



Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego

w Warszawie

Instytut Inżynierii Lądowej

mgr inż. Maciej Miturski

Charakterystyka wytrzymałościowa
gruntu stabilizowanego cementem
z dodatkiem włókien polipropylenowych

Strength characteristics of soil stabilised by cement
with the addition of polypropylene fibres

Rozprawa doktorska

Doctoral thesis

Promotor:

dr hab. inż. Wojciech Sas, prof. SGGW

Instytut Inżynierii Lądowej

Promotor pomocniczy:

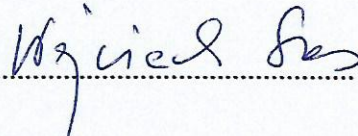
dr inż. Andrzej Głuchowski

Instytut Inżynierii Lądowej

Warszawa, rok 2025

Oświadczenie promotora rozprawy doktorskiej

Oświadczam, że niniejsza rozprawa została przygotowana pod moim kierunkiem i stwierdzam, że spełnia warunki do przedstawienia jej w postępowaniu o nadanie stopnia naukowego doktora.

Data 14.01.2025 r. Czytelny podpis promotora 

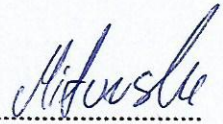
Oświadczenie autora rozprawy doktorskiej

Świadom/a odpowiedzialności prawnej, w tym odpowiedzialności karnej za złożenie fałszywego oświadczenia, oświadczam, że niniejsza rozprawa doktorska została napisana przez mnie samodzielnie i nie zawiera treści uzyskanych w sposób niezgodny z obowiązującymi przepisami prawa, w szczególności z ustawą z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (tj. z dnia 28 października 2022 r., Dz.U. z 2022 r. poz. 2509 ze zm.)

Oświadczam, że przedstawiona rozprawa nie była wcześniej podstawą żadnej procedury związanej z uzyskaniem stopnia naukowego doktora.

Oświadczam ponadto, że niniejsza wersja rozprawy jest identyczna z załączoną wersją elektroniczną.

Przyjmuję do wiadomości, że rozprawa doktorska poddana zostanie procedurze antyplagiatowej.

Data 14.01.2025 r. Czytelny podpis autora rozprawy 

Streszczenie

Charakterystyka wytrzymałościowa gruntu stabilizowanego cementem z dodatkiem włókien polipropylenowych

W niniejszej rozprawie doktorskiej zbadano wpływ włókien polipropylenowych na charakterystykę wytrzymałościową gruntu stabilizowanego cementem. Głównym celem pracy była analiza czynników wpływających na wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie oraz wyznaczenie zależności empirycznej do prognozowania tej wytrzymałości. W ramach badań zmierzono prędkości pulsów ultradźwiękowych, a następnie przeprowadzono badania jednoosiowego ściskania. Badania przeprowadzono na próbkach wykonanych na bazie piasku gliniastego, cementu oraz włókien polipropylenowych. Przeprowadzone badania wykazały, że dodatek włókien przyczynił się do wzrostu wytrzymałości oraz zmniejszenia parametrów odkształceniowych. Podczas analizy wyznaczono zależność do prognozowania wytrzymałości. W tym celu posłużono się koncepcją ośrodka pięciofazowego, która bazuje na porowatości, indeksie cementowym i zbrojeniowym. Wyznaczona zależność charakteryzowała się średnim bezwzględnym błędem procentowym wynoszącym 14,52%. Następnie przeprowadzono badania kontrolne wyznaczonej zależności. W podsumowaniu pracy zestawiono wnioski z przeprowadzonych badań, przedstawiono zakres stosowania wyznaczonej zależności oraz wskazano dalsze kierunki prac badawczych.

Słowa kluczowe: grunt stabilizowany, zbrojenie rozproszone, włókna, porowatość, indeks cementowy, indeks zbrojeniowy.

Summary

Strength characteristics of soil stabilised by cement with the addition of polypropylene fibres

This doctoral dissertation examines the impact of polypropylene fibers on the strength characteristics of cement-stabilized soil. The study's primary objective was to analyze the factors influencing unconfined compressive strength and derive an empirical relationship for predicting this strength. As part of the research, ultrasonic pulse velocities were measured, followed by unconfined compressive strength testing. The tests were conducted on samples made of clayey sand, cement, and polypropylene fibers. The study revealed that the addition of fibers contributed to an increase in strength and a reduction in deformation parameters. A relationship for predicting strength was determined during the analysis of the results. For this purpose, the concept of a five-phase medium based on porosity, cement index, and reinforcement index was applied. The relationship was characterized by a mean absolute percentage error of 14.52%. Subsequently, validation tests of the determined relationship were conducted. The conclusion of the dissertation summarized the research findings, presented the scope of applicability of the derived relationship, and outlined directions for further research.

Keywords: stabilized soil, dispersed reinforcement, fibres, porosity, cement index, fibres index.

Spis treści

1. WSTĘP	17
1.1. RYS HISTORYCZNY STABILIZACJI GRUNTU	17
1.2. TŁO PROBLEMU PRACY	19
1.3. CEL PRACY	21
1.4. HIPOTEZA BADAWCZA	21
1.5. UKŁAD PRACY	22
2. PRZEGLĄD STANU WIEDZY.....	23
2.1. TERMINOLOGIA	23
2.2. KLASYFIKACJA WZMACNIANIA PODŁOŻA	24
2.3. STABILIZACJA GRUNTU.....	27
2.3.1. Stabilizacja gruntu w świetle norm	28
2.3.2. Stabilizacja cementem	30
2.3.2.1. Hydratacja cementu	31
2.3.2.2. Wpływ mineralogii i rodzaju gruntu	34
2.3.2.3. Wpływ zawartości i rodzaju spoiwa.....	36
2.3.2.4. Wpływ stosunku wody do cementu.....	37
2.3.2.5. Wpływ okresu i temperatury utwardzania.....	38
2.3.2.6. Wpływ części organicznych i siarczanów	38
2.3.2.7. Kryteria normowe.....	39
2.3.2.8. Wymagania wobec cementogruntu	49
2.3.3. Stabilizacja zbrojeniem rozproszonym.....	51
2.3.3.1. Włókna naturalne.....	53
2.3.3.2. Włókna chemiczne	54
2.3.3.3. Wpływ włókien na parametry wytrzymałościowe	56
2.3.3.4. Wpływ włókien na parametry odkształceniowe.....	68
2.3.3.5. Wpływ włókien na właściwości fizyczne.....	74
2.4. SZACOWANIE WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH CEMENTOGRUNTU	75
3. MATERIAŁ BADAŃ	81
3.1. GRUNT.....	81
3.1.1. Skład granulometryczny	81
3.1.2. Analiza granic Atterberga.....	83

3.1.3.	Oznaczenie zawartości części organicznych.....	85
3.1.4.	Zawartość CaCO_3	85
3.1.5.	Zagęszczalność gruntów na podstawie metody Proctora.....	85
3.1.6.	Oznaczenie gęstości właściwej	86
3.2.	SPOIWO	87
3.2.1.	Oznaczenie wytrzymałości.....	87
3.2.2.	Oznaczenie gęstości właściwej	88
3.3.	ZBROJENIE ROZPROSZONE	89
3.3.1.	Oznaczenie gęstości właściwej	89
4.	METODYKA I ZAKRES BADAŃ.....	90
4.1.	PROGRAM BADAŃ.....	90
4.2.	PRZYGOTOWANIE I PIELĘGNACJA MATERIAŁU BADAWCZEGO	93
4.2.1.	Identyfikacja mieszanek.....	93
4.2.2.	Przygotowanie składników	95
4.2.3.	Dozowanie i mieszanie składników w warunkach laboratoryjnych	95
4.2.4.	Przygotowanie próbek.....	97
4.2.5.	Pielęgnacja próbek	98
4.3.	APARATUROWA POMIAROWA	99
4.3.1.	Badania nieniszczące.....	99
4.3.2.	Badania niszczące	108
4.4.	PARAMETRY MECHANICZNE	110
4.4.1.	Parametry wytrzymałościowe	110
4.4.2.	Parametry odkształceniowe.....	111
5.	WYNIKI BADAŃ LABORATORYJNYCH	115
5.1.	STRUKTURA PREZENTACJI WYNIKÓW BADAŃ	115
5.2.	PARAMETRY WYTRZYMAŁOŚCIOWE	115
5.3.	PARAMETRY ODKSZTAŁCENIOWE.....	125
6.	ANALIZA	136
6.1.	CEMENTOGRUNT JAKO OŚRODEK PIĘCIOFAZOWY	136
6.2.	OPRACOWYWANIE ZALEŻNOŚCI EMPIRYCZNYCH.....	140
6.2.1.	Wpływ porowatości.....	141
6.2.2.	Wpływ objętości cementu	143

6.2.3.	Wpływ stosunku porowatości i objętości cementu.....	144
6.2.4.	Wpływ zbrojenia rozproszonego	147
6.2.5.	Wpływ czasu utwardzania	148
6.2.6.	Wpływ odporności na działanie wody	153
6.2.7.	Końcowe zależności empiryczne.....	157
6.3.	ANALIZA STATYSTYCZNA	160
6.3.1.	Opis statystyczny zmierzonych wartości.....	160
6.3.2.	Ocena jakości zależności empirycznych	169
6.3.3.	Analiza reszt	173
6.3.4.	Analiza korelacji czynników	178
7.	BADANIA KONTROLNE	182
7.1.	OPIS SERII BADAŃ KONTROLNYCH	182
7.2.	WERYFIKACJA ZALEŻNOŚCI EMPIRYCZNEGO	183
8.	PODSUMOWANIE, WNIOSKI I DALSZY KIERUNEK PRAC.....	186
8.1.	PODSUMOWANIE.....	186
8.2.	WNIOSKI.....	194
8.3.	DALSZY KIERUNEK PRAC	198
	LITERATURA	199
	SPIS RYSUNKÓW.....	214
	SPIS TABEL	218
	ZAŁĄCZNIK A	221
	ZAŁĄCZNIK B	232

WYKAZ ZASTOSOWANYCH OZNACZEŃ

Wielkie litery łacińskie

A	pierwotna powierzchnia badanej próbki,
B_{MCV}	liczba uderzeń potrzebna do uzyskania przemieszczenia równego 5 mm,
C	procentowa zawartość cementu,
CBR	kalifornijski wskaźnik nośności,
C_i	indeks cementu,
Cl	frakcja ilowa wg PN-EN ISO 14688-2,
C_{IV}	indeks cementu (oznaczenie org.),
D	średnica próbki,
E	moduł sprężystości, przy ściskaniu lub rozciąganiu,
E_c	moduł sprężystości przy ściskaniu,
E_{ch}	cięciwa modułu sprężystości,
E_{UPV}	moduł sprężystości wyznaczony metodą ultradźwiękową,
E_s	sieczny moduł sprężystości,
E_{it}	moduł sprężystości wyznaczony z badania rozciągania pośredniego,
E_t	moduł sprężystości przy rozciąganiu,
E_0	moduł sprężystości w zakresie bardzo małych odkształceń,
E_{50}	sieczny moduł sprężystości wyznaczony przy 50% największego naprężenia ściskającego,
F	siła wywierana na próbkę podczas badania,
F_c	największa zarejestrowana siła ściskająca,
F_r	największa zarejestrowana siła rozciągająca,
G_0	moduł ścinania w zakresie bardzo małych odkształceń,
Gr	frakcja żwirowa wg PN-EN ISO 14688-2,
G_{UPV}	moduł ścinania wyznaczony metodą ultradźwiękową,
H	wysokość próbki,
H_0	hipoteza zerowa,
H_1	hipoteza alternatywna,
I	odporność na działanie wody,
I^2	współczynnik Theila,
I_1^2	pierwszy składnik współczynnika Theila,
I_2^2	drugi składnik współczynnika Theila,

I_3^2	trzeci składnik współczynnika Theila,
I_B	wskaźnik kruchości,
I_p	wskaźnik plastyczności,
K	kurtoza,
MAE	średni błąd bezwzględny,
$MAPE$	średni bezwzględny błąd procentowy,
MCV	wskaźnik wilgotności,
ME	średni błąd,
N	liczba obserwacji,
P	długość pulsu,
PK_i	parametry kalibracyjne,
R	wytrzymałość na ściskanie lub rozciąganie,
R_b	wskaźnik objętości mieszanki,
R_C	wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie,
R_{Ci}	wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie po pielęgnacji w wodzie,
$R_{C,t}$	kolejna zaobserwowana wartość wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie,
$\bar{R}_C$	średnia arytmetyczna zmierzonych wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie,
$\hat{R}_C$	obliczona wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie,
$\hat{R}_{C,t}$	kolejna obliczona wartość wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie,
$R_{C\,Norm}$	znormalizowana wytrzymałość $\bar{R}_{CS}$ względem $T_C = 1$,
$\bar{R}_{CS}$	średnia arytmetyczna wytrzymałości na ściskanie dla serii o jednakowym T_C ,
$R_{C(\varepsilon/\varepsilon_c)}$	wytrzymałość na ściskanie przy dwukrotnym odkształceniu R_C ,
R_C^{z-o}	wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie po 14 cyklach zamrażania i rozmrażania,
$R_{C\,ref}$	wartość referencyjna R_C ,
R_i	wytrzymałość po pielęgnacji w wodzie,
R_{it}	wytrzymałość na rozciąganie pośrednie,
R_t	wytrzymałość na rozciąganie,
$R_{t(\varepsilon/\varepsilon_t)}$	wytrzymałość na rozciąganie przy dwukrotnym odkształceniu R_t ,
R^2	współczynnik determinacji,
$RMSE$	pierwiastek błędu średniokwadratowego,
S	odchylenie standardowe,
Sa	frakcja piaskowa wg PN-EN ISO 14688-2,

Si	frakcja pylasta wg PN-EN ISO 14688-2,
SK	skośność,
T_C	czas utwardzania,
UCS	wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie (oznaczenie org.),
UCS_{ref}	wartość referencyjna UCS (oznaczenie org.),
UPV	prędkość pulsu ultradźwiękowego,
V	objętość próbki,
V_a	objętość powietrza,
V_c	objętość cementu,
V_P	prędkość fali podłużnej wyznaczona metodą ultradźwiękową,
V_S	prędkość fali poprzecznej wyznaczona metodą ultradźwiękową,
V_{sg}	objętość szkieletu gruntowego,
V_{sz}	objętość szkieletu mieszanki,
V_V	objętość porów mieszanki,
V_w	objętość wody,
V_z	objętość zbrojenia,
W	wariancja,
W_m	wskaźnik mrozoodporności,
Z	procentowa zawartość zbrojenia,
Z_i	indeks zbrojenia.

Małe litery łacińskie

a	współczynnik kierunkowy zależności liniowej,
b	wyraz wolny zależności liniowej,
c	spójność,
d_i	różnica pomiędzy rangami cech X i Y ,
e	podstawa funkcji eksponentialnej, równa liczbie Eulera ($\sim 2,71828$),
e_i	reszta regresji,
f	częstotliwość zastosowanych przetworników,
f_i	frakcja iłowa wg PN-86-B-02480,
f_p	frakcja piaskowa wg PN-86-B-02480,
f_z	frakcja żwirowa wg PN-86-B-02480,
f_π	frakcja pylasta wg PN-86-B-02480,

h	droga przejścia fali,
m_c	masa cementu,
m_p	masę zagęszczonej próbki,
m_{sg}	masa szkieletu gruntowego,
m_z	masa zbrojenia,
n	porowatość,
n_s	liczba par cech X i Y ,
p	wartość prawdopodobieństwa,
p_{CBR}	zarejestrowany nacisk podczas badania CBR przy penetracji 2,5 i 5 mm,
p_s	nacisk potrzebny do zagłębienia tłoka w gruncie wzorcowym, badanie CBR,
q_u	wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie (oznaczenie org.),
r	rozstęp,
r_p	współczynnik korelacji liniowe Pearsona,
r_s	współczynnik korelacji rang Spearmana,
t_p	czas przejścia fali podłużnej,
t_s	czas przejścia fali poprzecznej,
v_s	prędkość fali poprzecznej,
w	wilgotność rzeczywista świeżej mieszanki,
w_L	granica płynności,
w_{opt}	wilgotność optymalna gruntu,
w_P	granica plastyczności,
x_i	ranga cechy X ,
y_i	ranga cechy Y .

Wielkie litery greckie

Δ_i	współczynnik zależny od zmiennych niezależnych i PK ,
$\Delta_{5\ Norm}$	znormalizowany parametr Δ_5 względem $T_C = 1$,
$\Delta\Phi_0$	zmiana długości średnicy poziomej, dla $F = 0,3F_r$,
$\Delta\Phi_{60}$	zmiana długości średnicy nachylonej pod kątem 60° , dla $F = 0,3F_r$,
ε	wartość $\Delta\Phi_{60}/\Delta\Phi_0$.

Małe litery greckie

α	wykładnik zależności empirycznej,
α_{stat}	poziom istotności statystycznej,
β	współczynnik skalujący zależność empiryczną,
ε_H	odkształcenia poprzeczne,
ε_k	wartość korekty odkształcenia badanej próbki,
ε_V	odkształcenia podłużne,
$\varepsilon_{0,3}$	odkształcenie podłużne przy $F = 0,3F_r$,
$\varepsilon_{0,5}$	odkształcenie podłużne przy $F = 0,5F_r$,
η	porowatość mieszanki (oznaczenie org.),
ν	współczynnik Poissona,
ν_{UPV}	współczynnik Poissona wyznaczony metodą ultradźwiękową,
ρ	gęstość objętościowa,
ρ_c	gęstość właściwa cementu,
$\rho_{d\ max}$	gęstość objętościowa szkieletu gruntowego,
$\rho_{d\ mix}$	gęstość objętościowa szkieletu mieszanki,
ρ_{mix}	gęstość próbki,
ρ_s	gęstość właściwa gruntu,
ρ_w	gęstość właściwa wody zarobowej,
ρ_z	gęstość właściwa zbrojenia rozproszonego,
σ_{max}	szczytowa wartość dewiatora naprężenia, $\sigma_{max} = \sigma_1 - \sigma_3$,
σ_{rez}	rezydualna wartość dewiatora naprężenia, $\sigma_{rez} = \sigma_1 - \sigma_3$,
$\sigma_{0,3}$	naprężenie przy 30% największego naprężenia ściskającego,
$\sigma_{0,5}$	naprężenie przy 50% największego naprężenia ściskającego,
τ_f	wytrzymałość na ścinanie w chwili zniszczenia materiału,
τ_r	rezydualna wytrzymałość na ścinanie,
φ	kąt tarcia wewnętrznego.

1. Wstęp

1.1. Rys historyczny stabilizacji gruntu

Potrzeba poprawy właściwości gruntu jest związana z postępem ludzkości, który byłby niemożliwy bez rozwoju szlaków pomiędzy osadami. Powstające drogi umożliwiały przemieszczanie się ludzi, handel, transport czy też sprawniejszy przepływ informacji. Oznacza to, że postęp wiedzy z zakresu budowy dróg był równoległy z rozwojem cywilizacji. Po dziś dzień możemy napotkać pozostałości dróg wybudowanych przed tysiącami lat. Jednak tylko nieliczne cywilizacje, takie jak Egipska, Chińska, Rzymska czy też Inków osiągnęły wystarczającą biegłość w ich budowie, aby zapewnić możliwość ich podziwiania po dziś dzień.

Najstarsza zachowana droga została wybudowana w starożytnym Egipcie w 2500-2100 rok p.n.e. Służyła ona do transportu bloków bazaltowych z kamieniołomu do nabrzeża jeziora Moeris. Kolejnym przykładem dobrze zachowanej drogi jest szlak łączący Rzym z Brindisi, który jest zwany Via Appia. Konstrukcja ta liczy łącznie 530 km długości a data rozpoczęcia jej budowy szacowana jest na 312 rok p.n.e. Droga ta przetrwała tysiące lat dzięki idei budowy dróg Rzymskich, która to opierała się na wykonaniu drogi w układzie warstwowym na odpowiednio przygotowanym podłożu gruntowym. Dobór metod wykonywania dróg był podyktowany położeniem geograficznym, dostępnością budulca czy też warunkami gruntowymi. Niezależnie od upływu lat sama idea wykonywania drogi nie uległa zmianie i nadal jest stosowana we współczesnej inżynierii.

Poza techniką budowy dróg również planowanie i tyczenie ich przebiegu odgrywało i odgrywa kluczową rolę w całym procesie budowy. Podczas którego projektanci stają przed trudną decyzją, czy poprowadzić szlak najkrótszą drogą, lecz nierzadko przez niekorzystne warunki gruntowe – terenowe, czy też wytyczyć nowy jej przebieg w celu ominięcia przeszkód. Jednak zmiana przebiegu trasy może wiązać się z wydłużonym czasem podróży pomiędzy łączonymi ośrodkami, co z rzadka stanowi rozwiązanie optymalne. Z tego też powodu wraz z rozwojem technik budowy dróg następował rozwój technik budowy mostów, tuneli czy metod ulepszających podłoże gruntowe.

Dodatkowo wraz z biegiem lat budowane drogi musiały sprostać zwiększającym się wymaganiom choćby takim jak zdolność do przenoszenia większych obciążeń. Było to następstwem rozwoju transportu lądowego, czyli po kolei pieszego, konnego i kołowego.

Zważywszy na fakt, iż wspomniane obciążenie na końcu zostaje przekazane na podłoże gruntowe, również one musiało sprostać coraz to nowszym wyzwaniom.

W związku z powyższym, wraz z rozwojem technik budowy dróg, podążała koncepcja ulepszania podłoża gruntowego, która była znana już ponad 5000 lat temu [52]. Początkowo mając na celu poprawę wytrzymałości i sztywności gruntu zaczęto stosować różne dodatki. I tak w Mezopotamii do poprawy właściwości słabego gruntu wykorzystywano materiał ziarnisty, taki jak piasek, żwir, czy też kamienie. W starożytnym Rzymie i Grecji zaczęto wykorzystywać różnego rodzaju dodatki na bazie wapna. Z czasem zauważono, że zastosowanie dodatku wapna z pyłem wulkanicznym jest skuteczniejszą metodą poprawy właściwości podłoża gruntowego aniżeli dodanie samego wapna.

Wzmocnienie podłoża gruntowego może być również rezultatem działalności natury. Można to dostrzec poprzez obserwacje porośniętych roślinnością zboczy skarp, gdzie korzenie stanowią naturalne zbrojenie. Sama koncepcja wzmocnienia gruntu za pomocą zbrojenia była znana już wieki temu [68]. Przykładem takiej koncepcji może być wykorzystanie techniki gruntu zbrojonego do budowy Wielkiego Muru Chińskiego, gdzie część muru wykonano z gruntu zbrojonego gałęziami czy też krzewami [80]. Innym przykładem mogą być konstrukcje Zigguratów, które były wznoszone przez Sumerów i Babilończyków w okresie od XL do VI wieku p.n.e., gdzie do ich budowy wykorzystywano maty trzcinowe, które pełniły funkcje zbrojenia pomiędzy warstwami cegieł [120]. Można domniemać, że koncepcja użycia zbrojenia rozproszonego do wzmocnienia masywu ziemnego wywodzi się z obserwacji systemu korzeniowego roślin, gdzie zaobserwowano poprawę właściwości mechanicznych.

Przywołane metody wzmacniania podłoża gruntowego można ogólnie nazwać stabilizacją gruntów. Proces ten został zdefiniowany jako zabieg chemiczny lub fizyczny mający na celu poprawę właściwości inżynierskich [113]. Stabilizacja chemiczna polega na wykorzystaniu materiału aktywnego chemicznie do modyfikacji właściwości gruntu, z kolei stabilizacja mechaniczna gruntu polega na fizycznej zmianie struktury gruntu, w wyniku której uzyskuje się poprawę właściwości mechanicznych.

Obecnie jedną z częściej wykorzystywanych metod stabilizacji chemicznej jest mieszanie gruntu z cementem w celu wytworzenia materiału o nazwie cementogrunt [40]. W wyniku wymieszania ze sobą cementu, gruntu oraz wody, a następnie zagęszczeniu powstałej mieszanki do pożądanej gęstości uzyskuje się materiał o podwyższonej

wytrzymałości na ściskanie, zwiększonej sztywności i mniejszej zdolności do wchłaniania wody [52]. Taki rodzaj stabilizacji jest powszechnie wykorzystywany podczas budowy obiektów liniowych takich jak autostrady, już od 1915 roku, kiedy to stabilizacja cementem została wykorzystana do budowy drogi w mieście Saracosta na Florydzie [2]. Do 1938 roku w samych Stanach Zjednoczonych Ameryki powstało ponad 241 km (150 mil) dróg zbudowanych z gruntu stabilizowanego cementem [14]. W tym czasie, w Polsce dopiero zaczęły pojawiać się informacje dotyczące wykorzystania cementu do stabilizacji podłoża gruntowego. Pierwsze wzmianki o nowych sposobach ulepszania podłoża gruntowego ukazały się w 1938 roku, w czasopiśmie *Wiadomości Drogowe*, gdzie inż. Czesław Bieleń opublikował artykuł pt. *Stabilizowania gliny w praktyce drogowej ostatniej doby* [19]. Pierwsze dwa odcinki próbne o łącznej powierzchni 6000 m² zostały wykonane w podwarszawskich Chylicach w latach 1949 i 1951. Od momentu zakończenia badań próbnych, stabilizacja cementem była coraz powszechniej wykorzystywana podczas inwestycji drogowych w Polsce [167].

Obecnie w wielu sektorach gospodarki, wykorzystuje się zbrojenie rozproszone do modyfikacji właściwości mechanicznych materiałów [17]. Badacze dostrzegli, że technika ta może również zostać wykorzystana do zmniejszenia zawartości spoiwa hydraulicznego w gruntach stabilizowanych poprzez poprawę efektywności wzmocnienia. Jest to istotny aspekt z uwagi na ciągły wzrost zapotrzebowania na spoiwa, takie jak cement, który jest powszechnie wykorzystywany do stabilizacji gruntu. Od 1990 roku produkcja cementu została zwiększona czterokrotnie a od 1950 roku aż trzydziestokrotnie [147]. W wyniku tych zmian udział producentów cementu w globalnej emisji dwutlenku węgla (CO₂) ciągle rośnie [7], co w efekcie przyczynia się do wzrostu jego ceny. Z tego powodu naukowcy nieustannie prowadzą badania mające na celu znalezienie metod mogących w niedalekiej przyszłości ograniczyć zapotrzebowanie na spoiwa hydrauliczne, również w gruntach stabilizowanych. Stanowiło to przesłankę do podjęcia tematyki niniejszej pracy, która bada wpływ włókien polipropylenowych na charakterystykę wytrzymałościową cementogruntu.

1.2. Tło problemu pracy

Aby możliwe było zastosowanie gruntu stabilizowanego w budownictwie drogowym, konieczne jest opracowanie odpowiedniego składu mieszanki, która jest projektowana przez wyspecjalizowane laboratorium. Jednak na początkowym etapie realizacji inwestycji niezbędne jest przeprowadzenie wstępnego określenia zawartości spoiwa w projektowanej warstwie. Aby prawidłowo oszacować ilość spoiwa niezbędne jest

odpowiednie doświadczenie i praktyka. Takie szacunki są konieczne do wstępnego ustalenia kosztów wykonania warstwy gruntu stabilizowanego. Z uwagi na stale rosnący koszt cementu, poszukiwane są alternatywne sposoby stabilizacji gruntu. Działania takie mają na celu ograniczenie zawartości spoiwa w projektowanych warstwach mieszanek związanych spoiwem hydraulicznym i gruntów stabilizowanych. Jednym ze sposobów zmniejszenia ilości spoiwa jest zastosowanie włókien polipropylenowych, dlatego też grunt stabilizowany z dodatkiem zbrojenia rozproszonego jest przedmiotem badań prac naukowych. Jednak wdrażanie takiego dodatku jest procesem długotrwałym, który wynika z braku polskich wytycznych, które kompletnie by opisywały wpływ włókien na właściwości mechaniczne cementogruntu. Sporządzenie takiego dokumentu oraz narzędzi mogących pomóc oszacować wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie przyczyni się do przyspieszenia procesu wdrażania zbrojenia rozproszonego jako dodatku do gruntów stabilizowanych.

Dodatkowo należy zaznaczyć, że obowiązujące wytyczne do projektowania nawierzchni drogowych, czyli katalog nawierzchni półsztywnych i podatnych [183] oraz katalog nawierzchni sztywnych [184], określają jedynie wymaganą klasę wytrzymałościową mieszanek związanych spoiwami hydraulicznymi i gruntów stabilizowanych. Klasa ta w zależności od rodzaju zastosowanego spoiwa, docelowego przeznaczenia oraz miejsca wbudowania może się różnić. Klasę wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie należy określić zgodnie z normami PN-EN 14227. W dokumentach tych nie określono konkretnego okresu pielęgnacji, po którym należy przeprowadzić klasyfikację. Wskazano jedynie, że klasyfikację należy przeprowadzić zgodnie z obowiązującą praktyką w miejscu zastosowania. Dlatego należy przyjąć, że zgodnie z wymaganiami technicznymi mieszanek związanych spoiwem hydraulicznym do dróg krajowych z 2010 roku (WT-5) [185] badanie jednoosiowego ściskania należy przeprowadzić po 28 dniach pielęgnacji. Warunki techniczne dodatkowo dopuszczają określenie klasy wytrzymałościowej po innym okresie pielęgnacji, np. po 7 lub 14 dniach. Nie zawarto jednak informacji dotyczących relacji wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie osiągniętej po 7 lub 14 dniach pielęgnacji do wytrzymałości po 28 dniach pielęgnacji. Dlatego też w dalszym ciągu powszechnie stosowana jest norma PN-S-96012 z 1998 roku, która wciąż nie została wycofana. Wynika to z faktu, że w normie zawarto informacje o wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie cementogruntu i warstwy ulepszanego podłoża po 7 i 28 dniach. Informacja ta pozwala ustalić, że stosunek wytrzymałości po 7 i 28 dniach, powinien mieścić się w przedziale od 0,44 do 0,67. Istnieje ryzyko, że tak opisane zależności mogą okazać się niewłaściwe do

prawidłowej oceny klasy wytrzymałościowej cementogruntu z dodatkiem zbrojenia rozproszonego. Dlatego też opracowanie metody do określania wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie z uwzględnieniem okresu pielęgnacji, będą mogły stanowić dodatkowe narzędzie podczas opracowywania składu mieszanki przez laboratorium. Dodatkowo należy stwierdzić, że opracowanie takiego narzędzia będzie niewątpliwie wartością dodaną.

1.3. Cel pracy

Głównym celem rozprawy doktorskiej jest:

Analiza czynników wpływających na wytrzymałość na ściskanie gruntu stabilizowanego cementem z włóknami polipropylenowymi oraz wyznaczenie zależności pomiędzy wytrzymałością na ściskanie a parametrami takimi jak: objętość porów, objętość spoiwa, objętość włókien, objętość szkieletu gruntowego świeżej mieszanki i czasu utwardzania oraz odporności na działanie wody.

Dodatkowo w pracy podjęto następujące cele szczegółowe:

1. określenie wpływu dodatku włókien polipropylenowych na wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie cementogruntu,
2. określenie wpływu dodatku włókien polipropylenowych na parametry odkształceniowe,
3. wyznaczenie zależności empirycznych pomiędzy prędkością pulsu ultradźwiękowego a wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie,
4. wyznaczenie zależności empirycznych pomiędzy parametrami odkształceniowymi a wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie,
5. wyznaczenie równania do określania wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie cementogruntu z dodatkiem włókien polipropylenowych na podstawie koncepcji ośrodka pięciofazowego.

1.4. Hipoteza badawcza

W niniejszej rozprawie doktorskiej postawiono następującą hipotezę badawczą:

Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie gruntu stabilizowanego cementem z dodatkiem włókien polipropylenowych zależy od porowatości cementogruntu, objętości cementu i włókien, czasu utwardzania oraz odporności na działanie wody.

1.5. Układ pracy

Niniejsza praca została podzielona na osiem rozdziałów, dodatkowo praca zawiera wykaz użytych symboli, spis rysunków i tabel oraz dwa załączniki.

Rozdział 1: Przedstawia krótki rys historyczny stabilizacji gruntu w budownictwie komunikacyjnym, tło problemu badawczego, wyznaczone cele główne i szczegółowe, hipotezę badawczą oraz układ pracy.

Rozdział 2: Został poświęcony przeglądowi literatury. Zaprezentowano w nim opis stosowanej terminologii z zakresu wzmacniania podłoża gruntowego oraz klasyfikacje wzmocnień. Ponadto szczegółowo omówiono stabilizację cementem oraz wpływ włókien polipropylenowych na jej efektywność.

Rozdział 3: Przedstawia charakterystykę użytych gruntów, cementu oraz włókien polipropylenowych. Informacje zawarte w rozdziale mogą służyć innym autorom do przeprowadzenia badań kontrolnych.

Rozdział 4: Zawiera szczegółowy plan badawczy, obejmujący zarówno badania zasadnicze, jak i kontrolne. W rozdziale przedstawiono zestawienie wszystkich zastosowanych mieszanek oraz opisano procedurę przygotowywania i pielęgnacji badanych próbek. Zaprezentowano pełny opis aparatury badawczej niezbędnej do przeprowadzenia pomiarów prędkości fali poprzecznej i podłużnej za pomocą betonoskopu (badanie nieniszczące) oraz wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie (badanie niszczące).

Rozdział 5: Przedstawia wyniki przeprowadzonych badań w ramach rozprawy doktorskiej.

Rozdział 6: Zawiera opis cementogruntu z dodatkiem włókien polipropylenowych, przedstawionego jako materiał pięciofazowy. Na podstawie wyróżnionych faz przeprowadzono analizę mającą na celu opracowanie trzech równań służących do określenia wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie. Następnie przeprowadzono analizę statystyczną opracowanych równań, na podstawie, której wyselekcjonowano równanie do dalszych badań kontrolnych.

Rozdział 7: Przedstawia wyniki badań kontrolnych, które następnie zostały wykorzystane do weryfikacji opracowanego równania.

Rozdział 8: Stanowi podsumowanie rozprawy doktorskiej, w której zawarto wnioski końcowe autora oraz możliwe dalsze kierunki badań.

2. Przegląd stanu wiedzy

2.1. Terminologia

Termin *wzmacnianie podłoża gruntowego* został zdefiniowany w PN-B-02481 jako zabieg, którego celem jest zwiększenie wytrzymałości, zmniejszenie ścisłości lub poprawa innych właściwości gruntu [188]. W literaturze anglojęzycznej i polskiej funkcjonują terminy, które są zamiennie stosowane do terminu *wzmacnianie podłoża gruntowego*, który został przetłumaczony w normie jako *ground improvement*. Do tych terminów można zaliczyć: *Soil Improvement*, *ground treatment*, *treatment of soil* czy też *ground modification*. W dalszej części pracy, w porządku chronologicznym przedstawiono okoliczności wprowadzenia poszczególnych terminów do powszechnego użytku.

Pomimo stosowania od wielu lat różnych technik wzmacniania podłoża gruntowego, dopiero w 1981 roku były one jednym z głównych tematów podczas odbywającej się w Sztokholmie dziesiątej międzynarodowej konferencji Mechaniki gruntów i inżynierii fundamentowania (z ang. *10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*). Podczas konferencji przedstawiono raport *Soil Improvement* [98], którego nazwę można przetłumaczyć jako *ulepszanie gruntu* [94]. Dwa lata później podczas trwającej ósmej Europejskiej Konferencji Mechaniki Gruntów i Inżynierii Fundamentowania (z ang. *Eighth European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*) został wprowadzony termin *ground improvement* [124], który po przetłumaczeniu oznacza *ulepszanie podłoża*. Pod taką też nazwą funkcjonował siedemnasty komitet techniczny międzynarodowego stowarzyszenia mechaniki gruntów i inżynierii geotechnicznej (z ang. *International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ISSMGE*), który później został przemianowany na TC211 [159]. Użyty termin *ground improvement* jest po dziś dzień powszechnie stosowany w literaturze międzynarodowej. Kilkanaście lat później w raporcie CIRIA C573 z 2002 roku wprowadzono do użytku kolejne dwa terminy: *treatment of soil* [11] i *ground treatment* [100]. Terminy te nie występują w polskiej terminologii geotechnicznej [94], które można przetłumaczyć na *obróbka podłoża*. Następnie w 2004 roku za sprawą opracowania kompendium technik modyfikacji podłoża (z ang. *A Compendium of Ground Modification Techniques*) do użytku wprowadzono termin *ground modification* [154], który oznacza *modyfikacje gruntu*. We wspomnianym raporcie CIRIA C573 stwierdzono, że przez termin *ground improvement* należy rozumieć zamiar lub cel, a nie proces jego osiągnięcia, chociaż

termin ten jest często używany w tym znaczeniu [100]. Dalej próbę uporządkowania stosowanej terminologii podjął Charles [25] który stwierdził, że:

1. procesem jest obróbka podłoża (z ang. *ground treatment*),
2. celem tego procesu jest ulepszenie podłoża (z ang. *ground improvement*),
3. rezultatem tego procesu jest modyfikacja podłoża (z ang. *ground modification*).

W polskiej literaturze termin *ulepszone podłoże* jest stosowany zazwyczaj w odniesieniu do budowy dróg, co jest związane bezpośrednio z użytą terminologią w katalogach typowych konstrukcji nawierzchni sztywnych [184] oraz półsztywnych i podatnych [183]. Ponadto termin ten został użyty w normie PN-S-96012 z 1997 roku [215]. Częściej stosowany jest przez autorów termin *wzmacnianie podłoża gruntowego* [54, 132, 153] który został ujęty we wcześniej przywołanej normie PN-B-02481. Określenie to pojawiło się również w wytycznych opracowanych przez Instytut Badawczy Dróg i Mostów w 2002 roku. Również stosowaną formą jest określenie *wzmacnianie gruntów* [131].

2.2. Klasyfikacja wzmacniania podłoża

Wraz z rozwojem technik wzmacniania podłoża gruntowego konieczne było wprowadzenie klasyfikacji, która miała na celu systematyzację i uporządkowanie dostępnych metod. Klasyfikacja technik wzmacniania podłoża gruntowego ułatwiła inżynierom i badaczom identyfikację, porównanie czy też wybór najkorzystniejszego rozwiązania. W literaturze naukowej funkcjonuje wiele klasyfikacji, które zostały zestawione w tab. 2.1 [29, 65, 66, 98, 139]. Fundamentalną różnicą między przywołanymi klasyfikacjami jest kryterium, według którego przeprowadzono wymienione klasyfikacje. Do najczęściej wykorzystywanych kryteriów klasyfikacyjnych można zaliczyć: konstrukcję, funkcję, proces, zastosowanie, rodzaj gruntu i inkluzje. Oprócz tego część autorów wprowadziło podział na płytkie wzmocnienie (z ang. *shallow improvement*) i głębokie wzmocnienie (z ang. *deep improvement*). Han [65] w zaproponowanej klasyfikacji przyjął, że do głębokości 3 metrów występuje płytkie wzmocnienie.

Każda klasyfikacja ma swoje zalety, jak i ograniczenia. Wynikają one z faktu, iż istnieją takie metody wzmacniania, które mogą zostać przypisane do jednej lub kilku kategorii. Na przykład kolumny żwirowe mogą pełnić jednocześnie funkcje zagęszczania, wymiany, drenażu czy wzmacniania. Jednak nadrzędną funkcją kolumn żwirowych jest wymiana. [65] Podobny problem klasyfikacyjny występuje w przypadku tematyki niniejszej pracy, gdzie badania skupiają się na materiale kompozytowym, który składa się z gruntu,

spoiwa i zbrojenia. Wzmocnienie podłoża przez zastosowanie spoiwa hydraulicznego i zbrojenia rozproszonego może jednocześnie pełnić funkcje stabilizacji i zbrojenia. Niemniej jednak jego główną funkcją jest stabilizacja, a zbrojenie rozproszone traktowane jest jako dodatek, który w kontekście danego materiału pełni funkcje zbrojenia.

Tab. 2.1 Klasyfikacje metod ulepszania podłoża gruntowego.

Autor	Kryterium	Kategorie
Mitchell (1981)	Konstrukcja/ funkcja	1. Wgłębne zagęszczanie gruntów niespoistych in-situ 2. Konsolidacja wstępna 3. Iniekcja i wstrzykiwanie zaprawy 4. Stabilizacja gruntu domieszkami i chemiczna stabilizacja 5. Termiczne ulepszenie gruntu 6. Zbrojenie gruntu
Hausmann (1990)	Proces	1. Modyfikacja mechaniczna 2. Modyfikacja hydrauliczna 3. Modyfikacja fizyczna i chemiczna 4. Modyfikacja przez zastosowanie inkluzji
Chu i in., (2009)	Rodzaj gruntu i inkluzja	1. Wzmocnienie podłoża bez użycia domieszek w gruntach niespoistych i zasypkach 2. Wzmocnienie podłoża bez użycia domieszek w gruntach spoistych 3. Wzmocnienie podłoża z użyciem domieszek lub inkluzji 4. Wzmocnienie podłoża domieszkami typu cementacyjnego 5. Zbrojenie gruntu
Schaefer & Berg (2012)	Zastosowanie	1. Roboty ziemne 2. Zagęszczanie gruntów niespoistych 3. Nasypy na gruntach słabonośnych 4. Przesłony przeciwfiltracyjne 5. Poprawa cech użytkowych nawierzchni 6. Zrównoważony rozwój 7. Drenaż i konsolidacja słabonośnego podłoża 8. Wykonanie pionowych elementów wsporczych 9. Poziome podparcie gruntu 10. Ograniczenie upłynnienia gruntu 11. Wypełnianie pustek przestrzeni gruntowej
Han (2015)	Funkcja	1. Zagęszczanie gruntu 2. Wymiana gruntu 3. Drenaż i konsolidacja gruntu 4. Stabilizacja chemiczna gruntu 5. Zbrojenie gruntu 6. Zabieg ulepszania termicznego i biologicznego gruntu

W Polskiej literaturze podział metod wzmacniania podłoża został przedstawiony w opracowanych przez Instytut Badawczy Dróg i Mostów (IBDiM) wytycznych wzmacniania podłoża gruntowego w budownictwie drogowym [83]. Przywołana klasyfikacja jest powszechnie wykorzystywana przez Polskich inżynierów, co podkreśla jej znaczenie. Podstawowe metody zostały zestawione w tab. 2.2. W przywołanych metodach brak jest konkretnej metody, która w pełni odpowiada tematyce pracy.

Tab. 2.2 Klasyfikacje metod ulepszania podłoża gruntowego w budownictwie drogowym.

Podział		Metoda
WYTYCZNE WZMACNIANIA PODŁOŻA GRUNTOWEGO W BUDOWNICTWIE DROGOWYM (Instytut Badawczy Dróg i Mostów, 2002)	wzmacnianie powierzchniowe	1. zagęszczanie powierzchniowe 2. ulepszanie uziarnienia i stabilizacja mechaniczna 3. ulepszanie gruntu spoiwami 4. stabilizacja chemiczna spoiwami
	wymiana gruntu	1. Pełna wymiana gruntu 2. Częściowa wymiana gruntu 3. Wyparcie gruntu nasypem 4. Lekkie wypełnienia nasypu
	metody statyczne	1. Wstępne obciążenie 2. Budowa etapowa 3. Przeciążenie 4. Wspomaganie konsolidacji drenami pionowymi 5. Wspomaganie konsolidacji podciśnieniem 6. Przypory boczne podstawy nasypu
	metody wibracyjne	1. Wibroflotacja 2. Wibrowymiana 3. Kolumny wibrobetonowe 4. Wibrowanie wgłębne
	metody dynamiczne	1. Konsolidacja dynamiczna 2. Słupy wybijane udarami 3. Zagęszczanie wybuchami
	zbrojenie wgłębne	1. Pale zagęszczające 2. Mieszanie wgłębne 3. Gwoździowanie gruntu 4. Kotwienie
	metody iniekcyjne	1. Wypełnianie pustek w podłożu 2. Zastrzyki cementowe 3. Zastrzyki chemiczne 4. Zastrzyki przemieszczeniowe 5. Iniekcja strumieniowa
	metody termiczne	1. Nagrzewanie 2. Mrożenie gruntu

Na podstawie przedstawionych klasyfikacji metod wzmacniania podłoża można stwierdzić, że tematyka pracy odnosi się do wzmacniania powierzchniowego z zastosowaniem metod stabilizacji gruntu. Wykorzystywane w tym procesie materiały to cement i zbrojenie rozproszone w postaci włókien polipropylenowych.

2.3. Stabilizacja gruntu

Stabilizacja gruntu stanowi jedno z kluczowych zagadnień w geotechnice, inżynierii drogowej czy też w ogólnym ujęciu budownictwa komunikacyjnego. Metoda ta polega na poprawie właściwości gruntu poprzez wymieszanie go z innymi materiałami [3, 52]. W literaturze naukowej [53, 113] wyróżnia się dwa podstawowe rodzaje stabilizacji: mechaniczną i chemiczną.

Proces stabilizacji mechanicznej polega na zmodyfikowaniu gruntu wzmacnianego poprzez dodanie do niego innych gruntów o odpowiednio dobranym uziarnieniu lub innymi elementami (np. zbrojeniem). W wyniku takiego działania otrzymuje się grunt o dobrych parametrach zagęszczalności, co wpływa bezpośrednio na poprawę właściwości mechanicznych czy też zwiększoną odporność na działanie wody. Mieszanka gruntów dobrana w ten sposób nazywana jest mieszanką optymalną [167]. Część autorów uważa, że wymieszanie gruntu z elementami zbrojącymi należy zaliczyć do stabilizacji mechanicznej [5, 6, 53], inni z kolei uważają taki typ wzmocnienia za stabilizację domieszkami [3]. Należy zwrócić uwagę, że dodatkiem lub domieszką może być zarówno zbrojenie, jak i spoiwo hydrauliczne, które należałoby zaliczyć do stabilizacji chemicznej. Dlatego też w pracy przyjęto, że wykorzystanie zbrojenia rozproszonego do wzmocnienia podłoża gruntowego jest stabilizacją mechaniczną. Do stabilizacji mechanicznej przypisywane są również inne metody takie jak zagęszczanie gruntu czy wymiana gruntu.

Chemiczna stabilizacja wiąże się z modyfikacją właściwości gruntu poprzez dodanie materiałów aktywnych chemicznie [113]. Do takich materiałów można zaliczyć cement i wapno, które należą do grupy spoiw hydraulicznych, czyli takich, które po zmieszaniu z wodą wiążą i twardnieją w wyniku reakcji i procesów hydratacji. Spoiwa hydrauliczne po stwardnieniu wyróżnia zdolność do zachowania swoich właściwości mechanicznych również pod wodą. Kolejną grupą są spoiwa, które wykazują utajone właściwości hydrauliczne, czyli takie, które mogą wykazywać cechy hydrauliczne tylko w wyniku reakcji chemicznych z niektórymi składnikami [107]. Do tych materiałów należy zaliczyć żużel wielkopiecowy czy popioły lotne. Kolejna metoda stabilizacji gruntu jest podobna do

stabilizacji cementem, lecz zamiast spoiwa hydraulicznego wykorzystuje się materiały bitumiczne [167]. Zastosowanie ich powoduje wytworzenie się wiązań pomiędzy cząsteczkami gruntu w wyniku czego otrzymuje się zwiększoną wytrzymałość gruntu oraz odporność na warunki atmosferyczne [113]. W ostatnich latach pojawiają się również alternatywne metody stabilizacji gruntu. Coraz większym zainteresowaniem cieszy się wykorzystanie odpadów przemysłowych, takich jak żużel czy popioły lotne, które zawierają reaktywne glinokrzemiany. Przy użyciu takich materiałów, stabilizacja zachodzi poprzez wymieszanie ich z alkalicznym roztworem wodnym, np. mieszanką wody i wodorotlenku sodu, który pełni funkcje aktywatora. Proces, w którym stosowane są materiały glinokrzemianowe o niskiej zawartości wapnia, jest określany jako geopolimeryzacja [1]. Powstały materiał nazywany jest geopolimerem, który cechuje się doskonałymi właściwościami mechanicznymi, odpornością na wysokie temperatury, kwasy i rozpuszczalniki organiczne [176].

W dalszej części przedstawiono najczęściej wykorzystywane rodzaje stabilizacji chemicznych, które zostały opisane i sklasyfikowane w wytycznych, jak i również w obowiązujących normach. Dodatkowo omówiono stabilizację z zastosowaniem zbrojenia rozproszonego, czyli szczególny przypadek stabilizacji mechanicznej. Omówienie zawiera klasyfikację zbrojenia rozproszonego oraz jego wpływ na właściwości mechaniczne i fizyczne mieszanki.

2.3.1. Stabilizacja gruntu w świetle norm

Z uwagi na powszechne stosowanie gruntu stabilizowanego jako metody wzmacniania podłoża w budownictwie infrastrukturalnym, w Normach Branżowych opisano stabilizację cementem, wapnem oraz popiołami. Warunki techniczne zostały zawarte w normach: BN-68-8933-08 [182] do stabilizacji cementem i BN-68-8933-07 [181] dla stabilizacji wapnem. W normie BN-63-6722-02 [180] opisano wymagania normowe dla popiołów lotnych wykorzystywanych podczas procesu stabilizacji. Przywołane normy branżowe były normami obowiązującymi do końca lat 90. XX wieku. Następnie zostały one zastąpione serią Polskich norm, *Drogi samochodowe*, które wprowadziły normy PN-S-96012 [215] do stabilizacji cementem i PN-S-96011 [214] dla stabilizacji wapnem. Wymagania dla popiołów lotnych zostały ujęte w normie PN-S-96035 [216]. Do chwili obecnej, spośród wymienionych norm wprowadzonych pod koniec lat 90., jedynie norma określająca wymagania i metody badań popiołów lotnych ma status normy wycofanej.

Zgodnie z definicjami zawartymi w opracowaniach z lat 90., można zapisać, że mieszanka gruntu stabilizowanego jest to mieszanina w optymalnych proporcjach gruntu, spoiwa i wody a w razie potrzeby również i dodatków ulepszających do chwili stwardnienia. Natomiast grunt stabilizowany to zagęszczona i stwardniała mieszanka. Norma do gruntów stabilizowanych cementem dzieli grunt stabilizowany na podbudowę i ulepszone podłoże gruntowe. W normie zawarto definicje opisujące dwie wymienione warstwy:

1. warstwa podłoża gruntowego ulepszanego cementem, jest to jedna lub dwie warstwy zagęszczonej mieszanki cementowo gruntowej, na której układana jest warstwa podbudowy,
2. podbudowa z gruntu stabilizowanego cementem, jest to jedna lub dwie warstwy zagęszczonej mieszanki cementowo-gruntowej, która po stwardnieniu stanowi fragment nośnej warstwy nawierzchni drogowej, służący do przenoszenia obciążenia od ruchu na podłoże.

Tymczasem norma do stabilizacji wapnem definiuje jedynie grunt ulepszony wapnem jako mieszankę wapienno – gruntową o zmienionej strukturze, charakteryzującą się polepszeniem cech fizycznych i chemicznych gruntu. Zapisy normowe wskazują, że grunt stabilizowany może zostać wykorzystany jako materiał konstrukcyjny do budowy drogi lub może stanowić warstwę wzmocnionego podłoża.

Podział ten został również zastosowany w najnowszej odsłonie norm z serii PN-EN 14227 – Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym, które zostały opracowane przez komitet techniczny CEN/TC 227 – *Road materials*. W opracowaniach wydzielono dwa podstawowe rodzaje stabilizacji: Mieszanki Związane Spoiwem Hydraulicznym (MZSH) i Grunt Stabilizowany Spoiwem Hydraulicznym (GSSH). Normy określają szczegółowe przepisy, według których można przeprowadzić klasyfikację materiału. Do podstawowych klasyfikatorów stwardniałej mieszanki można zaliczyć wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie (R_C), jednoosiowe rozciąganie (R_T) czy też moduły odkształcenia: przy ściskaniu (E_C) i przy rozciąganiu (E_t). Podstawową różnicą tych dwóch materiałów, są wymagania wobec składu granulometrycznego gruntu użytego w mieszance. Zgodnie z wymaganiami podczas przygotowywania MZSH należy stosować grunt o krzywej uziarnienia mieszczącej się w ustalonych przedziałach. Wymóg ten może wynikać z faktu, iż materiał może stanowić warstwę konstrukcyjną nawierzchni drogowej, wobec czego musi on spełnić bardziej restrykcyjne wymogi produkcyjne. Natomiast do produkcji GSSH należy

określić kategorie przesiewu, określaną na podstawie wymiarów oczek sita, przez które przejdzie nie mniej niż 95% masy kruszywa. W normach wyszczególniono spoiwa hydrauliczne na bazie: cementu, żużlu, popiołów i spoiw drogowych, dodatkowo GSSH można wykonać na bazie wapna. Wykaz norm z serii PN-EN 14227 zestawiono w tab. 2.3.

Tab. 2.3 Polskie normy dotyczące gruntów stabilizowanych.

Oznaczenie normy	Rodzaj stabilizacji
PN-EN 14227-1:2013 [205]	Mieszanki związane cementem
PN-EN 14227-2:2013 [206]	Mieszanki żużłowe
PN-EN 14227-3:2013 [207]	Mieszanki związane popiołami lotnymi
PN-EN 14227-4:2013 [208]	Popioły lotne do mieszanek związanych spoiwem hydraulicznym
PN-EN 14227-5:2013 [209]	Mieszanki związane spoiwem drogowym
PN-EN 14227-15:2015 [210]	Grunty stabilizowane hydraulicznie

Podział gruntu stabilizowanego został również zastosowany w powszechnie wykorzystywanych przez projektantów wytycznych do projektowania nawierzchni drogowych: katalog typowych konstrukcji nawierzchni sztywnych [184] oraz katalog typowych konstrukcji nawierzchni półsztywnych i podatnych [183]. W katalogach zostały przedstawione wymagania mechaniczne wobec projektowanych gruntów stabilizowanych, które się zmieniają wraz z przeznaczeniem i miejscem wbudowania.

Na podstawie analizy klasyfikacji metod wzmocnienia podłoża, obowiązujących norm i przepisów, materiał badawczy w pracy został zakwalifikowany do metod wzmocnienia powierzchniowego, dokładniej do stabilizacji gruntu. Materiał ten w dalszej części pracy będzie określany jako grunt stabilizowanym, grunt stabilizowany cementem, grunt stabilizowany spoiwem lub cementogruntem. W przypadku opisywania mieszanek z domieszką zbrojenia rozproszonego zostanie dodana informacja o zastosowanym dodatku. W kontekście obowiązujących norm badany materiał w niniejszej pracy należy zakwalifikować do GSSH, który został opisany w normie PN-EN 14227-15.

2.3.2. Stabilizacja cementem

Początkowo do stabilizacji gruntu wykorzystywano cement portlandzki, lecz z biegiem lat zaczęto stosować cementy, które zapewniały większą odporność na korozję chemiczną, w tym szczególnie na działanie siarczanów [217]. Udało się to osiągnąć między innymi przez zastosowanie dodatków takich jak popiół lotny czy żużel. Zawartość dodatków wpływa na właściwości spoiwa, które kształtują właściwości mechaniczne cementogruntu.

Jednak to klinkier jest podstawowym składnikiem cementów, który nadaje cementowi jego właściwości. Poza klinkierem w składzie cementu mogą się znajdować jeszcze inne składniki główne takie jak: żużel wielkopiecowy, pył krzemionkowy, pucolany, popioły lotne, łupek palony czy wapień [191]. Na podstawie zawartości poszczególnych składników przeprowadza się klasyfikacje cementu. Zgodnie z aktualnymi normami dla gruntów stabilizowanych PN-EN 14227-1 i PN-EN 14227-15 [205, 210], cement wykorzystany do stabilizacji musi być zgodny z wymogami normy, PN-EN 197-1 [191]. W tej normie wyróżniono pięć podstawowych rodzajów cementu, które zestawiono w tab. 2.4, w ramach których wyróżniono 27 różnych wyrobów [108].

Tab. 2.4 Cementy powszechnego użytku wg EN 197-1.

Oznaczenie	Nazwa normowa
CEM I	Cement portlandzki
CEM II	Cement portlandzki wieloskładnikowy
CEM III	Cement hutniczy
CEM IV	Cement pucolanowy
CEM V	Cement wieloskładnikowy

Grunt stabilizowany cementem zawdzięcza swoje właściwości mechaniczne procesowi hydratacji cementu, dzięki któremu następuje proces wiązania cząstek gruntu [3]. O przebiegu hydratacji poza składem mineralnym i chemicznym decydują również warunki jej prowadzenia takie jak np. temperatura [87]. Klinkier portlandzki, który jest kluczowym komponentem cementów, składa się przede wszystkim z surowców takich jak: wapień, margiel i glina [108]. Otrzymywany jest poprzez wypalanie surowców w piecu obrotowym, metodą spiekania. Następnie klinkier, po schłodzeniu, zostaje zmielony razem z dodatkami mineralnymi, w rezultacie czego otrzymuje się cement. Wcześniej już wspomniane wiązanie cementu jest terminem stosowanym do opisania tężenia zaczynu cementowego, czyli do przejścia zaczynu ze stanu plastycznego do sztywnego. Podczas procesu wiązania zaczyn już wykazuje pewną wytrzymałość, jednak należy rozróżnić pojęcie wiązania i twardnienia, które odnosi się do wzrostu wytrzymałości zaczynu cementowego już związanego [107].

2.3.2.1. Hydratacja cementu

Modelowe reakcje chemiczne zachodzące podczas stabilizacji gruntu cementem przedstawiono na przykładzie cementu portlandzkiego. Uznawany jest on za podstawowy rodzaj cementu, który składa się głównie z klinkieru portlandzkiego [133]. W jego skład wchodzi między innymi tlenki wapnia (CaO), dwutlenki krzemu (SiO_2), tlenki glinu

(Al_2O_3), tlenki żelaza (Fe_2O_3) oraz niewielkie ilości tlenków magnezu (MgO). Związki te tworzą główne składniki mineralne, zwane fazami klinkieru portlandzkiego [108, 133]:

1. Alit – ($3CaO \cdot SiO_2$, zapis skrótowy: C_3S) jest to roztwór krzemianu trójwapniowego. Stanowi on 55-65% masy klinkieru. Jest składnikiem, który ma decydujący wpływ na wytrzymałość i trwałość zaczynu.
2. Belit – ($2CaO \cdot SiO_2$, zapis skrótowy: C_2S) jest to krzemian dwuwapniowy. Jego zawartość w klinkierze waha się w przedziale 15-25%. Stanowi słabo reaktywną fazę cementu, w związku z czym odpowiada za wzrost wytrzymałości w późniejszym okresie twardnienia.
3. Celit – ($3CaO \cdot Al_2O_3$ zapis skrótowy: C_3A) jest to glinian trójwapniowy. W klinkierze portlandzkim występuje w przedziale 3-12%. Jest fazą klinkieru portlandzkiego, która najszybciej reaguje. Dlatego też kształtuje początkową wytrzymałość i właściwości reologiczne świeżego zaczynu. Faza może ulegać korozjom chemicznym.
4. Brownmilleryt – ($4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ zapis skrótowy: C_4AF) jest to glinożelazian czterowapniowy. Występuje w klinkierze portlandzkim zazwyczaj w ilości 8-12% masy klinkieru, a jego skład i właściwości zależą od stosunku A/F .

Proces wiązania cementu inicjowany jest przez hydratację jego poszczególnych składników. Proces hydratacji rozpoczyna się po wymieszaniu cementu z wodą, jest to szereg zjawisk związanych z włączeniem wody w strukturę związków chemicznych [108]. Podczas hydratacji zachodzą reakcje hydrolizy, które polegają na rozkładzie związków pod wpływem wody. Jednak termin *hydratacja* często jest stosowany w sposób ogólny, obejmując tym samym wszelkie reakcje zachodzące między cementem a wodą [107].

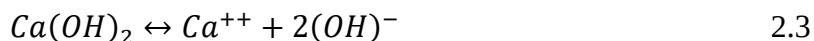
Proces hydratacji krzemianu trójwapniowego przyciąga najwięcej uwagi badaczy ze względu na jego dominujący udział w cemencie portlandzkim [108]. Podstawowymi produktami tej reakcji są: uwodniony krzemian wapnia ($C-S-H$) oraz wodorotlenek wapnia [133]. Żel $C-S-H$ jest głównym związkiem zwiększającym wytrzymałość również gruntu stabilizowanego [8]. Zakładając, że $C-S-H$ jest końcowym produktem hydratacji, reakcje można zapisać zgodnie z równaniem 2.1:



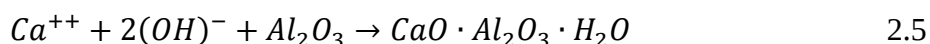
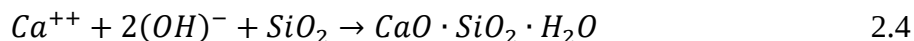
W analogiczny sposób przebiega hydratacja krzemianu dwuwapniowego:



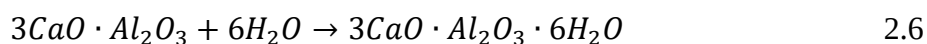
Podczas hydratacji Belitu powstaje trzykrotnie mniej wodorotlenku wapnia w stosunku do Alitu. Mniejsza szybkość reakcji wynika z różnic strukturalnych pomiędzy krzemianami wapnia i wpływa na powstanie większych kryształów wodorotlenku wapnia podczas hydratacji Belitu [87, 108]. W przypadku stabilizacji gruntów dochodzi do dodatkowych reakcji chemicznych związanych z obecnością tlenku krzemu (SiO_2) i tlenku glinu (Al_2O_3) [111], które zaczynają się od dysocjacji powstałego wodorotlenku wapnia na dwudodatni kation wapnia i dwa jednoujemne aniony wodorotlenkowe:



Następnie tlenki krzemu i glinu będą oddziaływać z jonami wapnia, tworząc nowe związki cementowe takie, jak uwodniony krzemian wapnia (C-S-H) i uwodniony glinian wapnia (C-A-H) [15]. Uogólniony zapis reakcji można zapisać w postaci:



Reakcje pozostałych składników, z uwagi na mniejszą zawartość, będą w mniejszym stopniu odpowiedzialne za wytrzymałość cementogruntu. Należy jednak zwrócić uwagę na wysoką reaktywność glinianu trójwapniowego, która wpływa na szybkość jego reakcji z wodą w mieszaninie. W odróżnieniu od glinianu trójwapniowego, glinożelazian czterowapniowy ulega hydratacji znacznie wolniej, więc będzie odpowiedzialny za wytrzymałość cementogruntu w późniejszym okresie twardnienia. W początkowym okresie wiązania, powstałe produkty żelowe krystalizują do postaci uwodnionych glinianów heksagonalnych C_2AH_8 i C_4AH_{13} , które następnie w temperaturze powyżej 30°C ulegają przemianom w regularny hydrat C_3AH_6 [108]. Reakcje hydratacji Celitu w klinkierze portlandzkim można przedstawić jako:



Biorąc pod uwagę różnorodność dostępnych cementów, które mogą zawierać różne dodatki oraz domieszki, oraz złożoność całego procesu hydratacji. Przedstawione reakcje należy rozpatrywać wyłącznie jako wzorcowe reakcje chemiczne, które zachodzą podczas wiązania gruntu stabilizowanego cementem.

Aby proces stabilizacji okazał się skuteczny, konieczne jest ulepszenie właściwości mechanicznych i fizycznych gruntu do poziomu spełniającego określone wymagania, które zależą od docelowego przeznaczenia cementogruntu. Z tego względu kluczowe znaczenie

ma rozpoznanie czynników, które wpływają na końcowy efekt stabilizacji cementem. W dalszej części rozdziału omówiono następujące czynniki modyfikujące wytrzymałość gruntu stabilizowanego cementem:

1. rodzaj i mineralogia gruntu,
2. zawartość i rodzaj cementu,
3. stosunek wody do cementu,
4. okres i temperatura utwardzania,
5. zawartość części organicznych i siarczanów.

2.3.2.2. Wpływ mineralogii i rodzaju gruntu

Cement jako środek stabilizujący wykazuje skuteczność w zastosowaniu z szeroką gamą gruntów, w tym gruntów piaszczystych, pylastych czy ilastych [91]. Ze względu na efektywność oraz korzyści ekonomiczne uznaje się, że optymalnym rozwiązaniem jest użycie cementu do stabilizacji gruntów piaszczystych, a nie do gruntów pylastych i ilastych. Wynika to z łatwości wymieszania spoiwa z gruntem w wyniku czego otrzymuje się mieszkankę z równomiernie rozproszonym cementem [27]. W przypadku gruntów drobnoziarnistych to ich plastyczność będzie determinować efektywność stabilizacji cementem. O ile grunty o małej i średniej plastyczności mogą być również stabilizowane, chociaż z mniejszą efektywnością, o tyle stabilizacja gruntów o wysokim wskaźniku plastyczności przekraczającym 30% jest trudna do osiągnięcia z uwagi na urabialność takiego gruntu. W takich przypadkach w pierwszej kolejności należy wymieszać grunt z wapnem w celu obniżenia jego plastyczności i poprawy urabialności [69], a następnie zastosować stabilizację cementem. Zasadniczo można stwierdzić, że grunty o niższej granicy płynności mają tendencje do osiągania wyższych wytrzymałości na ściskanie niż grunty o wyższej granicy płynności [117]. Ponadto, w miarę wzrostu zawartości części drobnych w gruncie, rośnie zapotrzebowanie na cement, głównie z powodu wzrostu powierzchni właściwej cząstek gruntu i ich wzajemnych kontaktów. W zależności od ich zawartości ilość potrzebnego cementu do uzyskania zadowalającego efektu wzmocnienia gruntów ekspansywnych może mieścić się w przedziale od 3% do 16% [11, 125]. Aby określić przydatność gruntu do stabilizacji cementem, wielu autorów posługuje się granicami Atterberga, podając konkretne wymagania dla gruntów przeznaczonych do stabilizacji [9, 69, 91, 105, 218]. W literaturze naukowej często określa się przydatność gruntów na podstawie kryteriów zestawionych w tab. 2.5, które zostały opracowane przez Departament Armii oraz Siły Powietrzne Stanów Zjednoczonych Ameryki [218].

Tab. 2.5 Kryteria przydatności gruntu do stabilizacji cementem.

Rodzaj gruntu	Zawartość części drobnych	Kryteria przydatności gruntu do stabilizacji cementem
Piaski i żwiry	do 5%	Nie ogranicza się
	5% - 12%	$I_p < 30\%$
	powyżej 12%	$I_p < 20 \cdot \frac{50 - (\% \text{ zawartość części drobnych})}{4}$
Gliny i iły	-	$I_p < 20\%$
		$W_L < 40\%$

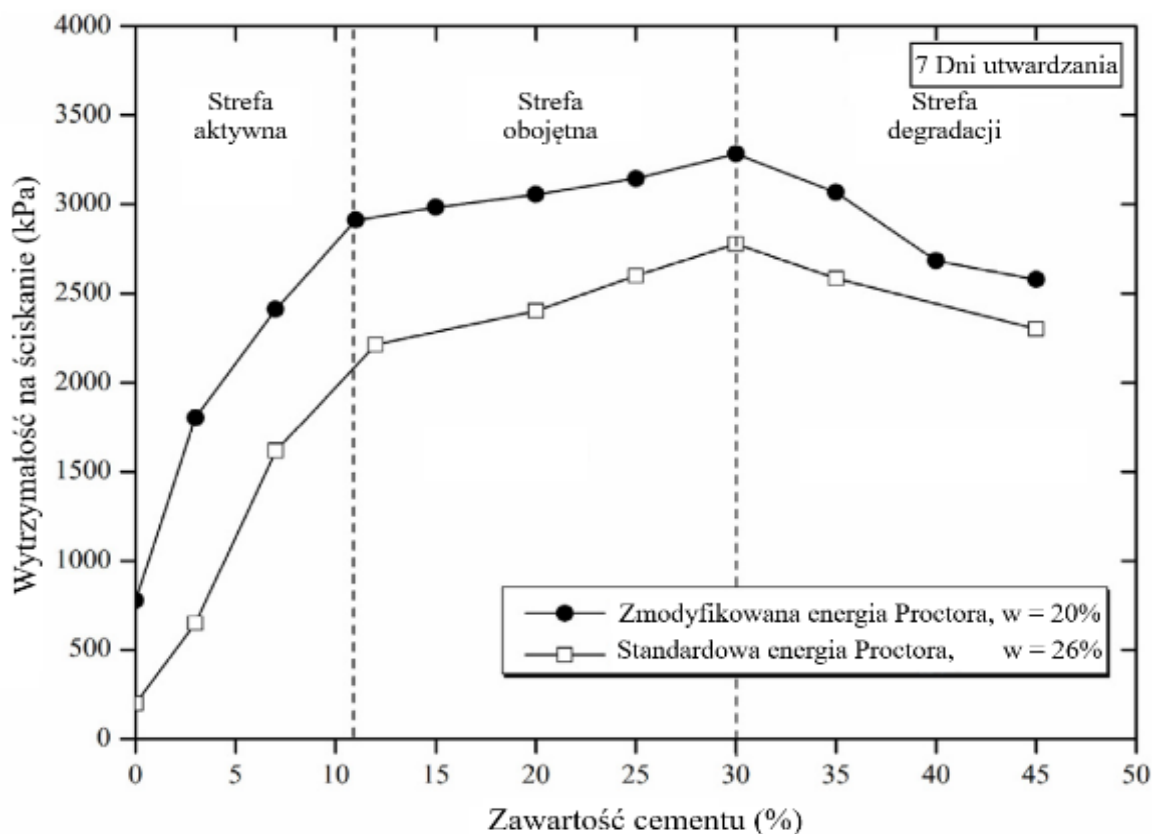
Grunty charakteryzują się szerokim zakresem składu mineralogicznego, który wpływa na właściwości fizyczne i chemiczne gruntu [114]. Mogą one składać się z różnych minerałów ilastych, zwłaszcza kaolinitu, illitu czy montmorylonitu, minerałów nie ilastych i części organicznych czy koloidalnych [10]. Croft [40] przeprowadził badania mineralogiczne gruntów gliniastych stabilizowanych cementem, z których wynika, że niektóre minerały ilaste mogą wpłynąć na efekty działania cementu. I tak podczas stabilizacji gruntów kaolinitowych, wytworzony wodorotlenek wapnia w pierwszych fazach utwardzania powoli reaguje z danym minerałem ilastym. Dopiero po dłuższym czasie wapno zostaje zużyte we wtórnych reakcjach hydratacji. Podobna sytuacja ma miejsce przy stabilizacji illitu, który można uznać za obojętny w kontekście wiązania i utwardzania cementogruntu [10]. Inaczej niż kaolinit i illit zachowuje się montmorylonit, który należy do grupy ekspansywnych materiałów ilastych. Na przykładzie mieszanek o zawartości 10% cementu, Croft [40] wykazał, że w wyniku reakcji montmorylonitu i tlenku wapnia dochodzi do obniżenia pH fazy wodnej, która w badanych mieszankach obniżyła się z wartości 12,2 pH do zaledwie 10 pH w ciągu mniej niż jednego tygodnia. Wynikający z tego niedobór dwudodatnich kationów wapnia sprawia, że rozwijające się produkty hydratacji są gorsze niż w mieszankach z minerałami nieekspansywnymi. W związku z tym rozwój wytrzymałości jest mniejszy i dopóki dodatek cementu nie będzie wystarczająco duży, aby zaspokoić zapotrzebowanie montmorylonitu na tlenek wapnia, wytrzymałość gruntu nie ulegnie poprawie. Aby osiągnąć widoczną poprawę właściwości mechanicznych, należy zastosować co najmniej 5% cementu, z kolei w celu osiągnięcia wyraźnej poprawy należy zastosować aż 15% cementu [10]. Jednak należy wspomnieć, że montmorylonit cechuje się wysoką zdolnością do wymiany kationów i przy zastosowaniu odpowiedniej ilości tlenku wapnia, grunty z ekspansywnym minerałem ilastym mogą być wykorzystane do stabilizacji cementem [61].

2.3.2.3. Wpływ zawartości i rodzaju spoiwa

Wytrzymałość cementogruntu na ściskanie ma tendencję do zwiększania się wraz ze wzrostem zawartości cementu w mieszance [170]. Rozwój wytrzymałości cementogruntu przy określonej zawartości wody można podzielić na trzy strefy, tj. aktywną, obojętną i degradacji [71], jak pokazano na rys. 2.1. Strefa aktywna charakteryzuje się znacznym zmniejszeniem rozmiarów porów w mieszance w wyniku tworzenia się związków cementowych, co z kolei prowadzi do zwiększenia wytrzymałości (zawartość cementu do 11%). W strefie obojętnej zarówno objętość porów, jak i ilość żelu *C-S-H* i *C-A-H* zmienia się nieznacznie wraz ze wzrostem ilości cementu. W związku z tym następuje nieznaczny wzrost wytrzymałości (zawartość cementu od 11% do 30%). W strefie degradacji, w wyniku wzrostu zawartości cementu, stosunek wody do cementu staje się zbyt mały, aby zaszła pełna hydratacja cementu. Efektem tego jest mniejsza ilość produktów hydratacji, co przekłada się na mniejszą wytrzymałość cementogruntu (zawartość cementu od 30% do 50%) [71].

Poza zawartością spoiwa, końcowy efekt wzmocnienia w znaczącym stopniu zależy również od właściwości użytego spoiwa hydraulicznego. Jak wspomniano wcześniej, (tab. 2.4) można wyróżnić 5 podstawowych rodzajów cementu, które będą różnić się między sobą zawartością głównych składników. Pomimo że stabilizację gruntu można przeprowadzić każdym z nich, to dotychczas najczęściej wykorzystywano cement portlandzki ze względu na jego dostępność i opłacalność [106]. Jednakże, trend ten uległ zmianie z uwagi na ograniczenie emisji dwutlenku węgla oraz ochronę wyczerpujących się zasobów naturalnych [140].

W związku z tym w ostatnich latach badania koncentrowały się na ograniczeniu śladu węglowego stabilizacji gruntu. Cel ten starano się osiągnąć poprzez zastosowanie materiałów pochodzących z recyklingu czy też produktów ubocznych [21, 73, 82, 156]. Do najczęściej stosowanych dodatków mających na celu zmniejszenie zapotrzebowania na spoiwo można zaliczyć granulowany żużel wielkopiecowy i popiół lotny [45, 141]. W procesie stabilizacji gruntu kluczowe jest zrozumienie wszelkich konsekwencji, jakie niesie ze sobą zastosowanie dodatku do cementu. Należy przy tym uwzględnić ich wpływ na właściwości mechaniczne, fizyczne, chemiczne oraz hydrauliczne gruntu [12].



Rys. 2.1 Strefy rozwoju wytrzymałości w stabilizowanym gruncie spoistym [71].

2.3.2.4. Wpływ stosunku wody do cementu

Oprócz ilości i rodzaju spoiwa również istotnym czynnikiem wpływającym na wytrzymałość gruntu stabilizowanego jest stosunek wody do cementu. Zaobserwowano, że dla danej zawartości wody istnieje maksymalny limit zawartości cementu, powyżej którego ziarna cementu nie mogą ulegać procesowi hydratacji, a tym samym nie mogą odpowiednio uczestniczyć w procesach pucolanowych [72]. Aby uzyskać całkowitą hydratację cementu portlandzkiego, na każdy jego mol należy zapewnić 4,2 mola wody [166]. W praktyce można przyjąć, że minimalny stosunek wody do cementu (w/c) powinien wynosić 0,42 [166]. Zmianę stosunku w/c w mieszankach można osiągnąć poprzez zmianę zawartości wody lub cementu albo obu parametrów jednocześnie [9]. Jednak podczas powierzchniowej stabilizacji gruntu zawartość wody powinna umożliwić uzyskanie wilgotności optymalnej, dzięki czemu uzyskamy mieszaninę, którą można dobrze zagęścić. W związku z tym możliwość zmiany stosunku wody do cementu przez zmianę zawartości wody może być ograniczona, jednakże jeśli jej zawartość jest wystarczająca do pełnej hydratacji to niższa wartość w/c umożliwia lepsze wiązanie cementu niż w przypadku wyższego stosunku w/c . Dlatego wytrzymałość cementogruntu ma tendencję do zmniejszania się wraz ze wzrostem współczynnika w/c [9].

2.3.2.5. Wpływ okresu i temperatury utwardzania

Zauważono, że niezależnie od typu gruntu i cementu, wytrzymałość cementogruntu ma tendencję do wzrostu w miarę upływu czasu utwardzania, pod warunkiem, że zawartość wody jest wystarczająca. Zachodzące reakcje w utwardzonej mieszance mogą trwać miesiące, a nawet lata [92, 118]. Tempo wzrostu wytrzymałości w pierwszych dniach utwardzania jest zdecydowanie większe niż w późniejszym czasie, wynika to z procesu hydratacji cementu, która z czasem stopniowo zwalnia, osiągając asymptotyczną wartość w późniejszym okresie utwardzania [13, 18]. Oprócz okresu utwardzania istotnym czynnikiem, wpływającym na wytrzymałość cementogruntu, jest temperatura, przy której zachodzą procesy hydratacji. Wraz ze wzrostem temperatury utwardzania znacznie przyspiesza się tworzenie wodorotlenku wapnia i żeli cementowych w mieszance gruntowo-cementowej [109]. Ponadto wyższa temperatura utwardzania może zapewnić większą ilość wodorotlenku wapnia, który będzie uczestniczył w rozpuszczaniu krzemionki i tlenku glinu. Może się to okazać szczególnie istotne w mieszkankach o obniżonym pH. W związku z tym wzrost temperatury może nie tylko poprawić wczesny przyrost wytrzymałości, ale także przyczynić się do poprawy wytrzymałości długoterminowej [177].

2.3.2.6. Wpływ części organicznych i siarczanów

Kluczowym czynnikiem mogącym znacząco wpłynąć na efekt wzmocnienia podłoża gruntowego jest zawartość w nim substancji organicznych. Substancje te mogą występować w postaci białka, żywicy, węglowodanów, tłuszczów czy też węgla. [99]. Takie związki reagują z wodorotlenkiem wapnia, tworząc nierozpuszczalne produkty, które pokrywają cząstki gruntu. Części organiczne absorbują jony wapnia, tym samym zostawiając niewystarczającą ich ilość do reakcji pucolanowej [172]. Ponadto obecność części organicznych powoduje obniżenie pH mieszanki, co niekorzystnie wpływa na hydratację cementu, zwłaszcza gdy zawartość części organicznych przekracza 3%~4% [64, 157]. Niewątpliwie, poza obecnością części organicznych, istotna jest również zawartość siarczanów w gruncie, gdyż może ona znacząco wpłynąć na właściwości stabilizowanego gruntu. Reakcje chemiczne siarczanów z cementem prowadzą do tworzenia ettryngitu i hydratu monosiarczanu, co prowadzi do obniżenia wytrzymałości mechanicznej i pęcznienia gruntu stabilizowanego cementem [78]. Siarczany, obecne w wodzie gruntowej, wywołują reakcje między wapniem a pucolanami i są odpowiedzialne za powstawanie wspomnianych związków [115].

2.3.2.7. Kryteria normowe

Grunt stabilizowany jest materiałem szeroko stosowanym w budownictwie komunikacyjnym, zwłaszcza w zakresie budowy infrastruktury drogowej. Takie materiały, po spełnieniu odpowiednich wymagań, mogą być wykorzystane jako warstwa konstrukcyjna nawierzchni drogowej lub ulepszonego podłoża gruntowego. Wymagania te zostały opisane w katalogach [183, 184, 219] jak również w wymaganiach technicznych [185], które zestawiono w tab. 2.6. Przedstawione opracowania nie zawierają informacji na temat klasyfikacji MZSH i GSSH. Podział ten został ujęty w serii norm PN-EN 14227 [205, 210] w których wyróżniono różne sposoby klasyfikacji mieszanek; zarówno tych, w których proces wiązania spoiwem jeszcze nie nastąpił, jak i tych, w których proces ten został już zakończony. Z uwagi na stawiane wymagania MZSH i GSSH oraz zmienność warunków gruntowo-wodnych, niezbędne jest indywidualne projektowanie składu mieszanki przy każdorazowym zastosowaniu. Obejmuje to dobór odpowiedniej zawartości i rodzaju spoiwa i innych dodatków w celu zapewnienia optymalnych właściwości gruntu stabilizowanego. Pomimo że oba materiały są gruntami stabilizowanymi to z uwagi na ich różne przeznaczenie, czyli miejsce wbudowania, sposób ich klasyfikacji jest różny.

Tab. 2.6 Katalogi typowych konstrukcji nawierzchni.

Nazwa dokumentu	Rok publikacji
WR-D-63 – Katalog typowych konstrukcji nawierzchni jezdni przeznaczonych do ruchu bardzo lekkiego oraz innych części dróg	2022
Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych	2014
Katalog typowych konstrukcji nawierzchni sztywnych	2014
Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym do dróg krajowych	2010

Stabilizacja MZSH została opisana w pierwszych pięciu częściach normy PN-EN 14227, które zostały zestawione w tab. 2.3. Każda z przywołanych norm poza szczegółową klasyfikacją właściwości materiału wyróżnia dodatkowo różne rodzaje mieszanek, które różnią się między sobą składem granulometrycznym i dodatkami. Oprócz tego część mieszanek wymaga przeprowadzenia dodatkowych badań, w celu określenia parametrów takich jak np. natychmiastowy wskaźnik nośności. Natomiast klasyfikacja GSSH przedstawiona w normie PN-EN 14227-15 [210] obejmuje zarówno stabilizację cementem, jak i innymi stabilizatorami takimi jak popioły lotne, żużle wielkopieczowe,

spoiwa drogowe czy wapno. W przeciwieństwie do norm klasyfikujących MZSH norma ta nie rozróżnia poszczególnych typów mieszanek, zamiast tego skupia się na klasyfikacji mieszanek świeżych i już związanych. Sposób klasyfikacji i oceny powinien zostać dostosowany do wymagań lokalnych. We wspomnianej normie można wyróżnić pięć kluczowych kryteriów, na podstawie których dokonuje się klasyfikacji i oceny świeżej mieszanki GSSH:

1. kryterium zawartości wody,
2. kryterium stopnia rozdrobnienia,
3. kryterium natychmiastowego wskaźnika nośności,
4. kryterium wskaźnika wilgotności,
5. kryterium okresu urabialności.

Pierwsze kryterium odnosi się do zawartości wody w świeżej mieszance, czyli do jej wilgotności. Jest to kluczowy parametr wpływający zarówno na właściwości mechaniczne cementogruntu, jak i również na jego urabialność. Zawartość wody powinna zostać tak dobrana, aby umożliwić skuteczne zagęszczenie mieszanki na placu budowy. Za optymalną zawartość wody w mieszance należy uznać taką jej ilość, która umożliwi uzyskanie maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu mieszanki. Klasyfikację zawartości wody dla mieszanek przedstawiono w tab. 2.7. Ponadto wilgotność mieszanki powinna zostać określona zgodnie z procedurami opisanymi w części 2, 3, 4 lub 5, normy PN-EN 13286.

Tab. 2.7 Kategorie minimalnej zawartości wody.

Minimalna zawartość wody	Kategoria
0,90 – optymalnej zawartość wody w mieszance	$W_{0,9}$
0,95 – optymalnej zawartość wody w mieszance	$W_{0,95}$
1,00 – optymalnej zawartość wody w mieszance	$W_{1,0}$
1,05 – optymalnej zawartość wody w mieszance	$W_{1,05}$

Kolejne kryterium odnosi się do stopnia rozdrobnienia mieszanki, jest to stosunek masy przechodzącej przez sito przed rozkruszeniem i po rozkruszeniu zatrzymanych grudek materiału na sicie o oczku 5,6 mm. Stopień rozdrobnienia będzie maleć wraz ze wzrostem zawartości frakcji ilastej i pylastej w mieszance gruntu stabilizowanego. Badanie należy przeprowadzić po wymieszaniu ze sobą wszystkich składników mieszanki, lecz przed ich zagęszczeniem, zgodnie z procedurą opisaną w normie PN-EN 13286-48 [203]. W tab. 2.8 zestawiono klasyfikacje stopnia rozdrobnienia świeżej mieszanki gruntu stabilizowanego.

Tab. 2.8 Stopień rozdrobnienia mieszanki.

Stopień rozdrobnienia	Kategoria
$\geq 30\%$	P ₃₀
$\geq 40\%$	P ₄₀
$\geq 50\%$	P ₅₀
$\geq 60\%$	P ₆₀

Następne kryterium określa nośność warstwy natychmiast po jej zagęszczeniu, czyli jej przejezdność. Natychmiastowy wskaźnik nośności mieszanki jest wyznaczany analogicznie jak kalifornijski wskaźnik nośności (z ang. *California Bearing Ratio*, CBR), lecz bez nasączania próbki i dodatkowych obciążników. Badanie przeprowadza się natychmiast po zagęszczeniu mieszanki w formie i polega na określeniu siły potrzebnej do zagłębienia trzpienia o średnicy 50 mm na głębokość 2,5 mm i 5,0 mm. Przemieszczenie trzpienia odbywa się ze stałą prędkością i wynosi 1,27 mm/min. Wskaźnik należy określić zgodnie z procedurą opisaną w normie PN-EN 13286-47 [202]. W tab. 2.9 zestawiono klasyfikacje natychmiastowego wskaźnika nośności mieszanek GSSH.

Tab. 2.9 Natychmiastowy wskaźnik nośności świeżej mieszanki.

Natychmiastowy wskaźnik nośności	Kategoria
≥ 10	IPI ₁₀
≥ 15	IPI ₁₅
≥ 20	IPI ₂₀
≥ 25	IPI ₂₅
≥ 30	IPI ₃₀
≥ 40	IPI ₄₀
≥ 50	IPI ₅₀

Kryterium wskaźnika wilgotności (MCV) służy do oceny, klasyfikacji i kontroli wilgotności mieszanki. Badanie polega na zagęszczaniu mieszanki przy pomocy ubijaka w formie przy jednoczesnym pomiarze powstałych osiadań. Z zależności przyrostu przemieszczeń do liczby wykonanych uderzeń wykreśla się linię styczną do krzywej. Na jej podstawie odczytuje się liczbę potrzebnych uderzeń ubijaka, aby uzyskać 5 mm przemieszczenia. Badanie zostało szczegółowo opisane w normie PN-EN 13286-46 [201]. Na podstawie wzoru 2.7 przeprowadza się klasyfikacje zgodnie z tab. 2.10.

$$MCV = 10 \cdot \log (B_{MCV}) \quad 2.7$$

gdzie:

MCV – wskaźnik wilgotności,

B_{MCV} – liczba uderzeń potrzebna do uzyskania przemieszczenia równego 5 mm.

Tab. 2.10 Wskaźnik wilgotności świeżej mieszanki.

Wskaźnik wilgotności MCV	Kategoria
$6 \leq MCV \leq 10$	MCV _{6/10}
$7 \leq MCV \leq 11$	MCV _{7/11}
$8 \leq MCV \leq 12$	MCV _{8/12}
$9 \leq MCV \leq 13$	MCV _{9/13}

Ostatnie kryterium dotyczy okresu urabialności, czyli czasu liczonego od zakończenia mieszania, podczas którego wiązanie spoiwa pozostaje zerowe lub bardzo niskie. Jako wartość graniczną przyjmuje się czas, po którym osiąga się wartość 98% początkowej gęstości szkieletu mieszanki. Normy nie wprowadzają klasyfikacji tego kryterium, a jedynie podają informacje, że jeśli jest to wymagane, to należy zadeklarować okres urabialności mieszanki. Badanie przeprowadzane jest zgodnie z procedurą opisaną w normie PN-EN 13286-45 [200].

Właściwości związanej mieszanki wyznacza się po określonej liczbie dni utwardzania. Materiał przeznaczony do badań laboratoryjnych przechowuje się w kontrolowanych warunkach powietrzno-suchych z zabezpieczeniem cementogruntu przed utratą wilgoci. W celu określenia odporności materiału na działanie wody do okresu pielęgnacji należy włączyć pielęgnację w środowisku wodnym, można tego dokonać poprzez zanurzenie materiału badawczego w wodzie. W tab. 2.11 zestawiono przykładowe okresy pielęgnacji zgodnie z załącznikiem A, normy PN-EN 14227-15 [210].

Tab. 2.11 Przykładowe okresy pielęgnacji mieszanek GSSH.

Liczba dni w środowisku powietrzno-suchym	Liczba dni w środowisku wodnym	Łączna liczba dni pielęgnacji
0	4	4
3	4	7
7	-	7
7	7	14
14	-	14
21	7	28
28	-	28
28	28	56
56	-	56
28	63	91
91	-	91
182	-	182
364	-	364

Ostatecznie o przydatności materiału decydują jego właściwości mechaniczne, te zaś będą się zmieniać wraz z upływem czasu. W pierwszych dniach zmiany będą zachodzić dynamicznie i z czasem stopniowo będą tracić na intensywności. Z tego powodu badania należy przeprowadzić po ustalonej liczbie dni pielęgnacji. Klasyfikacje mechanicznych właściwości cementogruntu przeprowadza się na podstawie wyników badań niszczących. W zależności od rodzaju materiału, klasyfikacji można dokonać na podstawie różnych badań. W przypadku badań MZSH można wykorzystać klasyfikację opartą na wynikach badań jednoosiowego ściskania lub rozciągania zgodnie z normą PN-EN 14227-1 [205]. Dodatkowo norma 14227-15 [210], dotycząca GSSH, dopuszcza klasyfikację na podstawie kalifornijskiego wskaźnika nośności. W związku z tym należy wybrać jedną z trzech metod do oceny właściwości mechanicznych GSSH:

1. kalifornijski wskaźnik nośności – CBR,
2. wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie – R_C ,
3. kombinacje wytrzymałości na rozciąganie – R_t z modułem sprężystości – E .

W metodzie pierwszej klasyfikację przeprowadza się na podstawie badania CBR przeprowadzonego zgodnie z normą PN-EN 13286-47 [202]. Badanie należy przeprowadzić po 4 dniach pielęgnacji lub innym okresie, jeśli został on wskazany w przepisach miejscowych. Pomiar przeprowadzany jest w sposób analogiczny jak podczas określania natychmiastowego wskaźnika nośności. Podczas badania CBR można odzwierciedlić obciążenie od warstw konstrukcyjnych zalegających powyżej przez zastosowanie pierścieni obciążeniowych. Należy jednak zwrócić uwagę, że obciążenie to ma wpływ na wartość CBR [28]. Podczas badania rejestrowana jest krzywa obciążenie – przemieszczenie, na podstawie której należy odczytać siłę przy zagłębieniu trzpienia na głębokość 2,5 i 5,0 mm. Wskaźnik ten wyrażony jest jako procent odczytanej siły względem wartości referencyjnej. Przy penetracji 2,5 mm wartość referencyjna wynosi 13,2 kN, przy 5,0 mm przyjmuje się wartość 20 kN. Jako kalifornijski wskaźnik nośności należy przyjąć wyższą wartość wyznaczoną ze wzoru 2.8, a następnie przeprowadzić klasyfikacji zgodnie z tab. 2.12.

$$CBR = \frac{p_{CBR}}{p_s} \cdot 100 \quad 2.8$$

gdzie:

CBR – kalifornijski wskaźnik nośności,

p_{CBR} – zarejestrowany nacisk podczas badania CBR przy penetracji 2,5 i 5 mm,

p_s – nacisk potrzebny do zagłębienia tłka w gruncie wzorcowym.

Tab. 2.12 Klasyfikacja kalifornijskiego wskaźnika nośności.

CBR po 4 dniach pielęgnacji (albo po innym dłuższym okresie pielęgnacji)	Kategoria
≥ 5	CBR ₅
≥ 10	CBR ₁₀
≥ 12	CBR ₁₂
≥ 15	CBR ₁₅
≥ 20	CBR ₂₀
≥ 30	CBR ₃₀
≥ 40	CBR ₄₀
≥ 50	CBR ₅₀

Druga metoda klasyfikacji opiera się na wytrzymałości cementogruntu, która jest określana podczas badania jednoosiowego ściskania. Badanie polega na ciągłym i równomiernym zwiększaniu obciążenia aż do zniszczenia próbki. Badanie powinno się przeprowadzić w czasie mieszczącym się w przedziale od 30 do 60 sekund. Jest to prosty i powszechnie wykorzystywane badanie do określenia właściwości mechanicznych materiałów budowlanych takich jak beton, drewno, skała czy też cementogrunt. Z uwagi na dostępność aparatury pomiarowej, szybkość badania i potwierdzoną skuteczność jest to standardowe badanie w branży budowlanej. Wytrzymałość gruntu stabilizowanego na jednoosiowe ściskanie jest definiowana jako stosunek największej zarejestrowanej siły podczas badania do pierwotnej powierzchni przekroju poprzecznego badanej próbki i należy ją wyznaczyć na podstawie wzoru 2.9. Badanie przeprowadza się zgodnie z procedurą opisaną w normie PN-EN 13286-41 [197]. Klasyfikacje przeprowadza się zgodnie z normą 14227-15 [210], która nie różnicuje wyników uzyskanych podczas badania próbek prostopadłościennych i cylindrycznych. Normowa klasyfikacja wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie gruntów stabilizowanych spoiwem hydraulicznym została zestawiona w tab. 2.13.

$$R_C = \frac{F_c}{A} \quad 2.9$$

gdzie:

R_C – wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie,

F_c – największa zarejestrowana siła ściskająca,

A – pierwotna powierzchnia badanej próbki.

Tab. 2.13 Klasyfikacja wytrzymałościowa ulepszanego podłoża gruntowego.

Minimalna wartość R_C w MPa Dla próbek cylindrycznych o smukłości 2	Minimalna wartość R_C w MPa Dla próbek cylindrycznych o smukłości 1	Klasa wytrzymałościowa R_C
0,15	0,20	C _{0,15/0,2}
0,40	0,50	C _{0,4/0,5}
0,80	1,00	C _{0,8/1}
1,20	1,50	C _{1,2/1,5}
1,50	2,00	C _{1,5/2}
2,00	2,50	C _{2/2,5}
2,30	3,00	C _{2,3/3}
3,00	4,00	C _{3/4}
4,00	5,00	C _{4/5}
5,00	6,00	C _{5/6}
6,00	8,00	C _{6/8}
8,00	10,00	C _{8/10}
9,00	12,00	C _{9/12}

Trzecia metoda wykorzystuje do klasyfikacji wytrzymałość na rozciąganie i moduł sprężystości. Z powodu złożonego procesu oceny i badań, podejście to jest rzadziej stosowane niż metoda 1 czy 2. Dlatego zgodnie z normą 14227-15 [210] można wybrać jeden z trzech sposobów badań w celu przeprowadzenia klasyfikacji:

1. badanie bezpośredniego rozciągania,
2. badanie pośredniego rozciągania,
3. badanie pośredniego rozciągania i jednoosiowego ściskania.

Określenie parametrów mechanicznych sposobem pierwszym polega na przeprowadzeniu badania bezpośredniego rozciągania zgodnie z normą PN-EN 13286-40 [196] przy jednoczesnym pomiarze odkształcenia zgodnie z normą PN-EN 13286-43 [199]. Podejście to wydaje się najbardziej miarodajnym sposobem ustalenia wytrzymałości na rozciąganie. Jednak podczas badania wymagana jest dodatkowa aparatura pomiarowa, jak np. ekstensometr umożliwiający pomiar odkształceń podłużnych na trzech liniach prostych, przesuniętych względem siebie o 120°, na podstawie których wyprowadza się wartość średnią odkształcenia próbki przy 30% maksymalnej siły niszczącej. Następnie należy wyznaczyć moduł sprężystości według wzoru 2.10. Natomiast wytrzymałość na rozciąganie bezpośrednio można zapisać jako stosunek największej zarejestrowanej siły rozciągającej do pierwotnego przekroju poprzecznego badanej próbki, co można zapisać wzorem 2.11:

$$E_t = \frac{1,2 \cdot F_r}{\pi \cdot D^2 \cdot \varepsilon_{0,3}} \quad 2.10$$

$$R_t = \frac{4 \cdot F_r}{\pi \cdot D^2} \quad 2.11$$

gdzie:

E_t – moduł sprężystości przy rozciąganiu,

R_t – wytrzymałość na rozciąganie,

F_r – największa zarejestrowana siła rozciągająca,

D – średnica próbki,

$\varepsilon_{0,3}$ – odkształcenie podłużne przy $F = 0,3F_r$.

Sposób drugi wprowadza uproszczenie do klasyfikacji w postaci określenia wytrzymałości na rozciąganie na podstawie badania rozciągania pośredniego, zwanego również testem brazylijskim. Badanie należy przeprowadzić zgodnie z normą PN-EN 13286-42 [198]. Podczas badania oprócz rejestracji siły prowadzi się pomiar zmiany długości dwóch średnic próbki. Pierwsza mierzona średnica jest pozioma, druga tworzy ze średnicą poziomą kąt 60° . Sposób drugi również wymaga zastosowania dodatkowej aparatury pomiarowej, w postaci dwóch tensometrów. Na podstawie zmierzonych wartości należy wyznaczyć w pierwszej kolejności współczynnik Poissona, a następnie moduł sprężystości wykorzystując wzory zawarte w normie PN-EN 13286-43 [199]:

$$\nu = \frac{1 + 0,40 \cdot \mathcal{E}}{1,73 + 1,07 \cdot \mathcal{E}} \quad 2.12$$

$$E_{it} = (0,273 + \nu + 0,726 \cdot \nu^2) \cdot \frac{0,3F_r}{H} \cdot \frac{1}{\Delta\Phi_0} \quad 2.13$$

gdzie:

E_{it} – moduł sprężystości wyznaczony z badania rozciągania pośredniego,

ν – współczynnik Poissona,

$\mathcal{E}$ – wartość $\Delta\Phi_{60}/\Delta\Phi_0$,

H – wysokość próbki,

$\Delta\Phi_0$ – zmiana długości średnicy poziomej, dla $F = 0,3F_r$,

$\Delta\Phi_{60}$ – zmiana długości średnicy nachylonej pod kątem 60° , dla $F = 0,3F_r$,

F – siła wywierana na próbkę podczas badania,

F_r – największa zarejestrowana siła rozciągająca.

Zgodnie z normą PN-EN 14227-15 [210] podczas klasyfikacji cementogruntu opisywanym sposobem należy przyjąć, że wytrzymałość na rozciąganie wynosi 80% pośredniej wytrzymałości na rozciąganie, którą wyznacza się ze wzoru:

$$R_{it} = \frac{2 \cdot F_c}{\pi \cdot H \cdot D} \quad 2.14$$

gdzie:

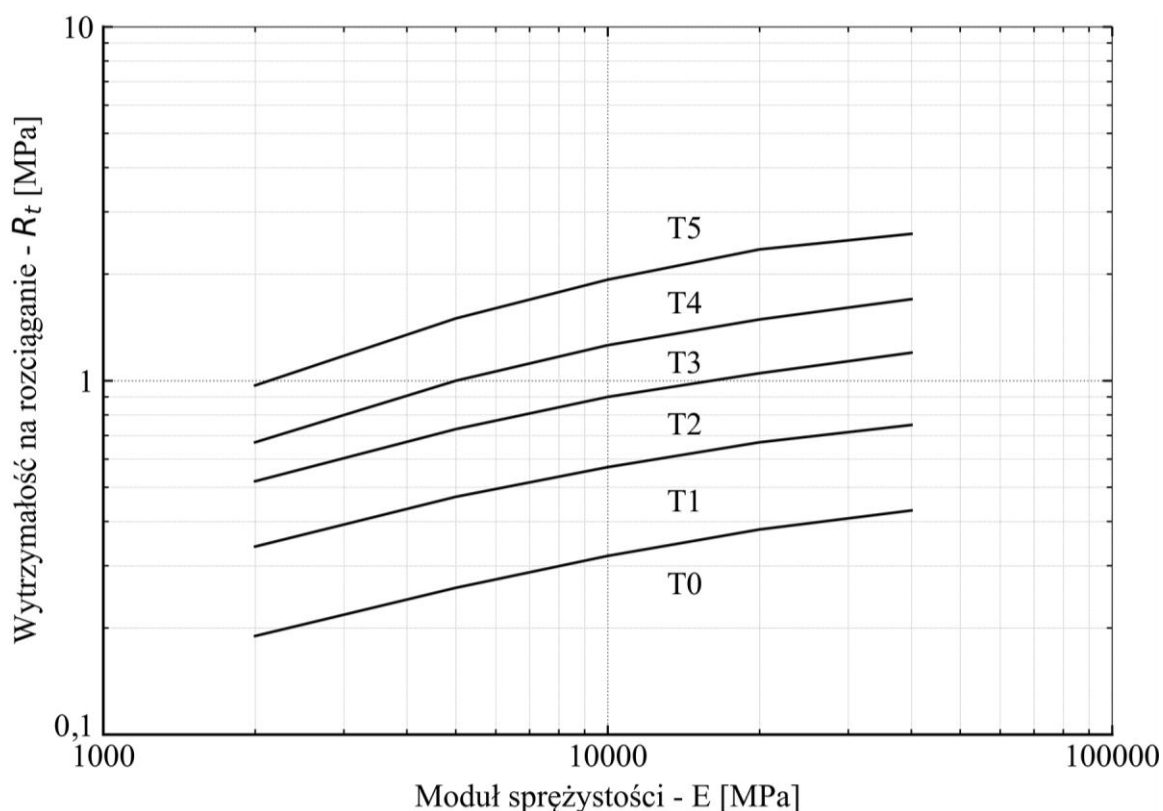
R_{it} – wytrzymałość na rozciąganie pośrednie,

F_c – największa zarejestrowana siła ściskająca,

H – wysokość próbki,

D – średnica próbki.

Trzeci sposób łączy elementy dwóch poprzednich podejść. Aby przeprowadzić klasyfikację cementogruntu, należy wyznaczyć wytrzymałość na rozciąganie analogicznie jak w sposobie drugim. Następnie wyznacza się moduł sprężystości z testu jednoosiowego ściskania przy zastosowaniu ekstensometrów, które opisano w pierwszym sposobie. Na podstawie wytrzymałości na rozciąganie i modułu sprężystości wyznaczonego jednym z trzech sposobów wymienionych w metodzie trzeciej można dokonać klasyfikacji GSSH. Metoda polega na przypisaniu właściwości materiału do jednej z sześciu kategorii przedstawionych na rys. 2.2.



Rys. 2.2 Klasyfikacja ze względu na wytrzymałość na rozciąganie i moduł sprężystości.

Oprócz opisanych klasyfikacji świeżych i związanych mieszanek cementogruntu zgodnie z normą 14227-15 [210], przeprowadza się również klasyfikacje odporności gruntu stabilizowanego na działanie wody oraz pęcznienia liniowego. Jednak w normie nie została opisana procedura i klasyfikacja sprawdzająca odporność GSSH na działanie mrozu. Zawarto jedynie informacje, że należy ją sprawdzić zgodnie z przepisami obowiązującymi w miejscu stosowania cementogruntu. Odporność na działanie wody wyraża się jako stosunek wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie lub rozciąganie próbek cementogruntu po pielęgnacji w wodzie i próbek niewystawionych na działanie wody. Odporność na działanie wody opisuje wzór 2.15. Klasyfikacje odporności na działanie wody należy przeprowadzić zgodnie z kategoriami zawartymi w tab. 2.14.

$$I = \frac{R_i}{R} \quad 2.15$$

gdzie:

I – odporność na działanie wody,

R_i – wytrzymałość po pielęgnacji w wodzie,

R – wytrzymałość na ściskanie lub rozciąganie.

Tab. 2.14 Klasa wytrzymałości po działaniu wody.

Stosunek R_i/R	Kategoria
$\geq 0,6$	I _{0,6}
$\geq 0,7$	I _{0,7}
$\geq 0,8$	I _{0,8}

Badanie pęcznienia liniowego przeprowadza się na próbkach GSSH w pełni nasączonych wodą zgodnie z procedurą opisaną w normie PN-EN 13286-47 [202]. Badanie powinno się przeprowadzać przez co najmniej 28 dni lub do ustania pęcznienia. Klasyfikacje przeprowadza się na podstawie kategorii zawartych w tab. 2.15. W normie 14227-1 [205], klasyfikacja pęcznienia liniowego MZSH nie została uwzględniona.

Tab. 2.15 Klasa pęcznienia liniowego.

Największe średnie pęcznienie [mm]	Największe pęcznienie pojedynczej próbki [mm]	Kategoria
5	10	LS ₅
1	2	LS ₁

Badanie odporności cementogruntu na mróz zostało opisane w normie PN-S-96012 [215] i WT-5 [185], które odnoszą się jedynie do MZSH. Wskaźnik mrozoodporności jest stosunkiem wytrzymałości na ściskanie po 14 cyklach zamrażania – odmrażania a wytrzymałością na ściskanie cementogruntu po 28 dniach pielęgnacji. Okres pielęgnacji próbek przed ich wystawieniem na działanie mrozu wynosi zgodnie z normą 13 dni i zgodnie z warunkami technicznymi 28 dni. Po tych okresach próbkę należy umieścić w zbiorniku wodnym na 24 godziny i następnie wystawić je na działanie mrozu. Oznacza to, że wytrzymałości na ściskanie określa się po 28 lub 43 dniach.

$$W_m = \frac{R_C^{z-o}}{R_C} \quad 2.16$$

gdzie:

W_m – wskaźnik mrozoodporności,

R_C^{z-o} – wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie po 14 cyklach zamrażania i rozmrażania,

R_C – wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie.

2.3.2.8. Wymagania wobec cementogruntu

Warstwa gruntu stabilizowanego jest poddana oddziaływaniom technologicznym i eksploatacyjnym. Obciążenie technologiczne jest wywierane przez urządzenia zagęszczające jak np. walce czy też pojazdy budowlane o dużym ciężarze, które poruszają się po wykonanej warstwie podbudowy w czasie budowy. Taki ruch pojazdów może prowadzić do odkształceń trwałych lub nawet uszkodzenia podbudowy [123]. Obciążenia eksploatacyjne wywierane są przez różnorodne pojazdy, jednak największy wpływ na naprężenia i odkształcenia konstrukcji nawierzchni, w tym podbudów, mają pojazdy ciężkie. Dlatego też w Polsce podczas projektowania nawierzchni drogowych uwzględnia się jedynie obciążenie wywierane przez pojazdy o ciężarze nie mniejszym niż 35 kN [123]. W zależności od wielkości tych oddziaływań wymagane są różne minimalne właściwości mechaniczne cementogruntu. Wymagania mogą się różnić w zależności od klasy drogi, kategorii ruchu, warunków gruntowo – wodnych czy też pełnionej funkcji w konstrukcji nawierzchni drogowej.

Projektując nawierzchnię drogową zgodnie z katalogami wymienionymi w tab. 2.6, należy uznać, że podstawowym parametrem klasyfikującym grunt stabilizowany jest wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie, czyli klasyfikacja metodą drugą wg normy 14227–15 [210]. Zgodnie z katalogami typowych konstrukcji nawierzchni podatnych, półsztywnych i sztywnych, można wykorzystać MZSH i GSSH do budowy warstw

konstrukcji nawierzchni drogowej, takich jak: podbudowa zasadnicza i pomocnicza lub warstwa mrozochronna. Dodatkowo GSSH może zostać wykorzystany jako warstwa ulepszanego podłoża gruntowego. W katalogach nie zapisano, w jaki sposób należy przeprowadzić pielęgnację próbek cementogruntu, można przyjąć, że pielęgnacja powinna być zgodna z PN-S-96012 [215] i WT-5 [185]. Schematyczny podział warstw przedstawiono na rys. 2.3. Minimalne wytrzymałości na ściskanie jednoosiowe, jakie musi osiągnąć projektowana warstwa stabilizacji w zależności od miejsca wbudowania materiału oraz od kategorii ruchu, została zestawiona w tab. 2.16. Należy zwrócić uwagę, że w zestawieniu nie podano grubości poszczególnych warstw, stąd też w podbudowie zasadniczej nawierzchni jezdni przeznaczonej do ruchu bardzo lekkiego wymagana jest większa wytrzymałość na ściskanie MZSH aniżeli GSSH.

Tab. 2.16 Zakres stosowania i podstawowe wymagania dla stabilizacji cementem.

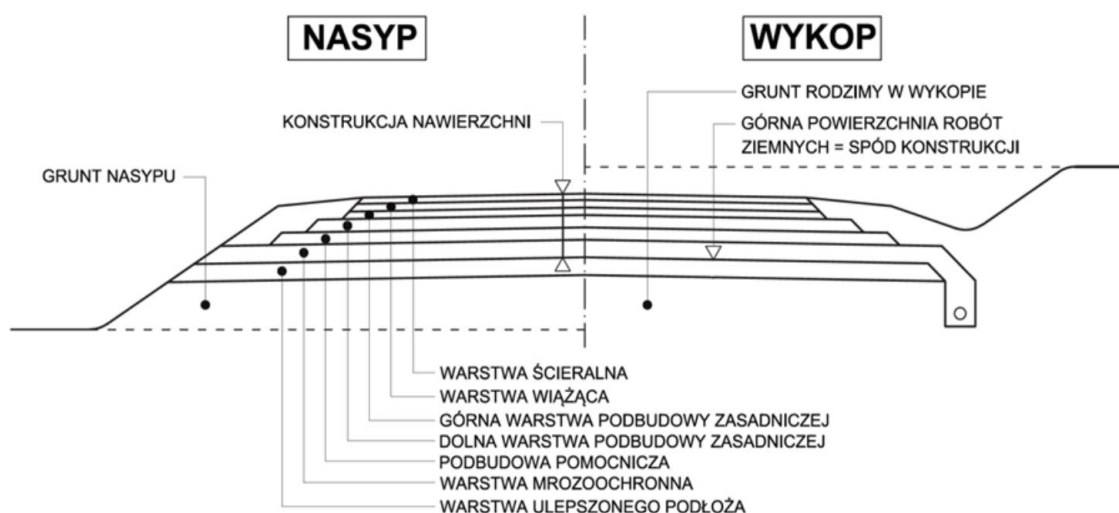
Warstwy konstrukcji nawierzchni i warstwy ulepszanego podłoża	KATEGORIA RUCHU	KTKNPIP	KTKNS	WR-D-63	KTKNPIP	KTKNS	WR-D-63
		MZSH			GSSH		
Podbudowa zasadnicza	KR0	N	N	C _{3/4}	N	N	C _{3/4}
	KR1	C _{3/4}	X	C _{3/4}	C _{3/4}	C _{3/4}	C _{3/4}
	KR2	C _{3/4}	X	C _{3/4}	C _{3/4}	C _{3/4}	C _{3/4}
	KR3	C _{5/6}	X	C _{5/6}	X	C _{5/6}	C _{3/4}
	KR4	C _{5/6}	C _{5/6}	C _{5/6}	X	X	C _{3/4}
	KR5	C _{8/10}	C _{8/10}	C _{8/10}	X	X	C _{3/4}
	KR6	C _{8/10}	C _{8/10}	C _{8/10}	X	X	C _{3/4}
	KR7	C _{8/10}	C _{8/10}	C _{8/10}	X	X	C _{3/4}
Podbudowa pomocnicza	KR0	N	N	X	N	N	X
	KR1	NW	NW	NW	NW	NW	NW
	KR2	NW	NW	NW	NW	NW	NW
	KR3	C _{3/4}	C _{3/4}	C _{3/4}	C _{3/4}	C _{3/4}	C _{3/4}
	KR4	C _{3/4}	C _{3/4}	C _{3/4}	C _{3/4}	C _{3/4}	C _{3/4}
	KR5	C _{5/6}	C _{5/6}	C _{5/6}	X	X	X
	KR6	C _{5/6}	C _{5/6}	C _{5/6}	X	X	X
	KR7	C _{5/6}	C _{5/6}	C _{5/6}	X	X	X
Warstwa mrozochronna	KR1-KR2	C _{1,5/2}	C _{1,5/2}	C _{1,5/2}	C _{1,5/2}	C _{1,5/2}	C _{1,5/2}
	KR3-KR4	C _{1,5/2}	C _{1,5/2}	C _{1,5/2}	C _{1,5/2}	C _{1,5/2}	C _{1,5/2}
Warstwa ulepszanego podłoża	KR1-KR7	X	X	X	C _{0,4/0,5}	C _{0,4/0,5}	C _{0,4/0,5}

N – kategoria ruchu 0 (KR0) nie występuje w KTKNPIP i KTKNS.

X – nie stosuje się,

NW – warstwa nie występuje w rozwiązaniach zaproponowanych w katalogu.

Wspomniane katalogi typowych konstrukcji nawierzchni podatnych, półsztywnych oraz sztywnych [183, 184, 219] nie uwzględniają wymagań dotyczących wskaźnika mrozoodporności. Zgodnie z WT-5 [185] minimalny wskaźnik mrozoodporności powinien być równy lub większy od 0,6 dla podbudowy pomocniczej i 0,7 dla podbudowy zasadniczej. Natomiast w normie PN-S-96012 [215] zostało zapisane, że wskaźnik mrozoodporności dla warstw podbudów powinien wynosić co najmniej 0,7 a dla warstwy ulepszanego podłoża gruntowego co najmniej 0,6. Należy jednak zaznaczyć, że obecnie w Polsce przyjmując grubość nawierzchni zgodnie z obowiązującymi wytycznymi, zakłada się przemarzanie podłoża gruntowego, które uwzględnia ryzyko powstawania w nim wysadzin podczas eksploatacji drogi [122].

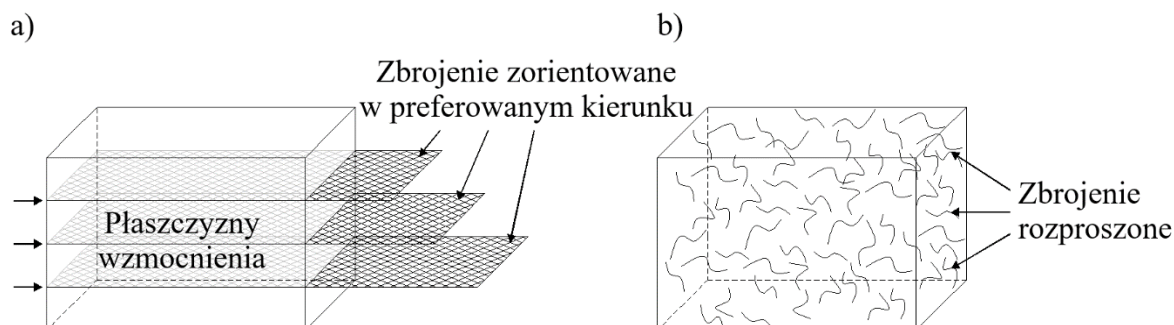


Rys. 2.3 Schemat warstw konstrukcji nawierzchni oraz ulepszanego podłoża [219].

2.3.3. Stabilizacja zbrojeniem rozproszonym

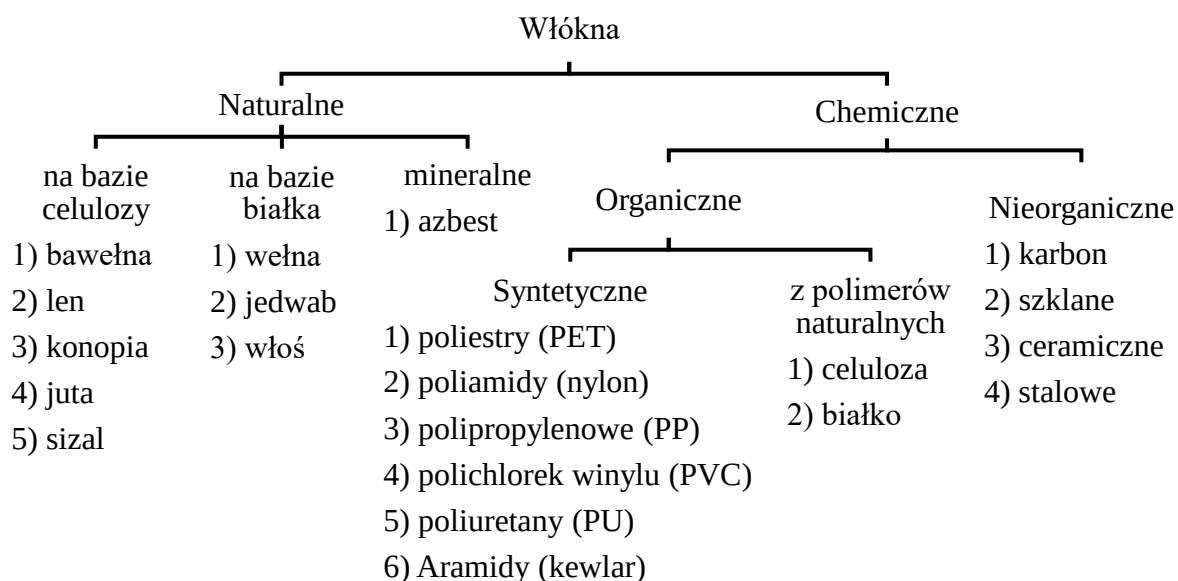
W drugiej połowie XX wieku grunt zbrojony zaczął być obiektem zainteresowań współczesnych inżynierów. Pierwsza technologia gruntu zbrojonego została opracowana w 1963 roku przez francuskiego inżyniera, Henri Vidal [48], który już sześć lat później opublikował prace dotyczącą podstaw gruntu zbrojonego [161]. Grunt wzmocniony zbrojeniem zorientowanym w preferowanym kierunku, które jest wprowadzane sekwencyjnie w warstwach naprzemiennych, charakteryzuje się właściwościami anizotropowymi [96] (Rys 2.4.a). Dodatkowy opór tarcia jest zapewniony wzdłuż wprowadzonych elementów, pomiędzy którymi występują obszary niewzmocnione, w których istnieje wyższe prawdopodobieństwo powstania płaszczyzny uszkodzenia gruntu [58]. W przypadku zastosowania zbrojenia rozproszonego to prawdopodobieństwo jest

mniejsze, ponieważ nie występują obszary niewzmocnione. Takie zbrojenie posiada również wysoką wytrzymałość na rozciąganie, które jest mobilizowane przez naprężenia ścinające w gruncie, co prowadzi do zwiększenia wytrzymałości kompozytu [57, 75]. Na rys. 2.4 przedstawiono klasyfikacje wzmocnienia gruntu ze względu na układ zbrojenia.



Rys. 2.4 Grunt wzmocniony a) tradycyjnym zbrojeniem; b) zbrojeniem rozproszonym.

W związku z tym, że zbrojenie jest dodawane do gruntu i mieszane z nim podobnie jak cement, wapno czy inne dodatki, proces przygotowania mieszanki jest zbliżony do stabilizacji dodatkami [96]. Jedną z głównych zalet zastosowania zbrojenia rozmieszczonego losowo jest zapewnienie izotropowości wzmocnionego gruntu i brak potencjalnych płaszczyzn osłabienia [4, 60, 95]. Oprócz tego zastosowanie takiego zbrojenia pod wieloma względami przypomina tradycyjne wzmocnienie gruntu [59]. W procesie wzmacniania podłoża gruntowego zbrojenie rozproszone zazwyczaj występuje w postaci włókien. W praktyce włókna można podzielić na dwie kategorie: włókna Naturalne i Chemiczne – wytworzone przez człowieka. Na rys. 2.5 przedstawiono klasyfikację włókien wraz z ich rodzajami, które są najczęściej opisywane w literaturze.



Rys. 2.5 Klasyfikacja zbrojenia rozproszonego w postaci włókien [128].

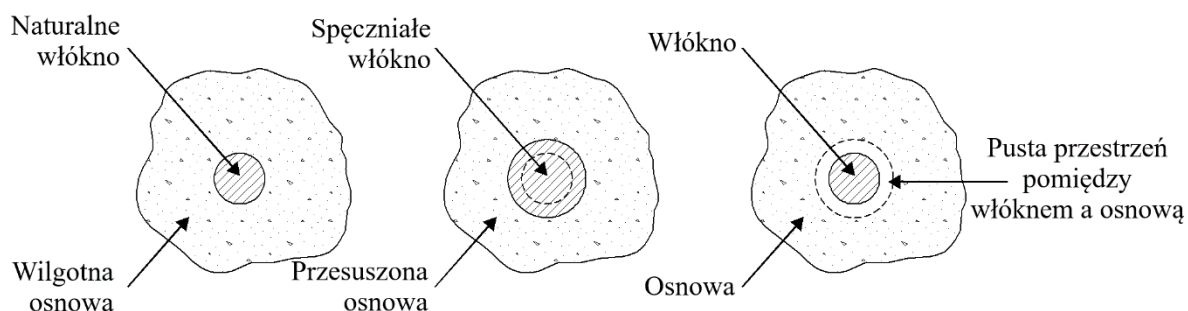
2.3.3.1. Włókna naturalne

Włókna naturalne można sklasyfikować na podstawie ich pochodzenia, gdzie można wyróżnić włókna: na bazie celulozy, czyli pochodzenia roślinnego; na bazie protein zatem pochodzenia zwierzęcego; czy też mineralne [171]. Literatura naukowa szczegółowo opisuje właściwości poszczególnych włókien [68, 144, 171], które zestawiono w tab. 2.17:

1. włókna pochodzenia roślinnego, z nasion, łodyg i liści roślin np. kokos, juta,
2. włókna pochodzenia zwierzęcego z sierści, wełny lub jedwabiu,
3. włókna naturalne na bazie azbestu czy bazaltu.

Z biegiem lat technologia włókien naturalnych, określana jako eko-kompozyt, cieszy się coraz większym zainteresowaniem badaczy w aspekcie wykorzystania ich do wzmacniania podłoża gruntowego. Największą zaletą włókien naturalnych pochodzenia roślinnego jest ich mały wpływ na środowisko. Jednocześnie włókna charakteryzują się wysoką wytrzymałością, niskim kosztem czy też wysoką sztywnością [68, 74, 171]. Właściwości mechaniczne i fizyczne włókien naturalnych zależą głównie od czynników środowiskowych takich jak rodzaj rośliny i gleby, wiek rośliny, metody separacji włókien, wilgotności i temperatury powietrza itp. [56]. W związku z tym niezmiernie trudne jest uzyskanie powtarzalnych właściwości. Pomimo tego, włókna naturalne przez wiele lat były i są wykorzystywane jako elementy zbrojące w gruntach stabilizowanych [56, 68, 138].

Badacze zaobserwowali, że włókna wykazują zdolność do pęcznienia, czyli zmiany średnicy przy wahaniami wilgotności i temperatury otoczenia. W początkowej fazie włókna absorbują wodę z otoczenia, tym samym zwiększając swoją objętość. Następnie wraz z upływem czasu włókna tracą wilgoć, w wyniku czego kurczą się do swoich niemal pierwotnych wymiarów. Następnym zachodzącym zjawiskiem są pozostawione puste przestrzenie pomiędzy włóknem a osnową, jak to przedstawiono na rys. 2.6.



Rys. 2.6 Zjawisko pęcznienia włókien naturalnych w gruncie.

W wyniku całego procesu zmniejsza się przyczepność włókien do osnowy gruntowej [56]. Oprócz tego absorpcja wody przez włókna prowadzi do zwiększenia wilgotności optymalnej mieszanki [97]. Dodatkowo wykorzystanie włókien roślinnych w stabilizacji chemicznej może prowadzić to intensyfikacji rezultatów tego zjawiska. Wynika to z faktu, że osnowa gruntowa w przeciwieństwie do cementogruntu wykazuje większą podatność. Podczas stosowania włókien naturalnych, istotne jest rozpoznanie ich zdolności do wchłaniania wody i wynikających z tego zmian wymiarów, jak również tempo, z jaką to zjawisko zachodzi. Rozwiązaniem może być znalezienie i zastosowanie skutecznego środka hydrofobowego, co może prowadzić do poprawy właściwości adhezyjnych włókien naturalnych [56].

Tab. 2.17 Właściwości przykładowych włókien naturalnych [41].

Materiał włókien	Średnica	Gęstość	Wytrzymałość na rozciąganie	Moduł sprężystości	Wydłużenie przy zerwaniu
[-]	[μm]	[g/cm^3]	[MPa]	[GPa]	[%]
len	12-600	1,4-1,54	343-2000	27,6-103	1,5-3,3
juta	20-200	1,3-1,5	320-773	2,5-26,5	1-2
abaka	18-28	1,5	400-980	6,2-31,1	1-10
sizal	8-400	1,34-1,45	80-750	1,46-38	2-15
banan	50-280	1,35-1,4	500-914	7,7-32	1,5-9
kokos	10-460	1,15-1,46	95-230	1,27-6	15-60
bawełna	10-45	1,5-1,6	287-800	1,1-12,6	6-10
bambus	12-125	0,6-1,1	140-800	11-36	1,3-8
wełna	18-35	1,3	120-240	2-3,5	0,8
azbest	0,03	2,55	620-3450	165	2-3

2.3.3.2. Włókna chemiczne

W literaturze naukowej występuje wiele klasyfikacji włókien wyprodukowanych przez człowieka (z ang. *Man – made fibres*), które również są nazywane syntetycznymi [41, 68, 128, 137, 171]. Początkowo w Polsce włókna te były nazywane sztucznymi. Obecnie zaś w Polskiej nomenklaturze określa się je mianem włókien chemicznych [81, 145]. Klasyfikację przyjętą w pracy przedstawiono na rys. 2.5, gdzie wyróżniono dwie główne grupy włókien chemicznych, czyli włókna Organiczne i Nieorganiczne.

Wymienione grupy włókien podlegają dalszej klasyfikacji, której dokonuje się na podstawie pochodzenia polimerów, rodzaju procesu polimeryzacji i w przypadku włókien nieorganicznych, rodzaju materiału. Włókna organiczne, które są wytwarzane na bazie naturalnych polimerów, można sklasyfikować na podstawie ich pochodzenia. I tak można

wyróżnić włókna organiczne na bazie celulozy i białka [128]. Do ulepszania podłoża gruntowego zazwyczaj wykorzystywane są włókna syntetyczne.

Włókna syntetyczne powstają w wyniku procesów polimeryzacji, jest to proces tworzenia polimerów. Podczas procesu polimeryzacji mniejsze cząsteczki zwane monomerami, łączą się pod wpływem temperatur, ciśnienia i katalizatora, tworząc cząstki i makrocząsteczki, z których powstają polimery [143]. Następnie utworzone polimery są przetwarzane w celu wytworzenia różnego rodzaju produktów z tworzyw sztucznych w tym również zbrojenia rozproszonego. Włókna syntetyczne, można sklasyfikować na podstawie procesu wytwarzania polimerów. Wyróżnia się polimeryzację addycyjną i kondensacyjną [70, 128]. Podczas polimeryzacji addycyjnej wzrost łańcucha polimeru następuje wyłącznie w wyniku reakcji między monomerami a miejscami reaktywnymi na łańcuchu polimeru. Podczas tego procesu nie wytwarzają się produkty uboczne [70, 143]. Do tej grupy można zaliczyć następujące włókna: polietylenowe (PE), polipropylenowe (PP) i akrylowe.

Natomiast polimeryzacja kondensacyjna zwana również stopniową, jest drugim najczęstszym mechanizmem polimeryzacji. Podczas procesu polimeryzacji wzrost łańcucha polimerowego przebiega w sposób stopniowy. Polimeryzacja stopniowa zachodzi na skutek reakcji grup funkcyjnych, które są obecne w monomerach [77, 119]. Podczas zachodzących reakcji dochodzi do uwolnienia małej cząsteczki, takiej jak woda, kwas solny czy amoniak, czyli dochodzi do powstania produktu ubocznego. Cała reakcja zachodzi w sposób stopniowy, stąd też nazwa polimeryzacji ze stopniowym wzrostem [143]. Do opisanej grupy można zaliczyć włókna takie jak nylonowe czy poliestrowe w tym włókna na bazie politereftalanu etylenu, czyli włókna PET. Włókna chemiczne charakteryzują się dużą zmiennością właściwości fizycznych i mechanicznych. Do najważniejszych parametrów można zaliczyć wytrzymałość na rozciąganie i moduł sztywności, od których w dużym stopniu zależy końcowy efekt wzmocnienia gruntu [41]. Zwykle przyjmuje się, że takie włókna charakteryzują się większą wytrzymałością niż włókna naturalne. W zależności od potrzeb mogą być modyfikowane poprzez zmianę właściwości chemicznych czy procesów produkcji [135], w wyniku czego można modyfikować ich sztywność czy rozciągliwość. Kolejną zaletą włókien chemicznych jest ich większa trwałość i mniejsza absorpcja wody niż włókien naturalnych [41]. Właściwości wybranych włókien chemicznych zestawiono w tab. 2.18.

Tab. 2.18 Właściwości przykładowych włókien chemicznych [41].

Materiał włókien	Średnica	Gęstość	Wytrzymałość na rozciąganie	Moduł sprężystości	Wydłużenie przy zerwaniu
[-]	[μm]	[g/cm^3]	[MPa]	[GPa]	[%]
poliester	10-50	1,2-1,4	5800-1100	15-17,5	20-35
aramid	11-12	1,4-1,5	2300-3625	62-120	2-4,5
akryl	19	1,16-1,18	270-1000	13,8-19,6	7,5-50
polipropylen	10-150	0,9-0,95	270-760	1,5-10	15-80
polietylen	40	0,9-0,97	80-3500	5-113	3-100
węgiel	7-18	1,8-2,2	1800-2600	230-380	0,5
szkło	12-20	2,46-2,7	3100-4650	69-86,9	4,4-5,4
bazalt	9	2,65-2,80	3000-4840	89-110	3-315
stal	50-85	7,65-7,85	280-2850	200-210	0,5-3,5

2.3.3.3. Wpływ włókien na parametry wytrzymałościowe

Stabilizacja gruntu włóknami sprawia, że ośrodek gruntowy zachowuje się jak materiał kompozytowy, gdzie włókna osadzone są w matrycy gruntu. Mechanizm wzmocnienia takiego kompozytu polega na mobilizacji wytrzymałości na rozciąganie włókien, do której dochodzi podczas pojawienia się naprężeń ścinających [68]. Dotychczas, w badaniach laboratoryjnych cementogruntu, naukowcy najczęściej wykorzystywali włókna polipropylenowe jako element zbrojący [93, 101, 102, 150, 151]. W literaturze naukowej dostępne są liczne badania cementogruntu przedstawiające wpływ zbrojenia rozproszonego na parametry wytrzymałościowe gruntu stabilizowanego, w tym takie jak:

1. wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie – R_c ,
2. wytrzymałość na rozciąganie – R_t ,
3. wytrzymałość na ścinanie (spójność – c , kąt tarcia wewnętrznego – φ),
4. kalifornijski wskaźnik nośności – CBR.

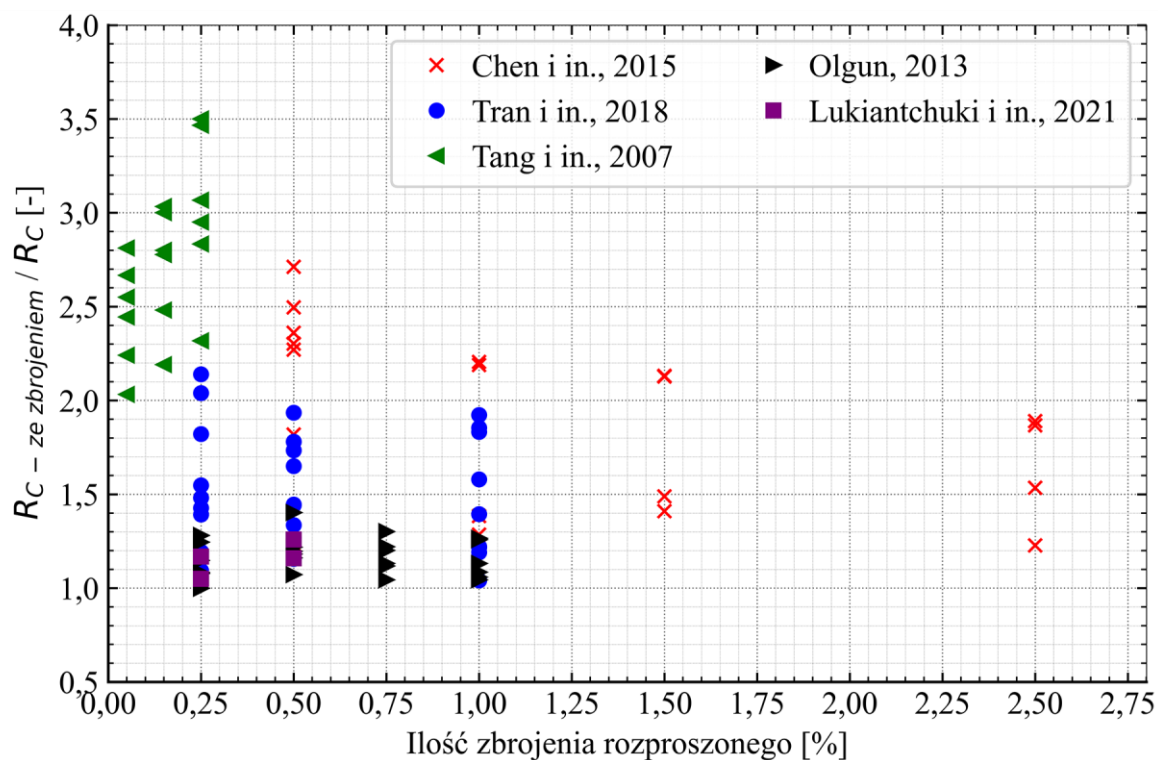
Efektem zastosowania włókien jest zwiększenie wytrzymałości gruntu stabilizowanego na ściskanie, co zostało potwierdzone przez wielu badaczy [26, 93, 110, 150, 155]. Badania wykazują, że istnieje zależność między wzrostem wytrzymałości a ilością zastosowanego zbrojenia rozproszonego w mieszance. Niewielki dodatek włókien polipropylenowych przyczynia się do wzrostu wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie, jednakże w miarę zwiększania ich ilości, efekt ten zanika. Część badaczy odnotowała największy wzrost wytrzymałości przy zawartości włókien polipropylenowych w przedziale od 0,25% do 0,5% w stosunku do masy szkieletu

gruntowego [26, 49, 150, 155, 174]. Istnieją również badania, które wskazują na wzrost wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie nawet do poziomu 2,5% [26, 62, 85]. Opisaną zmianę wytrzymałości przedstawiono przy pomocy efektywności wzmocnienia – stosunek wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie próbek z włóknami i bez nich, co zostało przedstawiono na rys. 2.7. Zjawisko to wynika z referencyjnej wytrzymałości gruntu stabilizowanego – wytrzymałość bez zastosowania zbrojenia. Zaobserwowano, że wraz ze wzrostem zawartości cementu w mieszance, czyli wzrostem wytrzymałości referencyjnej, optymalna zawartość włókien maleje [26], co przedstawiono na rys. 2.8.

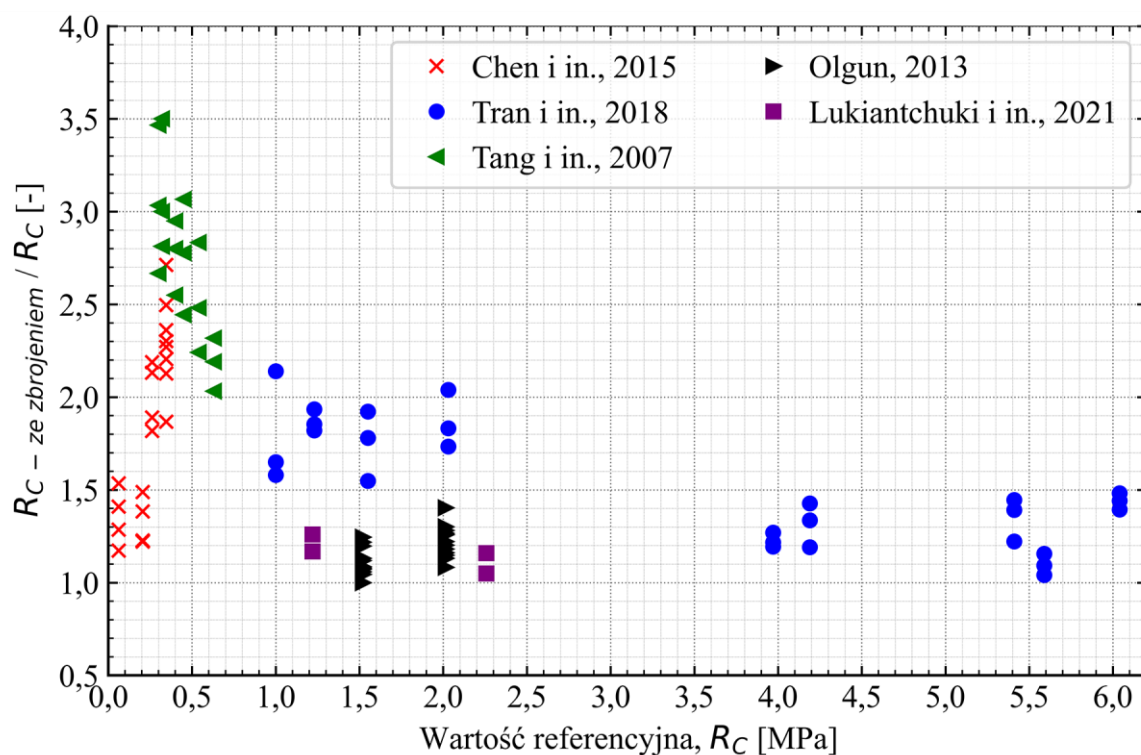
Oprócz zawartości włókien, istotnym czynnikiem wpływającym na zmianę wytrzymałości gruntu stabilizowanego jest ich długość [110]. Zaobserwowano, że wytrzymałość cementogruntu wzrasta wraz ze wzrostem długości włókien [26], jednak tylko do pewnego momentu, po którym efektywność wzmocnienia zaczyna spadać. Badania wykazały, że najlepszy efekt wzmocnienia uzyskuje się przy wykorzystaniu włókien o długości 12 mm [26, 62, 110, 169]. Zastosowanie zarówno krótszych, jak i dłuższych włókien prowadziło do osiągnięcia mniejszej efektywności wzmocnienia, co przedstawiono na rys. 2.9.

W przypadku krótszych włókien, spadek efektywności wzmocnienia może być spowodowany brakiem pełnej mobilizacji tarcia pomiędzy zbrojeniem a gruntem stabilizowanym. Natomiast przy zastosowaniu dłuższych włókien, może dojść do powstania ich lokalnych skupisk, czyli ich splątania [110], co jest analogiczne do sytuacji z zastosowaniem zbyt dużej ilości włókien w mieszance. Dodatkowo należy zwrócić uwagę, że stosunek długości włókien do rozmiaru badanej próbki nie zawsze będzie odzwierciedlał warunki terenowe [93]. Opisywany efekt skali należy rozważyć podczas wykonywania badań laboratoryjnych.

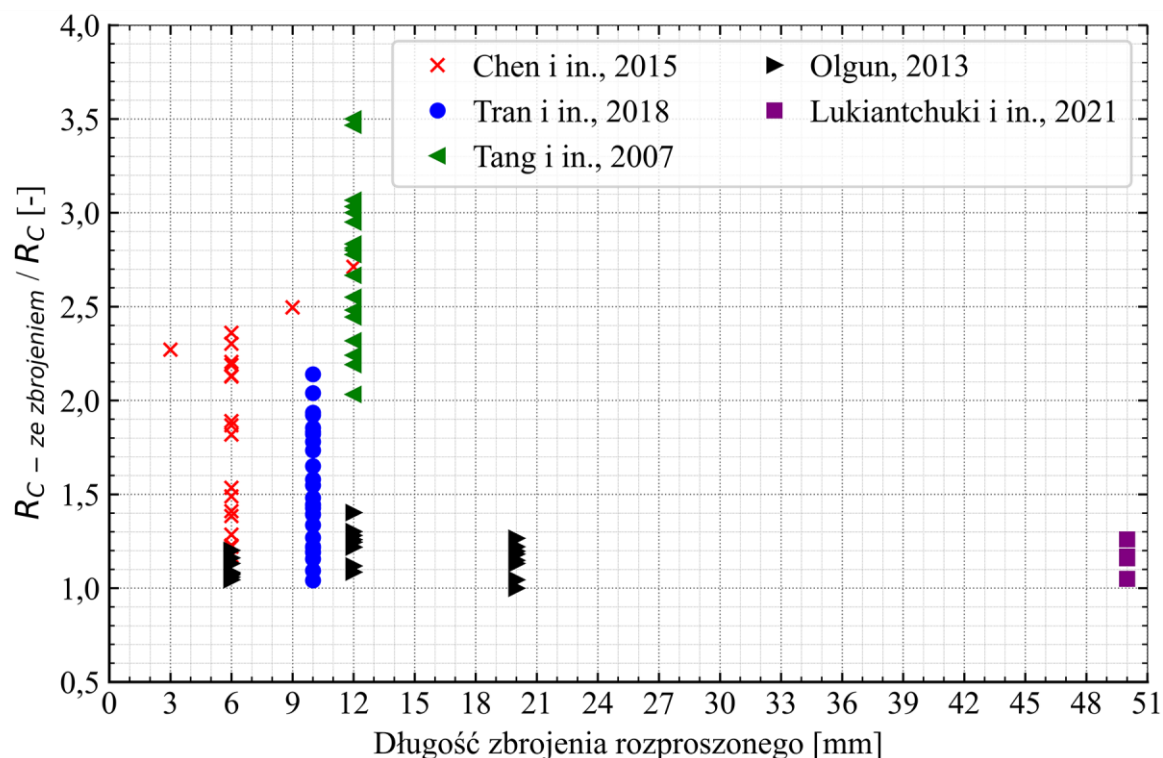
Opisywana utrata efektywności wzmocnienia może być wynikiem nieprawidłowego rozmieszczenia zbrojenia rozproszonego w gruncie stabilizowanym. Przy zastosowaniu wyższej zawartości włókien może dochodzić do ich splątania oraz miejscowej akumulacji. Następstwem czego jest utrudnione tworzenie się połączeń włókno – cementogrunt, w wyniku czego dochodzi do mniejszego efektu wzmocnienia [26]. Zjawisko to może być już widoczne na etapie mieszania ze sobą poszczególnych składników mieszanki cementogruntu w warunkach laboratoryjnych. Jednak podczas procesu mieszania w warunkach terenowych splątania włókien mogą pozostać niezauważone.



Rys. 2.7 Wpływ ilości włókien na wytrzymałość na ściskanie [26, 93, 110, 150, 155].



Rys. 2.8 Wpływ wytrzymałości na efektywność wzmocnienia [26, 93, 110, 150, 155].



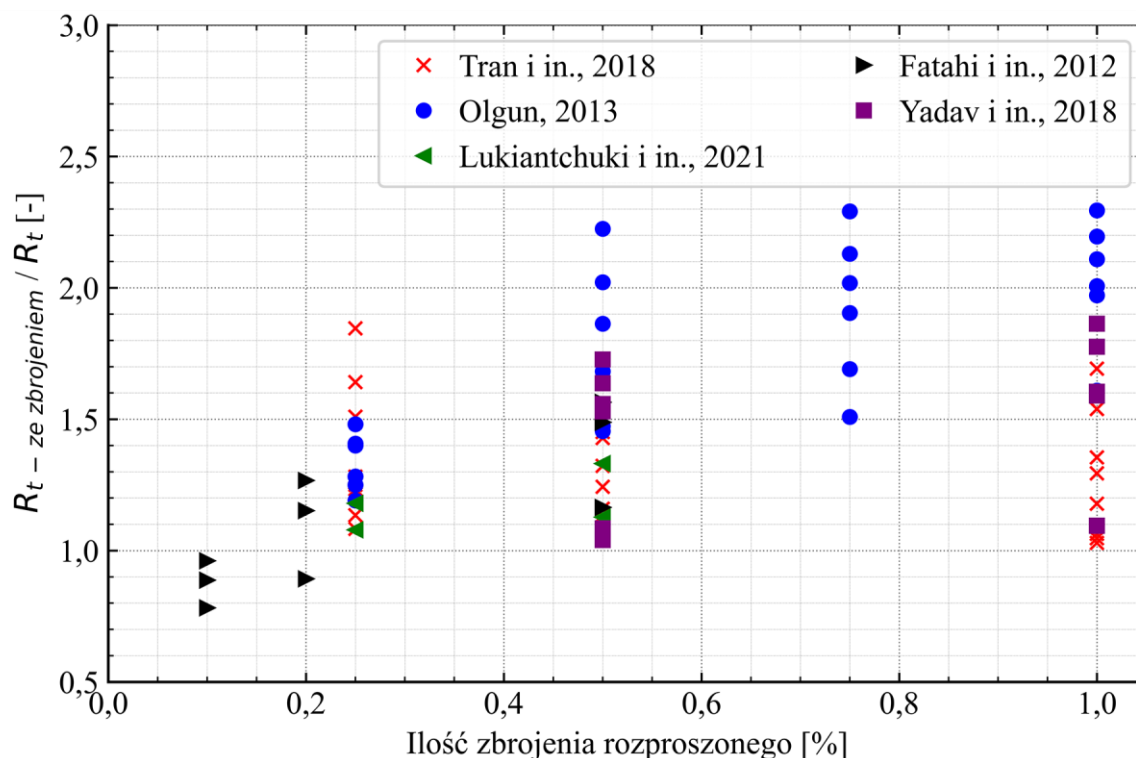
Rys. 2.9 Wpływ długości włókien na wytrzymałość na ściskanie [26, 93, 110, 150, 155].

Zastosowanie zbrojenia rozproszonego zwiększa nie tylko wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie, lecz również wytrzymałość na rozciąganie [62]. Sam efekt wzmocnienia jest zależny od ilości, jak i długości włókien, podobnie jak podczas określania wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie. Istnieje jednak różnica pomiędzy optymalną zawartością włókien w mieszankach, przy której uzyskuje się największy wzrost efektywności wzmocnienia. O ile dla wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie optymalna zawartość włókien mieści się w przedziale od 0,25% do 0,5%, to w przypadku wytrzymałości na rozciągania nie występuje wyraźny przedział optymalnej zawartości. Z przeprowadzonych badań wynika, że efektywność wzmocnienia może wzrastać do 0,5% [49, 93], 1% [110, 169] czy nawet 2% [62] zawartości zbrojenia rozproszonego w mieszance. Jednak przy niższych zawartościach włókien może nastąpić zmniejszenie efektywności wzmocnienia co zostało zbadane przez Fatahi i in [49]. Zmianę efektywności wzmocnienia w miarę wzrostu ilości zbrojenia rozproszonego w mieszance przedstawiono na rys. 2.10. Kolejnym czynnikiem wpływającym na efektywność wzmocnienia gruntu stabilizowanego jest długość włókien. Zjawisko to zaobserwował m.in. Olgun [110], który podczas badań gruntu stabilizowanego o tej samej zawartości spoiwa odnotował zmniejszenie wytrzymałości na rozciąganie w mieszankach zawierających 0,75% włókien o długości 20 mm. Natomiast przy zastosowaniu włókien o długości 12 mm, przy tej samej

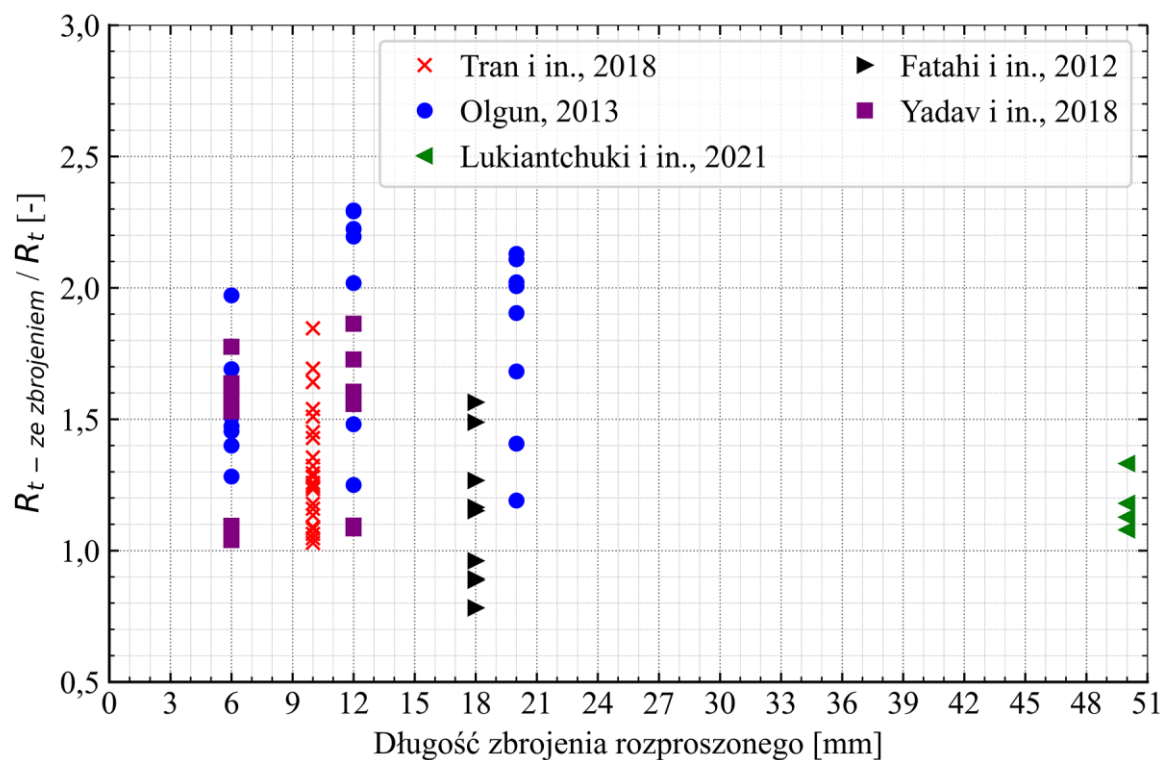
zawartości spoiwa, odnotował wzrost wytrzymałości na rozciąganie. Zależność efektywności wzmocnienia od długości włókien pokazano na rys. 2.11.

Rozpatrując wyniki wzmocnienia, uzyskane przez różnych autorów, można dostrzec, że wraz ze wzrostem wytrzymałości referencyjnej, efektywność wzmocnienia maleje. Podobne obserwacje w swojej pracy poczynili Lukiantchuki i in. [93], którzy stwierdzili, że większą efektywność wzmocnienia można uzyskać na mieszankach gruntu i zbrojenia niż gruntu stabilizowanego i zbrojenia. Zależność efektywności wzmocnienia od wytrzymałości referencyjnej na rozciąganie przedstawiono na rys. 2.12.

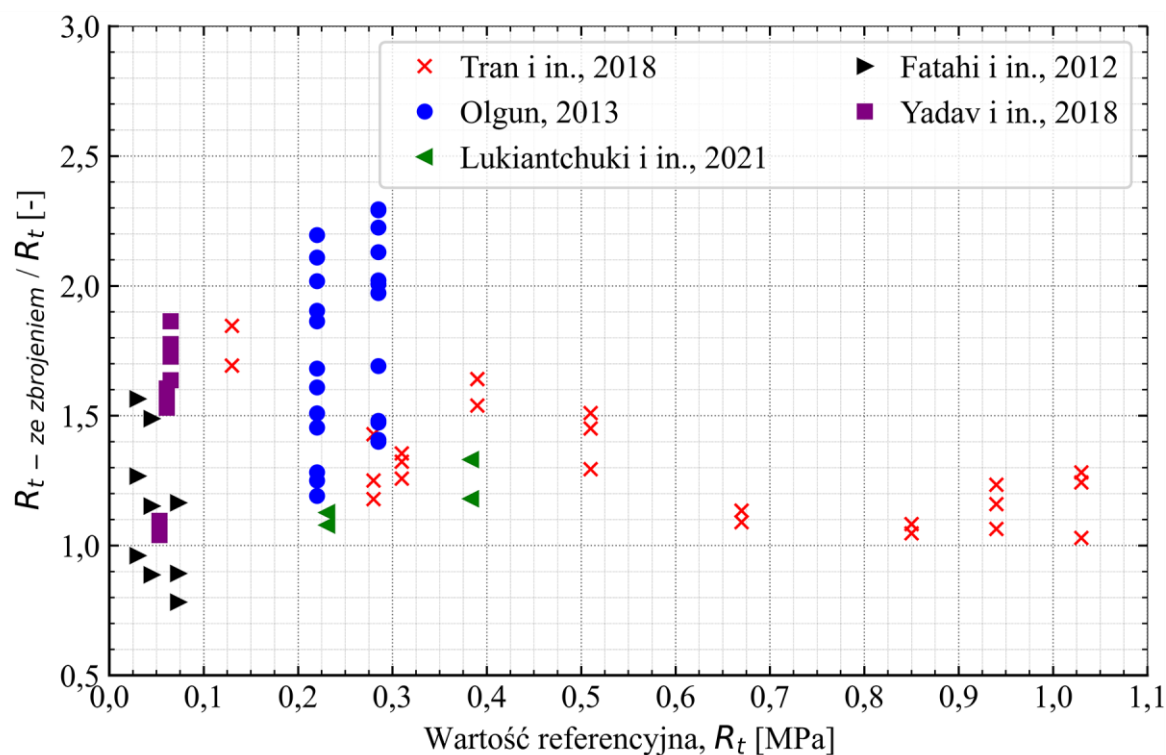
Analizując wpływ włókien na grunt stabilizowany, należy wspomnieć o stosunku wytrzymałości na rozciąganie do wytrzymałości na ściskanie. Zależność ta w gruntach stabilizowanych bez włókien zazwyczaj mieści się w przedziale od 9% do 14% [31], gdzie za typową wartość można przyjąć 10% [42]. Fatahi i in. [49] w badaniach przeprowadzonych na stabilizowanych gruntach spoistych z włóknami polipropylenowymi uzyskali wzrost stosunku badanych wytrzymałości w zakresie od 10% do prawie 16%. Natomiast Olgun [110] stosując włókna w ilości do 1%, uzyskał nieliniowy wzrost stosunku wytrzymałości na rozciąganie i ściskanie w przedziale od 14% do nawet 25%. Rozbieżność pomiędzy wynikami autorów może wynikać z różnych wytrzymałości referencyjnych próbek.



Rys. 2.10 Wpływ ilości włókien na wytrzymałość na rozciąganie [49, 93, 110, 155, 169].



Rys. 2.11 Wpływ dł. włókien na wytrzymałość na rozciąganie [49, 93, 110, 155, 169].



Rys. 2.12 Wpływ wytrzymałości na efektywność wzmocnienia [49, 93, 110, 155, 169].

W większości prac naukowych wytrzymałość na rozciąganie jest określana w sposób pośredni, poprzez test brazylijski. Można przypuszczać, że jest to związane z relatywnie niską wytrzymałością gruntu stabilizowanego, co skutkuje trudnościami w skutecznym połączeniu próbki z uchwytem aparatury badawczej. Dlatego też w celu przeprowadzenia badań bezpośredniego rozciągania, konieczne jest zwiększenie wytrzymałości cementogruntu, co można osiągnąć poprzez zwiększenie ilości spoiwa. Jednak zastosowana metoda badawcza do określania wytrzymałości na rozciąganie gruntu stabilizowanego z dodatkiem włókien w istotny sposób wpływa na otrzymywane rezultaty. Spowodowane jest to wpływem włókien na charakterystykę odkształceniową cementogruntu, który w wyniku dodania zbrojenia rozproszonego zmienia się z materiału kruchego w bardziej plastyczny [38]. Zmianę tą dobrze obrazują badania przeprowadzone przez Correira [38], który zbadał wpływ włókien polipropylenowych i cementu portlandzkiego na wytrzymałość na rozciąganie stabilizowanego gruntu organicznego. W tym celu przeprowadzono m.in. badania rozciągania pośredniego oraz bezpośredniego próbek, w których zawartość cementu wynosiła od 125 kg/m³ do 500 kg/m³ dla rozciągania pośredniego oraz od 375 kg/m³ do 500 kg/m³ dla rozciągania bezpośredniego. W zależności od rodzaju przeprowadzonego badania zaobserwowano różne zmiany charakterystyki odkształceniowej. Podczas badania rozciągania pośredniego odnotowano zmianę charakterystyki odkształceniowej badanych próbek z kruchej na bardziej plastyczną. Taka zmiana powoduje trudność w precyzyjnym określeniu odkształcenia, przy którym doszło do pęknięcia próbki. Natomiast podczas badania rozciągania bezpośredniego pomimo zastosowania włókien polipropylenowych cementogrunty zachowywały się jak materiał kruchy, który charakteryzował się wytrzymałością pogniszczeniową. Na tej podstawie należy stwierdzić, że wpływ włókien na wytrzymałość na rozciąganie zależy zarówno od ilości zastosowanych włókien jak i od rodzaju przeprowadzanego badania [38].

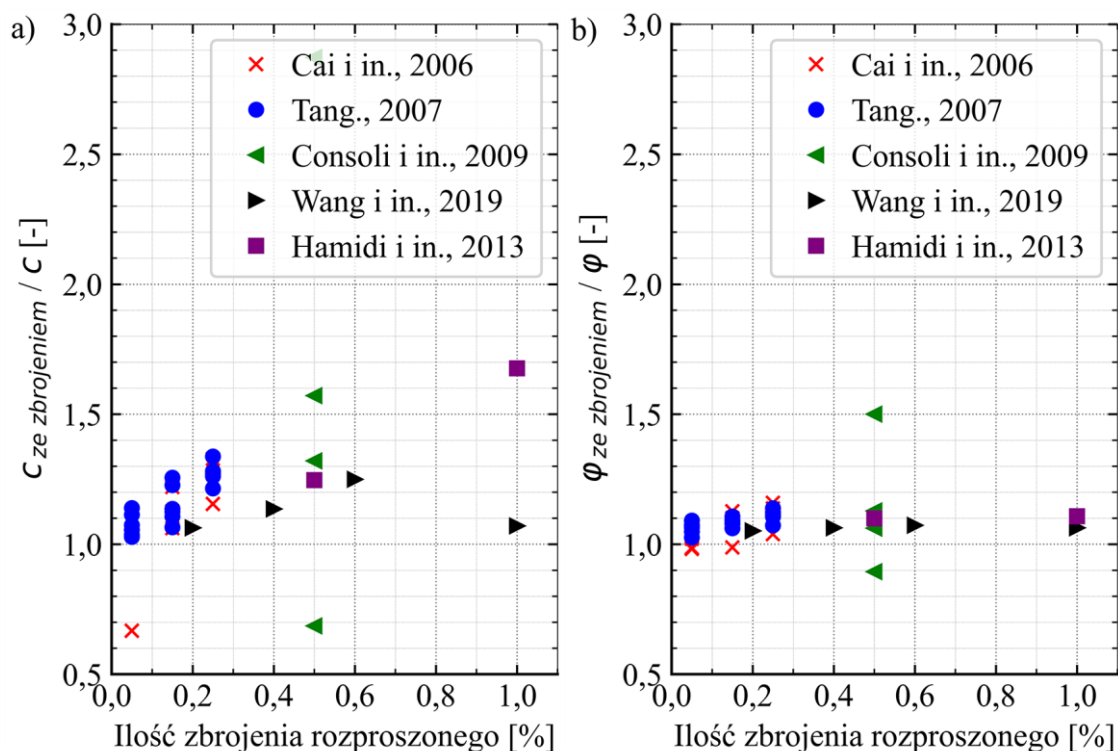
Następnym opisywanym parametrem jest wytrzymałość na ścinanie, która jest definiowana jako opór, jaki dany ośrodek stawia siłom przesuwającym, w odniesieniu do jednostki powierzchni [148]. Parametr ten rzadziej jest obiektem badań aniżeli wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie czy rozciąganie gruntu stabilizowanego. W dostępnych opracowaniach, w celu wyznaczenia spójności (c) oraz kąta tarcia wewnętrznego (φ), czyli parametrów do kryterium zniszczenia Coulomba – Mohra, powszechnie wykorzystywane są dwa rodzaje badań, badanie bezpośredniego ścinania i badanie trójosiowego ściskania.

Badania bezpośredniego ścinania gruntu stabilizowanego z dodatkiem włókien polipropylenowych zostały przeprowadzone m.in. przez Cai i in. [23] oraz Tang i in. [150]. Autorzy badali wpływ włókien w ilości do 0,25% na parametry takie jak φ i c , dla gruntów stabilizowanych wapnem i cementem w ilości do 8%. Na podstawie badań autorzy stwierdzili, że zawartość włókien w znaczący sposób wpływa zarówno na wzrost spójności, jak i kąta tarcia wewnętrznego [23, 150]. Należy jednak zaznaczyć, że w obu badaniach zastosowana ilość włókien była relatywnie niska, w związku z czym nie osiągnięto ilości, przy której odnotowano spadek wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie.

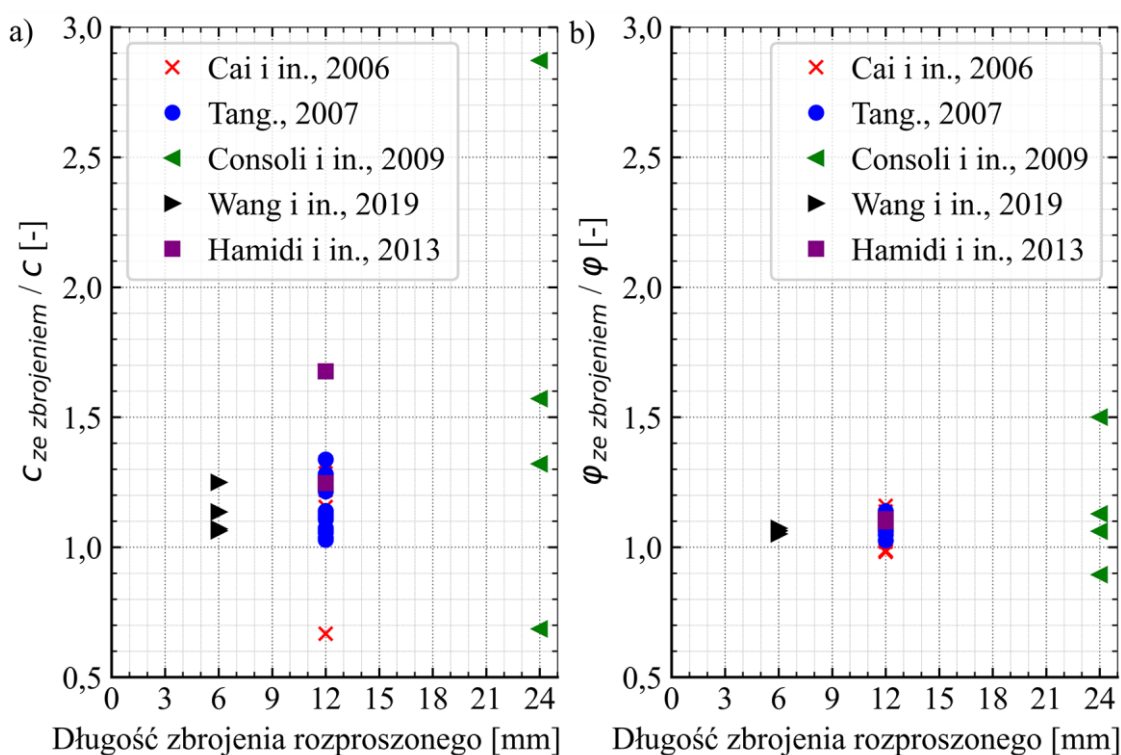
Badania trójosiowego ściskania gruntu stabilizowanego z dodatkiem włókien polipropylenowych zostały przeprowadzone m.in. przez Wang i in. [163], Hamidi i Hooresfand [63] oraz Consoli i in. [32]. W pierwszym badaniu przeprowadzono badania typu UU (z ang. *Unconsolidated Undrained*), czyli badania bez konsolidacji i drenażu. Następne przeprowadzone badania były typu CD (z ang. *consolidated drained*), czyli z konsolidacją i drenażem. Wszystkie badania przeprowadzono po 7 dniach utwardzania. W pierwszym badaniu autorzy odnotowali spadek parametrów φ i c w mieszankach z zawartością powyżej 0,6% włókien polipropylenowych, z kolei podczas drugiego badania nie odnotowano spadku efektywności wzmocnienia. Następnie w badaniu trzecim przeanalizowano wpływ zbrojenia rozproszonego w ilości 0,5% przy zmiennej zawartości cementu. Wyniki badań wskazują, że kąt tarcia zaczyna spadać w mieszankach zawierających 7% cementu a spójność dopiero przy 10% cementu. Przedstawione wyniki badań trójosiowego ściskania należy uznać za niejednoznaczne.

Analizując przytoczone badania, można stwierdzić, że włókna polipropylenowe w znaczący sposób zwiększają spójność i w mniejszym stopniu kąt tarcia wewnętrznego. Dodatkowo nie ma widocznej granicy zastosowanej ilości włókien, powyżej której następuje osłabienie efektywności wzmocnienia, co przedstawiono na rys. 2.13. Wpływ długości zbrojenia rozproszonego na parametry takie jak kąt tarcia wewnętrznego oraz spójność są niejednoznaczne, co uniemożliwia jednoznaczne określenie ich optymalnej długości, co przedstawiono na rys. 2.14. Analogicznie jak przy określaniu wpływu długości i ilości włókien, wartość referencyjna nie wpływa znacząco na efektywność wzmocnienia badanych parametrów, wyjątek stanowią badania przeprowadzone przez Consoli i in. [32]. Wpływ wartości referencyjnej kąta tarcia i spójności na efektywność wzmocnienia został przedstawiony na rys. 2.15. Warto podkreślić, że zestawione badania były przeprowadzane zarówno w aparacie bezpośredniego ścinania, jak i w aparacie trójosiowego ściskania, przy

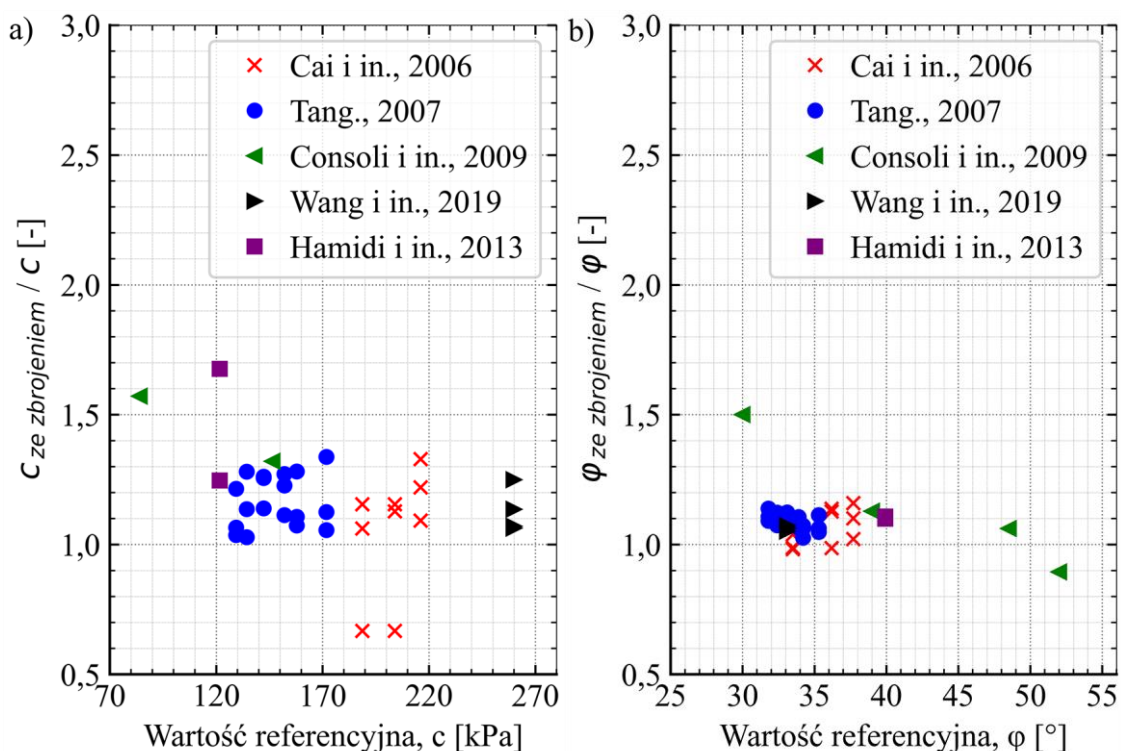
różnych warunkach konsolidacji i drenażu. Różnorodność tych metod badawczych może być przyczyną braku jednoznacznych przedziałów optymalnej zawartości włókien.



Rys. 2.13 Wpływ ilości włókien na: a) spójność; b) kąt tarcia wew. [23, 32, 63, 150, 163].



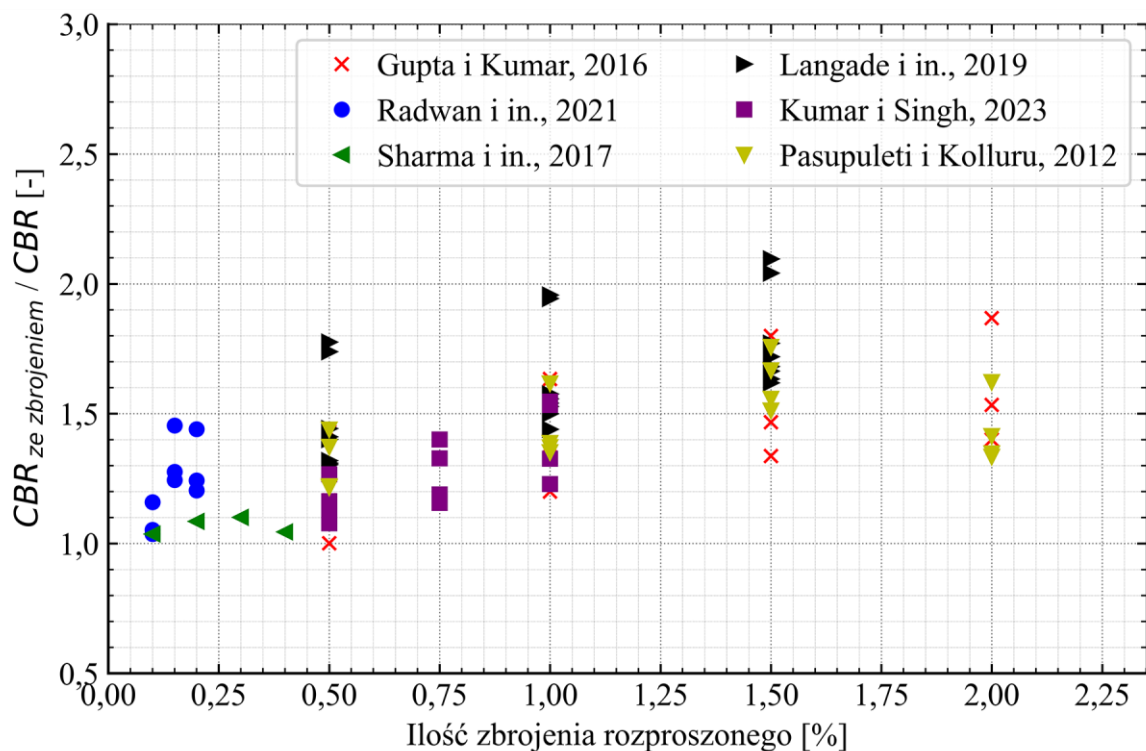
Rys. 2.14 Wpływ dł. włókien na: a) spójność; b) kąt tarcia wew. [23, 32, 63, 150, 163].



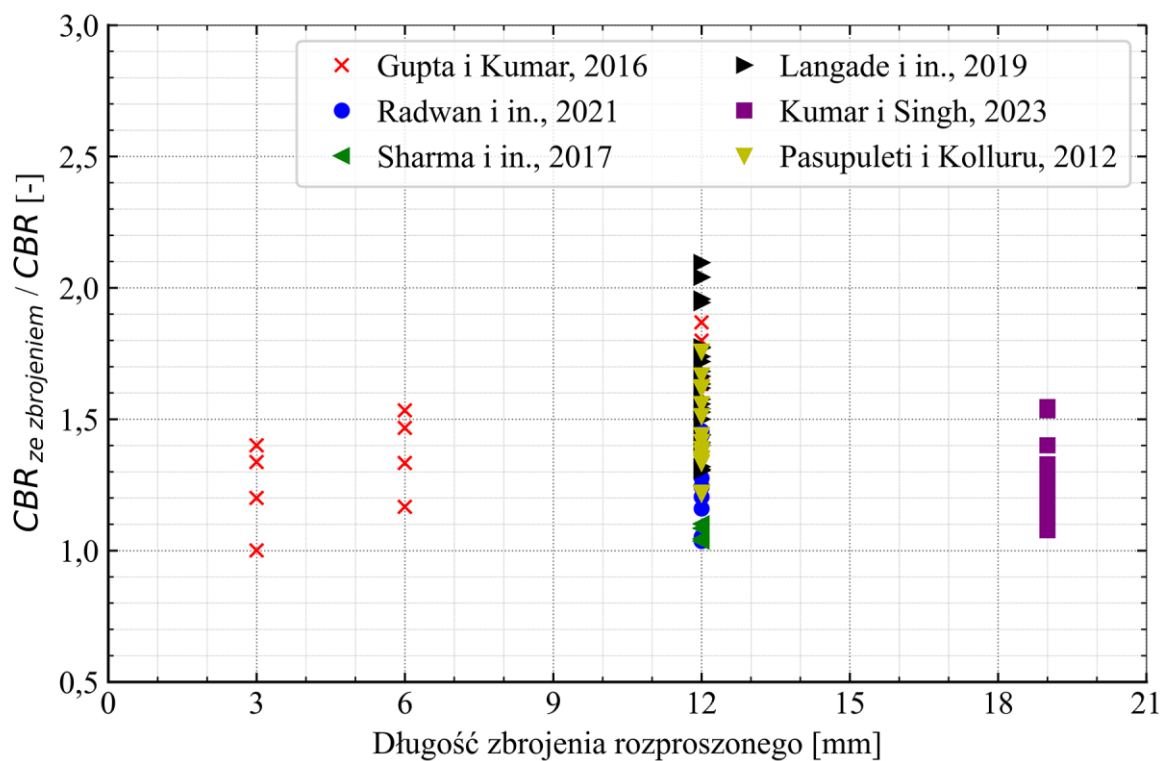
Rys. 2.15 Wpływ wartości ref. na: a) spójność; b) kąt tarcia wew. [23, 32, 63, 150, 163].

Ostatnim opisywanym parametrem wytrzymałościowym cementogruntu jest kalifornijski wskaźnik nośności, który podobnie jak wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie czy też rozciąganie wzrasta wraz z dodaniem włókien polipropylenowych. Badania w tym zakresie prowadzili m.in. Gupta i Kumar [62], Pasupuleti i Kolluru [112] oraz Sharma [142]. We wszystkich przywołanych pracach autorzy analizowali wpływ włókien polipropylenowych na wartość wskaźnika CBR stabilizowanych gruntów spoistych po 4 dniach nasączenia wodą. Podczas pierwszego badania uzyskano wzrost efektywności wzmocnienia we wszystkich analizowanych mieszankach, z dodatkiem do 2% włókien. Dodatkowo odnotowano wzrost wskaźnika CBR poprzez zwiększenie długości włókien. W drugim badaniu analizowano wpływ włókien o długości 12 mm przy zmiennej ilości środka stabilizującego, wynikiem czego był wzrost efektywności wzmocnienia do zawartości 1,5% zbrojenia rozproszonego. W badaniu trzecim przeanalizowano wpływ zawartości włókien w zakresie od 0,1% do 0,4% na wartość wskaźnika CBR. Autorzy badania odnotowali spadek efektywności wzmocnienia w mieszankach zawierających powyżej 0,3% zbrojenia rozproszonego. Na podstawie omówionych badań można stwierdzić, że optymalna zawartość włókien mieści się w przedziale od 1% do 2%, co widać na rys. 2.16. Optymalna długość włókien wynosi 12 mm, co pokazano na rys. 2.17.

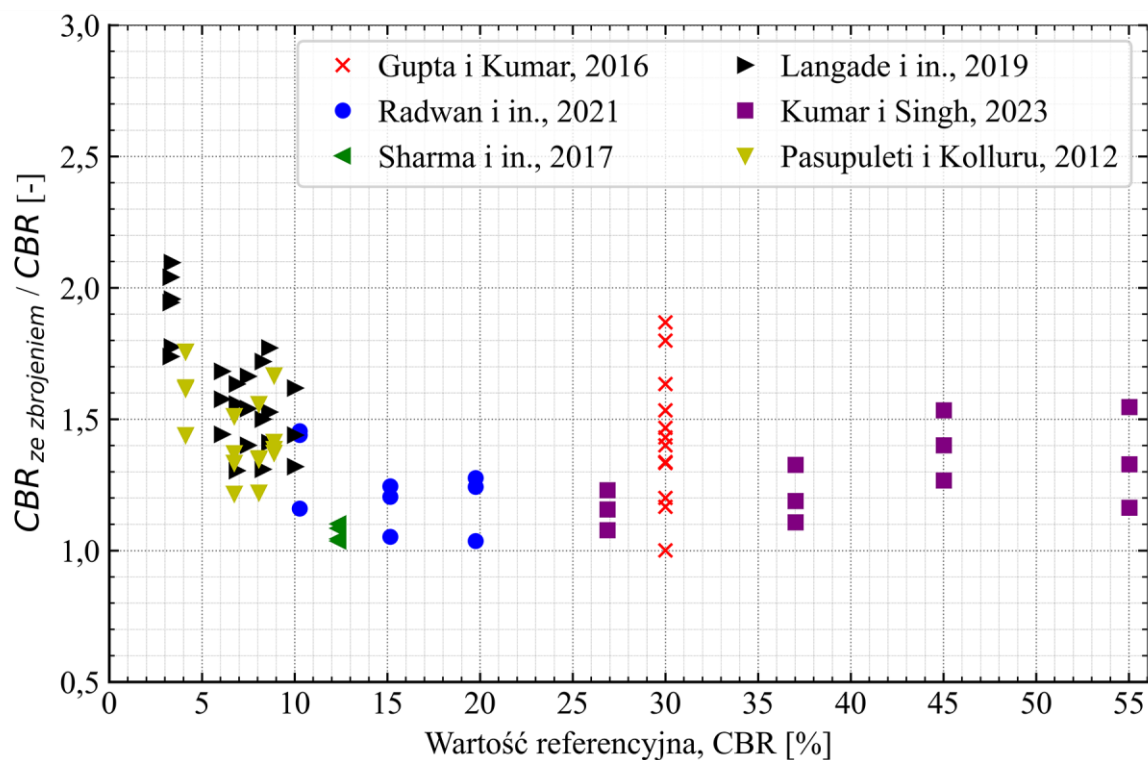
Natomiast efektywność wzmocnienia maleje wraz ze wzrostem wartości referencyjnej, co zostało przedstawione na rys. 2.18. Wszystkie omówione publikacje zestawiono w tab. 2.19.



Rys. 2.16 Wpływ ilości włókien na efektywność wzmocnienia wskaźnika CBR, [62, 86, 89, 112, 121, 142].



Rys. 2.17 Wpływ długości włókien na efektywność wzmocnienia wskaźnika CBR, [62, 86, 89, 112, 121, 142].



Rys. 2.18 Wpływ wartości referencyjnej na efektywność wzmocnienia wskaźnika CBR, [62, 86, 89, 112, 121, 142].

Tab. 2.19 Wykaz zastosowanych gruntów, spoiw i włókien w zestawionych badaniach.

Grunt	Spoiwo	Włókna	Autorzy
spoisty	wapno	PP – 12 mm	Cai i in., 2006 [23]
spoisty	cement	PP – 3/6/9/12 mm	Chen i in., 2015 [26]
niespoisty	cement	PP – 24 mm	Consoli i in., 2009 [32]
spoisty	cement	PP – 18 mm	Fatahi i in., 2012 [49]
spoisty	cement i popiół	PP – 3/6/12 mm	Gupta i Kumar, 2016 [62]
niespoisty	cement	PP – 12 mm	Hamidi i in., 2013 [63]
popiół	cement	PP – 12/19 mm	Kumar i Singh, 2023 [86]
spoisty	cement	PP – 12 mm	Langade i in., 2019 [89]
niespoisty destrukt	cement	PP – 50 mm	Lukiantchuki i in., 2021 [93]
spoisty	cement i popiół	PP - 6/12/20 mm	Olgun, 2013 [110]
organiczny	cement	PP – 12 mm	Radwan i in., 2021 [121]
spoisty	pył klinkierowy	PP – 12 mm	Sharma i in., 2017 [142]
spoisty	cement	PP – 12 mm	Tang i in., 2007 [150]
spoisty	cement	Kukurydziane 10 mm	Tran i in., 2018 [155]
spoisty	cement	PP - 6	Wang i in., 2019 [163]
spoisty	cement & popiół	PP-6/12 mm	Yadav i in., 2018 [169]

2.3.3.4. Wpływ włókien na parametry odkształceniowe

Zastosowanie włókien w gruncie stabilizowanym, poza wpływem na parametry wytrzymałościowe, powoduje zmianę odkształcalności materiału, który zasadniczo jest materiałem kruchym. Najbardziej zauważalną zmianą, jaka zachodzi, jest zwiększenie plastyczności materiału [34]. Bezwzględna miarą zachodzących zmian zachowania się materiału jest wskaźnik kruchości (I_B), który został zdefiniowany dla gruntów jako procentowe zmniejszenie wytrzymałości przy przejściu ze stanu w chwili zniszczenia do stanu rezydualnego [20]. Materiały, kiedy osiągają wartość ($I_B = 1$), zachowują się jak materiał całkowicie kruchy, to znaczy, że następuje całkowita utrata wytrzymałości po przekroczeniu wytrzymałości na ścinanie w chwili zniszczenia materiału. Natomiast materiały plastyczne, których wytrzymałość rezydualna równa jest wartości szczytowej, osiągają wartość ($I_B = 0$). Interpretację graficzną wskaźnika kruchości przedstawiono na rys. 2.19 i opisano wzorem 2.17.

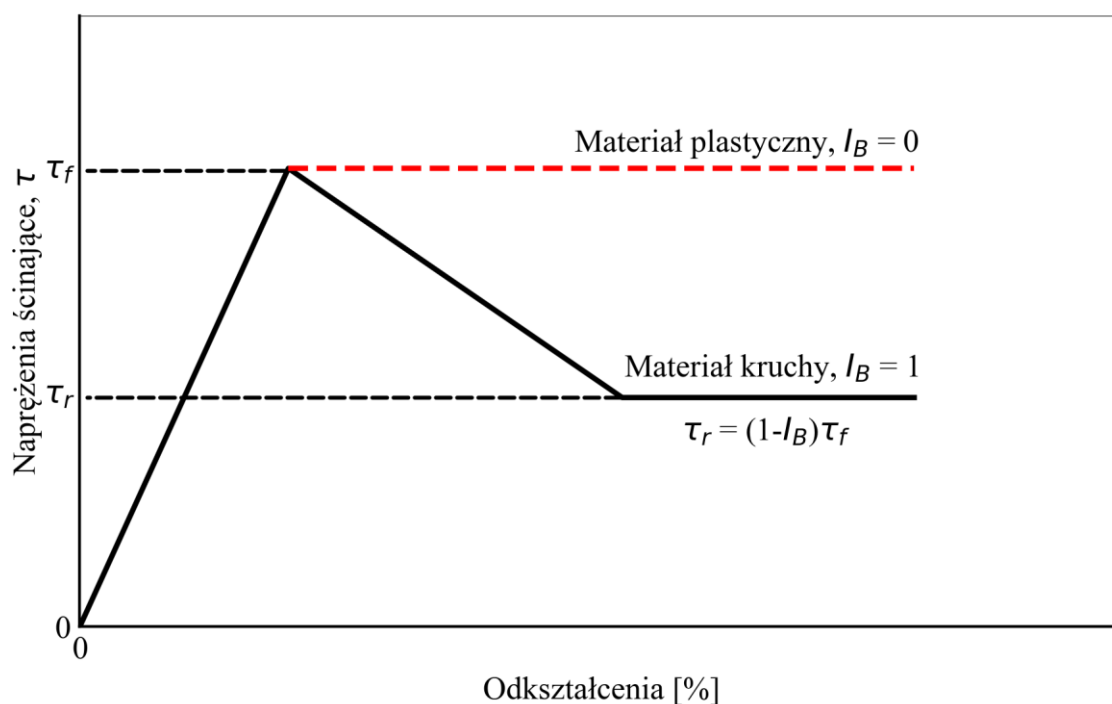
$$I_B = \frac{\tau_f - \tau_r}{\tau_f} \quad 2.17$$

gdzie:

I_B – wskaźnik kruchości,

τ_f – Wytrzymałość na ścinanie w chwili zniszczenia materiału,

τ_r – Rezydualna wytrzymałość na ścinanie.



Rys. 2.19 Schemat do interpretacji wskaźnika kruchości.

W przypadku badań gruntów stabilizowanych stosunkowo rzadko przeprowadzane są badania mające na celu określenie wytrzymałości na ścinanie w aparacie trójosiowego ściskania. W związku z tym zaproponowano zmodyfikowane wskaźniki kruchości, które wykorzystują podstawowe i ogólnodostępne badania jednoosiowego ściskania i rozciągania. Takie wskaźniki zostały użyte do oceny wpływu włókien stalowych i polipropylenowych na grunt stabilizowany w pracy Venda Oliveira i in. [160]. Wskaźniki opierające się na wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie zostały opisane wzorami 2.18 i 2.19.

$$I_B = 1 - \frac{R_{c(\varepsilon/\varepsilon_c)}}{R_c} \quad 2.18$$

$$I_B = 1 - \frac{R_{t(\varepsilon/\varepsilon_t)}}{R_t} \quad 2.19$$

gdzie:

I_B – wskaźnik kruchości,

R_c – Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie,

R_t – Wytrzymałość na rozciąganie,

$R_{c(\varepsilon/\varepsilon_c)}$ – Wytrzymałość na ściskanie przy dwukrotnym odkształceniu R_c ,

$R_{t(\varepsilon/\varepsilon_t)}$ – Wytrzymałość na rozciąganie przy dwukrotnym odkształceniu R_t .

Wyniki pracy wyraźnie potwierdziły, że zastosowanie dowolnego rodzaju włókien zmniejszyło kruchość w stosunku do materiału niewzmocnionego zbrojeniem. Jednak stopień zmniejszenia w przypadku włókien polipropylenowych był zdecydowanie większy aniżeli włókien stalowych. Należy również zwrócić uwagę na stosunkowo duże różnice wskaźników wyznaczonych na podstawie rozciągania pośredniego i bezpośredniego, które w przybliżeniu wynosiły odpowiednio 0,4 i 0,05.

W literaturze naukowej występują również inne odmiany wskaźnika, przykładem może być wskaźnik zaproponowany przez Consoli i in. [34], który jest stosowany również przez innych autorów [49, 63, 104]. Wskaźnik ten można zapisać wzorem 2.20, a rezydualną wartość dewiatora naprężenia można obliczyć przy pomocy wzoru 2.21.

$$I_B = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{rez}} - 1 \quad 2.20$$

$$\sigma_{rez} = \frac{\sigma_{max}}{I_B + 1} \quad 2.21$$

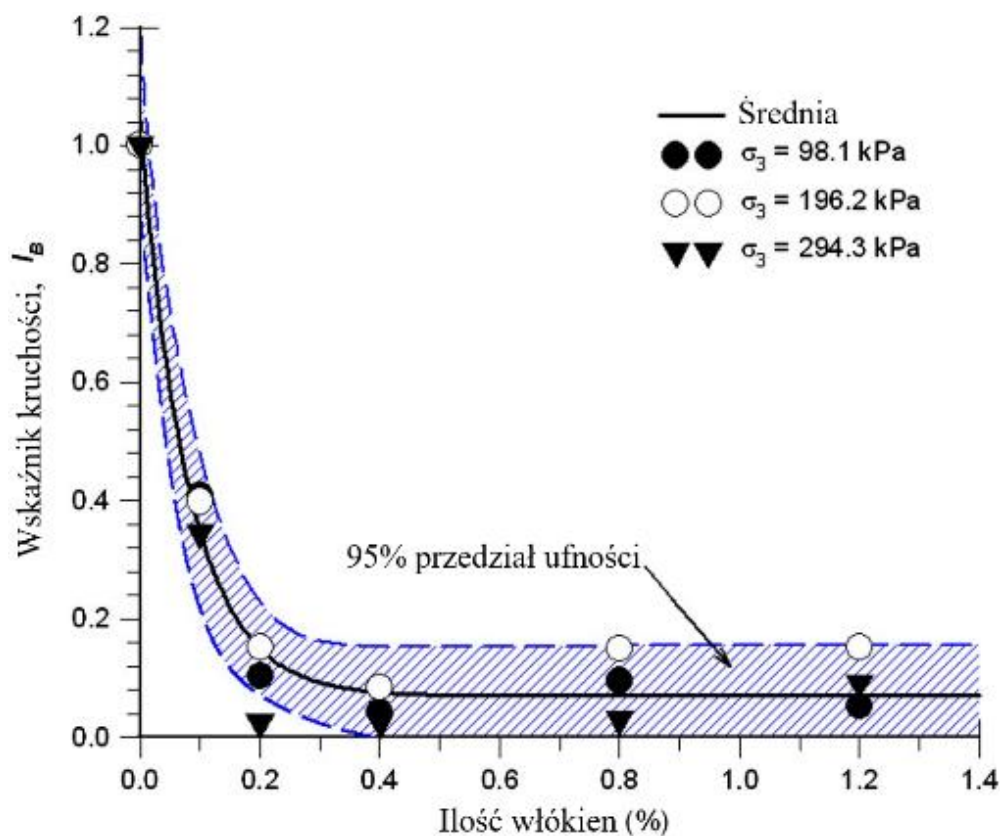
gdzie:

I_B – wskaźnik kruchości,

σ_{max} – szczytowa wartość dewiatora naprężenia, $\sigma_{max} = \sigma_1 - \sigma_3$,

σ_{rez} – rezydualna wartość dewiatora naprężenia, $\sigma_{rez} = \sigma_1 - \sigma_3$.

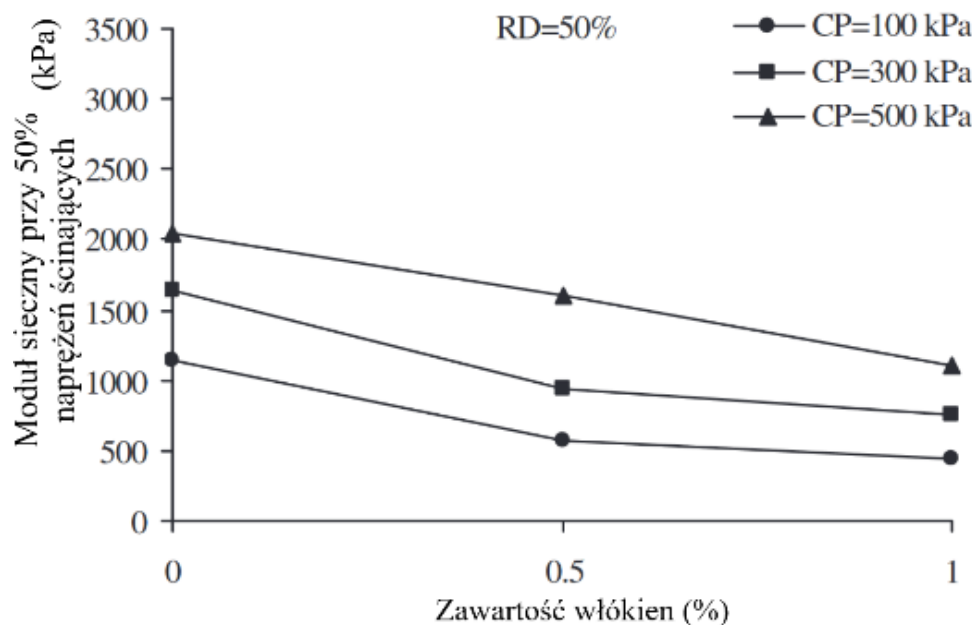
Analogicznie jak w poprzednich wskaźnikach, jeżeli $I_B = 0$, wówczas materiał zachowuje się w sposób plastyczny, następnie wraz ze wzrostem wartości I_B materiał zaczyna stawać się kruchy. W odróżnieniu od poprzednich wskaźników kruchości, wartość może przekroczyć jeden, a naprężenia rezydualne nie mogą być zerowe. Zważywszy na ten fakt, wskaźnik jest stosowany do analizy wyników badań w aparacie trójosiowego ściskania. Wraz ze wzrostem naprężeń poziomych, rośnie wartość naprężeń rezydualnych, a wskaźnik kruchości maleje [63]. Przykładem zastosowania opisanego wskaźnika mogą być wyniki prac Muntohar i in. [104], którzy zbadali wpływ włókien polipropylenowych na stabilizację wapnem. Podobnie jak inni badacze autorzy zaobserwowali wzrost plastyczności gruntu stabilizowanego wraz ze wzrostem zawartości włókien, co przedstawiono na rys. 2.20.



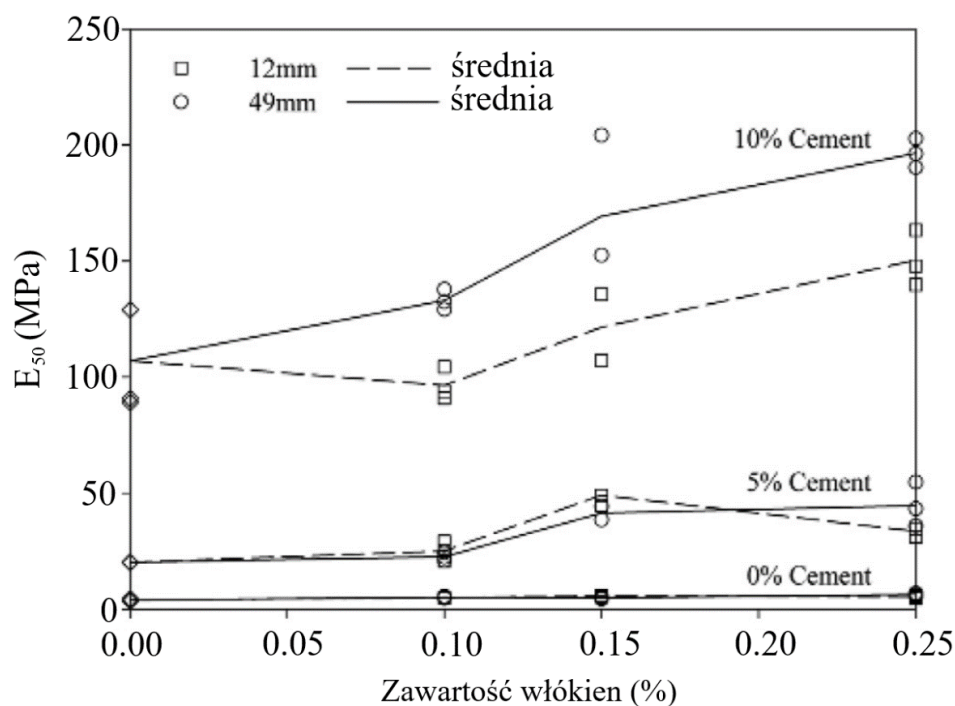
Rys. 2.20 Zależność między wskaźnikiem kruchości a zawartością włókien [104].

W celu określenia wpływu włókien na odkształcalność gruntu stabilizowanego badacze przeprowadzają badania jednoosiowego i trójosiowego ściskania. Podczas badań określany jest moduł odkształcalności liniowej, który opisuje sprężystość materiału podczas ściskania lub rozciągania. Dostępne opracowania niejednoznacznie określają wpływ zbrojenia rozproszonego. Część badań wskazuje na możliwość zmniejszenia sztywności gruntu stabilizowanego [34, 49, 63] co przedstawiono na rys. 2.21, z kolei inne badania

wskazują na możliwość zwiększenia sztywności [39, 49], przykładowe wyniki badań przedstawiono na rys. 2.22. W obu przypadkach autorzy uzyskali poprawę parametrów wytrzymałościowych. W tab. 2.20 zestawiono publikacje, w których zbadano wpływ zbrojenia rozproszonego na sztywność gruntu stabilizowanego.



Rys. 2.21 Wpływ włókien na sprężystość podczas badania trójosiowego ściskania [63].



Rys. 2.22 Wpływ włókien na sprężystość podczas badania jednoosiowego ściskania [39].

Tab. 2.20 Wpływ włókien na sztywność gruntu stabilizowanego.

Autorzy	Grunt	Włókna		Wnioski autorów
Hamidi i in. [63]	niespoisty	PP 12 mm 0,5/1%	↓	Zmniejszenie sztywności przy odkształceniu osiowym 0,1%, badania trójosiowego ściskania
Consoli i in. [32]	niespoisty	PP 24 mm 0,5%	↓	Mniejszy wzrost sztywności przy odkształceniu osiowym 0,01%, badania trójosiowego ściskania
Kutanaei i in. [88]	niespoisty	PVA 12 mm 0,3/0,6/1 %	↓	Dodanie włókien zmniejszyło moduł sprężystości. badania jednoosiowego ściskania
Fatahi i in. [49]	spoisty	Rec. PP 10 mm 0,5/0,75/1 %	↓	Zmniejszenie sztywności wraz ze wzrostem zawartości włókien, badania jednoosiowego ściskania
Fatahi i in. [49]	spoisty	Stalowe 18,4 mm 5/7,5/10 %	↓	
Fatahi i in. [49]	spoisty	PP 18 mm 0,1/0,2/0,4/0,5%	↑	Wzrost modułu sztywności niezależnie od ilości cementu, badania jednoosiowego ściskania
Cristelo i in. [39]	spoisty	PP 12.9/49/54 mm 0,1/0,15/0,25%	↑	Istotniejszy wpływ włókien przed osiągnięciem największych naprężeń, moduł sztywności rośnie wraz z ich zawartością, badania jednoosiowego ściskania
Zhang i in. [175]	spoisty	PP 15 mm 0,5/1/1,5%	↕	Moduł sprężystości wzrasta z zawartością włókien do 1%, powyżej tej wartości może nastąpić jego zmniejszenie, badania jednoosiowego ściskania
Correia i in. [38]	spoisty	PP 12 mm 25/50/75/100 kg/m ³	↕	Mniejsza ilość włókien prowadzi do zmniejszenia sztywności. Wpływ ilości włókien na sztywność wykazuje nieliniową zależność, badania jednoosiowego ściskania



zmniejszenie modułu odkształcenia



zwiększenie modułu odkształcenia



niejednoznaczny wpływ na moduł odkształcenia

W celu określenia wpływu włókien, na sztywność gruntu stabilizowanego przy bardzo małych odkształceniach, autorzy posługują się badaniem nieniszczącym, polegającym na określeniu czasu przejścia fali sejsmicznej przez badany ośrodek.

Na podstawie zmierzonej prędkości fali poprzecznej można wyznaczyć moduł ścinania, który jest jednym z podstawowych parametrów odkształceniowych. Na podstawie dostępnej literatury można stwierdzić, że wpływ włókien na sztywność jest niejednoznaczny, analogicznie jak podczas badań niszczących. W związku z tym, aby uznać wynik badania nieniszczącego za wiarygodny, należy sprawdzić, czy jest on zbieżny z badaniami niszczącymi [39]. Ostrożne podejście badaczy do zbadanych prędkości fal wynika z dłuższego czasu przejścia fali przez grunt stabilizowany z dodatkiem włókien aniżeli bez ich dodatku. Zjawisko to może być spowodowane większą ilością powierzchni kontaktu pomiędzy włóknem a gruntem stabilizowanym, które musi pokonać nadana fala sejsmiczna [39]. W tab. 2.21 zestawiono prace dotyczące wpływu włókien na moduł ścinania.

Tab. 2.21 Wpływ włókien na moduł ścinania w zakresie bardzo małych odkształceń.

Autorzy	Grunt	Włókna	Wnioski autorów
Safdar i in. [134]	niespoisty	PVA 12 mm 1/2/3%	 Wykazano, że sztywność przy małych odkształceniach nieznacznie spada wraz z dodaniem włókien. badania trójosiowego ściskania z zastosowaniem lokalnych czujników przemieszczenia z efektem typu Hall'a
Fatahi i in. [50]	spoisty	z Rec. PP 10 mm 0,5/0,75/1 %	 Zmniejszenie modułu ścinania w zakresie bardzo małych odkształceń. Piezoelementy typu Bender
Fatahi i in. [50]	spoisty	PP 18 mm 0,1/0,2/0,4/0,5%	 Zmniejszenie modułu ścinania w zakresie bardzo małych odkształceń. Piezoelementy typu Bender
Heidarizadeh i in. [67]	spoisty	PP 12 mm 0,2/0,4/0,8 %	 Zwiększenie modułu ścinania w zakresie bardzo małych odkształceń do zawartości 0,4% włókien, dalsze ich zwiększanie powodowało zmniejszenie modułu Piezoelementy typu Bender

 zmniejszenie modułu sztywności
 zwiększenie modułu sztywności
 niejednoznaczny wpływ na moduł sztywności

2.3.3.5. Wpływ włókien na właściwości fizyczne

Zbrojenie rozproszone, podobnie jak spoiwo wpływa na właściwości fizyczne mieszanki gruntu stabilizowanego. Do najczęściej analizowanych właściwości fizycznych należy zaliczyć wilgotność optymalną (w_{opt}) oraz gęstość objętościową szkieletu mieszanki ($\rho_{d_{mix}}$). Wynika to z ich wpływu na zagęszczalność mieszanki, która stanowi kluczowy czynnik w procesie stabilizacji powierzchniowej gruntu. Jednak o ile w przypadku spoiwa badacze są zgodni, że taki dodatek może zmniejszyć wilgotność optymalną oraz zwiększyć gęstość objętościową szkieletu mieszanki [16, 88, 121, 173], to w przypadku włókien polipropylenowych wyniki są niejednoznaczne.

Badania określające wpływ włókien polipropylenowych na wilgotność optymalną i gęstość objętościową szkieletu mieszanki przeprowadzili m.in. Gelder i in. [55], Kutanaei i Choobbasti [88], Sharma [142], Taha i in. [149] i Zabielska-Adamska i in. [173]. W pierwszym badaniu odnotowano, że zastosowanie zbrojenia rozproszonego w gruntach spoistych nie powoduje zmiany kształtu krzywej Proctora, a jedynie zwiększa wilgotność optymalną oraz zmniejsza gęstość objętościową szkieletu. W pracy odnotowano wzrost wilgotności optymalnej o 37% i spadek gęstości objętościowej szkieletu o 8%, co było efektem dodania włókien w ilości 0,75% do gruntu. W drugim badaniu również zaobserwowano spadek gęstości objętościowej szkieletu, jednak tym razem nie stwierdzono znaczącego wpływu włókien na wilgotność optymalną gruntów niespoistych. Odmienne wyniki uzyskano w następnych badaniach, gdzie w trzeciej pracy zauważono zmniejszenie wilgotności optymalnej i zwiększenie gęstości objętościowej szkieletu w gruntach spoistych. Trend ten utrzymywał się wraz ze zwiększaniem ilości włókien do ilości 0,3%, a następnie uległ zmianie. Kolejne badania również potwierdziły, że zastosowanie włókien prowadzi do obniżenia optymalnej wilgotności gruntu oraz zwiększenia jego gęstości objętościowej. Warto zauważyć, że czwarte badanie obejmowało grunty spoiste, natomiast piąte dotyczyło gruntów niespoistych.

Na podstawie omówionych badań nie można jednoznacznie określić wpływu włókien na wilgotność optymalną oraz gęstość objętościową szkieletu mieszanki. Warto jednak podkreślić, że spadek gęstości objętościowej szkieletu mieszanki może być efektem rozpraszania energii przez włókna podczas procesu zagęszczania [55]. Natomiast zwiększenie gęstości objętościowej szkieletu może być efektem wypełnienia wolnych przestrzeni w mieszance przez zbrojenie rozproszone [149].

2.4. Szacowanie właściwości mechanicznych cementogruntu

W ostatnich latach przeprowadzono liczne badania, które skupiały się na określeniu wpływu zbrojenia rozproszonego na właściwości mechaniczne gruntów stabilizowanych, co opisano we wcześniejszej części pracy. Jednak w dalszym ciągu istotnym problemem jest prognozowanie tych właściwości. Dlatego też część autorów skupiła się na badaniach mających na celu opracowanie modelu lub zależności mogącej oszacować m.in. wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie gruntu stabilizowanego z dodatkiem zbrojenia rozproszonego.

Część badaczy dostrzegła, że rozwój wytrzymałości cementogruntu jest nie tylko związany z zawartością spoiwa i wody w mieszance, lecz również z porowatością [116]. Zmniejszenie porowatości cementogruntu prowadzi do wykładniczego wzrostu jego wytrzymałości [36]. W związku z tym, część badań skoncentrowała się na prognozowaniu wytrzymałości cementogruntu w oparciu o jego porowatość i objętość cementu. Do pionierów tych badań, należą Consoli i in. [31, 32, 36], którzy zaproponowali zależność między stosunkiem porowatości (n) do objętości spoiwa (C_i) a wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie. Tym samym badacze wykazali, że określoną wytrzymałość cementogruntu lub cementogruntu ze zbrojeniem rozproszonym można osiągnąć poprzez modyfikację objętości porów oraz spoiwa [51]. Autorzy opisali tę zależność przy pomocy funkcji potęgowej, co przedstawia równanie 2.22. W ostatnich latach zależność ta była również wykorzystywana przez innych badaczy, dzięki czemu dostępna jest większa liczba zależności empirycznych. Przykładowe parametry do obliczenia wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie gruntu stabilizowanego, z wykorzystaniem równania 2.22, zestawiono w tab. 2.22 [31, 33, 35–37, 51, 127, 130, 136].

$$R_c = A \cdot \left[\frac{n}{(C_i)^c} \right]^B \quad 2.22$$

gdzie:

R_c – wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie (q_u – oznaczenie oryginalne),

n – porowatość (η – oznaczenie oryginalne),

C_i – indeks cementu, objętość cementu do objętości próbki (C_{IV} – oznaczenie oryginalne),

A, B, C – parametry zależne od gruntu, spoiwa i czasu utwardzania lub innych dodatków.

Tab. 2.22 Modele gruntu stabilizowanego oparte na porowatości i objętości cementu.

Autorzy	Grunt	Spoivo	Dzień	Włókna	Parametry		
					A	B	C
Consoli i in. [33]	Niespoisty, 0,06mm < d < 0,2 mm – 100%	Popiół lotny i wapno	7	[-]	5,613	-3,57	0,28
			7	PP 24 mm 0,5%	7,056	-3,57	0,28
Consoli i in. [35]	Spoisty, $w_L=39\%$, $w_p=34\%$, $I_p=5\%$	Wapno	28	PP 24 mm 0,5%	$4,62 \cdot 10^9$	-4,30	0,25
Consoli i in. [37]	Niespoisty,						
	0,2mm < d < 0,6 mm – 10%	Cement (III)	7	[-]	137649	-1,96	1,0
	0,06mm < d < 0,2 mm – 90%						
	Spoisty, $w_L=34\%$, $w_p=31\%$, $I_p=3\%$		7		$4 \cdot 10^9$	-4,29	0,21
Santana i in. [136]	Spoisty, $w_L=32\%$, $w_p=21\%$, $I_p=11\%$	Cement (IV)	7	[-]	$3,4 \cdot 10^5$	-3,585	0,2
Román Martínez i in. [130]	Spoisty + 15% kruszony wapień,		7		$23,63 \cdot 10^9$	-5,11	0,28
	$w_L=42\%$, $w_p=26\%$ $I_p=16\%$	Cement (III)	7	[-]	$30,83 \cdot 10^6$	-5,11	0,28
	Spoisty + 30% kruszony wapień,		28		$32,32 \cdot 10^6$	-5,11	0,28
	$w_L=42\%$, $w_p=26\%$ $I_p=16\%$		28		$40,22 \cdot 10^6$	-5,11	0,28
Festugato i in. [51]	Spoisty, $w_L=23\%$, $w_p=13\%$ $I_p=10\%$		7	[-]	$13,35 \cdot 10^6$	-2,90	0,28
		Cement (III)	7	PP 6 mm 0,5%	$13,87 \cdot 10^6$	-2,90	0,28
			7	PP 12 mm 0,5%	$16,61 \cdot 10^6$	-2,90	0,28
			7	PP 24 mm 0,5%	$17,65 \cdot 10^6$	-2,90	0,28
Consoli i in. [31]	Spoisty, $w_L=23\%$, $w_p=13\%$ $I_p=10\%$	Cement (III)	7	[-]	$2,2 \cdot 10^7$	-3,08	0,28
Consoli i in. [36]	Spoisty, $w_L=23\%$, $w_p=13\%$ $I_p=10\%$	Cement (III)	7	PP 24 mm 0,5%	$1,0 \cdot 10^7$	-2,73	0,28
Rios i in. [127]	Spoisty, $w_L=34\%$, $w_p=31\%$ $I_p=3\%$	Cement (I)	9	[-]	$2 \cdot 10^9$	-4,719	0,21

Na podstawie przeprowadzonych badań Consoli i in [30] zaproponowali znormalizowaną zależność do obliczania jednoosiowej wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie gruntu stabilizowanego z dodatkiem włókien polipropylenowych, co przedstawiono na rys. 2.23. W tym celu przeprowadzili oni normalizację równania 2.22, dzieląc je przez referencyjną wartość wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie. Wartości referencyjne zostały wyznaczone na podstawie opracowanych zależności, zgodnie z równaniem 2.22. Jako referencyjną wytrzymałość przyjęto wartość odpowiadającą $\Delta = n/C_i^{0,28} = 30$. Podczas badania wykorzystano dziesięć zależności, w ramach których przebadano 380 próbek, wykorzystane wartości referencyjne zestawiono w tab. 2.23. Znormalizowana wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie cementogruntu została opisana równaniem 2.23. Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie lub rozciąganie stanowi iloczyn wartości znormalizowanej i wartości referencyjnej, co zostało wyrażone równaniem 2.24.

Tab. 2.23 Wartości referencyjne dla równania 2.23 i 2.24.

Informacje dotyczące mieszanek					Wartości referencyjne	
Informacje o gruncie	Zaw. cementu	Zaw. włókien	Dł. włókien	Czas utwardzania	$R_{C(\Delta=30)}$	$R_{t(\Delta=30)}$
[-]	[%]	[%]	[mm]	[dni]	[kPa]	[kPa]
$w_L = 23\%$		0,5	6		760	[-]
$w_p = 13\%$		0,5	6		[-]	126
$I_p = 10\%$		0,5	12		1026	[-]
$d_{50} = 0,015$	od 1,0	0,5	12	7	[-]	140
$C_c = 1,0$	do 7,0	0,25	24		729	[-]
$C_u = 6,3$		0,5	24		959	[-]
USCS: CL		0,75	24		1159	[-]
$d_{50} = 0,19$						
$C_c = 2,1$	Od 0,5	0,5	24	7	1327	[-]
$C_u = 4,2$	do 5,0					
USCS: SP						
$d_{50} = 0,16$						
$C_c = 2,4$	Od 1,0	0,5	24	7	1454	[-]
$C_u = 18,0$	do 5,0					
USCS: SW						
$d_{50} = 0,075$						
$C_c = 1,8$	Od 1,0	0,5	24	7	1989	[-]
$C_u = 33,3$	do 5,0					
USCS: SW						

$$\frac{R_C}{R_{C(\Delta=30)}} = 4160 \cdot \left[\frac{n}{(C_i)^{0,28}} \right]^{-2,45} \quad 2.23$$

$$R_C = R_{C(\Delta=30)} \cdot 4160 \cdot \left[\frac{n}{(C_i)^{0,28}} \right]^{-2,45} \quad 2.24$$

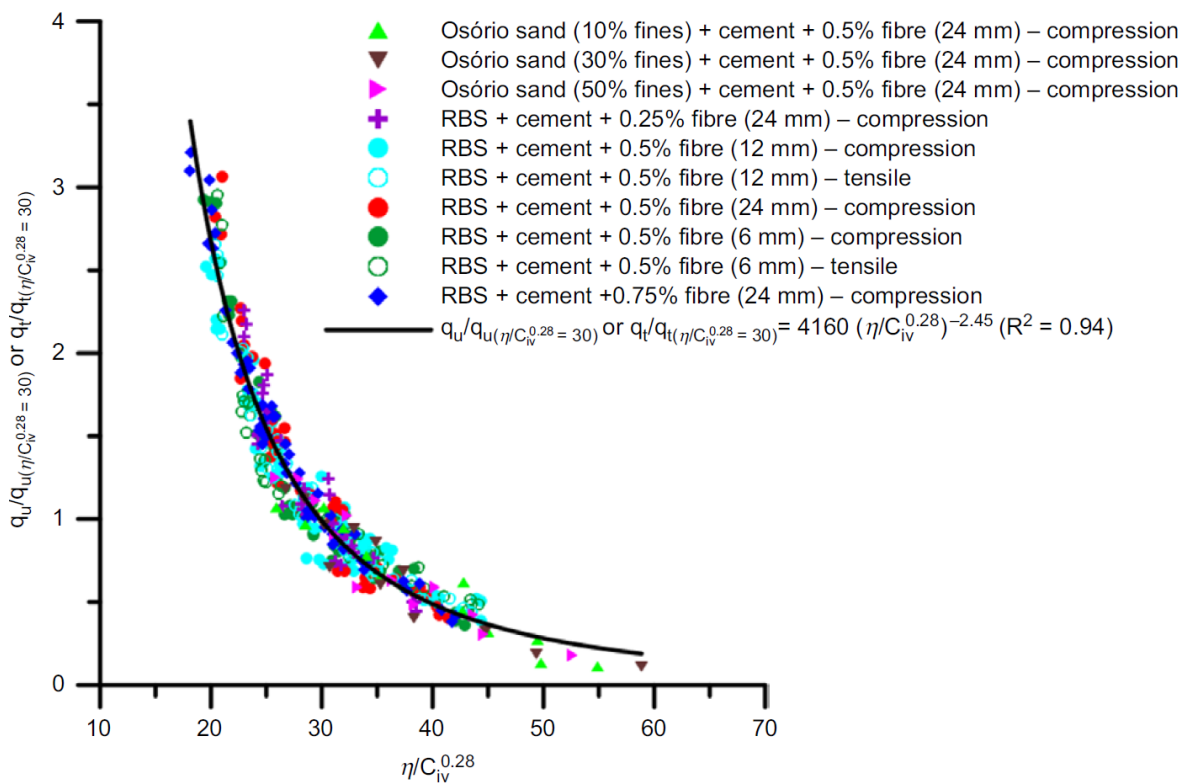
gdzie:

R_C – wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie (q_u – oznaczenie oryginalne),

$R_{C(\Delta=30)}$ – wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie dla $\Delta = n/C_i^{0,28} = 30$,

n – porowatość (η – oznaczenie oryginalne),

C_i – indeks cementu, objętość cementu do objętości próbki (C_{IV} – oznaczenie oryginalne).



Rys. 2.23 Znormalizowana wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie po 7 dniach [30].

Zależność opisana równaniem 2.22 została zmodyfikowana przez Pham i in. [116]. Badacze zaproponowali włączenie do równania objętości wody, w wyniku czego otrzymali zależność opisaną równaniem 2.25. W zaproponowanym równaniu zastąpiono iloraz porowatości i objętości cementu, wskaźnikiem objętości mieszanki (R_b), który został wyrażony wzorem 2.26. Dodatkowo, w celu wyznaczenia wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie zależność musi zostać skalibrowana. Procedura kalibracji składa się z dwóch badań jednoosiowego ściskania. Pierwsze badanie kalibracyjne jest niezbędne do wyznaczenia wartości referencyjnej, badanie to należy przeprowadzić na mieszance

o $R_b < 15$. Drugie badanie jednoosiowego ściskania pełni funkcję kalibracyjną parametru k , który należy traktować jako stałą zależną od rodzaju gruntu. Badanie to należy przeprowadzić przy wartości $R_b \neq 15$. Zaproponowana zależność może być stosowana do każdego rodzaju gruntu zmieszanego z cementem [116].

$$R_C = R_{C \text{ ref}} \cdot [R_b]^{-k} \quad 2.25$$

$$R_b = \frac{V_V \cdot V_W}{V_C^2} \quad 2.26$$

gdzie:

R_C – wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie (UCS – oznaczenie oryginalne),

$R_{C \text{ ref}}$ – wartość referencyjna R_C (UCS_{ref} – oznaczenie oryginalne),

k – parametry zależny od gruntu, spoiwa i czasu utwardzania lub innych dodatków,

V_V , V_W , V_C – objętość porów, wody i cementu,

R_b – wskaźnik objętości mieszanki.

Kolejna metoda szacowania wytrzymałości cementogruntu jest oparta na pomiarze prędkości fal [103]. Zarówno prędkość fal ścinających (v_s), jak i prędkości pulsów ultradźwiękowych (UPV) są wykorzystywane do korelacji z parametrami mechanicznymi [165]. Metoda ta może być wykorzystywana zarówno do monitorowania jak i kontroli jakości gruntu stabilizowanego [103]. Niewątpliwą zaletą tej metody jest możliwość prowadzenia pomiarów w warunkach terenowych. W praktyce powszechnie stosuje się dwa rodzaje zależności matematycznych do korelacji prędkości fal z wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie. Są to funkcje takie jak funkcja potęgowa i funkcja wykładnicza, które opisano przy pomocy równań 2.27 i 2.28. W celu określenia wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie można skorzystać ze współczynników wymienionych w tab. 2.24.

$$R_C = \beta_1 \cdot [UPV \vee v_s]^{\alpha_1} \quad 2.27$$

$$R_C = \beta_2 \cdot e^{(UPV \vee v_s) \cdot \alpha_2} \quad 2.28$$

gdzie:

R_C – wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie,

β_i – współczynnik liczbowy, różny od zera,

α_i – wykładnik potęgi, dowolna liczba rzeczywista,

e – podstawa funkcji eksponentialnej, równa liczbie Eulera ($\sim 2,71828$),

UPV – prędkość pulsu ultradźwiękowego, fala podłużna,

v_s – prędkość fali poprzecznej.

Tab. 2.24 Parametry do korelacji wytrzymałości gruntu stabilizowanego i prędkości fal.

Autorzy	Rodzaj fali i jednostka miary prędkości		Parametry do funkcji potęgowej		Parametry do funkcji eksponentialnej	
	UPV	v_s	β_1	α_1	β_2	α_2
Wei i in. [165]	km/s	[-]	0,0583	3,577	[-]	[-]
Wei i in. [165]	[-]	km/s	1,798	3,691	[-]	[-]
Moon i in. [103]	km/s	[-]	0,087	3,164	[-]	[-]
Moon i in. [103]	km/s	[-]	[-]	[-]	0,036	1,51
Moon i in. [103]	[-]	km/s	1,47	3,51	[-]	[-]
Moon i in. [103]	[-]	km/s	[-]	[-]	0,026	4,04
Jiang i in. [76]	m/s	[-]	[-]	[-]	0,009	0,0022
Wei i in. [164]	km/s	[-]	24,20	4,47	[-]	[-]
Wei i in. [164]	[-]	km/s	1647	3,91	[-]	[-]
Vinoth i in. [162]	km/s	[-]	0,065	3,756	[-]	[-]
Vinoth i in. [162]	km/s	[-]	[-]	[-]	0,037	1,581
Chan i in. [24]	[-]	m/s	$8 \cdot 10^{-4}$	2,37	[-]	[-]

Na podstawie wyznaczonej wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie, można wyznaczyć parametry odkształceniowe cementogruntu, co stanowi powszechną praktykę [43]. Opracowane korelacje pozwalają zarówno wyznaczyć moduły sprężystości (E_0) i ścinania (G_0) w zakresie bardzo małych odkształceń, jak i sieczny moduł sprężystości. Większość korelacji dotyczących modułu sprężystości odnosi się do siecznego modułu sprężystości wyznaczonego dla odkształcenia odpowiadającego 50% dewiatora naprężenia przy zniszczeniu (E_{50}). Jednak należy podkreślić, że w gruntach stabilizowanych powierzchniowo takie korelacje są dużo rzadszą praktyką, w związku z czym większość dostępnych opracowań dotyczy wglębnego wzmacniania gruntów. Przykładowe korelacje zestawiono w tab. 2.25.

Tab. 2.25 Korelacje parametrów odkształceniowych z R_c .

Autorzy	Zależność
David Suits i in. [43]	$E_{50} = 350 \div 800 \cdot R_c$
Elhakim [46]	$E_{50} = 125,7 \cdot R_c$
Van Impe i in. [158]	$E_{50} = 110 \cdot R_c$
Kang i in. [79]	$E_{50} = 91 \cdot R_c$
Lee i in. [90]	$E_{50} = 80 \div 200 \cdot R_c$
Van Impe i in. [158]	$E_0 = 714 \cdot R_c$
Román Martínez i in. [130]	$G_0 = 4828,8 \cdot R_c$
Kang i in. [79]	$G_0 = 298,21 \cdot R_c$
Xiao i in. [168]	$G_0 = 435 \cdot R_c$

3. Materiał badań

3.1. Grunt

Materiał badawczy przygotowano na bazie gruntów z dodatkiem spoiwa i zbrojenia rozproszonych w różnych proporcjach. W poniższym rozdziale opisano wybrane właściwości fizyczne i mechaniczne poszczególnych składników.

W pracy przebadano trzy rodzaje gruntów. Grunt oznaczony jako numer 1 stanowił materiał bazowy, który został wykorzystany w pierwszym i drugim etapie badań. Grunty oznaczone odpowiednio numerami 2 i 3, zostały wykorzystane podczas drugiego etapu badań, czyli badań kontrolnych. Dla wszystkich analizowanych rodzajów gruntów określono skład granulometryczny, wilgotność optymalną, gęstość właściwą, zawartość materii organicznej oraz obecność węglanów wapnia. Dodatkowo dla gruntu nr 1 i 3, czyli gruntów małoSpoistych i spoistych, przeprowadzono analizę granic konsystencji. Pierwszy rodzaj gruntu został pobrany z placu budowy przy ulicy Raławickiej w Warszawie z głębokości 2 m p.p.t. Drugi rodzaj gruntu został pobrany z placu budowy obiektu przemysłowego w miejscowości Zelgoszcz w województwie Łódzkim z głębokości 1 m p.p.t. Trzeci rodzaj gruntu został wydobyty ze złoża w Szkucinie, województwo świętokrzyskie. Wszystkie analizowane grunty zostały przetransportowane do laboratorium, gdzie były przechowywane. Przed przygotowaniem mieszanek do badań, każdy grunt został sklasyfikowany na podstawie składu granulometrycznego, plastyczności oraz zawartości części organicznych zgodnie z obowiązującą normą PN-EN 14688-2:2018 [212].

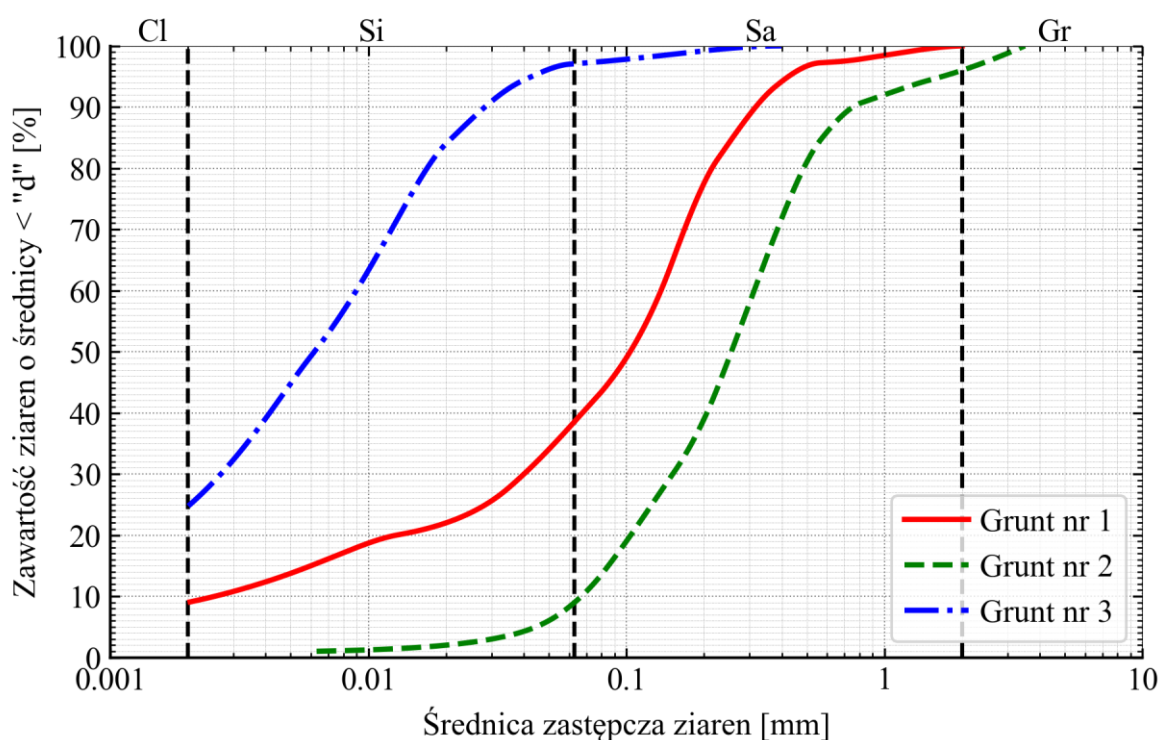
3.1.1. Skład granulometryczny

Skład granulometryczny analizowanych gruntów został oznaczony przy pomocy analizy sitowej i analizy areometrycznej. Na tej podstawie określono frakcje główną i drugorzędną badanych gruntów. Frakcję główną gruntu nr 1 stanowią ziarna piasku w przedziale od 0,063 mm do 2 mm a frakcję drugorzędną stanowi ił. Dlatego też grunt został sklasyfikowany jako Piasek z iłem (clSa). Dodatkowo należy zaznaczyć, że badany grunt wykazuje zarówno cechy gruntu gruboziarnistego, jak i drobnoziarnistego. Grunt nr 2 składa się z frakcji głównej w postaci ziaren piasku w przedziale od 0,063 mm do 2 mm. Na podstawie analizy krzywej uziarnienia, grunt sklasyfikowano jako piasek średni (MSa). Grunt nr 3 jest gruntem drobnoziarnistym, o największej zawartości cząstek w przedziale od 0,002 mm do 0,063 mm, lecz z uwagi na wysoką zawartość frakcji ilastej grunt charakteryzuje się wysoką plastycznością. W związku z tym uznano, że frakcję główną

stanowi ił, natomiast frakcję drugorzędą – pył. Na tej podstawie grunt nr 3 sklasyfikowano jako ił z pyłem (siCl). Dodatkowo przeprowadzono klasyfikacje gruntów na podstawie trójkąta zawartego w normie PN-EN ISO 14688-2-2006/Ap2:2012 [213] oraz normy PN-86-B-02480 [189]. Określone krzywe uziarnienia gruntów przedstawiono na rys. 3.1. Procentową zawartość frakcji oraz klasyfikacje gruntów zestawiono w tab. 3.1.

Tab. 3.1 Zawartość procentowa poszczególnych frakcji w badanych gruntach.

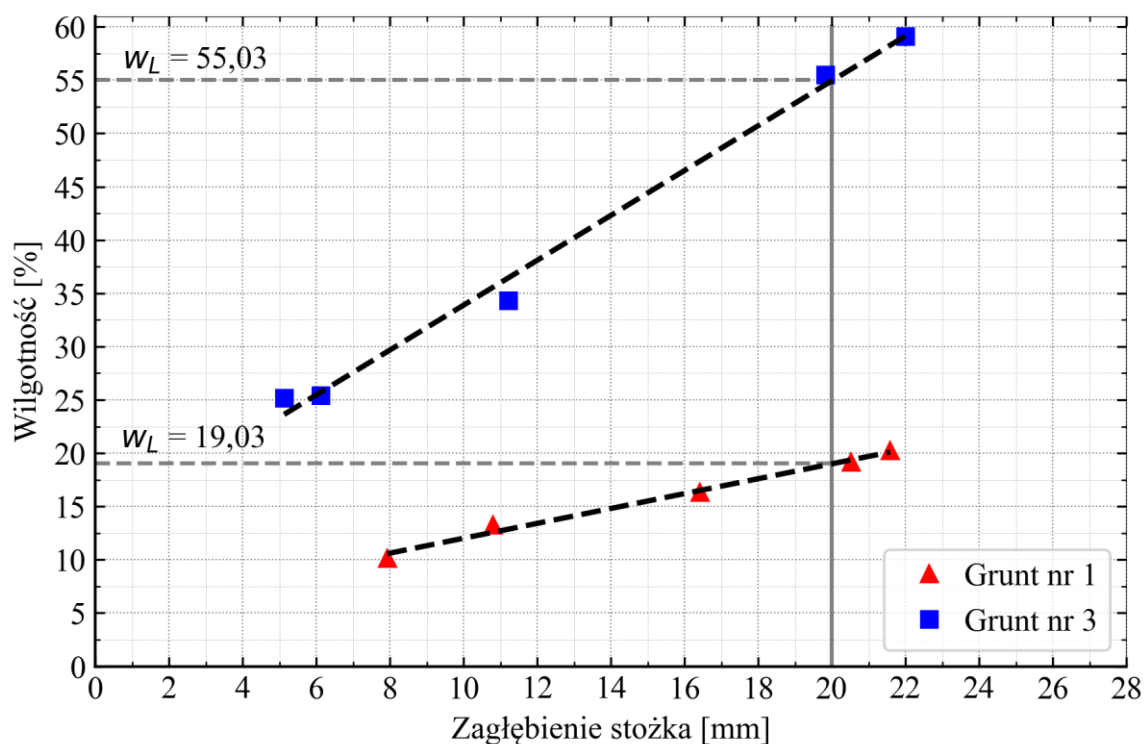
Frakcje gruntu wg PN-EN ISO 14688-2		Grunt nr 1	Grunt nr 2	Grunt nr 3
Przedział	Nazwa frakcji			
$d \leq 0,002 \text{ mm}$	Frakcja iłowa – Cl [%]	9	0	25
$0,002 \text{ mm} < d \leq 0,063 \text{ mm}$	Frakcja pylasta – Si [%]	30	9	72
$0,063 \text{ mm} < d \leq 2,0 \text{ mm}$	Frakcja piaskowa – Sa [%]	61	86	3
$2,0 \text{ mm} < d \leq 63,0 \text{ mm}$	Frakcja żwirowa – Gr [%]	0	5	0
Frakcje gruntu wg PN-86-B-02480				
$d \leq 0,002 \text{ mm}$	Frakcja iłowa – f_i [%]	9	0	25
$0,002 \text{ mm} < d \leq 0,05 \text{ mm}$	Frakcja pylasta – f_π [%]	25	5	71
$0,05 \text{ mm} < d \leq 2,0 \text{ mm}$	Frakcja piaskowa – f_p [%]	66	90	4
$2,0 \text{ mm} < d \leq 40,0 \text{ mm}$	Frakcja żwirowa – f_z [%]	0	5	0
Klasyfikacja gruntu wg:				
PN-EN ISO 14688-2:2018		clSa	MSa	siCl
PN-EN ISO 14688-2-2006/Ap2:2012		clSa	MSa	siCl
PN-86-B-02480		Pg	Ps	Gπz



Rys. 3.1 Krzywe uziarnienia badanych gruntów.

3.1.2. Analiza granic Atterberga

Granice konsystencji, które są również zwane granicami Atterberga, są podstawową metodą klasyfikacji gruntów drobnoziarnistych wg normy PN-EN 14688-2:2018 [212]. Wspomniany termin granic Atterberga odnosi się do zestawu parametrów, w tym granicy płynności (w_L) oraz granicy plastyczności (w_p). Granica płynności została określona przy użyciu metody penetrometru stożkowego, zgodnie z rekomendacjami normy PN-EN 1997-2 [192]. Granica plastyczności została wyznaczona na podstawie analizy makroskopowej (metodą wałeczkowania). Na podstawie wyznaczonych granic obliczono wskaźnik plastyczności (I_p), który jest różnicą pomiędzy granicą płynności i granicą plastyczności. Wskaźnik ten oznacza, ile wody w procentach wchłania dany grunt przy przejściu ze stanu półzwarego w półpłynny. Następnie wykorzystując wyznaczone wartości przeprowadzono klasyfikację gruntów drobnoziarnistych. Oznaczenie wymienionych parametrów przeprowadzono dla gruntów nr 1 oraz nr 3. Wyniki przeprowadzonych badań metodą penetrometru stożkowego przedstawiono na rys. 3.2. Dodatkowo w tab. 3.2 zestawiono wyznaczone parametry (granice płynności, granice plastyczności i stopień plastyczności), które były niezbędne do przeprowadzenia klasyfikacji gruntów drobnoziarnistych zgodnie z normą PN-EN 14688-2:2018 [212].

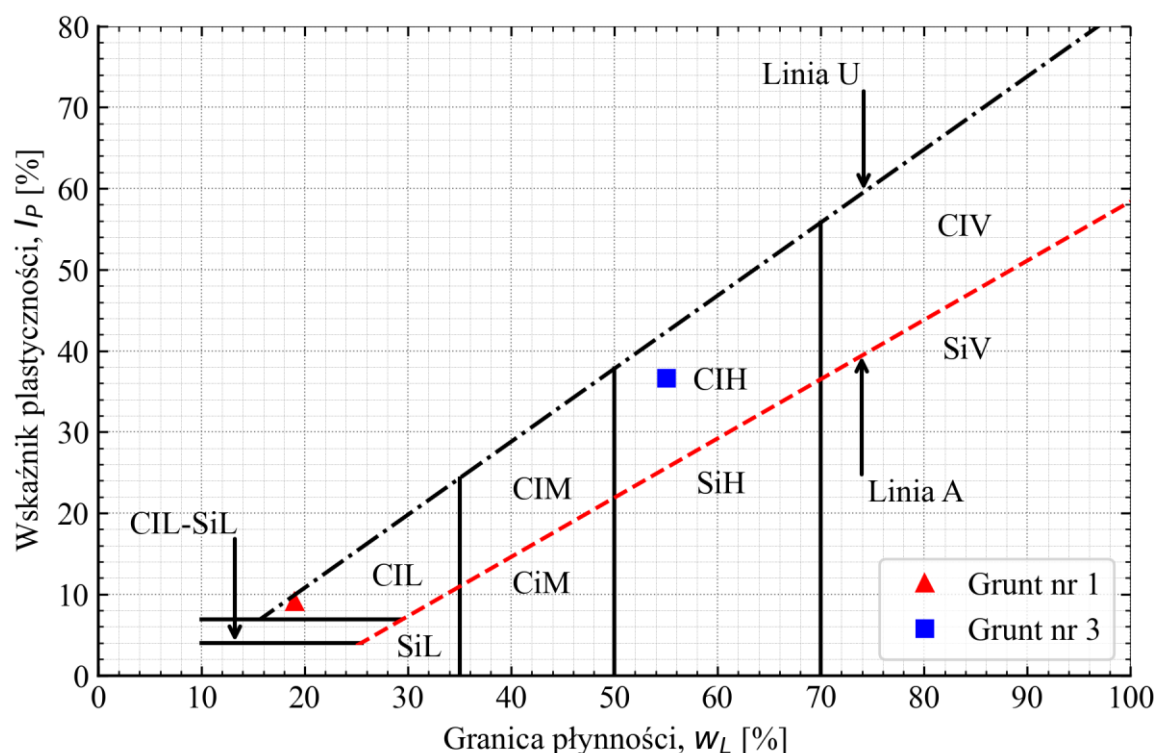


Rys. 3.2 Granice płynności gruntu nr 1 i 3.

Tab. 3.2 Oznaczone granice Atterberga i wskaźnik plastyczności badanych gruntów.

	Grunt Nr 1	Grunt Nr 3
Granica plastyczności: w_p [%]	9,88	18,36
Granica płynności: w_L [%]	19,03	55,03
Wskaźnik plastyczności: I_p [%]	9,15	36,67

Wykorzystując wyznaczone granice płynności i wskaźniki plastyczności przeprowadzono klasyfikację analizowanych gruntów. Zbadane wartości analizowanych gruntów drobnoziarnistych naniesiono na kartę plastyczności Casagrandego, co przedstawiono na rys. 3.3. Grunt nr 1 został sklasyfikowany jako mało plastyczny ił (CIL). Natomiast grunt nr 3 jest gruntem drobnoziarnistym o wysokim wskaźniku plastyczności oraz granicy płynności mieszczącej się w przedziale od 50% do 70%. Na tej podstawie grunt został sklasyfikowany jako ił o wysokiej plastyczności. Dodatkowo na podstawie wskaźnika plastyczności przeprowadzono klasyfikację gruntów wg normy PN-86-B-02480 [189]. Grunt nr 1 został sklasyfikowany jako grunt mało spoisty ($1\% < I_p \leq 10\%$), natomiast grunt nr 3 jako grunt bardzo spoisty ($30\% < I_p$).



Rys. 3.3 Oznaczenie gruntów drobnoziarnistych na karcie Casagrandego.

3.1.3. Oznaczenie zawartości części organicznych

Oznaczenie zawartości części organicznych w badanych gruntach przeprowadzono zgodnie z normą PN-88/B-04481 [187]. Na podstawie przeprowadzonych badań nie stwierdzono obecności części organicznych w analizowanych gruntach. Wszystkie rozpatrywane grunty zostały sklasyfikowane jako grunty mineralne.

3.1.4. Zawartość CaCO_3

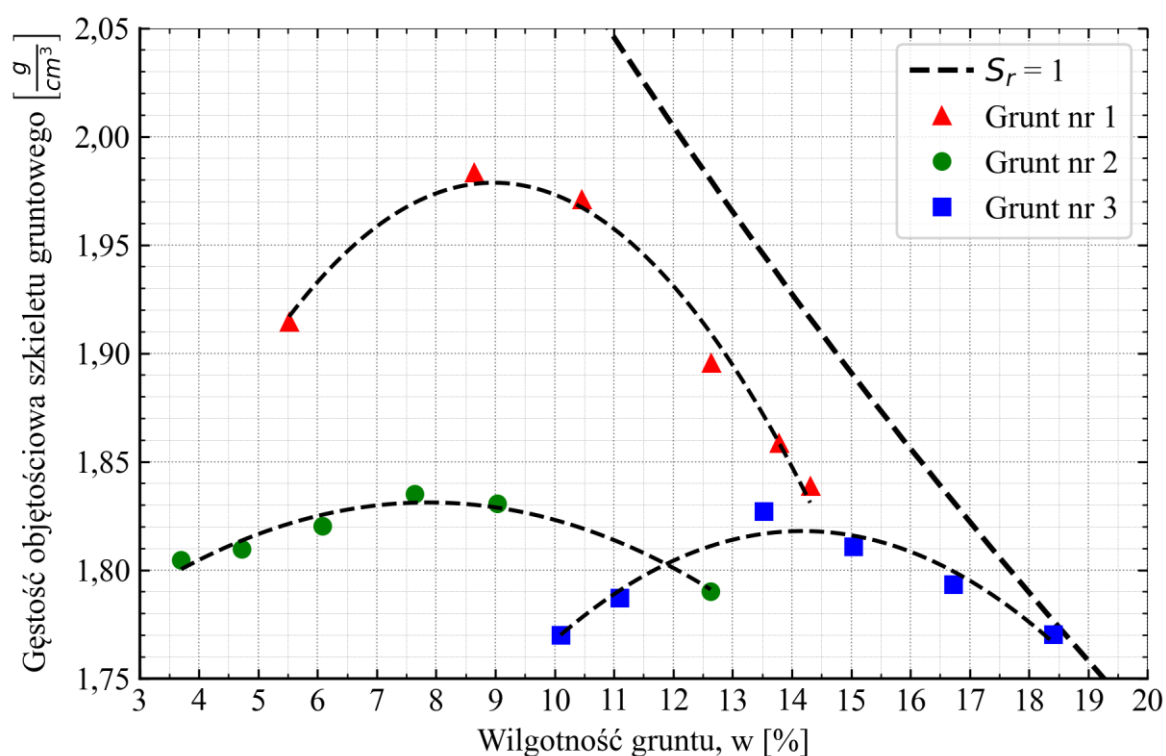
Dla analizowanych gruntów przeprowadzono badanie zawartości węglanów wapnia (CaCO_3) zgodnie z normą PN-88/B-04481 [187]. Podczas badania wykorzystano kwas solny o stężeniu 20%, którym skroplono przygotowane próbki gruntów. Podczas przeprowadzanych badań nie zaobserwowano żadnej reakcji gruntu na kwas solny, w związku z czym wszystkie grunty zostały zakwalifikowane jako grunty bezwapniste.

3.1.5. Zagęszczalność gruntów na podstawie metody Proctora

Parametrem decydującym o jakości zagęszczenia gruntu jest gęstość objętościowa szkieletu gruntowego (ρ_d), którą uzyskuje się przy wilgotności optymalnej (w_{opt}). Oznacza to, że wilgotnością optymalną jest taka wilgotność, przy której uzyskuje się maksymalną gęstość objętościową szkieletu gruntowego ($\rho_{d\ max}$). Badanie Proctora przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 13286-2 [195]. Podczas badania wykorzystano formę typu A i ubijak o masie 2,5 kg. Wszystkie przygotowane próbki do badań zostały zagęszczone ze stałą energią, która wynosiła $0,59\text{ J/cm}^3$. Wyznaczone krzywe zagęszczalności przedstawiono na rys. 3.4. Wartości uzyskanych wilgotności optymalnych i maksymalnych gęstości objętościowych szkieletów gruntowych zestawiono w tab. 3.3.

Tab. 3.3 Wyniki badań Proctora.

	Grunt Nr 1	Grunt Nr 2	Grunt Nr 3
$\rho_{d\ max}\ [\text{g/cm}^3]$	1,98	1,84	1,83
$w_{opt}\ [\%]$	8,64	7,64	13,53



Rys. 3.4 Krzywe zagęszczalności badanych gruntów.

3.1.6. Oznaczenie gęstości właściwej

Gęstości właściwe badanych gruntów zostały oznaczone przy pomocy piknometru gazowego firmy Micromeritics, model Accupyc II 1340. Urządzenie to jest w pełni zautomatyzowanym analizatorem gęstości i objętości materiału. Urządzenie wykorzystuje technikę wypierania gazu do pomiaru objętości materiału, na podstawie której określa się gęstość właściwą. Podczas badania wykorzystuje się gazy obojętne takie jak hel czy azot. Wszystkie badania przeprowadzono w komorze o objętości 10 cm^3 . Wyznaczone gęstości właściwe gruntów są wartościami średnimi z 10 pomiarów. Uzyskane wyniki zestawiono w tab. 3.4.

Tab. 3.4 Gęstości właściwe gruntów.

	Grunt Nr 1	Grunt Nr 2	Grunt Nr 3
$\rho_s [\text{g/cm}^3]$	2,66	2,65	2,69

3.2. Spoiwo

Spoiwo wykorzystane w pracy to cement wieloskładnikowy wyprodukowany w cementowni Góraždze. Cement został dostarczony do laboratorium w szczelnie zamkniętych workach. Przez cały okres trwania badań, cement był przechowywany w pomieszczeniu laboratoryjnym, zabezpieczony przed działaniem wilgoci. Zastosowano cement o deklarowanej wytrzymałości na ściskanie równej 10 MPa po 2 dniach utwardzania i 32,5 MPa po 28 dniach utwardzania. Cement składa się z klinkieru portlandzkiego, granulowanego żużla wielkopiecowego, popiołu lotnego krzemionkowego oraz regulatora czasu wiązania. Cement został oznaczony zgodnie z normą PN-EN 197-1 [191] jako CEM V/A (S-V) 32,5 R-LH. Zastosowane spoiwo charakteryzuje się niskim ciepłem hydratacji i dużą odpornością na agresję chemiczną. Opisany cement jest przeznaczony do stabilizacji gruntu i podbudów. Przydatność spoiwa w inżynierii komunikacyjnej została potwierdzona w rekomendacji technicznej IBDIM Nr RT/2011-02-0088/1. Informacje dotyczące składu spoiwa przedstawiono w tab. 3.5.

Tab. 3.5 Zawartość procentowa poszczególnych składników CEM V/A (S-V) 32,5 R-LH.

Składnik:	Przedziały zawartości
Klinkier cementu portlandzkiego [%]	40÷64
Granulowany żużel wielkopiecowy [%]	18÷30
Popiół lotny krzemionkowy [%]	18÷30
Składniki drugorzędne [%]	0÷5

3.2.1. Oznaczenie wytrzymałości

W celu oznaczenia rzeczywistej wytrzymałości wykorzystywanego spoiwa przeprowadzono badania niszczące zgodnie z normą PN-EN 196-1 [190]. Ocenę wytrzymałości na zginanie i ściskanie cementu wykonano, stosując beleczki w kształcie prostopadłościanu o wymiarach 40x40x160 mm. Badane próbki zostały sporządzone na bazie normowej zaprawy, która składała się z analizowanego cementu, wody i normowego piasku. Piasek ten jest naturalnym piaskiem kwarcowym o średnicy do 2 mm i wilgotności mniejszej niż 0,2%. Badania przeprowadzono po 2 i 28 dniach utwardzania. Wszystkie próbki zostały przygotowane, poddane procesowi pielęgnacji, a następnie ich wytrzymałość została określona w laboratorium budowlanym katedry mechaniki i konstrukcji budowlanych. Wytrzymałość na zginanie w poszczególnych dniach została określona na podstawie badań przeprowadzonych na serii składającej się z trzech próbek. Następnie wytrzymałość na ściskanie została określona na połówkach zbadanych beleczek, czyli

wytrzymałość ta została określona na podstawie sześciu badań. Na podstawie wyników badań obliczono wytrzymałość na zginanie oraz ściskanie, określając je jako średnią arytmetyczną uzyskaną z przeprowadzonych pomiarów. Należy zauważyć, że w trakcie badań wytrzymałości na ściskanie, przeprowadzonych po 2 i 28 dniach utwardzania, jedna z próbek wykazywała odchylenie od wartości średniej przekraczające 10%. Dodatkowo, obliczone wartości średnich arytmetycznych były nieznacznie niższe od deklarowanych wartości, na co miały wpływ pojedyncze wyniki. W związku z tym, zgodnie z zapisami normowymi odrzucono wartości odstające i ponownie obliczono średnią wartość arytmetyczną wytrzymałości na ściskanie. Pozostałe pomiary nie odstawały powyżej 10% od nowych obliczonych wartości średnich. Oznaczone wytrzymałości na zginanie i ściskanie są zgodne z wartościami deklarowanymi. W tab. 3.6 zestawiono wyznaczone wytrzymałości.

Tab. 3.6 Wytrzymałość na ściskanie i zginanie cementu.

Okres pielęgnacji	Wytrzymałość na zginanie [MPa]	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]
2 dni	2,8	10,1
28 dni	7,9	32,8

3.2.2. Oznaczenie gęstości właściwej

Oznaczenie gęstości właściwej cementu przeprowadzono z wykorzystaniem urządzenia pomiarowego firmy Micromeritics, model Accupyc II 1340. Piknometr gazowy opisano w 3.1.6. Wynik pomiarów gęstości właściwej spoiwa został przedstawiony jako wartość średnia z 10 pomiarów. Gęstość właściwa cementu wynosi: $\rho_c = 2,97 \left[\frac{g}{cm^3} \right]$.

3.3. Zbrojenie rozproszone

Podczas realizacji badań zastosowano zbrojenie rozproszone, wykorzystując włókna polipropylenowe jako elementy zbrojące. Włókna zostały dostarczone do laboratorium w szczelnym opakowaniu, w którym były przechowywane przez cały okres prowadzenia badań. Dzięki czemu wyeliminowano potencjalne zagrożenie zanieczyszczenia lub zmianę parametrów fizyczno – mechanicznych. Materiał został wyprodukowany przez firmę Belgian Fibres NV i jest zgodny z normą dla włókien polimerowych do betonu, PN-EN 14889-2 [211]. Włókna te są syntetyczne i zostały wytworzone na bazie organicznych związków chemicznych, a konkretnie z polipropylenu (PP). Produkt jest dostępny na rynku pod nazwą handlową Belmix. Podstawowe informacje o zastosowanych włóknach zostały zestawione w tab. 3.7.

Tab. 3.7 Podstawowe informacje dotyczące włókien polipropylenowych.

Parametr	Wartość	Jednostka
Producent	Belgian Fibers NV	[-]
Nazwa handlowa	Belmix	[-]
Materiał	Polipropylen	[-]
Długość	12	[mm]
Średnica	34	[μm]
Wytrzymałość na rozciąganie	40	[cN/Text]

3.3.1. Oznaczenie gęstości właściwej

Oznaczenie gęstości właściwej włókien polipropylenowych przeprowadzono z wykorzystaniem urządzenia pomiarowego firmy Micromeritics, model Accupyc II 1340. Piknometr gazowy opisano w 3.1.6. Wynik pomiarów gęstości właściwej włókien został przedstawiony jako wartość średnia z 10 pomiarów. Gęstość właściwa zbrojenia rozproszonego wynosi: $\rho_z = 0,92 \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]$.

4. Metodyka i zakres badań

4.1. Program badań

W celu określenia wpływu zbrojenia rozproszonego na właściwości mechaniczne ulepszonego podłoża gruntowego program badań został podzielony na dwa etapy. Podczas pierwszego etapu zostały wykonane trzy badania. Każde badanie zostało zaprojektowane w sposób umożliwiający wydzielenie trzech zmiennych niezależnych i zależnych. Podczas drugiego etapu wykonano badania kontrolne w celu weryfikacji wyników przeprowadzonej analizy etapu pierwszego. W tym celu zaprojektowano badania kontrolne z sześcioma zmiennymi niezależnymi i dwoma zmiennymi zależnymi. Program badań zaprezentowano schematycznie na rys. 4.1.

ETAP I	ETAP I	ETAP I	ETAP II
Badanie nr 1	Badanie nr 2	Badanie nr 3	Badania kontrolne
Określenie wpływu zbrojenia rozproszonego na właściwości mechaniczne przy zmiennej wilgotności	Określenie wpływu zbrojenia rozproszonego na właściwości mechaniczne w czasie dojrzewania	Określenie wpływu zbrojenia rozproszonego i pielęgnacji na właściwości mechaniczne przy zmiennej ilości cementu	Badania przeprowadzone w celu weryfikacji wyników analizy
Zmienne niezależne: 1. ilość zbrojenia rozproszonego, 2. ilość cementu, 3. wilgotność mieszanek.	Zmienne niezależne: 1. ilość zbrojenia rozproszonego, 2. ilość cementu, 3. czas dojrzewania.	Zmienne niezależne: 1. ilość zbrojenia rozproszonego, 2. ilość cementu, 3. warunki pielęgnacji.	Zmienne niezależne: 1. ilość zbrojenia rozproszonego, 2. ilość cementu, 3. warunki pielęgnacji, 4. wilgotność mieszanek, 5. czas dojrzewania, 6. rodzaj gruntu.
Zmienne zależne: 1. siła pionowa, 2. przemieszczenie pionowe, 3. prędkość fal.	Zmienne zależne: 1. siła pionowa, 2. przemieszczenie pionowe, 3. prędkość fal.	Zmienne zależne: 1. siła pionowa, 2. przemieszczenie pionowe, 3. prędkość fal.	Zmienne zależne: 1. siła pionowa, 2. przemieszczenie pionowe.

Rys. 4.1 Schemat podziału programu badań.

Wszystkie badania podczas etapu I, zostały przeprowadzone na gruncie nr 1. W ramach eksperymentu badawczego zapewniono jednolite warunki przygotowywania mieszanek i zagęszczania próbek. Podczas badań wykorzystano te same urządzenia pomiarowe do badań nieniszczących i niszczących. Wszystkie urządzenia pomiarowe były kalibrowane przed ich użyciem.

Jednorodne warunki przygotowania mieszanek do badań:

1. jeden rodzaj gruntu, rozdrobniony i przygotowany jednorazowo na wszystkie próbki,
2. jeden rodzaj cementu, spoiwo pochodziło z jednej partii,
3. jeden rodzaj włókien, zbrojenie rozproszone pochodziło z jednej partii,
4. wspólna procedura dozowania, mieszania i zagęszczania dla wszystkich próbek.

Etap I – badanie nr 1 – Głównym celem badania było określenie wpływu zbrojenia rozproszonego na właściwości mechaniczne przy zmiennej wilgotności mieszanek. Dodatkowo na podstawie uzyskanych rezultatów wyznaczono wilgotność mieszanek do badania nr 2 i 3. Wszystkie próbki zostały poddane jednakowej pielęgnacji. Badania nieniszczące i niszczące przeprowadzono po 28 dniach pielęgnacji.

W badaniu wydzielono trzy zmienne niezależne:

1. ilość zbrojenia: 0,00%; 0,25%; 0,50%,
2. ilość cementu: 3,00%; 5,00%; 7,00%,
3. wilgotność początkowa: od 6,00% do 13,00% (zwiększane co 1%).

W badaniu wydzielono trzy zmienne zależne:

1. wywierana siła pionowa podczas badania,
2. przemieszczenie pionowe próbki podczas badania,
3. prędkość fal poprzecznych i podłużnych.

Etap I – badanie nr 2 – Głównym celem badania było określenie wpływu zbrojenia rozproszonego na właściwości mechaniczne przy zmiennym czasie utwardzania. Wszystkie próbki zostały zagęszczone przy tej samej wilgotności wyznaczonej podczas badania nr 1. Warunki pielęgnacji były tożsame.

W badaniu wydzielono trzy zmienne niezależne:

1. ilość zbrojenia: 0,00%; 0,25%; 0,50%,
2. ilość cementu: 2,00%; 4,00%; 6,00%,
3. czas utwardzania: 1, 3, 7, 14, 28, 56 dni.

W badaniu wydzielono trzy zmienne zależne:

1. wywierana siła pionowa podczas badania,
2. przemieszczenie pionowe próbki podczas badania,
3. prędkość fal poprzecznych i podłużnych.

Etap I – badanie nr 3 – Głównym celem badania było określenie wpływu zbrojenia rozproszanego na odporność na działanie wody. Na potrzeby badania próbki cementogruntu przygotowywano w seriach składających się z 6 próbek. Po przygotowaniu próbki poddano 28 dniowej pielęgnacji. Trzy spośród nich zostały dodatkowo poddane pielęgnacji w wodzie. Wszystkie próbki zostały przygotowane i zagęszczone przy jednakowej wilgotności, która została ustalona na podstawie badania nr 1. W tab. 4.1 zestawiono liczbę przebadanych próbek i przeprowadzonych pomiarów podczas etapu I.

W badaniu wydzielono trzy zmienne niezależne:

1. ilość zbrojenia: 0,00%; 0,25%; 0,50%,
2. ilość cementu: 1,00%; 3,00%; 5,00%; 7,00%; 9,00%
3. warunki pielęgnacji.

W badaniu wydzielono trzy zmienne zależne:

1. wywierana siła pionowa podczas badania,
2. przemieszczenie pionowe próbki podczas badania,
3. prędkość fal poprzecznych i podłużnych.

Tab. 4.1 Zestawienie liczby badań i pomiarów w etapie I.

Numer badania	Liczba próbek	Liczba pomiarów	
		Badania nieniszczące	Badania niszczące
Badanie nr 1 (B1)	108	2160	108
Badanie nr 2 (B2)	162	3240	162
Badanie nr 3 (B3)	90	1440	90
Σ	360	6840	360

Etap II – badania kontrolne – zostały przeprowadzone w celu weryfikacji wyników analizy etapu I. Podczas etapu II przygotowano 72 próbki cementogruntu na bazie trzech rodzajów gruntów opisanych w rozdziale 3.1. W tab. 4.2 zestawiono liczbę przeprowadzonych badań i pomiarów podczas etapu II.

Dla badań kontrolnych przewidziano 6 zmiennych zależnych:

1. ilość zbrojenia: 0,00%; 0,25%; 0,50%,
2. ilość cementu: 5,00%; 8,00; 10,00%,
3. czas utwardzania: 3, 7, 14, 28 dni,
4. wilgotność początkowa: od 6,00% do 16,00% (zgodnie z tab. 7.1),
5. rodzaj gruntu: grunt nr 1; grunt nr 2; grunt nr 3,
6. warunki pielęgnacji.

W badaniu wydzielono dwie zmienne zależne:

1. wywierana siła pionowa podczas badania,
2. przemieszczenie pionowe próbki podczas badania.

Jednorodne warunki przygotowania mieszanek podczas badań kontrolnych:

1. jeden rodzaj cementu, spoiwo pochodziło z jednej partii,
2. jeden rodzaj włókien, zbrojenie rozproszone pochodziło z jednej partii,
3. wspólna procedura dozowania, mieszania i zagęszczania dla wszystkich próbek.

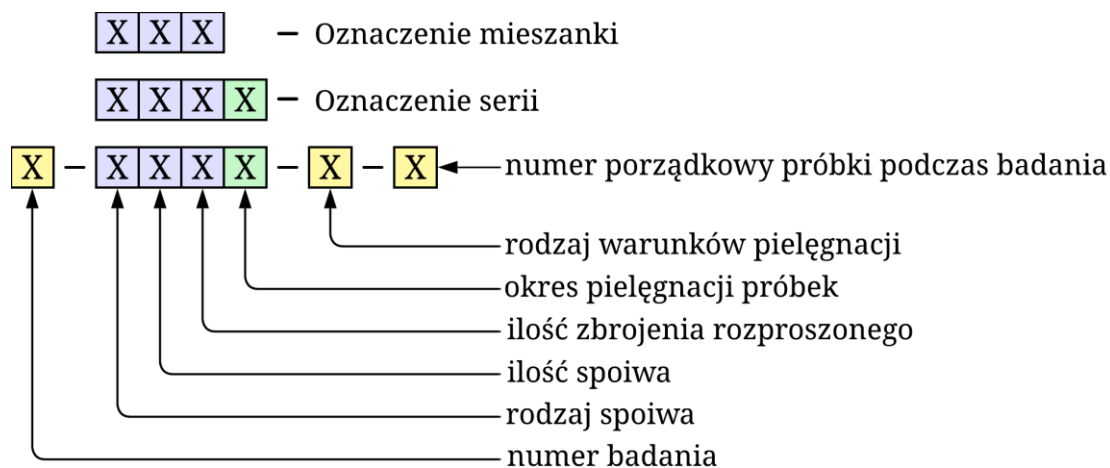
Tab. 4.2 Zestawienie liczby badań i pomiarów w etapie II.

Badanie kontrolne	Liczba próbek	Liczba pomiarów
		Badania niszczące
Badanie kontrolne nr 1 (BK1)	24	24
Badanie kontrolne nr 2 (BK2)	24	24
Badanie kontrolne nr 3 (BK3)	24	24
Σ	72	72

4.2. Przygotowanie i pielęgnacja materiału badawczego

4.2.1. Identyfikacja mieszanek

Każda przygotowana mieszanka stanowi kombinację gruntu, spoiwa, wody i w razie potrzeby zbrojenia rozproszonego. Podczas badań wydzielono dwadzieścia pięć mieszanek materiału kompozytowego. Mieszanki różnią się od siebie procentową zawartością poszczególnych składników w stosunku do suchej masy gruntu. W celu ułatwienia identyfikacji w pracy wydzielono mieszanki, serie oraz indywidualne oznaczenia próbek zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 4.2. Wykaz i oznaczenia zastosowanych mieszanek podczas przeprowadzanych badań zestawiono w tab. 4.3.



Rys. 4.2 Schemat oznaczeń mieszanek, serii i próbek podczas badań.

Tab. 4.3 Zestawienie zastosowanych mieszanek.

Lp.	Rodzaj spoiwa	Ilość spoiwa	Ilość zbrojenia rozproszonego	Oznaczenie mieszanki
1	C - CEM V/A	1 - 1%	0 - 0,00%	C10
2	C - CEM V/A	1 - 1%	1 - 0,25%	C11
3	C - CEM V/A	1 - 1%	2 - 0,50%	C12
4	C - CEM V/A	2 - 2%	0 - 0,00%	C20
5	C - CEM V/A	2 - 2%	1 - 0,25%	C21
6	C - CEM V/A	2 - 2%	2 - 0,50%	C22
7	C - CEM V/A	3 - 3%	0 - 0,00%	C30
8	C - CEM V/A	3 - 3%	1 - 0,25%	C31
9	C - CEM V/A	3 - 3%	2 - 0,50%	C32
10	C - CEM V/A	4 - 4%	0 - 0,00%	C40
11	C - CEM V/A	4 - 4%	1 - 0,25%	C41
12	C - CEM V/A	4 - 4%	2 - 0,50%	C42
13	C - CEM V/A	5 - 5%	0 - 0,00%	C50
14	C - CEM V/A	5 - 5%	1 - 0,25%	C51
15	C - CEM V/A	5 - 5%	2 - 0,50%	C52
16	C - CEM V/A	6 - 6%	0 - 0,00%	C60
17	C - CEM V/A	6 - 6%	1 - 0,25%	C61
18	C - CEM V/A	6 - 6%	2 - 0,50%	C62
19	C - CEM V/A	7 - 7%	0 - 0,00%	C70
20	C - CEM V/A	7 - 7%	1 - 0,25%	C71
21	C - CEM V/A	7 - 7%	2 - 0,50%	C72
22	C - CEM V/A	9 - 9%	0 - 0,00%	C90
23	C - CEM V/A	9 - 9%	1 - 0,25%	C91
24	C - CEM V/A	9 - 9%	2 - 0,50%	C92
25	C - CEM V/A	10 - 10%	0 - 0,00%	C100

Serie próbek dodatkowo zawierają informacje o okresie pielęgnacji, w związku z czym dodano do oznaczenia mieszanek liczbę, która odpowiada okresowi pielęgnacji.

- | | | |
|-----------------------|------------------------|------------------------|
| 1. $T_c = 1$ – ozn. 1 | 3. $T_c = 7$ – ozn. 3 | 5. $T_c = 28$ – ozn. 5 |
| 2. $T_c = 3$ – ozn. 2 | 4. $T_c = 14$ – ozn. 4 | 6. $T_c = 56$ – ozn. 6 |

Dodatkowo każda próbka posiada indywidualny numer, który składa się z oznaczenia serii i informacji na temat rodzaju badania, warunków pielęgnacji i numeru porządkowego. Oznaczenie badań przedstawiono we wcześniejszej części pracy. Numer porządkowy przypisany próbkom podczas badania stanowi kolejne liczby naturalne. Oznaczenia w zależności od warunków pielęgnacji to S dla próbek poddanych pielęgnacji w środowisku powietrzno-suchym oraz W dla próbek poddanych pielęgnacji w środowisku powietrzno-suchym i wodnym.

4.2.2. Przygotowanie składników

Wykorzystywane do badań grunty były przechowywane w plastikowych pojemnikach w pomieszczeniu laboratoryjnym. W trakcie magazynowania grunt uległ znacznemu przesuszeniu, co doprowadziło do powstania brył. Cały materiał został mechanicznie rozdrobniony i przesiany przez sito o oczkach 2,0 mm. Tak przygotowany grunt umożliwił wymieszanie ze sobą poszczególnych składników mieszanek. Wykorzystane sito podczas procesu przygotowywania gruntu jak i przygotowany grunt do badań przedstawiono na rys. 4.3.



Rys. 4.3 a) Sito o oczkach 2,0 mm; b) Grunt nr 1 przygotowany do badań.

Spoiwo i zbrojenie rozproszone zostało dostarczone do laboratorium w szczelnych workach, materiał był składowany w suchym pomieszczeniu o stałej temperaturze. Miejsce zapewniło ochronę przed niekorzystnym wpływem warunków atmosferycznych i przed zanieczyszczeniem materiału.

4.2.3. Dozowanie i mieszanie składników w warunkach laboratoryjnych

Wszystkie przygotowane mieszanki zostały sporządzone zgodnie ze składami przedstawionymi w tab. 4.3. Próbkę przeznaczoną do badań została przygotowana na bazie wcześniej rozdrobnionego gruntu. Składniki zostały odmierzone wagowo w stosunku do masy gruntu przy pomocy wagi laboratoryjnej RADWAG PS 6000/C/1 o dokładności pomiaru do 0,01 grama. Waga każdorazowo przed użyciem została wypoziomowana i wytarowana. Do wymieszania ze sobą wszystkich składników mieszanek wykorzystano mieszadło elektryczne marki Dedra o mocy 1200 watów, regulowanych obrotach i specjalnej końcówce do mieszania materiałów. Na rys. 4.4 przedstawiono wykorzystywaną wagę laboratoryjną i mieszadło używane do przygotowywania mieszanek.



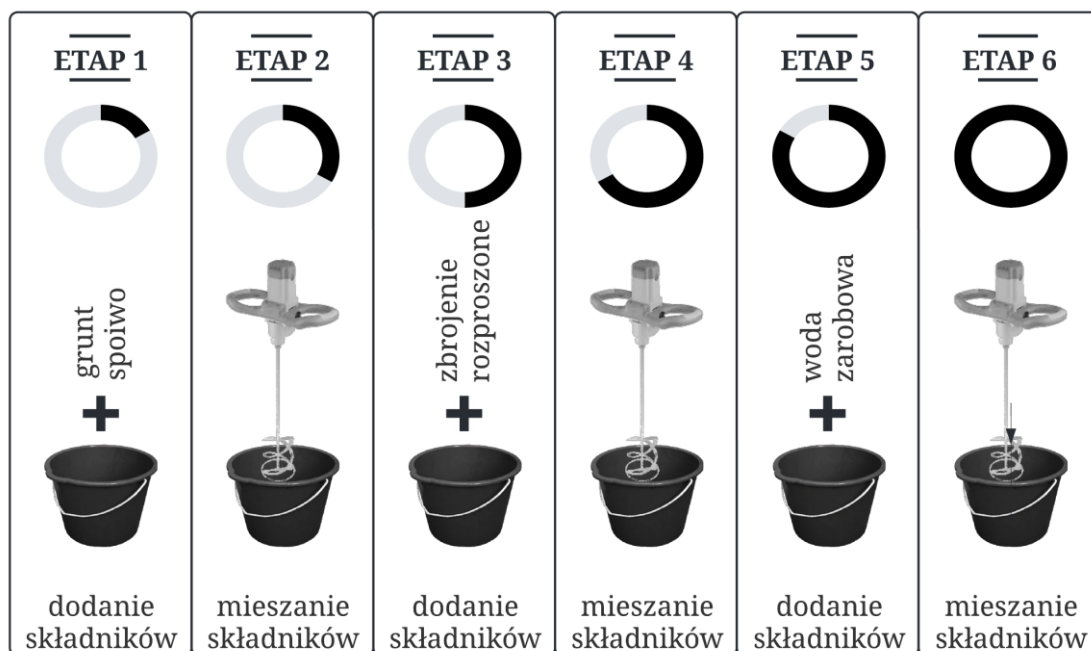
a)

b)

Rys. 4.4 a) Waga laboratoryjna RADWAG PS 6000/C/1; b) Mieszarka elektryczna.

Każda mieszanka została przygotowana zgodnie z procedurą mieszania, która składa się z 6 etapów. Procedura ta została sporządzona w celu ujednolicenia procesu mieszania ze sobą poszczególnych składników. Schemat procedury zaprezentowano na rys. 4.5. Objętość przygotowywanych zarobów była dostosowana do planowanych badań, tak aby wszystkie próbki w danej serii zostały sporządzone na bazie tej samej mieszanki. Procedura mieszania w warunkach laboratoryjnych została podzielona na następujące etapy:

1. dodanie odmierzonej ilości spoiwa do przygotowanego gruntu,
2. mieszanie ze sobą składników przy pomocy mieszarki elektrycznej przez co najmniej 60 sekund do uzyskania jednorodnej mieszanki,
3. dodanie odmierzonej ilości włókien polipropylenowych do wymieszanego gruntu ze spoiwem (dla mieszanek bez zbrojenia rozproszonego etap 3 i 4 został pominięty),
4. mieszanie ze sobą składników przy pomocy mieszarki elektrycznej przez co najmniej 60 sekund do uzyskania jednorodnej mieszanki,
5. dodanie odmierzonej ilości wody zarobowej do mieszanki,
6. mieszanie składników przy użyciu mieszarki elektrycznej do uzyskania jednorodnej mieszanki, składające się z trzech części:
 - a. wstępny czas mieszania min. 60 sekund,
 - b. po wstępnym wymieszaniu składników przy pomocy metalowej łopatkii oddzielono mieszankę przylegającą do powierzchni pojemnika,
 - c. zasadnicze mieszanie składników aż do uzyskania jednorodnej mieszanki. Czas mieszania wynosił min. 60 sekund.

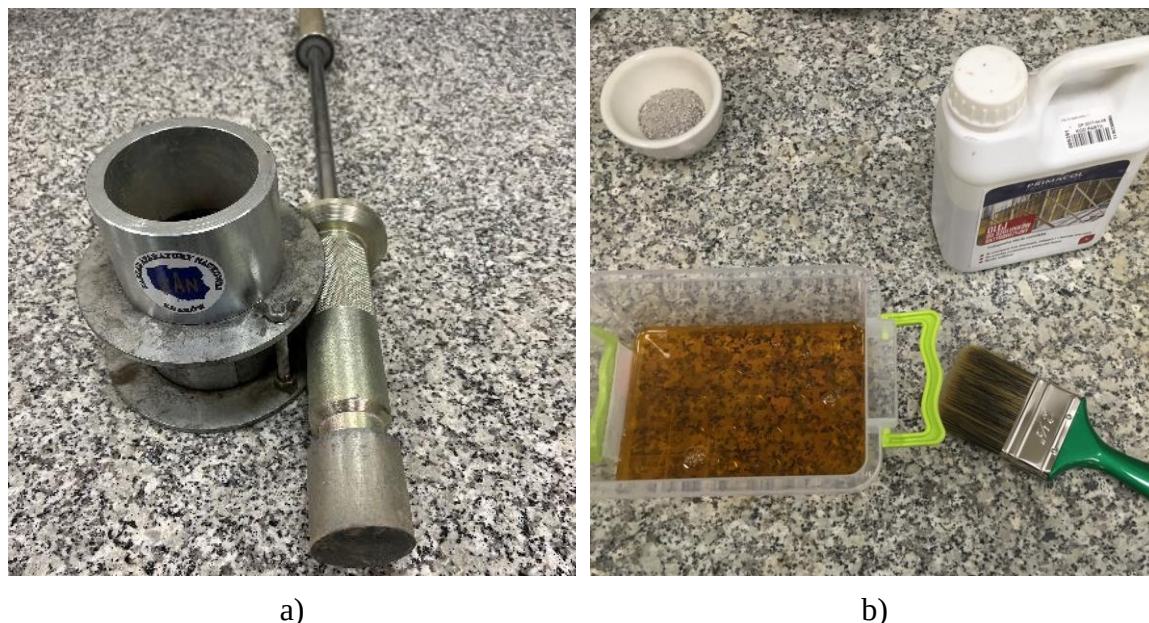


Rys. 4.5 Schemat kolejności dozowania i mieszania ze sobą składników mieszanek.

Bezpośrednio po przygotowaniu mieszanki określono jej wilgotność zgodnie z normą PN-EN 13286-1 [194]. W tym celu pobrano próbkę mieszanki i umieszczono ją w zważonym tyglu porcelanowym. Następnie próbka została poddana suszeniu w temperaturze 105°C przez 24 godziny. Po wysuszeniu tygiel porcelanowy z wysuszonym gruntem został ponownie zważony. Podczas badań wykorzystano wagę laboratoryjną RADWAG PS 6000/C/1 z dokładnością pomiarową do 0,01 grama.

4.2.4. Przygotowanie próbek

Po przygotowaniu mieszanek w warunkach laboratoryjnych od razu przystąpiono do formowania próbek. Próbki zostały przygotowane w formach cylindrycznych o średnicy i wysokości równej 8 cm. Przed przystąpieniem do zagęszczania forma została zważona i pokryta od strony wewnętrznej cienką warstwą płynu antyadhezyjnego, rys. 4.6b. Wszystkie przygotowane próbki zostały zagęszczone za pomocą ubijaka, zapewniającego stałą energię jednostkową na poziomie 0,59 J/cm³, zgodnie z normą PN-EN 13286-50 [204]. Próbki były zagęszczane w dwóch warstwach, gdzie na każdą warstwę przypadało 16 uderzeń ubijaka o masie 2,5 kg i 305 mm wysokości spadania. Próbki w badaniu nr 1 były zagęszczane przy zmiennej wilgotności, podczas pozostałych badań próbki były zagęszczane przy wilgotności wyznaczonej podczas badania nr 1. Po zagęszczeniu każda forma wraz z mieszanką została zważona przy pomocy wcześniej opisanej wagi laboratoryjnej. Na rys. 4.6 przedstawiono sprzęt potrzebny do przygotowania próbek.



Rys. 4.6 a) Lekki ubijak i forma do stabilizacji; b) Płyn antyadhezyjny i drobne narzędzia.

4.2.5. Pielęgnacja próbek

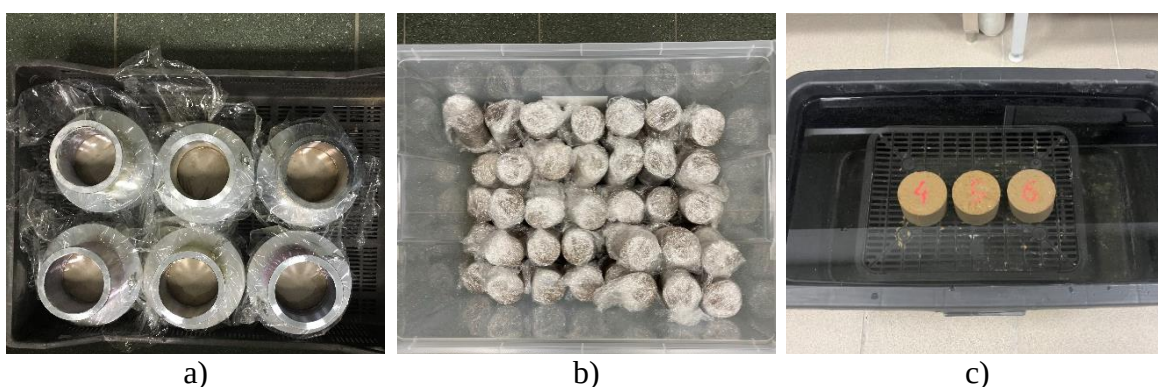
Pielęgnacja przygotowanych próbek została przeprowadzona zgodnie z procedurą opisaną w normie PN-EN 14227-15 z 2015 roku [210]. W badaniach wykorzystano 8 rodzajów pielęgnacji zgodnie z tab. 4.4. Każda pielęgnacja była podzielona na 3 okresy:

1. Obejmował pierwsze 24 godziny po zagęszczeniu świeżej mieszanki, w tym czasie próbka była umieszczona w formie dwudzielnej do stabilizacji, zabezpieczona przed wysychaniem. Próbkę w tym okresie były przechowywane w pomieszczeniu o temperaturze $20 \pm 2^\circ\text{C}$ i stałej wilgotności.
2. Rozpoczął się bezpośrednio po wyjęciu próbek z formy dwudzielnej do stabilizacji i trwał od 2 do 55 dni. W tym czasie próbki były zabezpieczone przed utratą wilgotności przy pomocy foli typu *stretch*. Próbkę były magazynowane w pomieszczeniu o temperaturze $20 \pm 2^\circ\text{C}$ i stałej wilgotności.
3. Rozpoczął się bezpośrednio po zdjęciu foli z próbek i trwał do 7 dni w zależności od rodzaju zastosowanej pielęgnacji. W tym czasie próbki były całkowicie zanurzone w wodzie. Próbkę były umieszczone na specjalnej kratce, która umożliwiała swobodny opływ wody.

Bezpośrednio po drugim lub trzecim okresie pielęgnacji w pierwszej kolejności następował pomiar prędkości fali poprzecznej i podłużnej przy pomocy betonoskopu, a następnie przeprowadzano badanie jednoosiowego ściskania. Próbkę w poszczególnych okresach pielęgnacji przedstawiono na rys. 4.7.

Tab. 4.4 Zestawienie sposobu pielęgnacji próbek.

Rodzaj pielęgnacji	Liczba dni pielęgnacji			Łączna liczba dni – T_C
	Okres 1	Okres 2	Okres 3	
A	1	0	0	1
B	1	2	0	3
C	1	6	0	7
D	1	13	0	14
E	1	27	0	28
F	1	55	0	56
G	1	20	7	28
H	1	3	4	7



Rys. 4.7 Próbki podczas pielęgnacji; a) okres 1; b) okres 2; c) okres 3.

4.3. Aparaturowa pomiarowa

Badania zostały podzielone na badania nieniszczące i badania niszczące. W pierwszej kolejności na każdej próbce przeprowadzono 20 pomiarów prędkości fal, a następnie przeprowadzono badanie jednoosiowego ściskania. Przed badaniem próbki zostały zmierzone i zważone.

4.3.1. Badania nieniszczące

Badania nieniszczące zostały przeprowadzone przy użyciu betonoskopu firmy Proceq, model Pundit Lab+ (rys. 4.8a). Nazwa *Pundit* jest skrótem od *Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Tester*. Określenie *UPV* jest skrótem od *Ultrasonic Pulse Velocity*, co oznacza prędkość pulsu ultradźwiękowego. Jest to nazwa wykorzystywane do określenia prędkości fal zmierzonej metodami ultradźwiękowymi. W niniejszej pracy przyjęto oznaczenia, dla prędkości fali podłużnej (V_P) i dla prędkości fali poprzecznej (V_S), określonymi metodami ultradźwiękowymi. Aparatura badawcza wysyła i odbiera fale przechodzące przez badany materiał. Różnica czasu między falą nadaną a falą odebraną to

czas, w jakim fale podłużne i poprzeczne rozprzestrzeniają się w badanym ośrodku. Prędkość fali jest obliczana jako iloraz odległości pomiędzy głowicą nadawczą i odbiorczą a zmierzonym czasem przejścia fali (t_p lub t_s):

$$V_P = \frac{h}{t_p} \quad 4.1$$

$$V_S = \frac{h}{t_s} \quad 4.2$$

gdzie:

V_P – prędkość fali podłużnej wyznaczona metodą ultradźwiękową,

V_S – prędkość fali poprzecznej wyznaczona metodą ultradźwiękową,

h – droga przejścia fali,

t_p – czas przejścia fali podłużnej,

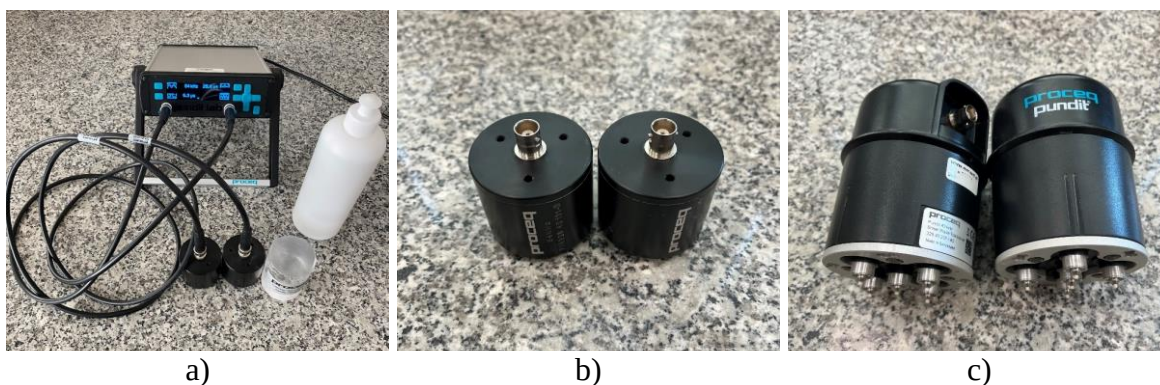
t_s – czas przejścia fali poprzecznej.

W dalszej części pracy zmierzone prędkości fal są powiązane z parametrami odkształceniowymi w zakresie bardzo małych odkształceń. Urządzenie typu betonoskop pierwotnie zostało zaprojektowane do badań skał i betonu, co zostało ujęte w normach takich jak: PN-EN 12504-4 [193], ASTM C597-02 [178], ASTM D2845-00 [179]. Normy nie obejmują badań przeprowadzanych na gruntach stabilizowanych. Dlatego też wszystkie badania zostały przeprowadzone zgodnie z zaleceniami producenta urządzenia pomiarowego.

Aparatura została wyposażona w dwa rodzaje przetworników do nadawania fal o różnych częstotliwościach, wymiarach i prętach kalibracyjnych. Każdy zestaw przetworników składa się z dwóch głowic: nadawczej i odbiorczej. Przetworniki o częstotliwości 54 kHz (rys. 4.8b) są przeznaczone do pomiaru prędkości fali podłużnej. Aby zapewnić prawidłowe przyleganie przetworników do powierzchni próbki i umożliwić przejście fali pomiędzy głowicą a próbką zastosowano warstwę sprzęgającą w postaci nietoksycznego żelu o wysokiej lepkości (żel do badań USG). Drugi rodzaj przetworników, o częstotliwości 40 kHz (rys. 4.8c), jest dedykowany do pomiaru prędkości fali poprzecznej. Ten specyficzny rodzaj przetworników nie wymaga stosowania warstwy sprzęgającej dzięki technologii DPC (z ang. *Dry Point Contact*). Urządzenie pomiarowe umożliwia prowadzenie badań z rozdzielczością 0,1 μ s i rejestracji czasu przejścia fali w zakresie od 0,1 do 9999 μ s. Nadajniki mogą wysyłać fale o napięciu 125, 250, 350 i 500 V. Fala odbierana może zostać wzmocniona w zakresie od 1 do 1000x. Parametry urządzenia pomiarowego i zastosowanych przetworników zestawiono w tab. 4.5.

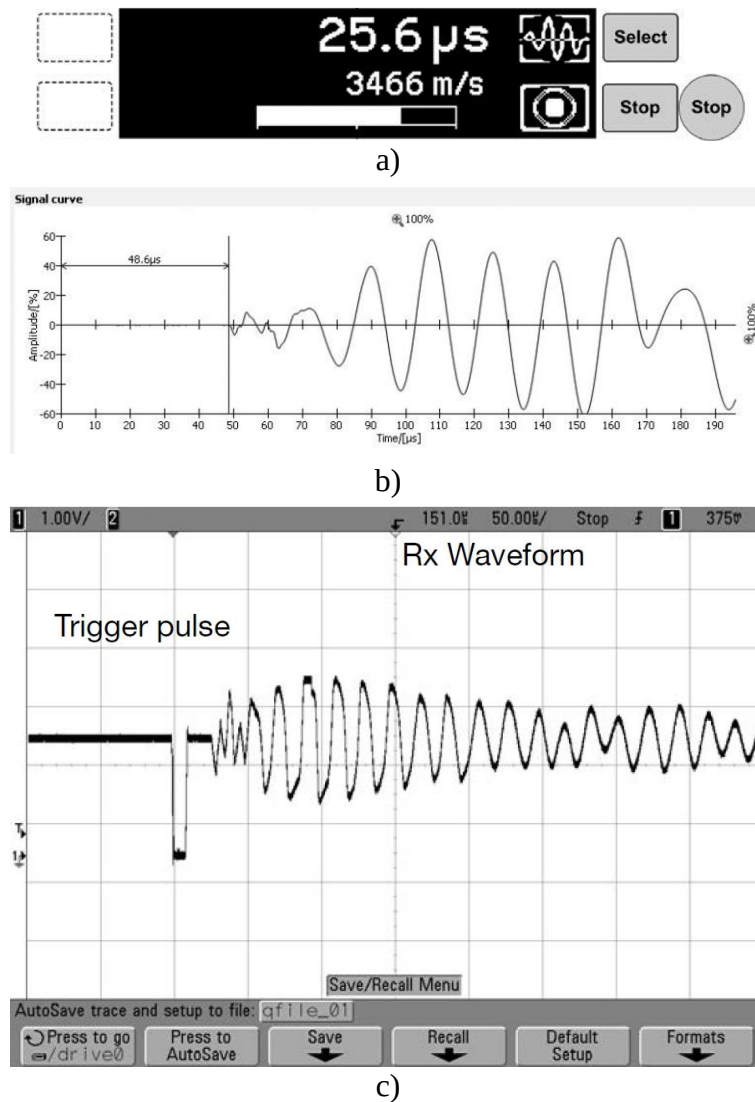
Tab. 4.5 Podstawowe parametry urządzenia *Pundit Lab+* i przetworników.

Parametr	Wartość	Jednostka
Urządzenie pomiarowe		
Producent	Proceq	[-]
Model	Pundit Lab+	[-]
Długość pomiaru	0.1 - 9999	[μ s]
Rozdzielczość	0,1	[μ s]
Częstotliwość	24, 37, 54, 82, 150, 200, 220, 250, 500	[kHz]
Napięcie wzbudzenia	125, 250, 350, 500	[V]
Przetworniki do pomiaru fali podłużnej		
Producent	Proceq	[-]
Model	Przetwornik 54 kHz	[-]
Rodzaj	Pojedynczy kryształ	[-]
Częstotliwość	54 ± 5	[kHz]
Zakres napięć wzbudzenia	Od -1000 do +1000	[V]
Przetworniki do pomiaru fali poprzecznej		
Producent	Proceq	[-]
Model	Przetwornik 40 kHz	[-]
Rodzaj	5x podwójny kryształ <i>dry-point contact (DPC)</i>	[-]
Częstotliwość	40	[kHz]
Zakres napięć wzbudzenia	Od -200 do +200	[V]

Rys. 4.8 a) Urządzenie *Pundit Lab+*; b) przetworniki 54 kHz; c) przetworniki 40 kHz.

Przetworniki nadają pojedynczy impuls, który po przejściu przez badany ośrodek jest odbierany przez przeciwległy przetwornik. Dodatkowo urządzenie pomiarowe daje możliwość użytkownikowi wzmocnić odbierany sygnał. Czas przejścia tego sygnału może zostać odczytany na kilka sposobów. Pierwszy z nich i zarazem najprostszy polega na odczytaniu wyniku bezpośrednio z ekranu urządzenia pomiarowego, co przedstawiono na rys. 4.9a. Jednak metoda ta daje małą możliwość interpretacji wyników. Druga metoda polega na przekierowaniu wyniku do programu sterującego na komputerze, co pozwala

przeprowadzić analizę odebranego sygnału. Na rys. 4.9b przedstawiono odebrany sygnał w programie sterującym. Ostatnia metoda wymaga zastosowania dodatkowego urządzenia takiego jak oscyloskop. Zaletą tej metody jest jednoczesna obserwacja sygnału nadanego i odebranego, przykład odczytanego sygnału przedstawiono na rys. 4.9c.



Rys. 4.9 Odczyt prędkości fali podczas badania; a) z betonoskopu 1; b) z programu sterującego 2; c) z wykorzystaniem oscyloskopu [186].

W trakcie badań wykorzystano drugą metodę odczytu czasu przejścia do obliczenia prędkości fal. Sam odczyt z wykorzystaniem programu sterującego jest możliwy po podłączeniu aparatury pomiarowej do komputera i zainstalowaniu programu dostarczonego przez producenta, *Punditlink 2.4.4*. Zgodnie z normą PN-EN 12504-4 [193], przed przystąpieniem do badań należy przeprowadzić kalibrację urządzenia pomiarowego, wykorzystując wzornik kalibracyjny, który jest dostarczony przez producenta. Kalibracja jest niezbędna z uwagi na opóźnienia wynikające z przesyłania sygnału przez przewody

łącznie przetworniki i urządzenie pomiarowe. Czas kalibracji jest różnicą czasu przejścia fali przez wzornik kalibracyjny a czasem wzorcowym, tak wyznaczoną wartość należy uwzględnić podczas badań. Do każdego kompletu przetworników producent dostarczył wzornik kalibracyjny. Do kalibracji urządzenia i przetworników 54 kHz do pomiaru fali podłużnej wykorzystano pręt kalibracyjny wykonany z polimeru PMMA, który przedstawiono na rys. 4.10a. Wzorcowy czas przejścia fali w medium wynosi 25,4 μ s. Przy zastosowaniu przetworników 40 kHz do pomiaru prędkości fali poprzecznej wykorzystano płytkę kalibracyjną, rys. 4.10b, której czas wzorcowy wynosi 1,1 μ s. Dla obu rodzajów przetworników opóźnienie było tożsame i wynosiło 5,6 μ s.



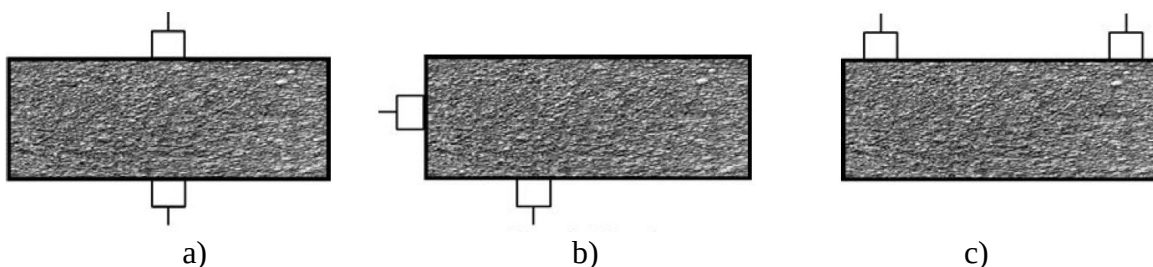
a)

b)

Rys. 4.10 Wzorniki kalibracyjne przetworników: a) 54 kHz; b) 40 kHz.

Zgodnie z normą PN-EN 12504-4 [193] prędkości fali ultradźwiękowej można wyznaczyć na podstawie trzech metod pomiarowych:

- pomiar bezpośredni (rys. 4.11a),
- pomiar częściowo bezpośredni (rys. 4.11b),
- pomiar pośredni (rys. 4.11c).



a)

b)

c)

Rys. 4.11 Sposób pomiaru: a) bezpośredni; b) częściowo bezpośredni; c) pośredni [186].

Podczas badań nieniszczących została wykorzystana metoda bezpośrednia pomiaru prędkości fali. W tego rodzaju układzie przekazywana energia jest zmaksymalizowana, a długość przebytej drogi jest znana [193] i określona z dokładnością do 1%. Do zmierzonej długości nie wlicza się grubości warstwy sprzęgającej, ale za to wykonuje się serię początkowych odczytów czasu przejścia fal, aż do uzyskania stabilnych odczytów. W ten sposób minimalizuje się wpływ warstw sprzęgających. Podczas badań nie stosowano korekty wynikającej z wpływu temperatury na zmierzone prędkości, ponieważ nie jest ona wymagana, jeśli badania są przeprowadzone w temperaturze od 10 do 30°C. Przed badaniem dla każdej próbki określono jej wysokość i masę. Wysokość została zmierzona przy pomocy suwmiarki, a do pomiaru masy została wykorzystana waga laboratoryjna RADWAG PS 6000/C/1 o dokładności pomiaru do 0,01 grama. Badanie przeprowadzono na przygotowanym stanowisku pomiarowym. W pierwszej kolejności określano czas przejścia fali poprzecznej przez badaną próbkę, a następnie czas przejścia fali podłużnej. Kolejność przeprowadzanych pomiarów wynikała z braku konieczności stosowania warstwy sprzęgającej podczas pomiarów przetwornikami o częstotliwości 40 kHz. Podczas badań napięcie nadajnika i wzmocnienie odbiornika było regulowane ręcznie aż do uzyskania stabilnego kształtu fali. Podczas badań, w których wykorzystano przetworniki do pomiaru fali podłużnej, zastosowano zalecaną częstotliwość 54 kHz. W przypadku przetworników dedykowanych do pomiaru fali poprzecznej zalecana wartość częstotliwości wynosi 40 kHz, która jest niedostępna z poziomu programu sterującego. W związku z tym wprowadzono obliczoną długość pulsu równą 12,5 μs, która odpowiada częstotliwości 40 kHz. Wartość ta została wyznaczona ze wzoru 4.3 zgodnie z zaleceniem producenta [186]:

$$P = \frac{1000}{2 \cdot f} \quad 4.3$$

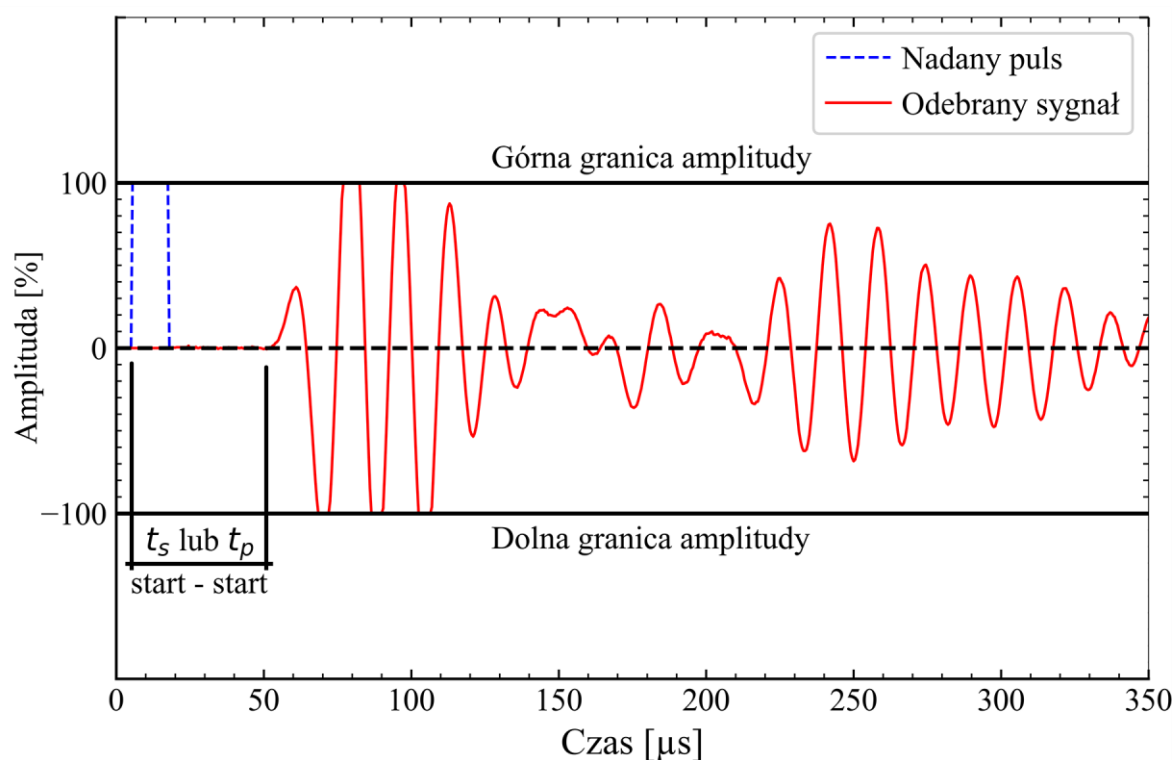
gdzie:

P – długość pulsu,

f – częstotliwość zastosowanych przetworników.

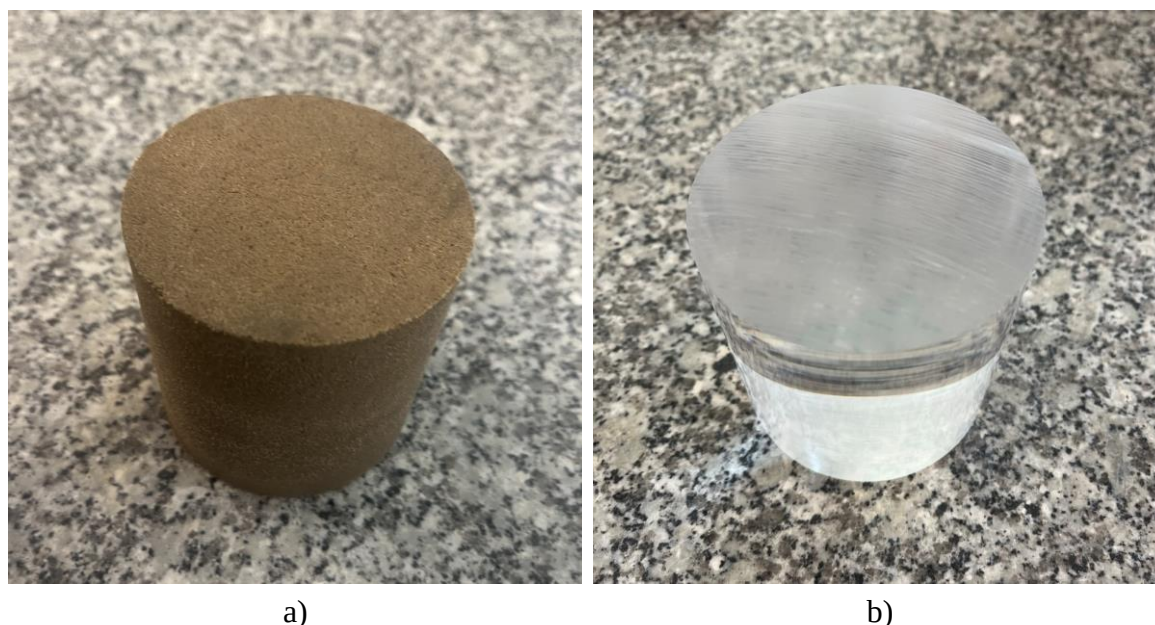
W przypadku pomiarów propagacji fali istotnym czynnikiem jest interpretacja odebranych sygnałów. Sama interpretacja polega na identyfikacji charakterystycznych miejsc w sygnale odebrany, w celu wyznaczenia prędkości rozchodzenia się fal. W tym celu można zastosować jedną z dwóch technik interpretacyjnych [146]. Pierwsza technika polega na wyznaczeniu szczytu fali odebranej, druga zaś na określeniu jej początku. Techniki te nazywane są odpowiednio *od szczytu do szczytu* i *od startu do startu*. W badaniach techniką ultradźwiękową wykorzystywana jest metoda *od startu do startu*. Jest

to związane z kształtem wysłanego sygnału, gdzie nadawany jest pojedynczy puls, w którym nie ma wyraźnego szczytu, co stanowi utrudnienie podczas interpretacji techniką *od szczytu do szczytu*. Aby ułatwić i usystematyzować procedurę interpretacji wyników, producent dostarczył oprogramowanie, które posiada wbudowaną funkcję do automatycznego wykrywania początku odebranej fali. Funkcja ta została wykorzystana do wstępnej interpretacji wyników, lecz ostateczna interpretacja została przeprowadzona przez operatora urządzenia pomiarowego. Zastosowaną technikę interpretacji wyników przedstawiono schematycznie na rys. 4.12.



Rys. 4.12 Schemat interpretacji odebranego sygnału, metoda *od startu do startu*.

Aby potwierdzić poprawność wyników pomiarów prędkości fal uzyskanych na walcowych próbkach o średnicy 8 cm i wysokości 8 cm, przeprowadzono walidację metody pomiarowej. Proces walidacji został podzielony na dwa etapy, których celem była ocena wpływu rozmiarów próbki na odczytywane wyniki. W celu walidacji metody pomiarowej wytworzono próbkę wzorcową z polimeru PMMA o wymiarach badanych próbek cementogruntu. Próbkę wzorcową i próbkę cementogruntu przedstawiono na rys. 4.13.



Rys. 4.13: a) Przykładowa próbka; b) próbka wzorcowa z PMMA.

Podczas pierwszego etapu walidacji zmierzono prędkości fal w próbce wzorcowej i pręcie kalibracyjnym. Obie próbki zostały wykonane z polimeru PPMA, co pozwoliło na ocenę wpływu wymiarów próbki wzorcowej na prędkość fali podłużnej. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że prędkość fali podłużnej w pręcie dostarczonym przez producenta była o 0,66% większa niż w próbce wzorcowej. Uzyskany wynik wskazuje na brak istotnego wpływu wymiarów badanej próbki na zmierzone wartości prędkości fal podłużnych. Szczegółowe wyniki zestawiono w tab. 4.6.

Tab. 4.6 Wyniki pierwszego etapu weryfikacji.

Rodzaj fali	Próbka	t_p	h	V_p - obliczone
[-]	[-]	[μ s]	[m]	[m/s]
V_p	Pręt kalibracyjny firmy <i>Proceq</i>	25,4	0,069	2727
V_s	Próbka wzorcowa	29,9	0,081	2709

Z uwagi na niewielkie wymiary pręta kalibracyjnego, niemożliwym było porównanie prędkości fal poprzecznych. W związku z tym drugi etap walidacji polegał na wyznaczeniu parametru odkształceniowego próbki wzorcowej i porównaniu uzyskanego wyniku z wartościami literaturowymi. Do weryfikacji wybrano współczynnik Poissona, który określa stosunek odkształcenia poprzecznego (ε_H) do odkształcenia podłużnego (ε_V), co można zapisać wzorem 4.4. Współczynnik Poissona dla materiału PMMA mieści się w przedziale od 0,35 do 0,40 [186]. Współczynnik Poissona został określony na podstawie prędkości fali podłużnej i poprzecznej zgodnie ze wzorem 4.5 i wynosił 0,35. Szczegółowe wyniki zestawiono w tab. 4.7 a odebrane sygnały podczas drugiego etapu weryfikacji

przedstawiono na rys. 4.14. Uzyskany wynik mieści się w przyjętym przedziale, w związku z czym należy uznać, że wymiary próbek nie wpływają istotnie na wyniki badań nieniszczących, a przyjęta metoda interpretacji wyników jest skuteczna.

$$\nu = \frac{\varepsilon_H}{\varepsilon_V} \quad 4.4$$

gdzie:

ν – współczynnik Poissona,

ε_H – odkształcenia poprzeczne,

ε_V – odkształcenia podłużne.

$$\nu_{UPV} = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad 4.5$$

gdzie:

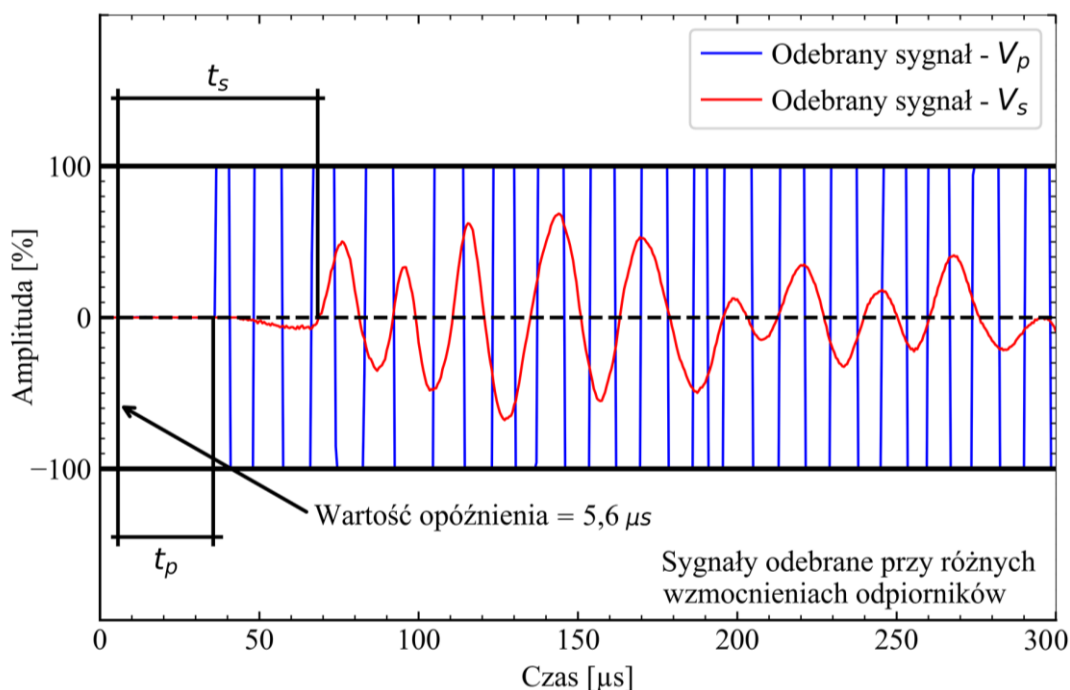
ν_{UPV} – współczynnik Poissona wyznaczony metodą ultradźwiękową,

V_p – prędkość fali podłużnej wyznaczona metodą ultradźwiękową,

V_s – prędkość fali poprzecznej wyznaczona metodą ultradźwiękową.

Tab. 4.7 Wyniki drugiego etapu weryfikacji.

Rodzaj fali	Próbka	t	h	V - obliczone
[-]	[-]	[μs]	[m]	[m/s]
V_p	Próbka wzorcowa	29,9	0,081	2709
V_s	Próbka wzorcowa	61,8	0,081	1311



Rys. 4.14: Odebrane sygnały fal przechodzących przez próbkę wzorcową.

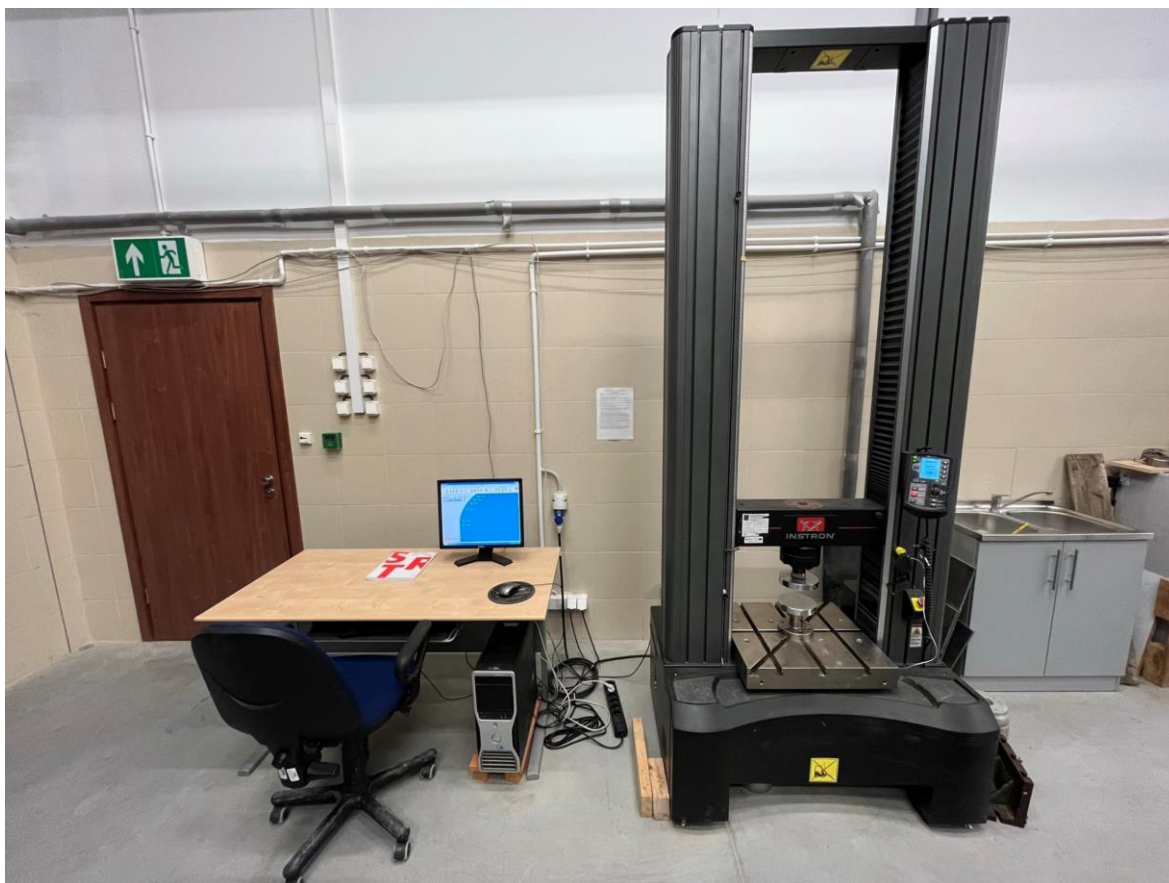
4.3.2. Badania niszczące

Badania jednoosiowego ściskania zostały przeprowadzone w laboratorium wytrzymałościowym materiałów i konstrukcji budowlanych w budynku Centrum Wodnego. Laboratorium zostało wyposażone w uniwersalną maszynę wytrzymałościową marki Instron, Model 5982. Podczas badania nacisk na próbki był wywierany przez stalowe płyty dociskowe, które zapewniały równomierne obciążenie badanych próbek. Urządzenie zostało wyposażone w czujnik siły i rejestrator przemieszczeń. Zastosowany czujnik siły umożliwił rejestrację obciążenia do wartości 100 kN z zachowaniem dokładności rejestracji na poziomie $\pm 0,5\%$. Rejestrator przemieszczeń zapewnił dokładność pomiarów przemieszczeń na poziomie $\pm 0,01$ mm. Częstotliwość rejestracji danych podczas badania wynosiła 2,5 kHz. Podczas przeprowadzanych badań wykorzystano program sterujący aparaturą Bluehill 2.0. Przy pomocy programu sterującego przeprowadzano kalibrację czujnika siły przed każdą serią badań oraz ustawiono odczyt czujnika przemieszczeń na wartość zero przed każdym badaniem. Podczas badania została zarejestrowana zależność obciążenia od przemieszczenia, następnie na podstawie wprowadzonych parametrów program sterujący przekonwertował uzyskaną charakterystykę na zależność naprężenia od odkształcenia. Na rys. 4.15 przedstawiono stanowisko badawcze, a w tab. 4.8 zestawiono najważniejsze parametry urządzenia pomiarowego.

Tab. 4.8 Podstawowe parametry pomiarowe uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej.

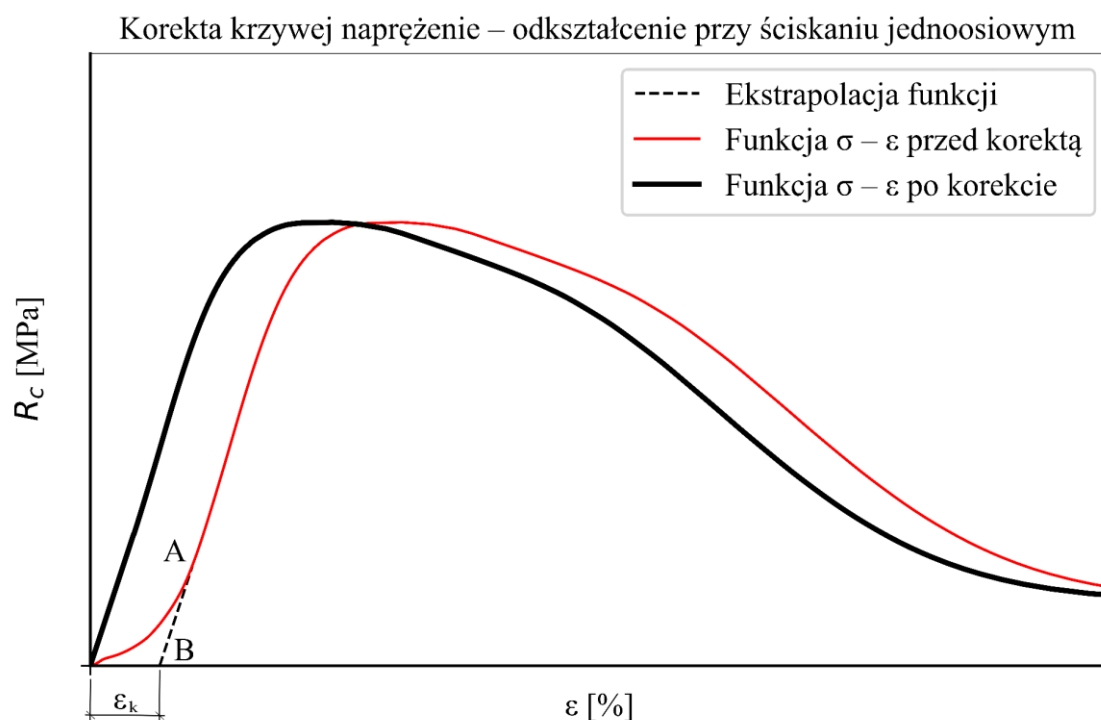
Parametr	Wartość	Jednostka
Dokładność pomiaru siły	$\pm 0,5$	[%]
Dokładność pomiaru przemieszczenia	$\pm 0,01$	[mm]
Dokładność prędkości obciążania	$\pm 0,1$	[%]
Częstotliwość rejestracji danych	2,5	[kHz]
Prędkość obciążania	0,05	[N/mm ² /s]

Obciążenie podczas badania jednoosiowego ściskania było wywierane w sposób ciągły i jednolity. Zgodnie z normą PN-EN 13286-41 [197] badanie powinno trwać od 30 do 60 sekund. Podczas obciążania siła była przykładana w sposób ciągły ze stałym przyrostem naprężenia, które wynosiło 0,05 N/mm²/s. Podczas badania była prowadzona ciągła rejestracja siły i przemieszczeń pionowych. W zarejestrowanych zależnościach naprężenie – odkształcenie zostały wprowadzone poprawki pomijające efekt dostosowywania się badanej próbki. Efekt ten może zostać wywołany przez czynniki takie jak nierównoległa powierzchnia badanej próbki w stosunku do płyty dociskowej czy też chropowatość powierzchni próbki [152].



Rys. 4.15 Uniwersalna maszyna wytrzymałościowa, marki Instron.

Wspomniane niedokładności kontaktowe mogą prowadzić do nierównomiernego rozkładu naprężeń. W rezultacie początkowe odkształcenia mogą być spowodowane dostosowaniem się próbki do powierzchni płyt dociskowych. Wszystkie pomiary zostały poddane korekcie z wykorzystaniem programu Bluehill 2.0. Błąd pomiarowy jest określany przez ekstrapolacje części krzywej poza początkowe odkształcenia, liniowo z powrotem do osi poziomej. W wyniku korekty otrzymujemy punkt B [22], który jest punktem przecięcia ekstrapolacji funkcji z osią poziomą. Następnie program korygował długość pomiarową próbki i wyliczał odległość pomiędzy punktem B a początkiem zarejestrowanej krzywej podczas badania. W załączniku B przedstawiono korekty do zarejestrowanych krzywych naprężenie – odkształcenie dla badanych próbek. Wprowadzenie tych poprawek ma na celu zapewnienie bardziej precyzyjnej interpretacji właściwości mechanicznych materiału, eliminując jednocześnie zakłócenia spowodowane nierównomiernym rozkładem naprężeń na powierzchni próbki w pierwszym etapie obciążania. Schematycznie zobrazowano wprowadzane poprawki na rys. 4.16.



Rys. 4.16 Schemat wprowadzanych poprawek do zależności naprężenie – odkształcenie.

4.4. Parametry mechaniczne

Na podstawie przeprowadzonych badań zostały określone właściwości mechaniczne gruntów stabilizowanych. Zidentyfikowano parametry wytrzymałościowe takie jak wytrzymałość na ściskanie definiowana jako zdolność materiału do opierania się działaniu sił zewnętrznych. Dodatkowo na podstawie przeprowadzonych badań nieniszczących i niszczących określono parametry odkształceniowe.

4.4.1. Parametry wytrzymałościowe

Klasyfikacja parametrów wytrzymałościowych została przeprowadzona zgodnie z obowiązującą normą PN-EN 14227-15 [210], która została szczegółowo opisana w rozdziale 2.3.2.7. W rozdziale tym wymieniono trzy metody, na podstawie których należy określić właściwości mechaniczne cementogrunty, czyli badanie kalifornijskiego wskaźnika nośności, badanie jednoosiowego ściskania i badanie rozciągania z określeniem modułu sprężystości. Spośród trzech wspomnianych metod wybrano metodę drugą, czyli badanie jednoosiowego ściskania. Również na tej podstawie zostanie przeprowadzona klasyfikacja cementogrunty z dodatkiem zbrojenia rozproszonego. Pozostałe dwie metody zostały odrzucone na podstawie przeglądu literatury i doświadczenia badacza. Na potrzeby klasyfikacji dla każdej serii określono średnią wartości wytrzymałości na podstawie trzech

testów, przy czym wykluczono wszystkie wyniki odbiegające o więcej niż 20% od wyznaczonej wartości średniej. Na podstawie wyznaczonej wytrzymałości przeprowadzono klasyfikacje zgodnie z tab. 2.13. Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie wyznaczono na podstawie wzoru 2.9, rozdział 2.3.2.7:

$$R_c = \frac{F_c}{A}$$

gdzie:

R_c – wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie,

F_c – największa zarejestrowana siła ściskająca,

A – pierwotna powierzchnia badanej próbki.

W ramach badania nr 3 zbadano wpływ zbrojenia rozproszonego na odporność na oddziaływanie wody. Zgodnie z zaleceniami normowymi oznaczenie wytrzymałości należy wykonać na serii składającej się z co najmniej 3 próbek. Kategorie odporności określono na podstawie wzoru 4.6. Klasyfikacje odporności na wodę przeprowadzono zgodnie z kategoriami zawartymi w tab. 2.14.

$$I = \frac{R_{Ci}}{R_c} \quad 4.6$$

gdzie:

I – odporność na działanie wody,

R_{Ci} – wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie po pielęgnacji w wodzie,

R_c – wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie.

4.4.2. Parametry odkształceniowe

W pracy wyznaczono parametry odkształceniowe na podstawie przeprowadzonych badań niszczących i nieniszczących. Na podstawie przeprowadzonych badań jednoosiowego ściskania wyznaczono sieczny moduł sprężystości E_{50} . Następnie wykorzystując wyznaczone prędkości fal, określono parametry odkształceniowe takie jak moduł sprężystości i moduł ścinania.

Należy jednak zwrócić uwagę na rozbieżność w nazewnictwie parametrów odkształceniowych, które są wyznaczane przy pomocy betonoskopu. W instrukcji dostarczonej przez producenta do opisu tych parametrów zostały użyte określenia, takie jak dynamiczne moduły sprężystości (z ang. *Dynamic elastic modulus*), moduł sprężystości (z ang. *Elastic modulus*), czy też moduł ścinania (z ang. *Shear modulus*). Tymczasem w literaturze światowej opisywane parametry odkształceniowe określane są mianem

dynamicznego czy też początkowego modułu. Należy wspomnieć, że druga nazwa również funkcjonuje w mechanice gruntów, gdzie odnosi się do modułu ścinania w zakresie bardzo małych odkształceń, który jest wyznaczany przy pomocy piezoelementów typu *bender*. Następnie w normie ASTM C597–02 [178], która opisuje badania nieniszczące betonów, zawarto informacje o dynamicznym module sprężystości (z ang. *Dynamic modulus of elasticity*). Jednak już w normie ASTM D2845 [179], która dotyczy się badań nieniszczących skał, została zawarta informacja, że moduły wyznaczone tą metodą należy określać jako ultradźwiękowe (z ang. *Ultrasonic*). Takie nazewnictwo w bezpośredni sposób wskazuje, że częstotliwość nadawanych impulsów podczas pomiarów, jest powyżej zakresu słyszalnego przez ludzi. Autorzy, argumentując zasadność takiego opisu, zwrócili uwagę na fakt, że wyniki uzyskane metodą ultradźwiękową mogą się różnić od parametrów wyznaczonych innymi metodami dynamicznymi. W celu uporządkowania nazewnictwa w dalszej części pracy uznano, że parametry wyznaczone na podstawie prędkości fal będą określane jako moduł sprężystości wyznaczony metodą ultradźwiękową dalej zwane jako moduł sprężystości (E_{UPV}) oraz moduł ścinania wyznaczony metodą ultradźwiękową, dalej zwane jako moduł ścinania (G_{UPV}).

Rozpatrując wzmocnione podłoże gruntowe jako jednorodny i izotropowy ośrodek, dokonano analizy parametrów odkształceniowych. W tym celu wykorzystano wyznaczone prędkości fal i pomiary gęstości próbek w dniu badania. Dzięki tym wynikom wyznaczono moduł sprężystości (E_{UPV}), wykorzystując zależność 4.7. Dodatkowo wyznaczono moduł ścinania (G_{UPV}), który jest definiowany jako przyrost naprężeń stycznych do zmian postaci materiału [146]. Moduł został wyznaczony na podstawie zależności 4.8. Sposoby określania parametrów odkształceniowych na podstawie badań nieniszczących są powszechnie stosowane i ujęte w normach [179] i instrukcji producenta [178].

$$E_{UPV} = 2 \cdot \rho \cdot V_S^2 \cdot (1 + \nu_{UPV}) \quad 4.7$$

$$G_{UPV} = \rho \cdot V_S^2 \quad 4.8$$

gdzie:

E_{UPV} – moduł sprężystości wyznaczony metodą ultradźwiękową,

G_{UPV} – moduł ścinania wyznaczony metodą ultradźwiękową,

ρ – gęstość objętościowa,

V_S – prędkość fali poprzecznej wyznaczona metodą ultradźwiękową,

ν_{UPV} – współczynnik Poissona, wyznaczony ze wzoru 4.5.

Grunt stabilizowany, podobnie jak podłoże gruntowe, zachowuje się w sposób sprężysty jedynie w zakresie małych odkształceń. Dlatego podczas analizy zależności naprężenie – odkształcenie z badań jednoosiowego ściskania, parametry odkształceniowe są opisywane przy pomocy siecznego modułu sprężystości (E_s), stycznego modułu sprężystości (E_t) czy też modułu cięciwy (E_{ch}). Obowiązująca norma PN-EN 13286-43 [199] przedstawia metodę oznaczenia modułu sprężystości przy ściskaniu (E_c) i rozciąganiu (E_t), co zostało opisane w rozdziale 2.3.2.7. Moduły opisane we wspomnianej normie można interpretować jako sieczny moduł sprężystości wyznaczony przy naprężeniu ściskającym równym 30%. W związku z tym wzór 2.10 można zapisać w następujący sposób:

$$E_c = \frac{\sigma_{0,3}}{\varepsilon_{0,3}} \quad 4.9$$

gdzie:

E_c – moduł sprężystości przy ściskaniu,

$\sigma_{0,3}$ – naprężenie przy 30% największego naprężenia ściskającego,

$\varepsilon_{0,3}$ – odkształcenie podłużne przy $F = 0,3F_C$.

Jednak większość prac naukowych odnosi się do siecznego modułu sprężystości wyznaczonego przy połowie największego dewiatora (E_{50}) jaki wystąpił podczas badania. Moduł taki można wyznaczyć przy pomocy wzoru 4.10. Dlatego też na podstawie przeprowadzonych badań jednoosiowego ściskania wyznaczono moduł E_{50} , aby była możliwość skonfrontowania uzyskanych wyników z literaturą światową. Warto zauważyć, że moduły sprężystości wyznaczone na podstawie badań statycznych charakteryzują się niższą wartością niż moduły wyznaczone metodami dynamicznymi, co jest następstwem oddziaływań niesprężystych [84].

$$E_{50} = \frac{\sigma_{0,5}}{\varepsilon_{0,5}} \quad 4.10$$

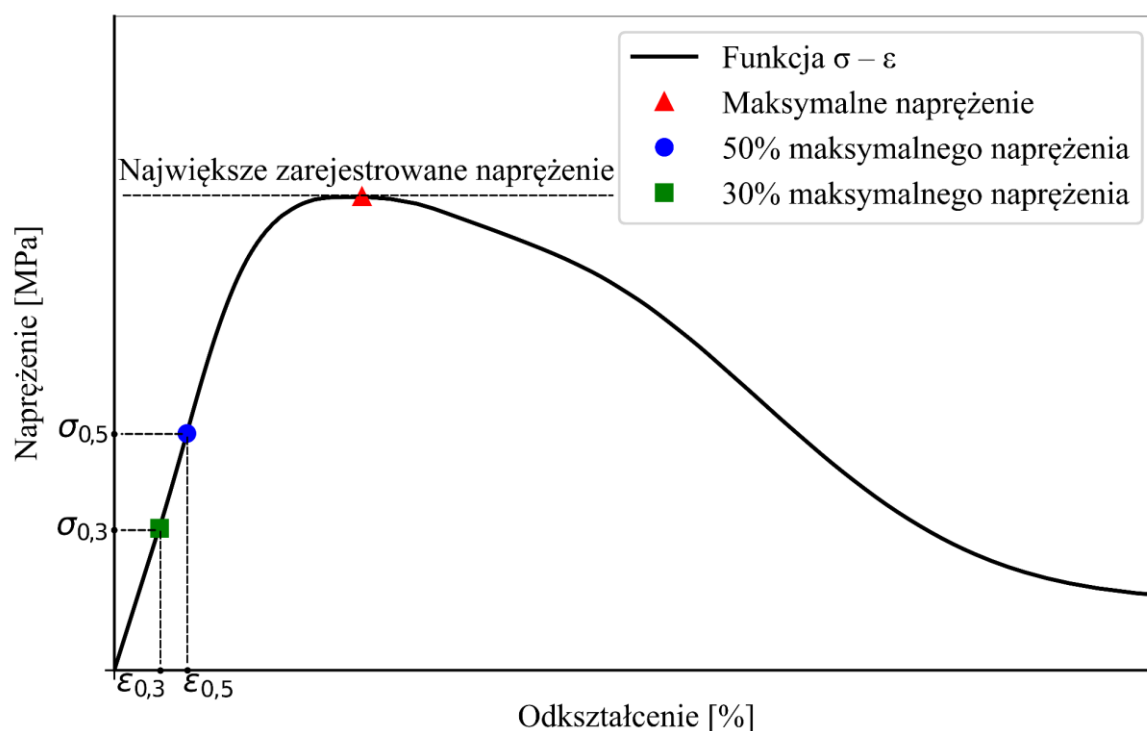
gdzie:

E_{50} – sieczny moduł sprężystości wyznaczony przy 50% największego naprężenia ściskającego,

$\sigma_{0,5}$ – naprężenie przy 50% największego naprężenia ściskającego,

$\varepsilon_{0,5}$ – odkształcenie podłużne przy $F = 0,5F_C$.

Na potrzeby graficznej interpretacji naprężeń i odkształceń wykorzystywanych podczas obliczania siecznych modułów sprężystości sporządzono schemat, który zaprezentowano na rys. 4.17. Przedstawiony schemat ukazuje przykładową zależność naprężenie – odkształcenie uzyskaną w wyniku badania jednoosiowego ściskania cementogruntu. Opisana zależność została poddana korekcie zgodnie z opisem zawartym we wcześniejszej części rozdziału.



Rys. 4.17 Zależności do wyznaczenia modułu sprężystości.

5. Wyniki badań laboratoryjnych

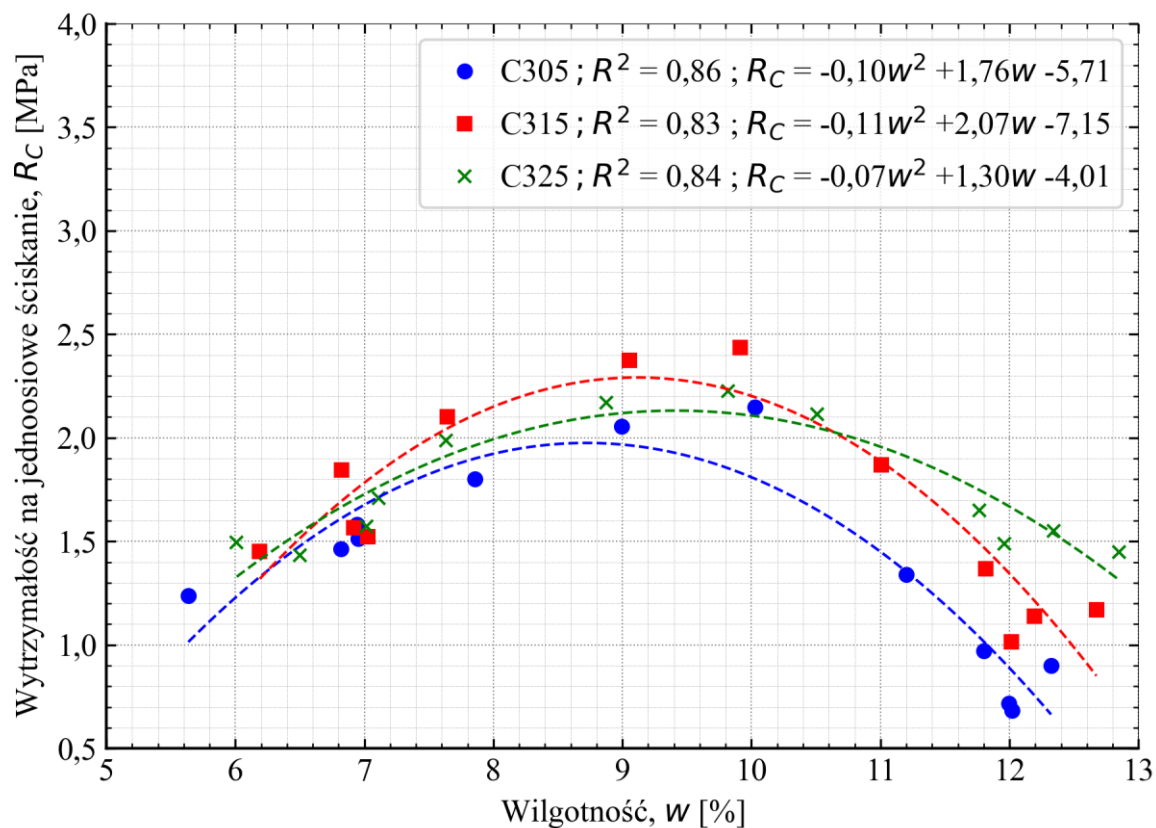
5.1. Struktura prezentacji wyników badań

W niniejszym rozdziale zaprezentowano wyznaczone parametry wytrzymałościowe i odkształceniowe na podstawie przeprowadzonych badań podczas etapu I. Uzyskane wyniki wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie przedstawiono w serii wykresów zbiorczych, które grupują wyniki dla mieszanek o jednakowej zawartości cementu, różniące się jednak zawartością włókien polipropylenowych. Taka forma prezentacji wyników pozwala na bezpośrednie porównanie wpływu ilości zbrojenia rozproszonego na wytrzymałość cementogruntu. Natomiast parametry odkształceniowe zostały pogrupowane wyłącznie na podstawie zawartości włókien polipropylenowych w mieszankach. W załączniku B zestawiono zarejestrowane charakterystyki naprężenie – odkształcenie z badań jednoosiowego ściskania.

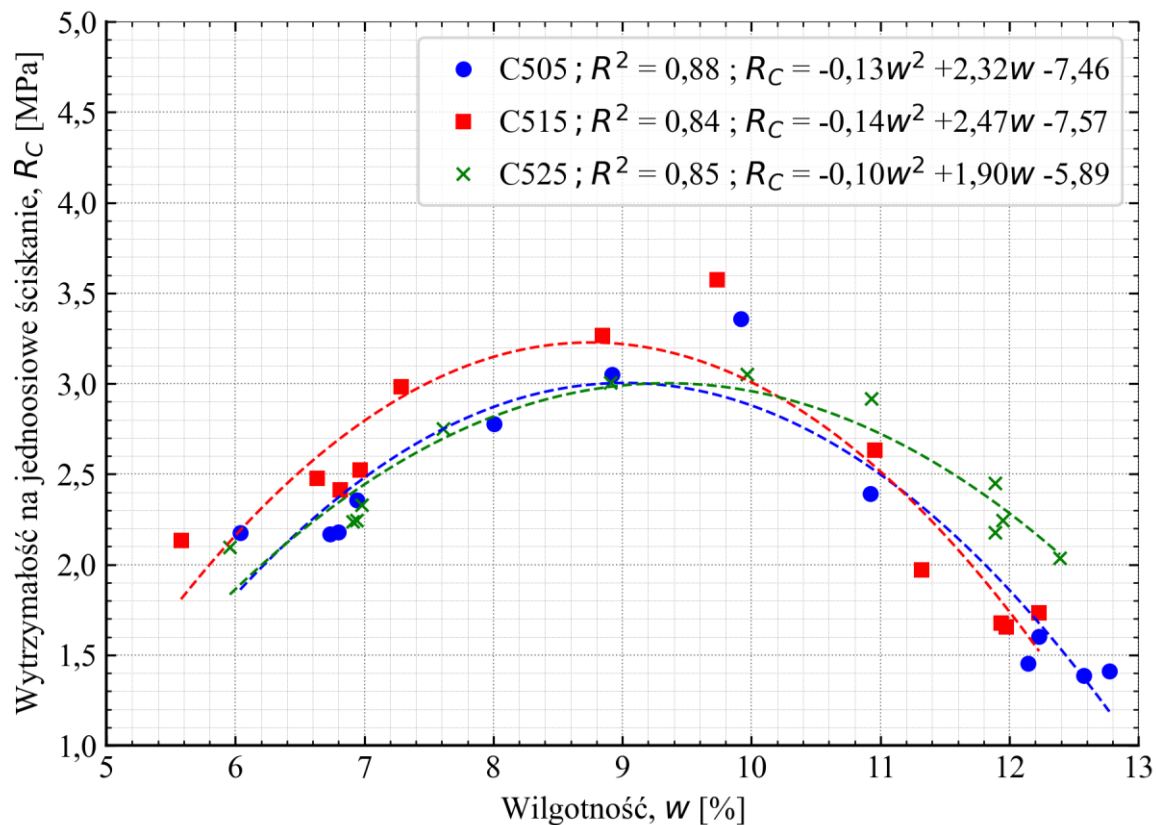
5.2. Parametry wytrzymałościowe

W badaniu nr 1 zbadano wpływ zbrojenia rozproszonego na wytrzymałość przy zmiennej wilgotności świeżej mieszanki. W tym celu przebadano próbki wytworzone na podstawie dziewięciu mieszanek: C30, C31, C32, C50, C51, C52, C70, C71 i C72. Do badań przygotowano 108 próbek przy zmiennej wilgotności, która mieściła się w przedziale od 6% do 13%. Dla każdej badanej próbki określono rzeczywistą wilgotność, stosując procedurę przedstawioną w poprzednim rozdziale. Badane próbki zostały poddane pielęgnacji typu E, czyli badania zostały przeprowadzone po 28 dniach utwardzania.

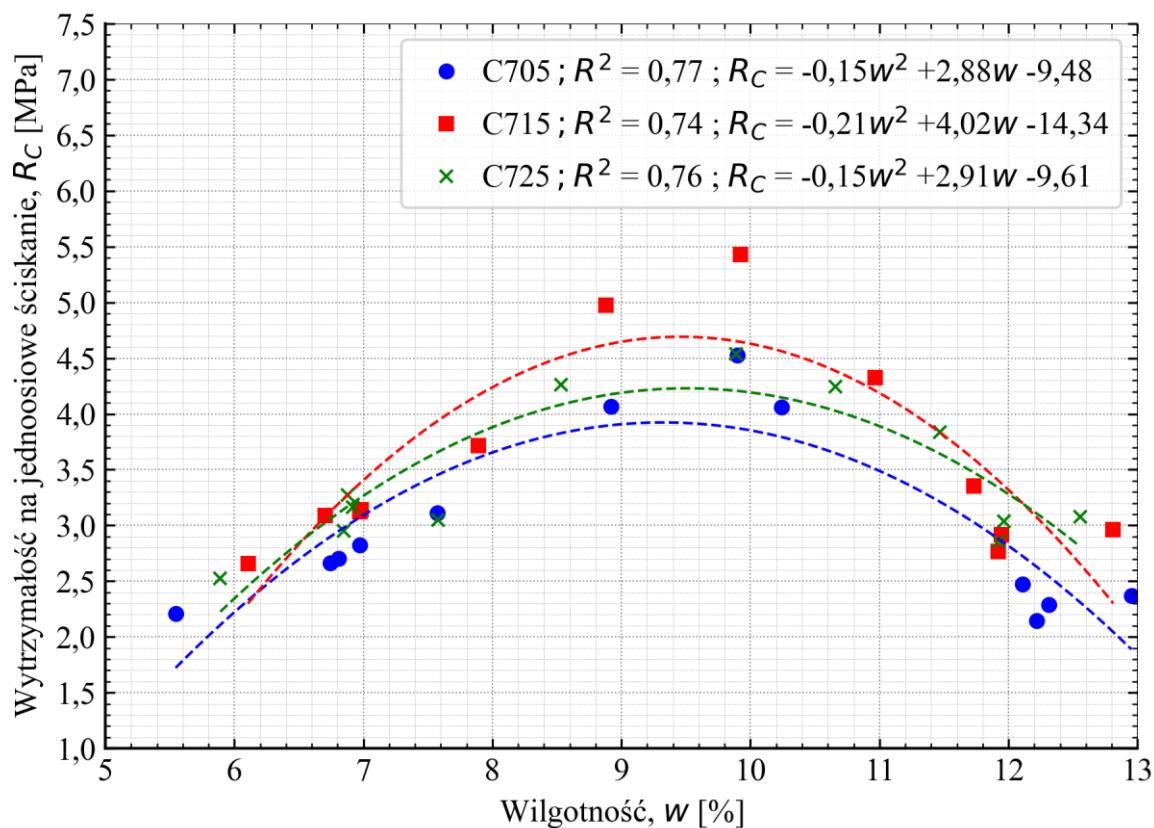
Na podstawie przeprowadzonych badań zaobserwowano, że największą wytrzymałość osiągnięto przy wilgotności zbliżonej do 10%, niezależnie od rodzaju badanej mieszanki. W związku z tym wilgotność ta została zastosowana podczas badania nr 2 i 3. Podczas analizy wpływu zbrojenia rozproszonego na zmianę wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie zaobserwowano, że serie zawierające 0,25% włókien polipropylenowych osiągnęły największy przyrost wytrzymałości przy wilgotności zbliżonej do 10%, niezależnie od zastosowanej ilości spoiwa. Trend ten był również widoczny przy obniżonej zawartości wody w mieszance, czyli przy wilgotności mniejszej od 10%. Natomiast mieszanki, które zawierały 0,5% włókien, osiągnęły największe wzmocnienie przy podwyższonej zawartości wody, czyli przy wilgotności większej od 10%. Uzyskane wyniki przedstawiono na serii rysunków: rys. 5.1 przedstawia mieszanki zawierające 3% spoiwa, rys. 5.2 – mieszanki z 5% zawartością spoiwa, natomiast rys. 5.3 – mieszanki z 7% spoiwa.



Rys. 5.1 Wpływ wilgotności na wytrzymałość na ściskanie mieszanek z 3% zaw. cementu.



Rys. 5.2 Wpływ wilgotności na wytrzymałość na ściskanie mieszanek z 5% zaw. cementu.



Rys. 5.3 Wpływ wilgotności na wytrzymałość na ściskanie mieszanek z 7% zaw. cementu.

Na zaprezentowanych rysunkach wyznaczono dla każdej mieszanki funkcje aproksymacji, na podstawie których wyznaczono efektywność wzmocnienia, czyli iloraz wytrzymałości serii z włóknami do wytrzymałości bez włókien. W tab. 5.1 zaprezentowano wyznaczoną efektywność wzmocnienia dla wilgotności wynoszącej odpowiednio 8%, 10% i 12%. Na podstawie zaprezentowanych wyników można zauważyć, że efektywność wzmocnienia była największa przy wilgotności 12%. Należy odnotować, że w serii C525 odnotowano spadek wytrzymałości, co jest również widoczne na rys. 5.2.

Tab. 5.1 Wzmocnienie włóknami przy zmiennej wilgotności świeżej mieszanki.

Rodzaj serii		Stosunek R_C z włóknami do wartości referencyjnej bez włókien przy wybranych wilgotnościach		
Seria referencyjna	Seria z włóknami	8%	10%	12%
[-]	[-]	[%]	[%]	[%]
C305	C315	112,01	113,41	152,61
	C325	103,71	103,62	188,90
C505	C515	109,69	106,44	93,67
	C525	98,25	90,83	123,20
C705	C715	116,07	120,08	118,00
	C725	106,24	100,37	116,58

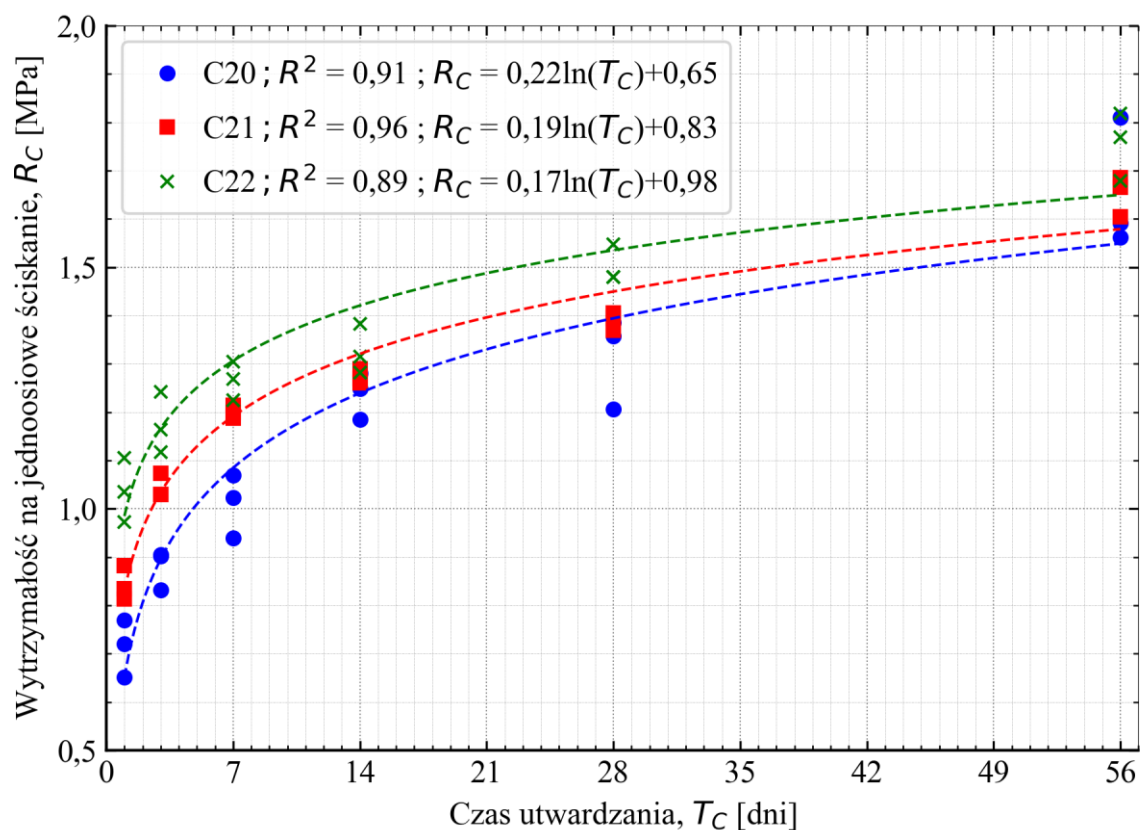
Dodatkowo przeprowadzono klasyfikacje badanych serii, co zostało przedstawione w tab. 5.2. Klasyfikacje przeprowadzono zgodnie z tab. 2.13. Na podstawie określonych klas wytrzymałościowych można dostrzec, że podwyższenie klasy najczęściej następowało w seriach C315, C515, C525. Natomiast najrzadziej w seriach C715 i C725, co jest związane z wyższą zawartością spoiwa.

Tab. 5.2 Wpływ włókien polipropylenowych na klasy wytrzymałościowe, badanie nr 1.

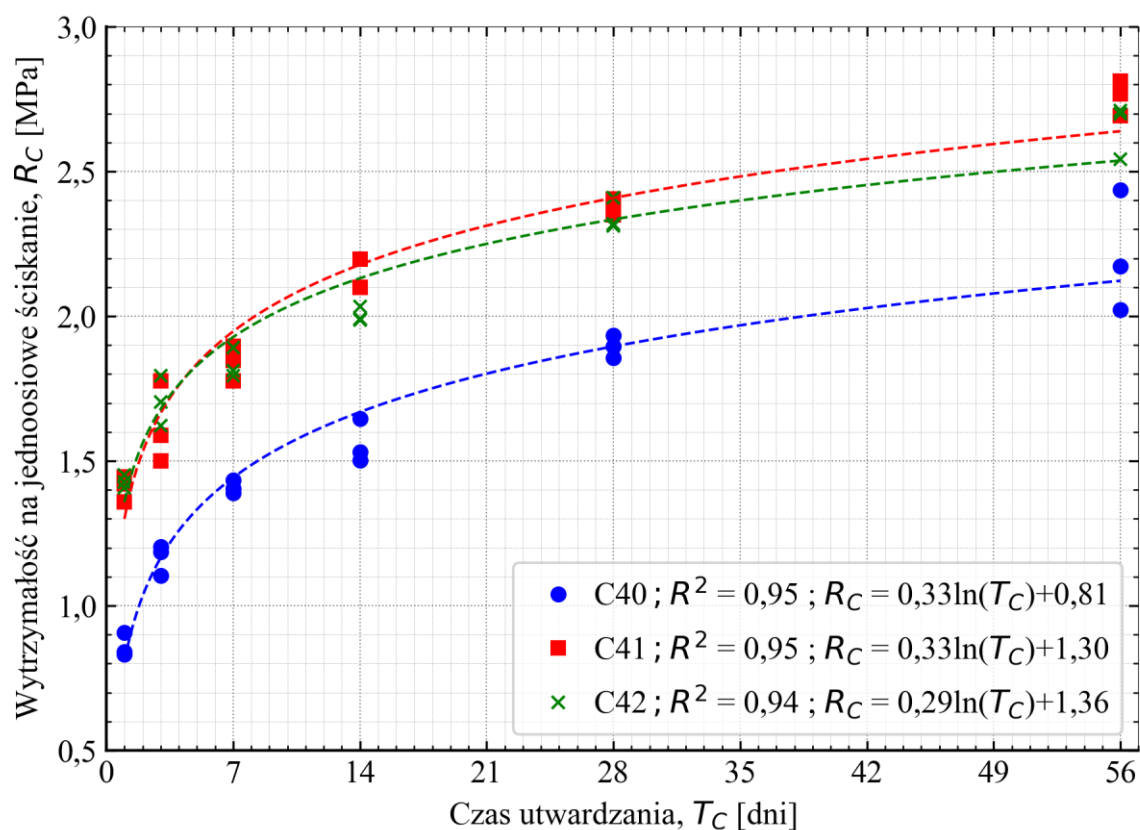
wilgotność	Rodzaj serii								
	C305	C315	C325	C505	C515	C525	C705	C715	C725
6%	C _{0,8/1}	C _{0,8/1}	C _{0,8/1}	C _{1,2/1,5}	C _{1,5/2}	C _{1,2/1,5}	C _{1,5/2}	C _{1,5/2}	C _{1,5/2}
7%	C _{1,2/1,5}	C _{1,2/1,5}	C _{1,2/1,5}	C _{1,5/2}	C _{2/2,5}	C _{2/2,5}	C _{2,3/3}	C _{2,3/3}	C _{2,3/3}
8%	C _{1,2/1,5}	C _{1,5/2}	C _{1,2/1,5}	C _{2/2,5}	C _{2,3/3}	C _{2/2,5}	C _{2,3/3}	C _{3/4}	C _{3/4}
9%	C _{1,5/2}	C _{2/2,5}	C _{1,5/2}	C _{2/2,5}	C _{2,3/3}	C _{2,3/3}	C _{3/4}	C _{3/4}	C _{3/4}
10%	C _{1,2/1,5}	C _{2/2,5}	C _{1,2/1,5}	C _{2/2,5}	C _{2,3/3}	C _{2,3/3}	C _{3/4}	C _{3/4}	C _{3/4}
11%	C _{1,2/1,5}	C _{1,5/2}	C _{1,2/1,5}	C _{1,5/2}	C _{2/2,5}	C _{2/2,5}	C _{3/4}	C _{3/4}	C _{3/4}
12%	C _{0,8/1}	C _{1,2/1,5}	C _{1,2/1,5}	C _{1,2/1,5}	C _{1,2/1,5}	C _{2/2,5}	C _{2,3/3}	C _{2,3/3}	C _{2,3/3}
13%	C _{0,15/0,2}	C _{0,8/1}	C _{0,8/1}	C _{0,4/0,5}	C _{0,4/0,5}	C _{1,2/1,5}	C _{2/2,5}	C _{1,5/2}	C _{2/2,5}

Badanie nr 2 miało na celu określenie wpływu włókien polipropylenowych na rozwój wytrzymałości cementogruntu w czasie. Badanie to przeprowadzono na 9 mieszankach: C20, C21, C22, C40, C41, C42, C60, C61 i C62. Wszystkie próbki zostały przygotowane przy jednakowej wilgotności założonej, która została wyznaczona podczas badania nr 1 i wynosiła 10%. W związku z analizą przeprowadzaną w dalszej części pracy określono rzeczywistą wilgotność badanych próbek. Dla każdej badanej mieszanki przygotowano 18 próbek z jednego zarobu. Następnie sporządzone próbki zostały poddane serii badań po upływie: 1, 3, 7, 14, 28 i 56 dni.

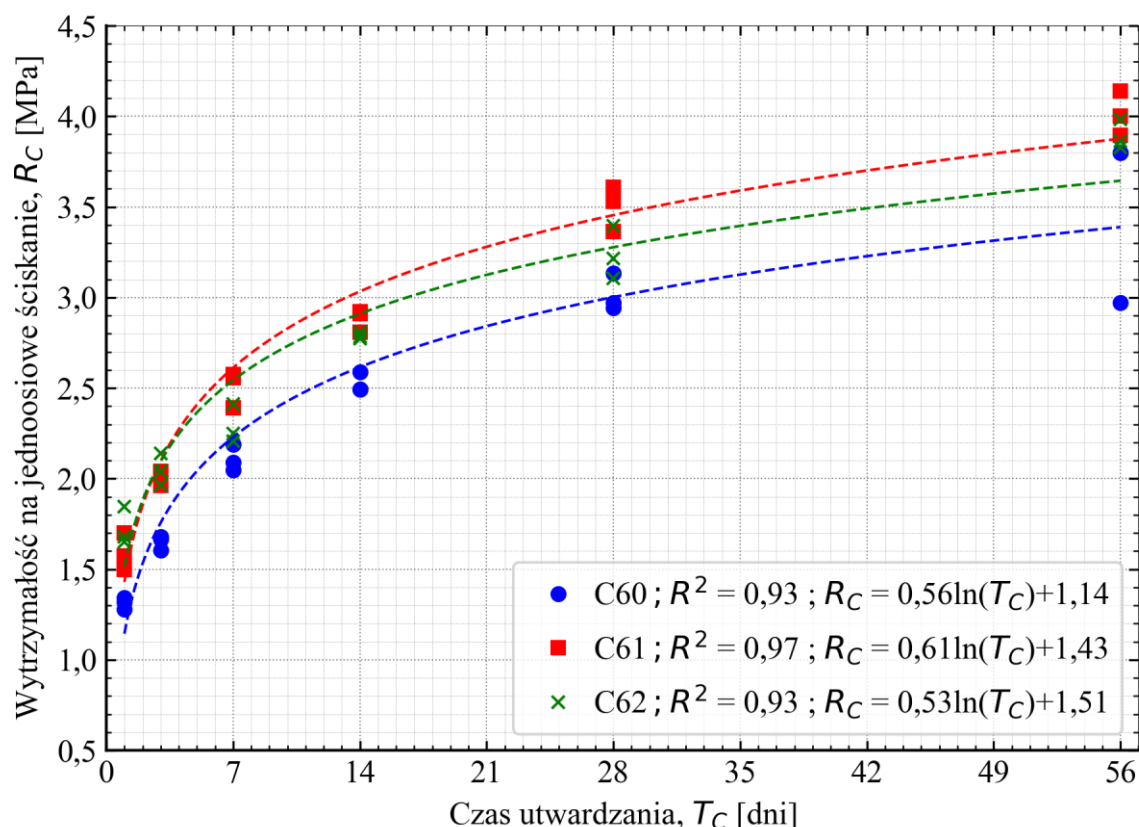
Na podstawie przeprowadzonych badań odnotowano, że największy wzrost wytrzymałości w mieszankach zawierających 2% spoiwa osiągnięto poprzez dodanie 0,5% włókien polipropylenowych, co jest widoczne na rys. 5.4. Następnie w mieszankach zawierających 4% i 6% spoiwa największy wzrost wytrzymałości uzyskano poprzez dodanie 0,25% zbrojenia rozproszonego, co jest widoczne na rys. 5.5 i rys. 5.6. Należy zauważyć, że wzrost wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie pozostaje stabilny, niezależnie od okresu pielęgnacji, wykazując jedynie niewielkie wahania. Na przywołanych rysunkach, wzrost wytrzymałości poszczególnych mieszanek został opisany funkcją logarytmiczną. Wyznaczone funkcje charakteryzowały się wysokim współczynnikiem determinacji.



Rys. 5.4 Wpływ czasu utwardzania na wytrzymałość mieszanek z 2% zaw. cementu.



Rys. 5.5 Wpływ czasu utwardzania na wytrzymałość mieszanek z 4% zaw. cementu.



Rys. 5.6 Wpływ czasu utwardzania na wytrzymałość mieszanek z 6% zaw. cementu.

Następnie na podstawie zaprezentowanych wyników wyznaczono efektywność wzmocnienia w poszczególnych dniach, a wyniki zestawiono w tab. 5.3. Największy wzrost efektywności wzmocnienia włóknami uzyskano w pierwszych dniach utwardzania. Jednak wraz z czasem utwardzania efektywność wzmocnienia zaczęła maleć. Wynika to ze wzrostu referencyjnej wytrzymałości cementogruntu, czyli bez włókien, przy jednoczesnym stałym wzroście wytrzymałości wynikającym z zastosowania zbrojenia rozproszonego.

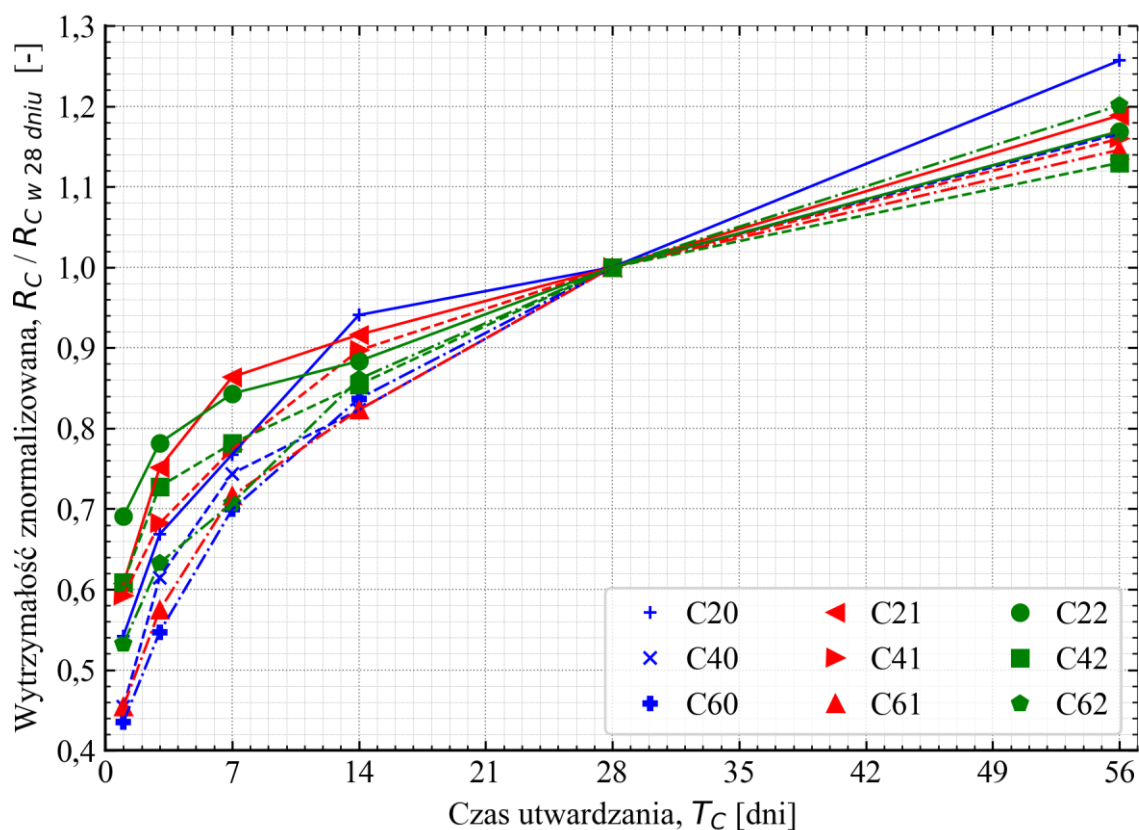
Tab. 5.3 Wpływ włókien na rozwój wytrzymałości w poszczególnych dniach.

Rodzaj mieszanki		Stosunek R_C z włóknami do wartości referencyjnej bez włókien w poszczególnych dniach pielęgnacji					
Mieszanka referencyjna	Mieszanka z włóknami	$T_C = 1$	$T_C = 3$	$T_C = 7$	$T_C = 14$	$T_C = 28$	$T_C = 56$
[-]	[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
C20	C21	118,21	118,65	118,80	102,84	105,59	99,86
	C22	145,40	133,47	125,32	107,15	114,10	106,12
C40	C41	163,53	139,20	130,54	136,74	125,45	124,78
	C42	165,93	146,53	130,00	128,48	123,76	119,91
C60	C61	121,20	121,84	118,92	114,14	116,08	113,83
	C62	131,36	124,22	108,56	110,51	107,39	110,38

W celu lepszego zobrazowania wzrostu wytrzymałości uzyskane wyniki przedstawiono w znormalizowany sposób, co pokazano na rys. 5.7 i zestawiono w tab. 5.4. Wartość znormalizowana została przedstawiona jako iloczyn średniej wytrzymałości na ściskanie serii do średniej wytrzymałości serii po 28 dniach utwardzania. Na podstawie uzyskanych wyników można dostrzec, że we wszystkich mieszankach zawierających włókna nastąpił wzrost wartości znormalizowanej w pierwszych dniach utwardzania ($T_C = 1$, $T_C = 3$ i $T_C = 7$). W następnych dniach wzrost ten nie był już jednoznaczny.

Tab. 5.4 Wartości do znormalizowanej wytrzymałości cementogruntu.

Rodzaj mieszanki	Okres utwardzania					
	$T_C = 1$	$T_C = 3$	$T_C = 7$	$T_C = 14$	$T_C = 28$	$T_C = 56$
C20	0,54	0,67	0,77	0,94	1,00	1,26
C21	0,61	0,75	0,86	0,92	1,00	1,19
C22	0,69	0,78	0,84	0,88	1,00	1,17
C40	0,45	0,61	0,74	0,82	1,00	1,17
C41	0,59	0,68	0,77	0,90	1,00	1,16
C42	0,61	0,73	0,78	0,85	1,00	1,13
C60	0,44	0,55	0,70	0,84	1,00	1,17
C61	0,45	0,57	0,72	0,82	1,00	1,15
C62	0,53	0,63	0,71	0,86	1,00	1,20



Rys. 5.7 Znormalizowany wzrost wytrzymałości poszczególnych mieszanek.

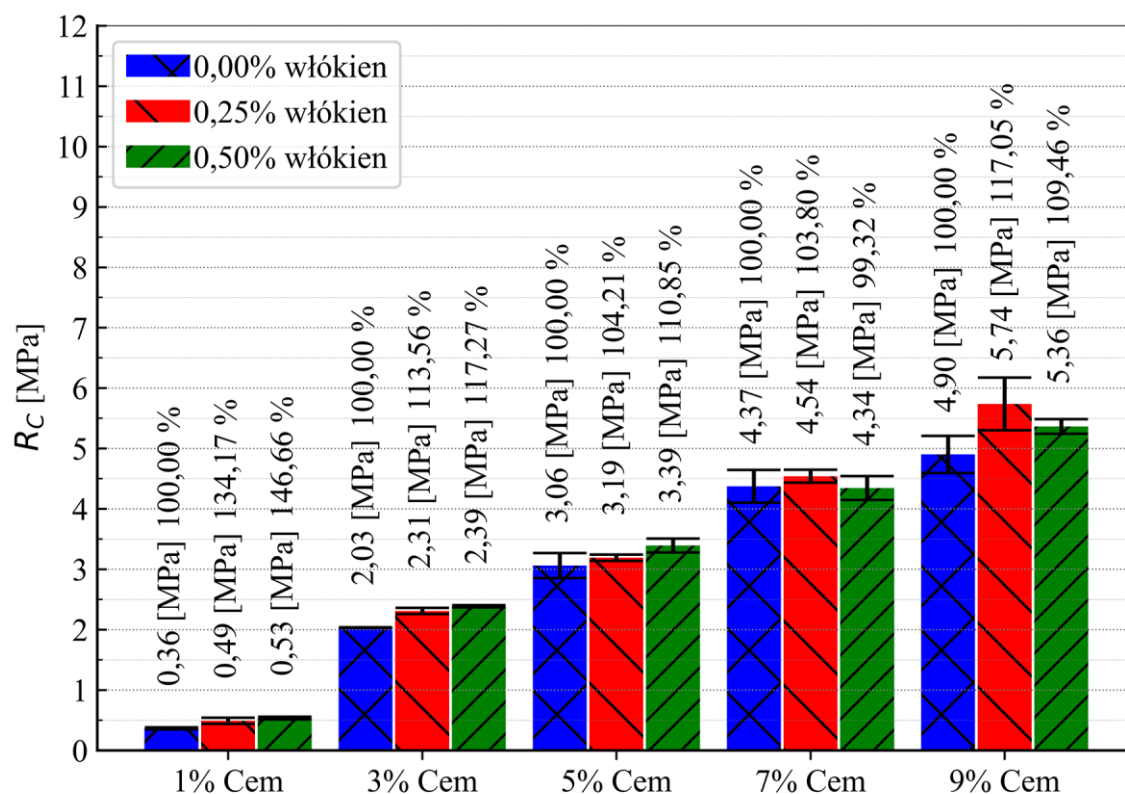
Dodatkowo wyznaczono klasy wytrzymałościowe dla poszczególnych serii badań, analogicznie jak w badaniu nr 1. Wyznaczone klasy wytrzymałościowe zostały zestawione w tab. 5.5. Na podstawie zaprezentowanych danych można dostrzec, że najczęściej zwiększenie klasy wytrzymałościowej następowało w mieszankach C41 i C42, a najrzadziej w mieszance C21.

Tab. 5.5 Wpływ włókien polipropylenowych na klasy wytrzymałościowe, badanie nr 2.

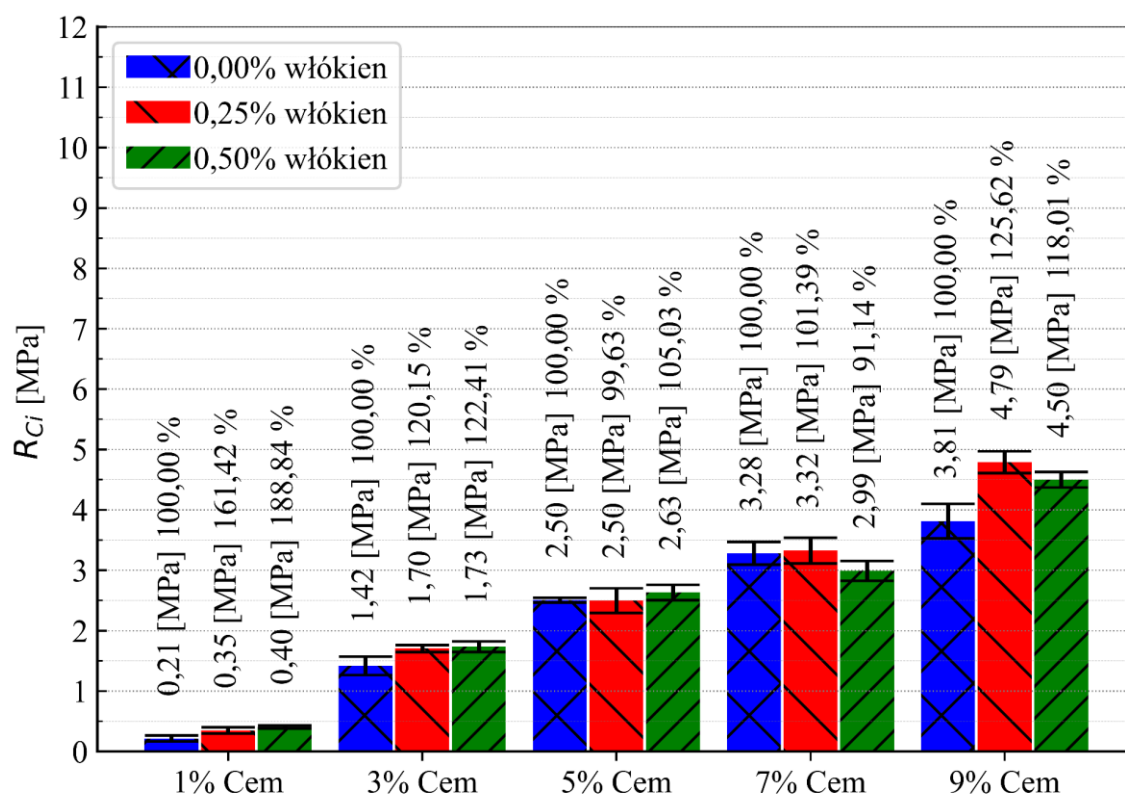
Okres utwardzania	Rodzaj mieszanki								
	C20	C21	C22	C40	C41	C42	C60	C61	C62
$T_C = 1$	C _{0,4/0,5}	C _{0,4/0,5}	C _{0,8/1}	C _{0,4/0,5}	C _{0,8/1}	C _{0,8/1}	C _{0,8/1}	C _{1,2/1,5}	C _{1,2/1,5}
$T_C = 3$	C _{0,4/0,5}	C _{0,8/1}	C _{0,8/1}	C _{0,8/1}	C _{1,2/1,5}	C _{1,2/1,5}	C _{1,2/1,5}	C _{1,5/2}	C _{1,5/2}
$T_C = 7$	C _{0,8/1}	C _{0,8/1}	C _{0,8/1}	C _{0,8/1}	C _{1,2/1,5}	C _{1,2/1,5}	C _{1,5/2}	C _{2/2,5}	C _{1,5/2}
$T_C = 14$	C _{0,8/1}	C _{0,8/1}	C _{0,8/1}	C _{1,2/1,5}	C _{1,5/2}	C _{1,5/2}	C _{2/2,5}	C _{2/2,5}	C _{2/2,5}
$T_C = 28$	C _{0,8/1}	C _{0,8/1}	C _{1,2/1,5}	C _{1,2/1,5}	C _{1,5/2}	C _{1,5/2}	C _{2,3/3}	C _{2,3/3}	C _{2,3/3}
$T_C = 56$	C _{1,2/1,5}	C _{1,2/1,5}	C _{1,2/1,5}	C _{1,5/2}	C _{2/2,5}	C _{2/2,5}	C _{2,3/3}	C _{3/4}	C _{2,3/3}

Badanie nr 3 zostało przeprowadzone w celu ustalenia wpływu włókien polipropylenowych na odporność na działanie wody. Badanie to zostało przeprowadzone na piętnastu mieszankach: C10, C11, C12, C30, C31, C32, C50, C51, C52, C70, C71, C72, C90, C91 i C92. Dla każdej mieszanki przygotowano sześć próbek z jednego zarobu, gdzie trzy próbki poddano pielęgnacji w wodzie przez okres 7 dni. W trakcie badania przygotowane próbki zostały poddane pielęgnacji typu E i G. Badanie objęło łącznie 90 próbek, które zostały sporządzone przy jednakowej wilgotności założonej wynoszącej 10%.

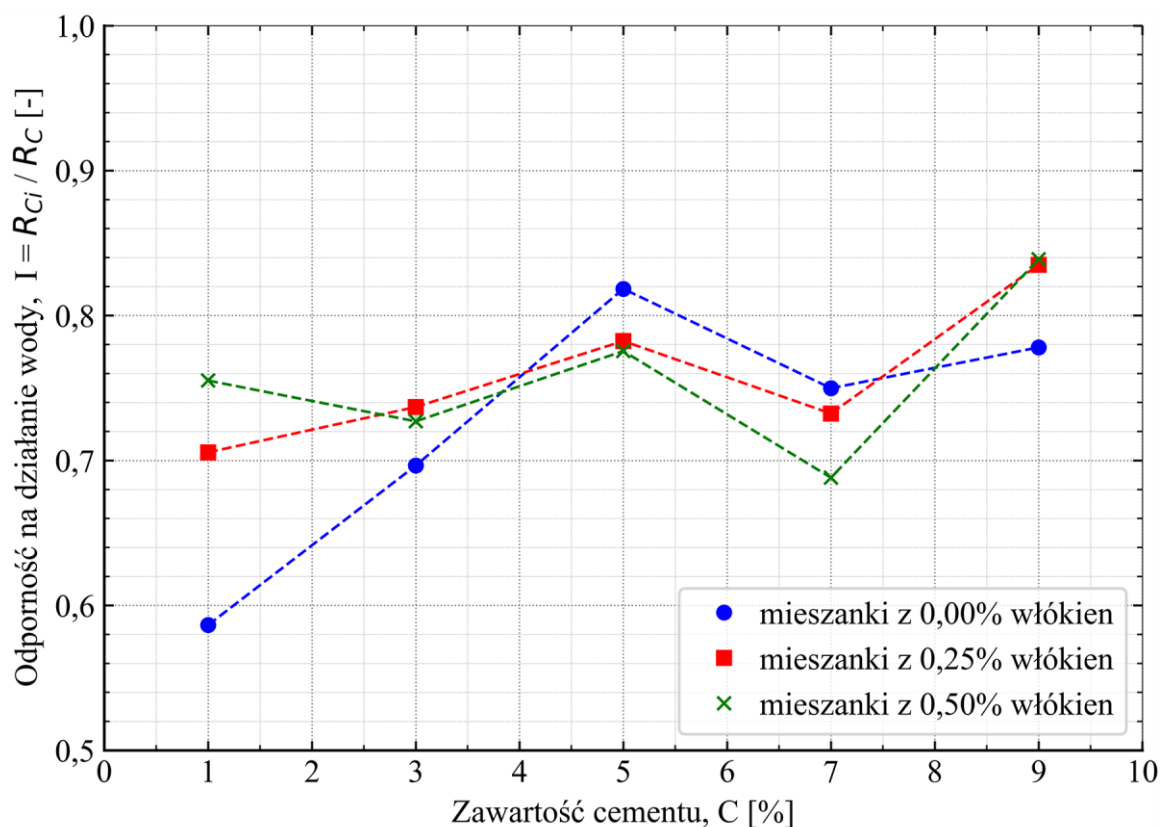
Na podstawie przeprowadzonych badań zaobserwowano, że zastosowanie włókien polipropylenowych spowodowało wzrost wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie. Wyjątek stanowiły serie C515 i C725 poddane pielęgnacji typu G oraz seria C725 poddana pielęgnacji typu E. Wzrost wytrzymałości zbadanych serii został przedstawiony na rys. 5.8 i rys. 5.9. Jednak w celu lepszego zobrazowania wpływu włókien na zbadaną odporność na działanie wody sporządzono wykres zbiorczy, przedstawiony na rys. 5.10. Należy zaznaczyć, że przedstawione wyniki są niejednoznaczne, ponieważ mieszanki zawierające 1%, 3% i 9% spoiwa oraz zbrojenie rozproszone uzyskały wzrost odporności na działanie wody. Natomiast mieszanki z włóknami, zawierające 5% i 7% spoiwa, uzyskały mniejszą odporność na działanie wody niż analogiczne mieszanki bez włókien.



Rys. 5.8 Wpływ włókien na wytrzymałość bez pielęgnacji próbek w wodzie.



Rys. 5.9 Wpływ włókien na wytrzymałość z pielęgnacją próbek w wodzie.



Rys. 5.10 Wpływ włókien na odporność na działanie wody.

Dodatkowo przeprowadzono klasyfikację wytrzymałościową zbadanych serii podobnie jak w poprzednich badaniach, co przedstawiono w tab. 5.6. Na podstawie przedstawionych klas można zaobserwować, że we wszystkich seriach poddanych pielęgnacji typu G odnotowano zmniejszenie klasy wytrzymałościowej. Wyjątek stanowiły serie C105 i C115, które z uwagi na osiągnięte bardzo niskie wytrzymałości nie mogły zostać sklasyfikowane poniżej klas wyznaczonych podczas pielęgnacji typu E. Należy jednak zaznaczyć, że wytrzymałość we wspomnianych seriach również uległa zmniejszeniu.

Tab. 5.6 Wpływ włókien polipropylenowych na klasy wytrzymałościowe, badanie nr 3.

Rodzaj serii	Rodzaj pielęgnacji		Rodzaj serii	Rodzaj pielęgnacji		Rodzaj serii	Rodzaj pielęgnacji	
	E	G		E	G		E	G
C105	C _{0,15/0,2}	C _{0,15/0,2}	C325	C _{1,5/2}	C _{1,2/1,5}	C715	C _{3/4}	C _{2,3/3}
C115	C _{0,15/0,2}	C _{0,15/0,2}	C505	C _{2,3/3}	C _{2/2,5}	C725	C _{3/4}	C _{2/2,5}
C125	C _{0,4/0,5}	C _{0,15/0,2}	C515	C _{2,3/3}	C _{1,5/2}	C905	C _{3/4}	C _{2,3/3}
C305	C _{1,5/2}	C _{0,8/1}	C525	C _{2,3/3}	C _{2/2,5}	C915	C _{4/5}	C _{3/4}
C315	C _{1,5/2}	C _{1,2/1,5}	C705	C _{3/4}	C _{2,3/3}	C925	C _{4/5}	C _{3/4}

5.3. Parametry odkształceniowe

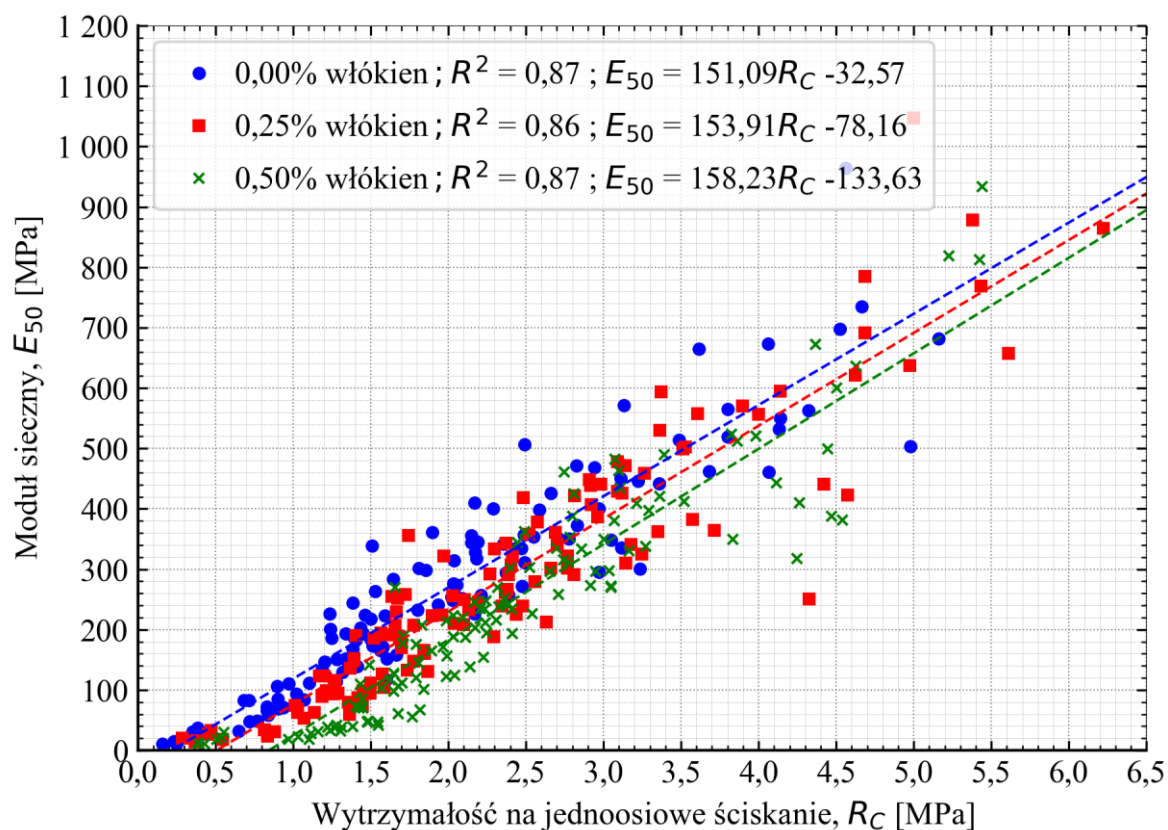
Parametry odkształceniowe wykazują silną korelację z wytrzymałością cementogruntu, dlatego też w niniejszym rozdziale nie analizowano indywidualnie serii badań, a przeprowadzono analizę zbiorczą. Dla przeprowadzonych badań wyznaczono następujące parametry odkształceniowe:

1. moduł sieczny sprężystości wyznaczony przy połowie największego dewiatora – E_{50} ,
2. moduł sprężystości wyznaczony metodą ultradźwiękową – E_{UPV} ,
3. moduł ścinania wyznaczony metodą ultradźwiękową – G_{UPV} .

Sieczny moduł sprężystości (E_{50}) został wyznaczony jako tangens kąta nachylenia prostej poprowadzonej przez punkt przecięcia prostej o wartości $1/2 \cdot R_c$ z zależnością naprężenie – odkształcenie po ekstrapolacji, która została schematycznie zilustrowana na rys. 4.17. Uzyskane wyniki wskazują na zależność liniową pomiędzy modułem E_{50} a wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie, co zostało przedstawione na rys. 5.11. Zaobserwowano, że wyznaczone linie trendu są niemalże równoległe i wraz ze wzrostem wytrzymałości na ściskanie powoli zbliżają się do siebie. Z powyższych zależności wynika, że wraz ze wzrostem zawartości włókien w mieszance gruntu stabilizowanego, stosunek modułu E_{50} do wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie maleje, niezależnie od zawartości cementu, okresu pielęgnacji czy też rodzaju pielęgnacji. Zmiany te wynikają z wpływu włókien polipropylenowych, które prowadzą zarówno do zwiększenia wytrzymałości, co zostało przedstawione w niniejszym rozdziale, jak i do obniżenia modułu E_{50} . Na przykładzie badania nr 3 można dostrzec, że zastosowanie włókien obniża wartość siecznego modułu sprężystości. Wyjątek stanowiły serie C525, C915 i C925, co zostało przedstawione w tab. 5.7.

Tab. 5.7 Zmiana wartości modułu E_{50} w poszczególnych seriach.

Rodzaj serii	E_{50} z 0,00% włókien	$\frac{E_{50} \text{ z } 0,25\% \text{ włókien}}{E_{50} \text{ z } 0,00\% \text{ włókien}}$	$\frac{E_{50} \text{ z } 0,50\% \text{ włókien}}{E_{50} \text{ z } 0,00\% \text{ włókien}}$
[MPa]	[MPa]	[%]	[%]
C105	32,42	79,67	71,70
C305	279,90	88,31	94,73
C505	336,40	96,73	121,93
C705	609,85	81,13	72,61
C905	716,23	111,69	119,34



Rys. 5.11 Zależność pomiędzy modułem siecznym a wytrzymałością cementogruntu.

Opisane zależności liniowe w pewnym przedziale wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie wykazują cechy nieliniowości. Dlatego też należy zwrócić uwagę, że przy wartościach modułów E_{50} , zbliżonych do wartości 20 MPa, wytrzymałość cementogruntu z włóknami zmniejsza się, a dane znacząco odstają od wyznaczonych zależności liniowych. Tym samym należy stwierdzić, że dla cementogruntu z dodatkiem 0,25% włókien polipropylenowych zależność jest nieliniowa, jeśli wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie jest mniejsza od 0,7 MPa. Natomiast w mieszankach zawierających 0,50% włókien polipropylenowych zależność staje się nieliniowa przy wytrzymałości poniżej 1 MPa.

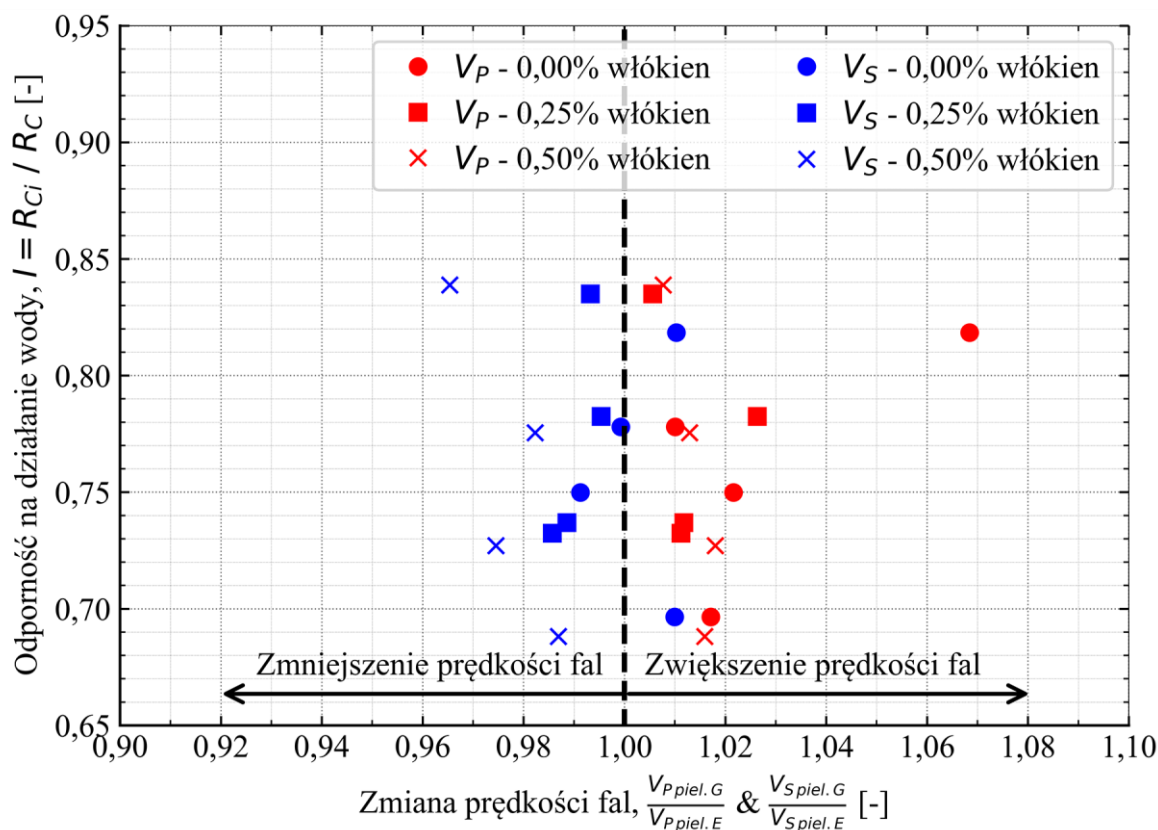
Dodatkowo zaobserwowano, że moduł E_{50} staje się mniej wrażliwy na zmiany w wyniku dodania włókien wraz ze wzrostem wytrzymałości. Taką zmianę dobrze obrazuje efektywność wzmocnienia modułu E_{50} , która jest ilorazem modułu E_{50} cementogruntu z włóknami do modułu E_{50} samego cementogruntu. Zmiany efektywności dla przyjętych referencyjnych wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie w przedziale od 1 MPa do 5 MPa przedstawiono w tab. 5.8. Na podstawie zaprezentowanych danych można stwierdzić, że efektywność wzmocnienia zwiększa się wraz ze wzrostem wytrzymałości referencyjnej.

Tab. 5.8 Zmiana wartości modułu E_{50} wraz ze wzrostem wytrzymałości referencyjnej.

Wartość referencyjna R_c	E_{50} z 0,00% włókien	$\frac{E_{50} \text{ z } 0,25\% \text{ włókien}}{E_{50} \text{ z } 0,00\% \text{ włókien}}$	$\frac{E_{50} \text{ z } 0,50\% \text{ włókien}}{E_{50} \text{ z } 0,00\% \text{ włókien}}$
[MPa]	[MPa]	[%]	[%]
1	118,52	63,91	20,75
2	269,62	85,18	67,81
3	420,71	91,17	81,07
4	571,81	94,00	87,32
5	722,90	95,64	90,95

Podczas analizy wpływu włókien polipropylenowych na prędkości fal podłużnych i poprzecznych pominięto trzy serie badań: C105, C115 oraz C125. Wymienione serie próbek zostały przygotowane w ramach badania nr 3. Pominięcie to wynikało z braku możliwości przeprowadzenia poprawnych pomiarów prędkości fal. Było to spowodowane niewielką ilością zastosowanego spoiwa, które wynosiło 1% masy gruntu. W związku z powyższym należy stwierdzić, że taka ilość cementu jest niewystarczająca do przeprowadzenia poprawnych pomiarów i rzetelnej oceny prędkości fal przy pomocy zastosowanej aparatury badawczej.

Dodatkowo przeprowadzono analizę wpływu pielęgnacji w środowisku wodnym na prędkości fal. Analizę przeprowadzono na podstawie pozostałych serii badania nr 3. Na potrzeby analizy zestawiono wyznaczone wartości odporności na działanie wody z ilorazem średnich prędkości fal w seriach próbek poddanych pielęgnacji typu G i E. Zależność ta została przedstawiona na rys. 5.12. Na podstawie zaprezentowanych wyników można zaobserwować, że pielęgnacja w środowisku wodnym wpływa nie tylko na jednoosiową wytrzymałość cementogruntu, ale również na prędkości fal. Zaobserwowano, że nastąpiło zmniejszenie prędkości fal poprzecznych, co może być wynikiem osłabienia struktury badanych próbek. Natomiast prędkości fal podłużnych uzyskiwały większe wartości w ośrodku nasyconym wodą, pomimo zmniejszonej wytrzymałości cementogruntu. Powyższe rozbieżności mogą prowadzić do błędnej interpretacji zależności wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie z prędkością fal i modułem E_{UPV} . Dlatego też w dalszej części rozdziału przedstawione wyniki nie obejmują serii poddanych pielęgnacji typu G, czyli próbek pielęgnowanych w środowisku wodnym. Szczegółowe wyniki przeprowadzonej analizy zestawiono w tab. 5.9.

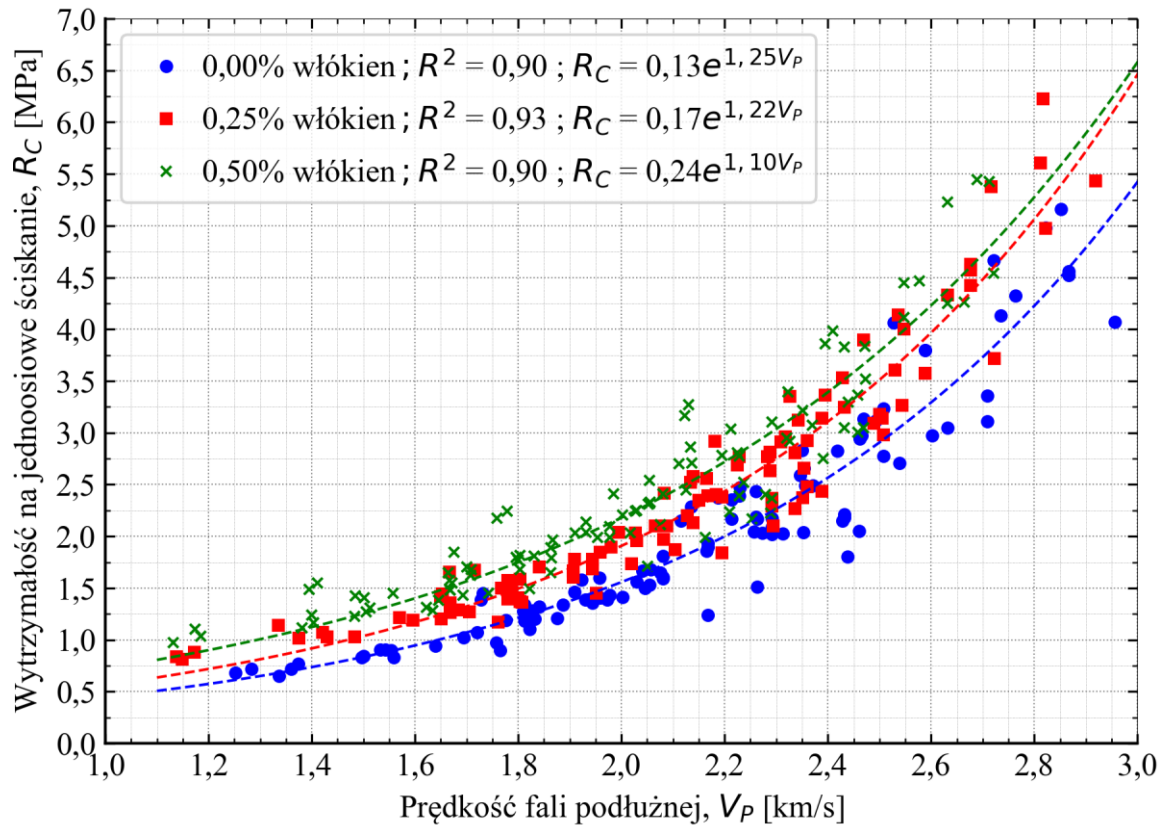


Rys. 5.12 Wpływ pielęgnacji w wodzie na prędkości fal.

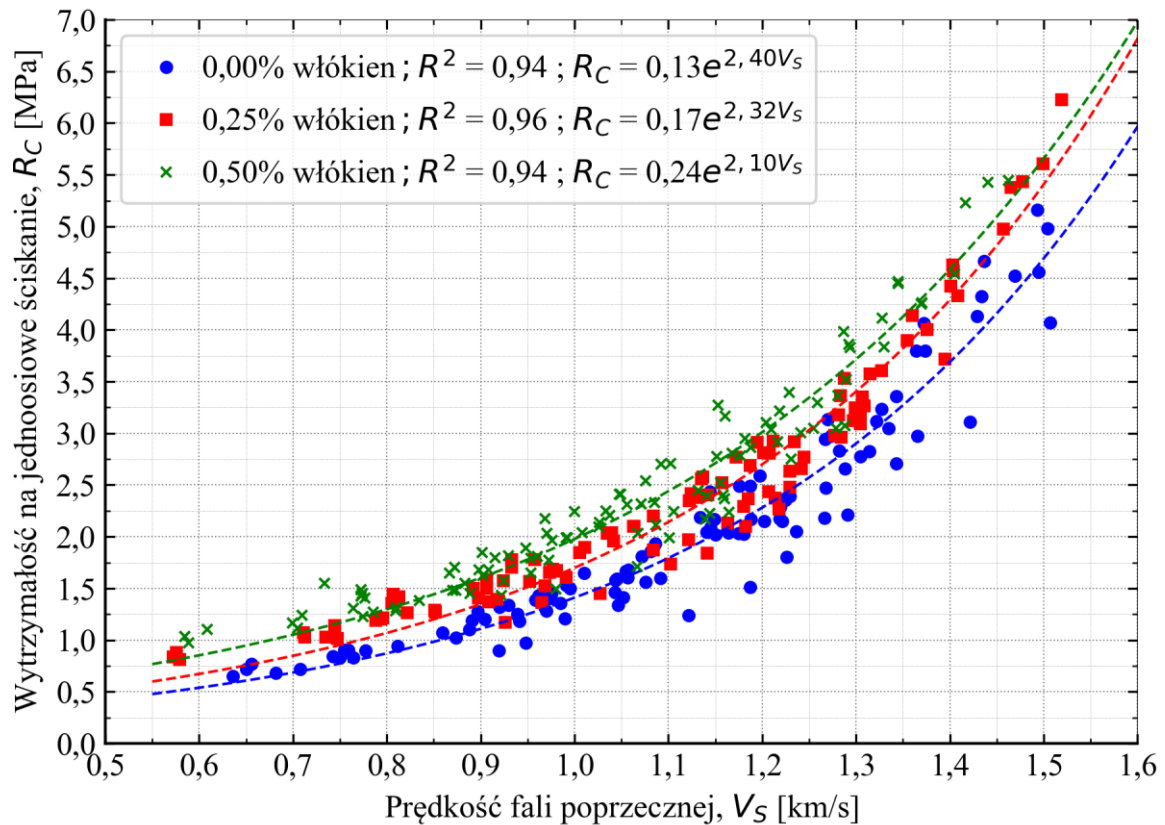
Tab. 5.9 Dane wyznaczone do analizy wpływu pielęgnacji w wodzie na prędkości fal.

Rodzaj serii	$I = \frac{R_{Ci}}{R_C}$	$\frac{V_P \text{ piel. } G}{V_P \text{ piel. } E}$	$\frac{V_S \text{ piel. } G}{V_S \text{ piel. } E}$
[-]	[-]	[%]	[%]
C305	0,70	101,71	100,99
C315	0,74	101,18	98,86
C325	0,73	101,80	97,45
C505	0,82	106,84	101,03
C515	0,78	102,63	99,54
C525	0,78	101,29	98,23
C705	0,75	102,16	99,13
C715	0,73	101,12	98,57
C725	0,69	101,59	98,69
C905	0,78	101,01	99,93
C915	0,84	100,56	99,33
C925	0,84	100,77	96,54

Po wykluczeniu wcześniej wymienionych serii badań wyznaczono zależności empiryczne pomiędzy prędkościami fal podłużnych i poprzecznych a wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie. Empiryczne zależności między R_C a V_P zostały przedstawione na rys. 5.13, natomiast zależności między R_C a V_S zaprezentowano na rys. 5.14.



Rys. 5.13 Zależność wytrzymałości na ściskanie od prędkości fal podłużnych.



Rys. 5.14 Zależność wytrzymałości na ściskanie od prędkości fal poprzecznych.

Analizując przedstawione wyniki, można stwierdzić, że istnieje silna zależność pomiędzy prędkościami fal a wytrzymałością cementogruntu. Zaprezentowane zależności empiryczne zostały opisane funkcją eksponentialną, której współczynnik skalujący wzrasta wraz ze zwiększaniem zawartości włókien polipropylenowych. Oznacza to, że dla takich samych prędkości fal, czyli referencyjnej prędkości fali, wytrzymałość cementogruntu będzie wzrastać. Aby lepiej opisać zachodzące zmiany, przeanalizowano efektywność wzmocnienia, czyli iloraz wytrzymałości na ściskanie z włóknami do wytrzymałości bez włókien. Podczas analizy wykorzystano omówione funkcje eksponentialne, a wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie wyznaczono dla wybranych wartości referencyjnych prędkości fal podłużnych i poprzecznych. Wyznaczone efektywności wzmocnienia zestawiono w tab. 5.10. Na podstawie zaprezentowanych wyników można stwierdzić, że efektywność wzmocnienia wzrasta wraz z zawartością włókien w mieszance, jednak w miarę zwiększania się wytrzymałości cementogruntu efekt wzmocnienia ulega osłabieniu.

Tab. 5.10 Wpływ włókien polipropylenowych na R_C dla referencyjnych prędkości fal.

Wartość ref. – V_P	R_C z 0,00% włókien	$\frac{R_C \text{ z 0,25\% włókien}}{R_C \text{ z 0,00\% włókien}}$	$\frac{R_C \text{ z 0,50\% włókien}}{R_C \text{ z 0,00\% włókien}}$
[km/s]	[MPa]	[%]	[%]
1,2	0,58	126,15	154,20
1,6	0,96	124,64	145,22
2,0	1,58	123,15	136,77
2,4	2,61	121,68	128,80
2,8	4,31	120,23	121,30
Wartość ref. – V_S	R_C z 0,00% włókien	$\frac{R_C \text{ z 0,25\% włókien}}{R_C \text{ z 0,00\% włókien}}$	$\frac{R_C \text{ z 0,50\% włókien}}{R_C \text{ z 0,00\% włókien}}$
[km/s]	[MPa]	[%]	[%]
0,6	0,55	124,64	154,20
0,8	0,89	122,66	145,22
1	1,43	120,72	136,77
1,2	2,32	118,80	128,80
1,4	3,74	116,91	121,30

Aby w pełni zrozumieć wpływ włókien na prędkości fal podłużnych i poprzecznych, przeprowadzono dodatkowo analizę badania nr 3, w ramach której przeanalizowano serie: C305, C315, C325, C505, C515, C525, C705, C715, C725, C905, C915 i C925. Wszystkie wymienione serie zostały poddane pielęgnacji typu E. Podczas analizy wyznaczono efektywność wzmocnienia prędkości fal, który jest ilorazem średnich prędkości fal w seriach z włóknami do prędkości fal w seriach bez włókien. Szczegółowe wyniki przedstawiające

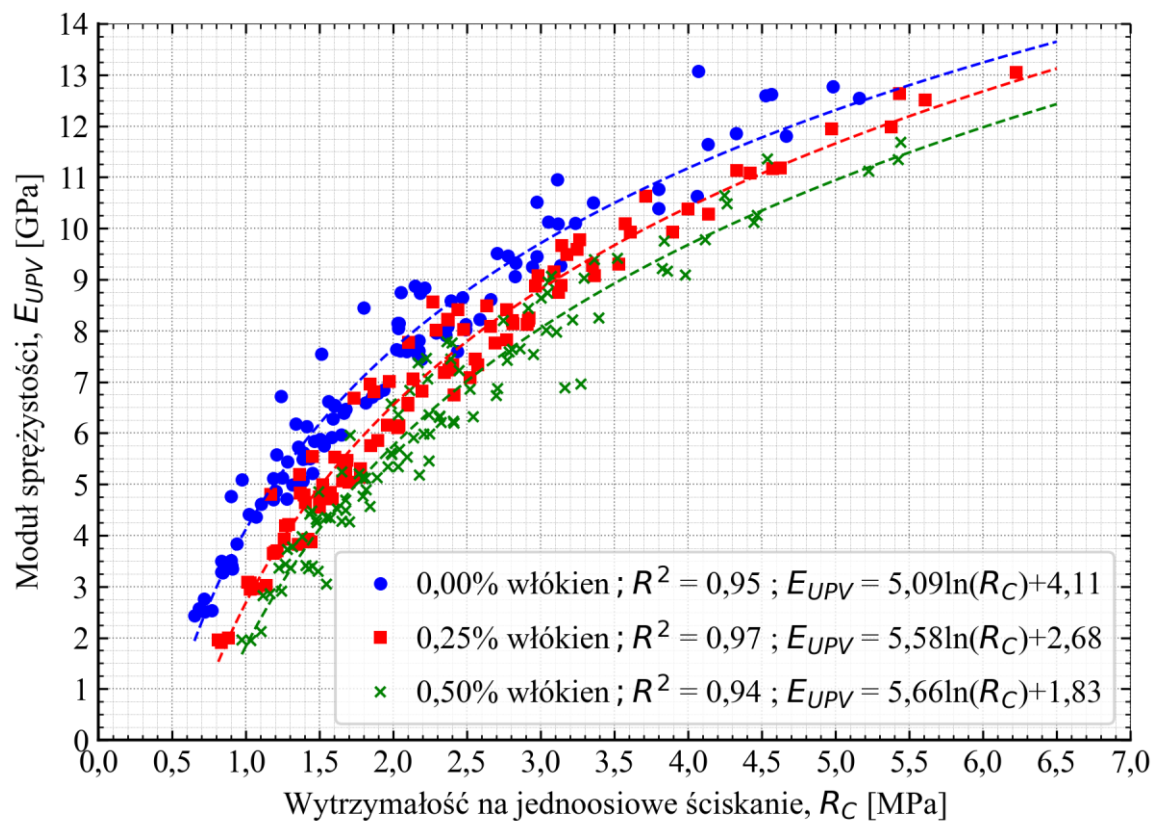
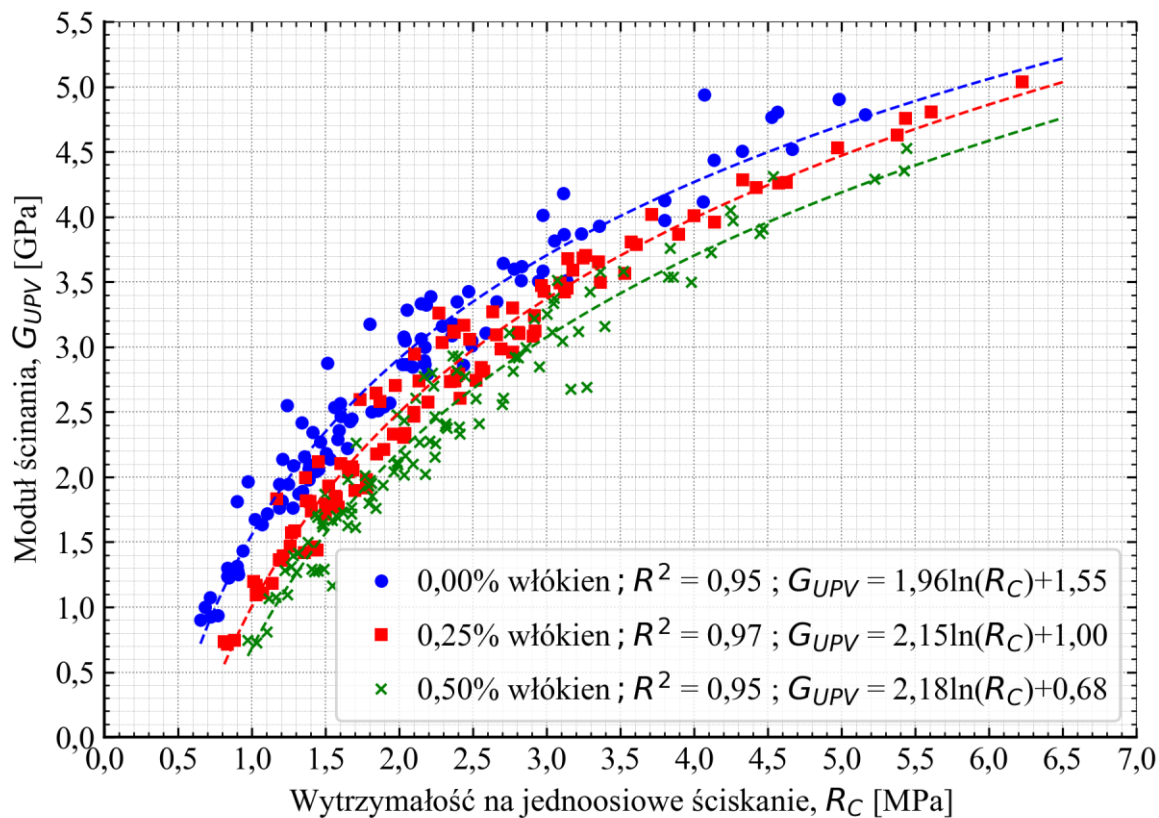
zmiany prędkości fal zestawiono w tab. 5.11. Na podstawie zaprezentowanych wyników należy stwierdzić, że w badanych seriach ze zbrojeniem rozproszonym prędkość fal zmniejszyła się do 96% wartości zmierzonej w mieszankach bez zbrojenia rozproszonego. Efekt ten nasilał się wraz ze wzrostem zawartości włókien w mieszankach. Porównywalne wyniki zmniejszenia prędkości fal odnotowano zarówno dla fal podłużnych, jak i poprzecznych. Takie wyniki mogą być spowodowane większą ilością powierzchni kontaktu pomiędzy włóknem a gruntem stabilizowanym, przez które musi przejść nadana fala. Takie zjawisko może prowadzić do wyznaczenia błędnych wartości modułów E_{UPV} i G_{UPV} , w związku z czym w dalszej części rozdziału przeprowadzono analizę porównawczą modułów wyznaczonych na podstawie prędkości fal, czyli modułów E_{UPV} i G_{UPV} z modułami wyznaczonymi podczas badań jednoosiowego ściskania, czyli modułem E_{50} . Taka analiza wyników pozwoli określić czy zbrojenie rozproszone w istotny sposób wpływa na zależności pomiędzy badanymi modułami.

Tab. 5.11 Zmiana prędkości fal podłużnych i poprzecznych w poszczególnych seriach.

Seria referencyjna	V_P z 0,00% włókien	$\frac{V_P \text{ z 0,25\% włókien}}{V_P \text{ z 0,00\% włókien}}$	$\frac{V_P \text{ z 0,50\% włókien}}{V_P \text{ z 0,00\% włókien}}$
[-]	[km/s]	[%]	[%]
C305	2,313	99,74	98,25
C505	2,450	101,18	99,10
C705	2,740	97,67	95,57
C905	2,847	97,71	96,26

Seria referencyjna	V_S z 0,00% włókien	$\frac{V_S \text{ z 0,25\% włókien}}{V_S \text{ z 0,00\% włókien}}$	$\frac{V_S \text{ z 0,50\% włókien}}{V_S \text{ z 0,00\% włókien}}$
[-]	[km/s]	[%]	[%]
C305	1,173	101,84	96,54
C505	1,311	98,76	98,61
C705	1,433	97,86	95,51
C905	1,497	99,82	96,34

Moduły sprężystości i ścinania wyznaczone metodą ultradźwiękową, analogicznie jak prędkości fal podłużnych i poprzecznych, są silnie powiązane z wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie gruntu stabilizowanego, co pokazano na rys. 5.15 i rys. 5.16. Przedstawione zależności empiryczne pomiędzy E_{UPV} i G_{UPV} a R_c zostały opisane przy pomocy funkcji logarytmicznej, dzięki czemu osiągnięto wysoki współczynnik determinacji. Również w tym przypadku można dostrzec wyraźny wpływ ilości włókien polipropylenowych na wyznaczone zależności empiryczne.

Rys. 5.15 Zależność pomiędzy modułem E_{UPV} a wytrzymałością cementoguntu.Rys. 5.16 Zależność pomiędzy modułem G_{UPV} a wytrzymałością cementoguntu.

Na podstawie zaprezentowanych zależności empirycznych ustalono, że wraz ze zwiększaniem zawartości włókien w mieszankach wzrastał współczynnik skalujący funkcje, jednak parametr odpowiedzialny za pionowe przesunięcie wykresu malał. Oznacza to, że dla takich samych wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie, czyli wytrzymałości referencyjnej, moduły E_{UPV} i G_{UPV} będą maleć wraz ze wzrostem zawartości włókien. Dla zbadanych wartości referencyjnych największe zmniejszenie w ujęciu procentowym odnotowano przy wartości $R_C = 1$ MPa. Jednak w miarę wzrostu wytrzymałości referencyjnej wpływ włókien był coraz mniejszy. Tab. 5.12 przedstawia zestawienie zmian modułów dla wybranych wartości referencyjnych.

Tab. 5.12 Zmiana modułów E_{UPV} i G_{UPV} wraz ze wzrostem wytrzymałości referencyjnej.

Wartość referencyjna R_C [MPa]	E_{UPV} z 0,00% włókien [GPa]	$\frac{E_{UPV} \text{ z } 0,25\% \text{ włókien}}{E_{UPV} \text{ z } 0,00\% \text{ włókien}}$ [%]	$\frac{E_{UPV} \text{ z } 0,50\% \text{ włókien}}{E_{UPV} \text{ z } 0,00\% \text{ włókien}}$ [%]
1	4,11	65,21	44,53
2	7,64	85,72	75,32
3	9,70	90,81	82,95
4	11,17	93,28	86,66
5	12,30	94,79	88,92

Wartość referencyjna R_C [MPa]	G_{UPV} z 0,00% włókien [GPa]	$\frac{G_{UPV} \text{ z } 0,25\% \text{ włókien}}{G_{UPV} \text{ z } 0,00\% \text{ włókien}}$ [%]	$\frac{G_{UPV} \text{ z } 0,50\% \text{ włókien}}{G_{UPV} \text{ z } 0,00\% \text{ włókien}}$ [%]
1	1,55	64,52	43,87
2	2,91	85,62	75,33
3	3,70	90,78	83,03
4	4,27	93,28	86,76
5	4,70	94,81	89,03

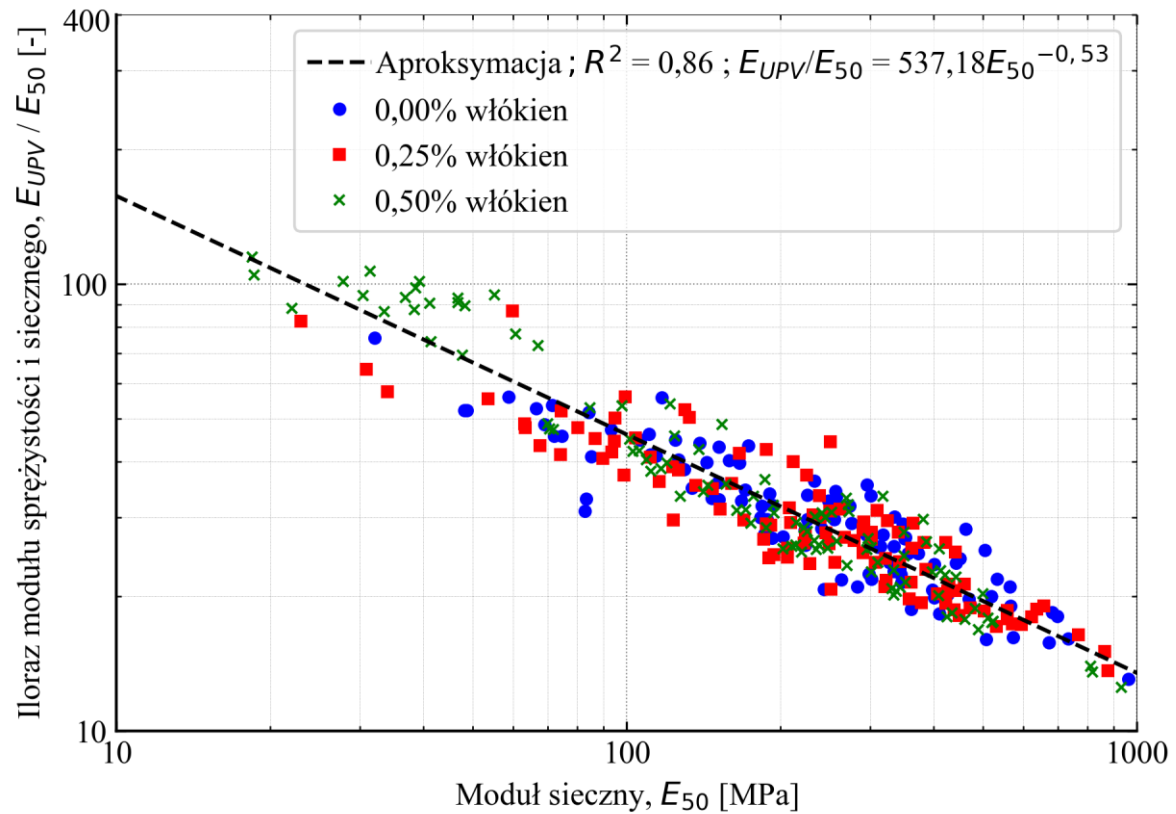
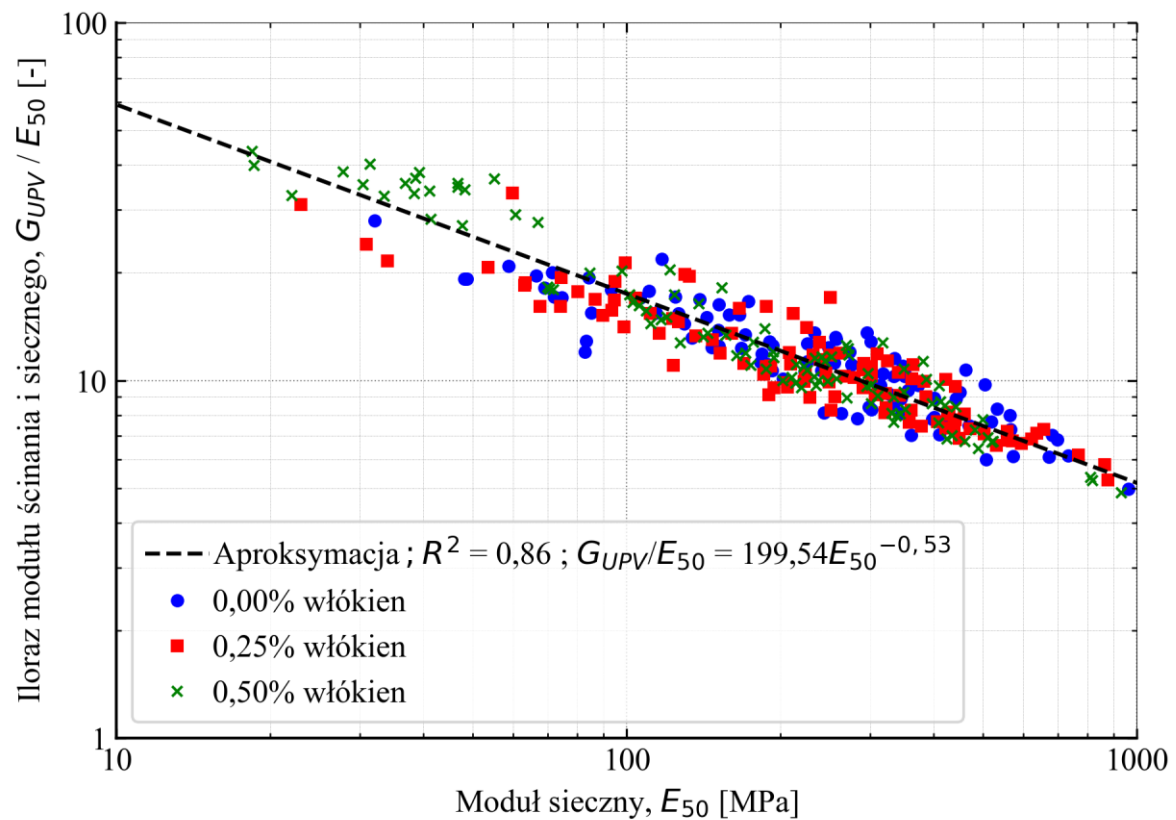
Rozpatrywanie zmiany modułów E_{UPV} i G_{UPV} jedynie w ujęciu referencyjnej wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie może prowadzić do mylnej oceny wpływu włókien na parametry odkształceniowe. Aby przedstawić zmiany wartości modułów, które nie odnoszą się do wartości referencyjnej, posłużono się badaniem nr 3. Opisywane moduły w tym przypadku również ulegają redukcji, jednak w mniejszym zakresie, osiągając spadek do 85% wartości modułów bez włókien, co przedstawiono w tab. 5.13. Różnice te wynikają z jednoczesnego zmniejszenia wartości modułów oraz zwiększenia wytrzymałości cementogruntu. Zważywszy jednak na fakt, iż zastosowanie włókien polipropylenowych ma na celu zmniejszenie ilości cementu w mieszance, wydaje się właściwym podejściem rozpatrywanie zmiany modułów względem referencyjnej wytrzymałości.

Tab. 5.13 Zmiana modułów E_{UPV} i G_{UPV} w poszczególnych seriach.

Seria referencyjna	E_{UPV} z 0,00% włókien	$\frac{E_{UPV} \text{ z 0,25\% włókien}}{E_{UPV} \text{ z 0,00\% włókien}}$	$\frac{E_{UPV} \text{ z 0,50\% włókien}}{E_{UPV} \text{ z 0,00\% włókien}}$
[-]	[GPa]	[%]	[%]
C305	8,12	101,78	94,34
C505	9,84	97,38	94,25
C705	11,77	94,68	85,39
C905	12,65	98,91	89,97

Seria referencyjna	G_{UPV} z 0,00% włókien	$\frac{G_{UPV} \text{ z 0,25\% włókien}}{G_{UPV} \text{ z 0,00\% włókien}}$	$\frac{G_{UPV} \text{ z 0,50\% włókien}}{G_{UPV} \text{ z 0,00\% włókien}}$
[-]	[GPa]	[%]	[%]
C305	3,06	102,54	94,43
C505	3,79	96,44	93,13
C705	4,49	94,75	85,44
C905	4,83	99,79	90,82

Zaprezentowane wyniki pierwszego etapu badań wykazały, że zastosowanie włókien polipropylenowych w gruncie stabilizowanym cementem prowadzi do zwiększenia wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie. Jednocześnie należy stwierdzić, że obecność włókien polipropylenowych wpływa na nieznaczne obniżenie wartości parametrów odkształceniowych, takich jak sieczny moduł sprężystości, moduły sprężystości i ścinania wyznaczone metodą ultradźwiękową. Jednak z uwagi na odmienne charakterystyki zmian tych modułów podjęto decyzję o przeprowadzeniu dodatkowej analizy. W tym celu zbadano, jak moduł E_{50} wpływa na zmianę ilorazów E_{UPV}/E_{50} i G_{UPV}/E_{50} . Zależności te przedstawiono odpowiednio na rys. 5.17 i rys. 5.18. W obu analizowanych przypadkach największą wartość współczynnika determinacji osiągnięto dla funkcji potęgowej, co wskazuje na nieliniową zależność pomiędzy wyznaczonymi modułami. Jednak na podstawie wyznaczonych zależności należy stwierdzić, że włókna polipropylenowe nie wpływają w znaczący sposób na zależności pomiędzy analizowanymi modułami. Dlatego uznano, że zwiększona ilość powierzchni kontaktu pomiędzy włóknami a gruntem stabilizowanym nie miała większego wpływu na zmierzone prędkości fal. W związku z tym wyznaczone parametry odkształceniowe E_{UPV} i G_{UPV} można uznać za reprezentatywne.

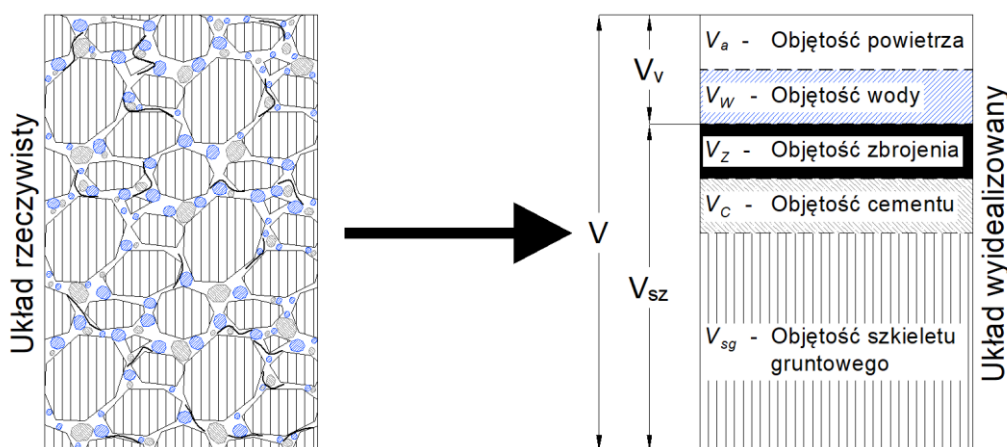
Rys. 5.17 Zależność pomiędzy E_{UPV}/E_{50} a E_{50} .Rys. 5.18 Zależność pomiędzy G_{UPV}/E_{50} a E_{50} .

6. Analiza

6.1. Cementogrunt jako ośrodek pięciofazowy

W niniejszym rozdziale przedstawiono szczegółową analizę uzyskanych wyników badań. Celem przeprowadzonej analizy było opracowanie zależności empirycznych opisujących wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie dla gruntu stabilizowanego z dodatkiem włókien polipropylenowych. W tym celu przyjęto założenie, że badany materiał zbudowany jest z pięciu składników nazywanych także fazami. W trakcie analizy wykorzystano wyniki przeprowadzonych badań mechanicznych i fizycznych składników, mieszanek i próbek. Następnie przeprowadzono weryfikację statystyczną opisanych zależności empirycznych gruntu stabilizowanego.

W klasycznej mechanice gruntów podłoże gruntowe rozpatrywane jest jako ośrodek trójfazowy, składający się z fazy stałej (ziarna i cząstki), fazy ciekłej (woda) i fazy gazowej (powietrze). Następnie w trakcie procesu stabilizacji gruntu do takiego opisu jest uzasadnione włączanie kolejnych składników cementogruntu jako faz, w tym przypadku, fazy wiążącej (spoiwo) i fazy strukturalnej (elementy wzmacniające). W wyniku czego powstaje nowy materiał, który jest materiałem pięciofazowym. Z uwagi na reakcje chemiczne zachodzące pomiędzy spoiwem a wodą, z biegiem czasu, objętość poszczególnych faz będzie ulegać zmianie. Jednocześnie, podczas tego procesu będzie wytwarzać się nowa faza wzmacniająca (żel *C-S-H*). Zważywszy na zachodzące zmiany w przygotowanych próbkach, kontrola objętości poszczególnych faz w późniejszym czasie jest niemożliwa. Dlatego też analizę przeprowadzono na podstawie objętości poszczególnych faz przygotowanych próbek, gdzie proces wiązania jeszcze się nie zaczął. Na rys. 6.1 przedstawiono schemat analizowanego materiału pięciofazowego.



Rys. 6.1 Model pięciofazowy gruntu z dodatkiem cementu i zbrojenia rozproszonego.

Objętość rozpatrywanego ośrodka można wyrazić jako sumę objętości jego poszczególnych faz, zgodnie ze wzorem 6.1. Gdzie objętość porów mieszanki (V_V) należy rozpatrywać jako sumę objętości powietrza (V_a) oraz wody (V_w) w analizowanym ośrodku co można wyrazić wzorem 6.2. Następnie objętość szkieletu mieszanki (V_{sz}) można opisać jako sumę objętości szkieletu gruntowego (V_{sg}), cementu (V_c) i zbrojenia (V_z) zgodnie ze wzorem 6.3. W przypadku mieszanek, które nie zawierały w swoim składzie zbrojenia rozproszonego, mamy do czynienia z ośrodkiem czterofazowym. Jednak na potrzeby pracy przyjęto, że jest to ośrodek pięcioletowy, w którym faza strukturalna równa się zero, a więc można przyjąć, że $V_z = 0$.

$$V = V_a + V_w + V_z + V_c + V_{sg} \quad 6.1$$

$$V_V = V_w + V_a \quad 6.2$$

$$V_{sz} = V_{sg} + V_c + V_z \quad 6.3$$

gdzie:

V – objętość próbki,

V_V – objętość porów mieszanki,

V_{sz} – objętość szkieletu mieszanki,

V_a – objętość powietrza,

V_w – objętość wody,

V_z – objętość zbrojenia,

V_{sg} – objętość szkieletu gruntowego.

W przeprowadzonej analizie wykorzystano parametry kwantyfikowane, które można opisać jako stosunek objętości rozpatrywanej fazy do objętości całego ośrodka. W pracy zidentyfikowano trzy podstawowe parametry, które następnie zostały wyznaczone dla każdej analizowanej próbki, należą do nich: porowatość (n), indeks cementu (C_i) oraz indeks zbrojenia (Z_i). Porowatość analogicznie jak w mechanice gruntów można określić jako iloraz V_v do V co zostało wyrażone wzorem 6.4. Następnie indeks cementu można opisać jako iloraz V_c do V zgodnie ze wzorem 6.5. W dalszej kolejności indeks zbrojenia został zdefiniowany jako iloraz V_z do V , co można zapisać wzorem 6.6. Jednak, aby było możliwe wyznaczenie opisanej porowatości i indeksów niezbędne jest przeprowadzenie dodatkowych obliczeń. W dalszej części rozdziału przedstawiono i omówiono zastosowaną metodologię podczas wyznaczania przedstawionych parametrów.

$$n = \frac{V_V}{V} \cdot 100\% \quad 6.4$$

$$C_i = \frac{V_C}{V} \cdot 100\% \quad 6.5$$

$$Z_i = \frac{V_z}{V} \quad 6.6$$

gdzie:

n – porowatość,

C_i – indeks cementu,

Z_i – indeks zbrojenia,

V_V – objętość porów mieszanki,

V_C – objętość cementu,

V_z – objętość zbrojenia,

V – objętość próbki.

W celu wyznaczenia wyżej wymienionych parametrów niezbędna jest znajomość parametrów fizycznych poszczególnych komponentów, świeżej mieszanki oraz przygotowanych próbek. Właściwości fizyczne zastosowanych komponentów zostały opisane w rozdziale 3. Procedura określania zawartości poszczególnych składników i wilgotności rzeczywistej (w) świeżej mieszanki została opisana w rozdziale 4.2.3. Następnie parametry, takie jak masa i objętość próbek, zostały wyznaczone podczas ich przygotowywania, co zostało opisane w rozdziale 4.2.4. Podczas analizy wykorzystano następujące parametry:

1. ρ_s – gęstość właściwa gruntu,
2. ρ_c – gęstość właściwa cementu,
3. ρ_z – gęstość właściwa zbrojenia rozproszonego,
4. ρ_w – gęstość właściwa wody zarobowej,
5. w – wilgotność rzeczywista świeżej mieszanki,
6. m_p – masę zagęszczonej próbki,
7. V – objętość próbki,
8. C – procentowa zawartość cementu,
9. Z – procentowa zawartość zbrojenia.

Na podstawie wyżej wymienionych właściwości fizycznych oraz procentowej zawartości poszczególnych komponentów, wyznaczono w pierwszej kolejności gęstość objętościową (ρ_{mix}) próbek zgodnie ze wzorem 6.7. Następnie korzystając z obliczonej

gęstości objętościowej oraz rzeczywistej wilgotności wyznaczono gęstość objętościową szkieletu mieszanki ($\rho_{d\ mix}$) zgodnie ze wzorem 6.8. W dalszej kolejności obliczono objętości poszczególnych faz w każdej analizowanej próbce. Objętość cementu wyznaczono zgodnie ze wzorem 6.9, objętość zbrojenia zgodnie ze wzorem 6.10 i objętość szkieletu gruntowego na podstawie wzoru 6.11. Dalej obliczono objętość porów, która jest różnicą objętości próbki i szkieletu mieszanki, zgodnie ze wzorem 6.12. W celu wyznaczenia objętości powietrza ze wzoru 6.2 konieczne jest obliczenie objętości wody, którą to wyznaczono z zależności 6.13. Poniżej zestawiono wykorzystane wzory:

$$\rho_{mix} = \frac{m_p}{V} \quad 6.7$$

$$\rho_{d\ mix} = \frac{m_{sg} + m_c + m_z}{V} = \frac{100 \cdot \rho_{mix}}{100 + w} \quad 6.8$$

$$V_c = V \cdot \frac{\rho_{d\ mix} \cdot C}{(100 + C + Z) \cdot \rho_c} \quad 6.9$$

$$V_z = V \cdot \frac{\rho_{d\ mix} \cdot Z}{(100 + C + Z) \cdot \rho_z} \quad 6.10$$

$$V_{sg} = \frac{(V \cdot \rho_{d\ mix}) - (V_c \cdot \rho_c) - (V_z \cdot \rho_z)}{\rho_s} \quad 6.11$$

$$V_v = V - V_{sz} = V - (V_{sg} + V_c + V_z) \quad 6.12$$

$$V_w = \frac{m_p \cdot w}{100 \cdot \rho_w} \quad 6.13$$

gdzie:

w – wilgotność rzeczywista świeżej mieszanki,

C, Z – procentowa zawartość: cementu, zbrojenia,

$\rho_{mix}, \rho_{d\ mix}$ – gęstość: gęstość próbki, objętościowa szkieletu mieszanki,

$\rho_c, \rho_z, \rho_s, \rho_w$ – gęstość właściwa: cementu, włókien polipropylenowych, gruntu, wody,

m_p, m_c, m_z, m_{sg} – masa: próbki, cementu, zbrojenia, szkieletu gruntowego,

$V, V_c, V_z, V_{sg}, V_{sz}, V_v, V_w$ – objętość: próbki, cementu, zbrojenia, szkieletu gruntowego, szkieletu mieszanki, porów mieszanki, wody.

Na podstawie wyznaczonych wartości określono porowatość, indeks cementu oraz indeks zbrojenia. Wymienione parametry zostały wykorzystane w dalszej części pracy. Wyniki przeprowadzonej analizy zostały przedstawione w postaci wykresów zaprezentowanych w niniejszym rozdziale.

6.2. Opracowywanie zależności empirycznych

W niniejszym rozdziale przedstawiono szczegółową analizę, w której wyznaczono zależności empiryczne służące do określania wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie cementogruntu z dodatkiem włókien polipropylenowych. Podczas analizy wykorzystano obliczone wartości porowatości, indeksu cementowego i zbrojeniowego, co było możliwe dzięki zastosowaniu opisu ośrodka pięciofazowego. Dodatkowo w trakcie analizy uwzględniono czas utwardzania i wyznaczoną odporność na działanie wody. Wymienione parametry pozwoliły na określenie zależności empirycznych pomiędzy zmienną zależną a pięcioma zmiennymi niezależnymi. W trakcie analizy następowało stopniowe włączanie wymienionych parametrów do końcowych zależności. Takie podejście umożliwiło bardziej precyzyjne przedstawienie toku postępowania przy wyznaczaniu równań. Przebieg analizy skrótkowo przedstawiono w tab. 6.1. Na potrzeby analizy wprowadzono współczynnik Δ_i , który był wyznaczany stopniowo na podstawie porowatości, indeksu cementowego i zbrojeniowego, czasu utwardzania, odporności na działanie wody i dodatkowo wprowadzonych parametrów kalibracyjnych (PK_i). Końcowe zależności empiryczne zostały zdefiniowane przy pomocy funkcji potęgowej, która jest zależna od wyznaczonego współczynnika Δ_i , co opisano równaniem 6.14. Odróżniono oznaczenie wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie (R_C) od końcowej zależności empirycznej poprzez wprowadzenie oznaczenia ($\hat{R}_C$), które w dalszej części pracy będzie jedynie stosowane do opisu wyznaczonych końcowych zależności.

$$R_C \vee \hat{R}_C = \beta[\Delta_i]^\alpha \quad 6.14$$

gdzie:

R_C – wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie,

$\hat{R}_C$ – obliczona wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie, zależność końcowa,

β – współczynnik skalujący zależność empiryczną,

α – wykładnik zależności empirycznej,

Δ_i – współczynnik zależny od zmiennych niezależnych i parametrów kalibracyjnych.

Ponadto zależności empiryczne pomiędzy wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie a indeksem cementowym zostały opisane przy pomocy zależności liniowej. W trakcie przeprowadzonej analizy wykorzystano dane pochodzące z badania nr 1, 2 i 3, które zostały przeprowadzone w ramach pierwszego etapu badań. W dalszej części rozdziału stosowane oznaczenia są zgodne z oznaczeniami podanymi w tab. 6.1.

Tab. 6.1 Tok postępowania przy opracowywaniu końcowych zależności empirycznych.

Lp.	Kolejność wprowadzanych danych i parametrów	Parametr Δ	Równanie	Rozdział
1	wprowadzone dane: n – porowatość	$\Delta_1 = n$	$R_C = \beta[\Delta_1]^\alpha$	6.2.1
2	wprowadzone dane: C_i – indeks cementowy	$\Delta_2 = C_i$	$R_C = \beta[\Delta_2]^\alpha$	6.2.2
3	Analiza stosunku indeksów: n, C_i	$\Delta_3 = \frac{n}{C_i}$	$R_C = \beta[\Delta_3]^\alpha$	6.2.3
	wprowadzone parametry: PK_1 – parametr kalibrujący	$\Delta_4 = \frac{n}{C_i^{PK_1}}$	$R_C = \beta[\Delta_4]^\alpha$	6.2.3
4	wprowadzone dane: Z_i – indeks zbrojenia wprowadzone parametry: PK_2 – parametr kalibrujący	$\Delta_5 = \frac{n(1 - Z_i^{PK_2})}{C_i^{PK_1}}$	$R_C = \beta[\Delta_5]^\alpha$	6.2.4
5	wprowadzone dane: T_c – okres pielęgnacji wprowadzone parametry: PK_3 – parametr kalibrujący	$\Delta_6 = \frac{n(1 - Z_i^{PK_2})}{T_c^{PK_3} C_i^{PK_1}}$	$R_C = \beta[\Delta_6]^\alpha$	6.2.5
6	wprowadzone dane: I – odp. na działanie wody wprowadzone parametry: PK_4 – parametr kalibrujący	$\Delta_7 = \frac{n(1 - Z_i^{PK_2}) I^{PK_4}}{T_c^{PK_3} C_i^{PK_1}}$	$R_C = \beta[\Delta_7]^\alpha$	6.2.6
7	Wyznaczenie zależności do dalszej analizy statystycznej i badań kontrolnych	$\Delta_7 = \frac{n(1 - Z_i^{PK_2}) I^{PK_4}}{T_c^{PK_3} C_i^{PK_1}}$	$\hat{R}_C = \beta[\Delta_7]^\alpha$	6.2.7

6.2.1. Wpływ porowatości

W pierwszej kolejności przeanalizowano wpływ objętości fazy gazowej i wodnej na wytrzymałość cementogruntu. Analizę przeprowadzono na próbkach po 28 dniach pielęgnacji w środowisku powietrzno – suchym, wykorzystując współczynnik porowatości (n), zgodnie ze wzorem 6.4.

$$\Delta_1 = n \quad 6.15$$

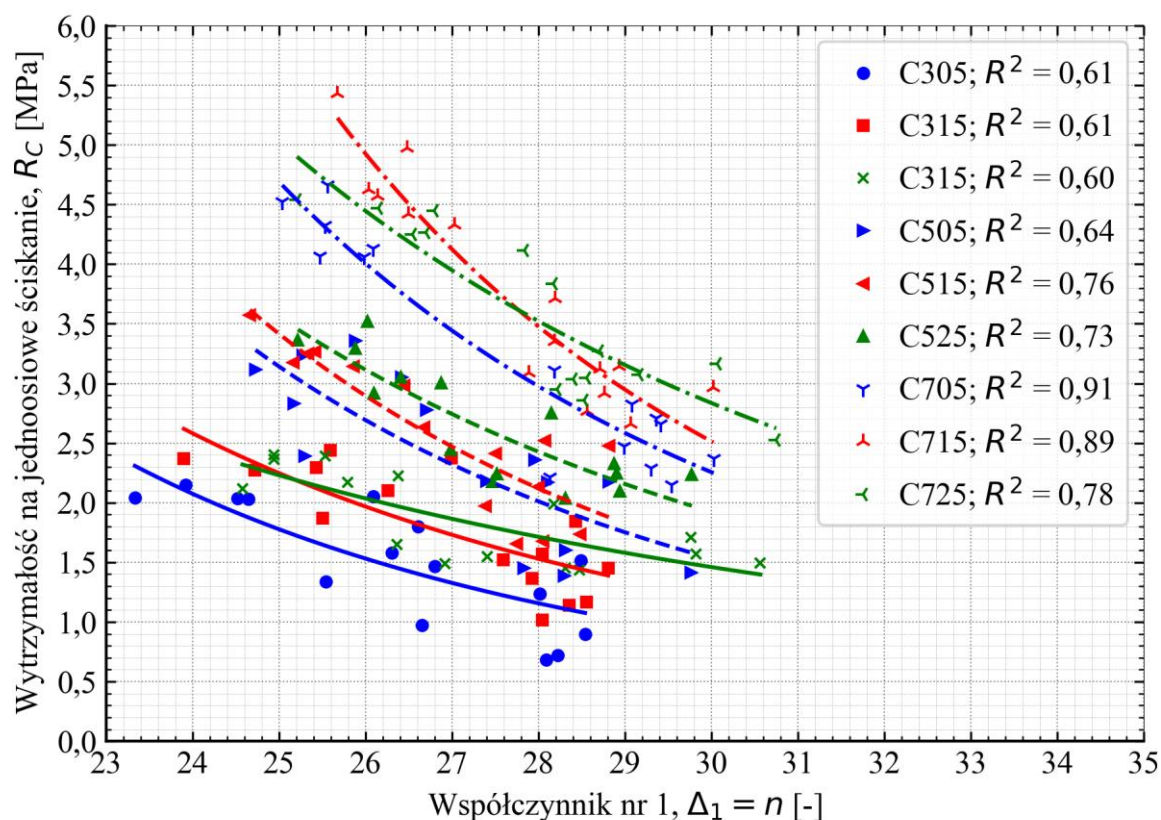
Gdzie:

Δ_1 - współczynnik nr 1,

n – porowatość.

Na podstawie uzyskanych wyników zaobserwowano, że wraz ze wzrostem porowatości, wytrzymałość cementogruntu maleje, co przedstawiono na rys. 6.2. Sam charakter zmian jest niezależny od ilości zastosowanego spoiwa czy też zbrojenia rozproszonego i może zostać opisany przy pomocy funkcji potęgowej. Dodatkowo można

zaobserwować, że istnieje korelacja między ilością włókien polipropylenowych i cementu a porowatością analizowanych próbek. Ponadto odnotowano, że wraz ze wzrostem ich zawartości zwiększała się wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie. W związku z przeprowadzoną analizą można stwierdzić, że objętość powietrza i wody w rozpatrywanym ośrodku znacząco wpływa na jego wytrzymałość. Wszystkie wyznaczone zależności empiryczne zostały zestawione w tab. 6.2.



Rys. 6.2 Wpływ porowatości na wytrzymałość cementogruntu.

Tab. 6.2 Zależności pomiędzy wytrzymałości cementogruntu a porowatością.

Seria	Zależność empiryczna	R^2	Nr równania
C305	$R_c = 353301,96 \cdot \Delta_1^{-3,79}$	0,61	6.16
C315	$R_c = 125031,68 \cdot \Delta_1^{-3,39}$	0,61	6.17
C325	$R_c = 3928,76 \cdot \Delta_1^{-2,32}$	0,60	6.18
C505	$R_c = 994537,96 \cdot \Delta_1^{-3,93}$	0,64	6.19
C515	$R_c = 2616207,96 \cdot \Delta_1^{-4,21}$	0,76	6.20
C525	$R_c = 179891,13 \cdot \Delta_1^{-3,37}$	0,73	6.21
C705	$R_c = 1912241,60 \cdot \Delta_1^{-4,01}$	0,91	6.22
C715	$R_c = 21964049,91 \cdot \Delta_1^{-4,70}$	0,89	6.23
C725	$R_c = 124638,53 \cdot \Delta_1^{-3,14}$	0,78	6.24

6.2.2. Wpływ objętości cementu

Kolejnym analizowanym czynnikiem jest objętość cementu. Analizę przeprowadzono na próbkach po 28 dniach pielęgnacji w środowisku powietrzno – suchym przy założonej wilgotności, która wynosiła 10%. Podczas analizy wykorzystano indeks cementowy (C_i), który zapisano wzorem 6.5.

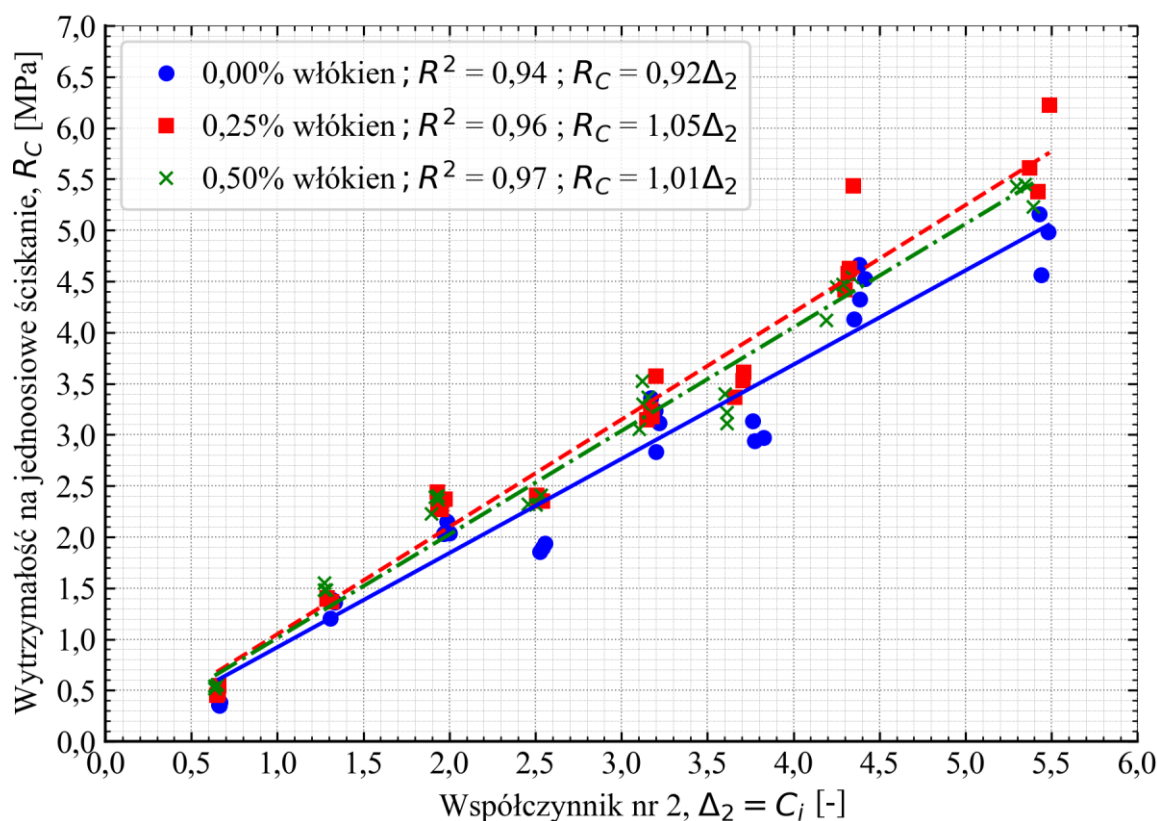
$$\Delta_2 = C_i \quad 6.25$$

Gdzie:

Δ_2 - współczynnik nr 2,

C_i – indeks cementu.

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że wraz ze wzrostem indeksu cementowego następuje liniowy wzrost wytrzymałości na ściskanie gruntu stabilizowanego, co zostało zaprezentowane na rys. 6.3. Dodatkowo odnotowano wzrost wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie wskutek zastosowania włókien polipropylenowych. Efekt wzmocnienia włóknami nasila się wraz ze wzrostem wartości indeksu C_i . Dlatego też można stwierdzić, że objętość cementu analogicznie jak objętość powietrza i wody znacząco wpływa na wytrzymałość gruntu stabilizowanego. Zależności empiryczne wyznaczone podczas analizy zostały zestawione w tab. 6.3.



Rys. 6.3 Wpływ indeksu cementowego na wytrzymałość cementogruntu.

Tab. 6.3 Zależności pomiędzy wytrzymałością cementogruntu a indeksem cementowym.

Seria	Zależność empiryczna	R^2	Nr równania
C105, C205, C305 C405, C505, C605, C705, C905	$R_C = 0,92 \cdot \Delta_2$	0,94	6.26
C115, C215, C315 C415, C515, C615, C715, C915	$R_C = 1,05 \cdot \Delta_2$	0,96	6.27
C125, C225, C325 C425, C525, C625, C725, C925	$R_C = 1,01 \cdot \Delta_2$	0,97	6.28

6.2.3. Wpływ stosunku porowatości i objętości cementu

Biorąc pod uwagę zaobserwowane zależności pomiędzy porowatością i indeksem cementowym a wytrzymałością cementogruntu, przeprowadzono analizę z uwzględnieniem obu tych parametrów. Analiza została przeprowadzona na próbkach po 28 dniach pielęgnacji w środowisku powietrzno – suchym. Rozpatrywany iloraz porowatości do indeksu cementowego zapisano przy pomocy wzoru 6.29.

$$\Delta_3 = \frac{n}{C_i} \quad 6.29$$

gdzie:

Δ_3 – współczynnik nr 3,

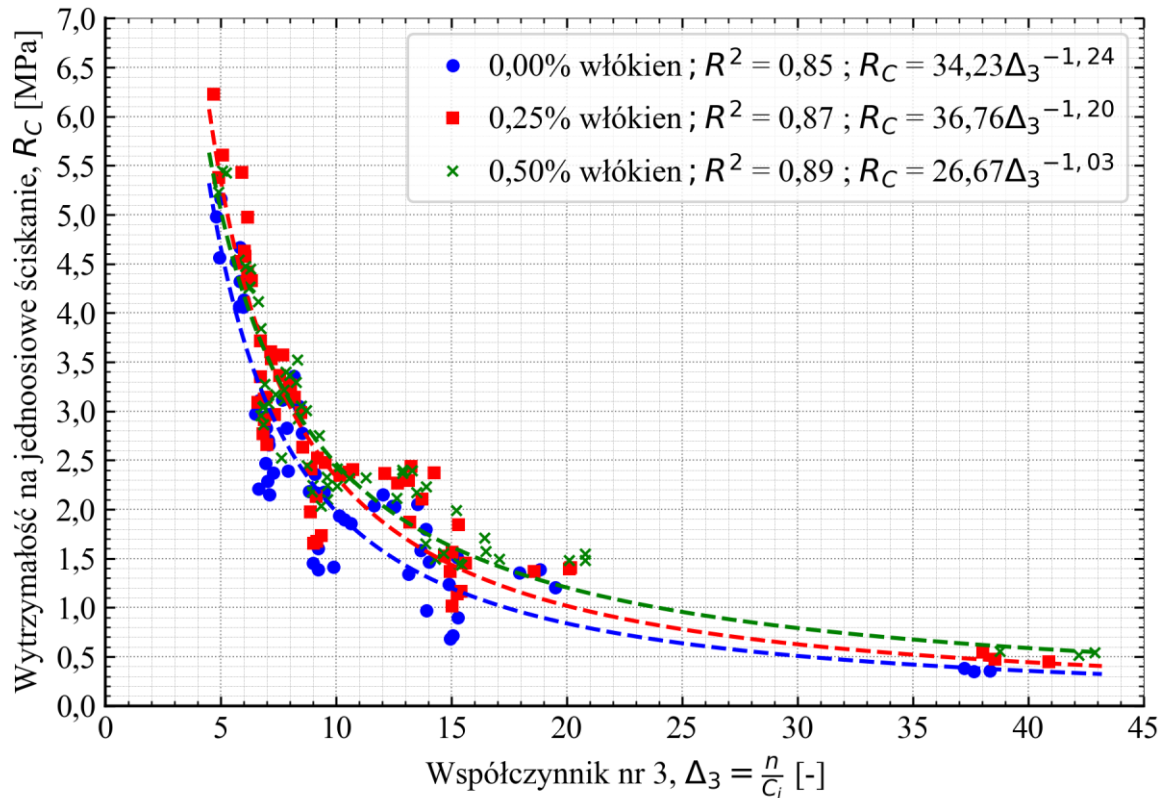
n – porowatość,

C_i – indeks cementu.

Na podstawie zaobserwowanych zależności przedstawionych na rys. 6.4 można stwierdzić, że istnieje silna korelacja pomiędzy współczynnikiem Δ_3 a wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie. Natomiast w dalszym ciągu można dostrzec wpływ włókien polipropylenowych na wzrost wytrzymałości. Jednak nie jest on już tak wyraźny, jak w przypadku zależności empirycznych wyznaczonych we wcześniejszej części rozdziału. Wszystkie wyznaczone zależności zestawiono w tab. 6.4.

Tab. 6.4 Zależności pomiędzy wytrzymałością cementogruntu a Δ_3 .

Seria	Zależność empiryczna	R^2	Nr równania
C105, C205, C305 C405, C505, C605, C705, C905	$R_C = 34,23 \cdot \Delta_3^{-1,24}$	0,85	6.30
C115, C215, C315 C415, C515, C615, C715, C915	$R_C = 36,76 \cdot \Delta_3^{-1,20}$	0,87	6.31
C125, C225, C325 C425, C525, C625, C725, C925	$R_C = 26,67 \cdot \Delta_3^{-1,03}$	0,90	6.32



Rys. 6.4 Zależność pomiędzy Δ_3 a wytrzymałością na ściskanie cementogruntu.

W celu poprawy korelacji empirycznej wprowadzono do Δ_3 dodatkowy parametr kalibracyjny (PK_1), który jest wykładnikiem indeksu cementowego. Zmodyfikowany współczynnik Δ_3 zapisano przy pomocy wzoru 6.33:

$$\Delta_4 = \frac{n}{C_i^{PK_1}} \quad 6.33$$

gdzie:

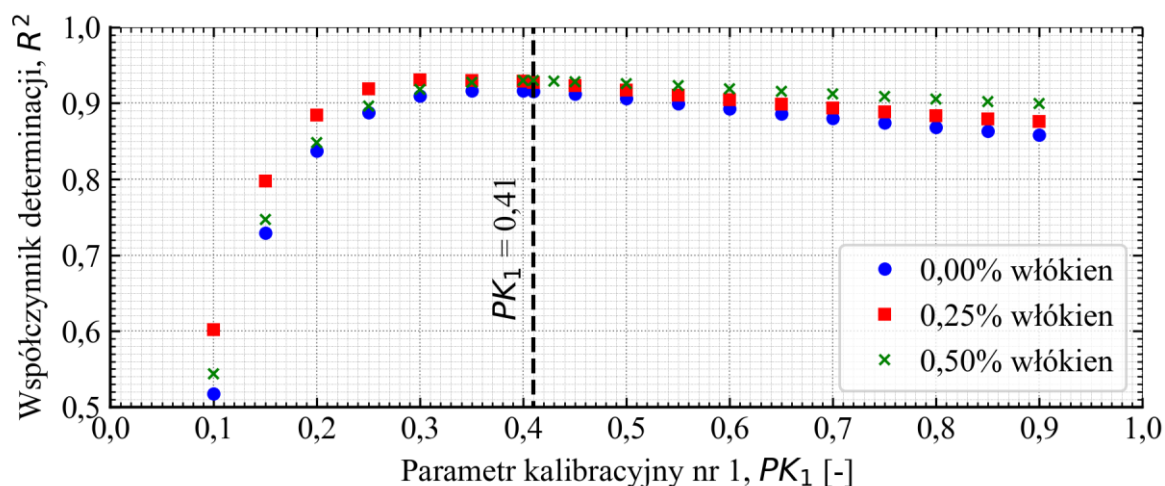
Δ_4 – współczynnik nr 4,

n – porowatość,

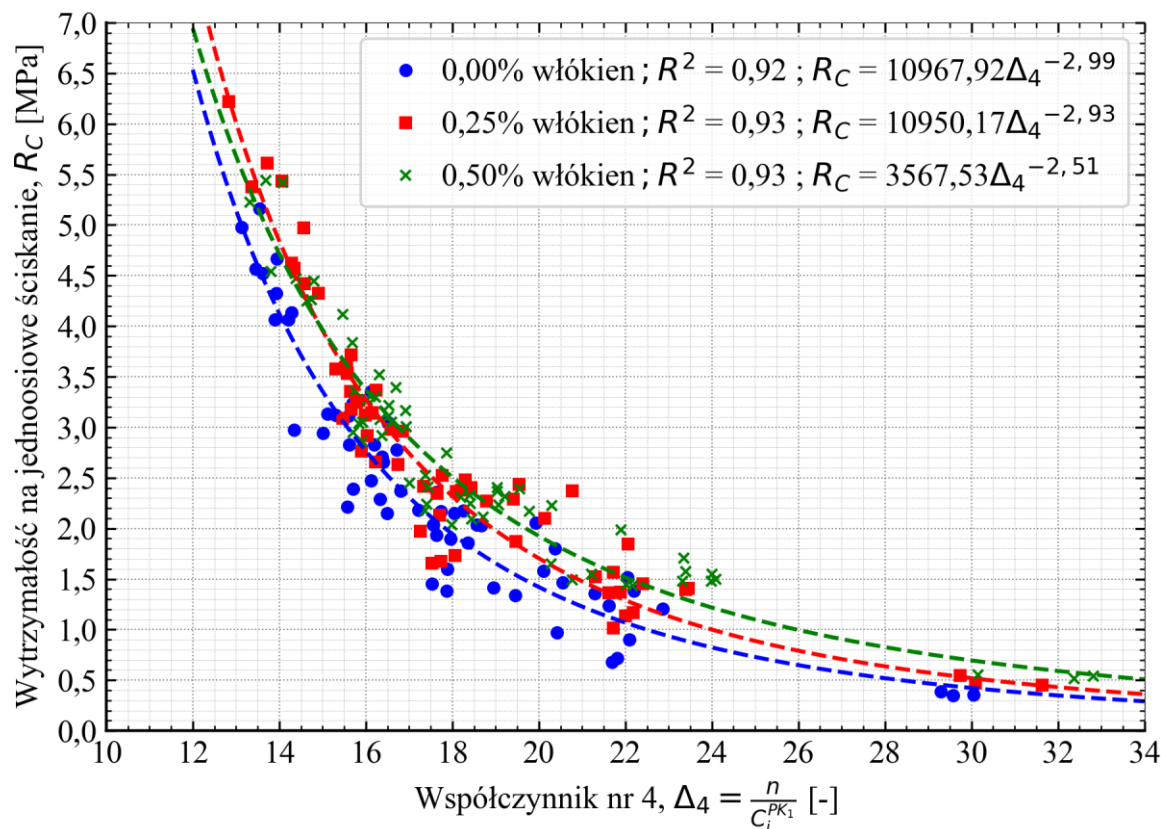
C_i – indeks cementu,

PK^1 – parametr kalibracyjny nr 1.

W celu doboru parametru PK_1 przeprowadzono analizę, podczas której zbadano, jak analizowany parametr wpływa na uzyskiwane współczynniki determinacji. Ustalono, że przy $PK_1 = 0,41$ osiągnięto największe wzrosty współczynników determinacji, co widać na rys. 6.5. Nowo wprowadzony parametr powinien mieścić się w zbiorze $PK_1 \in [0,1]$. Parametr ten będzie różnił się w zależności od zastosowanego rodzaju spoiwa czy też gruntu, w związku z czym Δ_4 jest bardziej uniwersalnym współczynnikiem niż Δ_3 . Stosując przyjęty parametr kalibracyjny, wyznaczono nowe zależności empiryczne, które zostały zestawione w tab. 6.5 i przedstawione na rys. 6.6.

Rys. 6.5 Wpływ parametru PK_1 na współczynnik determinacji.Tab. 6.5 Zależności pomiędzy wytrzymałością cementogruntu a Δ_4 .

Seria	Zależność empiryczna	R^2	Nr równania
C105, C205, C305 C405, C505, C605, C705, C905	$R_C = 10967,92 \cdot \Delta_4^{-2,99}$	0,92	6.34
C115, C215, C315 C415, C515, C615, C715, C915	$R_C = 10950,17 \cdot \Delta_4^{-2,93}$	0,93	6.35
C125, C225, C325 C425, C525, C625, C725, C925	$R_C = 3567,53 \cdot \Delta_4^{-2,51}$	0,93	6.36

Rys. 6.6 Zależność pomiędzy Δ_4 a wytrzymałością na ściskanie cementogruntu.

6.2.4. Wpływ zbrojenia rozproszonego

W celu uwzględnienia wpływu włókien polipropylenowych na wytrzymałość cementogruntu przeprowadzono analizę próbek po 28 dniach pielęgnacji w warunkach powietrzno – suchych. Podczas analizy uwzględniono indeks zbrojenia (Z_i) i następny parametr kalibracyjny (PK_2). Na potrzeby analizy wprowadzono współczynnik Δ_5 , który został opisany wzorem 6.37:

$$\Delta_5 = \frac{n(1 - Z_i^{PK_2})}{C_i^{PK_1}} \quad 6.37$$

gdzie:

Δ_5 – współczynnik nr 5,

n – porowatość,

C_i, Z_i – indeks: cementu, zbrojenia,

PK_1, PK_2 – parametr kalibracyjny nr 1, 2.

W powyższym równaniu wpływ włókien został uwzględniony jako iloczyn Δ_4 i $(1 - Z_i^{PK_2})$. Dla mieszanek niezawierających zbrojenia rozproszonego, indeks zbrojeniowy zawsze będzie przyjmował wartość 0. W rezultacie wprowadzony współczynnik będzie miał wartość 1, w związku z czym nie wpłynie na obliczaną wytrzymałość gruntu stabilizowanego bez włókien. Podejście takie sprawia, że Δ_5 jest współczynnikiem uniwersalnym i może być stosowany zarówno w mieszankach z włóknami polipropylenowymi, jak i bez nich. Dodatkowo w przypadku zastosowania innego rodzaju zbrojenia rozproszonego, parametr PK_2 może zostać dostosowany do nowych zależności empirycznych.

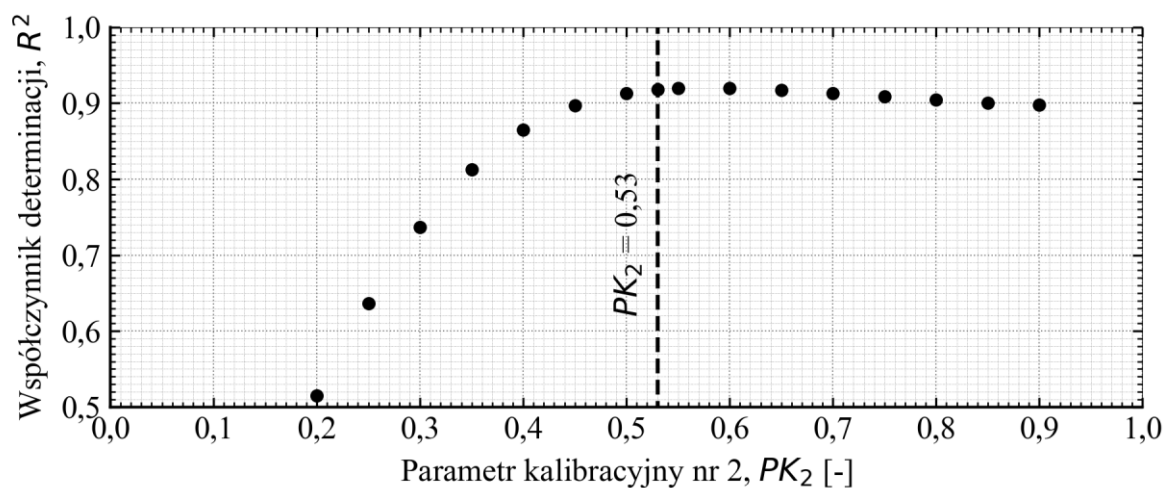
Podczas przeprowadzanej analizy przyjęto $PK_2 = 0,53$, co umożliwiło osiągnięcie wyższego współczynnika determinacji. Wpływ parametru kalibracyjnego na współczynnik determinacji przedstawiono na rys. 6.7. Następnie na podstawie przedstawionego wzoru 6.37 wyznaczono zależność empiryczną pomiędzy wytrzymałością na ściskanie a współczynnikiem Δ_5 , którą opisano równaniem 6.38 i przedstawiono na rys. 6.8.

$$R_C = 5918,03 \cdot \Delta_5^{-2,77} \quad 6.38$$

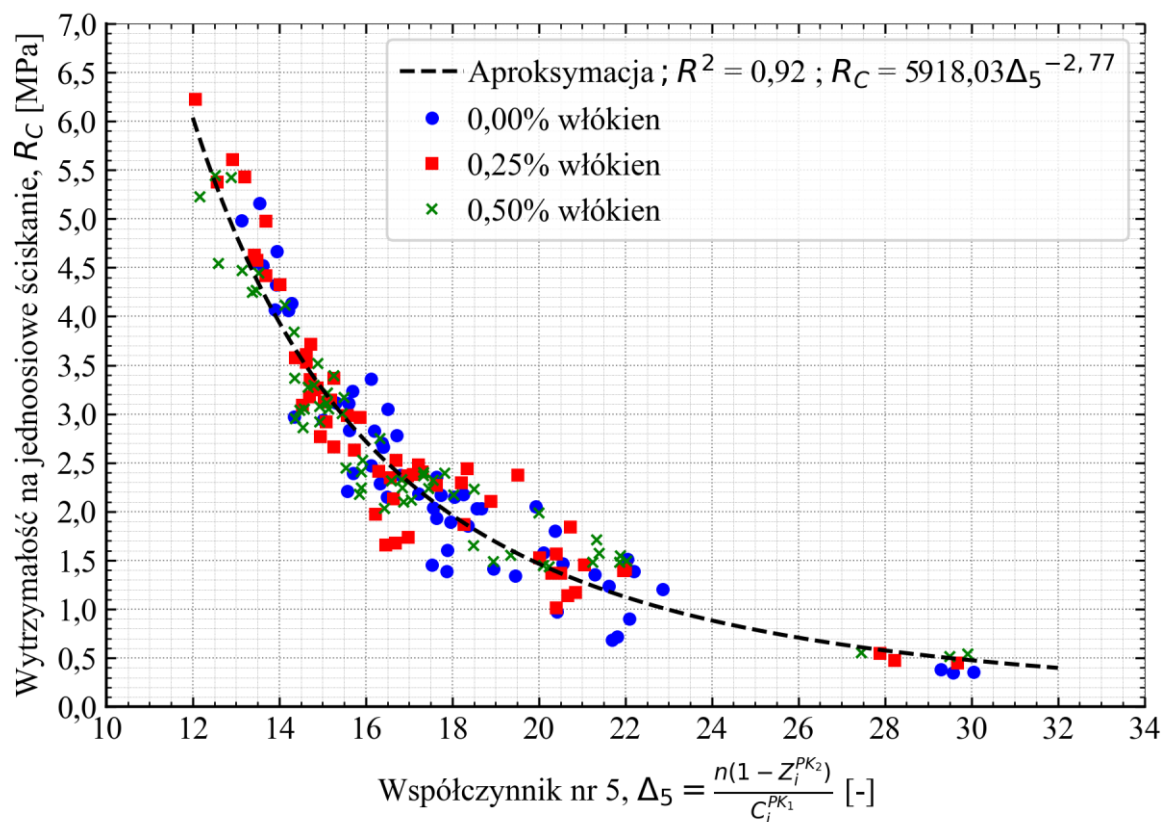
gdzie:

R_C – wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie,

Δ_5 – współczynnik nr 5.



Rys. 6.7 Wpływ parametru PK_2 na współczynnik determinacji.



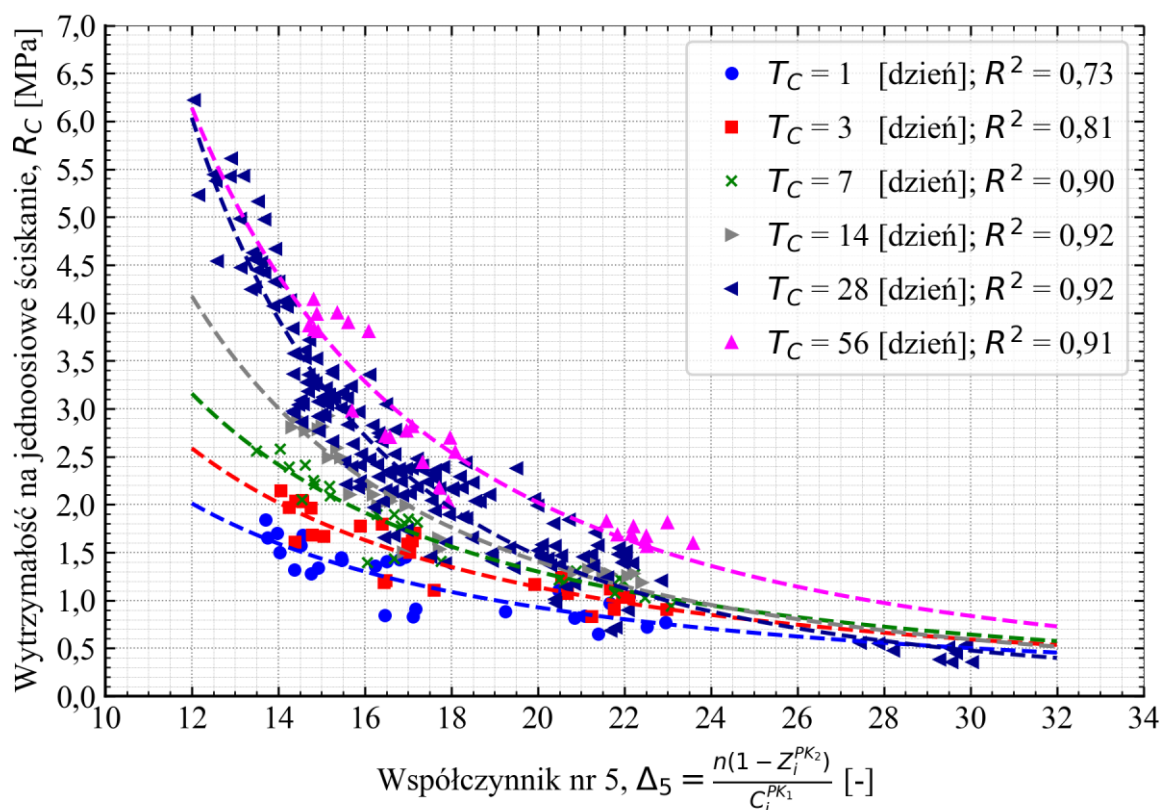
Rys. 6.8 Zależność pomiędzy Δ_5 a wytrzymałością na ściskanie cementogruntu.

6.2.5. Wpływ czasu utwardzania

Korzystając z wyznaczonego współczynnika Δ_5 , przeprowadzono analizę, na podstawie której wyznaczono dodatkowe zależności empiryczne pomiędzy wspomnianym współczynnikiem a wytrzymałością na ściskanie po 1, 3, 7, 14 i 56 dniach utwardzania. Wyznaczone zależności empiryczne zestawiono w tab. 6.6 oraz przedstawiono na rys. 6.9.

Tab. 6.6 Zależności pomiędzy Δ_5 a R_C przy różnym okresie pielęgnacji.

Okres pielęgnacji - T_C	Zależność empiryczna	R^2	Nr równania
1	$R_C = 87,22 \cdot \Delta_5^{-1,52}$	0,73	6.39
3	$R_C = 141,02 \cdot \Delta_5^{-1,61}$	0,81	6.40
7	$R_C = 237,20 \cdot \Delta_5^{-1,74}$	0,90	6.41
14	$R_C = 832,51 \cdot \Delta_5^{-2,13}$	0,92	6.42
28	$R_C = 5918,03 \cdot \Delta_5^{-2,77}$	0,92	6.38
56	$R_C = 1364,90 \cdot \Delta_5^{-2,17}$	0,91	6.43

Rys. 6.9 Zależność pomiędzy Δ_5 a wytrzymałością na ściskanie wg okresu pielęgnacji.

Analizując przedstawione zależności empiryczne, można dostrzec, że współczynnik determinacji rośnie wraz z okresem pielęgnacji, osiągając najwyższe wartości po 14 i 28 dniach utwardzania. Jednocześnie należy odnotować, że najniższe dopasowanie zależności empirycznych uzyskano po 1 i 3 dniach utwardzania. Związane jest to z wpływem włókien polipropylenowych na wytrzymałość na ściskanie cementogruntu w początkowym okresie pielęgnacji, co zostało opisane w rozdziale 5.2. W celu dostosowania współczynnika Δ_5 do okresu pielęgnacji wprowadzono do wzoru 6.37 współczynnik T_C i następny parametr kalibracyjny (PK_3). Aby dostosować parametr PK_3 przeprowadzono dodatkową analizę, podczas której wykorzystano wyniki badania nr 2. Kalibracja PK_3 została przeprowadzona zgodnie z poniższą procedurą:

1. wyznaczenie średniej wytrzymałości na ściskanie dla serii badań ($\bar{R}_C$),
2. wyznaczenie średniej wytrzymałości na ściskanie dla wszystkich serii o jednakowym czasie utwardzania ($\bar{R}_{CS}$),
3. wyznaczenie wartości znormalizowanej dla każdego okresu utwardzania ($R_{C\text{ Norm}} = \bar{R}_C / \bar{R}_{CS}$ dla $T_c = 1$),
4. wyznaczenie parametru Δ_5 na podstawie wyprowadzonego wzoru 6.44,
5. wyznaczenie wartości znormalizowanej parametru Δ_5 dla każdego okresu utwardzania ($\Delta_{5\text{ Norm}} = \Delta_5 / \Delta_5$ dla $T_c = 1$),
6. wyznaczenie zależności pomiędzy $\Delta_{5\text{ Norm}} = T_c^{PK_3}$ a T_c (rys. 6.10),
7. przyjęcie parametru PK_3 na podstawie wykładnika wyznaczonej funkcji potęgowej,
8. kalibracja parametru PK_3 dla pozostałych badań.

Na potrzeby procedury kalibracyjnej, wyprowadzono wzór 6.44 przekształcając równanie 6.38. Wyznaczone wartości podczas kalibracji zestawiono w tab. 6.7.

$$\Delta_5 = \left(\frac{R_{C\text{ Norm}}}{5918,03} \right)^{\left(\frac{1}{-2,77} \right)} \quad 6.44$$

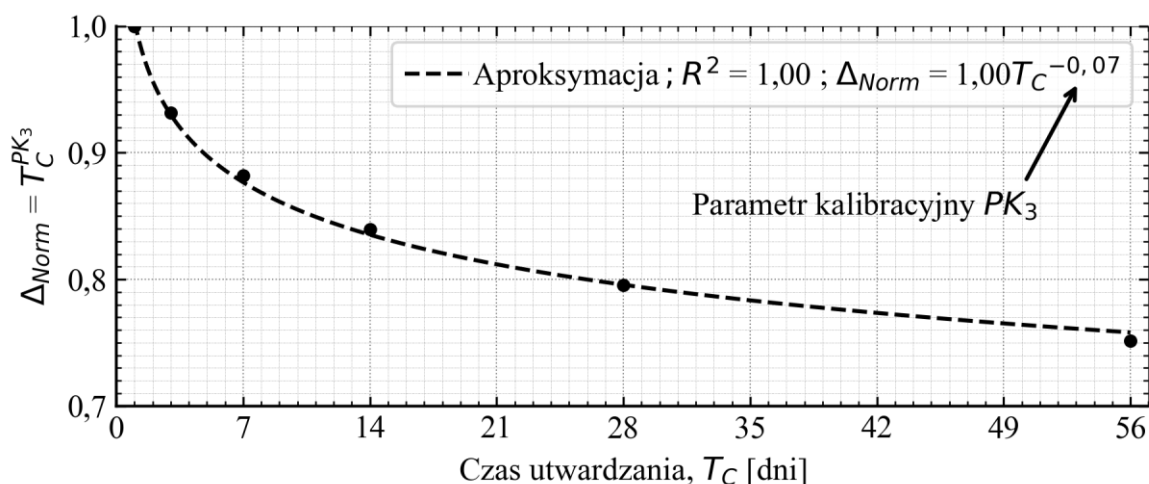
gdzie:

Δ_5 – współczynnik nr 5,

$R_{C\text{ Norm}}$ – znormalizowana wytrzymałość $\bar{R}_{CS}$ względem $T_c = 1$.

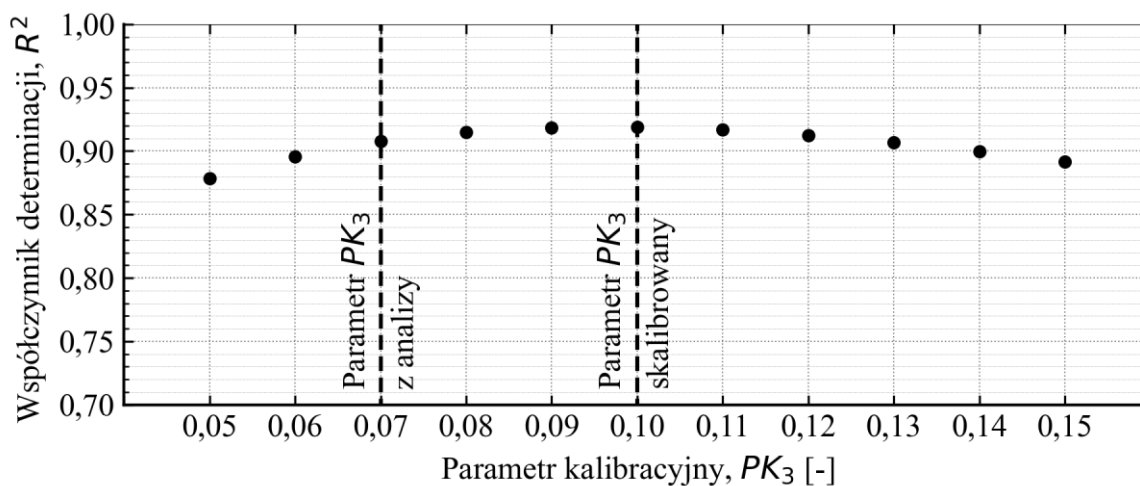
Tab. 6.7 Dane do analizy wpływu okresu pielęgnacji na wytrzymałość cementogruntu.

Rodzaj mieszanki	Okres pielęgnacji					
	$T_c = 1$	$T_c = 3$	$T_c = 7$	$T_c = 14$	$T_c = 28$	$T_c = 56$
C20	0,71	0,88	1,01	1,24	1,32	1,65
C21	0,86	1,16	1,41	1,56	1,90	2,21
C22	1,31	1,65	2,11	2,52	3,02	3,52
C40	0,84	1,04	1,20	1,27	1,39	1,65
C41	1,41	1,62	1,84	2,13	2,38	2,76
C42	1,59	2,01	2,51	2,88	3,50	4,01
C60	1,04	1,17	1,27	1,33	1,50	1,76
C61	1,43	1,71	1,83	2,00	2,35	2,65
C62	1,72	2,05	2,29	2,79	3,24	3,89
Wartości średnie i znormalizowane						
$\bar{R}_{CS}$	1,21	1,48	1,72	1,97	2,29	2,68
$R_{C\text{ Norm}}$	1,00	1,22	1,42	1,62	1,88	2,21
Δ_5	22,95	21,37	20,24	19,27	18,26	17,25
$\Delta_{5\text{ Norm}}$	1	0,93	0,88	0,84	0,80	0,75



Rys. 6.10 Zależność pomiędzy dzielnikiem wsp. Δ_5 a okresem pielęgnacji.

Na podstawie przeprowadzonej analizy wyznaczono parametr $PK_3 = -0,07$. Ze względu na umiejscowienie parametru kalibracyjnego w mianowniku przyjęto jego przeciwny znak, w związku z czym $PK_3 = 0,07$. Następnie w celu skalibrowania wyznaczonej wartości PK_3 dla pozostałych analizowanych próbek zbadano, jak parametr ten wpływa na wartość współczynnika determinacji, co przedstawiono na rys. 6.11. Do dalszej analizy przyjęto, że $PK_3 = 0,10$.



Rys. 6.11 Wpływ parametru PK_3 na współczynnik determinacji.

Na podstawie równania 6.38, wyznaczonego parametru kalibracyjnego oraz czasu utwardzania wyznaczono współczynnik Δ_6 , który został opisany wzorem 6.45. Następnie wyznaczono zależność empiryczną pomiędzy współczynnikiem Δ_6 a jednoosiową wytrzymałością na ściskanie cementogruntu. W celu zobrazowania wpływu kalibracji parametru PK_3 wyznaczono zależności empiryczne zarówno dla $PK_3 = 0,07$, jak i dla $PK_3 = 0,10$, co przedstawiono odpowiednio na rys. 6.12 i rys. 6.13. W wyniku

przeprowadzonej dodatkowej kalibracji współczynnik determinacji wzrósł z 0,91 do 0,92. Równaniem 6.46 zapisano zależność empiryczną dla $PK_3 = 0,07$. Następnie zależność empiryczną wyznaczoną przy $PK_3 = 0,10$ opisano równaniem 6.47.

$$\Delta_6 = \frac{n(1 - Z_i^{PK_2})}{T_c^{PK_3} C_i^{PK_1}} \quad 6.45$$

gdzie:

Δ_6 – współczynnik nr 6,

n – porowatość,

C_i, Z_i – indeks: cementu, zbrojenia,

T_c – czas utwardzania,

PK_1, PK_2, PK_3 – parametr kalibracyjny nr 1, 2, 3.

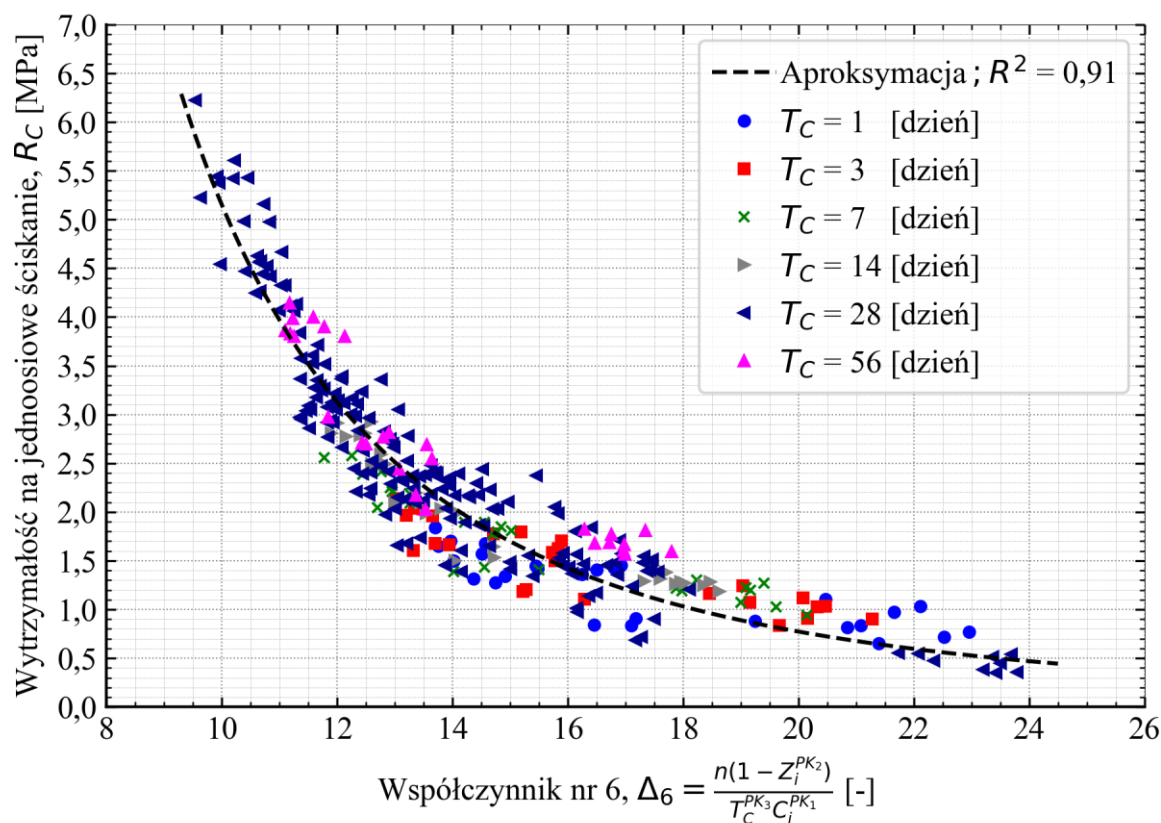
$$R_c = 2820,70 \cdot \Delta_6 (PK_3 = 0,07)^{-2,74} \quad 6.46$$

$$R_c = 1451,82 \cdot \Delta_6 (PK_3 = 0,10)^{-2,57} \quad 6.47$$

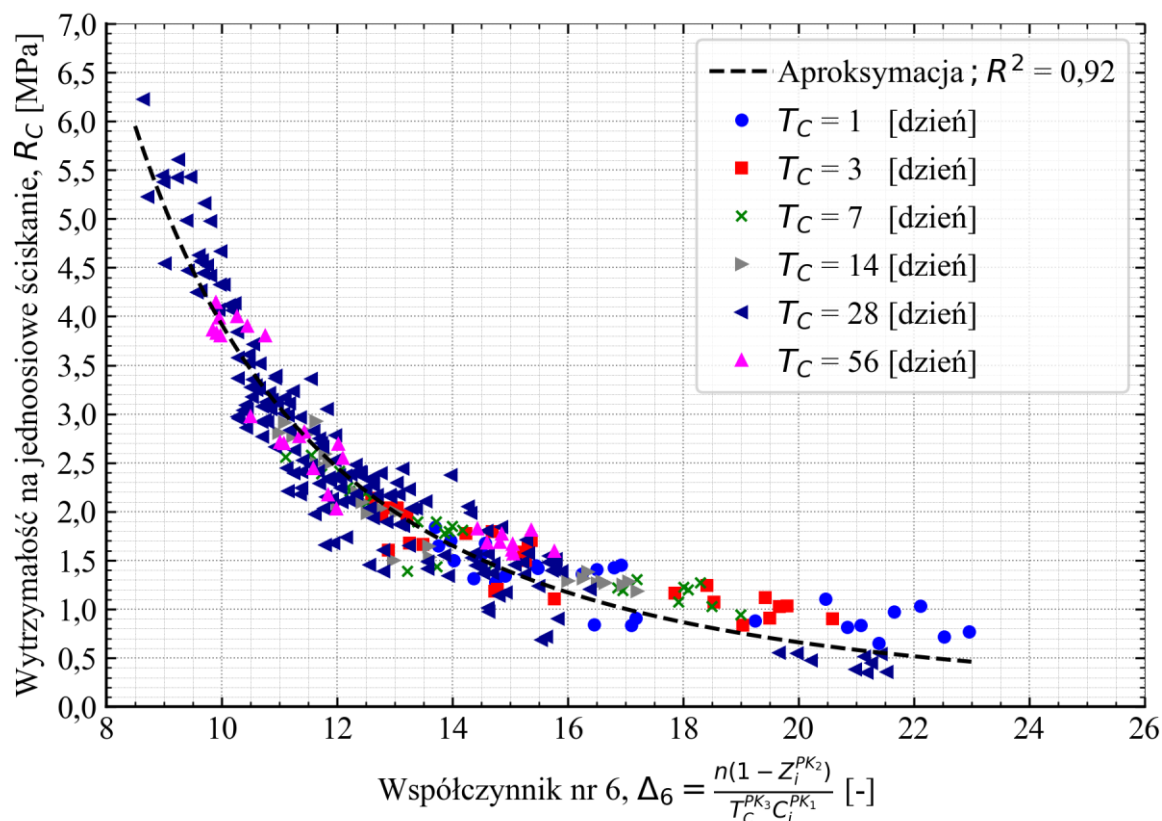
gdzie:

R_c – wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie,

Δ_6 – współczynnik nr 6.



Rys. 6.12 Zależność pomiędzy Δ_6 a R_c , $PK_3 = 0,07$.



Rys. 6.13 Zależność pomiędzy Δ_6 a R_C , $PK_3 = 0,10$.

6.2.6. Wpływ odporności na działanie wody

Odporność na działanie wody (I) jest następnym czynnikiem, który należy uwzględnić podczas określania wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie cementogruntu. Jednak ze względu na niejednoznaczne wyniki dotyczące wpływu włókien polipropylenowych na odporność na działanie wody, zdecydowano się na uwzględnienie jedynie współczynnika I , rezygnując z dodatkowej analizy wpływu zbrojenia rozproszonego. Przy takim założeniu, wpływ ten może zostać określony na dwa sposoby:

1. wyznaczenie wytrzymałości na ściskanie po pielęgnacji w środowisku wodnym z zależności: $R_{Ci} = R_C \cdot I$.
2. włączenie odporności na działanie wody do wyznaczonego wzoru 6.45.

Sposób pierwszy jest sposobem bezpośrednim i zarazem najdokładniejszym. Drugi sposób może być obarczony pewną niedokładnością wynikającą z dopasowania zależności empirycznej. Jednak włączenie odporności na działanie wody do równania pozwoli na zbadanie jej wpływu na ogólną postać wzoru, co może stanowić wstęp do dalszych badań. Ponadto włączenie odporności na działanie wody może zostać pominięte, poprzez przyjęcie wartości $I = 1$. W związku z tym zastosowanie podejścia drugiego nie wyklucza podejścia

pierwszego. Dlatego też podjęto decyzje o zbadaniu wpływu odporności na działanie wody na ogólną postać wzoru i zależności empiryczne. Należy jednak podkreślić, że niezależnie od zastosowanego sposobu, odporność na działanie wody ostatecznie powinna zostać określona na podstawie badań laboratoryjnych.

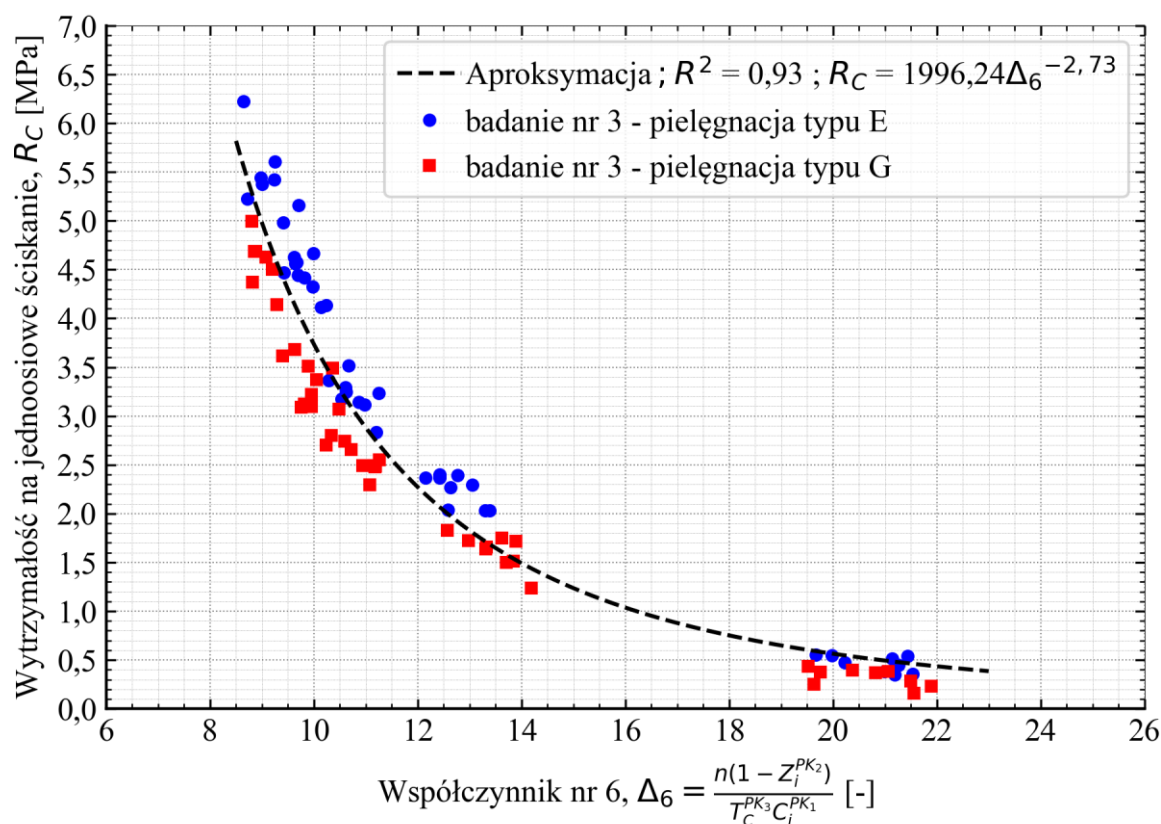
Zastosowanie podejścia drugiego w przeciwieństwie do pierwszego wymagało przeprowadzenie dodatkowej analizy. Została ona przeprowadzona na podstawie badania nr 3, czyli na próbkach po 28 dniach pielęgnacji typu E i G. W pierwszej kolejności zbadano zależność empiryczną pomiędzy wyznaczonym współczynnikiem Δ_6 a wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie, co zostało zaprezentowane na rys. 6.14. Wyznaczona zależność empiryczna charakteryzowała się wysokim współczynnikiem determinacji, który wynosił 0,93. Zależność ta została zapisana przy pomocy równania 6.48.

$$R_C = 1996,24 \cdot \Delta_6^{-2,73} \quad 6.48$$

gdzie:

R_C – wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie,

Δ_6 – współczynnik nr 6.



Rys. 6.14 Zależność pomiędzy Δ_6 a wytrzymałością po pielęgnacji typu E i G.

Następnie w celu uwzględnienia odporności na działanie wody zmodyfikowano współczynnik Δ_6 . Dokonano tego poprzez wprowadzenie do niego I oraz kolejnego parametru kalibracyjnego (PK_4), co zostało opisane wzorem 6.49. W celu wstępnego doboru parametru PK_4 przeprowadzono analizę, podczas której zbadano wpływ I na mnożnik I^{PK_4} . Na tej podstawie ustalono, że $PK_4 = -0,35$, co zostało przedstawione na rys. 6.15. Po zbadaniu opisywanej zależności przystąpiono do dodatkowej kalibracji PK_4 .

$$\Delta_7 = \frac{n(1 - Z_i^{PK_2}) I^{PK_4}}{T_c^{PK_3} C_i^{PK_1}} \quad 6.49$$

gdzie:

Δ_7 – współczynnik nr 7,

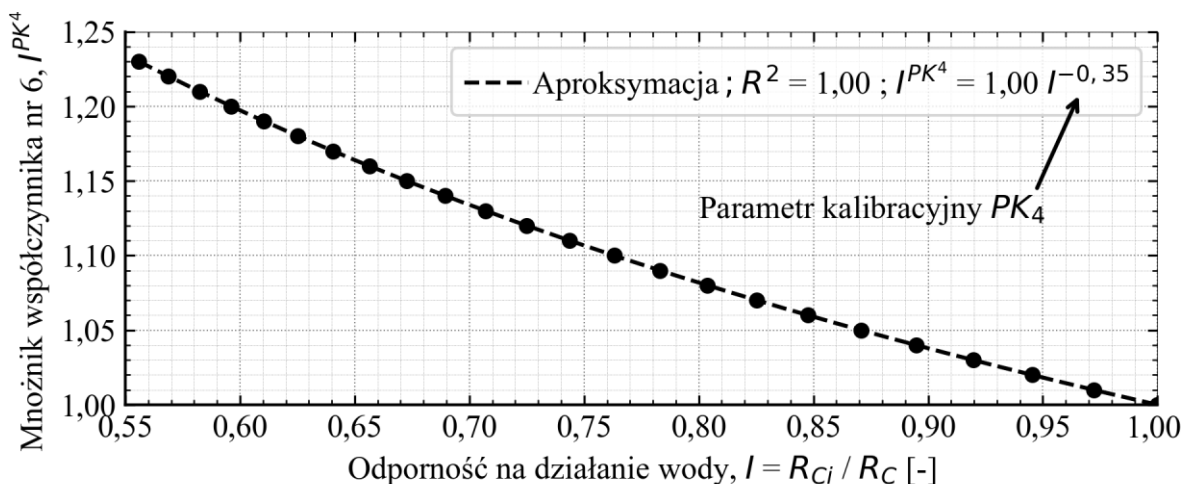
n – porowatość,

C_i, Z_i – indeks: cementu, zbrojenia,

T_c – czas utwardzania,

I – odporność na działanie wody,

PK_1, PK_2, PK_3, PK_4 – parametr kalibracyjny nr 1, 2, 3, 4.



Rys. 6.15 Zależność pomiędzy I na mnożnikiem I^{PK_4} .

Podczas kalibracji parametru PK_4 wykorzystano dostępne dane z wszystkich trzech badań. Sam proces kalibracji polegał na zbadaniu wpływu parametru PK_4 na uzyskiwane wartości współczynnika determinacji, co pozwoliło na identyfikację optymalnego rozwiązania. Na podstawie przeprowadzonej analizy ustalono, że parametr $PK_4 = -0,27$. Wpływ parametru PK_4 na współczynnik determinacji przedstawiono na rys. 6.16. Następnie przeprowadzono weryfikację wyznaczonego współczynnika Δ_7 i parametru PK_4 . W tym celu powtórnie wykorzystano dane z badania nr 3. Podczas weryfikacji wyznaczono nową

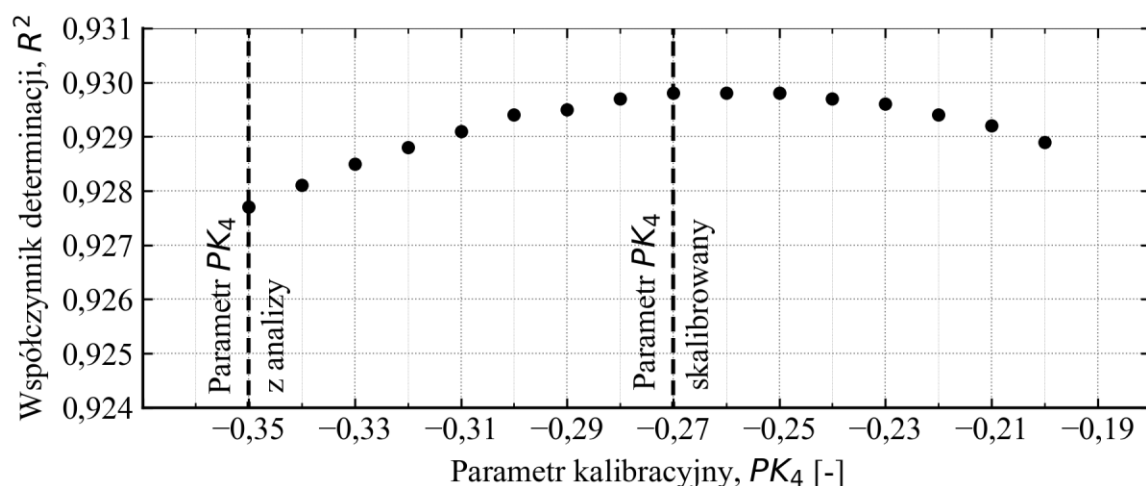
zależność empiryczną pomiędzy wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie a współczynnikiem Δ_7 , którą zapisano równaniem 6.50. Zależność ta charakteryzowała się wysokim współczynnikiem determinacji, który wynosił 0,98, co pokazane na rys. 6.17.

$$R_C = 1870,73 \cdot \Delta_7^{-2,66} \quad 6.50$$

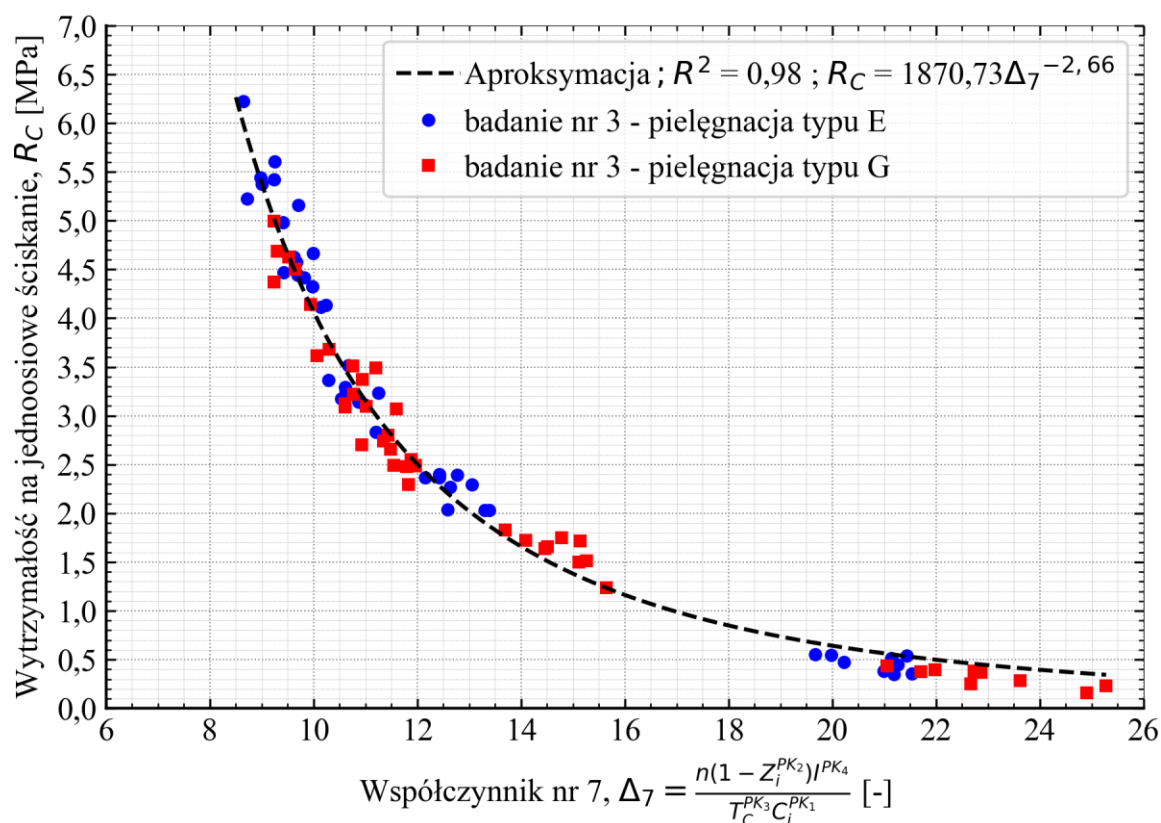
gdzie:

R_C – wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie,

Δ_7 – współczynnik nr 7,



Rys. 6.16 Wpływ parametru PK_4 na współczynnik determinacji.



Rys. 6.17 Zależność pomiędzy Δ_7 a wytrzymałością po pielęgnacji typu E i G.

6.2.7. Końcowe zależności empiryczne

Wszystkie przeprowadzone analizy we wcześniejszych częściach rozdziału miały za zadanie stopniowe włączanie poszczególnych faz badanego materiału, czasu jego utwardzania i odporności na działanie wody do analizowanego współczynnika Δ_i . Na podstawie opracowanego współczynnika Δ_7 wyznaczono zależności empiryczne do określania wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie gruntu stabilizowanego z dodatkiem włókien polipropylenowych. Zależności te zostały opisane przy pomocy funkcji potęgowej zgodnie z równaniem 6.51. Wykorzystując algorytm Levenberga – Marquardta przeprowadzono optymalizację parametrów α i β . W przeprowadzonych obliczeniach wykorzystano bibliotekę SciPy, będącą częścią ekosystemu języka Python.

$$\hat{R}_C = \beta \left[\frac{n (1 - Z_i^{PK_2}) I^{PK_4}}{T_C^{PK_3} C_i^{PK_1}} \right]^\alpha \quad 6.51$$

gdzie:

$\hat{R}_C$ – obliczona wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie, zależność końcowa,

β – współczynnik skalujący zależność empiryczną,

α – wykładnik zależności empirycznej,

n – porowatość,

C_i, Z_i – indeks: cementu, zbrojenia,

T_C – czas utwardzania,

I – odporność na działanie wody,

PK_1, PK_2, PK_3, PK_4 – parametry kalibracyjne: 0,41; 0,53; 0,10; -0,27.

Podczas przeprowadzonej analizy wyznaczono trzy końcowe zależności empiryczne. Pierwsza zależność empiryczna została określona na podstawie wszystkich przebadanych serii w ramach pierwszego etapu badań. Zależność nr 1 została zdefiniowana równaniem 6.52, co widać na rys. 6.18 i charakteryzowała się najwyższym współczynnikiem determinacji wynoszącym $R^2 = 0,93$. Druga zależność empiryczna nie uwzględnia mieszanek C10, C11 i C12, czyli wszystkich próbek zawierających 1% cementu. Decyzja o wykluczeniu wymienionych mieszanek została podjęta na podstawie badania nr 3. Druga zależność empiryczna została opisana równaniem 6.53 i przedstawiona na rys. 6.19. Trzecia zależność empiryczna, analogicznie jak zależność nr 2, nie uwzględnia próbek z 1% spoiwa oraz dodatkowo próbek pielęgnowanych w środowisku wodnym. Zależność tą zapisano równaniem 6.54 i przedstawiono na rys. 6.20. Następnie dla drugiej i trzeciej zależności

empirycznej przeprowadzono analizę parametrów kalibracyjnych, podczas której ustalono, że wyznaczone parametry kalibracyjne są parametrami pozwalającymi osiągnąć najwyższe wartości R^2 , które wynosiły: dla zależności nr 2 $R^2 = 0,92$ oraz dla zależności nr 3 $R^2 = 0,91$.

$$\hat{R}_{C \text{ nr } 1} = 1436,96 \left[\frac{n (1 - Z_i^{0,53}) I^{-0,27}}{T_C^{0,10} C_i^{0,41}} \right]^{-2,56} \quad 6.52$$

$$\hat{R}_{C \text{ nr } 2} = 1367,88 \left[\frac{n (1 - Z_i^{0,53}) I^{-0,27}}{T_C^{0,10} C_i^{0,41}} \right]^{-2,54} \quad 6.53$$

$$\hat{R}_{C \text{ nr } 3} = 1412,07 \left[\frac{n (1 - Z_i^{0,53}) I^{-0,27}}{T_C^{0,10} C_i^{0,41}} \right]^{-2,56} \quad 6.54$$

gdzie:

$\hat{R}_{C \text{ nr } 1}$ – obliczona wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie, zależność empiryczna nr 1,

$\hat{R}_{C \text{ nr } 2}$ – obliczona wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie, zależność empiryczna nr 2,

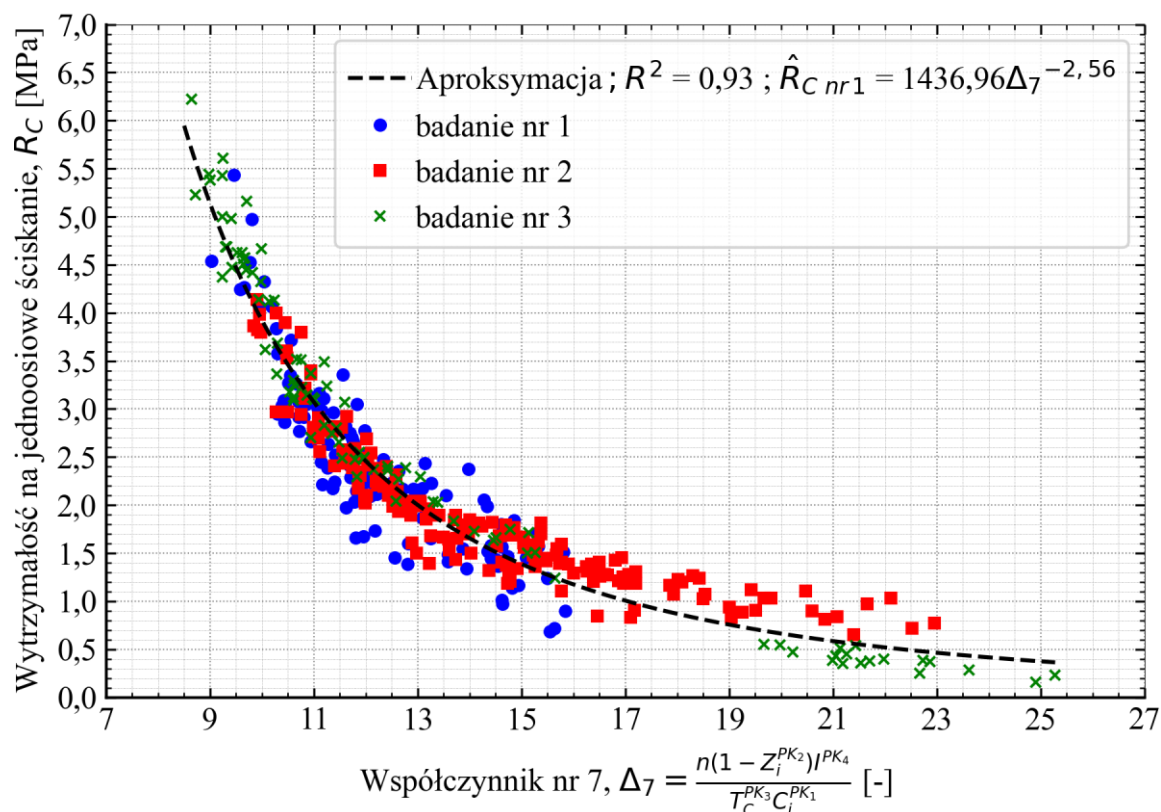
$\hat{R}_{C \text{ nr } 3}$ – obliczona wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie, zależność empiryczna nr 3,

n – porowatość,

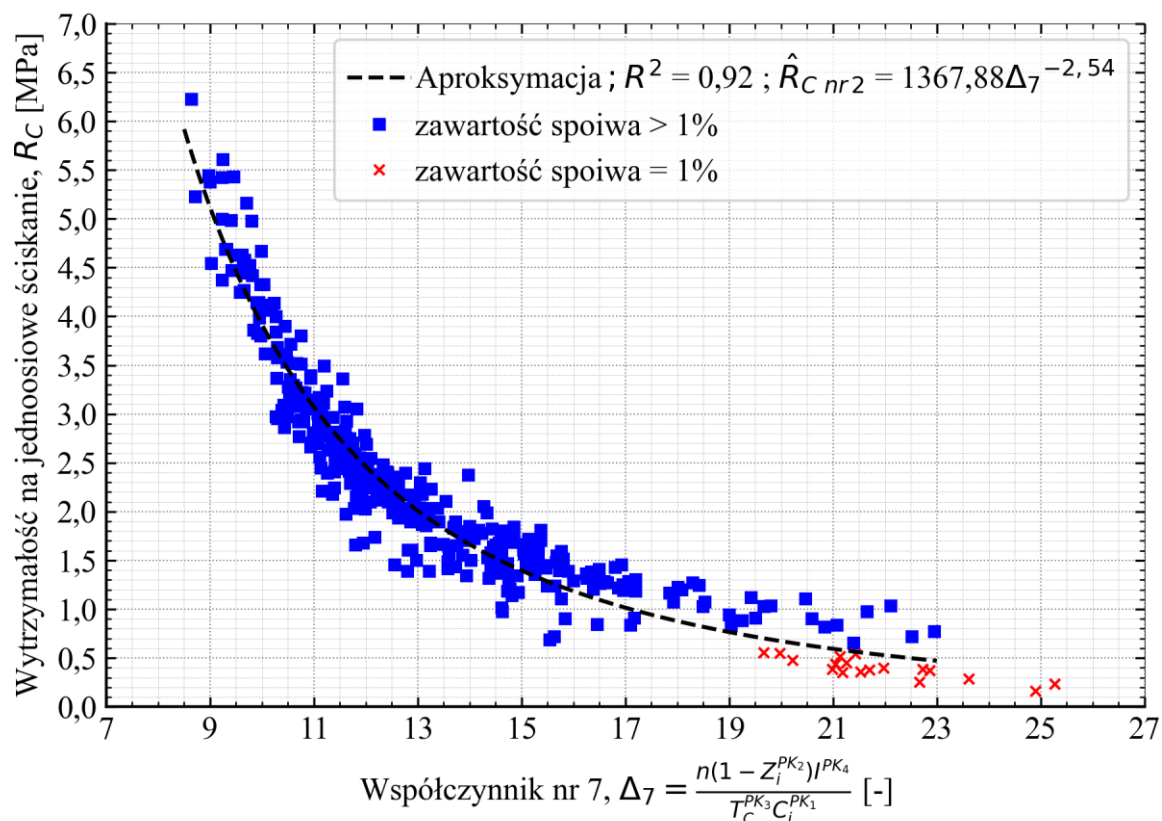
C_i, Z_i – indeks: cementu, zbrojenia,

T_C – czas utwardzania,

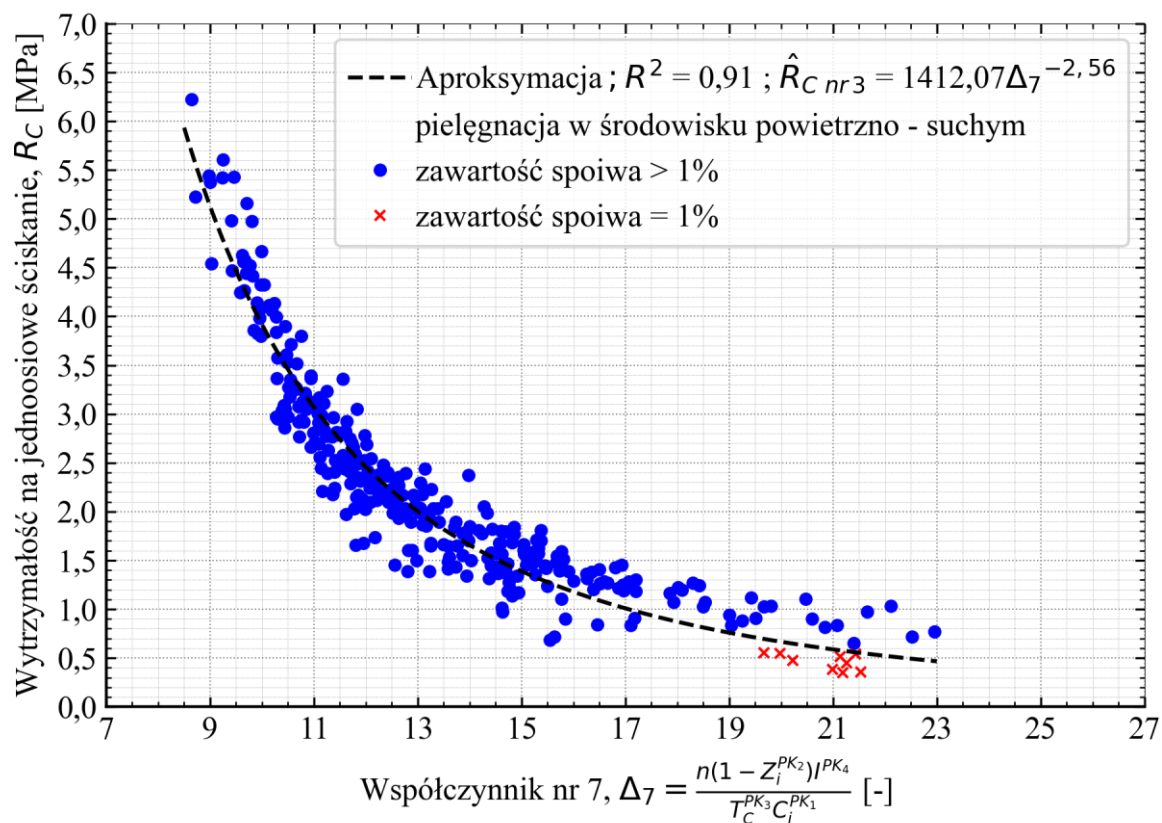
I – odporność na działanie wody.



Rys. 6.18 Zależność empiryczna nr 1 do szacowania wytrzymałości cementogruntu.



Rys. 6.19 Zależność empiryczna nr 2 do szacowania wytrzymałości cementogruntu.



Rys. 6.20 Zależność empiryczna nr 3 do szacowania wytrzymałości cementogruntu.

6.3. Analiza statystyczna

Pomiary przeprowadzane w warunkach laboratoryjnych obarczone są pewnym błędem wynikającym z niedokładności aparatury badawczej czy też czynników ludzkich. W związku z powyższym przeprowadzono ocenę statystyczną wyznaczonych zależności empirycznych. Do tego celu posłużono się podstawowymi miarami statystyki opisowej, miarami błędów względnych i bezwzględnych. W celu usystematyzowania analizy wydzielono cztery etapy:

1. opis statystyczny zmierzonych wartości,
2. ocena zależności empirycznych miarami bezwzględnymi i względnymi,
3. analiza reszt zależności empirycznych,
4. analiza korelacji poszczególnych czynników.

6.3.1. Opis statystyczny zmierzonych wartości

Na potrzeby analizy statystycznej, zmierzonych wartości parametrów mechanicznych, w pierwszej kolejności podzielono cały analizowany zbiór na poszczególne serie w zależności od numeru badania. Podziału dokonano na podstawie numeru badania, rodzaju pielęgnacji oraz ilości cementu i włókien, łącznie wydzielono 93 podzbiory. Każdy wyszczególniony podzbiór został opisany przy pomocy wybranych i opisanych miar. Następnie przeprowadzono analizę zbiorczą dla wszystkich wcześniej opisanych podzbiorów. Podczas analizy dokonano weryfikacji rozkładu prawdopodobieństwa, gdzie zbadano czy wykorzystane zbiory odzwierciedlały rozkład normalny.

Dla wszystkich analizowanych zbiorów i podzbiorów wyznaczono wartość średnią ($\overline{R_c}$) medianę (M) i trzy miary opisujące zmienność pomiarów. W pierwszej kolejności wyznaczono najprostszą miarę rozproszenia, czyli rozstęp (r). Parametr ten jest różnicą między wartością maksymalną a minimalną rozpatrywanego zbioru. Dlatego też parametr ten informuje jedynie o zakresie obserwacji zbioru.

$$r = \max(R_c) - \min(R_c) \quad 6.55$$

gdzie:

r – rozstęp,

$\max(R_c)$ – największa zmierzona wartość wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie,

$\min(R_c)$ – najmniejsza zmierzona wartość wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie.

Następną wyznaczoną podstawową miarą zmienności wytrzymałości na ściskanie było odchylenie standardowe S , które informuje o tym, jak bardzo zmierzone wartości są rozrzucone wokół wartości średniej. Wraz ze wzrostem odchylenia standardowego pomiary oddalają się od średniej arytmetycznej, natomiast przy jego spadku zbliżają się do niej.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^N (R_{C,t} - \bar{R}_C)^2}{N - 1}} \quad 6.56$$

gdzie:

S – odchylenie standardowe,

$R_{C,t}$ – kolejna zaobserwowana wartość wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie,

$\bar{R}_C$ – średnia arytmetyczna zmierzonych wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie,

N – liczba obserwacji.

Ostatnią badaną miarą zmienności pomiarów jest wariancja W . Parametr ten informuje o tym, jak duże jest zróżnicowanie wyników w analizowanym zbiorze. Wyznacza się go poprzez podniesienie odchylenia standardowego do kwadratu, co eliminuje wszystkie wartości ujemne. Dlatego też wariancja jest równa lub większa od 0.

$$W = \frac{\sum_{t=1}^N (R_{C,t} - \bar{R}_C)^2}{N - 1} \quad 6.57$$

gdzie:

W – wariancja,

$R_{C,t}$ – kolejna zaobserwowana wartość wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie,

$\bar{R}_C$ – średnia arytmetyczna zmierzonych wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie,

N – liczba obserwacji.

Na podstawie przeprowadzonej analizy statystycznej dla badania nr 1 można dostrzec, że wraz ze wzrostem zawartości włókien maleje wyznaczony rozstęp. Jest to spowodowane większą wytrzymałością próbek z włóknami niż bez nich przy podwyższonej wilgotności, co zostało opisane w rozdziale 5.2. Natomiast wysokie wartości odchylenia standardowego i wariancji należy uznać za nieistotne z uwagi na zmienną wilgotność próbek podczas badania. W związku z tym z badania pierwszego nie wykluczono żadnej próbki podczas analizy. W tab. 6.8 zestawiono opisane parametry statystyczne.

Tab. 6.8 Statystyczne parametry dla badania nr 1.

Seria	pielęgnacja	N	$\bar{R}_C$	M	S	r	W
C305	E	12	1,368	1,402	0,489	1,467	0,239
C315	E	12	1,654	1,545	0,474	1,423	0,225
C325	E	12	1,737	1,611	0,301	0,793	0,091
C505	E	12	2,192	2,177	0,651	1,971	0,423
C515	E	12	2,420	2,446	0,626	1,917	0,392
C525	E	12	2,460	2,286	0,369	1,016	0,136
C705	E	12	2,435	2,683	0,817	2,376	0,667
C715	E	12	3,538	3,131	0,902	2,772	0,814
C725	E	12	3,402	3,120	0,650	2,017	0,423

Na podstawie analizy zestawionych serii badań w tab. 6.9 i tab. 6.10 stwierdzono, że podczas badania nr 2 osiągnięto wysokie skupienie obserwacji, co znajduje potwierdzenie w niskich miarach odchylenia standardowego i wariancji. Największy rozrzut pomiarów odnotowano w serii C606 gdzie: $S = 0,479$ i $W = 0,229$. Jednak w żadnej z analizowanych serii, zmierzona wytrzymałość nie odbiegała o 20% od wartości średnich, w związku z czym nie wykluczono żadnej próbki z analizy.

Tab. 6.9 Statystyczne parametry dla badania nr 2, część 1.

Seria	pielęgnacja	N	$\bar{R}_C$	M	S	r	W
C201	A	3	0,714	0,720	0,059	0,117	0,003
C202	B	3	0,880	0,902	0,041	0,073	0,002
C203	C	3	1,010	1,023	0,066	0,130	0,004
C204	D	3	1,238	1,249	0,048	0,095	0,002
C205	E	3	1,317	1,358	0,096	0,179	0,009
C206	F	3	1,654	1,591	0,136	0,249	0,018
C211	A	3	0,844	0,835	0,035	0,069	0,001
C212	B	3	1,044	1,030	0,025	0,044	0,001
C213	C	3	1,200	1,200	0,013	0,027	0,000
C214	D	3	1,274	1,270	0,000	0,029	0,000
C215	E	3	1,390	1,395	0,018	0,036	0,000
C216	F	3	1,652	1,666	0,042	0,081	0,002
C221	A	3	1,038	1,035	0,066	0,132	0,004
C222	B	3	1,174	1,164	0,063	0,125	0,004
C223	C	3	1,266	1,269	0,040	0,080	0,002
C224	D	3	1,327	1,316	0,052	0,101	0,003
C225	E	3	1,502	1,480	0,039	0,068	0,002
C226	F	3	1,756	1,770	0,071	0,139	0,005

Tab. 6.10 Statystyczne parametry dla badania nr 2, część 2.

Seria	pielęgnacja	N	$\bar{R}_C$	M	S	r	W
C401	A	3	0,861	0,842	0,041	0,075	0,002
C402	B	3	1,165	1,187	0,053	0,098	0,003
C403	C	3	1,410	1,404	0,022	0,043	0,000
C404	D	3	1,560	1,530	0,076	0,144	0,006
C405	E	3	1,895	1,895	0,039	0,078	0,002
C406	F	3	2,210	2,172	0,210	0,414	0,044
C411	A	3	1,408	1,420	0,045	0,087	0,002
C412	B	3	1,621	1,588	0,142	0,278	0,020
C413	C	3	1,840	1,848	0,060	0,118	0,004
C414	D	3	2,132	2,101	0,056	0,096	0,003
C415	E	3	2,378	2,380	0,028	0,055	0,001
C416	F	3	2,757	2,768	0,061	0,121	0,004
C421	A	3	1,428	1,427	0,022	0,043	0,000
C422	B	3	1,707	1,703	0,086	0,171	0,007
C423	C	3	1,833	1,811	0,053	0,099	0,003
C424	D	3	2,004	1,991	0,025	0,045	0,001
C425	E	3	2,346	2,318	0,054	0,097	0,003
C426	F	3	2,650	2,698	0,094	0,169	0,009
C601	A	3	1,313	1,318	0,032	0,063	0,001
C602	B	3	1,650	1,655	0,040	0,075	0,002
C603	C	3	2,108	2,090	0,073	0,143	0,005
C604	D	3	2,524	2,491	0,056	0,097	0,003
C605	E	3	3,016	2,972	0,103	0,192	0,011
C606	F	3	3,524	3,800	0,479	0,829	0,229
C611	A	3	1,591	1,574	0,102	0,203	0,011
C612	B	3	2,010	2,031	0,043	0,078	0,002
C613	C	3	2,507	2,558	0,103	0,186	0,011
C614	D	3	2,880	2,909	0,062	0,114	0,004
C615	E	3	3,501	3,530	0,124	0,242	0,015
C616	F	3	4,011	3,999	0,122	0,243	0,015
C621	A	3	1,724	1,678	0,105	0,193	0,011
C622	B	3	2,049	2,041	0,087	0,173	0,008
C623	C	3	2,289	2,247	0,109	0,207	0,012
C624	D	3	2,789	2,784	0,018	0,034	0,000
C625	E	3	3,239	3,215	0,145	0,287	0,021
C626	F	3	3,890	3,862	0,082	0,156	0,007

W badaniu nr 3 największe rozproszenie danych pomiarowych uzyskano w serii C915, dla której wyznaczone miary rozproszenia wynoszą odpowiednio: $r = 0,845$, $S = 0,437$ i $W = 0,191$. Również i w tym przypadku należy uznać,

że rozproszenie danych było bardzo małe. Dlatego też podczas analizy nie zaistniała konieczność wykluczenia badanych próbek. Wszystkie wyznaczone parametry zestawiono w tab. 6.11. Biorąc pod uwagę zaprezentowane miary rozrzutu danych oraz fakt, iż nie zaistniała konieczność wykluczenia żadnej analizowanej próbki, należy uznać, że zarówno procedura sporządzania, jak i pielęgnacji próbek oraz zastosowana technika badawcza jest właściwa. W związku z powyższym dalszą analizę przeprowadzono na zbiorze złożonym z powyższych podzbiorów o łącznej liczbie obserwacji $N = 360$.

Tab. 6.11 Statystyczne parametry dla badania nr 3.

Seria	pielęgnacja	N	$\bar{R}_C$	M	S	r	W
C105	E	3	0,365	0,357	0,017	0,032	0,000
C305	E	3	2,034	2,034	0,005	0,010	0,000
C505	E	3	3,061	3,117	0,208	0,404	0,043
C705	E	3	4,373	4,324	0,270	0,533	0,073
C905	E	3	4,901	4,980	0,307	0,598	0,094
C115	E	3	0,489	0,472	0,050	0,096	0,003
C315	E	3	2,310	2,292	0,051	0,097	0,003
C515	E	3	3,190	3,177	0,053	0,104	0,003
C715	E	3	4,540	4,574	0,107	0,205	0,011
C915	E	3	5,736	5,609	0,437	0,845	0,191
C125	E	3	0,535	0,539	0,022	0,043	0,000
C325	E	3	2,385	2,391	0,019	0,037	0,000
C525	E	3	3,393	3,364	0,115	0,225	0,013
C725	E	3	4,343	4,446	0,198	0,354	0,039
C925	E	3	5,364	5,424	0,120	0,217	0,014
C105	G	3	0,214	0,232	0,049	0,093	0,002
C305	G	3	1,417	1,501	0,154	0,271	0,024
C505	G	3	2,505	2,489	0,040	0,074	0,002
C705	G	3	3,279	3,224	0,189	0,365	0,036
C905	G	3	3,813	3,683	0,286	0,527	0,082
C115	G	3	0,345	0,370	0,051	0,092	0,003
C315	G	3	1,702	1,725	0,059	0,110	0,003
C515	G	3	2,496	2,485	0,204	0,407	0,041
C715	G	3	3,325	3,370	0,213	0,419	0,046
C915	G	3	4,790	4,686	0,180	0,313	0,033
C125	G	3	0,404	0,395	0,025	0,047	0,001
C325	G	3	1,734	1,714	0,088	0,173	0,008
C525	G	3	2,631	2,656	0,128	0,253	0,016
C725	G	3	2,989	3,069	0,164	0,297	0,027
C925	G	3	4,500	4,503	0,129	0,259	0,017

Podczas przeprowadzanej analizy połączonych podzbiorów wyznaczono dodatkowo parametry takie jak: skośność SK i kurtozę K , które są miarami opisującymi kształt i symetrię rozkładu co zostało zapisane odpowiednio wzorami 6.58 i 6.59. Parametr skośności jest miarą asymetrii danych w zbiorze, czyli parametr informuje o tym, jak kształtują się pomiary wokół wartości średniej. Jeśli większość obserwacji jest większa od wartości średniej, wówczas asymetria przyjmuje wartość ujemną $SK < 0$ i nazywana jest asymetrią lewostronną. W przypadku, kiedy większość obserwacji jest mniejsza od wartości średniej, mowa jest o asymetrii prawostronnej, wtedy asymetria ma wartość dodatnią $SK > 0$. Natomiast jeśli miara skośności równa jest 0, oznacza to, że mamy do czynienia z rozkładem symetrycznym.

$$SK = \frac{N \sum_{t=1}^N (R_{C,t} - \bar{R}_C)^3}{(N-1)(N-2)S^3} \quad 6.58$$

gdzie:

SK – skośność,

$R_{C,t}$ – kolejna zaobserwowana wartość wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie,

$\bar{R}_C$ – średnia arytmetyczna zmierzonych wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie,

N – liczba obserwacji,

S – odchylenie standardowe.

Kurtoza jest określana jako miara koncentracji wyników, czyli informuje, jak dużo obserwacji jest zbliżonych do wartości średniej. Jeśli kurtoza przyjmuje wartość $K > 0$ wówczas rozkład jest leptokurtyczny, czyli bardziej spiczasty. Natomiast kiedy rozkład jest bardziej płaski wówczas $K < 0$ a rozkład nazywany jest platykurtycznym. W przypadku rozkładu normalnego kurtoza równa jest 0.

$$K = \frac{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (R_{C,t} - \bar{R}_C)^4}{S^4} \quad 6.59$$

gdzie:

K – kurtoza,

$R_{C,t}$ – kolejna zaobserwowana wartość wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie,

$\bar{R}_C$ – średnia arytmetyczna zmierzonych wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie,

N – liczba obserwacji,

S – odchylenie standardowe.

Opisane do tej pory miary statystyczne opierają się na założeniu, że badane zmienne są zgodne z rozkładem normalnym. Dlatego też przed wyznaczeniem opisanych miar przeprowadzono analizę zbioru, w skład którego wchodziły wszystkie analizowane próbki. W celu sprawdzenia normalności rozkładu powszechnie przeprowadza się następujące testy:

1. test Kołmogorowa – Smirnowa ($K-S$),
2. test Lillieforsa,
3. test D’Agostino – Pearsona,
4. test Shapiro – Wilka ($S-W$).

Mając na uwadze stosunkowo niewielki zbiór danych, do analizy normalności rozkładu wytrzymałości na ściskanie cementogruntu wybrano test Shapiro – Wilka. Test ten jest powszechnie wykonywany przy mniejszych próbach oraz dodatkowo charakteryzuje się dużą mocą statystyczną podczas wykrywania odstępstw od normalności rozkładu.

Na potrzeby przeprowadzonego testu normalności rozkładu $S-W$ przyjęto hipotezę zerową (H_0) i hipotezę alternatywną (H_1) oraz ustalono poziom istotności statystycznej (α_{stat}) na poziomie 5%. Wynikiem testu jest statystyka testowa (W) oraz wartość prawdopodobieństwa (p), na podstawie której dokonano weryfikacji przyjętych hipotez:

H_0 : badana zmienna ma rozkład normalny,

H_1 : badana zmienna ma rozkład inny niż normalny.

Na podstawie wyznaczonej wartości p i przyjętej wartości α_{stat} weryfikuje się hipotezę:

Jeżeli $p < \alpha$ wówczas należy odrzucić H_0 i przyjąć H_1 ,

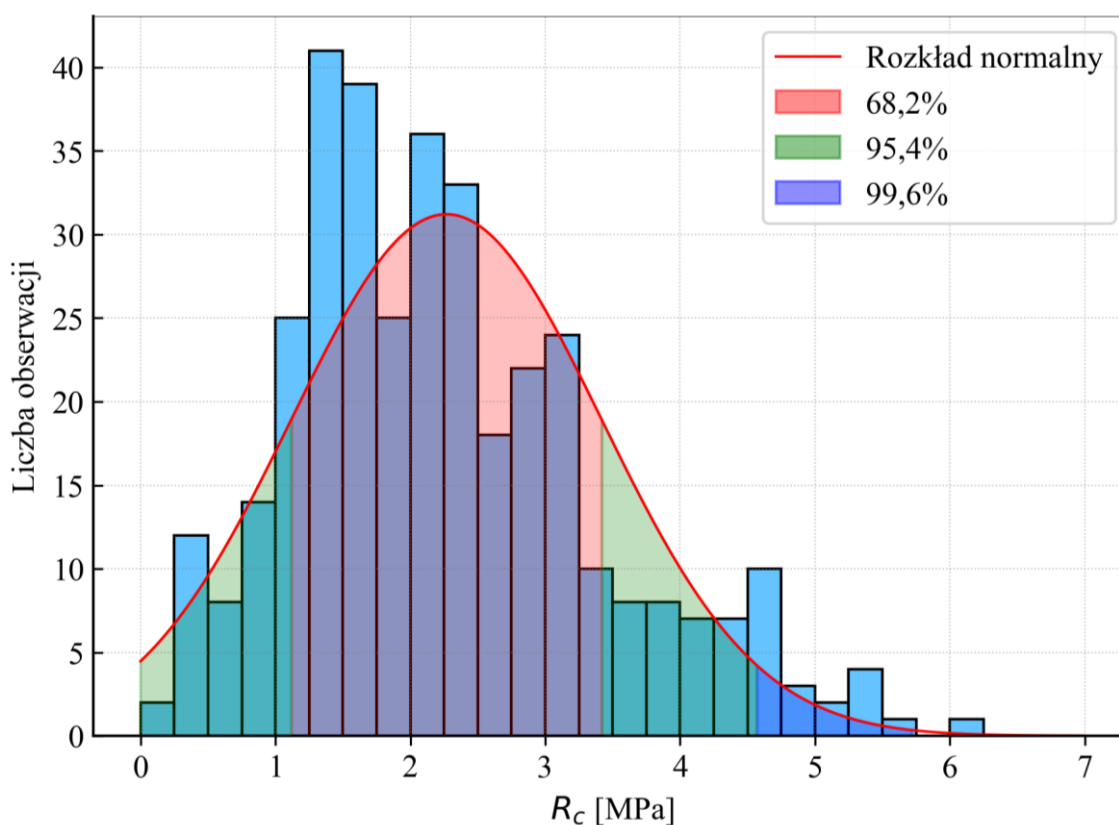
Jeżeli $p > \alpha$ wówczas nie ma podstaw do odrzucenia H_0 .

Na podstawie wyznaczonych parametrów skośności i kurtozy, które odpowiednio wynosiły 0,748 i 0,324, stwierdzono, że analizowany rozkład charakteryzuje się umiarkowaną asymetrią prawostronną oraz niewielką leptokurtycznością. Oznacza to, że większość obserwacji jest mniejsza od wartości średniej na osi poziomej oraz jest większe skupienie wartości wokół średniej, w związku z czym rozkład jest trochę bardziej stromy w stosunku do klasycznej postaci rozkładu normalnego. Biorąc pod uwagę wyznaczone parametry SK i K , histogram przedstawiony na Rys. 6.21 oraz wartość $p < 0,05$ stwierdzono, że należy odrzucić H_0 i przyjąć H_1 .

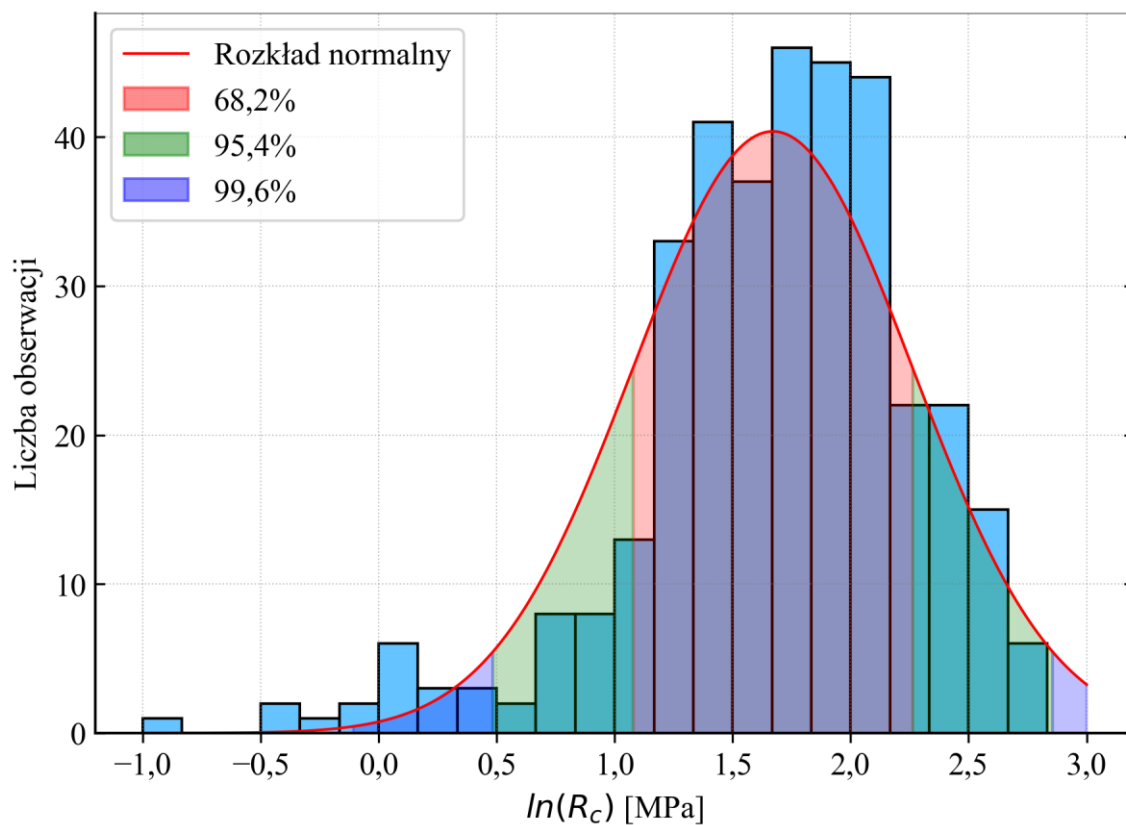
Zważywszy na fakt, iż rozkład obserwacji nie jest normalny, zdecydowano się wykorzystać technikę transformacji danych w celu przybliżenia obserwacji do formy rozkładu normalnego. W celu transformacji rozkładu z asymetrią prawostronną przeanalizowano transformację logarytmiczną i pierwiastkową. W przypadku pierwszej transformacji uzyskano asymetrię lewostronną i leptokurtyczność co można zaobserwować na rys. 6.22. Dodatkowo wyznaczona wartość $p < 0,05$, na tej podstawie ponownie odrzucono H_0 i przyjęto H_1 . Natomiast transformacja pierwiastkowa charakteryzowała się skośnością i kurtozą zbliżoną do wartości zera co świadczyło o możliwym rozkładzie normalnym. W trakcie dalszej analizy ustalono, że wartość prawdopodobieństwa $p > 0,05$ i wynosi 0,152, czyli dla analizowanego rozkładu po transformacji pierwiastkowej można przyjąć H_0 , która mówi, że analizowana zmienna ma rozkład normalny, co zostało zobrazowane na rys. 6.23. Wyznaczone dane podczas analizy zestawione w tab. 6.12.

Tab. 6.12 Statystyczne parametry dla analizy normalności rozkładu.

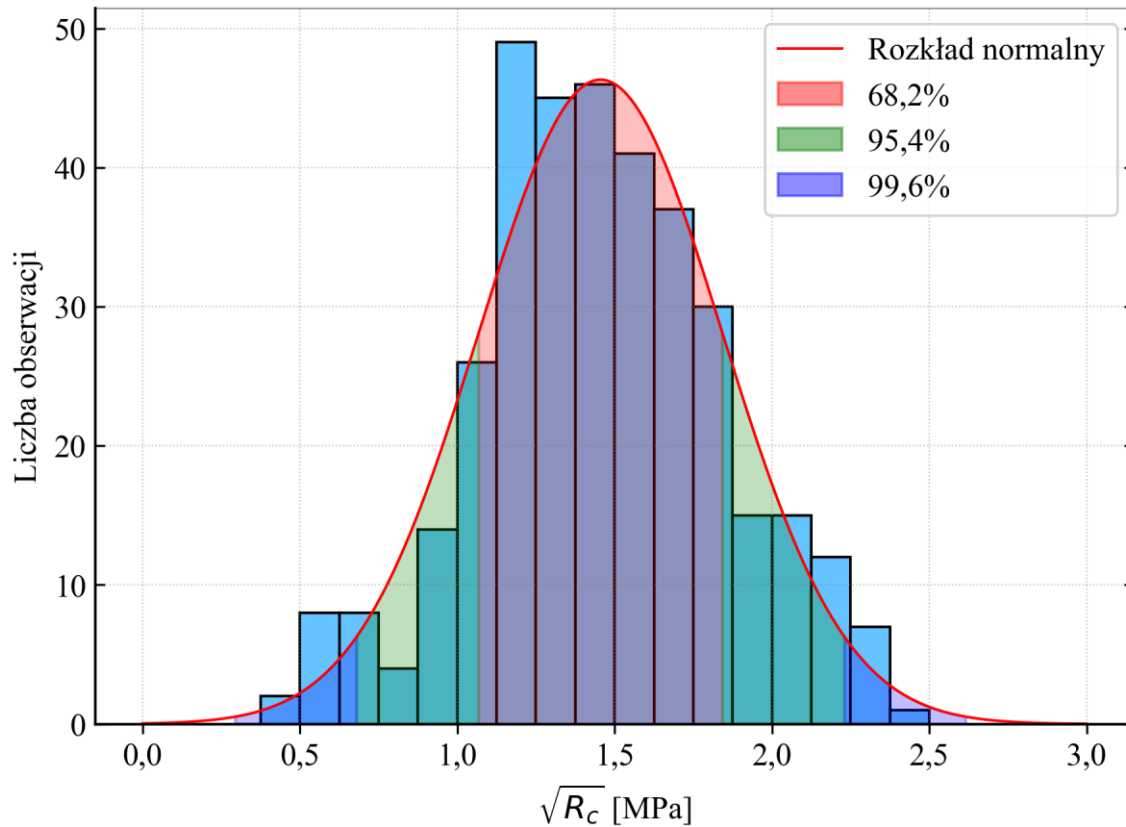
Zmienna	SK	K	$W(S - W)$	p	α_{stat}	test	Przyjęta hipoteza
R_C	0,748	0,324	0,959	2,04E-8	0,05	$\alpha_{stat} > p$	H_0 odrzucona
$\ln(R_C)$	-0,995	1,775	0,946	3,93E-10	0,05	$\alpha_{stat} > p$	H_0 odrzucona
$\sqrt{R_C}$	0,023	-0,058	0,994	0,152	0,05	$\alpha_{stat} < p$	H_0 nieodrzucona



Rys. 6.21 Histogram dla wytrzymałości na ściskanie.



Rys. 6.22 Histogram dla transformacji logarytmicznej wytrzymałości na ściskanie.



Rys. 6.23 Histogram dla transformacji potęgowej wytrzymałości na ściskanie.

6.3.2. Ocena jakości zależności empirycznych

Należy przyjąć, że każda prognoza jest obarczona pewnym błędem, który może wynikać z wielu czynników takich jak błąd pomiaru czy też błąd losowy. Dlatego też weryfikacja prognoz i ocena ich jakości jest tak istotna, w związku z czym należy przeprowadzić analizę błędów prognoz. Można wyróżnić dwa podstawowe rodzaje błędów:

1. błąd prognozy *ex – post* – przedstawia odchylenia rzeczywistej wartości od wyniku prognozy, czyli informuje o trafności przeprowadzonej prognozy,
2. błąd prognozy *ex – ante* – przedstawia oczekiwane odchylenie rzeczywistej wartości od wyniku prognozy, czyli informuje o dopuszczalności obliczonych prognoz.

Na potrzeby oceny jakości wyznaczonych zależności empirycznych, które opisano przy pomocy równań 6.52, 6.53 i 6.54 przeprowadzono analizę błędów prognoz *ex – post* z wykorzystaniem miar błędów względnych i bezwzględnych.

Pierwszą zastosowaną miarą bezwzględną jakości prognoz *ex-post* jest średni błąd (z ang. *Mean Error, ME*), który jest średnią różnicą wartości zaobserwowanych i obliczonych. Jeśli wartość *ME* będzie mniejsza od zera, wówczas należy uznać, że prognozy są przeszacowane. Natomiast jeśli *ME* jest większe od zera, wtedy prognozy są niedoszacowane. W związku z tym wartość *ME* powinna zbiegać do zera. Średni błąd został wyznaczony zgodnie ze wzorem:

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^n (R_{C,t} - \hat{R}_{C,t}) \quad 6.60$$

gdzie:

ME – średni błąd,

N – liczba obserwacji,

R_{C,t} – kolejna zaobserwowana wartość wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie

$\hat{R}_{C,t}$ – kolejna obliczona wartość wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie.

Następną użytą miarą jest średnia różnica wartości bezwzględnych zaobserwowanych i obliczonych, czyli średni błąd bezwzględny (z ang. *Mean Absolute Error, MAE*). Miara ta informuje o tym, ile będzie wynosić odchylenie od wartości rzeczywistej w okresie prognozy. Średni błąd bezwzględny został obliczony na podstawie wzoru 6.61.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^n |R_{c,t} - \hat{R}_{c,t}| \quad 6.61$$

gdzie:

MAE – średni błąd bezwzględny,

N – liczba obserwacji,

$R_{c,t}$ – kolejna zaobserwowana wartość wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie,

$\hat{R}_{c,t}$ – kolejna obliczona wartość wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie.

Kolejną miarą jest pierwiastek błędu średniokwadratowego (z ang. *Root Mean Squared Error, RMSE*), Definiuje się go jako pierwiastek z wartości średniej kwadratów różnic pomiędzy wartością zaobserwowaną a obliczoną. $RMSE$ mierzy o ile średnio wartości zaobserwowane, odchylają się od wartości obliczonych. Oznacza to, że im mniejsza wartość $RMSE$, tym lepsza jakość modelu.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^n (R_{c,t} - \hat{R}_{c,t})^2} \quad 6.62$$

gdzie:

$RMSE$ – pierwiastek błędu średniokwadratowego,

N – liczba obserwacji,

$R_{c,t}$ – kolejna zaobserwowana wartość wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie,

$\hat{R}_{c,t}$ – kolejna obliczona wartość wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie.

Średni bezwzględny błąd procentowy (z ang. *Mean Absolute Percentage Error, MAPE*) jest miarą względną, która jest procentową odmianą miary MAE . Miara ta wyraża w procentach średnią wielkość błędów prognoz i może być zapisana wzorem:

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^n \frac{|R_{c,t} - \hat{R}_{c,t}|}{R_{c,t}} \quad 6.63$$

gdzie:

$MAPE$ – średni bezwzględny błąd procentowy,

N – liczba obserwacji,

$R_{c,t}$ – kolejna zaobserwowana wartość wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie,

$\hat{R}_{c,t}$ – kolejna obliczona wartość wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie.

Na podstawie przeprowadzonej analizy zaobserwowano, że spośród trzech zależności to zależność empiryczna nr 1 charakteryzowała się najmniejszymi wartościami błędów względnych, czyli *ME*, *MAE* i *RMSE*. Wyznaczona wartość błędu *ME* wskazuje, że obliczone wartości wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie są nieznacznie niedoszacowane. Następną miarą *MAE* wskazującą, że średnia bezwzględna różnica między wytrzymałością zmierzoną i obliczoną wynosi 0,244 MPa. Kolejną miarą błędu *RMSE* osiągnęła wartość 0,305 MPa. Nieznacznie wyższy wynik *RMSE* od *MAE* może wskazywać, że niektóre obliczone wytrzymałości odchylają się bardziej od wartości zmierzonych. W związku z tym należy przeanalizować dane odstające. Pozostałe zależności empiryczne charakteryzowały się większymi błędami względnymi. Natomiast analiza błędu bezwzględnego wykazała, że najmniejszym średnim błędem procentowym charakteryzuje się zależność empiryczna nr 2, gdzie błąd ten wynosił 12,90%. Dodatkowo należy zaznaczyć, że różnice miar błędów względnych i bezwzględnych nie są znaczące, co zostało przedstawione w tab. 6.13.

Tab. 6.13 Wyniki obliczeń miar jakości zależności empirycznych nr 1, 2 i 3.

Zależność empiryczna	<i>ME</i>	<i>MAE</i>	<i>RMSE</i>	<i>MAPE</i>
[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]
nr 1	0,012	0,244	0,305	14,52
nr 2	0,016	0,249	0,311	12,90
nr 3	0,018	0,258	0,320	13,72

Dodatkowo przeprowadzono analizę współczynnika Theila (I^2), który informuje o jakości modelu oraz źródle błędów prognoz. Należy przyjąć, że im wartość współczynnika Theila jest mniejsza, tym większa jest jakość modelu i odwrotnie, jeśli wartość współczynnika rośnie, to jakość modelu maleje. Dzięki dekompozycji współczynnika Theila na trzy składowe: I_1^2 , I_2^2 , I_3^2 możliwa jest interpretacja źródeł błędów prognoz [129]. Pierwsza składowa (I_1^2) odzwierciedla obciążenie predykcji, czyli w jakim stopniu nie udało się odtworzyć średniej wartości zmierzonej. Drugi składnik (I_2^2) określa, w jakim stopniu zbliżone są do siebie zmienności prognozy i prognozowanej, czyli element ten jest powiązany z predykcją prognozowania. Trzeci i zarazem ostatni składnik (I_3^2) współczynnika Theila wyraża wielkość błędu związanego z nieodgadnięciem kierunku tendencji rozwoju zmiennej prognozowanej [129]. Informuje o błędach prognoz, które są niezależne od modelu. Dlatego też Idealny model powinien charakteryzować się zależnością

$I_1^2 = I_2^2 = 0\%$ oraz $I_3^2 = 100\%$. Współczynnik Theila można zapisać wzorem 6.64 lub też alternatywnie wzorem 6.65.

$$I^2 = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (R_{C,t} - \hat{R}_{C,t})^2}{\sum_{t=1}^n (R_{C,t})^2}} \quad 6.64$$

gdzie:

I^2 – współczynnik Theila,

N – liczba obserwacji,

$R_{C,t}$ – kolejna zaobserwowana wartość wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie,

$\hat{R}_{C,t}$ – kolejna obliczona wartość wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie.

$$I^2 = I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 \quad 6.65$$

gdzie:

I^2 – współczynnik Theila,

I_1^2 – pierwszy składnik współczynnika Theila,

I_2^2 – drugi składnik współczynnika Theila,

I_3^2 – trzeci składnik współczynnika Theila.

Na podstawie przeprowadzonej analizy poszczególnych składników współczynnika Theila można zaobserwować, że wyznaczone zależności empiryczne charakteryzują się wartościami I_1^2 i I_2^2 zbliżonymi do 0. Najniższą wartość $I_1^2 = 0.157\%$ osiągnięto dla zależności empirycznej nr 1 a najniższą wartość $I_2^2 = 0,098\%$ uzyskała zależność empiryczna nr 3. Tymczasem zależność empiryczna nr 2 charakteryzowała się największą wartością $I_3^2 = 99,636\%$. Z uwagi na małe różnice pomiędzy uzyskanymi wynikami należy przyjąć, że wyznaczone zależności empiryczne charakteryzują się wysoką jakością prognoz. Szczegółowe wyniki analizy współczynnika Theila przedstawiono w tab. 6.14.

Tab. 6.14 Wyniki obliczeń elementów składowych wskaźnika Theila.

Zależność empiryczna	I_1^2	I_2^2	I_3^2	I^2
nr 1	0,000023	0,000043	0,014304	0,014370
	0,157%	0,302%	99,541%	100%
nr 2	0.000036	0.000015	0,014145	0,014197
	0,255%	0,109%	99,636%	100%
nr 3	0,000048	0,000016	0,015750	0.015813
	0,302%	0,098%	99,600%	100%

6.3.3. Analiza reszt

Wyznaczone zależności empiryczne wykazują liniową zależność pomiędzy wartością zmierzoną a obliczoną, co można zapisać przy pomocy wzoru 6.66. Idealnie dopasowane równanie powinno charakteryzować się zależnością $R_C = \hat{R}_C$, tzn. wyraz wolny równy jest 0, a współczynnik kierunkowy równy 1 [44]. W rzeczywistości jednak istnieje pewien losowy rozrzut wzdłuż prostych. W celu zbadania zależności liniowej przeprowadzono analizę na trzech zbiorach wydzielonych dla każdej analizowanej zależności empirycznej, co zostało przedstawione na rys. 6.24, rys. 6.25 i rys. 6.26.

$$\hat{R}_C = aR_C + b \quad 6.66$$

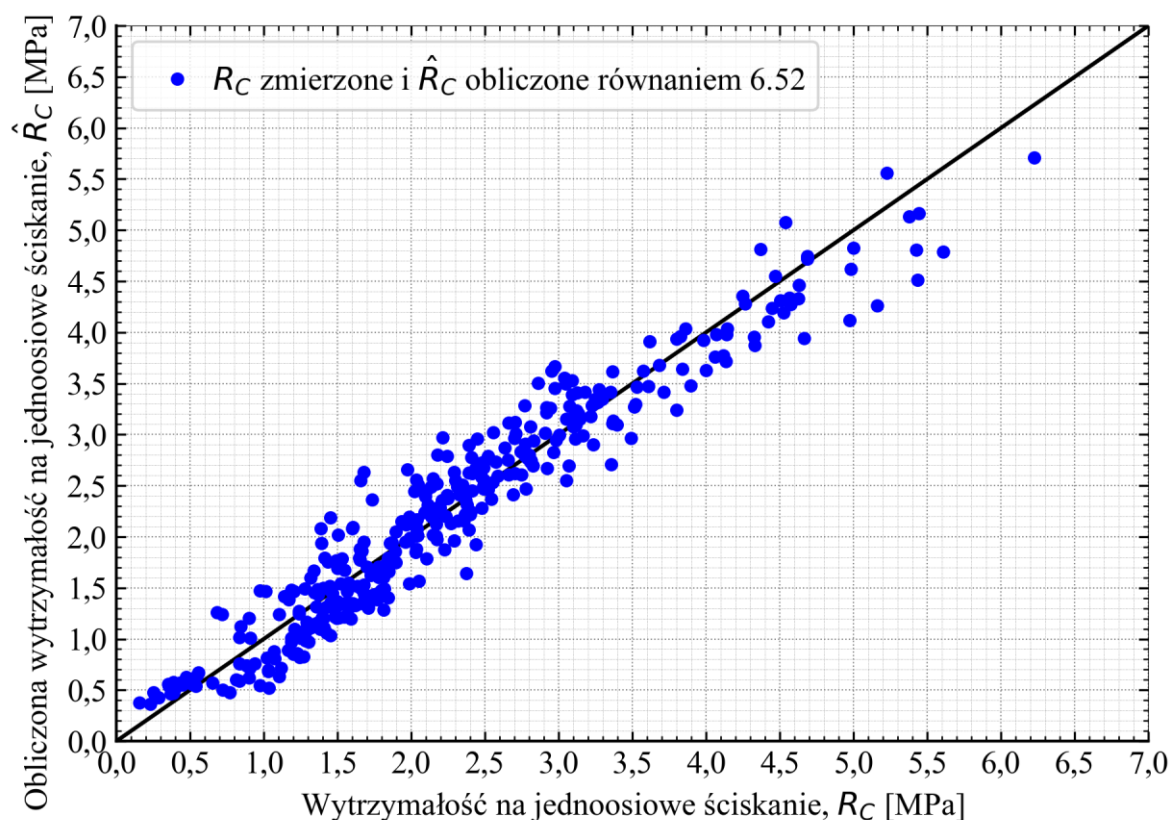
gdzie:

R_C – wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie,

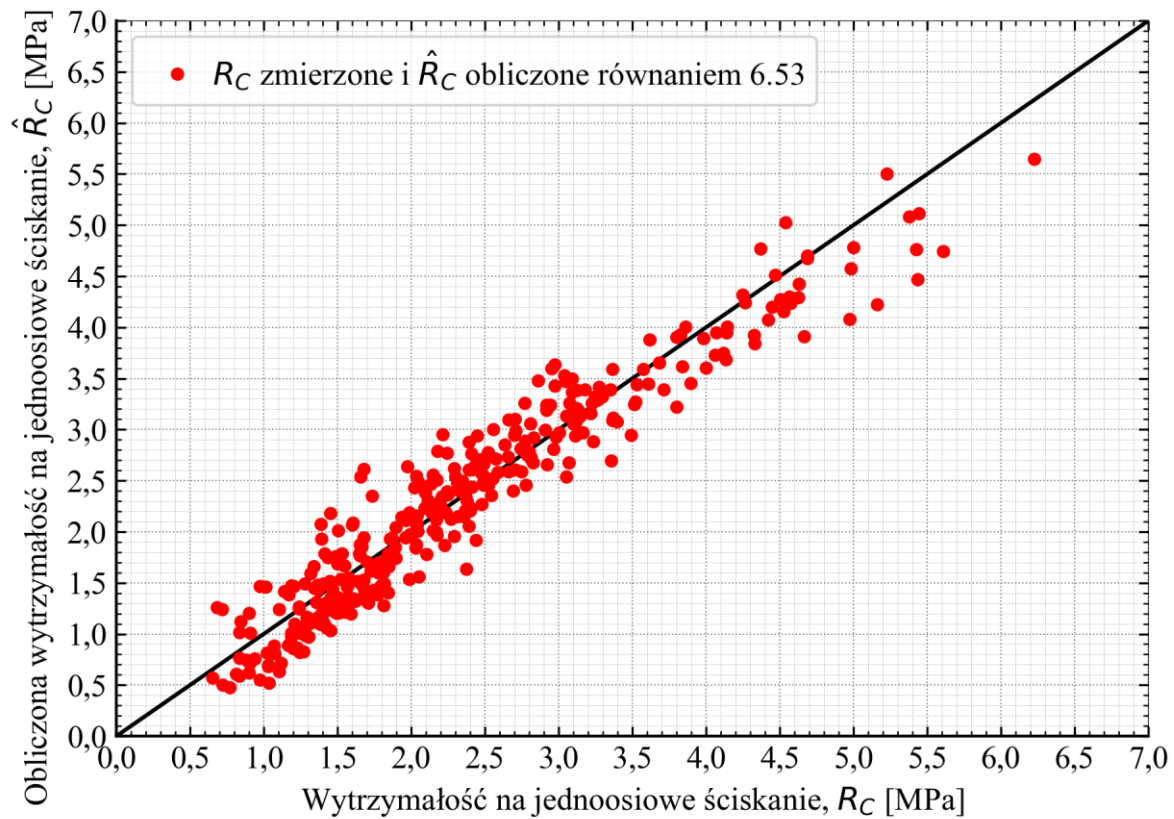
$\hat{R}_C$ – obliczona wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie,

a – współczynnik kierunkowy zależności liniowej,

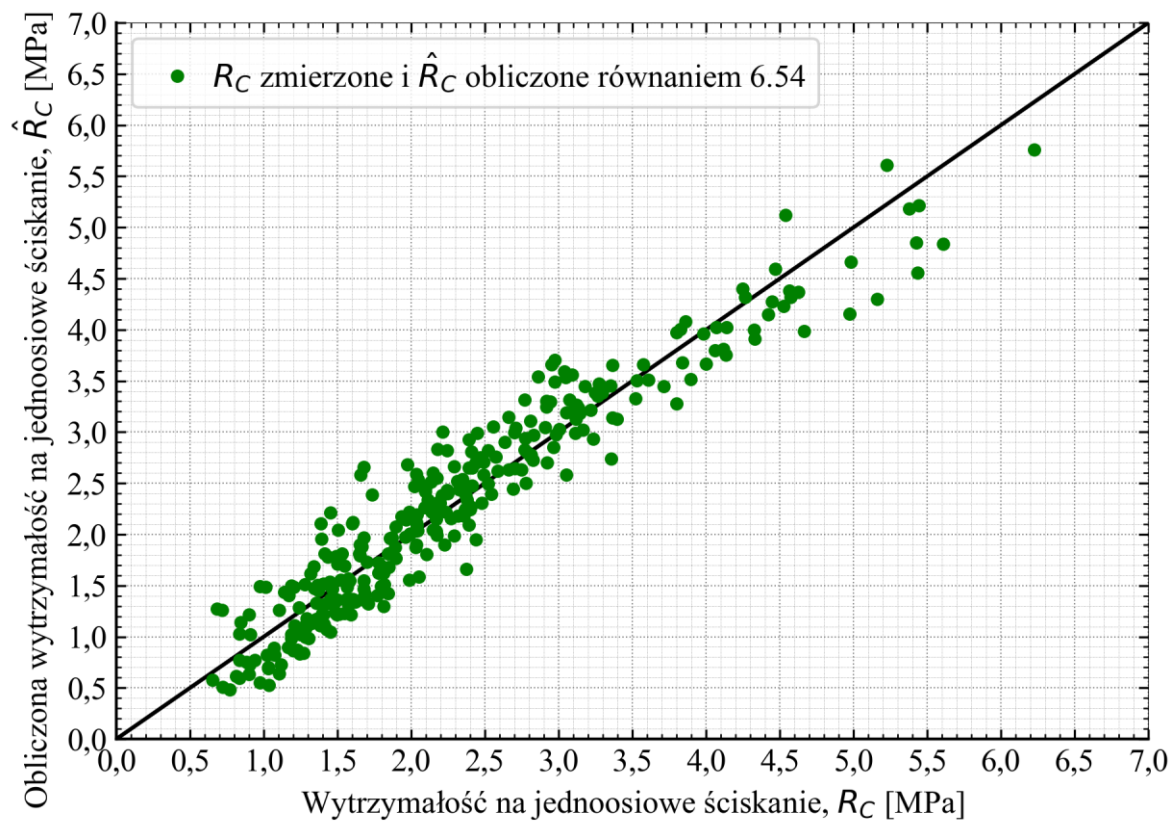
b – wyraz wolny zależności liniowej.



Rys. 6.24 Zależność wartości zmierzonych i obliczonych dla trzech równań.



Rys. 6.25 Zależność wartości zmierzonych i obliczonych dla trzech równań.



Rys. 6.26 Zależność wartości zmierzonych i obliczonych dla trzech równań.

Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzono występowanie bardzo silnej zależności liniowej pomiędzy zmierzoną a obliczoną wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie. Wyznaczone współczynniki korelacji Pearsona (r_p), które odzwierciedlają stopień dopasowania danych do modelu liniowego, mieściły się w przedziale od 0,956 do 0,965. Tak wysokie wartości świadczą o bardzo dobrej zgodności między wartościami zmierzonymi a obliczonymi. Szczegółowe wyniki przedstawiono w tab. 6.15.

Tab. 6.15 współczynniki zależności pomiędzy wartościami zmierzonymi a obliczonymi.

Zależność empiryczna	a	b	r_p
nr 1	0,9505	0,1002	0,965
nr 2	0,9505	0,1015	0,959
nr 3	0,9472	0,1038	0,956

Następnie przeanalizowano reszty regresji, czyli różnice pomiędzy zmierzoną a obliczoną wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie, co zapisano wzorem 6.67. Reszty powinny charakteryzować się losowymi wahaniami wartości wzdłuż linii prostej oraz mieć rozkład normalny [47]. W celu zbadania normalności rozkładu posłużono się testem $S - W$, który został opisany w rozdziale 6.3.1. Na potrzeby testu przyjęto wcześniej opisane hipotezy: H_0 , H_1 i poziom istotności statystycznej. Dodatkowo podczas przeprowadzanej analizy zbadano, czy obliczone reszty znacząco odstają od wartości średnich. Rozkład reszt dla zależności empirycznej nr 1 przedstawiono na rys. 6.27, dla zależności empirycznej nr 2 na rys. 6.28 i dla zależności empirycznej nr 3 na rys. 6.29. Szczegółowe dane przeprowadzonej analizy zestawiono w tab. 6.16.

$$e_i = R_C - \hat{R}_C \quad 6.67$$

gdzie:

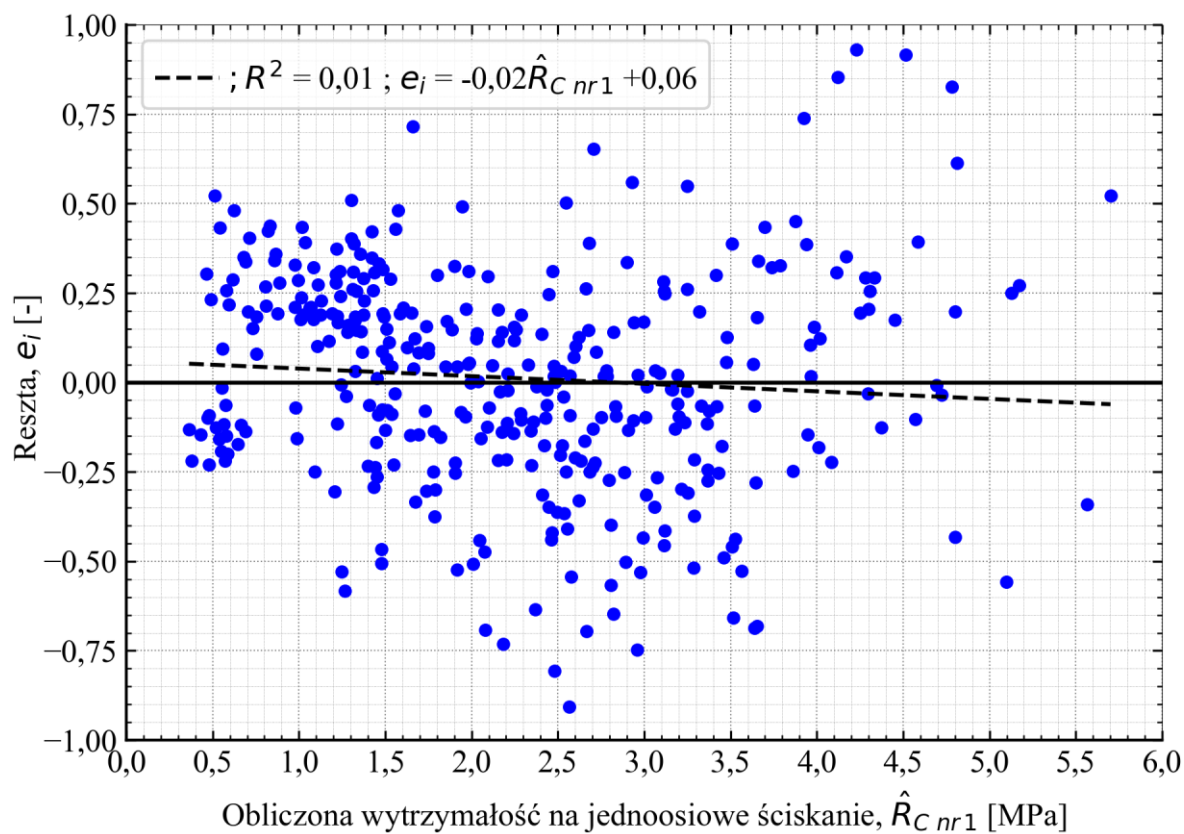
e_i – reszta regresji,

R_C – wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie,

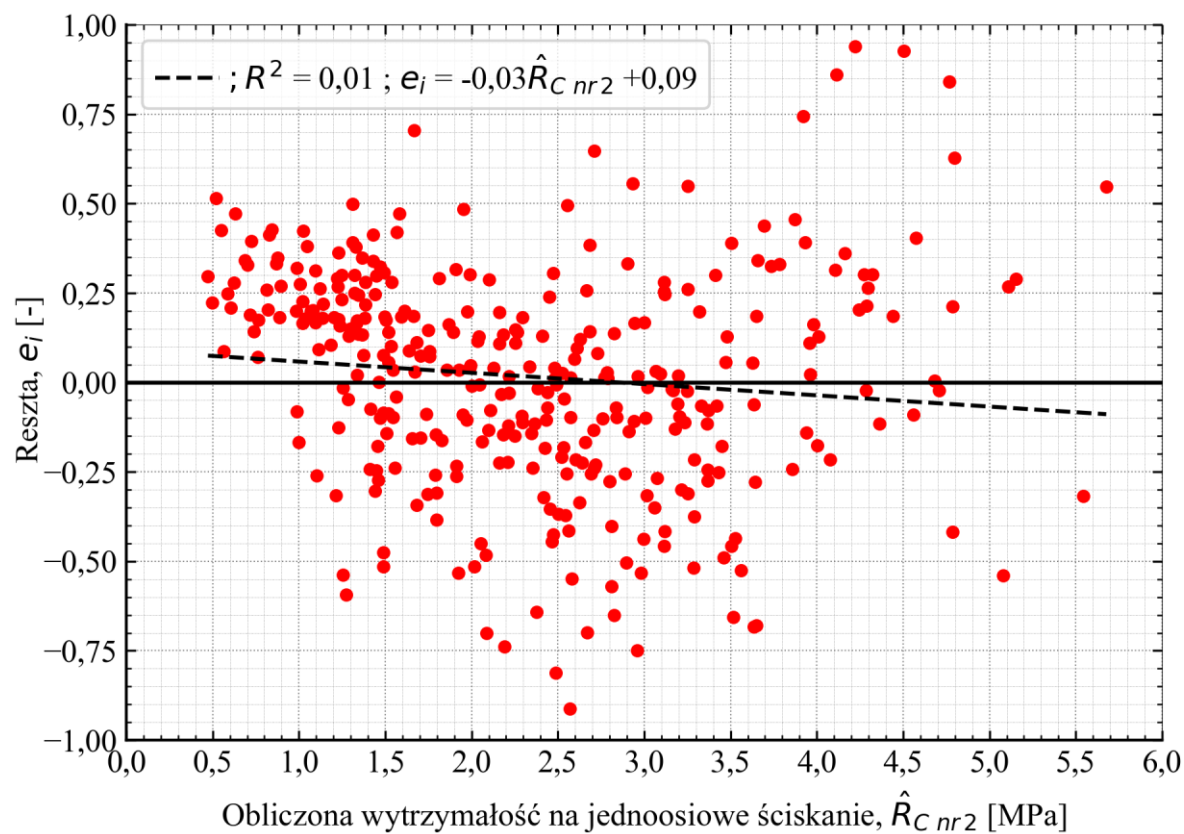
$\hat{R}_C$ – obliczona wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie.

Tab. 6.16 Statystyczne parametry dla analizy normalności rozkładu.

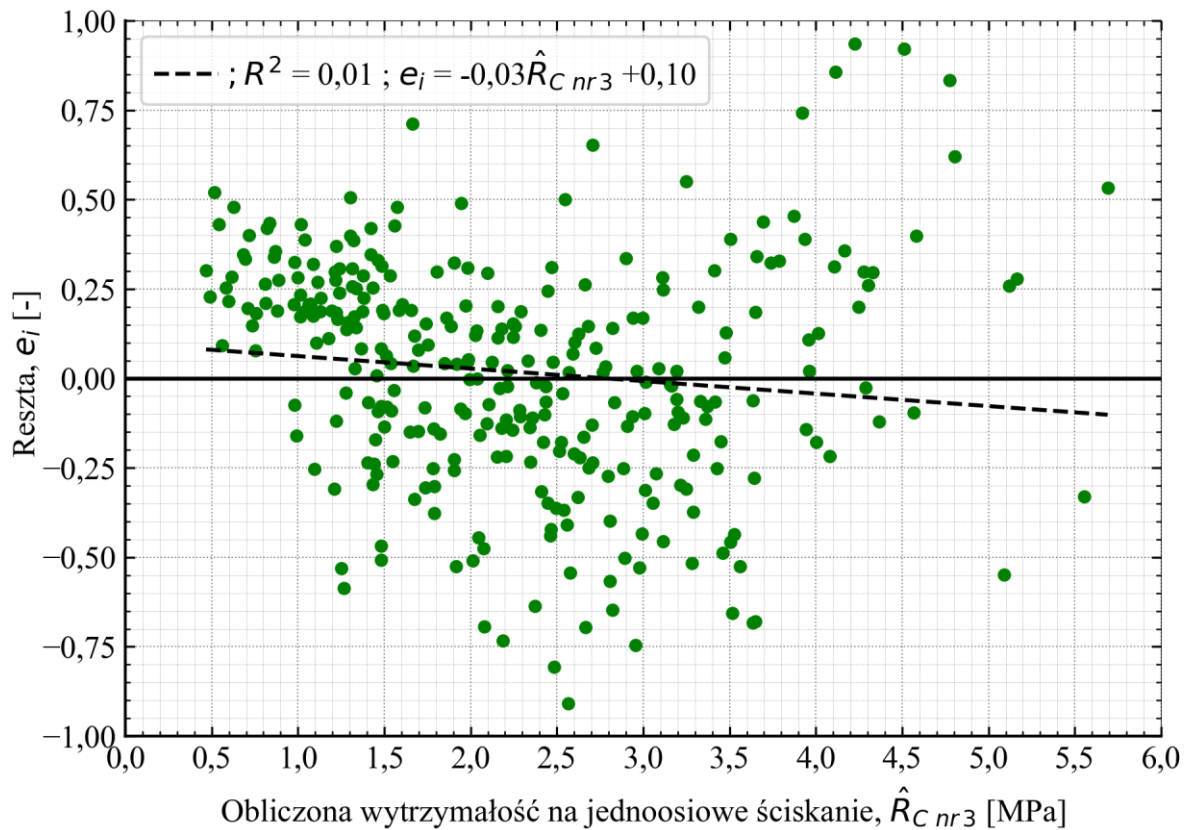
Zależność empiryczna	S	N	p	α_{stat}	test	Przyjęta hipoteza
nr 1	0,306	360	0,051	0,05	$\alpha < p$	H_0 nieodrzucona
nr 2	0,312	342	0,017	0,05	$\alpha > p$	H_0 odrzucona
nr 3	0,319	306	0,020	0,05	$\alpha > p$	H_0 odrzucona



Rys. 6.27 Analiza reszt zależności empirycznej nr 1.



Rys. 6.28 Analiza reszt zależności empirycznej nr 2.



Rys. 6.29 Analiza reszt zależności empirycznej nr 3.

Na podstawie przeprowadzonej analizy ustalono, że próbka o numerze porządkowym B1-C715-S-89 nieznacznie odstawała od analizowanych zbiorów. Największą wartość odstającą zaobserwowano podczas analizy zależności empirycznej nr 1, gdzie odchylenie od wartości średniej wynosiło 0,931, co stanowiło przekroczenie wartości trzech odchyłeń standardowych o około 1,64%. W związku ze znikomym wpływem wartości odstającej na analizowane zależności nie podjęto decyzji o wykluczeniu wspomnianych próbek.

Analiza zależności reszt regresji od obliczonej wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie wykazała, że wartości współczynników r_p są zbliżone do 0. Takie wyniki stanowiły podstawę do stwierdzenia, że nie występuje zależność reszt od zmiennej niezależnej. Dodatkowo na podstawie przeprowadzonych testów S – W stwierdzono, że dla zależności empirycznej nr 1 wyznaczona istotność była większa od 0,05. Wskazuje to, że obliczone reszty mają rozkład normalny. Jednak dla zależności empirycznych nr 2 i 3 wyznaczone istotności były mniejsze od 0,05, co stanowiło podstawę do odrzucenia hipotezy zerowej i przyjęcia hipotezy alternatywnej co świadczy o braku rozkładu normalnego. Na tej podstawie do dalszej analizy wybrano zależność empiryczną nr 1.

6.3.4. Analiza korelacji czynników

W celu zbadania związków pomiędzy właściwościami jednostek statystycznych, czyli cechami statystycznymi o charakterze mierzalnym przeprowadzono analizę bazującą na teorii współzależności. Analizę przeprowadzono dla wyselekcjonowanej zależności empirycznej nr 1, która została opisana równaniem 6.52. Głównym zadaniem analizy było zidentyfikowanie związków przyczynowo – skutkowych pomiędzy badanymi cechami, w związku z czym przeprowadzono ocenę zależności korelacyjnych. Zależności te występują wtedy, gdy wartościom jednej zmiennej przyporządkowane są średnie drugiej zmiennej [126].

Z uwagi na nieliniowe zależności pomiędzy badanymi zmiennymi podczas analizy wykorzystano współczynnik korelacji rang Spearmana (r_s), który jest nieparametrycznym odpowiednikiem współczynnika Pearsona, w związku z czym analizowane dane nie muszą spełniać założenia o normalności rozkładu. Korelacja rang Spearmana służy do analizy zależności monotonicznych między zmiennymi w przeciwieństwie do korelacji Pearsona, która bada jedynie związki liniowe. Współczynnik korelacji rang Spearmana oblicza się na podstawie następującego wzoru [126]:

$$r_s = \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n_s(n_s^2 - 1)} \quad 6.68$$

gdzie:

r_s – współczynnik korelacji rang Spearmana,

d_i – różnica pomiędzy rangami cechy X i Y tzn. $d_i = x_i - y_i$,

x_i – ranga cechy X ,

y_i – ranga cechy Y ,

n_s – liczba par cech X i Y .

W celu obliczenia współczynnika korelacji rang Spearmana konieczne jest uporządkowanie wartości cech X i Y w kolejności rosnącej lub malejącej. Po uszeregowaniu wartości nadaje się im tzw. rangi: 1, 2, 3 ..., n . W przypadku wystąpienia jednakowych wartości cech oblicza się średnią arytmetyczną z ich kolejnych numerów i przyporządkowuje się im otrzymaną wartość [126].

Obliczony współczynnik korelacji rang Spearmana określa siłę i kierunek związków między badanymi cechami, przyjmując wartość z przedziału od -1 do 1. Korelacja dodatnia występuje, kiedy współczynnik przyjmuje wartość większą od zera. Jeśli wartość jest

mniejsza od zera, występuje korelacja ujemna, która określa kierunek analizowanej korelacji. Dlatego też o sile korelacji nie decyduje znak a wartość współczynnika. Wraz ze zbliżaniem się współczynnika do wartości -1 lub 1 zwiększa się siła korelacji, natomiast korelacja słabnie, kiedy zbliża się do wartości 0. Do oceny siły korelacji pomiędzy analizowanymi zmiennymi przyjęto następujący podział:

$0,0 < |r_s| \leq 0,2$ – bardzo słaba,

$0,2 < |r_s| \leq 0,4$ – słaba,

$0,4 < |r_s| \leq 0,6$ – umiarkowana,

$0,6 < |r_s| \leq 0,8$ – silna,

$0,8 < |r_s| \leq 1,0$ – bardzo silna.

Na potrzeby analizy zbudowano tablicę korelacyjną, co przedstawia tab. 6.17. Podczas analizy zbadano korelacje pomiędzy 12 zmiennymi. Spośród analizowanych zmiennych, 5 miało wpływ na wyznaczony i analizowany współczynnik Δ_7 , są to: porowatość, indeks cementowy i zbrojeniowy, odporność na działanie wody i czas utwardzania. Pozostałe analizowane zmienne to: wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie, prędkości fal (V_P i V_S) i parametry odkształceniowe (E_{50} , E_{UPV} i G_{UPV}).

W pierwszej kolejności zbadano wpływ 5 zmiennych na współczynnik Δ_7 , który to został wykorzystany do wyznaczenia trzech końcowych zależności empirycznych. Na podstawie przeprowadzonej analizy ustalono, że współczynnik Δ_7 wykazuje bardzo silną korelację ujemną z indeksem cementowym. Następnie analizowany współczynnik przejawia umiarkowaną zależność z czasem utwardzania i słabą zależność z porowatością. Dodatkowo należy zwrócić uwagę na bardzo słabą korelację pomiędzy współczynnikiem Δ_7 a indeksem zbrojeniowym i odpornością na działanie wody. Oznacza to, że analizowany współczynnik Δ_7 w największym stopniu zależy od indeksu cementowego a następnie dopiero od czasu utwardzania, porowatości i pozostałych zmiennych.

W następnej kolejności zbadano zależności pomiędzy współczynnikiem Δ_7 a wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie cementogruntu i jego parametrami odkształceniowymi. Na podstawie przeprowadzonej analizy ustalono, że występuje bardzo silna korelacja ujemna pomiędzy analizowanym współczynnikiem Δ_7 a R_c oraz modułami E_{50} , E_{UPV} i G_{UPV} . Należy jednak podkreślić, że współczynnik r_s osiągnął największą wartość podczas korelacji z wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie, gdzie osiągnięto wartość $r_s = -0,964$. Uzyskane wyniki nie tylko potwierdzają silną zależność pomiędzy

analizowanym współczynnikiem Δ_7 a R_C , lecz również na możliwość wykorzystania opisywanego współczynnika do korelacji z parametrami odkształceniowymi. Jednak z uwagi na wyznaczone zależności empiryczne pomiędzy wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie a parametrami odkształceniowymi, nie wyznaczono takich zależności.

Następnie zbadano zależności pomiędzy modułami E_{50} , E_{UPV} i G_{UPV} a R_C . Analizę przeprowadzono w celu potwierdzenia słuszności wyboru R_C jako zmiennej niezależnej w zależnościach omówionych w rozdziale 5.3. Na podstawie wyznaczonych wartości r_s stwierdzono, że wspomniane parametry odkształceniowe wykazują bardzo silną korelację dodatnią z wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie. Taki wynik potwierdza zasadność korelacji wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie z modułami E_{50} , E_{UPV} i G_{UPV} .

W ostatniej kolejności zbadano zależności pomiędzy prędkościami fal a wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie cementogruntu. Uzyskane wyniki wskazują, że zarówno V_P , jak i V_S wykazują bardzo silną korelację dodatnią z analizowaną wytrzymałością cementogruntu. Oznacza to, że można również prognozować wytrzymałość cementogruntu na podstawie zmierzonych prędkości fal.

Na podstawie przeprowadzonej analizy należy stwierdzić, że wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie gruntu stabilizowanego w największym stopniu zależy od objętości cementu. Wydaje się to naturalnym zjawiskiem oraz dobrą przesłanką, zważywszy na fakt, iż parametr ten łatwo jest kontrolować w warunkach laboratoryjnych oraz terenowych. Podczas omawianych zależności pominięto opis korelacji modułów E_{UPV} i G_{UPV} z prędkościami fal z uwagi na sposób ich wyznaczania. Dodatkowo wszystkie wyznaczone współczynniki korelacji rang Spearmana zestawiono w tab. 6.17.

Tab. 6.17 Tablica korelacji $\{\gamma_S\}$ rozpatrywanych czynników wpływających na właściwości mechaniczne cementogruntu.

Zmienna	n	C_i	Z_i	I	T_C	Δ_7	V_p	V_S	E_{UPV}	G_{UPV}	E_{50}	R_C
	[-]	[-]	[-]	[-]	[dzień]	[-]	[m/s]	[m/s]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
n	1,000	0,272	0,136	0,091	0,323	-0,297	0,160	0,211	0,136	0,154	0,257	0,292
C_i	0,272	1,000	-0,257	-0,062	0,090	-0,872	0,768	0,766	0,754	0,761	0,804	0,826
Z_i	0,136	-0,257	1,000	0,002	-0,061	0,078	-0,238	-0,243	-0,252	-0,256	-0,246	-0,026
I	0,091	-0,062	0,002	1,000	-0,169	0,024	-0,218	-0,337	-0,356	-0,345	-0,123	-0,045
T_C	0,323	0,090	-0,061	-0,169	1,000	-0,434	0,458	0,583	0,567	0,572	0,449	0,435
Δ_7	-0,297	-0,872	0,078	0,024	-0,434	1,000	-0,869	-0,888	-0,880	-0,886	-0,903	-0,964
V_p	0,160	0,768	-0,238	-0,218	0,458	-0,869	1,000	0,981	0,989	0,984	0,922	0,910
V_S	0,211	0,766	-0,243	-0,337	0,583	-0,888	0,981	1,000	0,995	0,997	0,927	0,924
E_{UPV}	0,136	0,754	-0,252	-0,356	0,567	-0,880	0,989	0,995	1,000	0,999	0,923	0,915
G_{UPV}	0,154	0,761	-0,256	-0,345	0,572	-0,886	0,984	0,997	0,999	1,000	0,925	0,918
E_{50}	0,257	0,804	-0,246	-0,123	0,449	-0,903	0,922	0,927	0,923	0,925	1,000	0,921
R_C	0,292	0,826	-0,026	-0,045	0,435	-0,964	0,910	0,924	0,915	0,918	0,921	1,000

7. Badania kontrolne

7.1. Opis serii badań kontrolnych

W ramach drugiego etapu badań przeprowadzono weryfikację zależności empirycznej nr 1, która została opisana równaniem 6.52 w rozdziale 6.2.7. Badania kontrolne przeprowadzono na 72 próbkach, co stanowi 20% przebadanych próbek podczas pierwszego etapu badań. Zarejestrowane charakterystyki naprężenie – odkształcenie zestawiono w załączniku B.

Materiał badawczy został wytworzony na bazie 3 gruntów opisanych w rozdziale 3.1 z wykorzystaniem 5 mieszanek opisanych w tab. 4.3: C50; C51; C52; C80; C100. Wszystkie próbki do badań kontrolnych zostały wykonane zgodnie z procedurami przedstawionymi w rozdziale 4.2 i przebadane na aparaturze przedstawionej w rozdziale 4.3. Pełne zestawienie przeprowadzonych badań zaprezentowano w tab. 7.1.

Tab. 7.1 Zestawienie badań kontrolnych.

Badanie kontrolne	Rodzaj gruntu	Seria	Rodzaj pielęgnacji	Wilgotność	Liczba próbek
nr 1	Grunt nr 1 (clSa)	C503	H	6,5%	3
		C503	H	10,0%	3
		C503	H	13,0%	3
		C523	H	8,0%	3
		C523	H	10,0%	3
		C523	H	13,0%	3
		C1002	B	8,0%	1
		C1003	C	8,0%	1
		C1004	D	8,0%	1
		C802	B	12,0%	1
		C803	C	12,0%	1
		C804	D	12,0%	1
nr 2	Grunt nr 2 (MSa)	C505	E	od 6,0% do 12,0%	7
		C515	E	od 6,0% do 12,0%	7
		C525	E	od 6,0% do 12,0%	7
		C1002	B	9,0%	1
		C1003	C	9,0%	1
		C1004	D	9,0%	1
nr 3	Grunt nr 3 (siCl)	C505	E	od 10,0% do 16,0%	7
		C515	E	od 10,0% do 16,0%	7
		C525	E	od 10,0% do 16,0%	7
		C1002	B	14,0%	1
		C1003	C	14,0%	1
		C1004	D	14,0%	1

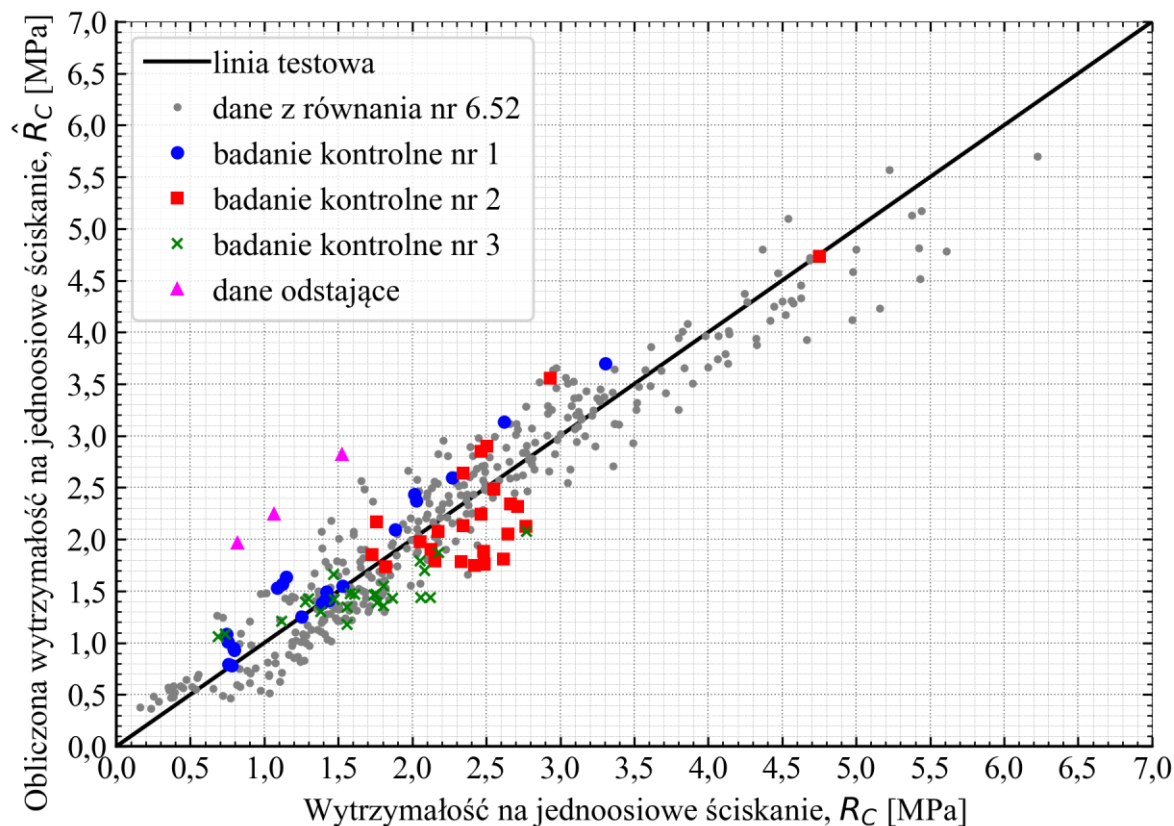
7.2. Weryfikacja zależności empirycznego

Podczas procesu weryfikacji zależności empirycznej nr 1 wykorzystano wilgotność założoną, co umożliwiło odwzorowanie niedokładności wynikającej z dozowania wody. Aby określić odporność na działanie wody serii C503 i C523, przeprowadzono obliczenia mające na celu określenie wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie bez pielęgnacji w wodzie. Obliczenia przeprowadzono wykorzystując dane z rys. 5.2 i tab. 5.4. Następnie wykorzystując obliczone i pomierzone wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie wyznaczono odporność na działanie wody dla każdej analizowanej próbki. Obliczone wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie przedstawiono poniżej:

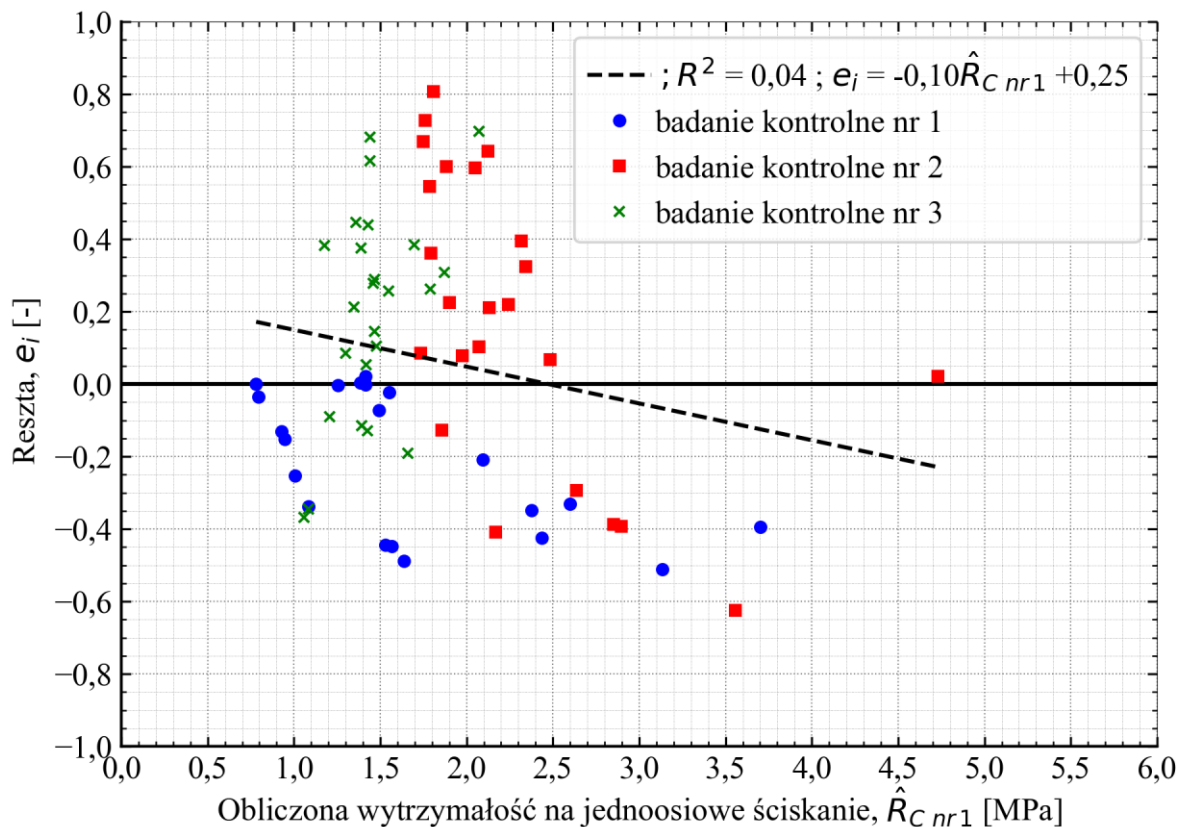
1. $R_C = 1,59$ [MPa] dla Serii C503 o wilgotności założonej 6,5%,
2. $R_C = 2,28$ [MPa] dla Serii C503 o wilgotności założonej 10%,
3. $R_C = 1,04$ [MPa] dla Serii C503 o wilgotności założonej 13%,
4. $R_C = 2,05$ [MPa] dla Serii C523 o wilgotności założonej 8%,
5. $R_C = 2,31$ [MPa] dla Serii C523 o wilgotności założonej 10%,
6. $R_C = 1,19$ [MPa] dla Serii C523 o wilgotności założonej 13%.

Na podstawie wyników przedstawionych na rys. 7.1 ustalono, że zależność pomiędzy zmierzoną a obliczoną wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie wykazuje silną korelację. Trzy punkty pomiarowe odstają od linii testowej i danych z pierwszego etapu badań. Próbki zostały zidentyfikowane jako serie badania kontrolnego nr 1: C802; C803; C804. Odstające próbki charakteryzowały się identyczną zawartością spoiwa wynoszącą 8% oraz wilgotnością świeżej mieszanki równą 12%. Badania jednoosiowego ściskania zostały przeprowadzone po 3, 7 i 14 dniach pielęgnacji. Po wykluczeniu odstających danych pomiarowych korelacja Pearsona wzrosła z 0,78 do 0,85, a więc wystąpiła bardzo silna zależność pomiędzy wytrzymałością zmierzoną a obliczoną.

Analogicznie jak we wcześniejszym rozdziale, w celu weryfikacji zależności liniowej przeprowadzono analizę reszt od zmiennej niezależnej, czyli prognozowanej wytrzymałości na ściskanie cementogruntu. Dodatkowo sprawdzono, czy rozkład reszt jest normalny. Na potrzeby analizy badań kontrolnych przyjęto również wcześniej opisane: H_0 , H_1 oraz poziom istotności statystycznej.



Rys. 7.1 Zależność wartości zmierzonych i obliczonych dla badań kontrolnych.



Rys. 7.2 Analiza reszt badań kontrolnych.

Podczas analizy rozrzutu reszt nie zaobserwowano znaczącej zależności pomiędzy zmiennymi a zaobserwowane wyniki są rozłożone wzdłuż osi poziomej, co zostało przedstawione na rys. 7.2. Wyznaczony współczynnik zależności liniowej jest bliski wartości zerowej tak jak to miało miejsce podczas analizy reszt przeprowadzonej dla równania nr 6.52. Dodatkowo zaobserwowano, że współczynnik korelacji liniowej Pearsona wykazuje bardzo słabą korelację między analizowanymi resztami a prognozowaną wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie czego dowodzi współczynnik $r_p = 0,195$. Ponadto, na podstawie przeprowadzonego testu S – W stwierdzono, że dla rozpatrywanego zbioru reszt nie ma podstaw do odrzucenia H_0 , w związku z czym stwierdzono, że analizowany zbiór reszt charakteryzuje się rozkładem normalnym. Szczegółowe wyniki testu S – W zestawiono w tab. 7.2.

Tab. 7.2 Statystyczne parametry dla analizy normalności rozkładu reszt badań kontrolnych.

badania	N	p	α_{stat}	test	Przyjęta hipoteza
Badania kontrolne	69	0,111	0,05	$\alpha_{stat} < p$	H_0 nieodrzucona

Dodatkowo przeprowadzono analizę błędów prognoz *ex – post* wykorzystując w tym celu miary błędów względnych i bezwzględnych. Analizowane miary zostały szczegółowo opisane w rozdziale 6.3.2. Uzyskane wyniki podczas analizy wykazały, że zarówno miary bezwzględne jak i względne charakteryzowały się większym błędem prognozy niż podczas analizy zależności empirycznej nr 1. W związku z powyższym przeprowadzono dodatkową weryfikację analizowanej zależności. W tym celu przyjęto założenie, że uzyskany błąd prognoz *ex – post* nie może być większy od 20%. Założenie to zostało przyjęte na podstawie procedury określania klasy wytrzymałościowej cementogruntu, która to została opisana w normie PN-EN 14227-15 [210]. Zgodnie z przywołaną normą, podczas określania klasy wytrzymałościowej odrzuca się wszystkie wyniki badań wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie, które odbiegają o więcej niż 20% od średniej wytrzymałości na ściskanie dla serii badanych próbek. Przeprowadzona weryfikacja wykazała, że średni bezwzględny błąd procentowy jest mniejszy od 20% i wynosi 16,88%. W tabeli 7.3 zestawiono wyniki przeprowadzonej analizy.

Tab. 7.3 Wyniki obliczeń miar jakości, badania kontrolne.

badania	ME	MAE	$RMSE$	$MAPE$
[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]
Badania kontrolne	0,067	0,302	0,367	16,88

8. Podsumowanie, wnioski i dalszy kierunek prac

8.1. Podsumowanie

Niniejsza praca koncentruje się na zastosowaniu koncepcji ośrodka pięciofazowego do prognozowania wytrzymałości na ściskanie gruntu stabilizowanego cementem z dodatkiem włókien polipropylenowych. Przegląd literatury przybliżył czytelnikom tematykę związaną z gruntem stabilizowanym cementem oraz przedstawił potencjalne korzyści wynikające z zastosowania zbrojenia rozproszonego. Ponadto zostały przedstawione przykładowe modele pozwalające na szacowanie właściwości mechanicznych.

Praca ma charakter doświadczalny i dotyczy zagadnień, które są fundamentalne w zrozumieniu czynników wpływających na właściwości mechaniczne cementogruntu. Opracowanie ma również wymiar praktyczny, ponieważ opisane zależności empiryczne pozwalają określić niezbędną ilość spoiwa w mieszankach, w zależności od oczekiwanej klasy wytrzymałościowej cementogruntu.

Celem niniejszej pracy była analiza wpływu włókien polipropylenowych na właściwości mechaniczne cementogruntu oraz opracowanie funkcji matematycznej opisującej zależność między wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie cementogruntu a objętością jego poszczególnych faz, czasem utwardzania i odpornością na działanie wody. W ramach badań własnych autor przebadiał 25 mieszanek, na bazie których wytworzono łącznie 432 próbki gruntu stabilizowanego cementem. W celu precyzyjnego określenia zakresu badań przedstawiono do rozwiązania pięć celów szczegółowych:

1. określenie wpływu dodatku włókien polipropylenowych na wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie cementogruntu,
2. określenie wpływu dodatku włókien polipropylenowych na parametry odkształceniowe,
3. wyznaczenie zależności empirycznych pomiędzy prędkością pulsu ultradźwiękowego a wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie,
4. wyznaczenie zależności empirycznych pomiędzy parametrami odkształceniowymi a wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie,
5. wyznaczenie równania do określania wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie cementogruntu z dodatkiem włókien polipropylenowych na podstawie koncepcji ośrodka pięciofazowego.

Badania realizowane w ramach prac badawczych zostały podzielone na dwa etapy. W ramach pierwszego etapu badań zidentyfikowano trzy zmienne zależne: siła pionowa, przemieszczenia pionowe, prędkość fal oraz pięć zmiennych niezależnych: ilość cementu, ilość zbrojenia rozproszonego, wilgotność, czas utwardzania, warunki pielęgnacji. Podczas tego etapu zrealizowano trzy odrębne grupy badań, podczas każdego badania zbadano wpływy trzech zmiennych niezależnych. Podczas drugiego etapu badań przeprowadzono badania kontrolne, które zostały przeprowadzone na trzech rodzajach gruntu, co stanowiło szóstą zmienną niezależną.

Podczas pierwszego etapu badań przeprowadzono badania nieniszczące i niszczące. W trakcie badań nieniszczących wyznaczono prędkość fali podłużnej i poprzecznej w badanym ośrodku. Pomiary przeprowadzono z wykorzystaniem betonoskopu Pundit Lab+ i dwoma zestawami przetworników 54 i 40 kHz firmy Proceq. Następnie podczas przeprowadzanych badań niszczących do pomiaru siły i przemieszczeń została wykorzystana uniwersalna maszyna wytrzymałościowa firmy Instron, model 5982. W trakcie drugiego etapu badań zostały przeprowadzone jedynie badania niszczące mające na celu weryfikację wyznaczonych zależności empirycznych.

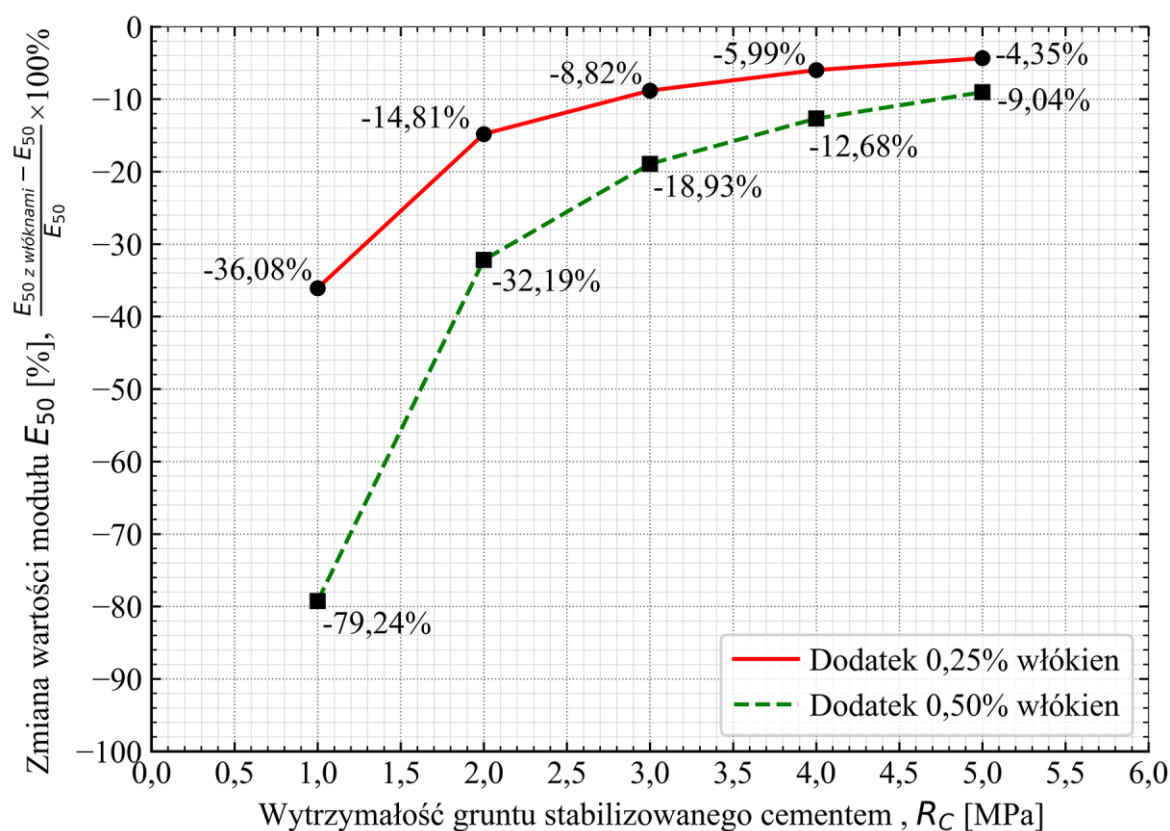
Do najważniejszych wyników przeprowadzonych badań należą te, które w istotny sposób przyczyniły się do zrozumienia wpływu włókien polipropylenowych na właściwości mechaniczne gruntu stabilizowanego cementem. Poniżej wymieniono najważniejsze wyniki badań własnych:

1. Podczas I etapu badań najwyższą wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie uzyskiwano przy wilgotności wynoszącej około 10%.
2. Wraz ze wzrostem początkowej wilgotności mieszanki cementogruntu następował wzrost efektu wzmocnienia zbrojeniem rozproszonym, który wynosił:
 - a. przy wilgotności 8% od 6,24% do 16,07%,
 - b. przy wilgotności 10% od 3,62% do 20,08%,
 - c. przy wilgotności 12% od 52,61% do 88,90%.
3. Efektywność wzmocnienia cementogruntu zbrojeniem rozproszonym ulegała osłabieniu wraz z upływem czasu, w przypadku serii C216 doprowadzając do zmniejszenia wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie:
 - a. po 1 dniu pielęgnacji od 18,21% do 65,93%,
 - b. po 3 dniach pielęgnacji od 18,65% do 46,53%,

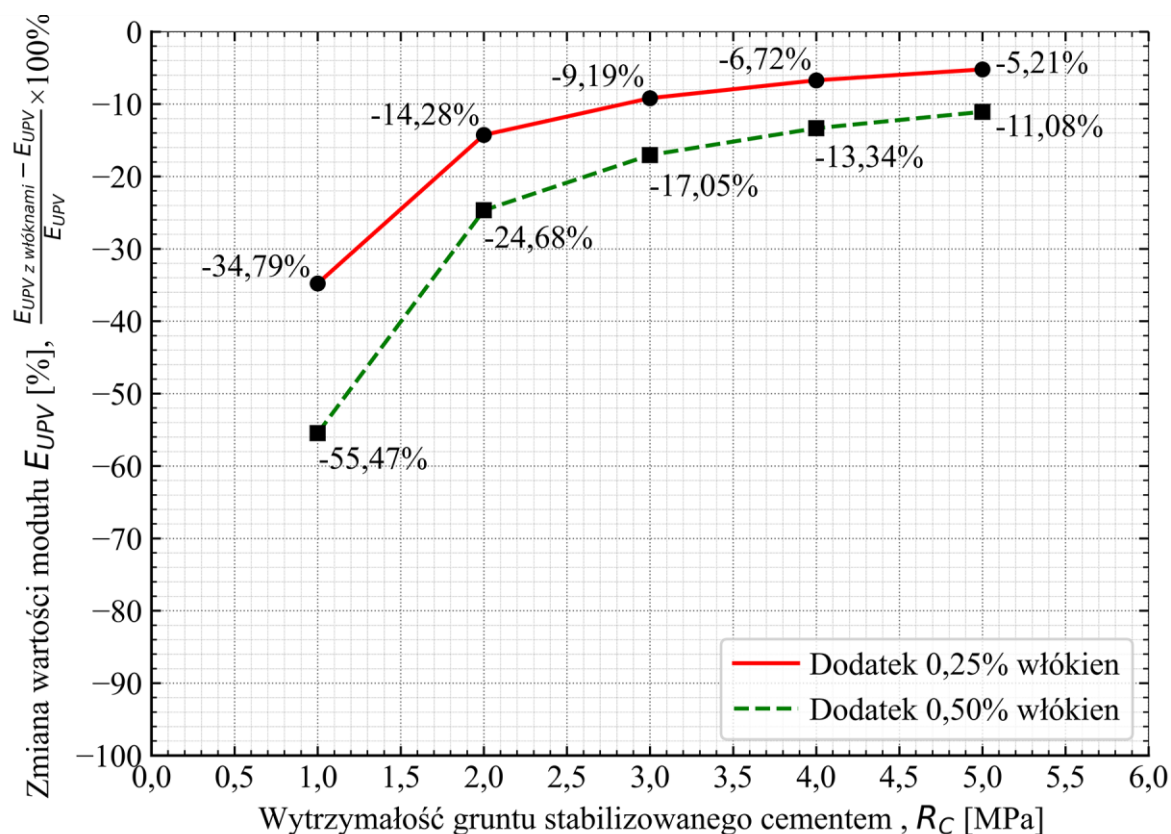
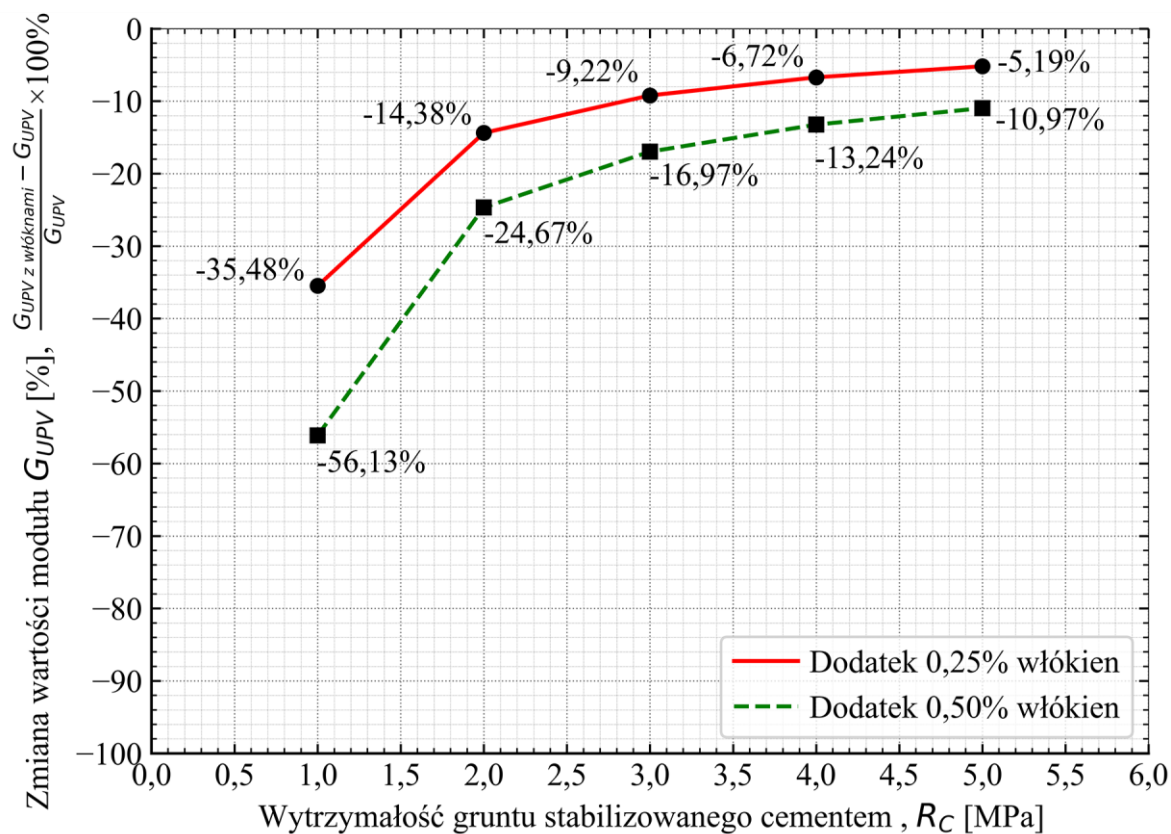
- c. po 7 dniach pielęgnacji od 8,56% do 30,54%,
 - d. po 14 dniach pielęgnacji od 2,84% do 36,74%,
 - e. po 28 dniach pielęgnacji od 5,59% do 25,45%,
 - f. po 56 dniach pielęgnacji od -0,14% do 24,78%.
4. W wyniku zastosowania włókien polipropylenowych nastąpił wzrost odporności na działanie wody w mieszankach zawierających 1%, 3% i 9% cementu. W pozostałych mieszankach nie odnotowano wzrostu odporności na działanie wody.
5. Istnieje bardzo silna zależność pomiędzy prędkością pulsów ultradźwiękowych a wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie cementogruntu, co opisano przy pomocy funkcji wykładniczych. Na rys. 5.13 przedstawiono zależności pomiędzy V_P a R_C a na rys. 5.14 przedstawiono zależności pomiędzy V_S a R_C :
 - a. $R_C = 0,13 \cdot e^{1,25V_P}$ dla $Z=0,00\%$,
 - b. $R_C = 0,17 \cdot e^{1,22V_P}$ dla $Z=0,25\%$,
 - c. $R_C = 0,24 \cdot e^{1,10V_P}$ dla $Z=0,50\%$,
 - d. $R_C = 0,13 \cdot e^{2,40V_S}$ dla $Z=0,00\%$,
 - e. $R_C = 0,17 \cdot e^{2,32V_S}$ dla $Z=0,25\%$,
 - f. $R_C = 0,24 \cdot e^{2,10V_S}$ dla $Z=0,50\%$.
6. Występuje bardzo silna zależność liniowa pomiędzy wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie cementogruntu a modułem E_{50} , co zostało przedstawione na rys. 5.11:
 - a. $E_{50} = 151,09 \cdot R_C - 32,57$ dla $Z=0,00\%$,
 - b. $E_{50} = 153,91 \cdot R_C - 78,16$ dla $Z=0,25\%$,
 - c. $E_{50} = 158,23 \cdot R_C - 133,63$ dla $Z=0,50\%$.
7. Zachodzi bardzo silna zależność pomiędzy wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie cementogruntu a modułem E_{UPV} , co zaprezentowano na rys. 5.15:
 - a. $E_{UPV} = 5,09 \cdot \ln(R_C) + 4,11$ dla $Z=0,00\%$,
 - b. $E_{UPV} = 5,58 \cdot \ln(R_C) + 2,68$ dla $Z=0,25\%$,
 - c. $E_{UPV} = 5,66 \cdot \ln(R_C) + 1,83$ dla $Z=0,50\%$.
8. Zaobserwowano bardzo silną korelację pomiędzy wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie cementogruntu a modułem G_{UPV} , co zaprezentowano na rys. 5.16:
 - a. $G_{UPV} = 1,96 \cdot \ln(R_C) + 1,55$ dla $Z=0,00\%$,
 - b. $G_{UPV} = 2,15 \cdot \ln(R_C) + 1,00$ dla $Z=0,25\%$,
 - c. $G_{UPV} = 2,18 \cdot \ln(R_C) + 0,68$ dla $Z=0,50\%$.

9. Dodanie włókien polipropylenowych do cementogruntu spowodowało zmniejszenie wartości modułów odkształceniowych (E_{50} , E_{UPV} , G_{UPV}). Efekt ten osłabiał się wraz ze wzrostem wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie. Dla wytrzymałości referencyjnych mieszczących się w przedziale od 1 MPa do 5 MPa zaobserwowano zmniejszenie wartości modułów E_{50} , E_{UPV} i G_{UPV} , co przedstawiono na rys. 8.1, rys. 8.2 i rys. 8.3:

- E_{50} od 4,35% do 36,08% dla $Z=0,25\%$,
- E_{50} od 9,04% do 79,24% dla $Z=0,50\%$,
- E_{UPV} od 5,21% do 34,79% dla $Z=0,25\%$,
- E_{UPV} od 11,08% do 55,47% dla $Z=0,50\%$,
- G_{UPV} od 5,19% do 35,48% dla $Z=0,25\%$,
- G_{UPV} od 10,97% do 56,13% dla $Z=0,50\%$.



Rys. 8.1 Procentowa zmiana wartości modułu E_{50} w wyniku zastosowania włókien.

Rys. 8.2 Procentowa zmiana wartości modułu E_{UPV} w wyniku zastosowania włókien.Rys. 8.3 Procentowa zmiana wartości modułu G_{UPV} w wyniku zastosowania włókien.

10. Na podstawie przeprowadzonych badań opracowano zależność empiryczną dla gruntu stabilizowanego z dodatkiem włókien polipropylenowych w postaci równania nr 6.52, które jest oryginalnym elementem pracy. Równanie pozwala prognozować wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie z średnim bezwzględnym błędem procentowym wynoszącym 14,52%, opierając się na znajomości objętości poszczególnych faz materiału:

$$\hat{R}_{C \text{ nr } 1} = 1436,96 \left[\frac{n (1 - Z_i^{0,53}) I^{-0,27}}{T_C^{0,10} C_i^{0,41}} \right]^{-2,56}$$

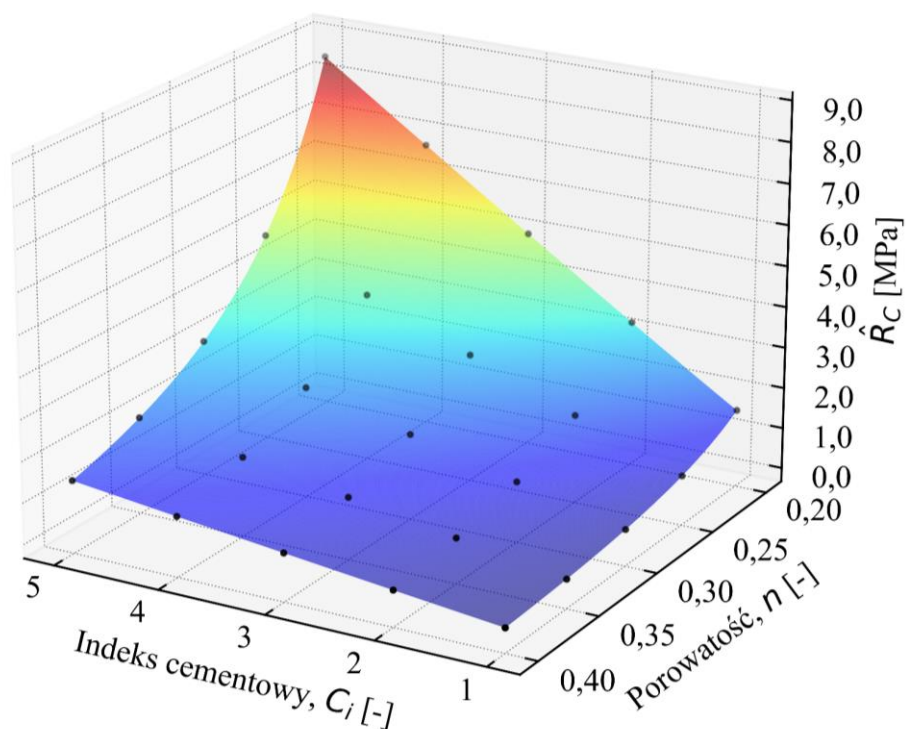
Zakres stosowalności zależności empirycznej:

1. zawartość cementu od 1% do 9%,
2. zawartość włókien od 0,00% do 0,50%,
3. okres utwardzania przy wilgotności optymalnej od 1 do 56 dni,
4. odporności na działanie wody w przedziale od 0,6 do 1,0.

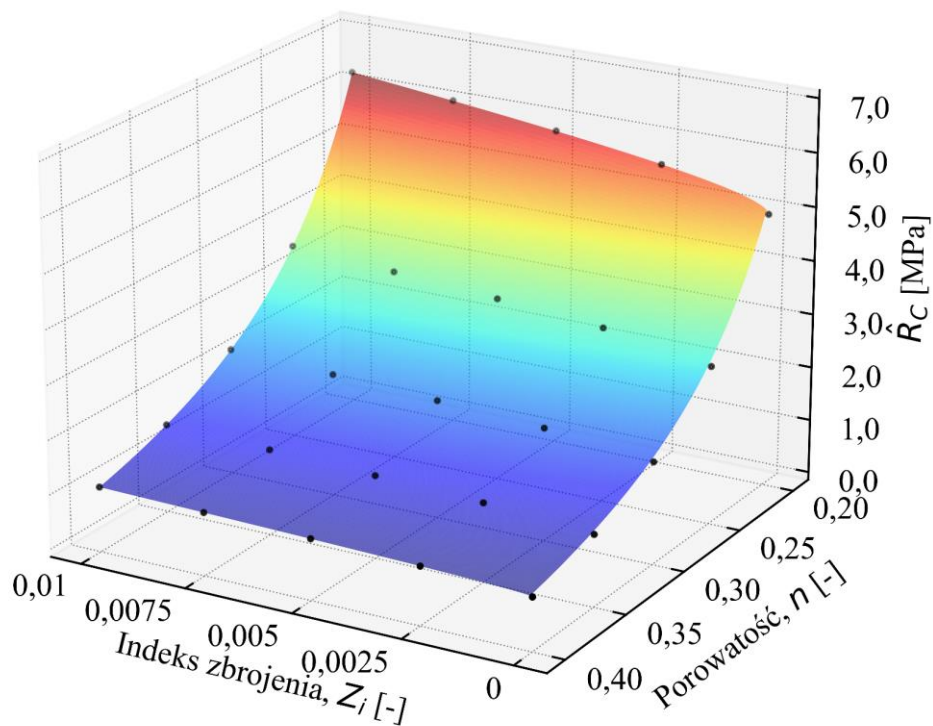
W celu lepszego zobrazowania wpływu poszczególnych zmiennych na obliczoną wartość wytrzymałości cementogruntu wyznaczono powierzchnie wzmocnienia. Powierzchnia przedstawiona na rys. 8.4 ukazuje, że wzrost indeksu cementowego prowadzi do liniowego wzmocnienia, przy czym tempo tego wzrostu zależy od porowatości mieszanki. Dalej na rys. 8.5 zaprezentowano powierzchnie wzmocnienia dla zmiennego indeksu zbrojeniowego, gdzie zaobserwowano nieliniowy charakter wzmocnienia. Z przedstawionego rysunku wynika, że dla indeksów zbrojeniowych równych 0,005 oraz 0,01 uzyskuje się wzrost wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie odpowiednio o 17,30% i 26,32%. Co istotne, procentowy wzrost wytrzymałości nie zależy od przyjętej porowatości mieszanki. Na rys. 8.6 przedstawiono rozwój wytrzymałości w czasie, który jest silnie związany z przyjętą porowatością. Jednakże analiza danych ukazuje, że w ujęciu znormalizowanym wzrost ten jest również niezależny od porowatości i wynosi:

1. $R_{C \text{ w } 7 \text{ dniu}}/R_{C \text{ w } 28 \text{ dniu}} = 0,70$,
2. $R_{C \text{ w } 14 \text{ dniu}}/R_{C \text{ w } 28 \text{ dniu}} = 0,84$,
3. $R_{C \text{ w } 56 \text{ dniu}}/R_{C \text{ w } 28 \text{ dniu}} = 1,19$.

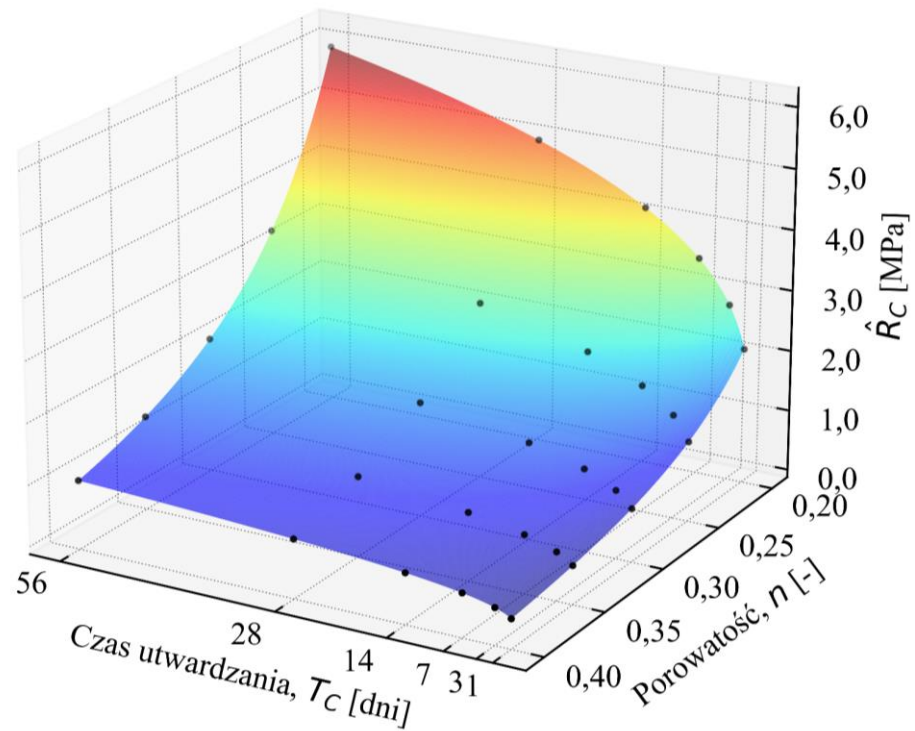
Na rys. 8.7 przedstawiono wpływ parametru I , odpowiedzialnego za uwzględnienie odporności na działanie wody, na wytrzymałość cementogruntu. Zaprezentowane dane wskazują na nieliniowy spadek wytrzymałości w miarę zmniejszania parametru I , wynoszący 29,79% dla $I = 0,6$; 21,88% dla $I = 0,7$; 14,31% dla $I = 0,8$; 7,03% dla $I = 0,9$.



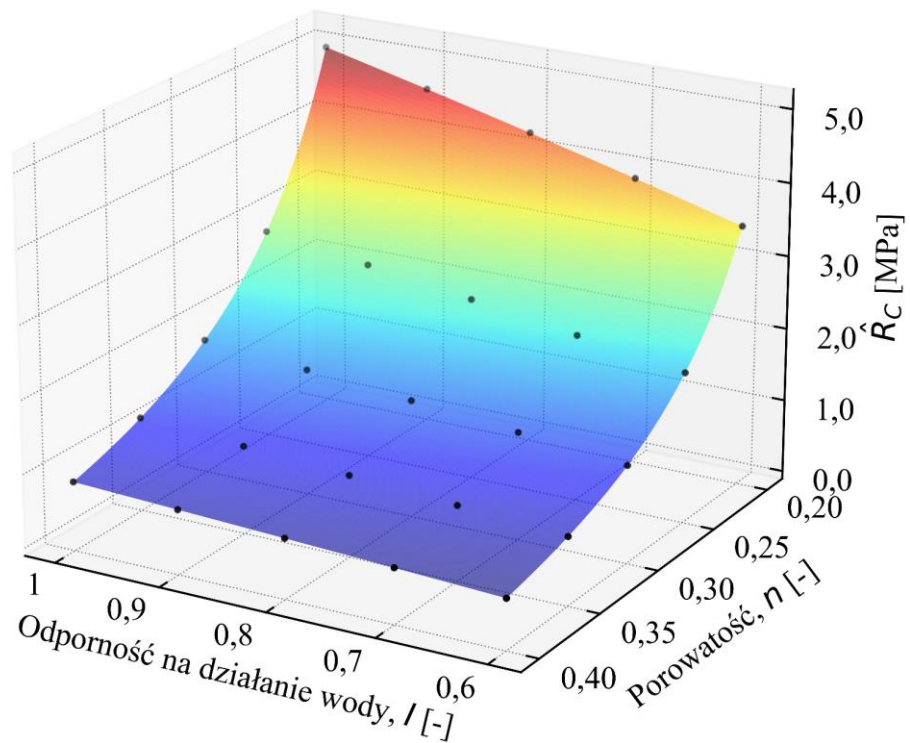
Rys. 8.4 Wpływ indeksu cementowego (C_i) i porowatości (n) na $\hat{R}_{C nr 1}$ po 28 dniach utwardzania bez zbrojenia rozproszonego.



Rys. 8.5 Wpływ indeksu zbrojenia (Z_i) i porowatości (n) na $\hat{R}_{C nr 1}$ dla 5% cementu po 28 dniach utwardzania.



Rys. 8.6 Wpływ czasu utwardzania (T_C) i porowatości (n) na $\hat{R}_{C\ nr\ 1}$ dla 5% cementu i bez zbrojenia rozproszonego.



Rys. 8.7 Wpływ odporności na działanie wody (I) i porowatości (n) na $\hat{R}_{C\ nr\ 1}$ dla 5% cementu i bez zbrojenia rozproszonego.

Przeprowadzona analiza stanowiła kluczowy element pracy badawczej, ponieważ umożliwiła potwierdzenie postawionej hipotezy badawczej, która brzmiała:

Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie gruntu stabilizowanego cementem z dodatkiem włókien polipropylenowych zależy od porowatości cementogruntu, objętości cementu i włókien, czasu utwardzania oraz odporności na działanie wody.

W celu rzetelnego zbadania tak sformułowanej hipotezy określono główny cel pracy, jak i szczegółowe cele, które umożliwiły dodatkowo zbadanie problematyki badawczej w szerszym spektrum. Dzięki temu było możliwe określenie wpływu włókien polipropylenowych nie tylko na wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie cementogruntu, ale również na parametry odkształceniowe.

Na podstawie zaprezentowanych wyników badań oraz opracowanej zależności należy uznać postawioną hipotezę badawczą za potwierdzoną.

8.2. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz przedstawionych wyników dotyczących wpływu zbrojenia rozproszonego na właściwości mechaniczne gruntu stabilizowanego cementem, a także w oparciu o przeprowadzoną analizę, sformułowano następujące wnioski:

1. Zaobserwowano, że podczas procesu przygotowywania mieszanek włókna polipropylenowe wykazywały tendencje do tworzenia lokalnych skupisk. Wraz ze wzrostem ich zawartości w mieszance efekt ten miał większą intensywność. Efekt został zminimalizowany poprzez rozdzielenie większych skupisk włókien na etapie ich dozowania.
2. Dla mieszanek cementogruntu sporządzonych na bazie gruntu nr 1, niezależnie od ilości spoiwa i włókien polipropylenowych, największą wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie uzyskano przy wilgotności wynoszącej około 10%. Uzyskane wyniki wskazują na możliwość zwiększenia wilgotności optymalnej mieszanki w stosunku do wilgotności optymalnej gruntu nr 1, która wynosiła 8.64%.
3. Próbkę cementogruntu o podwyższonej wilgotności początkowej, zawierającą 0,50% włókien polipropylenowych, wykazały wzrost wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie nawet o 88,90% w stosunku do próbek bez włókien. Wzrost efektywności wzmocnienia może umożliwić stabilizację gruntu o podwyższonej wilgotności

- w stanie naturalnym bez konieczności wcześniejszej modyfikacji gruntu lub też w ograniczonym zakresie.
4. Wpływ włókien polipropylenowych na jednoosiową wytrzymałość na ściskanie cementogruntu przy obniżonej zawartości wody w mieszankach jest niejednoznaczny. Dla przebadanych serii próbek, które zawierały 0,25% włókien polipropylenowych, odnotowano wzrost wytrzymałości w przedziale od 9,69% do 16,07% w stosunku do serii bez włókien. Jednak w seriach z 0,50% zawartością włókien, odnotowano nieznaczny wzrost wytrzymałości, który wynosił najwyżej 6,24% lub też odnotowano spadek wytrzymałości. Następnie wraz z dalszym zmniejszaniem wilgotności początkowej mieszanki, efekt wzmocnienia ulegał zmniejszeniu.
 5. W wyniku zastosowania włókien polipropylenowych nastąpił wzrost wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie, niezależnie od dnia badania, wyjątek stanowiła seria C216. Wzrost wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie wynikający z zastosowania włókien wykazywał niewielkie wahania podczas procesu utwardzania. Największe odchylenie od średniego przyrostu wytrzymałości w badanej mieszance zaobserwowano w serii C623, gdzie wyniosło ono 0,13 MPa. Jednak rozpatrując wzmocnienie w ujęciu procentowym, efekt wzmocnienia zmniejszał się wraz z upływem czasu utwardzania. Na tej podstawie można stwierdzić, że zastosowanie włókien polipropylenowych może przyczynić się do wcześniejszego osiągnięcia wymaganej wytrzymałości cementogruntu, co z kolei może umożliwić wcześniejsze obciążenie zagęszczonej mieszanki w warunkach terenowych.
 6. Na podstawie przeprowadzonych badań należy uznać, że zastosowanie włókien polipropylenowych nie wpływa istotnie na odporność gruntu stabilizowanego cementem na działanie wody. Po wyeliminowaniu serii odstających średnia wartość odporności na działanie wody wynosiła 0,76, niezależnie od zawartości zbrojenia rozproszonego. Największe zaobserwowane odchylenie od wartości średniej wyniosło 0,08.
 7. Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie cementogruntu można opisać funkcją potęgową, która zależy od porowatości, objętości spoiwa, wody i zbrojenia rozproszonego, a także okresu utwardzania i odporności na działanie wody. Wyznaczona zależność empiryczna nr 1, która została opisana równaniem nr 6.52, umożliwia oszacowanie niezbędnej ilości cementu i włókien polipropylenowych do osiągnięcia wymaganej klasy wytrzymałościowej cementogruntu.

8. Dodanie włókien polipropylenowych do gruntu stabilizowanego cementem prowadzi do zwiększenia wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie. Tym samym istnieje możliwość zmniejszenia ilości cementu w mieszance cementogruntu. Ilość niezbędnego cementu do osiągnięcia wymaganej wytrzymałości można wyznaczyć na podstawie indeksu cementowego, który z kolei można wyznaczyć przekształcając równanie nr 6.52. Na podstawie przeprowadzonego przekształcenia stwierdzono, że dla mieszanki o porowatości wynoszącej 30% oraz po 28 dniach utwardzania, zastosowanie 0,50% włókien polipropylenowych pozwoliło na zmniejszenie ilości niezbędnego spoiwa o 14,5%, przy zachowaniu wytrzymałości cementogruntu na poziomie 2,5 MPa.
9. Mając na uwadze, że zastosowanie zbrojenia rozproszonego ma na celu obniżenie zawartości spoiwa w mieszankach przy jednoczesnym zachowaniu wymaganej klasy wytrzymałościowej cementogruntu należy uznać, że w wyniku zastosowania włókien polipropylenowych następuje zmniejszenie wartości modułów odkształceniowych. Zgodnie z przeprowadzonymi badaniami następuje obniżenie wartości modułów E_{50} , E_{UPV} i G_{UPV} , jednak wraz ze wzrostem wytrzymałości gruntu stabilizowanego cementem obserwuje się mniejsze procentowe obniżenie wartości modułów.
10. Wartości modułów odkształceniowych, takich jak E_{50} , E_{UPV} i G_{UPV} , można oszacować na podstawie wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie cementogruntu, co przedstawiono na rys. 5.11, rys. 5.15 i rys. 5.16. Z uwagi na wysokie współczynniki determinacji wyznaczonych zależności oraz łatwość ich implementacji, takie pośrednie podejście można uznać za najbardziej adekwatne i uzasadnione. Dodatkowo należy podkreślić, że pomimo znajomości wartości modułów odkształceniowych może okazać się przydatna na etapie projektowym, to obecnie podstawowym kryterium decydującym o przydatności gruntu stabilizowanego jest wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie.
11. Wartości modułów odkształceniowych, takich jak E_{UPV} i G_{UPV} , można określić na podstawie znajomości modułu E_{50} , co przedstawiono na rys. 5.17 i rys. 5.18. Zawartość włókien polipropylenowych nie wpływa istotnie na zależność pomiędzy modułami oznaczonymi podczas badania jednoosiowego ściskania a modułami określonymi przy pomocy betonoskopu.
12. Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie gruntu stabilizowanego można określić na podstawie prędkości fal ultradźwiękowych, w tym fali podłużnej i poprzecznej, co

pokazano na rys. 5.13 i rys. 5.14. Jednak włókna polipropylenowe mogą wyraźnie wpływać na odczytywane wytrzymałości gruntu stabilizowanego. W związku z tym podczas określania wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie należy dobrać odpowiednią zależność. Taka metoda może stanowić alternatywę dla klasycznego badania jednoosiowego ściskania. Niewątpliwą zaletą tej metody jest możliwość określenia wytrzymałości cementogruntu w warunkach terenowych.

13. Na podstawie przeprowadzonych badań kontrolnych stwierdzono, że opracowane równanie nr. 6.52 może być z powodzeniem wykorzystane do prognozowania wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie cementogruntu wytworzonego zarówno na bazie gruntów spoistych, jak i niespoistych.

Zaprezentowane wyniki badań i przeprowadzona analiza stanowią istotny wkład w dziedzinę nauk Inżynierijno – Technicznych, w dyscyplinie Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport. Do najważniejszych elementów pracy należy zaliczyć:

1. opracowanie zależności empirycznej umożliwiającej prognozowanie wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie gruntu stabilizowanego z i bez dodatku włókien polipropylenowych,
2. wyznaczenie zależności pomiędzy wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie a modułami odkształceniowymi dla gruntu stabilizowanego z i bez dodatku włókien polipropylenowych,
3. wyznaczenie zależności pomiędzy prędkością fali podłużnej i poprzecznej a wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie gruntu stabilizowanego z i bez dodatku włókien polipropylenowych,
4. wyznaczenie zależności pomiędzy modułami statycznymi a modułami sprężystości i ścinania wyznaczonymi metodą ultradźwiękową,
5. zbadanie wpływu włókien polipropylenowych na właściwości mechaniczne gruntu stabilizowanego cementem.

8.3. Dalszy kierunek prac

W celu poszerzenia wiedzy z zakresu wpływu włókien polipropylenowych na właściwości mechaniczne gruntów stabilizowanych oraz opracowania uniwersalnego równania do prognozowania wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie należy kontynuować prace badawcze. Szczególną uwagę należy poświęcić poniższym zagadnieniom:

1. Kontynuacja prac badawczych z uwzględnieniem różnych rodzajów spoiw umożliwi rozszerzenie opracowanego równania nr. 6.52 o dodatkowy współczynnik, zależny od rodzaju zastosowanego spoiwa oraz jego klasy wytrzymałościowej.
2. Prowadzenie dalszych badań nad wpływem rodzaju i długości zbrojenia rozproszonego pozwoli na rozbudowę opracowanego równania nr. 6.52.
3. Należy przeprowadzić serie badań, które odpowiedzą na pytanie, jak wpływają włókna polipropylenowe na właściwości mechaniczne cementogruntu w funkcji czasu przy zmiennej wilgotności początkowej. Na podstawie takich badań będzie możliwość dokonania korekty współczynników w opracowanym równaniu nr. 6.52.
4. Należy określić wpływ włókien polipropylenowych na mrozoodporność gruntów stabilizowanych cementem.
5. Istnieje uzasadniona konieczność przeprowadzenia badań terenowych, które pozwolą zbadać rozkład zbrojenia w warunkach polowych, co umożliwi ocenę skuteczność ich wymieszania z gruntem i cementem w warunkach *in-situ*. Jednocześnie pozwoli to na wskazanie różnic pomiędzy efektem wzmocnienia w warunkach laboratoryjnych i polowych.
6. Kontynuacja badań z uwzględnieniem efektu skali oraz porównanie wyników z badaniami terenowymi pozwoli zrozumieć jak długość i ilość włókien oraz wymiary badanej próbki wpływają na właściwości mechaniczne cementogruntu.

Literatura

1. Abdullah, H.H. et al.: Review of Fly-Ash-Based Geopolymers for Soil Stabilisation with Special Reference to Clay. *Geosciences*. 10, 7, 249 (2020). <https://doi.org/10.3390/geosciences10070249>.
2. ACI Committee 230: State-of-the-Art Report on Soil Cement. *ACI Materials Journal*. 87, 4, (1990). <https://doi.org/10.14359/2140>.
3. Afrin, H.: A Review on Different Types Soil Stabilization Techniques. *IJTET*. 3, 2, 19 (2017). <https://doi.org/10.11648/j.ijtet.20170302.12>.
4. Ahmad, F. et al.: Performance evaluation of silty sand reinforced with fibres. *Geotextiles and Geomembranes*. 28, 1, 93–99 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2009.09.017>.
5. Al-Atroush, M.E., Sebaey, T.A.: Stabilization of expansive soil using hydrophobic polyurethane foam: A review. *Transportation Geotechnics*. 27, 100494 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100494>.
6. Alhokabi, A. et al.: The Effect of POFA-Gypsum Binary Mixture Replacement on the Performance of Mechanical and Microstructural Properties Enhancements of Clays. *Materials*. 15, 4, 1532 (2022). <https://doi.org/10.3390/ma15041532>.
7. Andrew, R.M.: Global CO₂ emissions from cement production, 1928–2018. *EARTH SYSTEM SCIENCE DATA*. 11, 4, 1675–1710 (2019). <https://doi.org/10.5194/essd-11-1675-2019>.
8. Bapat, J.D.: Mineral admixtures in cement and concrete. CRC press, Boca Raton (Fla.) (2012).
9. Barman, D., Dash, S.K.: Stabilization of expansive soils using chemical additives: A review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 14, 4, 1319–1342 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.02.011>.
10. Bell, F.G.: Cement stabilization and Clay Soils, with Examples. *Environmental & Engineering Geoscience*. 1, 2, 139–151 (1995). <https://doi.org/10.2113/gseengeosci.i.2.139>.
11. Bell, F.G.: Engineering treatment of soils. E & FN Spon, London (1993).
12. Bellezza, I., Fratalocchi, E.: Effectiveness of cement on hydraulic conductivity of compacted soil–cement mixtures. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*. 10, 2, 77–90 (2006). <https://doi.org/10.1680/grim.2006.10.2.77>.
13. Bergado, D.T. et al.: Soft Ground Improvement in Lowland and other Environments. ASCE PRESS, New York, USA (1996).
14. Bert Myers: ROAD STABILIZATION WITH PORTLAND CEMENT. ENGINEERING EXTENSION DEPARTMENT. 93–100 (1939).
15. Bessaim, M.M. et al.: Effect of quick lime on physicochemical properties of clay soil. *MATEC Web Conf*. 149, 02065 (2018). <https://doi.org/10.1051/matec-conf/201814902065>.

16. Bhardwaj, A. et al.: Influence of Cement and Polyester Fibres on Compaction and CBR Value of Clayey Soil. Indian Geotechnical Conference 2017 GeoNEst, IIT Guwahati, India (2017).
17. Bhat, G., Kandagor, V.: 1 - Synthetic polymer fibers and their processing requirements. In: Zhang, D. (ed.) *Advances in Filament Yarn Spinning of Textiles and Polymers*. pp. 3–30 Woodhead Publishing (2014). <https://doi.org/10.1533/9780857099174.1.3>.
18. Bi, J., Chian, S.C.: Modelling of three-phase strength development of ordinary Portland cement- and Portland blast-furnace cement-stabilised clay. *Géotechnique*. 70, 1, 80–89 (2020). <https://doi.org/10.1680/jgeot.18.P.087>.
19. Bielenia, C.: Stabilizacja gliny w praktyce drogowej ostatniej doby. *Wiadomości drogowe*. 140–141, 601–613 (1938).
20. Bishop, A.W.: Progressive Failure - with Special Reference to the Mechanism Causing it. Presented at the Proceedings of the Geotechnical Conference on Shear Strength Properties of Natural Soils and Rocks , Oslo (1967).
21. Brand, A.S. et al.: Stabilization of a Clayey Soil with Ladle Metallurgy Furnace Slag Fines. *Materials*. 13, 19, 4251 (2020). <https://doi.org/10.3390/ma13194251>.
22. BRE, UK: EuroSoilStab: Development of design and construction methods to stabilise soft organic soil, Design Guide Soft Soil Stabilisation. CT97-0351 Project No.: BE 96-3177, (2002).
23. Cai, Y. et al.: Effect of polypropylene fibre and lime admixture on engineering properties of clayey soil. *Engineering Geology*. 87, 3–4, 230–240 (2006). <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.07.007>.
24. Chan, C.M., Ch'ng, S.S.: Preliminary Study of S-Wave Velocity and Unconfined Compressive Strength of Cement- Palf Stabilised Kaolin. *International Journal of Integrated Engineering*. 2, 2, (2010).
25. Charles, J.A.: Ground improvement: the interaction of engineering science and experience-based technology. *Géotechnique*. 52, 7, 527–532 (2002). <https://doi.org/10.1680/geot.52.7.527.38748>.
26. Chen, M. et al.: Laboratory evaluation on the effectiveness of polypropylene fibers on the strength of fiber-reinforced and cement-stabilized Shanghai soft clay. *Geotextiles and Geomembranes*. 43, 6, 515–523 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.geotex-mem.2015.05.004>.
27. Chittoori, B.C.S.: CLAY MINERALOGY EFFECTS ON LONG-TERM PERFORMANCE OF CHEMICALLY TREATED EXPANSIVE CLAYS. THE UNIVERSITY OF TEXAS AT ARLINGTON (2008).
28. Chmielewski, R., Waliszewski, D.: Wpływ ciężaru warstw konstrukcyjnych nawierzchni na wartość wskaźnika nośności CBR. *ACTA SCIENTIARUM POLONORUM - Architectura Budownictwo*. 15, 2, 46–54 (2016).
29. Chu, J. et al.: Construction processes—State of the art report. Presented at the Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering , Alexandria, Egypt October (2009). <https://doi.org/10.3233/978-1-60750-031-5-3006>.

30. Consoli, N.C. et al.: A general relationship to estimate strength of fibre-reinforced cemented fine-grained soils. *Geosynthetics International*. 24, 4, 435–441 (2017). <https://doi.org/10.1680/jgein.17.00006>.
31. Consoli, N.C. et al.: Effect of fiber-reinforcement on the strength of cemented soils. *Geotextiles and Geomembranes*. 28, 4, 344–351 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2010.01.005>.
32. Consoli, N.C. et al.: Fiber reinforcement effects on sand considering a wide cementation range. *Geotextiles and Geomembranes*. 27, 3, 196–203 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2008.11.005>.
33. Consoli, N.C. et al.: Fibre-reinforced sand-coal fly ash-lime-NaCl blends under severe environmental conditions. *Geosynthetics International*. 26, 5, 525–538 (2019). <https://doi.org/10.1680/jgein.19.00039>.
34. Consoli, N.C. et al.: Influence of Fiber and Cement Addition on Behavior of Sandy Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 124, 12, 1211–1214 (1998). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1998\)124:12\(1211\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1998)124:12(1211)).
35. Consoli, N.C. et al.: Key parameter for tensile and compressive strength of fibre-reinforced soil–lime mixtures. *Geosynthetics International*. 19, 5, 409–414 (2012). <https://doi.org/10.1680/jgein.12.00026>.
36. Consoli, N.C. et al.: Key Parameters for Strength Control of Artificially Cemented Soils. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 133, 2, 197–205 (2007). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2007\)133:2\(197\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:2(197)).
37. Consoli, N.C. et al.: Parameters controlling stiffness and strength of artificially cemented soils. *Géotechnique*. 62, 2, 177–183 (2012). <https://doi.org/10.1680/geot.8.P.084>.
38. Correia, A.A.S. et al.: Effect of polypropylene fibres on the compressive and tensile strength of a soft soil, artificially stabilised with binders. *Geotextiles and Geomembranes*. 43, 2, 97–106 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2014.11.008>.
39. Cristelo, N. et al.: Influence of discrete fibre reinforcement on the uniaxial compression response and seismic wave velocity of a cement-stabilised sandy-clay. *Geotextiles and Geomembranes*. 43, 1, 1–13 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2014.11.007>.
40. Croft, J.B.: The Influence of Soil Mineralogical Composition on Cement Stabilization. *Géotechnique*. 17, 2, 119–135 (1967). <https://doi.org/10.1680/geot.1967.17.2.119>.
41. Danish, A., Ozbakkaloglu, T.: Fiber classifications and physical and mechanical properties of different fibers used in alkali-activated composites. In: *Advanced Fiber-Reinforced Alkali-Activated Composites*. pp. 23–58 Elsevier (2023). <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15301-3.00016-6>.
42. Dass, R.N. et al.: Tensile stress-strain behavior of lightly cemented sand. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 30, 7, 711–714 (1993). [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(93\)90011-2](https://doi.org/10.1016/0148-9062(93)90011-2).
43. David Suits, L. et al.: Properties of Singapore Marine Clays Improved by Cement Mixing. *Geotech. Test. J.* 25, 4, 9061 (2002). <https://doi.org/10.1520/GTJ11295J>.

44. Demski, T.: Liniowość metody oznaczania zawartości substancji na przykładzie chromatografu. Presented at the Materiały na seminarium organizowane przez StatSoft Polska w październiku 2011 r. w Warszawie „Walidacja, biegłość i inne zagadnienia analizy danych w laboratorium”, Kraków (2011).
45. Edil, T.B. et al.: Stabilizing Soft Fine-Grained Soils with Fly Ash. *J. Mater. Civ. Eng.* 18, 2, 283–294 (2006). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2006\)18:2\(283\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:2(283)).
46. Elhakim, A.F.: The use of point load test for Dubai weak calcareous sandstones. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 7, 4, 452–457 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.06.003>.
47. Esposito, D., Esposito, F.: Wprowadzenie do uczenia maszynowego według Esposito. APN Promise, Warszawa (2020).
48. Fang, H.-Y. ed: *Foundation Engineering Handbook*. Springer US, Boston, MA (1991). <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3928-5>.
49. Fatahi, B. et al.: Mechanical characteristics of soft clay treated with fibre and cement. *Geosynthetics International*. 19, 3, 252–262 (2012). <https://doi.org/10.1680/gein.12.00012>.
50. Fatahi, B. et al.: Small-strain properties of soft clay treated with fibre and cement. *Geosynthetics International*. 20, 4, 286–300 (2013). <https://doi.org/10.1680/gein.13.00018>.
51. Festugato, L. et al.: Fibre-reinforced cemented soils compressive and tensile strength assessment as a function of filament length. *Geotextiles and Geomembranes*. 45, 1, 77–82 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2016.09.001>.
52. Firoozi, A.A. et al.: Fundamentals of soil stabilization. *Geo-Engineering*. 8, 1, 26 (2017). <https://doi.org/10.1186/s40703-017-0064-9>.
53. Fondjo, A.A. et al.: Stabilization of Expansive Soils Using Mechanical and Chemical Methods: A Comprehensive Review. *cea*. 9, 5, 1295–1308 (2021). <https://doi.org/10.13189/cea.2021.090503>.
54. Gajewska, B., Kłosiński, B.: Rozwój metod wzmacniania podłoża gruntowego. Presented at the Seminarium IBDiM i PZWFS, WZMACNIANIE PODŁOŻA I FUNDAMENTÓW, Warszawa March (2011).
55. Gelder, C., Fowmes, G.J.: Mixing and compaction of fibre- and lime-modified cohesive soil. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*. 169, 2, 98–108 (2016). <https://doi.org/10.1680/grim.14.00025>.
56. Ghavami, K. et al.: Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres. *Cement and Concrete Composites*. 21, 1, 39–48 (1999). [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(98\)00033-X](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(98)00033-X).
57. Ghiassian, H. et al.: Dynamic Performance of Toyoura Sand Reinforced with Randomly Distributed Carpet Waste Strips. In: *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV*. pp. 1–13 American Society of Civil Engineers, Sacramento, California, United States (2008). [https://doi.org/10.1061/40975\(318\)44](https://doi.org/10.1061/40975(318)44).

58. Gowthaman, S. et al.: A State-of-the-Art Review on Soil Reinforcement Technology Using Natural Plant Fiber Materials: Past Findings, Present Trends and Future Directions. *Materials*. 11, 4, 553 (2018). <https://doi.org/10.3390/ma11040553>.
59. Gray, D.H., Al-Refeai, T.: Behavior of Fabric-Versus Fiber-Reinforced Sand. *J. Geotech. Engrg.* 112, 8, 804–820 (1986). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1986\)112:8\(804\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1986)112:8(804)).
60. Gray, D.H., Maher, M.H.: Admixture stabilization of sands with random fibers. In: *Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. pp. 1363–1366, Rio de Janeiro, Brazil (1989).
61. Grim, R.E.: *Clay Mineralogy*. McGraw-Hill, New York, USA (1968).
62. Gupta, D., Kumar, A.: Strength Characterization of Cement Stabilized and Fiber Reinforced Clay–Pond Ash Mixes. *Int. J. of Geosynth. and Ground Eng.* 2, 4, 32 (2016). <https://doi.org/10.1007/s40891-016-0069-z>.
63. Hamidi, A., Hooresfand, M.: Effect of fiber reinforcement on triaxial shear behavior of cement treated sand. *Geotextiles and Geomembranes*. 36, 1–9 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2012.10.005>.
64. Hampton, M.B., Edil T. B.: Strength gain of organic ground with cement-type binders. *Geotech. Spec. Publ.*, no. 81, pp. 135–148, (1998).
65. Han, J.: *Principles and practice of Ground Improvement*. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, USA (2015).
66. Hausmann, M.R.: *Engineering Principles of Ground Modification*. McGraw-Hill, New York, USA (1990).
67. Heidarizadeh, Y. et al.: Small Strain Stiffness Properties of Cement-Stabilized Sand Reinforced with Polypropylene Fibre. *Soil Mech Found Eng.* 59, 2, 148–153 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11204-022-09795-7>.
68. Hejazi, S.M. et al.: A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. *Construction and Building Materials*. 30, 100–116 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.045>.
69. Hicks, R.G.: *Alaska Soil Stabilization Design Guide*. (2002)
70. Hiemenz, P.C., Lodge, T.P.: *Polymer chemistry*. CRC Press, Boca Raton (2007).
71. Horpibulsuk, S. et al.: Analysis of strength development in cement-stabilized silty clay from microstructural considerations. *Construction and Building Materials*. 24, 10, 2011–2021 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.011>.
72. Horpibulsuk, S. et al.: Clay–Water/Cement Ratio Identity for Cement Admixed Soft Clays. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 131, 2, 187–192 (2005). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:2\(187\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:2(187)).
73. Hossain, Md.U. et al.: Evaluating the environmental impacts of stabilization and solidification technologies for managing hazardous wastes through life cycle assessment: A case study of Hong Kong. *Environment International*. 145, 106139 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106139>.

74. Ismail, H., Chung, F.L.: Partial Replacement of Silica by White Rice Husk Ash in Natural Rubber Compounds : The Effects of Bonding Agents. *Iranian Polymer Journal*. 7, 4, 255–261 (1998).
75. Jamshidi, R. et al.: Experimental evaluation of dynamic deformation characteristics of sheet pile retaining walls with fiber reinforced backfill. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 30, 6, 438–446 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2009.12.017>.
76. Jiang, H. et al.: Relationship between ultrasonic pulse velocity and uniaxial compressive strength for cemented paste backfill with alkali-activated slag. *Nondestructive Testing and Evaluation*. 35, 4, 359–377 (2020). <https://doi.org/10.1080/10589759.2019.1679140>.
77. Jones, R.G. ed: *Compendium of polymer terminology and nomenclature: IUPAC recommendations*, 2008. RSC Pub. : IUPAC, Cambridge (2009).
78. Kalipcilar, Irem et al.: Assessment of the effect of sulfate attack on cement stabilized montmorillonite. *Geomechanics and Engineering*. 10, 6, 807–826 (2016). <https://doi.org/10.12989/GAE.2016.10.6.807>.
79. Kang, G. et al.: Strength and stiffness of cement-treated marine dredged clay at various curing stages. *Construction and Building Materials*. 132, 71–84 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.124>.
80. Kapogianni, E.: Geotechnical Structures in the Ancient World. The Case of the Ziggurat of Ur in Mesopotamia. In: *12th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions*. CIMNE (2021). <https://doi.org/10.23967/sahc.2021.122>.
81. Karbownik, I.: *Modyfikacja włókien z zastosowaniem wybranych technik i nanotechnologii*. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź (2016).
82. Kim, Y. et al.: Stabilization of a residual granitic soil using various new green binders. *Construction and Building Materials*. 223, 724–735 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.019>.
83. Kłosiński, B. et al.: *Wytyczne wzmacniania podłoża gruntowego w budownictwie drogowym*. INSTYTUT BADAWCZY DRÓG I MOSTÓW, Warszawa (2002).
84. Kłysz, S.: *PODSTAWY WYTRZYMAŁOŚCI MATERIAŁÓW*. Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, Warszawa (2015).
85. Kumar, A., Gupta, D.: Behavior of cement-stabilized fiber-reinforced pond ash, rice husk ash–soil mixtures. *Geotextiles and Geomembranes*. 44, 3, 466–474 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2015.07.010>.
86. Kumar, S., Singh, D.: Prediction of UCS and CBR behavior of fiber-reinforced municipal solid waste incinerator bottom ash composites using experimental and machine learning methods. *Construction and Building Materials*. 367, 130230 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130230>.
87. Kurdowski, W.: *Chemia cementu i betonu*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa (2010).
88. Kutanaei, S.S., Choobbasti, A.J.: Prediction of combined effects of fibers and cement on the mechanical properties of sand using particle swarm optimization algorithm.

- Journal of Adhesion Science and Technology. 29, 6, 487–501 (2015). <https://doi.org/10.1080/01694243.2014.995343>.
89. Langade, S.W. et al.: EFFECTS OF POLYPROPYLENE FIBRE ON CEMENT STABILIZED SOIL. International Journal of Civil Engineering and Technology. 10, 02, 1355–1364 (2019).
 90. Lee, F.-H. et al.: Strength and Modulus of Marine Clay-Cement Mixes. J. Geotech. Geoenviron. Eng. 131, 2, 178–186 (2005). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:2\(178\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:2(178)).
 91. Little, D.N. et al.: Cementitious Stabilization. Transportation Research Board. 7 (2000).
 92. Lorenzo, G.A., Bergado, D.T.: Fundamental Characteristics of Cement-Admixed Clay in Deep Mixing. J. Mater. Civ. Eng. 18, 2, 161–174 (2006). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2006\)18:2\(161\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:2(161)).
 93. Lukiantchuki, J.A. et al.: Geotechnical Behavior of Construction Waste (CW) as a Partial Replacement of a Lateritic Soil in Fiber-Reinforced Cement Mixtures. Geotech Geol Eng. 39, 2, 919–942 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01533-w>.
 94. Madej, J.: Ulepszanie podłoża. Terminologia i klasyfikacja metod. Inżynieria Morska i Geotechnika. 3, 525–528 (2015).
 95. Maher, M.H.: Static and dynamic force response of sands reinforced with discrete, randomly distributed fibers. University of Michigan (1988).
 96. Maher, M.H., Gray, D.H.: Static Response of Sands Reinforced with Randomly Distributed Fibers. Journal of Geotechnical Engineering. 116, 11, 1661–1677 (1990). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1990\)116:11\(1661\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1990)116:11(1661)).
 97. Marandi, S.M. et al.: Strength and Ductility of Randomly Distributed Palm Fibers Reinforced Silty-Sand Soils. American J. of Applied Sciences. 5, 3, 209–220 (2008). <https://doi.org/10.3844/ajassp.2008.209.220>.
 98. Mitchell, J.K.: Soil improvement—State-of-the-art report. Presented at the Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm (1981).
 99. Mitchell, J.K., Soga, K.: Fundamentals of soil behavior. Wiley, Hoboken, NJ (2005).
 100. Mitchell, J.M., Jardine, F.M.: A guide to ground treatment. CIRIA, London (2002).
 101. Miturski, M. et al.: Effect of Dispersed Reinforcement on Ultrasonic Pulse Velocity in Stabilized Soil. Materials. 14, 22, 6951 (2021). <https://doi.org/10.3390/ma14226951>.
 102. Miturski, M. et al.: Influence of Dispersed Reinforcement on Mechanical Properties of Stabilized Soil. Materials. 14, 20, 5982 (2021). <https://doi.org/10.3390/ma14205982>.
 103. Moon, S.-W. et al.: Effect of fine particles on strength and stiffness of cement treated sand. Granular Matter. 22, 1, 9 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10035-019-0975-6>.
 104. Muntohar, A.S. et al.: Engineering Properties of Silty Soil Stabilized with Lime and Rice Husk Ash and Reinforced with Waste Plastic Fiber. J. Mater. Civ. Eng. 25, 9, 1260–1270 (2013). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000659](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000659).

105. National Cooperative Highway Research Program et al.: Recommended Practice for Stabilization of Subgrade Soils and Base Materials. Transportation Research Board, Washington, D.C. (2009). <https://doi.org/10.17226/22999>.
106. Nelson, J.D., Miller, D.J.: Expansive soils: problems and practice in foundation and pavement engineering. J. Wiley, New York (1992).
107. Neville, A.M.: Properties of concrete. Pearson, Harlow Munich (2011).
108. Niziurska, M.: Wpływ węglanu litu na proces hydratacji cementu glinowego i właściwości zapraw kompozytowych. AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA, Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki Katedra Technologii Materiałów Budowlanych (2019).
109. Noble, D.F., Plaster, R.W.: Reactions in Portland cement-clay mixtures : final report. VHRC 70-R13, (1970).
110. Olgun, M.: Effects of polypropylene fiber inclusion on the strength and volume change characteristics of cement-fly ash stabilized clay soil. Geosynthetics International. 20, 4, 263–275 (2013). <https://doi.org/10.1680/gein.13.00016>.
111. Ouhadi, V.Rezo.: The Role of Mari Components and Ettringite on the Stability of Stabilized Mari. McGill University, Department of . Civil Engineering and Applied Mechanics (1997).
112. Pasupuleti, V.K.R., Kolluru, S.K.: Effect of Fiber on Fly-Ash Stabilized Sub Grade Layer Thickness. International Journal of Engineering and Technology. 4, 3, (2012).
113. Patel, A.: Soil stabilization. In: Geotechnical Investigations and Improvement of Ground Conditions. pp. 19–27 Elsevier (2019). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817048-9.00003-2>.
114. Pedarla, A. et al.: Influence of Mineralogy and Plasticity Index on the Stabilization Effectiveness of Expansive Clays. Transportation Research Record. 2212, 1, 91–99 (2011). <https://doi.org/10.3141/2212-10>.
115. Petry, T.M., Little, D.N.: Update on Sulfate-Induced Heave in Treated Clays; Problematic Sulfate Levels. J. Transport. Res. Board, 1362. 51–55 (1992).
116. Pham, T.A. et al.: A new index for the strength analysis and prediction of cement-mixed soils. European Journal of Environmental and Civil Engineering. 27, 4, 1512–1534 (2023). <https://doi.org/10.1080/19648189.2022.2086929>.
117. Por, S. et al.: Deformation characteristics and stress responses of cement-treated expansive clay under confined one-dimensional swelling. Applied Clay Science. 146, 316–324 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.06.022>.
118. Prusinski, J.R., Bhattacharja, S.: Effectiveness of Portland Cement and Lime in Stabilizing Clay Soils. Transportation Research Record. 1652, 1, 215–227 (1999). <https://doi.org/10.3141/1652-28>.
119. Rabek, J.F.: Współczesna wiedza o polimerach. Tom 2. Polimery naturalne i syntetyczne, otrzymywanie i zastosowanie. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa (2017).
120. Rachet, G.: Dictionnaire de l'archéologie. Ed. Robert Laffont, S.A., Paris (1983)

121. Radwan, M.K.H. et al.: A Study of the Strength Performance of Peat Soil: A Modified Cement-Based Stabilization Agent Using Fly Ash and Polypropylene Fiber. *Polymers*. 13, 23, 4059 (2021). <https://doi.org/10.3390/polym13234059>.
122. Rafalski, L. et al.: Ochrona przeciwmrozowa nawierzchni drogowych na przykładzie wybranych krajów. *Drognictwo*. 2, 39–45 (2014).
123. Rafalski, L.: *PODBUDOWY DROGOWE*. INSTYTUT BADAWCZY DRÓG I MOSTÓW, Warszawa (2007).
124. Rathmayer, H.G., Saari, K.H.O.: Improvement of Ground: Proceedings of the Eighth European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. A.A. Balkema, Helsinki (1983).
125. Rauch, A.F. et al.: Measured Effects of Liquid Soil Stabilizers on Engineering Properties of Clay. *Transportation Research Record*. 1787, 1, 33–41 (2002). <https://doi.org/10.3141/1787-04>.
126. Ręklewski, M.: *Statystyka opisowa: teoria i przykłady*. Wydawnictwo Państwowej Uczelni Zawodowej we Włocławku, Włocławek (2020).
127. Rios, S., Viana da Fonseca, A.: Porosity/cement index to evaluate geomechanical properties of an artificial cemented soil. Presented at the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: Challenges and Innovations in Geotechnics, ICSMGE 2013, Paryż (2013).
128. Robertson, J. et al.: *Forensic Examination of Fibres*. CRC Press, Taylor & Francis Group (2017).
129. Rogalska, M.: *Wieloczynnikowe modele w prognozowaniu czasu procesów budowlanych*. Politechnika Lubelska, Lublin (2016).
130. Román Martínez, C. et al.: Strength, Stiffness, and Microstructure of Stabilized Marine Clay-Crushed Limestone Waste Blends: Insight on Characterization through Porosity-to-Cement Index. *Materials*. 16, 14, 4983 (2023). <https://doi.org/10.3390/ma16144983>.
131. Rychlewski, P.: Wzmacnianie gruntów pod nasypami infrastruktury komunikacyjnej. *GDMT*. 52, (2015).
132. Rychlewski, P.: Wzmacnianie podłoża gruntowego pod inwestycje infrastrukturalne. *Materiały Budowlane*. 3, 6–8 (2018). <https://doi.org/10.15199/33.2018.03.02>.
133. Ryszard, K.: Wpływ gezy na proces hydratacji cementów i ich właściwości. *AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA, Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki Katedra Technologii Materiałów Budowlanych* (2017).
134. Safdar, M. et al.: Effect of Fiber and Cement Additives on the Small-Strain Stiffness Behavior of Toyoura Sand. *Sustainability*. 12, 24, 10468 (2020). <https://doi.org/10.3390/su122410468>.
135. Salvador Cesa, F. et al.: Synthetic fibers as microplastics in the marine environment: A review from textile perspective with a focus on domestic washings. *Science of The Total Environment*. 598, 1116–1129 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.172>.

136. Santana, T. et al.: Effects of the Ratio of Porosity to Volumetric Cement Content on the Unconfined Compressive Strength of Cement Bound Fine Grained Soils. *Infrastructures*. 6, 7, 96 (2021). <https://doi.org/10.3390/infrastructures6070096>.
137. Sathishkumar, T. et al.: Hybrid fiber reinforced polymer composites – a review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 33, 5, 454–471 (2014). <https://doi.org/10.1177/0731684413516393>.
138. Savastano, H. et al.: Brazilian waste fibres as reinforcement for cement-based composites. *Cement and Concrete Composites*. 22, 5, 379–384 (2000). [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00034-2](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00034-2).
139. Schaefer, V.R. et al.: Ground Improvement in the 21st Century: A Comprehensive Web-Based Information System. Presented at the Geotechnical Engineering State of the Art and Practice, Keynote Lectures from GeoCongress 2012, , Oakland, California March (2012). <https://doi.org/10.1061/9780784412138.0011>.
140. Schneider, M.: The cement industry on the way to a low-carbon future. *Cement and Concrete Research*. 124, 105792 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105792>.
141. Sharma, A.K., Sivapullaiah, P.V.: Ground granulated blast furnace slag amended fly ash as an expansive soil stabilizer. *Soils and Foundations*. 56, 2, 205–212 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2016.02.004>.
142. Sharma, R.K.: Laboratory study on stabilization of clayey soil with cement kiln dust and fiber. *Geotech Geol Eng*. 35, 5, 2291–2302 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0245-5>.
143. Shrivastava, A.: Polymerization. In: *Introduction to Plastics Engineering*. pp. 17–48 Elsevier (2018). <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-39500-7.00002-2>.
144. Shukla, S.K.: *Fundamentals of Fibre-Reinforced Soil Engineering*. Springer Singapore, Singapore (2017). <https://doi.org/10.1007/978-981-10-3063-5>.
145. Skoracki, J.: Stulecie polskich włókien chemicznych (1911–2011). *Próba refleksji. CHEMIK*. 64, 12, 841–854 (2010).
146. Soból, E.: Czynniki warunkujące tłumienie fal sejsmicznych w gruntach spoistych. *Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Warszawa* (2018). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13446.63045>.
147. Sousa, V., Bogas, J.A.: Comparison of energy consumption and carbon emissions from clinker and recycled cement production. *Journal of Cleaner Production*. 306, 127277 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127277>.
148. Szymański, A.: *MECHANIKA GRUNTÓW*. Wydawnictwo SGGW, Warszawa (2007).
149. Taha, M.M.M. et al.: Influence of Polypropylene Fibre (PF) Reinforcement on Mechanical Properties of Clay Soil. *Advances in Polymer Technology*. 2020, 1–15 (2020). <https://doi.org/10.1155/2020/9512839>.
150. Tang, C. et al.: Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. *Geotextiles and Geomembranes*. 25, 3, 194–202 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2006.11.002>.

151. Tang, C.-S. et al.: Interfacial shear strength of fiber reinforced soil. *Geotextiles and Geomembranes*. 28, 1, 54–62 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2009.10.001>.
152. Topoliński, S.: Badanie wytrzymałości kompozytów grunt organiczny - spoiwo cementowe formowanych metodą mieszania. Uniwersytet Techniczno - Przyrodniczy im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy (2014).
153. Topolnicki, M. et al.: Wytyczne wzmacniania podłoża gruntowego kolumnami sztywnymi. Projektowanie, wykonawstwo, kontrola. PWN SA, Warszawa (2022).
154. Townsend, F.C., Anderson, J.B.: *A Compendium of Ground Modification Techniques*, (2004).
155. Tran, K.Q. et al.: Improvement of mechanical behavior of cemented soil reinforced with waste cornsilk fibers. *Construction and Building Materials*. 178, 204–210 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.104>.
156. Tran, T.Q. et al.: Feasibility of Reusing Marine Dredged Clay Stabilized by a Combination of By-Products in Coastal Road Construction. *Transportation Research Record*. 2673, 12, 519–528 (2019). <https://doi.org/10.1177/0361198119868196>.
157. Tremblay, H. et al.: Mechanical improvement and vertical yield stress prediction of clayey soils from eastern Canada treated with lime or cement. *Can. Geotech. J.* 38, 3, 567–579 (2001). <https://doi.org/10.1139/t00-119>.
158. Van Impe, W.F., Flores, R.D.V.: Deep mixing in underwater conditions: a laboratory and field investigation. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*. 10, 1, 15–22 (2006). <https://doi.org/10.1680/grim.2006.10.1.15>.
159. Varaksin, S., Hamidi, B.: Ground Improvement Case Histories and Advances in Practice. In: *Proceedings of the International Conference on Ground Improvement & Ground Control*. pp. 209–222 Research Publishing Services (2012). https://doi.org/10.3850/978-981-07-3559-3_103-0002.
160. Venda Oliveira, P.J. et al.: Effect of fibre type on the compressive and tensile strength of a soft soil chemically stabilised. *Geosynthetics International*. 23, 3, 171–182 (2016). <https://doi.org/10.1680/jgein.15.00040>.
161. Vidal, H.: *The Principle of Reinforced Earth*. Highway Research Record. 282, 1–16 (1969).
162. Vinoth, G. et al.: Early strength development in cement-treated sand using low-carbon rapid-hardening cements. *Soils and Foundations*. 58, 5, 1200–1211 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.07.001>.
163. Wang, W. et al.: Investigation on the Triaxial Mechanical Characteristics of Cement-Treated Subgrade Soil Admixed with Polypropylene Fiber. *Applied Sciences*. 9, 21, 4557 (2019). <https://doi.org/10.3390/app9214557>.
164. Wei, X. et al.: Effects of plastic fines content on the engineering properties of cement-stabilized sands. *Granular Matter*. 23, 2, 46 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10035-021-01114-5>.

165. Wei, X. et al.: Microscale analysis to characterize effects of water content on the strength of cement-stabilized sand–clay mixtures. *Acta Geotech.* 15, 10, 2905–2923 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11440-020-01018-3>.
166. Williamson, S., Cortes, D.D.: Dimensional analysis of soil–cement mixture performance. *Géotechnique Letters*. 4, 1, 33–38 (2014). <https://doi.org/10.1680/geolett.13.00082>.
167. Wiłun, Z.: *Zarys geotechniki*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa (1976).
168. Xiao, H. et al.: Engineering Properties of Marine Clay Admixed with Portland Cement and Blended Cement with Siliceous Fly Ash. *J. Mater. Civ. Eng.* 29, 10, 04017177 (2017). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002014](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002014).
169. Yadav, J.S. et al.: Strength Behaviour of Clayey Soil Mixed with Pond Ash, Cement and Randomly Distributed Fibres. *Transp. Infrastruct. Geotech.* 5, 3, 191–209 (2018). <https://doi.org/10.1007/s40515-018-0056-z>.
170. Yao, K. et al.: Generalized hyperbolic formula capturing curing period effect on strength and stiffness of cemented clay. *Construction and Building Materials*. 199, 63–71 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.288>.
171. Yazici, M.F., Keskin, N.: A Review on Soil Reinforcement Technology by Using Natural and Synthetic Fibers. *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. 14, 2, 631–663 (2021). <https://doi.org/10.18185/erzifbed.874339>.
172. Young, J.F.: A review of the mechanisms of set-retardation in portland cement pastes containing organic admixtures. *Cement and Concrete Research*. 2, 4, 415–433 (1972). [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(72\)90057-9](https://doi.org/10.1016/0008-8846(72)90057-9).
173. Zabielska-Adamska, K. et al.: Compaction characteristics of coarse post-glacial soil improved by fiber-reinforcement and cement addition. In: *Smart Geotechnics for Smart Societies*. pp. 2606–2611 CRC Press, London (2023). <https://doi.org/10.1201/9781003299127-406>.
174. Zhang, J. et al.: Strength and Water Stability of a Fiber-reinforced Cemented Loess. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. 13, 1, 155892501801300 (2018). <https://doi.org/10.1177/155892501801300109>.
175. Zhang, L. et al.: Effect of Polypropylene Fibers on the Strength and Elastic Modulus of Soil-Cement. In: Li, G. et al. (eds.) *Geosynthetics in Civil and Environmental Engineering*. pp. 386–391 Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg (2008). https://doi.org/10.1007/978-3-540-69313-0_74.
176. Zhang, M. et al.: Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer. *Construction and Building Materials*. 47, 1468–1478 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.017>.
177. Zhang, R.J. et al.: Long-Term Effect of Curing Temperature on the Strength Behavior of Cement-Stabilized Clay. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 140, 8, 04014045 (2014). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001144](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001144).
178. ASTM C 597-02 Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.02. West Conshohocken, Pennsylvania (2002). <https://doi.org/10.1520/C0597-22>.

179. ASTM D2845-00 Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock. Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.02. West Conshohocken, Pennsylvania (2002). <https://doi.org/10.1520/D2845-00>.
180. BN-63-6722-02:1963 Drogi samochodowe - Popioły lotne do stabilizacji gruntu.
181. BN-68-8933-07:1968 Drogi samochodowe - Stabilizacja gruntów wapnem do celów drogowych.
182. BN-68-8933-08:1968 Drogi samochodowe - Podbudowa z gruntów stabilizowanych cementem.
183. Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych. Załącznik do zarządzenia Nr 31 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 16.06.2014 r.
184. Katalog typowych konstrukcji nawierzchni sztywnych. Załącznik do zarządzenia Nr 30 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 16.06.2014 r.
185. Mieszanki związane Spoiwem hydraulicznym do dróg krajowych WT-5 2010, Wymagania techniczne. Załącznik Nr 4 do Zarządzenia Nr 102 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 19 listopada 2010 r.
186. Operating Instructions Pundit Lab / Pundit Lab+ Ultrasonic Instrument, Proceq SA (2017).
187. PN-88/B-04481:1988 Grunty budowlane - Badania próbek gruntu.
188. PN-B-02481:1998 Geotechnika: Terminologia podstawowa, symbole literowe i jednostki miar.
189. PN-B-02480:1986 Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów.
190. PN-EN 196-1:2016 Metody badania cementu - Część 1: Oznaczenia wytrzymałości.
191. PN-EN 197-1:2012 Cement część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku
192. PN-EN 1997-2:2009 Eurokod 7 - Projektowanie geotechniczne - Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego.
193. PN-EN 12504-4:2005 Badania betonu - Część 4: Oznaczanie prędkości fali ultradźwiękowej.
194. PN-EN 13286-1:2005 Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym - Część 1: Laboratoryjne metody badań oznaczania referencyjnej gęstości i wilgotności.
195. PN-EN 13286-2:2010 Mieszanki niezwiązane i związane hydraulicznie - Część 2: Metody badań laboratoryjnych gęstości na sucho i zawartości wody: zagęszczanie metodą Proktora.
196. PN-EN 13286-40:2005 Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym - Część 40: Metoda oznaczania wytrzymałości na rozciąganie bezpośrednie mieszanek mineralnych związanych spoiwem hydraulicznym.

197. PN-EN 13286-41:2005 Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym - Część 41: Metoda oznaczania wytrzymałości na ściskanie mieszanek związanych spoiwem hydraulicznym.
198. PN-EN 13286-42:2005 Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym - Część 42: Metoda oznaczania wytrzymałości na rozciąganie pośrednie mieszanek związanych spoiwem hydraulicznym.
199. PN-EN 13286-43:2005 Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym - Część 43: Metoda oznaczania modułu sprężystości mieszanek związanych spoiwem hydraulicznym.
200. PN-EN 13286-45:2004 Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym - Część 45: Metoda badania mająca na celu określenie okresu urabialności.
201. PN-EN 13286-46:2005 Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym - Część 46: Metoda oznaczania wskaźnika wilgotności.
202. PN-EN 13286-47:2012 Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym - Część 47: Metoda badania do określenia kalifornijskiego wskaźnika nośności, natychmiastowego wskaźnika nośności i pęcznienia liniowego.
203. PN-EN 13286-48:2007 Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym - Część 48: Metoda badawcza określania stopnia rozdrobnienia.
204. PN-EN 13286-50:2007 Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym - Część 50: Metoda sporządzania próbek związanych hydraulicznie za pomocą aparatu Proctora lub zagęszczania na stole wibracyjnym.
205. PN-EN 14227-1:2013 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym - Specyfikacje - Część 1: Mieszanki związane cementem.
206. PN-EN 14227-2:2013 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym - Specyfikacje - Część 2: Mieszanki żużlowe.
207. PN-EN 14227-3:2013 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym - Specyfikacje - Część 3: Mieszanki związane popiołami lotnymi.
208. PN-EN 14227-4:2013 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym - Specyfikacje - Część 4: Popioły lotne do mieszanek związanych spoiwem hydraulicznym. Polski Komitet Normalizacyjny.
209. PN-EN 14227-5:2013 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym - Specyfikacje - Część 5: Mieszanki związane spoiwem drogowym.
210. PN-EN 14227-15:2015 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym - Specyfikacje - Część 15: Grunty stabilizowane hydraulicznie.
211. PN-EN 14889-2:2007 Włókna do betonu. Część 2: Włókna polimerowe, definicje, wymagania i zgodność.
212. PN-EN ISO 14688-2:2018 Rozpoznanie i badania geotechniczne - Oznaczenia i klasyfikacje gruntów - Część 2: Zasady klasyfikowania.
213. PN-EN ISO 14688-2:2006/aP2 Dotyczy PN-EN ISO 14688-2:2006 Badania geotechniczne - Oznaczenia i klasyfikacje gruntów - Część 2: Zasady klasyfikowania.

- 214. PN-S-96011:1998 Drogi samochodowe - Stabilizacja gruntów wapnem do celów drogowych.
- 215. PN-S-96012:1998 Drogi samochodowe - odbudowa i ulepszone podłoże z gruntu stabilizowanego cementem.
- 216. PN-S-96035:1998 Drogi samochodowe - Popioły lotne.
- 217. Soil Stabilization for Pavements. Departments of the army, the navy, and the air force, Washington, D.C. (1994).
- 218. Soil Stabilization for Roads and Streets. Departments of the army and the air force, Washington, D.C. (1969).
- 219. WR-D-63 Katalog typowych konstrukcji nawierzchni jezdni przeznaczonych do ruchu bardzo lekkiego oraz innych części dróg, (2022).

Spis rysunków

- Rys. 2.1 Strefy rozwoju wytrzymałości w stabilizowanym gruncie spoistym.
- Rys. 2.2 Klasyfikacja ze względu na wytrzymałość na rozciąganie i moduł sprężystości.
- Rys. 2.3 Schemat warstw konstrukcji nawierzchni oraz ulepszanego podłoża.
- Rys. 2.4 Grunt wzmocniony a) tradycyjnym zbrojeniem; b) zbrojeniem rozproszonym.
- Rys. 2.5 Klasyfikacja zbrojenia rozproszonego w postaci włókien.
- Rys. 2.6 Zjawisko pęcznienia włókien naturalnych w gruncie.
- Rys. 2.7 Wpływ ilości włókien na wytrzymałość na ściskanie.
- Rys. 2.8 Wpływ wytrzymałości na efektywność wzmocnienia.
- Rys. 2.9 Wpływ długości włókien na wytrzymałość na ściskanie.
- Rys. 2.10 Wpływ ilości włókien na wytrzymałość na rozciąganie.
- Rys. 2.11 Wpływ dł. włókien na wytrzymałość na rozciąganie.
- Rys. 2.12 Wpływ wytrzymałości na efektywność wzmocnienia.
- Rys. 2.13 Wpływ ilości włókien na: a) spójność; b) kąt tarcia wew.
- Rys. 2.14 Wpływ dł. włókien na: a) spójność; b) kąt tarcia wew.
- Rys. 2.15 Wpływ wartości ref. na: a) spójność; b) kąt tarcia wew.
- Rys. 2.16 Wpływ ilości włókien na efektywność wzmocnienia wskaźnika CBR.
- Rys. 2.17 Wpływ długości włókien na efektywność wzmocnienia wskaźnika CBR.
- Rys. 2.18 Wpływ wartości referencyjnej na efektywność wzmocnienia wskaźnika CBR.
- Rys. 2.19 Schemat do interpretacji wskaźnika kruchości.
- Rys. 2.20 Zależność między wskaźnikiem kruchości a zawartością włókien.
- Rys. 2.21 Wpływ włókien na sprężystość podczas badania trójosiowego ściskania.
- Rys. 2.22 Wpływ włókien na sprężystość podczas badania jednoosiowego ściskania.
- Rys. 2.23 Znormalizowana wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie po 7 dniach.
- Rys. 3.1 Krzywe uziarnienia badanych gruntów.
- Rys. 3.2 Granice płynności gruntu nr 1 i 3.
- Rys. 3.3 Oznaczenie gruntów drobnoziarnistych na karcie Casagrandego.
- Rys. 3.4 Krzywe zagęszczalności badanych gruntów.
- Rys. 4.1 Schemat podziału programu badań.
- Rys. 4.2 Schemat oznaczeń mieszanek, serii i próbek podczas badań.
- Rys. 4.3 a) Sito o oczkach 2,0 mm; b) Grunt nr 1 przygotowany do badań.

- Rys. 4.4 a) Waga laboratoryjna RADWAG PS 6000/C/1; b) Mieszarka elektryczna.
- Rys. 4.5 Schemat kolejności dozowania i mieszania ze sobą składników mieszanek.
- Rys. 4.6 a) Lekki ubijak i forma do stabilizacji; b) Płyn antyadhezyjny i drobne narzędzia.
- Rys. 4.7 Próbkę podczas pielęgnacji; a) okres 1; b) okres 2; c) okres 3.
- Rys. 4.8 a) Urządzenie Pundit Lab+; b) przetworniki 54 kHz; c) przetworniki 40 kHz.
- Rys. 4.9 Odczyt prędkości fali podczas badania; a) z betonoskopu 1; b) z programu sterującego 2; c) z wykorzystaniem oscyloskopu.
- Rys. 4.10 Wzorniki kalibracyjne przetworników: a) 54 kHz; b) 40 kHz.
- Rys. 4.11 Sposób pomiaru: a) bezpośredni; b) częściowo bezpośredni; c) pośredni.
- Rys. 4.12 Schemat interpretacji odebranego sygnału, metoda od startu do startu.
- Rys. 4.13: a) Przykładowa próbka; b) próbka wzorcowa z PMMA.
- Rys. 4.14: Odebrane sygnały fal przechodzących przez próbkę wzorcową.
- Rys. 4.15 Uniwersalna maszyna wytrzymałościowa, marki Instron.
- Rys. 4.16 Schemat wprowadzanych poprawek do zależności naprężenie – odkształcenie.
- Rys. 4.17 Zależności do wyznaczenia modułu sprężystości.
- Rys. 5.1 Wpływ wilgotności na wytrzymałość na ściskanie mieszanek z 3% zaw. cementu.
- Rys. 5.2 Wpływ wilgotności na wytrzymałość na ściskanie mieszanek z 5% zaw. cementu.
- Rys. 5.3 Wpływ wilgotności na wytrzymałość na ściskanie mieszanek z 7% zaw. cementu.
- Rys. 5.4 Wpływ czasu utwardzania na wytrzymałość mieszanek z 2% zaw. cementu.
- Rys. 5.5 Wpływ czasu utwardzania na wytrzymałość mieszanek z 4% zaw. cementu.
- Rys. 5.6 Wpływ czasu utwardzania na wytrzymałość mieszanek z 6% zaw. cementu.
- Rys. 5.7 Znormalizowany wzrost wytrzymałości poszczególnych mieszanek.
- Rys. 5.8 Wpływ włókien na wytrzymałość bez pielęgnacji próbek w wodzie.
- Rys. 5.9 Wpływ włókien na wytrzymałość z pielęgnacją próbek w wodzie.
- Rys. 5.10 Wpływ włókien na odporność na działanie wody.
- Rys. 5.11 Zależność pomiędzy modułem siecznym a wytrzymałością cementogruntu.
- Rys. 5.12 Wpływ pielęgnacji w wodzie na prędkości fal.
- Rys. 5.13 Zależność wytrzymałości na ściskanie od prędkości fal podłużnych.
- Rys. 5.14 Zależność wytrzymałości na ściskanie od prędkości fal poprzecznych.
- Rys. 5.15 Zależność pomiędzy modułem E_{UPV} a wytrzymałością cementogruntu.
- Rys. 5.16 Zależność pomiędzy modułem G_{UPV} a wytrzymałością cementogruntu.
- Rys. 5.17 Zależność pomiędzy E_{UPV}/E_{50} a E_{50} .

Rys. 5.18 Zależność pomiędzy G_{UPV}/E_{50} a E_{50} .

Rys. 6.1 Model pięcioletowy gruntu z dodatkiem cementu i zbrojenia rozproszonego.

Rys. 6.2 Wpływ porowatości na wytrzymałość cementogruntu.

Rys. 6.3 Wpływ indeksu cementowego na wytrzymałość cementogruntu.

Rys. 6.4 Zależność pomiędzy Δ_3 a wytrzymałością na ściskanie cementogruntu.

Rys. 6.5 Wpływ parametru PK_1 na współczynnik determinacji.

Rys. 6.6 Zależność pomiędzy Δ_4 a wytrzymałością na ściskanie cementogruntu.

Rys. 6.7 Wpływ parametru PK_2 na współczynnik determinacji.

Rys. 6.8 Zależność pomiędzy Δ_5 a wytrzymałością na ściskanie cementogruntu.

Rys. 6.9 Zależność pomiędzy Δ_5 a wytrzymałością na ściskanie wg okresu pielęgnacji.

Rys. 6.10 Zależność pomiędzy dzielnikiem wsp. Δ_5 a okresem pielęgnacji.

Rys. 6.11 Wpływ parametru PK_3 na współczynnik determinacji.

Rys. 6.12 Zależność pomiędzy Δ_6 a R_C , $PK_3 = 0,07$.

Rys. 6.13 Zależność pomiędzy Δ_6 a R_C , $PK_3 = 0,10$.

Rys. 6.14 Zależność pomiędzy Δ_6 a wytrzymałością po pielęgnacji typu E i G.

Rys. 6.15 Zależność pomiędzy I na mnożnikiem I^{PK_4} .

Rys. 6.16 Wpływ parametru PK_4 na współczynnik determinacji.

Rys. 6.17 Zależność pomiędzy Δ_7 a wytrzymałością po pielęgnacji typu E i G.

Rys. 6.18 Zależność empiryczna nr 1 do szacowania wytrzymałości cementogruntu.

Rys. 6.19 Zależność empiryczna nr 2 do szacowania wytrzymałości cementogruntu.

Rys. 6.20 Zależność empiryczna nr 3 do szacowania wytrzymałości cementogruntu.

Rys. 6.21 Histogram dla wytrzymałości na ściskanie.

Rys. 6.22 Histogram dla transformacji logarytmicznej wytrzymałości na ściskanie.

Rys. 6.23 Histogram dla transformacji potęgowej wytrzymałości na ściskanie.

Rys. 6.24 Zależność wartości zmierzonych i obliczonych dla trzech równań.

Rys. 6.25 Zależność wartości zmierzonych i obliczonych dla trzech równań.

Rys. 6.26 Zależność wartości zmierzonych i obliczonych dla trzech równań.

Rys. 6.27 Analiza reszt zależności empirycznej nr 1.

Rys. 6.28 Analiza reszt zależności empirycznej nr 2.

Rys. 6.29 Analiza reszt zależności empirycznej nr 3.

Rys. 7.1 Zależność wartości zmierzonych i obliczonych dla badań kontrolnych.

Rys. 7.2 Analiza reszt badań kontrolnych.

Rys. 8.1 Procentowa zmiana wartości modułu E_{50} w wyniku zastosowania włókien.

Rys. 8.2 Procentowa zmiana wartości modułu E_{UPV} w wyniku zastosowania włókien.

Rys. 8.3 Procentowa zmiana wartości modułu G_{UPV} w wyniku zastosowania włókien.

Rys. 8.4 Wpływ indeksu cementowego (C_i) i porowatości (n) na R_C nr 1 po 28 dniach utwardzania bez zbrojenia rozproszonego.

Rys. 8.5 Wpływ indeksu zbrojenia (Z_i) i porowatości (n) na R_C nr 1 dla 5% cementu po 28 dniach utwardzania.

Rys. 8.6 Wpływ czasu utwardzania (T_C) i porowatości (n) na R_C nr 1 dla 5% cementu i bez zbrojenia rozproszonego.

Rys. 8.7 Wpływ odporności na działanie wody (I) i porowatości (n) na R_C nr 1 dla 5% cementu i bez zbrojenia rozproszonego.

Spis tabel

- Tab. 2.1 Klasyfikacje metod ulepszania podłoża gruntowego.
- Tab. 2.2 Klasyfikacje metod ulepszania podłoża gruntowego w budownictwie drogowym.
- Tab. 2.3 Polskie normy dotyczące gruntów stabilizowanych.
- Tab. 2.4 Cementy powszechnego użytku wg EN 197-1.
- Tab. 2.5 Kryteria przydatności gruntu do stabilizacji cementem.
- Tab. 2.6 Katalogi typowych konstrukcji nawierzchni.
- Tab. 2.7 Kategorie minimalnej zawartości wody.
- Tab. 2.8 Stopień rozdrobnienia mieszanki.
- Tab. 2.9 Natychmiastowy wskaźnik nośności świeżej mieszanki.
- Tab. 2.10 Wskaźnik wilgotności świeżej mieszanki.
- Tab. 2.11 Przykładowe okresy pielęgnacji mieszanek GSSH.
- Tab. 2.12 Klasyfikacja kalifornijskiego wskaźnika nośności.
- Tab. 2.13 Klasyfikacja wytrzymałościowa ulepszanego podłoża gruntowego.
- Tab. 2.14 Klasa wytrzymałości po działaniu wody.
- Tab. 2.15 Klasa pęcznienia liniowego.
- Tab. 2.16 Zakres stosowania i podstawowe wymagania dla stabilizacji cementem.
- Tab. 2.17 Właściwości przykładowych włókien naturalnych [40].
- Tab. 2.18 Właściwości przykładowych włókien chemicznych [40].
- Tab. 2.19 Wykaz zastosowanych gruntów, spoiw i włókien w zestawionych badaniach.
- Tab. 2.20 Wpływ włókien na sztywność gruntu stabilizowanego.
- Tab. 2.21 Wpływ włókien na moduł ścinania w zakresie bardzo małych odkształceń.
- Tab. 2.22 Modele gruntu stabilizowanego oparte na porowatości i objętości cementu.
- Tab. 2.23 Wartości referencyjne dla równania 2.23 i 2.24.
- Tab. 2.24 Parametry do korelacji wytrzymałości gruntu stabilizowanego i prędkości fal.
- Tab. 2.25 Korelacje parametrów odkształceniowych z R_C .
- Tab. 3.1 Zawartość procentowa poszczególnych frakcji w badanych gruntach.
- Tab. 3.2 Oznaczone granice Atterberga i wskaźnik plastyczności badanych gruntów.
- Tab. 3.3 Wyniki badań Proctora.
- Tab. 3.4 Gęstości właściwe gruntów.
- Tab. 3.5 Zawartość procentowa poszczególnych składników CEM V/A (S-V) 32,5 R-LH.

- Tab. 3.6 Wytrzymałość na ściskanie i zginanie cementu.
- Tab. 3.7 Podstawowe informacje dotyczące włókien polipropylenowych.
- Tab. 4.1 Zestawienie liczby badań i pomiarów w etapie I.
- Tab. 4.2 Zestawienie liczby badań i pomiarów w etapie II.
- Tab. 4.3 Zestawienie zastosowanych mieszanek.
- Tab. 4.4 Zestawienie sposobu pielęgnacji próbek.
- Tab. 4.5 Podstawowe parametry urządzenia Pundit Lab+ i przetworników.
- Tab. 4.6 Wyniki pierwszego etapu weryfikacji.
- Tab. 4.7 Wyniki drugiego etapu weryfikacji.
- Tab. 4.8 Podstawowe parametry pomiarowe uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej.
- Tab. 5.1 Wzmocnienie włóknami przy zmiennej wilgotności świeżej mieszanki.
- Tab. 5.2 Wpływ włókien polipropylenowych na klasy wytrzymałościowe, badanie nr 1.
- Tab. 5.3 Wpływ włókien na rozwój wytrzymałości w poszczególnych dniach.
- Tab. 5.4 Wartości do znormalizowanej wytrzymałości cementogruntu.
- Tab. 5.5 Wpływ włókien polipropylenowych na klasy wytrzymałościowe, badanie nr 2.
- Tab. 5.6 Wpływ włókien polipropylenowych na klasy wytrzymałościowe, badanie nr 3.
- Tab. 5.7 Zmiana wartości modułu E_{50} w poszczególnych seriach.
- Tab. 5.8 Zmiana wartości modułu E_{50} wraz ze wzrostem wytrzymałości referencyjnej.
- Tab. 5.9 Dane wyznaczone do analizy wpływu pielęgnacji w wodzie na prędkości fal.
- Tab. 5.10 Wpływ włókien polipropylenowych na R_C dla referencyjnych prędkości fal.
- Tab. 5.11 Zmiana prędkości fal podłużnych i poprzecznych w poszczególnych seriach.
- Tab. 5.12 Zmiana modułów E_{UPV} i G_{UPV} wraz ze wzrostem wytrzymałości referencyjnej.
- Tab. 5.13 Zmiana modułów E_{UPV} i G_{UPV} w poszczególnych seriach.
- Tab. 6.1 Tok postępowania przy opracowywaniu końcowych zależności empirycznych.
- Tab. 6.2 Zależności pomiędzy wytrzymałością cementogruntu a porowatością.
- Tab. 6.3 Zależności pomiędzy wytrzymałością cementogruntu a indeksem cementowym.
- Tab. 6.4 Zależności pomiędzy wytrzymałością cementogruntu a Δ_3 .
- Tab. 6.5 Zależności pomiędzy wytrzymałością cementogruntu a Δ_4 .
- Tab. 6.6 Zależności pomiędzy Δ_5 a R_C przy różnym okresie pielęgnacji.
- Tab. 6.7 Dane do analizy wpływu okresu pielęgnacji na wytrzymałość cementogruntu.
- Tab. 6.8 Statystyczne parametry dla badania nr 1.
- Tab. 6.9 Statystyczne parametry dla badania nr 2, część 1.

Tab. 6.10 Statystyczne parametry dla badania nr 2, część 2.

Tab. 6.11 Statystyczne parametry dla badania nr 3.

Tab. 6.12 Statystyczne parametry dla analizy normalności rozkładu.

Tab. 6.13 Wyniki obliczeń miar jakości zależności empirycznych nr 1, 2 i 3.

Tab. 6.14 Wyniki obliczeń elementów składowych wskaźnika Theila.

Tab. 6.15 współczynniki zależności pomiędzy wartościami zmierzonymi a obliczonymi.

Tab. 6.16 Statystyczne parametry dla analizy normalności rozkładu.

Tab. 6.17 Tablica korelacji r_s rozpatrywanych czynników wpływających na właściwości mechaniczne cementogruntu.

Tab. 7.1 Zestawienie badań kontrolnych.

Tab. 7.2 Statystyczne parametry dla analizy normalności rozkładu reszt badań kontrolnych.

Tab. 7.3 Wyniki obliczeń miar jakości, badania kontrolne.

Załącznik A

Oznaczenie próbki	C [%]	Z [%]	w [%]	T_C [dni]
B1-C305-S-1	3,00	0,00	5,64	28
B1-C305-S-2	3,00	0,00	7,85	28
B1-C305-S-3	3,00	0,00	6,95	28
B1-C305-S-4	3,00	0,00	8,99	28
B1-C305-S-5	3,00	0,00	10,03	28
B1-C305-S-6	3,00	0,00	11,20	28
B1-C305-S-7	3,00	0,00	11,80	28
B1-C305-S-8	3,00	0,00	12,32	28
B1-C305-S-9	3,00	0,00	6,94	28
B1-C305-S-10	3,00	0,00	6,82	28
B1-C305-S-11	3,00	0,00	12,02	28
B1-C305-S-12	3,00	0,00	11,99	28
B1-C315-S-13	3,00	0,25	6,19	28
B1-C315-S-14	3,00	0,25	6,82	28
B1-C315-S-15	3,00	0,25	7,64	28
B1-C315-S-16	3,00	0,25	9,05	28
B1-C315-S-17	3,00	0,25	9,91	28
B1-C315-S-18	3,00	0,25	11,00	28
B1-C315-S-19	3,00	0,25	11,82	28
B1-C315-S-20	3,00	0,25	12,67	28
B1-C315-S-21	3,00	0,25	6,92	28
B1-C315-S-22	3,00	0,25	7,03	28
B1-C315-S-23	3,00	0,25	12,01	28
B1-C315-S-24	3,00	0,25	12,19	28
B1-C325-S-25	3,00	0,50	6,01	28
B1-C325-S-26	3,00	0,50	7,11	28
B1-C325-S-27	3,00	0,50	7,63	28
B1-C325-S-28	3,00	0,50	8,88	28
B1-C325-S-29	3,00	0,50	9,82	28
B1-C325-S-30	3,00	0,50	10,51	28
B1-C325-S-31	3,00	0,50	11,76	28
B1-C325-S-32	3,00	0,50	12,85	28
B1-C325-S-33	3,00	0,50	7,02	28
B1-C325-S-34	3,00	0,50	6,50	28
B1-C325-S-35	3,00	0,50	12,34	28
B1-C325-S-36	3,00	0,50	11,96	28
B1-C505-S-37	5,00	0,00	6,04	28
B1-C505-S-38	5,00	0,00	6,80	28

Oznaczenie próbki	C [%]	Z [%]	w [%]	T_C [dni]
B1-C505-S-39	5,00	0,00	8,01	28
B1-C505-S-40	5,00	0,00	8,92	28
B1-C505-S-41	5,00	0,00	9,92	28
B1-C505-S-42	5,00	0,00	10,92	28
B1-C505-S-43	5,00	0,00	12,23	28
B1-C505-S-44	5,00	0,00	12,77	28
B1-C505-S-45	5,00	0,00	6,73	28
B1-C505-S-46	5,00	0,00	6,94	28
B1-C505-S-47	5,00	0,00	12,57	28
B1-C505-S-48	5,00	0,00	12,14	28
B1-C515-S-49	5,00	0,25	5,58	28
B1-C515-S-50	5,00	0,25	6,64	28
B1-C515-S-51	5,00	0,25	7,28	28
B1-C515-S-52	5,00	0,25	8,85	28
B1-C515-S-53	5,00	0,25	9,74	28
B1-C515-S-54	5,00	0,25	10,95	28
B1-C515-S-55	5,00	0,25	11,32	28
B1-C515-S-56	5,00	0,25	12,23	28
B1-C515-S-57	5,00	0,25	6,97	28
B1-C515-S-58	5,00	0,25	6,81	28
B1-C515-S-59	5,00	0,25	11,98	28
B1-C515-S-60	5,00	0,25	11,94	28
B1-C525-S-61	5,00	0,50	5,96	28
B1-C525-S-62	5,00	0,50	6,91	28
B1-C525-S-63	5,00	0,50	7,61	28
B1-C525-S-64	5,00	0,50	8,91	28
B1-C525-S-65	5,00	0,50	9,97	28
B1-C525-S-66	5,00	0,50	10,93	28
B1-C525-S-67	5,00	0,50	11,89	28
B1-C525-S-68	5,00	0,50	12,39	28
B1-C525-S-69	5,00	0,50	7,00	28
B1-C525-S-70	5,00	0,50	7,00	28
B1-C525-S-71	5,00	0,50	12,00	28
B1-C525-S-72	5,00	0,50	12,00	28
B1-C705-S-73	7,00	0,00	5,54	28
B1-C705-S-74	7,00	0,00	6,81	28
B1-C705-S-75	7,00	0,00	7,57	28
B1-C705-S-76	7,00	0,00	9,90	28
B1-C705-S-77	7,00	0,00	8,92	28
B1-C705-S-78	7,00	0,00	10,24	28

Oznaczenie próbki	C [%]	Z [%]	w [%]	T _C [dni]
B1-C705-S-79	7,00	0,00	12,11	28
B1-C705-S-80	7,00	0,00	12,95	28
B1-C705-S-81	7,00	0,00	6,97	28
B1-C705-S-82	7,00	0,00	6,74	28
B1-C705-S-83	7,00	0,00	12,31	28
B1-C705-S-84	7,00	0,00	12,22	28
B1-C715-S-85	7,00	0,25	6,11	28
B1-C715-S-86	7,00	0,25	6,71	28
B1-C715-S-87	7,00	0,25	7,89	28
B1-C715-S-88	7,00	0,25	8,88	28
B1-C715-S-89	7,00	0,25	9,92	28
B1-C715-S-90	7,00	0,25	10,96	28
B1-C715-S-91	7,00	0,25	11,73	28
B1-C715-S-92	7,00	0,25	12,81	28
B1-C715-S-93	7,00	0,25	6,98	28
B1-C715-S-94	7,00	0,25	6,97	28
B1-C715-S-95	7,00	0,25	11,92	28
B1-C715-S-96	7,00	0,25	11,95	28
B1-C725-S-97	7,00	0,50	5,89	28
B1-C725-S-98	7,00	0,50	6,85	28
B1-C725-S-99	7,00	0,50	7,58	28
B1-C725-S-100	7,00	0,50	8,53	28
B1-C725-S-101	7,00	0,50	9,89	28
B1-C725-S-102	7,00	0,50	10,66	28
B1-C725-S-103	7,00	0,50	11,47	28
B1-C725-S-104	7,00	0,50	12,55	28
B1-C725-S-105	7,00	0,50	6,88	28
B1-C725-S-106	7,00	0,50	6,92	28
B1-C725-S-107	7,00	0,50	11,97	28
B1-C725-S-108	7,00	0,50	11,92	28
B2-C201-S-1	2,00	0,00	9,86	1
B2-C201-S-2	2,00	0,00	9,86	1
B2-C201-S-3	2,00	0,00	9,86	1
B2-C202-S-4	2,00	0,00	9,86	3
B2-C202-S-5	2,00	0,00	9,86	3
B2-C202-S-6	2,00	0,00	9,86	3
B2-C203-S-7	2,00	0,00	9,86	7
B2-C203-S-8	2,00	0,00	9,86	7
B2-C203-S-9	2,00	0,00	9,86	7
B2-C204-S-10	2,00	0,00	9,86	14

Oznaczenie próbki	C [%]	Z [%]	w [%]	T_C [dni]
B2-C204-S-11	2,00	0,00	9,86	14
B2-C204-S-12	2,00	0,00	9,86	14
B2-C205-S-13	2,00	0,00	9,86	28
B2-C205-S-14	2,00	0,00	9,86	28
B2-C205-S-15	2,00	0,00	9,86	28
B2-C206-S-16	2,00	0,00	9,86	56
B2-C206-S-17	2,00	0,00	9,86	56
B2-C206-S-18	2,00	0,00	9,86	56
B2-C211-S-19	2,00	0,25	9,81	1
B2-C211-S-20	2,00	0,25	9,81	1
B2-C211-S-21	2,00	0,25	9,81	1
B2-C212-S-22	2,00	0,25	9,81	3
B2-C212-S-23	2,00	0,25	9,81	3
B2-C212-S-24	2,00	0,25	9,81	3
B2-C213-S-25	2,00	0,25	9,81	7
B2-C213-S-26	2,00	0,25	9,81	7
B2-C213-S-27	2,00	0,25	9,81	7
B2-C214-S-28	2,00	0,25	9,81	14
B2-C214-S-29	2,00	0,25	9,81	14
B2-C214-S-30	2,00	0,25	9,81	14
B2-C215-S-31	2,00	0,25	9,81	28
B2-C215-S-32	2,00	0,25	9,81	28
B2-C215-S-33	2,00	0,25	9,81	28
B2-C216-S-34	2,00	0,25	9,81	56
B2-C216-S-35	2,00	0,25	9,81	56
B2-C216-S-36	2,00	0,25	9,81	56
B2-C221-S-37	2,00	0,50	9,91	1
B2-C221-S-38	2,00	0,50	9,91	1
B2-C221-S-39	2,00	0,50	9,91	1
B2-C222-S-40	2,00	0,50	9,91	3
B2-C222-S-41	2,00	0,50	9,91	3
B2-C222-S-42	2,00	0,50	9,91	3
B2-C223-S-43	2,00	0,50	9,91	7
B2-C223-S-44	2,00	0,50	9,91	7
B2-C223-S-45	2,00	0,50	9,91	7
B2-C224-S-46	2,00	0,50	9,91	14
B2-C224-S-47	2,00	0,50	9,91	14
B2-C224-S-48	2,00	0,50	9,91	14
B2-C225-S-49	2,00	0,50	9,91	28
B2-C225-S-50	2,00	0,50	9,91	28

Oznaczenie próbki	C [%]	Z [%]	w [%]	T _C [dni]
B2-C225-S-51	2,00	0,50	9,91	28
B2-C226-S-52	2,00	0,50	9,91	56
B2-C226-S-53	2,00	0,50	9,91	56
B2-C226-S-54	2,00	0,50	9,91	56
B2-C401-S-55	4,00	0,00	9,96	1
B2-C401-S-56	4,00	0,00	9,96	1
B2-C401-S-57	4,00	0,00	9,96	1
B2-C402-S-58	4,00	0,00	9,96	3
B2-C402-S-59	4,00	0,00	9,96	3
B2-C402-S-60	4,00	0,00	9,96	3
B2-C403-S-61	4,00	0,00	9,96	7
B2-C403-S-62	4,00	0,00	9,96	7
B2-C403-S-63	4,00	0,00	9,96	7
B2-C404-S-64	4,00	0,00	9,96	14
B2-C404-S-65	4,00	0,00	9,96	14
B2-C404-S-66	4,00	0,00	9,96	14
B2-C405-S-67	4,00	0,00	9,96	28
B2-C405-S-68	4,00	0,00	9,96	28
B2-C405-S-69	4,00	0,00	9,96	28
B2-C406-S-70	4,00	0,00	9,96	56
B2-C406-S-71	4,00	0,00	9,96	56
B2-C406-S-72	4,00	0,00	9,96	56
B2-C411-S-73	4,00	0,25	10,10	1
B2-C411-S-74	4,00	0,25	10,10	1
B2-C411-S-75	4,00	0,25	10,10	1
B2-C412-S-76	4,00	0,25	10,10	3
B2-C412-S-77	4,00	0,25	10,10	3
B2-C412-S-78	4,00	0,25	10,10	3
B2-C413-S-79	4,00	0,25	10,10	7
B2-C413-S-80	4,00	0,25	10,10	7
B2-C413-S-81	4,00	0,25	10,10	7
B2-C414-S-82	4,00	0,25	10,10	14
B2-C414-S-83	4,00	0,25	10,10	14
B2-C414-S-84	4,00	0,25	10,10	14
B2-C415-S-85	4,00	0,25	10,10	28
B2-C415-S-86	4,00	0,25	10,10	28
B2-C415-S-87	4,00	0,25	10,10	28
B2-C416-S-88	4,00	0,25	10,10	56
B2-C416-S-89	4,00	0,25	10,10	56
B2-C416-S-90	4,00	0,25	10,10	56

Oznaczenie próbki	C [%]	Z [%]	w [%]	T_C [dni]
B2-C421-S-91	4,00	0,50	9,96	1
B2-C421-S-92	4,00	0,50	9,96	1
B2-C421-S-93	4,00	0,50	9,96	1
B2-C422-S-94	4,00	0,50	9,96	3
B2-C422-S-95	4,00	0,50	9,96	3
B2-C422-S-96	4,00	0,50	9,96	3
B2-C423-S-97	4,00	0,50	9,96	7
B2-C423-S-98	4,00	0,50	9,96	7
B2-C423-S-99	4,00	0,50	9,96	7
B2-C424-S-100	4,00	0,50	9,96	14
B2-C424-S-101	4,00	0,50	9,96	14
B2-C424-S-102	4,00	0,50	9,96	14
B2-C425-S-103	4,00	0,50	9,96	28
B2-C425-S-104	4,00	0,50	9,96	28
B2-C425-S-105	4,00	0,50	9,96	28
B2-C426-S-106	4,00	0,50	9,96	56
B2-C426-S-107	4,00	0,50	9,96	56
B2-C426-S-108	4,00	0,50	9,96	56
B2-C601-S-109	6,00	0,00	9,99	1
B2-C601-S-110	6,00	0,00	9,99	1
B2-C601-S-111	6,00	0,00	9,99	1
B2-C602-S-112	6,00	0,00	9,99	3
B2-C602-S-113	6,00	0,00	9,99	3
B2-C602-S-114	6,00	0,00	9,99	3
B2-C603-S-115	6,00	0,00	9,99	7
B2-C603-S-116	6,00	0,00	9,99	7
B2-C603-S-117	6,00	0,00	9,99	7
B2-C604-S-118	6,00	0,00	9,99	14
B2-C604-S-119	6,00	0,00	9,99	14
B2-C604-S-120	6,00	0,00	9,99	14
B2-C605-S-121	6,00	0,00	9,99	28
B2-C605-S-122	6,00	0,00	9,99	28
B2-C605-S-123	6,00	0,00	9,99	28
B2-C606-S-124	6,00	0,00	9,99	56
B2-C606-S-125	6,00	0,00	9,99	56
B2-C606-S-126	6,00	0,00	9,99	56
B2-C611-S-127	6,00	0,25	10,04	1
B2-C611-S-128	6,00	0,25	10,04	1
B2-C611-S-129	6,00	0,25	10,04	1
B2-C612-S-130	6,00	0,25	10,04	3

Oznaczenie próbki	C [%]	Z [%]	w [%]	T _C [dni]
B2-C612-S-131	6,00	0,25	10,04	3
B2-C612-S-132	6,00	0,25	10,04	3
B2-C613-S-133	6,00	0,25	10,04	7
B2-C613-S-134	6,00	0,25	10,04	7
B2-C613-S-135	6,00	0,25	10,04	7
B2-C614-S-136	6,00	0,25	10,04	14
B2-C614-S-137	6,00	0,25	10,04	14
B2-C614-S-138	6,00	0,25	10,04	14
B2-C615-S-139	6,00	0,25	10,04	28
B2-C615-S-140	6,00	0,25	10,04	28
B2-C615-S-141	6,00	0,25	10,04	28
B2-C616-S-142	6,00	0,25	10,04	56
B2-C616-S-143	6,00	0,25	10,04	56
B2-C616-S-144	6,00	0,25	10,04	56
B2-C621-S-145	6,00	0,50	9,93	1
B2-C621-S-146	6,00	0,50	9,93	1
B2-C621-S-147	6,00	0,50	9,93	1
B2-C622-S-148	6,00	0,50	9,93	3
B2-C622-S-149	6,00	0,50	9,93	3
B2-C622-S-150	6,00	0,50	9,93	3
B2-C623-S-151	6,00	0,50	9,93	7
B2-C623-S-152	6,00	0,50	9,93	7
B2-C623-S-153	6,00	0,50	9,93	7
B2-C624-S-154	6,00	0,50	9,93	14
B2-C624-S-155	6,00	0,50	9,93	14
B2-C624-S-156	6,00	0,50	9,93	14
B2-C625-S-157	6,00	0,50	9,93	28
B2-C625-S-158	6,00	0,50	9,93	28
B2-C625-S-159	6,00	0,50	9,93	28
B2-C626-S-160	6,00	0,50	9,93	56
B2-C626-S-161	6,00	0,50	9,93	56
B2-C626-S-162	6,00	0,50	9,93	56
B3-C105-W-1	1,00	0,00	9,71	28
B3-C105-W-2	1,00	0,00	9,71	28
B3-C105-W-3	1,00	0,00	9,71	28
B3-C105-S-4	1,00	0,00	9,71	28
B3-C105-S-5	1,00	0,00	9,71	28
B3-C105-S-6	1,00	0,00	9,71	28
B3-C115-S-7	1,00	0,25	10,05	28
B3-C115-W-8	1,00	0,25	10,05	28
B3-C115-W-9	1,00	0,25	10,05	28

Oznaczenie próbki	C [%]	Z [%]	w [%]	T_C [dni]
B3-C115-W-10	1,00	0,25	10,05	28
B3-C115-S-11	1,00	0,25	10,05	28
B3-C115-S-12	1,00	0,25	10,05	28
B3-C125-W-13	1,00	0,50	9,80	28
B3-C125-W-14	1,00	0,50	9,80	28
B3-C125-W-15	1,00	0,50	9,80	28
B3-C125-S-16	1,00	0,50	9,80	28
B3-C125-S-17	1,00	0,50	9,80	28
B3-C125-S-18	1,00	0,50	9,80	28
B3-C305-W-19	3,00	0,00	9,93	28
B3-C305-W-20	3,00	0,00	9,93	28
B3-C305-W-21	3,00	0,00	9,93	28
B3-C305-S-22	3,00	0,00	9,93	28
B3-C305-S-23	3,00	0,00	9,93	28
B3-C305-S-24	3,00	0,00	9,93	28
B3-C315-W-25	3,00	0,25	9,90	28
B3-C315-W-26	3,00	0,25	9,90	28
B3-C315-W-27	3,00	0,25	9,90	28
B3-C315-S-28	3,00	0,25	9,90	28
B3-C315-S-29	3,00	0,25	9,90	28
B3-C315-S-30	3,00	0,25	9,90	28
B3-C325-W-31	3,00	0,50	9,77	28
B3-C325-W-32	3,00	0,50	9,77	28
B3-C325-W-33	3,00	0,50	9,77	28
B3-C325-S-34	3,00	0,50	9,77	28
B3-C325-S-35	3,00	0,50	9,77	28
B3-C325-S-36	3,00	0,50	9,77	28
B3-C505-W-37	5,00	0,00	9,97	28
B3-C505-W-38	5,00	0,00	9,97	28
B3-C505-W-39	5,00	0,00	9,97	28
B3-C505-S-40	5,00	0,00	9,97	28
B3-C505-S-41	5,00	0,00	9,97	28
B3-C505-S-42	5,00	0,00	9,97	28
B3-C515-W-43	5,00	0,25	9,82	28
B3-C515-W-44	5,00	0,25	9,82	28
B3-C515-W-45	5,00	0,25	9,82	28
B3-C515-S-46	5,00	0,25	9,82	28
B3-C515-S-47	5,00	0,25	9,82	28
B3-C515-S-48	5,00	0,25	9,82	28
B3-C525-W-49	5,00	0,50	9,93	28
B3-C525-W-50	5,00	0,50	9,93	28

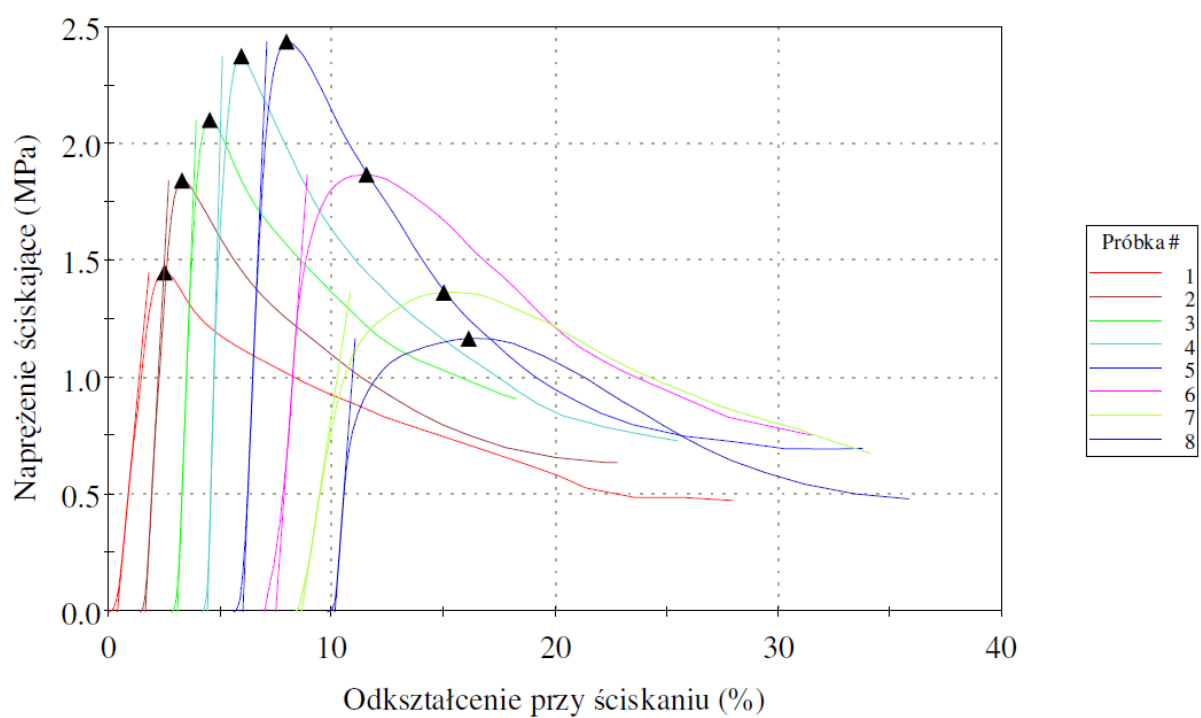
Oznaczenie próbki	C [%]	Z [%]	w [%]	T _C [dni]
B3-C525-W-51	5,00	0,50	9,93	28
B3-C525-S-52	5,00	0,50	9,93	28
B3-C525-S-53	5,00	0,50	9,93	28
B3-C525-S-54	5,00	0,50	9,93	28
B3-C705-W-55	7,00	0,00	9,80	28
B3-C705-W-56	7,00	0,00	9,80	28
B3-C705-W-57	7,00	0,00	9,80	28
B3-C705-S-58	7,00	0,00	9,80	28
B3-C705-S-59	7,00	0,00	9,80	28
B3-C705-S-60	7,00	0,00	9,80	28
B3-C715-W-61	7,00	0,25	9,85	28
B3-C715-W-62	7,00	0,25	9,85	28
B3-C715-W-63	7,00	0,25	9,85	28
B3-C715-S-64	7,00	0,25	9,85	28
B3-C715-S-65	7,00	0,25	9,85	28
B3-C715-S-66	7,00	0,25	9,85	28
B3-C725-W-67	7,00	0,50	10,10	28
B3-C725-W-68	7,00	0,50	10,10	28
B3-C725-W-69	7,00	0,50	10,10	28
B3-C725-S-70	7,00	0,50	10,10	28
B3-C725-S-71	7,00	0,50	10,10	28
B3-C725-S-72	7,00	0,50	10,10	28
B3-C905-S-73	9,00	0,00	9,74	28
B3-C905-W-74	9,00	0,00	9,74	28
B3-C905-S-75	9,00	0,00	9,74	28
B3-C905-W-76	9,00	0,00	9,74	28
B3-C905-S-77	9,00	0,00	9,74	28
B3-C905-W-78	9,00	0,00	9,74	28
B3-C915-S-79	9,00	0,25	10,07	28
B3-C915-S-80	9,00	0,25	10,07	28
B3-C915-S-81	9,00	0,25	10,07	28
B3-C915-W-82	9,00	0,25	10,07	28
B3-C915-W-83	9,00	0,25	10,07	28
B3-C915-W-84	9,00	0,25	10,07	28
B3-C925-S-85	9,00	0,50	9,33	28
B3-C925-S-86	9,00	0,50	9,33	28
B3-C925-S-87	9,00	0,50	9,33	28
B3-C925-W-88	9,00	0,50	9,33	28
B3-C925-W-89	9,00	0,50	9,33	28
B3-C925-W-90	9,00	0,50	9,33	28

Oznaczenie próbki	C [%]	Z [%]	w [%]	T _C [dni]
BK1-C503-W-1	5,00	0,00	6,50	7
BK1-C503-W-2	5,00	0,00	6,50	7
BK1-C503-W-3	5,00	0,00	6,50	7
BK1-C503-W-4	5,00	0,00	10,00	7
BK1-C503-W-5	5,00	0,00	10,00	7
BK1-C503-W-6	5,00	0,00	10,00	7
BK1-C503-W-7	5,00	0,00	13,00	7
BK1-C503-W-8	5,00	0,00	13,00	7
BK1-C503-W-9	5,00	0,00	13,00	7
BK1-C523-W-10	5,00	0,50	8,00	7
BK1-C523-W-11	5,00	0,50	8,00	7
BK1-C523-W-12	5,00	0,50	8,00	7
BK1-C523-W-13	5,00	0,50	10,00	7
BK1-C523-W-14	5,00	0,50	10,00	7
BK1-C523-W-15	5,00	0,50	10,00	7
BK1-C523-W-16	5,00	0,50	13,00	7
BK1-C523-W-17	5,00	0,50	13,00	7
BK1-C523-W-18	5,00	0,50	13,00	7
BK1-C1002-S-19	10,00	0,00	8,00	3
BK1-C1003-S-20	10,00	0,00	8,00	7
BK1-C1004-S-21	10,00	0,00	8,00	14
BK1-C802-S-22	8,00	0,00	12,00	3
BK1-C803-S-23	8,00	0,00	12,00	7
BK1-C804-S-24	8,00	0,00	12,00	14
BK2-C505-S-1	5,00	0,00	6,00	28
BK2-C505-S-2	5,00	0,00	7,00	28
BK2-C505-S-3	5,00	0,00	8,00	28
BK2-C505-S-4	5,00	0,00	9,00	28
BK2-C505-S-5	5,00	0,00	10,00	28
BK2-C505-S-6	5,00	0,00	11,00	28
BK2-C505-S-7	5,00	0,00	12,00	28
BK2-C515-S-8	5,00	0,25	6,00	28
BK2-C515-S-9	5,00	0,25	7,00	28
BK2-C515-S-10	5,00	0,25	8,00	28
BK2-C515-S-11	5,00	0,25	9,00	28
BK2-C515-S-12	5,00	0,25	10,00	28
BK2-C515-S-13	5,00	0,25	11,00	28
BK2-C515-S-14	5,00	0,25	12,00	28
BK2-C525-S-15	5,00	0,50	6,00	28
BK2-C525-S-16	5,00	0,50	7,00	28

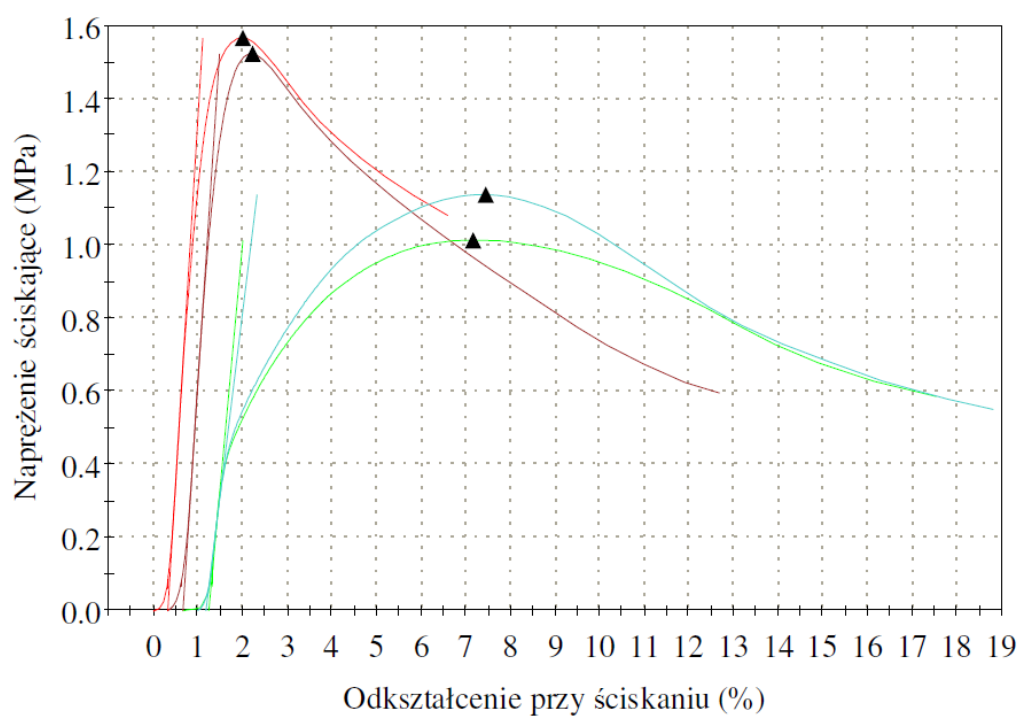
Oznaczenie próbki	C [%]	Z [%]	w [%]	T_C [dni]
BK2-C525-S-17	5,00	0,50	8,00	28
BK2-C525-S-18	5,00	0,50	9,00	28
BK2-C525-S-19	5,00	0,50	10,00	28
BK2-C525-S-20	5,00	0,50	11,00	28
BK2-C525-S-21	5,00	0,50	12,00	28
BK2-C1002-S-22	10,00	0,00	9,00	3
BK2-C1003-S-23	10,00	0,00	9,00	7
BK2-C1004-S-24	10,00	0,00	9,00	14
BK3-C505-S-1	5,00	0,00	10,00	28
BK3-C505-S-2	5,00	0,00	11,00	28
BK3-C505-S-3	5,00	0,00	12,00	28
BK3-C505-S-4	5,00	0,00	13,00	28
BK3-C505-S-5	5,00	0,00	14,00	28
BK3-C505-S-6	5,00	0,00	15,00	28
BK3-C505-S-7	5,00	0,00	16,00	28
BK3-C515-S-8	5,00	0,25	10,00	28
BK3-C515-S-9	5,00	0,25	11,00	28
BK3-C515-S-10	5,00	0,25	12,00	28
BK3-C515-S-11	5,00	0,25	13,00	28
BK3-C515-S-12	5,00	0,25	14,00	28
BK3-C515-S-13	5,00	0,25	15,00	28
BK3-C515-S-14	5,00	0,25	16,00	28
BK3-C525-S-15	5,00	0,50	10,00	28
BK3-C525-S-16	5,00	0,50	11,00	28
BK3-C525-S-17	5,00	0,50	12,00	28
BK3-C525-S-18	5,00	0,50	13,00	28
BK3-C525-S-19	5,00	0,50	14,00	28
BK3-C525-S-20	5,00	0,50	15,00	28
BK3-C525-S-21	5,00	0,50	16,00	28
BK3-C1002-S-22	10,00	0,00	14,00	3
BK3-C1003-S-23	10,00	0,00	14,00	7
BK3-C1004-S-24	10,00	0,00	14,00	14

Załącznik B

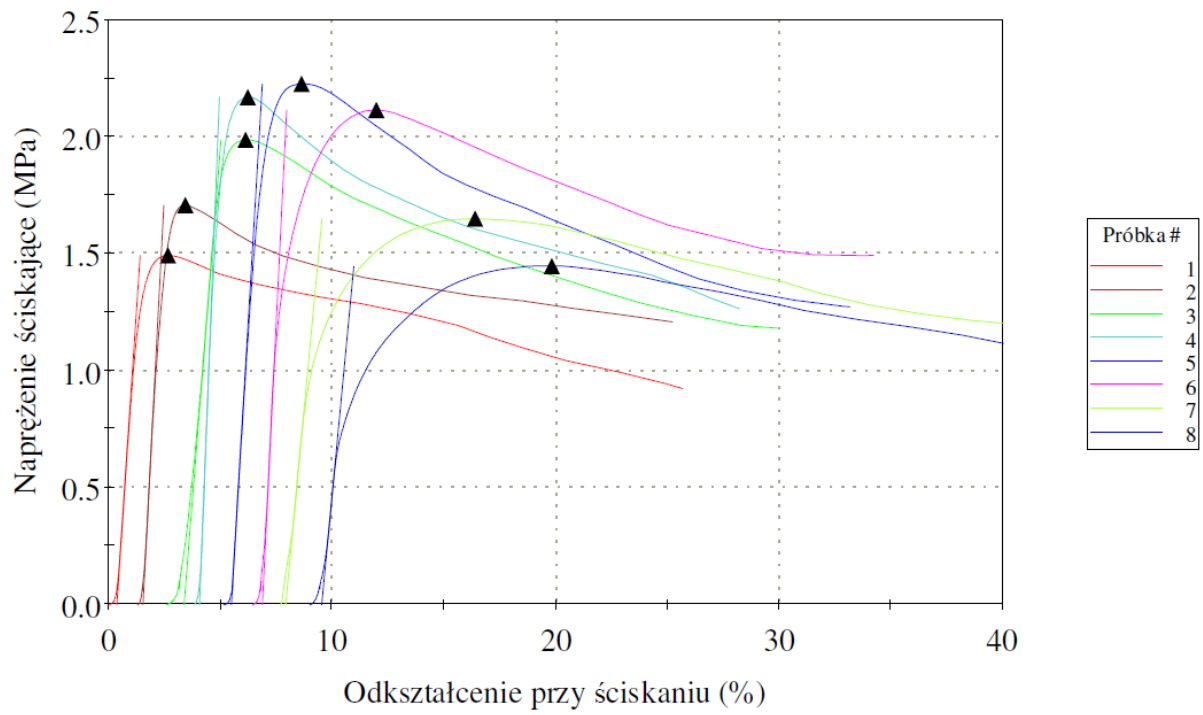
B1-C315-S-(13-20)



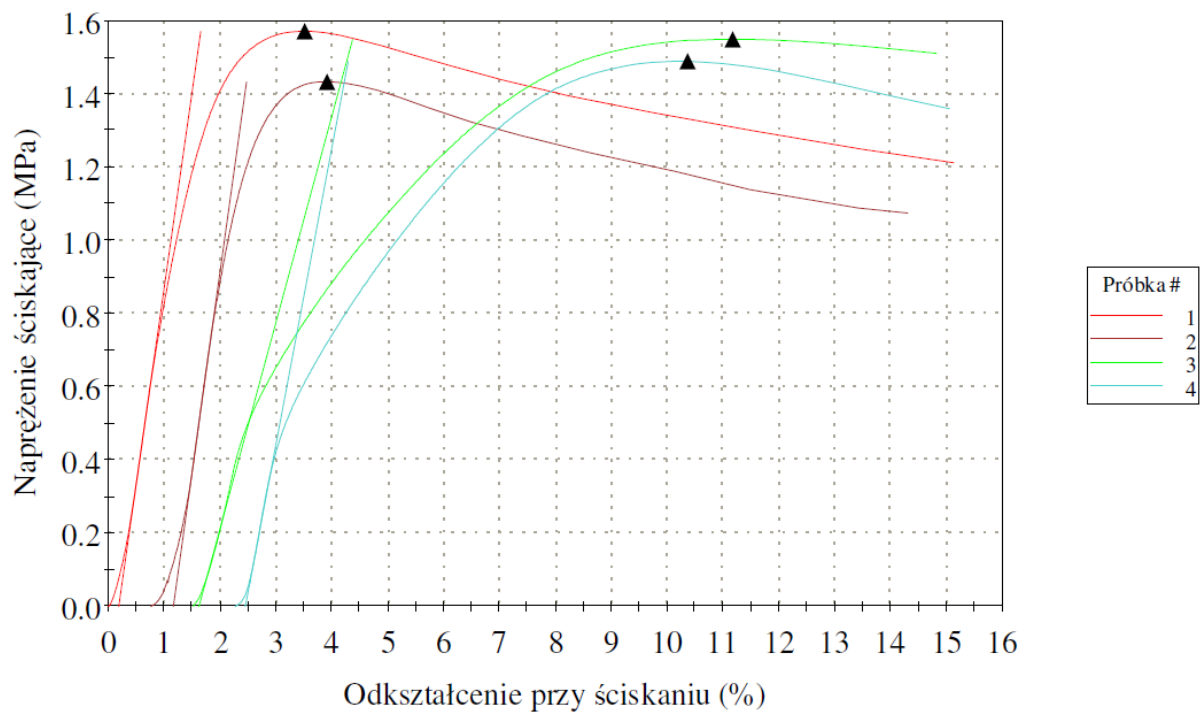
B1-C315-S-(21-24)



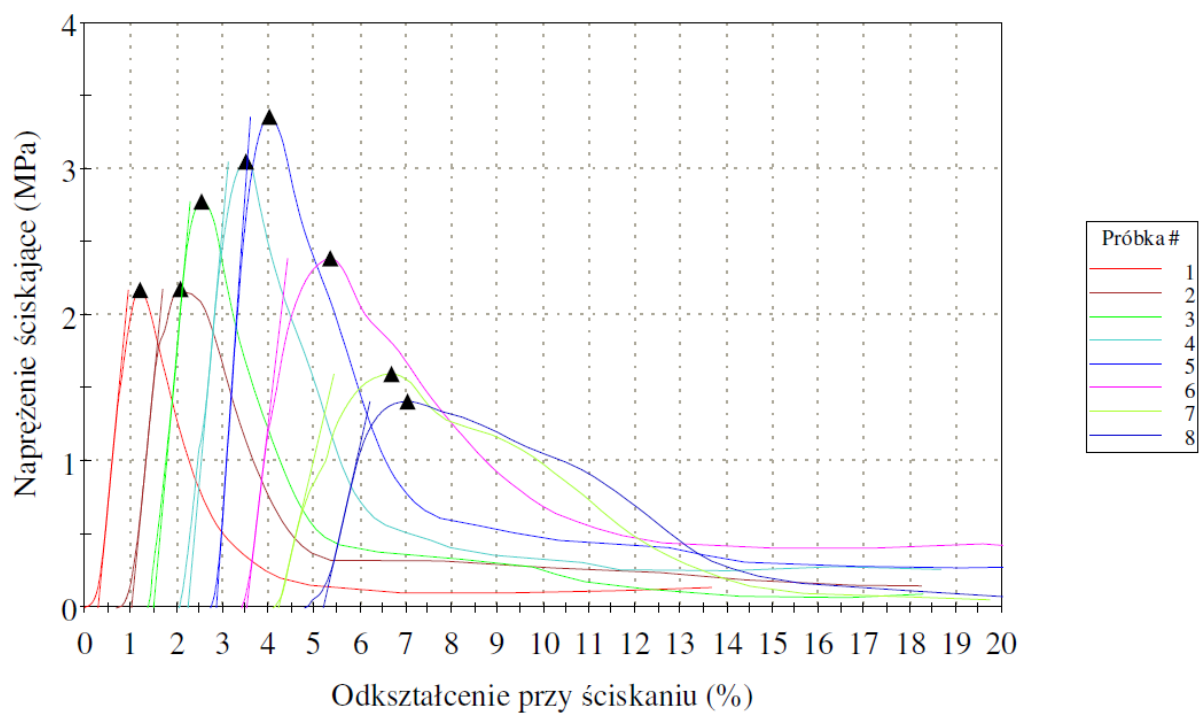
B1-C325-S-(25-32)



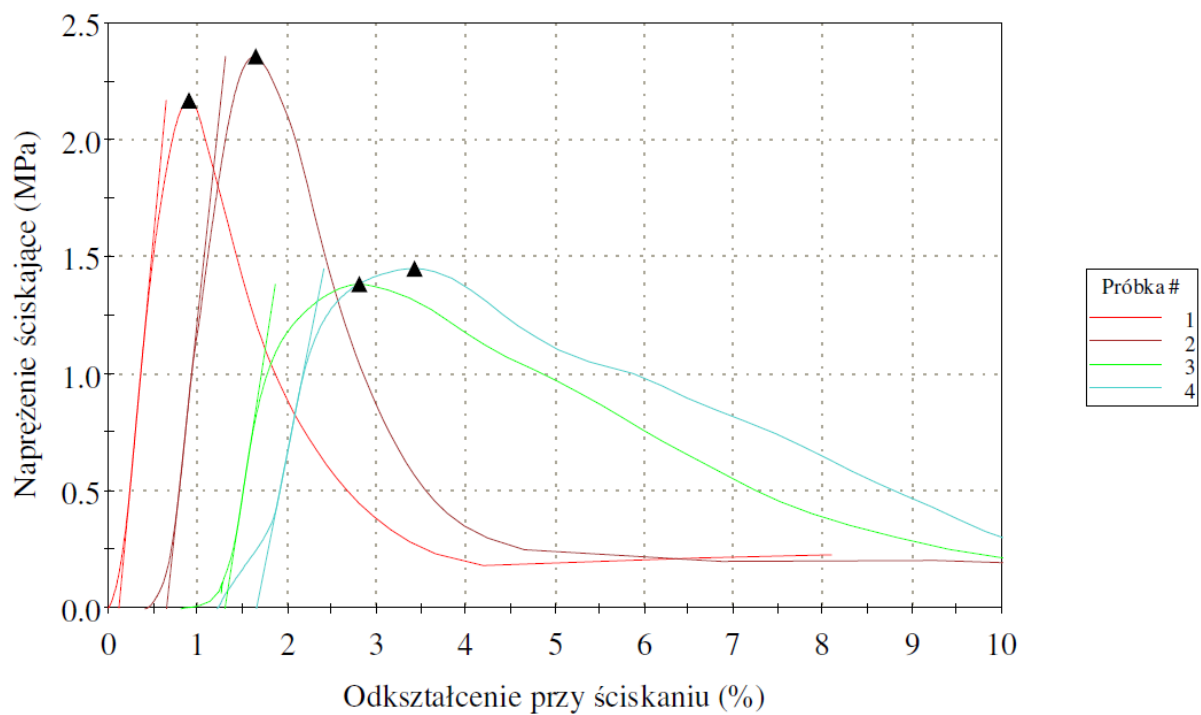
B1-C325-S-(33-36)



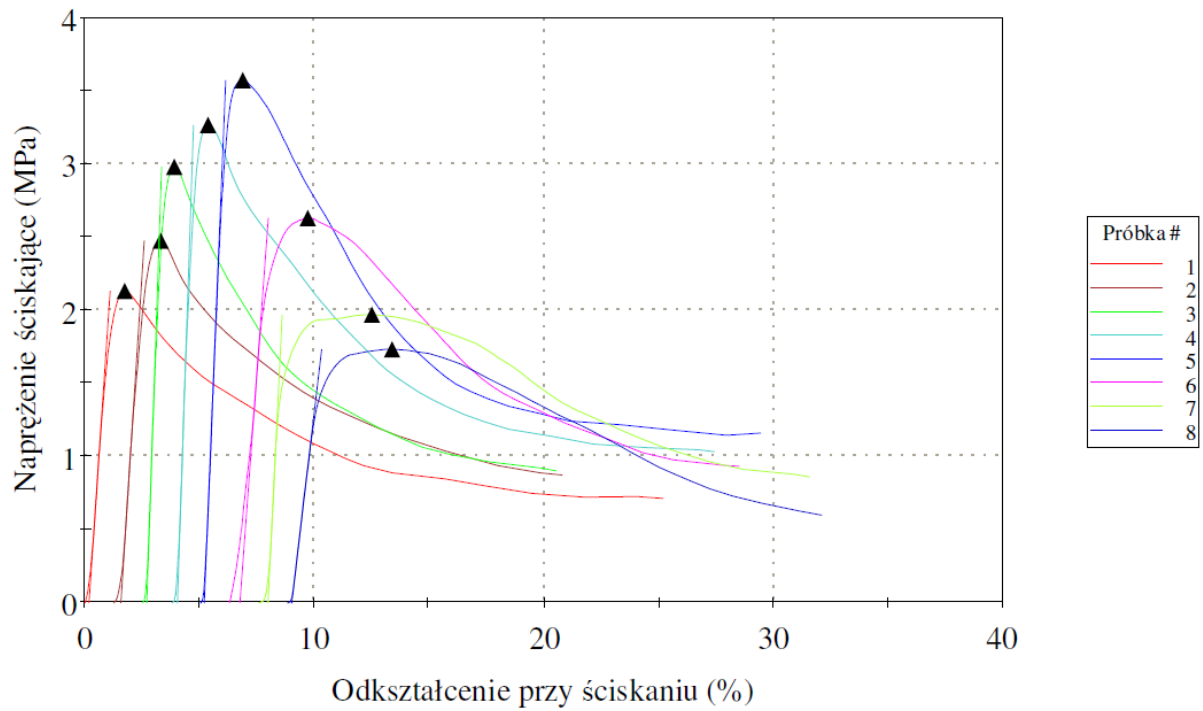
B1-C505-S-(37-44)



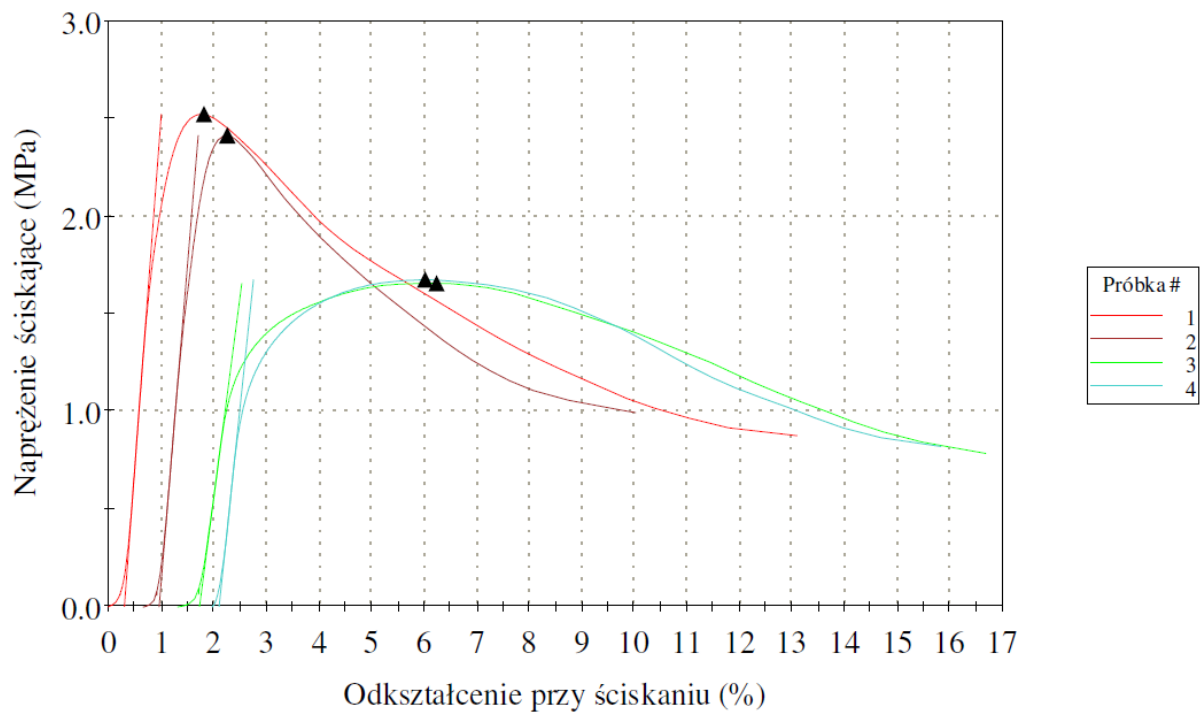
B1-C505-S-(45-48)



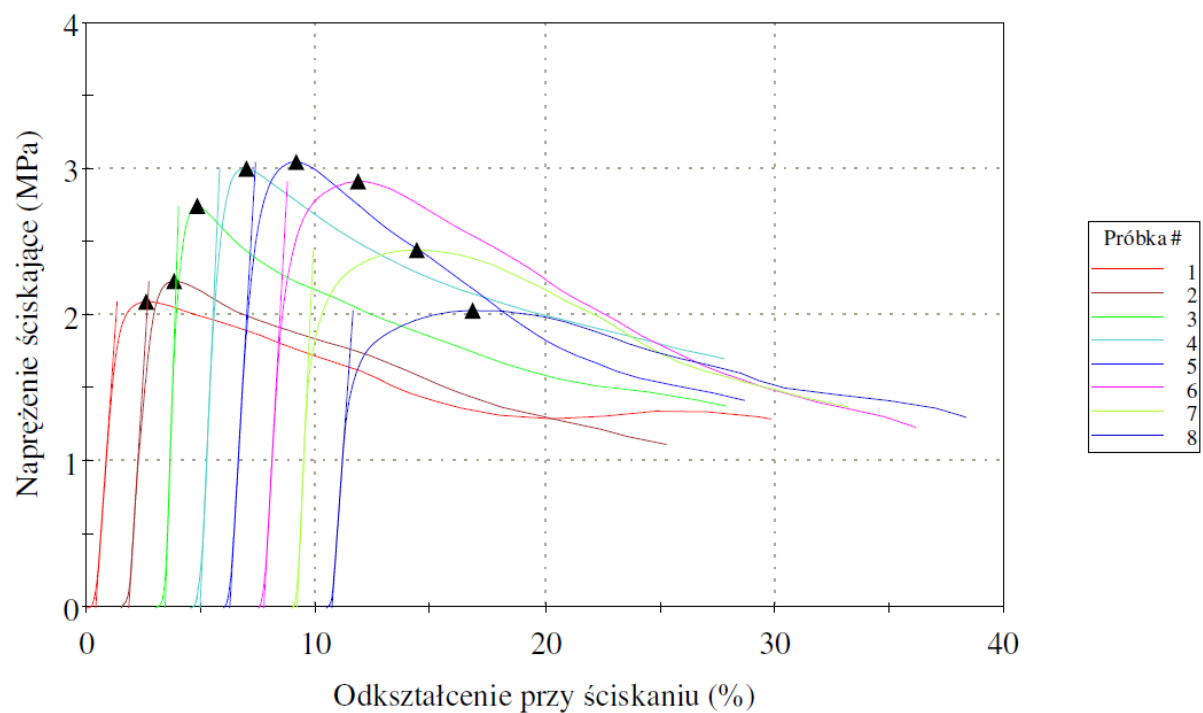
B1-C515-S-(49-56)



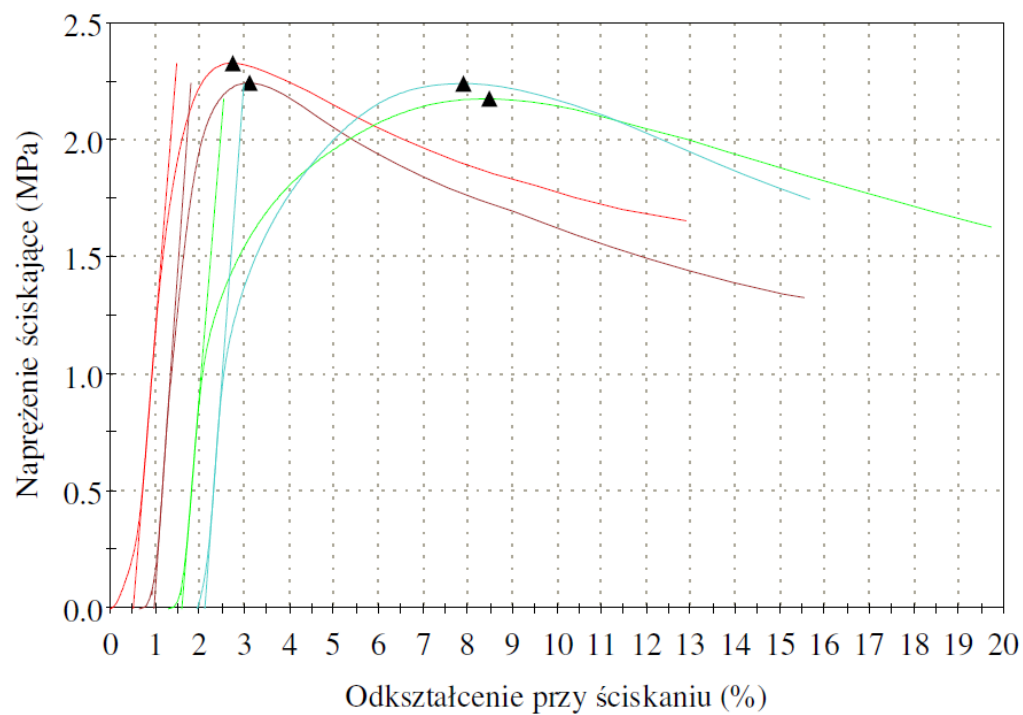
B1-C515-S-(57-60)



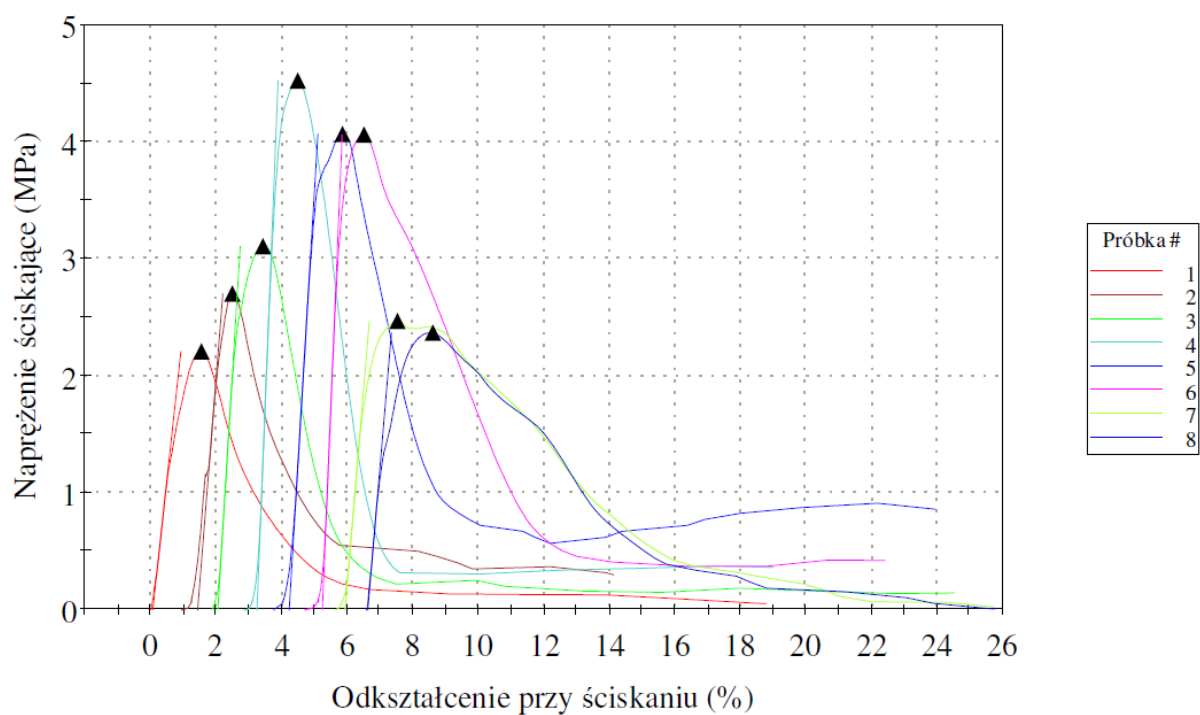
B1-C525-S-(61-68)



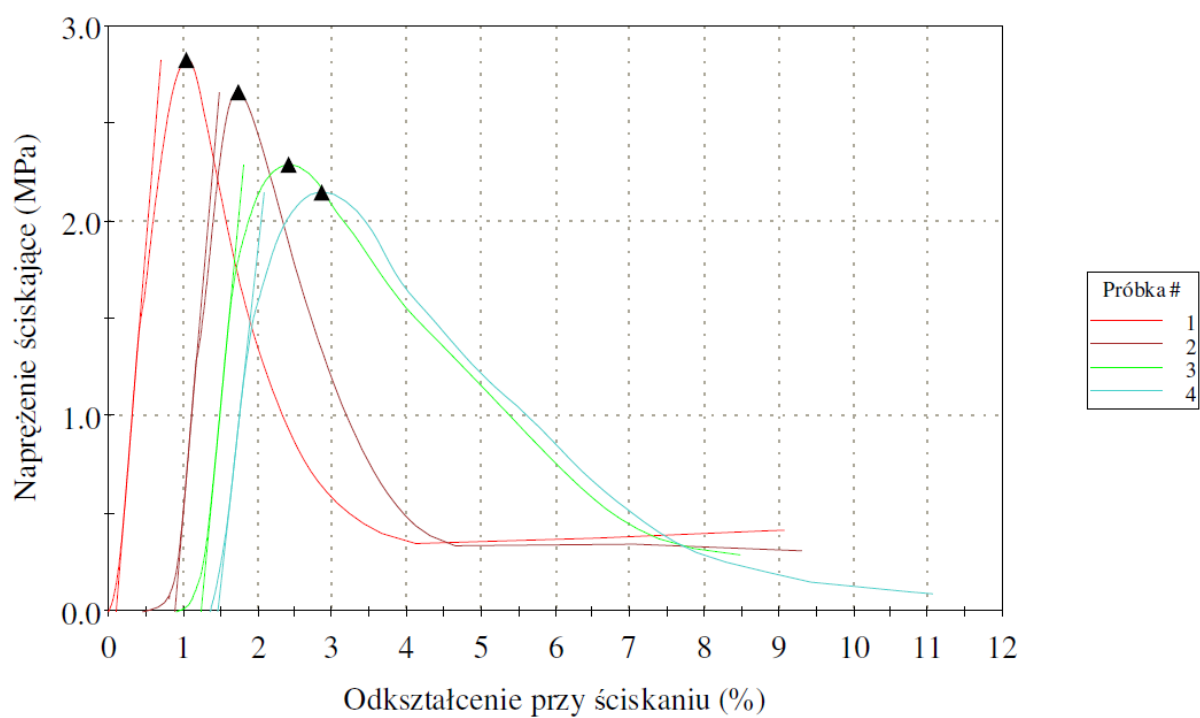
B1-C525-S-(69-72)



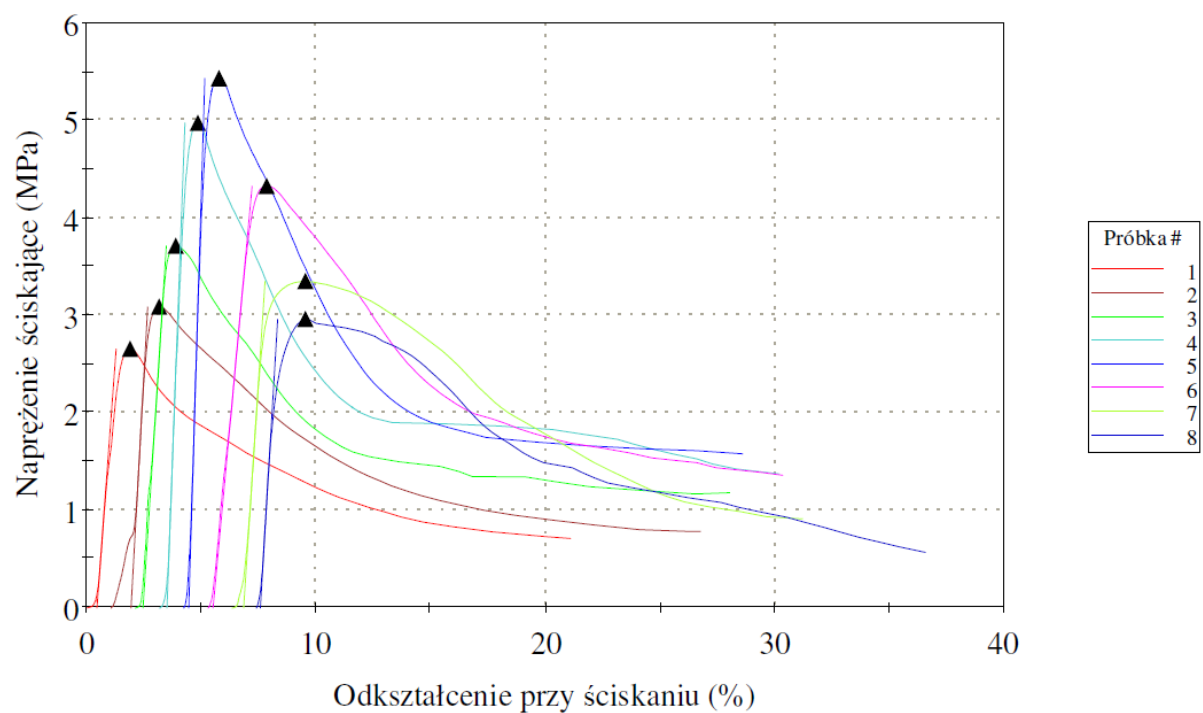
B1-C705-S-(73-80)



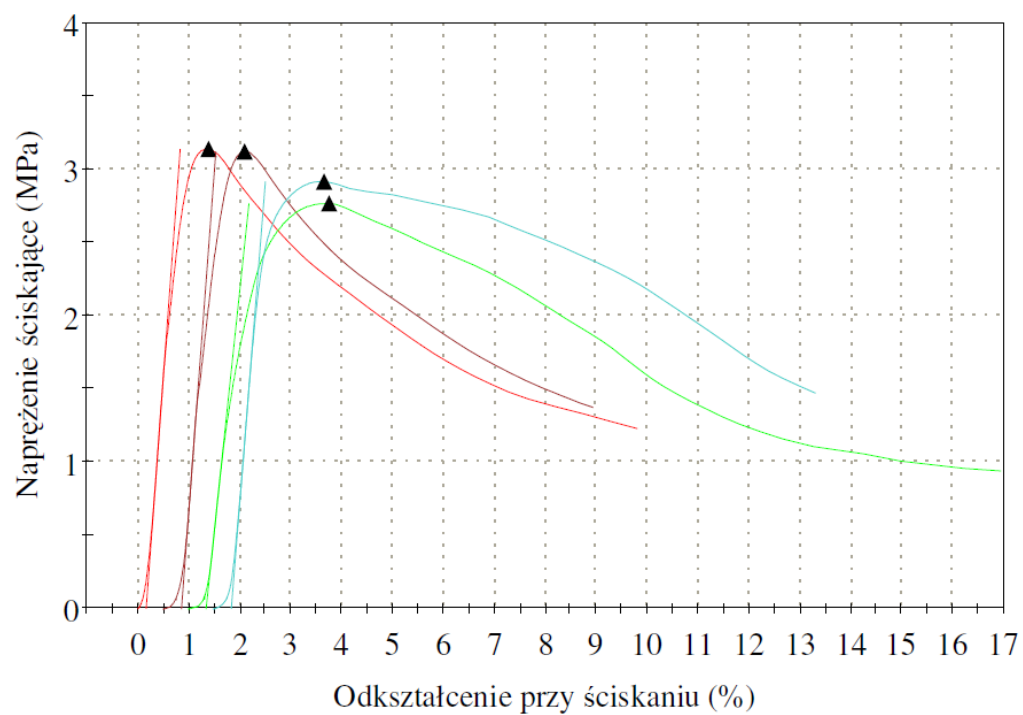
B1-C705-S-(81-84)



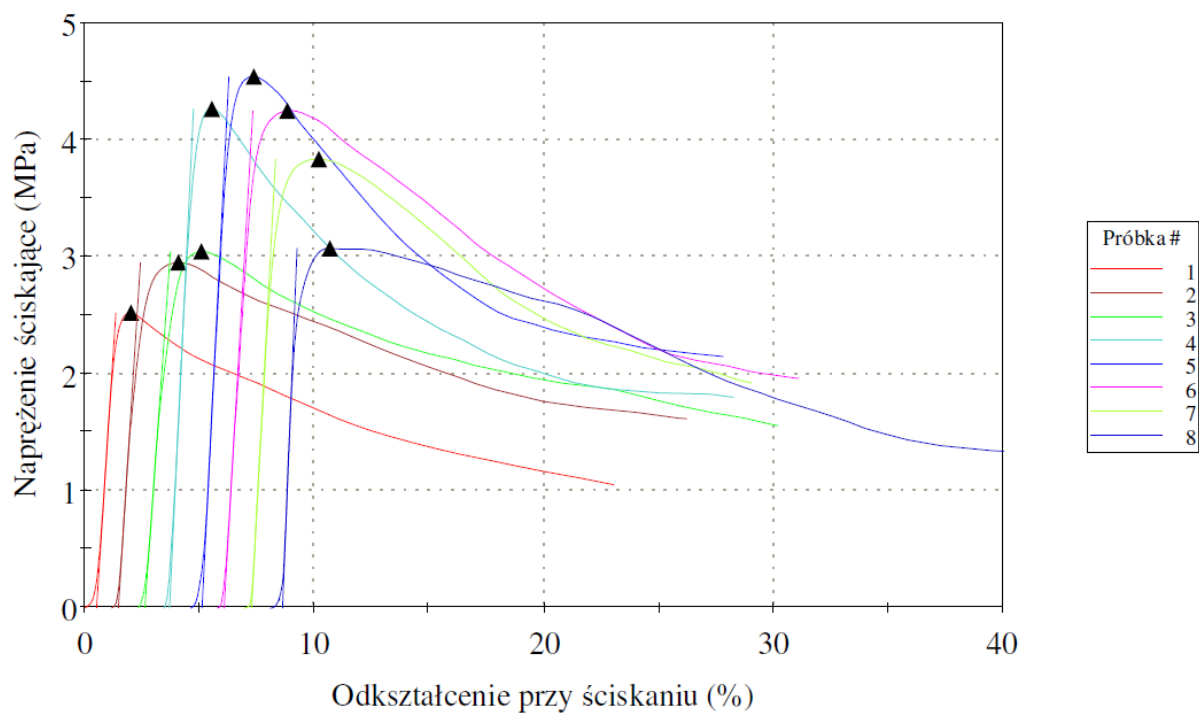
B1-C715-S-(85-92)



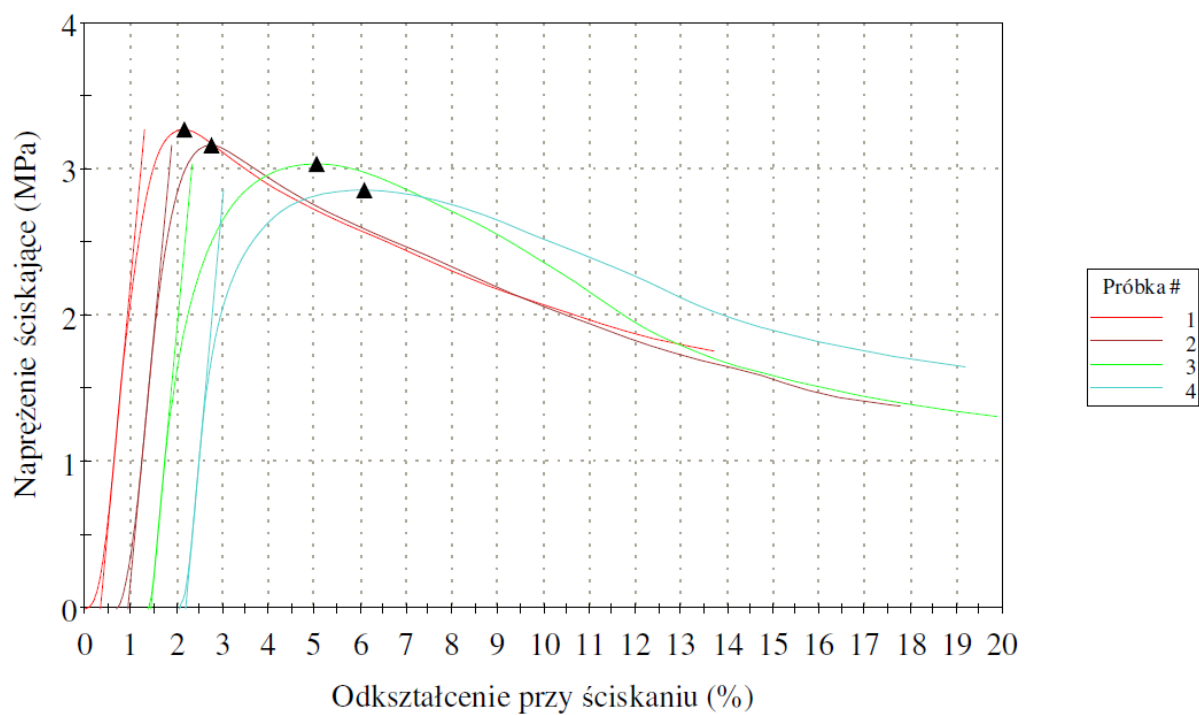
B1-C715-S-(93-96)



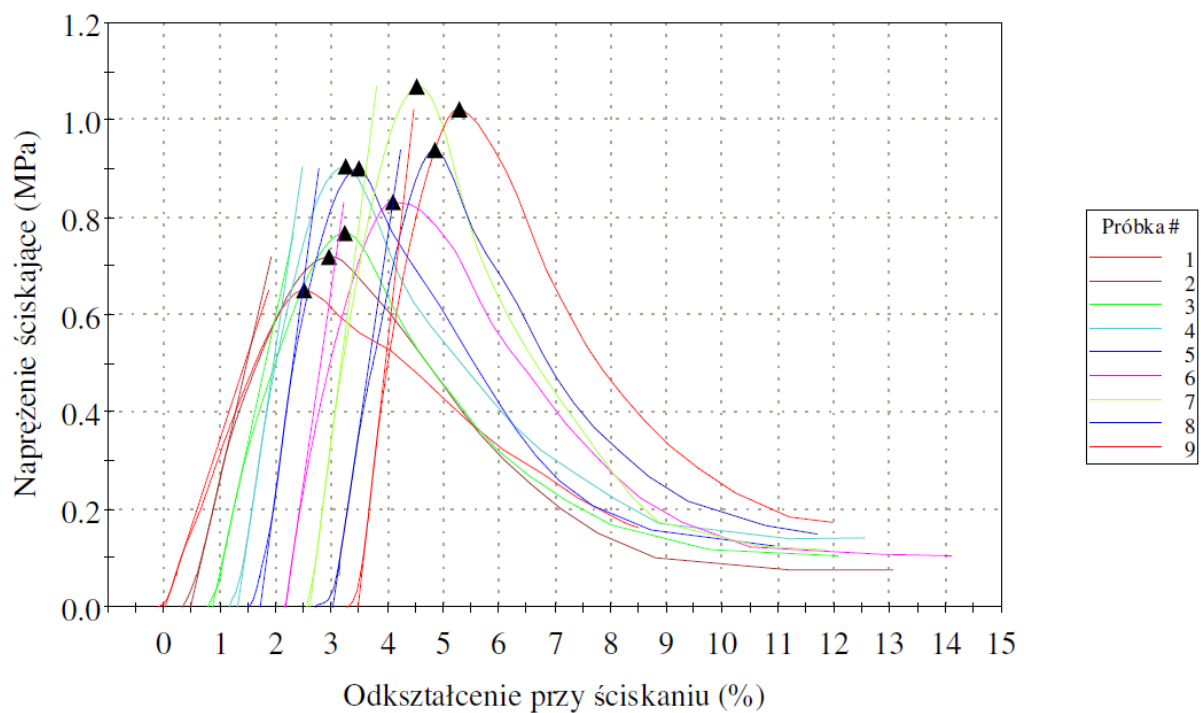
B1-C725-S-(97-104)



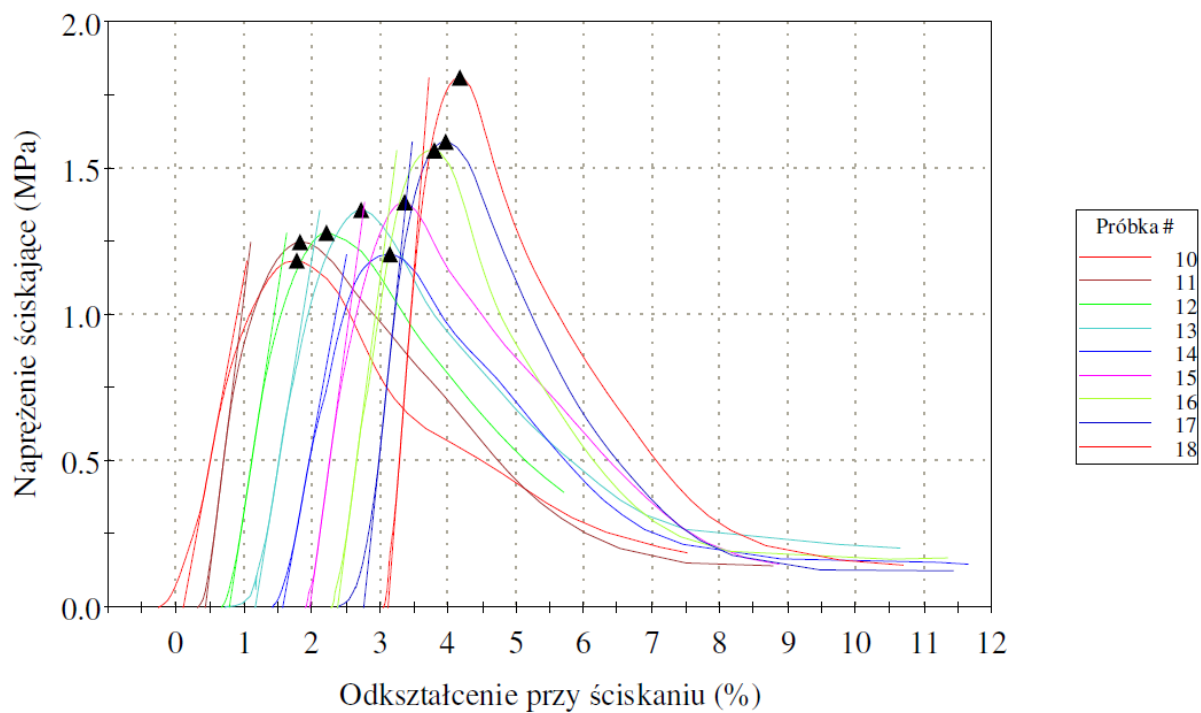
B1-C725-S-(105-108)



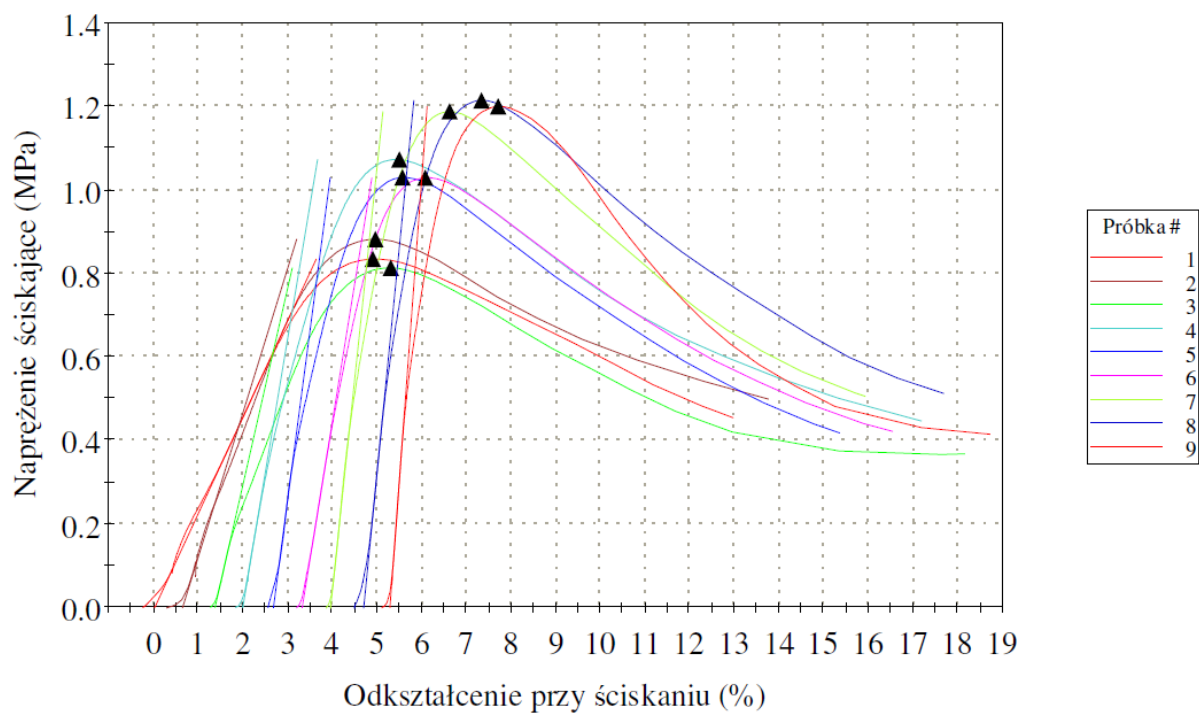
B2-C201-S-(1-3) / B2-C202-S-(4-6) / B2-C203-S-(7-9)



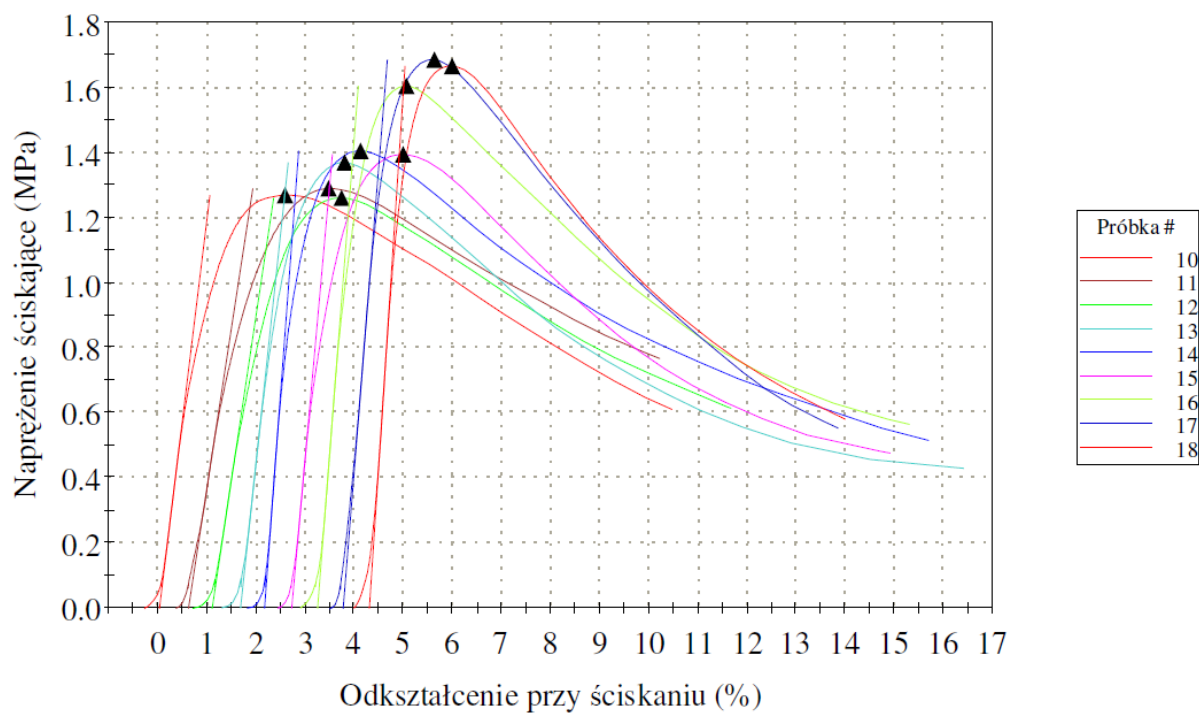
B2-C204-S-(10-12) / B2-C205-S-(13-15) / B2-C206-S-(16-18)



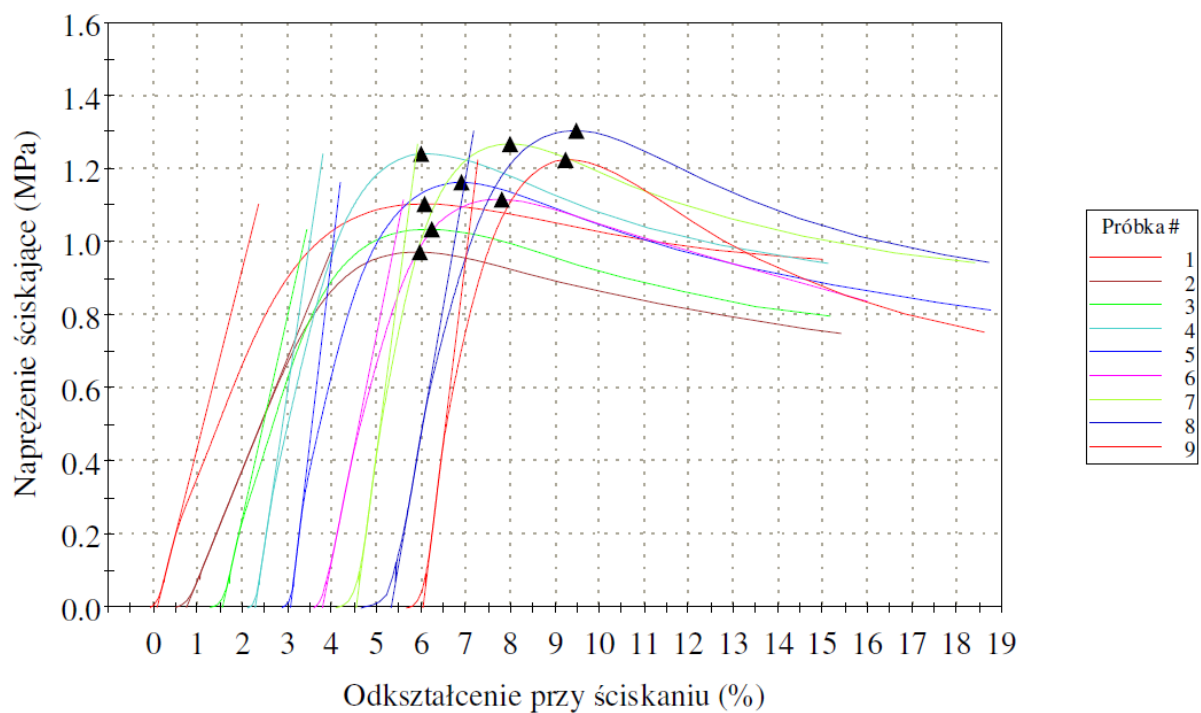
B2-C211-S-(19-21) / B2-C212-S-(22-24) / B2-C213-S-(25-27)



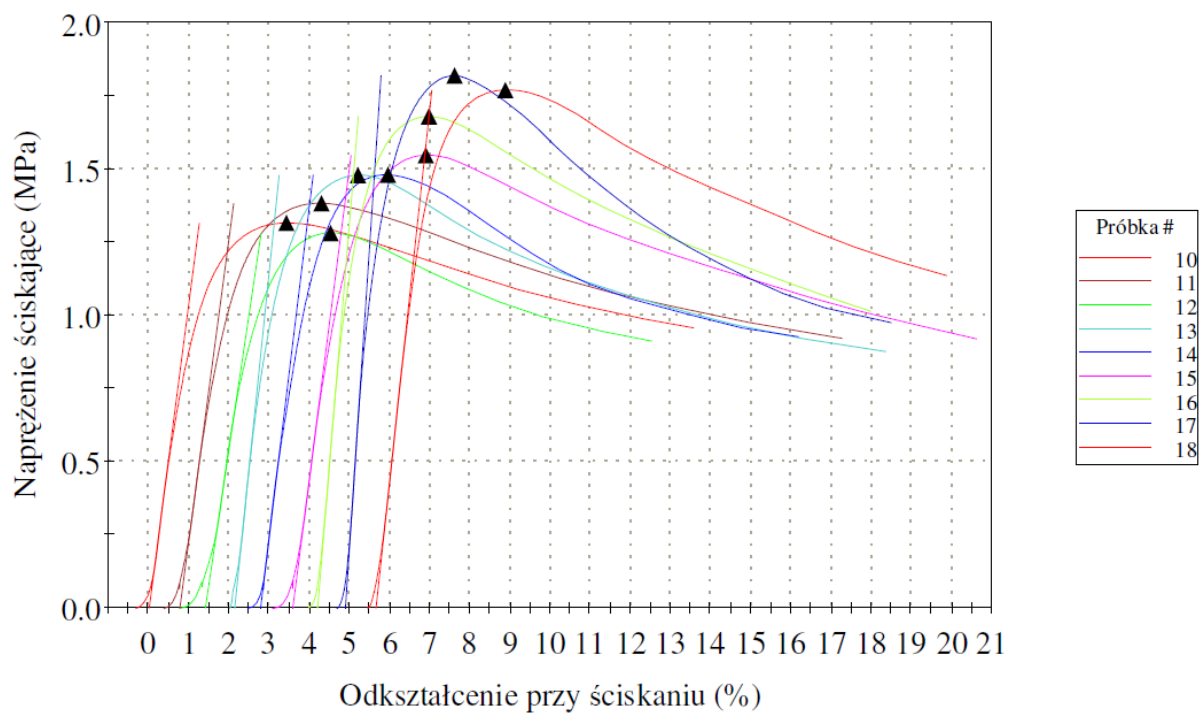
B2-C214-S-(28-30) / B2-C215-S-(31-33) / B2-C216-S-(34-36)



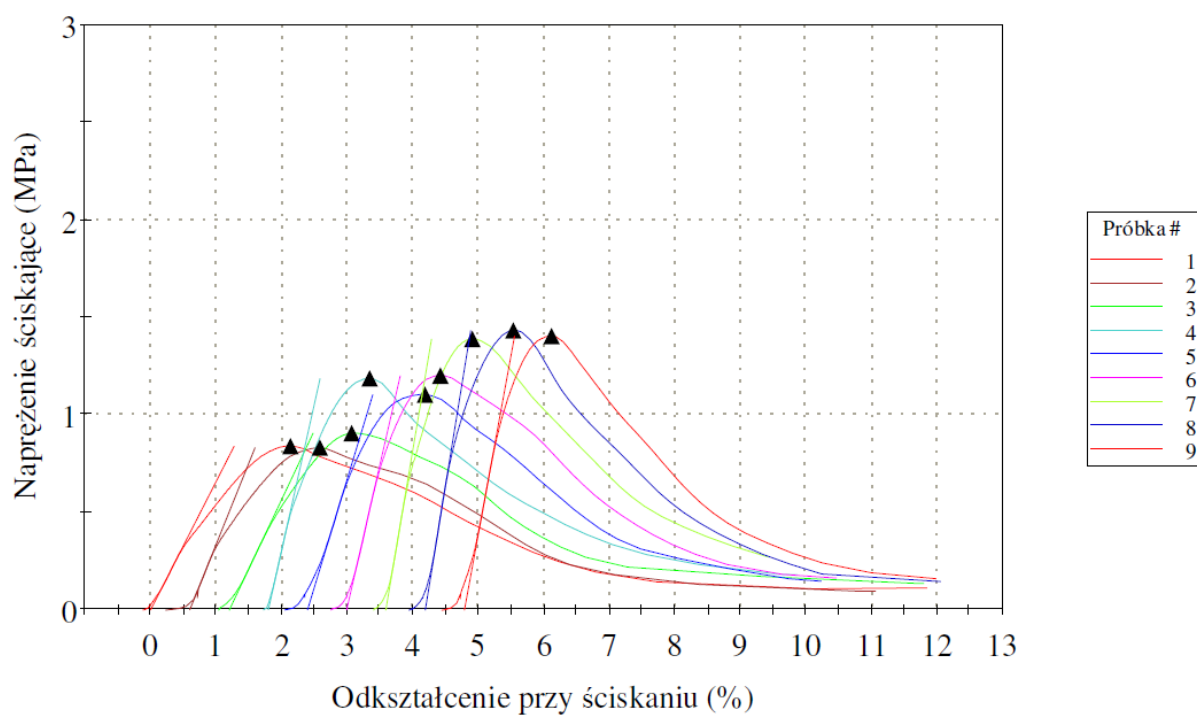
B2-C221-S-(37-39) / B2-C222-S-(40-42) / B2-C223-S-(43-45)



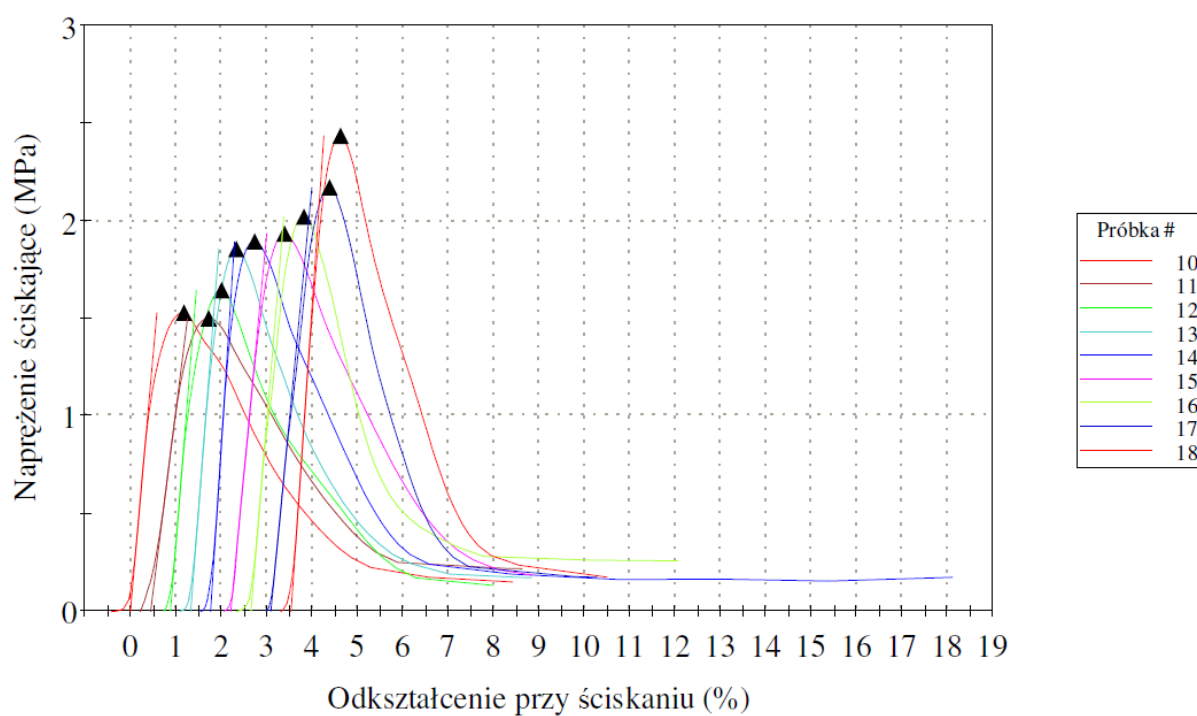
B2-C224-S-(46-48) / B2-C225-S-(49-51) / B2-C226-S-(52-54)



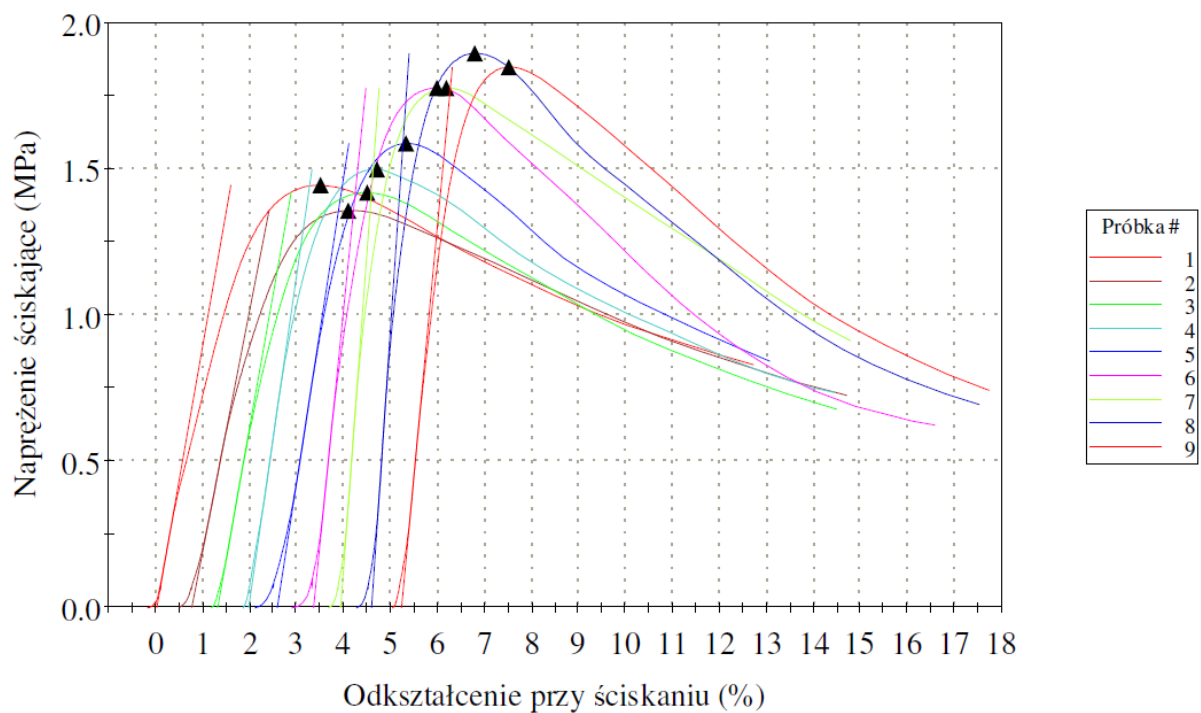
B2-C401-S-(55-57) / B2-C402-S-(58-60) / B2-C403-S-(61-63)



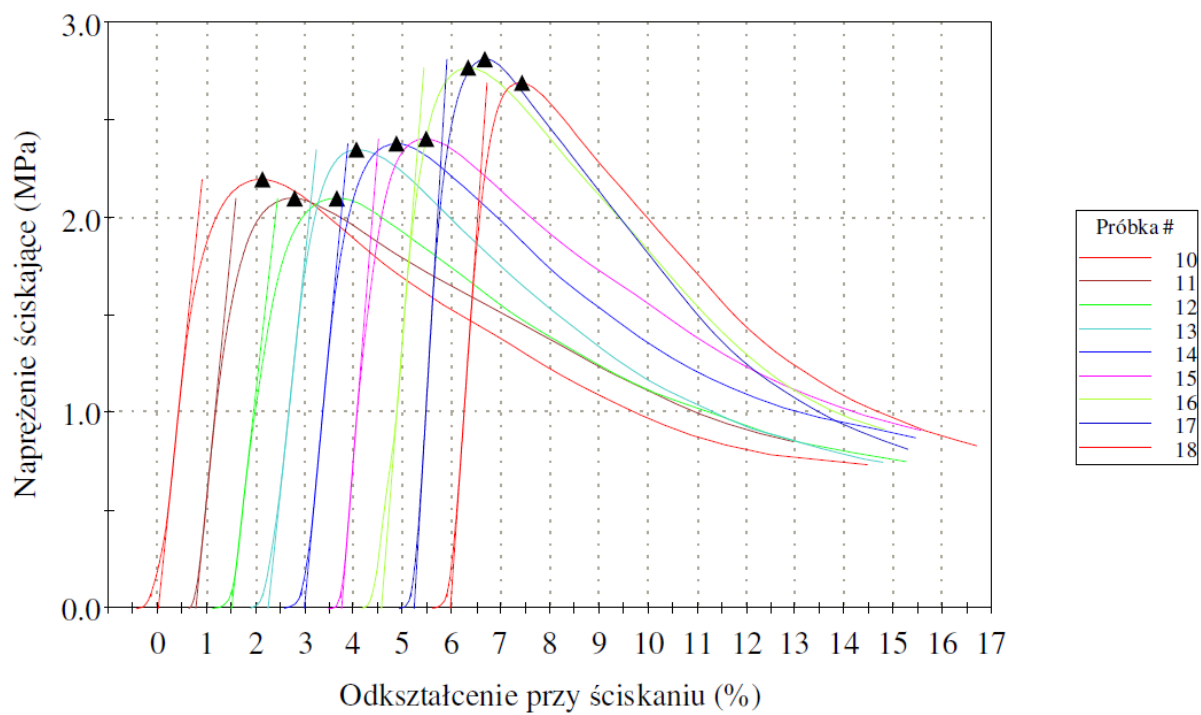
B2-C404-S-(64-66) / B2-C405-S-(67-69) / B2-C406-S-(70-72)



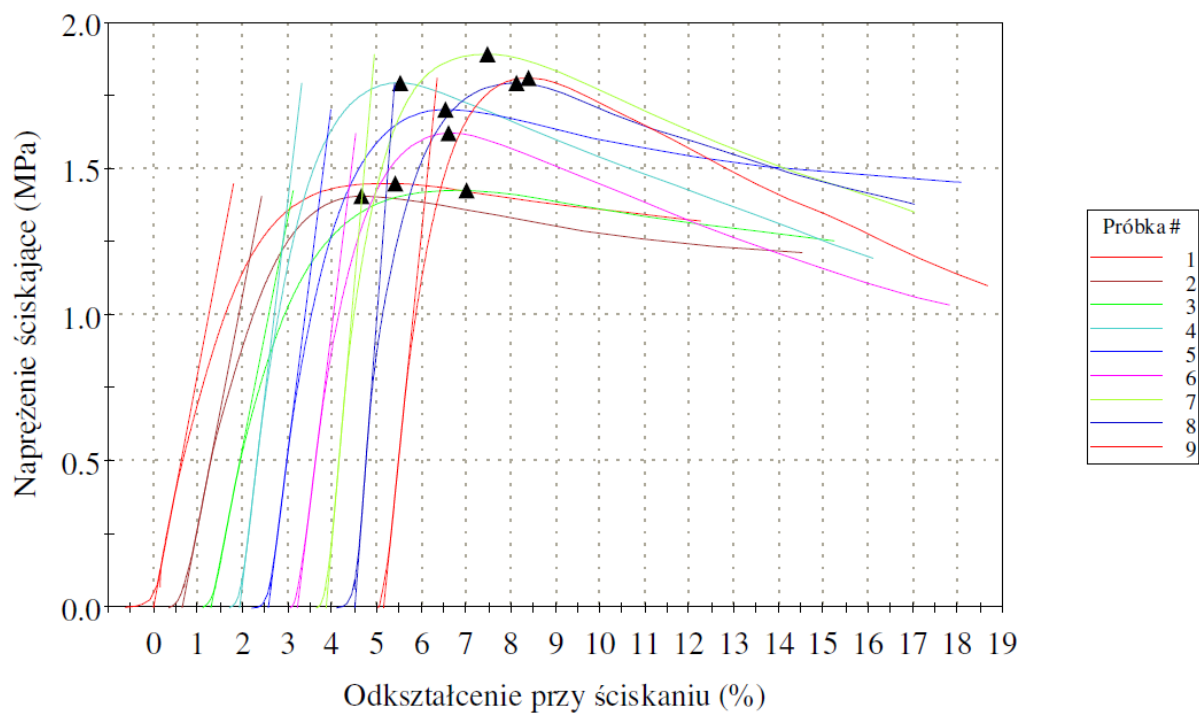
B2-C411-S-(73-75) / B2-C412-S-(76-78) / B2-C413-S-(79-81)



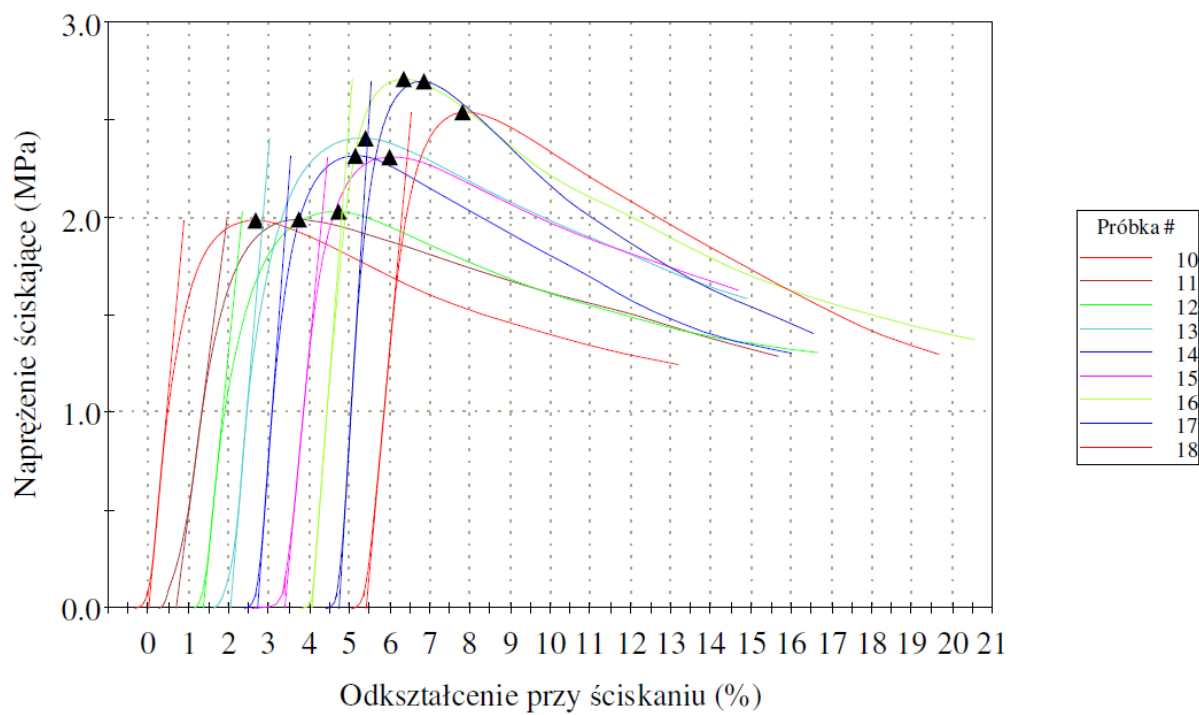
B2-C414-S-(82-84) / B2-C415-S-(85-87) / B2-C416-S-(88-90)



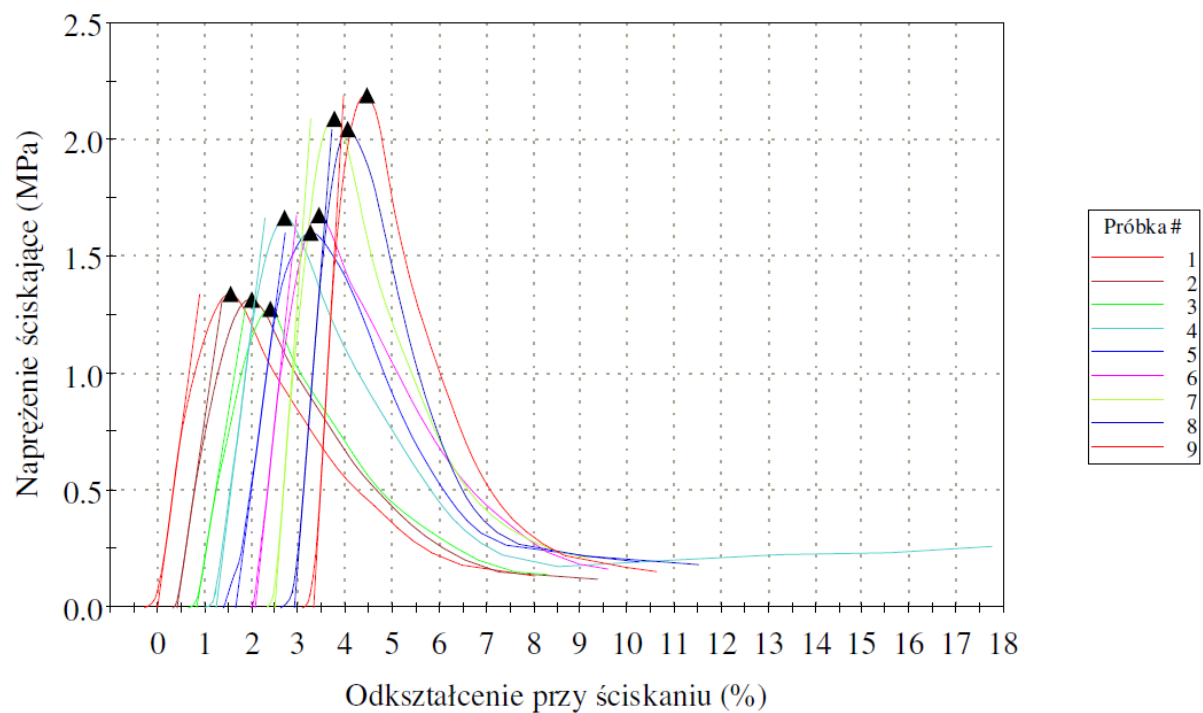
B2-C421-S-(91-93) / B2-C422-S-(94-96) / B2-C423-S-(97-99)



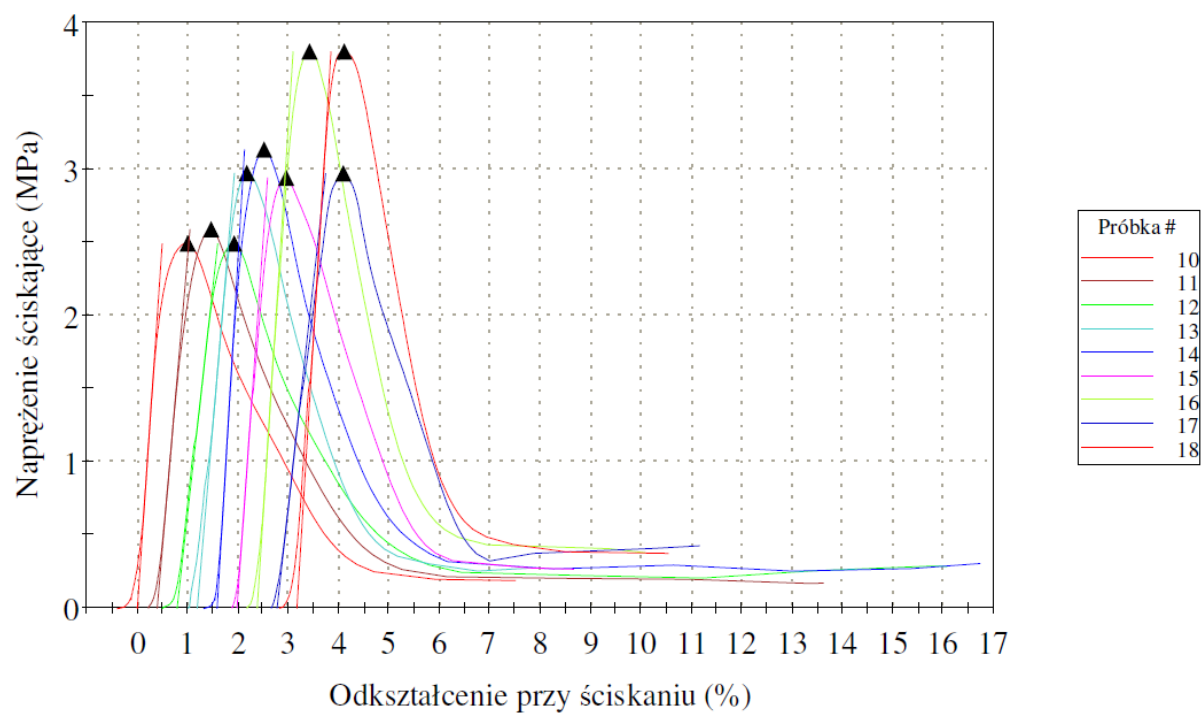
B2-C424-S-(100-102) / B2-C425-S-(103-105) / B2-C426-S-(106-108)



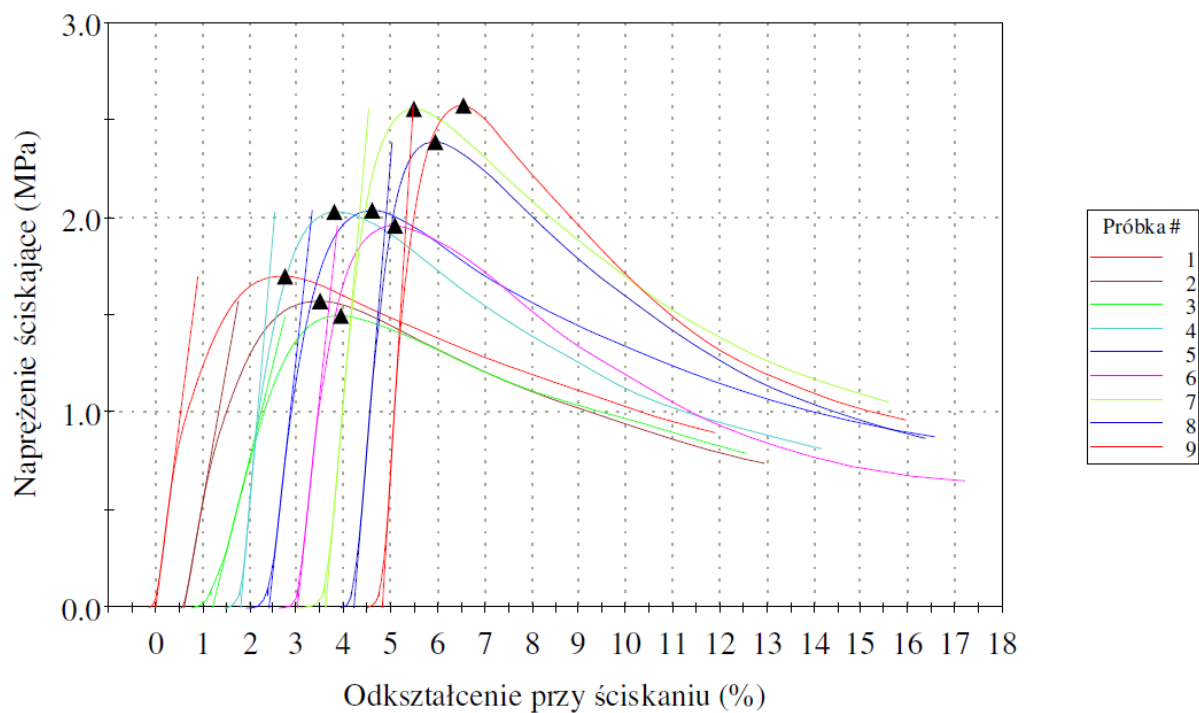
B2-C601-S-(109-111) / B2-C602-S-(112-114) / B2-C603-S-(115-117)



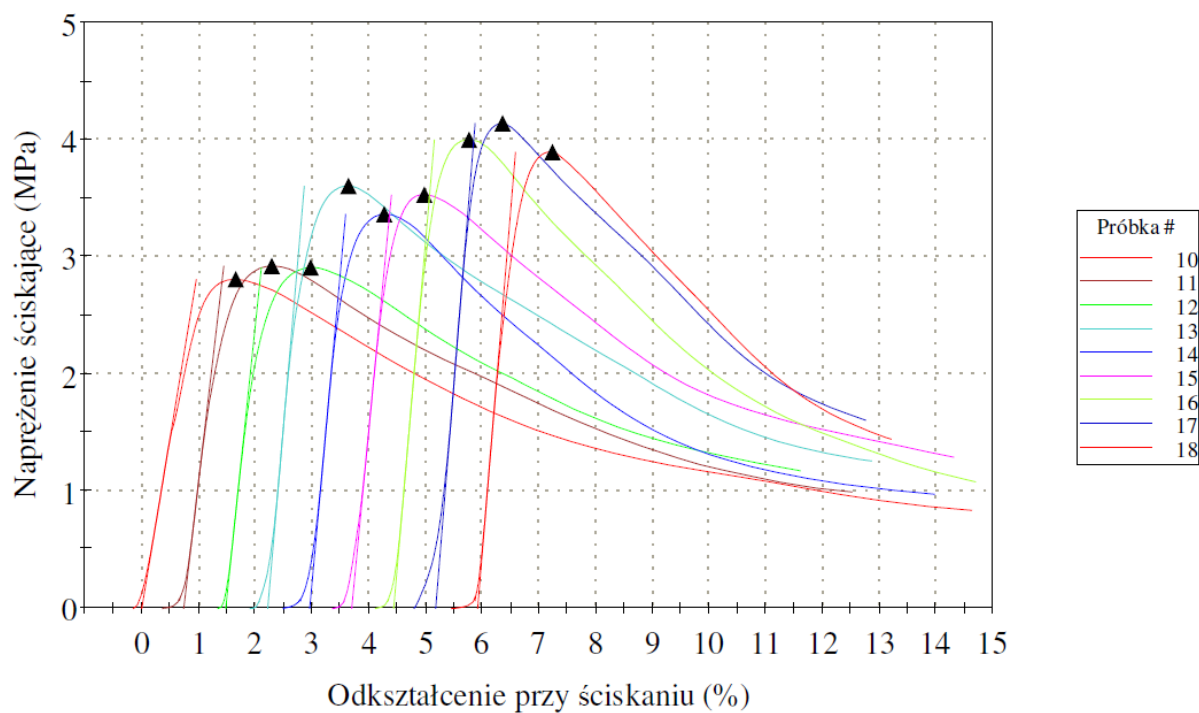
B2-C604-S-(118-120) / B2-C605-S-(121-123) / B2-C606-S-(124-126)



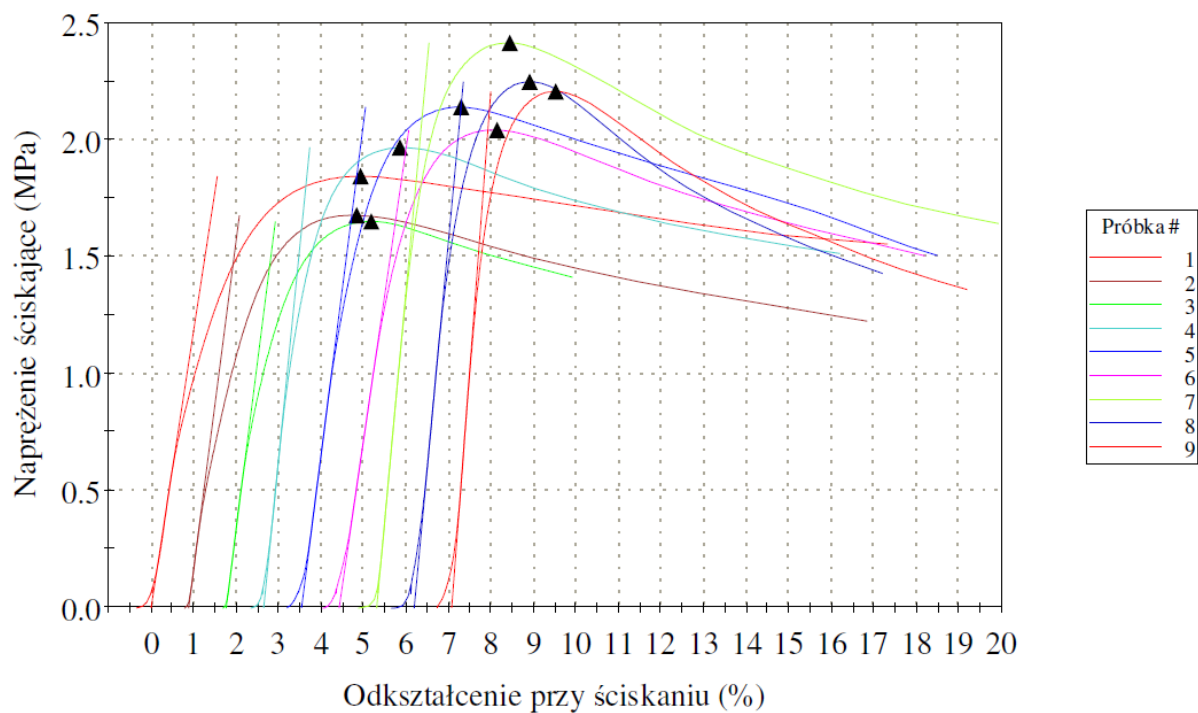
B2-C611-S-(127-129) / B2-C612-S-(130-132) / B2-C613-S-(133-135)



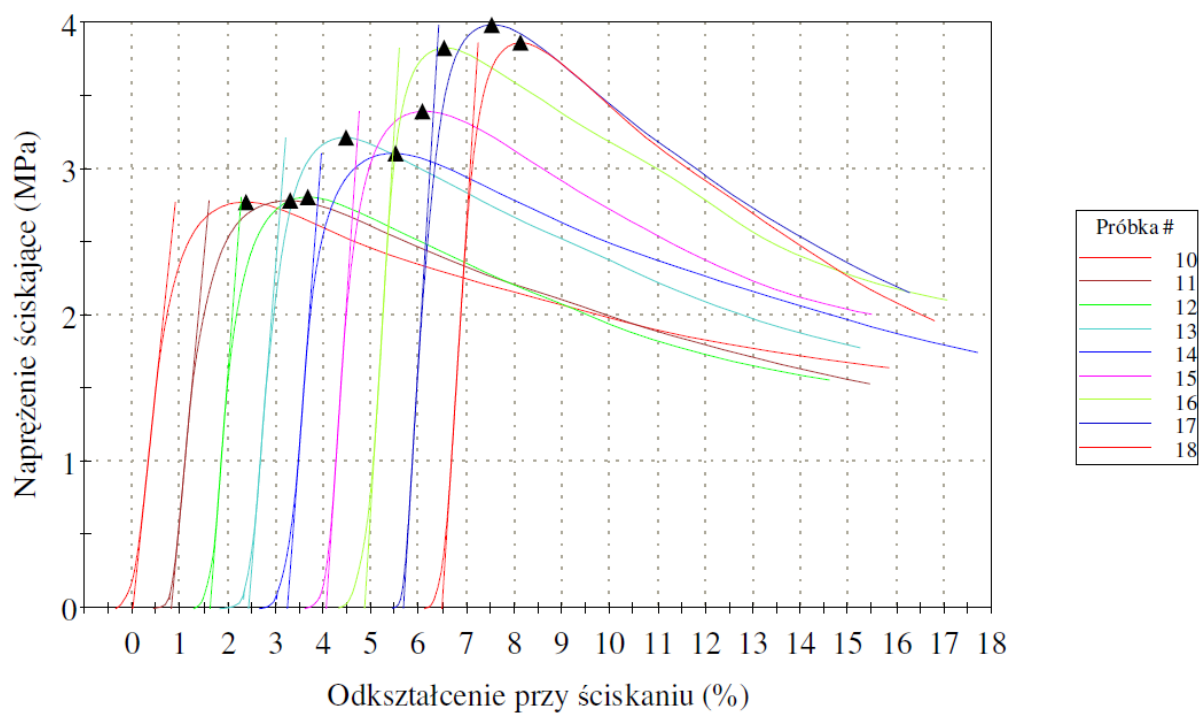
B2-C614-S-(136-138) / B2-C615-S-(139-141) / B2-C616-S-(142-144)



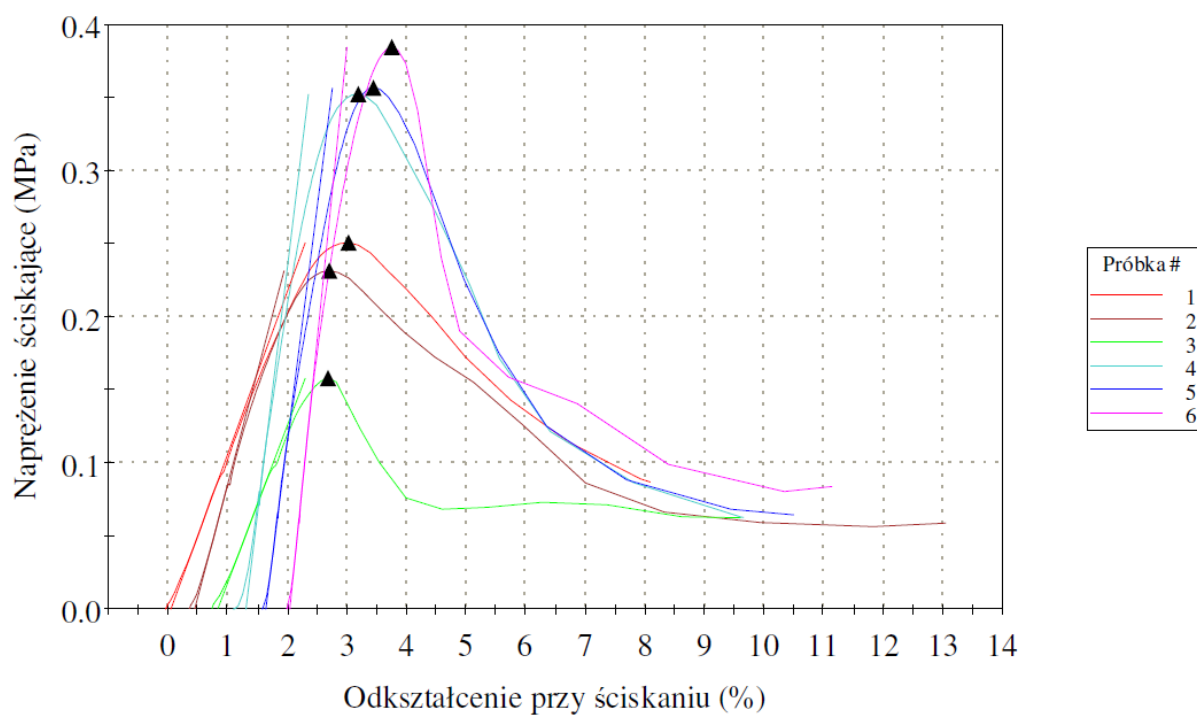
B2-C621-S-(145-147) / B2-C622-S-(148-150) / B2-C623-S-(151-153)



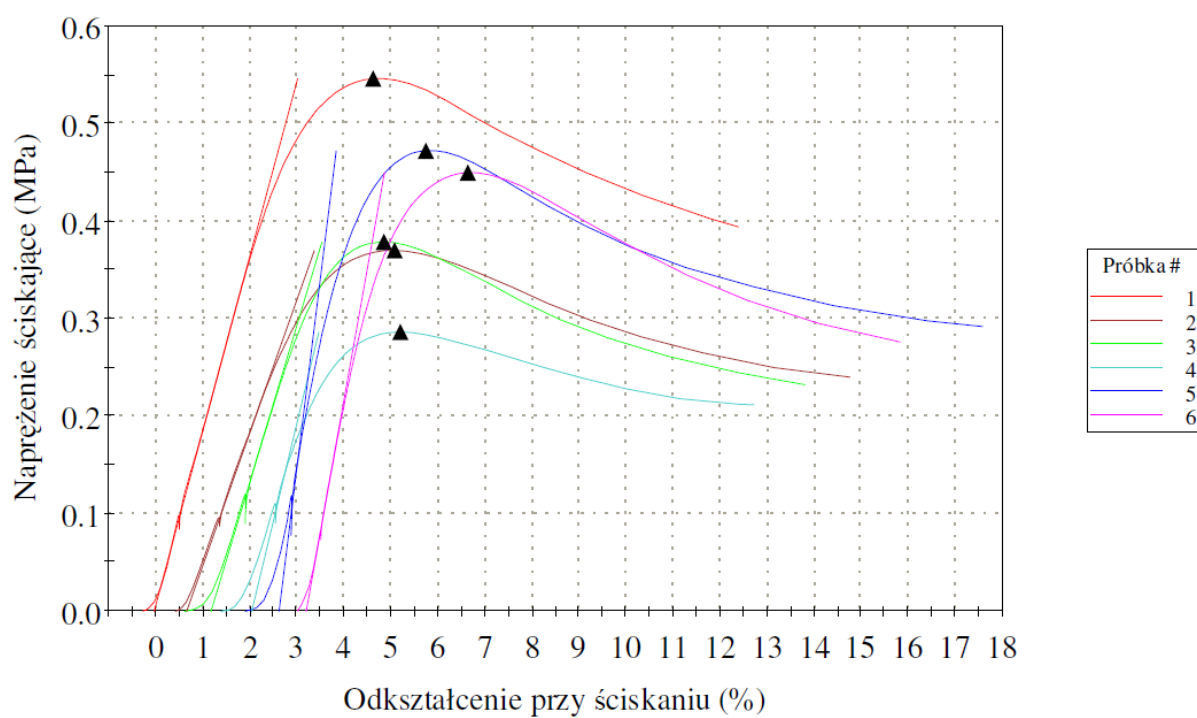
B2-C624-S-(154-156) / B2-C625-S-(157-159) / B2-C626-S-(160-162)



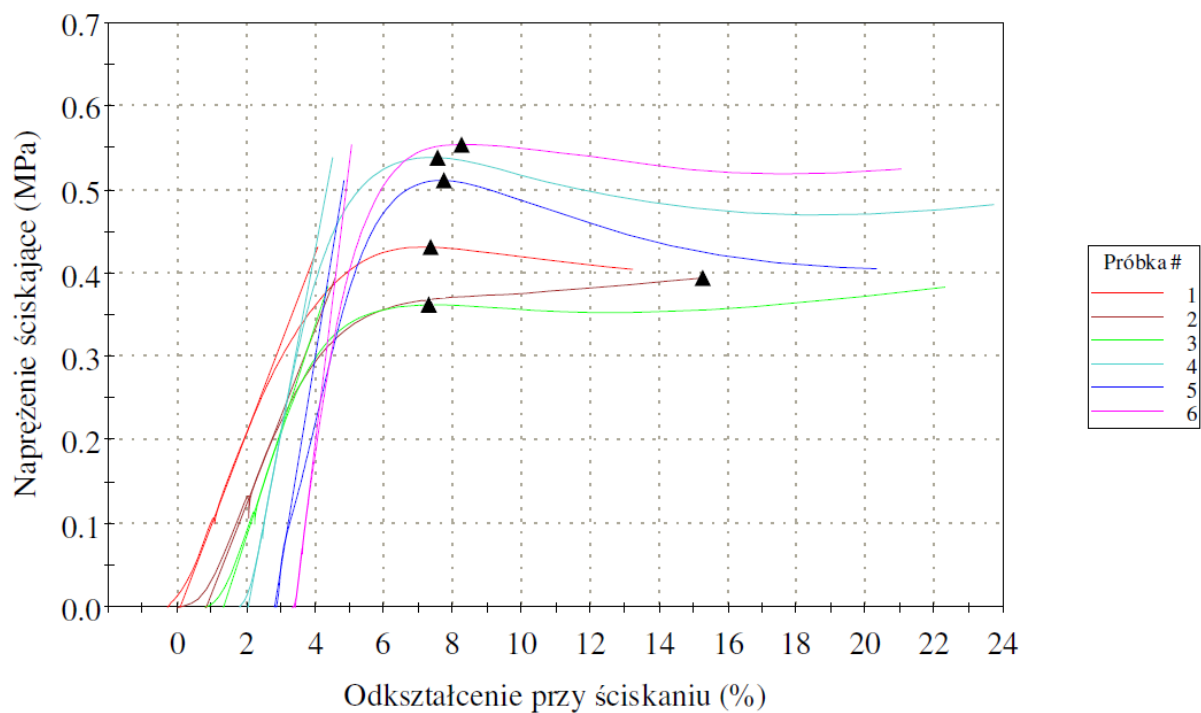
B3-C105-W-(1-3) / B3-C105-S-(4-6)



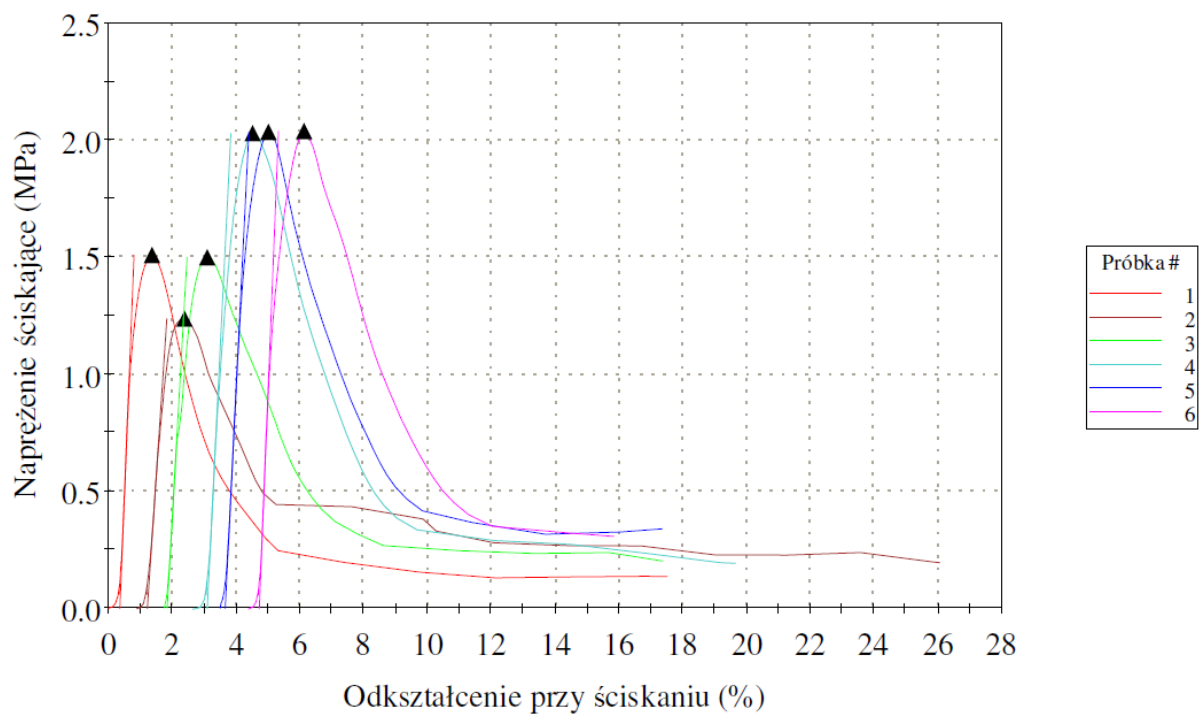
B3-C115-S-7 / B3-C115-W-(8-10) / B3-C115-S-(11-12)



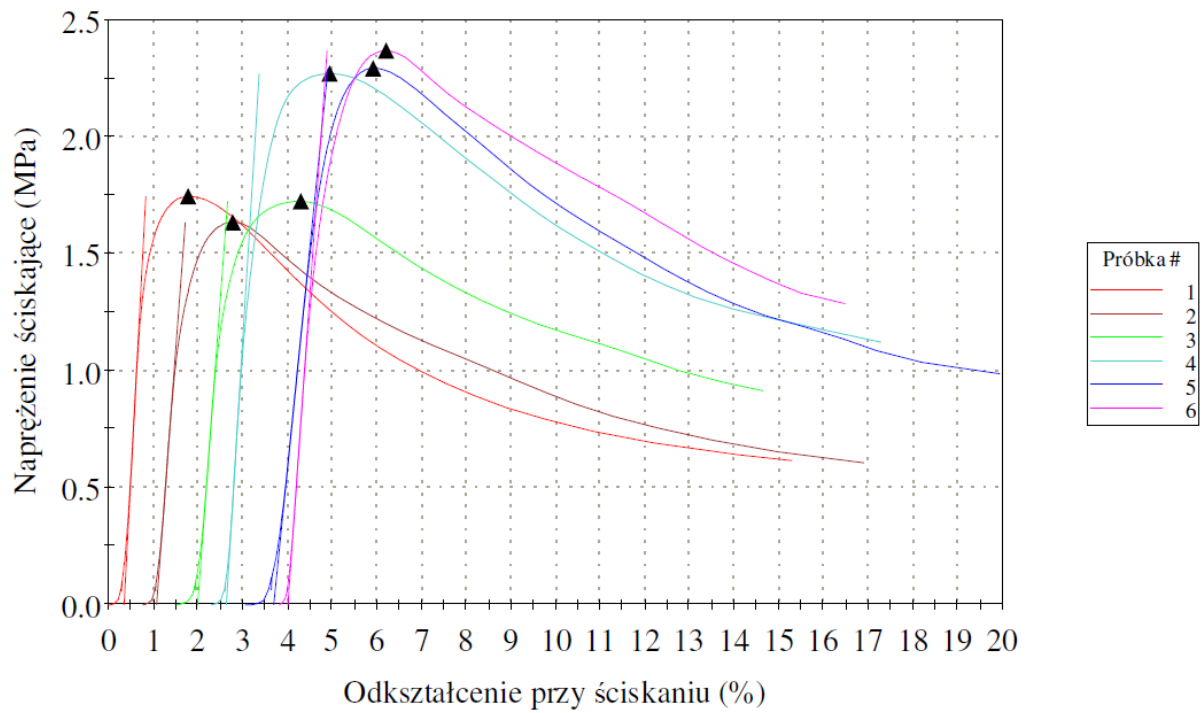
B3-C125-W-(13-15) / B3-C125-S-(16-18)



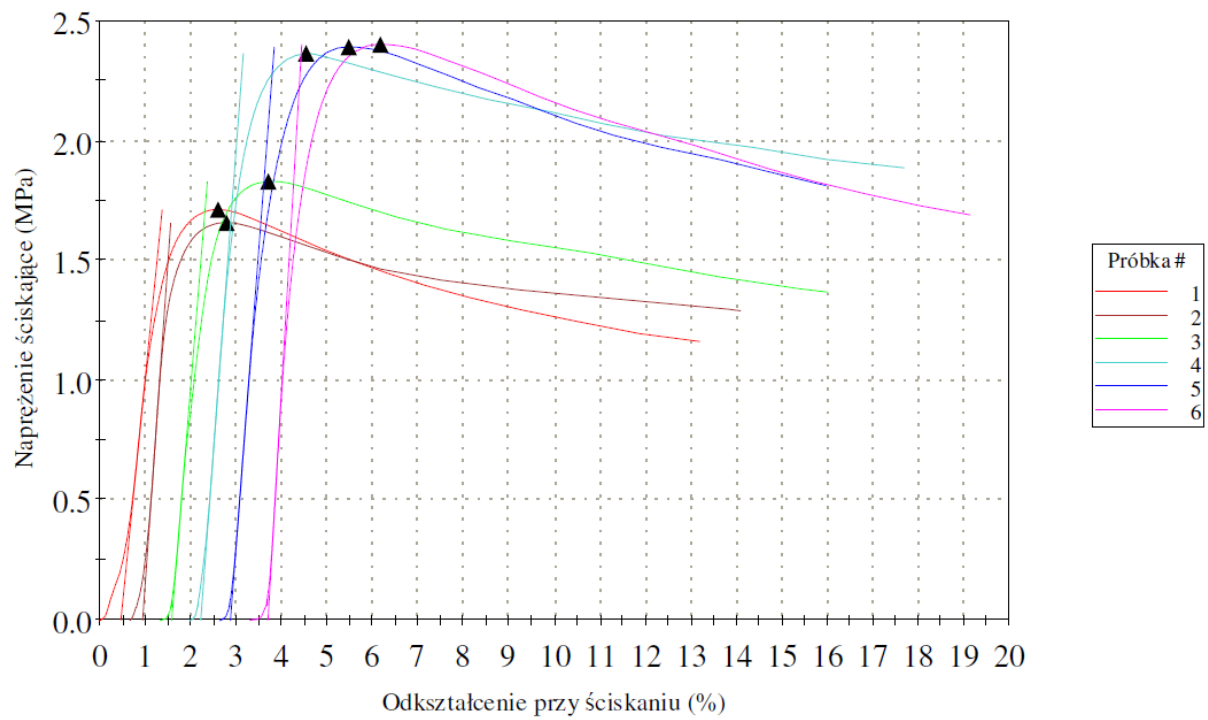
B3-C305-W-(19-21) / B3-C305-S-(22-24)



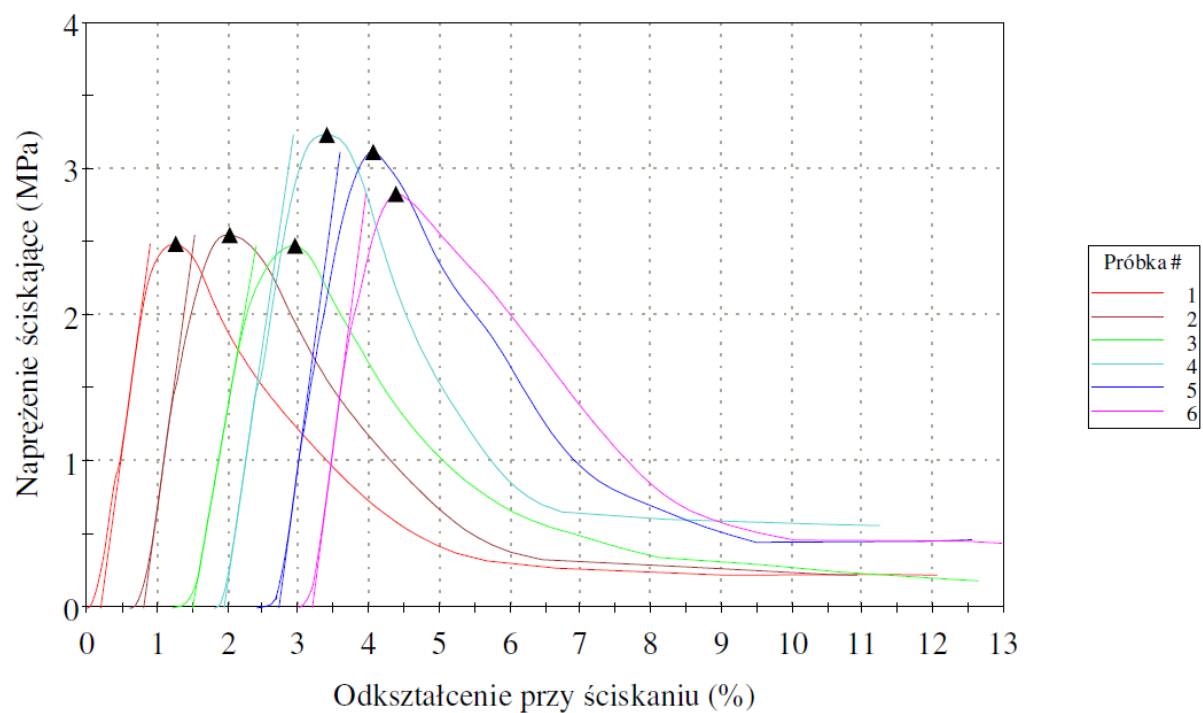
B3-C315-W-(25-27) / B3-C315-S-(28-30)



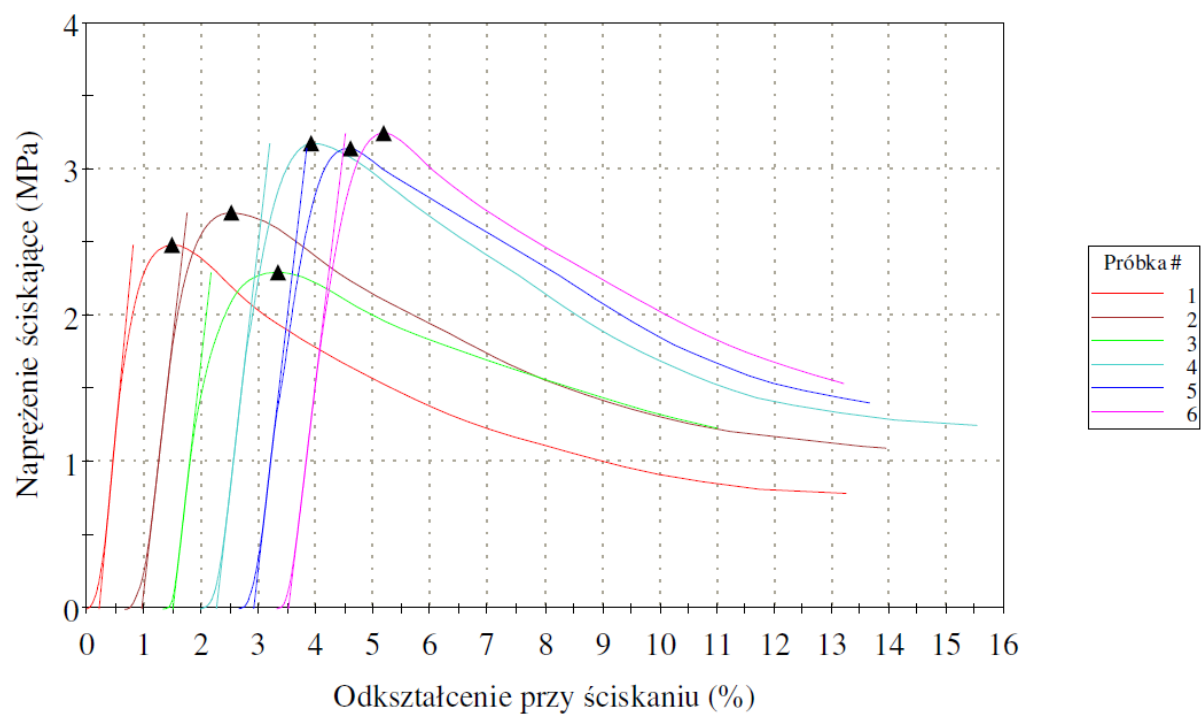
B3-C325-W-(31-33) / B3-C325-S-(34-36)



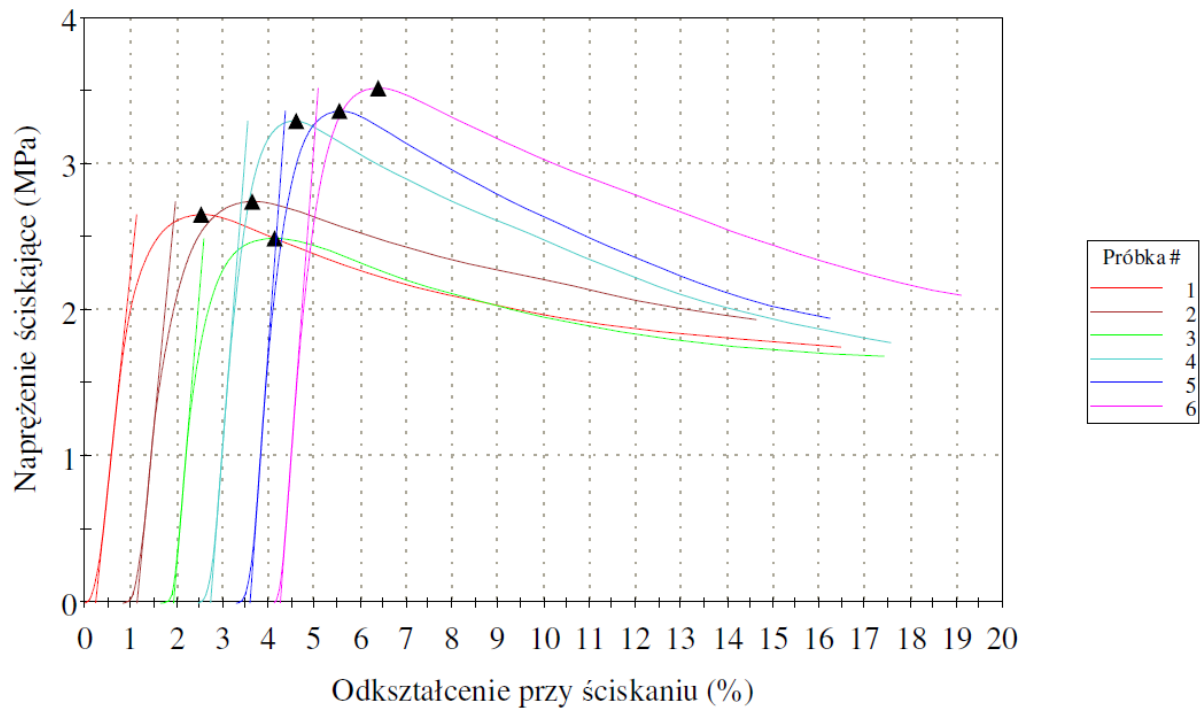
B3-C505-W-(37-39) / B3-C505-S-(40-42)



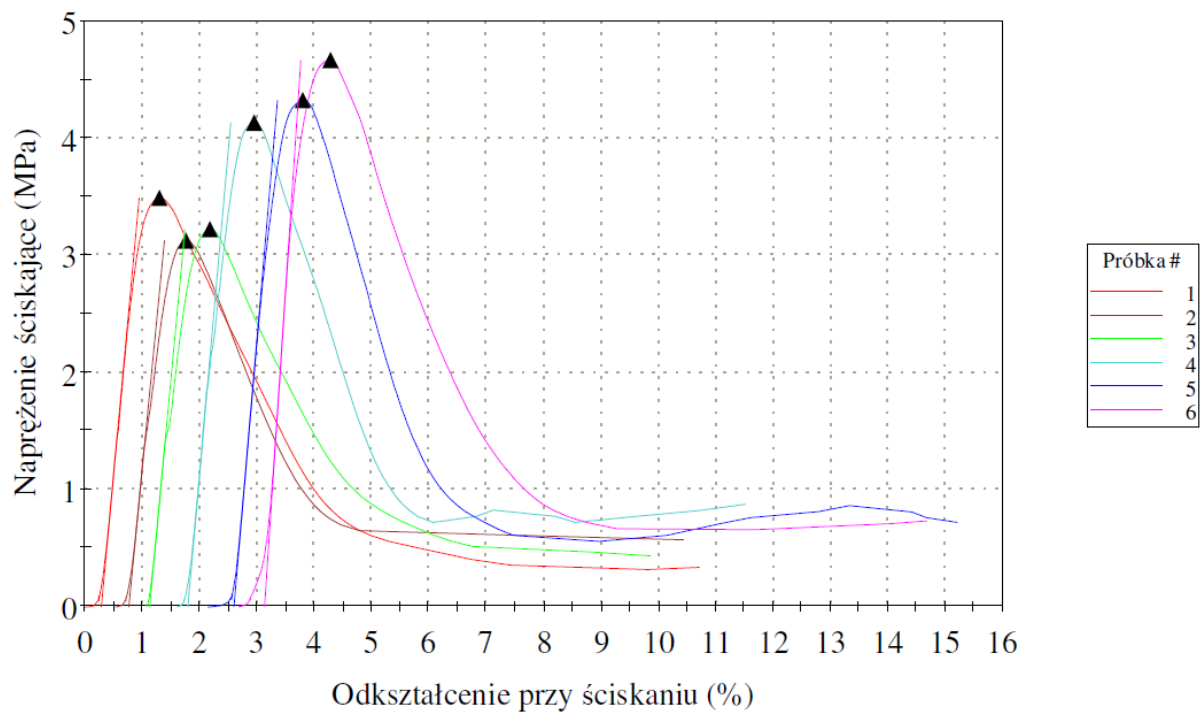
B3-C515-W-(43-45) / B3-C515-S-(46-48)



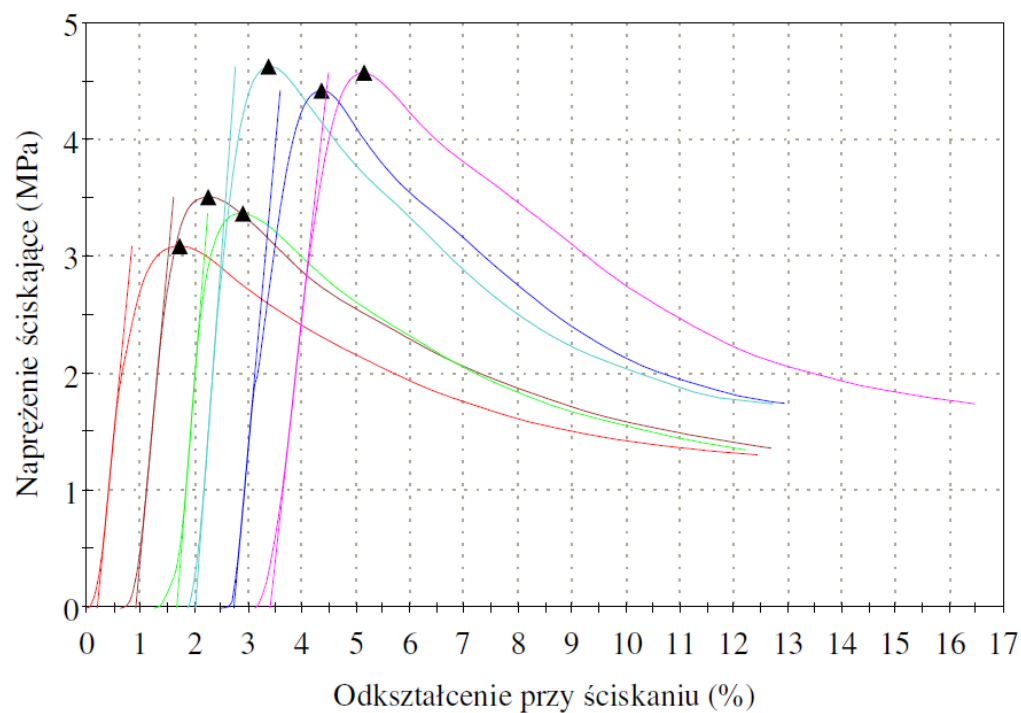
B3-C525-W-(49-51) / B3-C525-S-(52-54)



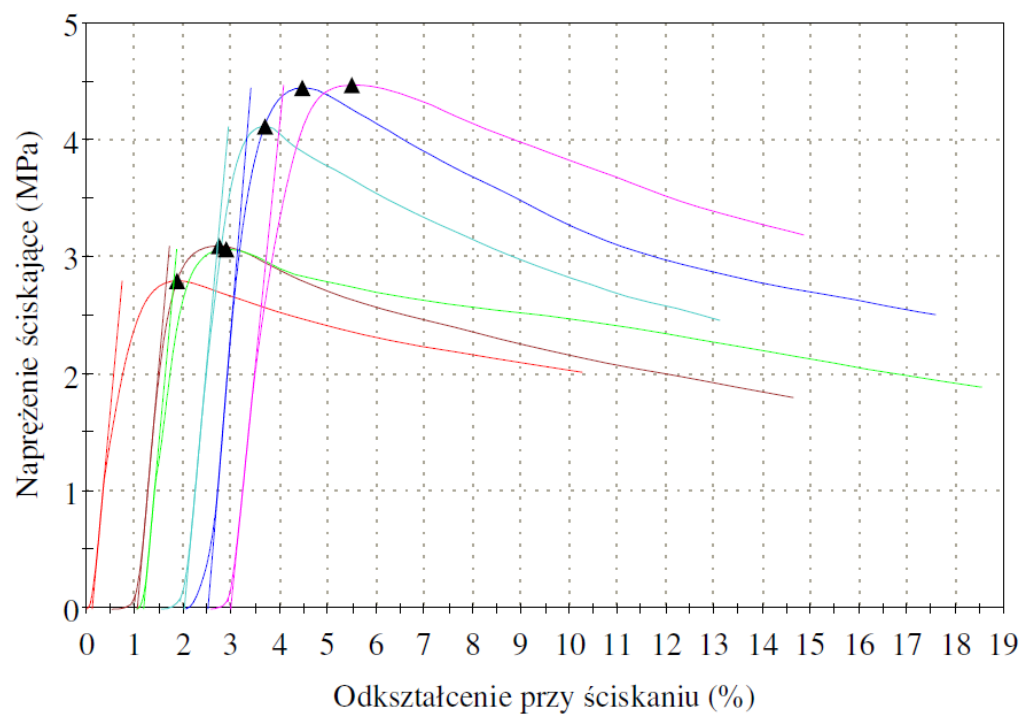
B3-C705-W-(55-57) / B3-C705-S-(58-60)



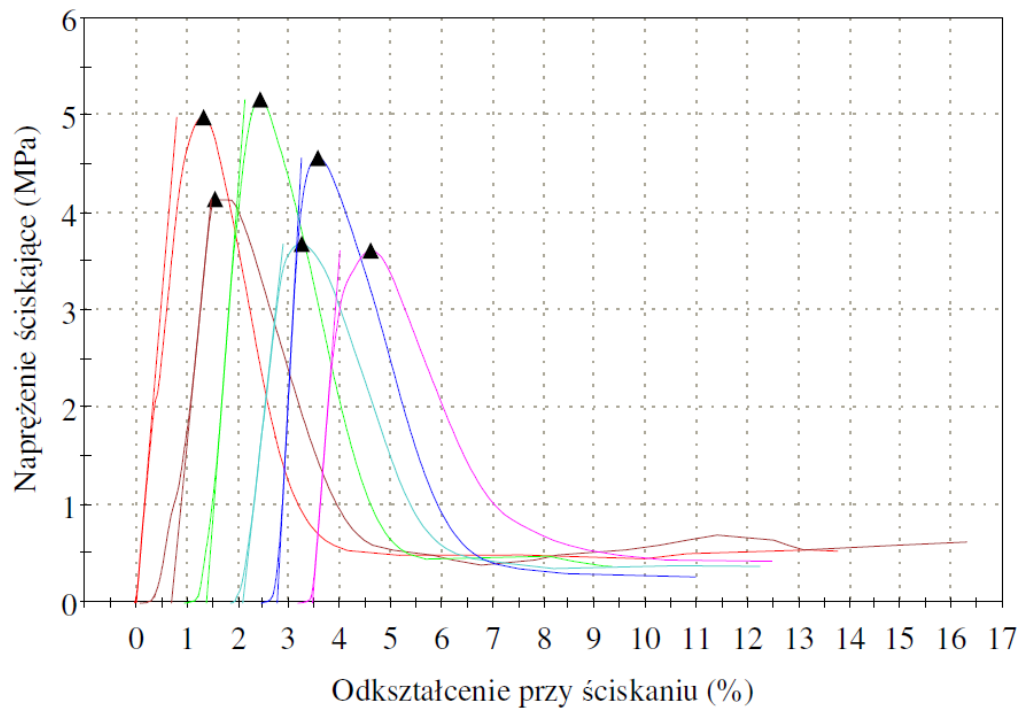
B3-C715-W-(61-63) / B3-C715-S-(64-66)



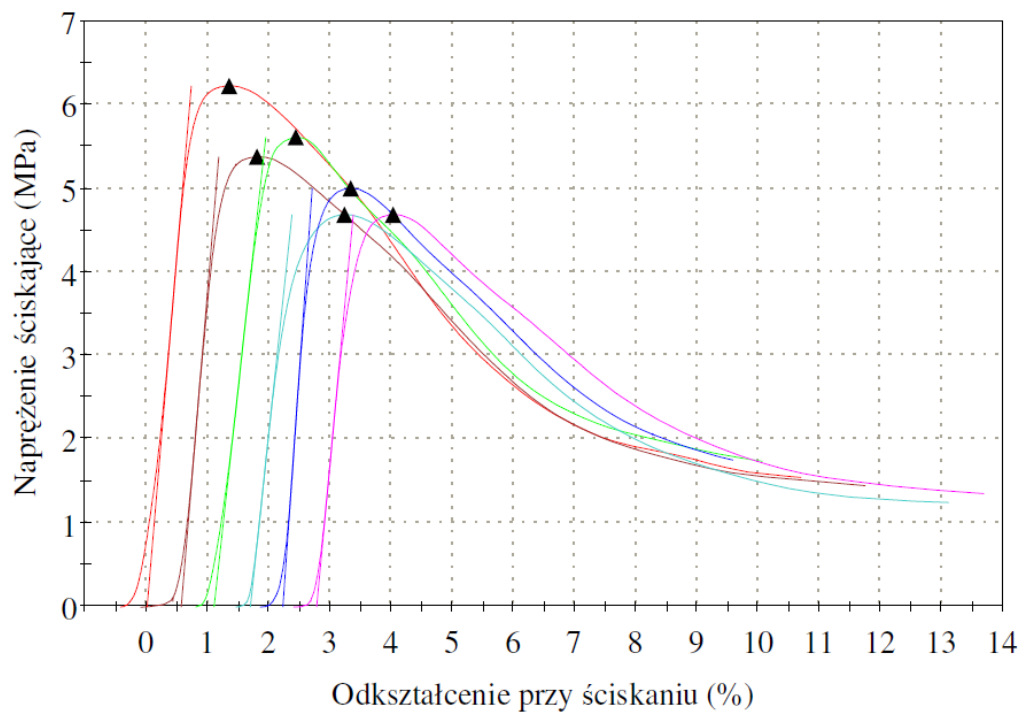
B3-C725-W-(67-69) / B3-C725-S-(70-72)



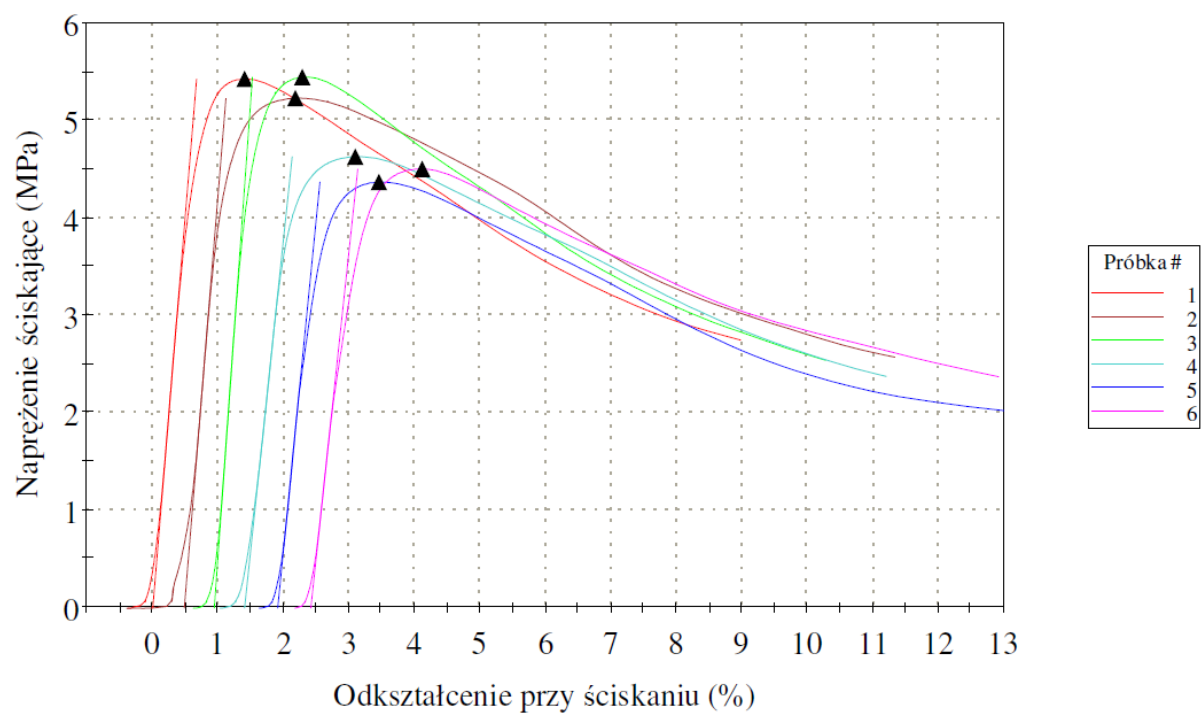
B3-C905-S-(73-75-77) / B3-C905-W-(74-76-78)



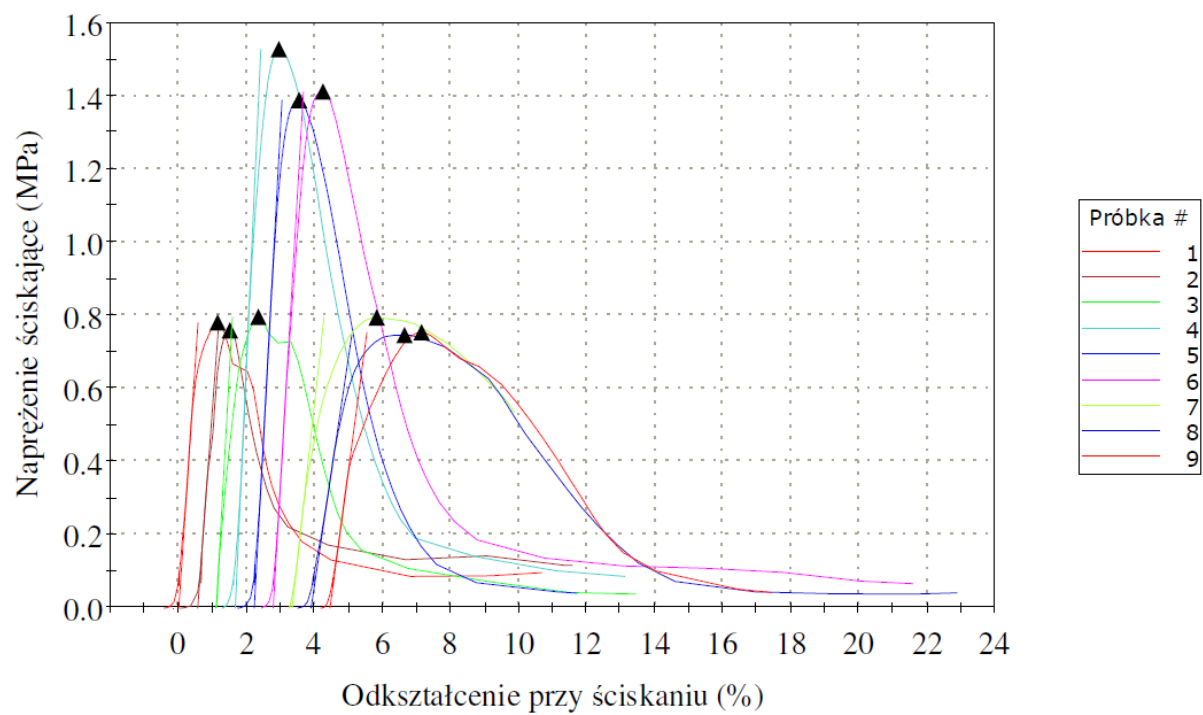
B3-C915-S-(79-81) / B3-C915-W-(82-84)



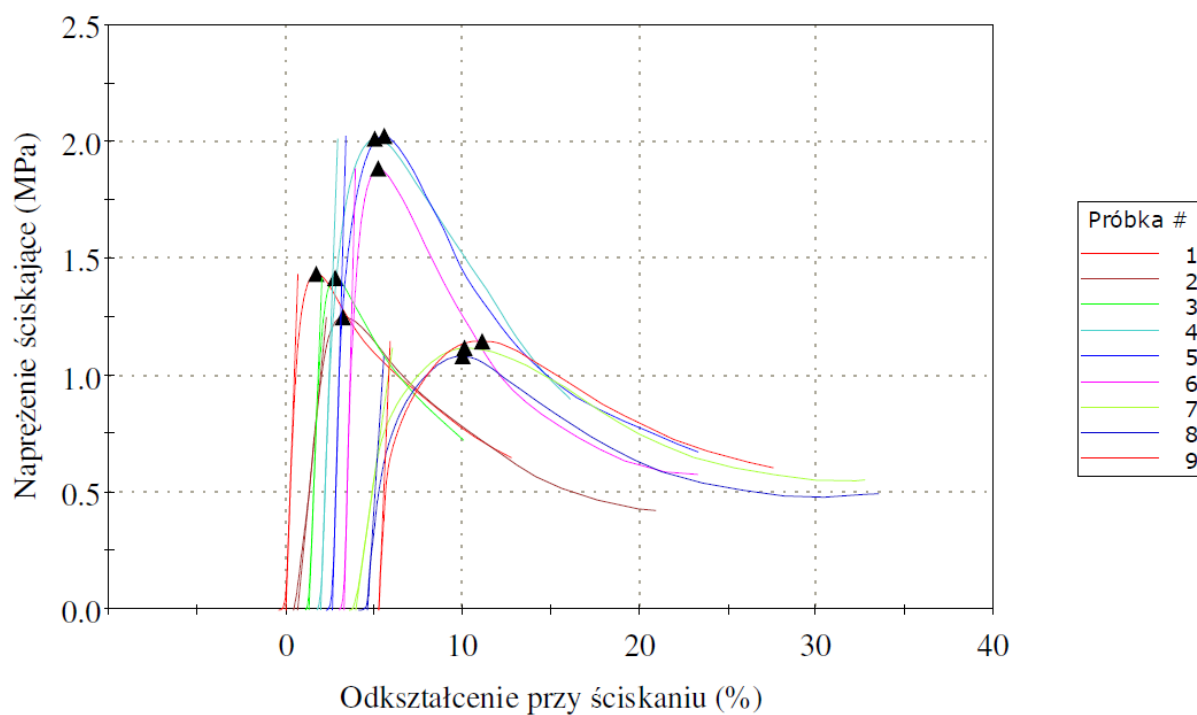
B3-C925-S-(85-87) / B3-C925-W-(88-90)



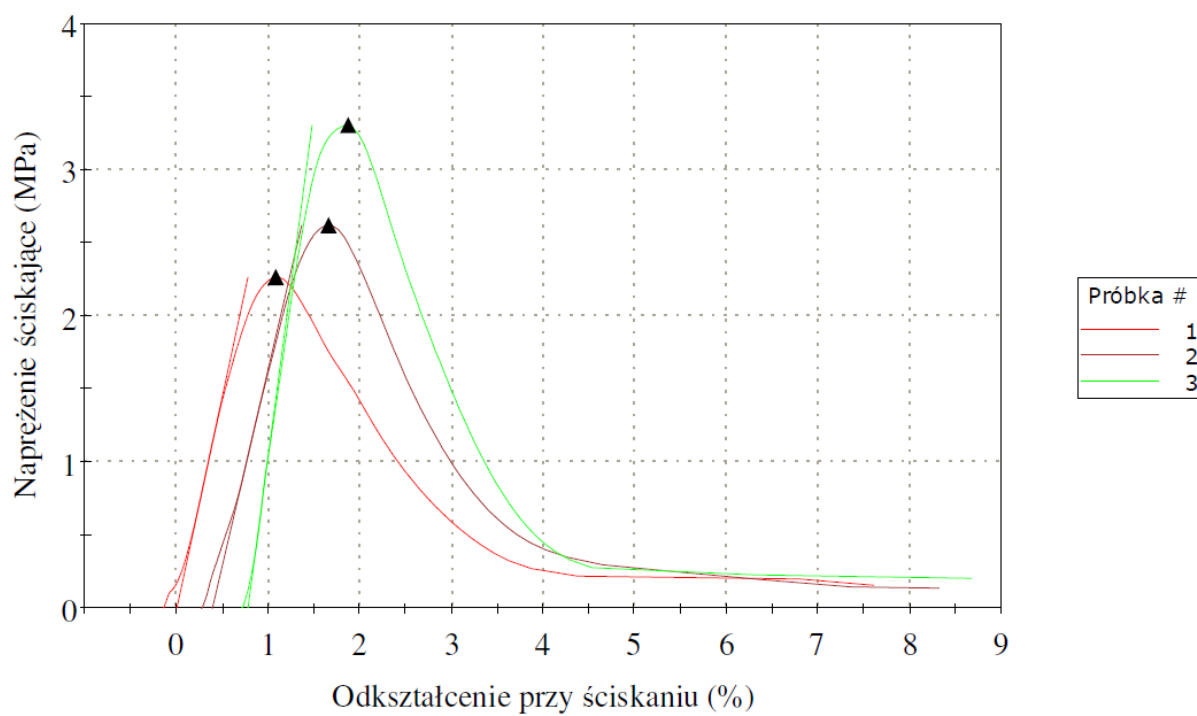
BK1-C503-W-(1-9)



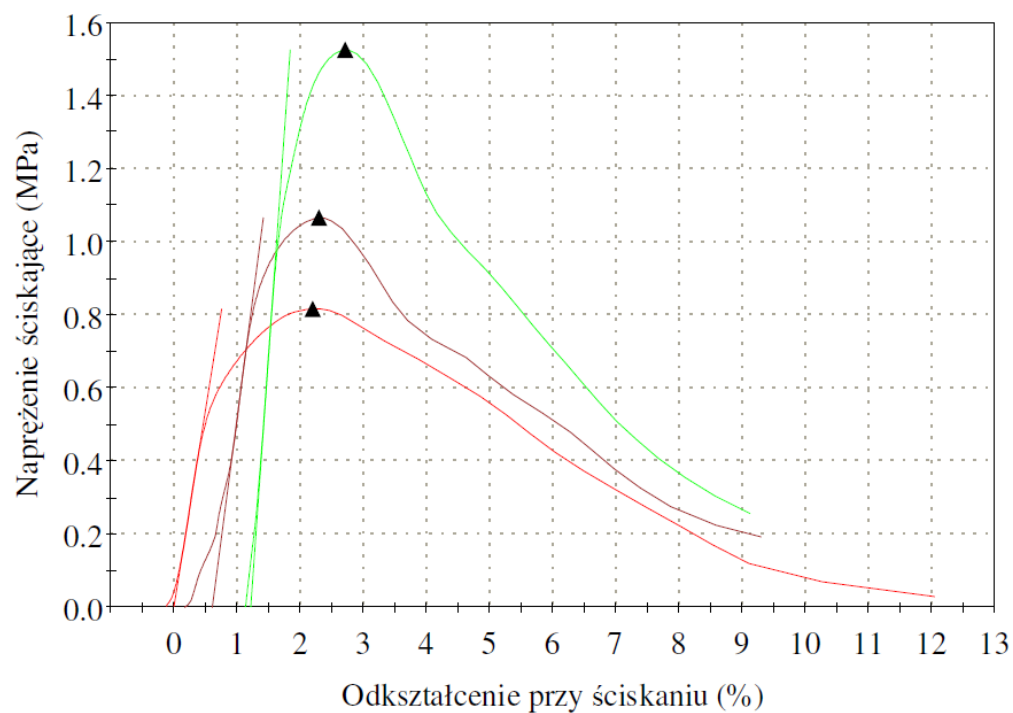
BK1-C523-W-(10-18)



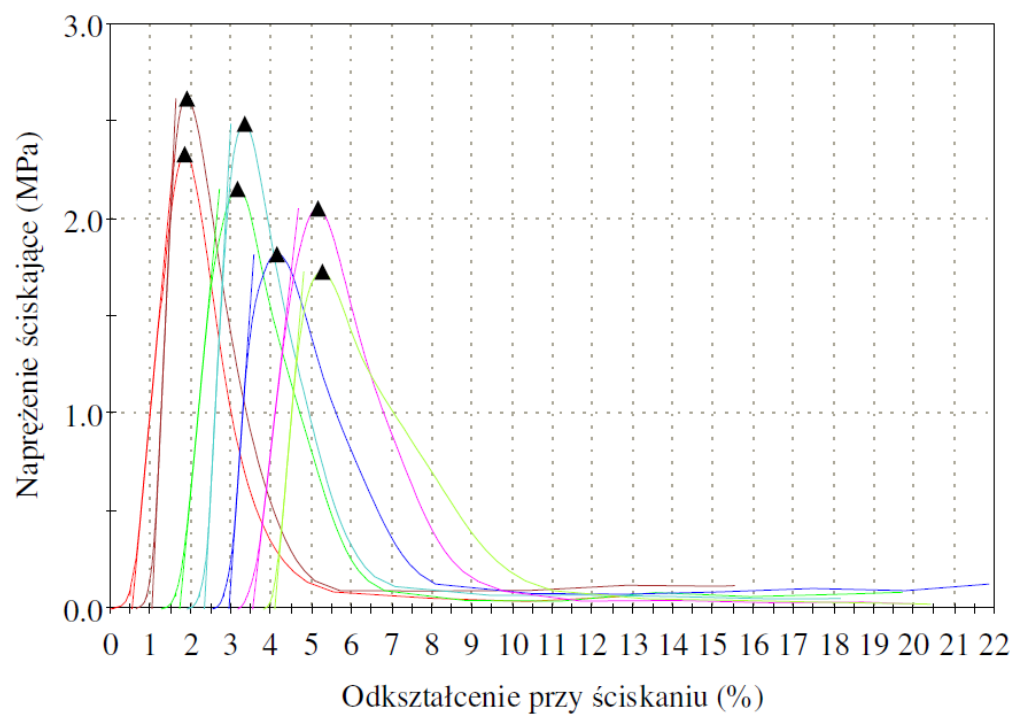
BK1-C1002-S-19 / BK1-C1003-S-20 / BK1-C1004-S-21



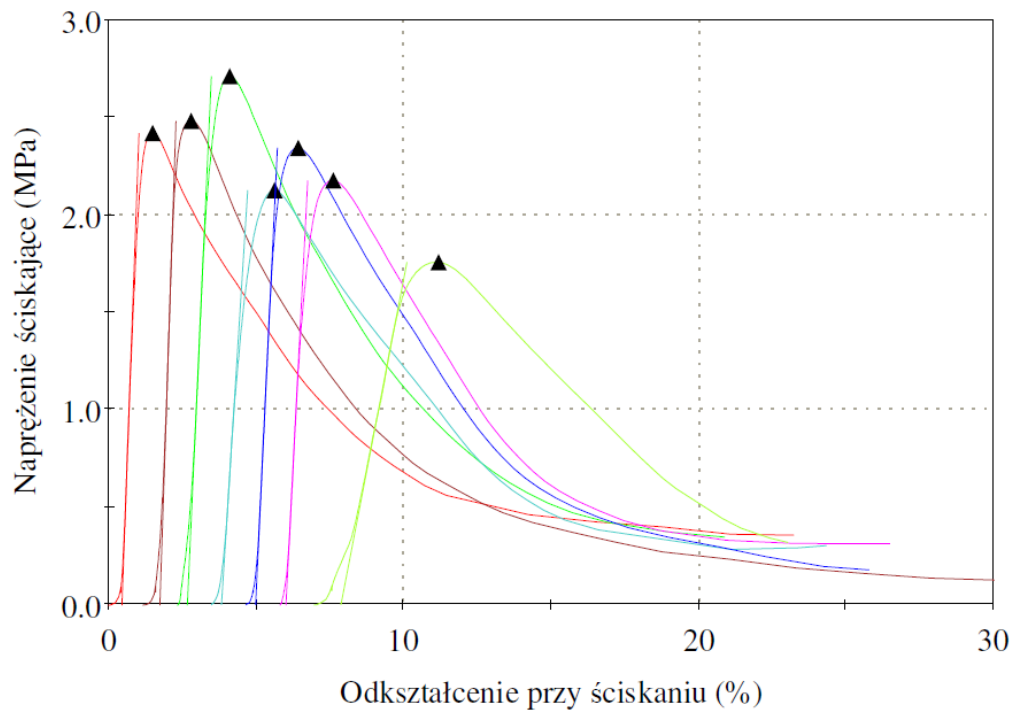
BK1-C802-S-22 / BK1-C802-S-23 / BK1-C802-S-24



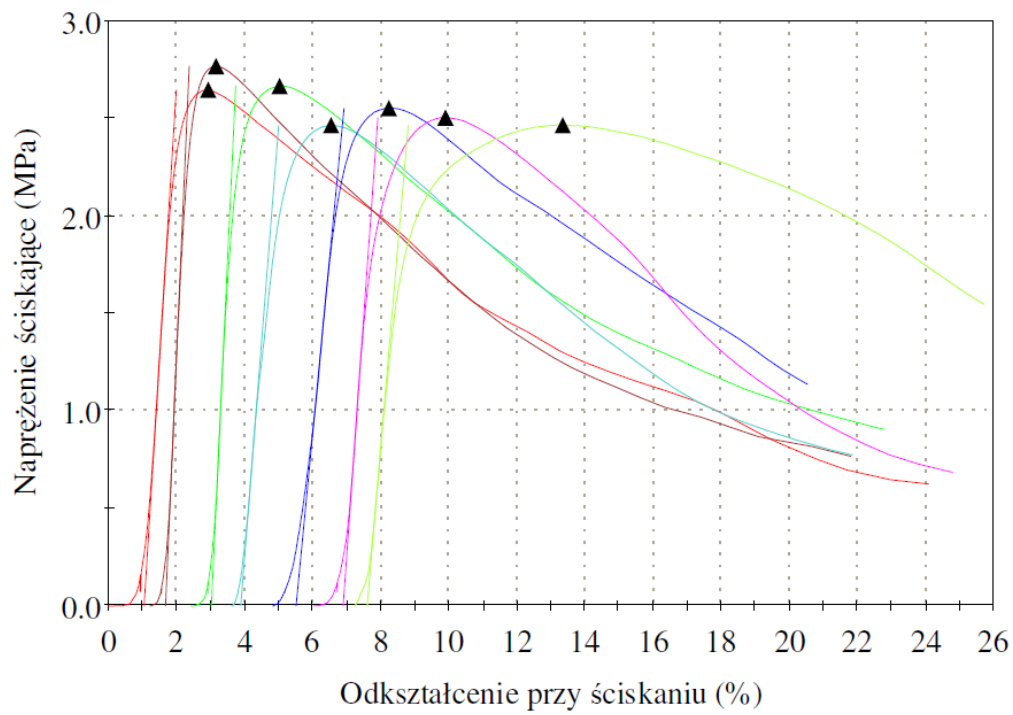
BK2-C505-S-(1-7)



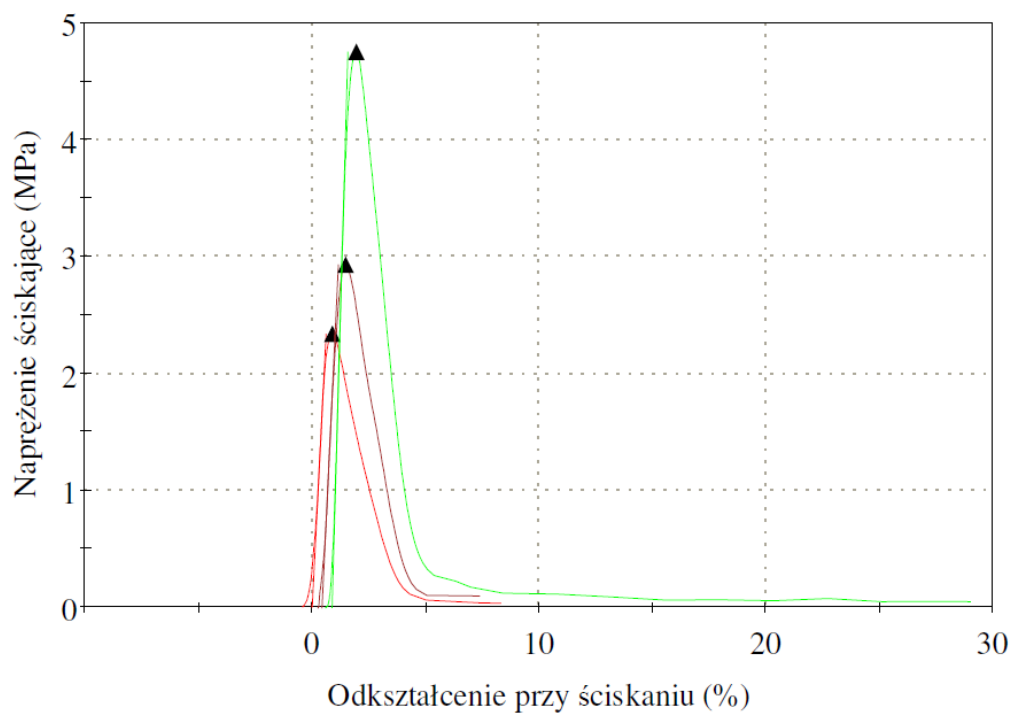
BK2-C515-S-(8-14)



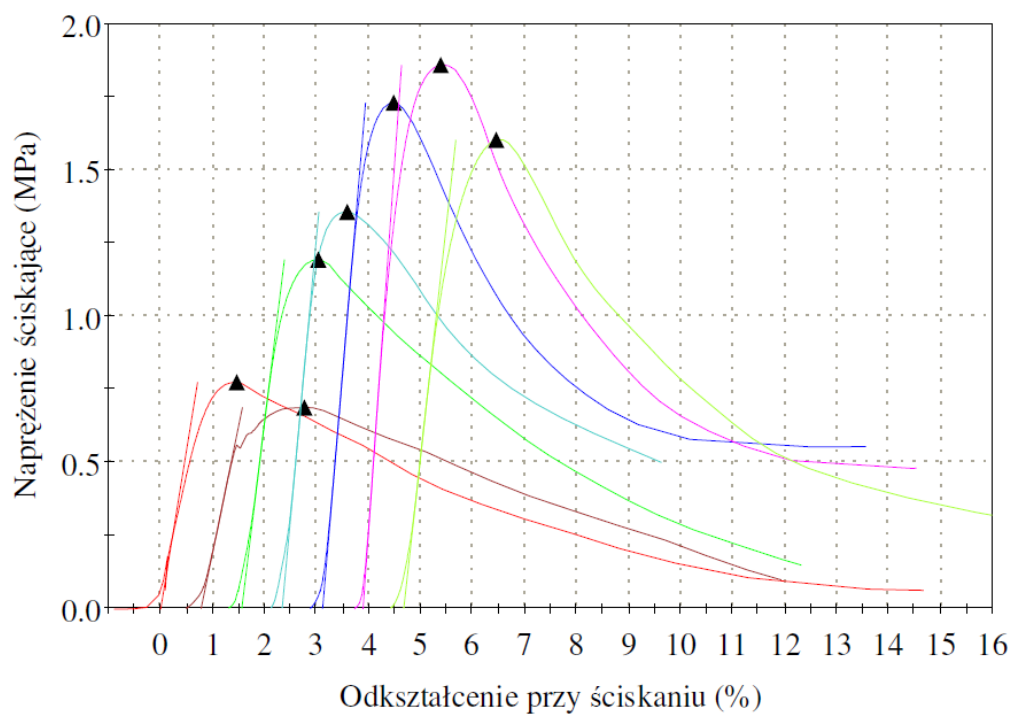
BK2-C525-S-(15-21)



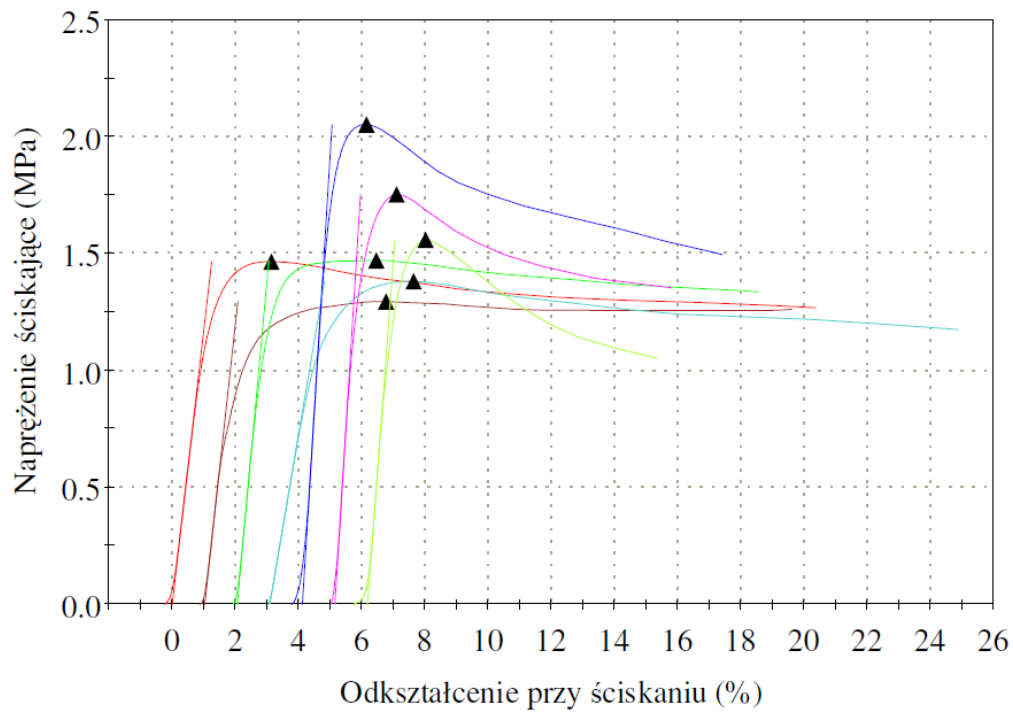
BK2-C1002-S-22 / BK2-C1003-S-23 / BK2-C1004-S-24



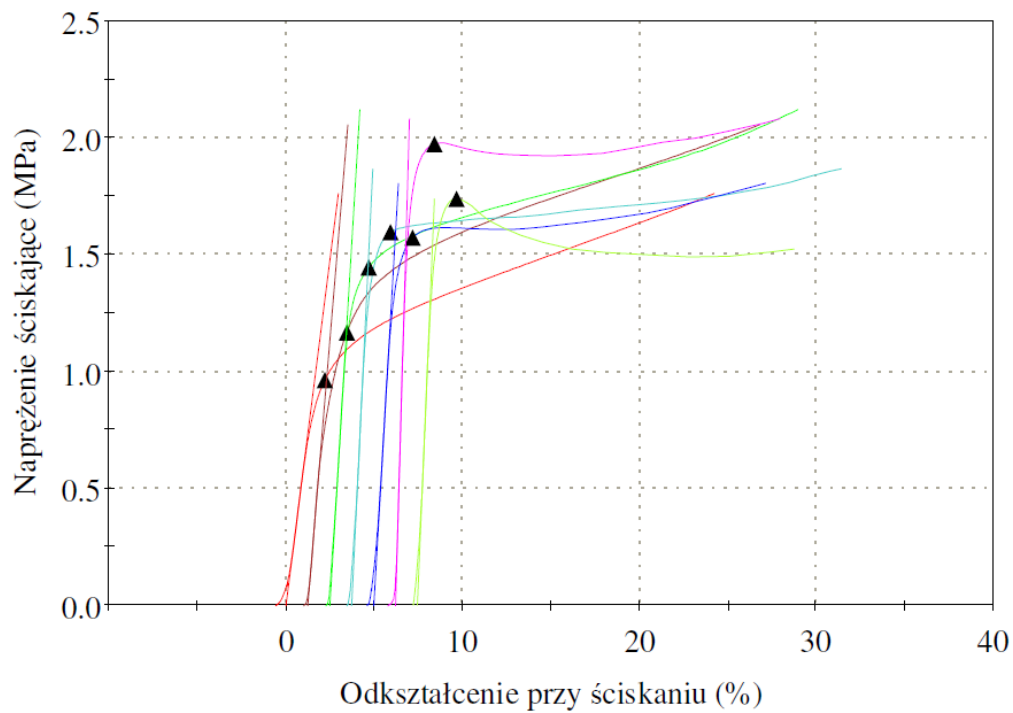
BK3-C505-S-(1-7)



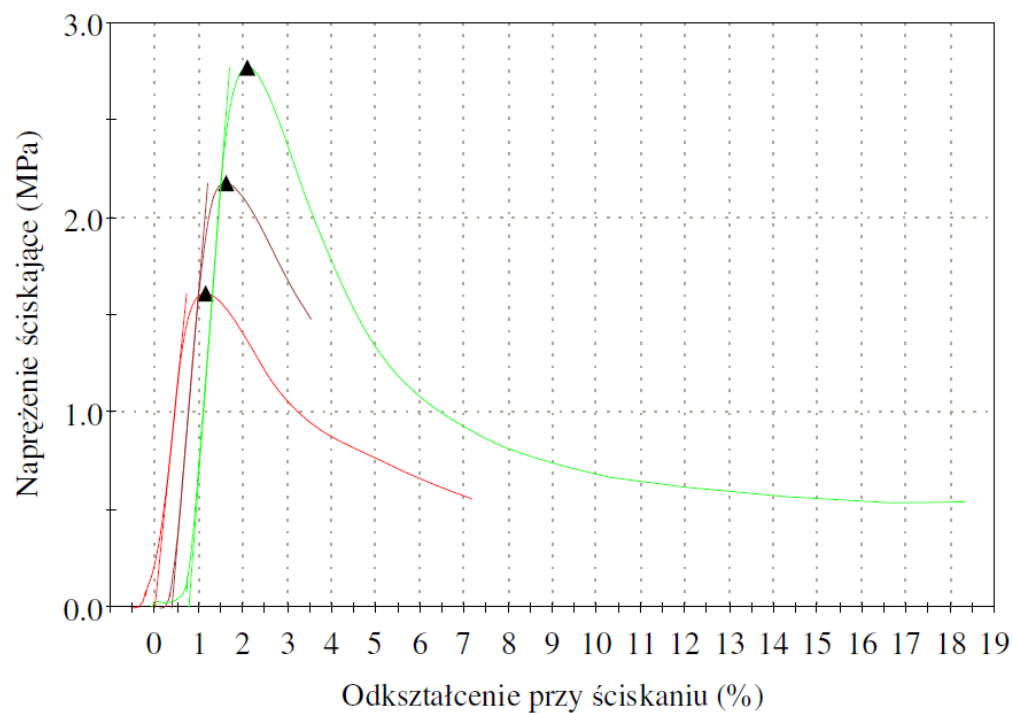
BK3-C515-S-(8-14)



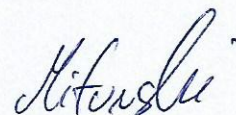
BK3-C525-S-(15-21)



BK3-C1002-S-22 / BK3-C1003-S-23 / BK3-C1004-S-24



Wyrażam zgodę na udostępnianie mojej pracy w czytelniach Biblioteki SGGW.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Katarzyna", is positioned above a horizontal dotted line.

(czytelny podpis autora)