il (D)	I		0.02				
	13.0	24.40									
	14.0										

Rys. 5.3 Karta otworu do przekroju geologicznego w miejscu wykonania pała 31P-10P [85]

Profil	Skala [m]	Głębokość zwiarcia wody [m p.p.l.]	Przelot [m]	Opis Litologiczny	Symbol gruntu	IL	ID
1	2	3	4	5	6	7	8
		1.2		nasyp budowlany	nB(Pg+Pd)	0.30	
	2.0		1.20	nasyp budowlany	nB(Pd)		0.49
	4.0		2.30	nasyp budowlany			0.34
	6.0		4.70	piasek średni przewarstwiony piaskiem drobnym	Ps//Pd		0.45
	8.0		7.90	piasek średni przewarstwiony piaskiem drobnym			0.57
	10.0		9.00	żwir z domieszką otoczek i głazów	Ż+KO		0.71
	12.0		10.00	piasek średni	Ps		0.55
	14.0		14.20				
	16.0		15.50	pył (B) przewarstwiony gliną pylastą	π//Gπ	0.19	
	18.0		17.30	il piaszczysty (D)	Ip	0.07	
	20.0		20.00	il (D)	I		0.04
	21.00		21.00	il (D)			0.01
	22.00		22.00	gлина pylasta (B)	Gπ	0.10	
	24.0		23.50	il (D)	I		0.02
	24.00		24.00	il (D)			0.00
	24.50		24.50	il (D)			0.02
27.10		27.10	il piaszczysty (D) przewarstwiony piaskiem pylastym	Ip//Pπ	0.00		
28.50		28.50					

Rys. 5.4 Karta otworu do przekroju geologicznego w miejscu wykonania pała 31L-10L [85]

5.2 Aproksymacja w przypadku trzech parametrów poddanych optymalizacji

W niniejszym punkcie przeanalizowane zostały trzy metody aproksymacji, w których optymalizacji poddawane są wszystkie parametry krzywej M-K, czyli N_{gr2} , κ_2 , C_2 . Poniższą analizę przeprowadzono dla trzech pali 36N-10L, 31-10L, 38-10P.

Metoda I opiera się na aproksymacji parametrów C_2 , N_{gr2} względem założonych wartości κ_2 , zmieniających się w określonym przedziale, w większości praktycznych przypadków $\kappa_2 \in \langle 0; 4 \rangle$. Algorytm obliczeniowy przedstawiono w załączniku B. Wychodząc z równania (3.19), które dla $\kappa_2 = 0$ można zapisać w postaci (3.44):

$$s_i = -C_2 N_{gr2} \ln \left[1 - \frac{N_i}{N_{gr2}} \right] \quad (5.1)$$

Po podstawieniu:

$$A = C_2 N_{gr2} \quad (5.2)$$

Otrzymano ostateczną postać równania (5.1) wykorzystaną w obliczeniach metodą I.

$$s_i = -A \ln \left[1 - \frac{N_i}{N_{gr2}} \right] \quad (5.3)$$

Współczynnik A można wyznaczyć na podstawie zbioru wartości $\{N_i, s_i\}$:

$$A = \frac{\sum (s_i Y_i)}{\sum (Y_i^2)} \quad (5.4)$$

gdzie dla $\kappa_2 = 0$:

$$Y_i = -\ln \left[1 - \frac{N_i}{N_{gr2}(0)} \right] = \ln \left[\frac{1}{1 - \frac{N_i}{N_{gr2}(0)}} \right] \quad (5.5)$$

Kwadrat odchyłki można wówczas wyznaczyć w następujący sposób:

$$\delta^2 = (s_i - AY_i)^2 \quad (5.6)$$

Analogiczny tok postępowania można przeprowadzić dla wartości $\kappa_2 \neq 0$. Po podstawieniu współczynnika A równanie krzywej M-K przybiera postać:

$$s_i = A \frac{\left(1 - \frac{N_i}{N_{gr2}}\right)^{-\kappa_2} - 1}{\kappa_2} \quad (5.7)$$

Oznacza to, że dla wartości $\kappa_2 \neq 0$ można zapisać równanie (5.8):

$$Y_i = \frac{\left(1 - \frac{N_i}{N_{gr2}}\right)^{-\kappa_2} - 1}{\kappa_2} \quad (5.8)$$

W rezultacie dla każdej wartości κ_2 otrzymujemy optymalną wartość C_2 , N_{gr2} oraz odpowiadającą jej minimalną sumę kwadratów odchyłek, która pozwala na znalezienie najlepiej dopasowanej krzywej.

Metoda II, której algorytm obliczeniowy został przedstawiony w załączniku B, opiera się na optymalizacji parametru κ_2 względem sztywno założonych wartości N_{gr2} . Parametr C_2 nie bierze udziału w aproksymacji, jest on wyznaczany na końcu obliczeń. Kwadrat odchyłki w takim przypadku jest równy:

$$\delta^2 = (y_{pom} - y_{obl})^2 \quad (5.9)$$

gdzie:

$$y_{pom} = \frac{s_{i+1}}{s_i} \quad (5.10)$$

oraz:

$$y_{obl} = \frac{\left(1 - \frac{N_{i+1}}{N_{gr2}}\right)^{-\kappa_2} - 1}{\left(1 - \frac{N_i}{N_{gr2}}\right)^{-\kappa_2} - 1} \quad (5.11)$$

Po wyznaczeniu optymalnych wartości N_{gr2} oraz κ_2 można obliczyć parametr C_2 ze wzoru:

$$C_2 = \frac{\sum(s_i X_i)}{\sum(X_i)^2} \quad (5.12)$$

gdzie:

$$X_i = N_{gr2} \frac{\left(1 - \frac{N_i}{N_{gr2}}\right)^{-\kappa_2} - 1}{\kappa_2} \quad (5.13)$$

Wadą metody II jest wyznaczenie δ^2 z różnicy proporcji osiadania, zamiast tak jak w metodzie I, z różnicy wartości osiadania. W przypadku mniej dokładnych zbiorów danych może to uniemożliwić uzyskanie odpowiedniego dopasowania aproksymowanej krzywej.

W **metodzie III** wszystkie parametry krzywej M-K otrzymywane są bezpośrednio, jako wynik optymalizacji. Kwadrat odchyłki możemy wyliczyć jako kwadrat różnicy osiadania pomierzonego oraz obliczonego. Sposób postępowania w tej metodzie przedstawiono w uproszczeniu poniżej. Pełen algorytm postępowania, wraz z wynikami obliczeń zamieszczono w załączniku B.

1) założyć:

$N_{i,max}$ – maksymalna wartość siły przyłożonej podczas próbnego obciążenia statycznego,

$N_{gr2,max}, \kappa_{2,max}$ - końce przyjętych przedziałów optymalizacji.

Δ - przyrost optymalizowanego parametru

2) założyć $\kappa_2 = 0.001$, $N_{gr2,1} = N_{i,max} + 100$;

3) wyznaczyć optymalną wartość C_2 metodą najmniejszych kwadratów;

$$\delta^2_i = (y_{pom} - y_{obl})^2 \quad (5.14)$$

$$y_{pom} = s_i \quad (5.15)$$

$$y_{obl} = C_2 N_{gr2} \frac{(1 - \frac{N_i}{N_{gr2}})^{-\kappa} - 1}{\kappa} \quad (5.16)$$

4) założyć $\kappa_2 = 0.001 + \Delta$;

5) powtórzyć kroki 2 i 3 do $\kappa_{2,max}$;

6) $\kappa_2 = 0.001 + 2 \cdot \Delta$, $N_{gr2} = N_{i,max} + \Delta$;

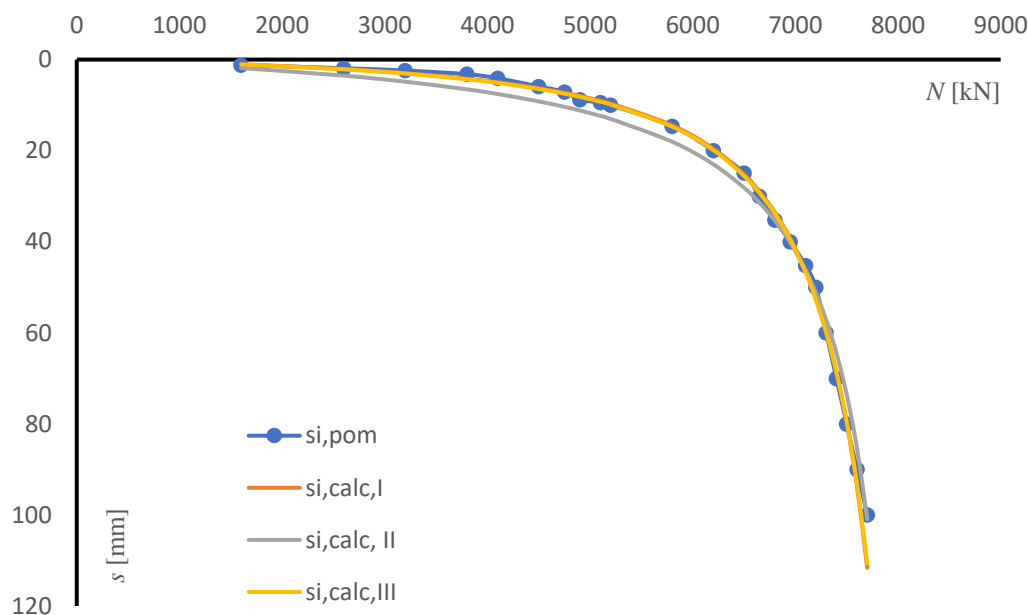
7) powtórzyć kroki 3-6 do $N_{gr2} = N_{gr2,max}$;

8) znaleźć $\min \sum \delta^2$ i odczytać związane z nią parametry κ_2, C_2, N_{gr2} .

Przeprowadzono obliczenia mające na celu przeanalizowanie powyższych metod w celu wyboru optymalnego sposobu wyznaczenia parametrów krzywej M-K, który będzie można wykorzystać do sformułowania metody konwersji. W pierwszym kroku przeprowadzono obliczenia trzema przedstawionymi powyżej metodami wykorzystując cały zbiór wartości $\{s_i, N_i\}$ otrzymany w wyniku testu statycznego. Wyniki obliczeń wraz ze schematami postępowania dla każdej z metod zamieszczono w załączniku B. W tab. 5.1 zestawiono parametry M-K obliczone metodami I-III dla trzech analizowanych pali. Na rys. 5.5 oraz w tab. 5.2. przedstawiono porównanie obliczonych oraz pomierzonych wartości osiadania dla przykładowego pala.

Tab. 5.1 Porównanie stałych równania M-K obliczonych metodami I-III dla całego zbioru wartości

Pal	Metoda I			Metoda II			Metoda III		
	N_{gr2} [kN]	κ_2 [-]	C_2 [mm/kN]	N_{gr2} [kN]	κ_2 [-]	C_2 [mm/kN]	N_{gr2} [kN]	κ_2 [-]	C_2 [mm/kN]
36N-10L	6590	0,8	0,00041	6590	0,64	0,00071	6590	0,81	0,0004
31-10L	8700	1,8	0,00048	8300	1,01	0,00093	8700	1,77	0,0005
38-10P	12500	0,8	0,00075	35700	8,81	0,00071	12400	0,71	0,0008



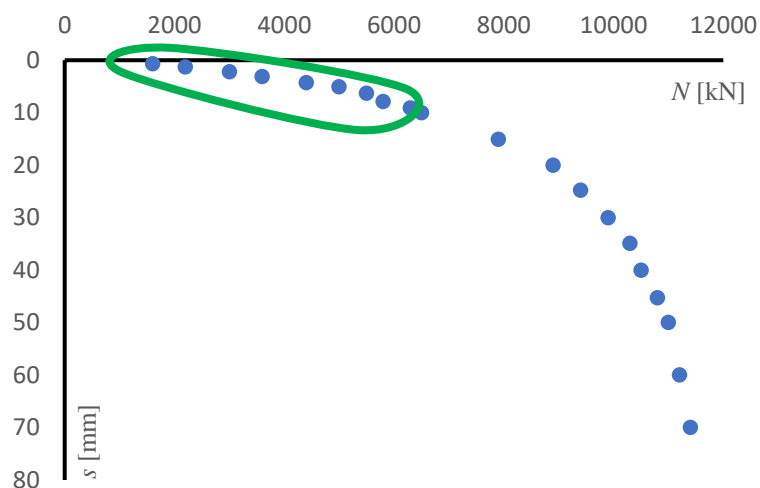
Rys. 5.5 Porównanie krzywych M-K obliczonych metodami I-III dla pala 31-10L

Tab. 5.2 Porównanie krzywych M-K obliczonych metodami I-III dla pala 31-10L

N_i [kN]	$S_{i,pom}$ [mm]	$S_{i,calc,I}$ [mm]	$S_{i,calc,II}$ [mm]	$S_{i,calc,III}$ [mm]
1600	1,2	1,025	1,829	1,064
2600	1,9	2,077	3,497	2,150
3200	2,4	2,978	4,813	3,076
3800	3,2	4,203	6,482	4,332
4100	4,1	4,988	7,497	5,135
4500	5,9	6,289	9,100	6,461
4750	7,1	7,295	10,286	7,485
4900	8,8	7,989	11,082	8,190
5100	9,4	9,043	12,261	9,259
5200	10	9,634	12,907	9,858
5800	14,6	14,450	17,877	14,722
6200	20	19,585	22,778	19,884
6500	24,9	25,253	27,892	25,556
6650	30	28,991	31,150	29,286
6800	35,2	33,580	35,063	33,856
6950	40	39,308	39,850	39,546
7100	45,2	46,595	45,841	46,766
7200	50	52,621	50,748	52,723
7300	60	59,886	56,641	59,890
7400	70	68,763	63,852	68,629
7500	80	79,779	72,875	79,448
7600	90	93,699	84,490	93,086
7700	100	111,670	100,000	110,643

Za optymalną uznano metodę I. Krzywe otrzymane tym sposobem obliczeń dają dobrą zgodność z wartościami pomierzonymi, podobnie jak w metodzie III, jednak przy znacznie krótszym czasie prowadzenia obliczeń.

Mając na celu określenie wpływu poszczególnych części zbioru wartości na dokładność przeprowadzonej optymalizacji parametrów M-K, w kolejnych krokach przeprowadzono obliczenia, w których uwzględniono jedynie część zbioru $\{s_i, N_i\}$ otrzymanego w wyniku testu statycznego w sposób przedstawiony schematycznie na rys.5.6. W tab. 5.3 przedstawiono wyniki obliczeń przeprowadzonych metodami I-III wykorzystując jedynie początkowe dziewięć wartości.

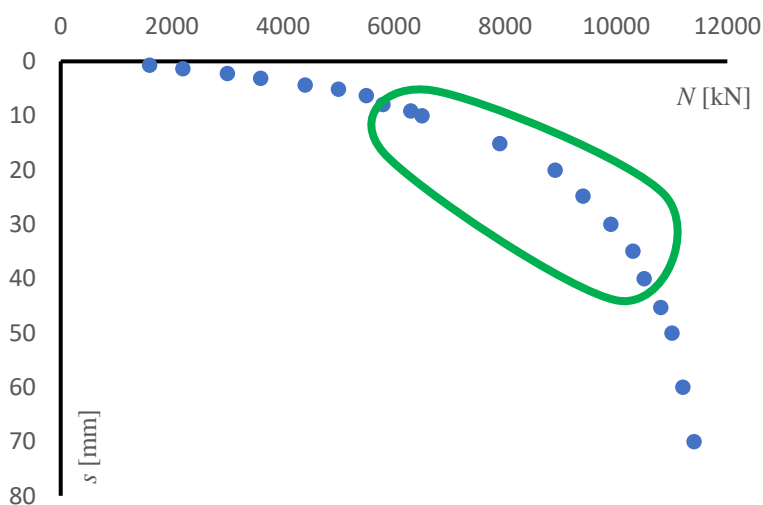


Rys. 5.6 Schemat danych wejściowych z wykorzystaniem początku zbioru wartości $s_{i,p}$

Tab. 5.3 Porównanie stałych równania M-K obliczonych metodami I-III dla początkowych wartości $\{s_i, N_i\}$

Pal	Metoda I			Metoda II			Metoda III		
	N_{gr2} [kN]	κ_2 [-]	C_2 [mm/kN]	N_{gr2} [kN]	κ_2 [-]	C_2 [mm/kN]	N_{gr2} [kN]	κ_2 [-]	C_2 [mm/kN]
36N-10L	6700	1,2	0,000369	5600	0,18	0,000549	5600	0,27	0,0005
31-10L	6600	1,2	0,000361	5600	0,01	0,000686	5600	0,29	0,0005
38-10P	15800	3,2	0,000455	12600	2,66	0,000361	7700	0,18	0,0006

W następnym kroku wykorzystano wartości znajdujące się w środku krzywej próbnego statycznego obciążenia od $n = 8$ do $n = 16$, co przedstawiono schematycznie na rys. 5.7. Następnie w tab. 5.4 porównano wyniki przeprowadzonych obliczeń.

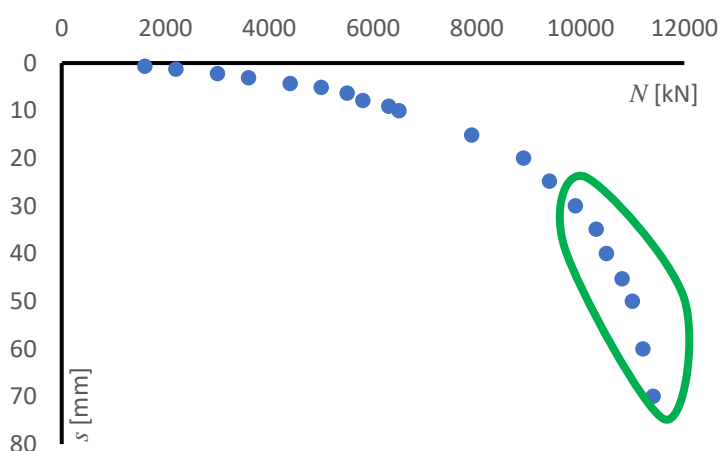


Rys. 5.7 Schemat danych wejściowych z wykorzystaniem środka zbioru wartości $s_{i,s}$

Tab. 5.4 Porównanie stałych równania M-K obliczonych metodami I-III dla środkowych wartości $\{s_i, N_i\}$

Pal	Metoda I			Metoda II			Metoda III		
	N_{gr2} [kN]	κ_2 [-]	C_2 [mm/kN]	N_{gr2} [kN]	κ_2 [-]	C_2 [mm/kN]	N_{gr2} [kN]	κ_2 [-]	C_2 [mm/kN]
36N-10L	6700	0,8	0,000537	8900	3,33	0,000253	6500	0,46	0,0007
31-10L	8250	1,4	0,000561	8250	1,34	0,000596	7350	0,47	0,0009
38-10P	12100	0,6	0,000829	12000	0,52	0,000890	11600	0,38	0,0009

W kolejnym kroku wykorzystano wartości znajdujące się na końcu krzywej od $n = 15$ do $n = 23$, co pokazano na rys. 5.8.

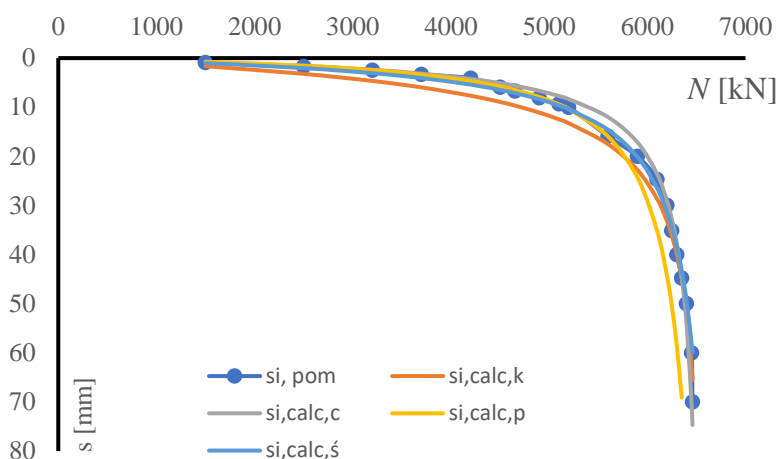
**Rys. 5.8** Schemat danych wejściowych z wykorzystaniem końca zbioru wartości $s_{i,k}$

Wyniki przeprowadzonych obliczeń metodami I-III dla trzech analizowanych pali przedstawiono w tab. 5.5.

Tab. 5.5 Porównanie stałych równania M-K obliczonych metodami I-III dla końcowych wartości $\{s_i, N_i\}$

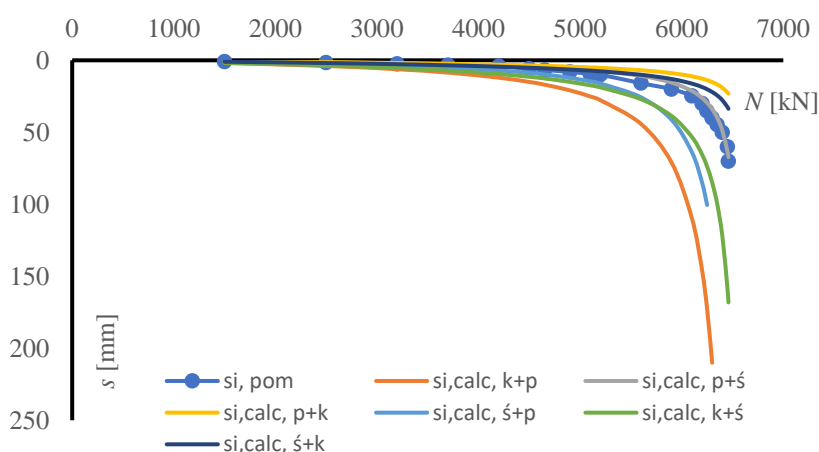
Pal	Metoda I			Metoda II			Metoda III		
	N_{gr2} [kN]	κ_2 [-]	C_2 [mm/kN]	N_{gr2} [kN]	κ_2 [-]	C_2 [mm/kN]	N_{gr2} [kN]	κ_2 [-]	C_2 [mm/kN]
36N-10L	6560	0,4	0,000923	6590	0,6	0,000803	6590	0,66	0,0006
31-10L	7800	0,6	0,00109	9400	2,33	0,000470	8000	0,48	0,0016
38-10P	12000	0,4	0,00105	14400	1,93	0,000473	12400	0,47	0,0011

Na rys. 5.9 przedstawiono obliczone wartości osiadania metodą I, wykorzystując do aproksymacji parametrów M-K zarówno całość zbioru $\{s_i, N_i\}$, jak również tylko jego części dla pala 36N-10L. Pozostałe wyniki przedstawiono w załączniku C.



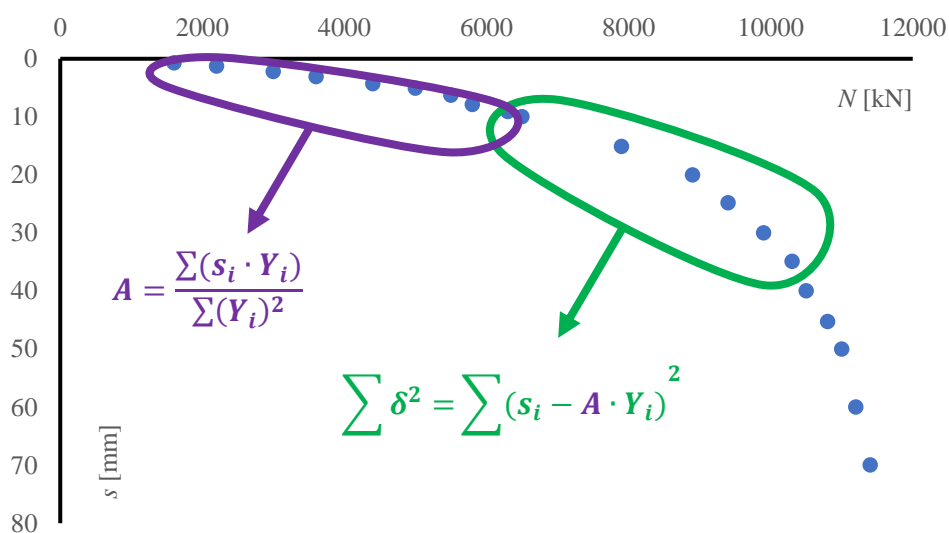
Rys. 5.9 Porównanie wartości osiadania w przypadku estymacji parametrów M-K przeprowadzonej metodą I dla pała 36N-10L, z podziałem zbioru wartości na części

Następnie sprawdzono dopasowanie krzywych M-K otrzymanych w przypadku wykorzystania parametrów κ_2 oraz C_2 wyznaczonych oddzielnie, dla różnych części zbioru $\{s_i, N_i\}$. Przykładowo $s_{i,calc, k+p}$ oznacza osiadanie obliczone dla wartości κ_2 wyznaczonej dla końcowych wartości zbioru wartości ($s_{i,calc,k}$) przedstawione w tab. 5.5, oraz wartości C_2 wyznaczonej dla początkowych wartości ($s_{i,calc,p}$) przedstawioną w tab. 5.3. Z uwagi na niewielkie różnice nośność graniczną w każdym przypadku przyjmowano jako wartość obliczoną dla całego zbioru. Na rys. 5.10 przedstawiono krzywe M-K uzyskane metodą I dla pała 36N-10L.



Rys. 5.10 Porównanie krzywych $Q-s$, w przypadku estymacji parametrów M-K przeprowadzonej metodą I, dla pała 36N-10L, przy połączeniu wyników uzyskanych dla różnych części zbioru wartości

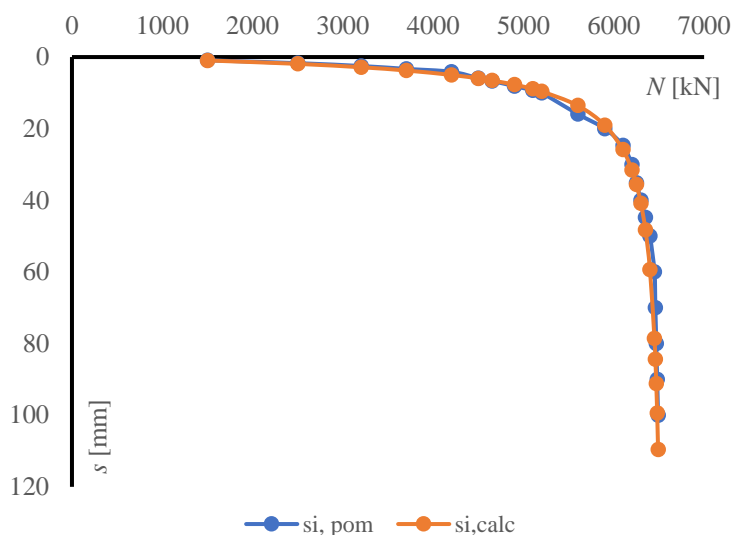
Rezultaty obliczeń przedstawione na rys. 5.10 wskazują, że w przypadku wykorzystania wartości parametru κ_2 oraz C_2 wyznaczonych niezależnie, dla różnych części zbioru $\{s_i, N_i\}$ uzyskane zostaną błędne krzywe M-K. Różnice w obliczonych wartościach osiadania są wyraźne. W większości przypadków różnice są po stronie niebezpiecznej, co powoduje niedoszacowanie rzeczywistych wartości osiadania pała w gruncie. W związku z tym takie podejście zostało uznane za niepoprawne, w dalszej części analizy, wartości otrzymane takim sposobem zostały pominięte. Jako ostatnią część analizy aproksymowano parametry M-K z wykorzystaniem zmodyfikowanej metody I, której rezultaty przedstawiono w załączniku D. Modyfikacja polega na obliczeniu parametru A , opisanego równaniami (5.2) ÷ (5.4), z innej części zbioru, niż odbywa się poszukiwanie $\min \sum \delta^2$. Ideę zmodyfikowanej metody I przedstawiono na rys. 5.11, natomiast obliczone parametry M-K dla trzech analizowanych pali zestawiono w tab. 5.6. Krzywa M-K otrzymana, jako rezultat obliczeń prowadzonych zmodyfikowaną metodą I dla pała 36N-10L pokazana została na rys. 5.12.



Rys. 5.11 Idea zmodyfikowanej metody I

Tab. 5.6 Aproksymowane parametry M-K zmodyfikowaną metodą I

Pal	Aproksymacja		
	N_{gr2} [kN]	κ_2 [-]	C_2 [mm/kN]
36N-10L	6560	0,7	0,000509
31-10L	8000	1,29	0,000525
38-10P	13700	1,31	0,000658



Rys. 5.12 Krzywa M-K estymowana dla pala 36N-10L zmodyfikowaną metodą I

Na podstawie testów statycznych, które zostały przeprowadzone do osiągnięcia nośności pali, można określić pomierzoną wartość nośności granicznej $N_{gr2,pom}$, jako:

$$N_{gr2,pom} = \max N_i \quad (5.15)$$

Wynika z tego, że pomierzone nośności graniczne trzech analizowanych pali przyjmują wartości zestawione w tab. 5.7.

Tab. 5.7 Pomierzone nośności graniczne analizowanych pali

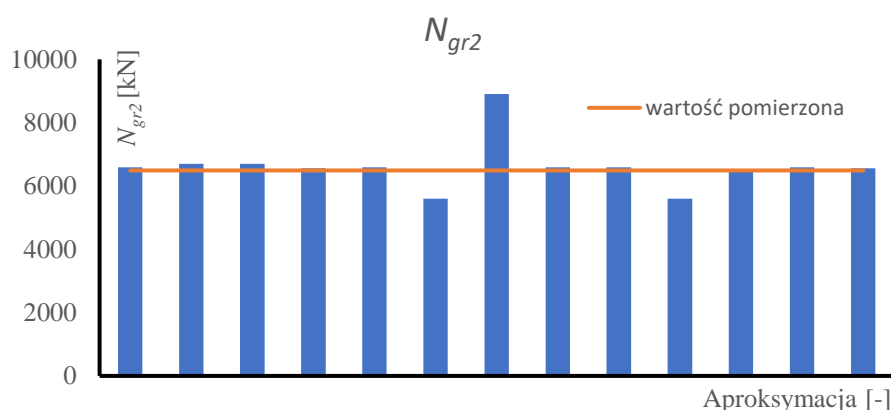
Pal	$N_{gr2,pom}$ [kN]
36N-10L	6490
31-10L	7700
38-10P	11900

W tab. 5.8 zestawiono wyniki aproksymacji przedstawionymi powyżej sposobami dla pala 36N-10L, wraz z porównaniem między pomierzonymi, a obliczonymi wartościami nośności granicznej N_{gr2} . Podejście przedstawione na rys. 5.10 w widoczny sposób nie prowadzi do poprawnego rozwiązania, w związku z czym zostało one pominięte w dalszej części pracy.

Tab. 5.8 Zestawienie parametrów krzywej M-K, wyznaczonych dla pała 36N-10L, różnymi sposobami estymacji

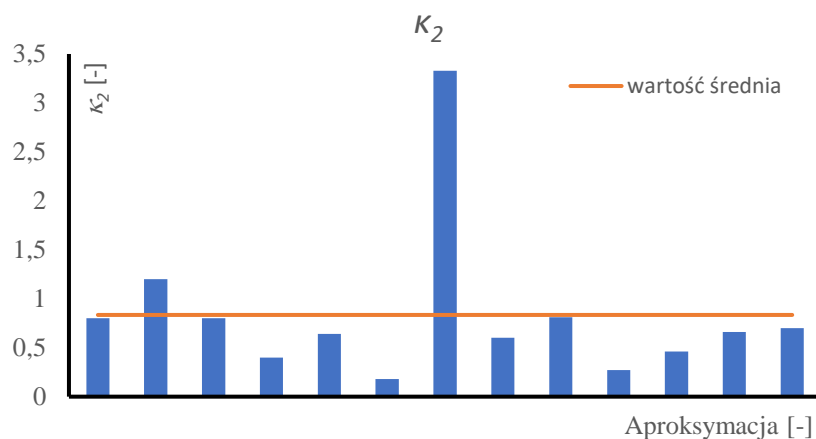
Aproksymacja	κ_2 [-]	C_2 [mm/kN]	$N_{gr2,opt}$ [kN]	$\frac{N_{gr2,opt}}{N_{gr2,pom}}$
Metoda I, c	0,8	0,00041	6590	1,02
Metoda I, p	1,2	0,00037	6700	1,03
Metoda I, ś	0,8	0,00054	6700	1,03
Metoda I, k	0,4	0,00092	6560	1,01
Metoda II, c	0,64	0,00071	6590	1,02
Metoda II, p	0,18	0,000549	5600	0,86
Metoda II, ś	3,33	0,000253	8900	1,37
Metoda II, k	0,6	0,000803	6590	1,02
Metoda III, c	0,81	0,0004	6590	1,02
Metoda III, p	0,27	0,0005	5600	0,86
Metoda III, ś	0,46	0,0007	6500	1,00
Metoda III, k	0,66	0,0006	6590	1,02
Metoda I, mod	0,7	0,000509	6560	1,01

Aproksymowane wartości nośności granicznej $N_{gr2,opt}$ niezależnie od przyjętej metody, jak również niezależnie od wybranej części zbioru wartości $\{s_i, N_i\}$ pozostają w zdecydowanej większości przypadków zbliżone do wartości pomierzonej w teście statycznym $N_{gr2,pom}$. Zostało to przedstawione na rys. 5.13. Było to również przedmiotem badań przedstawionych przez Meyera i Stacheckiego w pracy [50].

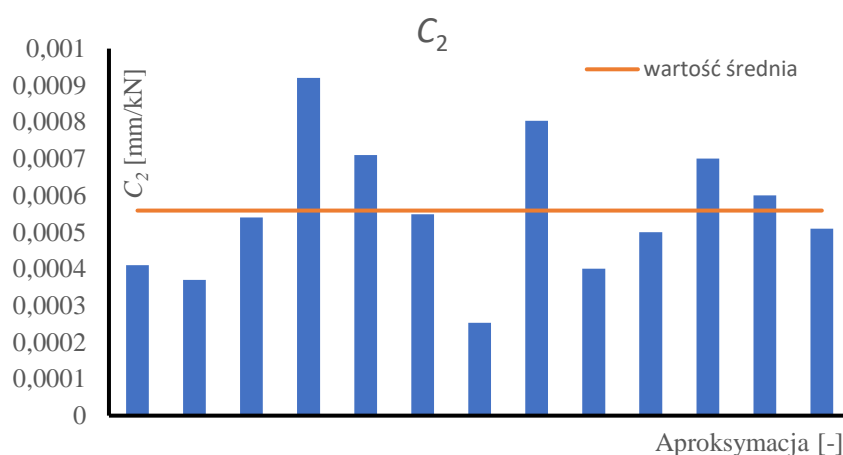
**Rys. 5.13** Graficzne porównanie wartości N_{gr2} dla pała 36N-10L

W przypadku pozostałych parametrów opisujących krzywą M-K, czyli κ_2 oraz C_2 zaobserwowano większe zróżnicowanie otrzymanych rezultatów, co zostało przedstawione na rys. 5.14 oraz rys. 5.15. Nie ma możliwości uzyskania wartości współczynników κ_2 oraz C_2

pomierzonych bezpośrednio w teście statycznym, tak jak zostało to przedstawione dla nośności granicznej. Na podstawie przeprowadzonej analizy, nie było możliwe jednoznaczne stwierdzenie, która metoda aproksymacji byłaby rekomendowana w przypadku analizowanych pali.



Rys. 5.14 Graficzne porównanie wartości κ_2 dla pala 36N-10L



Rys. 5.15 Graficzne porównanie wartości C_2 dla pala 36N-10L

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń można stwierdzić, że wartości nośności granicznej pala N_{gr2} , która jest podstawowym parametrem decydującym o bezpieczeństwie, są podobne w analizowanych podejściach obliczeniowych. Do obliczenia nośności granicznej rekomenduje się wykorzystanie całego zbioru wartości otrzymanego w wyniku testu statycznego oraz przeprowadzenie optymalizacji metodą I z uwagi na efektywność prowadzonych obliczeń oraz dokładność otrzymanych wyników. W przypadku κ_2 , C_2 różnice są bardziej wyraźne. Niedokładności C_2 mogą być spowodowane błędami pomiarowymi wynikającymi z np. dopasowywania się pala do gruntu, co jest przedmiotem badań opisanych

w pracach Meyera i Wasiluka [59, 60]. W przypadku κ_2 można wykorzystać również badania Meyera i Siemaszko [46], które pozwalają obliczyć wartość parametru na podstawie wyniku badania sondą statyczną. W niniejszej rozprawie zdecydowano się kontynuować analizę statystyczną w pkt. 5.3 i 5.4. Umożliwiło to ostatecznie przedstawienie rekomendowanej metody estymacji krzywej M-K, która została przedstawione w pkt. 5.5.

5.3 Aproksymacja metodą jednego równania

Na podstawie badań przeprowadzonych w pkt. 5.2 do dalszej analizy przyjęto jako wartości obliczonej nośności granicznej $N_{gr2,obl}$ rezultaty aproksymacji $N_{gr2,opt}$, optymalizowane metodą I z wykorzystaniem całego zbioru wartości, które zostały zestawione w tab. 5.9.

Tab. 5.9 Obliczone nośności graniczne przyjęte do dalszych obliczeń.

Pal	$N_{gr2,obl}$ [kN]
36N-10L	6590
31-10L	8700
38-10P	12500

Znając wartość nośności granicznej przedstawiono w poniższym punkcie aproksymację dotyczącą jedynie dwóch parametrów, czyli κ_2 oraz C_2 . Obliczenia przeprowadzono metodą najmniejszych kwadratów, opierając się na wyznaczeniu optymalnych parametrów C_2 , dla kolejnych wartości κ_2 . Algorytm postępowania w metodzie aproksymacji przy dwóch parametrach optymalizowanych znajduje się w załączniku E. Poniżej przedstawiono uproszczony schemat postępowania, analogicznie, jak w pkt. 5.2. Wychodząc z równania krzywej M-K (3.17), które dla $\kappa_2 = 0$ można zapisać w następującej postaci:

$$s_i = -C_2 N_{gr2,obl} \ln \left[1 - \frac{N_i}{N_{gr2,obl}} \right] \quad (5.17)$$

Można obliczyć kwadrat odchyłki dla każdej wartości s_i z następującego wzoru:

$$\delta^2_i = (s_i - C_2 Y_i)^2 \quad (5.18)$$

gdzie dla $\kappa_2 = 0$

$$Y_i = -N_{gr2} \ln \left[1 - \frac{N_i}{N_{gr2,obl}} \right] = N_{gr2} \ln \left[\frac{1}{1 - \frac{N_i}{N_{gr2,obl}}} \right] \quad (5.19)$$

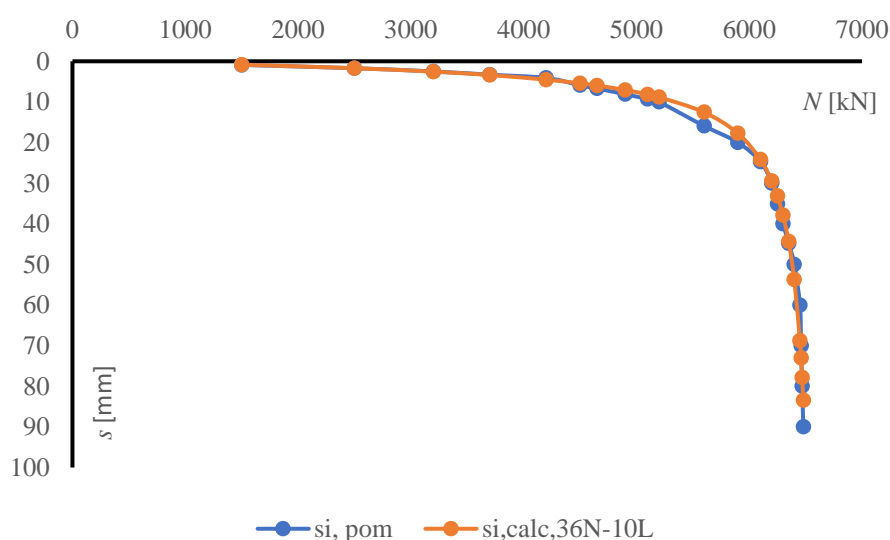
oraz

$$C_2 = \frac{\sum (s_i Y_i)}{\sum (Y_i)^2} \quad (5.20)$$

Dla wartości $\kappa_2 \neq 0$ należy korzystać z klasycznej postaci równania krzywej M-K (3.17), co powoduje, że po przekształceniach otrzymano:

$$Y_i = N_{gr2,obl} \frac{\left(1 - \frac{N_i}{N_{gr2,obl}} \right)^{-\kappa_2} - 1}{\kappa_2} \quad (5.21)$$

Dla $\kappa_2 \neq 0$ wartości δ^2 oraz stałą C_2 można obliczyć analogicznie, jak dla wartości $\kappa_2 = 0$. Szczegółowe wyniki obliczeń znajdują się w załączniku E, natomiast na rys. 5.16 przedstawiono porównanie krzywej obciążenie-osiadanie, otrzymanej bezpośrednio w wyniku badania statycznego z krzywą M-K aproksymowaną dla pala 36N-10L, w pełnym zakresie obciążenia dla całego zbioru pomierzonych wartości $\{s_i, N_i\}$.



Rys. 5.16 Obliczona metodą jednego równania oraz pomierzona krzywa $N-s$ dla pala 36N-10L w przypadku uwzględnienia całego zbioru wartości

W tab. 5.10 oraz tab. 5.11 zestawiono wartości stałych równania M-K obliczonych na podstawie analizy przeprowadzonej w niniejszym punkcie, z uwzględnieniem różnych części zbioru wartości dla trzech analizowanych pali.

Tab. 5.10 Obliczone wartości parametrów M-K metodą jednego równania z uwzględnieniem całości zbioru $\{s_i, N_i\}$ oraz jego początkowych wartości

Pal	Dane	Aproksymacja			
	N_{gr2} [kN]	Całość		Początek	
		κ_2 [-]	C_2 [mm/kN]	κ_2 [-]	C_2 [mm/kN]
36N-10L	6590	0,76	$4,5 \cdot 10^{-4}$	1,06	$3,9 \cdot 10^{-4}$
31-10L	8700	1,7	$5,5 \cdot 10^{-4}$	2,7	$3,0 \cdot 10^{-4}$
38-10P	12500	0,66	$8,8 \cdot 10^{-4}$	2,1	$4,7 \cdot 10^{-4}$

Tab. 5.11 Obliczone wartości parametrów M-K metodą jednego równania z uwzględnieniem środkowych oraz końcowych wartości zbioru $\{s_i, N_i\}$

Pal	Dane	Aproksymacja			
	N_{gr2} [kN]	Środek		Koniec	
		κ_2 [-]	C_2 [mm/kN]	κ_2 [-]	C_2 [mm/kN]
36N-10L	6590	0,7	$5,3 \cdot 10^{-4}$	0,7	$5,1 \cdot 10^{-4}$
31-10L	8700	1,8	$4,9 \cdot 10^{-4}$	1,8	$4,8 \cdot 10^{-4}$
38-10P	12500	0,8	$7,6 \cdot 10^{-4}$	0,74	$8,0 \cdot 10^{-4}$

Na podstawie analizy powyższych wyników można stwierdzić, że rozrzut obliczonych wartości κ_2 oraz C_2 , wykorzystując wybraną część zbioru wartości, jest wyraźnie mniejszy. Zdecydowano się na przeprowadzenie jeszcze jednego kroku weryfikacji, który będzie polegał na porównaniu dokładności krzywych M-K opisanych estymowanymi parametrami, przedstawionymi w tab. 5.10 i tab. 5.11, z wynikami aproksymacji opisanej w pkt. 5.4. Na tej podstawie w pkt. 5.5. przedstawiony zostanie ostateczny wybór rekomendowanej metody aproksymacji.

5.4 Aproksymacja metodą dwóch równań

Mając na celu dalszą weryfikację wartości κ_2 oraz C_2 przeprowadzona została aproksymacja metodą dwóch równań. Podstawowa różnica między nią, a metodą opierającą się na jednym równaniu, opisaną w pkt 5.3, polega na estymacji parametrów krzywej M-K z wykorzystaniem równania M-K zapisanego dla dwóch następujących po sobie punktów krzywej próbnego obciążenia statycznego pala. Przeprowadzenie obliczeń w taki sposób ma na celu wyeliminowanie błędów pomiarowych, które mogą się znajdować w analizowanych zbiorach wartości. Po odjęciu od siebie równań dla dwóch kolejnych punktów zbioru $\{s_i, N_i\}$ otrzymano ostatecznie dla $\kappa_2 \neq 0$:

$$s_{i+1} - s_i = C_2 N_{gr2} \frac{\left(1 - \frac{N_{i+1}}{N_{gr2}}\right)^{-\kappa_2} - \left(1 - \frac{N_i}{N_{gr2}}\right)^{-\kappa_2}}{\kappa_2} \quad (5.22)$$

Powyższą zależność można przekształcić do równania prostej po wykonaniu poniższych przekształceń:

$$Y_i = s_{i+1} - s_i \quad (5.23)$$

$$A = C_2 N_{gr2} \rightarrow C_2 = \frac{A}{N_{gr2}} \quad (5.24)$$

$$X_i = \frac{\left(1 - \frac{N_{i+1}}{N_{gr2}}\right)^{-\kappa_2} - \left(1 - \frac{N_i}{N_{gr2}}\right)^{-\kappa_2}}{\kappa_2} \quad (5.25)$$

Otrzymano ostatecznie:

$$Y_i = AX_i \quad (5.26)$$

Wartości A wyznaczono z równania:

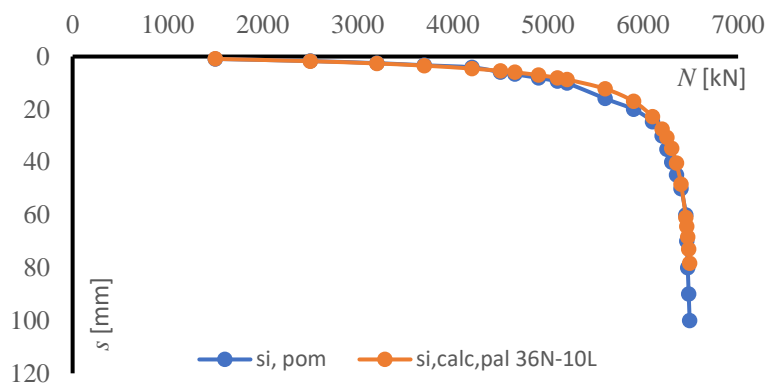
$$Y_i = AX_i \rightarrow A = \frac{\sum(X_i Y_i)}{\sum(X_i^2)} \quad (5.27)$$

Można wówczas zapisać:

$$\delta^2_i = (Y_i - AX_i)^2 \quad (5.28)$$

W obliczeniach metodą dwóch równań uwzględniono jedynie punkty od $i = 1$ do $i = 21$, z uwagi na duże przyrosty osiadań spowodowane zbliżeniem obciążenia do nośności granicznej

dla dwóch ostatnich odczytów, co skutkowało zmniejszeniem dokładności obliczeń w odniesieniu do całej krzywej osiadania. Podziału zbioru danych $\{s_i, N_i\}$ dokonano analogicznie, jak w pkt. 5.2 i 5.3. Na rys. 5.17 pokazano przykładowy rezultat optymalizacji dla jednego z a pali. Pozostałe rezultaty przedstawiono w załączniku F. Natomiast parametry równania M-K estymowane metodą dwóch równań zestawiono w tab. 5.12 oraz tab. 5.13.



Rys. 5.17 Obliczona metodą dwóch równań oraz pomierzona krzywa $Q-s$ dla pala 36N-10L w przypadku uwzględnienia całego zbioru wartości

Tab. 5.12 Obliczone wartości parametrów M-K metodą dwóch równań z uwzględnieniem całości oraz początkowych wartości zbioru $\{s_i, N_i\}$

Pal	Dane	Aproksymacja			
	N_{gr2} [kN]	Całość		Początek	
		κ_2 [-]	C_2 [mm/kN]	κ_2 [-]	C_2 [mm/kN]
36N-10L	6590	0,7	$4,7 \cdot 10^{-4}$	1,2	$3,3 \cdot 10^{-4}$
31-10L	8700	1,8	$4,8 \cdot 10^{-4}$	2,05	$3,7 \cdot 10^{-4}$
38-10P	12500	0,65	$9,1 \cdot 10^{-4}$	0,75	$8,1 \cdot 10^{-4}$

Tab. 5.13 Obliczone wartości parametrów M-K metodą dwóch równań z uwzględnieniem środkowych oraz końcowych wartości zbioru $\{s_i, N_i\}$

Pal	Dane	Aproksymacja			
	N_{gr2} [kN]	Środek		Koniec	
		κ_2 [-]	C_2 [mm/kN]	κ_2 [-]	C_2 [mm/kN]
36N-10L	6590	0,61	$6,2 \cdot 10^{-4}$	0,75	$4,0 \cdot 10^{-4}$
31-10L	8700	1,4	$7,7 \cdot 10^{-4}$	1,8	$4,7 \cdot 10^{-4}$
38-10P	12500	0,65	$8,7 \cdot 10^{-4}$	0,65	$9,1 \cdot 10^{-3}$

5.5 Wybór sposobu estymacji

W poniższym punkcie przedstawiono rekomendowany sposób aproksymowania parametrów krzywej M-K oraz wyniki przeprowadzonych obliczeń dla analizowanych pali. Aby wybrać podejście charakteryzujące się największą dokładnością zdecydowano się porównać wartości sumy błędów kwadratowych δ^2 . Wyboru rekomendowanej metody dokonano z uwzględnieniem wszystkich analizowanych pali. W tab. 5.14 zestawiono wartości nośności granicznej $N_{gr2,obl}$ obliczonej wykorzystując metodę I przy trzech parametrach optymalizowanych, zgodnie z wnioskami zapisanymi w pkt 5.2.

Tab. 5.14 Obliczone nośności graniczne dla siedmiu analizowanych pali

Pal	$N_{gr2,obl}$ [kN]
36N-10L	6590
31-10L	8700
38-10P	12500
21N-10L	8270
25N-10L	6550
38-12P	11820
38-12L	12200

Sumę błędów kwadratowych zdecydowano się policzyć w inny sposób, niż miało to miejsce podczas obliczeń związanych z aproksymacją parametrów M-K. Dokonano takiej zmiany z uwagi na potrzebę osiągnięcia, w miarę możliwości, obiektywnego sposobu wyboru rekomendowanej metody, który nie byłby stronniczy w stosunku do żadnego z ocenianych podejść obliczeniowych. Zdecydowano ostatecznie o przeprowadzeniu obliczeń sumy błędów kwadratowych z uwzględnieniem całego zbioru wartości, niezależnie od tego jaka część zbioru została wykorzystana w aproksymacji, stosując poniższe równanie (5.29):

$$\sum \delta^2 = \sum \left(\frac{S_{i+1,pom}}{S_{i,pom}} - \frac{S_{i+1,calc}}{S_{i,calc}} \right)^2 \quad (5.29)$$

W tab. 5.15 zestawiono sumy błędów kwadratowych, a pogrubioną czcionką oznaczono wartości minimalne dla każdego z pali. Na tej podstawie stwierdzono, że podejście zaprezentowane w pkt 5.4 wykorzystujące środek zbioru danych $\{s_i, N_i\}$ przy prowadzeniu obliczeń metodą dwóch równań daje najlepszą dokładność dla największej liczby pali z analizowanego zbioru. W związku z powyższym jest to sposób optymalizacji parametrów M-K rekomendowany w niniejszej rozprawie.

Tab. 5.15 Porównanie dokładności metody jednego i dwóch równań

Pal	Metoda jednego równania				Metoda dwóch równań			
	początek	środek	koniec	całość	początek	środek	koniec	całość
36N-10L	0,355	0,184	0,184	0,194	0,511	0,181	0,192	0,184
31-10L	0,756	0,34	0,324	0,305	0,393	0,275	0,324	0,324
38-10P	1,510	0,311	0,309	0,311	0,309	0,312	0,312	0,312
21N-10L	0,300	0,227	0,300	0,300	0,219	0,253	0,333	0,333
25N-10L	1,500	1,407	1,223	1,270	1,407	1,500	1,270	1,270
38-12P	1,224	1,316	1,229	1,242	1,229	1,389	23,634	23,634
38-12L	0,690	0,450	0,544	0,450	1,030	0,450	0,491	0,491

Metoda estymacji parametrów krzywej M-K, przyjęta w dalszej części, pracy opiera się na wyznaczeniu, najpierw wartości nośności granicznej wykorzystując metodę optymalizacji trzech parametrów w sposób opisany w pkt 5.2, przy wykorzystaniu całego zbioru wartości. Następnie dla obliczonej wartości zaleca się przeprowadzić aproksymację metodą dwóch równań, opisaną w pkt 5.4, wykorzystując środkowe wartości zbioru $\{s_i, N_i\}$, uzyskanego w rezultacie testu statycznego.

6. RÓWNANIE OPISUJĄCE NOŚNOŚĆ GRANICZNĄ PAŁA

6.1 Analiza statystyczna

W niniejszym rozdziale przedstawiono szczegółowo autorską analizę. Jej wyniki zostały opublikowane w referacie [68]. Wyniki testów statycznych przeprowadzonych przez Energopol S.A Szczecin [84] przedstawionych w załączniku A zostały wykorzystane do wyznaczenia zależności między nośnością graniczną pała, parametrami geotechnicznymi gruntu oraz wymiarami pała. Parametry te użyto następnie do konwersji krzywej osiadania w pełnym zakresie obciążenia. Uwzględniono również badania sondą statyczną w rezultacie, którego określony został opór stożka sondy pod podstawa pała q_b . Parametry pałi zestawiono w tab. 6.1.

Tab. 6.1 Parametry analizowanych pałi

Pał	H [m]	D [m]	$N_{gr2,pom}$ [kN]	κ_2 [-]	q_b [MPa]
36N-10L	27,5	1	6490	0,61	4,75
31-10L	27,5	2	7700	1,4	
38-10P	31,5	1,5	11900	0,65	
21N-10L	27,5	2	8260	0,6	
25N-10L	27,5	1	6350	1,2	
38-12P	33,5	1,5	11780	0,1	
38-12L	33,5	1,5	12150	0,5	

Przyjmując zależność opisującą nośność podstawy pała wg publikacji [43]:

$$N_{gr1} = \beta q_b D^2 \left(\frac{H}{D}\right)^{1/3} \quad (6.1)$$

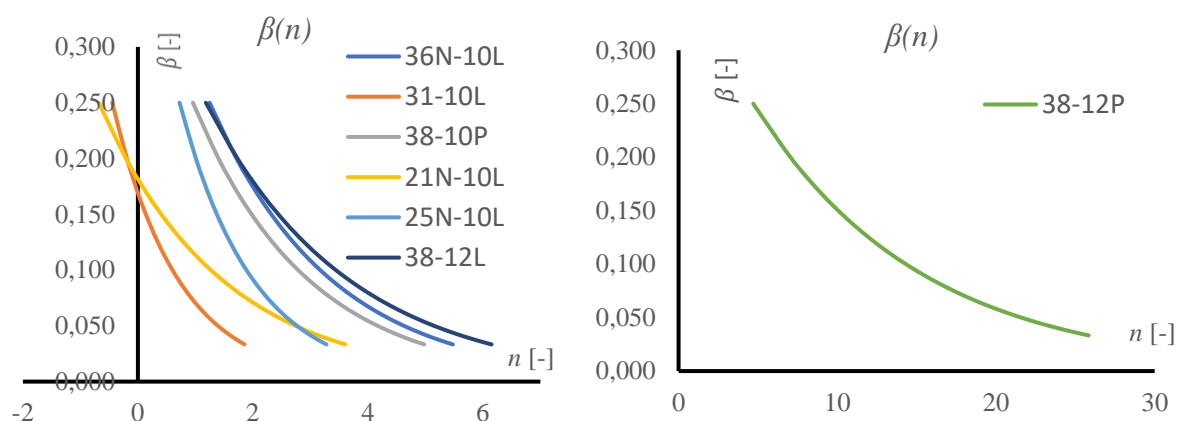
oraz wykorzystując następujący związek występujący w metodzie M-K:

$$N_{gr1} = \frac{N_{gr2}}{(1 + \kappa_2)^n} \quad (6.2)$$

można obliczyć parametr n z równania, w którym jedyną niewiadomą jest wartość β :

$$n = \frac{\ln\left(\frac{N_{gr2,pom}}{\beta q_b D^2 \left(\frac{H}{D}\right)^{1/3}}\right)}{\ln(1 + \kappa_2)} \quad (6.3)$$

Następnie wyznaczono wartości n przy $\beta \in \left[\frac{1}{4} \div \frac{1}{30}\right]$. Przedział zmiany parametru β założono uwzględniając jako wartość wyjściową $\frac{1}{2\pi}$, która była przyjęta w zależności opisanej w publikacji [43]. Wyniki obliczeń przedstawiono w postaci graficznej na rys. 6.1.



Rys. 6.1 Wykresy $\beta(n)$

Po przeprowadzeniu analizy uzyskanych wartości zdecydowano się aproksymować funkcję $\beta(n)$ w następującej postaci:

$$\beta(n) = f(n) = a_0 a_1^n \quad (6.4)$$

Dla pala 36N-10L uzyskano, metodą najmniejszych kwadratów, następujące parametry:

$$a_0 = 0,4526615; a_1 = 0,625$$

Można więc zapisać w przypadku pala 36N-10L:

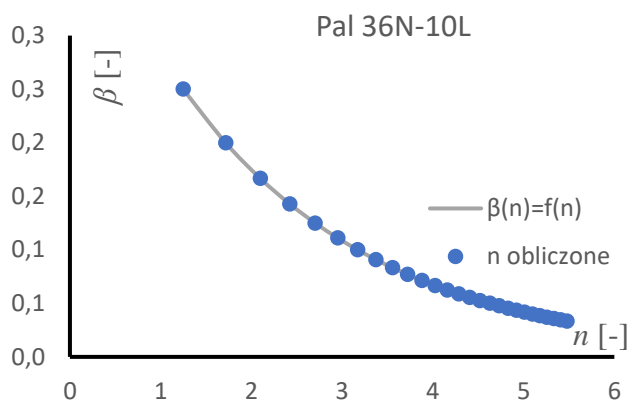
$$n_{obliczone} = \frac{\ln\left(\frac{6490}{\beta \cdot 4,75 \cdot 1^2 \cdot \left(\frac{27,5}{1}\right)^{1/3}}\right)}{\ln(1 + 0,61)} \quad (6.5)$$

$$\beta(n) = f(n) = 0,4526615 \cdot 0,625^n \quad (6.6)$$

Opisaną zależnością (6.6) funkcję $\beta(n)$ można porównać z wartościami $n_{obliczone}$ z równania (6.5), co zostało przedstawione w tab. 6.2 oraz na rys. 6.2. Wyniki obliczeń dla pozostałych, analizowanych pali przedstawiono w załączniku G.

Tab. 6.2 Sprawdzenie zgodności aproksymowanej zależności funkcyjnej dla pala 36N-10L

β	$n_{obliczone}$	$f(n)$
0,250	1,247	0,250
0,200	1,715	0,200
0,167	2,098	0,167
0,143	2,422	0,143
0,125	2,702	0,125
0,111	2,949	0,111
0,100	3,171	0,100
0,091	3,371	0,091
0,083	3,553	0,083
0,077	3,722	0,077
0,071	3,877	0,071
0,067	4,022	0,067
0,063	4,158	0,063
0,059	4,285	0,059
0,056	4,405	0,056
0,053	4,518	0,053
0,050	4,626	0,050
0,048	4,729	0,048
0,045	4,826	0,045
0,043	4,920	0,043
0,042	5,009	0,042
0,040	5,095	0,040
0,038	5,177	0,038
0,037	5,256	0,037
0,036	5,333	0,036
0,034	5,406	0,034
0,033	5,478	0,033



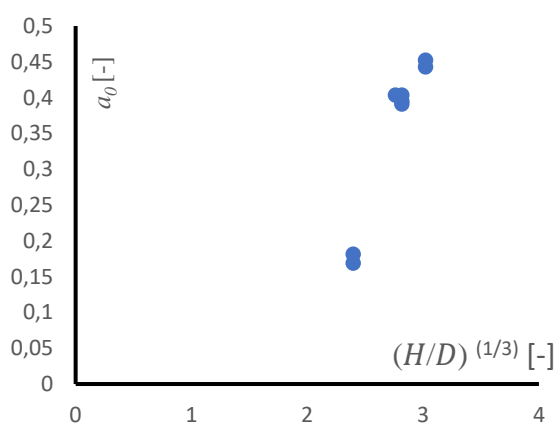
Rys. 6.2 Wykres aproksymowanej zależności $\beta(n)$ dla pala 36N-10L

Parametry a_0 i a_1 określające funkcję aproksymującą zależność $\beta(n)$ wyznaczone dla siedmiu analizowanych pali zestawiono w tab. 6.3.

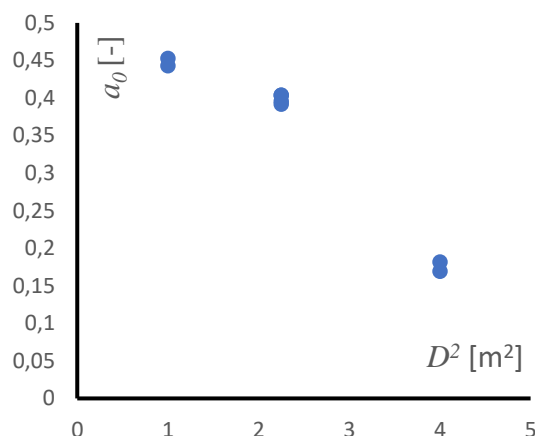
Tab. 6.3 Parametry opisujące zależności $\beta(n)$ dla analizowanych pali

L.p.	Pal	H [m]	D^2 [m ²]	$\left(\frac{H}{D}\right)^{1/3}$	κ_2	a_0	a_1
1	36N-10L	27,5	1	3,018405	0,61	0,452661	0,62112
2	31-10L	27,5	4	2,39571	1,4	0,169162	0,41667
3	38-10P	31,5	2,25	2,758924	0,65	0,403581	0,60606
4	21N-10L	27,5	4	2,39571	0,6	0,181465	0,625
5	25N-10L	27,5	1	3,018405	1,2	0,442897	0,45455
6	38-12P	33,5	2,25	2,81612	0,1	0,391397	0,90909
7	38-12L	33,5	2,25	2,81612	0,5	0,403691	0,66667

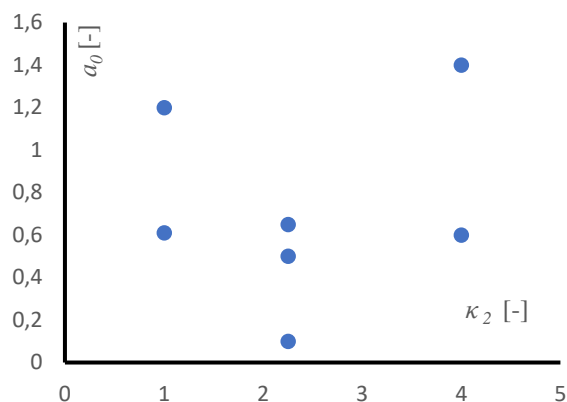
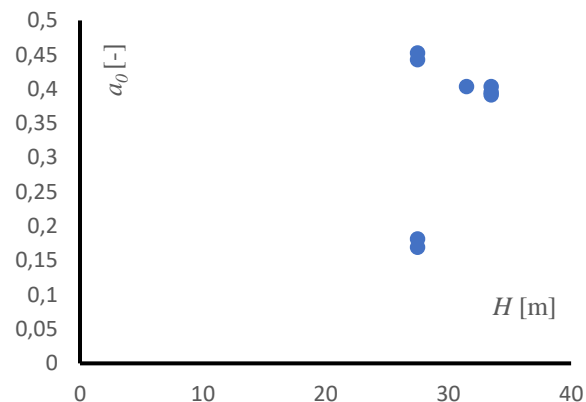
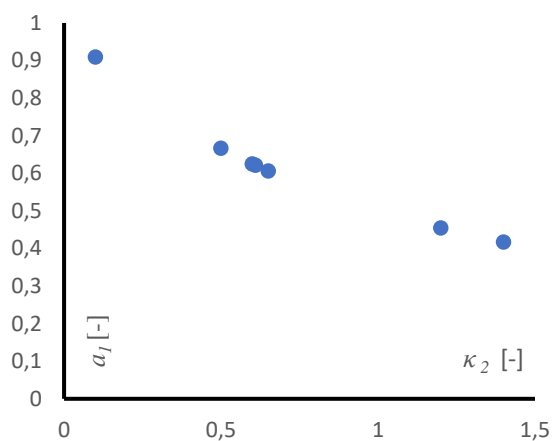
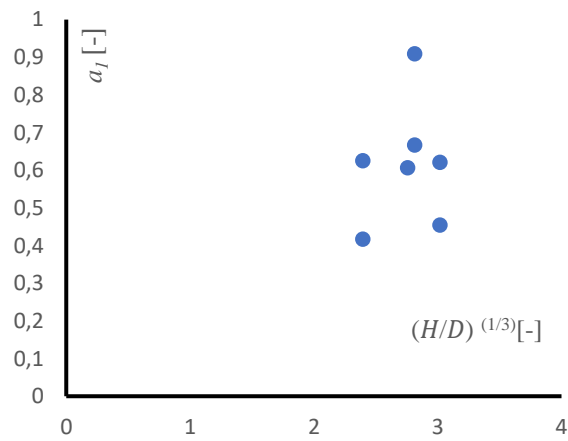
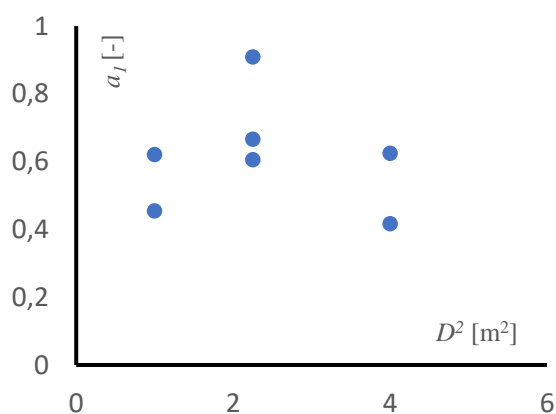
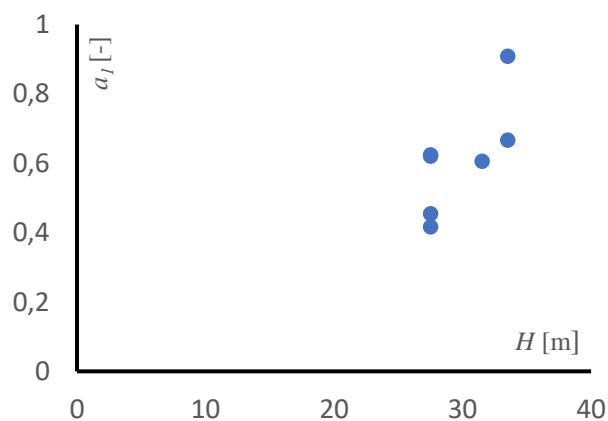
W opisany powyżej sposób uzyskane zostało siedem funkcji $\beta(n)$ opisujących przebieg zależności dla każdego z pali osobno. Kolejnym krokiem przeprowadzonych obliczeń było sprawdzenie możliwości uogólnienia zależności i aby to osiągnąć przanalizowano związek między wyznaczonymi statystycznie wartościami a_0 i a_1 , a pozostałymi parametrami pali. Na rys. 6.3 ÷ rys. 6.10 przedstawiono uzyskane w ten sposób zależności.



Rys. 6.3 Zależność $a_0 - \left(\frac{H}{D}\right)^{1/3}$



Rys. 6.4 Zależność $a_0 - D^2$

Rys. 6.5 Zależność $a_0 - \kappa_2$ Rys. 6.6 Zależność $a_0 - H$ Rys. 6.7 Zależność $a_1 - \kappa_2$ Rys. 6.8 Zależność $a_1 - \left(\frac{H}{D}\right)^{1/3}$ Rys. 6.9 Zależność $a_1 - D^2$ Rys. 6.10 Zależność $a_1 - H$

W przypadku wartości a_1 widać wyraźny związek z parametrem κ_2 . W odniesieniu do parametru a_0 można zaobserwować istnienie zależności zarówno ze średnicą pala D , jak i proporcją między długością, a średnicą. Stwierdzono, że możliwe będzie aproksymowanie parametrów a_0 i a_1 , co pozwoli na uzyskanie jednego równania opisującego wszystkie analizowane pale. Do aproksymacji parametru a_1 wybrano funkcję $a_1 = f(\kappa_2)$, w przypadku drugiego z parametrów, czyli a_0 poddano weryfikacji funkcję $a_0 = f(D)$ oraz $a_0 = f\left(\frac{H}{D}\right)$. Dla wszystkich zależności przyjęto postać funkcji aproksymującej, opisaną równaniem (6.7):

$$y(x) = Ax^B \quad (6.7)$$

Po wyznaczeniu metodą najmniejszych kwadratów parametrów A i B otrzymano w rezultacie:

$$a_0 = f(D) = A_0(D^2)^{B_0} = 0,521679183 \cdot [D^2]^{-0,63169315} \quad (6.8)$$

$$a_0 = f\left(\frac{H}{D}\right) = A_0 \left[\left(\frac{H}{D}\right)^{\frac{1}{3}} \right]^{B_0} = 4,439 \cdot 10^{-3} \cdot \left[\left(\frac{H}{D}\right)^{1/3} \right]^{4,2709995} \quad (6.9)$$

$$a_1 = f(\kappa_2) = A_1(1 + \kappa_2)^{B_1} = 1 \cdot (1 + \kappa_2)^{-1} = \frac{1}{1 + \kappa_2} \quad (6.10)$$

W tab. 6.4 ÷ tab. 6.6 porównano aproksymowane zależności z obliczonymi, we wcześniejszym etapie, wartościami parametrów a_0 i a_1

Tab. 6.4 Sprawdzenie zgodności aproksymowanych wartości dla funkcji $a_0 = f(D)$

D^2	a_0	$a_0 = f(D^2)$	δ^2
1	0,45266146	0,521679	0,004763
4	0,16916203	0,217312	0,002318
2,25	0,40358133	0,312558	0,008285
4	0,18146472	0,217312	0,001285
1	0,44289681	0,521679	0,006207
2,25	0,39139744	0,312558	0,006216
2,25	0,40369091	0,312558	0,008305

Tab. 6.5 Sprawdzenie zgodności aproksymowanych wartości dla funkcji $a_0 = f\left(\frac{H}{D}\right)$

$\left(\frac{H}{D}\right)^{1/3}$	a_0	$a_0 = f\left(\frac{H}{D}\right)$	δ^2
3,01840537	0,452661	0,497078	0,001972829
2,39570993	0,169162	0,185293	0,000260197
2,75892418	0,403581	0,338606	0,004221848
2,39570993	0,181465	0,185293	0,000014653
3,01840537	0,442897	0,497078	0,002935601
2,81612017	0,391397	0,369619	0,000474282
2,81612017	0,403691	0,369619	0,001160866

Tab. 6.6 Sprawdzenie zgodności aproksymowanych wartości dla funkcji $a_1 = f(\kappa_2)$

$1 + \kappa_2$	a_1	$a_1 = f(\kappa_2)$	δ^2
1,61	0,621118	0,621118	≈ 0
2,4	0,416667	0,416667	≈ 0
1,65	0,606061	0,606061	≈ 0
1,6	0,625	0,625	≈ 0
2,2	0,454545	0,454545	≈ 0
1,1	0,909091	0,909091	≈ 0
1,5	0,666667	0,666667	≈ 0

$\sum(\delta^2)$ dla funkcji $a_0 = f(D)$ jest równa 0,03738, natomiast dla $a_0 = f\left(\frac{H}{D}\right)$ wynosi 0,01104.

Z uwagi na większą dokładność ostatecznie do aproksymacji parametru a_0 wybrano funkcję proporcji długości i średnicy pala. W przypadku przeanalizowania większej liczby wyników badań dla pali o różnych średnicach można przypuszczać, że byłoby możliwe dokładniejsze opisanie przebiegu zależności $a_0 = f(D)$. W odniesieniu do parametru a_1 obliczone wartości są dokładne. Podstawiając zależności (6.8) i (6.10) do równań (6.1), (6.2) i (6.4) uzyskano:

$$\beta(n) = A_0 \cdot \left[\left(\frac{H}{D}\right)^{1/3}\right]^{B_0} [A_1 \cdot (1 + \kappa_2)^{B_1}]^n = 4,439 \cdot 10^{-3} \cdot \left[\left(\frac{H}{D}\right)^{1/3}\right]^{4,271} \frac{1}{(1 + \kappa_2)^n} \quad (6.11)$$

$$N_{gr1} = 4,439 \cdot 10^{-3} \cdot \left[\left(\frac{H}{D}\right)^{1/3}\right]^{4,271} \frac{1}{(1 + \kappa_2)^n} q_b D^2 \left(\frac{H}{D}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (6.12)$$

$$N_{gr2} = (1 + \kappa_2)^n \cdot 4,439 \cdot 10^{-3} \cdot \left[\left(\frac{H}{D}\right)^{1/3}\right]^{4,271} \frac{1}{(1 + \kappa_2)^n} q_b D^2 \left(\frac{H}{D}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (6.13)$$

Po przekształceniach można zapisać następujące równania:

$$N_{gr1} = 4,439 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{H}{D}\right)^{1,757} \left(\frac{1}{1 + \kappa_2}\right)^n q_b D^2 \quad (6.14)$$

$$N_{gr2,rów} = 4,439 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{H}{D}\right)^{1,757} q_b D^2 \quad (6.15)$$

Wykorzystując równanie (6.15) obliczono nośność graniczną analizowanych pali $N_{gr2,rów}$.

Wyniki obliczeń zestawiono w tab. 6.7.

Tab. 6.7 Obliczone wartości N_{gr2}

Pal	D	H/D	$N_{gr2,pom}$ [kN]	$N_{gr2,rów}$ [kN]	$\frac{N_{gr2,rów}}{N_{gr2,pom}}$
36N-10L	1	27,5	6490	7127	1,09
31-10L	2	13,75	7700	8434	1,09
38-10P	1,5	21	11900	9984	0,84
21N-10L	2	13,75	8260	8434	1,02
25N-10L	1	27,5	6350	7126	1,12
38-12P	1,5	22,33	11780	11124	0,94
38-12L	1,5	22,33	12150	11124	0,92

Mając dostęp do pomierzonych wartości N_{gr2} można również, po przekształceniu, wykorzystać równanie (6.15) do obliczenia wartości $q_{b(obl)}$.

$$q_{b(obl)} = \frac{N_{gr2,pom}}{4,439 \cdot 10^{-3} \cdot D^2} \left(\frac{D}{H}\right)^{1,757} \quad (6.16)$$

Wyniki obliczeń przeprowadzonych z wykorzystaniem równania (6.16) przedstawiono w tab. 6.8.

Tab. 6.8 Obliczone wartości q_b

Pal	H [m]	D [m]	$N_{gr2,pom}$ [kN]	D/H	$q_{b(obl)}$ [MPa]
36N-10L	27,5	1	6490	0,036363636	4,325656296
31-10L	27,5	2	7700	0,072727273	4,33658385
38-10P	31,5	1,5	11900	0,047619048	5,661610622
21N-10L	27,5	2	8260	0,072727273	4,651971767
25N-10L	27,5	1	6350	0,036363636	4,232344758
38-12P	33,5	1,5	11780	0,044776119	5,029979829
38-12L	33,5	1,5	12150	0,044776119	5,187967311

Dla powyższych wartości $q_{b(obl)}$ przeprowadzono ponownie obliczenia statystyczne, których wyniki przedstawiono w załączniku H. Nieznacznej zmianie uległ jedynie parametr A_0 , jednak w przybliżeniu jest on ciągle równy $4,439 \cdot 10^{-3}$, co potwierdza poprawność równań (6.9) i (6.11). Na podstawie powyższej analizy stwierdzono, że możliwe jest ustalenie związku (6.15), w którym nośność graniczna pala jest zależna jedynie od naprężeń pod podstawą oraz zmiany średnicy i długości. Równanie (6.15) zostało zaimplementowane w przedstawionej w rozdziale 8 metodzie konwersji w pełnym zakresie obciążenia.

W przypadku znanej wartości oporu całkowitego N_{gr2} możliwe jest również wyznaczenie wartości q_b wykorzystując zależność (6.14). Dalsze badania związane z równaniem opisującym nośność graniczną powinny obejmować wykorzystanie wyników badań dla pali o małych średnicach. Pozwoliłoby na dokładniejszą weryfikację zależności $a_0 = f(D)$. Przeprowadzenie również badań dla pali wykonanych w różnych warunkach gruntowych umożliwiłoby stwierdzenie, czy można w sposób przedstawiony powyżej uzyskać uniwersalne zależności. Prawdopodobnie współczynnik $4,439 \cdot 10^{-3}$ oraz wykładnik 1,757 mają związek z warunkami gruntowymi oraz technologią wykonania pala, w związku z tym ogólną postać równania opisującego nośność graniczną pala (6.15) można zapisać następująco:

$$N_{gr2} = \xi \left(\frac{H}{D}\right)^\eta q_b D^2 \quad (6.17)$$

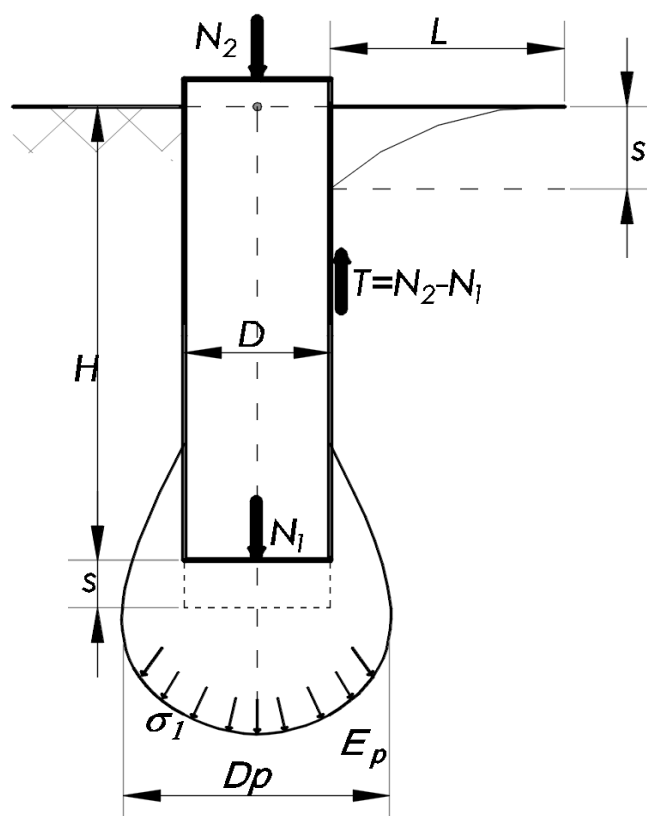
Tak jak zostało to opisane wcześniej, w rozdziale 6, współczynniki empiryczne ξ, η zostały wyznaczone na podstawie analizy pali poddanych testom statycznym w pełnym zakresie obciążenia. W związku z tym ostatecznie przyjęto i wykorzystano w dalszej części rozprawy zależność (6.18):

$$N_{gr2} = 4,439 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{H}{D}\right)^{1,757} q_b D^2 \quad (6.18)$$

7. WPLYW ROZKŁADU NAPRĘŻEŃ POD PODSTAWĄ PAŁA NA OSIADANIE

7.1 Analiza zjawiska

W poniższym rozdziale przedstawiono analizę dotyczącą wpływu powierzchni aktywnej gruntu, pod podstawą pała na wartość osiadania. Schematyczny rozkład sił oraz naprężeń pod podstawą pała przedstawiono poniżej na rys. 7.1.



Rys. 7.1 Naprężenia pod podstawą pała

Naprężenia pod podstawą pała są wówczas równe:

$$\sigma_1 = \frac{4N_2}{\pi D_p^2} \quad (7.1)$$

Natomiast zasięg powierzchni aktywnej można obliczyć z zależności [43]:

$$D_p = D(1 + \kappa_2) \quad (7.2)$$

Osiadanie podstawy jest opisane równaniem:

$$s = \frac{\sigma_1}{E_p} D_p \quad (7.3)$$

Wykorzystując następnie to, że dla małych osiadań [44]:

$$s = C_2 N_2 \quad (7.4)$$

Wynika z tego, że:

$$C_2 = \frac{4}{\pi D E_p (1 + \kappa_2)} \quad (7.5)$$

oraz:

$$E_p = \frac{4}{\pi D C_2 (1 + \kappa_2)} \quad (7.6)$$

Na podstawie literatury [55] można również zapisać zależność:

$$E_p = 4q_c \left(1 + \frac{1}{4} q_c^{1/3} \right) \quad (7.7)$$

Badania analityczne wskazują, że porównanie wzoru na osiadanie sprężyste pala (7.3) oraz krzywej Q - s wymaga wprowadzenie współczynnika korelacji nazwanego parametrem dopasowania pala i oznaczonego α . W związku z tym można zapisać wzór na osiadanie w postaci:

$$s = \frac{\sigma_1 D_p}{E_p} \alpha \quad (7.8)$$

Parametr C_2 jest wówczas równy:

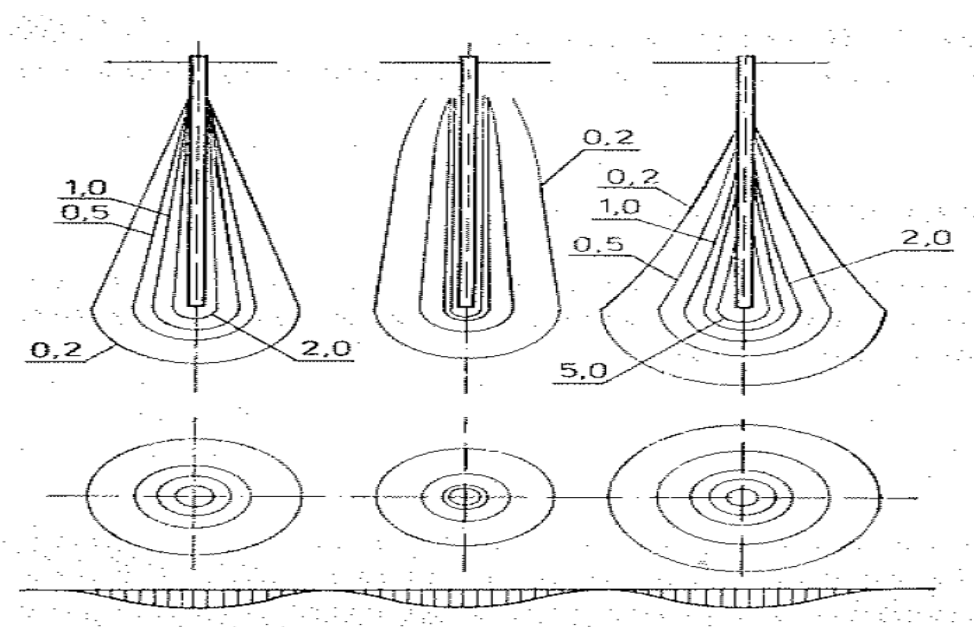
$$C_2 = \frac{4\alpha}{\pi D E_p (1 + \kappa_2)} \quad (7.9)$$

Wykorzystując metodę aproksymacji krzywej M-K opisaną w rozdziale 5 wyznaczono wartości parametru α , dla analizowanych pali. Wyniki przeprowadzonych obliczeń zestawiono w tab. 7.1.

Tab. 7.1 Wartości parametru dopasowania

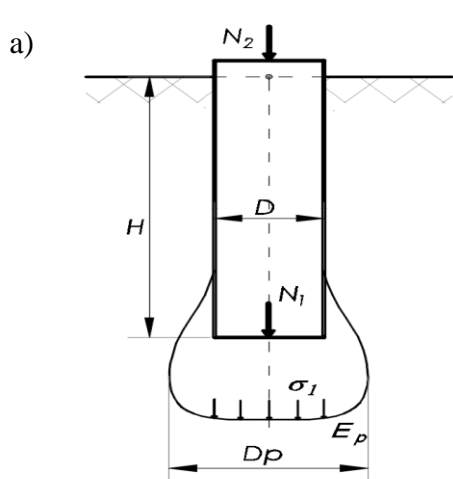
Pal	H [m]	D [m]	α [-]
36N-10L	27,5	1	0,0192
31-10L	27,5	2	0,0713
38-10P	31,5	1,5	0,0554
21N-10L	27,5	2	0,0292
25N-10L	27,5	1	0,0128
38-12P	33,5	1,5	0,0237
38-12L	33,5	1,5	0,0194

Małe wartości α w przedziale $0,01 \div 0,07$ świadczą o przyjęciu zbyt dużej wartości naprężeń pod podstawą σ_1 . Dembicki i inni [11] opisali rozkład naprężeń w otoczeniu podstawy pala na powierzchnię stykową o kształcie czaszy kulistej, co przedstawiono na rys. 7.2

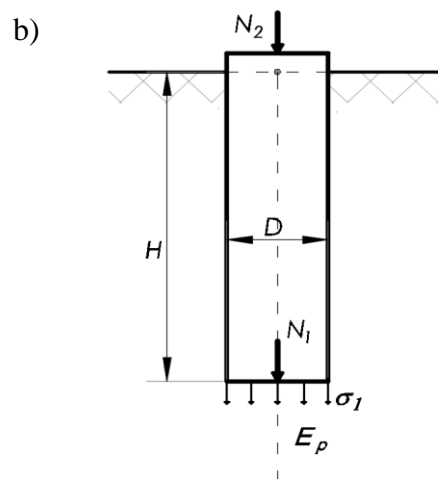


Rys. 7.2 Naprężenia ściskające w otoczeniu pala [11]

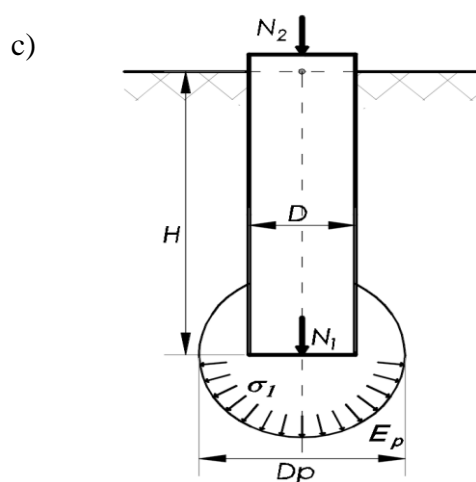
Na tej podstawie przeprowadzono analizę powierzchni dopasowania o czterech różnych kształtach przedstawionych poniżej na rys. 7.3.



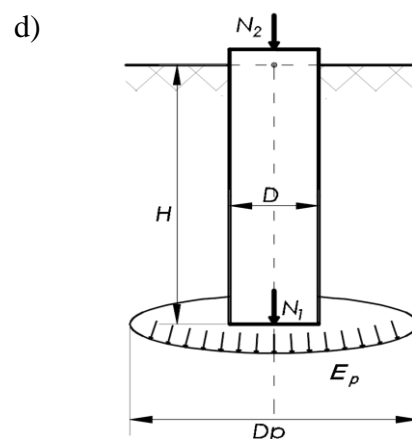
$$C_2 = C_{2,1} = \frac{4\alpha}{\pi D E_p (1 + \kappa_2)} \quad (7.10)$$



$$C_2 = C_{2,2} = \frac{4\alpha'}{\pi D E_p (1 + \kappa_2)^2} \quad (7.11)$$



$$C_2 = C_{2,3} = \frac{2\alpha'}{\pi D E_p (1 + \kappa_2)^3} \quad (7.12)$$



$$C_2 = C_{2,4} = \frac{2\alpha'}{3\pi D E_p (1 + \kappa_2)^3} \quad (7.13)$$

Rys. 7.3 Powierzchnia dopasowania podstawy pala

- a) powierzchnia dopasowania w kształcie gruszki; b) powierzchnia dopasowania w kształcie podstawy pala;
c) powierzchnia dopasowania w kształcie czaszy kulistej; d) powierzchnia dopasowania w kształcie elipsy

Dla przypadku powierzchni dopasowania równej podstawie pala można zapisać:

$$\alpha' = \frac{\alpha}{1 + \kappa_2} \quad (7.14)$$

Przekształcając równanie (7.10) oraz (7.12) otrzymano:

$$\alpha' = \frac{\alpha}{2(1 + \kappa_2)^2} \quad (7.15)$$

W odniesieniu do powierzchni dopasowania w kształcie elipsy uzyskano:

$$\alpha' = \frac{\alpha}{6(1 + \kappa_2)^2} \quad (7.16)$$

W rezultacie analizy powyższych zależności zmodyfikowano zależność (7.9) opisującą C_2 do poniższej postaci, którą przyjęto do dalszych obliczeń:

$$C_2 = \frac{4}{\pi D(1 + \kappa_2)E_p} \frac{\alpha}{(1 + \kappa_2)^2} \quad (7.17)$$

Ostatecznie przyjęte wartości α oraz parametrów M-K zestawiono poniżej w tab. 7.2. Algorytm postępowania w metodzie aproksymacji oraz szczegółowe wyniki obliczeń przedstawiono w załączniku I. Poniżej w tab. 7.3 oraz na rys. 7.4 i rys. 7.5 zaprezentowano przykładowe wyniki otrzymane dla pala 31-10L.

Tab. 7.2 Parametry M-K przyjęte do dalszych obliczeń

Pal	H [m]	D [m]	$N_{gr2,obl}$ [kN]	$\kappa_{2,opt}$ [-]	$C_{2,opt}$ [mm/kN]	α_{opt} [-]
36N-10L	27,5	1	6590	0,61	$6,2 \cdot 10^{-4}$	0,0498
31-10L	27,5	2	8700	1,4	$7,7 \cdot 10^{-4}$	0,4109
38-10P	31,5	1,5	12500	0,65	$8,7 \cdot 10^{-4}$	0,1508
21N-10L	27,5	2	8360	0,6	$4,4 \cdot 10^{-4}$	0,0749
25N-10L	27,5	1	6550	1,2	$3,1 \cdot 10^{-4}$	0,0621
38-12P	33,5	1,5	11850	0,1	$6,4 \cdot 10^{-4}$	0,0288
38-12L	33,5	1,5	12200	0,5	$3,7 \cdot 10^{-4}$	0,0436

Tab. 7.3 Wynik obliczeń dla pala 31-10L

N_i [kN]	$s_{i,pom}$ [mm]	$s_{i,calc,opt}$ [mm]
1600	1,2	1,575
2600	1,9	3,081
3200	2,4	4,308
3800	3,2	5,904
4100	4,1	6,892
4500	5,9	8,479
4750	7,1	9,668
4900	8,8	10,474
5100	9,4	11,673
5200	10	12,335
5800	14,6	17,492
6200	20	22,637
6500	24,9	28,011
6650	30	31,419
6800	35,2	35,482
6950	40	40,396
7100	45,2	46,435
7200	50	51,279
7300	60	56,964
7400	70	63,715
7500	80	71,837
7600	90	81,763

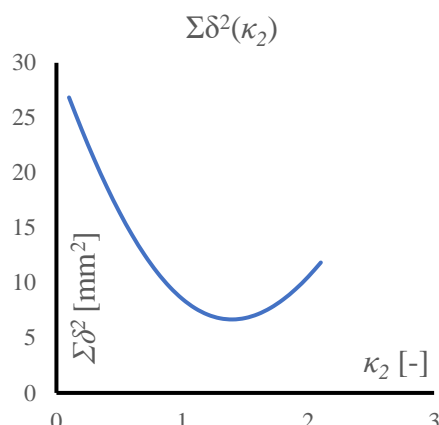
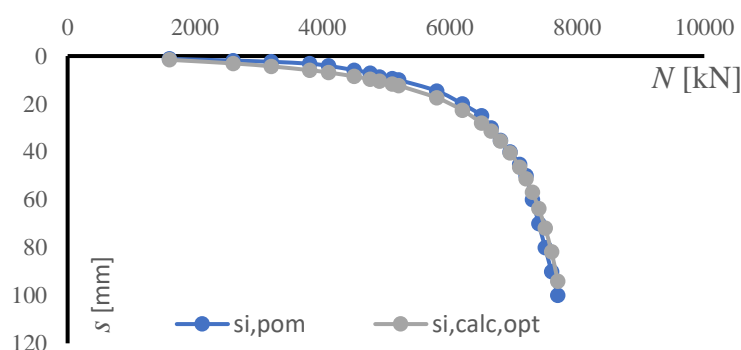
$$N_{gr2,obl} = 8700 \text{ kN}$$

$$\min \Sigma \delta^2 = 6,68 \text{ mm}^2$$

$$\kappa_{2,opt} = 1,4$$

$$C_{2,opt} = 0,00077 \text{ mm/kN}$$

$$\alpha_{opt} = 0,4109$$

**Rys. 7.4** Optymalne parametry krzywej M-K dla pala 31-10L**Rys. 7.5** Krzywa M-K dla pala 31-10L

7.2 Podsumowanie

Z oceny wyników badań wynika, że tak jak zostało to przedstawione na rys. 7.2 [11], kształt obszaru aktywnego pod podstawą pala ma istotny wpływ na formowanie się oporu pala. Próbné statyczne obciążenia wykonane w warunkach naturalnych potwierdzają, że opór podstawy obliczony na podstawie założenia jedynie sprężystej pracy odbiega od pomierzonych wartości. Na tej podstawie wprowadzono parametr α opisany w 7.1, który został nazwany parametrem dopasowania pala, co potwierdza wpływ opisany w monografii pod redakcją Dembickiego [11]. Interpretacja próbných statycznych obciążeń z parametrem α uwzględnia fakt, że ma on istotne znaczenie dla poprawnego opisu współpracy pala z gruntem. Osiadanie pala obliczone na podstawie osiadania sprężystego, bez uwzględnienia wpływu powierzchni dopasowania powoduje otrzymanie w rezultacie wyraźnie większych wartości osiadania. Jest to spowodowane kształtem powierzchni stykowej oraz faktem, że odpór generowany jest nie tylko przez naprężenia pionowe, ale również naprężenia styczne. Zagadnienie to nie było

przedmiotem niniejszej rozprawy doktorskiej w związku z tym ograniczono się do wprowadzenia parametru dopasowania α , którego wartości można określić, wykorzystując wyniki testów statycznych pala. W związku z tym w dalszej części pracy, gdzie analizowana jest konwersja krzywej próbnego statycznego obciążenia pala założono, że α jest znane na podstawie próbnych statycznych obciążeń, a zmiana geometrii pala nie wpływa na jego wartość.

8. METODA KONWERSJI DLA PEŁNEGO ZAKRESU OBCIĄŻENIA

8.1 Opis metody

Na podstawie analizy przeprowadzonej w rozdziałach 5 ÷ 7 niniejszej rozprawy oraz opublikowanych badaniach Meyera i Stacheckiego [47, 48, 49, 68] sformułowano proponowany opis metody konwersji krzywej $Q-s$, w pełnym zakresie obciążenia. Przeprowadzona we wcześniejszej części pracy analiza pali, które były obciążone, aż do uzyskania obciążenia granicznego (do utraty stateczności), wskazuje, że pomimo podobnych wymiarów pali oraz podobnych warunków, reakcja podłoża w podstawie pala była inna. W rozdziale 7 autor tę współpracę określił parametrem α , którego wartości podano w tab. 7.2. Metoda konwersji opisana w tym rozdziale opiera się na założeniu, że współpraca z gruntem w podstawie pala pomierzonego oraz pala ze zmienioną średnicą i długością pozostaje taka sama, tzn. parametr α pozostaje bez zmian. W rozdziale 9 przedstawiono praktyczny przykład konwersji, wykorzystując te spośród analizowanych pali, które charakteryzowały się zbliżonymi wartościami α .

Na podstawie wyników próbnego obciążania statycznego pala można w sposób opisany w rozdziale 5 wyznaczyć krzywą obciążenia pala, scharakteryzowaną poniższymi, podstawowymi parametrami:

$$H^{(0)}; D^{(0)}; C_2^{(0)}; \kappa_2^{(0)}; N_{gr,2}^{(0)}$$

Podobnie, jak w metodzie opartej na liniowej teorii sprężystości, omówionej w pkt. 4.2, krzywa próbnego obciążenia statycznego pala opisywana będzie jako stan „0”. Parametry krzywej M-K związane ze stanem „0” będą oznaczane górnym indeksem „0” i zestawiono je w tab. 8.1. Dodatkowo, każdy z pali charakteryzuje się również parametrem α uwzględniającym sposób współpracy podstawy pala z gruntem. Wartości α obliczono na podstawie testów statycznych wg równania (7.17), w sposób opisany w rozdziale 7.

Tab. 8.1 Parametry analizowanych pali w stanie „0”

Pal	H [m]	D [m]	N_{gr2} [kN]	κ_2 [-]	C_2 [mm/kN]	α [-]
36N-10L	27,5	1	6590	0,61	$6,2 \cdot 10^{-4}$	0,0498
31-10L	27,5	2	8700	1,4	$7,7 \cdot 10^{-4}$	0,4109
38-10P	31,5	1,5	12500	0,65	$8,7 \cdot 10^{-4}$	0,1508
21N-10L	27,5	2	8360	0,6	$4,4 \cdot 10^{-4}$	0,0749
25N-10L	27,5	1	6550	1,2	$3,1 \cdot 10^{-4}$	0,0621
38-12P	33,5	1,5	11850	0,1	$6,4 \cdot 10^{-4}$	0,0288
38-12L	33,5	1,5	12200	0,5	$3,7 \cdot 10^{-4}$	0,0436

Parametry $C_1^{(0)}$, $\kappa_1^{(0)}$ oraz $N_{gr1}^{(0)}$ wyznaczyć można na podstawie związków między parametrami krzywej M-K, przywoływanych w rozdziale 3 równaniami (3.26) ÷ (3.28), co było tematem różnych badań prowadzonych w Katedrze Geotechniki WBiIŚ, m.in. przez Żarkiewicza [43, 57, 77. 78]:

$$\frac{C_1^{(0)}}{C_2^{(0)}} = (1 + \kappa_2^{(0)})^2 \rightarrow C_1^{(0)} = C_2^{(0)}(1 + \kappa_2^{(0)})^2 \quad (8.1)$$

$$\kappa_1^{(0)} = \ln(1 + \kappa_2^{(0)}) \quad (8.2)$$

$$N_{gr1}^{(0)} = \frac{N_{gr2}^{(0)}}{2\kappa_2^{(0)}} \quad (8.3)$$

Po wyznaczeniu parametrów M-K zgodnie z równaniami (8.1) ÷ (8.3) kolejnym krokiem jest ustalenie wartości parametrów odnoszących się do krzywej Q -s dla pala o nowej geometrii $H^{(1)}$; $D^{(1)}$, która będzie nazywana stanem „1”. Wykorzystując badania przeprowadzone przez Meyera i Siemaszko [46], w wyniku, których ustalone zostały analityczne zależności umożliwiające obliczenia parametru κ_2 na podstawie wyników badania sondą statyczną CPTU,

możliwe jest przeanalizowanie zmiany wartości κ_2 w przypadku zmiany średnicy lub długości pała. Na podstawie poniższego równania [46]:

$$\kappa_2 = \left[\frac{4\beta}{20,86} \left(\frac{H}{D} \right)^{0,785} \frac{\bar{q}_c}{q_b} \frac{1}{1 + \frac{1}{4} q_b^{1/3}} \right]^{3/5} \quad (8.4)$$

Można po przekształceniach zapisać związek opisujący wartość $\kappa_2^{(1)}$ w postaci:

$$\kappa_2^{(1)} = \kappa_2^{(0)} \left[\frac{\left(\frac{D^{(0)} H^{(1)}}{D^{(1)} H^{(0)}} \right)^{0,785} \frac{\bar{q}_c^{(1)} q_b^{(1)}}{\bar{q}_c^{(0)} q_b^{(0)}} \frac{1 + 0,25 (q_b^{(0)})^{1/3}}{1 + 0,25 (q_b^{(1)})^{1/3}} \right]^{3/5} \quad (8.5)$$

W przypadku stałych parametrów gruntowych można uprościć zależność (8.5) do:

$$\kappa_2^{(1)} = \kappa_2^{(0)} \left(\frac{D^{(0)} H^{(1)}}{D^{(1)} H^{(0)}} \right)^{0,471} \quad (8.6)$$

Następnie przyjmując, tak jak zostało to opisane w rozdziale 7, w równaniu (7.13), można zapisać:

$$C_2^{(0)} = \frac{4\alpha^{(0)}}{\pi D^{(0)} E_p^{(0)} (1 + \kappa_2^{(0)})^3} \quad (8.7)$$

Po przekształceniu wyrażenia (8.7) otrzymano:

$$\frac{C_2^{(1)}}{C_2^{(0)}} = \frac{\pi D^{(0)} E_p^{(0)}}{4\alpha^{(0)} (1 + \kappa_2^{(1)})^3} \frac{4\alpha^{(1)} (1 + \kappa_2^{(0)})^3}{\pi D^{(1)} E_p^{(1)}} \quad (8.8)$$

Przy założeniu, że w stanie „1” parametry gruntowe nie ulegają zmianie, czyli:

$$E_p^{(0)} = E_p^{(1)} \quad (8.9)$$

oraz:

$$\alpha^{(0)} = \alpha^{(1)} \quad (8.10)$$

Na podstawie zależności (8.7) ÷ (8.10) uzyskano równanie opisujące parametr $C_2^{(1)}$ w postaci:

$$C_2^{(1)} = C_2^{(0)} \frac{D^{(0)} (1 + \kappa_2^{(0)})^3}{D^{(1)} (1 + \kappa_2^{(1)})^3} \quad (8.11)$$

Wyznaczenie nośności granicznej opisującej krzywą M-K po konwersji, czyli $N_{gr2}^{(1)}$ przeprowadzono w oparciu o wyniki analizy przedstawionej w rozdziale 6. Wykorzystując pozwalającą na konwersję zależność (6.16), po przekształceniach zapisano:

$$N_{gr2}^{(1)} = N_{gr2}^{(0)} \left(\frac{H^{(1)}}{H^{(0)}} \right)^{1,77} \left(\frac{D^{(1)}}{D^{(0)}} \right)^{0,243} \frac{q_b^{(1)}}{q_b^{(0)}} \quad (8.12)$$

W przypadku, gdy warunki gruntowe nie ulegają zmianie upraszcza się ona do postaci:

$$N_{gr2}^{(1)} = N_{gr2}^{(0)} \left(\frac{H^{(1)}}{H^{(0)}} \right)^{1,757} \left(\frac{D^{(1)}}{D^{(0)}} \right)^{0,243} \quad (8.13)$$

Na podstawie powyżej przedstawionych równań możliwe jest ustalenie wartości wszystkich parametrów niezbędnych zarówno do konwersji krzywej dotyczącej oporu całkowitego pala, jak również krzywych oporu podstawy i pobocznicy.

8.2 Przykład obliczeń

W poniższym punkcie omówione zostaną obliczenia dotyczące konwersji krzywej obciążenia pala 36N-10L (stan „0”), w przypadku zmiany jego długości oraz średnicy. W przedstawionym przykładzie założono, że warunki gruntowe nie ulegają zmianie. Parametry równania M-K opisujące pal w stanie „0” przyjęto wg tab. 8.1 i zestawiono poniżej:

$$D^{(0)} = 1m; H^{(0)} = 27,5m; C_2^{(0)} = 6,2 \cdot 10^{-4} \frac{mm}{kN}; \kappa_2^{(0)} = 0,61; N_{gr2}^{(0)} = 6590 kN$$

Następnie obliczono parametry krzywej oporu podstawy z równań (8.1) – (8.3):

$$C_1^{(0)} = C_2^{(0)} (1 + \kappa_2^{(0)})^2 = 6,2 \cdot 10^{-4} \cdot (1 + 0,61)^2 = 1,6 \cdot 10^{-3} \frac{mm}{kN}$$

$$\kappa_1^{(0)} = \ln(1 + \kappa_2^{(0)}) = \ln(1 + 0,61) = 0,48$$

$$N_{gr1}^{(0)} = \frac{N_{gr2}^{(0)}}{2\kappa_2^{(0)}} = \frac{6590}{2 \cdot 0,61} = 4318 kN$$

Znając parametry krzywej oporu całkowitego oraz oporu podstawy można na podstawie zależności (3.25) wyznaczyć również krzywą oporu pobocznicy w stanie „0”.

Następnie przeprowadzono obliczenia parametrów opisujących krzywą po konwersji (stan „1”). Parametry pała w stanie „1”, przyjęte do obliczeń, zestawiono poniżej:

$$D^{(1)} = 1,5m; H^{(1)} = 22,5m;$$

Wartość $\kappa_2^{(1)}$ wyznaczono z równania (8.6):

$$\kappa_2^{(1)} = \kappa_2^{(0)} \left(\frac{D^{(0)}}{D^{(1)}} \cdot \frac{H^{(1)}}{H^{(0)}} \right)^{0,471} = 0,61 \cdot \left(\frac{1}{1,5} \cdot \frac{22,5}{27,5} \right)^{0,471} = 0,46$$

Na podstawie związku (8.11) ustalono wartość $C_2^{(1)}$:

$$C_2^{(1)} = C_2^{(0)} \frac{D^{(0)} (1 + \kappa_2^{(0)})^3}{D^{(1)} (1 + \kappa_2^{(1)})^3} = 6,2 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{1}{1,5} \cdot \frac{(1 + 0,61)^3}{(1 + 0,46)^3} = 5,6 \cdot 10^{-4} \frac{mm}{kN}$$

Ostatnim parametrem niezbędnym do opisania krzywej oporu całkowitego pała po konwersji jest wartość $N_{gr2}^{(1)}$, którą obliczono z równania (8.13):

$$N_{gr2}^{(1)} = 6590 \cdot \left(\frac{22,5}{27,5} \right)^{1,757} \cdot \left(\frac{1,5}{1} \right)^{0,243} = 5111 \text{ kN}$$

Do pełnego kompletu krzywych $N_1(s)$, $N_2(s)$, $T(s)$ opisujących współpracę pała z gruntem konieczne jest wyznaczenie jeszcze dwóch parametrów, czyli $\kappa_1^{(1)}$ oraz $N_{gr1}^{(1)}$. Analogicznie, jak w przypadku stanu „0” wykorzystano związki między parametrami M-K [43, 57, 77, 78]:

$$C_1^{(1)} = C_2^{(1)} (1 + \kappa_2^{(1)})^2 = 5,6 \cdot 10^{-4} \cdot (1 + 0,46)^2 = 1,2 \cdot 10^{-3} \frac{mm}{kN}$$

$$\kappa_1^{(1)} = \ln(1 + \kappa_2^{(1)}) = \ln(1 + 0,46) = 0,38$$

$$N_{gr1}^{(1)} = \frac{N_{gr2}^{(1)}}{2^{\kappa_2^{(1)}}} = \frac{5111}{2^{0,46}} = 3720 \text{ kN}$$

Obliczone powyżej parametry zestawiono w tab. 8.2 oraz wykorzystano do opisanie krzywych M-K po konwersji, przedstawionych na rys. 8.1.

Tab. 8.2 Wyniki przykładu obliczeniowego

parametr	stan „0”	stan „1”
H [m]	27,5	22,5
D [m]	1	1,5
H/D [-]	27,5	15
C_2 [mm/kN]	0,00062	0,00056
κ_2	0,61	0,46
N_{gr2} [kN]	6590	5111
C_1 [mm/kN]	0,0016	0,0012
κ_1	0,48	0,38
N_{gr1} [kN]	4318	3720
C_1/C_2	2,59	2,13
N_{gr1}/N_{gr2}	0,66	0,73

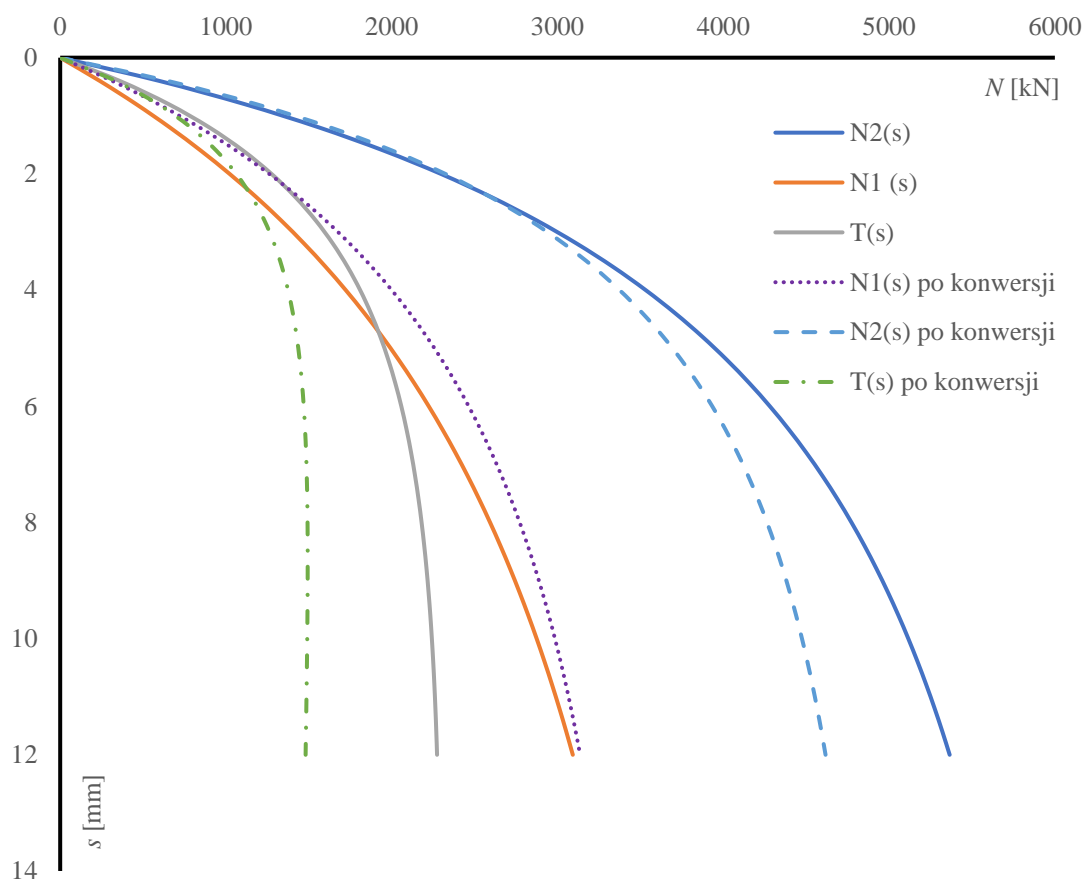
Do opisu krzywych wykorzystano równania metody M-K:

$$N_1(s) = N_{gr1} \left[1 - \left(1 + \frac{\kappa_1 s}{C_1 N_{gr1}} \right)^{-\frac{1}{\kappa_1}} \right] \quad (8.16)$$

$$N_2(s) = N_{gr2} \left[1 - \left(1 + \frac{\kappa_2 s}{C_2 N_{gr2}} \right)^{-\frac{1}{\kappa_2}} \right] \quad (8.17)$$

$$T(s) = N_2(s) - N_1(s) \quad (8.18)$$

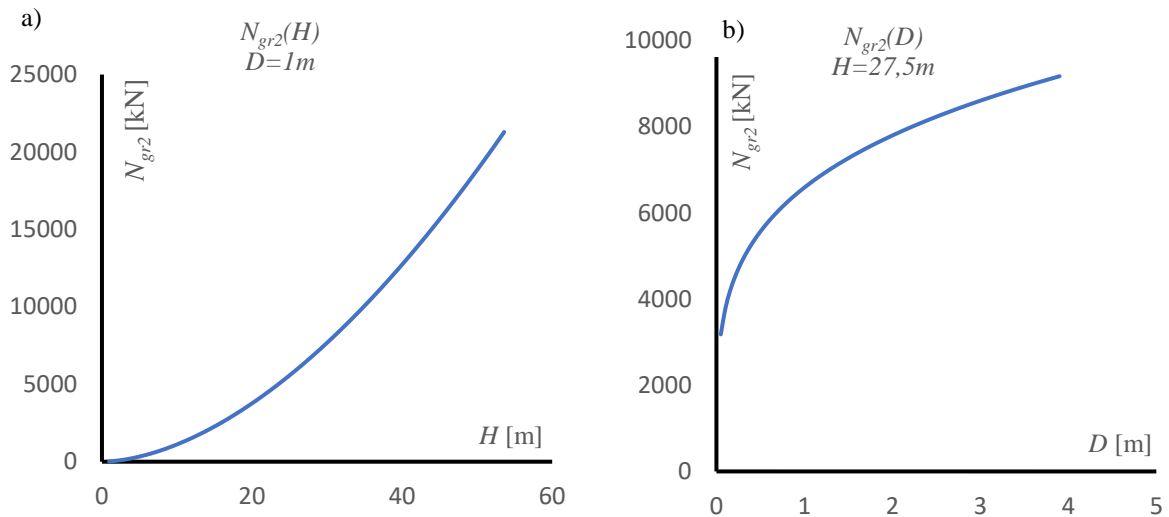
Przeprowadzenie obliczeń, zaprezentowaną metodą konwersji, pozwala na opis krzywej oporu całkowitego, oporu podstawy oraz oporu pobocznic w pełnym zakresie obciążenia dla pala o nowej długości oraz nowej średnicy, przy przyjęciu założenia, że sposób reakcji podłoża w podstawie pala określony parametrem α pozostaje bez zmian. Zostało to przedstawione na rys 8.1.



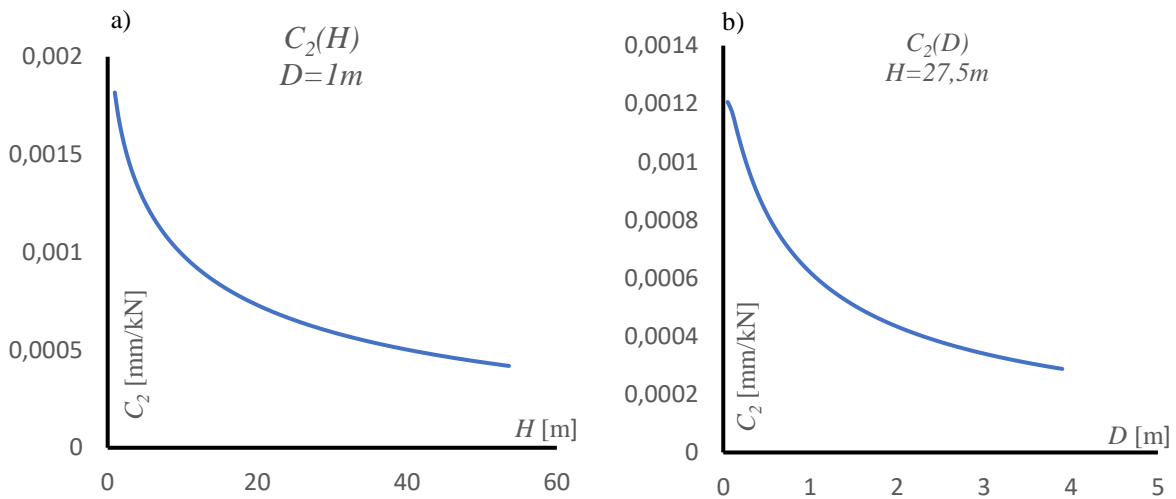
Rys. 8.1 Porównanie krzywych obciążenia pala w stanie „0” oraz w stanie „1” przy zmianie średnicy oraz długości pala

8.3 Analiza wyników

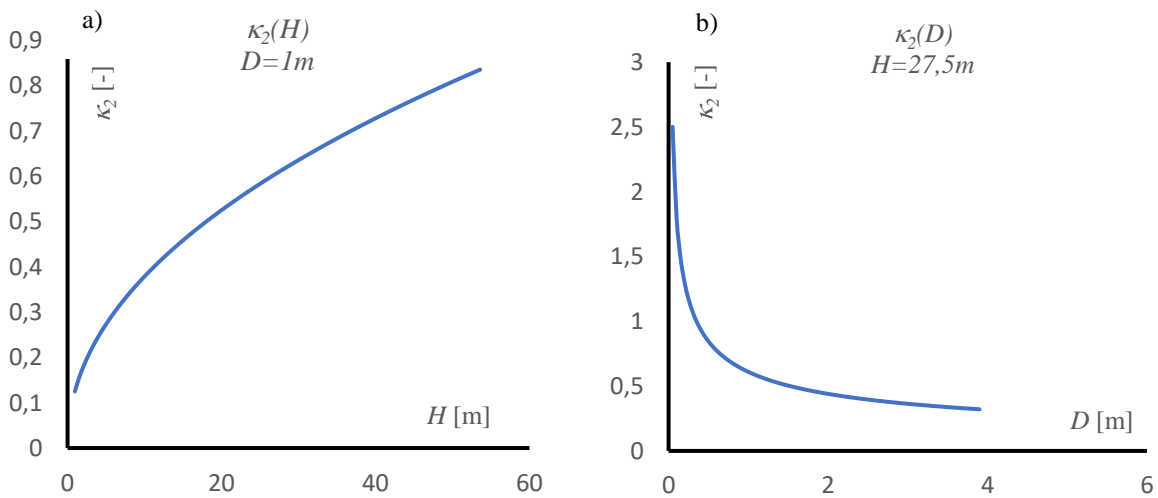
Przedstawione poniżej wykresy (rys. 8.2 ÷ rys. 8.7) odnoszą się do konwersji krzywej obciążenia pala 36N-10L, przy założeniu, że warunki gruntowe pozostają bez zmian. W przypadku analizy wpływu zmiany średnicy pala jego długość pozostaje stała i jest równa 27,5m. Natomiast w przypadku analizy wpływu zmiany długości pala jego średnica pozostaje stała i jest równa 1m. W pierwszej kolejności przeanalizowano zmianę parametrów M-K przedstawioną w postaci ciągłych funkcji, co zostało przedstawione na rys. 8.2 ÷ rys. 8.7.



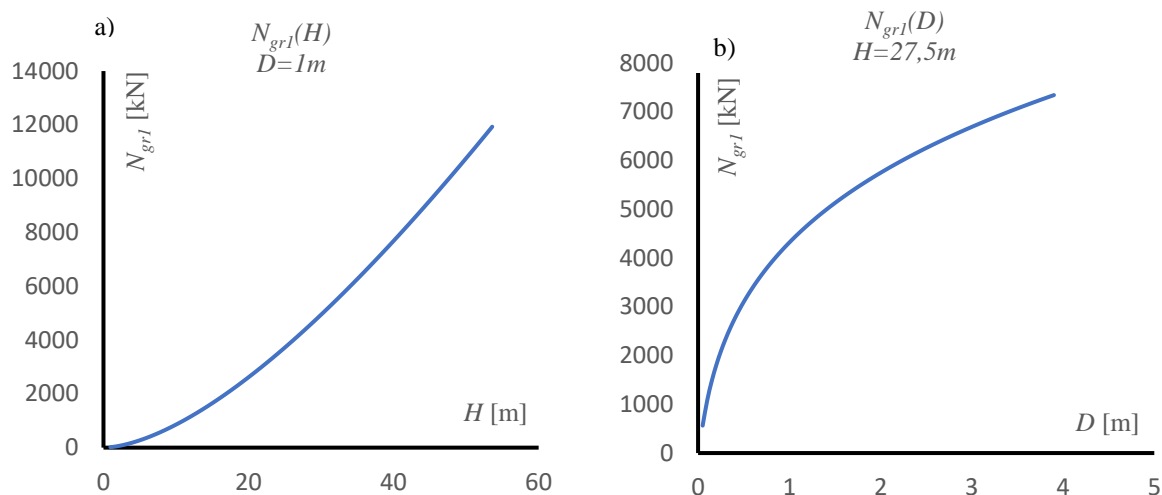
Rys. 8.2 Zmiana wartości N_{gr2} przy zmianie: a) średnicy; b) długości pała



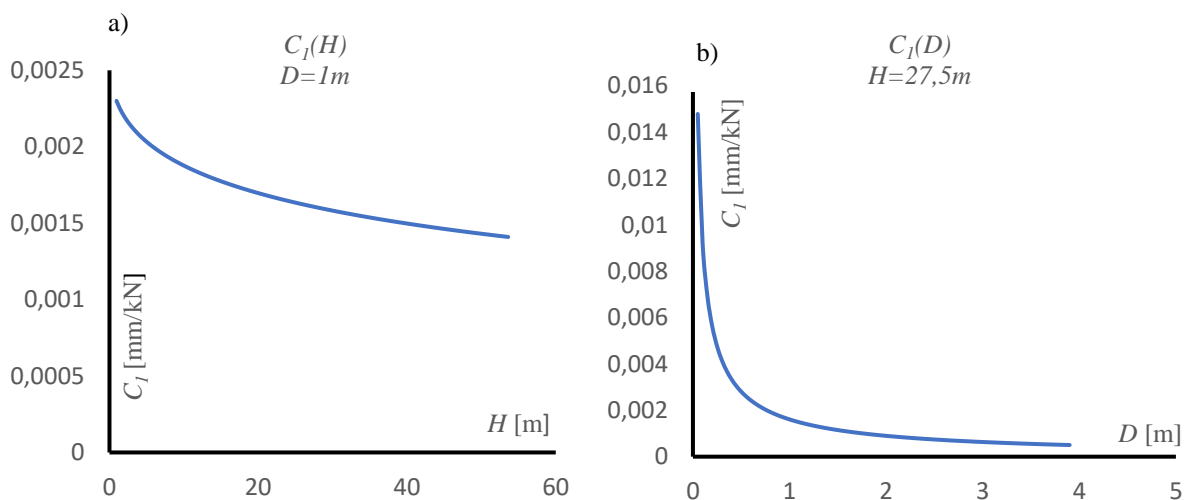
Rys. 8.3 Zmiana wartości C_2 przy zmianie: a) średnicy; b) długości pała



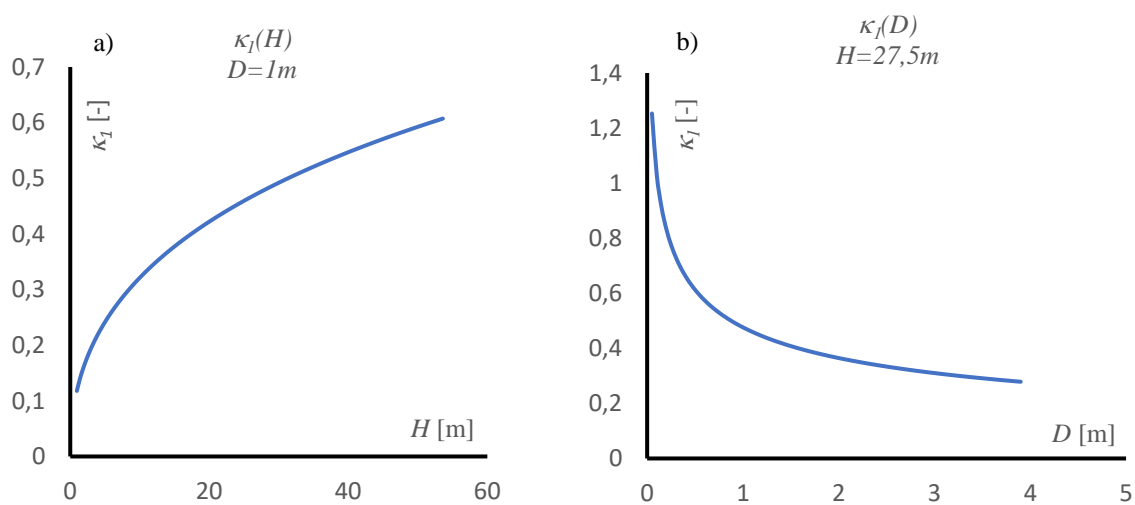
Rys. 8.4 Zmiana wartości κ_2 przy zmianie: a) średnicy; b) długości pała



Rys. 8.5 Zmiana wartości N_{gr1} przy zmianie: a) średnicy; b) długości pała

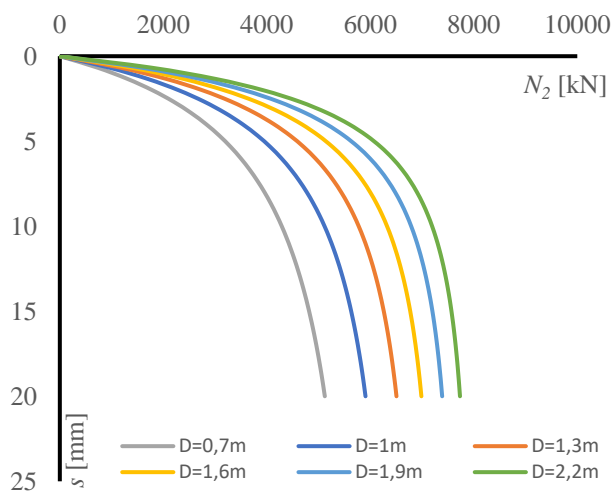


Rys. 8.6 Zmiana wartości C_1 przy zmianie: a) średnicy; b) długości pała

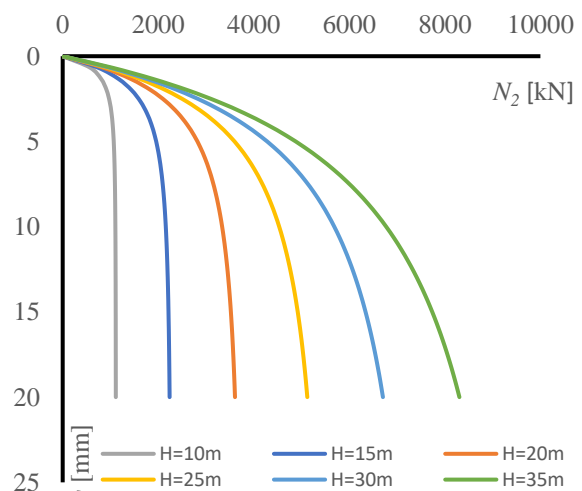


Rys. 8.7 Zmiana wartości κ_1 przy zmianie: a) średnicy; b) długości pała

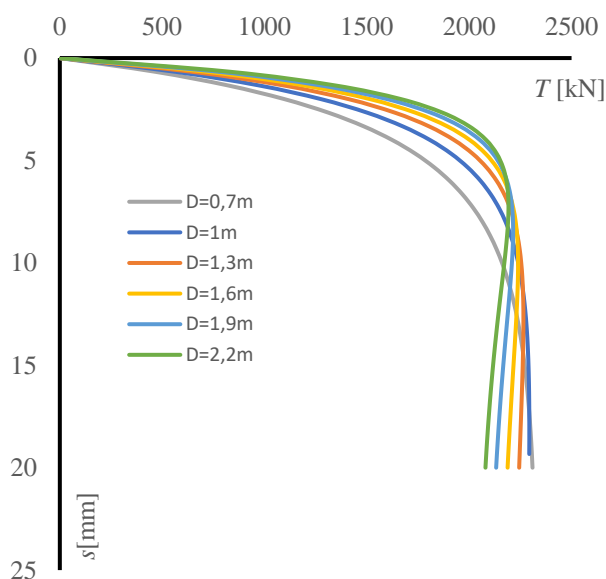
Na podstawie wykresów przedstawionych na rys. 8.2 ÷ rys. 8.7 można przeanalizować zmianę wartości każdego z parametrów opisujących krzywe M-K w zależności od wymiarów geometrycznych pała. Umożliwia to m.in. przeprowadzenie optymalizacji po wykonaniu testu statycznego pała, polegającej na dobraniu odpowiedniej średnicy oraz długości, zapewniającej wystarczającą z uwagi na bezpieczeństwo nośność graniczną w odniesieniu do rzeczywistych warunków współpracy pała z gruntem, bez potrzeby wykonywania ponownego testu statycznego. W kolejnym kroku analizy wyników ustalono zmianę przebiegu krzywych M-K w zależności od średnicy oraz długości pała przedstawioną na rys. 8.8 ÷ rys. 8.19.



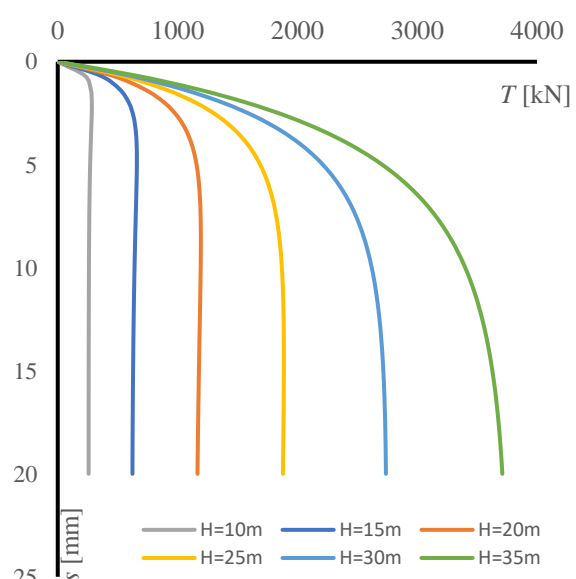
Rys. 8.8 Zmiana przebiegu krzywej oporu całkowitego pała dla różnych średnic



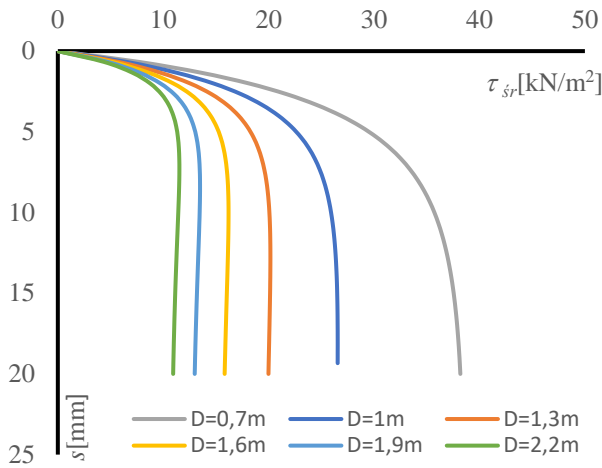
Rys. 8.9 Zmiana przebiegu krzywej oporu całkowitego pała dla różnych wysokości



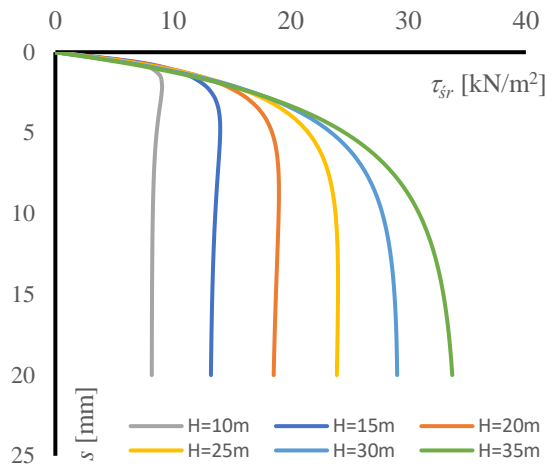
Rys. 8.10 Zmiana przebiegu krzywej oporu pobocznego pała dla różnych średnic



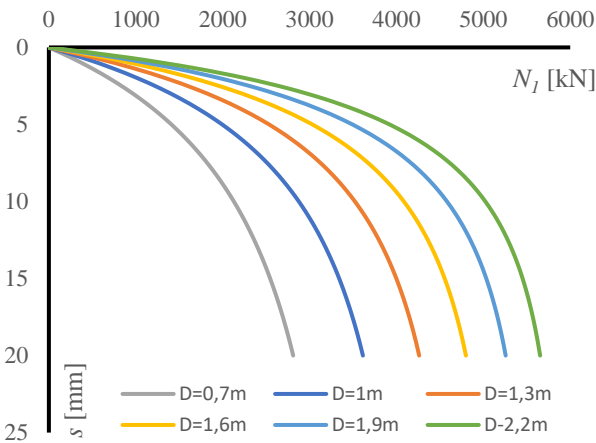
Rys. 8.11 Zmiana przebiegu krzywej oporu pobocznego pała dla różnych wysokości



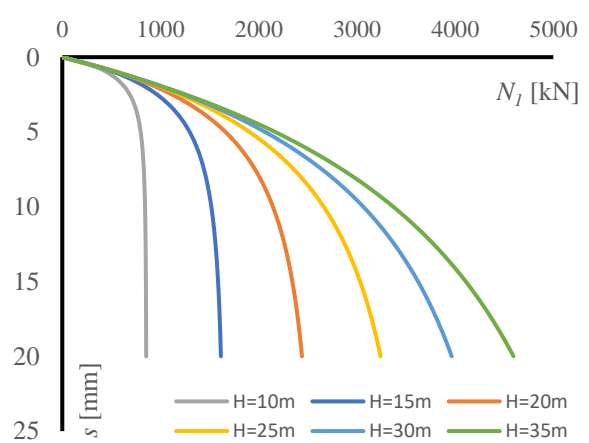
Rys. 8.12 Zmiana przebiegu mobilizacji naprężeń na poboczniczy pala dla różnych średnic



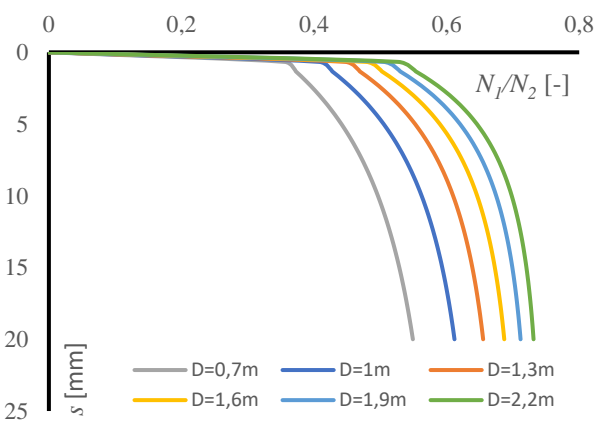
Rys. 8.13 Zmiana przebiegu mobilizacji naprężeń na poboczniczy pala dla różnych długości



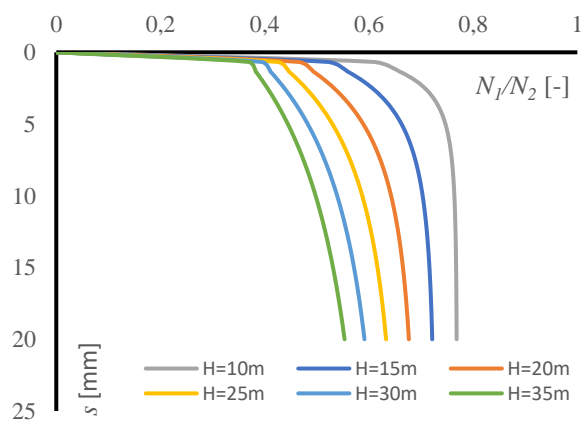
Rys. 8.14 Zmiana przebiegu krzywej oporu podstawy pala dla różnych średnic



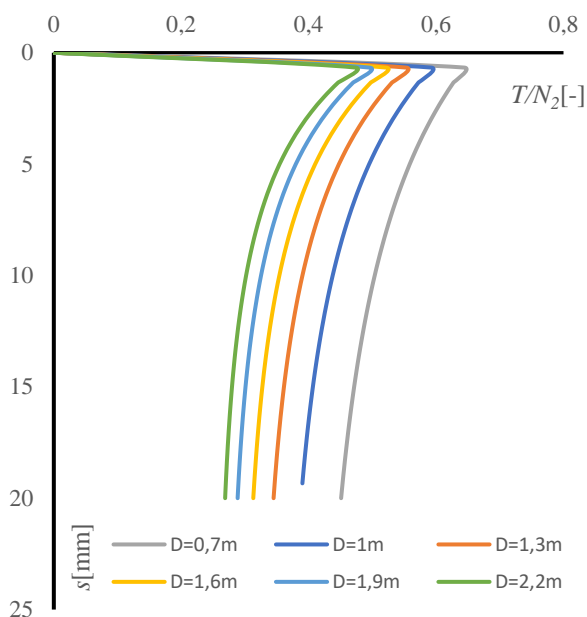
Rys. 8.15 Zmiana przebiegu krzywej oporu podstawy pala dla różnych wysokości



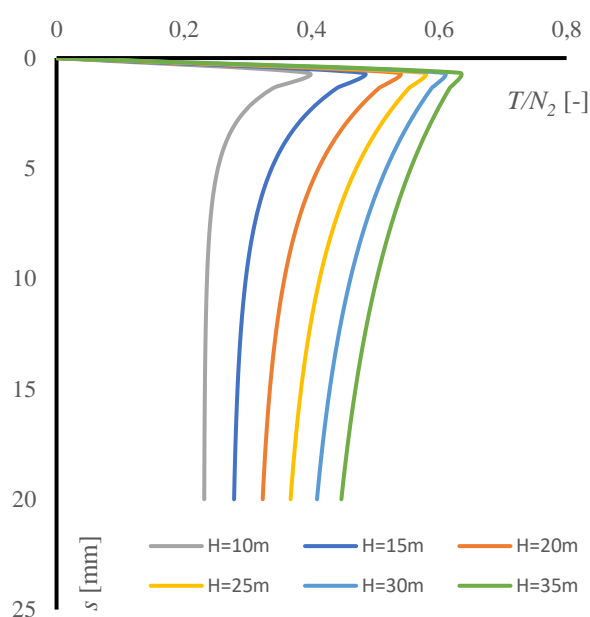
Rys. 8.16 Zmiana udziału podstawy w oporze całkowitym pala dla różnych średnic



Rys. 8.17 Zmiana udziału podstawy w oporze całkowitym pala dla różnych długości



Rys. 8.18 Zmiana udziału poboczniczy w oporze całkowitym pala dla różnych średnic



Rys. 8.19 Zmiana udziału poboczniczy w oporze całkowitym pala dla różnych długości

Na wykresach przedstawionych na rys. 8.8 ÷ rys. 8.9 zaobserwować można w jaki sposób zmienia się rozkład oporów, na poboczniczy pala $T(s)$, pod podstawą pala $N_1(s)$ oraz oporu całkowitego $N_2(s)$, dla różnych długości oraz średnic. Warto zwrócić uwagę na zmianę przebiegu mobilizacji oporu poboczniczy przedstawioną na rys. 8.10 ÷ rys. 8.13. W przypadku zwiększenia średnicy pala, przy stałej długości, można zaobserwować występowanie coraz wyraźniejszego ekstremum krzywej oporu poboczniczy, co można zaobserwować na rys. 8.10 oraz rys. 8.12. Natomiast, jeżeli przy zachowaniu stałej średnic zmianie podlega długość pala ekstremum krzywej oporu poboczniczy staje się bardziej wyraźne wraz ze zmniejszeniem długości, co można zaobserwować na rys. 8.11 oraz rys. 8.13. W powyższej analizie przedstawiono możliwość ustalenia przebiegu krzywych M-K dla dowolnej średnicy oraz dowolnej długości, co w rezultacie pozwala na prowadzenie efektywnej analizy sposobu współpracy pala z gruntem, poprzez zbadanie zmiany wartości osiadania dla pali o różnych średnicach i różnych długościach, obciążonych zadaniem obciążeniem.

9. PRAKTYCZNE ZASTOSOWANIE

9.1 Praktyczne przykłady konwersji

W poniższym punkcie przedstawiono praktyczne przykłady konwersji, wykorzystując dwie pary analizowanych pali o zbliżonych wartościach parametru α . Pierwszą parę stanowią pale 36N-10L oraz 38-12L, a drugą stanowią pale 38-12L oraz 25N-10L. Przy wyznaczaniu nośności granicznej pala uwzględniono zmianę naprężeń pod podstawą pala wg równania (8.14), a wartości q_b przyjęto na podstawie tab. 6.8. Wyniki obliczeń zestawiono poniżej w tab. 9.1.

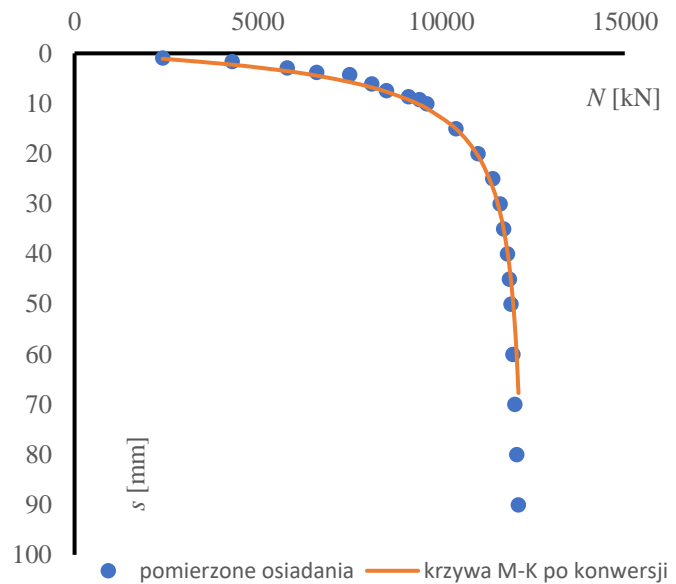
Tab. 9.1 Praktyczny przykład konwersji

parametr	stan „0” pal 36N-10L	stan „1” pal 38-12L	stan „0” pal 38-12L	stan „1” pal 25N-10L
H [m]	27,5	33,5	33,5	27,5
D [m]	1	1,5	1,5	1
H/D [-]	27,5	22,33	22,33	27,5
q_b [MPa]	4,33	5,19	5,19	4,23
C_2 [mm/kN]	0,00062	0,000038	0,00037	0,00063
κ_2	0,61	0,553	0,5	0,55
N_{gr2} [kN]	6590	12330	12200	6370
C_1 [mm/kN]	0,0016	0,0009	0,0008	0,0010
κ_1	0,48	0,44	0,41	0,44
N_{gr1} [kN]	4318	8404	8267	4346
C_1/C_2	2,5921	2,41	2,25	2,41
N_{gr1}/N_{gr2}	0,66	0,68	0,71	0,68

Następnie w tab. 9.2, tab. 9.3 oraz rys. 9.1, rys. 9.2 zweryfikowano zgodność wartości osiadania obliczonych na podstawie krzywej M-K uzyskanej w wyniku konwersji z wartościami osiadania pomierzonymi podczas testów statycznych odpowiednio dla pala 38-12L oraz 38-10P.

Tab. 9.2 Weryfikacja konwersji pala 36N-10L na 38-12L

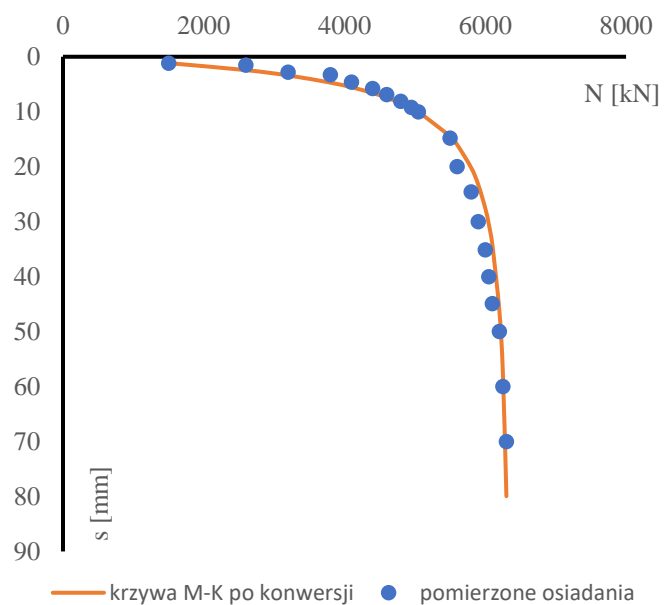
N_i [kN]	$s_{i,pom}$ [mm]	$s_{i,calc}$ [mm]
2400	0,9	1,07
4300	1,6	2,25
5800	2,9	3,54
6600	3,8	4,44
7500	4,2	5,71
8100	6,1	6,79
8500	7,4	7,65
9100	8,6	9,24
9400	9,2	10,21
9600	10	10,96
10400	15	15,05
11000	20	20,42
11400	25	26,73
11600	30	31,77
11700	35	35,18
11800	40	39,56



Rys. 9.1 Krzywa M-K po konwersji pala 36N-10L na 38-12L

Tab. 9.3 Weryfikacja konwersji pala 38-12L
na 25N-10L

N_i [kN]	$s_{i,pom}$ [mm]	$s_{i,calc}$ [mm]
1500	1,2	1,16
2600	1,5	2,43
3200	2,8	3,40
3800	3,3	4,71
4100	4,6	5,56
4400	5,8	6,60
4600	6,9	7,44
4800	8,1	8,45
4950	9,2	9,34
5050	10	10,02
5500	14,8	14,49
5600	20	16,00
5800	24,6	20,20
5900	30	23,28
6000	35,1	27,58
6050	40	30,49
6100	44,9	34,19
6200	50	46,23
6250	60	57,55



Rys. 9.2 Krzywa M-K po konwersji pala 38-12L na 25N-10L

9.2 Analiza wartości współczynnika bezpieczeństwa

Wykorzystując równanie M-K w poniższej postaci:

$$s(N) = C_2 N_{gr2} \frac{\left(1 - \frac{N}{N_{gr2}}\right)^{-\kappa_2} - 1}{\kappa_2} \quad (9.1)$$

Przyjmując, że:

$$s_0 = C_2 N_{gr2} \quad (9.2)$$

Wartość osiadania dopuszczalnego s_{dop} odpowiadająca dopuszczalnemu obciążeniu N_{dop} jest wówczas równa:

$$s(N_{dop}) = s_{dop} = s_0 \frac{\left(1 - \frac{N_{dop}}{N_{gr2}}\right)^{-\kappa_2} - 1}{\kappa_2} \quad (9.3)$$

W przypadku, gdy:

$$s_{dop} = s_0 \quad (9.4)$$

spełniona musi być poniższa równość:

$$\frac{\left(1 - \frac{N_{dop}}{N_{gr2}}\right)^{-\kappa_2} - 1}{\kappa_2} = 1 \quad (9.5)$$

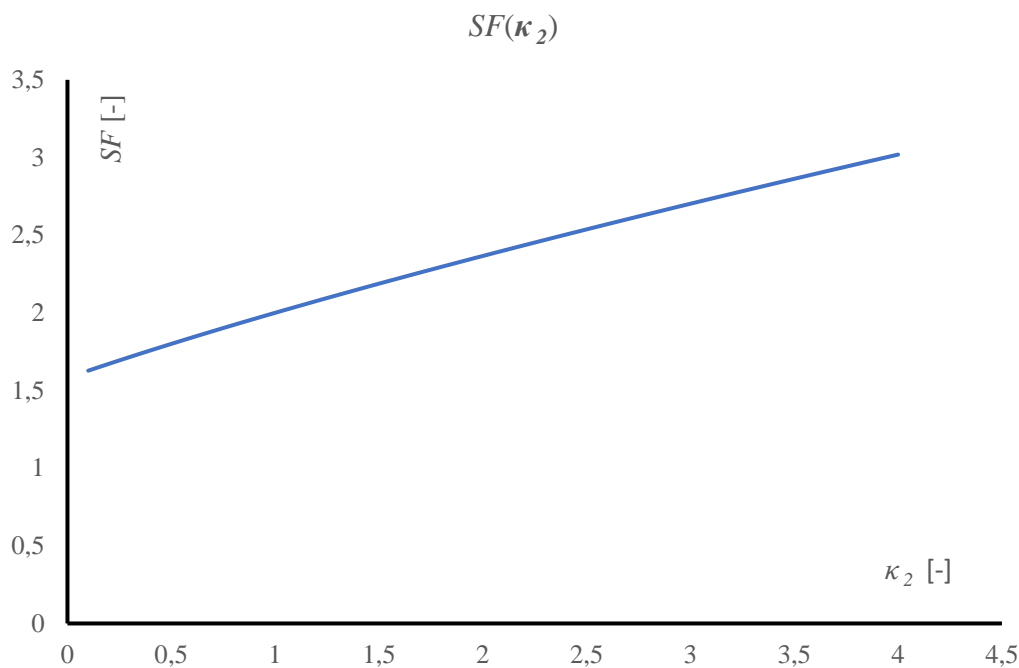
co prowadzi do zależności opisującej współczynnik bezpieczeństwa SF jako równy:

$$SF = \frac{N_{gr2}}{N_{dop}} \quad (9.6)$$

lub

$$SF(\kappa_2) = \frac{1}{1 - (\kappa_2 + 1)^{-\frac{1}{\kappa_2}}} \quad (9.7)$$

Powyzsza zależność, którą przedstawiono w formie graficznej na rys. 9.3 jest prawdziwa tylko w przypadku, gdy dopuszczalne osiadanie pala s_{dop} jest równe s_0 .



Rys. 9.3 Zmiana współczynnika bezpieczeństwa SF dla $s_{dop} = s_0$

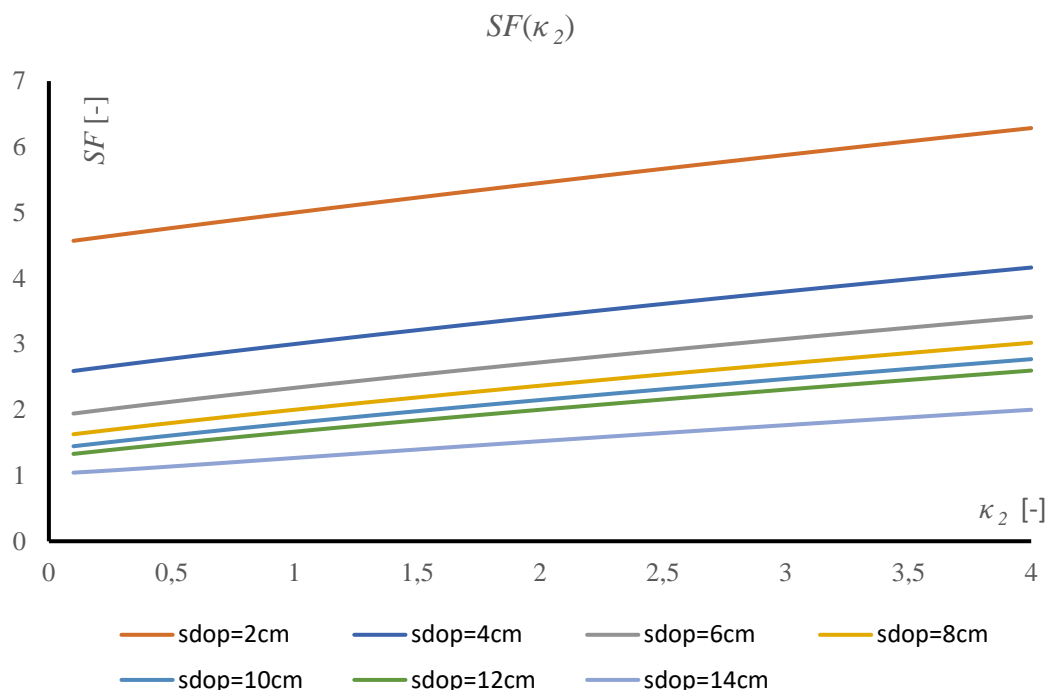
W przypadku, gdy:

$$s_{dop} \neq s_0 \quad (9.8)$$

Przekształcenie równania (9.3) prowadzi do zależności:

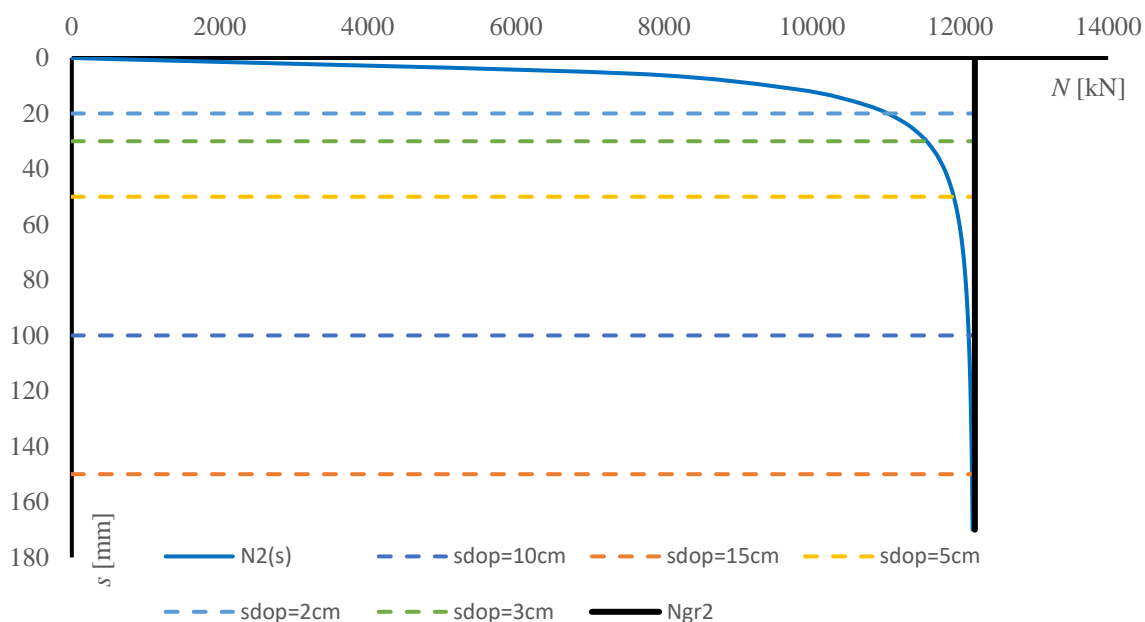
$$SF\left(\kappa_2; \frac{s_{dop}}{s_0}\right) = \frac{1}{1 - \left(\frac{s_{dop}}{s_0} \kappa_2 + 1\right)^{\frac{1}{\kappa_2}}} \quad (9.9)$$

Wynika z tego, że współczynnik bezpieczeństwa jest zależny zarówno od wartości κ_2 , jak i od dopuszczalnego osiadania s_{dop} . Przykładowo, jeżeli $s_0 = 8\text{cm}$ można dla różnych wartości dopuszczalnego osiadania s_{dop} przeanalizować przebieg zależności (9.9) opisującej współczynnik bezpieczeństwa, co zostało przedstawione na rys. 9.4.



Rys. 9.4 Zmiana współczynnika bezpieczeństwa SF dla $s_{dop} \neq s_0$

Wykorzystując aproksymowaną ciągłą krzywą obciążenia dla pala 38-12L o średnicy 1,5m można przeanalizować stopień wykorzystania nośności dla założonych wartości osiadania dopuszczalnego s_{dop} , tak jak to przedstawiono poniżej na rys. 9.5.



Rys. 9.5 Analiza wykorzystania pala dla różnych wartości osiadania dopuszczalnego

Następnie wykorzystując zależność (6.18) opisującą nośność graniczną pala przedstawioną rozdziale 6:

$$N_{gr2} = 4,439 \cdot 10^{-3} \left(\frac{H}{D}\right)^{1,757} q_b D^2 \quad (9.10)$$

Przyjęto dodatkowo założenie, że zamiast średnicy pala D należy uwzględnić również strefę aktywną pod podstawą pala D_p opisaną równaniem:

$$D_p = D(1 + \kappa_2) \quad (9.11)$$

Zamiast stałej $4,439 \cdot 10^{-3}$ podstawioną ogólną wartość ξ . Otrzymano wówczas:

$$N_{gr2} = \xi \left(\frac{H}{D}\right)^{7/4} q_b D^2 (1 + \kappa_2)^{1/4} \quad (9.12)$$

Przyjmując zależność ogólną opisującą parametr C_2 w postaci:

$$C_2 = \frac{1}{\pi D (1 + \kappa_2) q_b f(q_b)} \quad (9.13)$$

Po przekształceniach zapisano:

$$s_0 = C_2 N_{gr2} = \frac{\xi D}{\pi f(q_b)} \left(\frac{H}{D}\right)^{7/4} (1 + \kappa_2)^{-3/4} \quad (9.14)$$

Dla przeciętnych warunków gruntowych charakteryzujących się poniższymi parametrami:

$$\frac{H}{D} = 30; f(q_b) = 1,6; \kappa_2 = 1; (1 + \kappa_2)^{-3/4} = 0,595$$

otrzymano po podstawieniu do równania (9.14):

$$s_0 = \frac{\xi D}{\pi 1,6} \cdot 385 \cdot 0,595 = 46\xi D \quad (9.15)$$

PN-EN 1997-1 [83] rekomenduje szacunkowo:

$$s_0 = 0,1D \quad (9.16)$$

Dla różnych pali wielkość ta może być inna. W przypadku przeciętnych warunków gruntowych po podstawieniu otrzymano:

$$0,1D = 46\xi D \rightarrow \xi = \frac{1}{460} \quad (9.17)$$

Można również do równania (9.14) podstawić zależność oryginalną (9.10), co umożliwi obliczenie s_0 dla różnych $\frac{H}{D}$ oraz κ_2 :

$$s_0 = C_2 N_{gr2} = \frac{4,439 \cdot 10^{-3}}{\pi} \frac{D}{f(q_b)} \left(\frac{H}{D}\right)^{7/4} (1 + \kappa_2)^{-3/4} \quad (9.18)$$

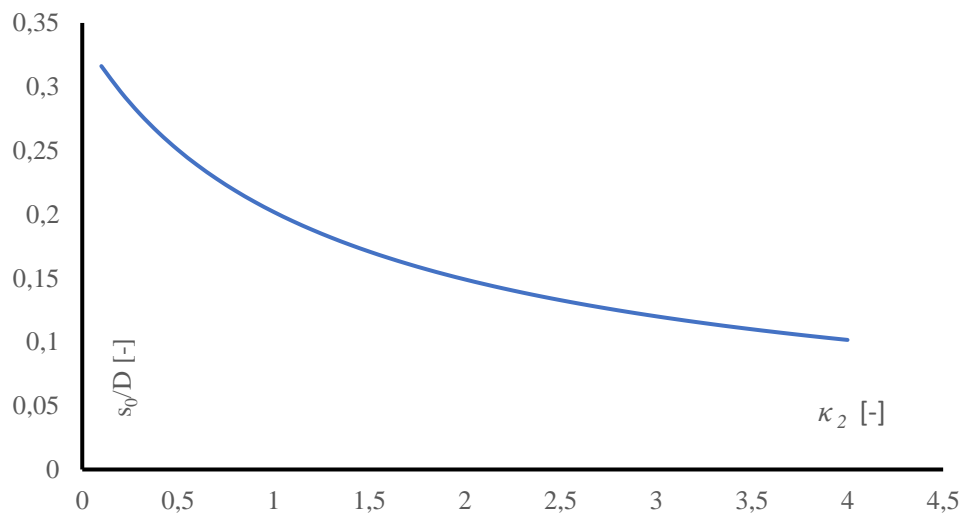
Dla przeciętnych warunków gruntowych otrzymano wówczas:

$$s_0 = C_2 N_{gr2} = \frac{4,439 \cdot 10^{-3}}{\pi} \frac{D}{1,6} \cdot 385 \cdot 0,595 = 0,20D \quad (9.19)$$

Powyższe równanie można również przekształcić do postaci funkcji dla zmiennej κ_2 :

$$\frac{s_0}{D}(\kappa_2) = \frac{4,439 \cdot 10^{-3}}{\pi} \cdot \frac{1}{1,6} \cdot 385 (1 + \kappa_2)^{-3/4} \quad (9.20)$$

którą przedstawiono graficznie na rys. 9.6.



Rys. 9.6 Funkcja $\frac{s_0}{D}(\kappa_2)$

10. WNIOSKI I PROGRAM DALSZYCH BADAŃ

Wnioski ogólne

1. W pracy przedstawiono analizę możliwości zastosowania krzywej Meyera-Kowalowa do oceny możliwości konwersji krzywej próbnych statycznych obciążeń pala. Badania miały na celu sformułowanie zasad, na podstawie których możliwe będzie, dla zadanej krzywej próbnego statycznego obciążenia pala, określenie krzywej obciążenia dla pala o innej średnicy albo długości, bez potrzeby ponownego wykonania testu statycznego. Przeprowadzone badania potwierdziły możliwość wykorzystania krzywej M-K wraz z występującymi w niej zależnościami do konwersji krzywej obciążenia pala. Oznacza to, że po przeprowadzeniu próbnych statycznych obciążeń pala, dla zadanej długości i średnicy, można otrzymać metodami obliczeniowymi krzywą dla pala w tych samych warunkach gruntowych, o innej średnicy lub długości, bez potrzeby ponawiania próbnych statycznych obciążeń.
2. Analiza została przeprowadzona w oparciu o badania eksperymentalne przeprowadzone w warunkach terenowych dla pali wielkowymiarowych obciążonych do zniszczenia, tzn. do osiągnięcia nośności granicznej N_{gr2} . Pale zostały wykonane podczas budowy podpór mostu przez Wisłę przez przedsiębiorstwo Energopol Szczecin S.A., które zgodziło się na wykorzystanie ich dla celów naukowych. Badaniami objęto siedem pali, które zostały opisane w części eksperymentalnej.
3. Badania przeprowadzone z wykorzystaniem wyników testów statycznych pali przeprowadzonych w pełnym zakresie obciążenia, pozwoliły na sformułowanie oraz weryfikację zależności opisującej nośność graniczną pala, jako funkcję średnicy, długości oraz naprężeń pod podstawą pala. Dla wszystkich analizowanych pali nośność graniczna, obliczona proponowanym równaniem, charakteryzowała się dobrą zgodnością.
4. Analiza krzywych próbnych statycznych obciążeń wskazuje, iż na podstawie testu statycznego jesteśmy w stanie wyznaczyć parametr α określający sposób współpracy pala z gruntem w podstawie. Zależnie od sposobu wykonania, jak również sposobu obciążenia, powstaje powierzchnia aktywna pod podstawą pala o różnym kształcie, co powoduje mniejszy lub większy docisk podstawy pala na skutek rozkładu naprężeń. Jeżeli przyjąć, że parametr α charakteryzuje tę współpracę to dla badanych pali przyjmował on wartości w przedziale od 0,029 do 0,4.

5. Przygotowano pakiet programów obliczeniowych, który pozwala na podstawie próbnych statycznych obciążeń pala określić parametry krzywej M-K, czyli N_{gr2} , C_2 , κ_2 , jak również przeprowadzić ich konwersję dla zmienionej średnicy oraz długości pala. Autor wskazuje na metody statystyki matematycznej, które prowadzą do obliczonych wartości osiadania najbardziej zbliżonych do wyników pomiarów.
6. Wykorzystując analizę próbnych statycznych obciążeń pala, autor przygotował metodę obliczeniową, która pozwala na konwersję zależności $s - N_2$ dla pala w tych samych warunkach, ale o innej średnicy oraz innej długości. Określenie w tych samych warunkach oznacza, że dotyczy to zarówno parametrów gruntowych, jak i wartości α , która uwzględnia charakter współpracy podstawy pala z gruntem w podstawie.

Wnioski szczegółowe

1. Szczegółowa analiza przedstawia eksperymenty numeryczne związane z wyznaczeniem parametrów równania Meyera-Kowalowa. Badania, polegające na analizie rezultatów otrzymanych za pomocą różnych sposobów estymacji wykorzystujących metody statystyki matematycznej z uwzględnieniem różnych części zbioru wartości $\{s_i, N_i\}$, pozwoliły na ustalenie rekomendowanego sposobu prowadzenia obliczeń, szczegółowo opisanego w rozprawie. Proponowany przez autora sposób prowadzenia obliczeń opiera się na aproksymacji przeprowadzonej w dwóch etapach. W pierwszym etapie optymalizacji podlega jedynie wartość nośności granicznej pala. Następnie w drugim etapie, dla ustalonej wartości nośności granicznej pala N_{gr2} , przeprowadzono w oparciu o metody statystyki matematycznej estymację pozostałych parametrów z wykorzystaniem równań M-K zapisanych dla dwóch kolejnych punktów zbioru wartości, co pozwala na minimalizację błędów mogących wystąpić w zbiorach $\{s_i, N_i\}$. Dla każdego z analizowanych pali uzyskano dobrą zgodność obliczonych osiadań z wartościami pomierzonymi.
2. Z badań można również wyciągnąć wniosek dotyczący współpracy podstawy pala z gruntem. Dla pali charakteryzujących się zbliżonymi wartościami naprężeń pod podstawą pala q_b parametr α przyjmuje różną wartość. Oznacza to, że istotną rolę we współpracy pala z gruntem ma wzajemne oddziaływanie podstawy pala i gruntu po zagłębieniu pala, co skutkuje różnym kształtem powierzchni aktywnej pod podstawą pala. Mając to na względzie, mówiąc o konwersji krzywej $Q-s$ autor przyjął założenie, że konwersja dotyczy zmiany tylko średnicy i długości pala.

3. Sformułowane równanie opisujące nośność graniczną pala, rezultaty eksperymentów numerycznych pozwalające na wyznaczenie krzywych M-K dla każdego z pali z dużą dokładnością oraz obliczenie parametru α , jak również wykorzystanie innych badań przedstawionych w literaturze, pozwoliły na sformułowanie metody konwersji w pełnym zakresie obciążenia, co było celem rozprawy. Konwersja możliwa jest zarówno dla krzywej oporu całkowitego $N_2(s)$, jak i oporu podstawy $N_1(s)$ i poboczniczy $T(s)$.
4. Na podstawie metody konwersji w pełnym zakresie obciążenia możliwa jest analiza przebiegu zmian parametrów M-K w postaci ciągłej funkcji dla zmiennej średnicy oraz długości pala. Z praktycznego punktu widzenia umożliwia to efektywne prowadzenie optymalizacji wymiarów geometrycznych pali, np. poprzez analizę przebiegu zmiany nośności granicznej pala w odniesieniu do rzeczywistych warunków gruntowych ustalonych na podstawie rezultatów próbnego obciążenia statycznego pala. Dodatkowo można również analizować zmianę przebiegu krzywej $Q-s$, opisującej sposób współpracy pala z gruntem w odniesieniu do zmiany jego średnicy oraz długości. Możliwe jest przeprowadzenie analizy zależności między obciążeniem, a osiadaniem, co pozwala na zmianę wymiarów geometrycznych pala w taki sposób, aby zwiększyć wykorzystanie z uwagi na stan graniczny użyteczności, związany z osiadaniem dopuszczalnym.
5. W pracy podano metodę praktycznego wykorzystania zależności opracowanych w ramach rozprawy doktorskiej. Do analizy przyjęto pale o zbliżonych wartościach parametru α natomiast o różnych średnicach oraz długościach i wskazano możliwość przeprowadzenia konwersji, co potwierdza tezę zawartą w rozprawie. Drugim elementem praktycznego zastosowania jest analiza możliwości spełnienia warunków pierwszego i drugiego stanu granicznego dla pali, tzn. założono, że osiadanie jest równe osiadaniu dopuszczalnemu i poszukiwana jest wartość współczynnika bezpieczeństwa SF , który spełnia to założenie. Przedstawiono również przypadek, gdzie zakładamy wartość SF , czyli dla założonego obciążenia N_{dop} z krzywej $Q-s$ pala odczytujemy odpowiadające osiadanie, które następnie można porównać z wartością dopuszczalną. Wykorzystanie obu warunków równocześnie jest trudne, ponieważ, aby wykorzystać nośność pala potrzebne jest duże osiadanie, a wówczas przekroczone jest osiadanie dopuszczalne lub następuje zbytne zbliżenie do nośności granicznej, co powoduje wartości współczynnika bezpieczeństwa bliskie 1,0.

Program dalszych badań

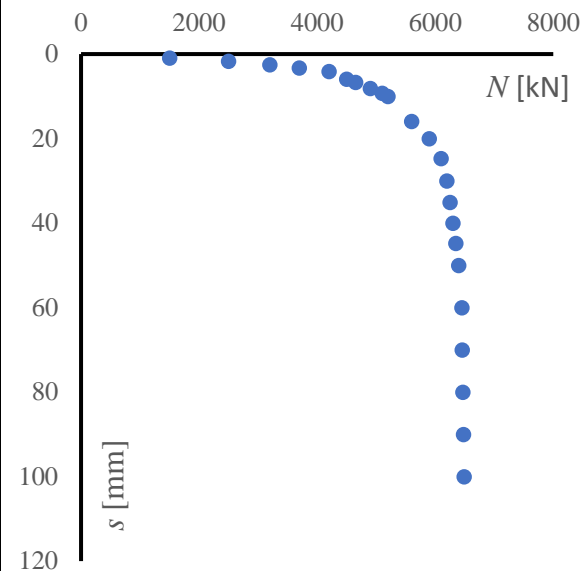
1. Program dalszych badań przewiduje kontynuację weryfikacji proponowanych rozwiązań, przeprowadzoną z wykorzystaniem pali wykonanych w różnych warunkach gruntowych oraz przy zastosowaniu różnych technologii. Umożliwiłyby to uogólnienie przedstawionego w rozprawie równania opisującego nośność graniczną pala, która jest podstawowym parametrem charakteryzującym bezpieczeństwo fundamentu palowego.
2. Istotnym elementem prowadzonych dalej badań będzie również analiza możliwości ustalenia analitycznej zależności opisującej parametr α , który zdaniem autora charakteryzuje sposób współpracy podstawy pala z gruntem.
3. Rozbudowanie zależności dotyczących sposobu wyznaczania parametru α oraz równania opisującego nośność graniczną, co pozwoliłoby na uszczegółowienie proponowanej metody konwersji w taki sposób, aby możliwa była również w pełnym zakresie obciążenia dla przypadku zmiany parametrów geotechnicznych, jak również zmiany sposobu reakcji podłoża gruntowego pod podstawą pala.
4. Wykorzystanie metody konwersji do analizy współpracy pala z gruntem, pozwalające na optymalne wykorzystanie nośności pala, przy zachowaniu wymaganego współczynnika bezpieczeństwa.

11. ZALĄCZNIKI

Załącznik A. Wyniki testów statycznych

Tab. 11.1 Wyniki testu statycznego dla pala 36N-10L

s_i [mm]	N_i [kN]
0,9	1500
1,7	2500
2,5	3200
3,3	3700
4,1	4200
5,9	4500
6,7	4650
8,1	4900
9,3	5100
10	5200
15,9	5600
20	5900
24,7	6100
30	6200
35,1	6250
40	6300
44,8	6350
50	6400
60	6450
70	6460
80	6470
90	6480
100	6490

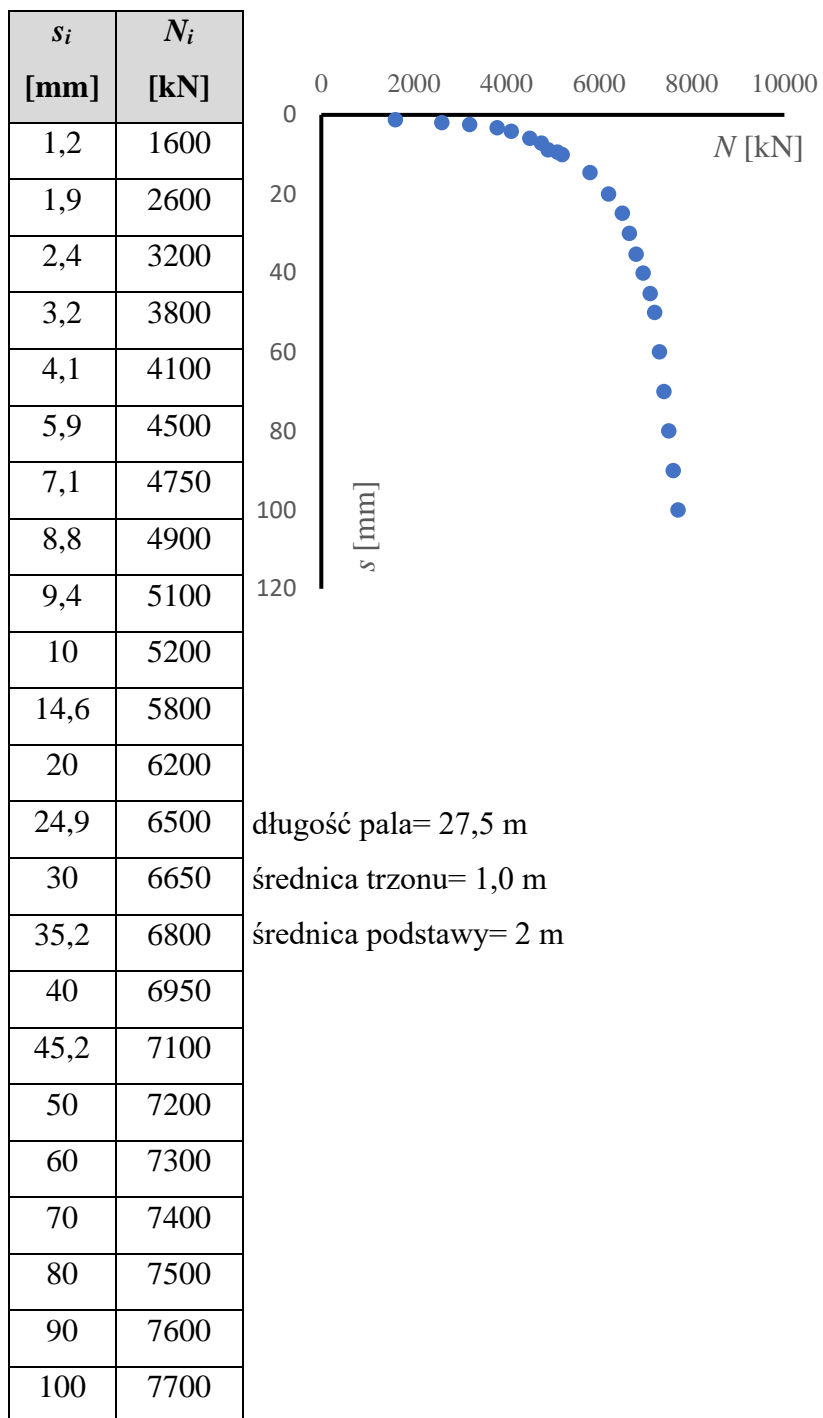


długość pala= 27,5 m

średnica trzonu= 1,0 m

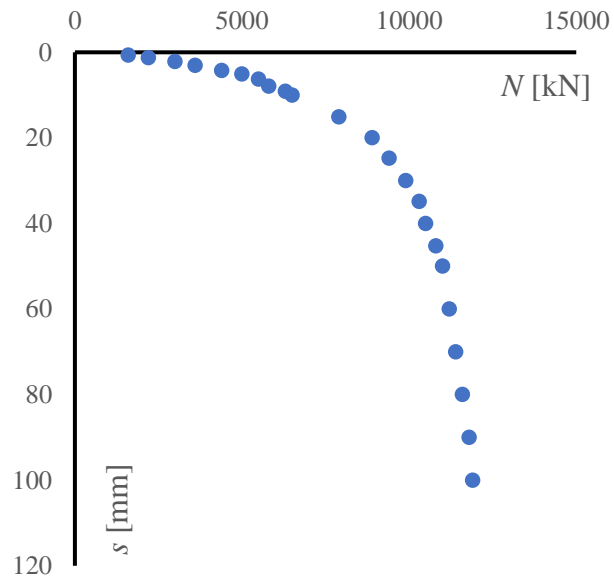
średnica podstawy= 1,0 m

Tab. 11.2 Wyniki testu statycznego dla pala 31-10L



Tab. 11.3 Wyniki testu statycznego dla pala 38-10P

s_i [mm]	N_i [kN]
0,7	1600
1,3	2200
2,2	3000
3,1	3600
4,3	4400
5,1	5000
6,3	5500
7,9	5800
9,1	6300
10	6500
15,1	7900
20	8900
24,8	9400
30	9900
34,9	10300
40	10500
45,3	10800
50	11000
60	11200
70	11400
80	11600
90	11800
100	11900



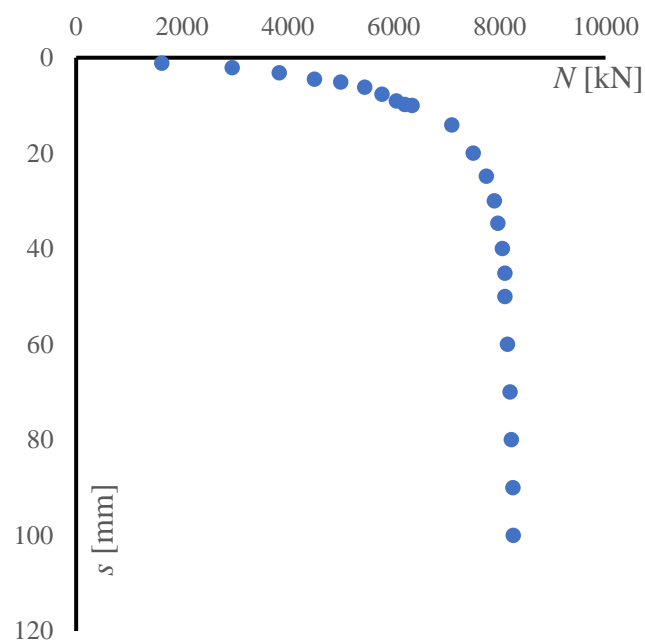
długość pala= 31,5 m

średnica trzonu= 1,5 m

średnica podstawy= 1,5 m

Tab. 11.4 Wyniki testu statycznego dla pala 21N-10L

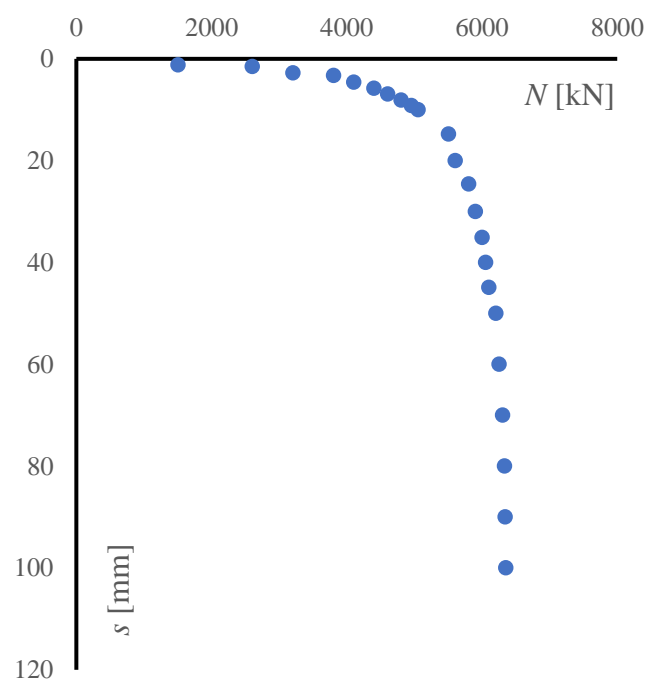
s_i [mm]	N_i [kN]
1,2	1620
2,1	2950
3,2	3840
4,5	4500
5,1	5000
6,2	5450
7,7	5780
9,1	6050
9,8	6210
10	6350
14,1	7100
20	7500
24,8	7750
30	7900
34,7	7970
40	8050
45,1	8100
50	8100
60	8150
70	8200
80	8220
90	8250
100	8260



długość pala= 27,5 m
średnica trzonu= 1,0 m
średnica podstawy= 2,0 m

Tab. 11.5 Wyniki testu statycznego dla pala 25N-10L

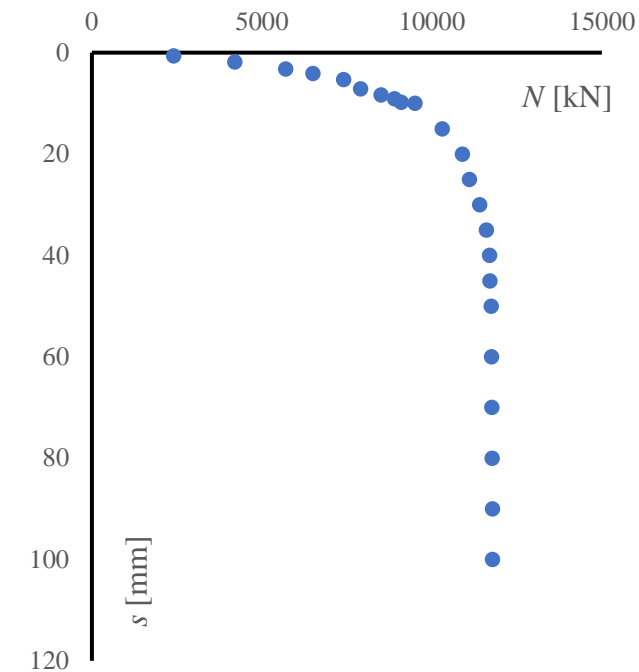
s_i [mm]	N_i [kN]
1,2	1500
1,5	2600
2,8	3200
3,3	3800
4,6	4100
5,8	4400
6,9	4600
8,1	4800
9,2	4950
10	5050
14,8	5500
20	5600
24,6	5800
30	5900
35,1	6000
40	6050
44,9	6100
50	6200
60	6250
70	6300
80	6330
90	6340
100	6350



długość pala= 27,5 m
średnica trzonu= 1,0 m
średnica podstawy= 1,0 m

Tab. 11.6 Wyniki testu statycznego dla pala 38-12P

s_i [mm]	N_i [kN]
0,6	2400
1,8	4200
3,2	5700
4,1	6500
5,3	7400
7,1	7900
8,3	8500
9,1	8900
9,8	9100
10	9500
15	10300
20	10900
25	11100
30	11400
35	11600
40	11700
45	11710
50	11740
60	11750
70	11760
80	11770
90	11780
100	11780



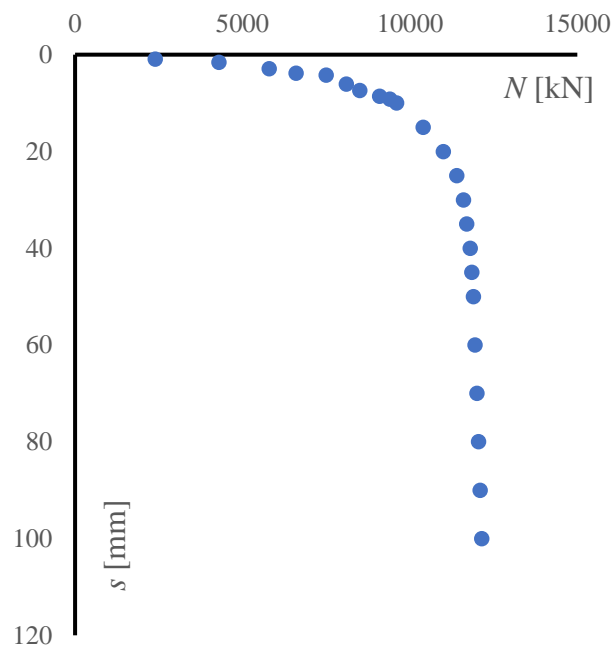
długość pala= 33,5 m

średnica trzonu= 1,5 m

średnica podstawy= 1,5 m

Tab. 11.7 Wyniki testu statycznego dla pala 38-12L

s_i [mm]	N_i [kN]
0,9	2400
1,6	4300
2,9	5800
3,8	6600
4,2	7500
6,1	8100
7,4	8500
8,6	9100
9,2	9400
10	9600
15	10400
20	11000
25	11400
30	11600
35	11700
40	11800
45	11850
50	11900
60	11950
70	12000
80	12050
90	12100
100	12150



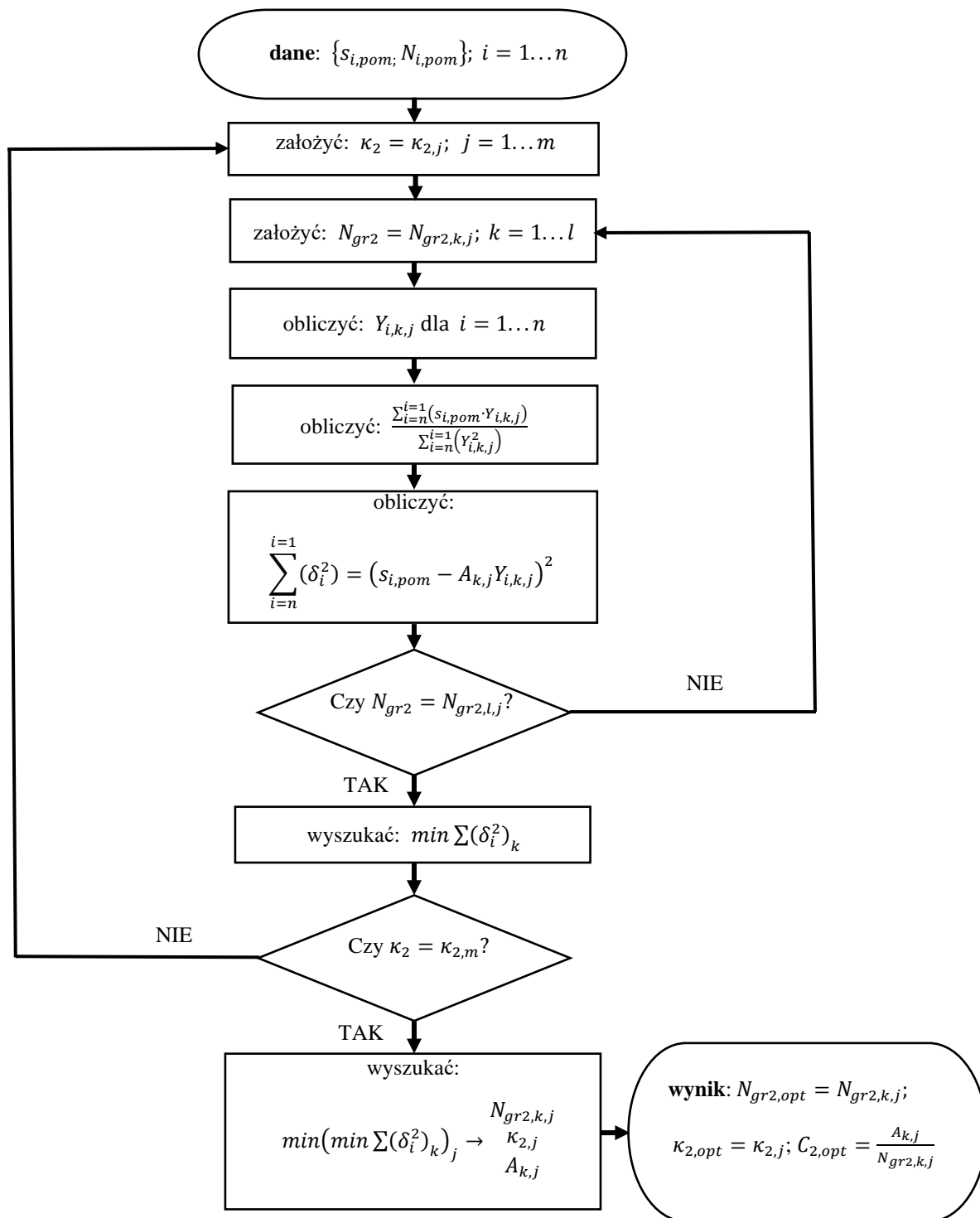
długość pala= 33,5 m

średnica trzonu= 1,5 m

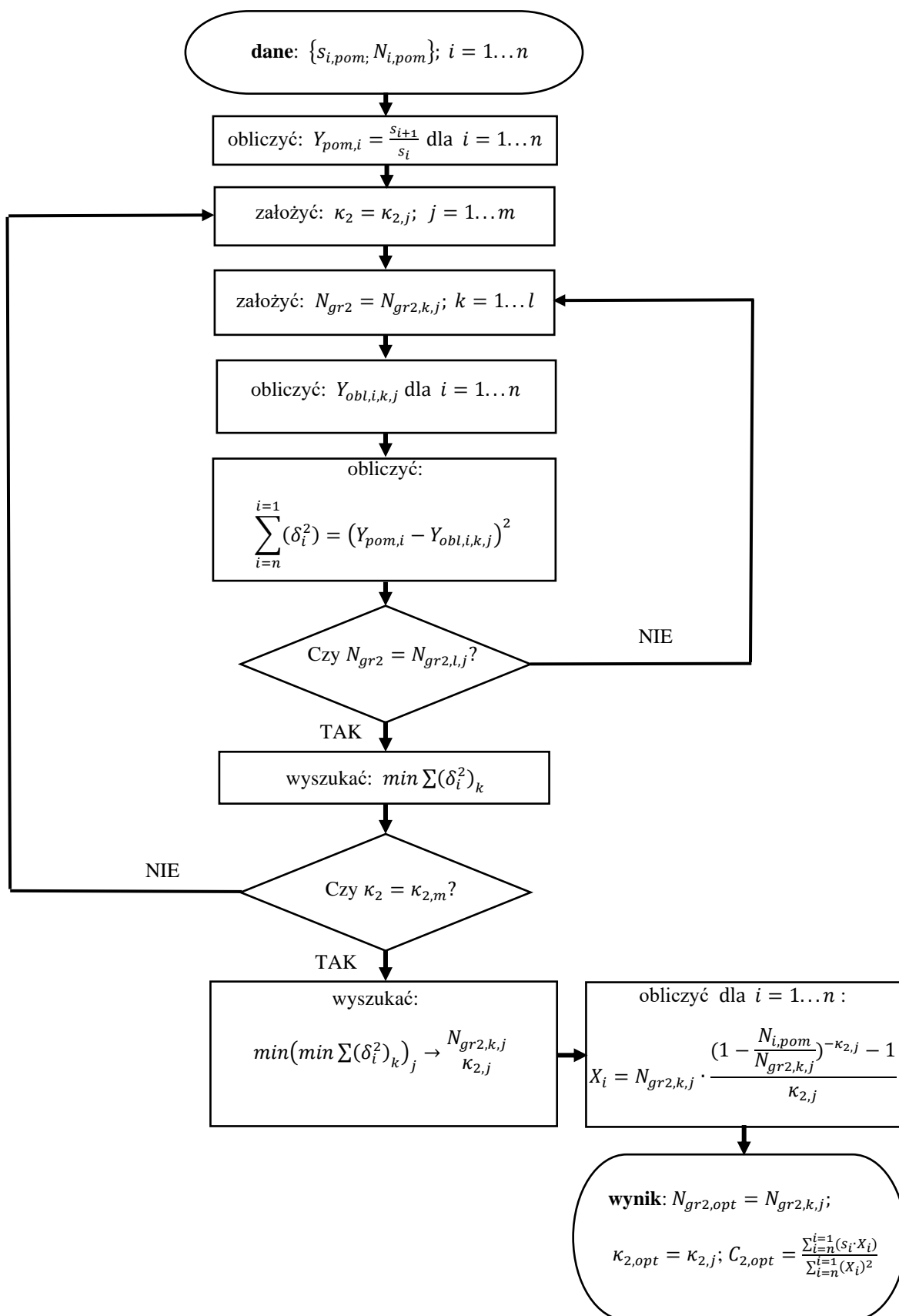
średnica podstawy= 1,5 m

Załącznik B. Aproksymacja metodami I-III dla całego zbioru wartości

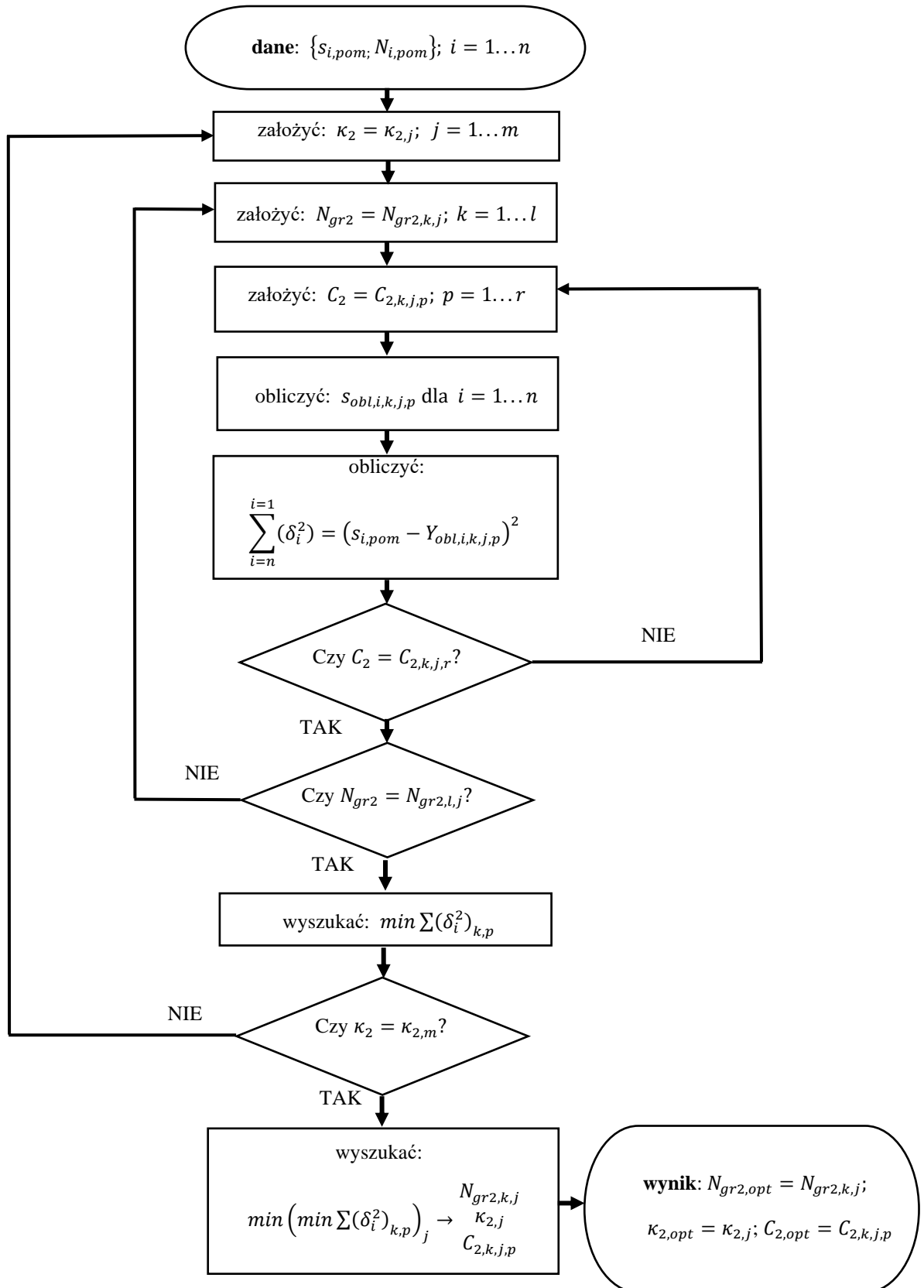
1. Algorytm postępowania w metodzie I



2. Algorytm postępowania w metodzie II



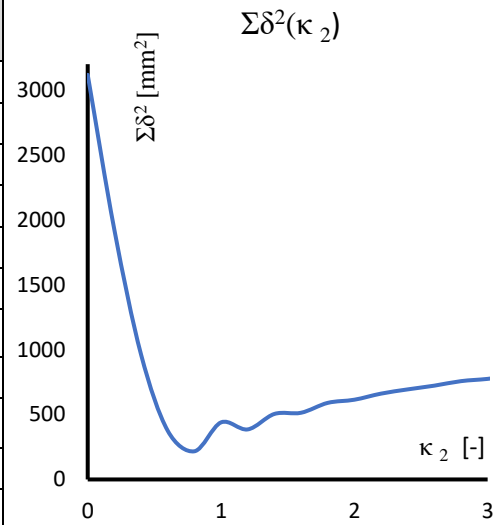
3. Algorytm postępowania w metodzie III



4. Obliczenia dla pala 36N-10L metodą I

Tab. 11.8 Optymalizacja metodą I dla pala 36N-10L

$\min \Sigma \delta^2$ [mm ²]	A [mm]	N_{gr2} [kN]	κ_2 [-]	C_2 [mm/kN]
3118	13,6	6590	0	0,002067
2503	11,8	6590	0,1	0,001785
1923	10,0	6590	0,2	0,001519
1404	8,4	6590	0,3	0,001272
963	6,9	6590	0,4	0,001048
617	5,6	6590	0,5	0,000850
376	4,5	6590	0,6	0,000678
243	3,5	6590	0,7	0,000532
217	2,7	6590	0,8	0,000411
291	2,1	6590	0,9	0,000313
440	2,6	6690	1	0,000385
388	2,0	6690	1,1	0,000306
385	1,6	6690	1,2	0,000241
426	1,3	6690	1,3	0,000188
505	1,0	6690	1,4	0,000146
500	1,2	6790	1,5	0,000178
514	1,0	6790	1,6	0,000142
550	0,8	6790	1,7	0,000112
590	0,9	6890	1,8	0,000132
595	0,7	6890	1,9	0,000106
614	0,6	6890	2	0,000086



$\min \Sigma \delta^2 = 217 \text{ mm}^2$

$N_{gr2,opt} = 6590 \text{ kN}$

$\kappa_{2,opt} = 0,8$

$C_{2,opt} = 0,00041 \text{ mm/kN}$

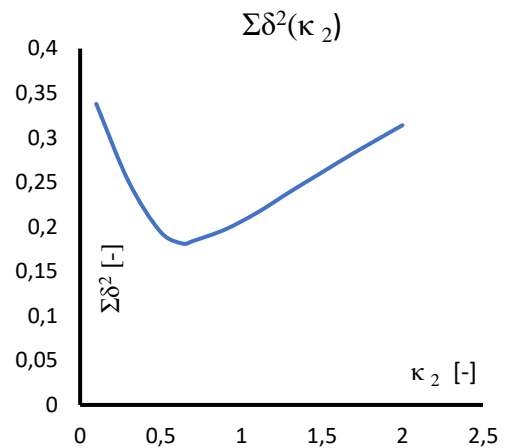
5. Obliczenia dla pala 36N-10L metodą II

$$\min \Sigma \delta^2 = 0,181$$

$$N_{gr2,opt} = 6590 \text{ kN}$$

$$\kappa_{2,opt} = 0,64$$

$$C_{2,opt} = 0,00071 \text{ mm/kN}$$



Rys. 11.1 Optymalizacja metodą II dla pala 36N-10L

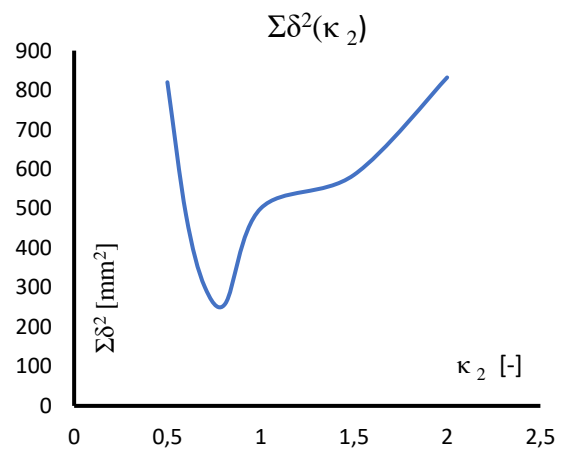
6. Obliczenia dla pala 36N-10L metodą III

$$\min \Sigma \delta^2 = 258,62 \text{ mm}^2$$

$$N_{gr2,opt} = 6590 \text{ kN}$$

$$\kappa_{2,opt} = 0,81$$

$$C_{2,opt} = 0,0004 \text{ mm/kN}$$

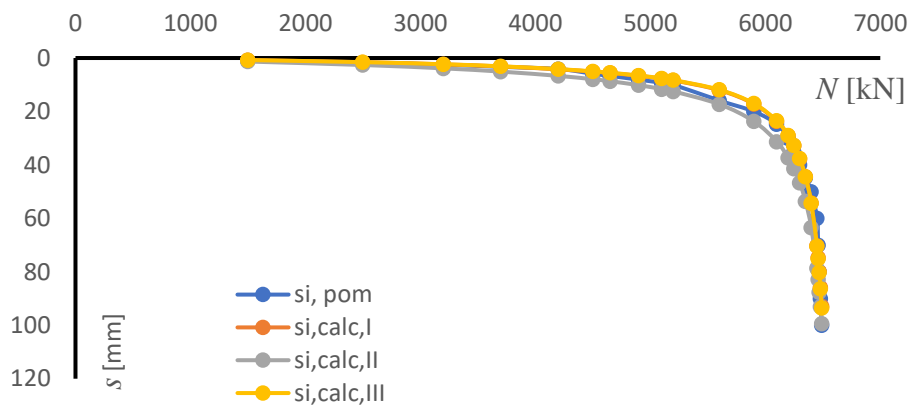


Rys. 11.2 Optymalizacja metodą III dla pala 36N-10L

7. Rezultaty obliczeń dla pala 36N-10L metodami I-III

Tab. 11.9 Osiadanie obliczone metodami I-III dla pala 36N-10L

N_i [kN]	$S_{i,pom}$ [mm]	$S_{i,calc,I}$ [mm]	$S_{i,calc,II}$ [mm]	$S_{i,calc,III}$ [mm]
1500	0,9	0,775	1,314	0,757
2500	1,7	1,569	2,610	1,535
3200	2,5	2,371	3,876	2,321
3700	3,3	3,153	5,079	3,091
4200	4,1	4,225	6,681	4,146
4500	5,9	5,087	7,935	4,995
4650	6,7	5,606	8,680	5,508
4900	8,1	6,654	10,156	6,544
5100	9,3	7,718	11,622	7,597
5200	10	8,352	12,483	8,225
5600	15,9	12,011	17,284	11,857
5900	20	17,163	23,677	16,989
6100	24,7	23,633	31,266	23,457
6200	30	29,044	37,334	28,882
6250	35,1	32,806	41,431	32,659
6300	40	37,716	46,655	37,598
6350	44,8	44,433	53,603	44,365
6400	50	54,257	63,426	54,285
6450	60	70,207	78,695	70,433
6460	70	74,701	82,873	74,992
6470	80	79,865	87,613	80,233
6480	90	85,865	93,049	86,329
6490	100	92,936	99,361	93,519

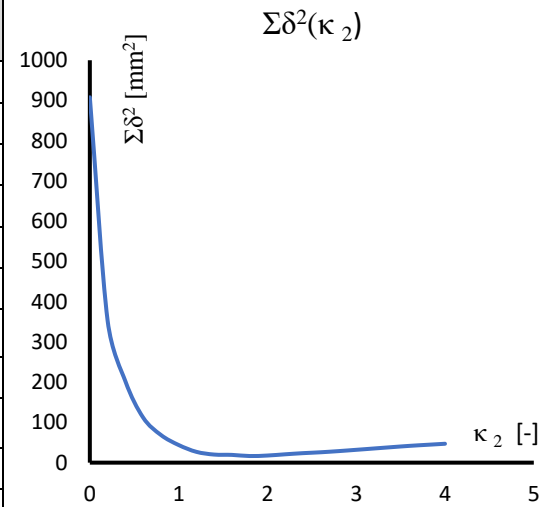


Rys. 11.3 Krzywe M-K obliczone metodami I-III dla pala 36N-10L

8. Obliczenia dla pala 31-10L metodą I

Tab. 11.10 Optymalizacja metodą I dla pala 31-10L

$\min \Sigma \delta^2$ [mm ²]	A [mm]	N_{gr2} [kN]	κ_2 [-]	C_2 [mm/kN]
646	14,5	7500	0	0,001932
393	12,5	7500	0,1	0,001665
243	10,6	7500	0,2	0,001410
223	10,4	7600	0,3	0,001362
135	8,8	7600	0,4	0,001156
117	8,6	7700	0,5	0,001111
81	7,3	7700	0,6	0,000943
62	7,1	7800	0,7	0,000908
55	6,9	7900	0,8	0,000870
44	5,9	7900	0,9	0,000745
33	5,7	8000	1	0,000718
28	5,6	8100	1,1	0,000690
25	5,4	8200	1,2	0,000662
24	5,3	8300	1,3	0,000636
23	5,1	8400	1,4	0,000611
20	4,5	8400	1,5	0,000534
19	4,4	8500	1,6	0,000516
18	4,3	8600	1,7	0,000497
18	4,2	8700	1,8	0,000480
18	4,1	8800	1,9	0,000464
19	4,0	8900	2	0,000448



$\min \Sigma \delta^2 = 18 \text{ mm}^2$

$N_{gr2,opt} = 8700 \text{ kN}$

$\kappa_{2,opt} = 1,8$

$C_{2,opt} = 0,00048 \text{ mm/kN}$

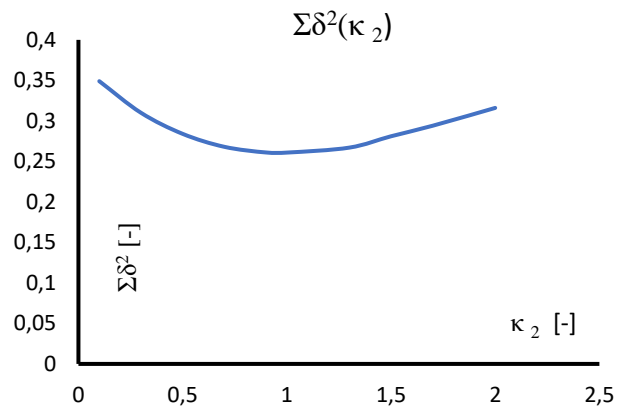
9. Obliczenia dla pala 31-10L metodą II

$$\min \Sigma \delta^2 = 0,261$$

$$N_{gr2,opt} = 8300 \text{ kN}$$

$$\kappa_{2,opt} = 1,01$$

$$C_{2,opt} = 0,00093 \text{ mm/kN}$$



Rys. 11.4 Optymalizacja metodą II dla pala 31-10L

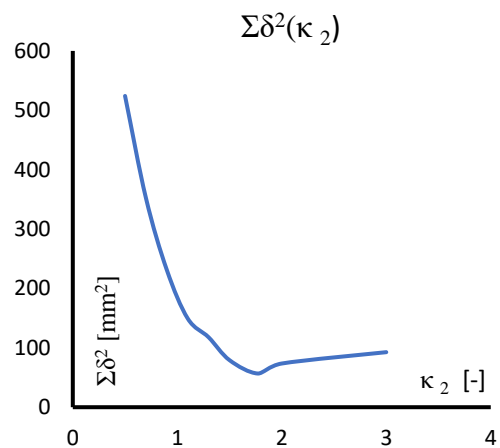
10. Obliczenia dla pala 31-10L metodą III

$$\min \Sigma \delta^2 = 56,751 \text{ mm}^2$$

$$N_{gr2,opt} = 8700 \text{ kN}$$

$$\kappa_{2,opt} = 1,77$$

$$C_{2,opt} = 0,0005 \text{ mm/kN}$$

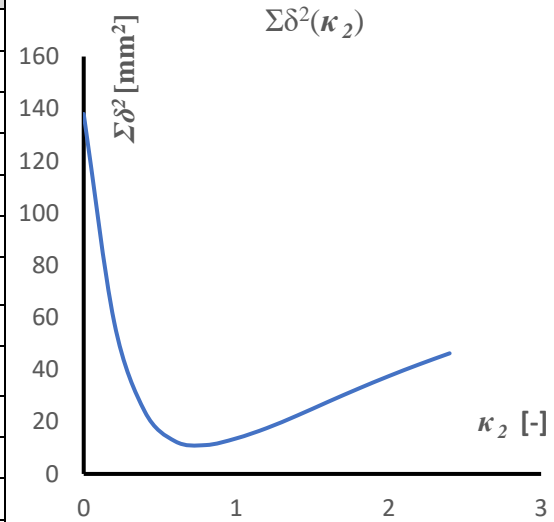


Rys. 11.5 Optymalizacja metodą III dla pala 31-10L

11. Obliczenia dla pala 38-10P metodą I

Tab. 11.11 Optymalizacja metodą I dla pala 38-10P

$\min \Sigma \delta^2$ [mm ²]	A [mm]	N_{gr2} [kN]	κ_2 [-]	C_2 [mm/kN]
138,0	15,3	11500	0	0,001329
89,2	14,2	11600	0,1	0,001226
56,2	13,1	11700	0,2	0,001124
35,4	12,1	11800	0,3	0,001029
24,0	11,2	11900	0,4	0,000942
17,9	11,0	12100	0,5	0,000912
12,5	10,2	12200	0,6	0,000837
11,8	10,0	12400	0,7	0,000810
11,1	9,3	12500	0,8	0,000746
11,7	9,2	12700	0,9	0,000722
13,6	9,0	12900	1	0,000699
15,7	8,4	13000	1,1	0,000648
17,6	8,3	13200	1,2	0,000629
19,9	8,2	13400	1,3	0,000610
22,4	8,1	13600	1,4	0,000592
25,0	7,9	13800	1,5	0,000576
27,6	7,8	14000	1,6	0,000560
30,1	7,7	14200	1,7	0,000545
32,6	7,6	14400	1,8	0,000530
35,1	7,5	14600	1,9	0,000517
37,5	7,5	14800	2	0,000504



$$\min \Sigma \delta^2 = 11,1 \text{ mm}^2$$

$$N_{gr2,opt} = 12500 \text{ kN}$$

$$\kappa_{2,opt} = 0,8$$

$$C_{2,opt} = 0,00075 \text{ mm/kN}$$

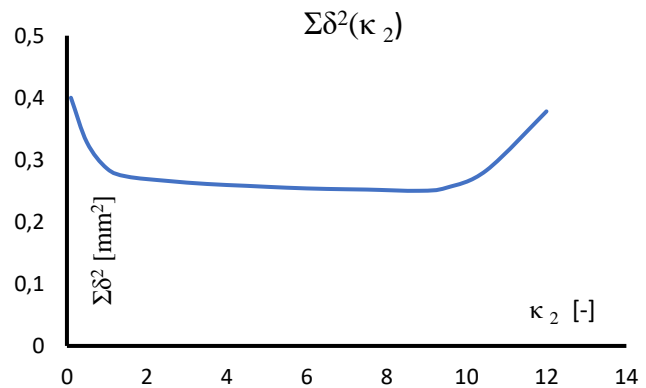
12. Obliczenia dla pala 38-10P metodą II

$$\min \Sigma \delta^2 = 0,25 \text{ mm}^2$$

$$N_{gr2,opt} = 35700 \text{ kN}$$

$$\kappa_{2,opt} = 8,81$$

$$C_{2,opt} = 0,00071 \text{ mm/kN}$$



Rys. 11.6 Optymalizacja metodą II dla pala 38-10P

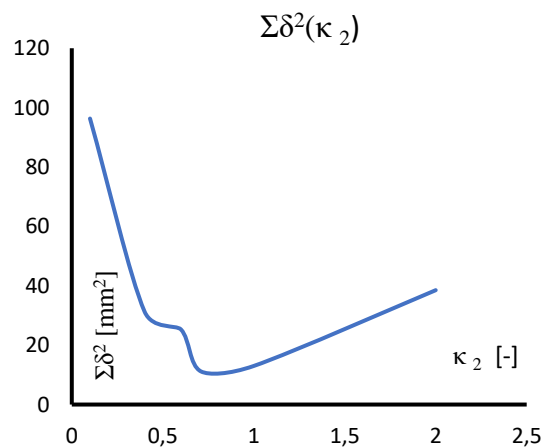
13. Obliczenia dla pala 38-10P metodą III

$$\min \Sigma \delta^2 = 11,15 \text{ mm}^2$$

$$N_{gr2,opt} = 12400 \text{ kN}$$

$$\kappa_{2,opt} = 0,71$$

$$C_{2,opt} = 0,0008 \text{ mm/kN}$$

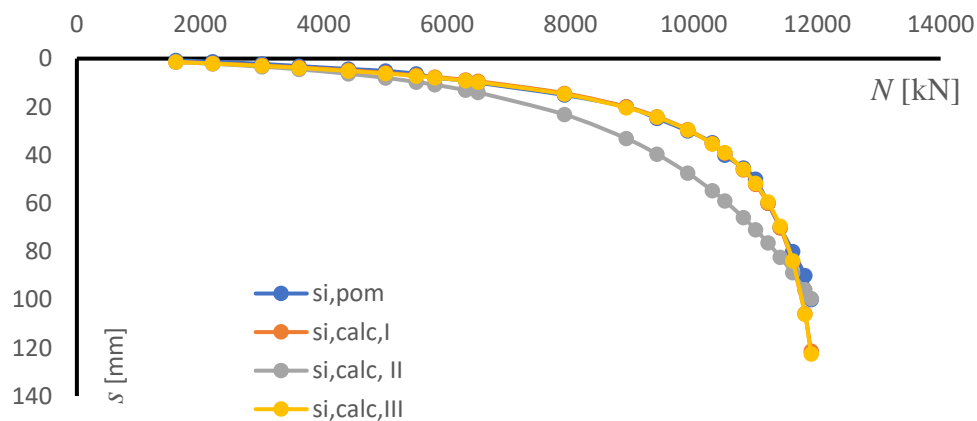


Rys. 11.7 Optymalizacja metodą III dla pala 38-10P

14. Rezultaty obliczeń dla pala 38-10P metodami I-III

Tab. 11.12 Osiadanie obliczone metodami I-III dla pala 38-10P

N_i [kN]	$S_{i,pom}$ [mm]	$S_{i,calc,I}$ [mm]	$S_{i,calc,II}$ [mm]	$S_{i,calc,III}$ [mm]
1600	0,7	1,357	1,432	1,440
2200	1,3	1,963	2,162	2,078
3000	2,2	2,877	3,357	3,037
3600	3,1	3,659	4,462	3,852
4400	4,3	4,863	6,290	5,100
5000	5,1	5,916	7,994	6,185
5500	6,3	6,916	9,686	7,212
5800	7,9	7,581	10,841	7,891
6300	9,1	8,816	13,038	9,149
6500	10	9,362	14,025	9,703
7900	15,1	14,355	23,180	14,723
8900	20	20,004	33,105	20,328
9400	24,8	24,035	39,599	24,295
9900	30	29,437	47,425	29,584
10300	34,9	35,322	54,849	35,324
10500	40	39,049	59,013	38,954
10800	45,3	46,098	65,900	45,822
11000	50	52,186	70,964	51,768
11200	60	59,938	76,447	59,372
11400	70	70,183	82,387	69,508
11600	80	84,446	88,827	83,839
11800	90	105,861	95,813	106,004
11900	100	121,292	99,526	122,585



Rys. 11.8 Krzywe M-K obliczone metodami I-III dla pala 38-10P

Załącznik C. Aproksymacja metodami I-III dla różnych części zbioru wartości

1. Rezultaty obliczeń dla pala 36N-10L metodami I-III

Tab. 11.13 Osiadania obliczone z wykorzystaniem różnych części zbioru $\{N_i, s_i\}$ metodą I dla pala 36N-10L

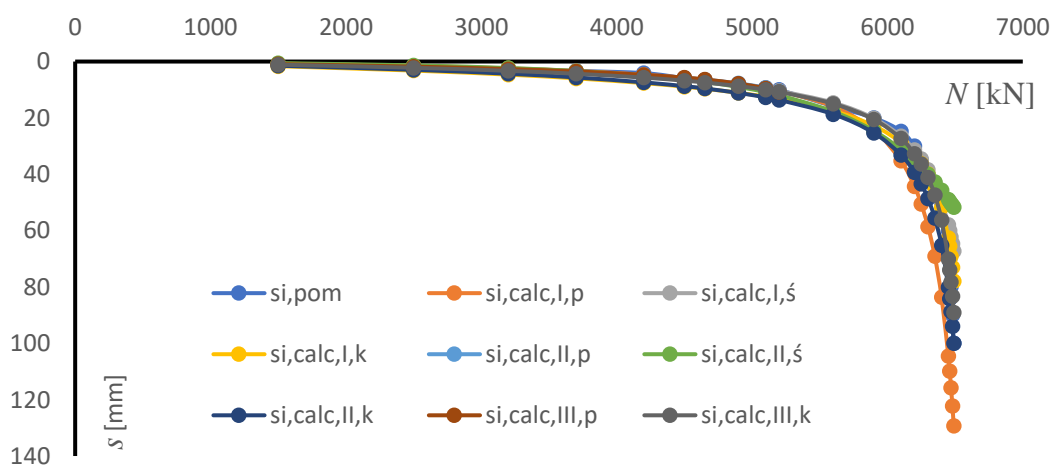
N_i [kN]	$S_{i,pom}$ [mm]	$S_{i,calc,I,p}$ [mm]	$S_{i,calc,I,s}$ [mm]	$S_{i,calc,I,k}$ [mm]
1500	0,9	0,732	1,011	1,657
2500	1,7	1,548	2,037	3,203
3200	2,5	2,431	3,063	4,645
3700	3,3	3,343	4,056	5,962
4200	4,1	4,665	5,399	7,647
4500	5,9	5,780	6,464	8,921
4650	6,7	6,473	7,101	9,659
4900	8,1	7,914	8,373	11,091
5100	9,3	9,428	9,645	12,473
5200	10	10,353	10,394	13,268
5600	15,9	15,951	14,588	17,514
5900	20	24,334	20,126	22,793
6100	24,7	35,216	26,498	28,686
6200	30	44,332	31,365	33,201
6250	35,1	50,584	34,519	36,180
6300	40	58,577	38,374	39,920
6350	44,8	69,115	43,208	44,831
6400	50	83,577	49,469	51,722
6450	60	104,521	57,943	62,532
6460	70	109,872	60,016	65,550
6470	80	115,737	62,250	69,024
6480	90	122,191	64,667	73,084
6490	100	129,325	67,289	77,924

Tab. 11.14 Osiadania obliczone z wykorzystaniem różnych części zbioru $\{N_i, s_i\}$ metodą II dla pała 36N-10L

N_i [kN]	$s_{i,pom}$ [mm]	$s_{i,calc,II,p}$ [mm]	$s_{i,calc,II,s}$ [mm]	$s_{i,calc,II,k}$ [mm]
1500	0,9	0,986	1,351	1,478
2500	1,7	1,918	2,306	2,923
3200	2,5	2,814	3,372	4,322
3700	3,3	3,668	4,992	5,643
4200	4,1	4,841	6,384	7,389
4500	5,9	5,813	7,249	8,747
4650	6,7	6,426	9,022	9,550
4900	8,1	7,754	10,828	11,135
5100	9,3	9,304	11,896	12,702
5200	10	10,386	17,727	13,618
5600	15,9	-	24,601	18,685
5900	20	-	31,129	25,337
6100	24,7	-	35,224	33,124
6200	30	-	37,529	39,280
6250	35,1	-	40,031	43,407
6300	40	-	42,750	48,637
6350	44,8	-	45,711	55,546
6400	50	-	48,939	65,231
6450	60	-	49,619	80,122
6460	70	-	50,312	84,166
6470	80	-	51,017	88,740
6480	90	-	51,734	93,969
6490	100	-	0,000	100,018

Tab. 11.15 Osiadania obliczone z wykorzystaniem różnych części zbioru $\{N_i, s_i\}$ metodą III dla pała 36N-10L

N_i [kN]	$S_{i,pom}$ [mm]	$S_{i,calc,III,p}$ [mm]	$S_{i,calc,III,s}$ [mm]	$S_{i,calc,III,k}$ [mm]
1500	0,9	0,911	1,269	1,113
2500	1,7	1,795	2,475	2,217
3200	2,5	2,666	3,619	3,299
3700	3,3	3,514	4,680	4,331
4200	4,1	4,708	6,060	5,710
4500	5,9	5,722	7,119	6,793
4650	6,7	6,372	7,740	7,437
4900	8,1	7,811	8,958	8,717
5100	9,3	9,540	10,152	9,992
5200	10	10,777	10,847	10,742
5600	15,9	-	14,669	14,942
5900	20	-	19,705	20,575
6100	24,7	-	25,774	27,308
6200	30	-	30,820	32,722
6250	35,1	-	34,382	36,391
6300	40	-	39,168	41,082
6350	44,8	-	46,109	47,345
6400	50	-	57,592	56,236
6450	60	-	82,934	70,132
6460	70	-	92,969	73,947
6470	80	-	107,522	78,284
6480	90	-	131,597	83,265
6490	100	-	184,731	89,060



Rys. 11.9 Krzywe M-K aproksymowane z wykorzystaniem różnych części zbioru wartości $\{N_i, s_i\}$ metodami I-III dla pała 36N-10L

2. Rezultaty obliczeń dla pala 31-10L metodami I-III

Tab. 11.16 Osiadania obliczone z wykorzystaniem różnych części zbioru $\{N_i, s_i\}$ metodą I dla pala 31-10L

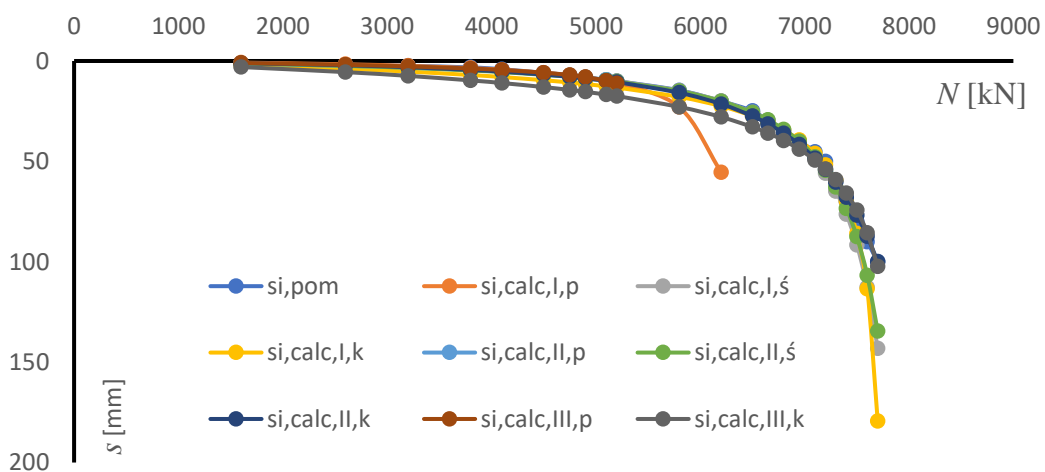
N_i [kN]	$S_{i,pom}$ [mm]	$S_{i,calc,I,p}$ [mm]	$S_{i,calc,I,s}$ [mm]	$S_{i,calc,I,k}$ [mm]
1600	1,2	0,785	1,165	2,093
2600	1,9	1,636	2,310	3,903
3200	2,4	2,415	3,266	5,282
3800	3,2	3,570	4,540	6,984
4100	4,1	4,379	5,345	7,997
4500	5,9	5,861	6,664	9,572
4750	7,1	7,150	7,675	10,721
4900	8,8	8,125	8,369	11,486
5100	9,4	9,764	9,420	12,610
5200	10	10,778	10,008	13,223
5800	14,6	22,996	14,786	17,893
6200	20	55,406	19,914	22,487
6500	24,9	300,931	25,672	27,350
6650	30	-	29,546	30,520
6800	35,2	-	34,400	34,429
6950	40	-	40,628	39,407
7100	45,2	-	48,855	46,026
7200	50	-	55,940	51,859
7300	60	-	64,851	59,492
7400	70	-	76,335	70,045
7500	80	-	91,588	85,912
7600	90	-	112,637	113,476
7700	100	-	143,187	179,306

Tab. 11.17 Osiadania obliczone z wykorzystaniem różnych części zbioru $\{N_i, s_i\}$ metodą II dla pala 31-10L

N_i [kN]	$S_{i,pom}$ [mm]	$S_{i,calc,II,p}$ [mm]	$S_{i,calc,II,s}$ [mm]	$S_{i,calc,II,k}$ [mm]
1600	1,2	1,295	1,229	1,033
2600	1,9	2,405	2,425	2,136
3200	2,4	3,269	3,414	3,104
3800	3,2	4,385	4,722	4,442
4100	4,1	5,094	5,545	5,310
4500	5,9	6,303	6,885	6,756
4750	7,1	7,311	7,908	7,878
4900	8,8	8,072	8,607	8,654
5100	9,4	9,394	9,663	9,833
5200	10	10,273	10,252	10,494
5800	14,6	-	15,001	15,849
6200	20	-	20,039	21,452
6500	24,9	-	25,638	27,472
6650	30	-	29,377	31,340
6800	35,2	-	34,037	35,980
6950	40	-	39,978	41,605
7100	45,2	-	47,772	48,504
7200	50	-	54,440	54,004
7300	60	-	62,780	60,404
7400	70	-	73,460	67,904
7500	80	-	87,545	76,765
7600	90	-	106,825	87,326
7700	100	-	134,546	100,036

Tab. 11.18 Osiadania obliczone z wykorzystaniem różnych części zbioru $\{N_i, s_i\}$ metodą III dla pała 31-10L

N_i [kN]	$s_{i,pom}$ [mm]	$s_{i,calc,II,p}$ [mm]	$s_{i,calc,II,s}$ [mm]	$s_{i,calc,II,k}$ [mm]
1600	1,2	0,990	1,721	3,015
2600	1,9	1,916	3,205	5,537
3200	2,4	2,689	4,338	7,410
3800	3,2	3,763	5,740	9,666
4100	4,1	4,492	6,579	10,981
4500	5,9	5,823	7,895	12,988
4750	7,1	7,025	8,863	14,424
4900	8,8	7,991	9,513	15,367
5100	9,4	9,800	10,476	16,734
5200	10	11,101	11,006	17,472
5800	14,6	-	15,176	22,889
6200	20	-	19,581	27,899
6500	24,9	-	24,719	32,890
6650	30	-	28,426	35,979
6800	35,2	-	33,527	39,623
6950	40	-	41,212	44,011
7100	45,2	-	54,879	49,439
7200	50	-	73,590	53,865
7300	60	-	132,842	59,196
7400	70	-	-	65,790
7500	80	-	-	74,246
7600	90	-	-	85,655
7700	100	-	-	102,287

**Rys. 11.10** Krzywe M-K aproksymowane z wykorzystaniem różnych części zbioru wartości $\{N_i, s_i\}$ metodami I-III dla pała 31-10L

3. Rezultaty obliczeń dla pala 38-10P metodami I-III

Tab. 11.19 Osiadania obliczone z wykorzystaniem różnych części zbioru $\{N_i, s_i\}$ metodą I dla pala 38-10P

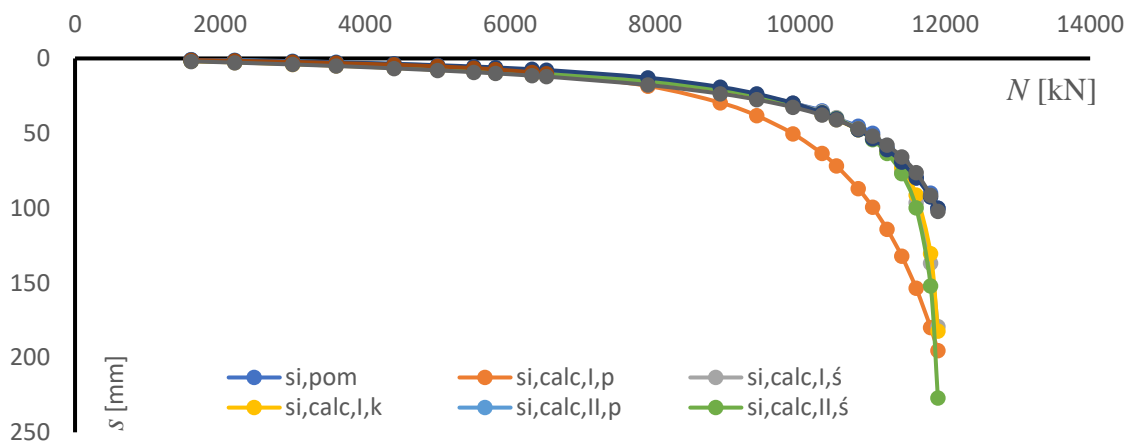
N_i [kN]	$S_{i,pom}$ [mm]	$S_{i,calc,I,p}$ [mm]	$S_{i,calc,I,s}$ [mm]	$S_{i,calc,I,k}$ [mm]
1600	0,7	0,915	1,485	1,856
2200	1,3	1,383	2,139	2,658
3000	2,2	2,161	3,117	3,842
3600	3,1	2,892	3,946	4,830
4400	4,3	4,138	5,208	6,314
5000	5,1	5,344	6,302	7,579
5500	6,3	6,587	7,333	8,755
5800	7,9	7,463	8,014	9,523
6300	9,1	9,196	9,272	10,926
6500	10	10,002	9,825	11,537
7900	15,1	18,398	14,825	16,903
8900	20	29,588	20,416	22,630
9400	24,8	38,253	24,401	26,576
9900	30	50,294	29,777	31,755
10300	34,9	63,528	35,726	37,334
10500	40	71,806	39,566	40,868
10800	45,3	86,985	47,034	47,624
11000	50	99,437	53,755	53,610
11200	60	114,272	62,772	61,557
11400	70	132,083	75,709	72,905
11600	80	153,645	96,386	91,289
11800	90	179,987	136,951	130,521
11900	100	195,366	179,275	182,288

Tab. 11.20 Osiadania obliczone z wykorzystaniem różnych części zbioru $\{N_i, s_i\}$ metodą II dla pala 38-10P

N_i [kN]	$S_{i,pom}$ [mm]	$S_{i,calc,II,p}$ [mm]	$S_{i,calc,II,s}$ [mm]	$S_{i,calc,II,k}$ [mm]
1600	0,7	0,744	1,587	0,901
2200	1,3	1,139	2,281	1,331
3000	2,2	1,815	3,314	2,010
3600	3,1	2,475	4,185	2,620
4400	4,3	3,651	5,506	3,604
5000	5,1	4,852	6,644	4,509
5500	6,3	6,154	7,712	5,404
5800	7,9	7,111	8,415	6,015
6300	9,1	9,098	9,709	7,184
6500	10	10,066	10,276	7,714
7900	15,1	21,851	15,362	12,853
8900	20	42,811	20,979	19,086
9400	24,8	63,796	24,956	23,654
9900	30	101,223	30,299	29,783
10300	34,9	155,973	36,204	36,340
10500	40	199,143	40,020	40,380
10800	45,3	300,951	47,471	47,715
11000	50	412,311	54,234	53,691
11200	60	588,873	63,434	60,794
11400	70	888,228	76,984	69,326
11600	80	1 443,669	99,874	79,703
11800	90	2 615,041	152,127	92,501
11900	100	3 730,972	227,057	100,052

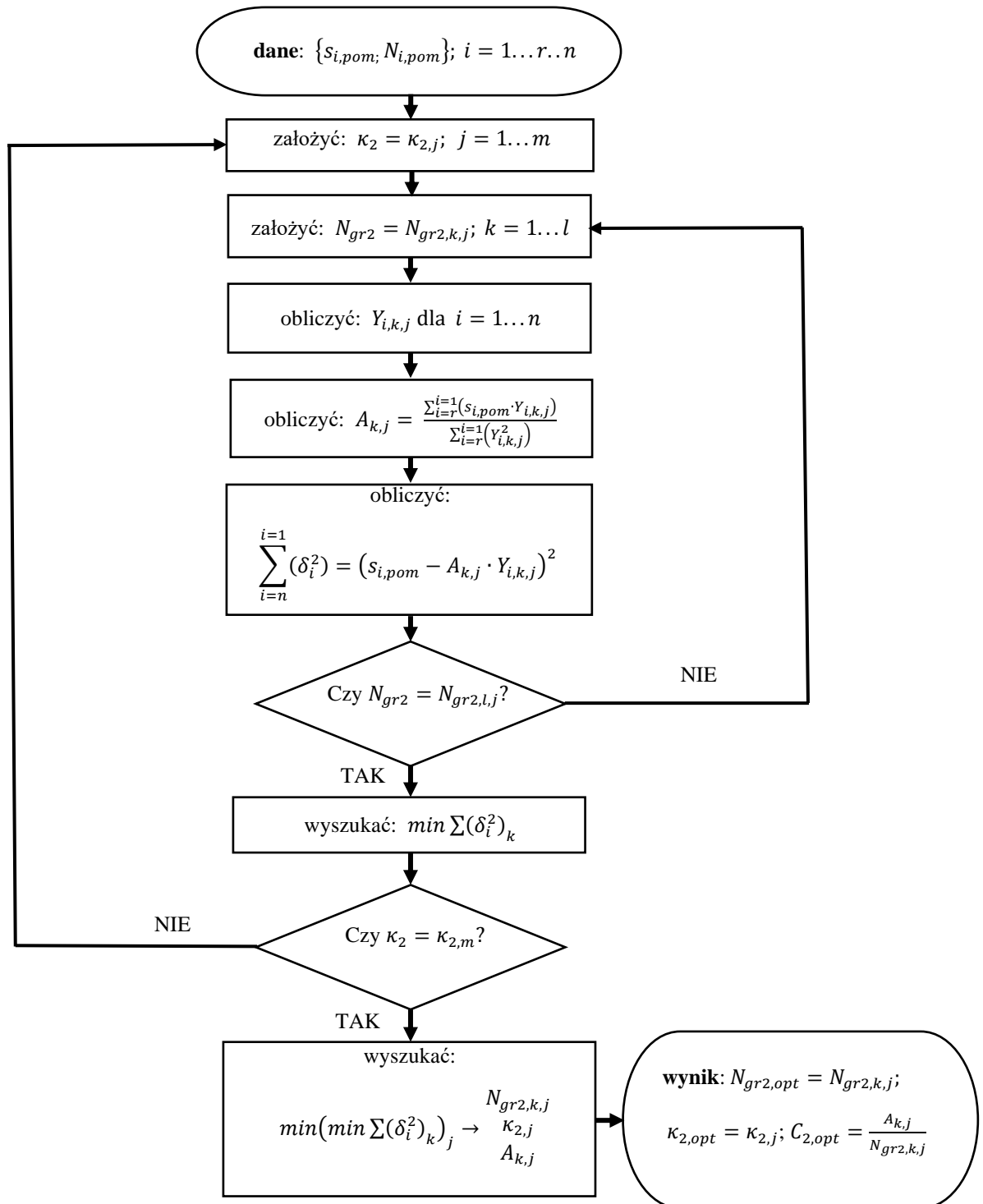
Tab. 11.21 Osiedzenia obliczone z wykorzystaniem różnych części zbioru $\{N_i, s_i\}$ metodą III dla pała 38-10P

N_i [kN]	$s_{i,pom}$ [mm]	$s_{i,calc,III,p}$ [mm]	$s_{i,calc,III,s}$ [mm]	$s_{i,calc,III,k}$ [mm]
1600	0,7	1,099	1,594	1,947
2200	1,3	1,603	2,286	2,790
3000	2,2	2,385	3,309	4,035
3600	3,1	3,083	4,166	5,076
4400	4,3	4,229	5,459	6,638
5000	5,1	5,328	6,566	7,969
5500	6,3	6,492	7,600	9,205
5800	7,9	7,352	8,279	10,012
6300	9,1	9,218	9,525	11,485
6500	10	10,200	10,070	12,124
7900	15,1	-	14,939	17,711
8900	20	-	20,333	23,570
9400	24,8	-	24,202	27,522
9900	30	-	29,522	32,580
10300	34,9	-	35,638	37,841
10500	40	-	39,775	41,061
10800	45,3	-	48,425	46,957
11000	50	-	57,193	51,878
11200	60	-	71,297	57,957
11400	70	-	101,061	65,739
11600	80	-	-	76,217
11800	90	-	-	91,453
11900	100	-	-	102,232

**Rys. 11.11** Krzywe M-K aproksymowane z wykorzystaniem różnych części zbioru wartości $\{N_i, s_i\}$ metodami I-III dla pała 38-10P

Załącznik D. Aproksymacja parametrów M-K zmodyfikowaną metodą I

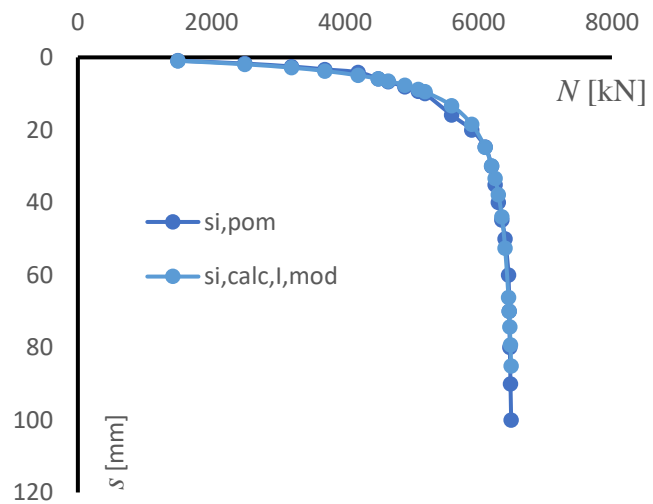
1. Algorytm postępowania w zmodyfikowanej metodzie I



2. Rezultaty obliczeń dla pala 36N-10L.

Tab. 11.22 Osiadania obliczone do zmodyfikowanej metody I dla pala 36N-10L

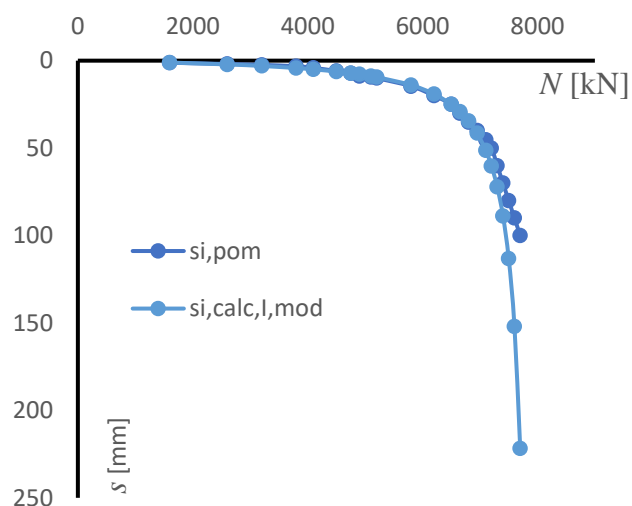
N_i [kN]	$S_{i,pom}$ [mm]	$S_{i,calc,I,mod}$ [mm]
1500	0,9	0,950
2500	1,7	1,900
3200	2,5	2,839
3700	3,3	3,741
4200	4,1	4,955
4500	5,9	5,914
4650	6,7	6,487
4900	8,1	7,630
5100	9,3	8,775
5200	10	9,452
5600	15,9	13,271
5900	20	18,464
6100	24,7	24,760
6200	30	29,880
6250	35,1	33,375
6300	40	37,871
6350	44,8	43,914
6400	50	52,567
6450	60	66,237
6460	70	70,019
6470	80	74,330
6480	90	79,299
6490	100	85,101



3. Rezultaty obliczeń dla pala 31-10L

Tab. 11.23 Osiadania obliczone do zmodyfikowanej metody I dla pala 31-10L

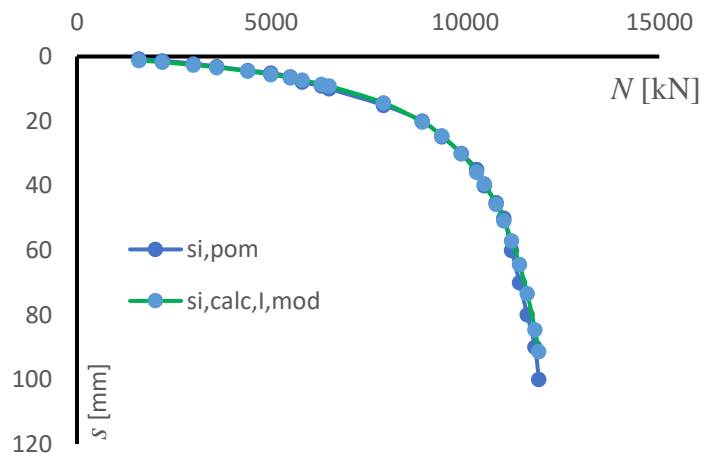
N_i [kN]	$s_{i,pom}$ [mm]	$s_{i,calc,I,mod}$ [mm]
1600	1,2	1,086
2600	1,9	2,150
3200	2,4	3,037
3800	3,2	4,220
4100	4,1	4,970
4500	5,9	6,202
4750	7,1	7,151
4900	8,8	7,805
5100	9,4	8,799
5200	10	9,357
5800	14,6	13,960
6200	20	19,046
6500	24,9	24,960
6650	30	29,067
6800	35,2	34,371
6950	40	41,445
7100	45,2	51,279
7200	50	60,227
7300	60	72,161
7400	70	88,753
7500	80	113,150
7600	90	151,979
7700	100	221,732



4. Rezultaty obliczeń dla pala 38-10P

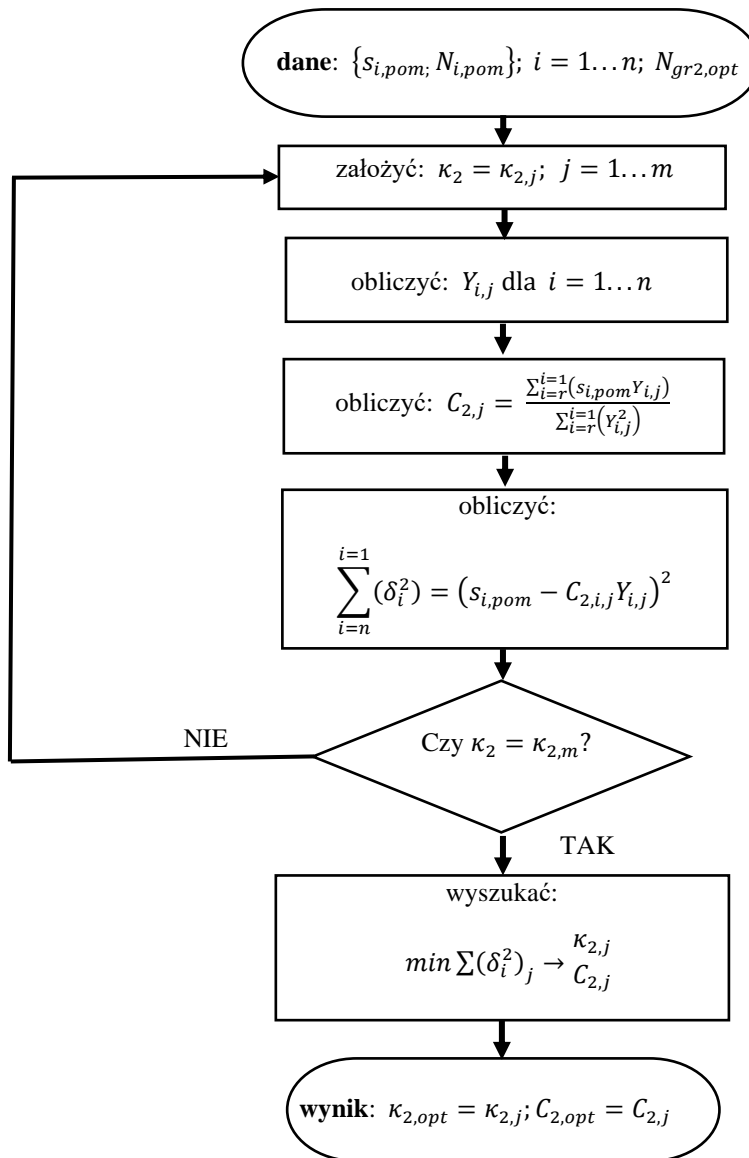
Tab. 11.24 Osadania obliczone do zmodyfikowanej metody I dla pala 38-10P

N_i [kN]	$s_{i,pom}$ [mm]	$s_{i,calc,I,mod}$ [mm]
1600	0,7	1,216
2200	1,3	1,774
3000	2,2	2,631
3600	3,1	3,378
4400	4,3	4,549
5000	5,1	5,593
5500	6,3	6,598
5800	7,9	7,273
6300	9,1	8,539
6500	10	9,102
7900	15,1	14,336
8900	20	20,305
9400	24,8	24,519
9900	30	30,039
10300	34,9	35,830
10500	40	39,360
10800	45,3	45,725
11000	50	50,887
11200	60	57,015
11400	70	64,390
11600	80	73,411
11800	90	84,659
11900	100	91,378



Załącznik E. Aproksymacja metodą jednego równania

1. Algorytm postępowania



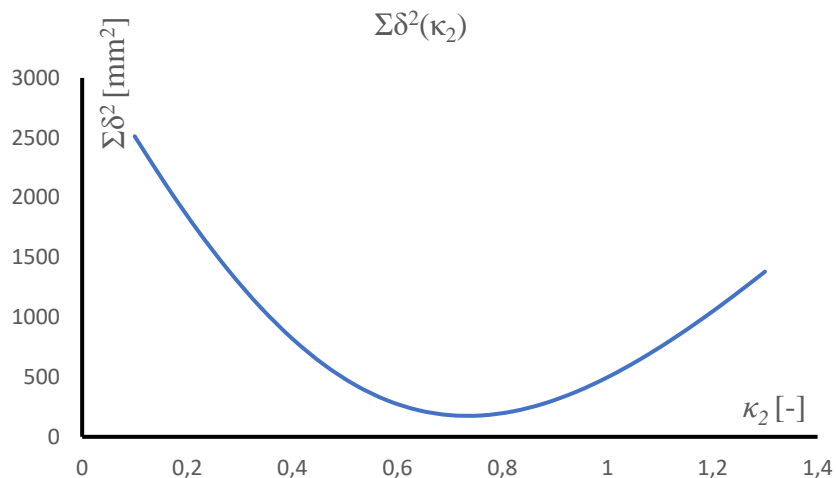
2. Optimalizacja dla pala 36N-10L

$$N_{gr2,obl} = 6590 \text{ kN}$$

$$\min \Sigma \delta^2 = 178,6 \text{ mm}^2$$

$$\kappa_{2,opt} = 0,76$$

$$C_{2,opt} = 0,000449 \text{ mm/kN}$$



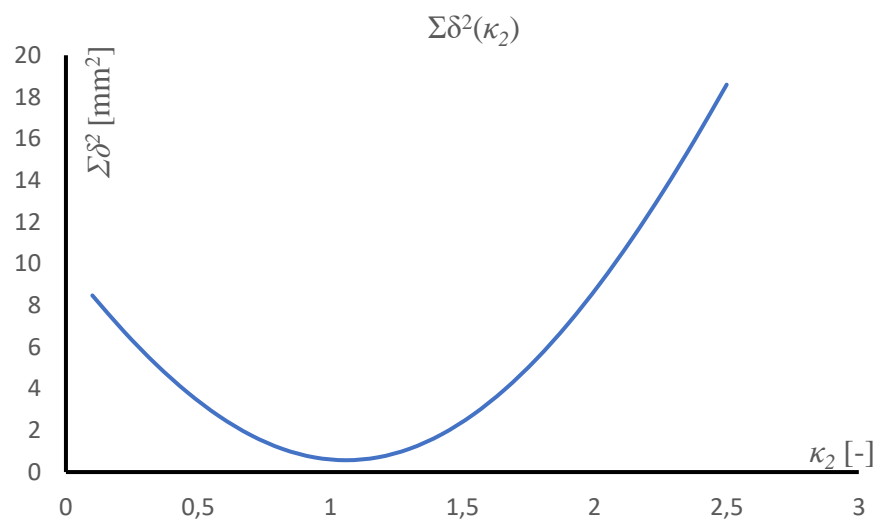
Rys. 11.12 Optimalizacja parametrów krzywej M-K metodą jednego równania z wykorzystaniem całego zbioru wartości dla pala 36N-10L

$$N_{gr2,obl} = 6590 \text{ kN}$$

$$\min \Sigma \delta^2 = 0,57 \text{ mm}^2$$

$$\kappa_{2,opt} = 1,06$$

$$C_{2,opt} = 0,000390 \text{ mm/kN}$$



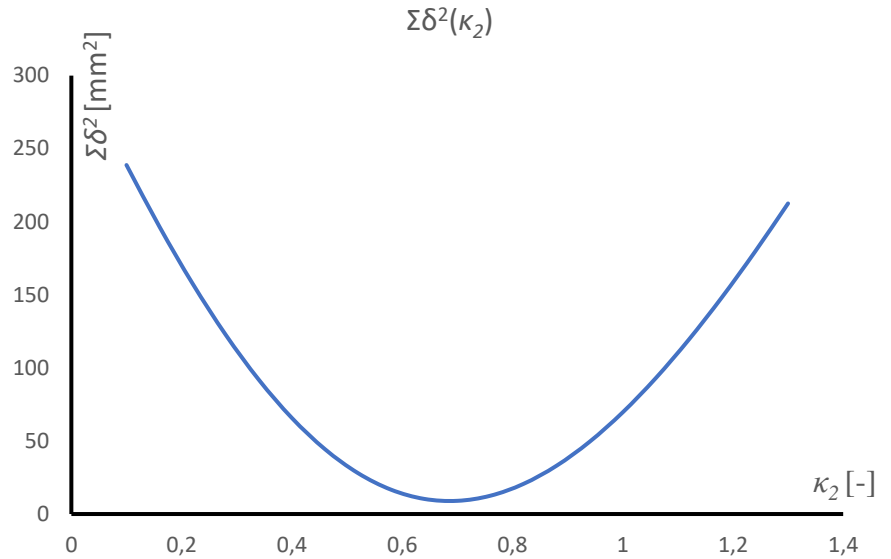
Rys. 11.13 Optimalizacja parametrów krzywej M-K metodą jednego równania z wykorzystaniem początkowej części zbioru wartości dla pala 36N-10L

$$N_{gr2,obl} = 6590 \text{ kN}$$

$$\min \Sigma \delta^2 = 9,02 \text{ mm}^2$$

$$\kappa_{2,opt} = 0,7$$

$$C_{2,opt} = 0,000531 \text{ mm/kN}$$



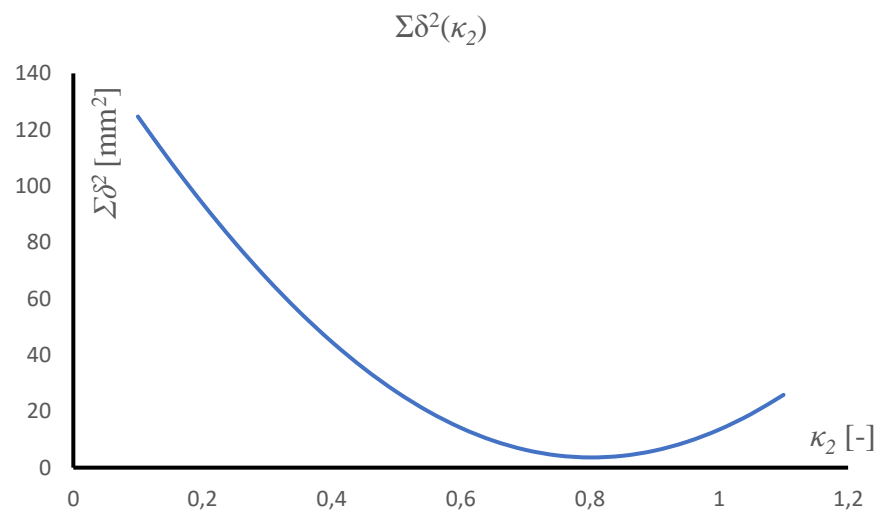
Rys. 11.14 Optymalizacja parametrów krzywej M-K metodą jednego równania z wykorzystaniem środkowej części zbioru wartości dla pała 36N-10L

$$N_{gr2,obl} = 6590 \text{ kN}$$

$$\min \Sigma \delta^2 = 94,93 \text{ mm}^2$$

$$\kappa_{2,opt} = 0,7$$

$$C_{2,opt} = 0,000512 \text{ mm/kN}$$

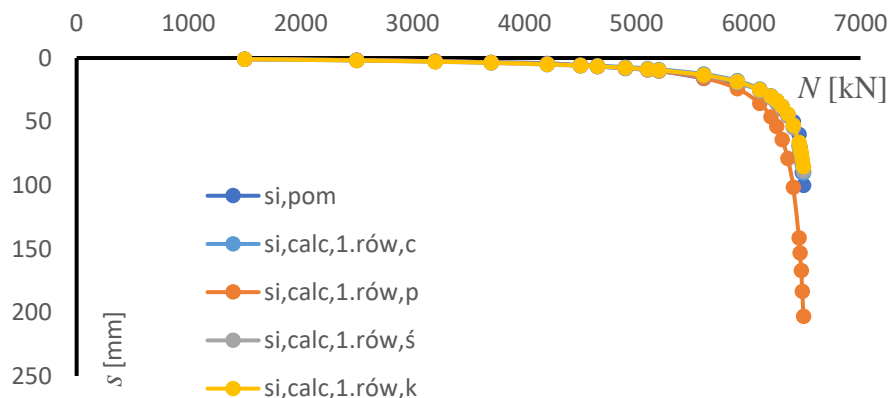


Rys. 11.15 Optymalizacja parametrów krzywej M-K metodą jednego równania z wykorzystaniem końcowej części zbioru wartości dla pała 36N-10L

3. Krzywe osiadania dla pala 36N-10L

Tab. 11.25 Osiadania obliczone do metody jednego równania dla pala 36N-10L

N_i [kN]	$S_{i,pom}$ [mm]	$S_{i,calc,1.rów,c}$ [mm]	$S_{i,calc,1.rów,p}$ [mm]	$S_{i,calc,1.rów,s}$ [mm]	$S_{i,calc,1.rów,k}$ [mm]
1500	0,9	0,846	0,764	0,989	0,951
2500	1,7	1,705	1,595	1,978	1,903
3200	2,5	2,565	2,481	2,956	2,845
3700	3,3	3,399	3,385	3,895	3,748
4200	4,1	4,532	4,680	5,159	4,964
4500	5,9	5,438	5,766	6,158	5,926
4650	6,7	5,981	6,439	6,755	6,500
4900	8,1	7,074	7,834	7,945	7,645
5100	9,3	8,177	9,300	9,138	8,793
5200	10	8,831	10,196	9,842	9,470
5600	15,9	12,578	15,659	13,818	13,297
5900	20	17,781	24,090	19,226	18,500
6100	24,7	24,223	35,687	25,782	24,809
6200	30	29,550	46,119	31,113	29,939
6250	35,1	33,227	53,718	34,752	33,441
6300	40	37,998	64,029	39,433	37,945
6350	44,8	44,479	78,791	45,725	44,000
6400	50	53,879	101,611	54,735	52,670
6450	60	68,973	141,378	68,970	66,367
6460	70	73,196	153,130	72,908	70,157
6470	80	78,031	166,904	77,397	74,476
6480	90	83,632	183,264	82,571	79,455
6490	100	90,208	203,005	88,612	85,268



Rys. 11.16 Krzywe M-K aproksymowane metodą jednego równania z wykorzystaniem różnych części zbioru wartości $\{N_i, s_i\}$ dla pala 36N-10L

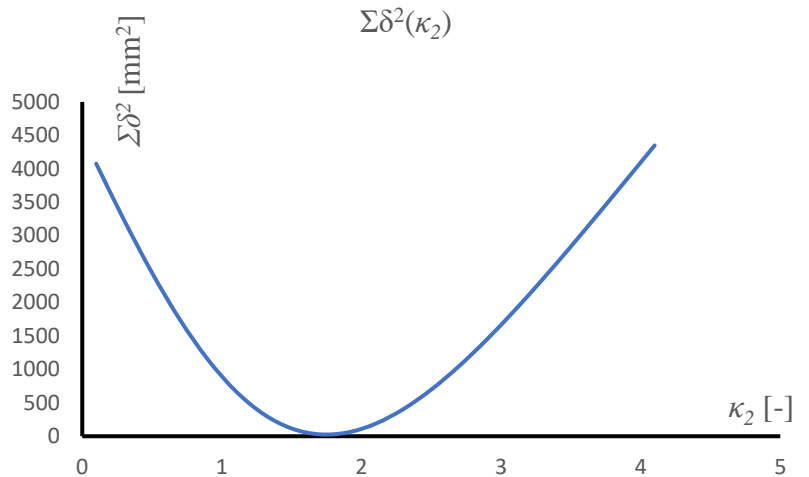
4. Optimalizacja dla pała 31-10L

$$N_{gr2,obl} = 8700 \text{ kN}$$

$$\min \Sigma \delta^2 = 23,38 \text{ mm}^2$$

$$\kappa_{2,opt} = 1,7$$

$$C_{2,opt} = 0,0005447 \text{ mm/kN}$$



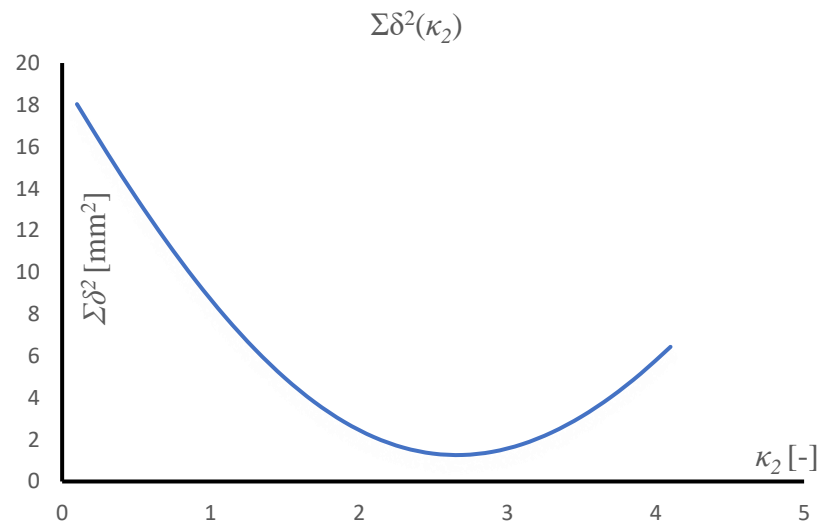
Rys. 11.17 Optimalizacja parametrów krzywej M-K metodą jednego równania z wykorzystaniem całego zbioru wartości dla pała 31-10L

$$N_{gr2,obl} = 8700 \text{ kN}$$

$$\min \Sigma \delta^2 = 1,27 \text{ mm}^2$$

$$\kappa_{2,opt} = 2,7$$

$$C_{2,opt} = 0,000299 \text{ mm/kN}$$



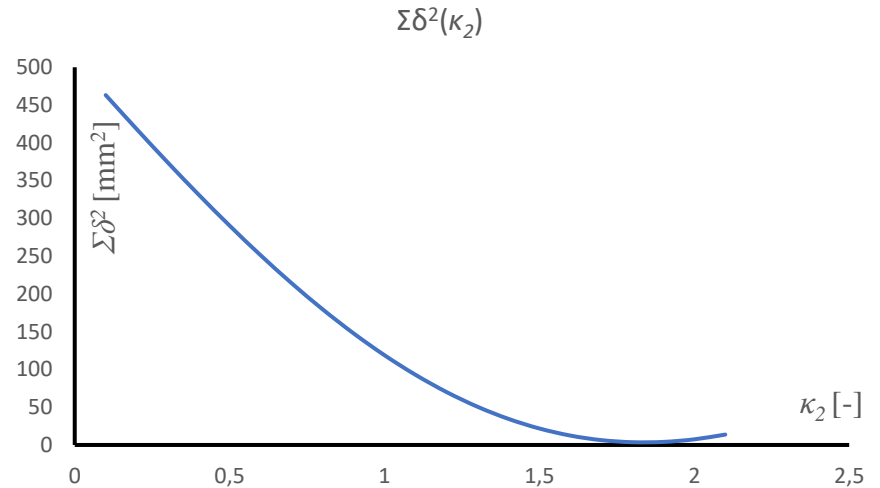
Rys. 11.18 Optimalizacja parametrów krzywej M-K metodą jednego równania z wykorzystaniem początkowej części zbioru wartości dla pała 31-10L

$$N_{gr2,obl} = 8700 \text{ kN}$$

$$\min \Sigma \delta^2 = 3,65 \text{ mm}^2$$

$$\kappa_{2,opt} = 1,8$$

$$C_{2,opt} = 0,000491 \text{ mm/kN}$$



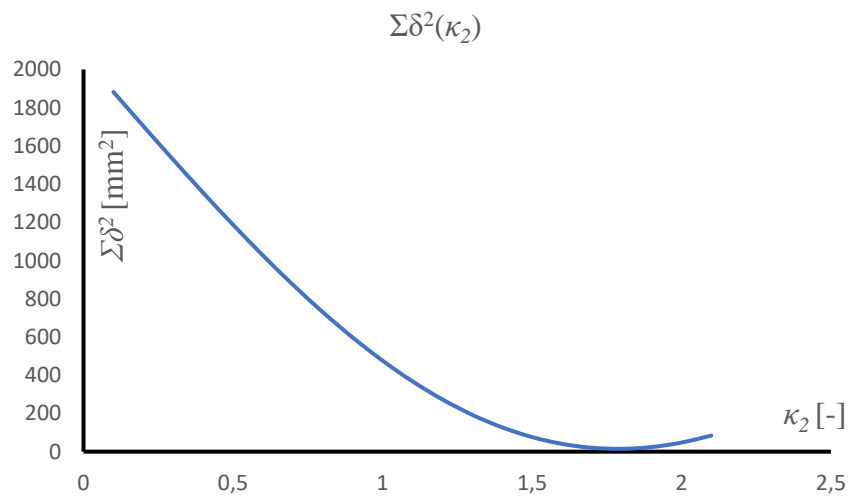
Rys. 11.19 Optymalizacja parametrów krzywej M-K metodą jednego równania z wykorzystaniem środkowej części zbioru wartości dla pała 31-10L

$$N_{gr2,obl} = 8700 \text{ kN}$$

$$\min \Sigma \delta^2 = 14,96 \text{ mm}^2$$

$$\kappa_{2,opt} = 1,8$$

$$C_{2,opt} = 0,000481 \text{ mm/kN}$$

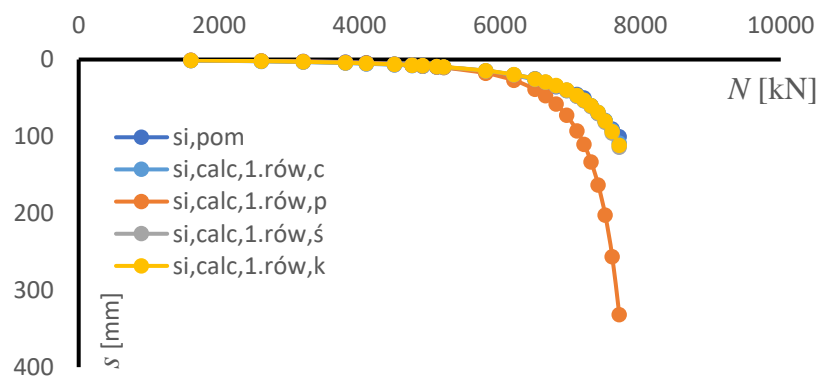


Rys. 11.20 Optymalizacja parametrów krzywej M-K metodą jednego równania z wykorzystaniem końcowej części zbioru wartości dla pała 31-10L

5. Krzywe osiadania dla pala 31-10L

Tab. 11.26 Osiadania obliczone do metody jednego równania dla pala 31-10L

N_i [kN]	$S_{i,pom}$ [mm]	$S_{i,calc,1.rów,c}$ [mm]	$S_{i,calc,1.rów,p}$ [mm]	$S_{i,calc,1.rów,ś}$ [mm]	$S_{i,calc,1.rów,k}$ [mm]
1600	1,2	1,162	0,707	1,046	1,025
2600	1,9	2,332	1,554	2,119	2,076
3200	2,4	3,323	2,368	3,038	2,976
3800	3,2	4,655	3,588	4,288	4,200
4100	4,1	5,502	4,435	5,090	4,986
4500	5,9	6,892	5,939	6,416	6,285
4750	7,1	7,960	7,184	7,442	7,291
4900	8,8	8,693	8,082	8,150	7,984
5100	9,4	9,801	9,504	9,226	9,037
5200	10	10,420	10,331	9,829	9,628
5800	14,6	15,405	17,805	14,742	14,441
6200	20	20,634	27,058	19,982	19,574
6500	24,9	26,326	38,610	25,765	25,239
6650	30	30,043	46,923	29,578	28,974
6800	35,2	34,574	57,829	34,260	33,561
6950	40	40,184	72,447	40,104	39,286
7100	45,2	47,259	92,543	47,539	46,568
7200	50	53,066	110,343	53,687	52,591
7300	60	60,020	133,135	61,099	59,852
7400	70	68,456	162,840	70,155	68,724
7500	80	78,845	202,358	81,394	79,733
7600	90	91,863	256,202	95,597	93,646
7700	100	108,516	331,677	113,931	111,606



Rys. 11.21 Krzywe M-K aproksymowane metodą jednego równania z wykorzystaniem różnych części zbioru wartości $\{N_i, s_i\}$ dla pala 31-10L

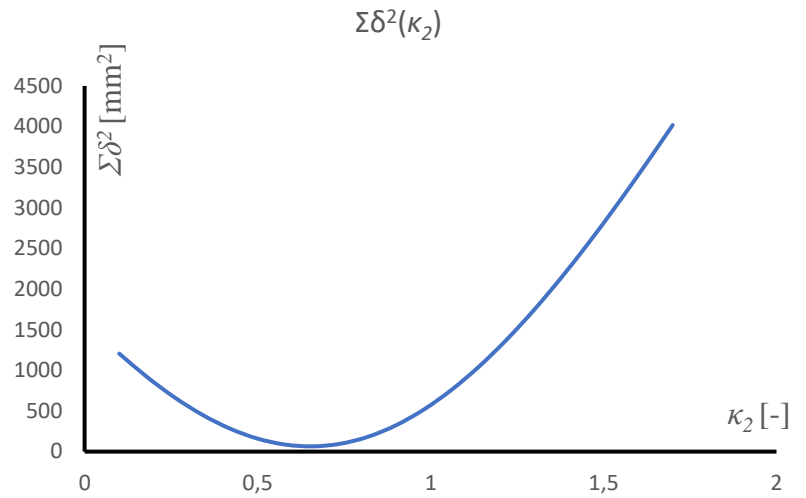
6. Optymalizacja dla pala 38-10P

$$N_{gr2,obl} = 12500 \text{ kN}$$

$$\min \Sigma \delta^2 = 64,94 \text{ mm}^2$$

$$\kappa_{2,opt} = 0,66$$

$$C_{2,opt} = 0,0008775 \text{ mm/kN}$$



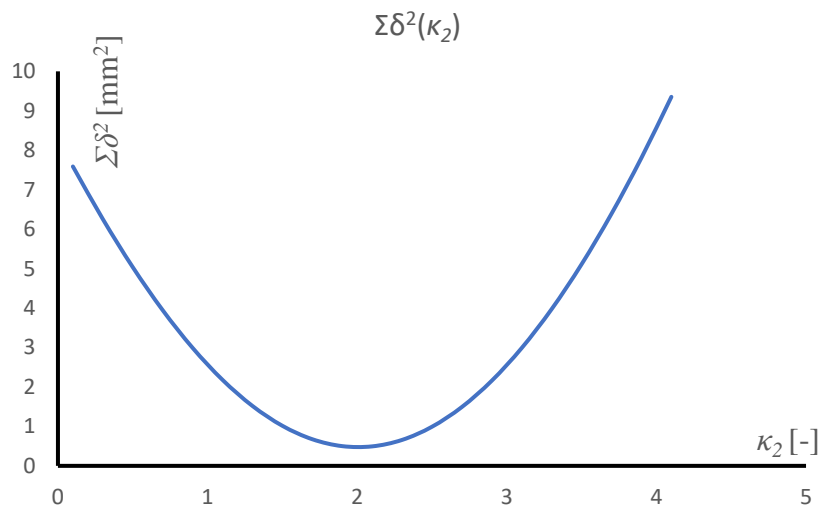
Rys. 11.22 Optymalizacja parametrów krzywej M-K metodą jednego równania z wykorzystaniem całego zbioru wartości dla pala 38-10P

$$N_{gr2,obl} = 12500 \text{ kN}$$

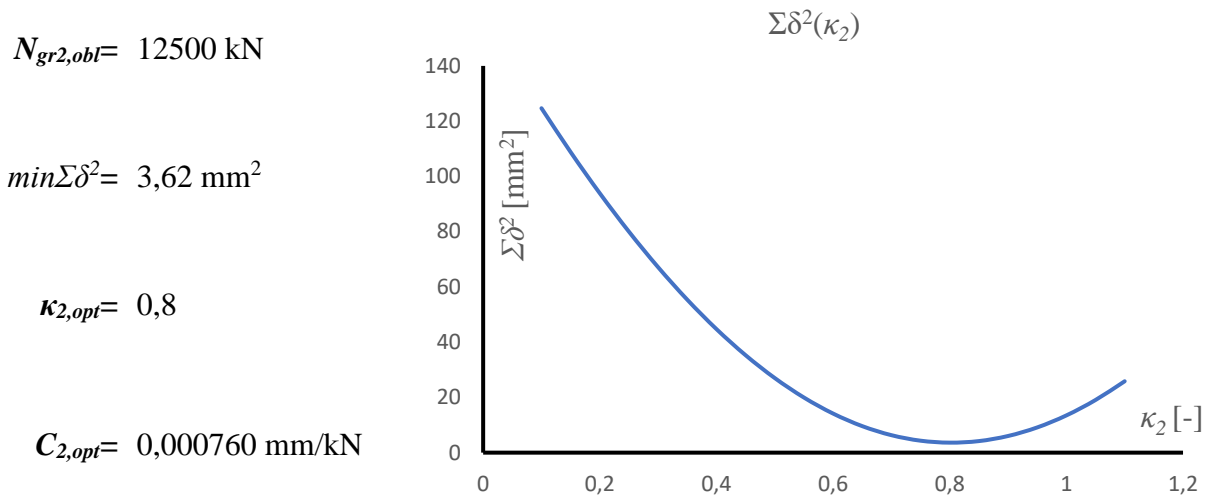
$$\min \Sigma \delta^2 = 0,49 \text{ mm}^2$$

$$\kappa_{2,opt} = 2,1$$

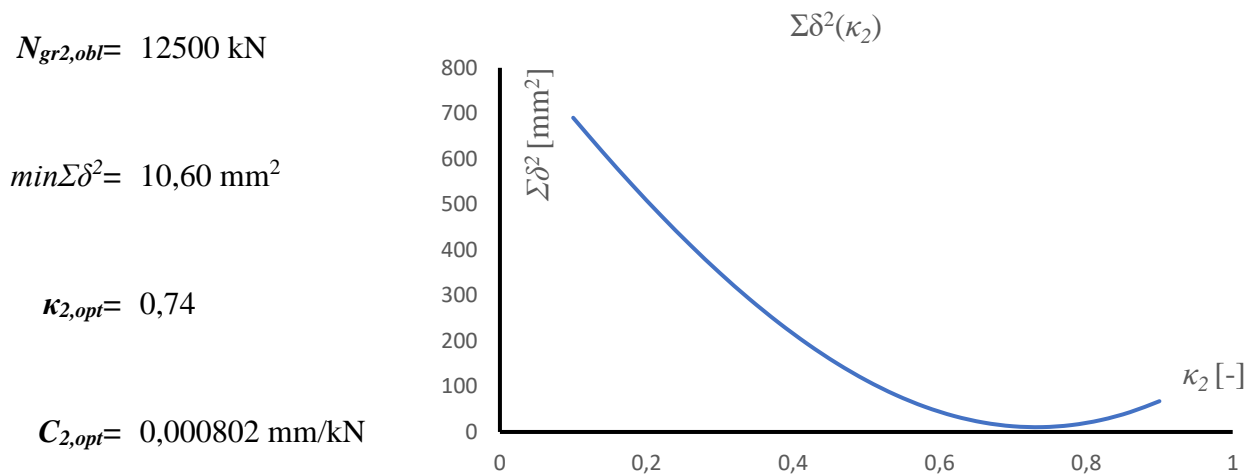
$$C_{2,opt} = 0,000462 \text{ mm/kN}$$



Rys. 11.23 Optymalizacja parametrów krzywej M-K metodą jednego równania z wykorzystaniem początkowej części zbioru wartości dla pala 38-10P



Rys. 11.24 Optymalizacja parametrów krzywej M-K metodą jednego równania z wykorzystaniem środkowej części zbioru wartości dla pala 38-10P

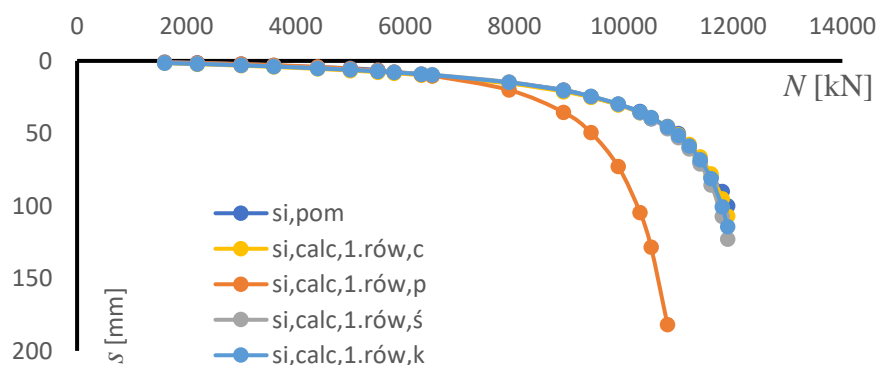


Rys. 11.25 Optymalizacja parametrów krzywej M-K metodą jednego równania z wykorzystaniem końcowej części zbioru wartości dla pala 38-10P

7. Krzywe osiadania dla pala 38-10P

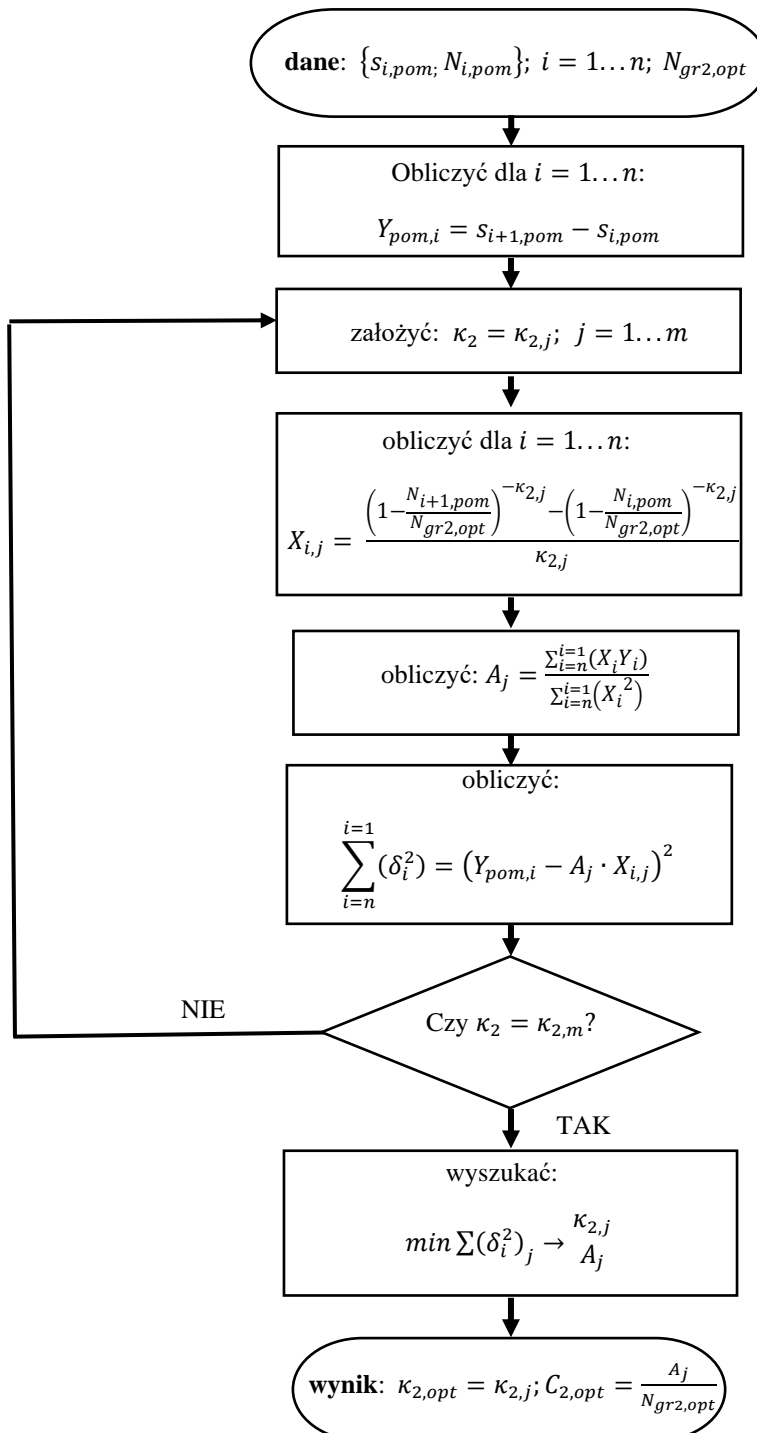
Tab. 11.27 Osiadania obliczone do metody jednego równania dla pala 38-10P

N_i [kN]	$S_{i,pom}$ [mm]	$S_{i,calc,1.rów,c}$ [mm]	$S_{i,calc,1.rów,p}$ [mm]	$S_{i,calc,1.rów,ś}$ [mm]	$S_{i,calc,1.rów,k}$ [mm]
1600	0,7	1,577	0,932	1,375	1,441
2200	1,3	2,271	1,403	1,989	2,081
3000	2,2	3,309	2,181	2,915	3,043
3600	3,1	4,188	2,912	3,708	3,862
4400	4,3	5,526	4,160	4,927	5,116
5000	5,1	6,682	5,381	5,995	6,208
5500	6,3	7,770	6,656	7,009	7,241
5800	7,9	8,487	7,567	7,682	7,925
6300	9,1	9,808	9,400	8,934	9,191
6500	10	10,387	10,270	9,487	9,749
7900	15,1	15,573	20,032	14,546	14,803
8900	20	21,234	35,402	20,270	20,435
9400	24,8	25,166	49,495	24,355	24,407
9900	30	30,315	72,861	29,830	29,678
10300	34,9	35,791	104,654	35,793	35,362
10500	40	39,197	128,464	39,569	38,933
10800	45,3	45,522	181,856	46,712	45,636
11000	50	50,878	237,366	52,882	51,376
11200	60	57,568	321,556	60,737	58,624
11400	70	66,221	457,857	71,119	68,117
11600	80	77,959	699,288	85,572	81,185
11800	90	95,031	1 187,331	107,272	100,540
11900	100	106,993	1 642,263	122,910	114,321

Rys. 11.26 Krzywe M-K aproksymowane metodą jednego równania z wykorzystaniem różnych części zbioru wartości $\{N_i, s_i\}$ dla pala 38-10P

Załącznik F. Aproxymacja metodą dwóch równań.

1. Algorytm postępowania



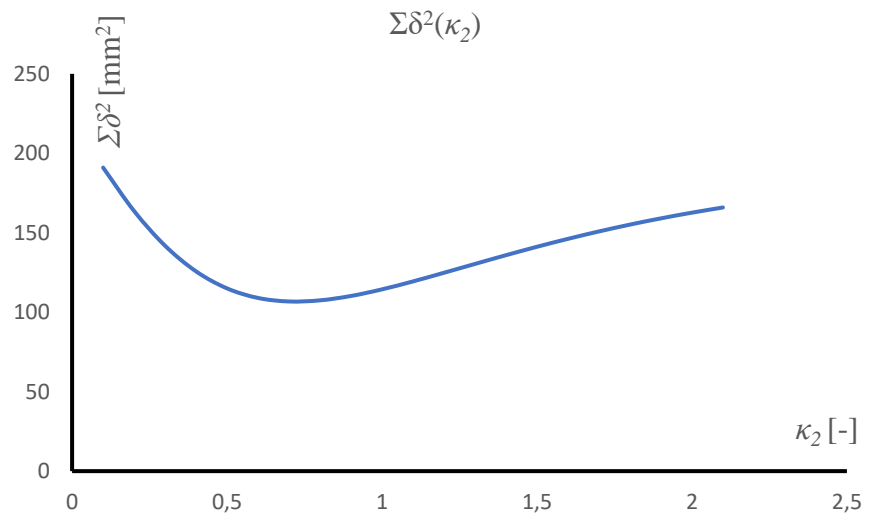
2. Optymalizacja dla pala 36N-10L

$$N_{gr2,obl} = 6590 \text{ kN}$$

$$\min \Sigma \delta^2 = 106,8 \text{ mm}^2$$

$$\kappa_{2,opt} = 0,7$$

$$C_{2,opt} = 0,000468 \text{ mm/kN}$$



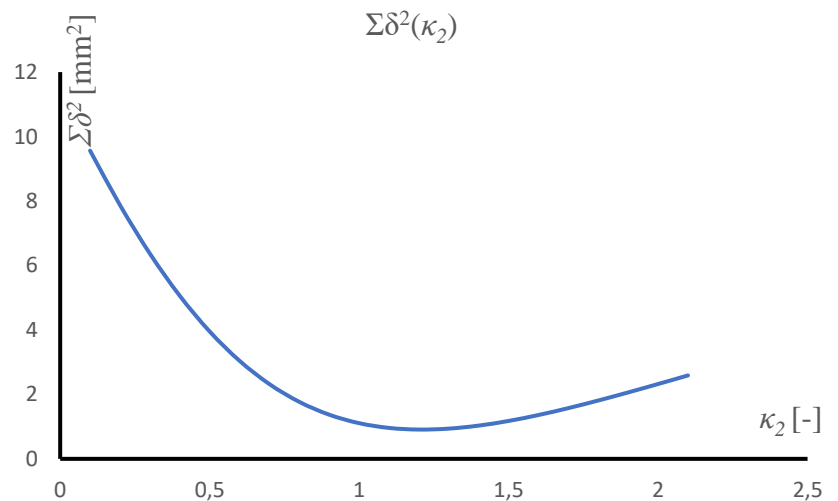
Rys. 11.27 Optymalizacja parametrów krzywej M-K metodą dwóch równań z wykorzystaniem całego zbioru wartości dla pala 36N-10L

$$N_{gr2,obl} = 6590 \text{ kN}$$

$$\min \Sigma \delta^2 = 0,91 \text{ mm}^2$$

$$\kappa_{2,opt} = 1,2$$

$$C_{2,opt} = 0,000327 \text{ mm/kN}$$



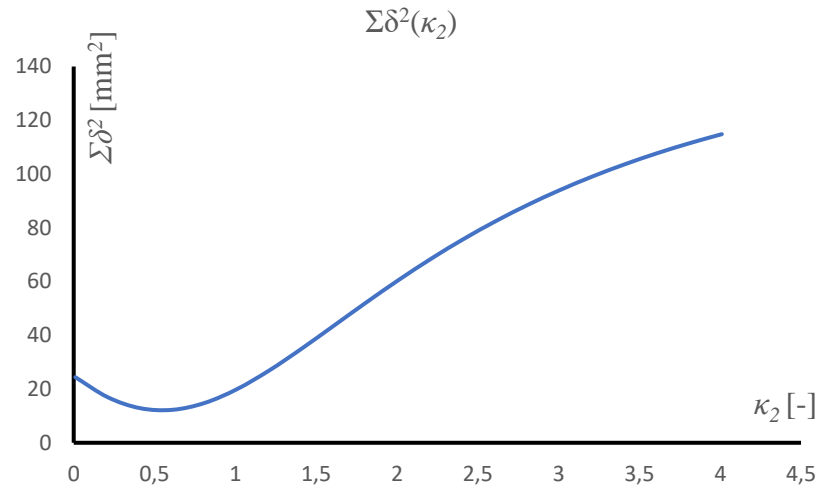
Rys. 11.28 Optymalizacja parametrów krzywej M-K metodą dwóch równań z wykorzystaniem początkowej części zbioru wartości dla pala 36N-10L

$$N_{gr2,obl} = 6590 \text{ kN}$$

$$\min \Sigma \delta^2 = 12,26 \text{ mm}^2$$

$$\kappa_{2,opt} = 0,61$$

$$C_{2,opt} = 0,000623 \text{ mm/kN}$$



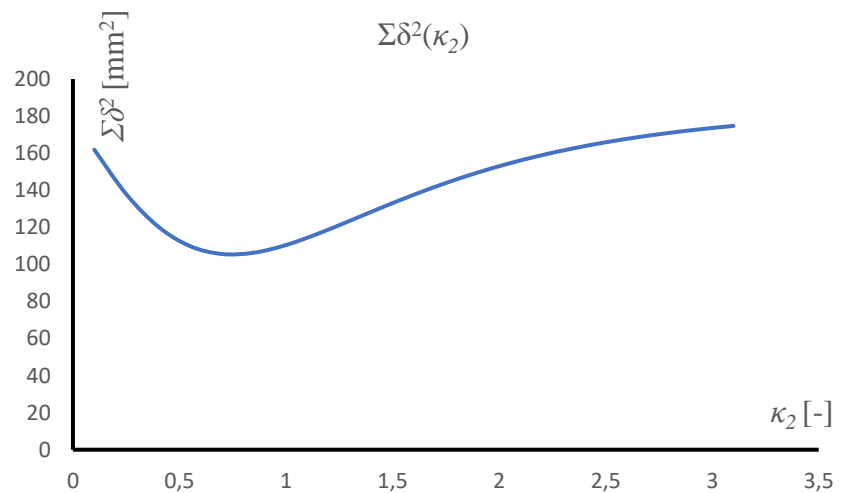
Rys. 11.29 Optymalizacja parametrów krzywej M-K metodą dwóch równań z wykorzystaniem środkowej części zbioru wartości dla pala 36N-10L

$$N_{gr2,obl} = 6590 \text{ kN}$$

$$\min \Sigma \delta^2 = 105,36 \text{ mm}^2$$

$$\kappa_{2,opt} = 0,75$$

$$C_{2,opt} = 0,000396 \text{ mm/kN}$$

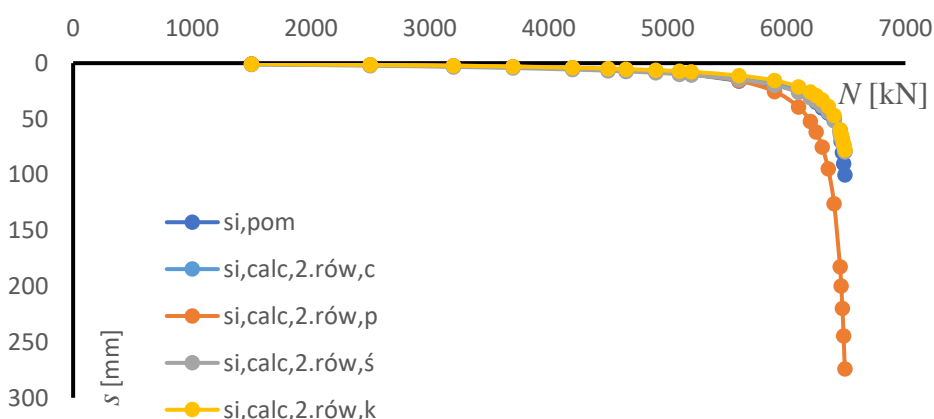


Rys. 11.30 Optymalizacja parametrów krzywej M-K metodą dwóch równań z wykorzystaniem końcowej części zbioru wartości dla pala 36N-10L

3. Krzywe osiadania dla pala 36N-10L

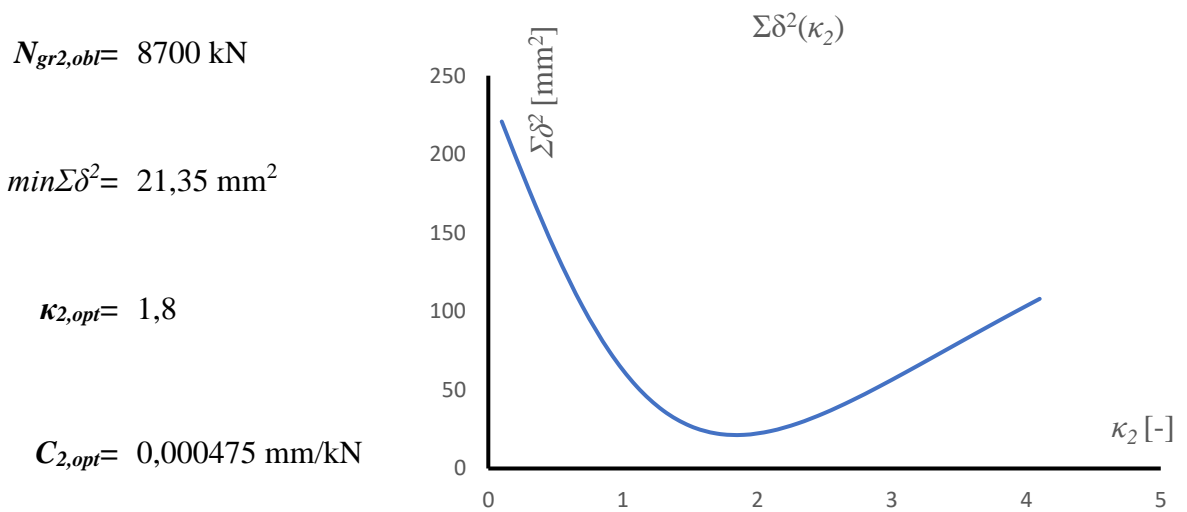
Tab. 11.28 Osiadania obliczone do metody dwóch równań dla pala 36N-10L

N_i [kN]	$S_{i,pom}$ [mm]	$S_{i,calc,2.rów,c}$ [mm]	$S_{i,calc,2.rów,p}$ [mm]	$S_{i,calc,2.rów,ś}$ [mm]	$S_{i,calc,2.rów,k}$ [mm]
1500	0,9	0,877	0,658	1,143	0,751
2500	1,7	1,754	1,400	2,262	1,512
3200	2,5	2,622	2,212	3,349	2,272
3700	3,3	3,454	3,061	4,376	3,007
4200	4,1	4,575	4,308	5,737	4,006
4500	5,9	5,461	5,377	6,797	4,802
4650	6,7	5,990	6,049	7,424	5,280
4900	8,1	7,046	7,465	8,664	6,238
5100	9,3	8,103	8,979	9,891	7,204
5200	10	8,727	9,917	10,609	7,778
5600	15,9	12,254	15,812	14,590	11,051
5900	20	17,049	25,369	19,834	15,580
6100	24,7	22,863	39,175	25,994	21,169
6200	30	27,591	52,090	30,879	25,777
6250	35,1	30,818	61,736	34,159	28,952
6300	40	34,969	75,101	38,322	33,066
6350	44,8	40,549	94,710	43,831	38,644
6400	50	48,539	125,942	51,570	46,718
6450	60	61,162	182,488	63,501	59,647
6460	70	64,654	199,629	66,747	63,257
6470	80	68,635	219,937	70,422	67,388
6480	90	73,223	244,343	74,626	72,169
6490	100	78,580	274,170	79,494	77,777

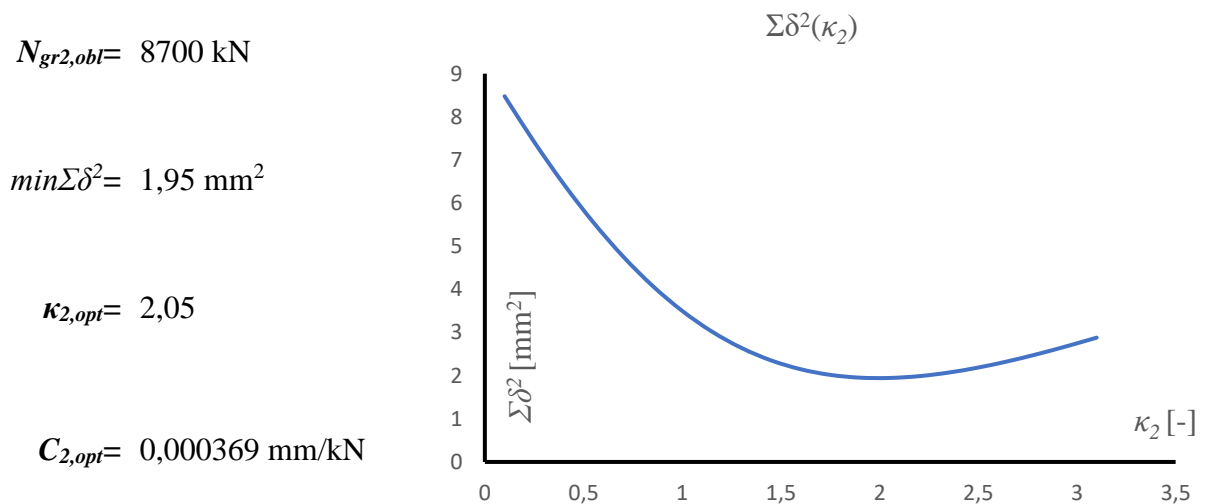


Rys. 11.31 Krzywe M-K aproksymowane metodą dwóch równań z wykorzystaniem różnych części zbioru wartości $\{N_i, s_i\}$ dla pala 36N-10L

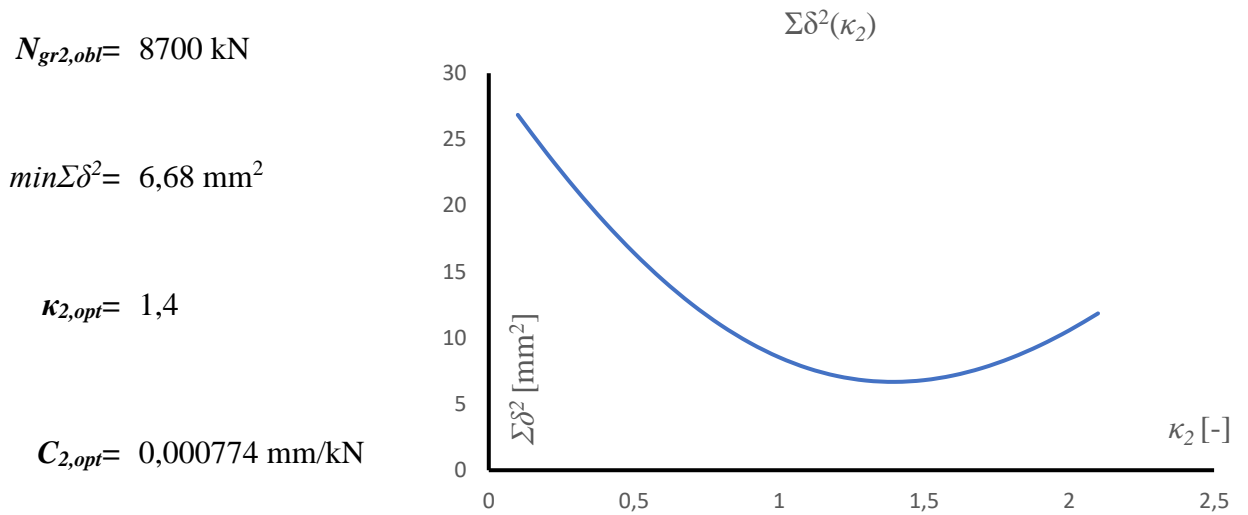
4. Optimalizacja dla pala 31-10L



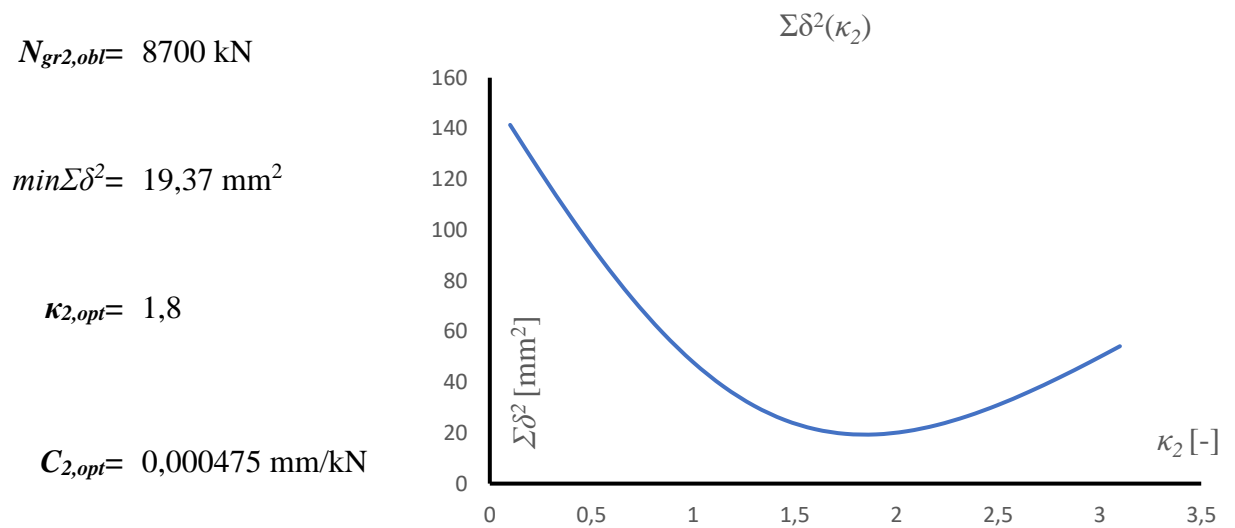
Rys. 11.32 Optimalizacja parametrów krzywej M-K metodą dwóch równań z wykorzystaniem całego zbioru wartości dla pala 31-10L



Rys. 11.33 Optimalizacja parametrów krzywej M-K metodą dwóch równań z wykorzystaniem początkowej części zbioru wartości dla pala 31-10L



Rys. 11.34 Optymalizacja parametrów krzywej M-K metodą dwóch równań z wykorzystaniem środkowej części zbioru wartości dla pała 31-10L

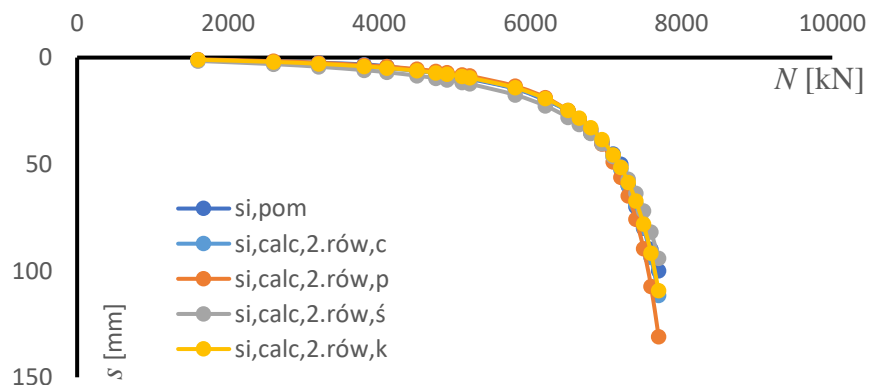


Rys. 11.35 Optymalizacja parametrów krzywej M-K metodą dwóch równań z wykorzystaniem końcowej części zbioru wartości dla pała 31-10L

5. Krzywe osiadania dla pala 31-10L

Tab. 11.29 Osiadania obliczone do metody dwóch równań dla pala 31-10L

N_i [kN]	$s_{i,pom}$ [mm]	$s_{i,calc,2.rów,c}$ [mm]	$s_{i,calc,2.rów,p}$ [mm]	$s_{i,calc,2.rów,ś}$ [mm]	$s_{i,calc,2.rów,k}$ [mm]
1600	1,2	1,025	0,812	1,575	1,003
2600	1,9	2,076	1,681	3,081	2,032
3200	2,4	2,976	2,450	4,308	2,914
3800	3,2	4,200	3,524	5,904	4,113
4100	4,1	4,986	4,228	6,892	4,882
4500	5,9	6,285	5,417	8,479	6,155
4750	7,1	7,291	6,354	9,668	7,139
4900	8,8	7,984	7,009	10,474	7,818
5100	9,4	9,037	8,014	11,673	8,849
5200	10	9,628	8,584	12,335	9,428
5800	14,6	14,441	13,360	17,492	14,140
6200	20	19,574	18,669	22,637	19,166
6500	24,9	25,239	24,733	28,011	24,713
6650	30	28,974	28,831	31,419	28,371
6800	35,2	33,561	33,955	35,482	32,862
6950	40	39,286	40,479	40,396	38,467
7100	45,2	46,568	48,958	46,435	45,598
7200	50	52,591	56,106	51,279	51,495
7300	60	59,852	64,868	56,964	58,605
7400	70	68,724	75,769	63,715	67,292
7500	80	79,733	89,559	71,837	78,072
7600	90	93,646	107,355	81,763	91,695
7700	100	111,606	130,858	94,118	109,281



Rys. 11.36 Krzywe M-K aproksymowane metodą dwóch równań z wykorzystaniem różnych części zbioru wartości $\{N_i, s_i\}$ dla pala 31-10L

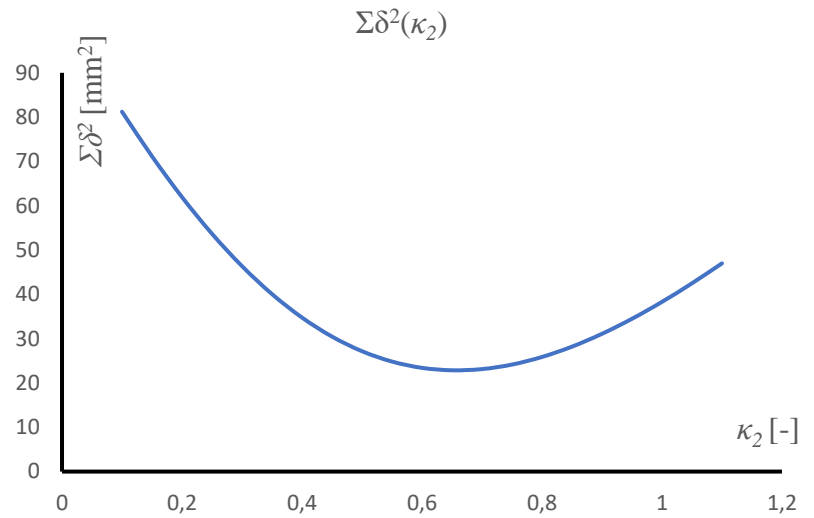
6. Optimalizacja dla pała 38-10P

$$N_{gr2,obl} = 12500 \text{ kN}$$

$$\min \Sigma \delta^2 = 22,86 \text{ mm}^2$$

$$\kappa_{2,opt} = 0,65$$

$$C_{2,opt} = 0,000907 \text{ mm/kN}$$



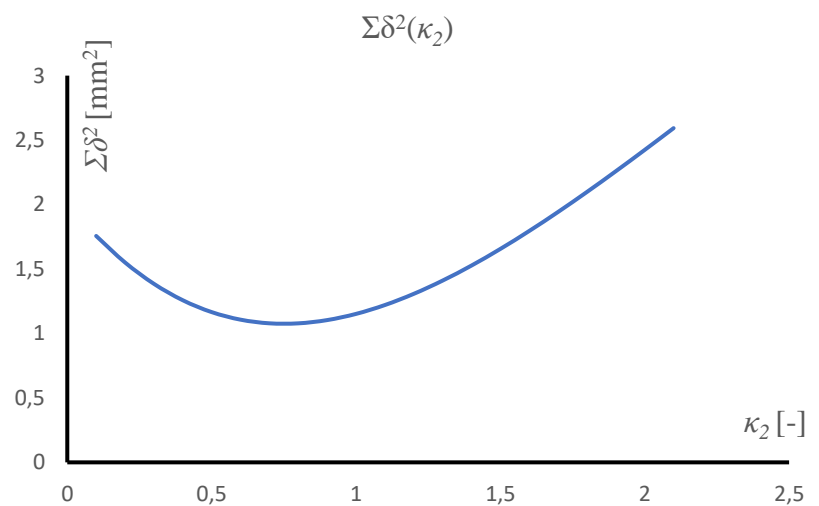
Rys. 11.37 Optimalizacja parametrów krzywej M-K metodą jednego równania z wykorzystaniem całego zbioru wartości dla pała 38-10P

$$N_{gr2,obl} = 12500 \text{ kN}$$

$$\min \Sigma \delta^2 = 1,08 \text{ mm}^2$$

$$\kappa_{2,opt} = 0,75$$

$$C_{2,opt} = 0,000811 \text{ mm/kN}$$



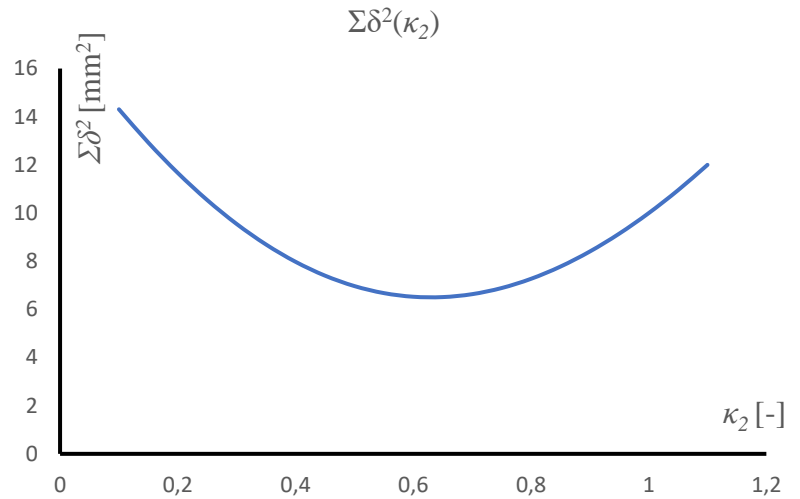
Rys. 11.38 Optimalizacja parametrów krzywej M-K metodą jednego równania z wykorzystaniem początkowej części zbioru wartości dla pała 38-10P

$$N_{gr2,obl} = 12500 \text{ kN}$$

$$\min \Sigma \delta^2 = 6,51 \text{ mm}^2$$

$$\kappa_{2,opt} = 0,65$$

$$C_{2,opt} = 0,000871 \text{ mm/kN}$$



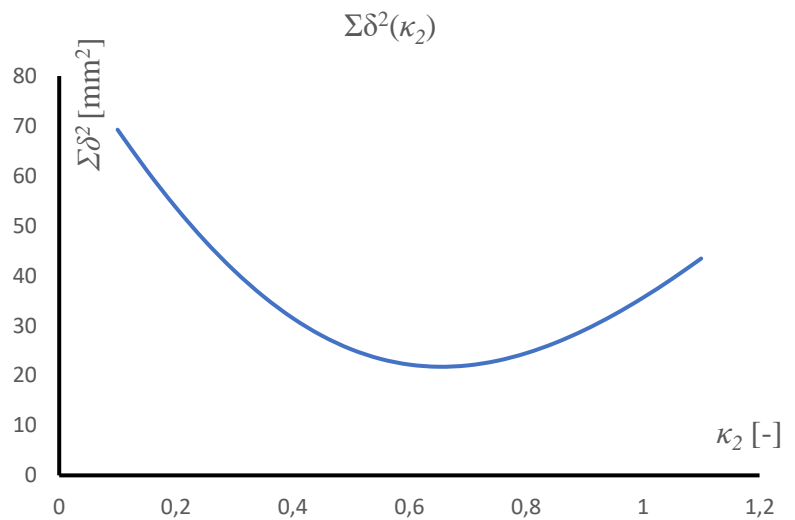
Rys. 11.39 Optymalizacja parametrów krzywej M-K metodą jednego równania z wykorzystaniem środkowej części zbioru wartości dla pala 38-10P

$$N_{gr2,obl} = 12500 \text{ kN}$$

$$\min \Sigma \delta^2 = 21,77 \text{ mm}^2$$

$$\kappa_{2,opt} = 0,65$$

$$C_{2,opt} = 0,000907 \text{ mm/kN}$$

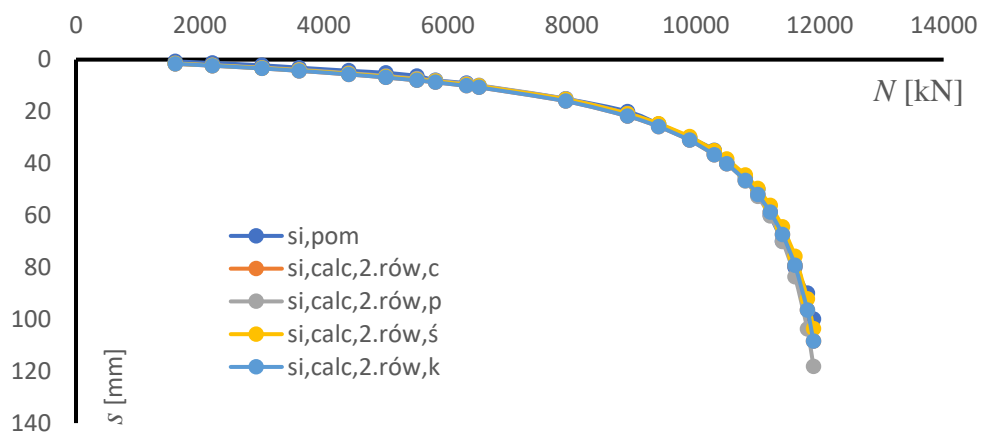


Rys. 11.40 Optymalizacja parametrów krzywej M-K metodą jednego równania z wykorzystaniem końcowej części zbioru wartości dla pala 38-10P

7. Krzywe osiadania dla pala 38-10P

Tab. 11.30 Osiadania obliczone do metody dwóch równań dla pala 38-10P

N_i [kN]	$S_{i,pom}$ [mm]	$S_{i,calc,2.rów,c}$ [mm]	$S_{i,calc,2.rów,p}$ [mm]	$S_{i,calc,2.rów,ś}$ [mm]	$S_{i,calc,2.rów,k}$ [mm]
1600	0,7	1,629	1,461	1,558	1,629
2200	1,3	2,347	2,109	2,243	2,347
3000	2,2	3,417	3,085	3,267	3,417
3600	3,1	4,324	3,917	4,134	4,324
4400	4,3	5,701	5,192	5,451	5,701
5000	5,1	6,892	6,303	6,589	6,892
5500	6,3	8,010	7,354	7,658	8,010
5800	7,9	8,747	8,051	8,363	8,747
6300	9,1	10,104	9,341	9,660	10,104
6500	10	10,699	9,910	10,229	10,699
7900	15,1	16,015	15,072	15,311	16,015
8900	20	21,804	20,839	20,845	21,804
9400	24,8	25,816	24,914	24,681	25,816
9900	30	31,062	30,331	29,697	31,062
10300	34,9	36,632	36,182	35,022	36,632
10500	40	40,092	39,863	38,329	40,092
10800	45,3	46,509	46,781	44,464	46,509
11000	50	51,934	52,714	49,651	51,934
11200	60	58,702	60,215	56,122	58,702
11400	70	67,442	70,055	64,478	67,442
11600	80	79,277	83,626	75,792	79,277
11800	90	96,450	103,772	92,211	96,450
11900	100	108,460	118,145	103,692	108,460

Rys. 11.41 Krzywe M-K aproksymowane metodą dwóch równań z wykorzystaniem różnych części zbioru wartości $\{N_i, s_i\}$ dla pala 31-10L

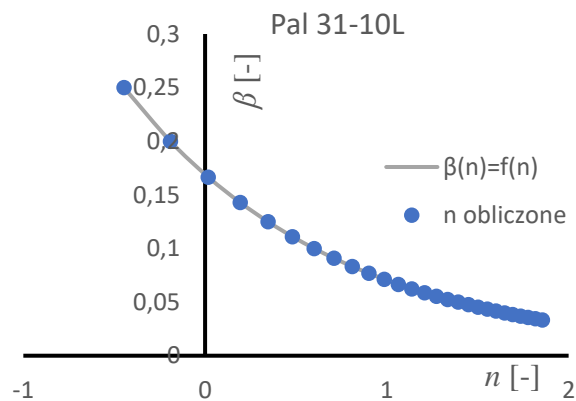
Załącznik G. Funkcje $\beta(n)$ dla poszczególnych pali

Tab. 11.31 Sprawdzenie zgodności dla pala 31-10L

β	$n_{obliczone}$	$f(n)$
0,250	-0,446	0,250
0,200	-0,191	0,200
0,167	0,017	0,167
0,143	0,193	0,143
0,125	0,346	0,125
0,111	0,480	0,111
0,100	0,600	0,100
0,091	0,709	0,091
0,083	0,809	0,083
0,077	0,900	0,077
0,071	0,985	0,071
0,067	1,064	0,067
0,063	1,137	0,063
0,059	1,207	0,059
0,056	1,272	0,056
0,053	1,334	0,053
0,050	1,392	0,050
0,048	1,448	0,048
0,045	1,501	0,045
0,043	1,552	0,043
0,042	1,600	0,042
0,040	1,647	0,040
0,038	1,692	0,038
0,037	1,735	0,037
0,036	1,777	0,036
0,034	1,817	0,034
0,033	1,855	0,033

$$n_{obliczone} = \frac{\ln\left(\frac{7700}{\beta \cdot 4,75 \cdot 2^2 \cdot \left(\frac{27,5}{2}\right)^{1/3}}\right)}{\ln(1 + 1,4)}$$

$$\beta(n) = f(n) = 0,169162 \cdot 0,4166667^n$$

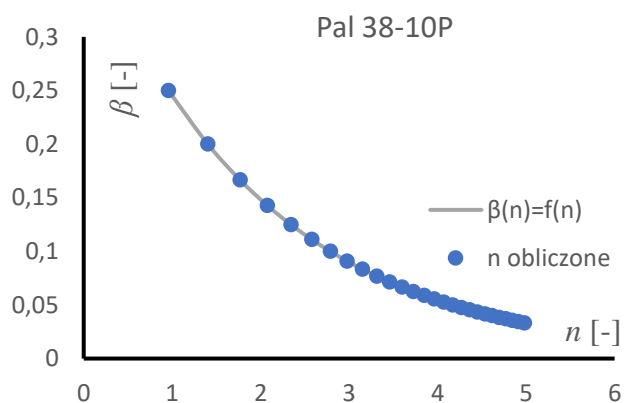


Tab. 11.32 Sprawdzenie zgodności dla pala 38-10P

β	$n_{obliczone}$	$f(n)$
0,250	0,956	0,250
0,200	1,402	0,200
0,167	1,766	0,167
0,143	2,074	0,143
0,125	2,340	0,125
0,111	2,576	0,111
0,100	2,786	0,100
0,091	2,976	0,091
0,083	3,150	0,083
0,077	3,310	0,077
0,071	3,458	0,071
0,067	3,596	0,067
0,063	3,725	0,063
0,059	3,846	0,059
0,056	3,960	0,056
0,053	4,068	0,053
0,050	4,170	0,050
0,048	4,268	0,048
0,045	4,361	0,045
0,043	4,449	0,043
0,042	4,534	0,042
0,040	4,616	0,040
0,038	4,694	0,038
0,037	4,770	0,037
0,036	4,842	0,036
0,034	4,912	0,034
0,033	4,980	0,033

$$n_{obliczone} = \frac{\ln\left(\frac{11900}{\beta \cdot 4,75 \cdot 1,5^2 \cdot \left(\frac{31,5}{1,5}\right)^{1/3}}\right)}{\ln(1 + 0,65)}$$

$$\beta(n) = f(n) = 0,403581 \cdot 0,606061^n$$

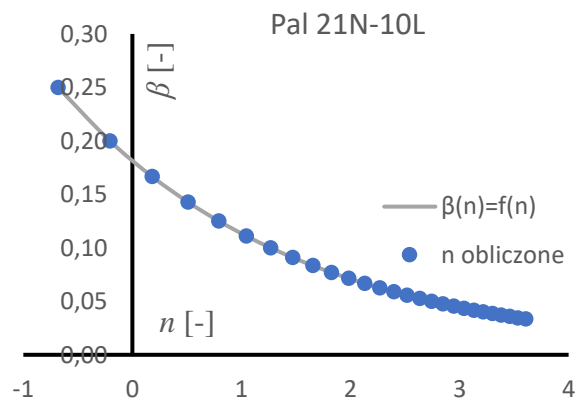


Tab. 11.33 Sprawdzenie zgodności dla pala 21N-10L

β	$n_{obliczone}$	$f(n)$
0,250	-0,682	0,250
0,200	-0,207	0,200
0,167	0,181	0,167
0,143	0,509	0,143
0,125	0,793	0,125
0,111	1,044	0,111
0,100	1,268	0,100
0,091	1,471	0,091
0,083	1,656	0,083
0,077	1,826	0,077
0,071	1,984	0,071
0,067	2,131	0,067
0,063	2,268	0,063
0,059	2,397	0,059
0,056	2,518	0,056
0,053	2,633	0,053
0,050	2,743	0,050
0,048	2,846	0,048
0,045	2,945	0,045
0,043	3,040	0,043
0,042	3,131	0,042
0,040	3,217	0,040
0,038	3,301	0,038
0,037	3,381	0,037
0,036	3,459	0,036
0,034	3,533	0,034
0,033	3,605	0,033

$$n_{obliczone} = \frac{\ln\left(\frac{8260}{\beta \cdot 4,75 \cdot 2^2 \cdot \left(\frac{27,5}{2}\right)^{1/3}}\right)}{\ln(1 + 0,6)}$$

$$\beta(n) = f(n) = 0,181465 \cdot 0,625^n$$

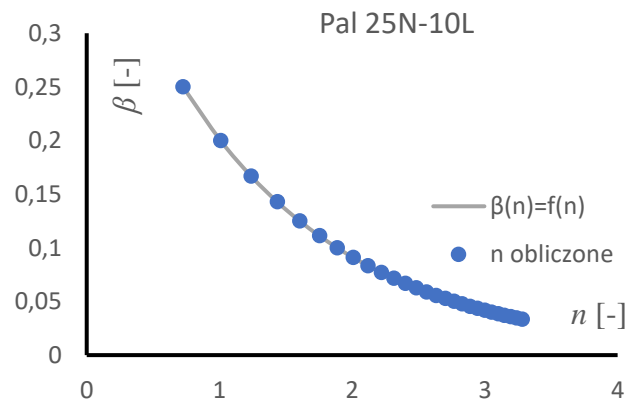


Tab. 11.34 Sprawdzenie zgodności dla pala 25N-10L

β	$n_{obliczone}$	$f(n)$
0,250	0,725	0,250
0,200	1,008	0,200
0,167	1,240	0,167
0,143	1,435	0,143
0,125	1,604	0,125
0,111	1,754	0,111
0,100	1,887	0,100
0,091	2,008	0,091
0,083	2,119	0,083
0,077	2,220	0,077
0,071	2,314	0,071
0,067	2,402	0,067
0,063	2,484	0,063
0,059	2,560	0,059
0,056	2,633	0,056
0,053	2,702	0,053
0,050	2,767	0,050
0,048	2,828	0,048
0,045	2,887	0,045
0,043	2,944	0,043
0,042	2,998	0,042
0,040	3,050	0,040
0,038	3,099	0,038
0,037	3,147	0,037
0,036	3,193	0,036
0,034	3,238	0,034
0,033	3,281	0,033

$$n_{obliczone} = \frac{\ln\left(\frac{6350}{\beta \cdot 4,75 \cdot 1^2 \cdot \left(\frac{27,5}{1}\right)^{1/3}}\right)}{\ln(1 + 1,2)}$$

$$\beta(n) = f(n) = 0,442897 \cdot 0,4545^n$$

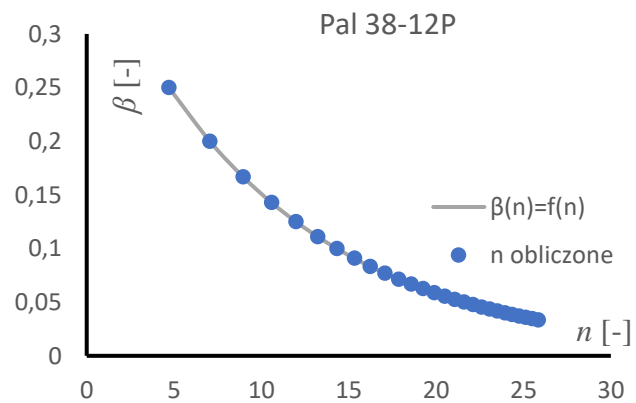


Tab. 11.35 Sprawdzenie zgodności dla pala 38-12P

β	$n_{obliczone}$	$f(n)$
0,250	4,703	0,250
0,200	7,044	0,200
0,167	8,957	0,167
0,143	10,575	0,143
0,125	11,976	0,125
0,111	13,212	0,111
0,100	14,317	0,100
0,091	15,317	0,091
0,083	16,230	0,083
0,077	17,070	0,077
0,071	17,847	0,071
0,067	18,571	0,067
0,063	19,248	0,063
0,059	19,884	0,059
0,056	20,484	0,056
0,053	21,051	0,053
0,050	21,590	0,050
0,048	22,101	0,048
0,045	22,590	0,045
0,043	23,056	0,043
0,042	23,502	0,042
0,040	23,931	0,040
0,038	24,342	0,038
0,037	24,738	0,037
0,036	25,120	0,036
0,034	25,488	0,034
0,033	25,844	0,033

$$n_{obliczone} = \frac{\ln\left(\frac{11780}{\beta \cdot 4,75 \cdot 1,5^2 \cdot \left(\frac{33,5}{1,5}\right)^{1/3}}\right)}{\ln(1 + 0,1)}$$

$$\beta(n) = f(n) = 0,391397 \cdot 0,9091^n$$

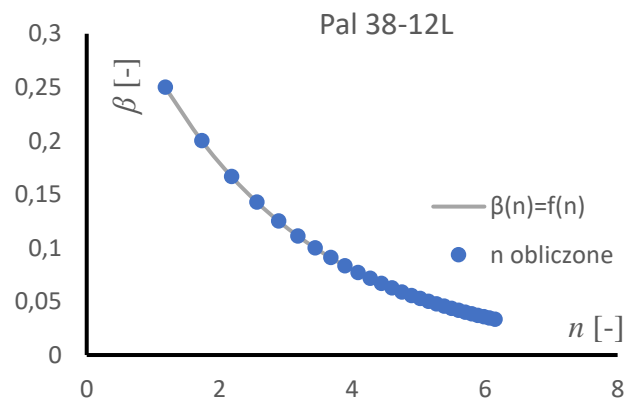


Tab. 11.36 Sprawdzenie zgodności dla pała 38-12L

β	$n_{obliczone}$	$f(n)$
0,250	1,182	0,250
0,200	1,732	0,200
0,167	2,182	0,167
0,143	2,562	0,143
0,125	2,891	0,125
0,111	3,182	0,111
0,100	3,442	0,100
0,091	3,677	0,091
0,083	3,891	0,083
0,077	4,089	0,077
0,071	4,272	0,071
0,067	4,442	0,067
0,063	4,601	0,063
0,059	4,750	0,059
0,056	4,891	0,056
0,053	5,025	0,053
0,050	5,151	0,050
0,048	5,272	0,048
0,045	5,386	0,045
0,043	5,496	0,043
0,042	5,601	0,042
0,040	5,702	0,040
0,038	5,798	0,038
0,037	5,891	0,037
0,036	5,981	0,036
0,034	6,068	0,034
0,033	6,151	0,033

$$n_{obliczone} = \frac{\ln\left(\frac{12150}{\beta \cdot 4,75 \cdot 1,5^2 \cdot \left(\frac{33,5}{1,5}\right)^{1/3}}\right)}{\ln(1 + 0,5)}$$

$$\beta(n) = f(n) = 0,403691 \cdot 0,66667^n$$



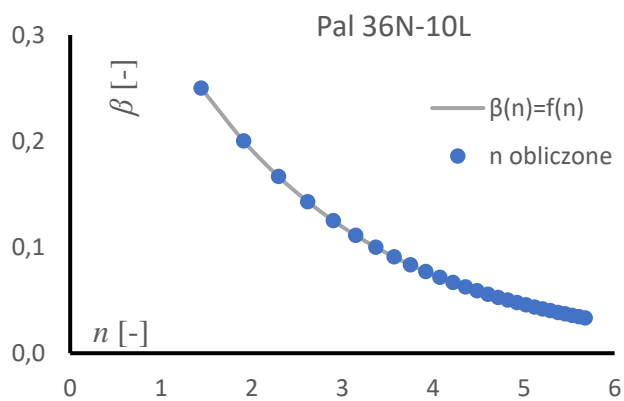
Załącznik H. Funkcje $\beta(n)$ po relaksacji statystycznej

Tab. 11.37 Sprawdzenie zgodności dla pała 36N-10L

β	$n_{obliczone}$	$f(n)$
0,250	1,443	0,250
0,200	1,912	0,200
0,167	2,295	0,167
0,143	2,618	0,143
0,125	2,899	0,125
0,111	3,146	0,111
0,100	3,367	0,100
0,091	3,567	0,091
0,083	3,750	0,083
0,077	3,918	0,077
0,071	4,074	0,071
0,067	4,219	0,067
0,063	4,354	0,063
0,059	4,481	0,059
0,056	4,601	0,056
0,053	4,715	0,053
0,050	4,823	0,050
0,048	4,925	0,048
0,045	5,023	0,045
0,043	5,116	0,043
0,042	5,205	0,042
0,040	5,291	0,040
0,038	5,374	0,038
0,037	5,453	0,037
0,036	5,529	0,036
0,034	5,603	0,034
0,033	5,674	0,033

$$n_{obliczone} = \frac{\ln\left(\frac{6490}{\beta \cdot 4,33 \cdot 1^2 \cdot \left(\frac{27,5}{1}\right)^{1/3}}\right)}{\ln(1 + 0,61)}$$

$$\beta(n) = f(n) = 0,497067 \cdot 0,621118^n$$

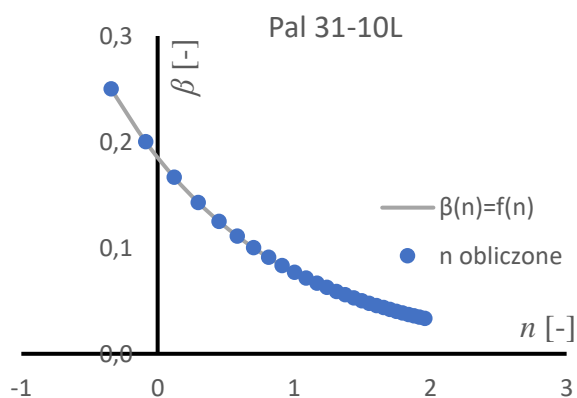


Tab. 11.38 Sprawdzenie zgodności dla pała 31-10L

β	$n_{obliczone}$	$f(n)$
0,250	-0,342	0,250
0,200	-0,087	0,200
0,167	0,121	0,167
0,143	0,297	0,143
0,125	0,450	0,125
0,111	0,584	0,111
0,100	0,704	0,100
0,091	0,813	0,091
0,083	0,913	0,083
0,077	1,004	0,077
0,071	1,089	0,071
0,067	1,168	0,067
0,063	1,241	0,063
0,059	1,311	0,059
0,056	1,376	0,056
0,053	1,438	0,053
0,050	1,496	0,050
0,048	1,552	0,048
0,045	1,605	0,045
0,043	1,656	0,043
0,042	1,704	0,042
0,040	1,751	0,040
0,038	1,796	0,038
0,037	1,839	0,037
0,036	1,881	0,036
0,034	1,921	0,034
0,033	1,855	0,033

$$n_{obliczone} = \frac{\ln\left(\frac{7700}{\beta \cdot 4,34 \cdot 2^2 \cdot \left(\frac{27,5}{2}\right)^{1/3}}\right)}{\ln(1 + 1,4)}$$

$$\beta(n) = f(n) = 0,185289 \cdot 0,4166667^n$$

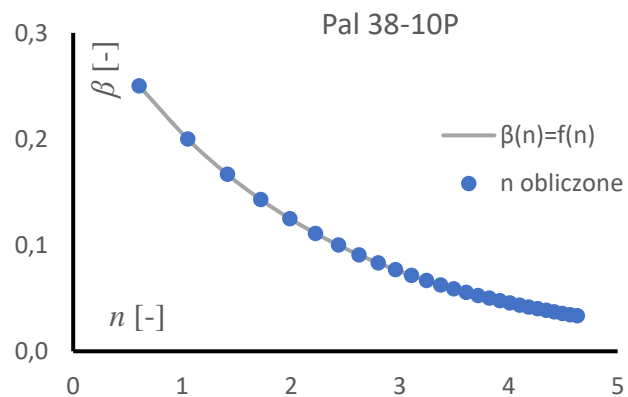


Tab. 11.39 Sprawdzenie zgodności dla pała 38-10P

β	$n_{obliczone}$	$f(n)$
0,250	0,606	0,250
0,200	1,051	0,200
0,167	1,415	0,167
0,143	1,723	0,143
0,125	1,990	0,125
0,111	2,225	0,111
0,100	2,436	0,100
0,091	2,626	0,091
0,083	2,800	0,083
0,077	2,959	0,077
0,071	3,107	0,071
0,067	3,245	0,067
0,063	3,374	0,063
0,059	3,495	0,059
0,056	3,609	0,056
0,053	3,717	0,053
0,050	3,820	0,050
0,048	3,917	0,048
0,045	4,010	0,045
0,043	4,099	0,043
0,042	4,184	0,042
0,040	4,265	0,040
0,038	4,344	0,038
0,037	4,419	0,037
0,036	4,492	0,036
0,034	4,562	0,034
0,033	4,629	0,033

$$n_{obliczone} = \frac{\ln\left(\frac{11900}{\beta \cdot 5,66 \cdot 1,5^2 \cdot \left(\frac{31,5}{1,5}\right)^{1/3}}\right)}{\ln(1 + 0,65)}$$

$$\beta(n) = f(n) = 0,338598 \cdot 0,606061^n$$

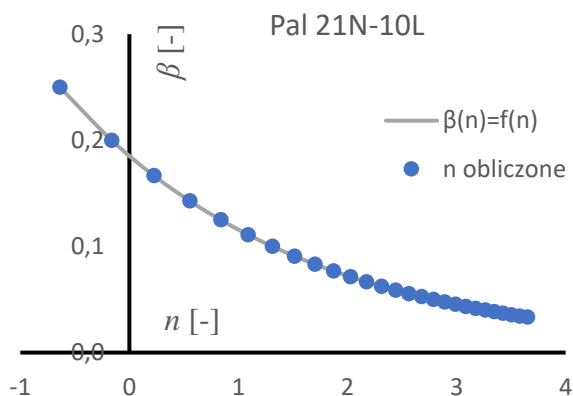


Tab. 11.40 Sprawdzenie zgodności dla pala 21N-10L

β	$n_{obliczone}$	$f(n)$
0,250	-0,637	0,250
0,200	-0,163	0,200
0,167	0,225	0,167
0,143	0,553	0,143
0,125	0,837	0,125
0,111	1,088	0,111
0,100	1,312	0,100
0,091	1,515	0,091
0,083	1,700	0,083
0,077	1,870	0,077
0,071	2,028	0,071
0,067	2,175	0,067
0,063	2,312	0,063
0,059	2,441	0,059
0,056	2,563	0,056
0,053	2,678	0,053
0,050	2,787	0,050
0,048	2,891	0,048
0,045	2,990	0,045
0,043	3,084	0,043
0,042	3,175	0,042
0,040	3,262	0,040
0,038	3,345	0,038
0,037	3,425	0,037
0,036	3,503	0,036
0,034	3,578	0,034
0,033	3,650	0,033

$$n_{obliczone} = \frac{\ln\left(\frac{8260}{\beta \cdot 4,66 \cdot 2^2 \cdot \left(\frac{27,5}{2}\right)^{1/3}}\right)}{\ln(1 + 0,6)}$$

$$\beta(n) = f(n) = 0,185289 \cdot 0,625^n$$

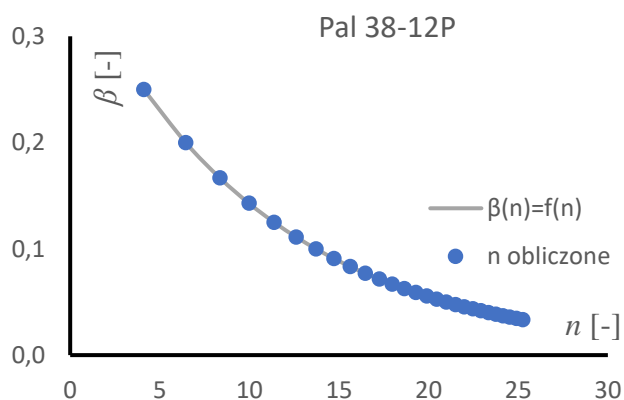


Tab. 11.41 Sprawdzenie zgodności dla pala 25N-10L

β	$n_{obliczone}$	$f(n)$
0,250	4,102	0,250
0,200	6,444	0,200
0,167	8,356	0,167
0,143	9,974	0,143
0,125	11,375	0,125
0,111	12,611	0,111
0,100	13,716	0,100
0,091	14,716	0,091
0,083	15,629	0,083
0,077	16,469	0,077
0,071	17,246	0,071
0,067	17,970	0,067
0,063	18,647	0,063
0,059	19,283	0,059
0,056	19,883	0,056
0,053	20,450	0,053
0,050	20,989	0,050
0,048	21,501	0,048
0,045	21,989	0,045
0,043	22,455	0,043
0,042	22,902	0,042
0,040	23,330	0,040
0,038	23,741	0,038
0,037	24,137	0,037
0,036	24,519	0,036
0,034	24,887	0,034
0,033	25,243	0,033

$$n_{obliczone} = \frac{\ln\left(\frac{6350}{\beta \cdot 4,23 \cdot 1^2 \cdot \left(\frac{27,5}{1}\right)^{1/3}}\right)}{\ln(1 + 1,2)}$$

$$\beta(n) = f(n) = 0,497067 \cdot 0,4545^n$$

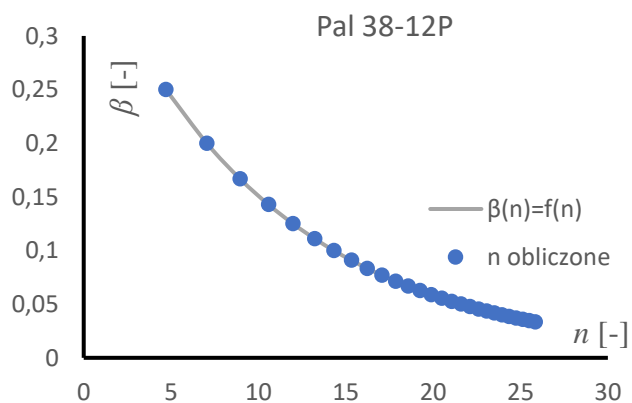


Tab. 11.42 Sprawdzenie zgodności dla pala 38-12P

β	$n_{obliczone}$	$f(n)$
0,250	4,703	0,250
0,200	7,044	0,200
0,167	8,957	0,167
0,143	10,575	0,143
0,125	11,976	0,125
0,111	13,212	0,111
0,100	14,317	0,100
0,091	15,317	0,091
0,083	16,230	0,083
0,077	17,070	0,077
0,071	17,847	0,071
0,067	18,571	0,067
0,063	19,248	0,063
0,059	19,884	0,059
0,056	20,484	0,056
0,053	21,051	0,053
0,050	21,590	0,050
0,048	22,101	0,048
0,045	22,590	0,045
0,043	23,056	0,043
0,042	23,502	0,042
0,040	23,931	0,040
0,038	24,342	0,038
0,037	24,738	0,037
0,036	25,120	0,036
0,034	25,488	0,034
0,033	25,844	0,033

$$n_{obliczone} = \frac{\ln\left(\frac{11780}{\beta \cdot 5,03 \cdot 1,5^2 \cdot \left(\frac{33,5}{1,5}\right)^{1/3}}\right)}{\ln(1 + 0,1)}$$

$$\beta(n) = f(n) = 0,369611 \cdot 0,9091^n$$

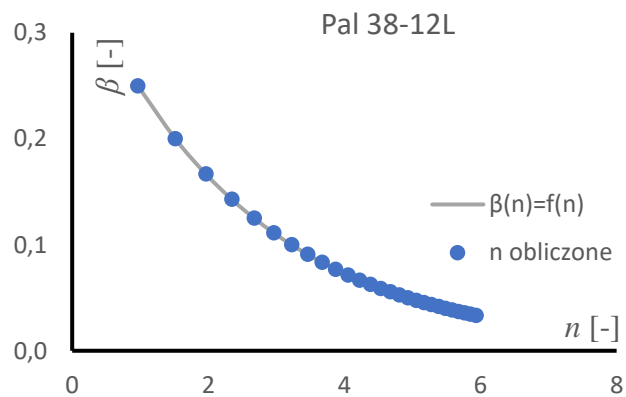


Tab. 11.43 Sprawdzenie zgodności dla pała 38-12L

β	$n_{obliczone}$	$f(n)$
0,250	0,964	0,250
0,200	1,515	0,200
0,167	1,964	0,167
0,143	2,344	0,143
0,125	2,674	0,125
0,111	2,964	0,111
0,100	3,224	0,100
0,091	3,459	0,091
0,083	3,674	0,083
0,077	3,871	0,077
0,071	4,054	0,071
0,067	4,224	0,067
0,063	4,383	0,063
0,059	4,533	0,059
0,056	4,674	0,056
0,053	4,807	0,053
0,050	4,934	0,050
0,048	5,054	0,048
0,045	5,169	0,045
0,043	5,278	0,043
0,042	5,383	0,042
0,040	5,484	0,040
0,038	5,581	0,038
0,037	5,674	0,037
0,036	5,764	0,036
0,034	5,850	0,034
0,033	5,934	0,033

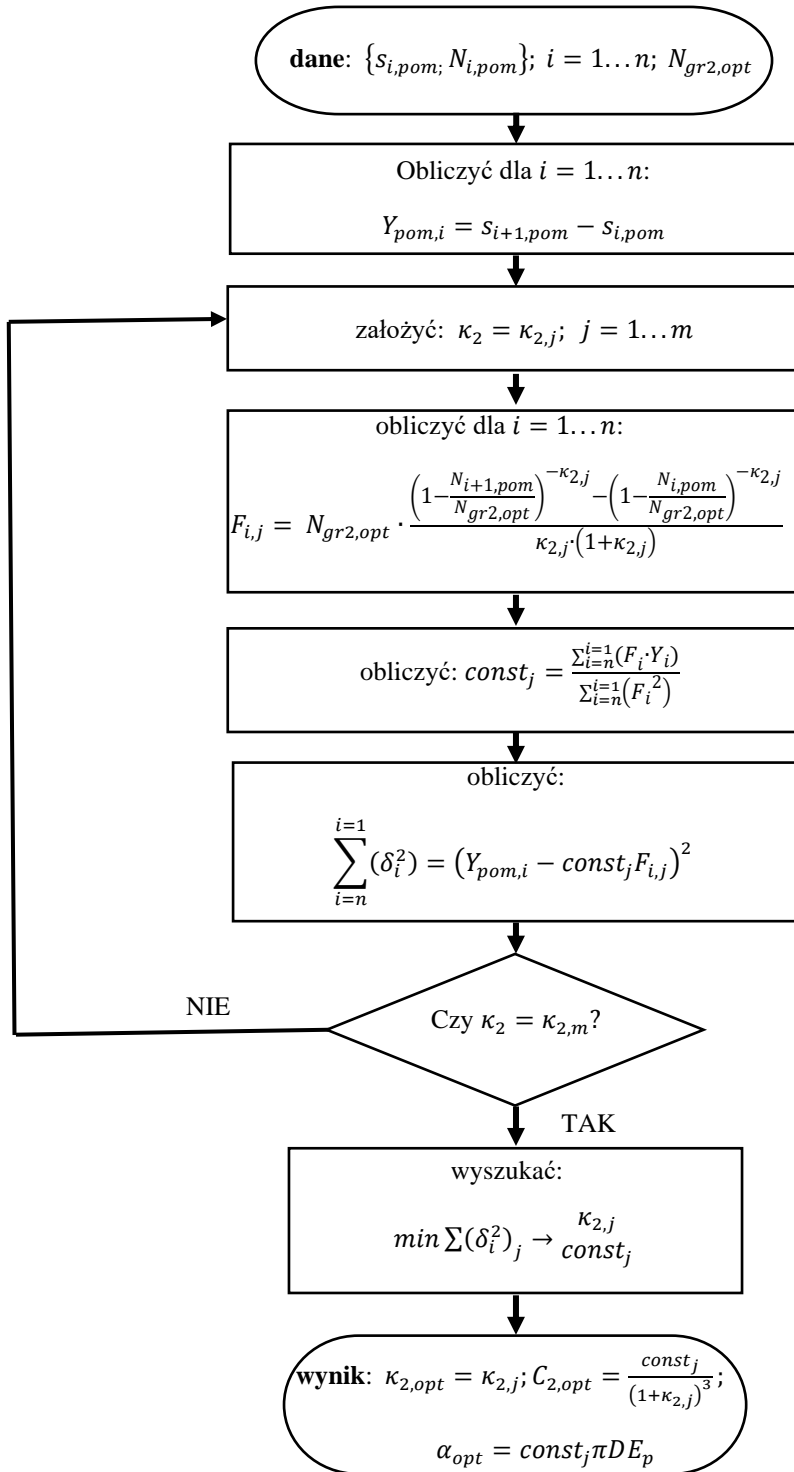
$$n_{obliczone} = \frac{\ln\left(\frac{12150}{\beta \cdot 5,19 \cdot 1,5^2 \cdot \left(\frac{33,5}{1,5}\right)^{1/3}}\right)}{\ln(1 + 0,5)}$$

$$\beta(n) = f(n) = 0,369611 \cdot 0,66667^n$$



Załącznik I. Rekomendowana metoda wyznaczania parametrów M-K

1. Algorytm postępowania



2. Aproxymowana krzywa osiadania dla pala 36N-10L

Tab. 11.44 Optymalne parametry krzywej M-K dla pala 36N-10L

N_i [kN]	$s_{i,pom}$ [mm]	$s_{i,calc,opt}$ [mm]
1500	0,9	1,143
2500	1,7	2,262
3200	2,5	3,349
3700	3,3	4,376
4200	4,1	5,737
4500	5,9	6,797
4650	6,7	7,424
4900	8,1	8,664
5100	9,3	9,891
5200	10	10,609
5600	15,9	14,590
5900	20	19,834
6100	24,7	25,994
6200	30	30,879
6250	35,1	34,159
6300	40	38,322
6350	44,8	43,831
6400	50	51,570
6450	60	63,501
6460	70	66,747
6470	80	70,422
6480	90	74,626
6490	100	79,494

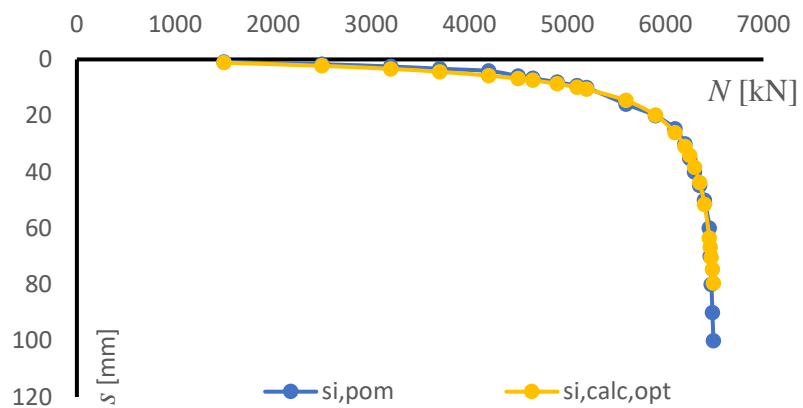
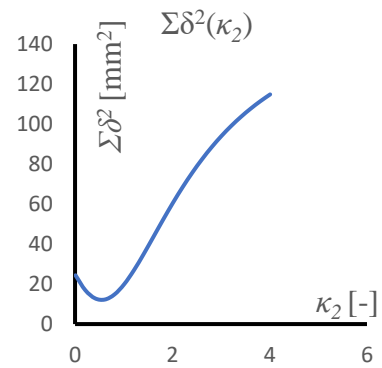
$$N_{gr2,obl} = 6590 \text{ kN}$$

$$\min \Sigma \delta^2 = 12,26 \text{ mm}^2$$

$$\kappa_{2,opt} = 0,61$$

$$C_{2,opt} = 0,000623 \text{ mm/kN}$$

$$\alpha_{opt} = 0,0498$$



3. Aproxymowana krzywa osiadania dla pala 38-10P

Tab. 11.45 Optymalne parametry krzywej M-K dla pala 38-10P

N_i [kN]	$s_{i,pom}$ [mm]	$s_{i,calc,opt}$ [mm]
1600	0,7	1,558
2200	1,3	2,243
3000	2,2	3,267
3600	3,1	4,134
4400	4,3	5,451
5000	5,1	6,589
5500	6,3	7,658
5800	7,9	8,363
6300	9,1	9,660
6500	10	10,229
7900	15,1	15,311
8900	20	20,845
9400	24,8	24,681
9900	30	29,697
10300	34,9	35,022
10500	40	38,329
10800	45,3	44,464
11000	50	49,651
11200	60	56,122
11400	70	64,478
8220	80	123,931
8250	90	219,200
8260	100	335,372

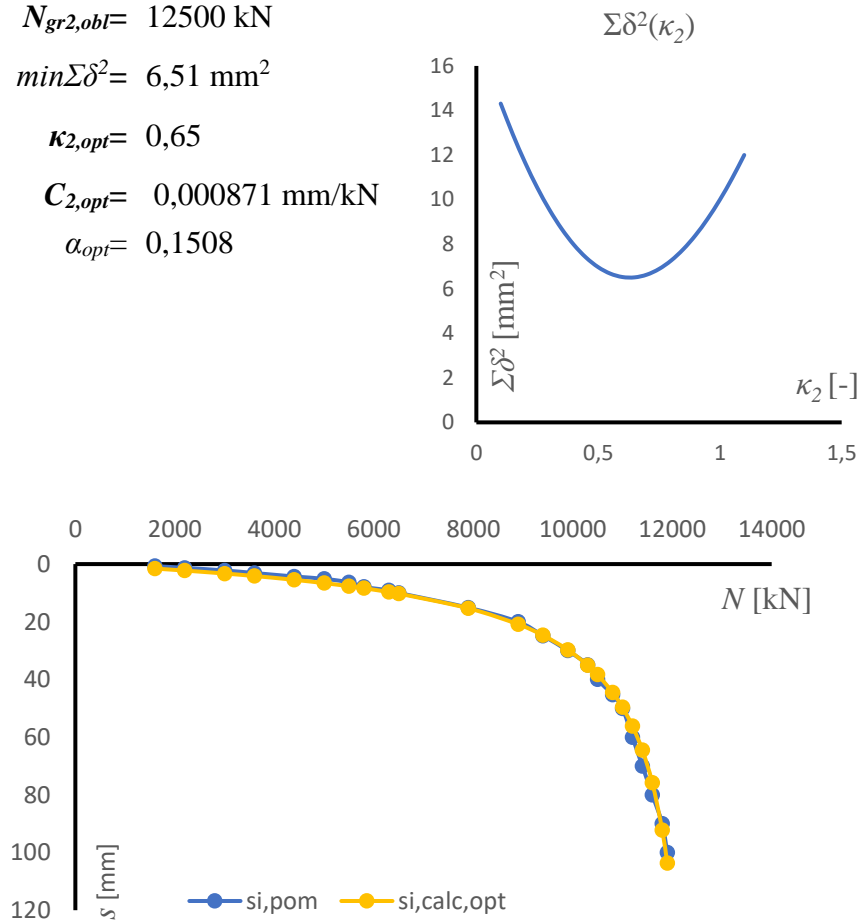
$$N_{gr2,obl} = 12500 \text{ kN}$$

$$\min \Sigma \delta^2 = 6,51 \text{ mm}^2$$

$$\kappa_{2,opt} = 0,65$$

$$C_{2,opt} = 0,000871 \text{ mm/kN}$$

$$\alpha_{opt} = 0,1508$$



4. Aproksymowana krzywa osiadania dla pala 21N-10L

Tab. 11.46 Optymalne parametry krzywej M-K dla pala 21N-10L

N_i [kN]	$s_{i,pom}$ [mm]	$s_{i,calc,opt}$ [mm]
1620	1,2	0,848
2950	2,1	1,838
3840	3,2	2,755
4500	4,5	3,652
5000	5,1	4,518
5450	6,2	5,501
5780	7,7	6,397
6050	9,1	7,286
6210	9,8	7,899
6350	10	8,501
7100	14,1	13,542
7500	20	19,136
7750	24,8	25,829
7900	30	33,054
7970	34,7	38,300
8050	40	47,374
8100	45,1	56,315
8100	50	56,315
8150	60	70,813
8200	70	100,166
8220	80	123,931
8250	90	219,200
8260	100	335,372

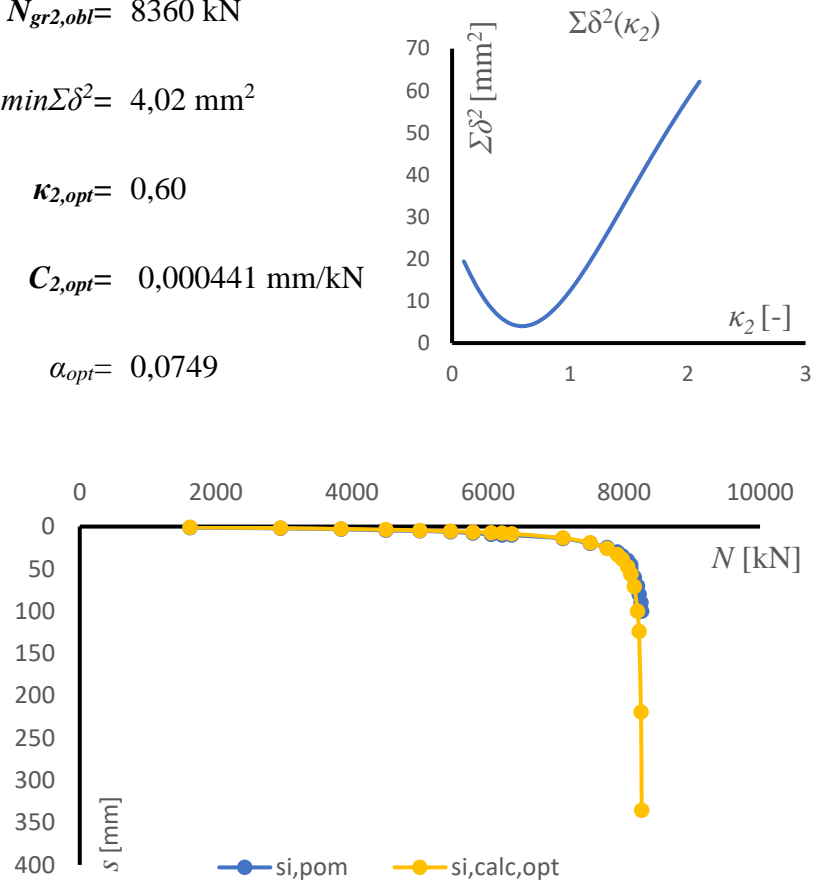
$$N_{gr2,obl} = 8360 \text{ kN}$$

$$\min \Sigma \delta^2 = 4,02 \text{ mm}^2$$

$$\kappa_{2,opt} = 0,60$$

$$C_{2,opt} = 0,000441 \text{ mm/kN}$$

$$\alpha_{opt} = 0,0749$$



5. Aproxymowana krzywa osiadania dla pala 25N-10L

Tab. 11.47 Optymalne parametry krzywej M-K dla pala 25N-10L

N_i [kN]	$S_{i,pom}$ [mm]	$S_{i,calc,opt}$ [mm]
1500	1,2	0,620
2600	1,5	1,412
3200	2,8	2,091
3800	3,3	3,102
4100	4,6	3,815
4400	5,8	4,749
4600	6,9	5,550
4800	8,1	6,554
4950	9,2	7,491
5050	10	8,230
5500	14,8	13,530
5600	20	15,473
5800	24,6	21,103
5900	30	25,373
6000	35,1	31,381
6050	40	35,389
6100	44,9	40,386
6200	50	55,197
6250	60	66,757
6300	70	83,497
6330	80	97,620
6340	90	103,322
6350	100	109,654

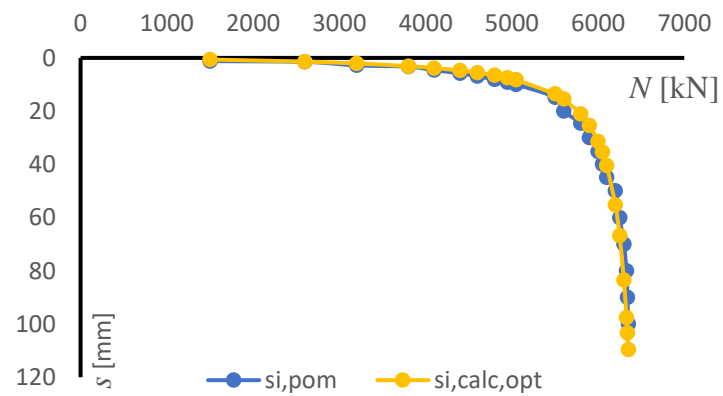
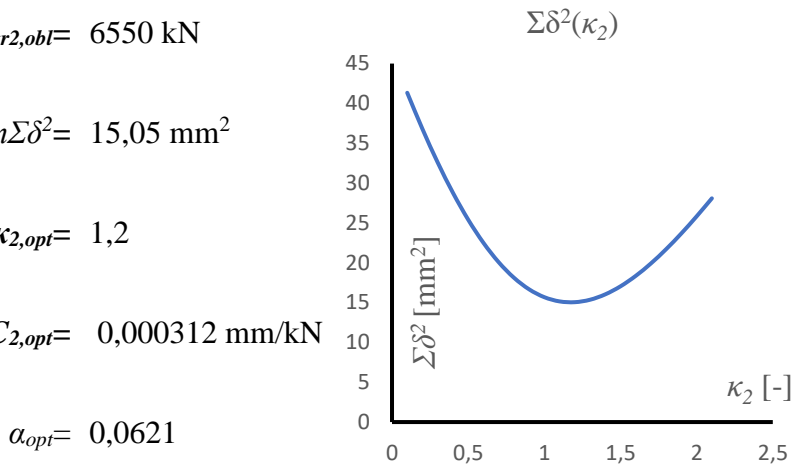
$$N_{gr2,opt} = 6550 \text{ kN}$$

$$\min \Sigma \delta^2 = 15,05 \text{ mm}^2$$

$$\kappa_{2,opt} = 1,2$$

$$C_{2,opt} = 0,000312 \text{ mm/kN}$$

$$\alpha_{opt} = 0,0621$$



6. Aproxymowana krzywa osiadania dla pala 38-12P

Tab. 11.48 Optymalne parametry krzywej M-K dla pala 38-12P

N_i [kN]	$s_{i,pom}$ [mm]	$s_{i,calc,opt}$ [mm]
2400	0,6	1,737
4200	1,8	3,395
5700	3,2	5,147
6500	4,1	6,287
7400	5,3	7,819
7900	7,1	8,827
8500	8,3	10,243
8900	9,1	11,352
9100	9,8	11,972
9500	10	13,377
10300	15	17,222
10900	20	22,004
11100	25	24,427
11400	30	29,969
11600	35	37,024
11700	40	44,065
11710	45	45,111
11740	50	49,019
11750	60	50,694
11760	70	52,657
11770	80	55,018
11780	90	57,966
11785	100	59,763

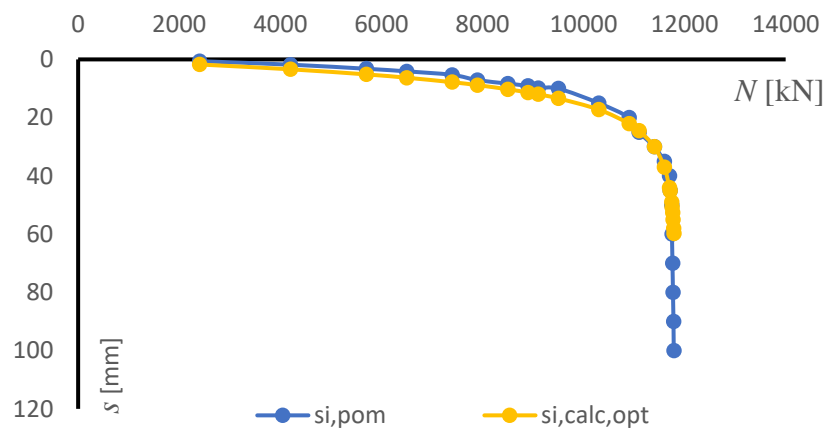
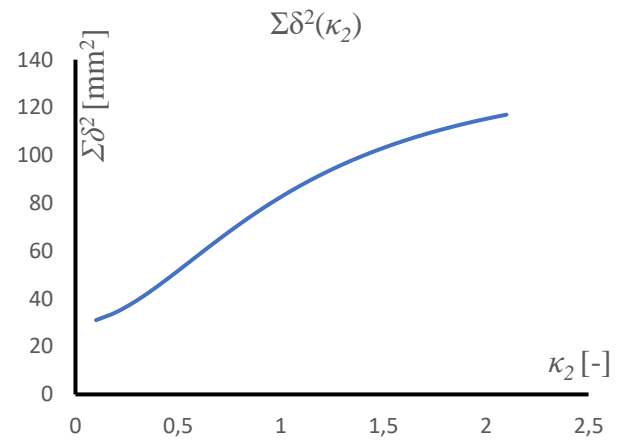
$$N_{gr2,opt} = 11850 \text{ kN}$$

$$\min \Sigma \delta^2 = 31,05 \text{ mm}^2$$

$$\kappa_{2,opt} = 0,1$$

$$C_{2,opt} = 0,000638 \text{ mm/kN}$$

$$\alpha_{opt} = 0,0288$$



7. Aproxymowana krzywa osiadania dla pala 38-12L

Tab. 11.49 Optymalne parametry krzywej M-K dla pala 38-12L

N_i [kN]	$s_{i,pom}$ [mm]	$s_{i,calc,opt}$ [mm]
2400	0,9	1,045
4300	1,6	2,191
5800	2,9	3,437
6600	3,8	4,297
7500	4,2	5,517
8100	6,1	6,545
8500	7,4	7,365
9100	8,6	8,882
9400	9,2	9,817
9600	10	10,528
10400	15	14,476
11000	20	19,758
11400	25	26,227
11600	30	31,682
11700	35	35,567
11800	40	40,831
11850	45	44,273
11900	50	48,544
11950	60	54,039
12000	70	61,483
12050	80	72,391
12100	90	90,690
12150	100	131,994

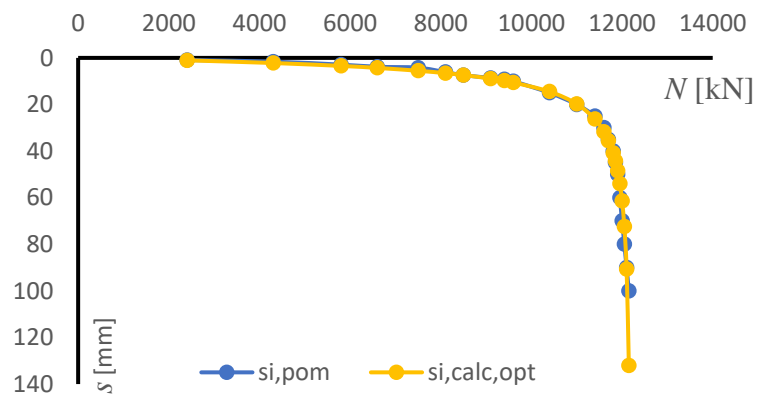
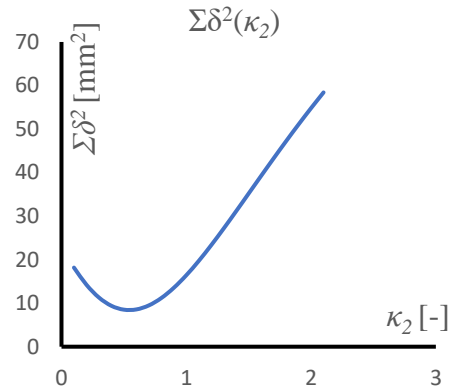
$$N_{gr2,opt} = 12200 \text{ kN}$$

$$\min \Sigma \delta^2 = 8,50 \text{ mm}^2$$

$$\kappa_{2,opt} = 0,5$$

$$C_{2,opt} = 0,000369 \text{ mm/kN}$$

$$\alpha_{opt} = 0,0436$$



SPIS RYSUNKÓW

Rys. 1.1 Schemat ideowy konwersji	11
Rys. 3.1 Rodzaje funkcji transformacyjnych [20].....	17
Rys. 3.2 Wyznaczanie nośności granicznej pali wg Mazurkiewicza [81]	22
Rys. 3.3 Charakterystyczne asymptoty ograniczające krzywą $s = s(N)$ [43]	24
Rys. 3.4 Przykładowe krzywe obciążenia pala [43].....	25
Rys. 3.5 Strefa uplastyczniona gruntu pod podstawą pala [46]	26
Rys. 3.6 Opis zależności obciążenie-osiadanie według metody Chin-Kondnera [65].....	27
Rys. 3.7 Porównanie krzywych obciążenia pala wyznaczonych różnymi metodami	28
Rys. 3.8 Liniowa i nieliniowa część zależności obciążenie-osiadanie.....	33
Rys. 4.1 Schemat naprężeń dla pala zagłębionego w gruncie.....	34
Rys. 4.2 Schemat równoważenia naprężeń na pobocznicy naprężeniami w podstawie [41]...	38
Rys. 4.3 Schemat uplastycznienia gruntu pod podstawą pala	41
Rys. 4.4 Krzywe obciążenia dla pala pierwotnego (stan „0”).....	46
Rys. 4.5 Krzywe obciążenia dla pala po konwersji (stan „1”).....	46
Rys. 5.1 Przybliżona lokalizacja podpory 10 [85]	47
Rys. 5.2 Rozmieszczenie pali pod jedną z podpór [85]	48
Rys. 5.3 Przekrój geologiczny 31P/10P [85]	49
Rys. 5.4 Przekrój geologiczny 31L/10L [85]	50
Rys. 5.5 Porównanie krzywych M-K obliczonych metodami I-III dla pala 31-10L.....	54
Rys. 5.6 Schemat danych wejściowych z wykorzystaniem początku zbioru wartości $s_{i,p}$	56
Rys. 5.7 Schemat danych wejściowych z wykorzystaniem środka zbioru wartości $s_{i,s}$	56
Rys. 5.8 Schemat danych wejściowych z wykorzystaniem końca zbioru wartości $s_{i,k}$	57
Rys. 5.9 Porównanie wartości osiadania w przypadku estymacji parametrów M-K przeprowadzonej metodą I dla pala 36N-10L, z podziałem zbioru wartości na części	58
Rys. 5.10 Porównanie krzywych $Q-s$, w przypadku estymacji parametrów M-K przeprowadzonej metodą I, dla pala 36N-10L, przy połączeniu wyników uzyskanych dla różnych części zbioru wartości.....	58
Rys. 5.11 Idea zmodyfikowanej metody I.....	59
Rys. 5.12 Krzywa M-K estymowana dla pala 36N-10L zmodyfikowaną metodą I	60
Rys. 5.13 Graficzne porównanie wartości N_{gr2} dla pala 36N-10L	61
Rys. 5.14 Graficzne porównanie wartości κ_2 dla pala 36N-10L	62
Rys. 5.15 Graficzne porównanie wartości C_2 dla pala 36N-10L.....	62
Rys. 5.16 Obliczona metodą jednego równania oraz pomierzona krzywa $N-s$ dla pala 36N- 10L w przypadku uwzględnienia całego zbioru wartości	64
Rys. 5.17 Obliczona metodą dwóch równań oraz pomierzona krzywa $Q-s$ dla pala 36N-10L w przypadku uwzględnienia całego zbioru wartości	67
Rys. 6.1 Wykresy $\beta(n)$	71
Rys. 6.2 Wykres aproksymowanej zależności $\beta(n)$ dla pala 36N-10L	72
Rys. 6.3 Zależność $a_0 - \left(\frac{H}{D}\right)^{1/3}$	73
Rys. 6.4 Zależność $a_0 - D^2$	73
Rys. 6.5 Zależność $a_0 - \kappa_2$	74
Rys. 6.6 Zależność $a_0 - H$	74
Rys. 6.7 Zależność $a_1 - \kappa_2$	74

Rys. 6.8 Zależność $a_1 - \left(\frac{H}{D}\right)^{1/3}$	74
Rys. 6.9 Zależność $a_1 - D^2$	74
Rys. 6.10 Zależność $a_1 - H$	74
Rys. 7.1 Naprężenia pod podstawą pała	79
Rys. 7.2 Naprężenia ściskające w otoczeniu pała [11]	81
Rys. 7.3 Powierzchnia dopasowania podstawy pała	82
Rys. 7.4 Optymalne parametry krzywej M-K dla pała 31-10L	84
Rys. 7.5 Krzywa M-K dla pała 31-10L	84
Rys. 8.1 Porównanie krzywych obciążenia pała w stanie „0” oraz w stanie „1” przy zmianie średnicy oraz długości pała	92
Rys. 8.2 Zmiana wartości N_{gr2} przy zmianie: a) średnicy; b) długości pała	93
Rys. 8.3 Zmiana wartości C_2 przy zmianie: a) średnicy; b) długości pała	93
Rys. 8.4 Zmiana wartości κ_2 przy zmianie: a) średnicy; b) długości pała	93
Rys. 8.5 Zmiana wartości N_{gr1} przy zmianie: a) średnicy; b) długości pała	94
Rys. 8.6 Zmiana wartości C_1 przy zmianie: a) średnicy; b) długości pała	94
Rys. 8.7 Zmiana wartości κ_1 przy zmianie: a) średnicy; b) długości pała	94
Rys. 8.8 Zmiana przebiegu krzywej oporu całkowitego pała dla różnych średnic	95
Rys. 8.9 Zmiana przebiegu krzywej oporu całkowitego pała dla różnych wysokości	95
Rys. 8.10 Zmiana przebiegu krzywej oporu pobocznic pała dla różnych średnic	95
Rys. 8.11 Zmiana przebiegu krzywej oporu pobocznic pała dla różnych wysokości	95
Rys. 8.12 Zmiana przebiegu mobilizacji naprężeń na pobocznic pała dla różnych średnic ..	96
Rys. 8.13 Zmiana przebiegu mobilizacji naprężeń na pobocznic pała dla różnych długości	96
Rys. 8.14 Zmiana przebiegu krzywej oporu podstawy pała dla różnych średnic	96
Rys. 8.15 Zmiana przebiegu krzywej oporu podstawy pała dla różnych wysokości	96
Rys. 8.16 Zmiana udziału podstawy w oporze całkowitym pała dla różnych średnic	96
Rys. 8.17 Zmiana udziału podstawy w oporze całkowitym pała dla różnych długości	96
Rys. 8.18 Zmiana udziału pobocznic w oporze całkowitym pała dla różnych średnic	97
Rys. 8.19 Zmiana udziału pobocznic w oporze całkowitym pała dla różnych długości	97
Rys. 9.1 Krzywa M-K po konwersji pała 36N-10L na 38-12L	99
Rys. 9.2 Krzywa M-K po konwersji pała 38-12L na 25N-10L	100
Rys. 9.3 Zmiana współczynnika bezpieczeństwa SF dla $s_{dop} = s_0$	102
Rys. 9.4 Zmiana współczynnika bezpieczeństwa SF dla $s_{dop} \neq s_0$	103
Rys. 9.5 Analiza wykorzystania pała dla różnych wartości osiadania dopuszczalnego	103
Rys. 9.6 Funkcja $\frac{s_0}{D}(\kappa_2)$	105
Rys. 11.1 Optymalizacja metodą II dla pała 36N-10L	121
Rys. 11.2 Optymalizacja metodą III dla pała 36N-10L	121
Rys. 11.3 Krzywe M-K obliczone metodami I-III dla pała 36N-10L	122
Rys. 11.4 Optymalizacja metodą II dla pała 31-10L	124
Rys. 11.5 Optymalizacja metodą III dla pała 31-10L	124
Rys. 11.6 Optymalizacja metodą II dla pała 38-10P	126
Rys. 11.7 Optymalizacja metodą III dla pała 38-10P	126
Rys. 11.8 Krzywe M-K obliczone metodami I-III dla pała 38-10P	127
Rys. 11.9 Krzywe M-K aproksymowane z wykorzystaniem różnych części zbioru wartości $\{N_{i,s_i}\}$ metodami I-III dla pała 36N-10L	130

Rys. 11.10 Krzywe M-K aproksymowane z wykorzystaniem różnych części zbioru wartości $\{N_i, s_i\}$ metodami I-III dla pala 31-10L	133
Rys. 11.11 Krzywe M-K aproksymowane z wykorzystaniem różnych części zbioru wartości $\{N_i, s_i\}$ metodami I-III dla pala 38-10P.....	136
Rys. 11.12 Optymalizacja parametrów krzywej M-K metodą jednego równania z wykorzystaniem całego zbioru wartości dla pala 36N-10L	142
Rys. 11.13 Optymalizacja parametrów krzywej M-K metodą jednego równania z wykorzystaniem początkowej części zbioru wartości dla pala 36N-10L.....	142
Rys. 11.14 Optymalizacja parametrów krzywej M-K metodą jednego równania z wykorzystaniem środkowej części zbioru wartości dla pala 36N-10L	143
Rys. 11.15 Optymalizacja parametrów krzywej M-K metodą jednego równania z wykorzystaniem końcowej części zbioru wartości dla pala 36N-10L	143
Rys. 11.16 Krzywe M-K aproksymowane metodą jednego równania z wykorzystaniem różnych części zbioru wartości $\{N_i, s_i\}$ dla pala 36N-10L.....	144
Rys. 11.17 Optymalizacja parametrów krzywej M-K metodą jednego równania z wykorzystaniem całego zbioru wartości dla pala 31-10L	145
Rys. 11.18 Optymalizacja parametrów krzywej M-K metodą jednego równania z wykorzystaniem początkowej części zbioru wartości dla pala 31-10L	145
Rys. 11.19 Optymalizacja parametrów krzywej M-K metodą jednego równania z wykorzystaniem środkowej części zbioru wartości dla pala 31-10L	146
Rys. 11.20 Optymalizacja parametrów krzywej M-K metodą jednego równania z wykorzystaniem końcowej części zbioru wartości dla pala 31-10L	146
Rys. 11.21 Krzywe M-K aproksymowane metodą jednego równania z wykorzystaniem różnych części zbioru wartości $\{N_i, s_i\}$ dla pala 31-10L.....	147
Rys. 11.22 Optymalizacja parametrów krzywej M-K metodą jednego równania z wykorzystaniem całego zbioru wartości dla pala 38-10P	148
Rys. 11.23 Optymalizacja parametrów krzywej M-K metodą jednego równania z wykorzystaniem początkowej części zbioru wartości dla pala 38-10P.....	148
Rys. 11.24 Optymalizacja parametrów krzywej M-K metodą jednego równania z wykorzystaniem środkowej części zbioru wartości dla pala 38-10P	149
Rys. 11.25 Optymalizacja parametrów krzywej M-K metodą jednego równania z wykorzystaniem końcowej części zbioru wartości dla pala 38-10P	149
Rys. 11.26 Krzywe M-K aproksymowane metodą jednego równania z wykorzystaniem różnych części zbioru wartości $\{N_i, s_i\}$ dla pala 38-10P.....	150
Rys. 11.27 Optymalizacja parametrów krzywej M-K metodą dwóch równań z wykorzystaniem całego zbioru wartości dla pala 36N-10L	152
Rys. 11.28 Optymalizacja parametrów krzywej M-K metodą dwóch równań z wykorzystaniem początkowej części zbioru wartości dla pala 36N-10L.....	152
Rys. 11.29 Optymalizacja parametrów krzywej M-K metodą dwóch równań z wykorzystaniem środkowej części zbioru wartości dla pala 36N-10L	153
Rys. 11.30 Optymalizacja parametrów krzywej M-K metodą dwóch równań z wykorzystaniem końcowej części zbioru wartości dla pala 36N-10L	153
Rys. 11.31 Krzywe M-K aproksymowane metodą dwóch równań z wykorzystaniem różnych części zbioru wartości $\{N_i, s_i\}$ dla pala 36N-10L.....	154
Rys. 11.32 Optymalizacja parametrów krzywej M-K metodą dwóch równań z wykorzystaniem całego zbioru wartości dla pala 31-10L	155

Rys. 11.33 Optymalizacja parametrów krzywej M-K metodą dwóch równań z wykorzystaniem początkowej części zbioru wartości dla pala 31-10L	155
Rys. 11.34 Optymalizacja parametrów krzywej M-K metodą dwóch równań z wykorzystaniem środkowej części zbioru wartości dla pala 31-10L	156
Rys. 11.35 Optymalizacja parametrów krzywej M-K metodą dwóch równań z wykorzystaniem końcowej części zbioru wartości dla pala 31-10L	156
Rys. 11.36 Krzywe M-K aproksymowane metodą dwóch równań z wykorzystaniem różnych części zbioru wartości $\{N_i, s_i\}$ dla pala 31-10L	157
Rys. 11.37 Optymalizacja parametrów krzywej M-K metodą jednego równania z wykorzystaniem całego zbioru wartości dla pala 38-10P	158
Rys. 11.38 Optymalizacja parametrów krzywej M-K metodą jednego równania z wykorzystaniem początkowej części zbioru wartości dla pala 38-10P	158
Rys. 11.39 Optymalizacja parametrów krzywej M-K metodą jednego równania z wykorzystaniem środkowej części zbioru wartości dla pala 38-10P	159
Rys. 11.40 Optymalizacja parametrów krzywej M-K metodą jednego równania z wykorzystaniem końcowej części zbioru wartości dla pala 38-10P	159
Rys. 11.41 Krzywe M-K aproksymowane metodą dwóch równań z wykorzystaniem różnych części zbioru wartości $\{N_i, s_i\}$ dla pala 31-10L	160

SPIS TABEL

Tab. 3.1 Parametry funkcji transformacyjnych [20]	18
Tab. 3.2 Współczynniki częściowe dla pali wbijanych [83].....	30
Tab. 3.3 Współczynniki częściowe dla pali wierconych [83].....	30
Tab. 3.4 Współczynniki częściowe dla pali formowanych świdrem ciągłym CFA [83].....	31
Tab. 3.5 Współczynniki korelacji przy próbnym obciążeniu statycznym [83].....	31
Tab. 5.1 Porównanie stałych równania M-K obliczonych metodami I-III dla całego zbioru wartości.....	54
Tab. 5.2 Porównanie krzywych M-K obliczonych metodami I-III dla pala 31-10L.....	55
Tab. 5.3 Porównanie stałych równania M-K obliczonych metodami I-III dla początkowych wartości $\{s_i, N_i\}$	56
Tab. 5.4 Porównanie stałych równania M-K obliczonych metodami I-III dla środkowych wartości $\{s_i, N_i\}$	57
Tab. 5.5 Porównanie stałych równania M-K obliczonych metodami I-III dla końcowych wartości $\{s_i, N_i\}$	57
Tab. 5.6 Aproksymowane parametry M-K zmodyfikowaną metodą I.....	59
Tab. 5.7 Pomierzone nośności graniczne analizowanych pali	60
Tab. 5.8 Zestawienie parametrów krzywej M-K, wyznaczonych dla pala 36N-10L, różnymi sposobami estymacji	61
Tab. 5.9 Obliczone nośności graniczne przyjęte do dalszych obliczeń.	63
Tab. 5.10 Obliczone wartości parametrów M-K metodą jednego równania z uwzględnieniem całości zbioru $\{s_i, N_i\}$ oraz jego początkowych wartości.....	65
Tab. 5.11 Obliczone wartości parametrów M-K metodą jednego równania z uwzględnieniem środkowych oraz końcowych wartości zbioru $\{s_i, N_i\}$	65
Tab. 5.12 Obliczone wartości parametrów M-K metodą dwóch równań z uwzględnieniem całości oraz początkowych wartości zbioru $\{s_i, N_i\}$	67
Tab. 5.13 Obliczone wartości parametrów M-K metodą dwóch równań z uwzględnieniem środkowych oraz końcowych wartości zbioru $\{s_i, N_i\}$	67
Tab. 5.14 Obliczone nośności graniczne dla siedmiu analizowanych pali	68
Tab. 5.15 Porównanie dokładności metody jednego i dwóch równań.....	69
Tab. 6.1 Parametry analizowanych pali	70
Tab. 6.2 Sprawdzenie zgodności aproksymowanej zależności funkcyjnej dla pala 36N-10L. 72	
Tab. 6.3 Parametry opisujące zależności $\beta(n)$ dla analizowanych pali	73
Tab. 6.4 Sprawdzenie zgodności aproksymowanych wartości dla funkcji $a_0 = f(D)$	75
Tab. 6.5 Sprawdzenie zgodności aproksymowanych wartości dla funkcji $a_0 = f\left(\frac{H}{D}\right)$	76
Tab. 6.6 Sprawdzenie zgodności aproksymowanych wartości dla funkcji $a_1 = f(\kappa_2)$	76
Tab. 6.7 Obliczone wartości N_{gr2}	77
Tab. 6.8 Obliczone wartości q_b	77
Tab. 7.1 Wartości parametru dopasowania.	81
Tab. 7.2 Parametry M-K przyjęte do dalszych obliczeń	83
Tab. 7.3 Rezultat obliczeń dla pala 31-10L.....	84
Tab. 8.1 Parametry analizowanych pali w stanie „0”.....	87
Tab. 8.2 Wyniki przykładu obliczeniowego	91
Tab. 9.1 Praktyczny przykład konwersji	98
Tab. 9.2 Weryfikacja konwersji pala 36N-10L na 38-12L	99

Tab. 9.3 Weryfikacja konwersji pała 38-12L na 25N-10L	100
Tab. 11.1 Wyniki testu statycznego dla pała 36N-10L	110
Tab. 11.2 Wyniki testu statycznego dla pała 31-10L	111
Tab. 11.3 Wyniki testu statycznego dla pała 38-10P	112
Tab. 11.4 Wyniki testu statycznego dla pała 21N-10L	113
Tab. 11.5 Wyniki testu statycznego dla pała 25N-10L	114
Tab. 11.6 Wyniki testu statycznego dla pała 38-12P	115
Tab. 11.7 Wyniki testu statycznego dla pała 38-12L	116
Tab. 11.8 Optymalizacja metodą I dla pała 36N-10L	120
Tab. 11.9 Osiadanie obliczone metodami I-III dla pała 36N-10L	122
Tab. 11.10 Optymalizacja metodą I dla pała 31-10L	123
Tab. 11.11 Optymalizacja metodą I dla pała 38-10P	125
Tab. 11.12 Osiadanie obliczone metodami I-III dla pała 38-10P	127
Tab. 11.13 Osiadania obliczone z wykorzystaniem różnych części zbioru $\{N_i, s_i\}$ metodą I dla pała 36N-10L.....	128
Tab. 11.14 Osiadania obliczone z wykorzystaniem różnych części zbioru $\{N_i, s_i\}$ metodą II dla pała 36N-10L.....	129
Tab. 11.15 Osiadania obliczone z wykorzystaniem różnych części zbioru $\{N_i, s_i\}$ metodą III dla pała 36N-10L.....	130
Tab. 11.16 Osiadania obliczone z wykorzystaniem różnych części zbioru $\{N_i, s_i\}$ metodą I dla pała 31-10L	131
Tab. 11.17 Osiadania obliczone z wykorzystaniem różnych części zbioru $\{N_i, s_i\}$ metodą II dla pała 31-10L	132
Tab. 11.18 Osiadania obliczone z wykorzystaniem różnych części zbioru $\{N_i, s_i\}$ metodą III dla pała 31-10L.....	133
Tab. 11.19 Osiadania obliczone z wykorzystaniem różnych części zbioru $\{N_i, s_i\}$ metodą I dla pała 38-10P.....	134
Tab. 11.20 Osiadania obliczone z wykorzystaniem różnych części zbioru $\{N_i, s_i\}$ metodą II dla pała 38-10P.....	135
Tab. 11.21 Osiadania obliczone z wykorzystaniem różnych części zbioru $\{N_i, s_i\}$ metodą III dla pała 38-10P.....	136
Tab. 11.22 Osiadania obliczone do zmodyfikowanej metody I dla pała 36N-10L.....	138
Tab. 11.23 Osiadania obliczone do zmodyfikowanej metody I dla pała 31-10L.....	139
Tab. 11.24 Osiadania obliczone do zmodyfikowanej metody I dla pała 38-10P.....	140
Tab. 11.25 Osiadania obliczone do metody jednego równania dla pała 36N-10L	144
Tab. 11.26 Osiadania obliczone do metody jednego równania dla pała 31-10L	147
Tab. 11.27 Osiadania obliczone do metody jednego równania dla pała 38-10P	150
Tab. 11.28 Osiadania obliczone do metody dwóch równań dla pała 36N-10L	154
Tab. 11.29 Osiadania obliczone do metody dwóch równań dla pała 31-10L	157
Tab. 11.30 Osiadania obliczone do metody dwóch równań dla pała 38-10P	160
Tab. 11.31 Sprawdzenie zgodności dla pała 31-10L	161
Tab. 11.32 Sprawdzenie zgodności dla pała 38-10P.....	162
Tab. 11.33 Sprawdzenie zgodności dla pała 21N-10L.....	163
Tab. 11.34 Sprawdzenie zgodności dla pała 25N-10L.....	164
Tab. 11.35 Sprawdzenie zgodności dla pała 38-12P.....	165
Tab. 11.36 Sprawdzenie zgodności dla pała 38-12L	166

Tab. 11.37 Sprawdzenie zgodności dla pała 36N-10L.....	167
Tab. 11.38 Sprawdzenie zgodności dla pała 31-10L	168
Tab. 11.39 Sprawdzenie zgodności dla pała 38-10P.....	169
Tab. 11.40 Sprawdzenie zgodności dla pała 21N-10L.....	170
Tab. 11.41 Sprawdzenie zgodności dla pała 25N-10L.....	171
Tab. 11.42 Sprawdzenie zgodności dla pała 38-12P.....	172
Tab. 11.43 Sprawdzenie zgodności dla pała 38-12L	173
Tab. 11.44 Optymalne parametry krzywej M-K dla pała 36N-10L.....	175
Tab. 11.45 Optymalne parametry krzywej M-K dla pała 38-10P	176
Tab. 11.46 Optymalne parametry krzywej M-K dla pała 21N-10L.....	177
Tab. 11.47 Optymalne parametry krzywej M-K dla pała 25N-10L.....	178
Tab. 11.48 Optymalne parametry krzywej M-K dla pała 38-12P	179
Tab. 11.49 Optymalne parametry krzywej M-K dla pała 38-12L.....	180

BIBLIOGRAFIA

- [1] Anamali E., Shkodrani N., Dhimitri L. 2014: *Axial Load Capacity of Cast in Place Piles from SPT and CPTU Data*. World Journal of Engineering and Technology nr 2, s.100-108.
- [2] Bauer J., Puła W., Wyjadłowski M. 2018: *Pile Load Test Results as a Basis for Reliability Calculation with Parabolic Response Surface*. Technical Gazette 25, nr 2, s. 558-564
- [3] Briaud J-L. 2013: *Geotechnical Engineering: Unsaturated and Saturated soils*. John Wiley & Sons.
- [4] Brząkała W. 2013: *Bezpieczeństwo i niezawodność w geotechnice. Teoretyczne podstawy Eurokodu EC7-1*. Inżynieria Morska i Geotechnika nr 1, s. 21-29
- [5] Chin, F. K. 1970: *Estimation of the Ultimate Load of Piles Not Carried to Failure*. Proceedings of 2nd Southeast Asia Conference on Soil Engineering, Singapore, s.81-90.
- [6] Coyle H.M., Reese L.C 1966: *Load Transfer for Axially Loaded Piles in Clay*. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division. ASCE. 92 s.1-26.
- [7] Coyle H.M., Sulaiman I.H 1969: *Bearing Capacity of Foundation Piles: State of the Art*. Texas Transportation Institute
- [8] Cichocki P. 2018: *Analiza współpracy fundamentu płytowo-palowego z podłożem gruntowym z uwzględnieniem oporu pobocznic i podstawy pala wywołanych osiadaniem*. Rozprawa doktorska. Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
- [9] Decourt L. 1999: *Behavior of foundations under working load conditions*. Proceedings of 11th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Brazil, vol.4, 1999, s.453-488
- [10] De Gennaro V., Frank R., Said Imen 2008: *Finite element analysis of model piles axially loaded in sands*. Rivista Italiana Di Geotechnica nr 2, s.44-62.
- [11] Dembicki E. (red.) 1988: *Fundamentowanie. Projektowanie i wykonawstwo. Tom 2. Posadowienie budowli*. Arkady
- [12] Dias T., Bezuijen A. 2018: *Load transfer method for piles under axial loading and unloading*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. American Society of Civil Engineers, vol. 144, nr 1: 04017096
- [13] Dotson D.W. 2013: *Direct solution of the Brinch-Hansen 90% Pile Ultimate Failure Load*. DFI Journal, vol. 7, nr 1, s .13-21.
- [14] Fellenius B. 2020: *Basics of Foundation Designs*. Electronic edition, www.fellenius.net. (Data dostępu: styczeń 2020r).
- [15] Gwizdała K. 1996: *Analiza osiadań przy wykorzystaniu funkcji transformacyjnych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, nr 532, Budownictwo nr 41.
- [16] Gwizdała K. 2010: *Fundamenty palowe*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe.
- [17] Gwizdała K., Dyka I. 2001: *Analityczna metoda prognozowania krzywej osiadania pala pojedynczego*. Inżynieria i Budownictwo, nr 12, s.729-733.
- [18] Gwizdała K., Dyka I. 2004: *Osiadanie pali i fundamentów palowych*. Seminarium „Zagadnienia posadowień na fundamentach palowych”, Gdańsk.

- [19] Gwizdała K., Krasieński 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, Paris 2013.
- [20] Gwizdała K., Krasieński A. 2016: *Fundamenty palowe, obliczenia z zastosowaniem zasad Eurokodu 7 i doświadczeń krajowych*. Acta Sci. Pol. Architectura, vol.15, nr 2 s.3-22.
- [21] Gwizdała K., Stęczyński M., Dyka I. 2009: *Wykorzystanie sondowań statycznych do obliczania nośności i osiadań pali*. Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne, s. 62-68.
- [22] Gwizdała K., Tejchman A., Blockus M. 2005: *Kontrolne badania dynamiczne pali prefabrykowanych w czasie ich wykonawstwa* XXII Konferencja Naukowo-Techniczna Awary Budowlane, Szczecin-Międzyzdroje.
- [23] Hansen J.B. 1961: *A general formula for bearing capacity*. Danish Geotechnical Institute, Bulletin, nr 11, s. 38-46.
- [24] Hansen J. B. 1970: *A revised and extended formula for bearing capacity*. Danish Geotechnical Institute, Bulletin nr 28, s. 5-11.
- [25] Hirayama H. 1990: *Load settlement analysis for bored piles using hyperbolic transfer functions*. Soils and Foundations. Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering. Vol. 30, nr 1, s. 55-64.
- [26] Kacprzak G. 2018: *Współpraca fundamentu płytowo-palowego z podłożem gruntowym*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- [27] Karlsrud K. 2012: *Prediction of load-displacement behavior and capacity of axially loaded piles in clay based on analyses and interpretation of pile load test results*. Doctoral thesis. Norwegian University of Science and Technology.
- [28] Kiouis P.D, Elansary A.S. 1987.: *Load Settlement Relation for Axially Loaded Piles*. Journal of Geotechnical Engineering, vol. 113, nr 6, s. 332-661.
- [29] Kishida H 1967.: *Ultimate Bearing Capacity of Piles Driven Into Loose Sand*. The Japanese Geotechnical Society, vol. 7, issues 3, s. 20-29
- [30] Kraft L.M, Ray R.P, Kagawa T. 1981: *Theoretical t-z curves*. J. Geotech Engineering ASCE 107(110), s. 1543-1561
- [31] Krasieński A., 2012: *Proposal for Calculating the Bearing Capacity of Screw Displacement Piles in Non-Cohesive Soils Based on CPT results*. Studia Geotechnica et Mechanica XXXIV, nr 4, s.41-51
- [32] Kondner R.L. 1962: *Hyperbolic Stress-Strain Relation in Direct Shear*. Technical Report Civil Engineering Department, Northwestern University.
- [33] Kłosiński B. 2012: *Zasady i problemy projektowania pali według Eurokodu 7*. XI seminarium IBDiM i PZWFS, Fundamenty palowe, Warszawa.
- [34] Kłosiński B. 2013: *Ocena i przyszłość Eurokodu 7 „Projektowanie geotechniczne”*. Przegląd naukowy Inżyniera i Kształtowanie Środowiska, vol. 22, nr 2, s.222-235.
- [35] Kuwabara F. 1991: *Settlement behavior of non-linear soil around single piles subjected to vertical loads*. Soils and Foundations. Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 31, nr 1, s. 39-46.
- [36] Lefik M. 2016: *Zastosowanie metody aproksymacji relacji odwrotnej do rozwiązywania wybranych zagadnień geotechnicznych*. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej.

- [37] Lim A., Kawanda A., Rahardjo P.P 2013: *The study of t-z and q-z curves on bored piles based on the results of instrumented pile load test in medium and stiff clays*. Proceedings for Pile 2013, June 2-4.
- [38] Mandolini A., Russo G., Viggiani C. 2005: *Pile foundations: Experimental investigations, analysis and design*. XVI ICSMGE, Osaka 2005, Millpress Vol. 1, s. 177-195.
- [39] Mazurkiewicz B.: *Sprawdzenie dopuszczalnej nośności pali w terenie cz.2*. Inżynieria i budownictwo 1966 nr 6, s. 214-218.
- [40] Meyer Z. 1992: *Estimation of soil parameters for consolidated later*. The second international seminar on environment protection and regional problems. Kalmar, Sweden.
- [41] Meyer Z. 2010: *Analiza naprężeń na poboczniczy pala oraz pod podstawą pojedynczego pala w oparciu o liniową teorię Boussinesqa*. XVIII Seminarium Naukowe Regionalne Problemy Inżynierii Środowiska. Wydawnictwo Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie.
- [42] Meyer Z. 2012: *Obliczenia inżynierskie osiadania fundamentów*. Szczecin ZAPOL.
- [43] Meyer Z. 2017: *Wykorzystanie wyników testu statycznego pala do określenia mobilizacji oporu podstawy i poboczniczy*. XXXII Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji. Polski Związek Inżynierów i Techników budownictwa.
- [44] Meyer Z., Kowalów M. 2010: *Model krzywej aproksymującej wyniki testów statycznych pali*, Inżynieria Morska i Geotechnika 3/2010, s.438-446.
- [45] Meyer Z., Mrozińska G. 1992: *Estimation of parameters in empirical model of peat consolidation*. The second international seminar on environment protection and regional problems. Kalmar, Szwecja.
- [46] Meyer Z., Siemaszko P. 2019: *Static load test curve analysis based on soil field investigations*. Bulletin of Polish Academy of Sciences. Technical Sciences, vol 67, nr 2, s.329-337.
- [47] Meyer Z., Stachecki K. 2018: *Static load test curve (Q-s) conversion in to pile of different size*. Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW Land Reclamation vol. 50, nr 2, s.171-182.
- [48] Meyer Z., Stachecki K. 2019: *Static load test curve conversion in case of pile length changes*, Proceedings of the Third International Conference “Challenges in Geotechnical Engineering” and of the Project PILE TEST 2019, Zielona Góra, s.24
- [49] Meyer Z. Stachecki K. 2020: *Praktyczne zastosowanie konwersji krzywej próbnego statycznego obciążenia pala przy zmianie jego wymiarów oraz parametrów gruntowych*. XVI Konferencja Naukowo-Techniczna Warsztaty Pracy Rzeczoznawcy Budowlanego, s.387-394.
- [50] Meyer Z. Stachecki K. 2020: *Analysis of static load test referred to limit bearing the capacity of a pile*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 96022101
- [51] Meyer Z. Stachecki K. 2020: *Interpretacja wyników próbnego obciążenia statycznego*. Inżynieria Morska i Geotechnika nr 5, s.222-229.

- [52] Meyer Z., Szmeczel G. 2010: *Analiza możliwości analitycznej aproksymacji krzywej obciążenie-osiadanie dla próbnych obciążeń pali żelbetowych w gruntach sypkich*. Inżynieria Morska i Geotechnika nr 3, s. 178-182.
- [53] Meyer Z., Szmeczel G. 2015: *Problemy zasad wymiarowania pali*. Inżynieria Morska i Geotechnika nr 3, s. 444-449.
- [54] Meyer Z., Szmeczel G. 2015: *Określenie oporów poboczniczy pala na podstawie próbnych obciążeń statycznych pala*. Inżynieria Morska i Geotechnika nr 3, s.441-444
- [55] Meyer Z., Szmeczel G. 2018: *Ocena możliwości wykorzystania próbnych obciążeń statycznych do ustalenia nośności poboczniczy i podstawy pala*. Inżynieria Morska i Geotechnika nr 3, s. 220-224
- [56] Meyer Z., Żarkiewicz K. 2016: *Formowanie się oporu na poboczniczy pala wyznaczone na podstawie badań laboratoryjnych*. XXIII Seminarium Naukowe z cyklu Regionalne Problemy Inżynierii Środowiska, s.79-90
- [57] Meyer Z., Żarkiewicz K.: 2017: *Mechanizm formowania się oporu poboczniczy przy podstawie pala na podstawie badań laboratoryjnych*. Inżynieria i Budownictwo nr 5, s.263 -265.
- [58] Meyer Z. Żarkiewicz K. 2018: *Skin and Toe Resistance Mobilization of Pile During Laboratory Static Load Test*, Studio Geotechnica et Mechanica. vol. 40, nr 1, s. 1-5.
- [59] Meyer Z., Wasiluk A. 2018.: *Analiza niedokładności pomiarów badania statycznego pala z wykorzystaniem modeli analitycznych*, Inżynieria Morska i Geotechnika nr 5, s. 344-352.
- [60] Meyer Z., Wasiluk A. 2019: *Weryfikacja krzywej Meyera-Kowalowa w oparciu o wyniki eksperymentalne oraz kolejny etap analizy niedokładności pomiarów testu statycznego pala*. Inżynieria Morska i Geotechnika nr 6, s.315-323.
- [61] Nishida Y. 1964: *The elastic settlement of pile in the ground*. Soil and Foundation. Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering.
- [62] Poulos H.G 2000: *Practical design procedures for piled raft foundations*, s. 425-468 w *“Design applications of raft foundations”*. J.A Hemsley, Thomas Telford Publishing, London.
- [63] Poulos H.G, Carter J.P, Small J.C. 2001: *Foundations and retaining structures - research and practice*. Proceedings of XV International Conference of Soil Mechanics and Foundations Engineering, Hamburg, s. 119-124.
- [64] Poulos H.G, Davis E.H 1980: *Pile foundation analysis and design*. Rainbow Bridge Book Co.
- [65] Rybak J. 2018: *Geoinżynieria, Drogi mosty tunele* nr 3, s. 34-37
- [66] Seed, H.B., and Reese L.C 1957: *The action of soft clay along friction piles*. Transactions. ASCE 122 s. 731-754.
- [67] Seo H., Prezzi M., Salgado R. 2008: *Settlement Analysis of Axially Loaded Piles*. 6th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Missouri University of Science and Technology.
- [68] Stachecki K. 2020: *Analiza nośności granicznej pala z wykorzystaniem wyników testów statycznych*. Współczesne zagadnienia z Inżynierii lądowej, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, s. 197-203.

- [69] Stęczniewski M., Gwizdała K 2003.: *Obliczanie nośności i osiadania pali pojedynczych na podstawie badań sondą statyczną CPT*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria Budownictwo z.97, s. 267-278.
- [70] Szmeczel G. 2014: *Określenie nośności granicznej pali na podstawie próbnych obciążeń statycznych w ograniczonym zakresie*. Rozprawa doktorska. Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie.
- [71] Szmeczel G. 2017: *Przegląd metod obliczania osiadania pali pojedynczych i interpretacji wyników próbnych obciążeń statycznych. Problemy współpracy fundamentów z podłożem gruntowym*. Wydawnictwo Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, s. 79-91.
- [72] Terzaghi K. 1956: *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley & Sons.
- [73] Więclawski P. 2015: *Prognozowanie pracy pali Vibro obciążonych osiowo z wykorzystaniem wyników sondowania CPT*. Rozprawa doktorska. Politechnika Gdańska.
- [74] Wiłun Z. 2013: *Zarys geotechniki*. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności.
- [75] Wysokiński L., Kotlicki W., Godlewski T. 2011: *Projektowanie geotechniczne według Eurokodu 7*. Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa.
- [76] Yudhi Lastiasih, Indra Djati Sidi 2014: *Reliability of Estimation Pile Load Capacity Methods*. J.Eng Technol. Sci vol. 46, nr 1, 2014, s. 1-16
- [77] Żarkiewicz K. 2017: *Analiza formowania się oporu poboczniczy pala w gruntach niespoistych na podstawie modelowych badań laboratoryjnych*. Rozprawa doktorska. Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie.
- [78] Żarkiewicz K. 2018: *Wykorzystanie krzywej osiadania pala do wyznaczania oporu poboczniczy i podstawy pala*. Inżynieria Morska i Geotechnika nr 3, s.224-229
- [79] Żarkiewicz K. 2019: *Laboratory experiment of soil vertical displacement measurement near an axially loaded pile*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 603032012.
- [80] Żarkiewicz K. 2019: *Pile bearing analysis based upon ultimate values of toe and skin resistance as their mobilization with settlement*. MATEC Web of Conferences 284, 03011, ICSF 2019.

Normy

- [81] PN-69/B-02482: *Fundamenty budowlane. Nośność pali i fundamentów palowych*.
- [82] PN-83/B-02482: *Fundamenty budowlane. Nośność pali i fundamentów palowych*.
- [83] PN-EN 1997-1 2008: *Projektowanie Geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne*.
- [84] PN-EN 1997-2 2009: *Projektowanie Geotechniczne. Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego*.

Materiały niepublikowane

- [85] Wyniki testów statycznych. Energopol S.A Szczecin

Autor dziękuje za okazaną pomoc w postaci udostępnieniu materiałów do pracy badawczej firmie Energopol S.A. Szczecin.