

Politechnika Koszalińska
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska



Rozprawa doktorska
mgr inż. Jarosław Filipiak

Badania skuteczności ulepszania
niektórych gruntów organicznych
przy użyciu różnych spoiw

Promotor
Dr hab. inż. Maciej Werno, prof. nadzw. P. Kosz.

Koszalin, 2006 r.

Spis treści

1.0 WPROWADZENIE	4
2.0 TEZA I CEL PRACY	13
3.0 PRZEGLĄD I OCENA STANU WIEDZY W ZAKRESIE PRZEDMIOTU PRACY	14
3.1 BADANIA TORFU SZWEDZKIEGO.	15
3.2 ULEPSZANIE SZWEDZKICH GRUNTÓW ORGANICZNYCH RÓŻNYMI STABILIZATORAMI.....	17
3.3 BADANIA TORFÓW WŁOSKICH.....	21
3.4 ZESTAWIENIE WYNIKÓW BADAŃ WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCISKANIE.	22
3.5 CHARAKTERYSTYKA GRUNTÓW ORGANICZNYCH.....	26
3.6 CHARAKTERYSTYKA WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNYCH I MECHANICZNYCH GRUNTÓW ORGANICZNYCH	32
3.7 PROCESY CHEMICZNE ZACHODZĄCE W WYNIKU POŁĄCZENIA STABILIZATORA Z WODĄ I GRUNTEM MINERALNYM	44
3.8 CHARAKTERYSTYKA ZASTOSOWANYCH STABILIZATORÓW.....	46
4.0 METODYKA I PROGRAM BADAŃ	54
4.1 POSZUKIWANIE GRUNTÓW DO BADAŃ	54
4.2 BADANIA LABORATORYJNE	57
4.3 PODSTAWY WŁASNEJ METODYKI BADAŃ	58
4.4 SPOSÓB PRZYGOTOWANIA PRÓBEK	58
4.5 ZAKRES BADAŃ	59
4.6 BADANIA WYTRZYMAŁOŚCI	60
4.7 BADANIA ŚCIŚLIWOŚCI.....	62
4.8 BADANIA DERYWATOGRAFICZNE	64
4.9 BADANIA ZMIAN STRUKTURY	65

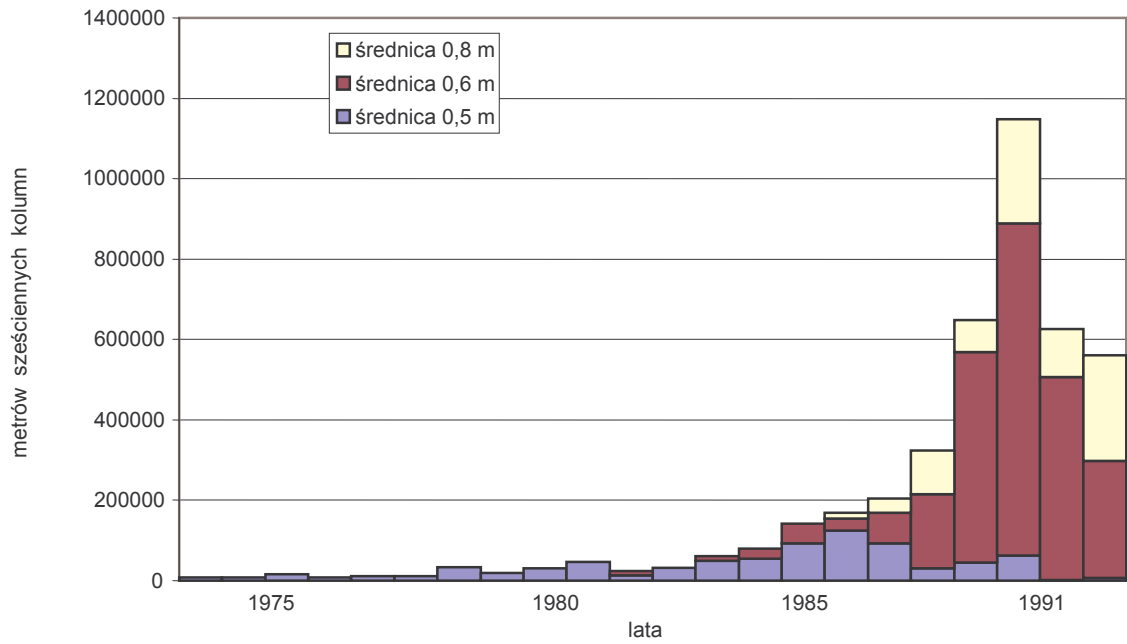
5.0 WYNIKI BADAŃ.....	66
5.1 BADANIE WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCISKANIE	66
5.2 BADANIE ŚCIŚLIWOŚCI.....	77
5.3 BADANIE DERYWATOGRAFICZNE	92
5.4 BADANIE STRUKTURALNE	97
5.4 ZESTAWIENIE WYBRANYCH WYNIKÓW BADAŃ CECH FIZYCZNYCH	103
6.0 ANALIZA STATYSTYCZNA	105
7.0 WNIOSKI.....	123
WYKAZ LITERATURY	125

1.0 Wprowadzenie

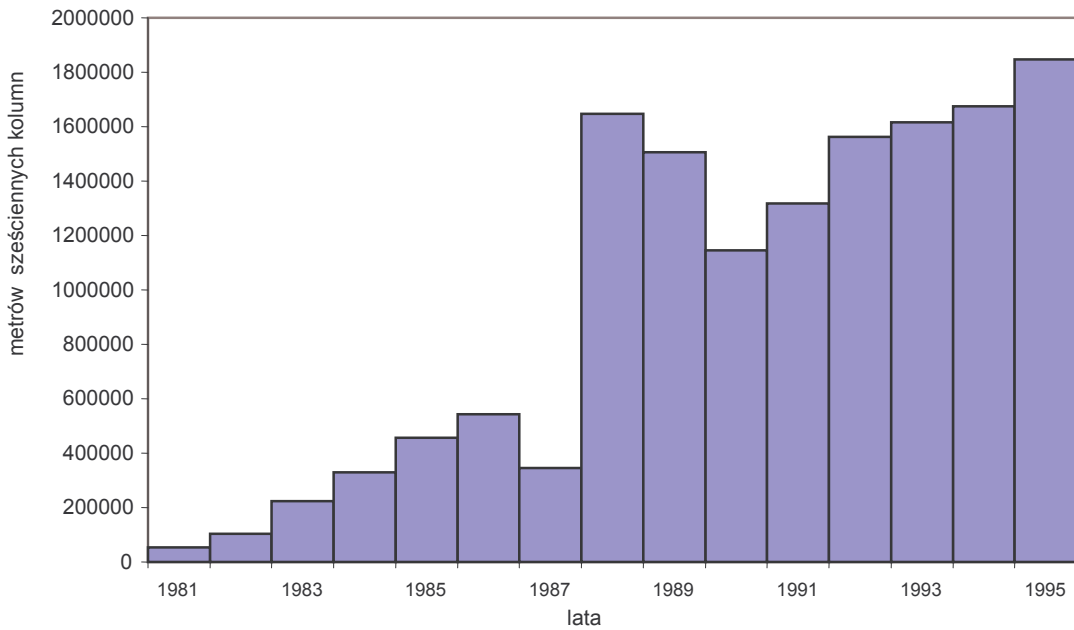
W praktyce coraz częściej zachodzi konieczność posadowienia obiektów budowlanych w trudnych warunkach geotechnicznych. Pod pojęciem trudnych warunków geotechnicznych kryje się podłoże zbudowane najogólniej z mineralnych gruntów spoistych o dużym stopniu plastyczności oraz gruntów pochodzenia organicznego, które w zależności od ich rodzaju i stanu mogą charakteryzować się małą wytrzymałością oraz dużą ściśliwością. Aby takie podłoże gruntowe bezpiecznie, bez utraty stateczności oraz nadmiernych i długotrwałych osiadań, przeniosło obciążenie budowli inżynierskich, zwłaszcza obiektów liniowych i obiektów o dużych powierzchniach, konieczne jest ulepszenie albo inaczej wzmocnienie podłoża. Jedną z bardzo atrakcyjnych metod pod względem skuteczności, prostoty i szybkości wykonania, zdobywającą coraz większy rynek, jest grupa metod ulepszania podłoża za pomocą tzw. *głębokiego mieszania* (ang. deep mixing). Polega ona na tym, że rodzimy grunt podlegający ulepszeniu miesza się z jednym lub mieszaniną kilku stabilizatorów, często z cementem, wapnem lub innymi dodatkami na przykład niekwestionowanych popiołami. Do niekwestionowanych głównych zalet tej metody w porównaniu z wieloma innymi metodami wzmocnienia podłoża, znanymi w praktyce inżynierskiej, należy zaliczyć:

- oszczędność naturalnych zasobów piasku i żwiru dzięki mieszaniu wyłącznie gruntu zalegającego w podłożu,
- oszczędność kosztów transportu materiałów piaszczystych,
- wykorzystanie odpadów przemysłowych jako składników stabilizatora,
- uzyskanie wzmocnienia bloku gruntowego o właściwościach podłoża podatnego.

W grupie głębokiego mieszania rozróżnia się metodę mokrą i metodę suchą. W pierwszej metodzie używa się stabilizatora w postaci zawiesiny z wodą jako środka transportującego do podłoża, gdzie następuje mieszanie z gruntem. W drugiej metodzie określanej w skrócie **DJM** (Dry Jet Mixing) używa się powietrza do transportu stabilizatora w postaci suchej w podłoże. Metoda DJM została zainicjowana w krajach skandynawskich i w Japonii w połowie lat 60-tych ubiegłego stulecia, podczas gdy szersze ciągle wzrastające zastosowanie znalazła dopiero od połowy lat 70 - tych. Zjawisko to dokumentują rys. 1.1 i rys. 1.2 [22].



Rys 1.1 Wzrost zastosowania kolumn w Szwecji i Finlandii w latach 1975 ÷ 1991 [22].

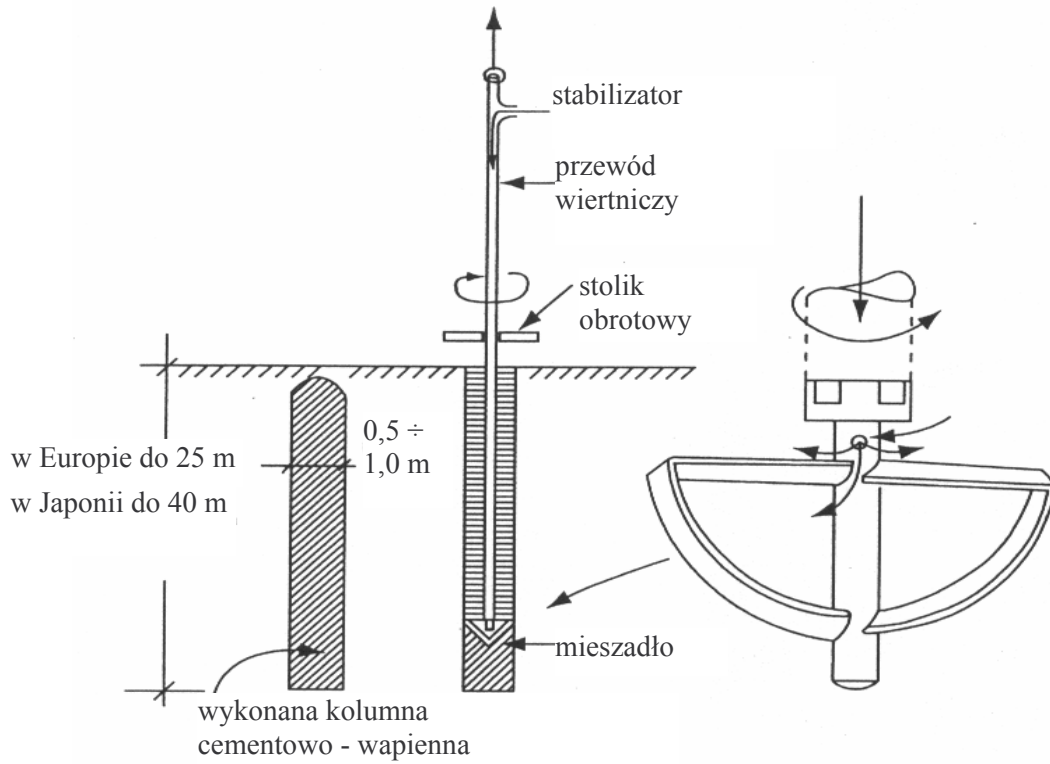


Rys 1.2 Wzrost zastosowania kolumn w Japonii w latach 1981 ÷ 1995 [22].

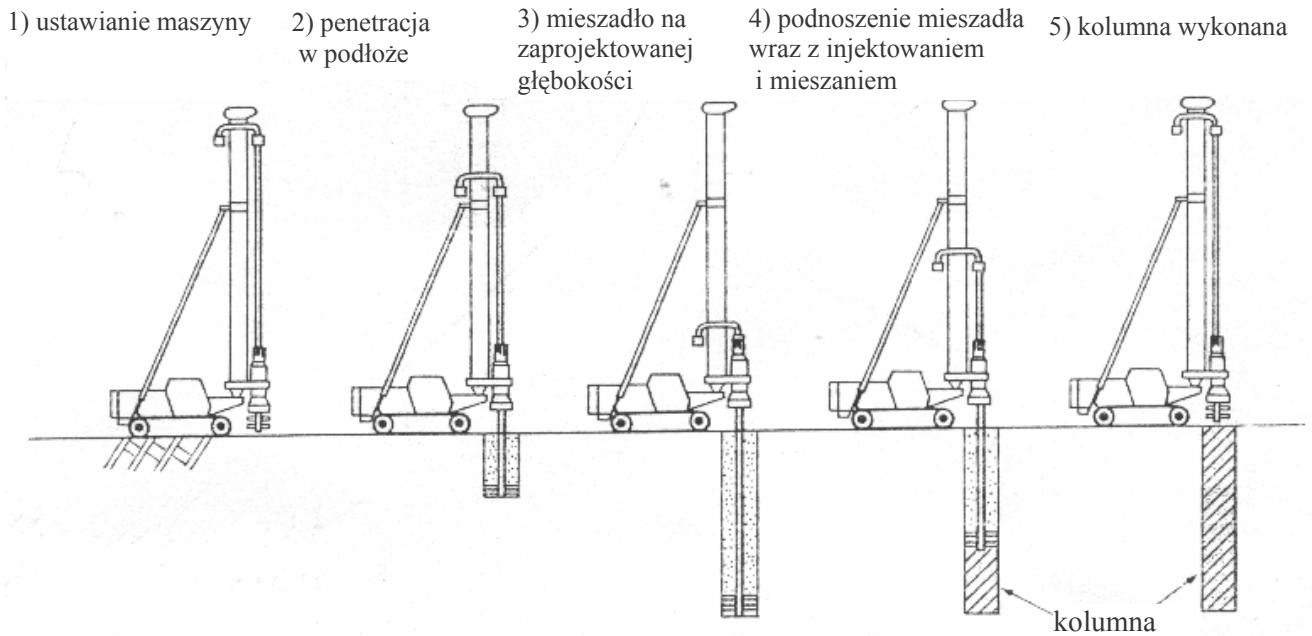
Co więcej jak podają Druss [12] i Okumara [35] w Japonii w latach 1980 ÷ 2004 wykonano 26 243 000 m³ kolumn DJM, a w Szwecji tylko w 2003 r. 587 000 m³. Wiąże się to z faktem, iż DJM w odróżnieniu od metody mokrej posiada wiele zalet, przy czym kluczową zaletą jest fakt, iż w przypadku zastosowania DJM otrzymuje się większą wytrzymałość między innymi na ścinanie w warunkach bez odwodnienia gruntu ulepszanego przy tej samej ilości cementu, w porównaniu z metodą mokrą. [9], [50]. Ma to związek z faktem redukcji wilgotności naturalnej gruntu i w konsekwencji wskaźnika wodno-cementowego w/c. Jak podaje Okumara [35] wskaźnik w/c w metodzie mokrej waha się w granicach od 0,6 do 1,3 wywołując zmniejszenie się wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odwodnienia Sandors i Holm [50] stwierdzili, iż wytrzymałość iltu pylastego była od 1,7 do 3,2 razy wyższa w przypadku metody DJM w porównaniu z metodą mokrą.

W metodzie DJM stosowane są dwa rozwiązania: powszechnie stosowane w postaci pionowych kolumn w różnych warunkach gruntowych, nazywane popularnie kolumnami cementowo-wapiennymi (niezależnie od użytego stabilizatora) ze względu na używanie w większości stabilizatora C - W [52] oraz, co jest nowością w ostatnich latach, w postaci tzw. masowej stabilizacji, która praktycznie stosowana jest wyłącznie w gruntach organicznych maksymalnie do głębokości 5 m.

Kolumny cementowo-wapienne w gruntach wymagających wzmocnienia wykonywane są przy użyciu specjalnie do tego celu zbudowanych, maszyn zaopatrzonych w jedną lub więcej kolumn wiertniczych w postaci zespolonej, zakończonych mieszadłami posiadającymi dysze, poprzez które za pomocą sprężonego powietrza injektowany jest do gruntu stabilizator. Mieszanie stabilizatora z gruntem następuje w trakcie obrotów mieszadła z jednoczesnym jego przemieszczaniem się ku górze. Na rys. 1.3a i 1.3b przedstawiono zasadę i poszczególne fazy instalacji kolumn C - W, a na rys. 1.4 typowy sprzęt do instalacji kolumn.

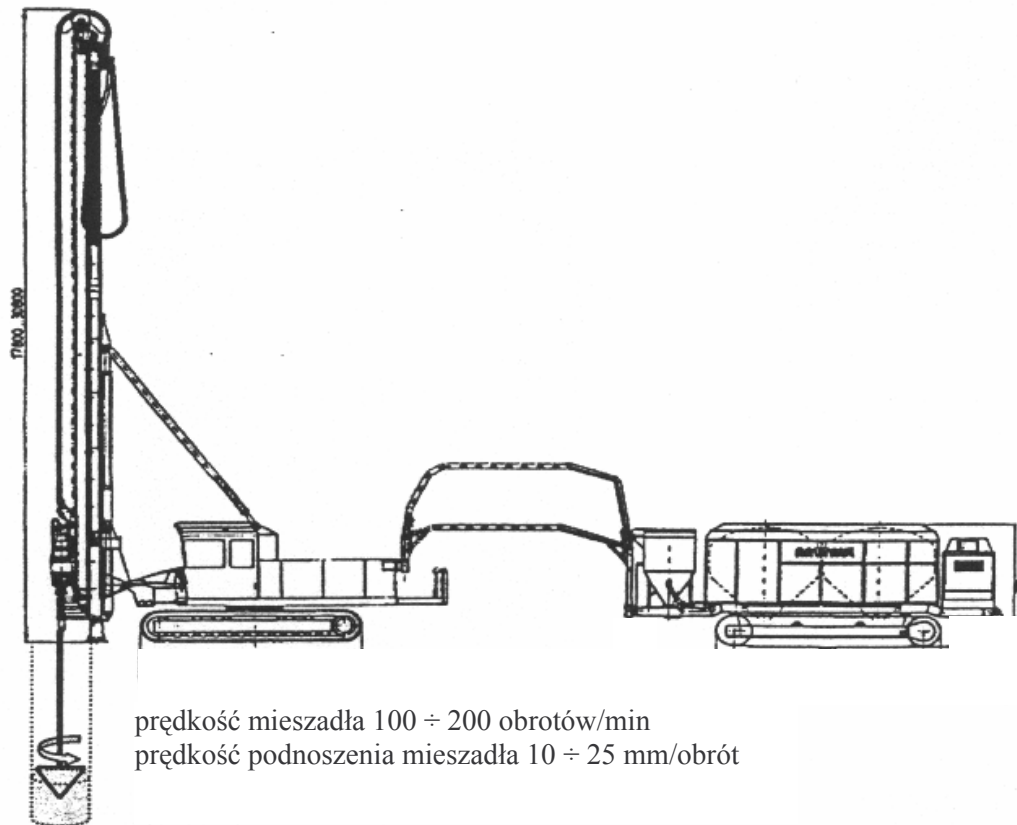


a. Instalacja kolumn cementowo-wapiennych. [29]



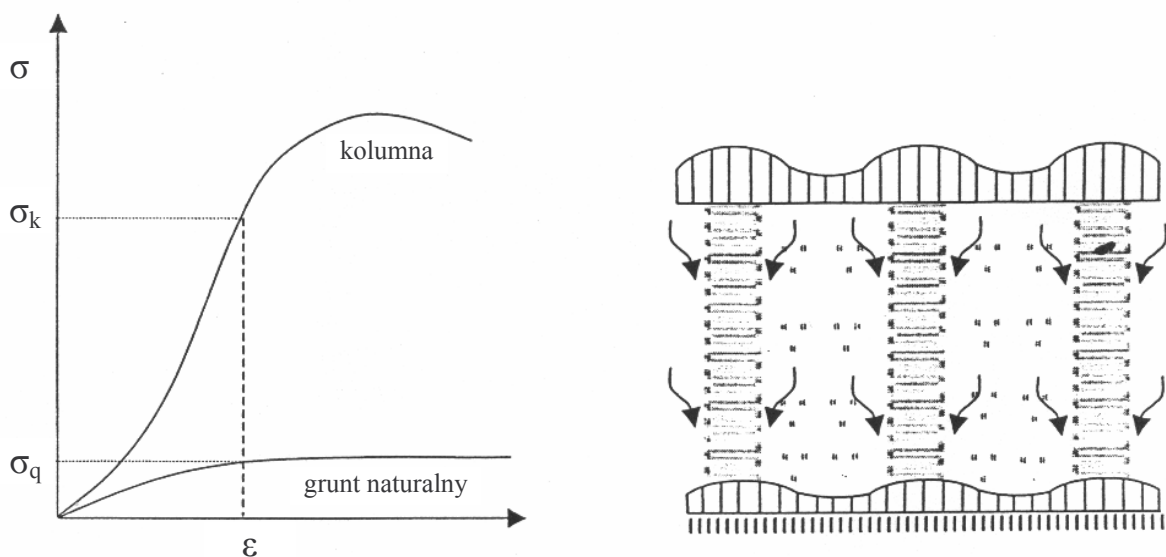
b. Fazy wykonania kolumn C - W. [52]

Rys. 1.3 Zasada wykonywania kolumn C - W.



Rys. 1.4 Typowe urządzenie do instalacji kolumn. [14]

Idea głębokiej stabilizacji głównie polega na wytworzeniu kolumny, która pod obciążeniem zewnętrznym współpracuje z niestabilizowanym otaczającym gruntem, co oznacza, iż część obciążenia jest przenoszona przez kolumnę, a część przez otaczający grunt. W tym przypadku kolumna nie powinna charakteryzować się dużą sztywnością, tak aby nie zachowywała się jak pał. Gdyby zjawisko to miało miejsce nie nastąpiłby oczekiwany rozkład obciążenia zewnętrznego na kolumnę i otaczający grunt. Ideę tę zobrazowano na rys. 1.5.



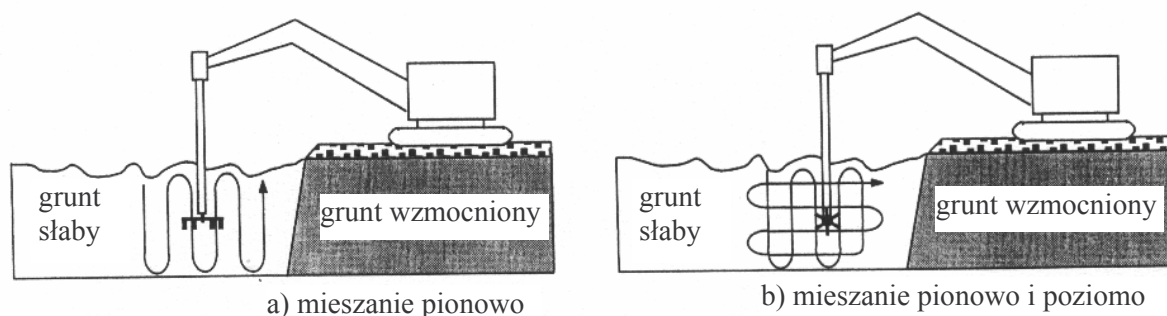
Rys. 1.5 Idea współpracy kolumny z otaczającym gruntem. [14]

Z praktyki wynika, iż generalnie dobrą współpracę z otaczającym gruntem zapewniają kolumny tzw. miękkie lub półtwarde (semi-hard), których wytrzymałość na ścinanie w warunkach bez odwodnienia nie przekracza 150 kPa [14]. Większe wytrzymałości sprawiają, iż kolumna jest „krucha” i w konsekwencji ulega zniszczeniu przy małych odkształceniach.

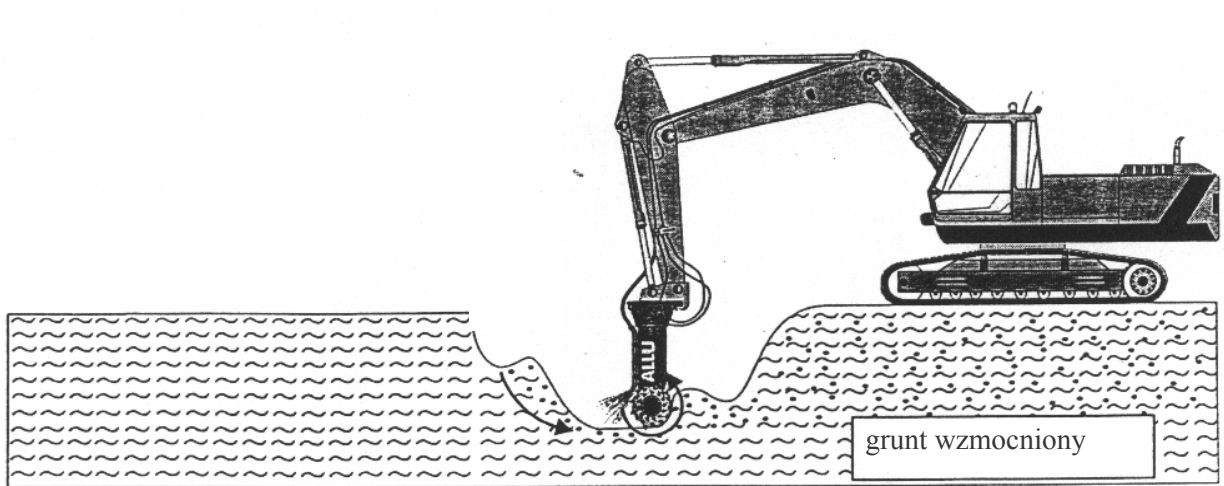
Kolumny mogą być wykonywane w różnych konfiguracjach takich jak bloki (kolumna przy kolumnie), w postaci ścian, względnie w określonej siatce geometrycznej (mające największe zastosowanie) lub w dowolnym rozproszeniu kolumn. Co więcej w zależności od funkcji wzmocnienia gruntu, kolumny w danym przypadku mogą być instalowane na różnych głębokościach.

Z punktu widzenia wzmocnienia podłoża jest sprawą oczywistą, że jeżeli wzrasta proporcja powierzchni podłoża ulepszonego (powierzchni kolumn) do całkowitej powierzchni podlegającej ulepszeniu wtedy można oczekiwać zmniejszenia się podatności podłoża na deformacje, a w szczególnych przypadkach gruntowych zmniejszenia możliwości utraty nośności podłoża wskutek procesu upłynnienia się gruntu [49]. Zagadnienie to wiąże się głównie z przypadkiem wykonania kolumn w określonej siatce geometrycznej np. w siatce kwadratów lub w siatce trójkątów równobocznych.

Wspomniana wcześniej metoda masowej stabilizacji zastępuje w ograniczonym zakresie wykonywanie kolumn w konfiguracji blokowej. Polega ona na pionowym lub pionowym i poziomym mieszaniu gruntu ze stabilizatorem przy jednoczesnym obracaniu specjalnego narzędzia mieszającego rys. 1.6. Narzędzie mieszające umieszczone jest na wysięgniku konwencjonalnej koparki rys. 1.7. Ograniczenie stabilizacji do maksymalnej głębokości 5 m wynika z jednej strony z zastosowania do tego celu konwencjonalnych koparek, a z drugiej strony ze wzrastającego oporu gruntu wraz z głębokością, przy poziomym przemieszczaniu się narzędzia mieszającego.

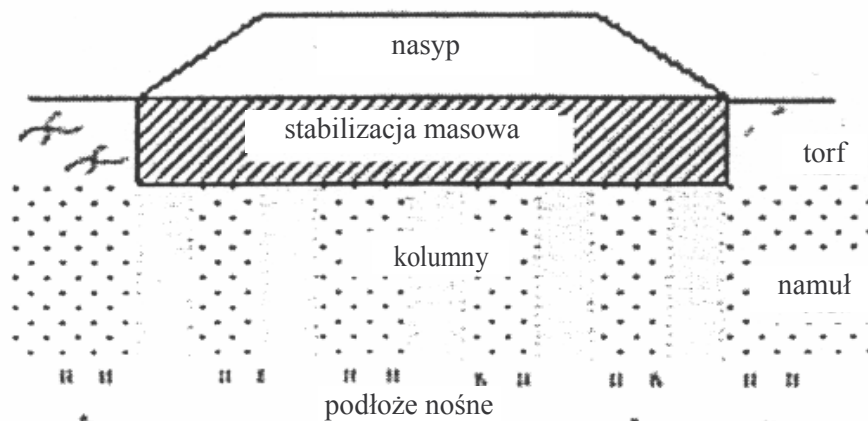


Rys. 1.6 Zasada masowej stabilizacji. [29]



Rys. 1.7 Widok masowej stabilizacji pionowo i poziomo. [14]

To ograniczenie w szczególnych przypadkach podłoża gruntowego sprawia, iż np. w przy posadowieniu nasypu stosuje się w głębszych partiach podłoża kolumny, a bezpośrednio pod nasypem stabilizację masową (rys.1.8).



Rys. 1.8 Stabilizacja masowa w połączeniu z kolumnami C - W. [14]

W praktyce inżynierskiej DJM znajduje coraz szersze zastosowanie i tak:

- najpowszechniej jako wzmocnienie podłoża fundamentowego między innymi pod nasypami drogowymi i kolejowymi, pod konstrukcją dróg, placów składowych, pod przyczółkami mostowymi, budynkami, halami przemysłowymi, zbiornikami, przepustami, falochronami, nabrzeżami,
- jako elementy konstrukcyjne zabezpieczające między innymi głębokie wykopy, w gruntach słabych oraz budowie znajdujące się w otoczeniu wykopów, przed zjawiskami wyporu gruntu lub zjawiskami osuwiskowymi,

- jako zabezpieczenie przed zjawiskiem upłynnienia się luźnych, całkowicie nawodnionych piasków drobnych wskutek trzęsienia ziemi o dużej sile,
- w celu ograniczenia wibracji na otaczające środowisko,
- jako elementy ochrony środowiska gruntowo-wodnego w postaci barier uniemożliwiających migrację zanieczyszczeń w wodach podziemnych, a także jako sposób wiązania skażeń organicznych i metali ciężkich z osadami i gruntami do postaci stałej tzw. solidyfikacja.

Z punktu widzenia ulepszenia warunków gruntowych zastosowanie DJM spełnia następujące cele:

- redukuje osiadania,
- zwiększa stateczność budowli,
- zwiększa nośność podłoża,
- zabezpiecza przed osuwiskami,
- zabezpiecza budowle w sąsiedztwie wykopów,
- redukuje wibracje,
- łagodzi zjawiska upłynniania gruntu,
- ogranicza oddziaływanie skażeń w gruncie [22].

W metodzie DJM oczekiwany proces wzmocnienia gruntu zależny jest od następujących czynników:

- charakterystyki i warunków geotechnicznych warstw gruntu podlegających stabilizacji tj. rodzaju i stanu gruntu, stopnia jego jednorodności, wilgotności naturalnej, zawartości części organicznych, układu warstw gruntu oraz położenia swobodnego zwierciadła wody gruntowej,
- rodzaju lub mieszaniny kilku rodzajów stabilizatora i ilości stosowanej na jednostkę objętości gruntu wzmacnianego,
- procedury - warunków mieszania tj. kształtu mieszadła, umiejscowienia wylotowych dysz stabilizatora w mieszadle, ciśnienia i ilości powietrza stosowanego do transportu stabilizatora w grunt, szybkości obrotów oraz szybkości podnoszenia mieszadła,
- warunków dojrzewania kolumn, przy czym istotne są tutaj dwa elementy: minimalny czas dojrzewania praktycznie wynoszący 28 dni, a w przypadku podłoża, które musi bezpiecznie przenieść określone obciążenie, czasowe przeciążenie konstrukcji o wartości obciążenia użytkowego, szczególnie wymagane przy nasypach drogowych.

Autorzy, którzy porównywali ilościowe wyniki badań wytrzymałości na ściskanie kolumn C – W, w terenie lub prób pobranych z kolumn z wynikami badań prób spreparowanych w laboratorium uzyskiwali bardzo duże rozbieżności spowodowane wymienionymi czynnikami bez względu na to jakiego rodzaju grunt poddawano wzmocnieniu. [24], [50]

Tym niemniej każdy projekt wzmocnienia podłoża musi być poprzedzony badaniami laboratoryjnymi, których zadaniem jest określenie proporcji składników stabilizatora i jego ilości na jednostkę objętości gruntu, tak aby otrzymać postulowaną miękką lub półtwardą kolumnę. Co więcej kluczowym zadaniem badań laboratoryjnych jest zbadanie, czy między gruntem wzmocnianym, a stabilizatorem w obecności wody gruntowej zachodzi proces wiązania. Dotyczy to szczególnie gruntów organicznych, które charakteryzują się bardzo dużą zmiennością właściwości fizycznych i chemicznych. Negatywnym przykładem zastosowania kolumn C - W było nieudane wzmocnienie podłoża na odcinku budowanej autostrady A-2, gdzie prawdopodobnie zignorowano wykonanie badań laboratoryjnych, o czym wspomniano podczas obrad International Conference on Deep Mixing w Sztokholmie w 2005 r. Ewentualne zastosowanie kolumn do wzmocnienia gruntów spoistych w stanie płynnym lub międko plastycznym, na co w warunkach polskich znajduje się zapotrzebowanie, aktualnie nie jest możliwe z uwagi na brak praktycznych doświadczeń, które powinny być w każdym przypadku poprzedzone badaniami laboratoryjnymi. Istotnym mankamentem jest generalnie brak jednolitej i jednoznacznej metodyki badań laboratoryjnych. Z praktycznego punktu widzenia badania te muszą mieć zarówno charakter ilościowy jak i jakościowy. Natomiast z poznawczego punktu widzenia konieczne są badania zmian mikrostrukturalnych w procesie ulepszania oddzielnie dla każdego rodzaju gruntu, a w szczególnych przypadkach nawet stanu gruntu.

2.0 Teza i cel pracy

2.1 Teza pracy

Badania laboratoryjne umożliwiające wykazanie, iż w wyniku mieszania wybranych gruntów organicznych, pochodzących z rejonu Koszalina z ograniczoną ilością spoiwa w postaci różnych relacji cementu, i produktu odpadowego, jakim jest popiół lotny zachodzi proces wiązania, w konsekwencji którego, uzyskuje się postulowaną miękką lub półtwardą kolumnę zapewniającą współpracę kolumny z otaczającym gruntem.

2.2 Cel pracy

Celem pracy jest:

- próba określenia relacji poszczególnych składników i ilości stabilizatora pozwalająca na racjonalne i skuteczne ulepszenie badanych gruntów organicznych,
- zaproponowanie metodyki badań laboratoryjnych wytrzymałości na ściskanie gruntów organicznych ulepszonych stabilizatorami, możliwej do wykorzystania w praktyce inżynierskiej przy projektowaniu wzmocnienia podłoża.

2.3 Zakres pracy

Zakres pracy obejmuje:

- poszukiwanie trzech rodzajów gruntów organicznych w regionie koszalińskim, oraz badania laboratoryjne w celu określenia wyjściowych właściwości fizycznych i mechanicznych,
- badania właściwości fizycznych, wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie oraz ściśliwości gruntów ulepszonych przyjętymi do badań stabilizatorami wraz z analizą i interpretacją wyników,
- badania derywatograficzne składu mineralogicznego,
- badania mikroskopowe zmian struktury gruntów stabilizowanych w porównaniu z naturalnymi,
- analizę statystyczną wyników badań wytrzymałości na ściskanie,
- podsumowanie oraz wnioski z przeprowadzonych badań i analiz.

3.0 Przegląd i ocena stanu wiedzy w zakresie przedmiotu pracy.

W świetle badań prowadzonych na świecie, głównie w Japonii oraz w krajach skandynawskich, gdzie autorzy projektów kładą nacisk na znalezienie mieszanek stabilizujących, podjęto próbę znalezienia wytycznych lub co najmniej zaleceń prowadzenia badań laboratoryjnych stabilizacji gruntów organicznych. Według najnowszej literatury Ground Improvement [29] oraz publikacji w materiałach konferencyjnych [2], [6], [7], [8], [10], [15], [19], [20], [21], [24], [26], [48], wynika, iż jak dotąd nie ujednotaczono procedury tych badań. Autorzy poszczególnych publikacji [2], [20], [24], [26], [48] promują własną procedurę badań opartą na wytycznych i normach obowiązujących w danym kraju. Najczęściej są to normy dotyczące przygotowania i badań wytrzymałości prób betonu. Niewątpliwie istotnym krokiem w kierunku znormalizowania procedur stabilizacji gruntów organicznych w tym również badań laboratoryjnych była realizacja projektu Unii Europejskiej określonego w skrócie EuroSoilStab w ramach 4 Programu Ramowego pod tytułem „Development of design and construction methods of stabilise soft organic soils for the construction of rail, road and other infrastructure”. W pracach tych uczestniczyły organizacje z Finlandii, Holandii, Irlandii, Szwecji, Wielkiej Brytanii i Włoch. Projekt został zakończony na początku roku 2000 opracowaniem pt.: „Design guide soft soil stabilisation”.

Głównym kierunkiem prowadzonych badań na świecie jest poszukiwanie optymalnych mieszanek stabilizujących pod względem wytrzymałości, dla gruntów organicznych występujących w rejonie, gdzie projektowane jest wzmocnienie podłoża, przy czym nie są w sposób jawny podane kryteria optymalizacji, co z kolei jest błędem metodyki badań. Przy tej okazji wielu autorów [3], [20], [24] [26], [48], prowadziło badania mające na celu określenie wpływu poszczególnych czynników procesu stabilizacji na wartość wytrzymałości na ściskanie oraz ściśliwości gruntu wzmocnionego.

Główne kierunki prowadzonych badań to:

- rodzaj i ilość stabilizatora, [2], [6], [10], [13], [16], [19], [20], [26], [48], [52],
- sposób i czas mieszania, [48],
- wielkość oraz kształt próbek, [10], [48],
- warunki oraz czas dojrzewania, [10], [26],
- wielkość obciążenia podczas dojrzewania, [48],
- mrozoodporność, [48],
- analiza zmian struktury gruntu po wzmocnieniu, [20], [26],
- wykorzystanie materiałów odpadowych do wzmocnienia gruntów, [2], [10], [13], [26], [37], [38], [40], [48].

Najważniejsze wyniki badań prowadzonych w różnych ośrodkach zostały przedstawione w formie tablic i wykresów. Przedstawiają one zmianę wytrzymałości w zależności od rodzaju i ilości stabilizatora na metr sześcienny różnych gruntów organicznych.

Szczegółowa analiza charakterystyki poddawanych wzmocnieniu gruntów organicznych oraz uzyskanych wyników badań ma na celu zobrazowanie problematyki zagadnienia. Analizę oparto na trzech pracach najszerzej traktujących metodykę stabilizacji gruntów organicznych: Ahnberg i Holm [2], Cortellazzo i Cola [10] oraz Pousette i inni [48].

Autorzy ci szczegółowo opisują procedurę stabilizowania gruntów organicznych w warunkach laboratoryjnych. Badania i analizę uzyskanych wyników badań przedstawiono w kolejnych punktach niniejszego rozdziału.

3.1 Badania torfu szwedzkiego. Pousette K., Macsik J. & Jacobsson A. [48]

3.1.1 Rodzaje i cechy fi

zyczne wzmocnianego gruntu:

Torf T1 głębokość pobrania gruntu **1,5 ÷ 2 m**, wilgotność **660 %**, straty prażenia **9 %**, pH **4,5**, **H4 ÷ H5****, Arvidsjaur - miejsce pobrania,

Torf T2 głębokość pobrania gruntu **1 m**, wilgotność **570 %**, straty prażenia **16 %**, pH **4,5**, **H2 ÷ H3****, Arvidsjaur - miejsce pobrania,

Torf T3 głębokość pobrania gruntu **0,8 ÷ 1 m**, wilgotność **490 %**, straty prażenia **55 %**, pH **brak oznaczenia**, **H7 ÷ H8****, Glommerstråsk - miejsce pobrania,

** - stopień rozkładu, (wg skali von Posta)

(temp. prażenia 800 ° C, czas prażenia 1 h).

3.1.2 Program badań:

rodzaj mieszanki: **50/50 cement hutniczy/popiól C/P**,

ilość mieszanki: **200 kg/m³**,

dwa rodzaje miksera, 1 i 2 bliżej nie opisane,

czas mieszania: **1, 2, 5 min**,

próbki dojrzewały pod wodą,

obciążenie próbki podczas dojrzewania: **20 kPa**,

temperatura w pomieszczeniu: **20 ° C**,

czas dojrzewania: **3, 7, 14, 28, 85 i 365 dni**,

cykle zamrażania i rozmrażania: **0, 1, 2, 4 i 8**.

Tablica 3.1 Zestawienie wyników badań. [48]

Rodzaj gruntu	Czas dojrzwania [doby]	średnica foremki [mm]	Ilość próbek [sztuk]	Średnia wartość wytrzymałości na ściskanie [kPa]	Odchylenie wytrzymałości od wartości średnich [%]	Odchylenie standardowe [kPa]	Gęstość objętościowa po dojrzwaniu [g/cm ³]
T1	14	50	10	87	- 12 do + 12	6,7	1,16
		68	6	82	- 7 do + 6	3,7	1,15
T2	14	50	10	92	- 5 do + 13	5,3	1,17
		68	8	76	- 12 do + 6	5,6	1,16
		68	7	78	- 6 do + 5	3,1	1,16
T2	28	50	10	110	- 12 do + 8	7,3	1,17
		50	8	113	- 5 do + 5	3,5	1,17
		68	8	88	- 17 do + 12	7,6	1,16
		68	7	90	- 8 do + 9	5,5	1,16
T3	14	50	10	38	- 22 do + 23	4,8	1,14
		50	5	42	- 6 do + 11	2,8	1,15
		68	10	37	- 7 do + 9	2,0	1,15

Tablica 3.2 Zestawienie wartości średnich wyników badań z trzech, **-pięciu i ***-ośmiu prób. [48]

Czas mieszania [min]	wytrzymałość na ściskanie [kPa]					
	Torf T2 [H2 ÷ H3]				Torf T3 [H2 ÷ H3]	
	C/P1		C/P2		C/P1	C/P2
	Mikser 1	Mikser 2	Mikser 1	Mikser 2	Mikser 1	Mikser 2
1	107	93	72	82	54	41
2	113	107***	97	99	42**	46
5	101	111	87	91	63	43

C/P1 - cement szybkosprawy/ziarnisty popiół lotny,

C/P2 - cement szybkosprawy/ popiół lotny chłodzony powietrzem,

3.1.3 Ważniejsze wnioski:

- wytrzymałość na ściskanie jest od 6 do 25 % wyższa dla próbek o małej średnicy,
- zmiana miksera nie powodowała wzrostu wytrzymałości na ściskanie,
- zwiększanie obciążenia podczas dojrzwania powodowało zwiększenie wytrzymałości na ściskanie,
- mieszanie gruntu przez jedną minutę powodowało nierównomierne wymieszanie stabilizatora z gruntem, mieszanie przez pięć minut powodowało niszczenie struktury gruntu, najlepszy efekt wzrostu wytrzymałości na ściskanie zaobserwowano gdy grunt mieszano przez dwie minuty,
- wzrost cykli badania mrozoodporności powoduje spadek wytrzymałości na ściskanie,
- łatwiej pakować stabilizowany gruntu do foremek o mniejszej średnicy,
- większa średnica foremek jest standardową średnicą używaną w Swedish Deep Stabilisation Research Centre.

3.1.4 Dodatkowe uwagi:

- próbki podczas pakowania do foremek powinny być układane tak aby nie powstawały wolne przestrzenie (warstwy około 1,5 cm),
- wydłużenie czasu dojrzewania powoduje wzrost wytrzymałości na ściskanie,
- różnorodność torfu jest duża, pomiędzy południową T1 i T2, a północną T3 Szwecją, nie można porównywać wyników.

3.2 Ulepszanie szwedzkich gruntów organicznych różnymi stabilizatorami. Ahnberg H.& Holm G. [2]

3.2.1 Rodzaje i cechy fizyczne wzmocnianego gruntu:

Torf 1 głębokość pobrania gruntu 2,2 ÷ 4,2 m, gęstość objętościowa 0,95 g/cm³, wilgotność 1600 %, straty prażenia 97 %, pH 4,3, Dömle - miejsce pobrania,

Torf 2 głębokość pobrania gruntu 0,2 ÷ 2,2 m, gęstość objętościowa 0,96 g/cm³, wilgotność 1500 %, straty prażenia 99 %, pH 4,4, Dömle - miejsce pobrania,

Gytia - D głębokość pobrania gruntu 4,5 ÷ 4,9 m, gęstość objętościowa 1,1 g/cm³, wilgotność 370 %, straty prażenia 11 %, pH 5,4, Dömle - miejsce pobrania,

Gytia - H1 głębokość pobrania gruntu 3 ÷ 5 m, gęstość objętościowa 1,23 g/cm³, wilgotność 220 %, straty prażenia 10 %, pH 8,5, Holma Morse - miejsce pobrania,

Gytia - H2 głębokość pobrania gruntu 1 ÷ 2 m, gęstość objętościowa 1,2 g/cm³, wilgotność 270 %, straty prażenia 11 %, pH 6,8, Holma Morse - miejsce pobrania.

3.2.2 Program badań:

rodzaj mieszanki zgodnie z tablicą 3.3,

ilość mieszanki: 100 ÷ 300 kg/m³,

czas mieszania: 5 min.,

próbki dojrzewały pod wodą,

obciążenia próbki podczas dojrzewania: 18 kPa,

temperatura w pomieszczeniu: 20 ° C,

komory klimatyczne: 8 ° ÷ 40 ° C,

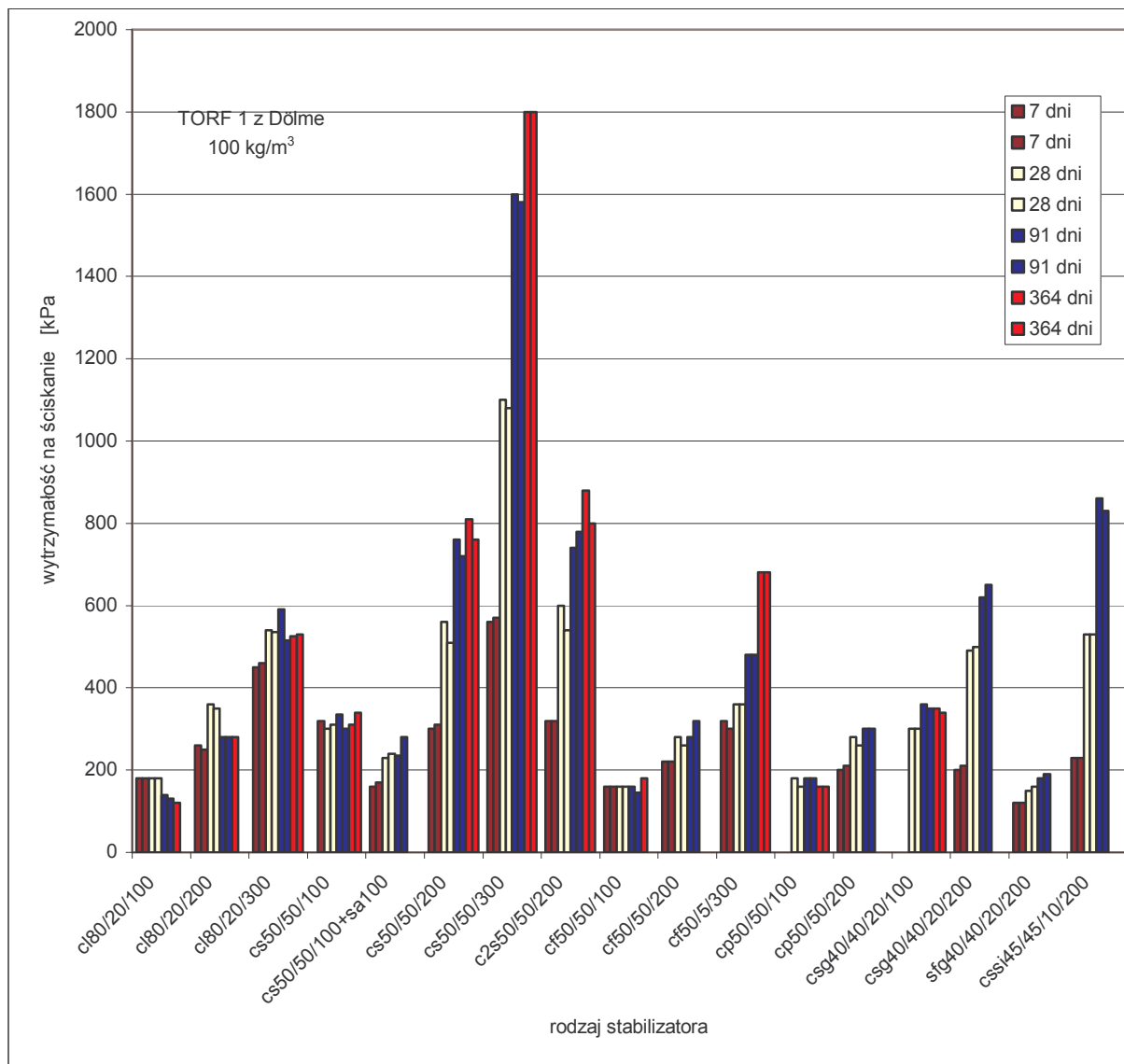
czas dojrzewania: 7, 28, 91, 364 dni,

cykle zamrażania i rozmarzania: 0,

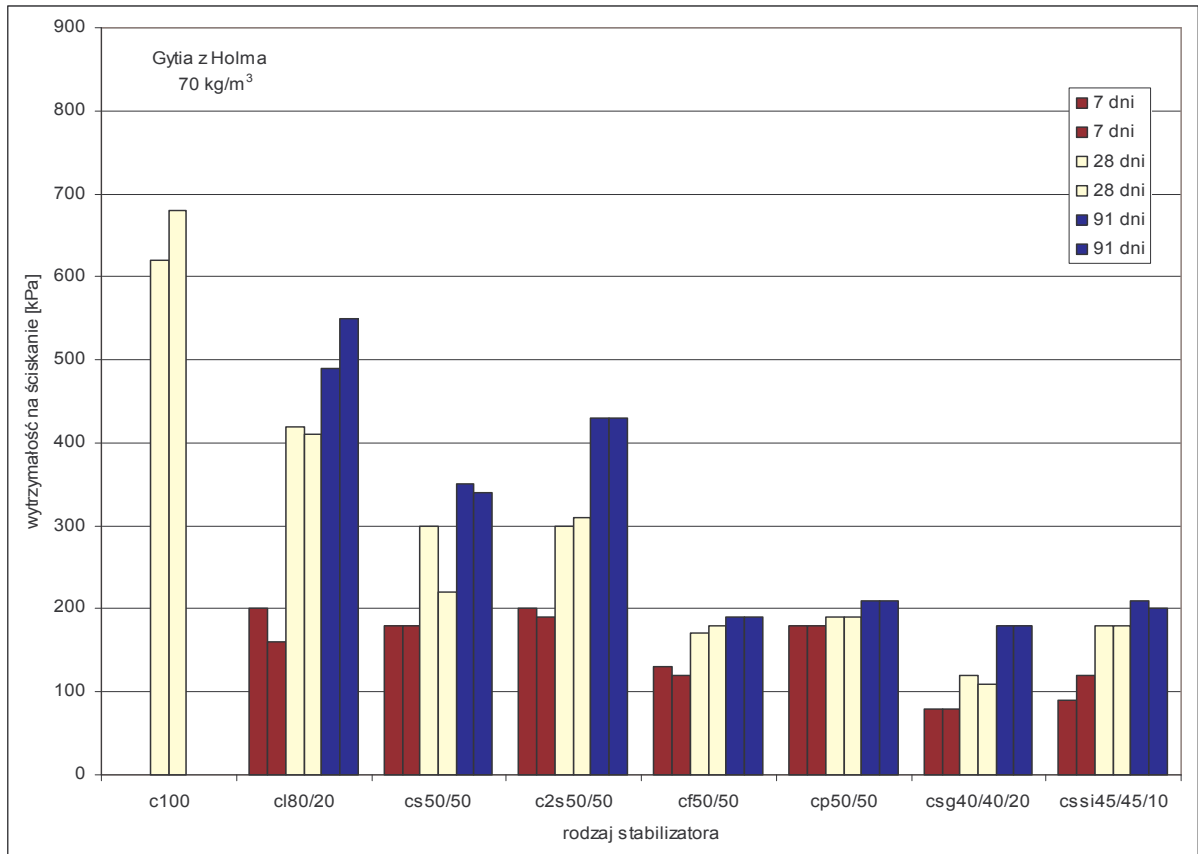
Tablica 3.3 Zestawienie proporcji mieszanek stabilizujących. [2]

środek stabilizujący 1	środek stabilizujący 2	środek stabilizujący 3	stosunek stabilizatorów 1/2/3	symbol
cement std c	wapno l	-	80/20	cl80/20
cement std c	żużel s	-	50/50	cs50/50
cement std c	żużel s	+piasek 100 kg/m ³ sa100	50/50	cs50/50+sa100
cement SH c ₂	żużel s	-	50/50	c ₂ s50/50
cement std c	popiół f	-	50/50	cf50/50
cement std c	drzewny popiół p	-	50/50	cp50/50
cement std c	żużel s	gips g	40/40/20	csg40/40/20
żużel s	popiół f	gips g	40/40/20	sfg40/40/20
cement std c	żużel s	pył krzemionkowy si	45/45/10	cssi45/45/10

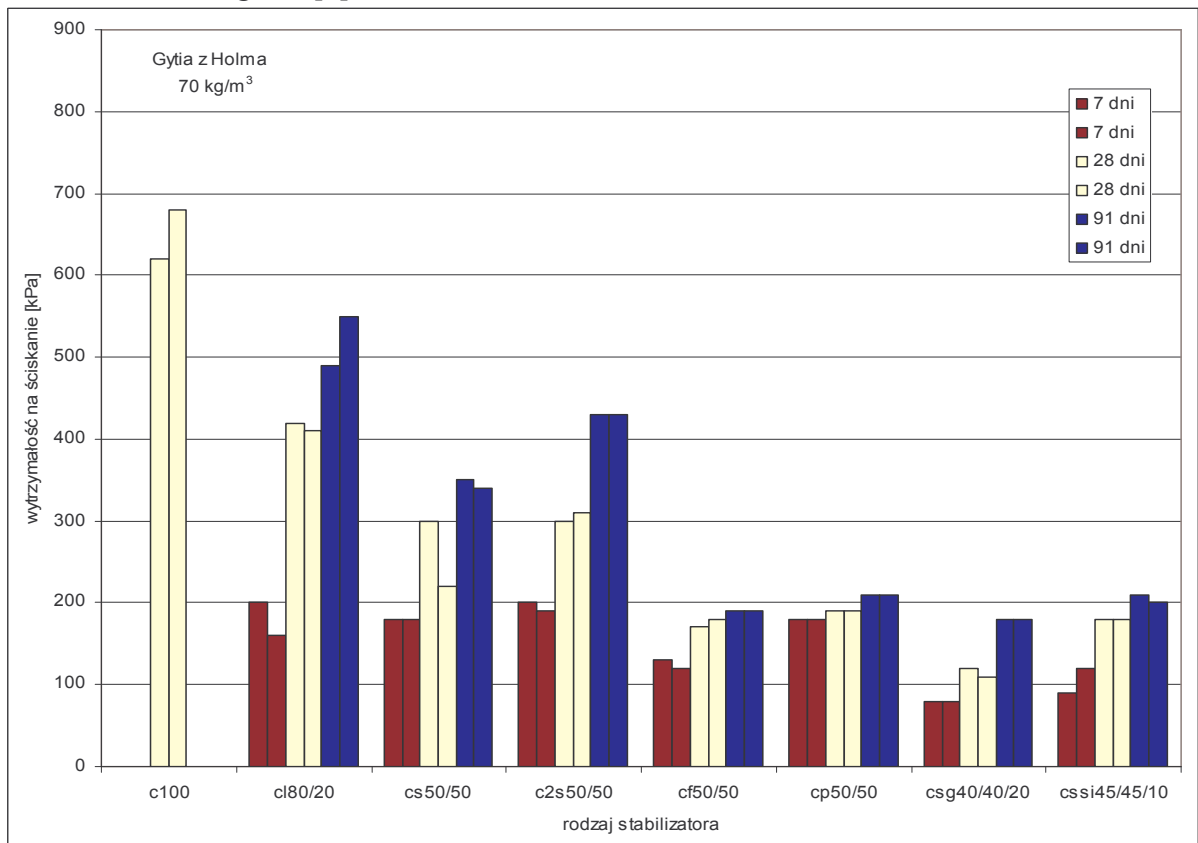
Uzyskane wyniki badań dla Torfu 1, dla Gytii z Dölme oraz dla Gytii z Holme przedstawiono w postaci wykresów na rys. 3.1, 3.2 i 3.3. Wykresy przedstawiają zmianę wytrzymałości w zależności od rodzaju stabilizatora. Tablica 3.3 przedstawia rodzaje stabilizatorów, stosunek poszczególnych składników oraz symbol. Ilość stabilizatora użytego dla poszczególnych gruntów wynosiła 100, 200 lub 300 kg/m³ dla gruntów Dölme (rys. 3.1 i 3.2) oraz 70 kg/m³ dla Gytii z Holme (rys. 3.3). Dla torfu z Dölme oprócz stabilizatorów przedstawionych w tablicy 3.3, zastosowano również dodatek piasku w ilości 100 kg/m³ (**cs50/50/100+sa100**). Jako podstawowy środek wiążący zastosowano cement portlandzki (cement std) tylko w dwóch przypadkach był to cement szybkosprawny (cement SH) lub żużel.



Rys. 3.1 Zmiana wytrzymałości na ściskanie Torfu z Dölme dla różnych mieszanek w ilości stabilizatora 100 kg/m³. [2]



Rys. 3.2 Zmiana wytrzymałości na ściskanie Gytii z Dölme dla różnych mieszanek w ilości stabilizatora 100 kg/m³. [2]



Rys. 3.3 Zmiana wytrzymałości na ściskanie Gytii z Holme dla różnych mieszanek w ilości stabilizatora 70 kg/m³. [2]

3.3.3 Ważniejsze wnioski:

- bardzo dobre wyniki wzmocnienia torfu i gytii uzyskano przy zastosowaniu mieszanki cement-żużel,
- dodanie gipsu do mieszanki cementowo-żużlowej spowodowało wzrost wytrzymałości gytii z Dölme a spadek gytii z Holme,
- właściwości chemiczne wpływają na efekt wzmocnienia,
- większa ilość mieszanki powoduje wzrost siły ściskającej przy zniszczeniu,
- dodanie piasku do stabilizatora daje negatywny efekt wzmocnienia próbek torfu,
- wysoka temperatura dojrzewania próbek daje negatywny efekt wzmocnienia torfu,
- potwierdziło się, że wzmocnianie torfu jest dużo mniej efektywne niż wzmocnianie gytii,
- wodoprzepuszczalność stabilizowanych próbek zmniejszyła się,
- autorzy podkreślają, fakt dużych rozbieżności pomiędzy wynikami badań laboratoryjnych i polowych.

3.3 Badania torfów włoskich. Cortellazzo G. & Cola S. [10]

3.3.1 Rodzaje wzmacnianego gruntu.

Torf ADRIA głębokość pobrania gruntu 3,0 ÷ 6,0 m, gęstość objętościowa 1,03 ÷ 1,07 g/cm³, wilgotność 330 ÷ 421%, straty prażenia 68 ÷ 75%, pH 6,5 ÷ 7,2, Adria - miejsce pobrania*,
Torf CORREZZOLA głębokość pobrania gruntu 1,5 ÷ 2,1 m, gęstość objętościowa 1,03 ÷ 1,08 g/cm³, wilgotność 606 ÷ 790%, straty prażenia 70 ÷ 72%, pH 4,0 ÷ 5,1, Correzzola - miejsce pobrania*,

* - północno-zachodnia część Włoch, delta rzeki Bachiglione

3.3.2 Program badań:

rodzaj mieszanki: **cement II/A-M32,5 R, 75/25 cement/gips,**

ilość mieszanki: **200, 250 kg/m³,**

czas mieszania: **ręcznie, do uzyskania homogenicznej masy,**

próbki dojrzewały pod wodą,

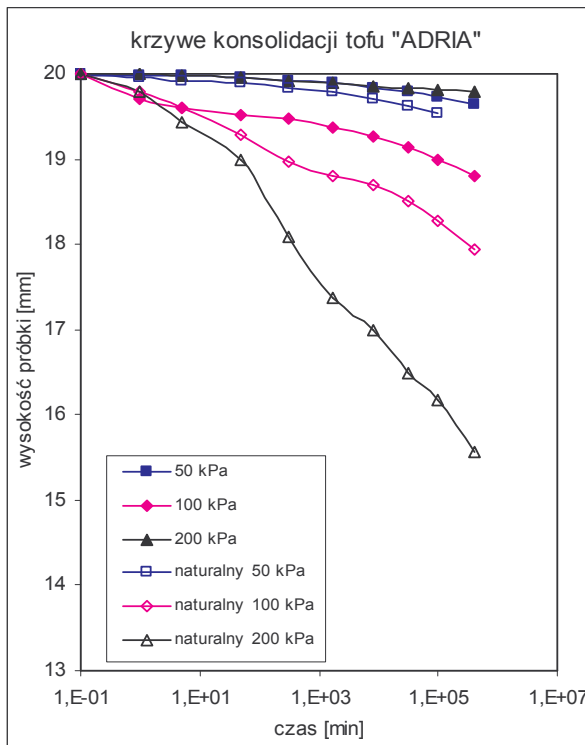
obciążenia próbki podczas dojrzewania: **18 kPa,**

zakres naprężeń w badania ścisłości: **50 ÷ 200 kPa,**

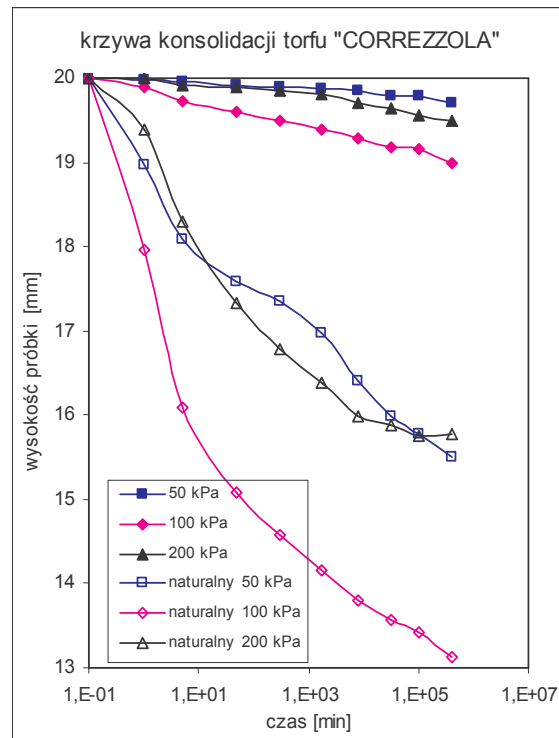
temperatura w pomieszczeniu: **18 ÷ 22 ° C,**

czas dojrzewania: **7, 28, 90 i 360 dni,**

cykle zamrażania i rozmrażania: **0.**



Rys. 3.4 Krzywe konsolidacji torfu **ADRIA** naturalnego i stabilizowanego cementem w ilości 200 kg/m³ [10]



Rys. 3.5 Krzywe konsolidacji torfu **CORREZZOLA** naturalnego i stabilizowanego cementem w ilości 150 kg/m³ i gipsem w ilości 50 kg/m³

3.3.3 Ważniejsze wnioski:

- znacząca redukcja ścisłości torfu stabilizowanego w porównaniu do gruntu naturalnego, widoczna na krzywych konsolidacji rys. 3.4 i rys. 3.5

Badania laboratoryjne skuteczności ulepszania niektórych gruntów organicznych przy użyciu różnych spoiw.

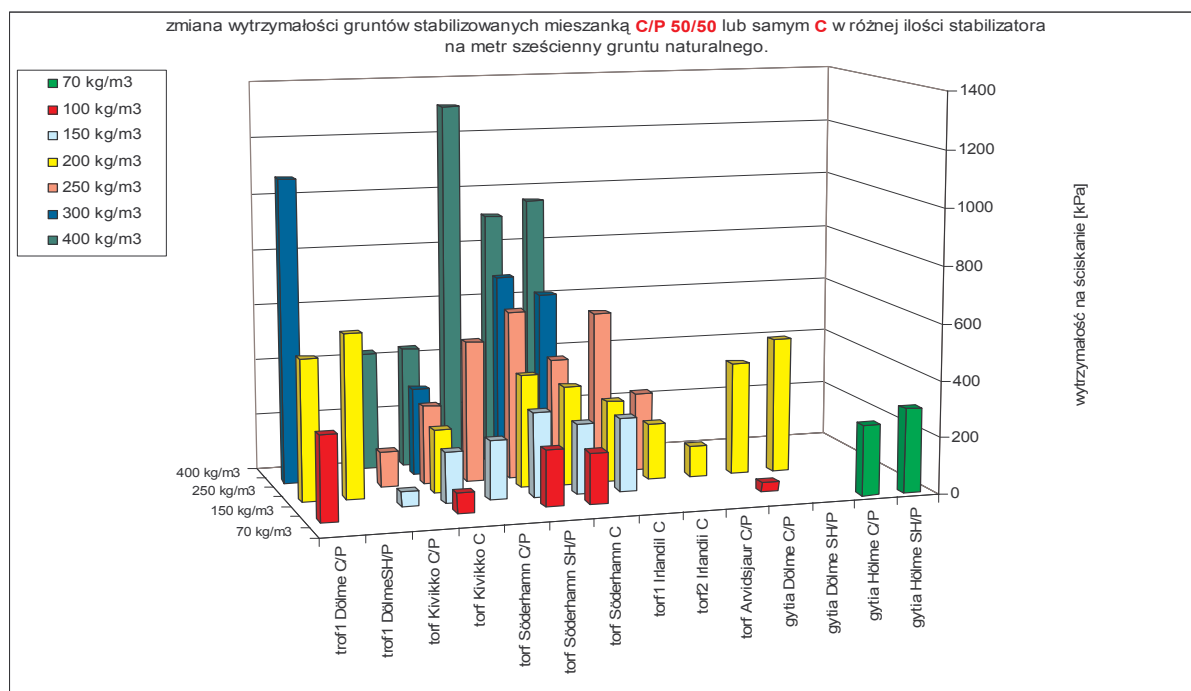
3.4 Zestawienie wyników badań wytrzymałości na ściskanie.

Niektóre wyniki badań prowadzonych w różnych krajach dla różnych gruntów organicznych, wzmocnianych mieszanką cementu i popiołu lub samym cementem w różnej ilości stabilizatora na jeden metr sześcienny gruntu zestawiono w tablicy 3.4. Do analizy wybrano tylko te wyniki badań, gdzie proporcje stabilizatora, tj. cementu i popiołu wynosiły odpowiednio

C/P 50/50 lub C/P 100/0. Analizą objęto osiem rodzajów gruntów o różnej zawartości części organicznych. Cechy fizyczne poszczególnych gruntów przedstawiono w pkt. 3.1.1 do 3.3.1 oraz w tablicy 3.5. W badaniach zastosowano mieszanki popiołu i cementu portlandzkiego oraz popiołu i cementu szybkosprawnego (SH).

Tablica 3.4 Zestawienie wyników badań wytrzymałości na ściskanie w zależności od ilości stabilizatora na metr sześcienny gruntu naturalnego. [2], [20], [26], [48]

ilość stabilizatora [kg/m ³]	70	100	150	200	250	300	400	
rodzaj gruntu	wytrzymałości na ściskanie [kPa]							skład stabilizatora
Trof 1 Dölme [2]		300		500		1080		cement+popiół
Trof 1 Dölme [2]				580				cementSH+popiół
Torf Kivikko [26]			50		125		420	cement+popiół
Torf Kivikko [26]		70	180	225	280	310	430	cement
Torf Söderhamn[26]			210		500		1300	cement+popiół
Torf Söderhamn[26]		200	300	400	600	700	900	cementSH+popiół
Torf 1 Irlandii [20]			260	290	580			cement
Torf 2 Irlandii [20]				200	280			cement
Torf Arvidsjaur [48]				110				cement+popiół
Gytia Dölme [2]		35		400				cement+popiół
Gytia Dölme [2]				480				cementSH+popiół
Gytia Holme [2]	250							cement+popiół
Gytia Holme [2]	300							cementSH+popiół



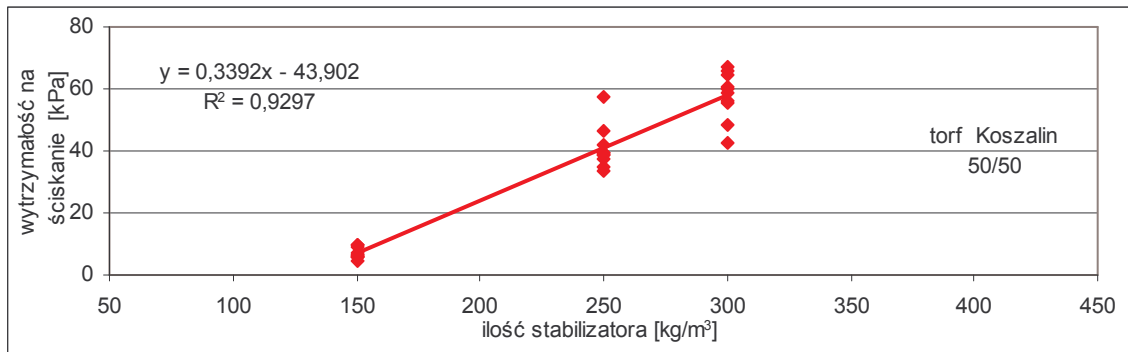
Rys. 3.6 Graficzne przedstawienie wyników badań wytrzymałości na ściskanie zestawionych w tabelicy 3.4.

Biorąc pod uwagę przedstawione wyniki badań podjęto próbę porównania niektórych wyników badań z wynikami własnymi. Porównanie dotyczy wyników badań dla torfów z Kivikko, Söderhamn oraz badań pilotowych torfów z Koszalina, stabilizowanych mieszanką cementu i popiołu C/P 50/50 oraz 100/0 w różnej ilości stabilizatora na metr sześcienny gruntu.

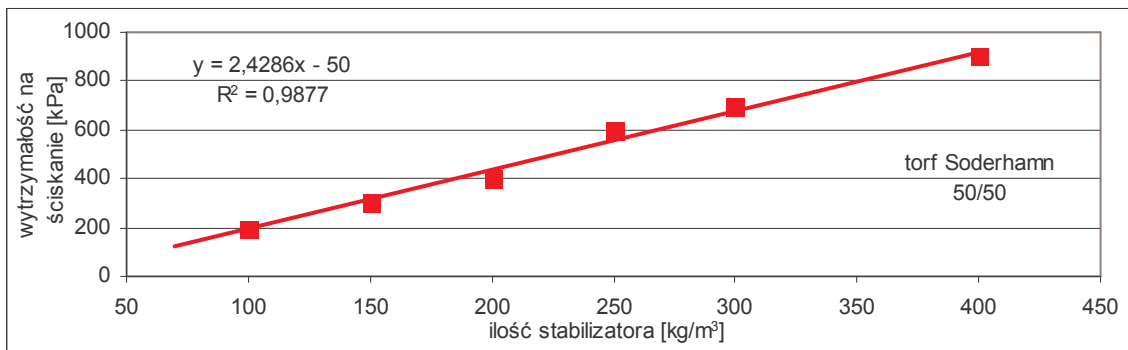
Tablica 3.5 Cechy fizyczne porównywanych gruntów.

Rodzaj gruntu	wilgotność [%]	straty prażenia [%]
Torf Kivikko	668	95
Torf Söderhamn	869	89
Torf Koszalin	532	65

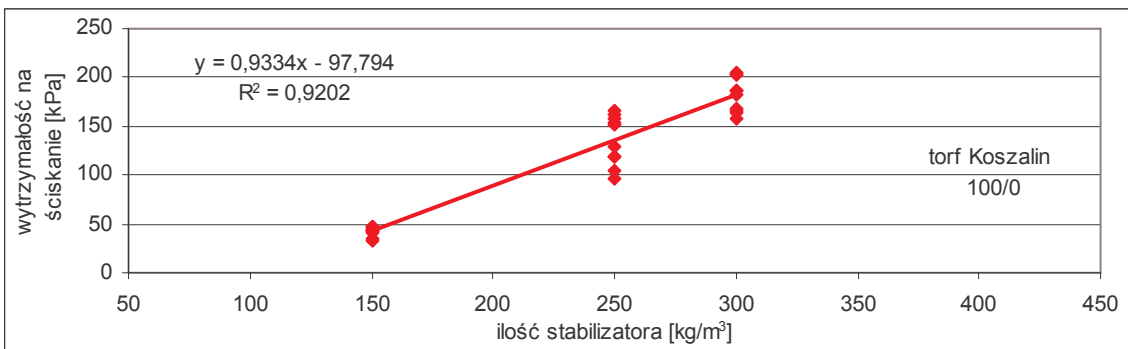
Na rys. 3.7 do 3.12, przedstawiono zmianę wytrzymałości na ściskanie w zależności od ilości stabilizatora na metr sześcienny gruntu. We wszystkich przypadkach widoczny jest wzrost wytrzymałości wraz ze wzrostem ilości stabilizatora. Dla wszystkich gruntów uzyskano wysoki współczynnik determinacji rzędu $R^2 = 0,92$ do $0,99$. Niższe wartości współczynnika determinacji gruntów z Koszalina, spowodowane są tym, iż wykresy zostały sporządzone dla $n = 10$ wyników badań, a nie na wartościach średnich tak jak dla gruntów z Kivikko i Söderhamn.



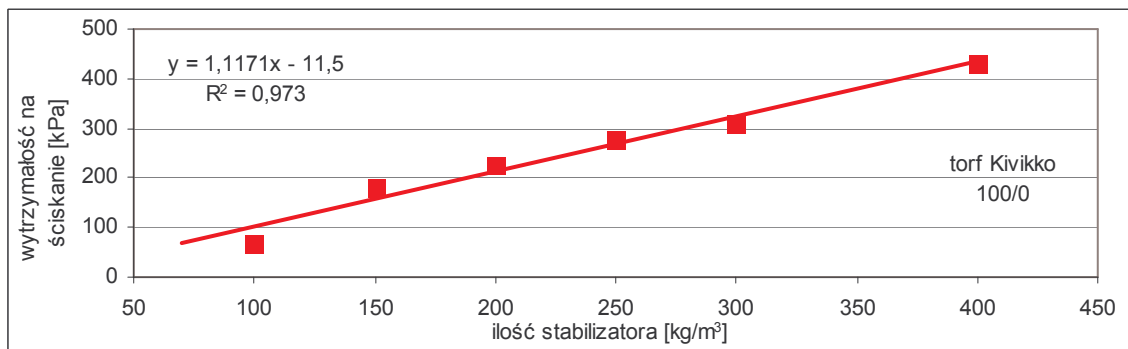
Rys 3.7 Wytrzymałość na ściskanie w zależności od ilości stabilizatora na metr sześcienny gruntu, dla torfu z Koszalina stabilizowanego mieszanką cementu i popiołu 50/50.



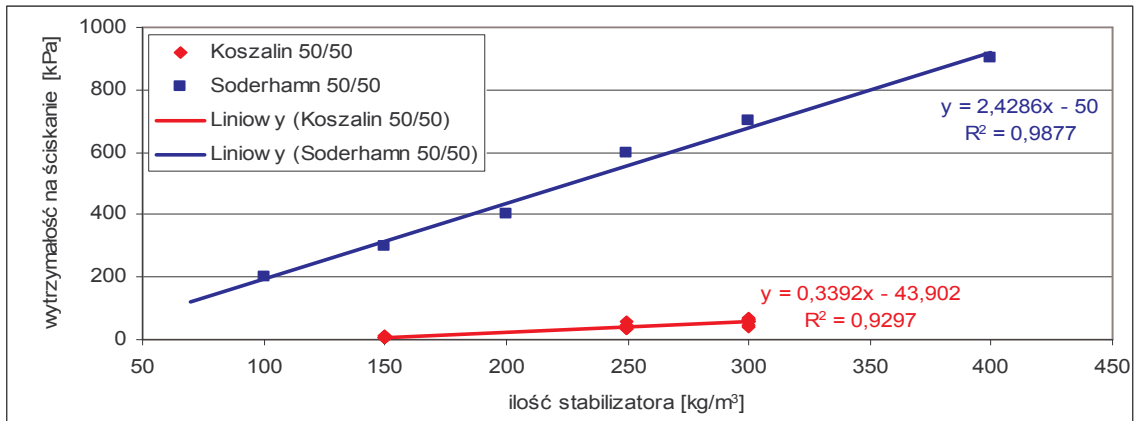
Rys 3.8 Wytrzymałość na ściskanie w zależności od ilości stabilizatora na metr sześcienny gruntu, dla torfu z Söderhamm stabilizowanego mieszanką cementu i popiołu 50/50.



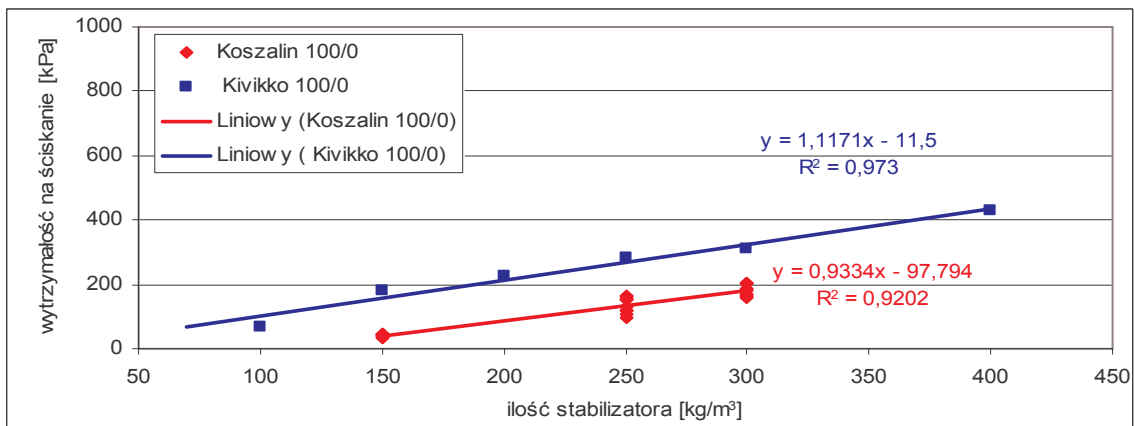
Rys 3.9 Wytrzymałość na ściskanie w zależności od ilości stabilizatora na metr sześcienny gruntu, dla torfu z Koszalina stabilizowanego mieszanką cementu i popiołu 100/0.



Rys 3.10 Wytrzymałość na ściskanie w zależności od ilości stabilizatora na metr sześcienny gruntu, dla torfu z Kivikko stabilizowanego mieszanką cementu i popiołu 100/0.



Rys 3.11 Wytrzymałość na ściskanie w zależności od ilości stabilizatora na metr sześcienny gruntu, dla torfu z Söderhamn i Koszalina stabilizowanego mieszanką cementu i popiołu 50/50.



Rys 3.12 Wytrzymałość na ściskanie w zależności od ilości stabilizatora na metr sześcienny gruntu, dla torfu z Kivikko i Koszalina stabilizowanego mieszanką cementu i popiołu 100/0.

Analizując zmiany wytrzymałości pokazane na rys. 3.11 i 3.12 w powiązaniu z wilgotnością i zawartością części organicznych stwierdza się brak wyraźnej korelacji, co prowadzi do stwierdzenia wyrażanego przez różnych autorów [3], [20], [26], [48], że:

Każdy projekt wzmacniania gruntów organicznych musi się opierać na wynikach badań laboratoryjnych prowadzonych indywidualnie dla poszczególnych rodzajów gruntów organicznych z danego rejonu. Autorzy ci podkreślają fakt różnorodności gruntów organicznych występujących na danym terenie. Różnorodność ta może prowadzić do zupełnie różnych wyników badań wytrzymałości mimo złudnie podobnych cech fizycznych gruntów organicznych w stanie naturalnym. Potwierdzają to przedstawione wykresy na rys. 3.7 do 3.12. Brak jednolitej metodyki badań oraz analiza uzyskanych wyników i wniosków pozwoliła na wypracowanie własnej, dostosowanej do potrzeb danego projektu oraz wyposażenia laboratorium, procedury stabilizacji wybranych gruntów organicznych z regionu koszalińskiego.

3.5 Charakterystyka gruntów organicznych.

3.5.1 Problemy geotechniczne związane z gruntami organicznymi.

W każdym planowanym przedsięwzięciu inżynierskim, a w szczególności na organicznych utworach bagiennych lub jeziornych, bezwzględnie konieczne jest uwzględnienie specyfiki takiego podłoża. Grunty organiczne przy dodatkowym obciążeniu wykazują bardzo duże i długotrwałe osiadanie oraz tendencję do utraty stateczności i łatwego wyparcia spod wznoszonej budowli. Długotrwałe oraz nierównomierne osiadania w utworach bagiennych są spowodowane niekorzystnymi właściwościami mechanicznymi wynikającymi z genezy tych gruntów. Badania terenowe gruntów organicznych są często utrudnione ze względu na płytkie zaleganie wody gruntowej. Pobieranie próbek o nienaruszonej strukturze spod zwierciadła wody gruntowej wymaga użycia specjalnych próbników. Także badania laboratoryjne gruntów organicznych natrafiają często na trudności natury metodologicznej. Widoczne jest to np. w badaniu uziarnienia (tendencja do nadmiernej koagulacji w badaniu areometrycznym - niektórych składników gruntu), w badaniu wytrzymałości na ścinanie (bardzo niewyraźnie zaznaczający się moment ścięcia w badaniu trójosiowym) lub w badaniu ściśliwości (bardzo długi czas badania i trudność miarodajnego określenia czasu zakończenia badania edometrycznego) [32].

Wykonanie pełnego zakresu badań terenowych i laboratoryjnych jest zwykle przedsięwzięciem pracochłonnym, czasochłonnym i kosztownym, jednak tylko takie podejście do problematyki gruntów organicznych umożliwia podjęcie racjonalnej technicznie i optymalnej finansowo decyzji o sposobie posadowienia budowli inżynierskiej na podłożu organicznym.

3.5.2 Geneza utworów jeziornych.

Substancja organiczna dostaje się do gleb i gruntów w wyniku obumierania roślin i zwierząt. Głównymi związkami chemicznymi budującymi zarówno organizmy roślinne, jak i zwierzęce są cukry, białka, tłuszcze i kwasy tłuszczowe oraz lignina. W zależności od warunków klimatycznych i biologicznych substancja organiczna w warstwie glebowej może ulegać całkowitemu rozkładowi lub też przekształceniu w próchnicę (humifikacja). Pojęcie części organicznych lub substancji organicznej obejmuje zarówno nie rozłożoną substancję organiczną, jak i jej część zhumifikowaną. Części szkieletowe takie jak kości, skorupy, zęby, nie są zaliczane do substancji organicznej [32].

Dla większości gruntów organicznych naturalnymi środowiskami sedymentacyjnymi są jeziora i bagna. Wśród osadów jeziornych wyróżnia się: osady biogeniczne, hydrogeniczne i mineralne [32]. Osady biogeniczne dzieli się na osady sapropelowe jezior, powstające głównie ze szczątków roślinnych i zwierzęcych, przede wszystkim planktonu oraz osady humusowe torfowisk, powstające ze szczątków roślin lądowych. Sapropela natomiast są dzielone na dwa główne typy dy i gytie, która może przechodzić w kredę jeziorną przy zawartości węgla wapnia ponad 80 %.

Jednocześnie z sedymentacją materiału organicznego w jeziorach są osadzane części mineralne o różnej granulacji i różnym składzie mineralnym. Substancja organiczna opada na dno w postaci ziaren o różnej wielkości, wskutek czego jej rozmieszczenie jest zależne od warunków hydrodynamicznych. Ponadto istnieje wyraźny związek pomiędzy składem granulometrycznym osadu a ilością związków organicznych, których zawartość wzrasta wraz ze zmniejszeniem się średnicy ziaren osadu [32].

3.5.3 Charakterystyki typologiczne utworów jeziornych.

Typ osadów jeziornych określany jest zwykle na podstawie zawartości jego podstawowych składników. Ogólnie można wyróżnić trzy podstawowe rodzaje substancji budujących osad: [32]

Substancja organiczna – jest autogenicznym¹ materiałem najczęściej pochodzenia roślinnego. Sapropel biogeniczny, organiczny osad powstający na dnie jeziora definiowany jest jako ciemna, jednorodna i galaretowata masa, o konsystencji mazistej, tłusta w dotyku. Zawiera zwykle ponad 67 % substancji organicznych, w tym 40 ÷ 75 % węgla oraz substancje mineralne występujące w szczątkach obumarłych organizmów, jak krzemionka czy związki wapnia i żelaza. Najkorzystniejsze warunki powstania sapropelu są w zbiornikach o przydennej warstwie wody źle przewietrzanej i zatrutej przez siarkowodór. Sapropela mogą zawierać różne domieszki najczęściej piaszczyste, ilaste, wapienne okrzemkowe. Po osadzeniu na dnie jeziora materiał organiczny podlega rozdrobnieniu przez zwierzęta denne oraz ulega przemianom pod wpływem działania bakterii.

Substancja mineralna węglanowa – występuje najczęściej w postaci autogenicznego węgla wapnia. Występuje w osadach pojeziornych, jest w zdecydowanej większości autogeniczna. Powstaje w wyniku procesów biochemicznych i fizykochemicznych.

¹ *Podstawowe składniki chemiczne skał osadowych i spoiwa skał okruchowych - minerały powstające w czasie sedymentacji osadu lub jego diagenety (przemiany luźnego osadu w zwięzłą skałę).*

Najczęściej występującym osadem w jeziorach polodowcowych strefy umiarkowanej jest węglan wapnia. W przypadku, gdy osad jeziorny zawiera ponad 80 % węglanu wapnia i zmienne ilości substancji organicznej oraz niewęglowego materiału mineralnego, określany jest jako kreda jeziorna.

Substancja mineralna niewęglanowa – występuje w postaci allogenicznego² kwarcu, skaleni, granatów oraz autogenicznych minerałów ilastych.

Podstawowym składnikiem niewęglanowej substancji mineralnej w osadach jeziornych są minerały ilaste. Poza nimi w osadach jeziornych występują domieszki kwarcu, skaleni, kalcytu, dolomitu, rzadziej syderytu czy łyszczyków. Osady o takim składzie określane są jako miki i iłki jeziorne. Mają zwykle ciemne zabarwienie związane z obecnością związków organicznych lub szarozielone i szaroniebieskie, związane z występowaniem związków żelaza dwuwartościowego.

Bardzo charakterystycznym wskaźnikiem składu i stanu osadów jeziornych jest ich barwa. Przy dobrze przewietrzanych wodach dennych i powolnym gromadzeniu się osadów, materia organiczna na dnie jest pożerana przez nekrofagi lub niszczona przez rozkład pod wpływem bakterii, a żelazo ulega utlenianiu. Osad ma zabarwienie szare, kremowe lub żółte. Przy szybkim gromadzeniu się osadów, w wodach słabo przewietrzanych, część materii organicznej ulega pogrzebaniu i działa redukująco na osad, zwłaszcza na zawarte w nim żelazo. Związki żelaza dwuwartościowego barwią osad na szaro lub niebiesko, a substancja organiczna powoduje jego ciemniejszy odcień, w przypadku rozwoju bakterii siarkowych powstaje jednosiarcezek żelaza barwiący osad na czarno [32].

3.5.4 Cechy litologiczne.

Cechy litologiczne decydują o określeniu rodzaju utworu organicznego. Podstawową charakterystyką litologiczną jest uziarnienie. Badanie uziarnienia utworów nie skalistych, o charakterze spoistym przeprowadza się przede wszystkim w oparciu o metody sedymentacyjne w polu grawitacji lub w polu działania siły odśrodkowej. Najczęściej stosowaną jest analiza areometryczna lub pipetowa.

Badania uziarnienia utworów organicznych są często utrudnione ze względu na znaczną tendencję do koagulacji cząstek gruntowych w zawiesinie oraz ze względu na bardzo duże zróżnicowanie gęstości właściwej cząstek organicznych i mineralnych szkieletu gruntowego.

² Podstawowe składniki okruchowych skał osadowych - minerały powstałe poza basenem sedymentacyjnym, do którego dostały się w postaci okruchów.

Ze względu na małą średnią gęstość właściwą szkieletu gruntowego i niewielkie wymiary cząstek (frakcja pyłowa), tempo sedymentacji jest niewielkie, co wymaga bardzo precyzyjnych odczytów na areometrze i prowadzić może do istotnych zniekształceń wyników badania.

Bardzo ważną cechą litologiczną jest udział poszczególnych składników w budowie osadu. Najczęściej rozpatrywane są wzajemne proporcje substancji organicznej, zawartość węglanów (głównie CaCO_3) i substancji mineralnej nie węglanowej z uwzględnieniem udziału minerałów ilastych.

3.5.5 Granulometria utworów jeziornych.

Gytie i kredy jeziorne są osadami o charakterze utworów spoiw. Dominuje frakcja pylasta, a frakcja piaszkowa stanowi najczęściej domieszkę. Zróżnicowanie frakcji piaszkowej związane jest z położeniem osadu w basenie sedymentacyjnym – im bliżej linii brzegowej tym zawartość frakcji piaszkowej jest większa.

Przeciętne uziarnienie utworów jeziornych w Polsce północnej [59] jest następujące:

- frakcja piaszczysta 5 ÷ 10 %
- frakcja pyłowa 30 ÷ 80 %
- frakcja ilowa 10 ÷ 50 %.

Na podstawie badań składu granulometrycznego utwory tego typu można najczęściej sklasyfikować jako utwory mineralne spoiw t.j. gliny pylaste zwięzłe, gliny pylaste oraz rzadziej, jako gliny pyły lub ily.

3.5.6 Klasyfikacja gruntów organicznych

Sposób badania gruntów organicznych do celów geotechnicznych, opierający się na ich genezie i wynikających z niej właściwościach, nie został do tej pory ujednoczony. Brak jest też jednolitej klasyfikacji. Wielu badaczy w Polsce podjęło trud ustalenia klasyfikacji poszczególnych grup gruntów organicznych z uwzględnieniem ich właściwości geotechnicznych i zależności korelacyjnych między poszczególnymi parametrami.

W klasyfikacji gruntów organicznych, podawanej przez nie obowiązującą już polską normę PN-86/B-02480 *Grunty budowlane Określenia, symbole, podział i opis gruntów* [61], proponuje się ich podział na podstawie genezy, zarzucając jednak poprzednie propozycje szczegółowego podziału opierające się na zawartości substancji organicznej (PN-74/B-02480). Zgodnie z tym podziałem wyróżnia się następujące grupy nie skalistych gruntów organicznych:

grunty próchniczne –zawierające ponad 2 % części organicznych pochodzenia roślinnego oraz obumarłej mikroflory i mikrofauny,

namuły – grunty powstałe w wyniku osadzania się substancji mineralnych i organicznych w różnych zbiornikach i warunkach sedymentacyjnych; tj. namuły piaszczyste lub gliniaste [32]. Z punktu widzenia oceny geotechnicznej zalicza się je do gruntów słabych. Ich niekorzystne właściwości wynikają przede wszystkim z dużej zmienności litologii, małego stopnia diagenety, wysokiej wilgotności oraz obecności substancji organicznej,

gytie - to namuły o zawartości węglanu wapnia > 5%, który może wiązać szkielet gruntu nadając mu charakter gruntu skalistego o niskiej wartości wytrzymałości na ściskanie [61].

Jedną z ostatnich definicji gytii do celów geologii inżynierskiej podała Myślińska [32] za Długaszkiem. Gytie są to utwory pochodzenia jeziornego o zawartości części organicznych ponad 2 %, a w przypadku zaliczenia do tej grupy także kredy jeziornej, czyli osadu zawierającego ponad 80% węglanu wapnia, zawartość części organicznych może być niższa niż 2 %.

Gytie są organicznym osadem jeziornym powstałym w holocenie, osadzającym się w słodkowodnych zbiornikach wód stojących, najczęściej w rynnach polodowcowych oraz jeziorach wytopiskowych. Gytie w przeciwieństwie do torfów powstają ze szczątków roślin bogatych w tłuszcze i białka. Masa organiczna odkładana na dnie jeziora jest przetwarzana przez faunę denną, bez dopływu tlenu, ulegając mineralizacji i humifikacji.

Warunki sedymentacji są ważnym czynnikiem kształtującym skład gytii, a więc i ich właściwości. Na ogół sekwencja osadzania się gytii w jeziorach jest następująca: najgłębiej osadzają się gytie mineralne, wyżej gytie mineralno-organiczne i najwyżej gytie organiczne, co jest wynikiem spływania się zbiornika.

Termin *gyttja* w języku szwedzkim oznacza szlam, po raz pierwszy wprowadził ten termin H. Von Post w 1862 r., definiując gytie jako jasno zabarwiony utwór koprogeniczny³, składający się z cząstek planktonu, skorupki mięczaków, chitynowych szczątków owadów oraz części mineralnych, powstających w zbiornikach eutroficznych⁴. [32],

torfy - grunty powstałe z obumarłych i podlegających stopniowej karbonizacji części roślin, cechuje je na ogół zawartość części organicznych $I_{om} > 30$ [61].

³ *kopro* - w złożeniach: *nawóz, gnój; brud*

⁴ *żyzny, obfitujący w substancje pokarmowe;*

Według normy [62]: torf jest utworem akumulacyjnym pochodzenia organicznego, głównie roślinnego, powstały w wyniku procesu torfienia przebiegającego w określonych warunkach wodnych, powietrznych i mikrobiologicznych. Torf składa się ze szczątków roślinnych w różnym stopniu zhumifikowanych oraz humusu torfowego. Według przyjętego umownie kryterium zawartość części mineralnych (zawartość popiołu) w torfie nie przekracza 80 %.

Torfy tworzyły się w całym plejstocenie w okresach interglacjalnych oraz w holocenie. Intensywny rozwój torfowisk trwający do dziś rozpoczął się w okresie atlantyckim w wyniku podniesienia zwierciadła wody gruntowej [47].

W torfowiskach torfy mogą występować bez nadkładu lub pod przykryciem warstwy murszu lub gleby torfowej. Naturalna sekwencja osadów w torfowiskach jest na ogół następująca: podłoże mineralne, podłoże mineralne wzbogacone w węglan wapnia (kreda jeziorna), gytia, torf.

Typ torfu można najprościej określić na podstawie torfowiska w jakim on występuje:

- **niski** – powstaje w torfowiskach, które tworzą się w obniżeniach terenu, w dolinach rzecznych lub na terenach źródliskowych, torfowiska niskie są zasilane wodami rzek, strumieni i wodami gruntowymi, niekiedy wody powodziowe; wody zasilające ten typ torfowisk zawierają zarówno mechaniczną zawiesinę mineralną o różnej granulacji jak i rozpuszczone substancje mineralne (sole), torfy torfowisk niskich są więc zasobne w części mineralne w różnej postaci w znacznie większym stopniu niż torfy torfowisk innego typu;
- **przejściowy** – powstaje na obszarach torfowisk, na których podłoże mineralne leży blisko powierzchni; są to więc zwykle płytkie torfowiska z porastającą je roślinnością mieszaną, złożoną z gatunków występujących zarówno na torfowiskach niskich jak i wysokich; torfowiska wysokie powstają również na podłożu torfowisk niskich po zaniku przepływu wód zasilających te torfowiska;

wysoki – powstaje na obszarze torfowisk, które tworzą się na wododziałach, terenach, gdzie występują nieruchome wody gruntowe lub powierzchniowe. Powierzchnia tego rodzaju torfowisk jest zwykle wypukła; torfy, które tutaj powstają zawierają niewiele substancji mineralnych, odczyn ich jest kwaśny (pH poniżej 6), rozkład substancji organicznych przebiega tu wolno; torfowiska wysokie porasta roślinność oligotroficzna - mało wymagająca pod względem pokarmowym [32].

3.6 Charakterystyka właściwości fizycznych i mechanicznych gruntów organicznych.

Właściwości fizyczne i mechaniczne gruntów organicznych wykazują zasadnicze różnice w porównaniu z gruntami mineralnymi. Liczne badania, różnych autorów potwierdzają znaczne zróżnicowanie badanych właściwości. Grunty organiczne cechuje zazwyczaj wysoka wilgotność naturalna, niewielka gęstość objętościowa, wysoka kurczliwość, duża ściśliwość, mała wytrzymałość na ścinanie. Najczęściej bierze się pod uwagę zawartość substancji organicznej i jej wpływ na właściwości fizyczne. Wzrost zawartości substancji organicznej wiąże się ze wzrostem wilgotności i ze zmniejszeniem się gęstości.

3.6.1 Badania terenowe.

Badania terenowe; przeprowadza się w celu rozpoznania istniejącej budowy geotechnicznej podłoża, warunków wodnych, pobrania próbek do badań laboratoryjnych oraz wskazania najbardziej odpowiedniego terenu do posadowienia projektowanego obiektu. Badania terenowe powinny umożliwić określenie:

- rodzaju gruntów,
- uwarstwienia i pochylenia warstw gruntów,
- miąższości gruntów organicznych i głębokości zalegania stropu gruntów mineralnych,
- rodzaju gruntu mineralnego bezpośrednio zalegającego pod gruntami organicznymi,
- wytrzymałości poszczególnych warstw,
- głębokości i wahań zwierciadła wody gruntowej.

Próbki gruntu organicznego o nienaruszonej strukturze NNS z głębokości około 4 ÷ 5 m oraz poniżej zwierciadła wody gruntowej, wymagają użycia próbnika z zaworem kulowym lub próbnika tłokowego. Zapobiega to wysysaniu gruntu podczas wyciągania próbnika z otworu.

3.6.2 Badania laboratoryjne.

Brak normowych wielkości liczbowych właściwości fizycznych, mechanicznych oraz litologicznych gruntów organicznych powoduje konieczność wykonywania badań laboratoryjnych. Badania te pozwalają na określenie podstawowych cech litologicznych, fizycznych i mechanicznych takich jak:

- uziarnienie,
- wilgotność,
- gęstość objętościowa,

- zawartość części organicznych mineralnych węglanowych i niewęglanowych,
- ściśliwość,
- wytrzymałość na ścinanie,.

3.6.3 Właściwości fizyczne

3.6.3.1 Badanie wilgotności gruntu.

Wilgotnością naturalną (w_n) nazywamy stosunek masy wody zawartej w danej próbce gruntu w warunkach naturalnych do masy szkieletu gruntowego tej próbki. [32] Masę szkieletu gruntowego uzyskuje się poprzez suszenie próbki w temperaturze $105 \div 110$ °C, zakładając, że w tej temperaturze grunt traci całą wodę wolną.

3.6.3.2 Gęstość objętościowa gruntu

Gęstość objętościowa gruntu jest to stosunek masy próbki gruntu do objętości tej próbki łącznie z porami ρ [g/cm³]. Badania wykonuje się za pomocą pierścienia wg [60].

3.6.3.3 Badanie zawartości części organicznych.

Zawartością części organicznych (I_{om}) nazywamy stosunek masy części organicznych zawartej w danej próbce gruntu do masy szkieletu gruntowego tej próbki [32].

W piecu elektrycznym w temperaturze $600 \div 650$ °C praży się pustą parowniczkę. Po wyprażeniu waży się ją. Następnie z próbki w stanie powietrzno suchym usuwa się ręcznie nierozłożone korzenie i inne części organiczne. Próbkę rozciera się i przesiewa przez sito o wymiarach oczek 0,25 mm. Próbkę suszy się w parownicze lub w naczynku wagowym w temperaturze $105 \div 110$ °C do osiągnięcia stałej masy. Z próbki o stałej masie będącej w parownicze odważa się z dokładnością 0,01 g około 10 g próbki. Zważoną próbkę umieszcza się w piecu. Temperaturę podnosi się stopniowo aż do $600 \div 650$ °C

Natomiast według ASTM D 2974-87 i BS 1377: Part 3; 1990 oraz Projektu Eurocode 7 [32] temperatura stosowana w badaniach strat prażenia do uzyskania ilości części organicznych wynosi 440 °C.

Według DIN 18128 temperatura prażenia wynosi 550 °C (przy temperaturze suszenia 60 °C). Próbkę przetrzymuje się w piecu w ustalonej temperaturze przez co najmniej 4 godzin. Po tym czasie próbkę wyjmuje się z pieca i studzi w eksykatorze, a następnie waży. Następnie wstawia się próbkę ponownie do pieca przez dalsze 3 ÷ 4 godziny. Prażenie i ważenie powtarza się do uzyskania stałej masy [32].

3.6.3.4 Badanie zawartości węgla wapnia.

Makroskopowo zawartość węgla wapnia określa się na podstawie obserwacji reakcji gruntu po skropieniu gruntu 20 % roztworem kwasu solnego, następnie na podstawie PN [60] stwierdza się klasę.

3.6.4 Metodyka badań substancji organicznej.

Zawartość węglanów w gruntach określana jest poprzez oznaczenie zawartego w nich dwutlenku węgla. Najczęściej stosowane są metody; miareczkowania i Scheiblera [31]. Metoda miareczkowania oparta jest na rozkładzie węglanów kwasem solnym i miareczkowaniu nadmiaru kwasu roztworem wodorotlenku sodu. Metoda Scheiblera polega na pomiarze ilości dwutlenku węgla wydzielanego w trakcie reakcji węgla wapnia z 10 % kwasem solnym HCl.

Zawartość minerałów wchodzących w skład bezwęglanowej substancji mineralnej, zwłaszcza minerałów frakcji ilowej, określana jest najczęściej za pomocą analizy derywatograficznej [31]. Analiza ta polega na badaniu efektów cieplnych i zmian wagowych w następstwie fizycznych, fizykochemicznych i chemicznych przemian badanej substancji pod wpływem temperatury, najczęściej w zakresie od 0 do 1500 ° C. Wyniki badań derywatograficznych rejestrowane są jednocześnie w postaci krzywych: temperatury (T), termicznej różnicowej (DTA), termogravimetrycznej (TG), termogravimetrycznej różnicowej (DTA). Analiza tych krzywych pozwala na określenie jakościowego i ilościowego składu mineralnego badanej próbki.

Poza tym stosowane są metody rentgenostrukturalne i spektrometrii w podczerwieni oraz metody oparte na zastosowaniu transmisyjnego mikroskopu elektronowego [31].

3.6.4.1 Analiza termiczna.

Istotą analizy termicznej jest badanie efektów cieplnych i zmian wagowych zachodzących na skutek fizycznych, fizykochemicznych i chemicznych przemian badanej substancji pod wpływem zmian ich temperatury.

Mechanizm wykonywania analizy termicznej polega na tym, że podczas ogrzewania badanej próbki odbywa się nieprzerwany zapis temperatury oraz różnic temperatur między badaną próbką a substancją wzorcową. Efekty cieplne zachodzące w badanej próbce podczas jej ogrzewania rejestruje się mierząc różnicę temperatur za pomocą dwóch termoelementów różnicowych, z których jeden jest umieszczony w badanej substancji, a drugi w substancji

wzorcowej, tj. takiej, w której nie zachodzą żadne reakcje związane z wydzielaniem lub pochłanianiem ciepła.

3.6.4.2 Analiza derywatograficzna.

Analiza derywatograficzna jest jedną z wielu metod termicznych identyfikowania minerałów i skał. Istotną zaletą tej metody jest to, że aparat służący do jej wykonania – derywatograf, który różniczkuje ubytek masy w funkcji temperatury. Pozwala to dość dokładnie ustalić zakresy temperatury poszczególnych reakcji termicznych i ich maksima, co umożliwia przyporządkowanie każdej reakcji, wartości ubytku masy, a w połączeniu z termicznymi efektami różnicowymi niesłychanie ułatwia interpretację składu mineralnego zarówno pod względem jakościowym jak i ilościowym.

Derywatograf rejestruje jednocześnie krzywą temperatury (T), termiczną różnicową (DTA), termograwimetryczną (TG) oraz termograwimetryczną różniczkową (DTG). Krzywe te łącznie stanowią treść derywatogramu.

Krzywe derywatogramów.

Krzywa temperatury (T), mająca kształt zbliżony do prostej odwzorowuje wartość temperatury panującej w piecu, a zarazem w substancji organicznej. Krzywa (T) służy do odczytywania temperatury poszczególnych reakcji.

Krzywa termiczna różnicowa (DTA) odwzorowuje reakcje endotermiczne i egzotermiczne zachodzące w próbce, w trakcie jej ogrzania. Reakcje te są rejestrowane jako różnice między temperaturą próbki, a temperaturą substancji wzorcowej.

Reakcje endotermiczne są rejestrowane jako ugięcia krzywej (DTA) ku dołowi derywatogramu, zwanej endotermami. Endotermy skał ilastych związane są między innymi z: odparowaniem wody higroskopowej, termicznym rozkładem węglanów, np. kalcytu, niszczeniem struktury minerałów ilastych.

Reakcje egzotermiczne są rejestrowane jako ugięcie krzywej (DTA) ku górze derywatogramu. Są to egzotermalne piki lub egzotermy. Egzotermy skał ilastych związane są między innymi ze spalaniem części lotnych, utlenieniem np. siarki uwalnianej z siarczków.

Krzywa termograwimetryczna (TG) odwzorowuje zmiany masy próbki w funkcji temperatury. W analizie skał ilastych zmiany te z reguły polegają na ubytku masy, na skutek dehydratacji i dehydroksylacji, spalania substancji organicznej, termicznego rozkładu i termicznej dysocjacji węglanów.

Termograwimetryczna krzywa różniczkowa (DTG) spełnia w omawianej analizie pierwszoplanową rolę. Krzywa (DTG) stanowi, bowiem podstawę interpretacji

derywatogramów. Dzięki krzywej (DTG) możliwe jest ustalenie początku i końca reakcji wiążącej się ze zmianą masy, inaczej mówiąc zakresu reakcji, a tym samym odczytanie z krzywej (TG) wartości zmiany masy [55].

Podstawą identyfikacji minerałów jest krzywa (DTA). Identyfikację krzywej (DTA) przeprowadza się porównując ją z krzywymi uzyskanymi dla czystych minerałów lub ich mieszanin. Przy porównywaniu krzywych bierze się pod uwagę trzy zasadnicze ich cechy:

- charakter,
- wychylenia (maksima i minima),
- wielkości wychylenia i temperaturę, przy jakiej to wychylenie zachodzi.

Warunki wykonania analizy derywatograficznej.

Warunki wykonywania analizy derywatograficznej powinny być tak dobrane do danej próbki, aby otrzymany z tej analizy derywatogram umożliwił jak najdokładniejsze i wiarygodne określenie składu mineralnego badanej substancji, którą dana próbka reprezentuje. Dobór warunków ma zmierzać do dwóch celów: by wszystkie krzywe zmieściły się na powierzchni rejestrującego papieru oraz by krzywe były jak najbardziej czytelne, ułatwiały odczyt i interpretację. Warunki te, dotyczą: masy próbki, czułości wagi i wzmocnienia krzywych (DTG) i (DTA), wilgotności próbki, doboru tygli mieszczących analizowaną i wzorcową substancję oraz szybkości nagrzewania.

Masa próbki ms, derywatografy pozwalają analizować próbki o masie dochodzącej do 10 000 mg.

Nie należy jednak wyciągać wniosku o potrzebie stosowania dużych naważek (dużej masy próbki), ponieważ w jednostce czasu jest dostarczana przez piec ściśle określona ilość ciepła, która musi wystarczyć do przeprowadzenia każdej reakcji endotermicznej, w czasie i w zakresie temperatury charakterystycznej dla danej reakcji. Z doświadczenia Wyrwickiego [56] wynika, iż optymalna masa próbki skał ilastych i ich frakcji wynosi 500 mg. Masa próbki może być w uzasadnionych przypadkach większa lub mniejsza (np. kiedy całkowita strata masy przekracza 20 % wagowo, korzystniejsza jest naważka 400 lub 800 mg.). Zalecane wartości naważki wyrażają się pełnymi setkami miligramów (wiąże się to z czułością wagi), choć wagi zainstalowane w derywatografach pozwalają analizować próbki o dowolnej masie.

Czułość wagi, wagi derywatografów pracują z różnymi, lecz stałymi czułościami: 20, 50, 100, 200, 500, 1000 i 2000 mg. Czułość wagi musi być co do wartości większa od spodziewanej maksymalnej straty masy lub co najwyżej jej równa. Po drugie, w miarę zwiększania wartości liczby wyrażającej czułość wagi, maleje dokładność odczytu wartości

ubytku masy. Po trzecie, do ustalenia ilości poszczególnych składników mineralnych wygodniejsze jest wyrażenie ubytku masy w % wagowych. Papier w derywatografie z fotograficznym zapisem w części rejestrującej ubytek masy (krzywa TG), ma stałą skalę, którą można odnieść do ubytku masy wyrażanego w gramach – zgodnie z czułością wagi, ale również do ubytku wyrażanego w procentach. Zależy to tylko od odpowiedniego dobrania naważki i czułości (TG) (tablica 3.7).

Wzmocnienia krzywych (DTG) i (DTA), wzmocnienie obu krzywych jest wyrażone ułamkami o stałych wartościach: 1/50, 1/30, 1/25, 1/15, 1/10, 1/5, 1/3, 1/2, 1/1 i jest proporcjonalne do wartości ułamka. W praktyce analiz skał ilastych są stosowane najczęściej wzmocnienia 1/10 lub 1/5 jednakowe dla krzywej (DTA) i (DTG) lub różne. W analizie skał zawierających składniki charakteryzujące się małymi wartościami ubytku masy lub charakteryzujące się bardzo słabymi efektami termicznymi, nieodzowne są silniejsze wzmocnienia. Wykonując serię analiz skał, np. tego samego wieku czy pochodzących z jednego złoża, skał o podobnym jakościowo, lecz zróżnicowanym ilościowo składzie mineralnym, dobrze jest stosować stałe warunki, w tym te same wzmocnienia i masę próbki.

Wilgotność próbki, można analizować próbki o dowolnej wilgotności, zależnie od celu, dla którego analizę się wykonuje. W analizie składu mineralnego skał ilastych wykorzystuje się próbki na ogół w stanie powietrzno-suchym, a nie w stanie zupełnego wysuszenia. Pożądane jest w przypadku analizowania serii próbek skał ilastych i ich frakcji pochodzących z jednego obiektu badań, np. złoża, aby próbki te były przechowywane przez kilka dni, co najmniej trzy, w tych samych lub mało zmiennych warunkach wilgotności. W przypadkach przechowywania próbek w warunkach pokojowych a nie w eksykatorze ze stałą wilgotnością, konieczne jest wykonanie analizy próbki skały i próbki jej frakcji ilowej tego samego dnia.

Tablica 3.7 Dobór naważki i czułość TG. [56]

Naważka ms [mg]	Czułość TG [mg]	Wartość całej skali [% wag.]	Wartość najmniejszej działki [% wag.]	Dokładność odczytu ¼ działki [% wag.]
1000	1000	100	1,0	0,25
	500	50	0,5	0,125
	200	20	0,2	0,05
	100	10	0,1	0,025
500	500	100	1,0	0,25
	200	40	0,5	0,1
	100	20	0,2	0,05
	50	10	0,1	0,025
400	400	100	1,0	0,25
	200	50	0,5	0,125
	100	25	0,25	0,06
	50	12,5	0,125	0,03
200	200	100	1,0	0,25
	100	50	0,5	0,125
	50	25	0,25	0,06
	20	10	0,1	0,025

Szybkość nagrzewania, w analizie skał ilastych za optymalną uznano szybkość 10 °C/min i taka szybkość jest powszechnie stosowana.

Barwa próbki, próbki skał ilastych po nagraniu zmieniają diametralnie swą pierwotną, naturalną barwę głównie na skutek procesów utleniania, rzadziej – redukcji. Pożyteczne jest notowanie barwy po zakończeniu analizy, bowiem dostarcza ona dodatkowych informacji o składzie mineralnym bądź chemicznym analizowanej próby [56].

Ustalenie składu mineralnego skał ilastych (analiza derywatogramu, obliczanie ilości minerałów ilastych).

Skały ilaste składają się z wielu komponentów, część z nich ilościowo przeważającą, stanowią składniki termicznie czynne. Są to te składniki, które ogrzewane w zakresie temperatury 20 ° ÷ 1000 °C, zmieniają swą masę (z reguły jest to jej ubytek) lub ich struktura ulega przebudowie nie pociągając za sobą zmian masy. Na derywatogramach w pierwszym przypadku znajduje to odzwierciedlenie w efektach ubytku, a wyjątkowo przybytku masy zarejestrowanych na krzywych (TG) i (DTG), odpowiadających endo i egzotermom na krzywej (DTA). W drugim przypadku znajduje to odzwierciedlenie tylko i wyłącznie w endo i egzotermach zarejestrowanych na krzywej (DTA).

Składnikami termicznie nieczynnymi są te, które w stosownym zakresie temperatury ogrzewania nie ulegają żadnym zmianom lub też ulegają jedynie rozszerzeniu czy topnieniu. Zalicza się do nich głównie: minerały skaleniowe, bezwodne tlenki żelaza i tytanu oraz baryt

i anhydryt. Natomiast czynnymi termicznie składnikami są: minerały ilaste, kwarc, minerały węglanowe: kalcyt, dolomit, syderyt i im pokrewne, siarczki żelaza, uwodnione tlenki żelaza, powszechnie występująca substancja organiczna, gips i sporadycznie występujące inne uwodnione siarczany, np. jarosyty oraz chlorki, np. halit.

Analiza derywatogramów termicznie czystych składników skał ilastych oraz wyliczone wartości ubytku masy odnoszą się do minerałów absolutnie suchych i nie uwzględniają wartości dehydratacji.

Ustalenie składu mineralnego skał ilastych za pomocą analizy derywatograficznej traktuje się jako działanie dwuetapowe. W pierwszym przeprowadza się identyfikację poszczególnych termicznie czynnych składników, a w drugim – oblicza ich udział na podstawie ubytku masy spowodowanego termicznym ich rozkładem [56].

3.6.5 Badanie wytrzymałości.

Wytrzymałością gruntu na ścinanie nazywamy opór, jaki stawia grunt naprężeniom stycznym w rozpatrywanym punkcie ośrodka. Po pokonaniu oporu ścinania następuje poślizg pewnej części gruntu w stosunku do pozostałej. Najstarszą i do dzisiaj stosowaną formułą określającą zjawisko ścinania gruntu jest warunek podany przez Coulomba w 1773 roku:

$$\tau_f = \sigma_n \operatorname{tg} \phi + c \quad (1)$$

w którym:

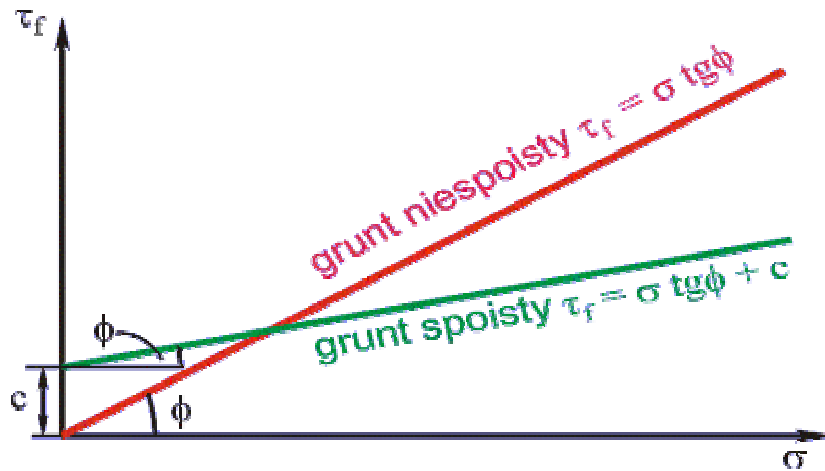
τ_f - wytrzymałość na ścinanie [kPa],

σ_n - naprężenia normalne do płaszczyzny ścinania [kPa],

ϕ - kąt tarcia wewnętrznego [°],

c - spójność [kPa].

W sensie matematycznym równanie Coulomba jest równaniem prostej nachylonej pod kątem tarcia wewnętrznego ϕ do osi odciętych i wyznaczającej na osi rzędnych wartość oporu spójności c .



Rys. 3.13 Proste Coulomba, - wytrzymałość gruntu na ścinanie [53].

Rutynowe badania laboratoryjne wytrzymałości na ścinanie wykonuje się w aparacie bezpośredniego ścinania (skrzynkowy) ABS lub w aparacie trójosiowego ściskania (trójosiowy) AT [46].

3.6.6 Badanie ścisłości.

Ścisłość gruntu oznacza jego zdolność do zmniejszenia objętości pod wpływem obciążenia. W przypadku rozdrobnionych gruntów mineralnych zmniejszanie się objętości gruntu pod wpływem obciążenia jest wynikiem zmniejszania się objętości porów wskutek wzajemnego przesuwania się ziaren i cząstek gruntu. W procesie tym następuje wyciskanie wody i powietrza wypełniających pory gruntowe. Miarą ścisłości gruntu jest moduł ścisłości gruntu, który jest w pewnym sensie odpowiednikiem modułu sprężystości ciał sprężystych, przy czym dla gruntów zależność między obciążeniem a odkształceniem wyraża się zawsze w postaci linii krzywej. Grunt nie jest ciałem sprężystym i odkształcenia zachodzące w nim pod wpływem przyłożonych obciążeń są sumą odkształceń sprężystych i trwałych, dlatego krzywa ścisłości nie pokrywa się z krzywą odprężenia [31].

Ścisłość gruntów zależy od wielu czynników. Do najważniejszych z nich można zaliczyć:

- skład granulometryczny,
- porowatość,
- wilgotność,
- skład mineralny,
- skład chemiczny,
- stopień mineralizacji wody porowej,
- teksturę.

Badanie ściśliwości gruntów przeprowadza się na próbkach o naturalnej nienaruszonej strukturze (NNS) poddanych w edometrze (rys. 4.8) jednoosiowemu ściskaniu w warunkach uniemożliwionej bocznej rozszerzalności. Parametr uzyskany w wyniku tego badania nazywa się edometrycznym modułem ściśliwości. Zależność między obciążeniem a odkształceniem jest funkcją wyższego rzędu ilustracją, której jest krzywa ściśliwości.

Obciążenie przyłożone na powierzchnię próbki powoduje odkształcenie pionowe. Najczęściej stosuje się stopniowy wzrost obciążenia. Zmiana wysokości jest wprost proporcjonalna do zmiany jej objętości.

Ściśliwość gruntu można scharakteryzować przez: krzywą ściśliwości, moduł ściśliwości oraz krzywe konsolidacji.

Wartość edometrycznego modułu ściśliwości pierwotnej M_0 [kPa] wyznacza się na podstawie wykresu ściśliwości pierwotnej, wg wzoru:

$$M_0 = \frac{\Delta\sigma_1 * h_{i-1}}{\Delta h_1} \quad (2)$$

gdzie:

$\Delta\sigma_1$ – przyrost naprężeń równy $\sigma_i - \sigma_{i-1}$, [kPa]

h_{i-1} – wysokość próbki w edometrze przed zwiększeniem naprężenia z σ_{i-1} do σ_i , [mm]

Δh_i – zmniejszenie wysokości próbki w pierścieniu edometru po zwiększeniu naprężenia o $\Delta\sigma_i$; (traktowane jako wielkość dodatnia),

$\Delta h_i = h_{i-1} - h_i$, [mm].

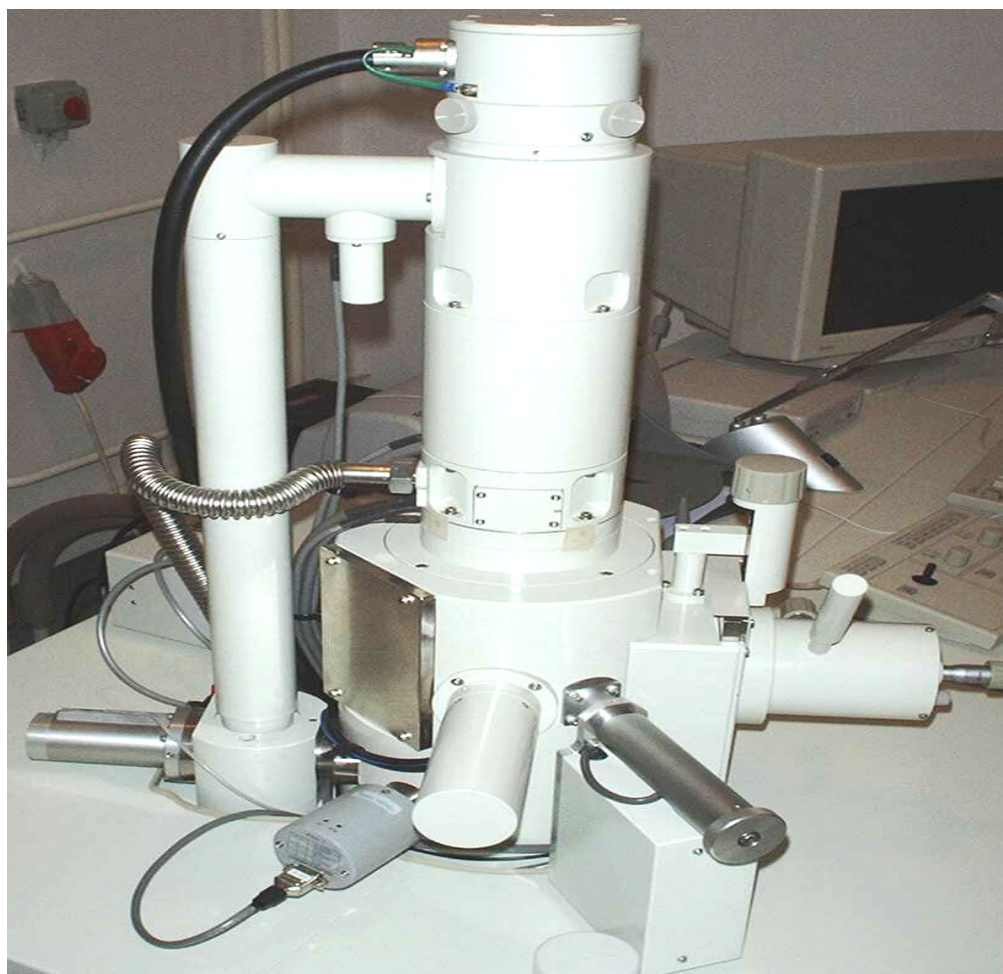
Parametry ściśliwości i konsolidacji, edometryczny moduł ściśliwości pierwotnej M_0 , współczynnik ściśliwości a_v , współczynnik konsolidacji pionowej C_v , otrzymywane są na podstawie wyników badań przeprowadzanych w edometrach [31].

3.6.7 Badania strukturalne.

Badania budowy wewnętrznej określonej mikrostrukturą i przestrzenią porową, przeprowadzane są przy wykorzystaniu elektronowych mikroskopów skaningowych [31]. Podstawowe znaczenie dla prawidłowego przeprowadzenia badania ma właściwe przygotowanie próbek. Polega to na usunięciu wody, odsłonięciu powierzchni i zaimpregnowaniu próbki bez naruszenia ich pierwotnej struktury. Próbki mogą mieć postać okruchów lub naturalnych przełamów (zdarzają się też często próbki szlifowane i polerowane w celu uzyskania niezbędnej ostrości obrazu).

Wszystkie znane metody można podzielić na bezpośrednie i pośrednie. Metoda bezpośrednia polega na umieszczeniu badanego obiektu na odpowiednio spreparowanej blonce nośnej tj. odpowiedniku szkiełka przedmiotowego w mikroskopii świetlnej i bezpośrednim obserwowaniu go pod mikroskopem [31].

Próbkę umieszcza się w mikroskopie skaningowym na stoliku obserwacyjnym tzw. holderze (rys. 3.14) Mikroskop zamyka się i po ustawieniu parametrów obserwacji (napięcie elektronów, ciśnienie, powiększenie) dokonuje się rejestracji obrazów.



Rys. 3.14 Mikroskop skaningowy typ JSM 5500 LV, ze zintegrowanym komputerem rejestrującym obraz.

Podczas badania powierzchnia próbki jest skanowana punkt po punkcie za pomocą wiązki elektronów pierwotnych emitowanych przez działło elektronowe. Emiterem jest tu włókno wolframowe, osłonięte przez cylinder Wehnelta. Następnie elektrony są przyspieszane w polu elektrycznym między katodą i anodą, i kierowane są w stronę próbki. Po drodze następuje ich ogniskowanie przez zespół soczewek elektromagnetycznych do takich rozmiarów, aby ich maksymalne rozproszenie wynosiło 2 ± 5 nm. Średnica elektronów

padających na próbkę decyduje o zdolności rozdzielczej urządzenia. System oparty jest na działaniu elektronów w próżni, aby nie zakłócać ich biegu oraz ze względu na bezpieczeństwo pracy poszczególnych detali. Przy badaniu wykorzystuje się zjawisko wstecznego odbicia elektronów od próbki oraz emisję elektronów wtórnych. Badanie odbywa się w wysokiej lub niskiej próżni przy stosowanym napięciu powierzchniowym do 20 kV. Padająca na próbkę wiązka elektronów bombardowała z prędkością zbliżoną do prędkości światła badaną powierzchnię, część z nich przechodzi przez badany obiekt, a z próbki zostają wyrzucone elektrony wtórne. Odbita z powierzchni próbki wiązka elektronów jest zbierana oraz przekazywana na fotopowielacz i wzmacniacz optyczny, przy czym zmiany napięcia regulują potencjał elektrody oscyloskopu i jasność punktu świecącego na ekranie. Dodatkowe urządzenie odchyła wiązkę elektronów tak, że przebiega ono kolejno przez wszystkie okolice powierzchni preparatu, ukształtowanie bombardowanej powierzchni znajduje odzwierciedlenie w liczbie odbitych elektronów. Powoduje to pojawienie się przestrzennego obrazu na ekranie, przy czym wypukłe miejsca próbki są jaśniejsze, a zagłębienia ciemniejsze [36].

Grubość próbki nie ma większego znaczenia, musi ona jednak być tak przygotowana, aby badana struktura powierzchniowa ulegała możliwie jak najmniejszym zmianom.

Podstawowe parametry użytego mikroskopu oraz uzyskiwanych obrazów zestawiono poniżej:

- dostępne powiększenie: od 50 ÷ 300 000 razy;
- dostępne napięcie przyspieszające: 0,3 ÷ 20 kV;
- rozdzielczość 10 nm;
- maksymalna wielkość oglądanej próbki – 100 mm średnicy, 25 mm wysokości (w przypadku stolika standardowego); 15 mm średnicy, 15 mm wysokości (w przypadku stolika mrożącego);
- zdjęcia zapisywane w pamięci komputera w postaci plików graficznych; (map bitowych - *.bmp) o wielkości 640×480 lub 1280×960 pikseli;
- na uzyskanych fotografiach mogą znaleźć się następujące dane: data lub godzina wykonania zdjęcia, typ detektora, wartość próżni (w przypadku wykonania zmiennej próżni), numer zdjęcia, napięcie przyspieszające, powiększenie, podziałka, odległość robocza;

3.7 Procesy chemiczne zachodzące w wyniku połączenia stabilizatora z wodą i gruntem mineralnym.

Przez pierwszych 10 lat stosowania metody stabilizowania prawie wyłącznie gruntów ilastych, jedynym środkiem do stabilizacji było wapno palone (CaO), ponieważ palenie powoduje powstawanie suszki a wzrost temperatury w kolumnie przyspiesza proces twardnienia.

Pomiędzy wapnem a iłem zachodzą 3 reakcje:

- 1) Wapno palone reaguje z wilgocią w gruncie ilastym, przez co tworzy się wapno gaszone. Reakcja ta jest egzotermiczna, przez co następuje dodatkowe zmniejszenie wilgotności gruntu, również w jego masie pomiędzy kolumnami. Szacuje się wzrost objętości wapna przy gaszeniu o około 50 %. Stąd przemieszcza się ono również w pory gruntu otaczającego kolumny. Wapno gaszone zwiększa wartość pH w gruncie.

Omawiana reakcja występuje niezwłocznie po wprowadzeniu wapna do gruntu. Szacuje się, że 100 g wapna palonego wiąże w reakcji ok. 32 g H₂O w ciągu pierwszych 5 ÷ 10 minut,

- 2) Następuje wymiana jonów w strukturze gruntu. Jony K⁺ i Na⁺ cząstek iłu wymieniane są na jony Ca²⁺ [4]. Jednocześnie tworzą się równoległe większe i trwalsze, nierozpuszczalne w wodzie konglomeraty poprzez koagulację. Następuje wewnętrzne „przesuszenie” poprzez redukcję warstewek wody, działającej „smarującej” pomiędzy równoległymi pasami struktury iłu. Zwiększa się wytrzymałość iłu na ściskanie i zmniejsza się jego wilgotność.

Powyższa reakcja rozpoczyna się natychmiast po wprowadzeniu wapna do gruntu i kończy się w zasadniczym zakresie w ciągu pierwszej doby, oprócz wymiany jonów, która może trwać wiele miesięcy,

- 3) Następuje reakcja chemiczna (pucolanowa), tworząca spoiwo na wzór cementowego. Łączy ono stykające się punktowo konglomeraty, stanowiące produkt reakcji drugiej. Większość gruntów zawiera wolną krzemionkę oraz krzemiany i gliniany, reagujące z wapnem. Reakcje tę ułatwia wysokie pH w wyniku reakcji pierwszej. Szacuje się długość przebiegu reakcji na kilka lat, przy czym w ciągu pierwszych kilku miesięcy następuje wzrost równoważny $\frac{2}{3}$ -cim rocznego wzrostu wytrzymałości kolumn i otaczającego gruntu [34].

Stosowanie czystego wapna palonego posiada jednak pewne ograniczenia. W warstwach piasku z uwagi na małą zawartość glinianów i wolnej krzemionki konieczne jest dodanie

cementu. Również w gruntach organicznych reakcja trzecia z samym wapnem przebiega zbyt wolno lub wcale, stąd wynika również konieczność dodania cementu. Ocenia się, że 100 g cementu wiąże ok. 25 g H₂O z gruntu [13].

Aby stabilizacja wapnem była skuteczna zawartość gliny w gruncie musi być większa niż 20 %. Zawartość łu i gliny musi przekraczać 35 %, co jest normalne, gdy wskaźnik plastyczności gruntu jest większy niż 10.

Wysoka temperatura gruntu i wysoki wskaźnik $\text{pH} \geq 12$ przyspieszają reakcje chemiczne, podczas gdy rozpuszczalność krzemianów i glinianów wzrasta wraz ze wzrostem temperatury i wskaźnika pH. Wymiana kationów jest mała, gdy $\text{pH} < 7$.

Dla nieorganicznych łąw o średniej lub małej plastyczności, maksymalny wzrost wytrzymałości na ściskanie jest zwykle otrzymany przy zawartości wapna 6 ÷ 8 % w stosunku do masy suchego gruntu. Odpowiada to 12 ÷ 16 kg wapna na 1 m długości kolumny o średnicy 0,5 m przy początkowej zawartości wody w gruncie ok. 70 %. Teoretyczna, optymalna zawartość wapna wynosi około 3 %. Optymalna zawartość wapna wzrasta wraz ze wzrostem zawartości wody w gruncie. Jeśli optymalne zawartości wody zostaną przekroczone wytrzymałość na ściskanie stabilizowanego gruntu jest stała lub zaczyna spadać [13].

W ogólnym przypadku wzrost wytrzymałości na ściskanie jest mały, kiedy stopień aktywności łu jest duży. Efektywność cementu generalnie maleje ze wzrostem zawartości łu i wskaźnika plastyczności. Przyrost wytrzymałości będzie umiarkowany do małego, gdy grunt jest organiczny.

Szybkość reakcji chemicznych może być większa przez dodanie półnawodnionego gipsu (CaSO₄*0,5H₂O) lub całkowicie nawodnionego (CaSO₄*2H₂O), zwłaszcza w gruntach organicznych. Zwykle dodaje się 15 kg gipsu na 1 m długości kolumny (3 ÷ 10 % masy suchego gruntu). Takie mieszanki uwodnionego gipsu i palonego wapna przyspieszają poprawę gruntu aż do końca pierwszego okresu reakcji tj. 7 ÷ 10 dni. Jeśli zastosuje się mieszanekę gipsu w stanie całkowicie uwodnionym i wapno palone w proporcji 75 x 25, otrzymamy etteringit (3CaO*Al₂O₃*3CaSO₄*32H₂O-uwolniony trójsiarczanoglinian wapniowy), związek o właściwościach wiążących bardzo szybko wykryształizowujący się z roztworu. Tworzony się głównie przez reakcje z łąmi. Etteringit ma strukturę krystaliczną z długimi igłami przypadkowo zorientowanymi i ma on duży wpływ na wzrost wytrzymałości na ściskanie stabilizowanego gruntu. Formowanie się etteringitu powoduje wzrost objętości o ok. 3 %. Niektórzy autorzy wspominają o tym w celu udowodnienia, że kolumny powodują zagęszczenie gruntu poprawiając w ten sposób nośność samych kolumn. Nie jest to jednak hipoteza sprawdzona do końca [34].

Z wykorzystaniem gipsu istnieje również pewne ryzyko pogorszenia się nośności pali betonowych lub konstrukcji betonowych znajdujących się w sąsiedztwie ustabilizowanego gruntu.

Mitchell w 1986 roku stwierdził spadek nośności i wytrzymałości chodników skonstruowanych na ekspansywnych gruntach (pęczniejących) z dodatkiem niegaszonego wapna. Początkowo chodniki zachowywały się właściwie, ale po ok. 2 latach zaczęły ulegać deformacji. Pogorszenie to przypisano siarczanowi sodu (NaSO_4) i gipsowi (Ca SO_4), obecnym w gruncie. Wskaźnik pH wynosił mniej, niż 12 co spowodowało spadek nasilenia reakcji pucolanowych [34].

Kiedy formuje się ettringit następują dwie zmiany objętości i spadek wytrzymałości na ścinanie oraz nośności gruntu. Innym niepożądanym efektem przy zastosowaniu wapna jest formowanie się węglanów. Wapno reaguje z dwutlenkiem węgla (CO_2) z powietrza lub wód gruntowych. Dzieje się tak dlatego, że wytrzymałość na ścinanie węglanów wapnia jest relatywnie mała. Nasycenie dwutlenkiem węgla zwalnia również reakcje pucolanową w gruncie.

3.8 Charakterystyka zastosowanych stabilizatorów.

3.8.1 Popiół lotny.

Odpady paleniskowe powstające w elektrowniach i elektrociepłowniach opalanych węglem kamiennym i brunatnym, składają się głównie z popiołów lotnych i żużla. Popioły lotne powstają ze spalania zmielonego węgla w paleniskach bezrusztowych. Przeciętna temperatura spalania w Polsce waha się w granicach $1000^\circ \div 1100^\circ \text{C}$. Popioły są wychwytywane ze strumienia spalin, w drodze z paleniska do komina [5], [57].

Popiołami lotnymi nazywa się tę część odpadów, w których zawartość ziaren mineralnych mniejszych od 0,075 mm jest w przewadze, tzn. powyżej 50 % [63].

Charakter i właściwości popiołu zależą przede wszystkim od składu chemicznego substancji niepalnej zawartej w węglu. Właściwości zależą również od rodzaju paleniska, stopnia rozdrobnienia, temperatury spalania oraz rodzaju urządzeń do wychwytywania popiołów ze spalin. We wszystkich rodzajach popiołów lotnych podstawowymi składnikami chemicznymi są tlenki: krzemu, glinu, żelaza, wapnia, magnezu, sodu, potasu, oraz nie spalony węgiel. Główne składniki popiołu SiO_2 , Al_2O_3 są przede wszystkim komponentami fazy szklistej popiołu. [57] W związku z dużym zróżnicowaniem właściwości chemicznych popiołów lotnych pojawiła się konieczność wprowadzenia ogólnej ich klasyfikacji, ze względu na ich skład chemiczny.

Tablica 3.8 Podział popiołów lotnych na kategorie w zależności od składu chemicznego [63].

Rodzaj popiołu	Symbol	Zawartość [%]			
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	SO ₃
Krzemianowy	K	> 40	< 30	≤ 10	< 4
Glinowy	G	> 40	≥ 30	≤ 10	< 4
Wapniowy	W	> 40	< 30	> 10	≥ 3

Tablica 3.9 Podział popiołów lotnych na kategorie w zależności od składu chemicznego według Europejskiej Komisji Gospodarczej ECE [57].

Kategoria podziału	Zawartość [SiO ₂][Al ₂ O ₃]	Zawartość [CaO]	Zawartość [SO ₃]
Grupa I	≥ 2	< 15%	-
Grupa II	< 2	< 15%	< 3%
Grupa III	-	> 15%	> 3%
Grupa IV	-	> 15%	< 3%

Popioły lotne można także podzielić na dwie grupy w zależności od zawartości tlenku wapnia CaO. Niskowapniowy popiół lotny składa się przede wszystkim ze szkliwa glinokrzemianowego; z faz krystalicznych w trakcie chłodzenia krystalizuje silimanit, mulit i kwarc. Tlenki żelaza występują w postaci hematytu lub magnetytu. Uważa się, że wysoka zawartość faz krystalicznych w tego rodzaju popiołu obniża jego aktywność pucolanową. Wysokowapniowy popiół lotny ma bardziej złożony skład mineralny, a faza szklista ma inny skład chemiczny w porównaniu z popiołem niskowapniowym. Podstawowymi składnikami krystalicznymi wapniowych popiołów lotnych są: kwarc, wolny CaO, anhydryt, glinian trójwapniowy, siarczano-glinian, czterowapniowy. Są to składniki reaktywne w stosunku do wody i nadają popiołom właściwości wiążące.

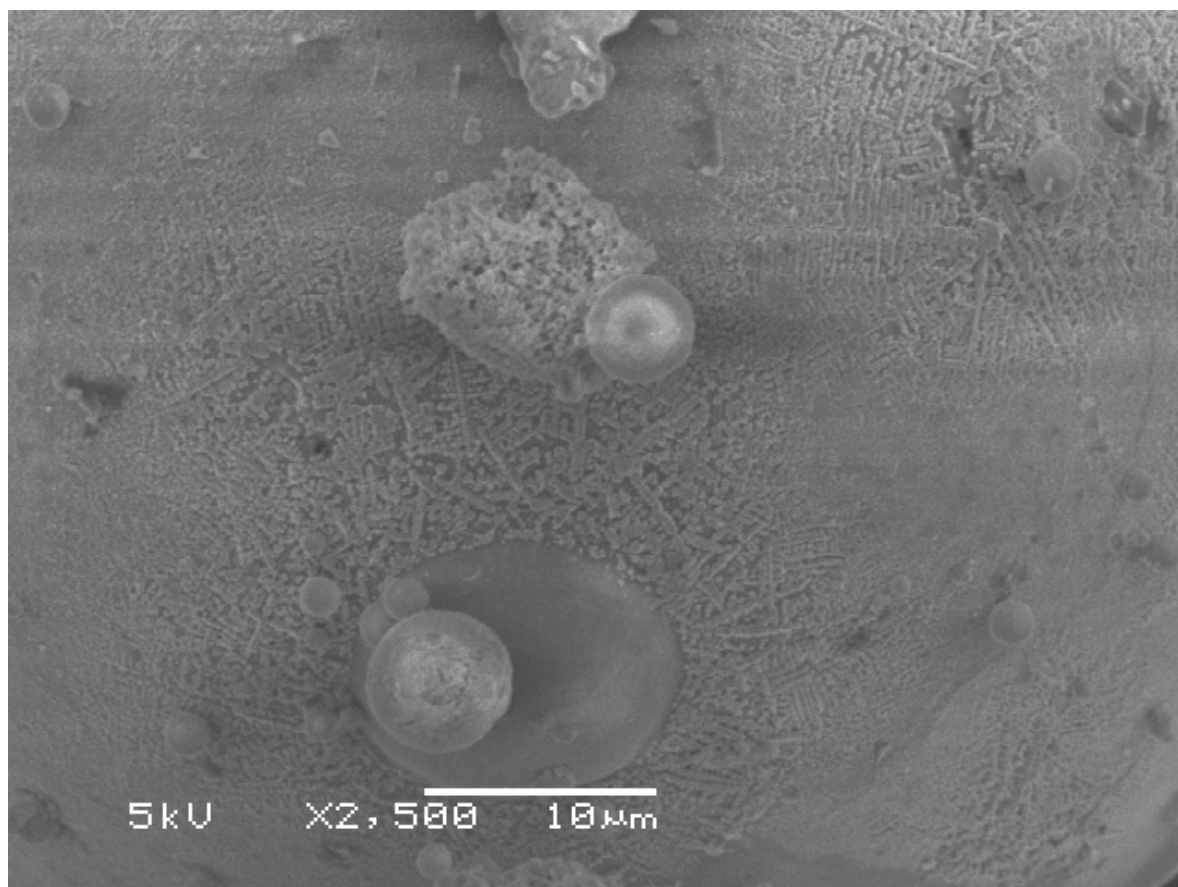
Skład chemiczny popiołu elektrowni „Dolna Odra” [33].

SiO ₂	51 ÷ 55 %,
Al ₂ O ₃	25 ÷ 29 %,
Fe ₂ O ₃	6,7 ÷ 7,4 %,
CaO	2,7 ÷ 3,6 %,
CaO wolne	0,06 ÷ 0,4 %,
MgO	2,2 ÷ 2,9 %,
SO ₃	0,3 ÷ 0,6 %,
K ₂ O	2,7 ÷ 3,2 %,
Na ₂ O	0,9 ÷ 1,3 %
NH ₃	0,012 ÷ 0,020 %,
Cr, Ni, Pb, Cd, Zn,	0,00069 ÷ 0,031 %,
Jony Cl	0,001 ÷ 0,01 %

Jak wynika ze składu chemicznego popiołów z elektrowni „Dolna Odra” można zaliczyć do popiołów krzemionkowych, a według podziału ECE do I Grupy. Do Grupy I można zaliczyć prawie wszystkie popioły powstające w Polsce z węgla kamiennego [33].

3.8.2 Cechy fizyczne.

Pod względem geotechnicznym popioły lotne sklasyfikowane są jako pyły lub pyły piaszczyste o ciemnoszarej barwie [41]. Wilgotność popiołów zależy od ich porowatości i sposobu składowania i zawiera się w granicach od 0 ÷ 100 %, gęstość właściwa ρ_s wynosi 1.59 ÷ 2.74 g/cm³, gęstość objętościowa szkieletu na mokrych składowiskach 0,6 ÷ 1,2 g/cm³. Cząstki popiołu mają zwykle kształt kulisty, powierzchnie cząstek są na ogół zeszkliwione lub szkliste, wewnątrz puste wypełnione mieszaniną gazów tak zwane cenosfery. Kulisty kształt ziaren powoduje, że woda stosunkowo szybko przepływa przez popioły pomimo drobnego uziarnienia. Popioły są kilkakrotnie bardziej przepuszczalne niż grunty naturalne o tym samym uziarnieniu. Współczynnik wodoprzepuszczalności popiołów w przybliżeniu wynosi $2 \cdot 10^{-6}$ m/s [33].



Rys. 3.15 Zdjęcie mikroskopowe ziaren popiołu, wykonane mikroskopem JSM 5500 LV w Katedrze Inżynierii Materiałowej Politechniki Koszalińskiej.

3.8.3 Właściwości wiążące popiołów.

Popioły lotne wykazują właściwości pucolanowe tzn. w obecności wody i temperatury dodatniej wchodzi w reakcję z wodorotlenkiem wapnia, dając stały związek chemiczny o właściwościach wiążących. Właściwość ta spowodowana jest obecnością czynnej chemicznie, bezpostaciowej krzemionki. *(Słowo pucolanowy pochodzi od nazwy włoskiej miejscowości Pozzuoli, gdzie podobno starożytni Rzymianie pierwszy raz zmieszali rozdrobniony kamień wapienny z pyłem wulkanicznym. Uzyskane w ten prosty sposób spoiwo służyło do wytwarzania zapraw murarskich oraz prymitywnych mieszanek betonowych potrzebnych do budowy np. Rzymu.)*

Opierając się na analizie wyników prac [25] lub [55], stwierdzono, że reakcja pucolanowa popiołu rozpoczyna się od absorpcji wodorotlenku wapniowego na powierzchni ziaren popiołu lotnego, uwolnionego podczas hydratacji cementu. Związek ten tworzy na ziarnach popiołu rodzaj otoczki, przy czym otoczka ta nie kontaktuje się jednak z ziarnem popiołu w sposób bezpośredni. Stwierdzono istnienie pomiędzy ziarnem popiołu a otoczką $\text{Ca}(\text{OH})_2$ granicznej warstwy wodnej grubości $0.5 \div 1$ mikrometra. W warstwie tej wytrącają się produkty reakcji pomiędzy składnikami ziaren popiołu a przechodzącymi przez tę warstwę z otoczki $\text{Ca}(\text{OH})_2$ jonami wapniowymi. Pierwszymi produktami reakcji pucolanowej są uwodnione siarczano-gliniany, a następnie uwodnione krzemiany i gliniany wapniowe. Efektem wypełniania granicznej warstwy produktami reakcji pucolanowej jest wzmocnienie więzi pomiędzy produktami hydratacji cementu a popiołem, co powoduje z kolei wzrost wytrzymałości. [5], [37].

Reakcję pucolanową można schematycznie przedstawić następująco;

Krzemionka, glin + wapno + woda --- uwodnione krzemiany wapnia, uwodnione gliniany.

Inną teorię wiązania i twardnienia spoiwa bezcementowego przedstawił Marcinkowski [55] zgodnie z teorią A. Bajkowa.

W procesie tym można wyróżnić trzy fazy:

1. pod wpływem działania wody wapiennej, następuje rozkład aktywnych minerałów popiołu lotnego,
2. następnie tworzą się nowe, uwodnione połączenia, które przechodzą w postać mikrokrystaliczną, z chwilą tworzenia się załączków krystalicznych wodorotlenku wapnia (powstaje faza żelowa, krzemianowa),
3. tworzą się połączenia grup krystalicznych, charakterystycznych dla procesu twardnienia. Jednocześnie Marcinkowski stwierdza korzystny wpływ obróbki termalnej na cechy wytrzymałościowe spoiwa bezcementowego [55].

3.8.4 Niektóre zastosowanie popiołu.

Odpady paleniskowe wykorzystywane są do wytwarzania materiałów i wyrobów budowlanych, budowy nasypów i podbudów drogowych, rekultywacji, makroniwelacji, mas bitumicznych (jako wypełniacz), do stabilizacji gruntów (jako wypełnienie lub jako samodzielne spoiwo) oraz wypełniania wyrobisk górniczych. Popioły lotne wykorzystywane są także do budowy kompozytów betonowych. Na Wydziale Budownictwa i Inżynierii Środowiska w Politechnice Koszalińskiej już w latach 70 – tych Marcinkowski [37] prowadził badania określające zależność podstawowych cech spoiwa pyłowo-wapienno-gipsowego od aktywności puculanowej popiołów lotnych, pochodzących z węgla kamiennego. Z odpadów paleniskowych wykonuje się też obwałowania mokrych składowisk odpadów. Charakterystyki użytkowe popiołu lotnego mogą być znacznie poprawione przez zmieszanie popiołu z cementem. Stabilizowany popiół jest dobrym substytutem w podłożach pod konstrukcje dróg. W Politechnice Gdańskiej Judycki, Alenowicz, Strugała, Cyske [37], opracowali technologię zastosowania do budowy dróg popiołów lotnych powstających w procesie spalania węgla. Autorzy zastosowali także pyły lotne do budowy nasypów. Natomiast Wysokiński z Instytutu Techniki Budowlanej w Warszawie oraz Goszcz [37] zalecają zastosowanie popiołów jako materiał do podsadzania wyrobisk kopalnianych. Nie jest to pomysł nowy gdyż już w 1989 r. Piecuch i Janus, zaproponowali w ofercie realizacji pracy badawczo-projektowo-wdrożeniowej dla Zakładów Chemicznych POLICE, zastosowanie popiołów lotnych razem z fosfogipsami, jako materiał do podsadzki hydraulicznej [43].

Zwraca się jednak uwagę na to, że wtórny odpad pochodzący z procesu termicznej destrukcji paliw np. odpadów organicznych – jakim jest proces pirolizy, zmniejsza wyraźnie wytrzymałość na ściskanie stabilizowanego gruntu w przypadku wprowadzenia takiego, odpadu do mieszanki jako jej komponentu [38], [42].

3.8.5 Cement

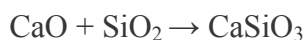
Cement jest to spoiwo hydrauliczne, tj. drobno zmielony materiał nieorganiczny, który po zmieszaniu z wodą daje zaczyn, wiążący i twardniejący w wyniku reakcji i procesów hydratacji, który po stwardnieniu pozostaje wytrzymały i trwały pod wodą.

Jeden z etapów wiązania cementu portlandzkiego zachodzi wg wzoru:



Cement uzyskuje się przez wypalenie odpowiednio dobranej mieszaniny wapienia i gliny oraz zmielonego klinkieru z dodatkiem gipsu jako regulatora czasu wiązania. Reakcja

heterogeniczna pomiędzy dwoma lub kilkoma substancjami stałymi zachodzi w drodze łączenia się (syntezy) substancji wyjściowych.



Im drobniej zmielony jest cement, tym jest wytrzymalszy i szybciej wiąże. Wyróżniamy dwa rodzaje cementów, portlandzkie i hutnicze. Cement hutniczy nadaje się w szczególności do wyrobu elementów prefabrykowanych poddawanych przyspieszonemu dojrzewaniu pod działaniem pary. Podstawowymi składnikami są: CaO, SiO₂, Al₂O₃ i Fe₂O₃. Cement hutniczy ma właściwości hydrauliczne i pucolanowe. Właściwości hydrauliczne polegają na zdolności wiązania i twardnienia po zarobieniu wodą z wytworzeniem hydratów, odpornych na działanie środowiska wodnego. Właściwości pucolanowe wykazują materiały mające zdolność wiązania wapna w obecności wody, z wytworzeniem związków hydraulicznych. Po zmieszaniu cementu z wodą tworzy się plastyczny zaczyn, który zaczyna stopniowo gęstnieć i tracić podatność na formowanie. Ten okres zmian zachodzących w zaczynie cementowym nazywamy wiązaniem. Dalsze twardnienie cementu po okresie wiązania powoduje wzrost wytrzymałości [11].

Cement zgodny z EN 197-1, nazywamy cementem CEM, odpowiednio dozowany i zmieszany z kruszywem i wodą, powinien tworzyć beton lub zaprawę, które wystarczająco długo zachowują urabialność i po określonym czasie powinny uzyskać ustalony poziom wytrzymałości, jak i również powinny zachować długotrwałą stałość objętości.

Cement hutniczy CEM III/A uzyskuje się poprzez wspólny przemiał klinkieru portlandzkiego, granulowanego żużla wielkopiecowego i regulatora czasu wiązania (anhydryt lub gips).

Cement hutniczy CEM III/A o zawartości klinkieru od 20 ÷ 34 % oraz żużla wielkopiecowego od 66 ÷ 80 %. Ponadto charakteryzuje się on niską zawartością alkaliów (max. do 2 %), wolniejszym procesem wiązania i twardnienia, opóźnionym początkiem i końcem wiązania. Do jego zalet zaliczyć można również większą odporność na środowiska agresywne.

Tablica 3.10 Skład chemiczny cementu hutniczego CEM III/A 32,5 [45].

Skład chemiczny	Nazwa	Wymagania PN-B-19701 (%)	Osiągane średnie wartości (%)
Straty prażenia	-	max. 5,00	1,02
Części nierozpuszczalne	-	max. 5,00	1,40
CaO	tlenek wapnia	-	54,10
SiO ₂	krzemionka	-	31,0
Al ₂ O ₃	tlenek glinu	-	5,10
Fe ₂ O ₃	tlenek żelaza	-	1,70
MgO	tlenek magnezu	-	3,0
SO ₃	trójtlenek siarki	max. 4,0	3,0
Alkalia (jako Na ₂ O)	tlenek sodu	max. 2	0,7

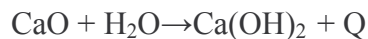
Stosowanie cementów hutniczych zapewnia:

- Stabilne przyrosty wytrzymałości w długich okresach dojrzewania betonu (nawet po kilku latach),
- Niskie ciepło hydratacji (poniżej 270 J/g po 7 dniach twardnienia), w praktyce wyklucza powstanie rys skurczowych i spękań w trakcie procesu wiązania i twardnienia,
- Wolne czasy wiązania (początek po 150 minutach; koniec po 240 ÷ 280 minutach),
- Uzyskanie stałej objętości,
- Wysoką mrozoodporność,
- Dobrą urabialność mieszanki betonowej i zachowanie właściwości roboczych w długim okresie czasu,
- Niską zawartość związków alkaicznych pozwalających na stosowanie produkcji betonu nawet kruszyw reaktywnych,
- Zmniejszoną tendencję do wykwitów węglanowych,

Cement hutniczy CEM III/A 32,5 NA jest bardzo dobrym spoiwem do wykonywania wszelakich konstrukcji betonowych narażonych na agresję chemiczną i ciągle przebywanie w środowisku wodnym, np.: oczyszczalnie ścieków, budownictwo hydrotechniczne i morskie, roboty i prace budowlane, w górnictwie roboty fundamentowe.

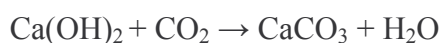
3.8.6 Wapno hydratyzowane.

Wapno hydratyzowane inaczej suchogaszone [39] jest sproszkowanym wodorotlenkiem wapnia Ca(OH)_2 powstałym w wyniku gaszenia tlenku wapnia małą ilością wody. Reakcja gaszenia przebiega wg wzoru;



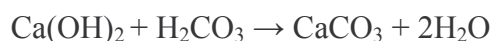
Wapno hydratyzowane z piaskiem lub innymi wypełniaczami drobnoziarnistymi tworzy zaprawy budowlane które wiążą i twardnieją na powietrzu. Proces ten polega na :

- utracie wody,
- wydzieleniu kryształków wodorotlenku wapnia z przesyconych roztworów wodnych,
- działaniu dwutlenku węgla z powietrza, zgodnie z reakcją:



Proces wiązania zachodzi kilka godzin, proces twardnienia zachodzi powoli i przez długi czas. Rezultatem procesów chemicznych przebiegających w zaprawie wapiennej jest powstanie kryształków Ca(OH)_2 i CaCO_3 , które łączą się ze sobą i ziarnami wypełniacza, przybierając cechy sztucznego kamienia.

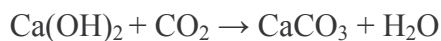
Wiązanie zaprawy wapiennej zachodzi wg wzoru:



Stabilizacja gruntów wapnem polega na wywołaniu w gruncie dwóch procesów; krystalizacji Ca(OH)_2 i karbonizacji wodorotlenku wapnia przy równoczesnych reakcjach wymiennych powodujących powstanie $\text{Ca*SiO}_2*\text{nH}_2\text{O}$, co daje w efekcie wzmocnienie gruntu [34].

Proces karbonatyzacji polega na łączeniu się zaczynu cementowego z CO_2 z powietrza, zwłaszcza w środowisku wilgotnym z upływem czasu.

Proces karbonatyzacji zachodzi według wzoru:



Proces karbonatyzacji jest powolny, można przyjmować, że w ciągu roku ulega karbonatyzacji warstewka betonu o grubości $0.5 \div 1$ mm. W wyniku karbonatyzacji zmienia się szereg właściwości betonu, m.in. zmniejsza się zdolność ochrony antykorozyjnej wobec stali zbrojeniowej a zwiększa się jego wytrzymałość mechaniczna [11].

Proces wiązania wapna hydratyzowanego z piaskiem został przedstawiony dla lepszego zrozumienia procesu stabilizacji gruntów organicznych. W niniejszej pracy nie użyto wapna jako środka wiążącego, lecz należy podkreślić fakt powszechnego zastosowania wapna do stabilizacji gruntów słabych.

4.0 Metodyka i program badań.

4.1 Poszukiwanie gruntów do badań.

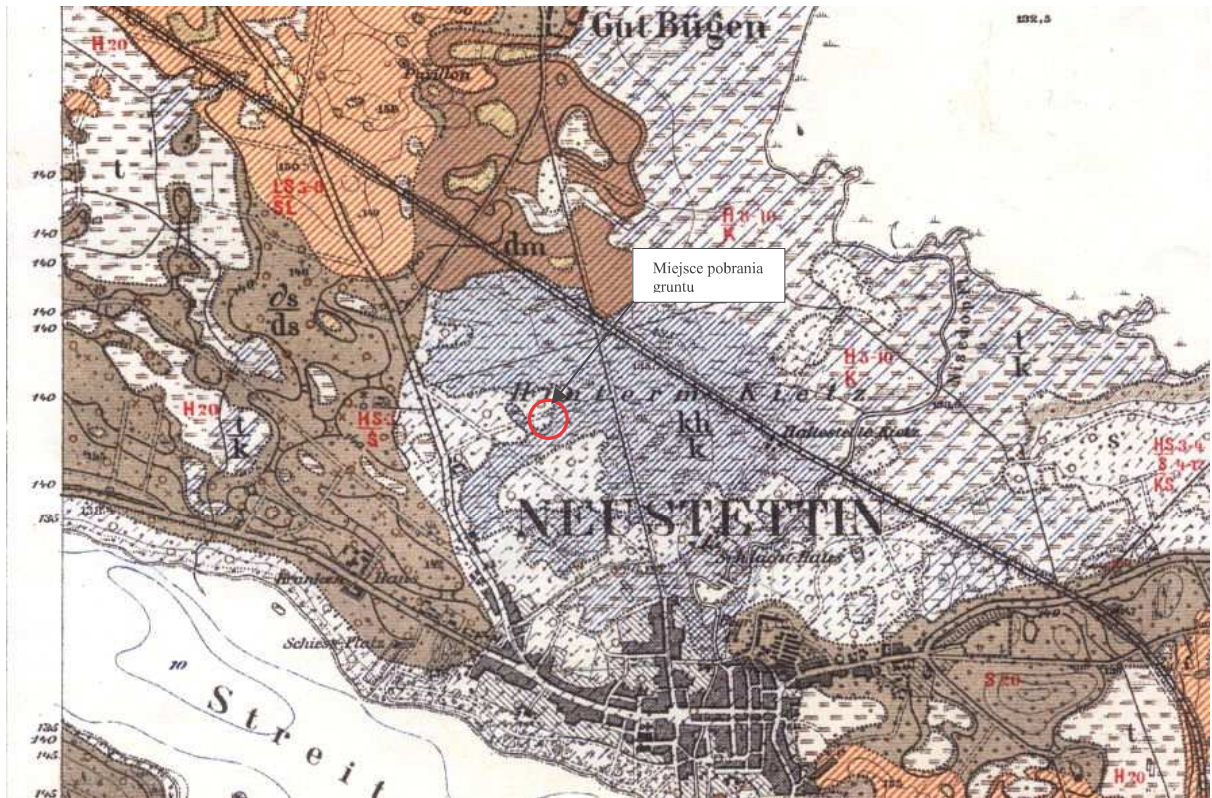
Badania rozpoznawcze przeprowadzono w rejonie Koszalina i Szczecinka. Polegały one na analizie materiałów archiwalnych, wstępnym wytypowaniu obszarów występowania charakterystycznych gruntów organicznych, wizji lokalnej w terenie, wytypowaniu miejsc pobrania próbek oraz pobrania próbek o strukturze nienaruszonej NNS do badań laboratoryjnych.

W pierwszym etapie, przeprowadzono analizę niemieckich map geologicznych (rys. 4.1 i rys. 4.3) i wytypowano obszary, gdzie występują grunty organiczne. Na rysunkach (rys. 4.2 i rys. 4.4) przedstawiono przypowierzchniową budowę geologiczną omawianego obszaru oraz pierwotną rzeźbę terenu. Dane te zaczerpnięto z map geologicznych pochodzących z przełomu XIX i XX wieku, pn „Geologische Karte von Preußen und benachbarten Bundesstaaten” arkusz Köslin (Koszalin) [66] i Neustettin (Szczecinek), w skali 1 : 25000 [67].

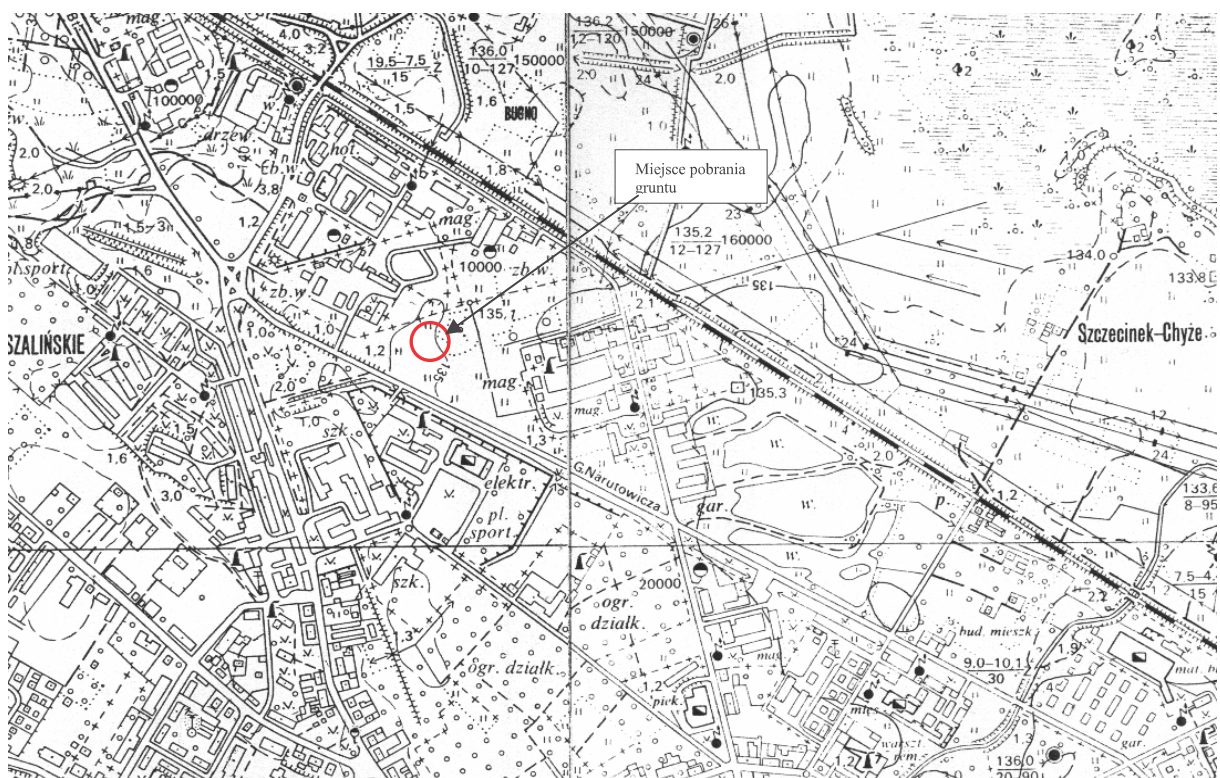
Następnie określono miejsca oraz głębokość zalegania tych gruntów. Po przeprowadzeniu wizji lokalnej, wykonano wiercenia pozwalające określić miąższość złożeń, co umożliwiło weryfikację wcześniejszych ustaleń opartych na dostępnych materiałach archiwalnych. Miejsce pobrania torfu i namułu zostało wyznaczone na obszarze zakola pradoliny rzeki Dzierżęcinki w okolicy ul. 4-ego Marca w Koszalinie. W podłożu występują grunty akumulacji bagienny-rzecznej, takie jak torfy, namuły, o łącznej miąższości do 6 ÷ 7 metrów poniżej powierzchni terenu.

Miejsce pobrania kredy jeziornej zostało znalezione w miejscowości Szczecinek pomiędzy drogą krajową Koszalin - Poznań a linią kolejową. Lokalizację pobrania próbek gruntów przedstawiono na wycinkach map topograficznych w skali 1 : 10000 rys. 4.2 i rys 4.4. [64], [65]

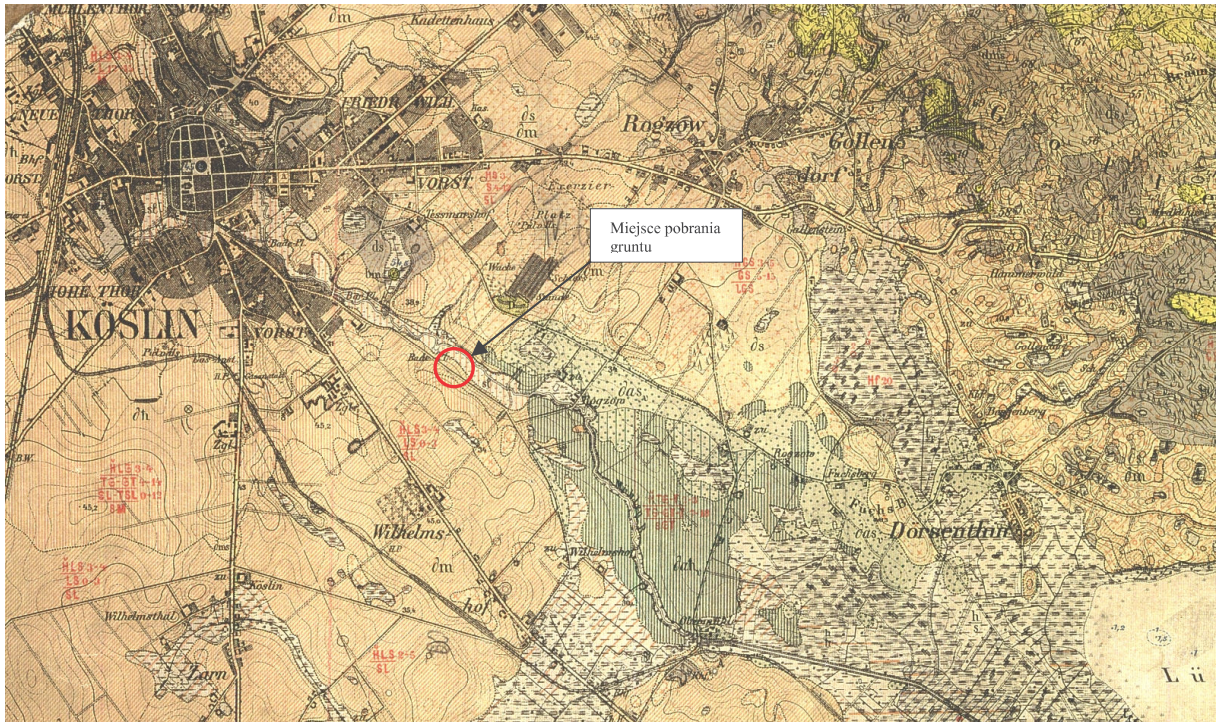
W drugim etapie wykonano wiercenia, a wydobyty urobek poddawano na bieżąco badaniom makroskopowym. Następnie pobrano próbki NNS z tej samej głębokości z kilku miejsc oddalonych od siebie nie więcej niż 2 m. Próbkę pobierano każdorazowo z dna otworu wiertniczego próbnikiem rdzeniowym typu van der Horstta firmy Eijkelkamp o średnicy 67 mm i długości 600 mm.



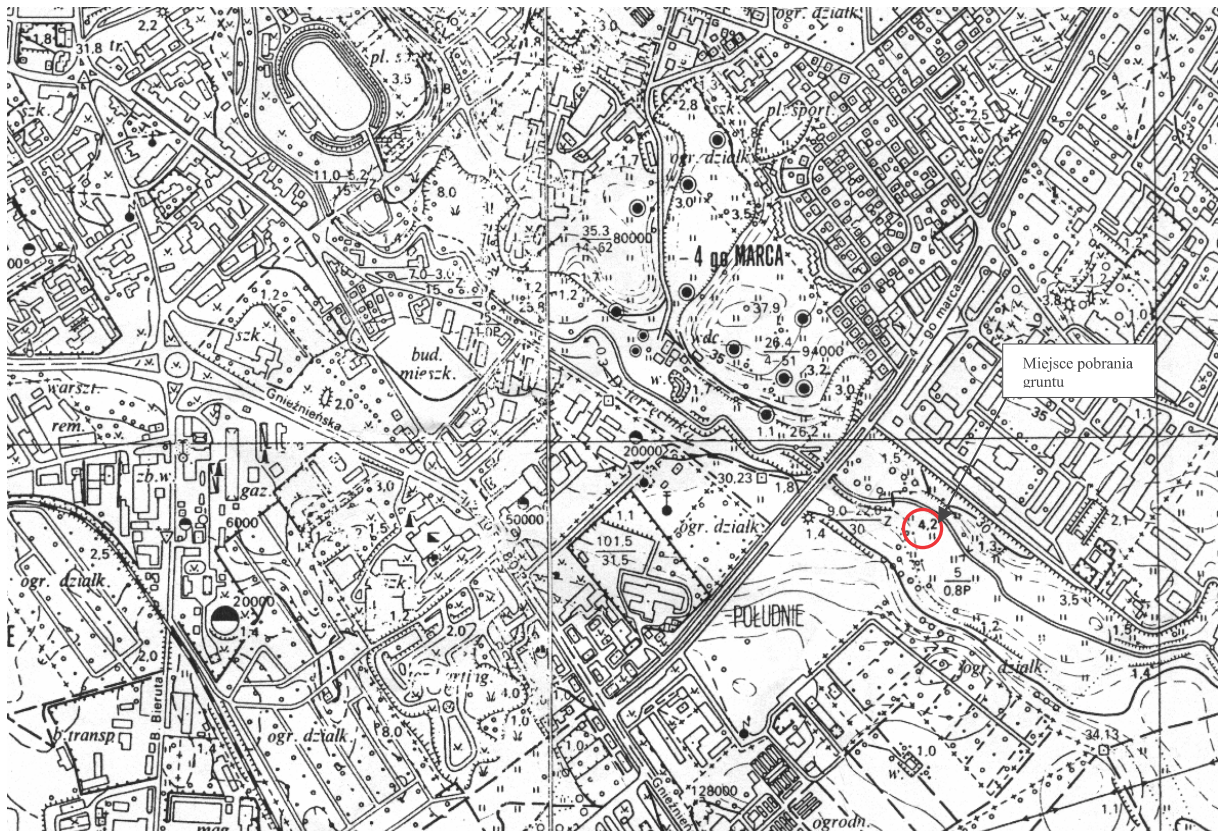
Rys. 4.1 Lokalizacja miejsca pobrania prób gruntu. Arkusz Neustettin, skala 1 : 25000. [67]



Rys. 4.2 Lokalizacja miejsca pobrania prób gruntu. Mapa topograficzna, arkusz Szczecinek, skala 1 : 10000. [65]



Rys. 4.3 Lokalizacja miejsca pobrania prób gruntu. Arkusz Köslin, skala 1 : 25000. [66]



Rys. 4.4 Lokalizacja miejsca pobrania prób gruntu. Mapa topograficzna, arkusz Koszalin, skala 1 : 10000. [64]

4.2 Badania laboratoryjne.

Pobrane próbki gruntów organicznych poddano następującym badaniom:

- ocenie makroskopowej,
- właściwości fizycznych (wilgotność, gęstość objętościową),
- badania litologii (zawartość substancji organicznej – oznaczoną metodą prażenia w dwóch temperaturach spalania 550 i 650 °C),
- badania wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie,
- badania ścisłości (edometryczny moduł ścisłości pierwotnej),
- badania derywatograficzne,
- badania pod mikroskopem elektronowym.

Właściwości fizyczne

Badanie właściwości fizycznych, (tj. wilgotność, gęstość objętościową oraz zawartość części organicznych) przeprowadzono standardowymi metodami zalecanymi w normie PN-88/B-04481, które omówiono w punkcie 3.6.3. Podstawowe właściwości fizyczne badanych gruntów obliczono wykorzystując wzory normowe. [60] Jako ostateczne wyniki badań właściwości fizycznych przyjęto wartości średnie z czterech uzyskanych wyników. Wartości poszczególnych cech fizycznych nie różniły się od średniej wartości nie więcej niż o 10%. Uzyskane wyniki przedstawiono w tablicy 4.1.

- *Torf - burzy intensywnie, krótko – grunt wapnisty (3% do 5%) klasa III*
- *Namuł gliniasty - burzy intensywnie i długo – grunt silnie wapnisty (>5%) klasa IV*
- *Kreda jeziorna - burzy intensywnie i długo – grunt silnie wapnisty (>5%) klasa IV*

Tablica 4.1 Zestawienie podstawowych cech fizycznych gruntów organicznych zakwalifikowanych do badań stabilizacji.

Rodzaj gruntu	Barwa	Wilgotność [%]	Gęstość objętościowa [g/cm ³]	Klasa zawartości węglanów	Zawartość części organicznych I _{om} [%] w temp. 550 °C	Zawartość części organicznych I _{om} [%] w temp. 650 °C
Torf	czarna	484 ÷ 581 w _{śr} = 531	1,08 ÷ 1,15 ρ _{śr} = 1,1	III	57,7 ÷ 69,5 I _{om} _{śr} = 64,6	58,7 ÷ 69,5 I _{om} _{śr} = 64,7
Namuł gliniasty	brunatna	151 ÷ 176 w _{śr} = 164	1,32 ÷ 1,49 ρ _{śr} = 1,4	IV	19,1 ÷ 21,2 I _{om} _{śr} = 20,1	19,1 ÷ 21,2 I _{om} _{śr} = 20,1
Kreda jeziorna	jasnoszara	78 ÷ 93 w _{śr} = 86	1,41 ÷ 1,58 ρ _{śr} = 1,5	IV	2,4 ÷ 3,0 I _{om} _{śr} = 2,7	8,1 ÷ 8,9 I _{om} _{śr} = 8,4

4.3 Podstawy własnej metodyki badań.

Brak jednolitej procedury badań gruntów organicznych, wzmocnianych mieszanką stabilizującą, doświadczenia prowadzone niezależnie w różnych krajach oraz badania pilotowe stały się podstawą do przyjęcia racjonalnej procedury badań własnych. Jak wynika z literatury kształt, wielkość badanych próbek, ilość oraz rodzaj stabilizatora, proporcje poszczególnych składników stabilizatora, czas mieszania stabilizatora z gruntem, warunki przechowywania gruntu wzmocnionego, obciążenie w trakcie dojrzewania próbki, czas dojrzewania, różnorodne metodyki badań oraz stosowane urządzenia do badania cech mechanicznych, mają istotny wpływ na wyniki wytrzymałości i ściśliwości gruntów wzmocnionych. Należy zwrócić uwagę, że wszyscy wcześniej cytowani autorzy, jednoznacznie stwierdzili fakt ogromnej różnorodności poszczególnych gruntów organicznych. Podkreślają, iż nie należy sugerować się otrzymanymi wynikami wzrostu wytrzymałości, mimo złudnie podobnych podstawowych cech fizycznych gruntów podlegających stabilizacji. Nalegają, aby prowadzić badania dla gruntów z określonego rejonu, gdyż grunty te, a w szczególności grunty organiczne mimo podobnych podstawowych cech fizycznych różnią się między sobą genezą, strukturą i składem mineralnym, co w konsekwencji prowadzi do różnych efektów stabilizacji.

Po przeprowadzeniu analizy wyników badań prowadzonych zwłaszcza w krajach skandynawskich, a w szczególności wobec braku ujednoczenia metodyki tych badań, zdecydowano się na wybranie i wypracowanie własnej metodyki badań gruntów organicznych.

Głównym kryterium prowadzonych badań w niniejszej pracy było określenie zmiany wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie oraz określenie zmian edometrycznych modułów ściśliwości w zależności od rodzaju i ilości stabilizatora. Do badań zakwalifikowano trzy rodzaje gruntów o różnej zawartości części organicznych pobrane z okolic Koszalina i Szczecinka. Badania zostały zaplanowane w taki sposób, aby przy przyjęciu różnych proporcji poszczególnych składników i ilości stabilizatora można było uzyskać racjonalne, a zarazem skuteczne ulepszenie badanych gruntów. Grunty stabilizowano mieszaniną cementu i popiołu lotnego. Ilości spoiwa oraz proporcje składników dobrano na podstawie badań pilotowych [16].

4.4 Sposób przygotowania próbek.

Badaniom wzmocnienia poddano trzy grunty o różnej zawartości części organicznych Torf, Namuł gliniasty i Kredę jeziorną. W celu uzyskania jednorodnych próbek gruntu,

z masy gruntowej usunięto widoczne zanieczyszczenia (kawałki drewna, korzenie, trzcinę, itp.), a następnie grunt wymieszano. Grunty ze stabilizatorem mieszano ręcznie przez dwie minuty. Czas ten zapewniał równomierne zmieszanie stabilizatora z gruntem. Co więcej ręczne mieszanie gruntu ze stabilizatorem nie powodowało niszczenia struktury gruntu. Homogeniczna, masę ulepszanego gruntu układano do plastikowych tub o średnicy 40 mm i wysokości 100 mm. Ulepszony grunt układano warstwami $2 \div 3$ cm i lekko ubijano, aby nie powstawały wolne przestrzenie, w których mogłoby gromadzić się powietrze zakłócające dalsze fazy badania. Poszczególne warstwy moletowano, aby uniknąć zjawiska rozwarstwiania się kolejnych partii gruntu. Warstwy układano kolejno aż do górnej krawędzi tuby. Górną i dolną powierzchnię wyrównywano. Tuby ze stabilizowanym gruntem ważono w celu określenia początkowej gęstości objętościowej. Tak przygotowane próbki wstawiano do naczynia z wodą. Naczynie z próbkami pozostawiono w zacienionym i chłodnym miejscu o małych wahaniami temperatury w celu zapewnienia jednakowych warunków dojrzewania zbliżonych do warunków panujących w terenie. Próbki przechowywano w środowisku wodnym, pionowo zorientowane pod obciążeniem około 18 kPa. Wartość obciążenia została przyjęta tak, aby nie dopuścić do pęcznienia gruntu [16], przy czym odpowiadała w przybliżeniu jednometrowej warstwie nasypu z gruntu niespoistego w stanie średniozagęszczonym. Nasyp taki zazwyczaj wykonywany jest pomiędzy kolumnami a fundamentem. Wszystkie badania przeprowadzono po 28 dniach dojrzewania.

4.5 Zakres badań.

Próbki trzech rodzajów gruntów stabilizowanych do badań przygotowano w sposób omówiony w pkt. 4.4 przyjmując różne ilości stabilizatora na jednostkę objętości gruntu oraz każdorazowo pięć różnych proporcji cementu do popiołu w mieszance stabilizującej. Ogółem badaniom wytrzymałości na ściskanie i ściśliwości poddano odpowiednio 450 i 26 prób.

Dane liczbowe przedstawiono w tablicy 4.2.

Tablica 4.2 Wykaz stabilizacji gruntów mieszanką cementowo-popiołową w zależności od ilości i rodzaju środka wzmacniającego.

Ilość stabilizatora w kg na m ³ gruntu	Procentowy udział cementu i popiołu C/P w mieszance stabilizującej				
	100/0	25/75	50/50	75/25	100/0
150	10	10	10	10	10
250	10	10	10	10	10
300	10	10	10	10	10

Należy zaznaczyć, iż w dalszej części pracy pod pojęciem rodzaju środka wzmacniającego lub stabilizującego względnie rodzaju stabilizatora rozumie się procentowy udział danych składników w mieszance stabilizującej tj. cementu i popiołu w omawianych badaniach własnych. Wszystkie przygotowane próbki gruntu po 28 dniach dojrzewania poddano badaniom wytrzymałości na ściskanie. Natomiast badaniom ściśliwości poddano dwie próbki torfu wzmocnione mieszanką C/P 100/0 oraz po jednej próbce namułu i kredy jeziornej, głównie z uwagi na małą liczbę edometrów oraz długi okres badania. Ponadto wybrane próbki poddawano badaniom derywatograficznym, oraz badaniom struktury pod mikroskopem skaningowym. Badania podstawowych cech fizycznych takich jak wilgotność, gęstość objętościową i zawartość części organicznych przeprowadzono po zmieszaniu gruntu ze stabilizatorem oraz po 28 dniach dojrzewania bezpośrednio po wykonaniu badań wytrzymałości.

Należy wyraźnie podkreślić, iż nie istnieje standardowa procedura przeprowadzania badań laboratoryjnych gruntów stabilizowanych, a parametry badań takich jak:

- wymiary próbek,
- liczba próbek,
- czas dojrzewania,
- obciążenie próbek w czasie dojrzewania,

zależą od celu i skali danego badania oraz możliwości badawczych laboratorium, w którym są przeprowadzane.

4.6 Badania wytrzymałości.

Po okresie leżakowania próbki wyjmowano, wycierano, a następnie ważono w celu określenia gęstości objętościowej przed badaniem. Następnie próbki gruntu wyciskano z tub i badano wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie. Badania wytrzymałości na ściskanie wykonano w aparacie trójosiowego ściskania bez naprężeń bocznych tzw. jednoosiowe ściskanie, w aparacie AT – 2. (rys. 4.5) Wszystkie próbki badano z jednakową prędkością, która wynosiła 10 mm/min. Prędkość ta wynika z rodzaju urządzenia zastosowanego do badania. Wartość prędkości była wartością stałą bez możliwości zmiany. Pierścienie dynamometryczne zmieniano w zależności do wytrzymałości stabilizowanych próbek. Zmiana dynamometru następowało w momencie, gdy odkształcenie dynamometru przekraczało 3 mm lub wynosiło nie więcej niż 0,1 mm. Do obliczenia wytrzymałości na ściskanie przyjęto maksymalną wartość odkształcenia dynamometru. Wartość tą uzyskiwano

w chwili zniszczenia próbki. Po zbadaniu wytrzymałości z każdej próbki pobrano gruntu w celu określenia wilgotności i zawartości części organicznych.



Rys. 4.5 Fotografia Aparatu Trójosiowego Ściskania Typu AT - 2, na którym były prowadzone badania na jednoosiowe ściskanie.



a) Torf

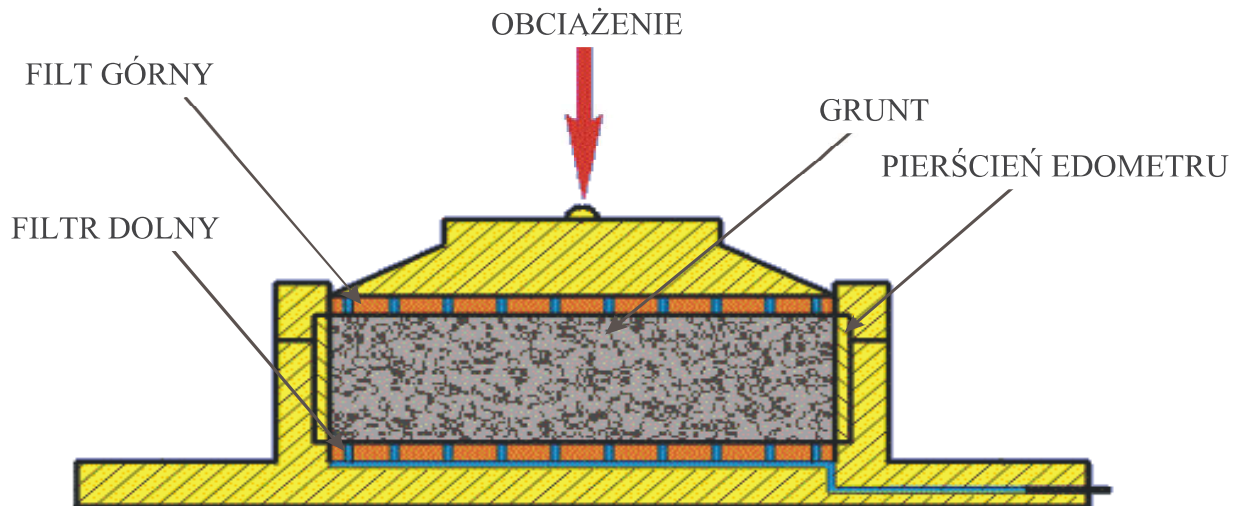
b) Namuł gliniasty

c) Kreda jeziorna

Rys. 4.6 Fotografie przedstawia próbki gruntów (przed badaniem) stabilizowanych mieszanką cementu i popiołu C/P 50/50 w ilości 150 kg na m³.

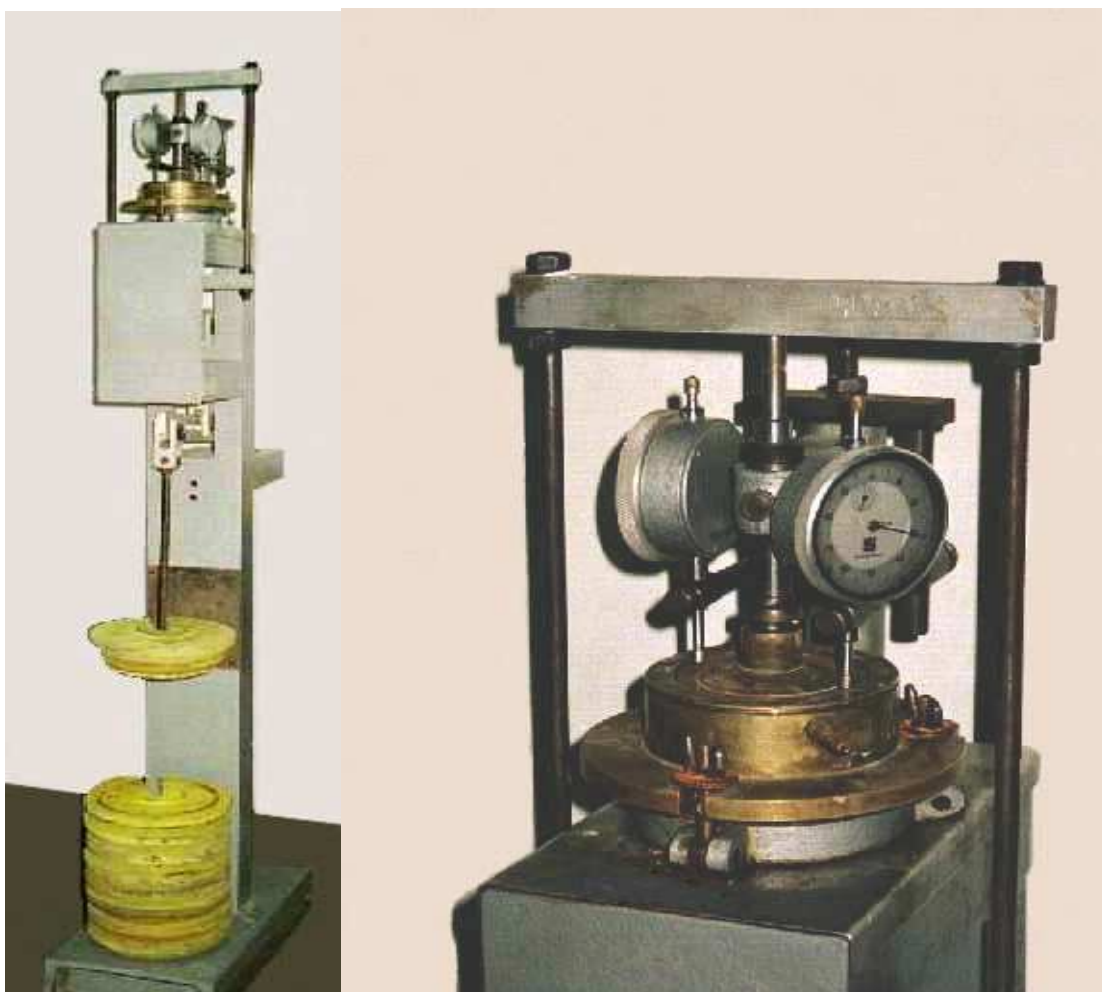
4.7 Badania ścisłości.

Badania edometryczne modułów ścisłości prowadzono w edometrach typu. EL - 1 rys. 4.7 i rys. 4.8, zgodnie z normą badań laboratoryjnych, oraz z Instrukcją ITB 289 [60] w warunkach pod wodą w temperaturze $13 \div 17^{\circ} \text{C}$.



Rys. 4.7 Schemat edometru z gruntem.

Podczas badania ścisłości zastosowano schemat podwajanych stopni obciążenia o wartościach 12,5, 25, 50, 100, 200 kPa. Zwiększenie obciążenia następowało po umownej stabilizacji osiadania odpowiadającej sytuacji, gdy w ciągu co najmniej trzech kolejnych okresów dobowych przyrosty osiadania nie przekraczały wartości 0,03 mm. Dotrzymanie powyższego warunku powodowało znaczne wydłużenie czasu trwania badania, zwłaszcza gruntów naturalnych. Odczyty zmian wysokości próbek wykonywano po 30 sekundach, po 1, 2, 5, 15, 30 minutach oraz po 1, 2, 4, 8, 16, 24 godzinach i dalej, co 24 h, aż do końca badania przy każdym stopniu obciążenia. Badania prowadzono na gruntach stabilizowanych oraz dla porównania gruntów w stanie naturalnym. Po zakończeniu badania ścisłości dla każdej próbki określono gęstość objętościową, wilgotność gruntu oraz zawartość części organicznych.



Rys. 4.8 Widok całego edometru typu EL - 1, oraz powiększenie pierścienia z gruntem.

4.8 Badania derywatograficzne.

Badania derywatograficzne wykonano w Katedrze Inżynierii Materiałowej Politechniki Koszalińskiej. Badaniom poddano Namuł gliniasty i Kredę jeziorną. Próbki do badań zostały wysuszone do stanu powietrzno suchego w temperaturze około 15 °C, a następnie poddane analizie termicznej. Dla porównania wykonano badania gruntów stabilizowanych, po 28 dniach dojrzewania oraz gruntów nie wzmocnionych.

W analizie derywatograficznej ilość wody higroskopowej znajduje odbicie w wartości **dehydratacji**. Wartość dehydratacji jest jedną z cech diagnostycznych, dlatego też wilgotność próbki dla interpretacji składu mineralnego nie jest obojętna. Jeżeli celem analizy jest określenie składu mineralnego, pożądane jest, aby próbki były przechowywane przez kilka dni, co najmniej trzy, w tych samych lub przynajmniej mało zmiennych warunkach wilgotności.

Kolejnymi rozpoznawalnymi czynnikami w analizie derywatograficznej jest określenie między innymi ilości substancji organicznej oraz zawartości kalcytu.

Substancja organiczna czyli chemicznie różne związki organiczne węgla, charakterystyczny dla obecności substancji organicznej jest efekt ubytku masy zarejestrowany na krzywej DTG i odpowiadająca mu egzoderma widoczna na krzywej DTA. Zakres temperatury spalania substancji organicznej zmienia się zależnie od stopnia jej uwęglenia, w bardzo szerokich granicach, początek między 200 ÷ 250 °C zaś koniec między 400 ÷ 1000 °C.

W osadach młodych, wieku czwartorzędowego, substancja organiczna spala się w przedziale 200 ÷ 400 °C, co rejestruje krzywa DTG wklęsłym, łukowatym ugięciem efektu ubytku masy, zaś krzywa DTA – kopulastą egzotermą maksimum w temp. 320 ÷ 350 °C. W osadach starszych od czwartorzędowych zakres spalania mieści się zazwyczaj między 250 ÷ 600 °C, zaś w osadach wieku karbońskiego, przesuwa się aż do ponad 800 °C.

Ilość substancji organicznej w próbce określa się z wartości ubytku masy odczytanego z krzywej TG w zakresie temperatury spalania tej substancji (wyraża ona ilość substancji organicznej, a nie ilość węgla). W wartości tej kryją się części palne substancji organicznej oraz te, które w formie gazowej ulatują z ogrzewanej próbki. Składniki pozostające po spalaniu substancji organicznej z uwagi na ich relatywnie znikomą ilość w obliczeniach są pomijane.

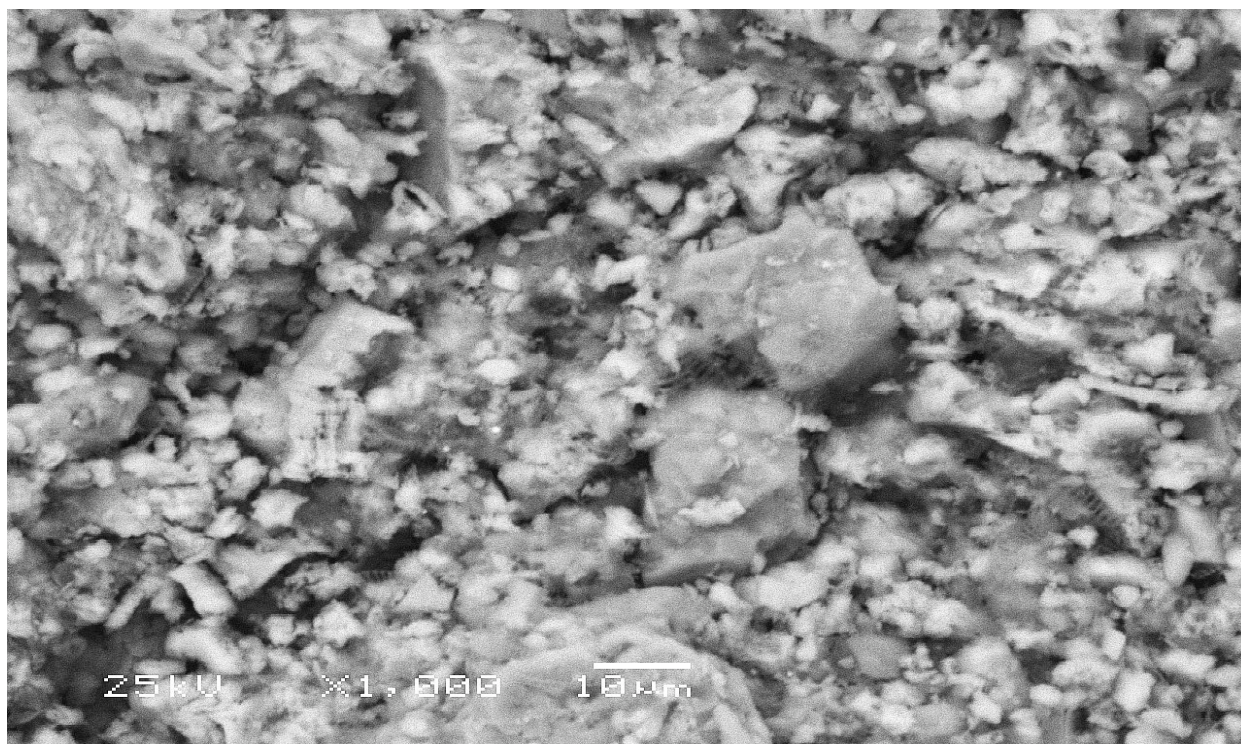
Kalcyt CaCO₃, rozkład kalcytu rozpoczyna się w temperaturze 600 °C, a kończy w 950 °C. Kalcyt zgodnie ze wzorem chemicznym zawiera 44,0 % CO₂, który w czasie ogrzewania wydziela się z próbki. Derywatogram ujawnia jedną reakcję termicznego rozpadu z wydzielaniem CO₂. Jest ona rejestrowana na krzywej DTG wyraźnie asymetrycznym

efektem ubytku masy, na krzywej DTA identyczną, co do kształtu asymetryczną endoterma, zaś krzywa TG kończy się, co jest dla węglanów charakterystyczne, załamaniem pod kątem bliskim prostemu. Cechy diagnostyczne, charakterystyczne dla każdej ilości kalcytu w gruncie to: asymetryczny efekt ubytku masy, któremu odpowiada równie asymetryczna entoderma (prawie pionowy powrót krzywej DTG i DTA do linii zerowej) oraz raptowne zakończenie krzywej TG pod kątem bliskim prostemu.

Ilość kalcytu oblicza się z wartości ubytku masy odczytanej z krzywej TG w zakresie temperatury jego rozkładu – co wyraża ilość CO_2 – pomnożonej przez 2,274

4.9 Badania zmian struktury.

Badania wykonano mikroskopem elektronowym w Katedrze Inżynierii Materiałowej Politechniki Koszalińskiej, mikroskopem JSM 5500 LV. Napięcie przyspieszające wiązkę elektronów wynosiło od 5 do 6 kV. Zdjęcia wykonano po 28 dniach od chwili zmieszania gruntu naturalnego ze stabilizatorem. Początkowo próbki gruntu naturalnego zamrażano, lecz wiązka elektronowa rozpuszczała lód i obraz w mikroskopie falował jednocześnie uniemożliwiając wykonanie zdjęć ostrych i wyraźnych (rys 4.9). W tym celu zmieniono sposób przygotowywania próbek. Próbki do badań zostały wysuszone do stanu powietrzno suchego w temperaturze około 15 °C, a następnie poddane badaniom. Dla porównania wykonano zdjęcia gruntów naturalnych.



Rys. 4.9 Zdjęcie zamrożonej kredy jeziornej.

5.0 Wyniki badań.

5.1 Badanie wytrzymałości na ściskanie.

Do obliczenia wytrzymałości na ściskanie przyjęto wartość odkształcenia dynamometru w chwili zniszczenia próbki. Wartość wytrzymałości na ściskanie q_u odpowiada połowie wartości wytrzymałości na ścinanie bez τ w warunkach bez możliwości odwodnienia.

Naprężenia ściskające q_u [kPa] obliczono wg wzoru:

$$q_u = \frac{k * \varepsilon_d}{F_p} \quad (3)$$

gdzie:

k – stała dynamometru, [kN/mm]

ε_d – odkształcenie dynamometru w chwili zniszczenia próbki, [mm]

F_p – pole przekroju próbki przed badaniem [cm²].

Jako ostateczny wynik badań przyjęto wartości średnie z n -liczby badań. Określenie wyniku badania polegało na obliczeniu średniej arytmetycznej z n -tej liczby wartości wytrzymałości na ściskanie zmierzone na komplecie danej serii. Jeżeli jedna z n -tej wartości oznaczeń różniła się o więcej niż ± 15 % od średniej, wówczas wartość tę odrzucano i obliczano wartość średnią z pozostałych $n - 1$ pojedynczych wartości. Kiedy dalsza pojedyncza wartość z tych $n-1$ różniła się o więcej niż ± 10 % od wartości średniej, wówczas odrzucano cały wynik badania.

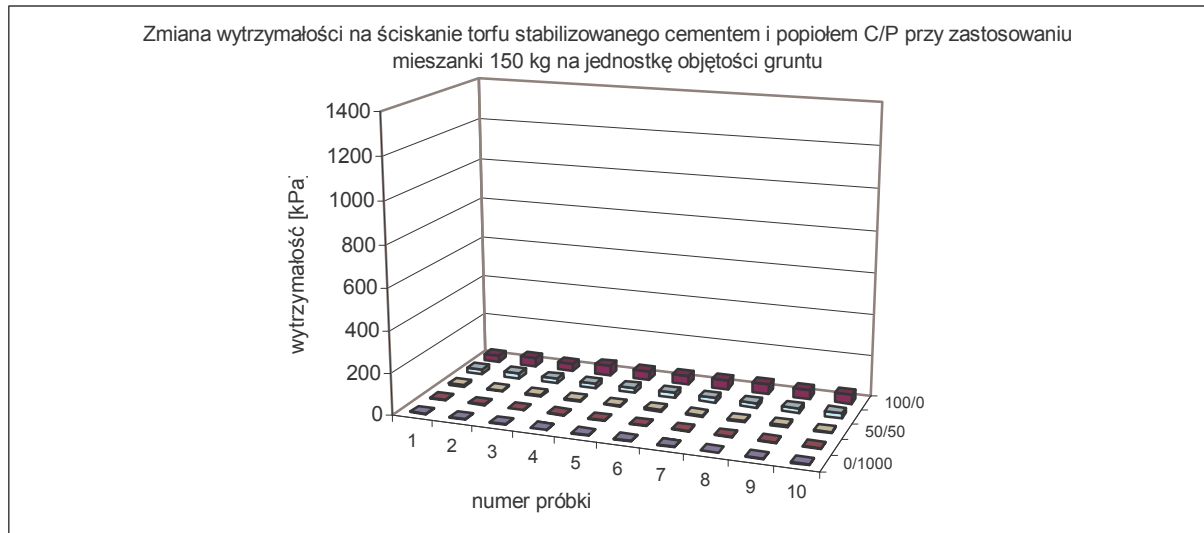
Wyniki badań przedstawiono w postaci numerycznej w tablicach 5.1, 5.2 i 5.3 oraz w postaci graficznej na rys. 5.1 do 5.9.

Tablica 5.1 Zestawienie wartości wytrzymałości na ściskanie dla Torfu

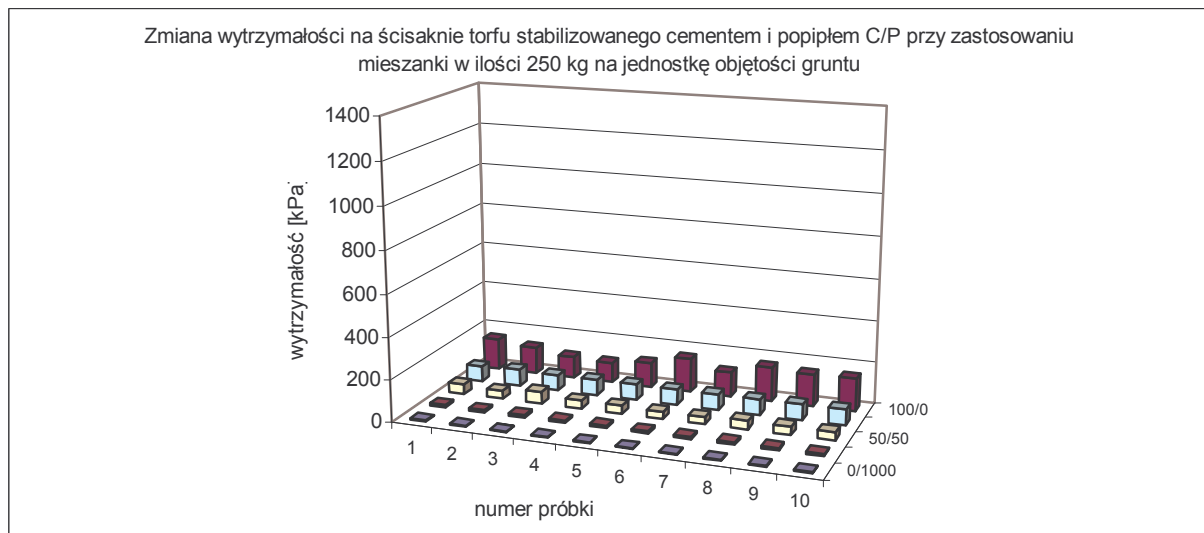
Rodzaj gruntu	Nr próbki	procentowa zawartość C/P cementu i popiołu w mieszance stabilizującej														
		0/100			25/75			50/50			75/25			100/0		
		150	250	300	150	250	300	150	250	300	150	250	300	150	250	300
Torf	1	2,7	4,4	6,4	2,7	10,7	15,1	8,6	45,4	66,0	23,2	73,0	86,7	36,1	151,0	166,0
	2	2,4	4,5	6,0	3,5	10,7	13,4	7,6	37,5	58,7	27,1	79,7	83,5	42,0	130,0	187,0
	3	3,6	3,2	6,6	1,8	11,6	14,3	7,3	48,7	67,3	22,4	76,0	82,9	35,7	121,0	168,0
	4	2,4	3,6	6,2	3,5	10,5	15,4	6,4	39,3	60,7	22,7	76,0	83,3	47,9	118,5	163,0
	5	3,6	4,5	6,4	2,6	11,2	14,6	7,6	38,4	64,7	24,1	77,1	81,3	42,2	118,0	158,0
	6	2,9	3,6	5,9	3,0	10,6	15,0	8,9	35,7	60,2	23,6	76,0	84,2	42,3	148,0	183,0
	7	2,6	3,6	5,5	3,1	10,0	15,0	6,5	34,6	49,9	24,0	75,0	82,1	43,9	128,0	205,0
	8	2,4	3,6	6,5	2,9	11,2	14,6	7,6	41,7	56,1	22,0	75,0	85,0	47,4	166,0	186,0
	9	2,8	4,5	6,1	3,0	10,6	15,1	8,8	39,1	48,8	22,0	76,0	80,1	43,6	153,0	202,0
	10	3,1	3,6	6,0	2,8	11,0	14,9	6,6	38,4	55,6	22,6	76,1	81,2	45,4	155,9	203,0
wartość średnia		2,8	4,0	6,1	2,9	10,8	14,7	7,6	39,9	58,8	23,4	76,0	83,0	42,7	138,9	182,1

Tablica 5.2 Zestawienie wartości wytrzymałości na ściskanie dla Namułu gliniastego

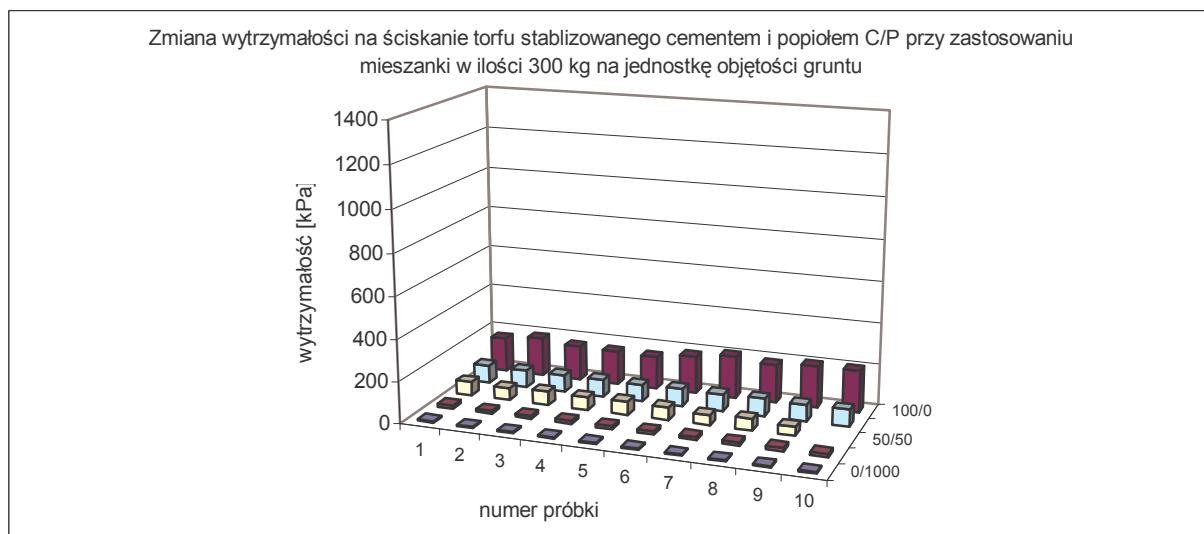
Rodzaj gruntu	Nr próbki	procentowa zawartość C/P cementu i popiołu w mieszance stabilizującej														
		0/100			25/75			50/50			75/25			100/0		
		150	250	300	150	250	300	150	250	300	150	250	300	150	250	300
Namuł gliniasty	1	14,4	19,3	23,0	28,7	44,7	73,7	63,5	124,8	134,8	84,9	251,1	296,6	118,2	293,8	335,8
	2	12,6	19,7	22,4	28,6	43,8	77,4	64,5	128,7	136,1	72,5	215,4	310,8	115,2	295,1	330,6
	3	13,7	17,9	21,4	24,8	48,1	74,2	59,4	122,1	131,1	89,4	250,2	271,7	120,5	305,1	332,2
	4	15,5	15,3	22,6	24,7	43,5	74,2	58,4	133,0	140,7	86,2	245,7	284,0	120,6	323,7	348,2
	5	13,7	17,9	21,5	25,8	44,0	74,0	65,9	125,1	145,3	84,6	239,7	301,3	124,6	303,3	370,2
	6	14,3	14,9	21,5	25,7	44,1	75,1	61,5	127,6	126,9	86,5	251,1	287,9	125,0	306,7	344,4
	7	13,3	18,9	19,8	25,0	44,0	74,3	74,2	130,6	133,8	87,5	249,4	291,2	116,9	294,7	332,3
	8	12,6	14,9	24,0	25,1	46,9	77,3	65,9	124,0	130,2	88,0	249,0	277,9	119,4	271,7	339,2
	9	11,6	18,0	20,7	25,6	47,1	74,2	65,6	132,3	135,3	73,5	265,1	287,0	118,8	307,1	349,1
	10	12,5	17,7	20,4	26,0	46,3	76,1	74,6	129,8	138,3	77,9	249,1	284,6	115,2	315,2	333,5
wartość średnia		13,4	17,5	21,7	26,0	45,2	75,0	65,4	127,8	135,3	83,1	246,6	289,3	119,4	301,6	341,5



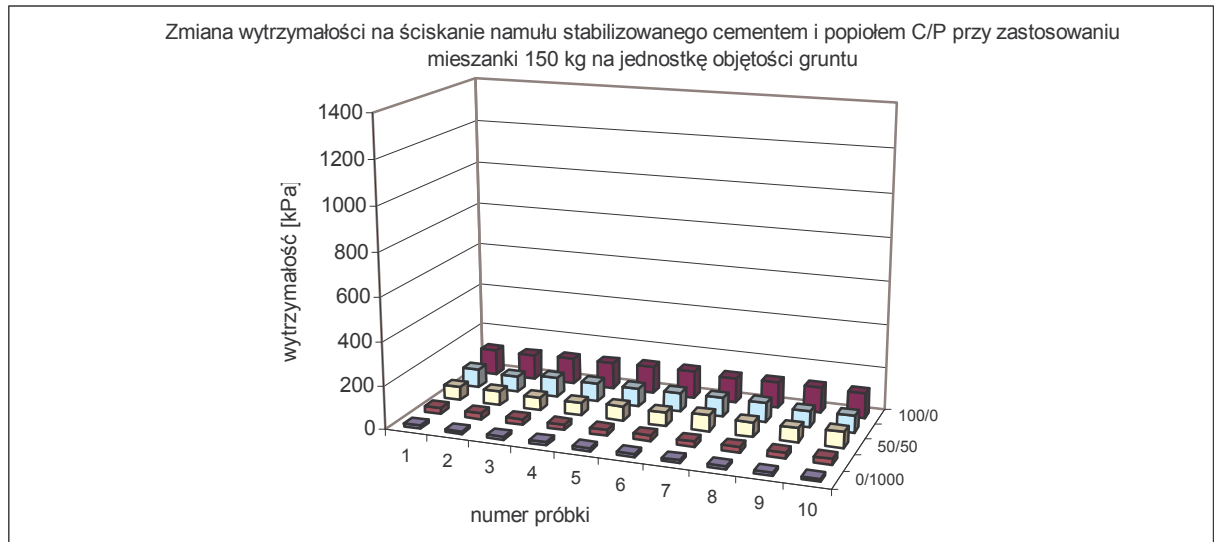
Rys. 5.1 Wykres wzrostu wytrzymałości na ściskanie stabilizowanego torfu wzmocnionego mieszanką C/P w ilości 150 kg/m³.



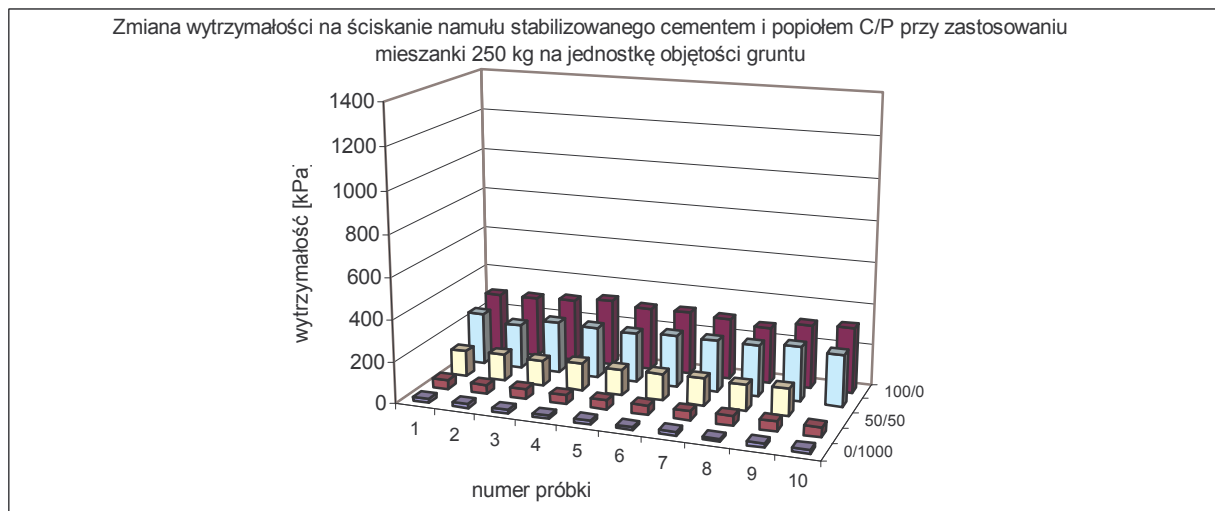
Rys. 5.2 Wykres wzrostu wytrzymałości na ściskanie stabilizowanego torfu wzmocnionego mieszanką C/P w ilości 250 kg/m³.



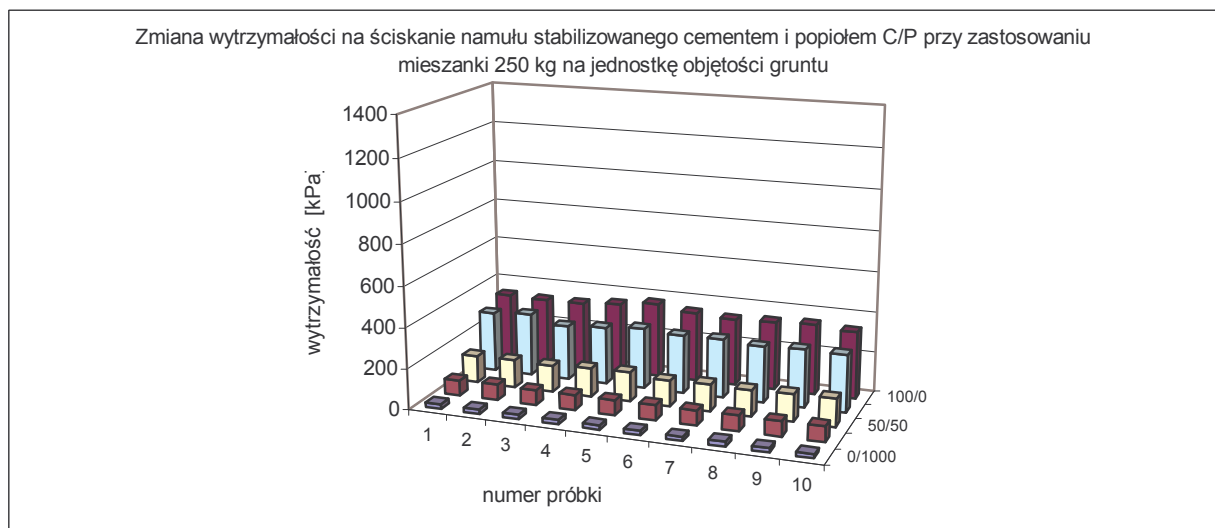
Rys. 5.3 Wykres wzrostu wytrzymałości na ściskanie stabilizowanego torfu wzmocnionego mieszanką C/P w ilości 300 kg/m³.



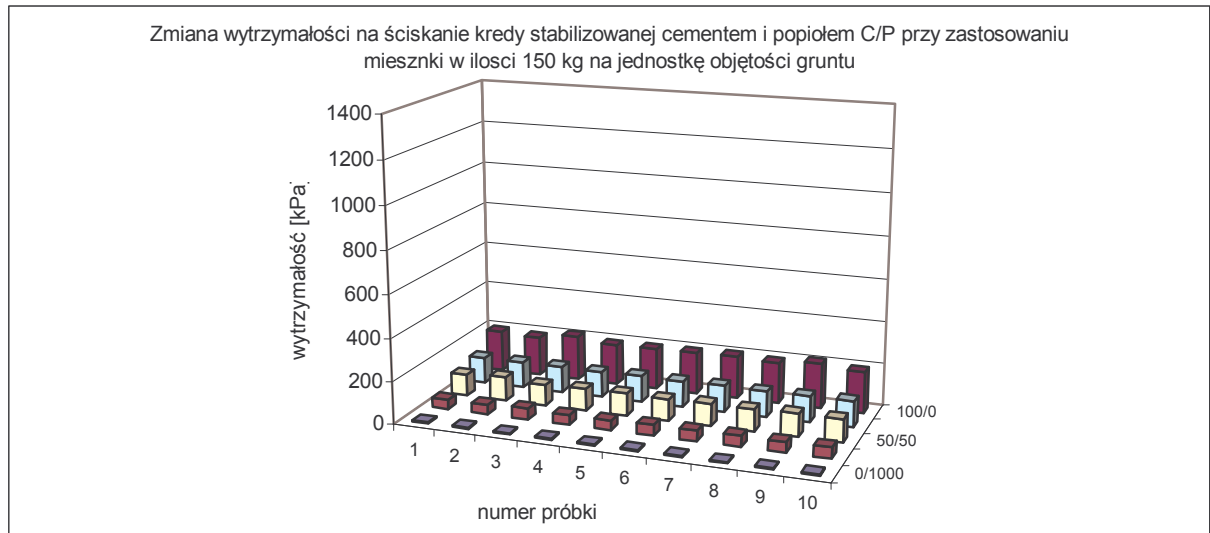
Rys. 5.4 Wykres wzrostu wytrzymałości na ściskanie stabilizowanego namułu wzmocnionego mieszanką C/P w ilości 150 kg/m³.



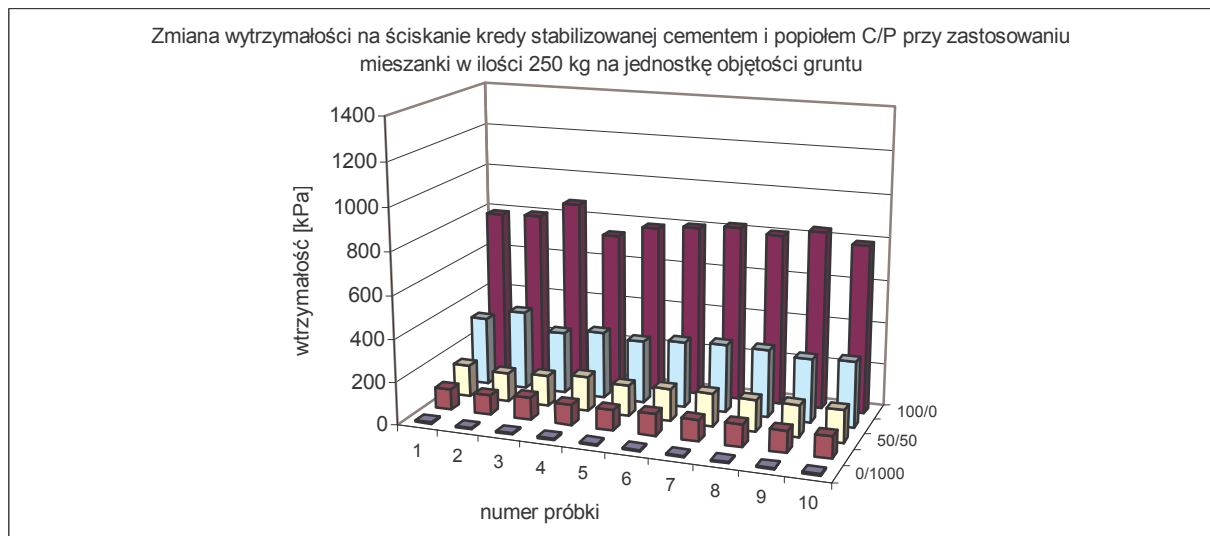
Rys. 5.5 Wykres wzrostu wytrzymałości na ściskanie stabilizowanego namułu wzmocnionego mieszanką C/P w ilości 250 kg/m³.



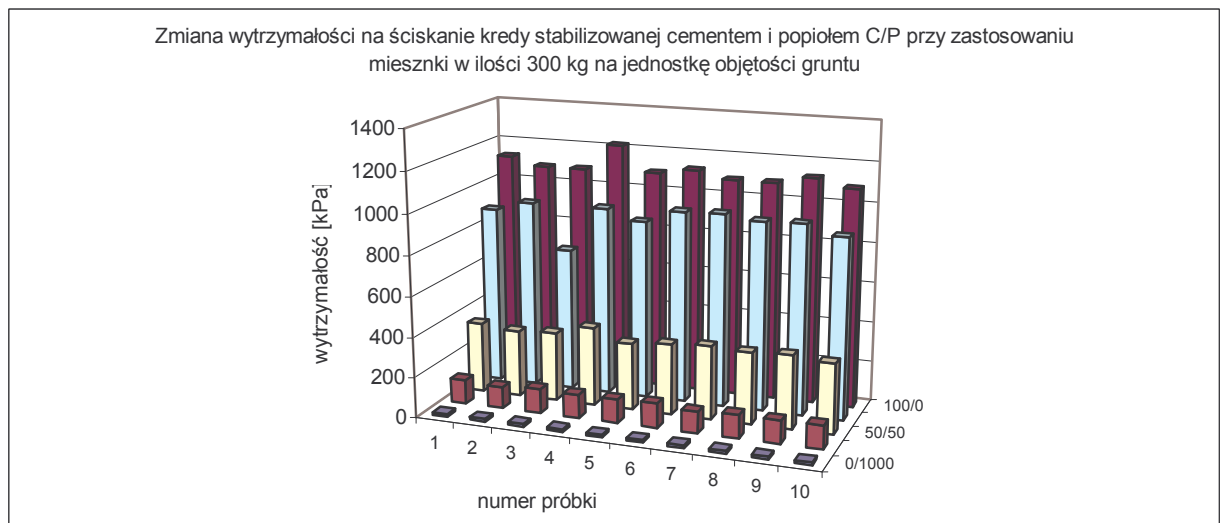
Rys. 5.6 Wykres wzrostu wytrzymałości na ściskanie stabilizowanego namułu wzmocnionego mieszanką C/P w ilości 300 kg/m³.



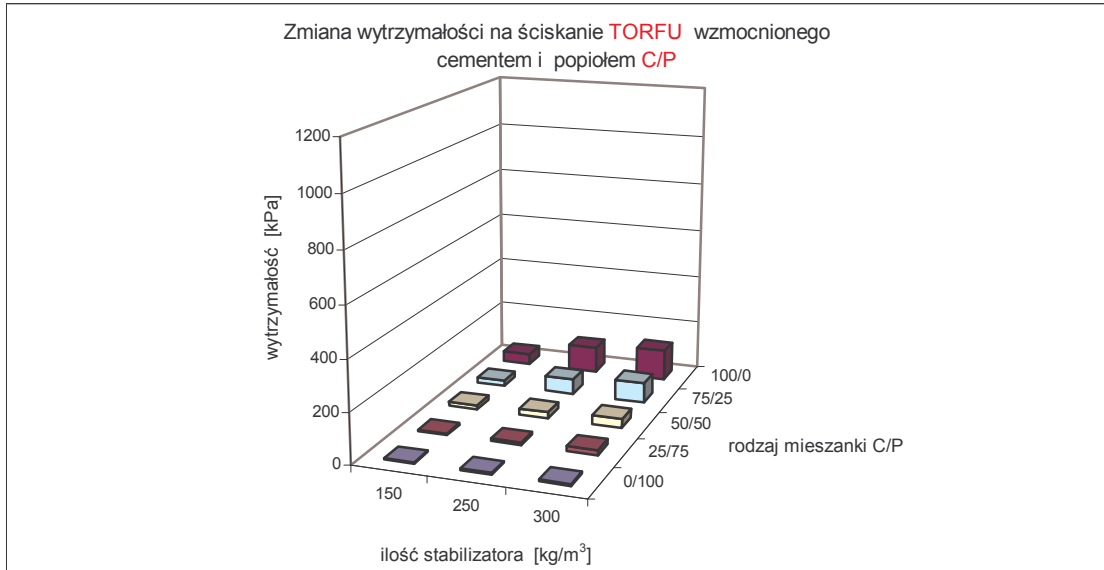
Rys. 5.7 Wykres wzrostu wytrzymałości na ściskanie stabilizowanej kredy wzmocnionego mieszanką C/P w ilości 150 kg/m³.



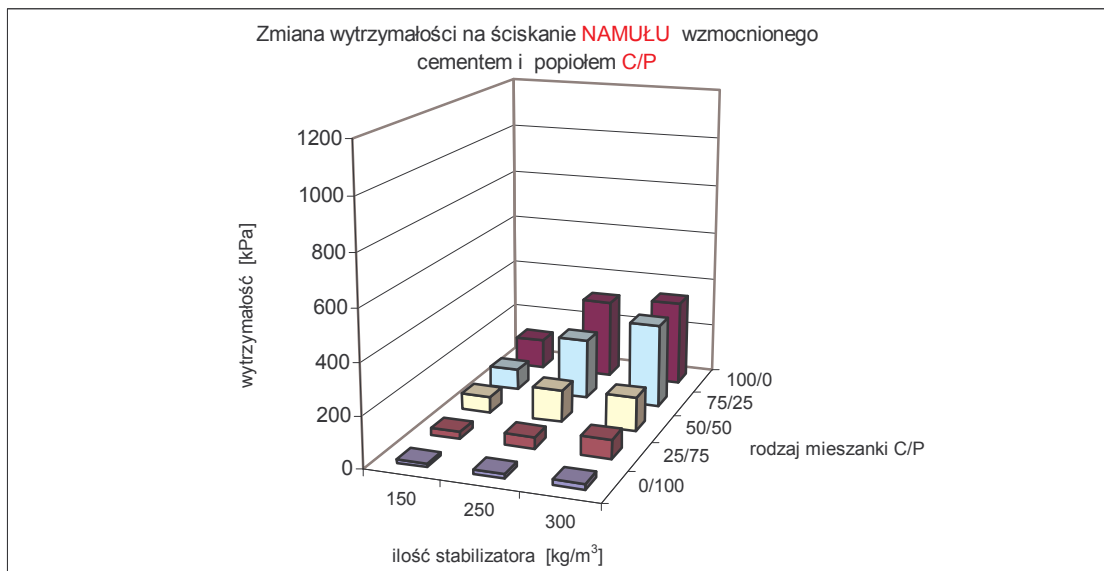
Rys. 5.8 Wykres wzrostu wytrzymałości na ściskanie stabilizowanej kredy wzmocnionego mieszanką C/P w ilości 250 kg/m³.



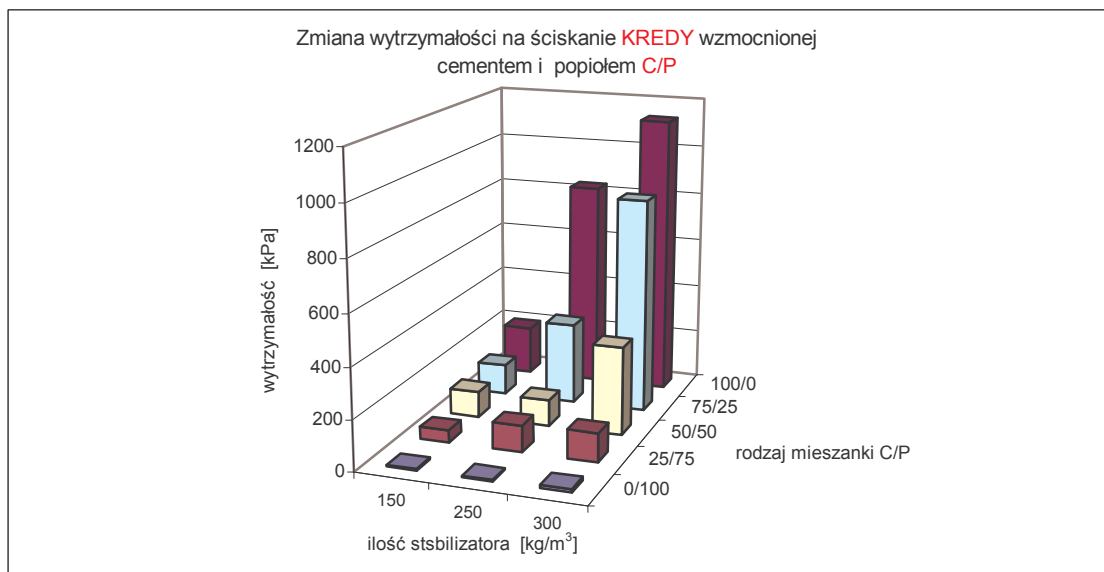
Rys. 5.9 Wykres wzrostu wytrzymałości na ściskanie stabilizowanej kredy wzmocnionego mieszanką C/P w ilości 300 kg/m³.



Rys. 5.10 Wzrost wytrzymałości na ściskanie stabilizowanego torfu.



Rys. 5.11 Wzrost wytrzymałości na ściskanie stabilizowanego namułu gliniastego.



Rys. 5. 12 Wzrost wytrzymałości na ściskanie stabilizowanej kredy jeziornej.

Na wykresach. 5.1 do 5.9 przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na ściskanie w zależności od rodzaju i ilości stabilizatora dla poszczególnych gruntów. Wykresy 5.10 do 5.12, przedstawiają zestawienie wzrostu wytrzymałości na ściskanie poszczególnych gruntów. Analizując wykresy można jednoznacznie stwierdzić, że wraz ze wzrostem ilości stabilizatora na metr sześcienny gruntu oraz, wraz ze wzrostem ilości cementu w mieszance stabilizującej następuje wzrost wytrzymałości na ściskanie wzmocnionych gruntów organicznych.

Z przeprowadzonej analizy badań wynika, iż oczekiwaną wytrzymałość na ściskanie rzędu 150 kPa, uzyskano dla torfu przy zastosowaniu samego cementu w ilości 250 kg/m^3 , natomiast dla namułu i kredy najwłaściwsze jest wzmocnienie mieszanką C/P 50/50 w ilości odpowiednio 300 i 250 kg/m^3 .

Natomiast zaobserwowano brak efektu oczekiwanej wytrzymałości na ściskanie wszystkich badanych gruntów stabilizowanych samym popiołem. Wyniki przeprowadzonych badań wykazały, że dla namułu wzmocnionego samym popiołem, C/P 0/100, uzyskano lepszy efekt wzmocnienia niż dla kredy (tablica 5.1 i 5.2) niezależnie od ilości stabilizatora. Jednakże w wyniku wzmocniania torfu uzyskano najmniejsze wartości wytrzymałości.

W zależności od rodzaju i ilości stabilizatora oraz rodzaju gruntu zaobserwowano różne modele ścięcia gruntu:

- płynięcie (np. ścinanej plastycznej próbki gliny),
- plastyczny (np. ścięcie próbki gliny w stanie twaroplastycznym),
- kruchy (np. ścięcie półzwartej próbki gliny lub zagęszczonego piasku) [54].

Model ścięcia gruntu tzw. „płynięcie” (rys. 5.13, do 5.15), występował we wszystkich gruntów stabilizowanych samym popiołem niezależnie od ilości stabilizatora. (rys. 5.21 do 5.24). Ścięcie „kruche” występowało dla wszystkich próbek kredy poza mieszanką C/P 0/100 i 25/75/150, dla torfu wzmocnionego mieszanką C/P 100/0, w której ilość stabilizatora wynosiła 250 i 300 kg/m^3 . Natomiast w namule ścięcie „kruche” występowało dla następujących proporcji stabilizatora 50/50 75/25 i 100/0 niezależnie od ilości stabilizatora i dla mieszanki 25/75 w ilości 300 kg/m^3 (rys.5.17 do.5.20). W pozostałych przypadkach ścięcie gruntów stabilizowanych następowało według modelu ścięcia „plastycznego”.

Na rysunkach 5.25 i 5.26, pokazano ogólny widok próbek kredy i namułu po badaniu wytrzymałości na ściskanie.



Rys. 5.13 Ścięcie „płynięcie” torfu stabilizowanego C/P 50/50/250.



Rys. 5.14 Ścięcie „płynięcie” namułu stabilizowanego C/P 25/75/150.



Rys. 5.15 Ścięcie „płynięcie” kredy stabilizowanej C/P 0/100/300.



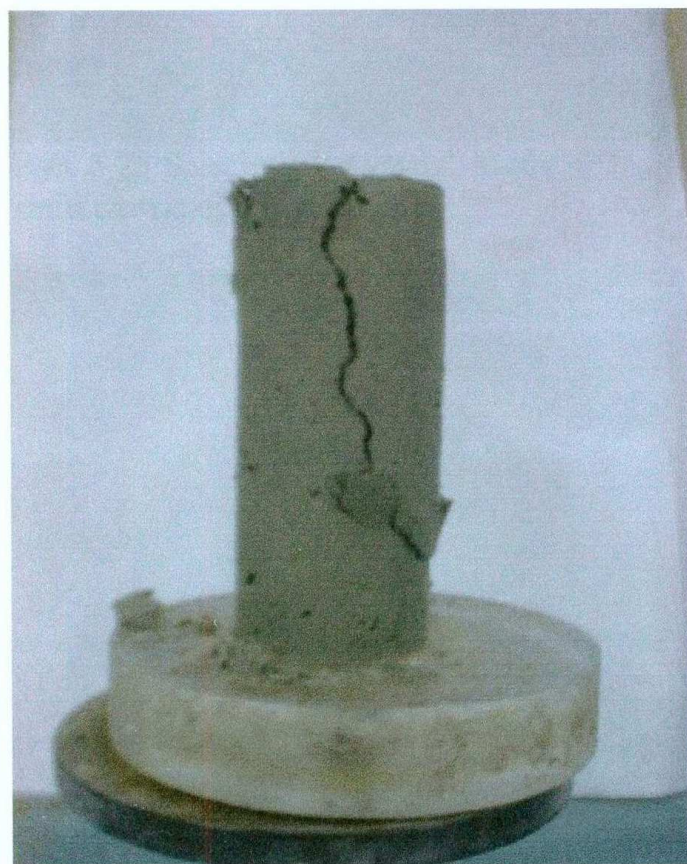
Rys. 5.16 Zdjęcie stabilizowanego torfu przed ścięciem C/P 100/0/250.



Rys. 5.17 Ścięcie „kruche” torfu stabilizowanego C/P 75/25/300.



Rys. 5.18 Ścięcie „kruche” namułu stabilizowanego C/P 75/25/250.



Rys. 5.19 Ścięcie „kruche” kredy stabilizowanej C/P 75/25/300.



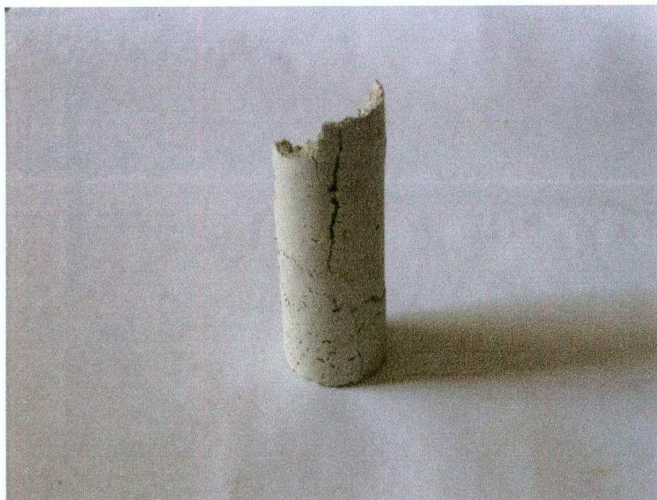
Rys. 5.20 Ścięcie „kruche” kredy stabilizowanej C/P 25/75/300.



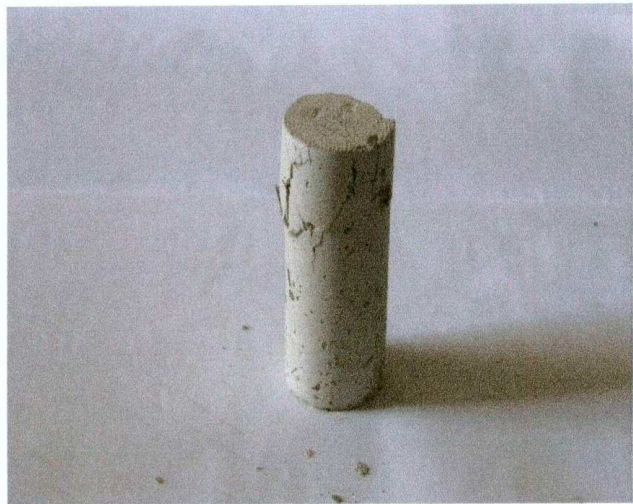
Rys. 5.21 Ścięcie „plastyczne” namułu stabilizowanego C/P 50/50/250.



Rys. 5.22 Ścięcie „plastyczne” namułu stabilizowanego C/P 75/25/300.



Rys. 5.23 Ścięcie „plastyczne” kredy stabilizowanej C/P 0/100/150.



Rys. 5.24 Ścięcie „plastyczne” kredy stabilizowanej C/P 25/75/150.



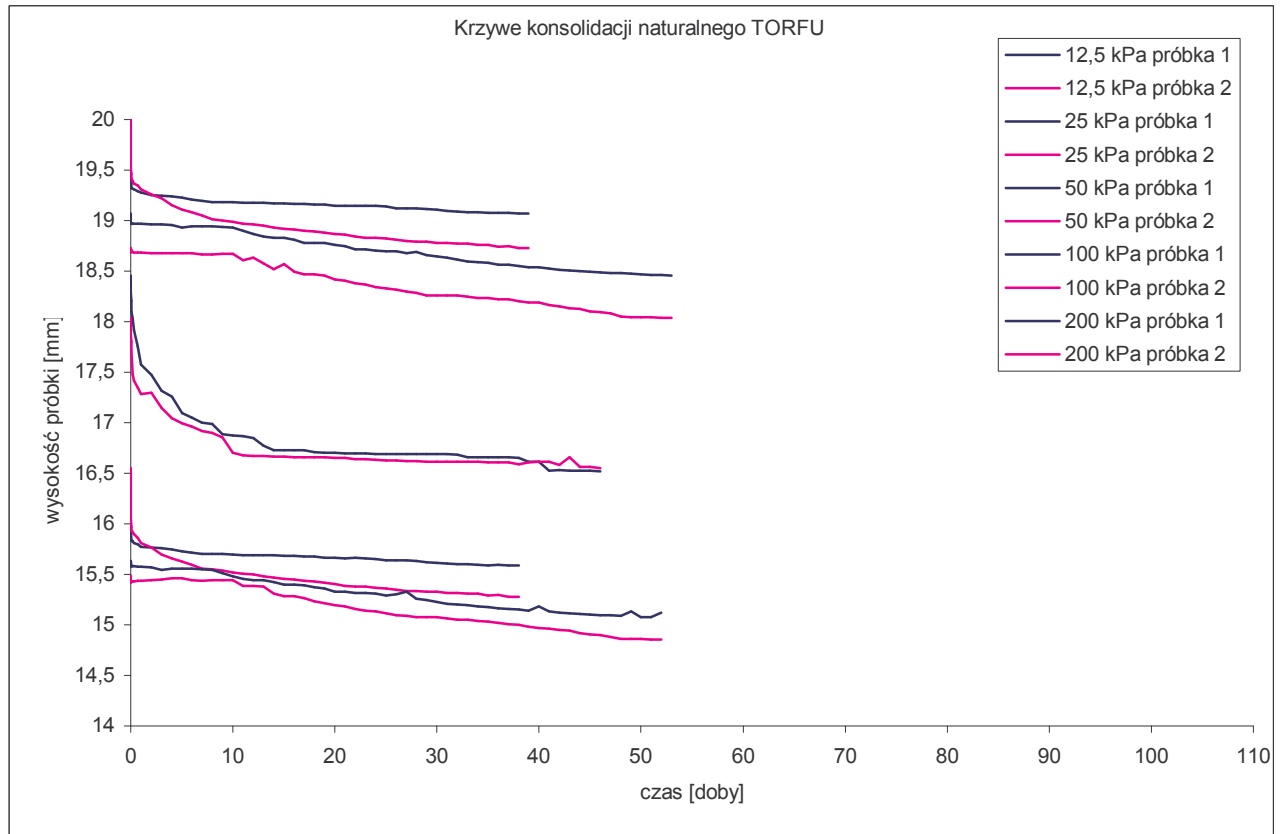
Rys. 5.25 Ogólny widok ściętych próbek namułu.



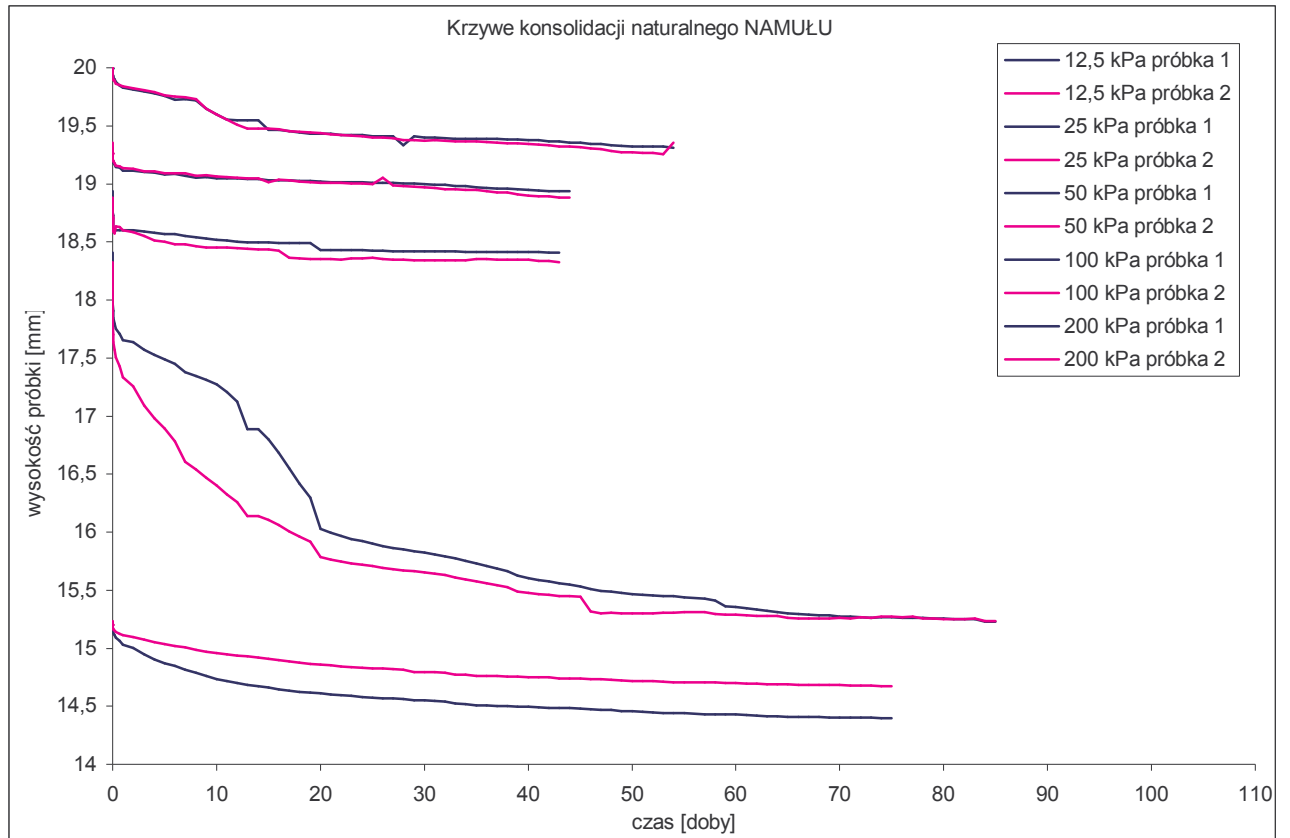
Rys. 5.26 Ogólny widok ściętych próbek kredy.

5.2 Badanie ścisłości.

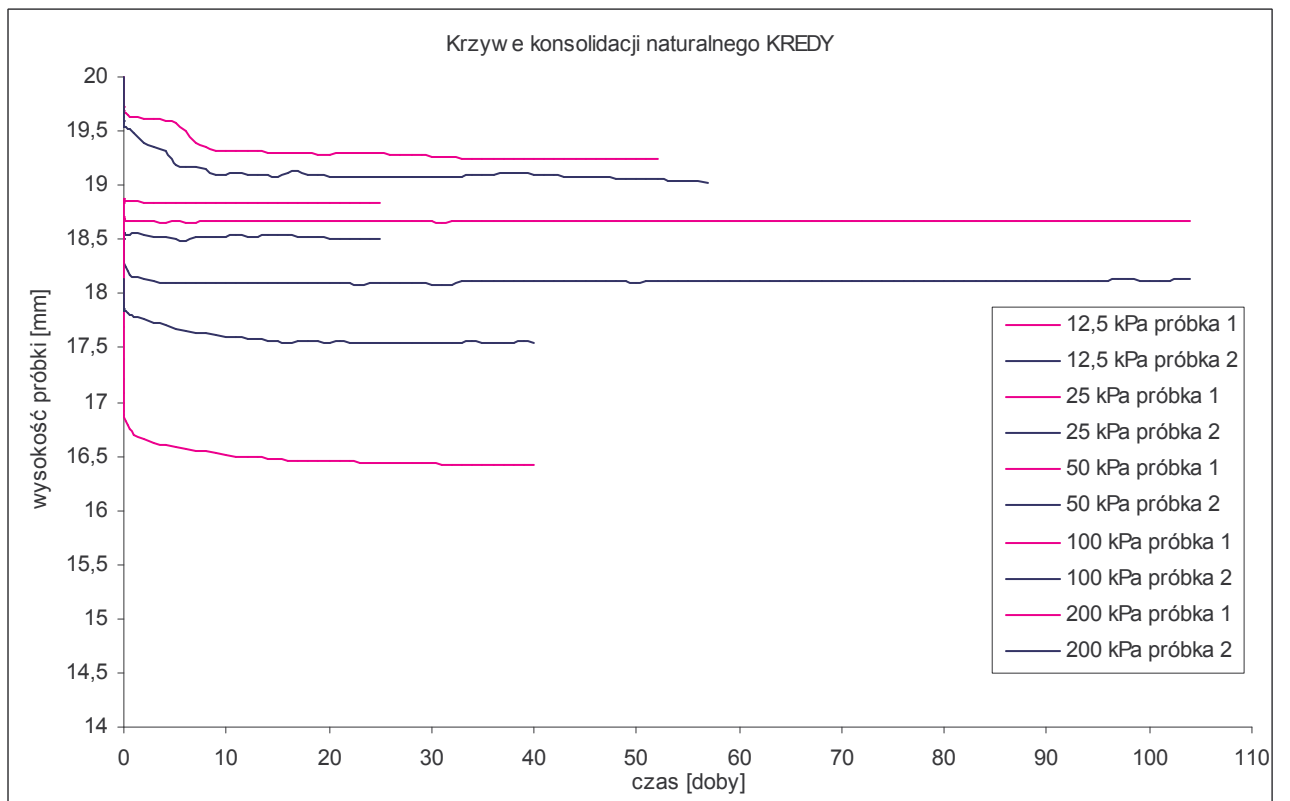
Badania edometrycznych modułów ścisłości prowadzono na próbkach stabilizowanych oraz dla porównania na gruntach naturalnych. Badania gruntów naturalnych prowadzono na dwóch próbkach, natomiast gruntów wzmocnionych na jednej próbce. Wyniki badań przedstawiono na rysunkach w postaci wykresów konsolidacji rys. 5.27 do 5.49.



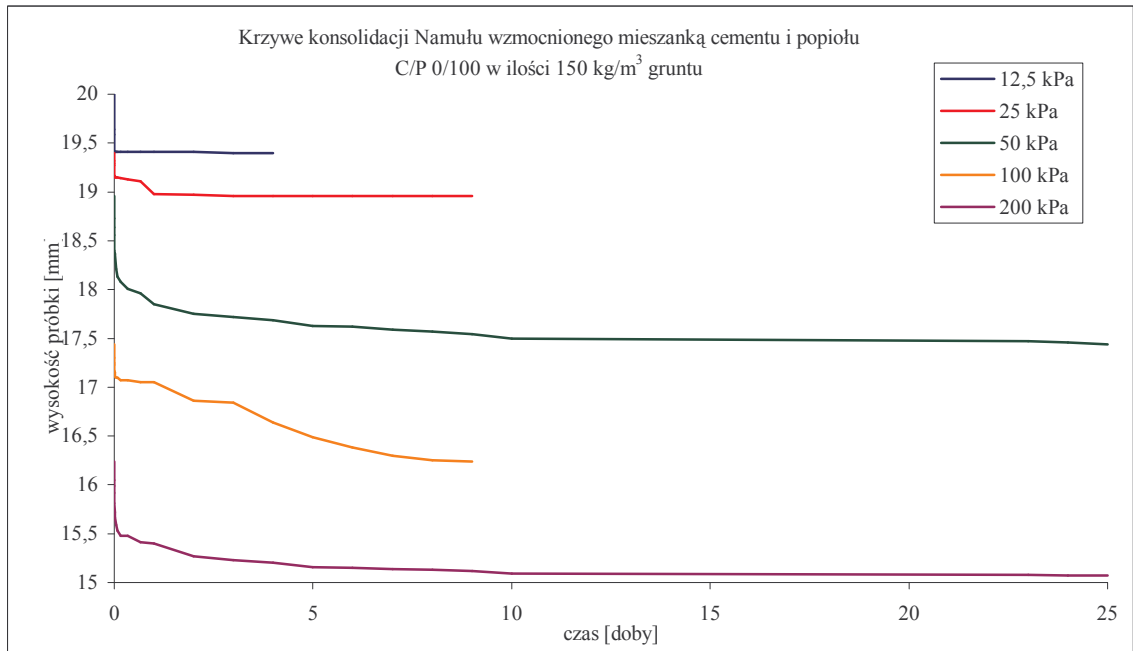
Rys. 5.27 Krzywe konsolidacji naturalnego torfu.



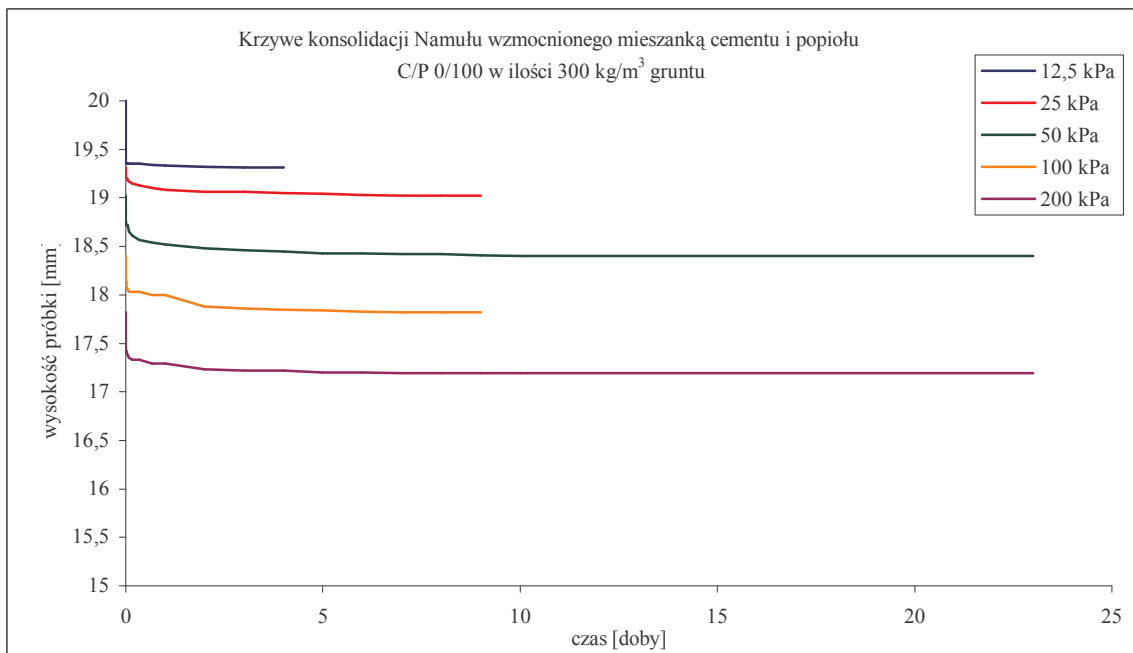
Rys. 5.28 Krzywe konsolidacji naturalnego namułu gliniastego.



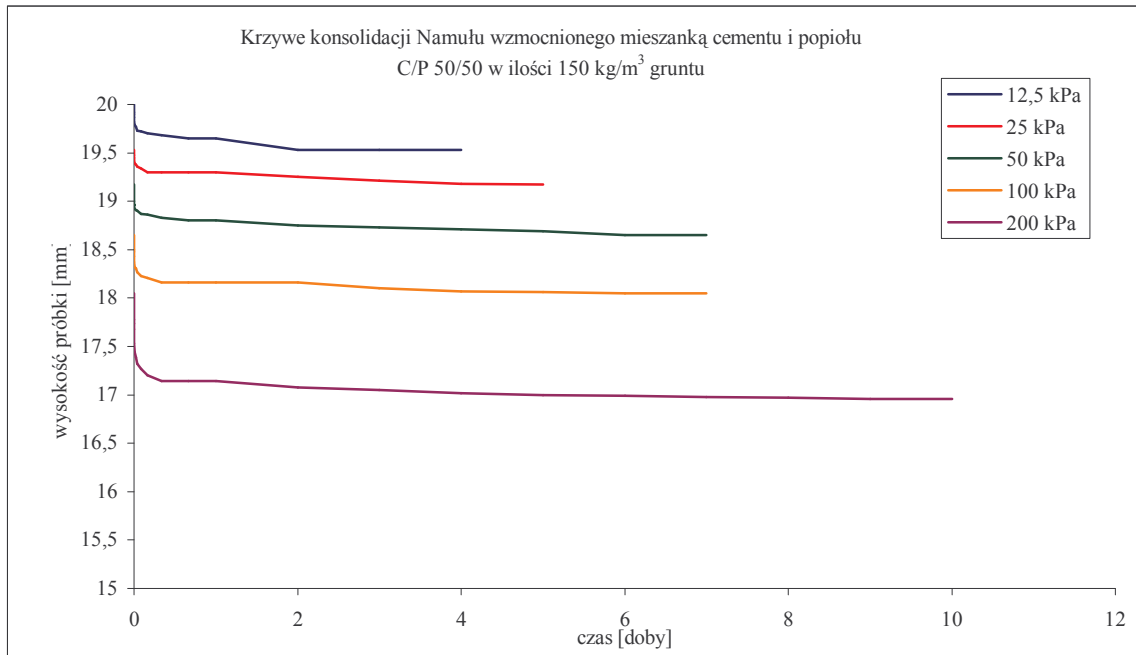
Rys. 5.29 Krzywe konsolidacji naturalnej kredy jeziornej.



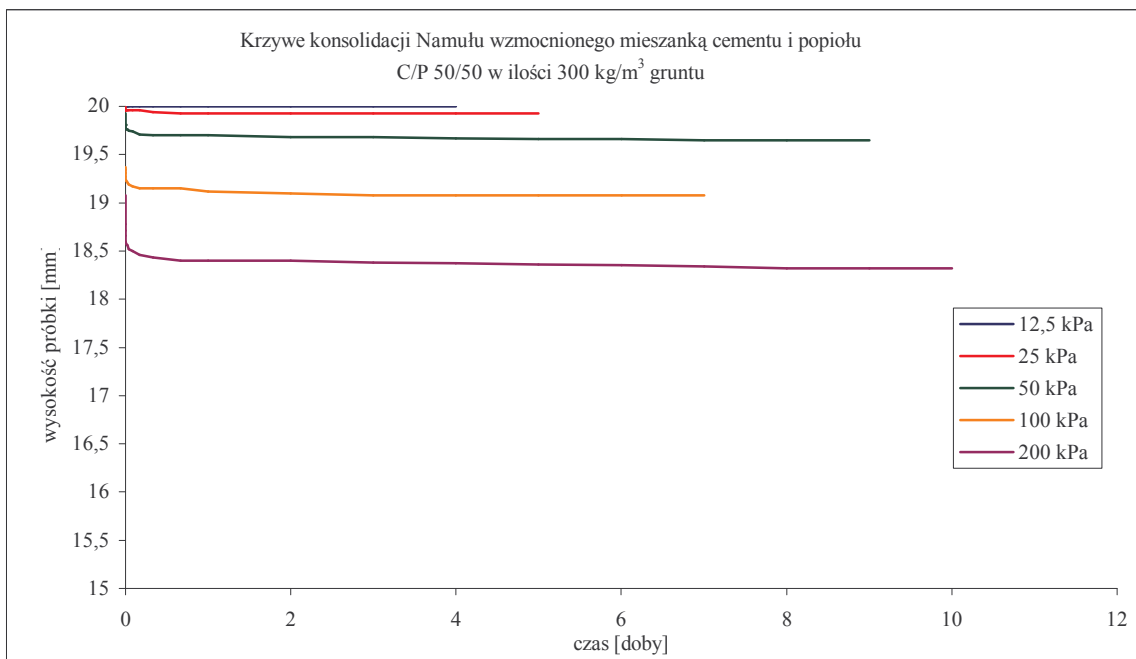
Rys. 5.30 Krzywe konsolidacji namu wzmocnionego mieszanką C/P 0/100 w ilości 150 kg/m³.



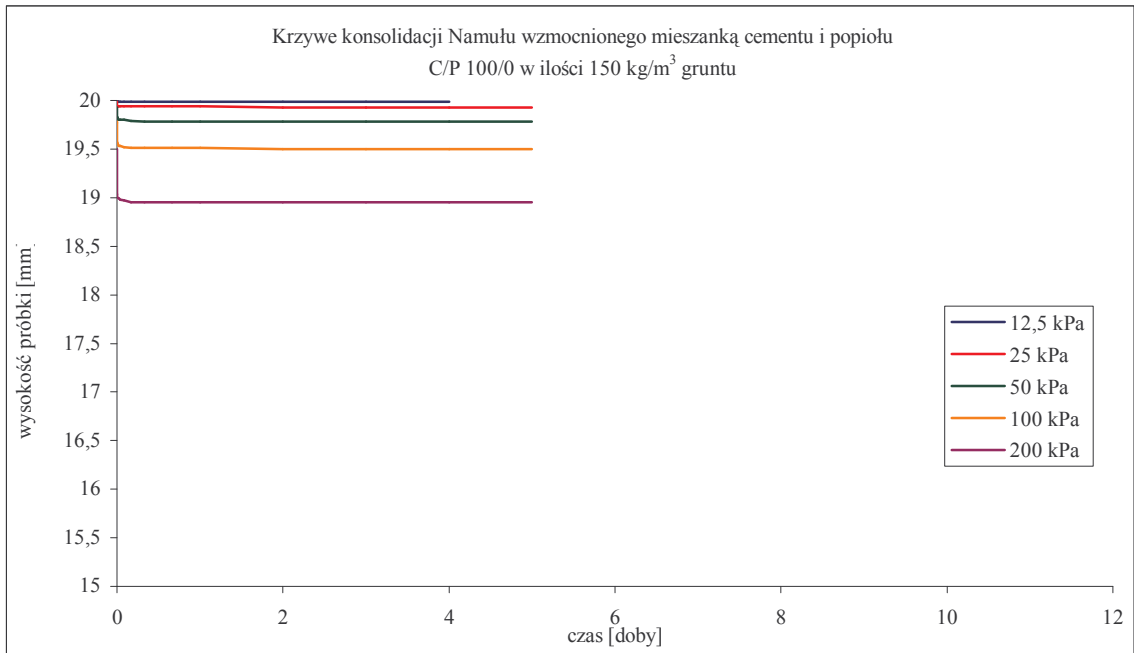
Rys. 5.31 Krzywe konsolidacji namu wzmocnionego mieszanką C/P 0/100 w ilości 300 kg/m³.



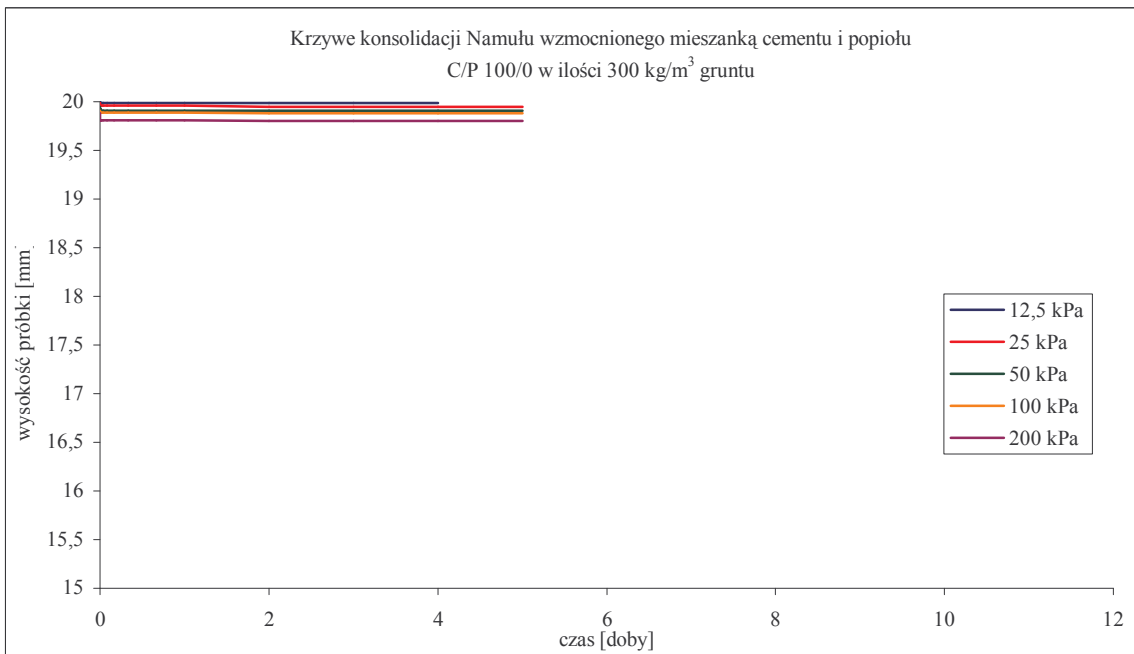
Rys. 5.32 Krzywe konsolidacji namułu wzmocnionego mieszanką C/P 50/50 w ilości 150 kg/m³.



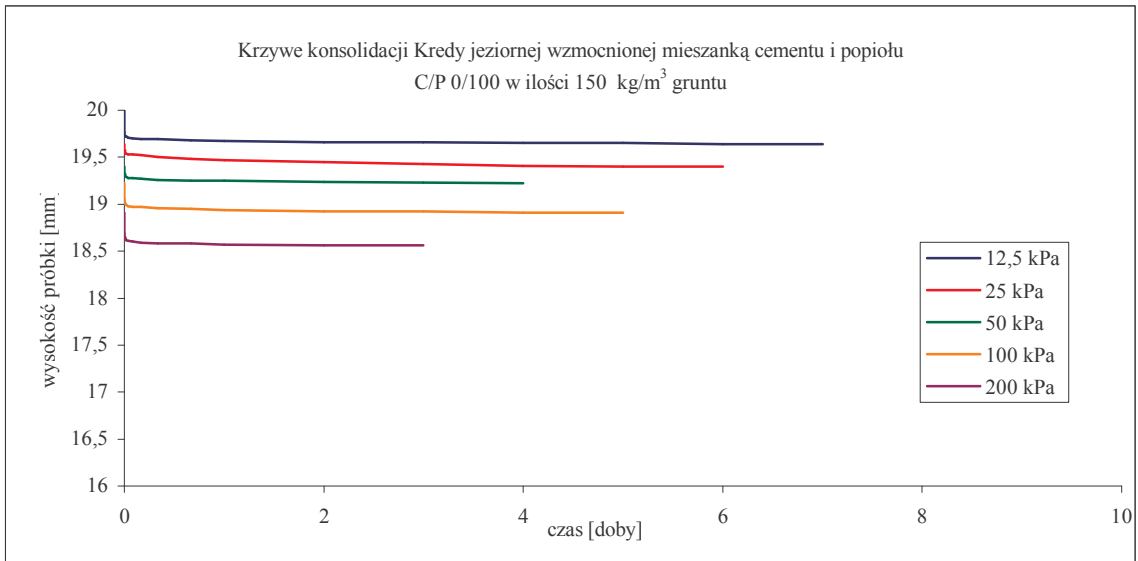
Rys. 5.33 Krzywe konsolidacji namułu wzmocnionego mieszanką C/P 50/50 w ilości 300 kg/m³.



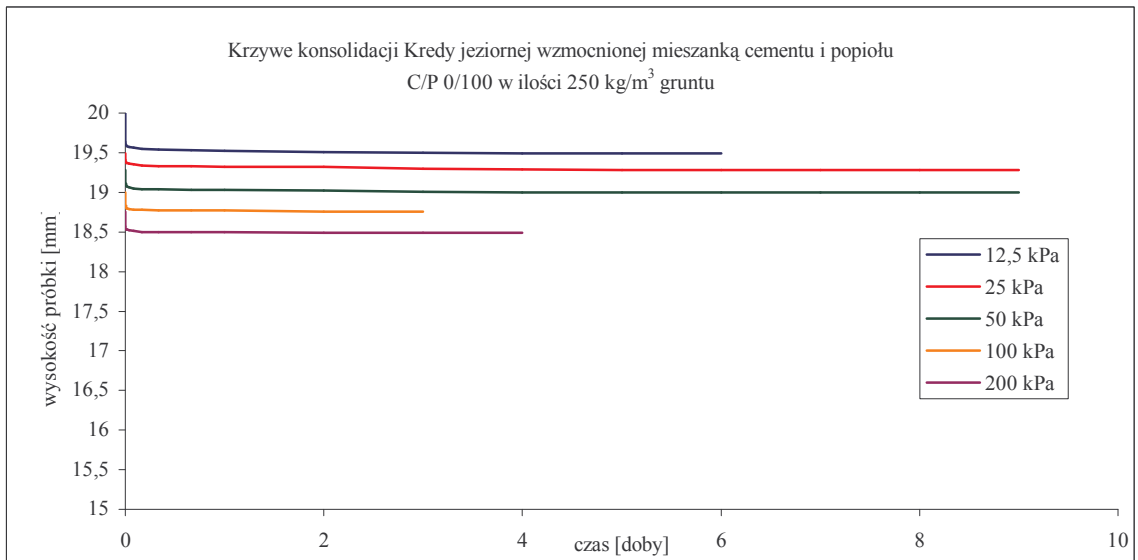
Rys. 5.34 Krzywe konsolidacji namu wzmocnionego mieszanką C/P 100/0 w ilości 150 kg/m³.



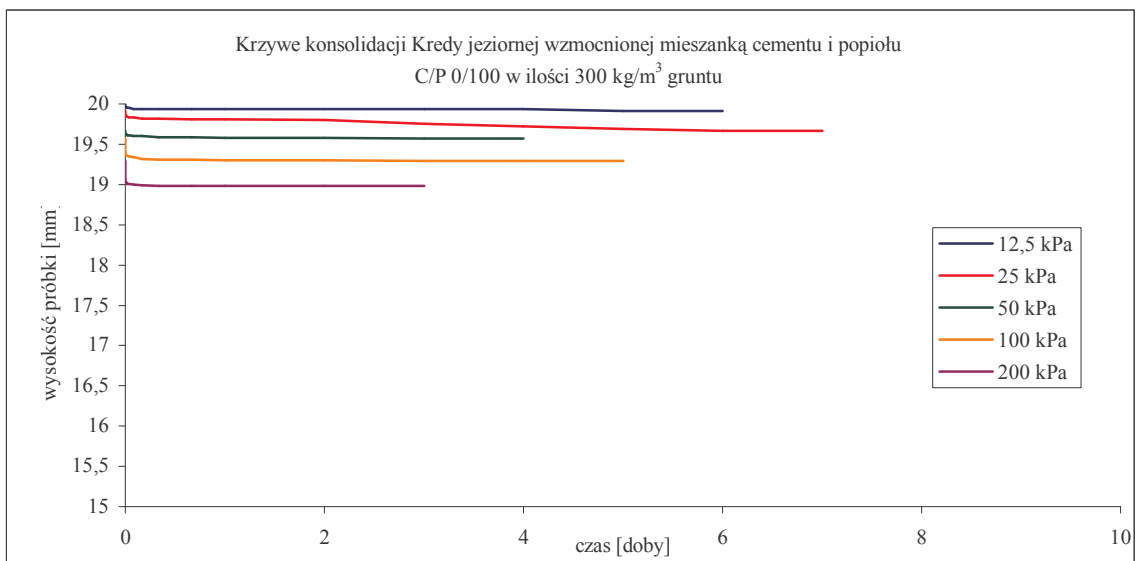
Rys. 5.35 Krzywe konsolidacji namu wzmocnionego mieszanką C/P 100/0 w ilości 300 kg/m³.



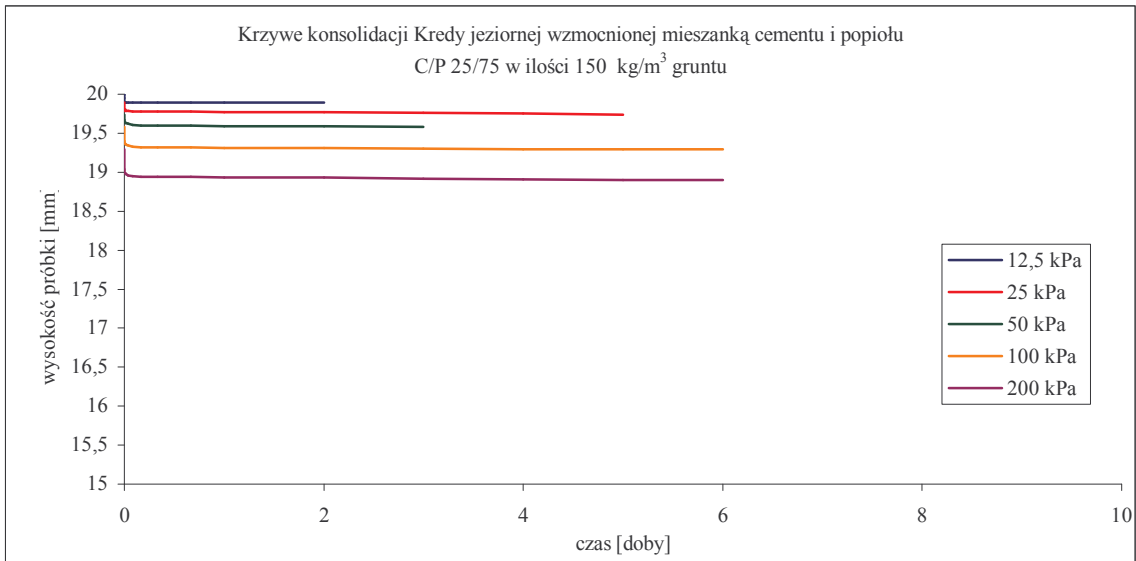
Rys. 5.36 Krzywe konsolidacji kredy wzmocnionej mieszanką C/P 0/100 w ilości 150 kg/m³.



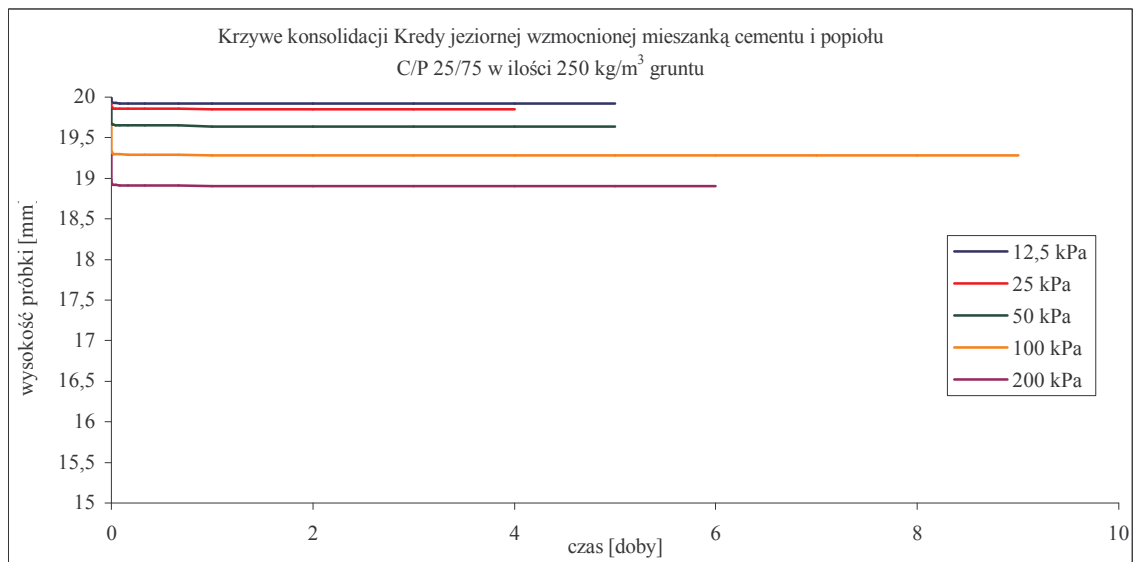
Rys. 5.37 Krzywe konsolidacji kredy wzmocnionej mieszanką C/P 0/100 w ilości 250 kg/m³.



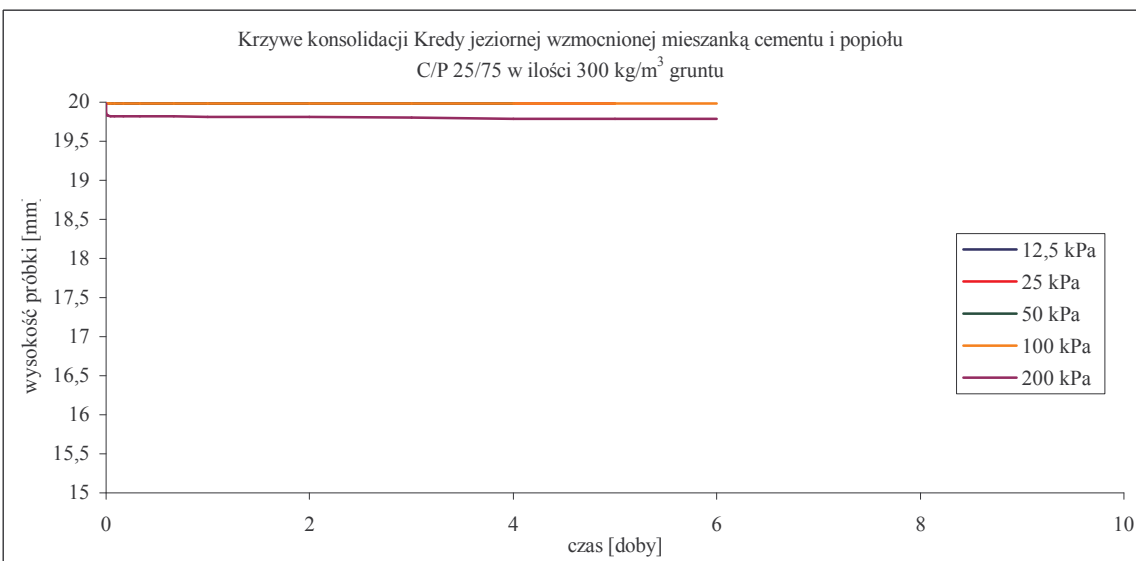
Rys. 5.38 Krzywe konsolidacji kredy wzmocnionej mieszanką C/P 0/100 w ilości 300 kg/m³.



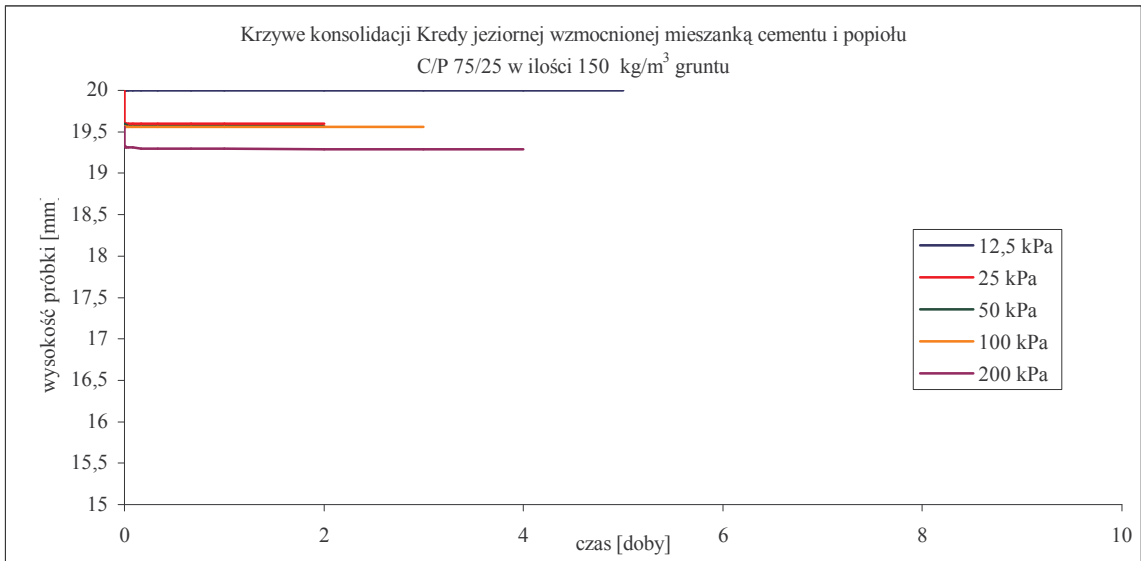
Rys. 5.39 Krzywe konsolidacji kredy wzmocnionej mieszanką C/P 25/75 w ilości 150 kg/m³.



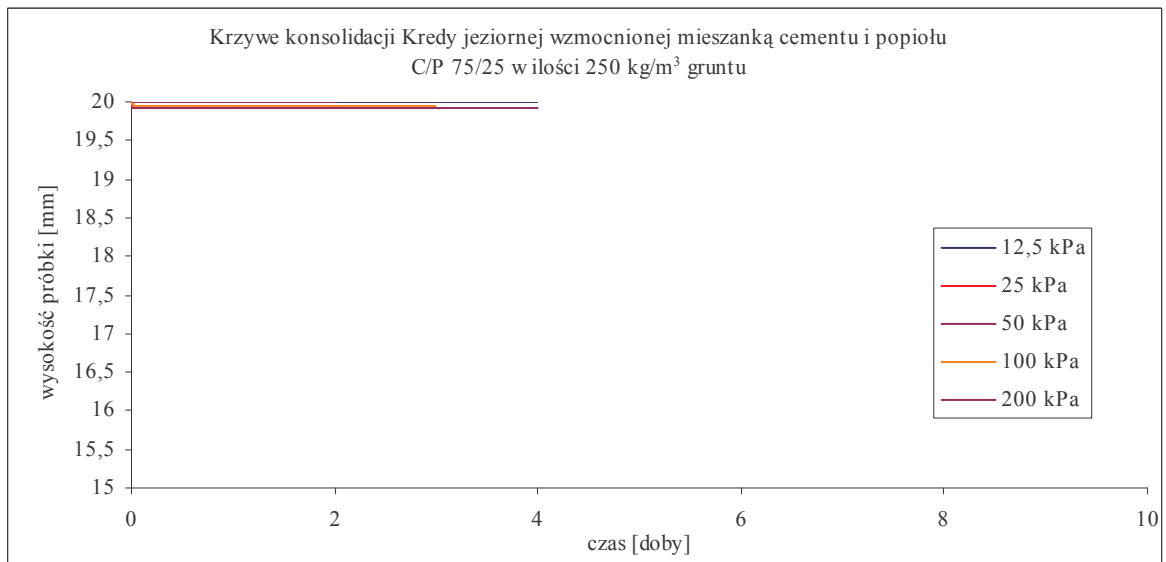
Rys. 5.40 Krzywe konsolidacji kredy wzmocnionej mieszanką C/P 25/75 w ilości 250 kg/m³.



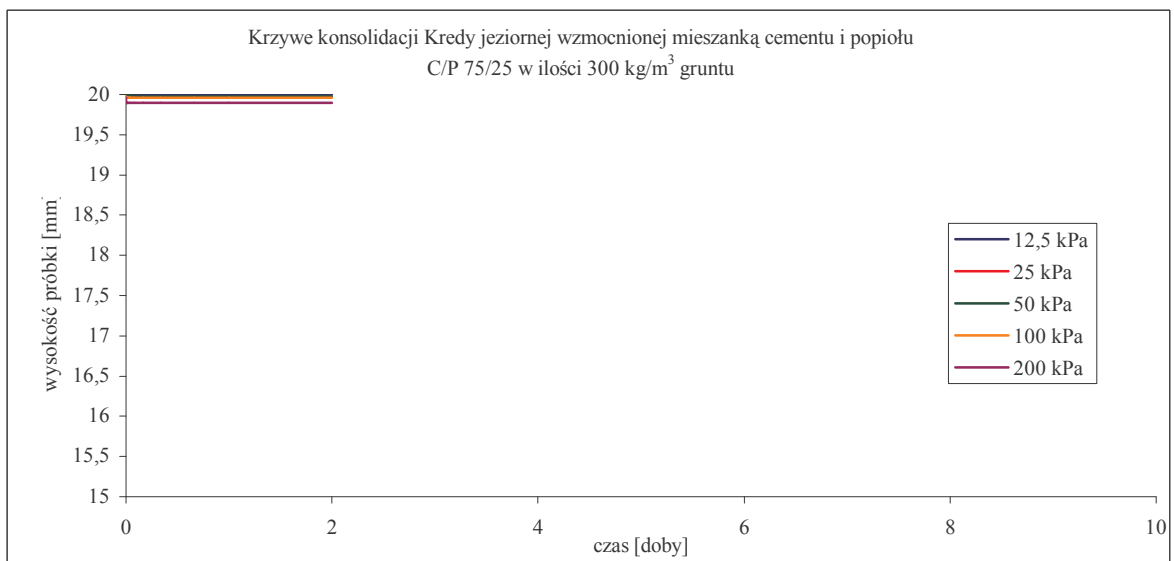
Rys. 5.41 Krzywe konsolidacji kredy wzmocnionej mieszanką C/P 25/75 w ilości 300 kg/m³.



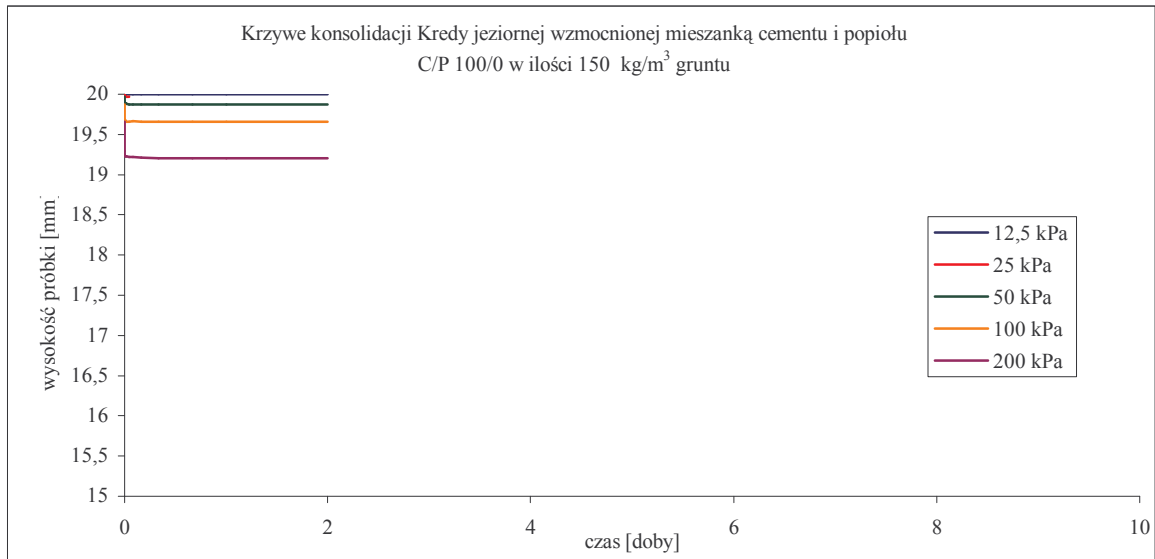
Rys. 5.42 Krzywe konsolidacji kredy wzmocnionej mieszanką C/P 75/25 w ilości 150 kg/m³.



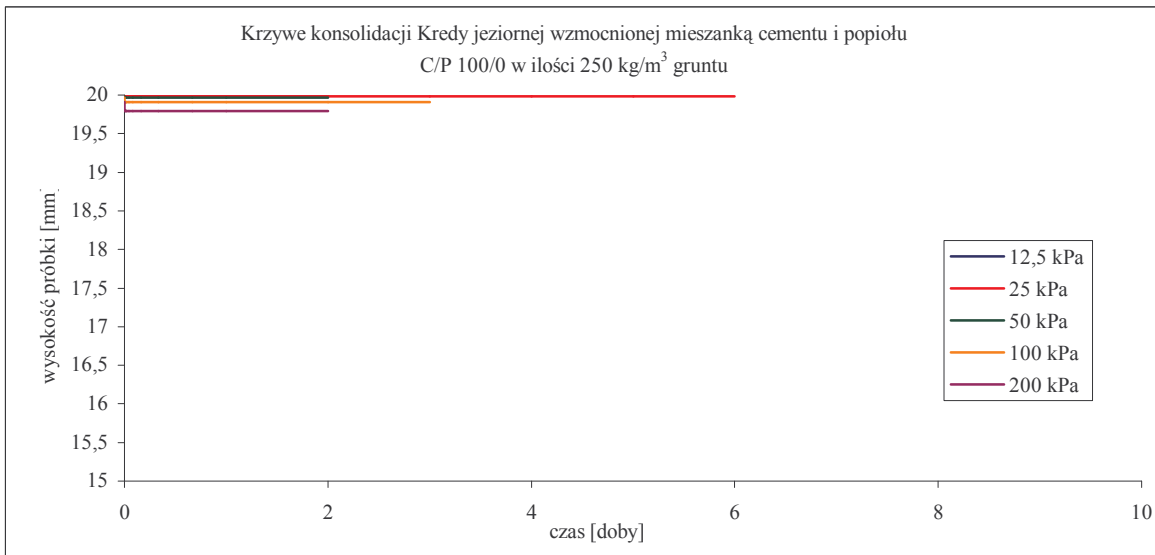
Rys. 5.43 Krzywe konsolidacji kredy wzmocnionej mieszanką C/P 75/25 w ilości 250 kg/m³.



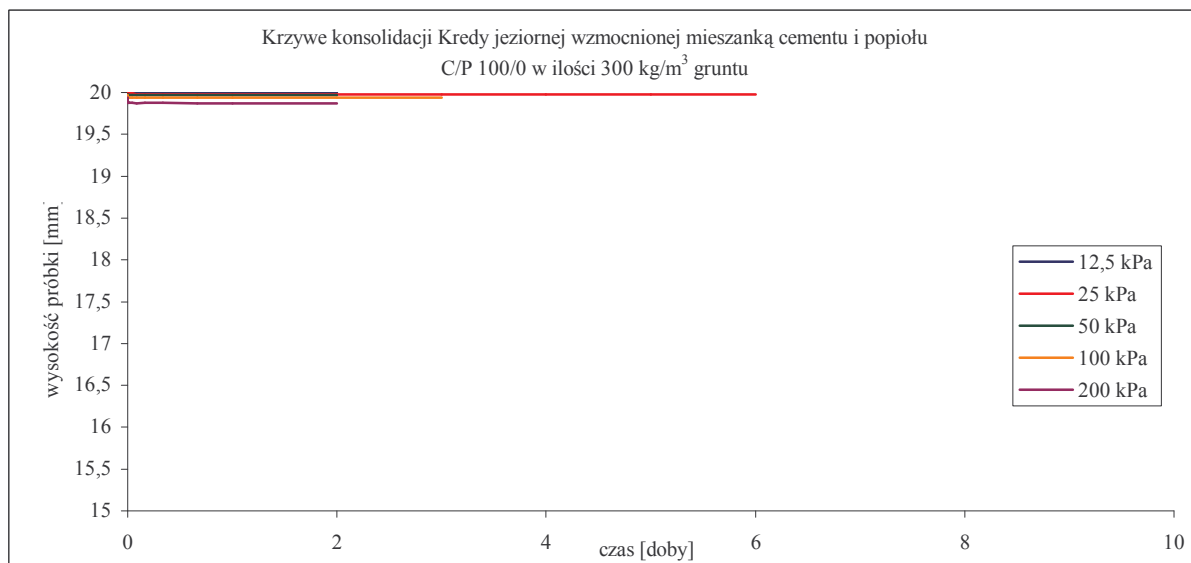
Rys. 5.44 Krzywe konsolidacji kredy wzmocnionej mieszanką C/P 75/25 w ilości 300 kg/m³.



Rys. 5.45 Krzywe konsolidacji kredy wzmocnionej mieszanką C/P 100/0 w ilości 150 kg/m³.



Rys. 5.46 Krzywe konsolidacji kredy wzmocnionej mieszanką C/P 100/0 w ilości 250 kg/m³.



Rys. 5.47 Krzywe konsolidacji kredy wzmocnionej mieszanką C/P 100/0 w ilości 300 kg/m³.

Na podstawie wykresów krzywych konsolidacji gruntów naturalnych i wzmocnionych, sporządzono wykresy ścisłości (rys 5.30 do 5.47), oraz obliczono wartości edometrycznych modułów ścisłości. Wartości modułów ścisłości pierwotnej podano w tablicach nr 5.4 do 5.6.

Wartość modułów ścisłości pierwotnej do 1 MPa można założyć jako wartość graniczną, poniżej której nie ma sensu wykonywania wzmocnienia kolumnami, gdyż w takim przypadku grunt można traktować jako skrajnie ścisły. W takim przypadku można mówić jedynie o zastosowaniu stabilizacji masowej całej objętości gruntu organicznego. Przedstawione wyniki badań wykazują, że najlepszym gruntem do ulepszania okazała się kreda jeziorna. Stabilizacja samym popiołem dała wartości modułu ścisłości powyżej wartości granicznej. Wartość modułu ścisłości powyżej 1 MPa dla namułu osiągnięto dopiero wtedy, gdy w mieszance stabilizującej cement jest środkiem przeważającym lub, gdy cement i popiół lotny są równowadze, a ilość stabilizatora wynosi 300 kg na metr sześcienny gruntu naturalnego. Natomiast ulepszanie torfu dało zadowalające wyniki, gdy ilość samego cementu wynosiła 250 i więcej kg na metr sześcienny gruntu.

Zmienność modułów ścisłości gruntów ulepszonych ze wzrostem naprężenia jest nietypowa w porównaniu do gruntów naturalnych gdyż nie następuje wyraźny wzrost wartości modułów ze wzrostem naprężenia. Spowodowane to może być załamaniem się nowo powstałego szkieletu gruntu stabilizowanego. Tym niemniej obserwuje się we wszystkich badanych gruntach istotny wzrost wartości modułów w porównaniu z gruntami naturalnymi podanymi badaniami.

Tablica 5.4 Wartości modułu ścisłości pierwotnej torfu naturalnego i wzmocnionego.

Wartość obciążenia, [kPa]	Wartości modułów ścisłości TORFU, M_o , [MPa]								
	próbka 1	próbka 2	próbka 1	próbka 2	próbka 1	próbka 2	próbka 1	próbka 2	
	grunt naturalny		grunt stabilizowany C/P 100/0						
				150 kg/m ³	150 kg/m ³	250 kg/m ³	250 kg/m ³	300 kg/m ³	300 kg/m ³
12,5÷25	0,2	0,2	1,3	0,9	12,5	3,8	12,5	24,9	
25÷50	0,3	0,3	1,5	9,1	8,3	4,1	19,9	16,2	
50÷100	0,5	0,3	2,2	0,6	6,0	4,2	15,3	18,7	
100÷200	0,6	0,6	0,6	0,7	23,2	4,4	14,7	17,3	

Tablica 5.5 Wartości modułu ścisłości pietwotnej namułu gliniastego naturalnego i wzmocnionego.

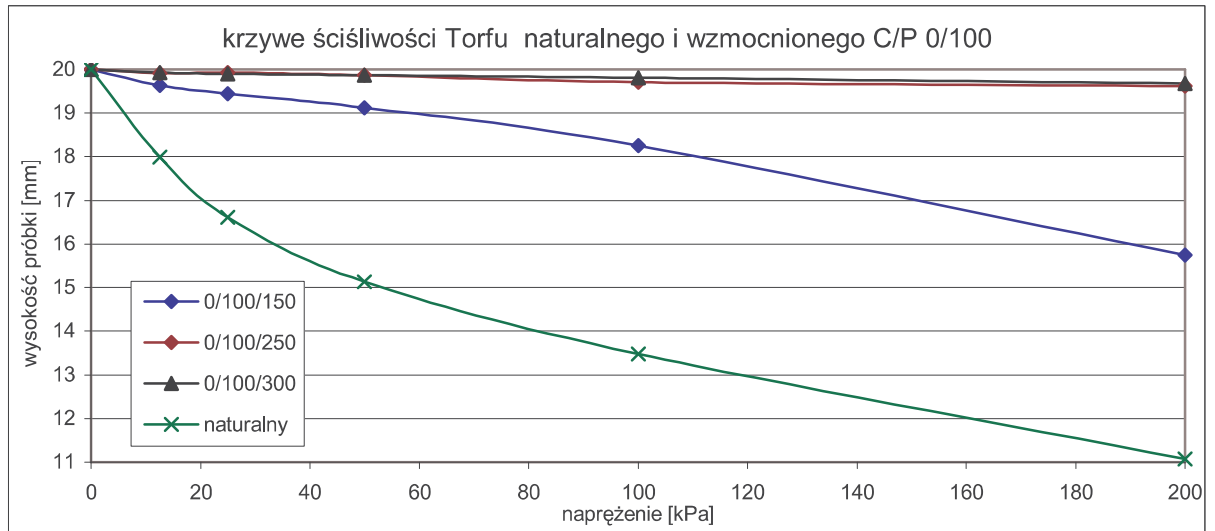
Wartość obciążen, [kPa]	Wartości modułów ścisłości NAMUŁU Mo , [MPa]								
	grunt naturalny	C/P 0/100	C/P 0/100	C/P 25/75	C/P 25/75	C/P 50/50	C/P 50/50	C/P 100/0	C/P 100/0
		150 kg/m ³	300 kg/m ³	150 kg/m ³	300 kg/m ³	150 kg/m ³	300 kg/m ³	150 kg/m ³	300 kg/m ³
12,5 ÷ 25	0,3	0,4	0,5	0,4	0,6	0,7	2,1	4,2	6,2
25 ÷ 50	0,4	0,4	0,4	0,4	0,9	0,9	2,4	3,3	12,5
50 ÷ 100	0,5	0,7	1,5	1,5	1,6	1,5	1,7	3,5	33,2
100 ÷ 200	1,4	2,1	3,6	3,6	2,8	1,7	2,5	3,6	24,9

Tablica 5.6 Wartości modułu ścisłości pierwotnej kredy jeziornej naturalnej i wzmocnionej.

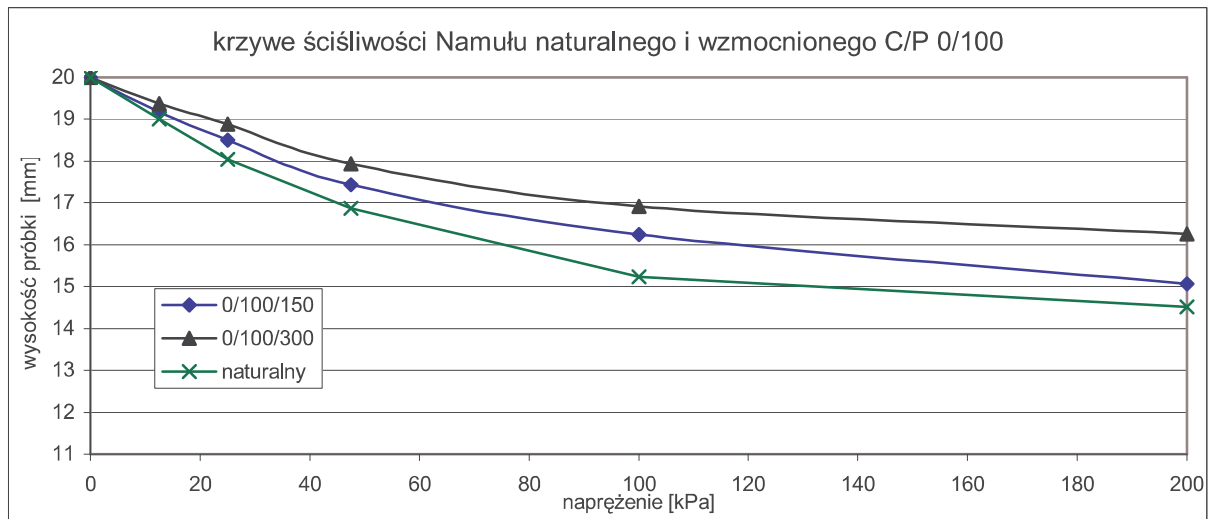
Wartość obciążen, [kPa]	Wartości modułów ścisłości KREDY Mo , [MPa]							
	grunt naturalny	C/P 0/100	C/P 0/100	C/P 25/75	C/P 25/75	C/P 50/50	C/P 50/50	C/P 50/50
		150 kg/m ³	300 kg/m ³	150 kg/m ³	300 kg/m ³	150 kg/m ³	250 kg/m ³	300 kg/m ³
12,5 ÷ 25	0,4	0,9	1,3	1,9	-	2,9	4,4	2,1
25 ÷ 50	0,8	2,2	2,1	2,7	16,5	3,7	5,5	2,4
50 ÷ 100	1,2	3,9	3,1	3,4	22,2	3,6	4,1	1,7
100 ÷ 200	1,9	6,9	5,4	4,9	14,1	3,9	4,2	2,5

c.d. Tablicy 5.6

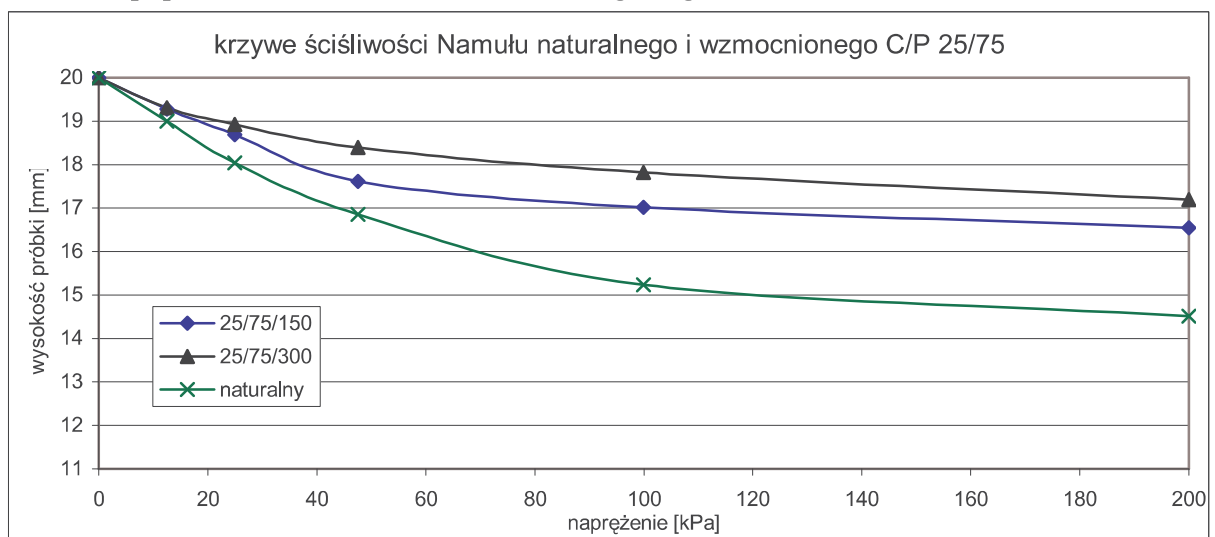
Wartość obciążen, [kPa]	Wartości modułów ścisłości KREDY Mo , [MPa]				
	C/P 75/25	C/P 75/25	C/P 75/25	C/P 100/0	C/P 100/0
	150 kg/m ³	250 kg/m ³	300 kg/m ³	250 kg/m ³	300 kg/m ³
12,5 ÷ 25	10,7	8,3	12,5	25	25
25 ÷ 50	12,5	5,0	49,9	71,4	49,9
50 ÷ 100	12,4	4,7	33,3	30,3	49,9
100 ÷ 200	10,4	4,3	28,5	49,9	33,3



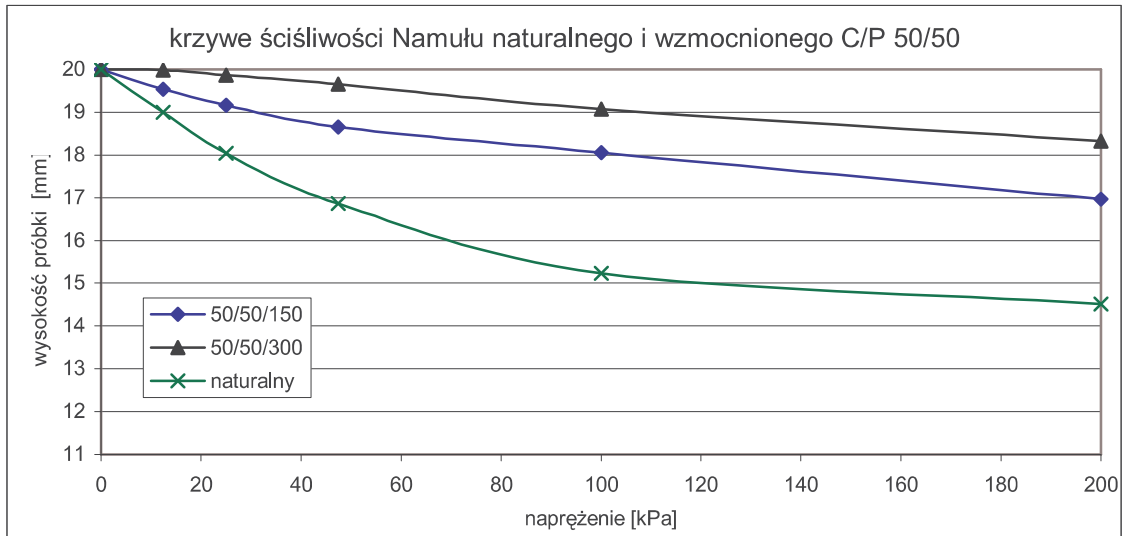
Rys. 5.48 Krzywe ściśliwości torfu naturalnego oraz wzmocnionego mieszanką cementu i popiołu C/P 0/100 i ilości 150, 250 i 300 kg/m³ gruntu.



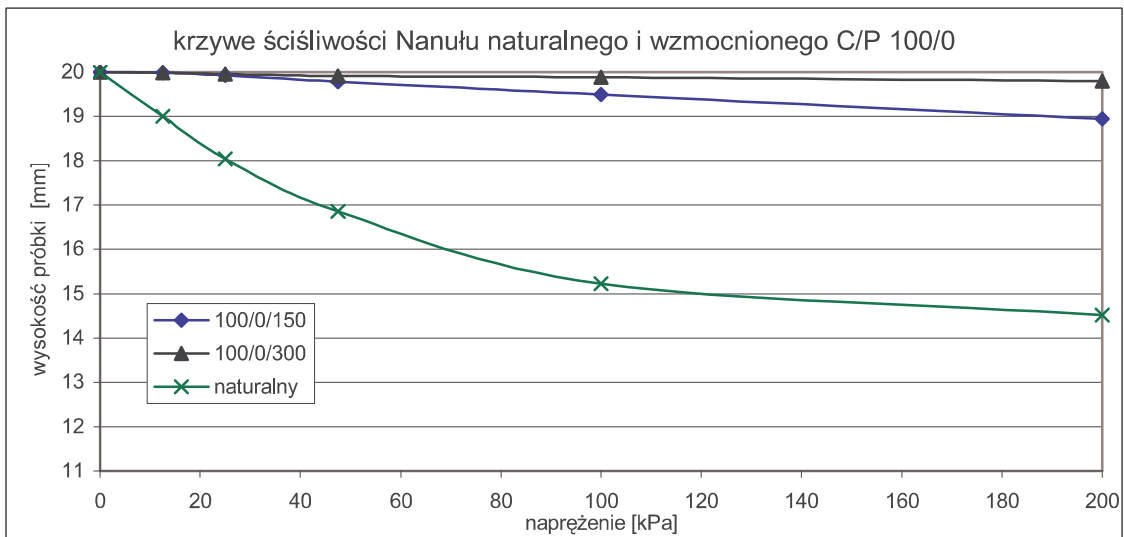
Rys. 5.49 Krzywe ściśliwości namułu naturalnego oraz wzmocnionego mieszanką cementu i popiołu C/P 0/100 i ilości 150 i 300 kg/m³ gruntu.



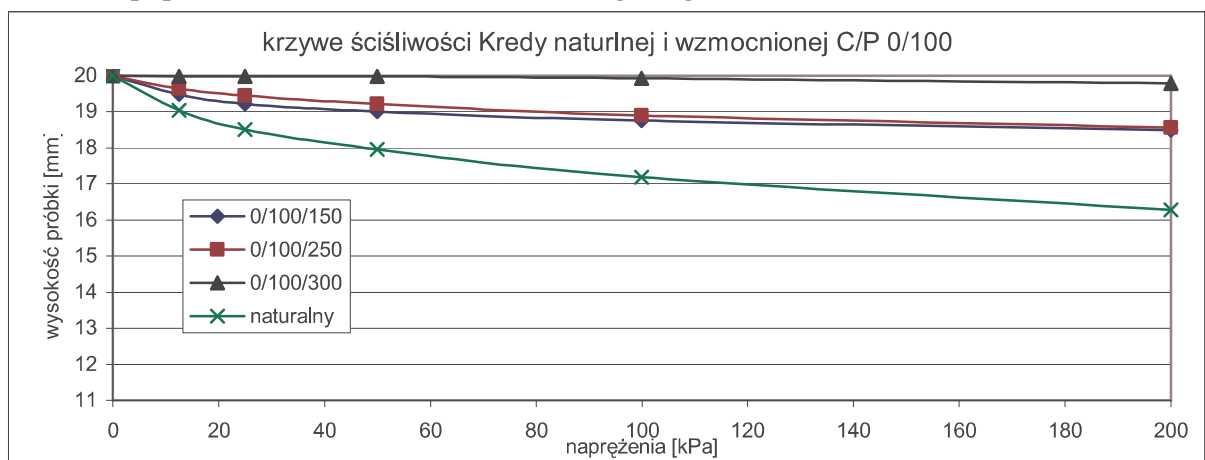
Rys. 5.50 Krzywe ściśliwości namułu naturalnego oraz wzmocnionego mieszanką cementu i popiołu C/P 25/75 i ilości 150 i 300 kg/m³ gruntu.



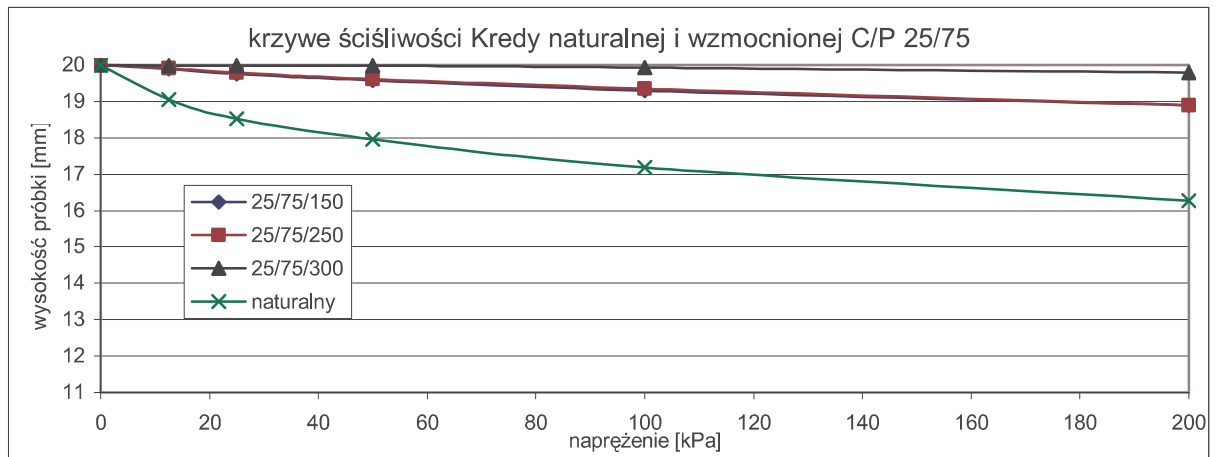
Rys. 5.51 Krzywe ścisłości namulu naturalnego oraz wzmocnionego mieszanką cementu i popiołu C/P 50/50 i ilości 150 i 300 kg/m³ gruntu.



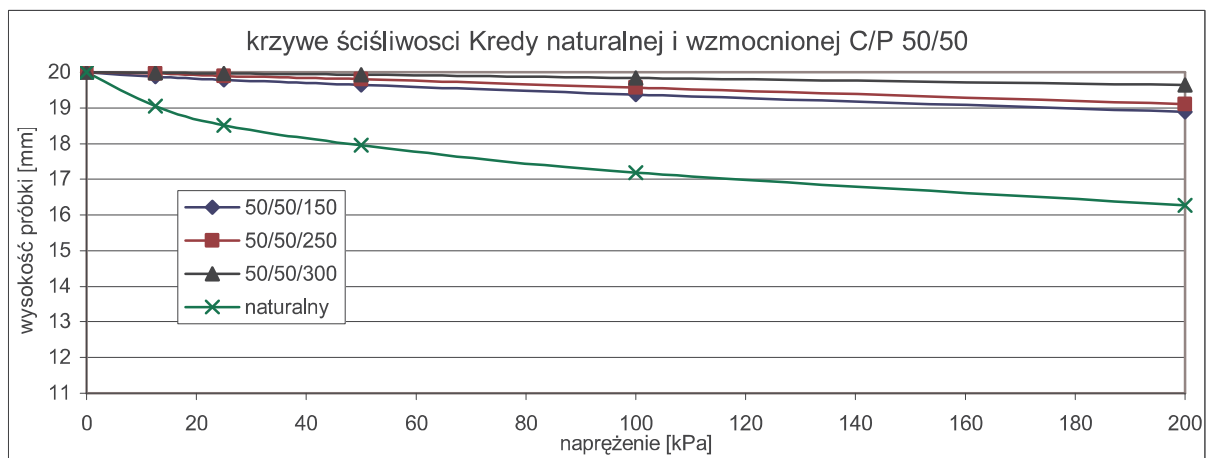
Rys. 5.52. Krzywe ścisłości namulu naturalnego oraz wzmocnionego mieszanką cementu i popiołu C/P 100/0 i ilości 150 i 300 kg/m³ gruntu.



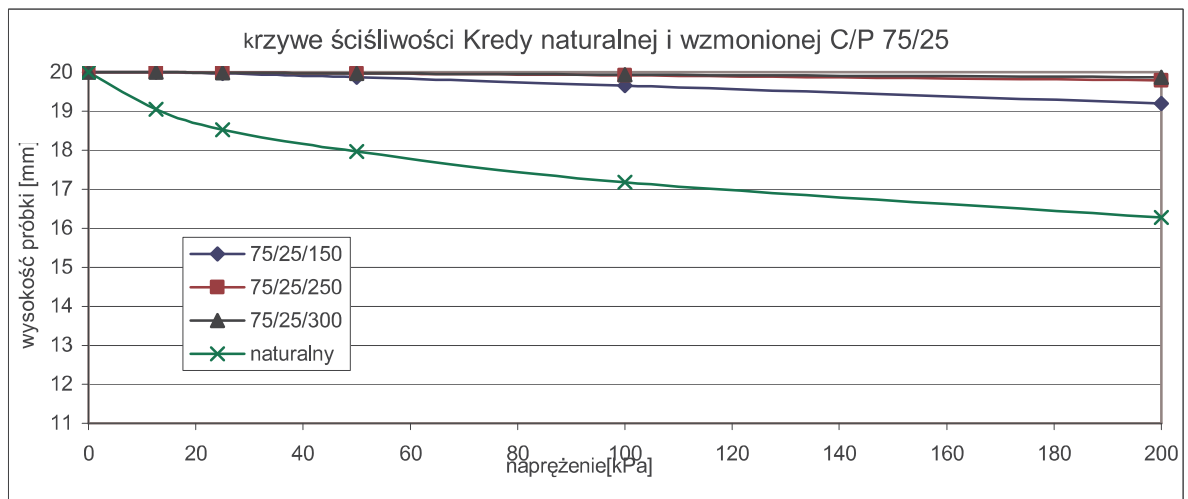
Rys. 5.53 Krzywe ścisłości kredy naturalnej oraz wzmocnionej mieszanką cementu i popiołu C/P 0/100 i ilości 150, 250 i 300 kg/m³ gruntu.



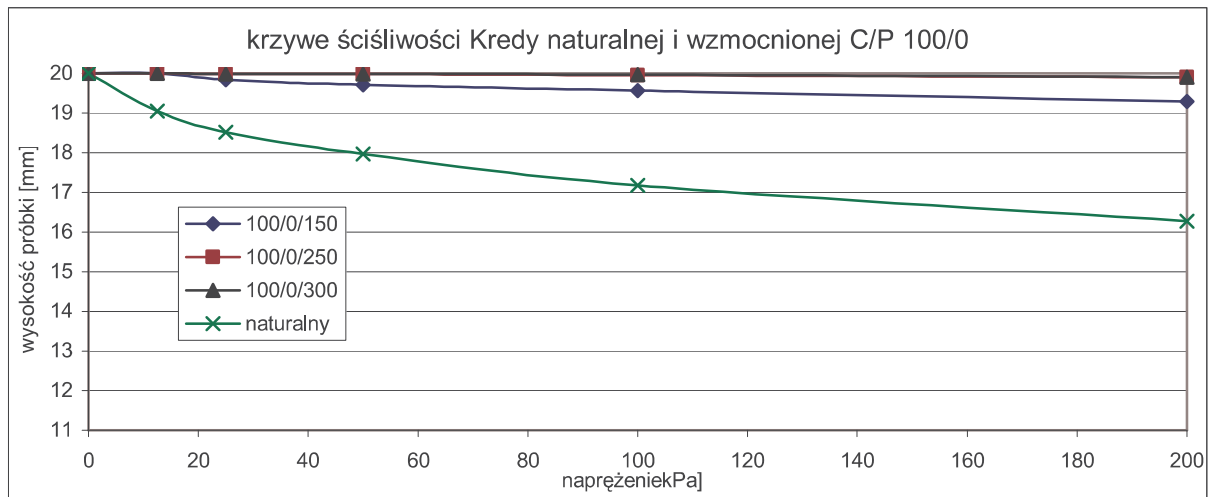
Rys. 5.54 Krzywe ściśliwości kredy naturalnej oraz wzmocnionej mieszanką cementu i popiołu C/P 25/75 i ilości 150, 250 i 300 kg/m³ gruntu.



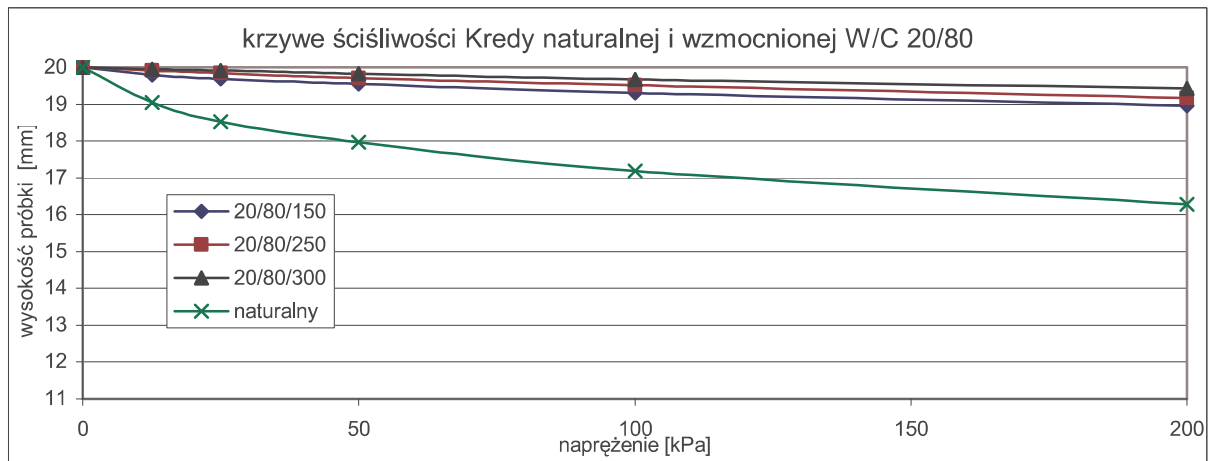
Rys. 5.55 Krzywe ściśliwości kredy naturalnej oraz wzmocnionej mieszanką cementu i popiołu C/P 50/50 i ilości 150, 250 i 300 kg/m³ gruntu.



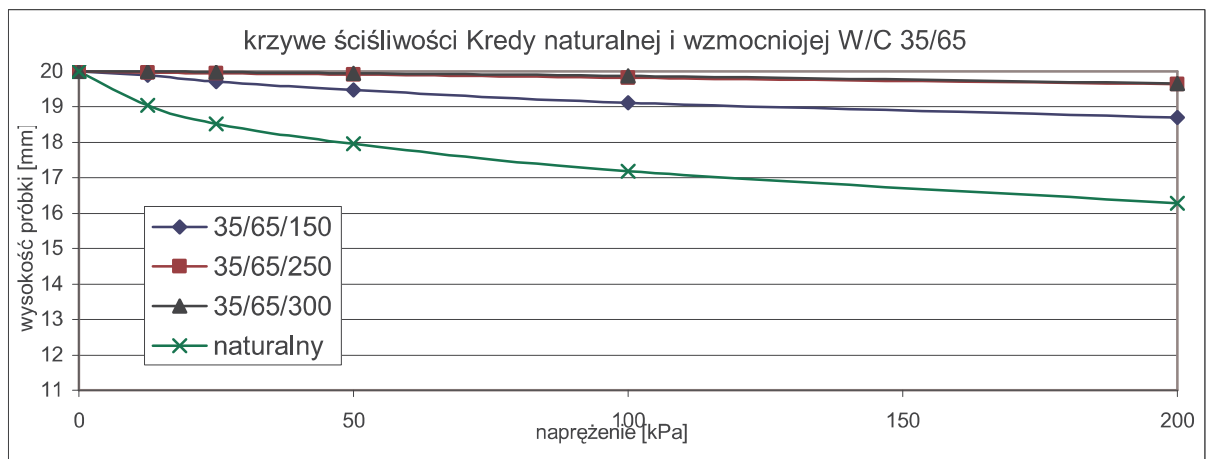
Rys. 5.56 Krzywe ściśliwości kredy naturalnej oraz wzmocnionej mieszanką cementu i popiołu C/P 75/25 i ilości 150, 250 i 300 kg/m³ gruntu.



Rys. 5.57 Krzywe ściśliwości kredy naturalnej oraz wzmocnionej mieszanką cementu i popiołu C/P 100/0 i ilości 150, 250 i 300 kg/m³ gruntu.



Rys. 5.58 Krzywe ściśliwości kredy naturalnej oraz wzmocnionej mieszanką wapna i cementu W/C 20/80 i ilości 150, 250 i 300 kg/m³ gruntu.



Rys. 5.59 Krzywe ściśliwości kredy naturalnej oraz wzmocnionej mieszanką wapna i cementu W/C 35/65 i ilości 150, 250 i 300 kg/m³ gruntu.

Wykresy przedstawiają zmianę zachowania się gruntów wzmocnionych stosunku do gruntów naturalnych pod obciążeniem. Przedstawione krzywe ścisłości gruntów naturalnych w porównaniu z krzywymi ścisłości gruntów ulepszonych, obrazują efekt wzmocnienia gruntów. Wyraźny efekt wzmocnienia gruntów widoczny jest na wszystkich krzywych ścisłości. Schemat wzmocniania gruntu naturalnego najbardziej widoczny jest na krzywych ścisłości namułu (rys. 5.48 do 5.60). Zmiana rodzaju oraz ilości środka stabilizującego wpływa nie tylko na zmniejszenie ścisłości próbki, ale również na zmianę charakteru krzywej. Nietypowy charakter krzywych ścisłości gruntów ulepszonych sugeruje powstanie nowego stałego związku chemicznego.

5.3 Badanie derywatograficzne.

Wyniki badań derywatograficznych gruntów zostały przedstawione w postaci derywatogramów na rys. 5.58 do 5.61. W przypadku gruntów wzmocnionych, gdzie ilość naważki wynosiła odpowiednio 733 i 818 mg, zastosowano skalę przeliczeniową dla krzywych TG.

Analizując derywatogramy (rys 5.60 oraz rys. 5.61) kredy naturalnej i wzmocnionej cementem, widać największy ubytek masy na krzywej TG z charakterystycznym załamaniem pod kątem prostym. Gwałtowne załamanie jest charakterystyczne dla węglanów. Odczytując wartości dehydratacji oraz zawartości substancji organicznych możemy określić ilość kalcytu. Na wykresie zaznaczono charakterystyczne punkty. Różnica wartości pomiędzy poszczególnymi reakcjami pozwala określić wartości: dehydratacji, substancji organicznej i zawartości kalcytu. Zestawienie tych wartości przedstawiono w tablicach 5.7 i 5.8.

Tablica 5.7 Zestawienie wyników analizy derywatograficznej kredy jeziornej.

	dehydratacja [% wag]	substancja organiczna [% wag]	kalcyt [% wag]
kreda naturalna	1,0	$4,2 - 1 = 3,2$	$(40,2 - 4,2) * 2,274 = 81,86$
kreda wzmocniona	1,0	$2,5 - 1,0 = 1,5$	$(19,2 - 2,5) * 2,274 = 38,20$
RÓŻNICA	0,0	0,7	43,66

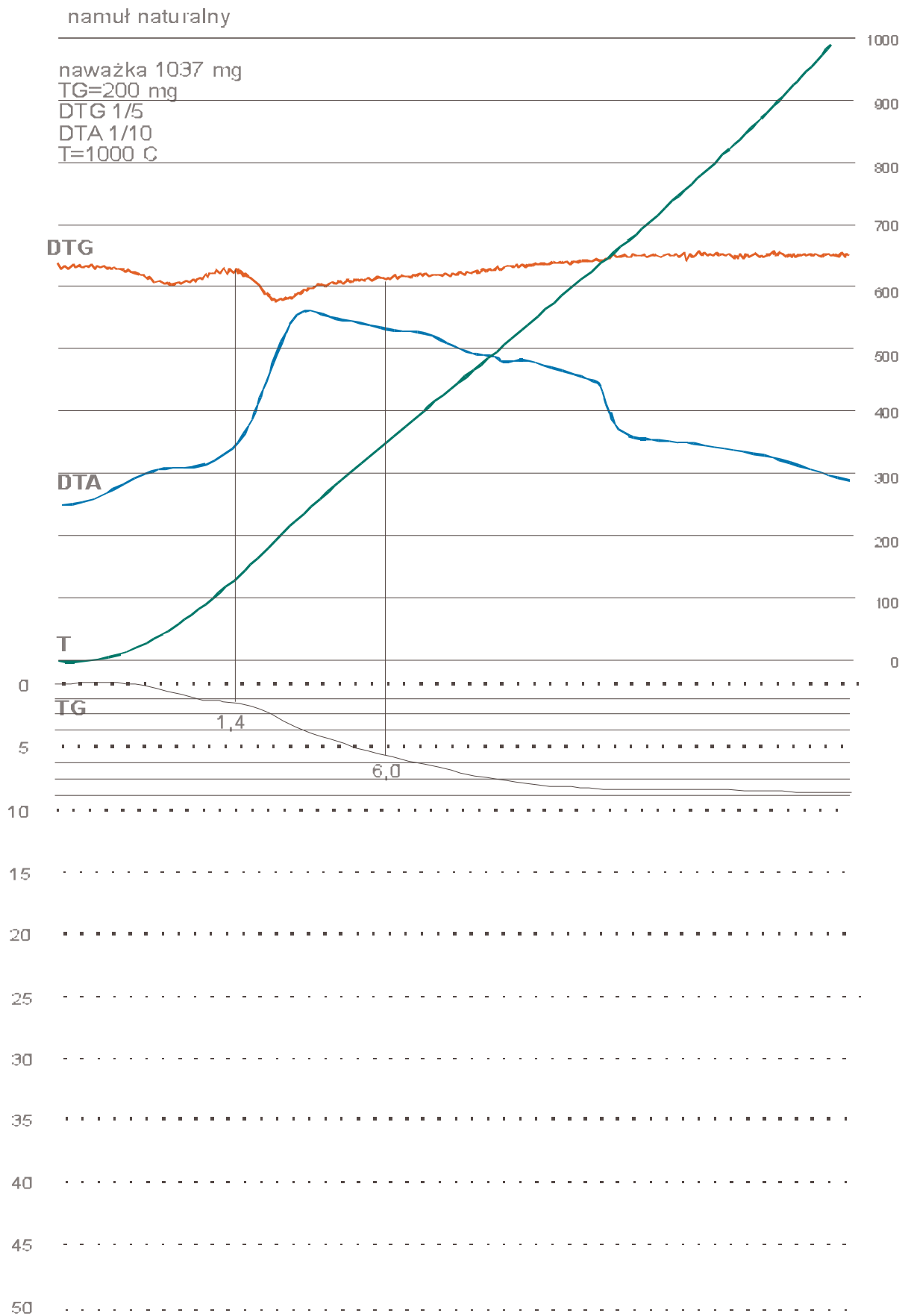
Z analizy uzyskanych rezultatów jednoznacznie wynika, że 43,66 % wag kalcytu zostało związane z cementem i utworzyło nowy stały związek chemiczny trudny na tym etapie badań do rozpoznania. Analogicznie przeprowadzono analizę derywatogramów namułu wzmocnionego oraz dla porównania naturalnego (rys. 5.58 i rys. 5.59).

Tablica 5.8 Zestawienie wyników analizy derywatograficznej namułu gliniastego.

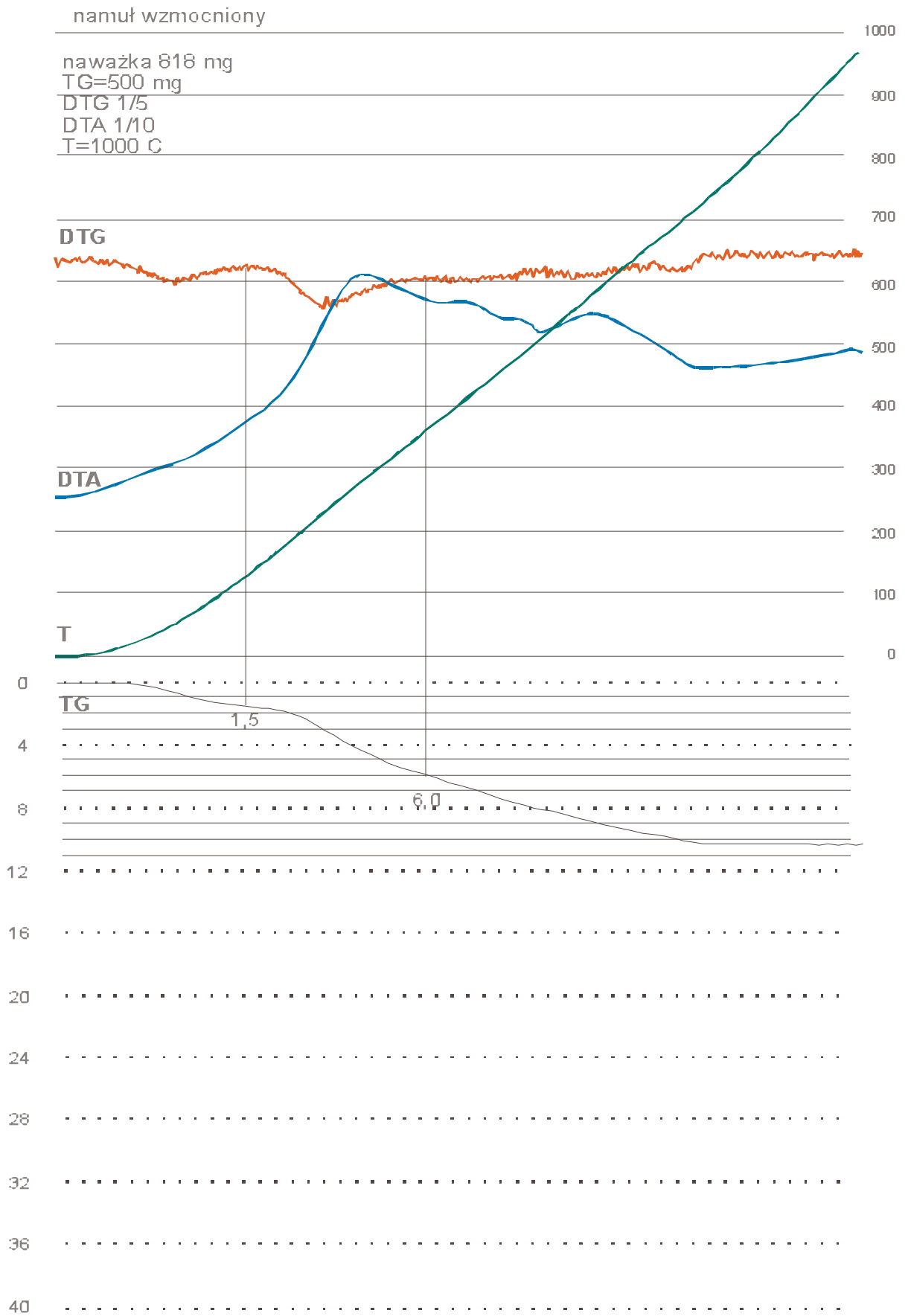
	dehydratacja [% wag]	substancja organiczna [% wag]
namuł naturalny	1,4	$6,0 \div 1,4 = 4,6$
namuł wzmocniony	1,5	$6 \div 1,5 = 4,5$
RÓŻNICA	0,1	0,1

Porównując derywatogramy namułu naturalnego ze wzmocnionym, nie ma tak widocznych różnic jak w przypadku kredy. Na wykresach tych przebieg poszczególnych krzywych jest podobny. Wyniki badań zestawiono w tablicy 5.8.

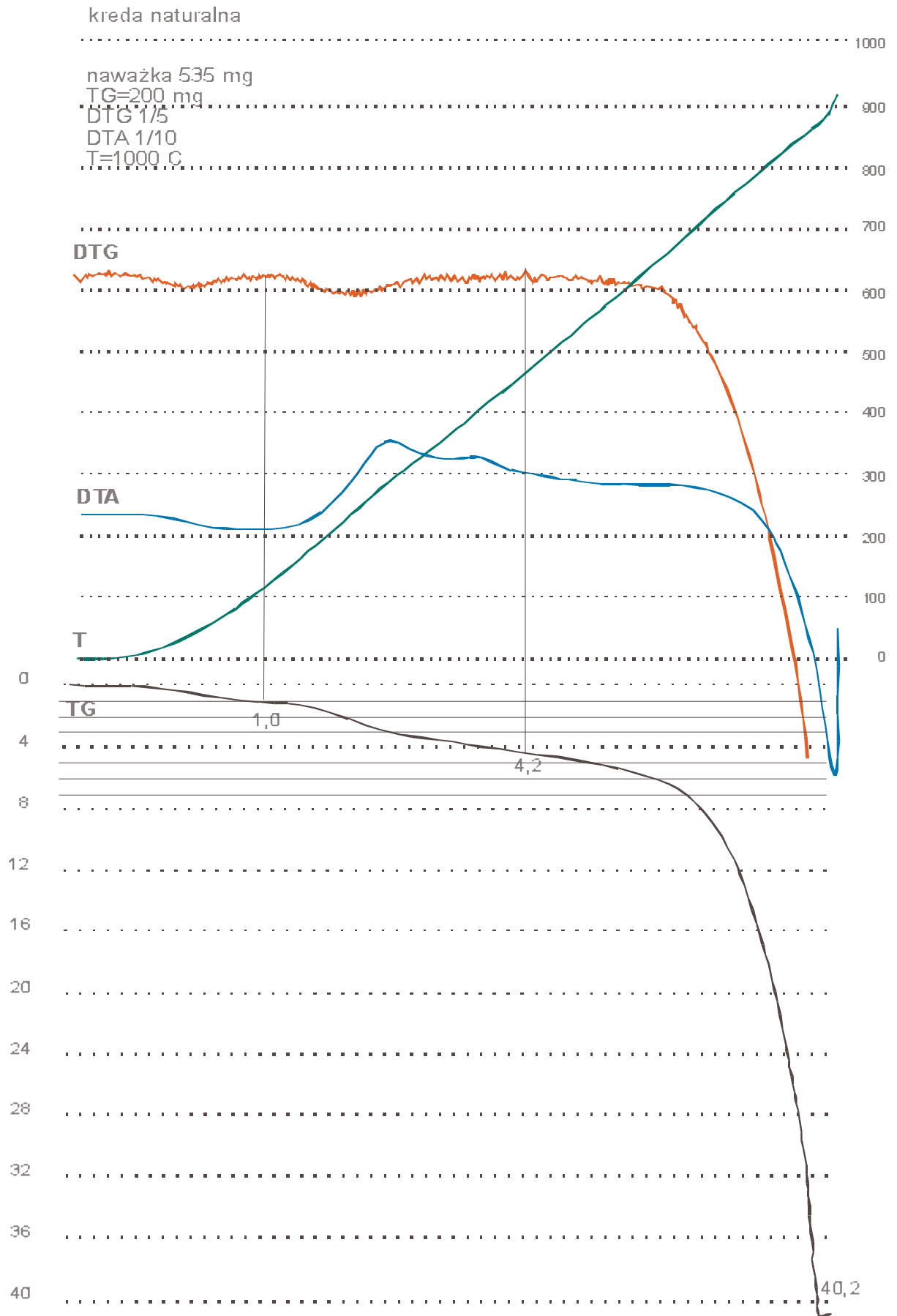
Niewielkie różnice dehydratacji oraz substancji organicznych w namule i kredzie są prawdopodobnie spowodowane tym, że w czasie prowadzenia badań następowała zmiana wilgotności środowiska, w którym przeprowadzono badania. Jednakże zmiana ta nie ma większego wpływu na poprawność badania.



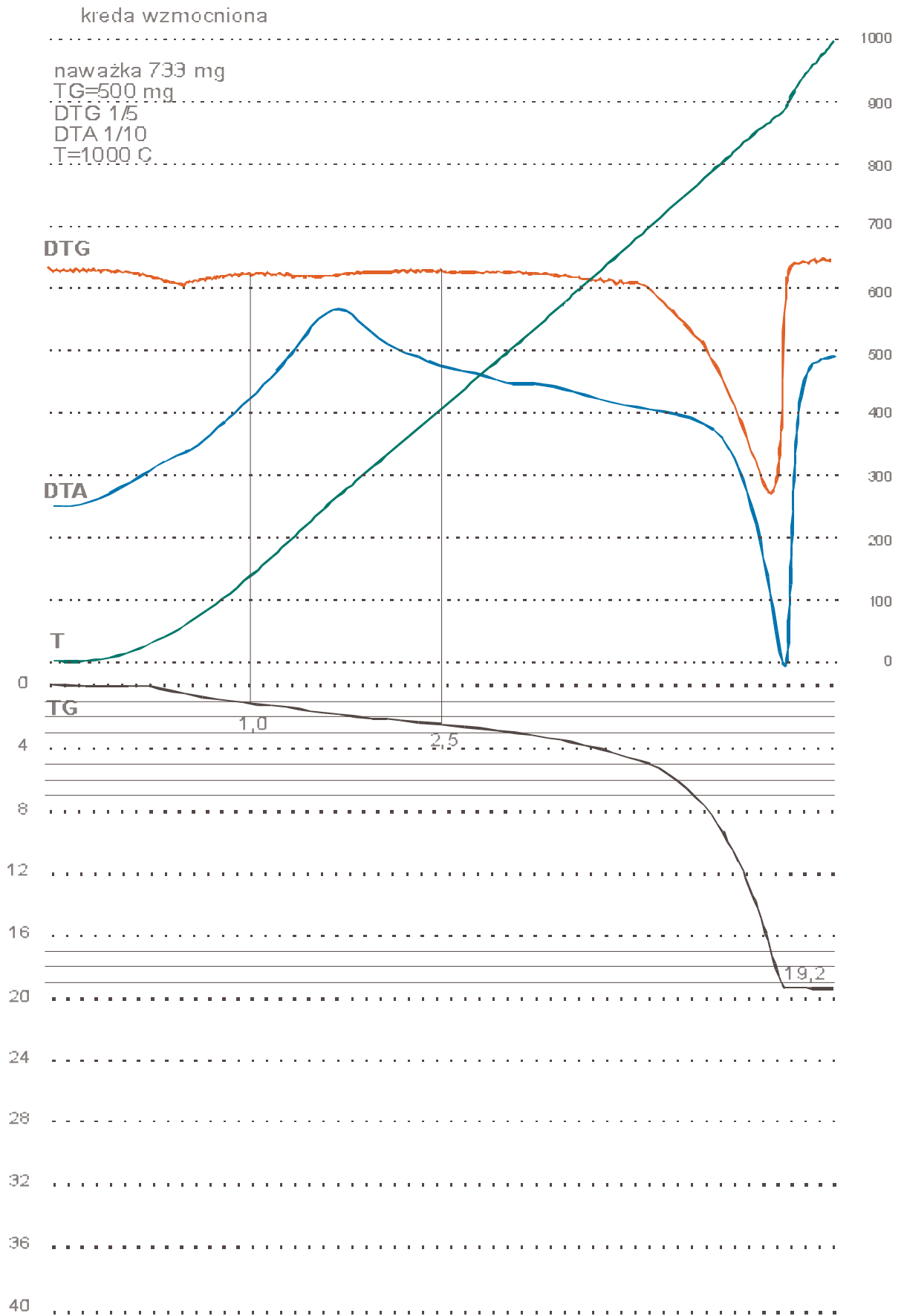
Rys. 5.58 Derywatogram naturalnego namułu gliniastego.



Rys. 5.59 Derywatogram wzmocnionego namułu gliniastego.



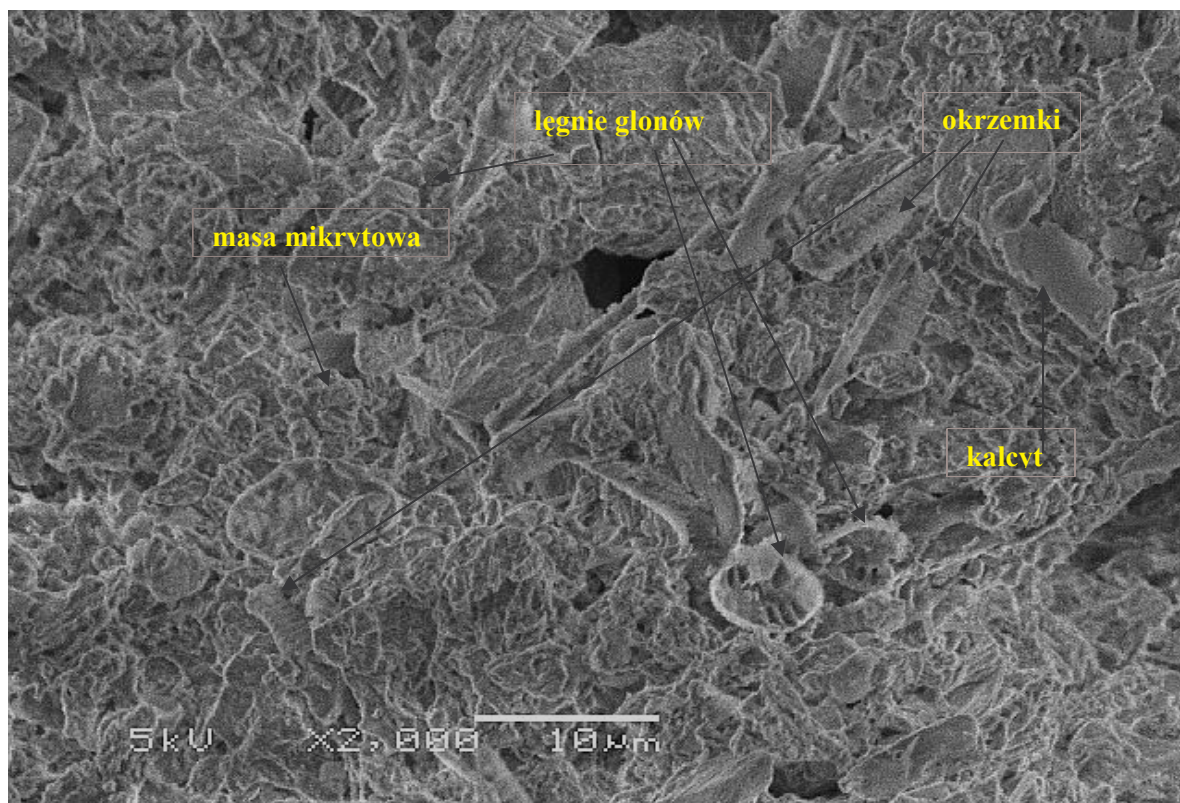
Rys. 5.60 Derywatogram naturalnej kredy jeziornej.



Rys. 5.61 Derywatogram wzmocnionej kredy jeziornej.

5.4 Badanie strukturalne (badania elektromikroskopowe).

Obserwacje mikroskopowe, wykonano według procedury opisanej w rozdziale 4.8. Do analizy wybrano zdjęcia, na których powiększenie próbki gruntów wynosiło od 500 do 2500 razy. Analiza dotyczyła gruntów wzmocnionych oraz dla porównania gruntów naturalnych.



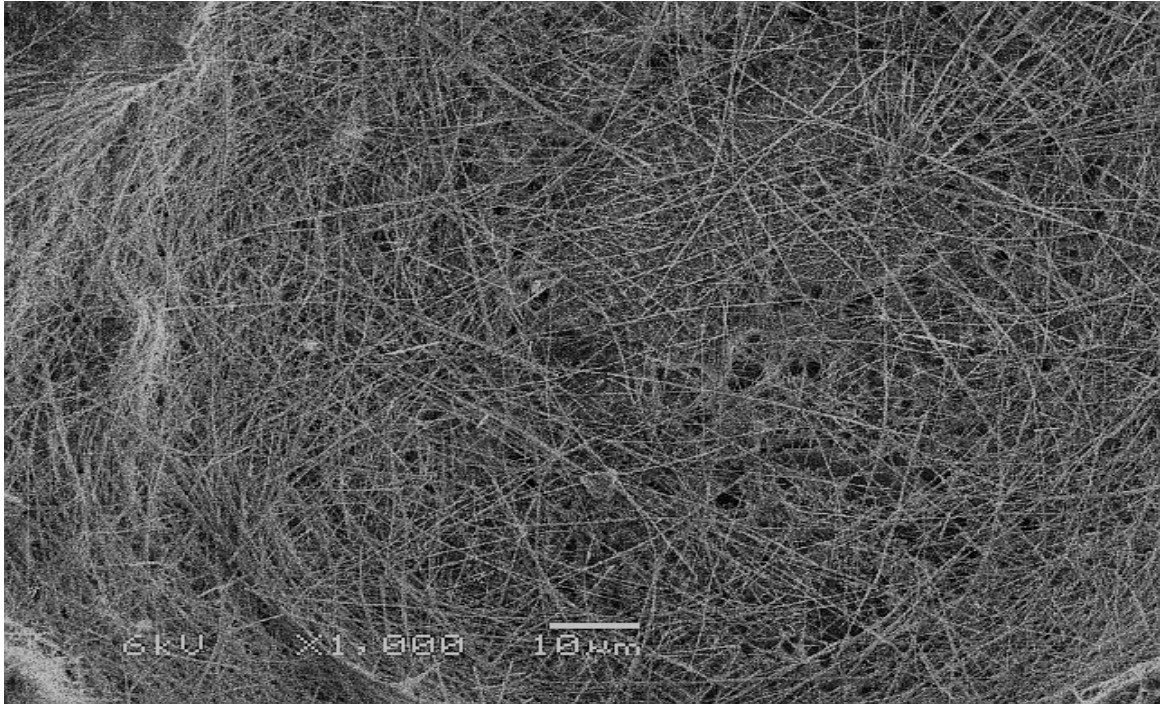
Rys.5.62 Zdjęcie naturalnej kredy jeziornej.

Zdjęcie (rys. 5.62) przedstawia naturalną porowatą strukturę kredy jeziornej. Główną amorficzną (nie krystaliczną) masę kredy stanowi masa mikrytowa kalcytu z fragmentami wapiennych inkluzji⁵ glonów. Akcesoryczne⁶ składniki to kryształy kalcytu, pyłki, okrzemki oraz łęganie glonów⁷ puste w środku powlekane kalcytem. Kryształy kalcytu, drobniejsze od kryształów minerałów ilastych, wielkości $1 \div 3 \mu\text{m}$. Mikropory o izometrycznym kształcie, wielkości około $5 \mu\text{m}$, sporadyczne i chaotycznie rozmieszczone, nie łączą się ze sobą.

⁵ za inkluzje uważa się każde obce ciało stałe, ciekłe lub gazowe zawarte w masie kryształu, niezależnie od jego pochodzenia.

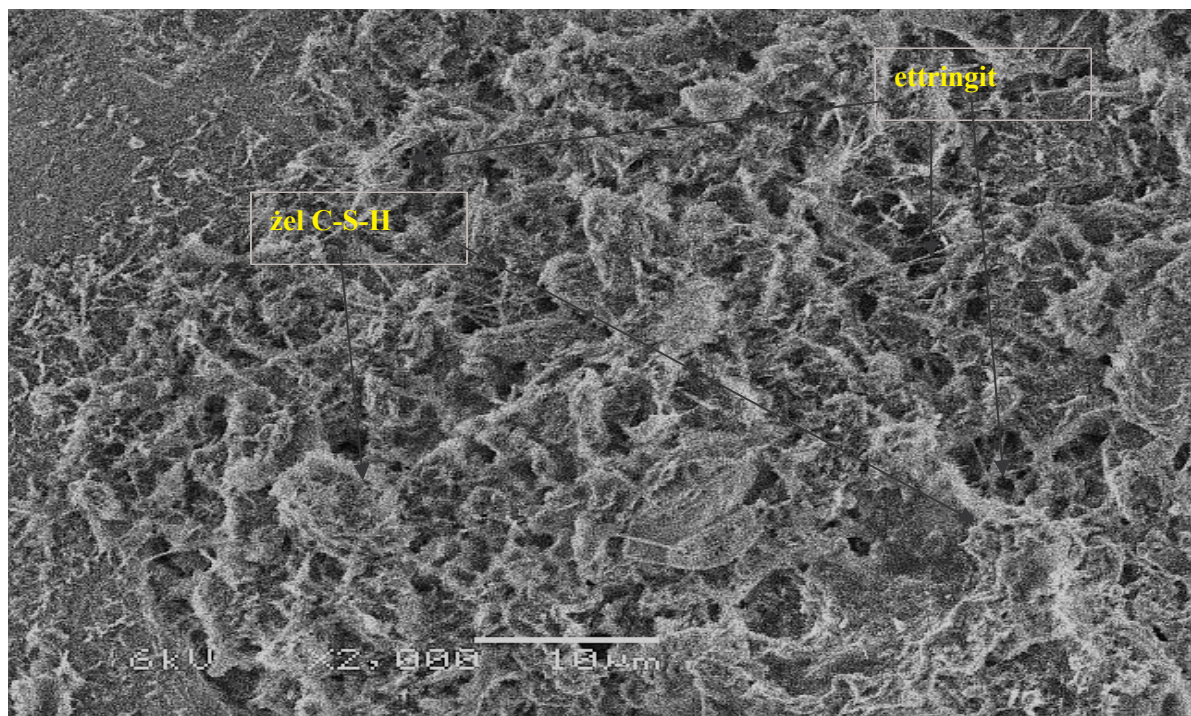
⁶ składniki dodatkowe.

⁷ Łęgania, jednokomórkowe gametangium żeńskie roślin niższych (glonów, grzybów), które zawiera jedną lub kilka nieruchomych gamet żeńskich (komórek...



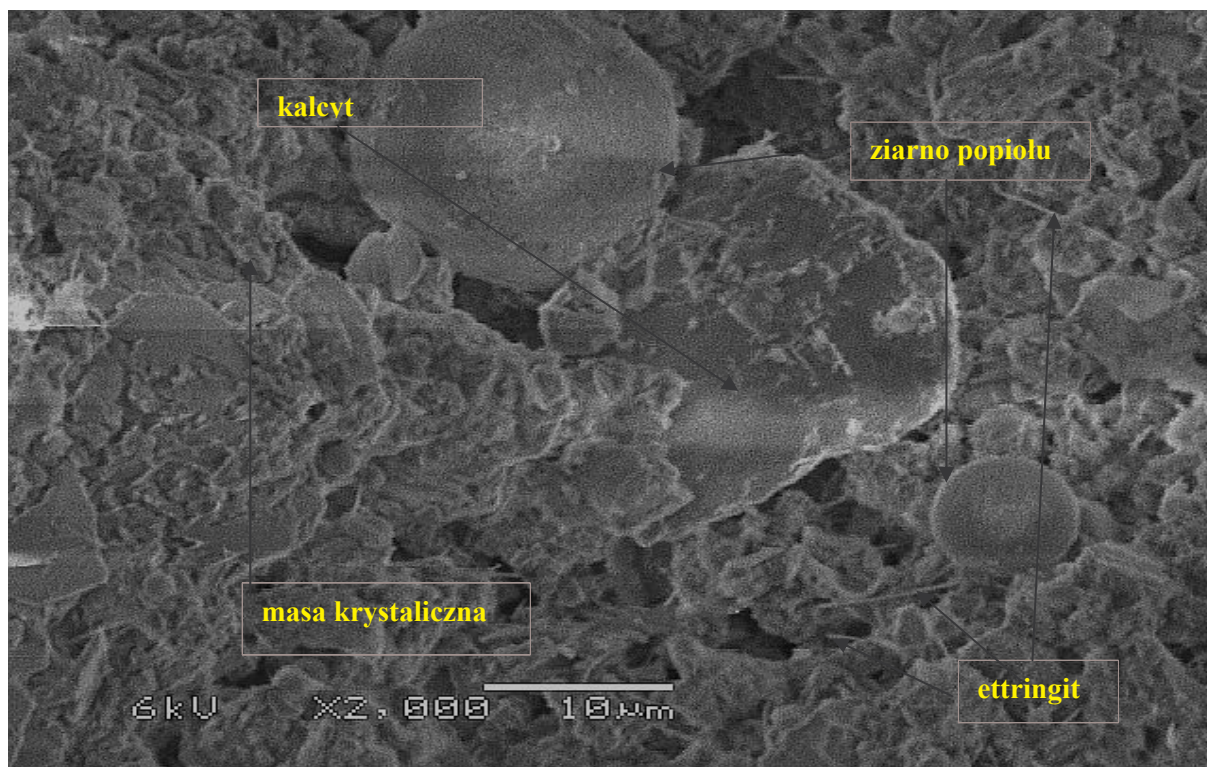
Rys. 5.63 Zdjęcie kredy jeziornej stabilizowanej cementem hutniczym.

Zdjęcie (rys. 5.63) przedstawia próbkę kredy jeziornej zmieszanej z cementem hutniczym CEM III/A. Ilość stabilizatora na metr sześcienny gruntu wynosiła 300 kg. Widoczna jest krystaliczna, chaotyczna struktura włoskowata, tzw. „struktura pilśniowa”. Mikrostruktura zbliżona jest do struktury nefrytu, skały charakteryzującej się największą wytrzymałością na ściskanie i na rozciąganie. Natomiast struktura włoskowata jest efektem hydratacji cementu.



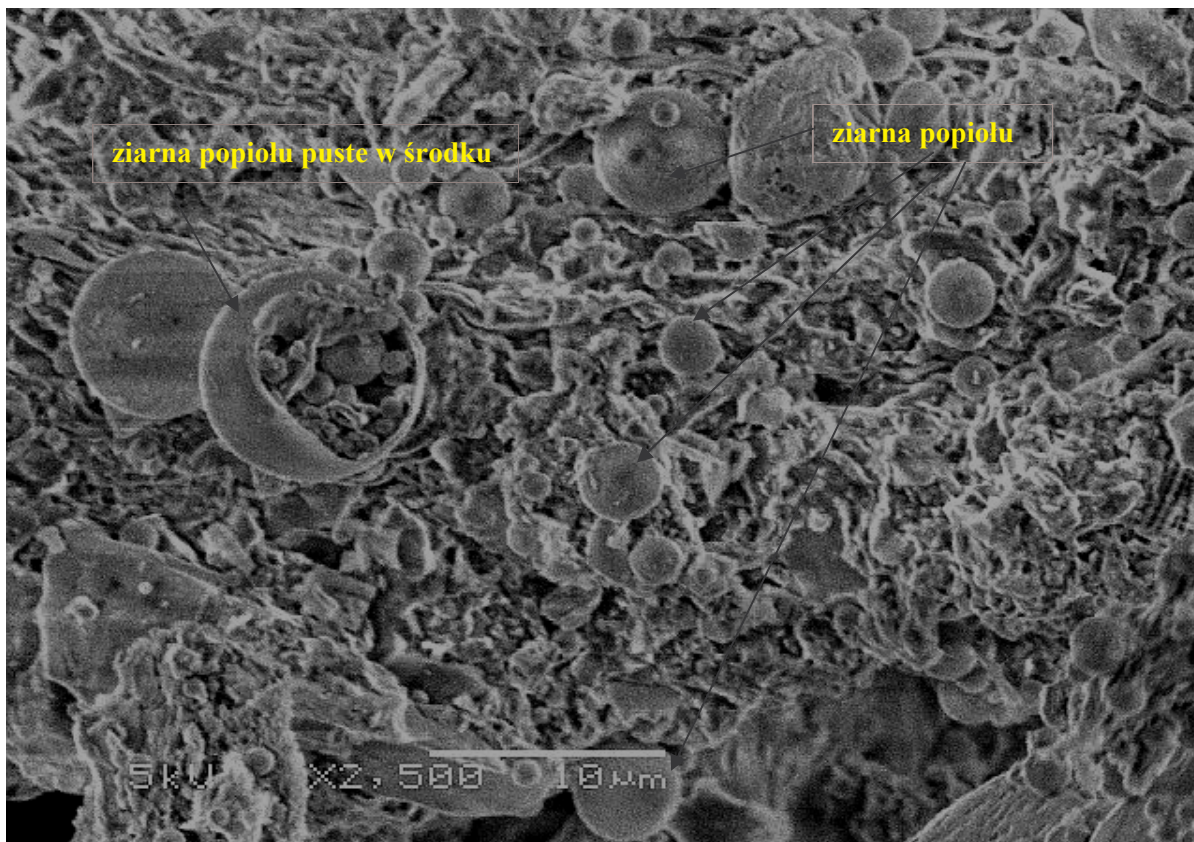
Rys. 5.64 Zdjęcie kredy jeziornej stabilizowanej cementem hutniczym.

Zdjęcie (rys. 5.64) przedstawia również próbkę kredy jeziornej zmieszanej z cementem hutniczym CEM III/A. Ilość stabilizatora na metr sześcienny gruntu wynosiła 300 kg. Natomiast na zdjęciu tym w otoczeniu ettringitu widać uwodnione fazy żelu CSH. W znacznym stopniu wpływają one na wytrzymałość stwardniałego zaczynu, powodując zagęszczenie mikrostruktury i wydzielanie wody. Pory wodne są natomiast wypełniane przez zrosty ettringitu oraz wodorotlenku wapnia widoczne na zdjęciach. Proces twardnienia cementu hutniczego może być podzielony na dwa procesy: początkowy – uwodnienia i twardnienia klinkierowej części cementu jak i również minerałów żużlowych, oraz proces ponowny – reakcji chemicznej produktów uwodnienia części klinkierowej z częściowo uwodnionymi granulowanymi żużłami wielkopieczowymi. Przy uwadnianiu krzemianu trójwapniowego znajdującego się w klinkierze, wydziela się wodorotlenek wapniowy. Pod wpływem nasyconego roztworu ujawnia się aktywność cząstek fazy szkła w żużlu granulowanym, które ulegają zniszczeniu na powierzchni. W wyniku tego pojawiają się galaretowate masy zawierające związki kwasu krzemowego, jak i również wodorotlenek glinowy. Następnie galaretowate produkty uwodnienia na powierzchni ziaren żużła przechodzą w odmianę krystaliczną, zapewniając wzrost wytrzymałości i umożliwiając dostęp wody do wewnętrznych warstw ziaren, a także sprzyjając dalszemu przebiegowi procesów uwodnienia [11].

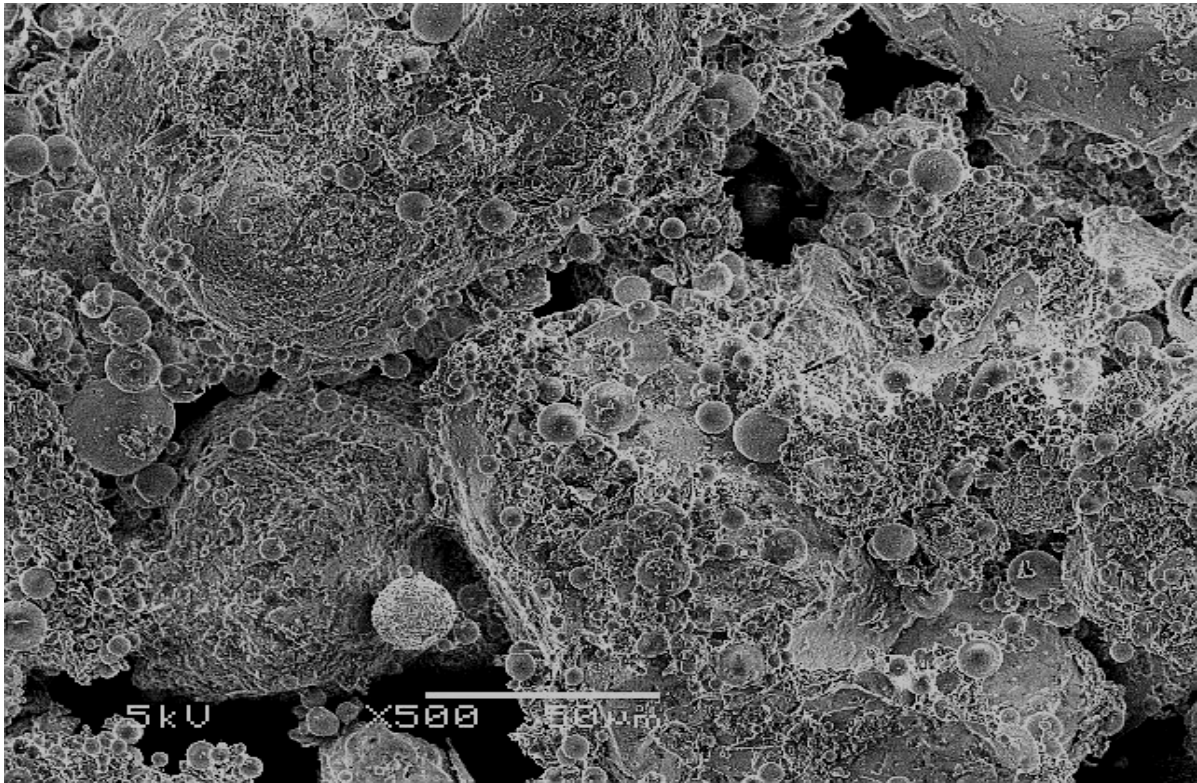


Rys. 5.65 Zdjęcie kredy jeziornej stabilizowanej popiołem lotnym.

Zdjęcie (rys. 5.65) przedstawia próbkę kredy jeziornej zmieszanej z popiołem lotnym. Ilość stabilizatora na metr sześcienny gruntu wynosiła 300 kg. Widoczna masa krystaliczna z ziarnami piroklastycznymi (wulkanicznymi), okrzemkami oraz ziarnami kalcytu. Struktura gruntu kubelkowata. Widoczne pojedyncze ziarna popiołu lotnego - „banieczki” wypełnione mieszaniną gazów tak zwane cenosfery [11]. Można sądzić, iż gazy wypełniające ziarna popiołu lotnego są to produkty rozkładu związków siarki np. siarczków metali. W warunkach redukcyjnych związki siarki występujące na +6 stopniu utlenienia mogą być zredukowane do siarczynów na +4 stopniu utlenienia (np. CaSO_3) a nawet do produktów gazowych w postaci gazowego siarkowodoru (H_2S) w którym siarka występuje na -2 stopniu utlenienia. Pewna część węgla w popiele może tworzyć tlenek węgla (CO). W rezultacie wypełnieniem banieczek popiołu może być mieszanina gazów składających się z H_2S i CO jak też CO_2 i SO_2 . Banieczki te pod wpływem wiązki elektronowej pękały (rys. 5.69). Zauważalne efekty procesu hydratacji popiołu, widoczne pojedyncze włókna struktury pilśniowej - ettringit. Obserwuje się tu również oprócz niewielkich ilości ettringitu, także ziarna popiołów lotnych wypełniających mikrostrukturę (rys. 5.66 i rys. 5.67). Ich obecność rekompensuje zawartość mniejszych ilości ettringitu poprawiających wytrzymałość, czego efektem są wyniki badań wytrzymałości na ściskanie.



Rys. 5.66 Zdjęcie namułu wzmocnionego popiołem.



Rys. 5.67 Zdjęcie namułu wzmocnionego popiołem

Opierając się na analizie wyników prac [36] lub [20], stwierdzono, że reakcja pucolanowa popiołu rozpoczyna się od absorpcji na powierzchni ziaren popiołu lotnego, uwolnionego wodorotlenku wapniowego podczas hydratacji cementu. Związek ten tworzy na ziarnach popiołu rodzaj otoczki, przy czym otoczka ta nie kontaktuje się jednak z ziarnem popiołu w sposób bezpośredni. Pomiędzy ziarnem popiołu a otoczką Ca(OH)_2 stwierdzono istnienie granicznej warstwy wodnej o grubości $0.5 \div 1$ mikrometra. W warstwie tej wytrącają się produkty reakcji pomiędzy składnikami ziaren popiołu, a przechodzącymi przez tę warstwę z otoczki Ca(OH)_2 jonami wapniowymi. Pierwszymi produktami reakcji pucolanowej są uwodnione siarczano-gliniany, a następnie uwodnione krzemiany i gliniany wapniowe. Efektem wypełniania granicznej warstwy produktami reakcji pucolanowej jest wzmocnienie więzi pomiędzy produktami hydratacji cementu, a popiołem, co powoduje z kolei wzrost wytrzymałości. [27]

Zdjęcia skaningowe mikrostruktury stabilizowanych gruntów mają podobny charakter do mikrostruktury zapraw z cementów portlandzkich. Występuje w nich przewaga ettringitu ($\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$). Cement portlandzki, zawierający w swym składzie duże ilości C_3A , na skutek jego uwodnienia, tworzy hydraty glinianów wapnia przy znacznej ilości wydzielanego ciepła.

W zależności od zawartości wody mogą przyjmować one następujące postaci: C_4AH_{19} – C_4A_{13} – C_4AH_{11} – C_4AH_7 . [45]

Wspomniany $Ca(OH)_2$ występuje w dużych ilościach ze względu na uwodnienie alitu i belitu, które to właśnie stanowią trzon mikrostruktury cementów portlandzkich. Cement hutniczy z kolei w zaprawie tworzy zupełnie inny obraz mikrostruktury. Braki zarówno alitu jak i glinianu trójwapniowego dają się odczuć w postaci dużej ilości ettringitu pochodzącego od glinu zawartego w żużlu na zhydratyzowanych kryształach $Ca(OH)_2$. Żadnych innych wtrąceń nie zauważono, choć powinny pojawić się skryształizowane elementy żużla wielkopieczowego. Inny obraz mikrostruktury zanotowano w przypadku stabilizacji popiołem lotnym. Obserwuje się tu oprócz niewielkich ilości ettringitu, także ziarna popiołów lotnych wypełniających mikrostrukturę.

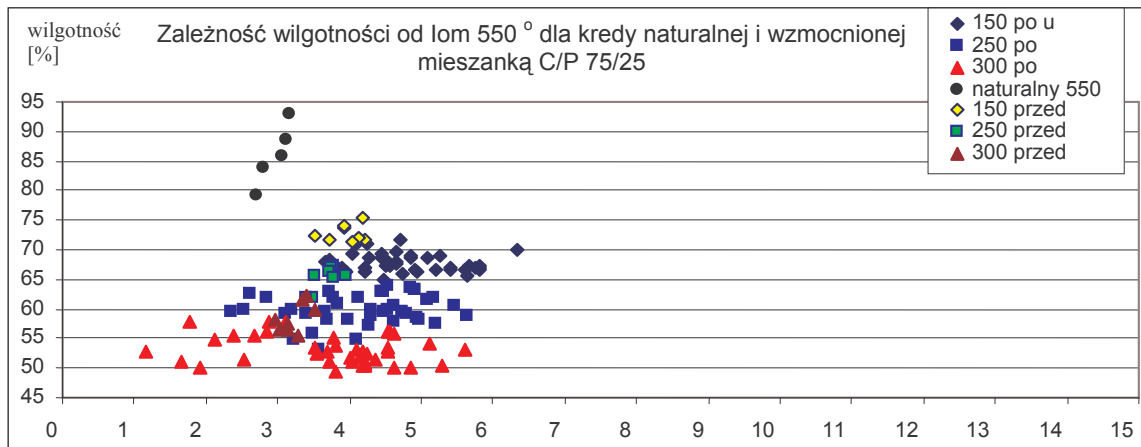
Mechanizm tworzenia mikrostruktury w gruntach można opisać w następujący sposób:

Na skutek podwyższonej zawartości wody, następuje proces hydratacji ziaren cementu z gruntem. W wyniku tego procesu, po ziarnach pozostają puste przestrzenie, a produkty hydratacji migrują do przestrzeni międzyziarnowej. W zależności od zastosowanych domieszek, obszar ten wykazuje mniejszą lub większą porowatość. Niekiedy dochodzi w porach do powstawania skupisk $Ca(OH)_2$ lub skryształizowanych włókien ettringitu. Opisany powyżej mechanizm przebiega podobnie jak dla kruszywa gdzie kruszywo lub zbrojenie jest obojętne dla zaczynu.

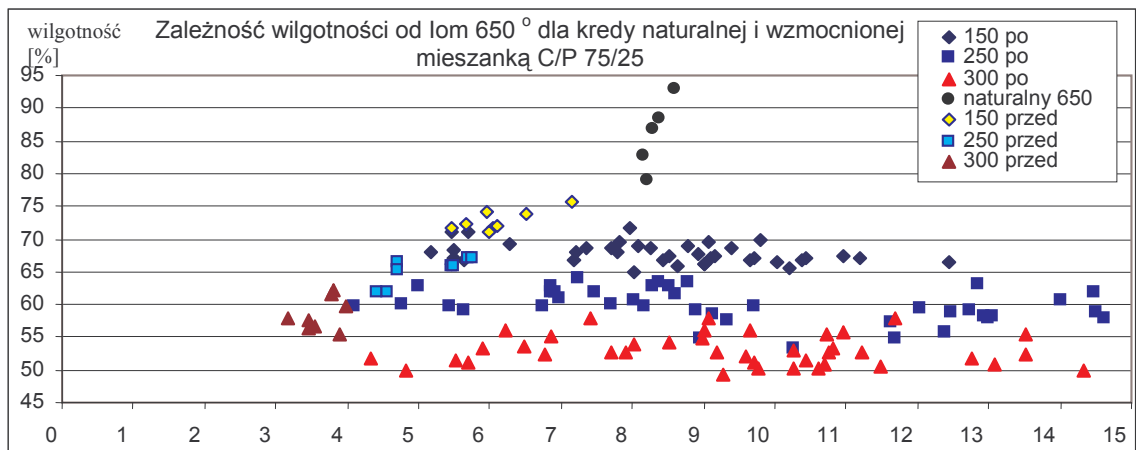
Badania derywatograficzne, oraz zdjęcia pod mikroskopem elektronowym przyczyniły się do zaobserwowania, wyjaśnienia oraz lepszego zrozumienia procesu stabilizacji gruntów organicznych.

Przedstawioną analizę wykonanych badań derywatograficznych i strukturalnych gruntów opracowano po bardzo cennych konsultacjach udzielonych przez prof. dr hab. Ryszarda Wyrwickiego z Uniwersytetu Warszawskiego wybitnego specjalistę geologii złóż i surowców mineralnych.

5.5 Zestawienie wybranych wyników badań cech fizycznych.

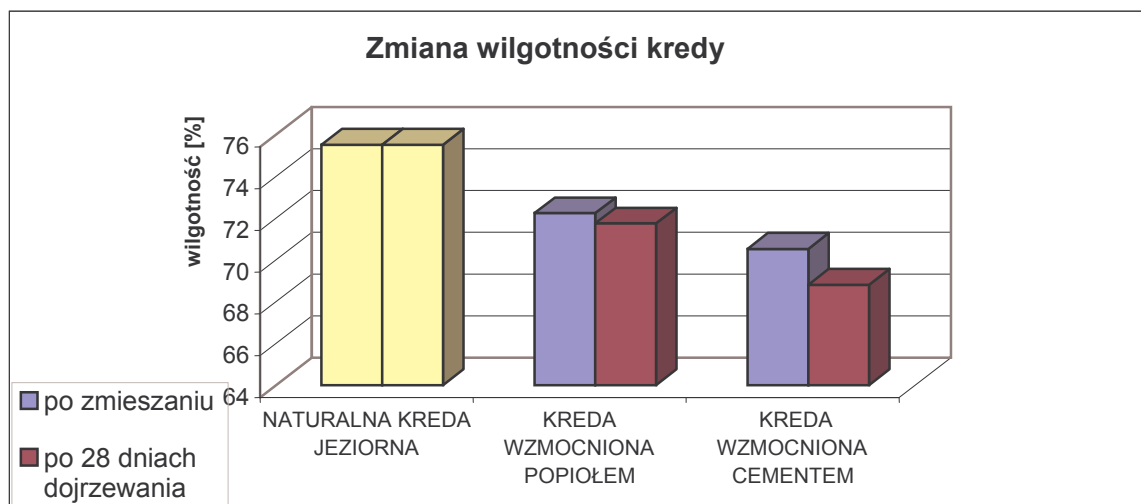


Rys. 5.68 Wykres zależności wilgotności do strat przy prażeniu w temperaturze 550 °C przed i po badaniu.

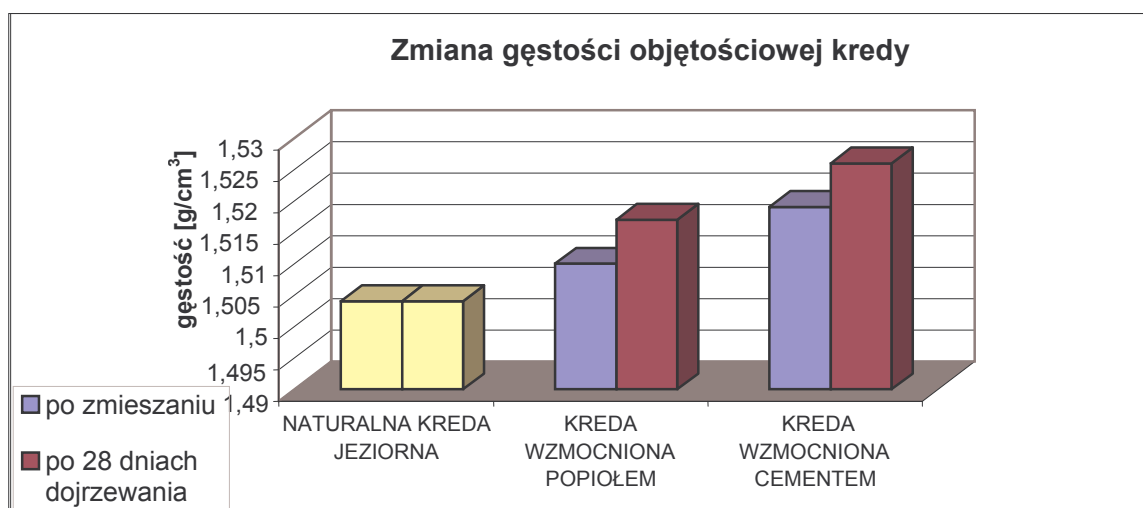


Rys. 5.69 Wykres zależności wilgotności do strat przy prażeniu w temperaturze 650 °C przed i po badaniu.

Na rys. 5.68 i 5.69 sporządzono zestawienie wyników badań zawartości części organicznych w dwóch temperaturach spalania 550 °C i 650 °C. Rysunki przedstawiają wartości dla kredy jeziornej, wzmocnionej przed i po dojrzewaniu dla wszystkich ilości stabilizatora na metr sześcienny oraz badano grunt w stanie naturalnym. Na podstawie wykresów rys. 5.68 i rys. 5.69, łatwo można zaobserwować, iż wyniku połączenia cementu, popiołu z gruntem nastąpiło uwolnienie się węglanu wapnia lub uwolnieniem wody chemicznie związanej, wody krystalicznej lub wody błonkowej. Może to świadczyć o powstaniu nowych form chemicznych podobnych do form jakie tworzą się podczas hydratacji cementu z materiałem mineralnym.



Rys. 5.70 Wykres zmiany wilgotności kredy wzmocnionej popiołem i cementem.



Rys. 5.71 Wykres zmiany gęstości objętościowej kredy wzmocnionej popiołem i cementem.

Rysunki 5.70 i 5.71 przedstawiają zmianę podstawowych cech fizycznych badanej kredy jeziornej. Na rysunkach tych widać spadek wilgotności i wzrost gęstości objętościowej odpowiednio dla wzmocnionych popiołem i cementem, a także z upływem czasu dojrzewania. Wykresy potwierdzają hipotezę właściwości puculanowych popiołów. Obrazują powstanie nowych związków chemicznych podczas hydratacji w wzmocnianych gruntach zarówno cementem jak i samym popiołem.

6.0 Analiza statystyczna.

Dokonując jakiegokolwiek pomiaru czy obserwacji narażeni jesteśmy na to, że mierzona lub obserwowana wielkość nie jest tą prawdziwą obiektywną wartością poszukiwanego parametru czy wykrytej relacji dlatego, że narzędzie pomiarowe zawsze wprowadza jakiś błąd, a także dlatego że obiekt badania może mieć swoje własne niepowtarzalne cechy, które omyłkowo można przyjąć za wyraz pewnej tendencji. Ponadto podczas obserwacji i pomiarów popełnić można różne pomyłki i błędy. Jednakże, aby na podstawie uzyskanych wyników pomiarów i obserwacji wyciągnąć reprezentatywne wnioski konieczne jest przeprowadzenie analizy statystycznej.

W związku z tym otrzymane wyniki badań wytrzymałości na ściskanie poddano analizie statystycznej zbiorowości jednowymiarowych na małych próbach, a do obliczenia wartości średnich, odchyłeń standardowych, współczynników korelacji i determinacji oraz analizy statystycznej posłużono się programem *EXCEL*.

Niezbędna liczba pomiarów.

Na podstawie wyników pomiarów pilotowych mierzonej wielkości możliwe jest obliczenie liczby pomiarów, która pozwoli wyznaczyć mierzoną wielkość z żadaną z góry dokładnością.

Niech cecha ma teoretyczny rozkład normalny $N(\bar{x}, S)$ ze średnią \bar{x} i odchyleniem standardowym S , minimalną liczebność próby, niezbędną do oszacowania nieznannej wartości przeciętnej \bar{x} na poziomie ufności $(1 - \alpha)$, z maksymalnym błędem szacunku nie przekraczającym d_x wyznaczamy ze wzoru: [51]

$$N = t_{\alpha}^2 \frac{S^2}{d_x^2} \quad (4)$$

$$\text{gdzie} \quad S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (5)$$

przy założeniu, że S^2 jest znane to na podstawie pomiarów wstępnych liczących n elementów i t_{α} - (wartość zmiennej t Studenta) odczytujemy z tablic dystrybucyj rozkładu normalnego dla współczynnika ufności $1 - \alpha = 0,05$ i $n-1$ stopni swobody, na podstawie powyższych wzorów i założeń podjęto próbę określenia niezbędnej liczby pomiarów. Wyniki obliczeń według wzoru (4) dla wszystkich gruntów wzmocnionych mieszanką cementu i popiołu C/P o różnej ilości stabilizatora na metr sześcienny gruntu, przedstawiono w postaci tablic 6.1 do 6.3.

Tablica 6.1 Niezbędna liczba pomiarów dla torfu z błędem szacunku od 0,1 do 5 kPa

torf błąd szacunku [kPa]	0/100			25/75			50/50			75/25			100/0		
	150	250	300	150	250	300	150	250	300	150	250	300	150	250	300
$d_x=0,1$	179	167	54	132	97	149	1774	22208	27958	1177	1330	1781	11886	295672	143312
$d_x=0,2$	45	42	14	33	24	37	444	5552	6990	294	333	445	2972	73918	35828
$d_x=0,3$	20	19	6	15	11	17	197	2468	3106	131	148	198	1321	32852	15924
$d_x=0,4$	11	10	3	8	6	9	111	1388	1747	74	83	111	743	18479	8957
$d_x=0,5$	7	7	2	5	4	6	71	888	1118	47	53	71	475	11827	5732
$d_x=0,6$	5	5	2	4	3	4	49	617	777	33	37	49	330	8213	3981
$d_x=0,7$	4	3	1	3	2	3	36	453	571	24	27	36	243	6034	2925
$d_x=2$	0,4	0,4	0,1	0,3	0,2	0,4	4	56	70	3	3	4	30	739	358
$d_x=5$	0,07	0,07	0,02	0,05	0,04	0,06	1	9	11	0,5	1	1	5	118	57

Tablica 6.2 Niezbędna liczba pomiarów dla namułu z błędem szacunku od 0,1 do 5 kPa

namuł błąd szacunku [kPa]	0/100			25/75			50/50			75/25			100/0		
	150	250	300	150	250	300	150	250	300	150	250	300	150	250	300
$d_x=0,1$	600	3103	760	993	1289	895	13706	6275	13085	17479	73644	59379	5369	91792	67843
$d_x=0,2$	150	776	190	248	322	224	3426	1569	3271	4370	18411	14845	1342	22948	16961
$d_x=0,3$	67	345	84	110	143	99	1523	697	1454	1942	8183	6598	597	10199	7538
$d_x=0,4$	38	194	48	62	81	56	857	392	818	1092	4603	3711	336	5737	4240
$d_x=0,5$	24	124	30	40	52	36	548	251	523	699	2946	2375	215	3672	2714
$d_x=0,6$	17	86	21	28	36	25	381	174	363	486	2046	1649	149	2550	1885
$d_x=0,7$	12	63	16	20	26	18	280	128	267	357	1503	1212	110	1873	1385
$d_x=2$	2	8	2	2	3	2	34	16	33	44	184	148	13	229	170
$d_x=5$	0,2	1,2	0,3	0,4	0,5	0,4	5	3	5	7	29	24	2	37	27

Tablica 6.3 Niezbędna liczba pomiarów dla kredy z błędem szacunku od 0,1 do 5 kPa

kreda błąd szacunku [kPa]	0/100			25/75			50/50			75/25			100/0		
	150	250	300	150	250	300	150	250	300	150	250	300	150	250	300
$d_x=0,1$	66	70	20	4807	7713	12987	7129	27635	139605	603	235848	2488186	33282	585535	794731
$d_x=0,2$	16	18	5	1202	1928	3247	1782	6909	34901	151	58962	622047	8320	146384	198683
$d_x=0,3$	7	8	2	534	857	1443	792	3071	15512	67	26205	276465	3698	65059	88303
$d_x=0,4$	4	4	1	300	482	812	446	1727	8725	38	14740	155512	2080	36596	49671
$d_x=0,5$	3	3	1	192	309	519	285	1105	5584	24	9434	99527	1331	23421	31789
$d_x=0,6$	2	2	1	134	214	361	198	768	3878	17	6551	69116	924	16265	22076
$d_x=0,7$	1	1	0,4	98	157	265	145	564	2849	12	4813	50779	679	11950	16219
$d_x=2$	0,2	0,2	0,1	12	19	32	18	69	349	2	590	6220	83	1464	1987
$d_x=5$	0,03	0,03	0,01	2	3	5	3	11	56	0,2	94	995	13	234	318

Na podstawie uzyskanych wyników przyjęto, że dla każdej serii niezależnie od błędu szacunku i wartości oczekiwanej liczba pomiarów wynosić będzie $n = 10$. Przyjęcie $n = 10$ pomiarów wynika z faktu, iż uzyskanie dokładności pomiaru 5 kPa, przy wartości wytrzymałości na ściskanie rzędu 1000 kPa (w przypadku kredy wzmocnionej wyłącznie

cementem w ilości 300 kg na metr sześcienny gruntu) wydaje się nieracjonalne z uwagi na możliwość utworzenia kolumny sztywnej. Ponadto założenie to, pozwoliło na znaczne skrócenie czasu prowadzenia badań.

Podstawowa analiza danych powinna doprowadzić do zwięzłego przedstawienia ogólnej charakterystyki istotnych właściwości badanej zbiorowości. W celu określenia opisu zbiorowości dokonano obliczeń miar położenia (wartość średnia), miar zmienności (odchylenie standardowe, odchylenie standardowe populacji), analizy regresji oraz przedziałów ufności dla poszczególnych średnich.

Przedział ufności dla wartości rzeczywistej ustala się ze wzoru:

$$\bar{x} - t_{\alpha,n} S_x \leq X < \bar{x} + t_{\alpha,n} S_x \quad (6)$$

w którym

$$S_x = \frac{S_x}{\sqrt{n}} \quad (7)$$

$t_{\alpha,n} = 2,2622$ - wartość krytyczna testu t Studenta (Gosseta) dla określonego poziomu istotności $\alpha = 0,05$ i liczby pomiarów $n = 10$ (współczynniki Studenta), X - wartość rzeczywista wielkości pomiarowej. [51]

Analiza statystyczna w zakresie założonym została wykonana dla wszystkich badanych gruntów, proporcji składników mieszanki stabilizującej i ilości stabilizatora. Wyniki tej analizy przedstawiono w postaci tablic 6.4 do 6.6.

Tablica 6.1. Analiza statystyczna wyników badań wytrzymałości próbek na ściskanie dla torfu stabilizowanego mieszką Cementu i Popiołu C/P.

rodzaj gruntu	procentowa zawartość cementu i popiołu														
	0/100			25/75			50/50			75/25			100/0		
	ilość stabilizatora na metr sześcienny gruntu w kg/m ³														
	150	250	300	150	250	300	150	250	300	150	250	300	150	250	300
torf	2,7	4,4	6,4	2,7	10,7	15,1	8,6	45,4	66,0	23,2	73,0	86,7	36,1	151,0	166,0
	2,4	4,5	6,0	3,5	10,7	13,4	7,6	37,5	58,7	27,1	79,7	83,5	42,0	130,0	187,0
	3,6	3,2	6,6	1,8	11,6	14,3	7,3	48,7	67,3	22,4	76,0	82,9	35,7	121,0	168,0
	2,4	3,6	6,2	3,5	10,5	15,4	6,4	39,3	60,7	22,7	76,0	83,3	47,9	118,5	163,0
	3,6	4,5	6,4	2,6	11,2	14,6	7,6	38,4	64,7	24,1	77,1	81,3	42,2	118,0	158,0
	2,9	3,6	5,9	3,0	10,6	15,0	8,9	35,7	60,2	23,6	76,0	84,2	42,3	148,0	183,0
	2,6	3,6	5,5	3,1	10,0	15,0	6,5	34,6	49,9	24,0	75,0	82,1	43,9	128,0	205,0
	2,4	3,6	6,5	2,9	11,2	14,6	7,6	41,7	56,1	22,0	75,0	85,0	47,4	166,0	186,0
	2,8	4,5	6,1	3,0	10,6	15,1	8,8	39,1	48,8	22,0	76,0	80,1	43,6	153,0	202,0
3,1	3,6	6,0	2,8	11,0	14,9	6,6	38,4	55,6	22,6	76,1	81,2	45,4	155,9	203,0	
x- srednie	2,85	3,98	6,14	2,87	10,80	14,73	7,58	39,88	58,80	23,36	75,98	83,03	42,65	138,94	182,10
odchylenie populacji	0,413	0,442	0,325	0,463	0,436	0,539	0,889	4,098	6,010	1,438	1,612	1,866	3,895	16,801	16,736
odchylenie	0,435	0,469	0,343	0,488	0,460	0,569	0,938	4,319	6,335	1,516	1,700	1,966	4,106	17,710	17,641
t alfa	2.2622	2.2622	2.2622	2.2622	2.2622	2.2622	2.2622	2.2622	2.2622	2.2622	2.2622	2.2622	2.2622	2.2622	2.2622
$t_{\alpha,n} S_x^-$	0,31	0,33	0,25	0,35	0,33	0,41	0,67	3,09	4,53	1,08	1,22	1,41	2,94	12,67	12,62
granice przedziału -	2,54	3,64	5,90	2,52	10,47	14,33	6,91	36,79	54,27	22,28	74,77	81,63	39,72	126,27	169,48
granice przedziału +	3,16	4,31	6,39	3,22	11,13	15,14	8,25	42,97	63,33	24,45	77,20	84,44	45,59	151,61	194,72

Tablica 6.2. Analiza statystyczna wyników badań wytrzymałości próbek na ściskanie dla namułu stabilizowanego mieszką Cementu i Popiołu C/P

rodzaj gruntu	procentowa zawartość cementu i popiołu														
	0/100			25/75			50/50			75/25			100/0		
	ilość stabilizatora na metr sześcienny gruntu w kg/m ³														
	150	250	300	150	250	300	150	250	300	150	250	300	150	250	300
namuł	14,4	19,3	23,0	28,7	44,7	73,7	63,5	124,8	134,8	84,9	251,1	296,6	118,2	293,8	335,8
	12,6	19,7	22,4	28,6	43,8	77,4	64,5	128,7	136,1	72,5	215,4	310,8	115,2	295,1	330,6
	13,7	17,9	21,4	24,8	48,1	74,2	59,4	122,1	131,1	89,4	250,2	271,7	120,5	305,1	332,2
	15,5	15,3	22,6	24,7	43,5	74,2	58,4	133,0	140,7	86,2	245,7	284,0	120,6	323,7	348,2
	13,7	17,9	21,5	25,8	44,0	74,0	65,9	125,1	145,3	84,6	239,7	301,3	124,6	303,3	370,2
	14,3	14,9	21,5	25,7	44,1	75,1	61,5	127,6	126,9	86,5	251,1	287,9	125,0	306,7	344,4
	13,3	18,9	19,8	25,0	44,0	74,3	74,2	130,6	133,8	87,5	249,4	291,2	116,9	294,7	332,3
	12,6	14,9	24,0	25,1	46,9	77,3	65,9	124,0	130,2	88,0	249,0	277,9	119,4	271,7	339,2
	11,6	18,0	20,7	25,6	47,1	74,2	65,6	132,3	135,3	73,5	265,1	287,0	118,8	307,1	349,1
12,5	17,7	20,4	26,0	46,3	76,1	74,6	129,8	138,3	77,9	249,1	284,6	115,2	315,2	333,5	
x- srednie	13,41	17,45	21,73	26,00	45,25	75,05	65,36	127,81	135,26	83,09	246,57	289,29	119,45	301,64	341,54
odchylenie populacji	1,083	1,709	1,219	1,393	1,587	1,322	5,176	3,502	5,057	5,845	11,997	10,773	3,239	13,394	11,515
odchylenie	1,142	1,802	1,285	1,469	1,673	1,394	5,456	3,691	5,331	6,161	12,646	11,355	3,415	14,119	12,138
t alfa	2.2622	2.2622	2.2622	2.2622	2.2622	2.2622	2.2622	2.2622	2.2622	2.2622	2.2622	2.2622	2.2622	2.2622	2.2622
$t_{\alpha,n} S_x^-$	0,82	1,29	0,92	1,05	1,20	1,00	3,90	2,64	3,81	4,41	9,05	8,12	2,44	10,10	8,68
granice przedziału -	12,59	16,16	20,81	24,95	44,05	74,05	61,46	125,17	131,44	78,69	237,53	281,17	117,00	291,54	332,86
granice przedziału +	14,22	18,74	22,65	27,05	46,45	76,05	69,26	130,45	139,07	87,50	255,62	297,41	121,89	311,74	350,22

Tablica 6.3 Analiza statystyczna wyników badań wytrzymałości próbek na ściskanie dla kredy stabilizowanej mieszką Cementu i Popiołu C/P.

rodzaj gruntu	procentowa zawartość cementu i popiołu														
	0/100			25/75			50/50			75/25			100/0		
	ilość stabilizatora na metr sześcienny gruntu w kg/m ³														
	150	250	300	150	250	300	150	250	300	150	250	300	150	250	300
kreda	5,2	6,2	13,5	45,2	98,0	120,0	102,0	149,9	351,0	123,0	322,0	889,0	195,0	788,0	1125,0
	5,5	5,6	13,8	44,8	92,1	107,5	112,0	133,6	332,2	122,8	372,3	938,7	186,0	795,2	1084,1
	4,6	6,4	13,8	52,9	105,0	121,2	98,3	143,7	343,2	123,0	292,7	812,4	213,0	867,9	1084,9
	5,5	6,5	13,4	45,5	96,6	117,4	103,8	163,4	391,9	121,7	314,4	940,4	191,7	731,5	1217,8
	4,8	6,7	13,2	44,5	95,2	118,2	105,8	145,2	333,7	123,5	294,5	890,5	194,1	785,9	1093,1
	5,2	7,0	13,5	50,1	102,3	122,1	101,6	152,3	352,2	121,1	312,5	956,1	196,8	803,5	1121,1
	5,8	6,8	13,6	49,5	99,5	106,4	104,9	155,1	365,1	124,8	322,5	961,2	201,5	821,1	1085,2
	5,3	6,2	13,2	52,0	104,0	117,0	104,5	149,0	356,0	121,0	320,0	940,0	193,0	801,0	1086,3
	5,5	6,3	13,4	48,9	101,0	115,0	109,0	149,8	365,0	122,5	299,0	946,0	211,0	835,0	1123,0
5,7	6,3	13,5	51,5	102,0	116,5	107,5	151,0	349,0	123,1	310,0	899,0	195,0	789,0	1085,0	
x- srednie	5,31	6,40	13,48	48,48	99,56	116,13	104,95	149,30	353,92	122,65	315,99	917,33	197,71	801,82	1110,55
odchylenie populacji	0,359	0,370	0,199	3,065	3,883	5,038	3,733	7,349	16,518	1,086	21,470	43,166	8,065	33,829	39,411
odchylenie	0,378	0,390	0,210	3,231	4,093	5,311	3,935	7,747	17,412	1,144	22,631	45,501	8,501	35,658	41,543
t alfa	2.2622	2.2622	2.2622	2.2622	2.2622	2.2622	2.2622	2.2622	2.2622	2.2622	2.2622	2.2622	2.2622	2.2622	2.2622
$t_{\alpha,n} S_x^-$	0,27	0,28	0,15	2,31	2,93	3,80	2,81	5,54	12,45	0,82	16,19	32,55	6,08	25,51	29,72
granice przedziału -	5,04	6,12	13,33	46,17	96,64	112,33	102,13	143,75	341,46	121,83	299,80	884,78	191,63	776,31	1080,83
granice przedziału +	5,58	6,67	13,63	50,79	102,49	119,93	107,76	154,84	366,37	123,47	332,18	949,88	203,79	827,32	1140,26

Współczynnik korelacji Pearsona.

Podstawowym problemem analizy statystycznej w badaniach zbiorowości kilku cech, które często pozostają ze sobą w pewnym związku, jest stwierdzenie czy ów związek jest bardziej lub mniej ścisły.

Współczynnik korelacji liniowej Pearsona określa poziom zależności liniowej między zmiennymi losowymi. Niech x i y będą zmiennymi losowymi o ciągłych rozkładach, x_i, y_i oznaczają wartości prób losowych tych zmiennych ($i = 1, 2, \dots, n$), natomiast \bar{x}, \bar{y} - wartości

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

średnie z tych prób, tj. (8)

Wówczas współczynnik korelacji liniowej definiuje się następująco:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}},$$
 (9)

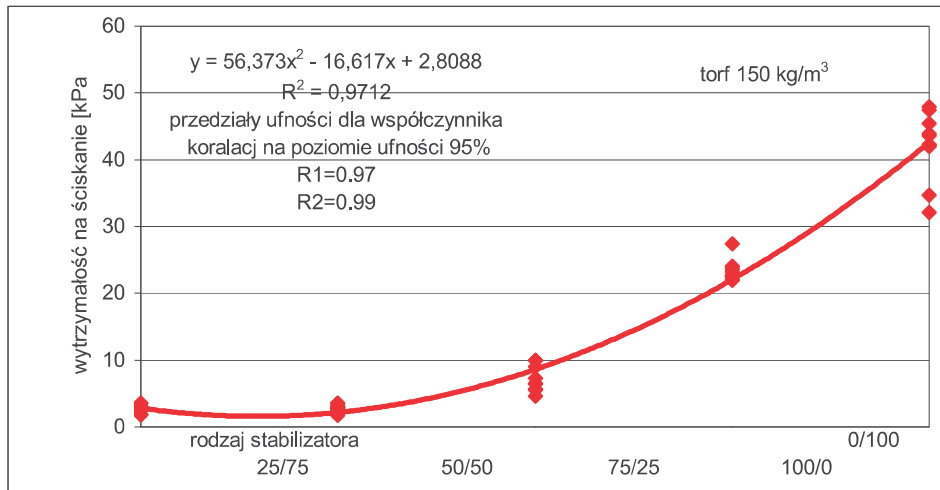
powyższy wzór posłużył do obliczenia współczynnika korelacji w niniejszej pracy.

$$r_{xy} \in [-1, 1].$$
 (10)

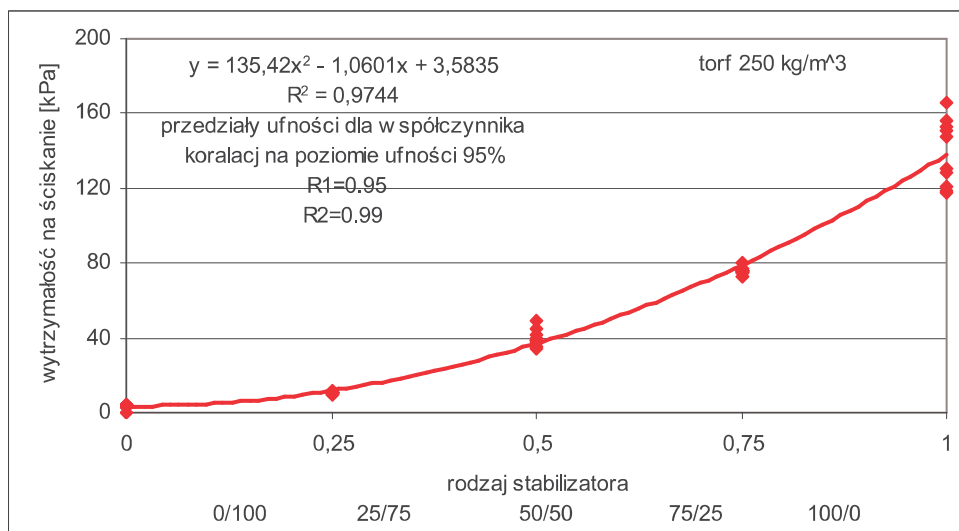
Innymi słowy współczynnik korelacji liniowej dwóch zmiennych jest ilorazem kowariancji i iloczynu odchyłeń standardowych tych zmiennych:

$$r_{XY} = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y}$$
 (11)

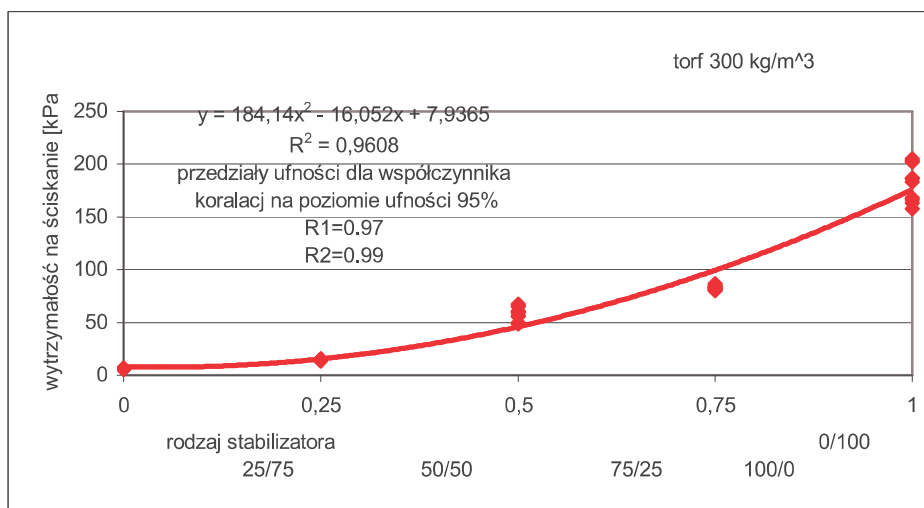
Współczynnik korelacji liniowej można traktować jako znormalizowaną kowariancję. Współczynnik korelacji przyjmuje zawsze wartości w zakresie $[-1, 1]$, co pozwala uniezależnić analizę od dziedziny badanych zmiennych. [51] Na podstawie uzyskanych wyników wszystkich trzech badanych gruntów sporządzono wykresy zmiany wytrzymałości w zależności od proporcji poszczególnych składników mieszanki dla zastosowanych ilości stabilizatora (rys. 6.1 do 6.10). W przypadku wszystkich przeprowadzonych badań, uzyskano wartości współczynnika korelacji Pearsona rzędu $R = 0,97$ i wyższe, co odpowiada korelacji prawie pełnej. Przedstawione na rys. od 6.1 do 6.10 wyniki badań, pokazują zmianę wytrzymałości w zależności od ilości cementu w mieszance stabilizującej C/P przy wysokiej wartości współczynnika determinacji; ($R^2 = 0,94 \div 0,97$) dla torfu, ($R^2 = 0,95 \div 0,97$) dla kredy oraz najwyższą wartość ($R^2 = 0,96 \div 0,97$) dla namułu. Na poszczególnych wykresach pokazano równania funkcję regresji, wartość współczynnika determinacji oraz przedziały ufności dla współczynnika korelacji na poziomie ufności 95 %. Zestawienie wzrostu wytrzymałości badanych gruntów w zależności od proporcji stabilizatora przedstawiono na trzech wykresach zbiorczych (rys 6.11 do 6.13).



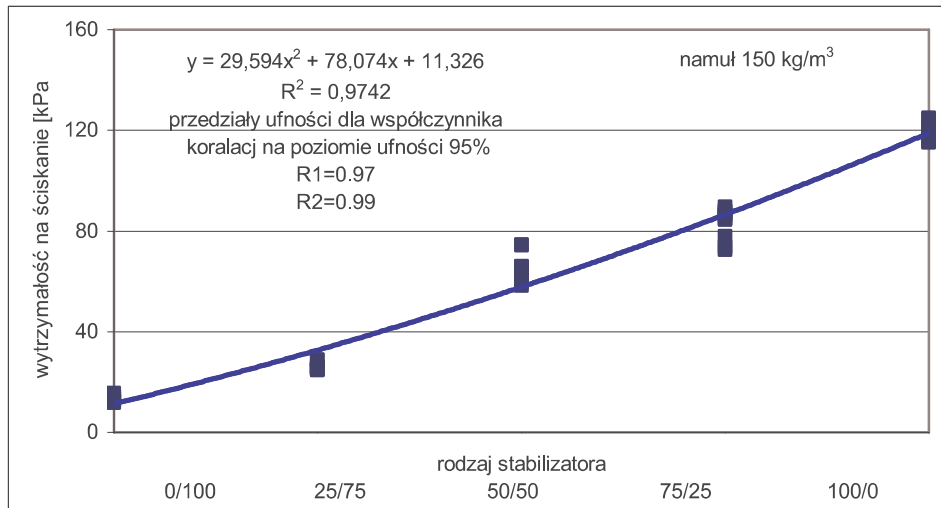
Rys. 6.1 Wzrost wytrzymałości torfu stabilizowanego mieszanką C/P w ilości 150 kg/m³.



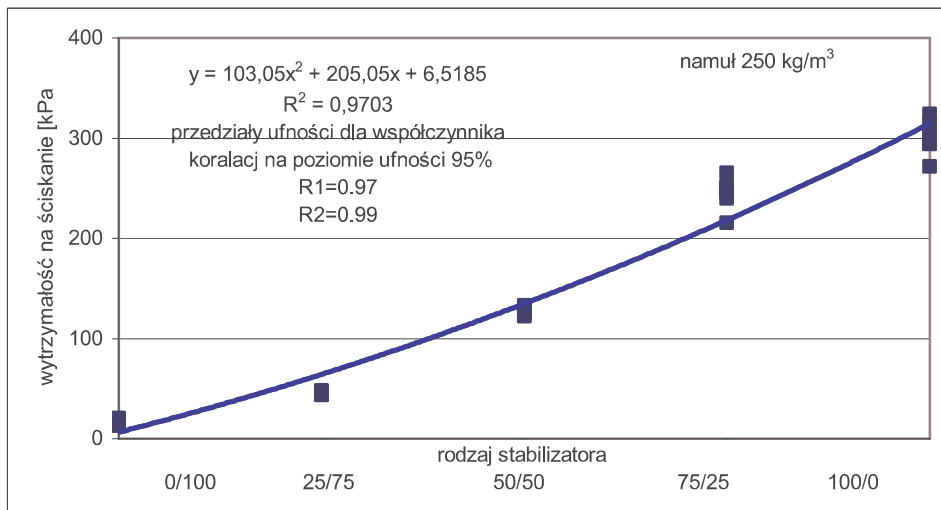
Rys. 6.2 Wzrost wytrzymałości torfu stabilizowanego mieszanką C/P w ilości 250 kg/m³.



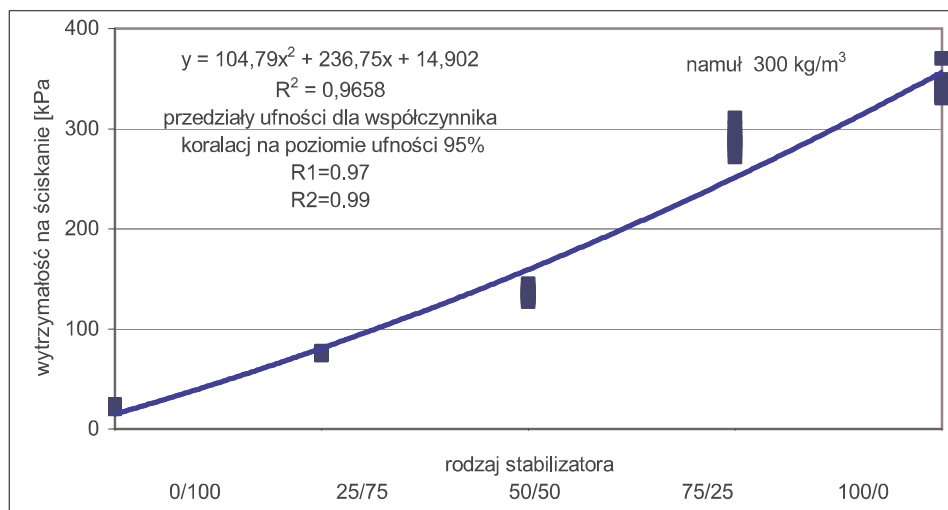
Rys. 6.3 Wzrost wytrzymałości torfu stabilizowanego mieszanką C/P w ilości 300 kg/m³.



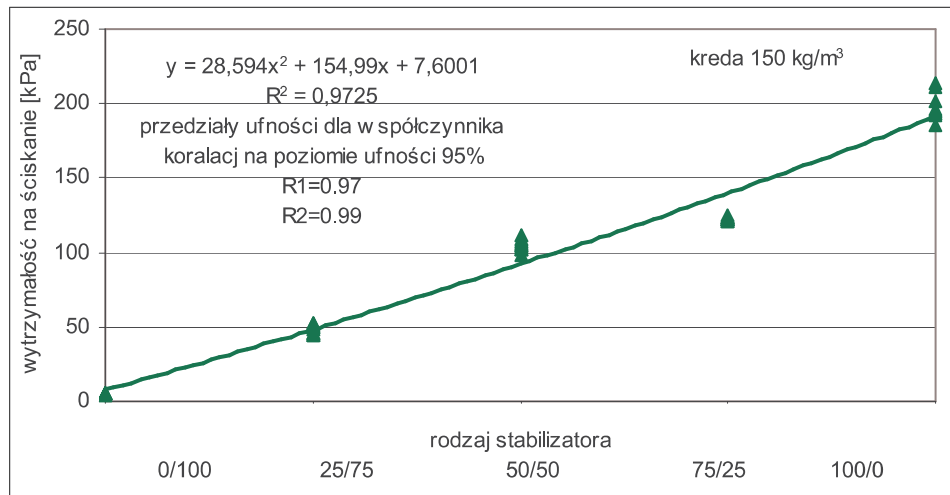
Rys. 6.4 Wzrost wytrzymałości namułu stabilizowanego mieszanką C/P w ilości 150 kg/m³.



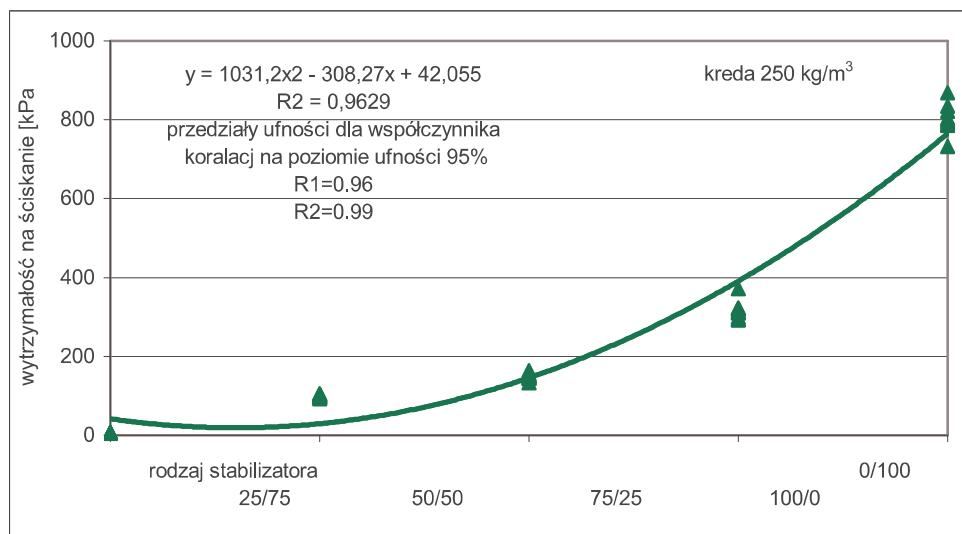
Rys. 6.5 Wzrost wytrzymałości namułu stabilizowanego mieszanką C/P w ilości 250 kg/m³.



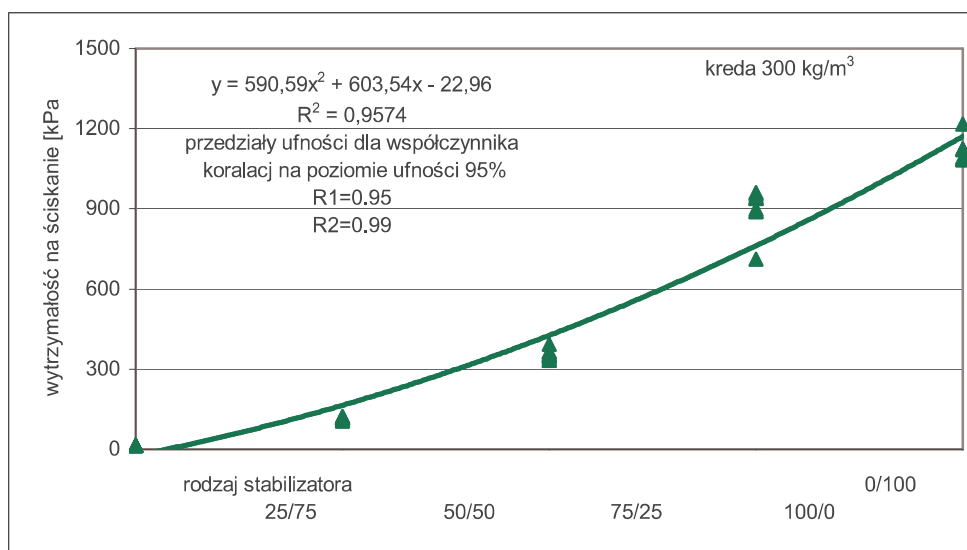
Rys. 6.6 Wzrost wytrzymałości namułu stabilizowanego mieszanką C/P w ilości 300 kg/m³.



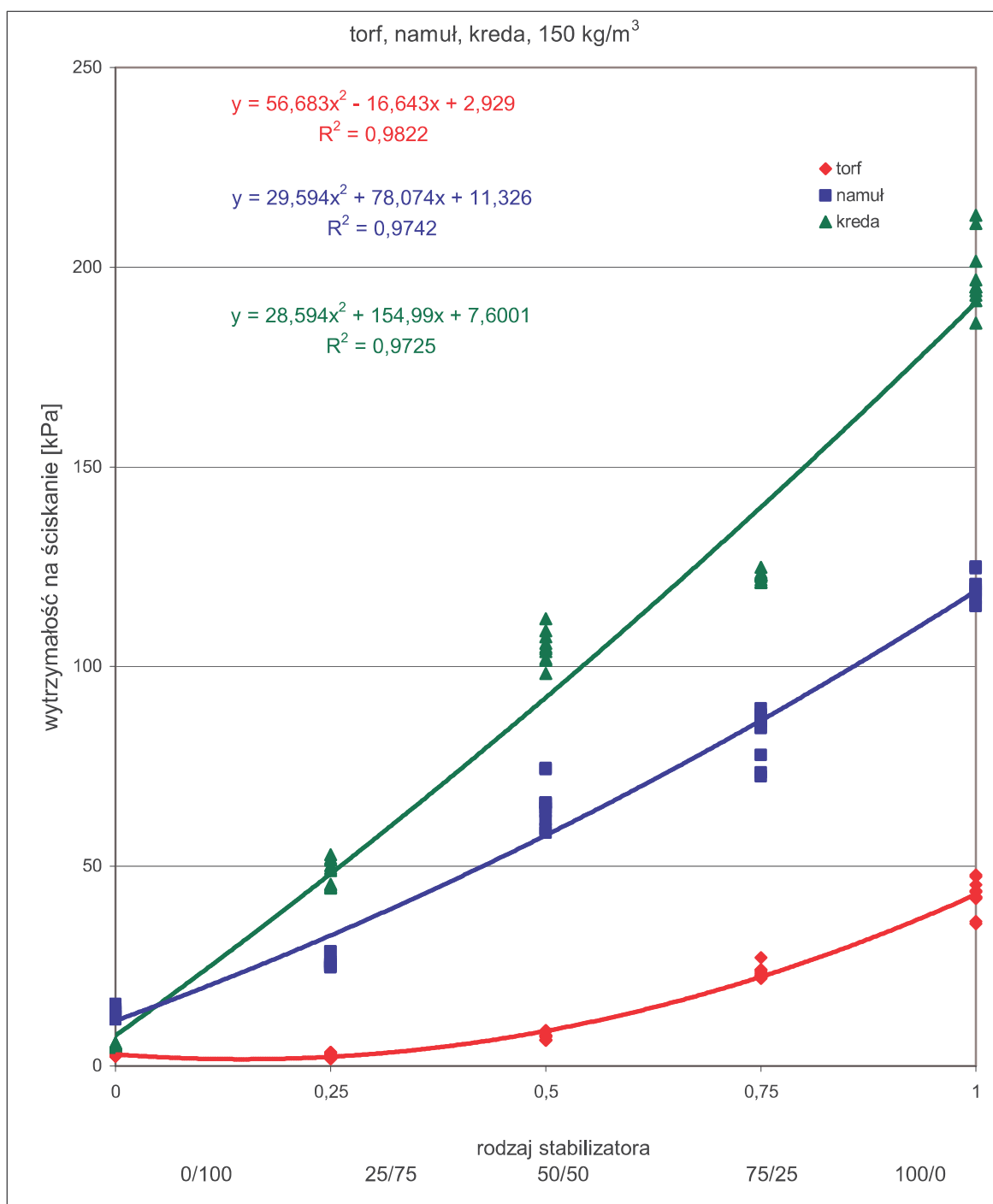
Rys. 6.7 Wzrost wytrzymałości kredy stabilizowanej mieszanką C/P w ilości 150 kg/m³.



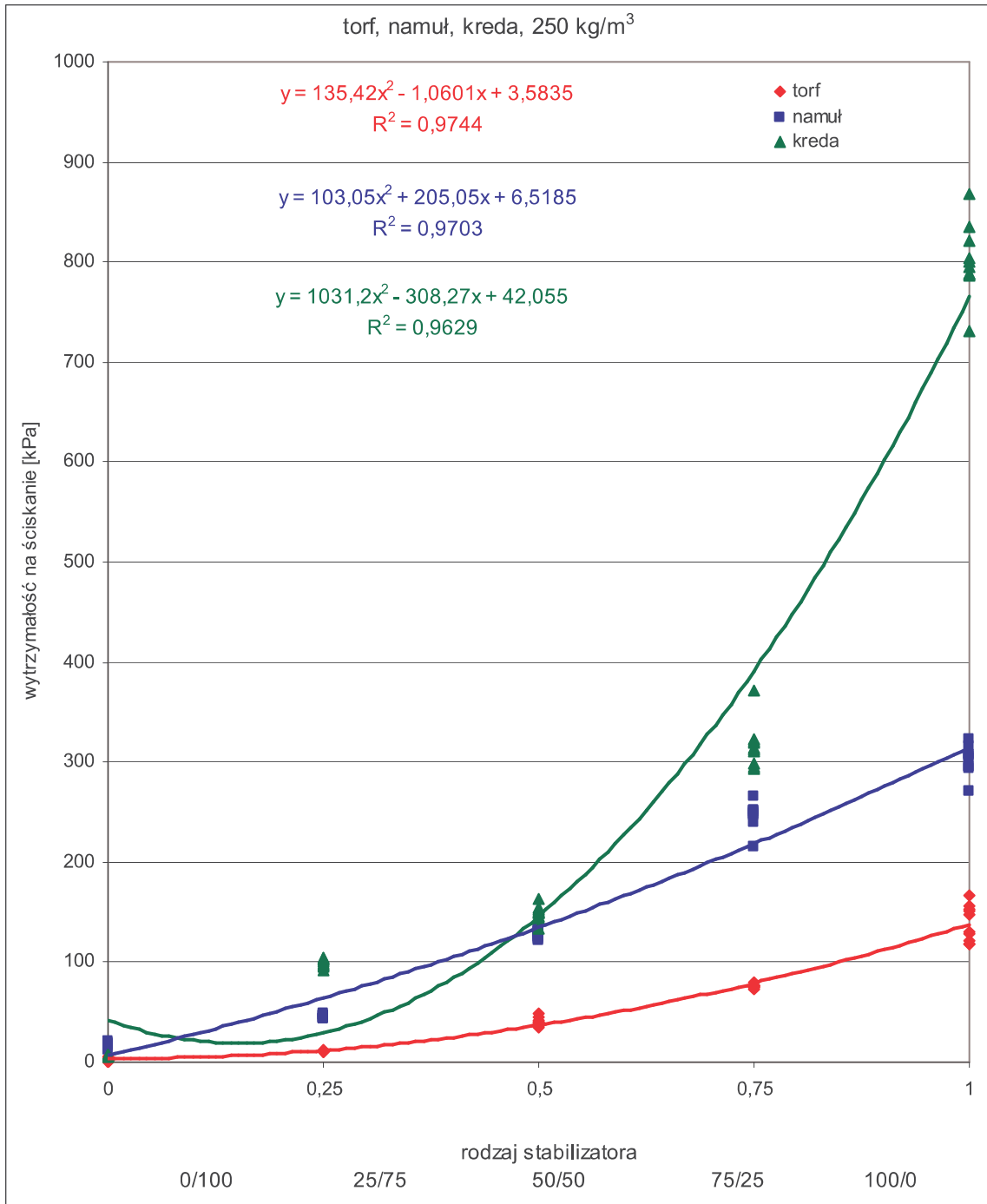
Rys. 6.8 Wzrost wytrzymałości kredy stabilizowanej mieszanką C/P w ilości 250 kg/m³.



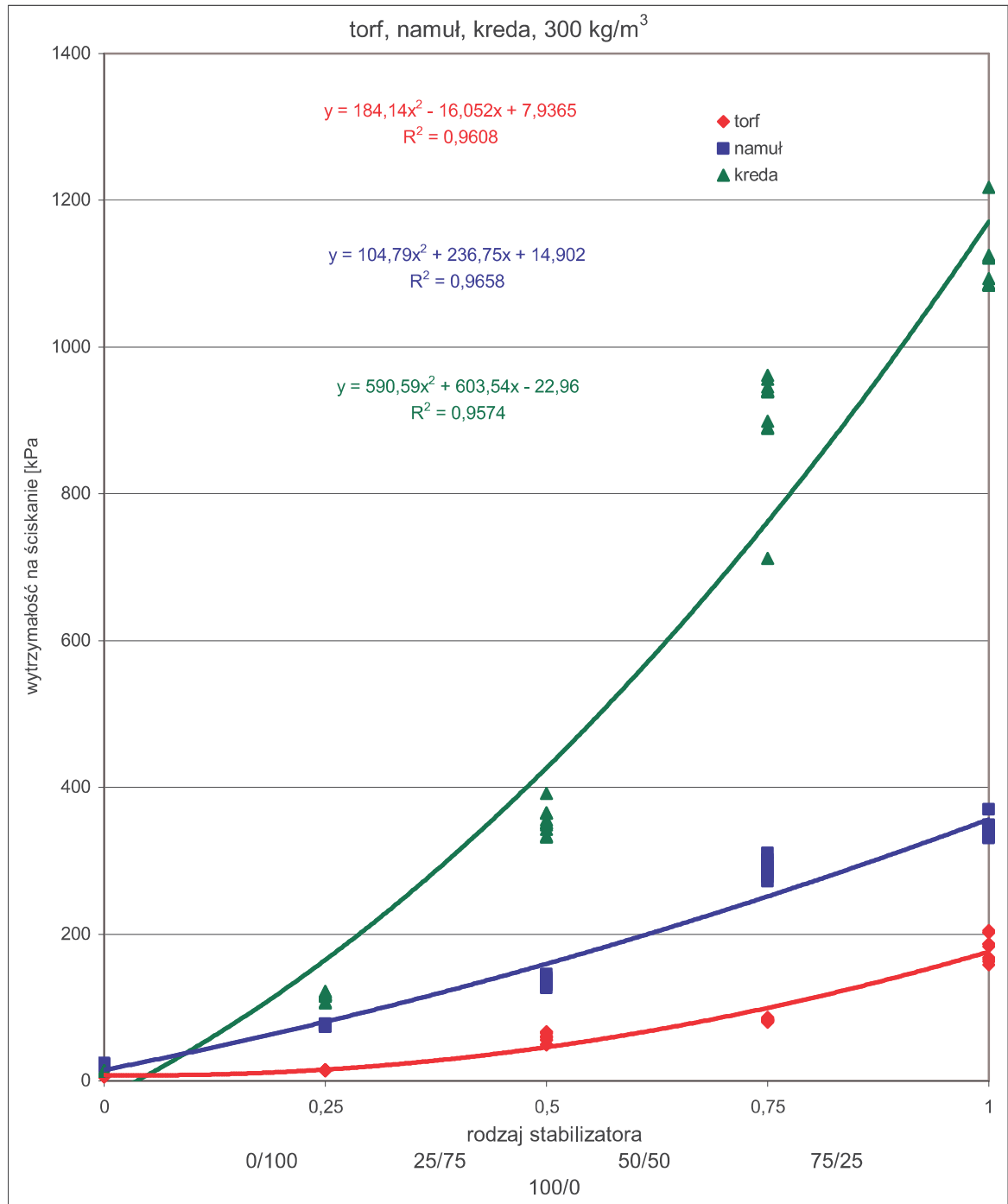
Rys. 6.10 Wzrost wytrzymałości kredy stabilizowanej mieszanką C/P w ilości 300 kg/m³.



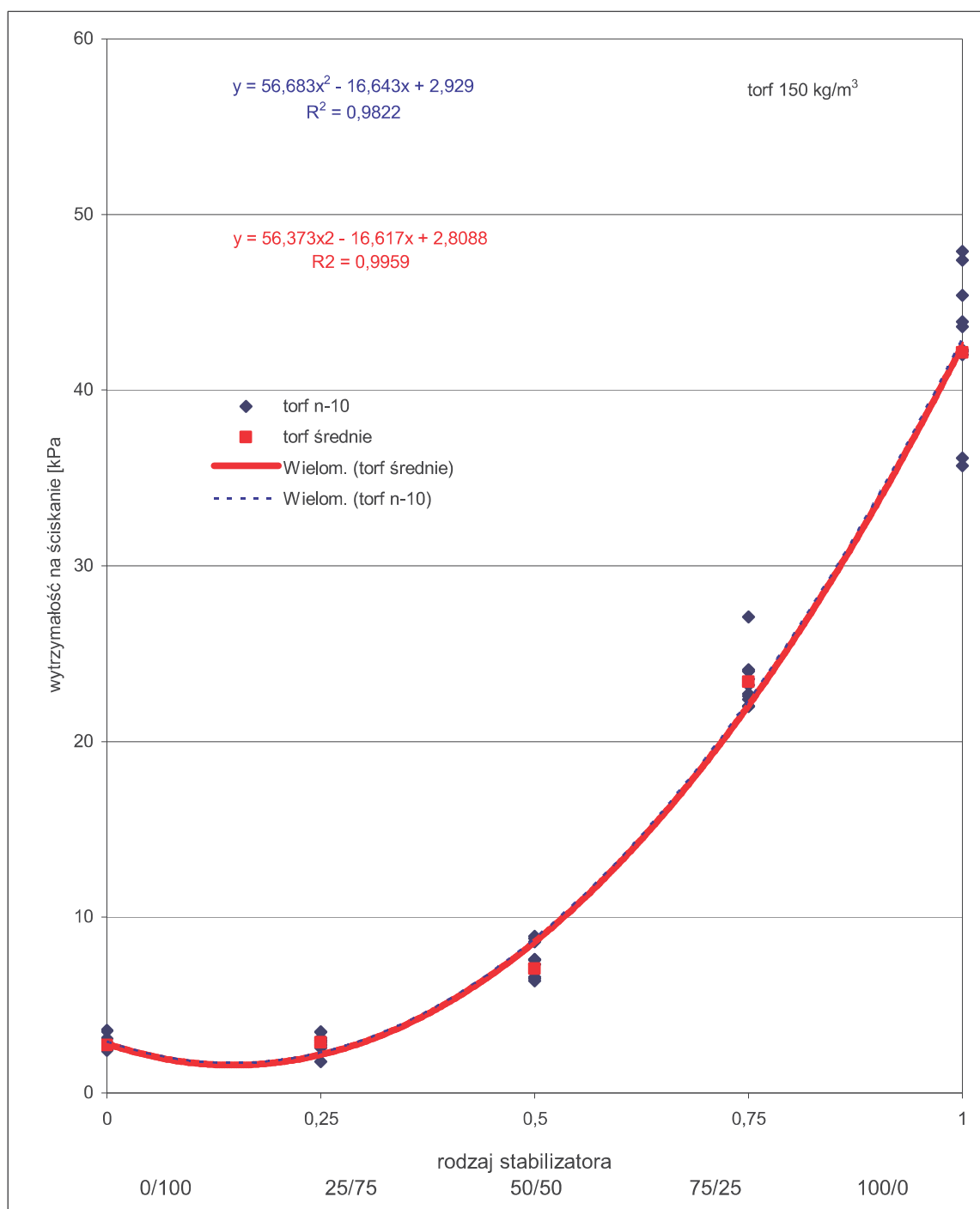
Rys. 6.11 Zestawienie wytrzymałości stabilizowanych gruntów w zależności od rodzaju stabilizatora w ilości 150 kg/m³.



Rys. 6.12 Zestawienie wytrzymałości stabilizowanych gruntów w zależności od rodzaju stabilizatora w ilości 250 kg/m³.



Rys. 6.13 Zestawienie wytrzymałości stabilizowanych gruntów w zależności od rodzaju stabilizatora w ilości 300 kg/m³.



Rys. 6.14 Zestawienie wytrzymałości torfu w zależności od rodzaju stabilizatora w ilości 150 kg/m³.

Wykres rys. 6.14 przedstawia wzrost wytrzymałości torfu w zależności od proporcji składników mieszanki stabilizującej w ilości 150 kg/m³. Na wykresie przedstawiono wartości poszczególnych wyników badań (niebieskie znaczniki) oraz wartości średnie (czerwone znaczniki). Dla poszczególnych wyników sporządzono linie regresji oraz obliczono funkcje regresji (niebieskie i czerwone). Na przedstawionym wykresie krzywe te pokrywają się, funkcje są identyczne, natomiast wartość współczynnika determinacji jest wyższa dla wartości

średnich. Fakt ten wydaje się dość oczywisty i wynika z uśrednienia poszczególnych pomiarów.

Na wykresach 6.12 oraz 6.14 widoczne są ugięcia linii trendu. Ugięcia te nie są związane z fizyczną interpretacją procesów wzmocnienia (miejscowy spadek wytrzymałości na ściskanie), lecz są skutkiem przyjęcia proponowanej przez program komputerowy funkcji aproksymacji.

Wyniki badań wzrostu wytrzymałości na ściskanie zostały zilustrowane w postaci grupy wykresów rys. od 6.15 do 6.17. Wykresy te przedstawiają zmianę wytrzymałości na ściskanie w zależności od ilości stabilizatora na metr sześcienny gruntu, dla poszczególnych proporcji składników mieszanki stabilizującej C/P. Dla lepszego przedstawienia efektu wzmocnienia poszczególnych proporcji jak i również gruntów skala wytrzymałości jest zróżnicowana. Na poszczególnych wykresach przedstawiono linie regresji, pokazano współczynniki determinacji oraz równania regresji. Dla poszczególnych współczynników korelacji obliczono przedziały ufności. Zestawienie wartości przedziałów ufności przedstawiono w tablicach 6.4 do 6.6. Przedziały ufności dla współczynnika korelacji obliczono na poziomie ufności 95 %.

Tablica 6.4 Przedział ufności współczynnika korelacji dla torfu.

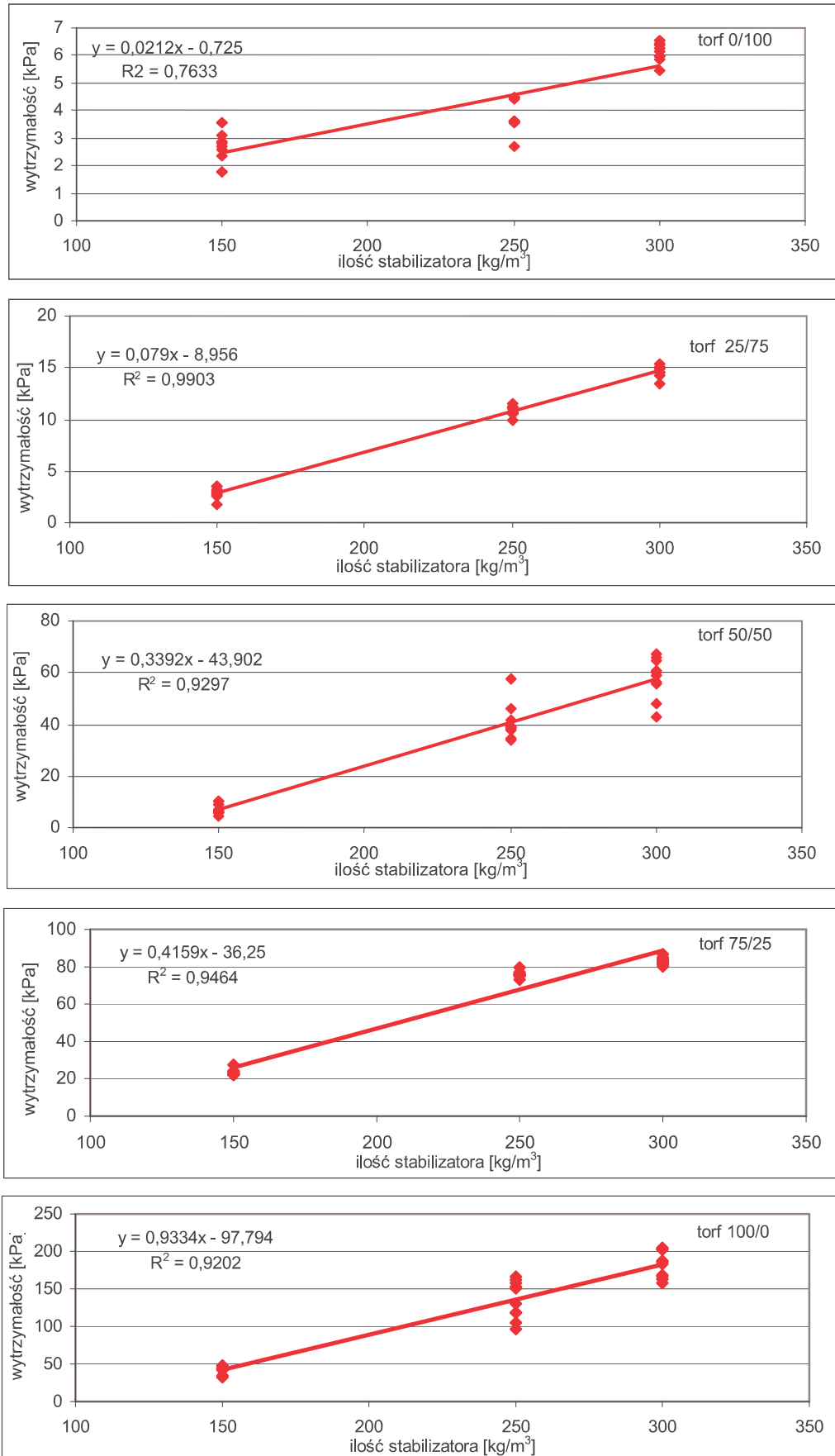
torf	0/100	25/75	50/50	75/25	100/0
liczba prób	30	30	30	30	30
współczynnik korelacji R	0,874	0,995	0,964	0,972	0,959
przedział ufności R ₁	0,72	0,96	0,92	0,95	0,87
przedział ufności R ₂	0,92	0,99	0,99	0,99	0,96

Tablica 6.5 Przedział ufności współczynnika korelacji dla namułu.

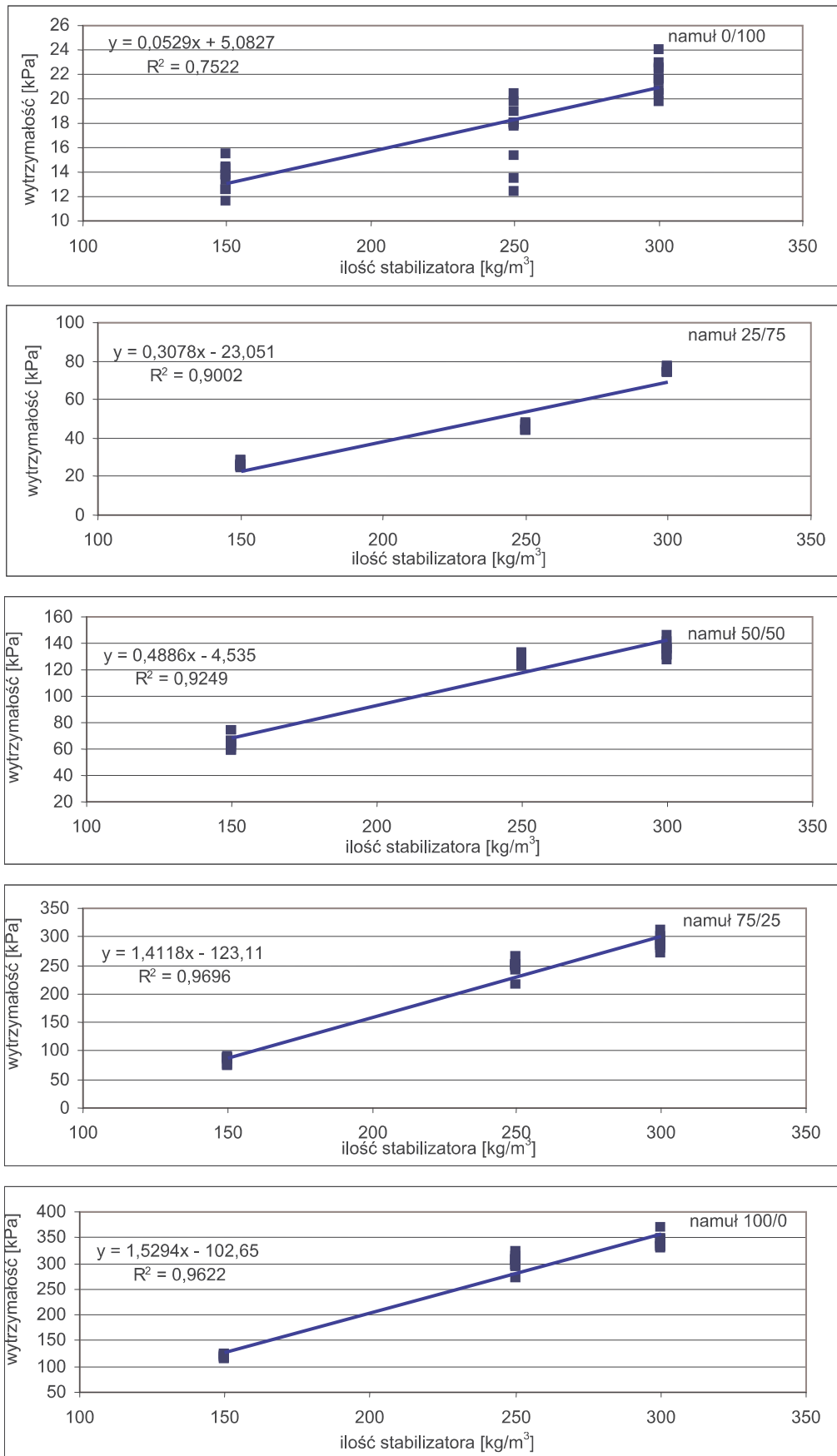
namuł	0/100	25/75	50/50	75/25	100/0
liczba prób	30	30	30	30	30
współczynnik korelacji R	0,867	0,949	0,962	0,985	0,981
przedział ufności R ₁	0,72	0,90	0,92	0,96	0,96
przedział ufności R ₂	0,92	0,98	0,99	0,99	0,99

Tablica 6.6 Przedział ufności współczynnika korelacji dla kredy.

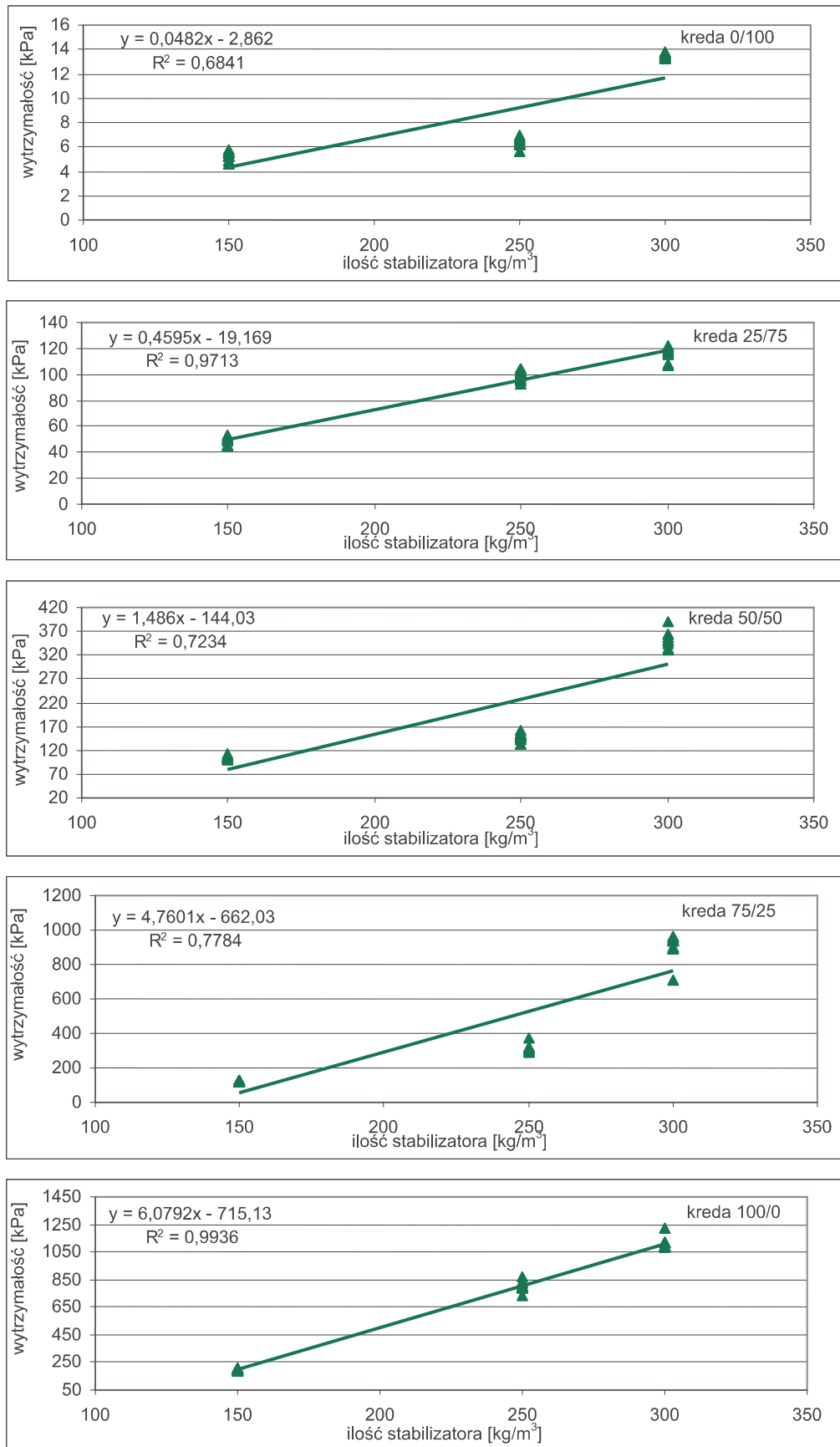
kreda	0/100	25/75	50/50	75/25	100/0
liczba prób	30	30	30	30	30
współczynnik korelacji R	0,827	0,987	0,851	0,882	0,996
przedział ufności R ₁	0,62	0,96	0,72	0,73	0,98
przedział ufności R ₂	0,92	0,99	0,92	0,93	0,99



Rys. 6.15 Zestawienie wytrzymałości na ściskanie torfu w zależności od ilości stabilizatora na metr sześcienny gruntu, dla poszczególnych proporcji mieszanki stabilizującej C/P.



Rys. 6.16 Zestawienie wytrzymałości na ściskanie namułu w zależności od ilości stabilizatora na metr sześcienny gruntu, dla poszczególnych proporcji mieszanki stabilizującej C/P.



Rys. 6.17 Zestawienie wytrzymałości na ściskanie kredy w zależności od ilości stabilizatora na metr sześcienny gruntu, dla poszczególnych proporcji mieszanki stabilizującej C/P.

Wnioski:

Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników badań można sformułować następujące wnioski:

1. Badania laboratoryjne wykazały wzrost wytrzymałości wszystkich badanych gruntów organicznych w zależności od rodzaju i ilości stabilizatora w przeliczeniu na jednostkę objętości gruntu wzmocnianego przy wysokiej wartości współczynnika determinacji ($R^2=0,94 \div 0,97$) w przypadku badanego torfu, ($R^2=0,96 \div 0,97$) w przypadku badanego namułu i ($R^2=0,96 \div 0,97$) w przypadku badanej kredy.
2. Z badań wynika, iż oczekiwaną wartość wytrzymałości na ściskanie rzędu 300 kPa, uzyskano dla namułu przy zastosowaniu cementu bez udziału popiołu w ilości 250 kg/m³, natomiast dla kredy przy zastosowaniu mieszanki C/P 50/50 w ilości 300 kg/m³. Wzmocnienie torfu oraz zastosowanie wyłącznie popiołu nie daje oczekiwanego efektu wzmocnienia.
3. We wszystkich badanych gruntach, przy jednakowej ilości cementu, uzyskano większą wytrzymałość, w przypadku mieszanek cementowo-popiołowych w porównaniu ze stabilizatorem zawierającym wyłącznie cement.
4. Zmiany właściwości fizycznych i mikrostrukturalnych uzasadniają występowaniem procesu wzmocnienia i tak:
 - a. Porównanie zdjęć pod mikroskopem elektronowym badanych gruntów wzmocnionych z gruntami naturalnymi potwierdza powstanie nowych struktur krystalicznych podobnych do struktur tworzących się podczas hydratacji cementu z materiałem mineralnym.
 - b. Analiza derywatogramów wzmocnionej próbki kredy, w której zaobserwowano zmniejszenie kalcytu o około 44 % wagowo, świadczy o tym, że kalcyt utworzył nowy związek krystaliczny trudny do zidentyfikowania na prezentowanym etapie przeprowadzonych badań.
 - c. Zmiana zawartości części organicznych po badaniu w stosunku do zawartości przed badaniem w temperaturze 650⁰ C, prawdopodobnie spowodowane jest spaleniem nowo powstałych form „krystalicznych” lub uwolnieniem wody chemicznie związanej, wody krystalicznej lub wody błonkowej.
 - d. W badanych gruntach wilgotność i gęstość objętościowa odpowiednio malała i rosła zarówno po samym zmieszaniu, (co jest sprawą oczywistą), ale również po 28 dniach dojrzewania. Zmniejszenie wilgotności gruntu po badaniu może świadczyć o związaniu wody higroskopowej lub kapilarnej.

- e. Na podstawie porównania wykresów zawartości części organicznych, w temperaturze spalania 550° C i 650° C, przed badaniem i po badaniu, zaobserwowano wyraźny wzrost ilości części organicznych spalonych w temperaturze 650 °C. Zmiana ta może sugerować spalenie nowo powstałych form „krystalicznych” lub uwolnienie wody chemicznie związanej, wody krystalicznej lub wody błonkowej.
5. Badania edometryczne wykazały, iż grunty stabilizowane zwiększają w sposób istotny swoją sztywność w porównaniu z gruntami naturalnymi, jednak trudne jest ustalenie wpływu rodzaju i ilości stabilizatora na wynik badania.
 6. W celu praktycznego stosowania metody wzmocnienia podłoża **DJM** w każdym przypadku dla każdego rodzaju gruntu występującego w podłożu bezwzględnie konieczne jest wykonanie badań laboratoryjnych mających na celu określenie czy w nominalnym czasie 28 dni, nastąpi wiązanie zastosowanego stabilizatora z badanym gruntem w obecności wody wraz z ustaleniem relacji poszczególnych składników i ilości stabilizatora, zapewniające uzyskanie postulowanej wytrzymałości.
 7. Badania laboratoryjne skuteczności ulepszania gruntu zalegającego w podłożu można prowadzić według procedury zaproponowanej i zastosowanej w niniejszej pracy. Dzięki przeprowadzeniu badań na dużej liczbie próbek i analizie statystycznej, która wykazała małe odchylenia standardowe i bardzo wysoka wartość współczynnika determinacji, dla celów praktycznych można ograniczyć liczbę badań określonej serii próbek tj. od 3 do 5 próbek.
 8. Zastosowanie popiołów lotnych wzmocnienia podłoża gruntowego stanowi istotny krok w kierunku ograniczenia zanieczyszczenia środowiska magazynowaniem tych odpadów.
 9. Na podstawie badań stwierdzono, iż wyniku zastosowania popiołu w połączeniu z cementem uzyskano zamierzony efekt wzmocnienia wyłącznie w przypadku namułu i kredy.

Wykaz literatury.

- [1] Ahnberg H., Holm G., Holmqvist L., Ljungcrantz C.: The use of different additives in deep stabilization of soft soils, XIII CIMSTF, New Delhi, India 1994.
- [2] Ahnberg H. & Holm G.: Stabilization of some Swedish organic soils with different types of binder, Proceedings of the International Conference on Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization, Rotterdam, 1999.
- [3] Ahnberg H. & Holm G.: Stabilization of some Swedish organic soils with different types of binder proceedings of the In, International Conference on Deep Mixing. Stockholm, 2005.
- [4] Anielak A. M.: Chemiczne i fizykochemiczne oczyszczanie ścieków. Wydawnictwo Naukowe PWN Warszawa 2000.
- [5] Bastian S.: Betony konstrukcyjne z popiołem lotnym Arkady, 1980.
- [6] Bredenberg H., Holm G., Broms B. B.: Proceedings of the International Conference on Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization, Rotterdam, 1999.
- [7] Broms B. B.: Stabilization of soft clay with lime and cement columns in Southeast, Proceedings of the International Conference on Engineering Problems of Engineering Soils. Beijing, 1988.
- [8] Broms B. & Boman Per.: Stabilization of soil with lime columns. Department of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology, Second Edition.
- [9] Chida S.: Development of dry jet mixing methods. Public Works Institute, Ministry of Construction, Japan, 1981.
- [10] Cortellazzo G. & Cola S.: Geotechnical characteristics of two Italian peats stabilized with binders. Proceedings of the International Conference on Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization. Rotterdam, 1999.
- [11] Czarnecki L.: Chemia w budownictwie, Arkady, 1996.
- [12] Druss D. L. and Yang D. S.: Keynote lecture; Challenges of employing deep mixing methods in US. Proceedings of the International Conference on Deep Mixing Best Practice and Recent Advances, Stockholm, 2005.
- [13] Esirg M. I.: Keynote lecture: Properties of binders and stabilized soils, Proceedings of the International on Conference Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization, Rotterdam, 1999 r.
- [14] EuroSoilStab: Development of design and construction methods to stabilize soft organic soils, 2004.
- [15] Execution of special geotechnical works. Deep mixing. CEN TC 288 European Standard, 2002.
- [16] Filipiak J.: Wzmacnianie gruntów organicznych mieszanką cementowo-wapienną. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, 2003.
- [17] Giergiczny Z.: Wykorzystanie popiołów podymnicowych do składowisk odpadów komunalnych i rekultywacji terenu. Materiały Konferencyjne. Gospodarcze wykorzystanie popiołów i produktów odsiarczania spalin PZLiTS Kiekrz k/Poznań, 1996.
- [18] Yonekura R., Terashi M. & Shibazaki M.: Grouting and deep mixing, Proceedings of the International Conference on Ground Improvement Geosystems, Tokyo, 1996.
- [19] Hayashi H. & Nishimoto S.: Strength characteristic of stabilized peat using different types of binders. Proceedings of the International Conference on Deep Mixing Best Practice and Recent Advances. Stockholm, 2005.
- [20] Heibib S. & Farrell E. R.: Some experience of stabilising Irish organic soils. Proceedings of the International on Conference Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization, Rotterdam, 1999.

- [21] Hernanders-Martinez F. G. & AL-Tabbaa A.: Strength properties of stabilised peat. Proceedings of the International Conference on Deep Mixing Best Practice and Recent Advances. Stockholm, 2005.
- [22] Holm G.: Keynote lecture; Applications of dry mix methods for deep soil stabilization. Proceedings of the International Conference on Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization. Rotterdam, 1999.
- [23] Jeż J.: Gruntoznawstwo budowlane. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2004.
- [24] Kitazume, M.: Field and laboratory investigations, properties of binders and stabilized soil. Proceedings of the International Conference on Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization. Stockholm, 2005.
- [25] Kokubu M.: Fly Ash and Fly Ash Cement. 5th International Symposium on Cement Chemistry Tokyo, 1968.
- [26] Lahtinen P. & Jyrävä H.: Development of binders for organic soils. Proceedings of the International Conference on Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization, Rotterdam, 1999.
- [27] Marcjoniak R.: Hipotezy Aktywności Pucolanowej. Unia Przedsiębiorstw Ubocznych Produktów Spalania Biuletyn, 2003.
- [28] Materiały 4th International DFI Conference, Balkema, Rotterdam, 1991
- [29] Moseley M. P. & Kirsch K.: Ground Improvement. 2nd edition Spon Press Taylor & Francis Group, 2005.
- [30] Molisz R., Baran L., Werno M.: Posadowienie nasypów na gruntach organicznych metodą wstępnej konsolidacji. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Biblioteka Drogownictwa, Warszawa 1981.
- [31] Myślińska E.: Laboratoryjne badania gruntów. PWN, Warszawa, 1998.
- [32] Myślińska E.: Grunty organiczne i laboratoryjne metody ich badania. PWN, 2001.
- [33] Myszowska A., Szczygielski, T.: Wykorzystanie popiołów z energetyki do rekultywacji Konferencja Naukowo-Techniczna, Mrągowo, 2002.
- [34] Najder T.: Stabilizacja gruntów spoistych i organicznych metodą kolumn wapienno-cementowych. Stabilator, Gdynia, 1996.
- [35] Okumara T.: Deep mixing method in Japan. Proceedings of the 2nd International Conference on Ground Improvement Geosystems, Vol. 2, Tokyo, 1996.
- [36] Pampuch R.: Podstawy inżynierii materiałów ceramicznych, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1971.
- [37] Piecuch T.: Wskazanie możliwości utylizacji pyłów lotnych MEC Kołobrzeg, Zeszyty Naukowe Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska nr 11, Koszalin, 1996 r.
- [38] Piecuch T., Dąbrowski T., Hryniewicz T. Żuchowicki W.: Polish-made pyrolytic convective waste utilizer of WPS type structure. Principle of operation and evaluation. problems of residue management after thermal waste utilization. The Journal of Soil Waste Technology and Management. Volume 26, November, 1999.
- [39] Piecuch T.: Technika Hydroszlamowa. Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej wydanie pierwsze, 1994, wydanie drugie 1999, wydanie trzecie 2004.
- [40] Piecuch T., Rapacz A.: Analiza techniczno-ekonomiczna możliwości uruchomienia produkcji kostek typu POLBRUK przy wykorzystaniu pyłów lotnych MEC Kołobrzeg. Zeszyty Naukowe Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska. Politechniki Koszalińskiej. Seria Inżynieria Środowiska, Nr 11, 1996.
- [41] Piecuch T. Anielak A., Radzikowski W., Barańska A.: Ochrona Powietrza. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 1981.
- [42] Piecuch T., Janus R.: Opracowanie ofertowe dla Zakładu Chemicznego POLICE. Politechnika Koszalińska, 1992.
- [43] Piecuch T.: The Pirolitye Convective Waste Utilizer. Environmental Science Research-Volume 58/2000, Kluwer Academic, Plenum Publisher New York, NY 10013.

- [44] Piecuch T.: Utylizacja Odpadów Przemysłowych., Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej; wydanie pierwsze 1996, wydanie drugie, 2000.
- [45] Peukert S.: Cementy powszechnego użytku i specjalne, Polski Cement, Kraków, 2000.
- [46] Pisarczyk S.: Grunty nasypowe Właściwości geotechniczne i metody ich badania. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2004.
- [47] Pisarczyk S.: Gruntoznawstwo inżynierskie. Wydawnictwo Naukowe PWN, 2001.
- [48] Pousette K., Macsik J. & Jacobsson A.: Peat soil samples in laboratory-Experiences from manufacturing and testing, Proceedings of the International Conference on Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization, Rotterdam 1999.
- [49] Probaha A., Zen K., and Kobayashi M.: Deep mixing technology for liquefaction mitigation. Journal of Infrastructure Systems, ASCE, Vol. 5. No. 1, 1999.
- [50] Sandors C. and Holm G.: Deep stabilization with the wet cement mixing method. Proceedings of the 12th Nordic Geotechnical Conference, Reykjavik, 1996.
- [51] Stanisław A.: Przystępny kurs statystyki, 1998.
- [52] Werno M.: Opracowanie podstaw stosowania technologii wzmacniania gruntu za pomocą kolumn cementowo-wapiennych dla potrzeb budownictwa drogowego, Wydawnictwa wewnętrzne Instytutu Morskiego, Gdańsk, 1999.
- [53] Werno M., Inerowicz M., Juskiewicz-Bednarczyk B.: Deep Stabilization of Sandfill in Organic Subsoil. Proceedings of the International Conference on Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization. Stockholm, 1999.
- [54] Wiłun Z.: Zarys Geotechniki Wydawnictwo Komunikacji i Łączności 2000.
- [55] Wolska-Kotańska Cz.: Wpływ popiołów lotnych na efekty cieplne w procesie hydratacji cementu. ITB Warszawa.
- [56] Wyrwicki R.: Analiza Derywatograficzna Skał Ilastych. Wydawnictwo Uniwersytetu Warszawskiego, 1988.
- [57] Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej. Quant B., Budownictwo Wodne nr 44, 1997.
- [58] Zieliński R. Tablice Statystyczne, wydanie 2 zmienione, PWN, Warszawa. 1997.
- [59] Żurek-Pysz U.: Trójosiowe badanie wytrzymałości kredy jeziornej i gytii. Materiały Krajowej Konferencji Mechaniki Gruntów i Fundamentowania Wrocław, 1987.
- [60] Norma PN-88/B-04481 Grunty budowlane. Badania próbek gruntu.
- [61] Norma PN-86/B-02480 Grunty budowlane Określenia, symbole, podział i opis gruntów.
- [62] Norma PN-85/G-02500 Torf. Genetyczny podział surowca.
- [63] Norma BN-79/6732.09 Popioły Lotne.
- [64] Mapa topograficzna, arkusz Koszalin w skali 1:10000.
- [65] Mapa topograficzna, arkusz Szczecinek w skali 1:10000
- [66] Geologische Karte von Preußen und benachbarten Bundesstaaten. arkusz Köslin w skali 1:25000, Keilhack K., 1889.
- [67] Geologische Karte von Preußen und benachbarten Bundesstaaten. Arkusz Neustettin w skali 1:25000, Leitung Beyschlag F.
- [68] Broszura reklamowa firmy STABILATOR – Gdynia.
- [69] strony internetowe firmy: WWW.STABILATOR.com.pl
- [70] strony internetowe firmy: WWW.HAYWARDBAKER.com
- [71] strony internetowe firmy: WWW.WYKIPEDIA.org.pl